

" using Fuzzy aggregation operators with Type-2 Fuzzy Model Predictive Control "

Dr. Bassam Mohammad*
Monaf Solieman**

(Received 28 / 10 / 2018. Accepted 10 / 2 / 2019)

□ ABSTRACT □

The purpose of this paper is to control a nonlinear system presented by a Singleton Fuzzy Model by using Fuzzy Predictive Control where the predictive control is combined with Fuzzy Decision Making. We use the Fuzzy Model to predict future behavior of the system, and we use Fuzzy Decision Making to select the best sequence of control commands. We represent goals and constraints by using fuzzy objective functions and we aggregate them by using aggregation operators, then we can find the best control commands that satisfies all goals and constraints in the system. We compare the performance of the Type-1 Fuzzy Predictive Controller with the Type-2 Fuzzy Predictive Controller with different aggregation operators, we simulate this system using Matlab and Simulink, and we find from results that the performance of Type-2 Fuzzy Predictive Controller is better than Type-1 Fuzzy Predictive Controller with all aggregation operators we use.

Key Words: Singleton Fuzzy Model, Predictive Control, Fuzzy Decision Making, fuzzy goals, fuzzy constraints.

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

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

استخدام طرق الدمج العائمة في التحكم التنبئي العائم من النمط الثاني

الدكتور بسام محمد*

مناف سليمان**

تاريخ الإيداع 28 / 10 / 2018. قُبِلَ للنشر في 10 / 2 / 2019

□ ملخص □

تمّ في هذا البحث تمّ تطبيق التحكم بنظام غير خطي معبر عنه بنموذج عائم مفرد Singleton باستخدام التحكم التنبئي العائم الذي يدمج مفاهيم التحكم التنبئي مع نظرية اتخاذ القرار العائم، تسمح هذه الطريقة باستخدام النموذج العائم للنظام للتنبؤ بتصرف النظام المستقبلي، وباستخدام اتخاذ القرار العائم نقوم بتحديد التسلسل الأفضل لأوامر المتحكم التي ستطبق على دخل النظام. وذلك من خلال التعبير عن أهداف وقيود النظام باستخدام توابع انتماء عائمة من النمط الأول والثاني، وباستخدام توابع ربط عائمة لدمج هذه الأهداف والقيود بطريقة تضمن تحقيقها جميعاً بدرجة مرضية. كما تمّ مقارنة أداء المتحكم التنبئي العائم من النمط الأول بأداء المتحكم التنبئي العائم من النمط الثاني وذلك لأكثر من عملية دمج عائمة، وتمت المحاكاة على الحاسب باستخدام البيئة البرمجية Matlab and Simulink، وبملاحظة النتائج تبين أن متحكم النمط الثاني يتفوق على متحكم النمط الأول من أجل جميع طرق الدمج المستخدمة.

الكلمات المفتاحية: النموذج العائم المفرد- التحكم التنبئي- اتخاذ القرار العائم- الأهداف العائمة- القيود العائمة.

* أستاذ مساعد - قسم الحواسيب والأتمتة - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق - دمشق - سوريا
** طالب دكتوراه - قسم الحواسيب والأتمتة - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق - دمشق - سوريا

مقدمة :

تعدّ عملية المراقبة والتحكم بالنظم الغامضة Uncertainty أو الغير محددة بدقة من العمليات الصعبة والمهمة في الحياة العملية. حيث تنتج عدم الدقة بشكل عام من الفهم الغير الكامل لتصرف النظام والذي يكون غالباً نظاماً غير خطياً وموزعاً، كما تنتج من عدم القدرة على قياس المتغيرات الأساسية للنظام بشكل دقيق وذلك إما بسبب التكلفة الاقتصادية العالية أو بسبب ظروف تشغيلية متعلقة ببيئة العمل، وبالتالي فإن التوصيف الغير دقيق للنظام يؤدي للحصول على نموذج غير دقيق أيضاً [1]، وفي مثل هذه الظروف تُستخدم النماذج العائمة Fuzzy Model للتعبير عن النظام، وتلعب الخبرة المكتسبة وطريقة الاستدلال المنطقي عند الخبير دوراً أساسياً في تصميم نظام التحكم [2]. ويمكننا القول أنه باستخدام المعرفة البشرية نستطيع التحكم بالنظم المعقدة والغير خطية والمبهمه وبشروط وقيود تشغيلية مختلفة، بينما المتحكمات الخطية التقليدية تفشل في مثل هذه الظروف، وتعد تقنيات التحكم العائم من أشهر التقنيات التي تستطيع ترجمة الخبرة البشرية إلى مجال التحكم.

تم مؤخراً التركيز على تقنيات التحكم العائم من قبل الباحثين في مجال التحكم وتم استخدامه تقريباً في جميع المجالات، وفي العديد من التطبيقات الصناعية وأول تطبيق صناعي نُفذ بشكل عملي قامت بتطويره شركتنا اسمنت دنماركيتان للتحكم بالأفران وطبق عام 1982 [3]. ثم تولى اليابانيون المهمة وقاموا بتطوير وتنفيذ العديد من التطبيقات العائمة الناجحة بما بات يعرف لاحقاً باليابان بالانفجار العائم Fuzzy Boom [4]، إلى أن شمل حالياً كل المجالات حتى شركات الطيران ووكالات الفضاء. ومن التقنيات العائمة الحديثة التي تحظى مؤخراً باهتمام متزايد تقنية اتخاذ القرار العائم (Fuzzy Decision Making (FDM) والتي يتم دمجها مع تقنيات التحكم التقليدية مثل التحكم التنبئي للحصول على طريقة جديدة وفعالة تسمى التحكم التنبئي العائم (Fuzzy Model Predictive Control (FMPC وهي قادرة على التعامل مع حالات عدم الدقة والغموض في النظم المراد التحكم بها [5]. إن استخدام اتخاذ القرار العائم FDM يساهم في حل العديد من مشاكل التحكم التنبئي، مثل حالات اللاخطية في النظم وحالات الغموض الناتجة عن عدم دقة القياسات مثلاً، كما تساعد على التعبير بشكل أكثر دقة عن أهداف وقيود النظام [6]، كما تتجنب مشكلة اختيار الأوزان في تابع الكلفة cost function الموجودة في التحكم التنبئي التقليدي.

لقد تم استخدام التحكم التنبئي العائم FMPC في العديد من المجالات بدءاً بعمليات التحكم بالعملية Process Control [7] والتحكم بمحطات الطاقة الشمسية [8] وفي قيادة المحركات التحريضية [9]. وفي هذه الدراسة سنقوم بتطبيق FMPC من النمط الأول والثاني باستخدام عدة طرق لدمج المجموعات العائمة للتحكم بنظام غير خطي معبر عنه بنموذج عائم مفرد Singleton وهو يعبر عن نظام تهوية وتكييف لمبنى كامل، ثم سنقوم بمقارنة النتائج بين متحكم النمط الأول ومتحكم النمط الثاني باستخدام ثلاث طرق مختلفة لدمج المجموعات العائمة، وذلك بإجراء عملية نمذجة على الحاسب باستخدام بيئة Matlab and Simulink.

أهمية البحث وأهدافه :

تأتي أهمية البحث من أهمية التحكم بالنظم غير الخطية والتي تحوي على الكثير من عدم التأكيد في متغيرات النظام Uncertainty، وهذه المتغيرات يتم التعبير عنها باستخدام نماذج عائمة. كما تكمن أهمية البحث في أهمية تطبيق التحكم التنبئي بشكل عام فهو يعد من أكثر التقنيات المستخدمة عملياً بسبب دقته وكفاءته العالية، كما أن دمجها مع التقنيات العائمة يعطينا أداءً أفضل.

وبناءً على ذلك فإنَّ الهدف من هذا البحث هو تصميم متحكم تنبئي عائم FMPC من النمط الأول والثاني للتحكم بنظام غير خطي ممثل بنموذج عائم مفرد (نظام تهوية وتكييف لمبنى)، ومقارنة أداء المتحكم التنبئي العائم من النمط الأول مع متحكم النمط الثاني، كما ستتم مقارنة طرق الربط المختلفة وتأثيرها على الأداء.

منهجية البحث:

لقد أنجز هذا البحث اعتماداً على دراسة العديد من البحوث المنجزة في هذا المجال والتوقف عند نتائجها و توصياتها ، وتم الاعتماد على البيئة البرمجية Matlab and Simulink في وضع النماذج الرياضية وتمثيل النموذج العائم وتصميم المتحكم التنبئي العائم واستخلاص النتائج .

● النموذج العائم Fuzzy Model:

بشكل عام فإنه في التحكم باستخدام نموذج النظام Model-Based Control يقوم المتحكم بحساب الأوامر التحكمية بناءً على نموذج الجملة. وتعد النمذجة العائمة من أكثر التقنيات المستخدمة لنمذجة النظم وخاصة في حالة كانت العملية غير خطية وكان النموذج الرياضي غير موجود، أو عندما نفهم كيفية عمل النظام بشكل عام. ويمكننا الحصول على القواعد العائمة التي تصف النموذج العائم من خلال معرفة الخبراء، أو نقوم بتخمينها عن طريق بيانات القياس التي نحصل عليها من النظام نفسه أو من خلال نموذج مشابه له نقوم بمحاكاته على الحاسب. وبشكل عام فإنَّ النموذج العائم يقدم تمثيلاً أكثر واقعية للنظام فهو يعطي شرحاً لغوياً للنظام من خلال القواعد المنظمة لعملية التابع [10].

وأشهر نوعين للنماذج العائمة هما النموذج اللغوي أو نموذج mamdani [11]، والتي تعطى قواعده بالشكل المبين بالمعادلة (1)، والنموذج العلائقي أو نموذج Takagi-Sugeno (TS) [12]، والتي تعطى قواعده بالشكل المبين بالمعادلة (2). حيث أن K تمثل عدد القواعد الكلي و R^k تمثل القاعدة رقم k ، و x تمثل دخل النظام العائم و y تمثل الخرج، وكل من A^k و B^k هي مجموعات عائمة يعبر عنها بتتابع انتماء على الشكل التالي $X \rightarrow [0,1]$ و $\mu_{A^k}(x)$ و $Y \rightarrow [0,1]$ و $\mu_{B^k}(y)$ على الترتيب، ونلاحظ في المعادلة (2) الحد f^k والذي يعني أن لكل قاعدة هناك تابع خرج مختلف.

$$R^k: IF x \text{ is } A^k \text{ then } y \text{ is } B^k , \quad k = 1,2, \dots \dots K \quad (1)$$

$$R^k: IF x \text{ is } A^k \text{ then } y^k = f^k(x) , \quad k = 1,2, \dots \dots K \quad (2)$$

سنركز بدراستنا على النموذج العائم المفرد Singlton والذي يمكن اعتباره حالة خاصة من نموذج mamdani، حيث أن قواعده تكون من الشكل المبين بالمعادلة (3)، ونلاحظ هنا أن y أصبحت ذات بعد وحيد، حيث أن c^k تمثل أعداد حقيقية.

$$R^k: IF x \text{ is } A^k \text{ then } y = c^k , \quad k = 1,2, \dots \dots K \quad (3)$$

ولحساب خرج هذا النموذج يجب أن نذكر عدد من التعاريف، مثل درجة استيفاء الشروط β^k والتي تحسب لكل قاعدة باستخدام العلاقة (4)، حيث أن \wedge هي عملية إيجاد أصغر قيمة min operation. أما عملية فك التعميم defuzzification في نموذج mamdani والتي تسمى مركز النقل center-of-gravity COG فتتخفف إلى طريقة المتوسط العائم fuzzy mean في حالة النموذج المفرد كما نرى بالعلاقة (5) والتي تبين أن عملية فك التعميم تعتمد على عدد القواعد K .

$$\beta^k = \mu_{A_1^k}(x_1) \wedge \mu_{A_2^k}(x_2) \wedge \dots \dots \wedge \mu_{A_n^k}(x_n) , \quad k = 1,2, \dots \dots K \quad (4)$$

$$y = \sum_{k=1}^K \frac{\beta^k}{\sum_{j=1}^K \beta^j} c^k \quad (5)$$

وبالتالي لن يتم استخدام عملية تعريف النموذج العائم identification، حيث سنستخدم نموذجاً عائماً مفرداً معرفاً باستخدام ستة عشر قاعدة من الشكل المبين بالمعادلة (3)، بالإضافة إلى توابع الانتماء التي تمثل دخل النظام.

• اتخاذ القرار العائم (FDM):

تأتي المهارة في كثير من الأحيان عندما يتم اتخاذ القرارات المهمة في ظل ظروف معقدة من عدم الدقة والغموض والحاجة لمراعات أهداف وقيود النظام والتي غالباً ما تكون غير محددة بدقة، وعلى سبيل المثال فإن أحد الأهداف الذي يتواجد في أغلب أنظمة التحكم هو محاولة الوصول بالخرج إلى القيمة المرجعية وبالتالي يكون الهدف هو تصغير الخطأ بين الخرج الفعلي والاشارة المرجعية لأقل قيمة ممكنة وبسرعة مناسبة، أما بالنسبة للقيود الفيزيائية للنظم مثل أكبر استطاعة يمكن تقديمها لمحرك أو المقدار الذي يمكننا فيه فتح صمام (ففي حالة الصمام يمكننا تمثيل معدل فتحة الصمام بين الصفر (الإغلاق) وبين الواحد (الفتح الكلي)).

تمثل عملية اتخاذ القرار عملية اختيار أحد الحلول من بين عدد من الخيارات (A) Alternatives، وهذه البدائل على سبيل المثال قد تكون اختيار حاسب من قائمة من أجهزة الحواسيب المعروضة للبيع وكل جهاز معرف بمجموعة من الخصائص attributes مثل سرعة المعالج والسعر وعمر البطارية حجم الذاكرة وخصائص أخرى، وبالتالي فإن عملية اتخاذ القرار (شراء حاسب) تتحدد بمدى ملائمة البدائل للخصائص التي يرغب بها الزبون، فهو سيختار الجهاز الذي يلائم الخصائص المطلوبة بنسبة أكبر من غيره. ويمكننا تعريف الـ FDM أي اتخاذ القرار في البيئة العائمة على أنه اتخاذ القرار عندما تكون قيود وأهداف النظام ذات طبيعة عائمة وذلك بغض النظر إذا كان النظام عائماً أم لا [13]، والمقصود بالأهداف العائمة مثلاً أن نقوم بتمثيل الهدف (تصغير الخطأ) ضمن مجموعة عائمة Fuzzy Set.

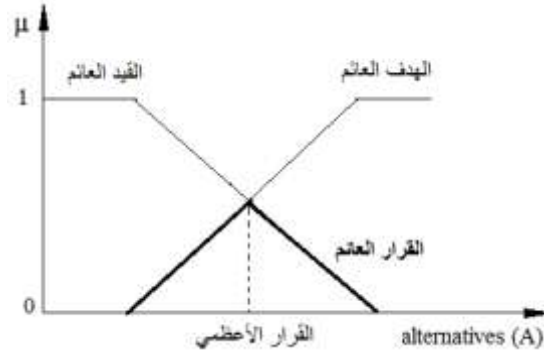
ويمكننا تعريف الهدف العائم على الشكل التالي: وإذا اعتبرنا A هي مجموعة البدائل المحتملة والتي تحوي على الحل لمسألة اتخاذ القرار. G عبارة عن الهدف العائم وهو مجموعة عائمة معروفة باستخدام تابع الانتماء التالي $\mu_G : A \rightarrow [0,1]$ وهذا التابع يمثل الدرجة التي تحقق بها البدائل الهدف المحدد. كما يمكن تعريف القيد العائم بالشكل التالي: نفترض أن C يمثل القيد العائم وهو مجموعة عائمة معرفة بتابع الانتماء التالي $\mu_C : A \rightarrow [0,1]$ وبالتالي يكون القرار العائم D هو ناتج تقاطع مجموعة الأهداف ومجموعة القيود العائمتين ويمكن تمثيل القرار العائم باستخدام تابع انتماء كما في المعادلة (6).

$$\mu_D(u) = \mu_G(u) \wedge \mu_C(u) \quad u \in A \quad (6)$$

وكما ذكرنا سابقاً فإن \wedge ترمز إلى عملية إيجاد القيمة الصغرى min operation. ولإيجاد القرار الأمثل u^* في عملية اتخاذ القرار العائم يجب البحث عن القرار صاحب أكبر قيمة لتابع الانتماء ويسمى أيضاً القرار الأعظمي Maximizing Decision وهو معرف بالمعادلة (7) [10].

$$u^* = \arg \max_{u \in A} \mu_G(u) \wedge \mu_C(u) \quad (7)$$

واضح أنه لا يوجد فرق بين الأهداف والقيود في المعادلة السابقة، فكل الأهداف والقيود ممثلة بتوابع انتماء ضمن مجموعة البدائل المتاحة، وتابع القرار (التقاطع في هذه الحالة) يعطي عملية ربط aggregation operation ملائمة بين الأهداف والقيود. ويسمى هذا النموذج بالتماثلي بسبب التماثل بين القيود والأهداف في النموذج، كما هو موضح بالشكل (1) حيث يتم تمثيل الأهداف والقيود كمجموعات عائمة، والقرار بالتالي يرضي كل من الأهداف والقيود بدرجة معينة.



الشكل (1) القرار العائم الناتج عن تقاطع الهدف والقيود العائمين.

• اتخاذ القرار متعدد الخصائص (MADM) Multi-attribute decision-making:

تهتم نظرية اتخاذ القرار العائم المتعدد الخصائص MADM باختيار البدائل من مجموعة منتهية وقابلة للعد مع الأخذ بعين الاعتبار عدد من المعايير criteria الهامة، وفي مجال التحكم تكون هذه المعايير هي أهداف وقيود النظام. وتقسّم MADM إلى مرحلتين [1] ، مرحلة التقييم Rating و مرحلة الترتيب Ranking.

في بمرحلة التقييم Rating نقوم بإعطاء قيم لكل بديل من البدائل حسب درجة ملائمته للمعايير، وهذه المعايير (الأهداف والقيود) 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 وتسمى عمليات الربط، وسنركز في هذا البحث على عمليات الربط المثلثية (t-norm) Triangular norm لأنها الأكثر استخداماً في التحكم التنبئي. وسنذكر منها ثلاث عمليات وهي المستخدمة في بحثنا هذا ومبينة بالمعادلات (8) و(9) و(10) [14]. حيث T ترمز لعملية الربط المثلثية بين تابعي انتماء عائمين وهذه التوابع تعبر عن الأهداف والقيود العائمة للنظام، ويمكننا تعديل المعادلات لتلائم عدد أكبر من القيود والأهداف.

○ عملية الجداء product operator

$$T_P(\mu_1, \mu_2) = \mu_1 \cdot \mu_2 \quad (8)$$

○ عملية ربط Hamacher

$$T_H(\mu_1, \mu_2) = \frac{1}{1 + \frac{1 - \mu_1}{\mu_1} + \frac{1 - \mu_2}{\mu_2}} \quad (9)$$

○ عملية ربط Dombi

$$T_D(\mu_1, \mu_2) = \frac{1}{1 + \sqrt[\gamma]{\left(\frac{1 - \mu_1}{\mu_1}\right)^\gamma + \left(\frac{1 - \mu_2}{\mu_2}\right)^\gamma}}, \gamma > 0 \quad (10)$$

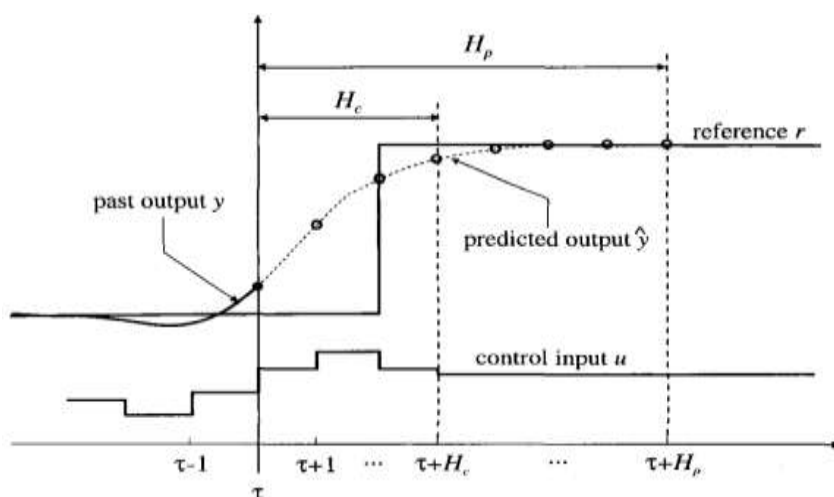
أما مرحلة الترتيب Ranking فهي تهتم بترتيب البدائل بحسب تقييمها الناتج عن عملية التقييم، وفي حال كان خرج مرحلة التقييم قيمة حدية crisp يكون ترتيب البدائل ترتيباً عددياً مسألة بسيطة، وإلا سنحتاج لعمليات ترتيب عائمة، وفي هذا البحث لا نحتاج لعمليات الترتيب العائمة باعتبار أن مرحلة التقييم هي عبارة عن قيم حدية.

• التحكم التنبئي (MPC) Model Predictive Control:

يستخدم التحكم التنبئي MPC نموذج النظام المراد التحكم به بالإضافة إلى القياسات الحالية للعملية من أجل حساب التصرف المستقبلي لخرج المتحكم من أجل العينة التالية، ويتم حساب أوامر المتحكم المستقبلية المثالية

$\{u(\tau), \dots, u(\tau + H_c)\}$ ، حيث أن الأمثلة في قانون التحكم تعني أن المتحكم قادر على دفع الجملة لأفضل استجابة ممكنة بأقل استهلاك لموارد المتحكم. وهذا الأمر يعبر عنه بالكلفة، فحتى نحصل على أمر تحكم مثالي يجب أن نقلل كلفة تنفيذ هذا الأمر، مع المحافظة على الأداء. لذلك فإن المتحكم التنبئي يقوم بتصغير تابع كلفة cost function للحصول على أوامر التحكم المثالية، ويجب الانتباه إلى أن توابع الكلفة من أهم العناصر التي تؤثر على تعقيد نظام التحكم وحساباته، لذلك يجب اختيارها بشكل مناسب لضمان الحصول على متحكم ذي أداء قوي مع المحافظة على أدنى كلفة ممكنة وأداء قوي [15].

يوضح الشكل (2) [16] طريقة عمل المتحكم التنبئي، حيث H_p تمثل أفق التنبؤ prediction horizon (أي عدد العينات المستقبلية للخروج التي سنتبأ 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 بتثبيت آخر قيمة للدخل كما هو موضح بالشكل (2).



الشكل (2) التحكم التنبئي MPC.

• التحكم التنبئي العائم من النمط الأول Type-1 Fuzzy Model Predictive Control (T1FMPC):

نحصل على التحكم التنبئي العائم FMPC عند استخدام FDM مع التحكم التنبئي، وكما ذكرنا سابقاً بوجود FDM يتم استخدام أهداف وقيود عائمة للنظام، ويمكننا أن نذكر شكلين من أشكال التحكم التنبئي العائم، الأول أن نقوم بتصميم المتحكم بناءً على أهداف وقيود عائمة ولكننا نستخدم نموذج رياضي تقليدي للتنبؤ بخروج النظام، والثاني نقوم بتصميم المتحكم بناءً على أهداف وقيود عائمة، لكن النموذج الرياضي الذي نستخدمه للتنبؤ بخروج النظام هو نموذج عائم أيضاً لكن خرج حدي [1]، وهذه هي الحالة التي سنقوم بدراستها في هذا البحث.

يعد التحكم التنبئي العائم FMPC تطبيقاً عملياً على مسألة اتخاذ القرار متعدد المراحل multi stage decision making ، حيث البدائل تمثل قيم الدخل الممكنة، ومعيار اتخاذ القرار يكون معياراً تحكيمياً متعلقاً بالأداء، ومرحلة اتخاذ القرار تتعلق بأفق التنبؤ فكل عينة أو لحظة مستقبلية يمكننا اعتبارها مرحلة في عملية اتخاذ القرار فقرارنا هنا مبني على الملائمة بين جميع اللحظات المستقبلية. وهنا يجب إجراء أو إضافة بعض التعديلات على مسألة اتخاذ القرار المتعدد المراحل حيث سنمثل كل هدف وكل قيد عائم بمعيار μ_{d_j} criteria 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 . ولأبي دخل (أي أوامر المتحكم)، واضح أن الهدف هو البحث عن التسلسل المثالي لأوامر المتحكم والتي تمثل هنا مجموعة البدائل الممكنة Alternatives. ولنفرض أن π عبارة عن تسلسل معين من الدخل، ولنفرض أن تابع انتمائه يرمز له بالشكل π ويعطى بالمعادلة (11)[10].

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

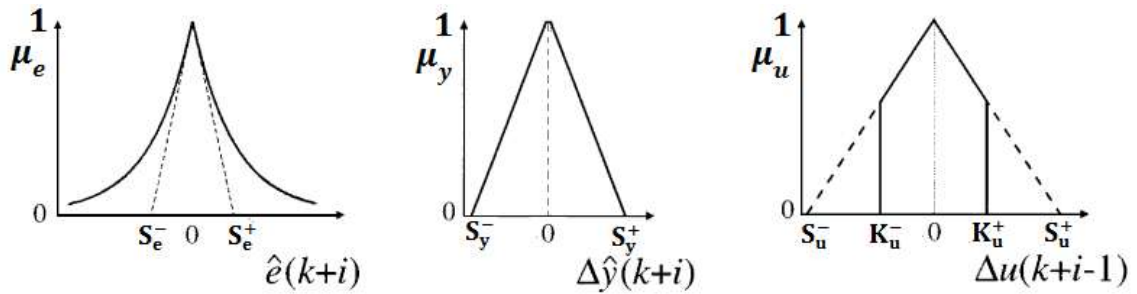
$$\dots \otimes \left(\mu_{d_{Hp1}} \otimes_g \dots \otimes_g \mu_{d_{Hpq}} \right) \otimes \left(\mu_{d_{Hp(q+1)}} \otimes_c \dots \otimes_c \mu_{d_{HpN}} \right)$$

حيث أن \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، فعلى سبيل المثال يمكن استخدام عمليات الربط المثلثية t-norm في حال أردنا إرضاء جميع الأهداف والقيود على حدٍ سواء. إن المعادلة السابقة (12) تعبر عن جميع تسلسلات الدخل الممكنة، وبالتالي يجب البحث عن التسلسل المثالي للأوامر المتحكم π^* ، وبما أن المعادلة (12) 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 (12).

$$\pi^* = \arg \max_{\{u(\tau), \dots, u(\tau+H_p-1)\}} \mu_{\pi} \quad (12)$$

يتضح من المعادلة (12) أن إيجاد أفضل تسلسل لـ π هي مسألة أمثلة غير محدبة non-convex، وهنا يجب استخدام الطرق العددية للحل مثل البرمجة الديناميكية [13].

عند استخدام التحكم التنبئي التقليدي عادة ما يكون تابع الكلفة تربيعي، بينما في حال المتحكم التنبئي العائم نستخدم توابع عائمة لتمثيل كل من الأهداف والقيود، واستخدام التوابع العائمة يصف بدقة وبموضوعية أهداف وقيود النظام، ويوضح الشكل (3) بعض توابع الانتماء لثلاث مجموعات عائمة لتمثيل المعايير مثل الخطأ ومعدل التغير في الخرج ومعدل التغير في أوامر التحكم، وإن استخدام التوابع العائمة لتحديد المعايير يصف بدقة أكبر أهداف وقيود النظام، كما أنه يقلل من الجهد اللازم لإيجاد القيم العددية لمعاملات الأوزان في التحكم التنبئي التقليدي، كما تلعب المعرفة البشرية هنا دوراً مهماً في تحديد الأهداف والقيود عند استخدام TIFMPC.

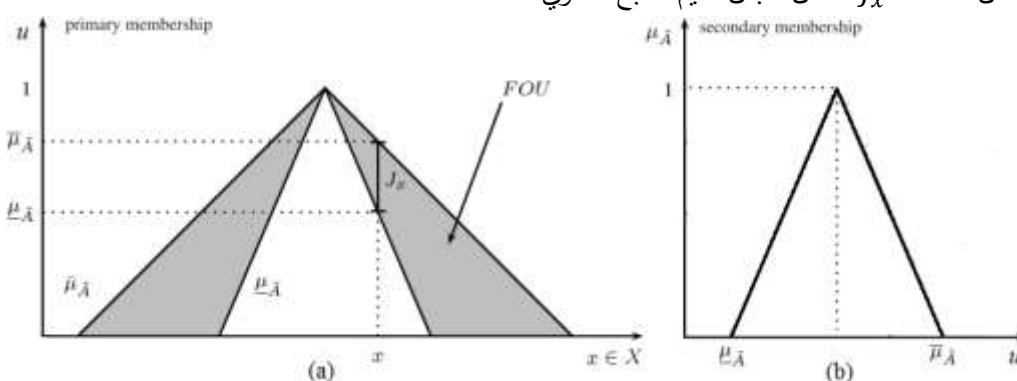


الشكل (3) تابع انتماء يمثل الخطأ، التغير في الخرج، التغير في أمر التحكم.

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

تختلف المجموعات العائمة من النمط الثاني عن النمط الأول بأنّ تابع الانتماء لها هو عبارة عن تابع عائم fuzzy MF بحد ذاته وليس قيمة حدية، حيث أن قيمة تابع الانتماء لأي عنصر من المجموعة العائمة هو مجموعة عائمة أيضاً تقع ضمن المجال $[0,1]$. وهذا يعني أن توابع الانتماء للمجموعات العائمة من النمط الثاني ثلاثية الأبعاد 3D وتحوي على منطقة تسمى ببصمة عدم اليقين (FOU) footprint of uncertainty وتحوي على تابع انتماء أولي وتابع انتماء ثانوي كما في الشكل (4).

التحكم التنبئي العائم من النمط الثاني T2FMPC مشابه للتحكم التنبئي العائم من النمط الأول T1FMPC وذلك عندما نمثل الأهداف والقيود باستخدام مجموعات عائمة من النمط الثاني كما يوضح الشكل (4a)، حيث $\bar{\mu}_{\bar{A}}(x)$ و $\underline{\mu}_{\bar{A}}(x)$ يمثل تابعين عائمين من النمط الأول (عُلوي وسُفلي) يحيطان بمنطقة عدم اليقين FOU، بينما يوضح الشكل (4b) 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.

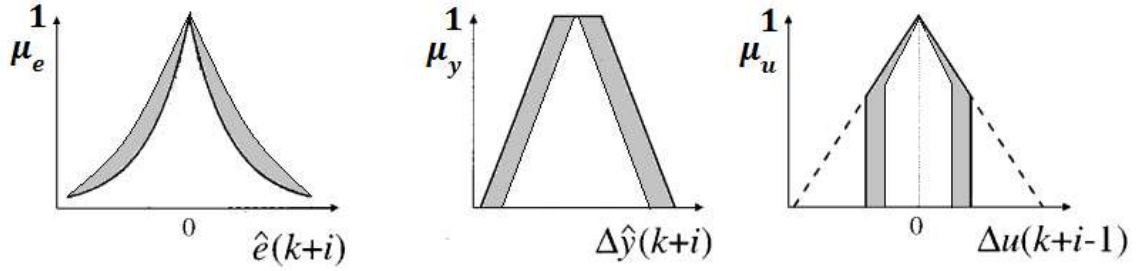


الشكل (4) مجموعة عائمة من النمط الثاني: (a) بصمة عدم اليقين، (b) تابع انتماء ثانوي مثلثي.

الهدف هو البحث عن التسلسل المثالي لأوامر المتحكم والتي تمثل هنا مجموعة البدائل الممكنة. وهنا أيضاً سنمثل كل هدف وقيود عائم بمعيار قرار عائم d_j وهنا المعيار عبارة عن مجموعة عائمة شبيهة بالشكل (4b) وليست قيمة حدية تمثل انتماء مفرد كما الحال في T1FMPC. المعادلة (13) تمثل تابع انتماء التسلسل المثالي لقيم الدخل μ_{π} والفرق الوحيد بين المعادلة (5) والمعادلة (13) هو بأنه في المعادلة (13) نقوم بربط مجموعات عائمة وليس قيم حدية لتوابع انتماء، وهذا يعني أننا بحاجة لطريقة ربط جديدة لربط هذه المجموعات العائمة حسب درجة تحقيقها للمعايير (أهداف وقيود النظام) وذلك على طول أفق التنبؤ H_p .

$$\mu_{\pi} = (A_{d_{11}} \otimes_g \dots \otimes_g A_{d_{1q}}) \otimes (A_{d_{1(q+1)}} \otimes_c \dots \otimes_c A_{d_{1N}}) \otimes \dots \dots \dots (A_{d_{Hp1}} \otimes_g \dots \otimes_g A_{d_{Hpq}}) \otimes (A_{d_{Hp(q+1)}} \otimes_c \dots \otimes_c A_{d_{HpN}}) \quad (13)$$

يتم استخدام المجموعات العائمة من النمط الثاني لتمثيل الأهداف والقيود كونها قادرة على تمثيل الابهام بالنظم بدرجة أفضل من النمط الأول، ولكن عند دمج هذه المجموعات العائمة من النمط الثاني تكون النتيجة عبارة عن مجموعة عائمة من النمط الأول [17] [18] [19]. يوضح الشكل (5) 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) تابع انتماء من النمط الثاني يمثل الخطأ، التغير في الخرج، التغير في أمر التحكم.

وبالنسبة لعمليات الربط المقترحة سنقوم باستخدام ثلاث قواعد ربط مثلثية product, Hamacher و Dombi وذلك بعد إجراء بعض التعديلات، وإذا اعتبرنا لدينا مجموعتين عائميتين A_1, A_2 موضحة بالشكل (6) والتي تمثل توابع انتماء ثانوية لمجموعتين عائميتين مثل الخطأ وتغير الخرج الموضحة بالشكل (5) على التوالي وذلك عند العينة $K + i$. المعادلات (14) (15) و (16) تعبر عن كيفية ربط هاتين باستخدام قاعدة الربط product, Hamacher و Dombi الجديدة على التوالي، ويمكننا بسهولة تعميمها لتشمل N مجموعة عائمة.

○ عملية الجداء الموزون من النمط الثاني Type-2 product operator

$$T_{P2}(A_1, A_2) = \mu_{\bar{A}m1}^{j_1} \cdot \mu_{\bar{A}m2}^{j_2} \quad (14)$$

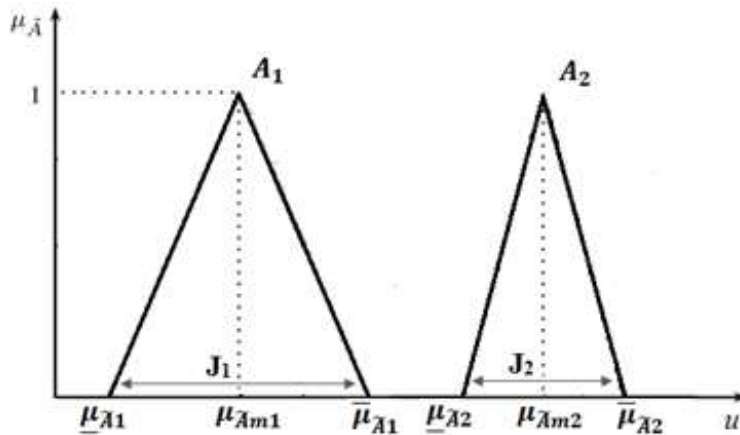
○ عملية ربط جداء Hamacher من النمط الثاني

$$T_{H2}(A_1, A_2) = \frac{1}{1 + j_1 \frac{1 - \mu_{\bar{A}m1}}{\mu_{\bar{A}m1}} + j_2 \frac{1 - \mu_{\bar{A}m2}}{\mu_{\bar{A}m2}}} \quad (15)$$

○ عملية ربط Dombi من النمط الثاني

$$T_{D2}(A_1, A_2) = \frac{1}{1 + \sqrt[\gamma]{j_1 \left(\frac{1 - \mu_{\bar{A}m1}}{\mu_{\bar{A}m1}}\right)^\gamma + j_2 \left(\frac{1 - \mu_{\bar{A}m2}}{\mu_{\bar{A}m2}}\right)^\gamma}}, \gamma > 0 \quad (16)$$

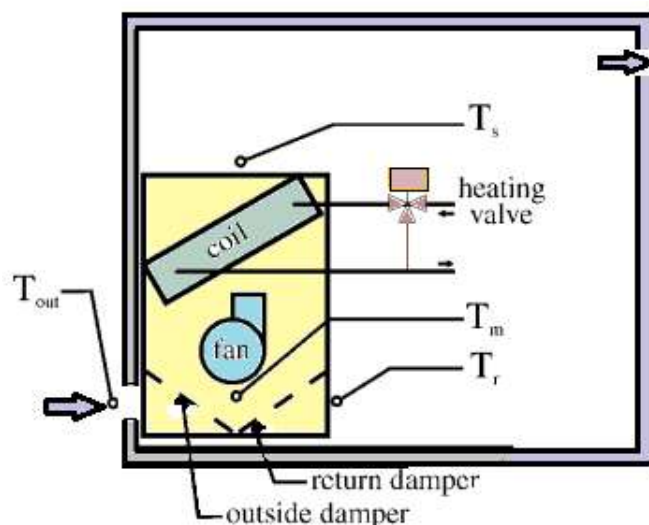
حيث T_{D2}, T_{H2}, T_{P2} تعبر عن عمليات الربط المثلثية من النمط الثاني لكل من قواعد الربط الثلاثة. و J يعبر عن كامل المجال للمجموعة العائمة أو عرض هذه المجموعة بينما $\mu_{\bar{A}mj}$ يعبر عن القيمة الوسطى للمجال $[\underline{\mu}_{\bar{A}j}(x), \bar{\mu}_{\bar{A}j}(x)]$. ويمكننا اعتبار قيم J عبارة عن أوزان وهذه الأوزان متغيرة لأنها تتعلق بقيمة الدخل وشكل المجموعة العائمة من النمط الثاني عند العينة $K + i$ ، أي يمكننا القول أننا حصلنا على أوزان متكيفة.



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

• نظام تهوية وتكييف لمبنى:

يوضح الشكل (7) الشكل العام لنظام التهوية والتكييف، وهو مكون من غرفة يدخلها الهواء من الخارج برجة حرارة T_{out} ثم تقوم ألواح dampers بتحديد نسبة المزج بين الهواء الخارجي وهواء غرفة المكيف وسنعتبر هذه الألواح مفتوحة بنسبة 50%، ثم تقوم المروحة والتي تدور بسرعة منخفضة بدفع الهواء عبر ملف تسخين (coil) لتتم عملية تبادل حراري، الملف تأتية مياه ساخنة بدرجة حرارة 65°C عبر صمام يتم التحكم به كهربائياً، ثم يوزع الهواء الناتج بدرجة T_s إلى المبنى والعملية التي سنقوم بها هي التحكم بدرجة حرارة غرفة التكييف T_s ضمن مجال من 30°C وحتى 60°C وذلك عن طريق فتح الصمام الذي يزود الملف بالمياه الساخنة ضمن المجال من 40% وحتى 100% وذلك لأن القيم الأصغر من 40% لا تعطي أداء جيد للصمام أي بعبارة أخرى ضمن المجال [0.4, 1].



الشكل (7) غرفة نظام التهوية والتكييف لمبنى.

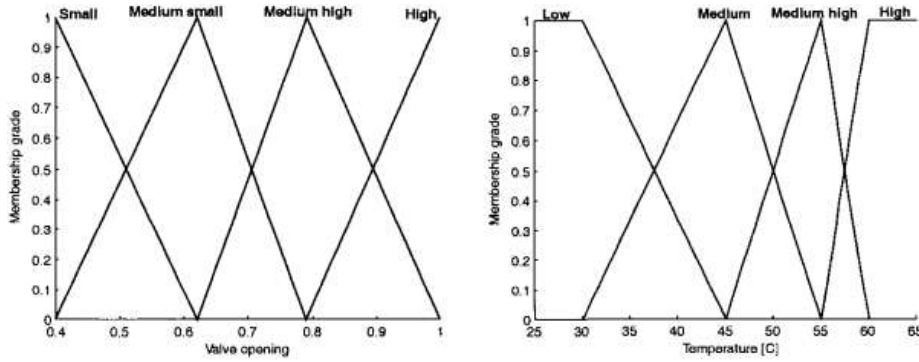
النظام السابق ممثل بنموذج عائم مفرد singleton، والذي يعبر عنه بالمعادلة (17)، حيث أن $(\tau + 1)_s$ هي الحرارة في العينة التالية وهي تابعة للحرارة بال اللحظة الحالية $T_s(\tau) \in [30, 60]$ ولفتح الصمام $u(\tau) \in [0.4, 1]$ أما قواعد النموذج العائم من نوع singleton معطاة بالجدول (1) ولنأخذ أول قاعدة والتي يمكن ترجمتها بالمعادلة (18)، وكما نلاحظ فإن الجدول (1) يحوي على 16 قاعدة. بينما الشكل (8a) يبين توابع الانتماء العائمة التي تمثل درجات الحرارة والشكل (8b) يبين توابع الانتماء العائمة التي تمثل فتحة الصمام. سنقوم باستخدام هذا النموذج للتنبؤ بخرج النظام المستقبلي لأكثر من خطوة للأمام وذلك بالنسبة لجميع تغيرات الدخل المحتملة. وكما ذكرنا سابقاً فإننا في هذه الدراسة لن ندخل في تعريف النموذج العائم identification بل سنستخدم نموذجاً جاهزاً معرّف لنظام تهوية وتكييف لمبنى تم الحصول عليه من الدراسة [10]. أي أن الجدول (1) والشكل (8) تم الحصول عليهم من الدراسة المذكورة.

$$T_s(\tau + 1) = f(T_s(\tau), u(\tau)) \quad (17)$$

$$\text{IF } u(\tau) \text{ is Small and } T_s(\tau) \text{ is Low then } T_s(\tau + 1) = 30.3^{\circ}\text{C} \quad (18)$$

الجدول (1): القواعد التي تمثل النموذج العائم لنظام تهوية وتكييف

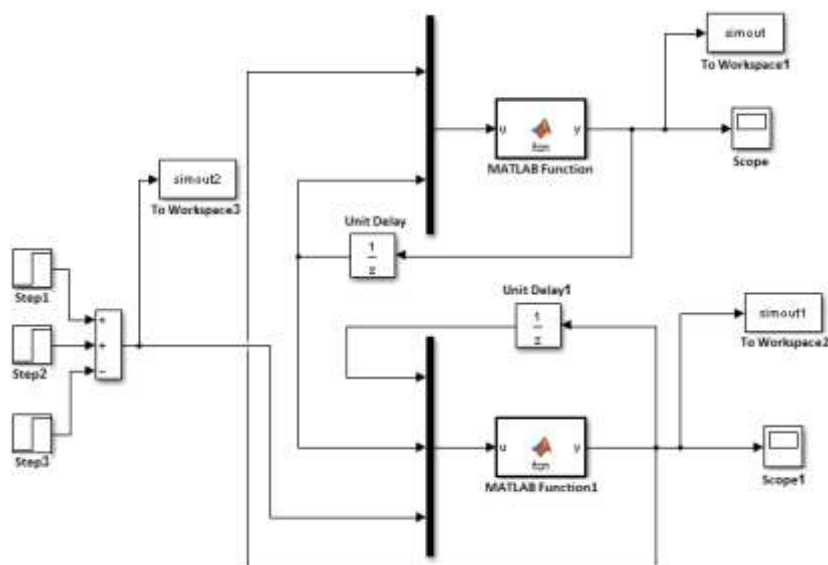
Valve Opening	Temperature			
	Low	Medium	Medium high	High
Small	30.3	43.9	52.6	56.4
Medium small	30.0	43.8	54.2	57.6
Medium high	32.8	47.4	55.6	59.7
High	35.5	47.3	55.1	60.3

b. توابع الانتماء لفتحة الصمام $u(\tau)$ a. توابع الانتماء لدرجات الحرارة $T_s(\tau)$

الشكل (8) توابع الانتماء للنموذج العائم.

النتائج و المناقشة :

يوضح الشكل (9) المخطط الصندوقي لنموذج النظام باستخدام Simulink، حيث أن النموذج العائم المعبر عن النظام مضمن في MATLAB Function، وبرنامج المتحكم عبارة عن كود تم تنفيذه وتضمينه في MATLAB Function1، وقد تمت دراسة استجابة النظام لعدة قفزات من الحرارة ضمن المجال $[30^{\circ}\text{C}, 60^{\circ}\text{C}]$ بزمن أخذ عينات يساوي 15s، 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 وذلك باستخدام ثلاث طرق ربط مختلفة وقد استخدمنا أفق تنبؤ $H_p = 3$ وأفق تحكم $H_c = 2$ في المتحكمين.



شكل (9) نموذج النظام باستخدام Simulink

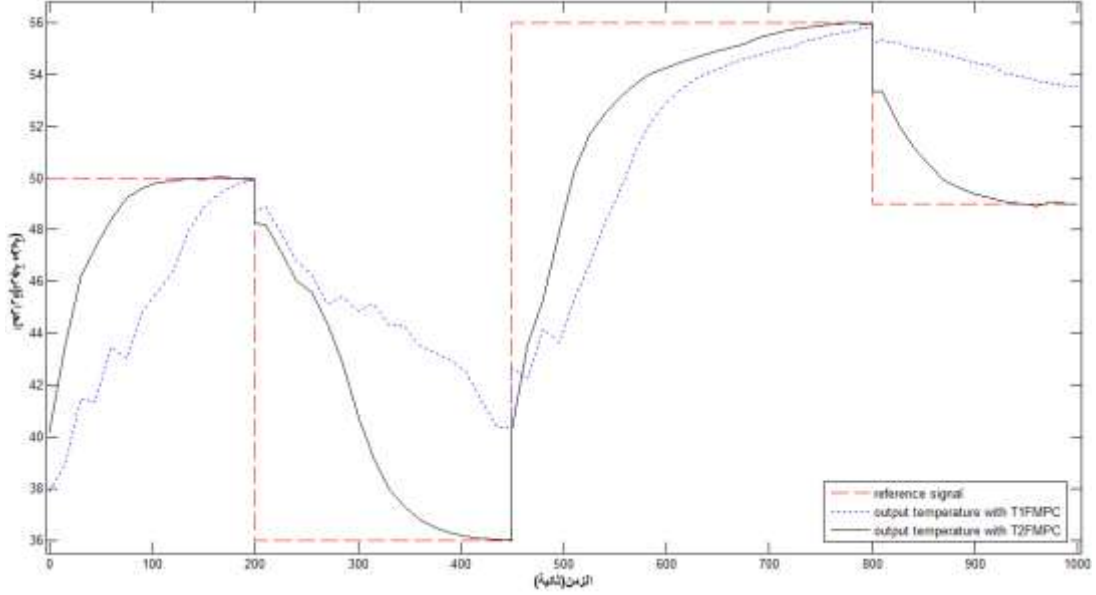
باستخدام ما سبق وبالنسبة للمتحكم التنبئي العائم من النمط الأول T1FMPC فقد تم استخدام توابع انتماء عائمة لكل من الخطأ وتغيرات الدخل وتغيرات الخرج وهي موضحة بالشكل (3) ونلاحظ شكل تابع انتماء الخطأ وهو تابع آسي ويتميز بأنه لا يصل إلى قيمة الصفر وقد تم اختيار القيم التالية $S_e^- = S_e^+ = 25$ وهو ما يمكننا أن نتوقعه بشكل قريب من الواقع لأن الخرج يتغير ضمن المجال $[30^\circ\text{C}, 60^\circ\text{C}]$ ، أما بالنسبة لتغيرات الخرج يمكن إعطاء القيم التالية لكي نتجنب التغيرات السريعة جداً $S_y^- = S_y^+ = 1.75$. أما بالنسبة لتغيرات الدخل Δu فيجب الالتزام لحد ما بالقيود المفروضة على تغيرات فتحة الصمام، وتم اختيار القيم التالية لتحقيق هذا الشرط بدرجة مقبولة $\bar{u} = S_u^+ = 0.8, K_u^- = K_u^+ = 0.5$

أما بالنسبة للمتحكم 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 $\bar{\mu}_{\bar{A}}(x)$ على الشكل التالي $S_e^- = S_e^+ = 30, S_y^- = S_y^+ = 2, S_u^- = S_u^+ = 1, K_u^- = K_u^+ = 0$. أما بالنسبة للتوابع السفلية $\underline{\mu}_{\underline{A}}(x)$ فهي $S_e^- = S_e^+ = 20, S_y^- = S_y^+ = 1.5, S_u^- = S_u^+ = 0.6, K_u^- = K_u^+ = 0.4$ الربط product، Hamacher، و Dombi الموضح بالمعادلات (8) و(9) و(10) بالنسبة للمتحكم التنبئي العائم من النمط الأول T1FMPC وذلك على فرض $\gamma = 2$. أما بالنسبة للمتحكم التنبئي العائم من النمط الثاني T2FMPC فقد تم استخدام قواعد الربط الجديدة المقترحة في هذه الدراسة والموضحة بالمعادلات (14) و(15) و(16) وذلك على فرض $\gamma = 2$. ولنقارن كل عملية ربط على حد.

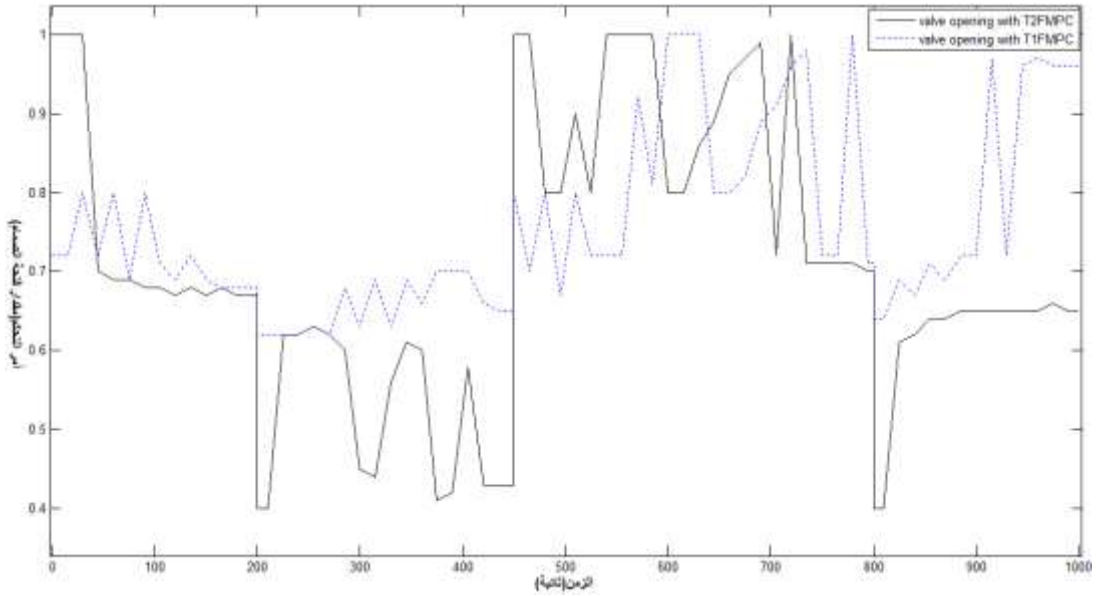
• product operator :

برسم استجابة النظام مع الزمن باستخدام عدة قفزات في درجة الحرارة نحصل على المنحني الموضح بالشكل (10) وهو يقارن استجابة النظام عند استخدام متحكم النمط الأول T1FMPC مع علاقة الربط Type-1 product ومتحكم النمط الثاني T2FMPC مع علاقة الربط Type-2 product، ويوضح الشكل السابق أن متحكم النمط الأول T1FMPC غير قادر على ملاحقة تغيرات الحرارة المطلوبة، كما يوضح الشكل السابق أن متحكم النمط الثاني T2FMPC قادر على ملاحقة تغيرات الحرارة المطلوبة بدقة وسلاسة. أما الشكل (11) فيوضح أوامر المتحكم أو مقدار

فتحة الصمام بالنسبة لمتحكم النمط الأول T1FMPC ونلاحظ أنها تأخذ قيم ضمن المجال $[0.4,1]$ ولكنها تختلف عن منحنيات الفتح والاعلاق لمتحكم النمط الثاني T2FMPC فكل متحكم لديه طريقة خاصة للوصول إلى الحرارة المرجعية المطلوبة، ويمكننا القول إن متحكم النمط الثاني يقوم بفتح وإغلاق الصمام بفعالية أكبر من متحكم النمط الأول.



الشكل (10) استجابة النظام لتغيرات درجة الحرارة عند استخدام متحكم من النمط الأول والثاني مع قاعدة ربط product.

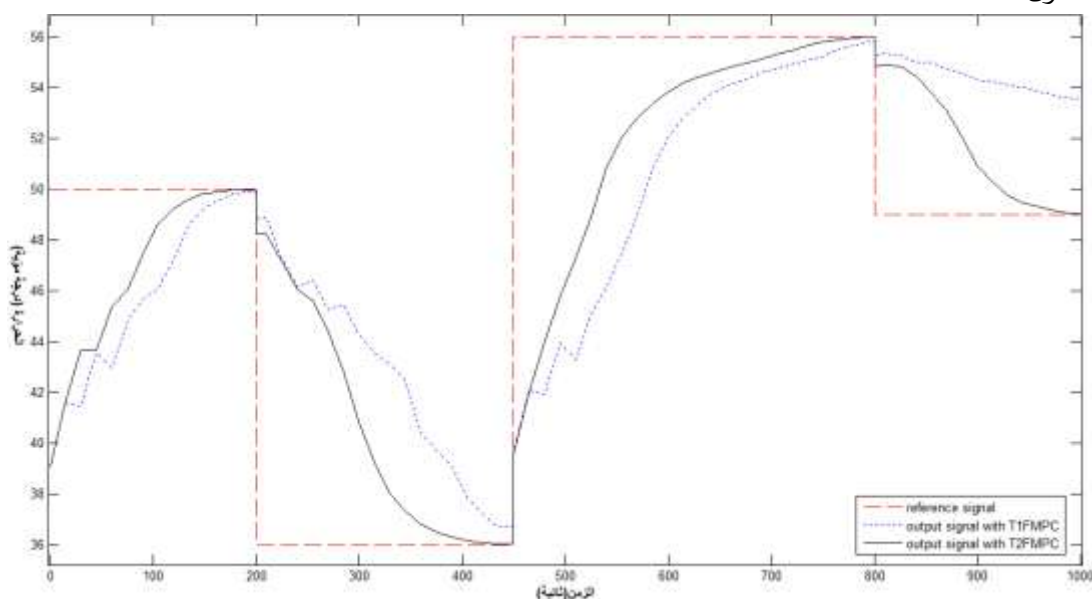


شكل (11) أوامر المتحكم أو مقدار فتحة الصمام عند استخدام متحكم من النمط الأول والثاني مع قاعدة ربط product.

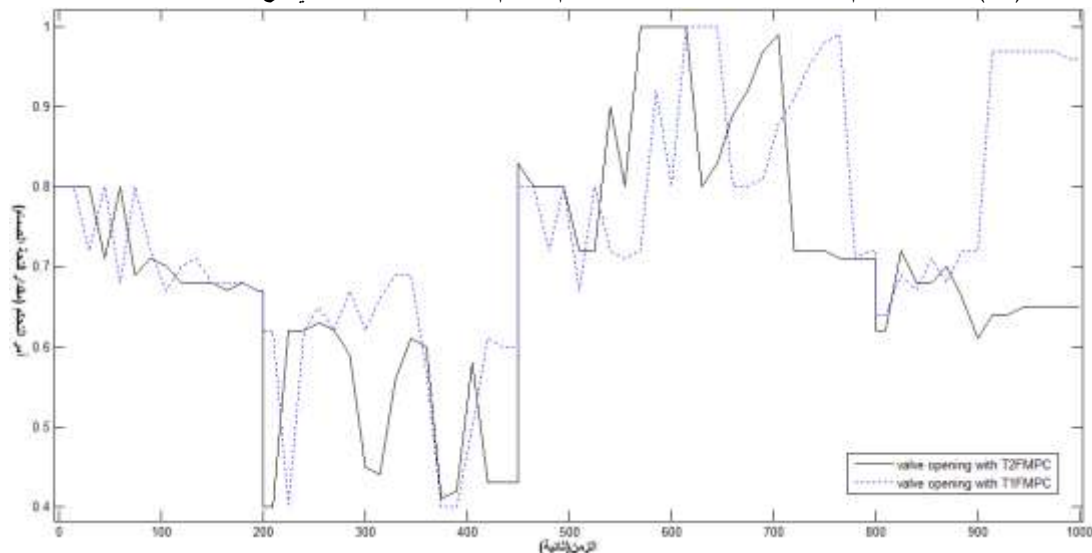
• Hamacher :

برسم استجابة النظام مع الزمن باستخدام عدة قفزات في درجة الحرارة نحصل على المنحني الموضح بالشكل (12) وهو يقارن استجابة النظام عند استخدام متحكم النمط الأول T1FMPC مع علاقة الربط Type-1 Hamacher ومتحكم النمط الثاني T2FMPC مع علاقة الربط Type-2 Hamacher ، ويوضح الشكل السابق أن متحكم النمط الأول

T1FMPC غير قادر على ملاحقة كل تغيرات الحرارة المطلوبة عند بعض القيم، كما يوضح الشكل السابق أنّ متحكم النمط الثاني T2FMPC قادر على ملاحقة تغيرات الحرارة المطلوبة بدقة وسلاسة. أما الشكل (13) فيوضح أوامر المتحكم أو مقدار فتحة الصمام بالنسبة لمتحكم النمط الأول T1FMPC ونلاحظ أنها تأخذ قيم ضمن المجال $[0.4,1]$ ولكنها تختلف عن منحنيات الفتح والإغلاق لمتحكم النمط الثاني T2FMPC فكل متحكم لديه طريقة خاصة للوصول إلى الحرارة المرجعية المطلوبة، ويمكننا القول إنّ متحكم النمط الثاني يقوم بفتح وإغلاق الصمام بفعالية أكبر من متحكم النمط الأول.



الشكل (12) استجابة النظام لتغيرات درجة الحرارة عند استخدام متحكم من النمط الأول والثاني مع قاعدة ربط Hamacher.

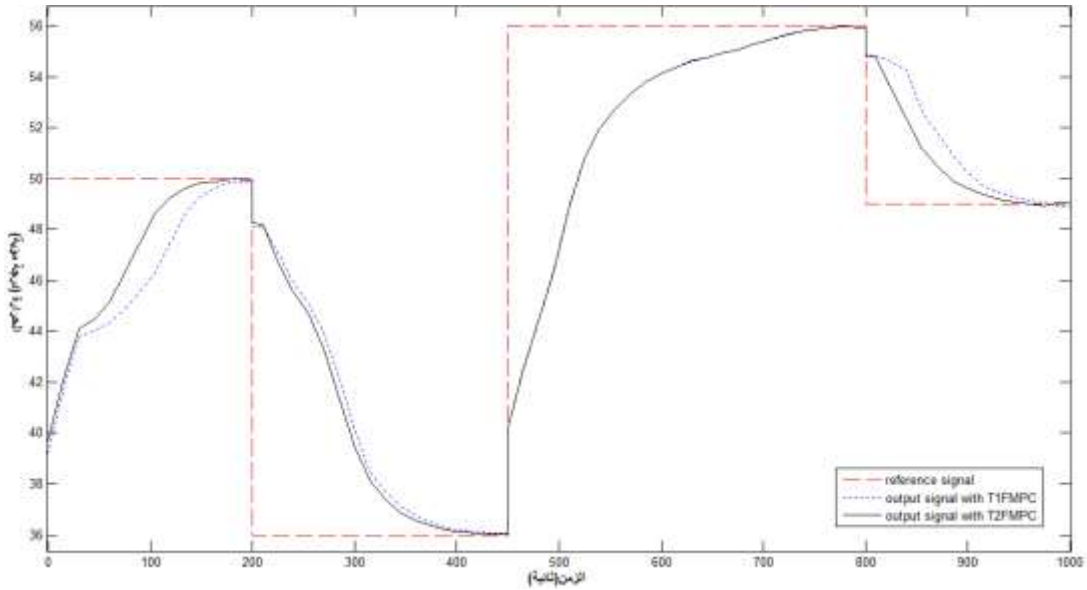


شكل (13) أوامر المتحكم أو مقدار فتحة الصمام عند استخدام متحكم من النمط الأول والثاني مع قاعدة ربط Hamacher.

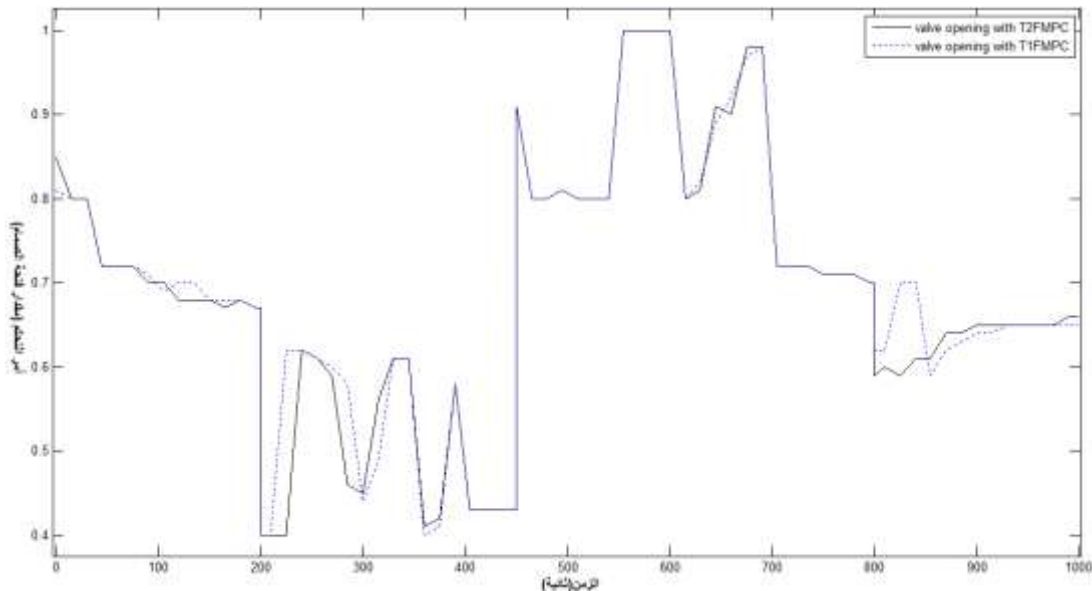
• Dombi :

برسم استجابة النظام مع الزمن باستخدام عدة قفزات في درجة الحرارة نحصل على المنحني الموضح بالشكل (14) وهو يقارن استجابة النظام عند استخدام متحكم النمط الأول T1FMPC مع علاقة الربط Type-1 Dombi ومتحكم النمط الثاني T2FMPC مع علاقة الربط Type-2 Dombi ، ويوضح الشكل السابق أنّ متحكم النمط الأول

T1FMPC قادر على ملاحقة تغيرات الحرارة المطلوبة، كما يوضح الشكل السابق أن متحكم النمط الثاني T2FMPC قادر على ملاحقة تغيرات الحرارة المطلوبة بدقة وسلاسة أكثر من متحكم النمط الأول. أما الشكل (15) فيوضح أوامر المتحكم أو مقدار فتحة الصمام بالنسبة لمتحكم النمط الأول T1FMPC ونلاحظ أنها تأخذ قيم ضمن المجال [0.4,1] ولكنها تختلف عن منحنيات الفتح والإغلاق لمتحكم النمط الثاني T2FMPC فكل متحكم لديه طريقة خاصة للوصول إلى الحرارة المرجعية المطلوبة، ويمكننا القول إن متحكم النمط الثاني يقوم بفتح وإغلاق الصمام بفعالية أكبر من متحكم النمط الأول.



الشكل (14) استجابة النظام لتغيرات درجة الحرارة عند استخدام متحكم من النمط الأول والثاني مع قاعدة ربط Dombi.



شكل (15) أوامر المتحكم أو مقدار فتحة الصمام عند استخدام متحكم من النمط الأول والثاني مع قاعدة ربط Dombi.

الاستنتاجات و التوصيات :

- قمنا بالتحكم بنظام غير خطي ممثل بنموذج عائم مفرد، باستخدام المتحكم التنبئي العائم من النمط الأول T1FMPC، ومتحكم النمط الثاني T2FMPC.
- تم استخدام النموذج العائم للتنبؤ بسلوك النظام المدروس.
- استخدام المجموعات العائمة من النمط الثاني يعطي مرونة أكثر للمصمم في توصيف أهداف وقيود النظام بشكل أكثر واقعية ، ويعبر عن حالات الابهام والغموض بدقة أكثر من المجموعات العائمة من النمط الأول.
- يتفوق المتحكم المقترح (النمط الثاني T2FMPC) على متحكم النمط الأول T1FMPC.
- تم تعديل طرق الربط product، Hamacher و Dombi لتتمكن من ربط المجموعات العائمة من النمط الثاني.
- لم يتمكن متحكم النمط الأول من ملاحقة تغيرات الحرارة عند استخدام كل من طريقتي الربط product و Hamacher.
- استطاع متحكم النمط الأول ملاحقة تغيرات الحرارة عند استخدام طريقة Dombi ولكن استجابة متحكم النمط الثاني كانت أفضل.
- يمكننا اقتراح استخدام قواعد ربط جديدة ومقارنتها مع قواعد الربط المقترحة في هذا البحث. كما يمكننا اقتراح تعديل شكل المجموعات العائمة المستخدمة لتمثيل المعايير.

المراجع :

1. DEXTER, A.L. *Monitoring and control of information-poor systems*. John Wiley & Sons, New Delhi, India, 2012, 313.
2. SARIDAKIS, K.M. and DENTSORAS, A.J. *Soft computing in engineering design – a review*. Advanced Engineering Informatics, 22, 2008, 202–221.
3. HOLMBAD, L. and OSTERGAARD, I. *Control of a cement kiln by fuzzy logic*. Fuzzy Information and Decision-Processes, Amsterdam, North-Holland, 1982, 389–399.
4. OSHIMA, H ; YASUNOBU, S and SEKINO, S. *Automatic train operation system based on predictive fuzzy control*. IEEE International Workshop on Artificial Intelligence for Industrial Applications, Hitachi City, Japan, 1988, 485-489.
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. THOMPSON, R and DEXTER, A.L. *A fuzzy decision-making approach to temperature control in air conditioning systems*. Control Engineering Practice, vol. 13, 2005, 689–698.
7. MANIKANDAN, P; GEETHA, M and JEROME, J. *Weighted Fuzzy Fault Tolerant Model Predictive Control*. IEEE International Conference on Fuzzy Systems, vol. 14, 2014, 83-90.

8. FLORES, A; SAEZ, D; ARAYA, J; BERENGUEL, M and CIPRIANO, A. *Fuzzy Predictive Control of a Solar Power Plant*. IEEE Transactions on Fuzzy systems, VOL. 13, 2005, 1063-6706.
9. CHRISTIAN, A; RODRIGUEZ, R.J; VILLARROEL, F; ESPINOZA, J and KHABURI, D. A. *Multiobjective Fuzzy Predictive Torque Control of an Induction Motor Drive*. IEEE, PEDSTC, vol.15, 2015, 201-206.
10. SOUSA, J.M.C and KAYMAK, U. *Fuzzy Decision Making in Modeling and Control*. World Scientific, Singapore, 2002, 335.
11. MAMDANI, E. H. *Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic systems*. IEEE Transactions on Computers, vol. 26, 1977, 1182-1191.
12. TAKAGI, T and SUGENO, M. *Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol.15, 1985, 116-132.
13. BELLMAN, R.E and ZADEH, L.A. *Decision-making in a fuzzy environment*. Management Science, vol.17, 1970, 141–164.
14. Mizumoto, M. *Pictorial representations of fuzzy connectives, part I: cases of t-norms, t-conorms and averaging operators*. Fuzzy Sets and Systems, 31,1989a, 217-242.
15. KOUVARITAKIS, B; and CANNON, M. *Nonlinear Predictive Control theory and practice*. IET Control Engineering Series 61, UK , 2001, 261.
16. ZHENG, T. *Model Predictive Control*. Sciyo, India, 2010, 304.
17. YAGER, R. R.. *Fuzzy subsets of type II in decisions*: J. Cybern, vol. 10,1980,137–159.
18. YAGER, R. R; and KELMAN, A.,. *Fusion of fuzzy information with considerations for compatibility, partial aggregation and reinforcement*: International Journal of Approximate Reasoning, 15,1996, 93–122.
19. WU, D; and MENDEL ,J.M., *Aggregation using the linguistic weighted average and interval type-2 fuzzy sets*: IEEE Trans. on Fuzzy Systems, vol.15, no. 6 ,2007, 1145-1161.