

Design Adaptive controller and learning controller to control the pacemaker

Eliatha Nasr Alden Alebrahem

Jomana Mahmoud Diab

Faculty of mechanical and electrical engineering || Albaath university || Homs || Syria

Feras Mohammad Zoreka

Faculty of medicine || Albaath university || Homs || Syria

Abstract: Pacemakers play a vital role in the management of electrical disorders of the heart, as having a controller that presents a signal that generates a correct heart rate without delay or overshoot is important, to provide better quality and long-term patient's life.

Many advances in pacemaker control technology have been achieved, making today's pacemakers capable of correcting many electrical heart abnormalities.

In this paper, a fuzzy model reference learning control was designed to control the pacemaker, and compared with a controller adopts the adaptive mechanism instead of the learning mechanism, in order to confirm the importance of learning in the controller. The controller automatically controls the heart rate (Heart Rate: HR) to prevent it from falling under a reference value and makes it track preset signal accurately. The learning controller achieved better performance than the adaptive controller and the learning controller achieved when comparing with the similar intelligent ones that proposed to control pacemaker the required response with a small settling time 0.9s, and minimized the overshoot at start-up operation where overshoot was 0.2%

Keywords: learning mechanism, adaptive algorithm, electrical system of heart, bradycardia, YNI model.

تصميم متحكم تكيفي ومتحكم متعلم للتحكم بناظم الخطى القلبي

إلياذة نصر الدين الإبراهيم

جمانا محمود دياب

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية || جامعة البعث || حمص || سوريا

فراس محمد زريقا

كلية الطب البشري || جامعة البعث || حمص || سوريا

الملخص: تلعب نواظم خطا القلب الكهربائية دورًا حيويًا في علاج امراض القلب المرتبطة بالفعالية الكهربائية، حيث أن وجود متحكم يؤمن إشارة تولد معدل ضربات قلب صحيح دون تأخير أو تجاوز يعتبر أمرًا مهمًا لتوفير نوعية حياة أفضل ولزيادة مدة البقاء على قيد الحياة للمرضى، وقد تم تحقيق العديد من التطورات في تقنية التحكم بناظم الخطى القلبي، مما يجعل نواظم الخطى القلبية الحالية قادرة على تصحيح عدد كبير من الشذوذات القلبية الكهربائية.

تم في هذا البحث تصميم متحكم ضبابي معتمد على النموذج المرجعي قابل للتعلم للتحكم بناظم الخطى القلبي، وتمت مقارنته مع متحكم يعتمد آلية التكيف بدلًا من آلية التعلم، وذلك بهدف تأكيد مدى أهمية التعلم في المتحكم. تتم عملية التحكم بناظم الخطى القلبي بشكل أوتوماتيكي للحفاظ على معدل ضربات القلب (Heart Rate: HR) ومنعه من الانخفاض عن قيمة مرجعية محددة مسبقًا

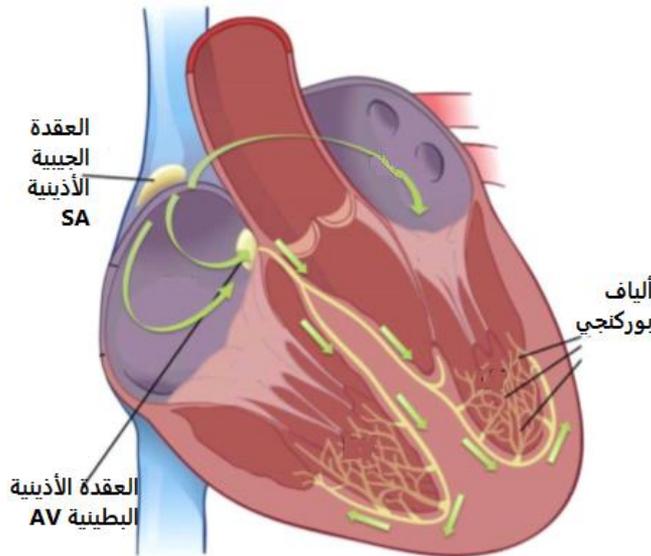
وجعله يتعقب بشكل دقيق الإشارة الموجودة، حقق المتحكم المتعلم أداء أفضل من المتحكم التكيفي، وقد حقق المتحكم المتعلم بالمقارنة مع المتحكمات الذكية المشابهة التي تم استخدامها للتحكم بناظم الخطى القلبي الاستجابة المطلوبة بزمن استقرار صغير 0.9s، مع تقليل التجاوز في الاستجابة التي يتعرض لها المنظم عند بدء التشغيل حيث كانت نسبة التجاوز 0.2%
الكلمات المفتاحية: آلية تعلم، خوارزمية تكيف، نظام التوصيل الكهربائي للقلب، بطء القلب، نموذج YNI

1- المقدمة:

إن القلب عبارة عن عضلة مسؤولة عن ضخ الدم النقي الحامل للأوكسجين إلى الجسم، وتخليص الجسم من السموم والفضلات الموجودة في الدم، وهذا يتم من خلال التقلص بانتظام وباستمرار، وهذا يتحقق من خلال نظام التوصيل الكهربائي القلبي.

يتكون القلب من أربع حجرات هي: الأذنين الأيمن، والبطين الأيمن، والأذنين الأيسر، والبطين الأيسر. يبدأ النشاط الكهربائي الطبيعي للقلب في العقدة الجيبية الأذينية التي تمثل ناظم الخطى القلبي الطبيعي (Sino-Atrial node:SA node)، وتتميز الخلايا الموجودة في هذه العقدة أنها قادرة على إزالة الاستقطاب وتوليد نبضة كهربائية بشكل ذاتي وهذا ما يسمى بالتلقائية.

تنتقل النبضة إلى الخلايا المجاورة، ومنها إلى كل من الأذنين الأيمن والأيسر مما يؤدي إلى تقلصهما، ثم تصل الإشارة الكهربائية إلى العقدة الأذينية البطينية (AtrioVentricular node:AV node) التي تؤخر هذه الإشارة قليلاً بهدف جعل البطين يمتلئ بالكامل، ثم تنتقل هذه الإشارة إلى حزمة هس، والتي تنقسم إلى غصن أيمن وأيسر، وتتفرع على شكل شبكة تسمى ألياف بوركنجي التي تتوزع على كامل جدار البطين، فتنتقل الإشارة عبر كامل البطين بسرعة ويتقلص البطينان بشكل متزامن. ينتج عن إكمال هذه العملية خطوة بخطوة دورة كاملة تسمى الدورة القلبية والتي تتكرر بتواتر محدد يتراوح بين 60-100 نبضة/د في الأحوال الطبيعية وتعطي ما يعرف باسم نبض القلب heart rate (HR) الشكل (1)[1].



الشكل(1): مسار التوصيل الكهربائي للقلب

تسبب أمراض الشيخوخة، وبعض أمراض القلب تلعاً في قدرة العقدة الجيبية الأذينية على ضبط نبض القلب بشكل صحيح، مما يؤدي إلى اضطراب في إيقاع القلب.

قد يحدث ببطء في معدل ضربات القلب مما قد ينعكس في حال البطء الشديد على قدرة البطينين على ضخ الدم بشكل فعال إلى أنحاء الجسم، وبالتالي يحدث انخفاض في الإرواء النسيجي وقد يحصل فقدان للوعي عند المريض في حال البطء الشديد.

قد يحصل توقف كامل في عمل العقدة الجيبية وبالتالي لا تقوم بتوليد النبضات، أو قد يحصل خلل على مستوى جهاز التوصيل الكهربائي يمنع انتقال النبضات ووصولها للبطينين، في هذه الحالة يحصل فقدان للوعي عند المريض وقد يحصل توقف للقلب ووفاة المريض.

في حال فشل العقدة الجيبية في توليد النبضة أو فشل انتقال النبضة، تتولى الأجزاء الأخرى من الجهاز الناقل التي تلي العقدة الجيبية مهمة توليد النبضة الكهربائية لإنقاذ الحياة وهذا ما يدعى نظم الهروب، والذي قد ينشأ في أي مستوى من الجهاز الكهربائي الناقل، فقد يكون في مستوى العقدة الأذينية البطينية أو على مستوى جهاز- هيس- بوركنجي، وفي حال فشل هذه الأجزاء في أخذ زمام المبادرة وتوليد النبضة يحصل توقف القلب. من الضروري استخدام ناظم الخطى القلبي الاصطناعي من أجل استعادة الإيقاع الصحي الطبيعي للقلب، ذلك عن طريق استشعار نبض قلب الشخص، وتسريع القلب عن طريق التحفيز الكهربائي عند اكتشافه أن النبض أصبح أبطأ من حد معين [2].

التحكم التكيفي من أشكال التحكم الأكثر فاعلية، كونها تجعل المتحكم يتفاعل مع بيئته، ويعمل على تطوير أدائه من خلال عامل التكيف الذي يضاف إلى إشارة التحكم.

التحكم الضبابي المعتمد على نموذج مرجعي قابل للتعلم (Fuzzy Model Reference Learning Control: FMRLC)، هو من أنظمة التحكم التكيفية المباشرة، ويتميز بخواص المتحكم الضبابي التقليدي الذي يؤمن سهولة التعامل مع الأنظمة اللاخطية والتي لا يمكن الحصول على النموذج الرياضي الدقيق لها بسهولة، وبخاصية التعلم بشكل محلي، التي تخفف من استهلاك الذاكرة وتعقيدات الحساب للمعالج، وهذا ما يميز FMRLC عن خوارزميات التعلم الأخرى [3]. يقدم هذا المتحكم آلية تحكم فعالة، والتي تعمل على تتبع خرج النظام لخرج نموذج مرجعي، والعمل على جعل إشارة الخطى بينهما أصغر ما يمكن

ظهرت خلال السنوات السابقة أبحاث متعددة عن خوارزميات التحكم بناظم الخطى القلبي.

قام Jyoti Yadav (2011) بتصميم متحكم PID للتحكم بناظم الخطى القلبي، وتم الاعتماد على أساليب متعددة لخوارزميات التحكم مثل (Ziegler-Nichols)، وتصميم متحكم ضبابي وذلك وفق حالات ثلاث للقيمة المرجعية لمعدل ضربات القلب وهي (HR=65 لكبار السن و HR=75 لشخص بالغ عادي و HR=85 لشباب نشط)، وتبين بالمقارنة أن المتحكم الضبابي أعطى استجابة أفضل من متحكم PID بنسبة تجاوز أقل، ولكن بقي التجاوز مع ذلك كبير نسبياً [4]، وهذا ما تم تجاوزه في بحثنا.

قام Jeyanth (2016) بتصميم متحكم PI عصبوني، وتم ضبط بارامترات المتحكم PI من خلال الشبكة العصبونية (Back Propagation: BP)، ووجد أنه متحكم جيد لأنه تخلص من التجاوز، ولكن كان زمن الاستقرار كبير كما انه احتاج لعينة تدريب كبيرة [5].

قام Arunachalam (2016) بتصميم متحكم (fractional-order PID:FOPID) للتحكم بناظم الخطى القلبي، حيث تم ضبط بارامترات المتحكم باستخدام خوارزمية التحكم (Ziegler-Nichols)، وأعطى المتحكم استجابة جيدة من خلال زمن وصول صغير لكن بقي التجاوز موجود في الإشارة [6]

قام Aghdam (2017) بتصميم متحكم ANFIS للتحكم بناظم الخطى القلبي حيث اعتمد على دمج كلا من المتحكم الضبابي والشبكات العصبونية فتميز بالتعلم و السرعة. وتم التحكم بزمن استقرار صغير، لكن كانت نسبة التجاوز في الاستجابة عالية [7].

قام Elnaggar (2019) بتصميم متحكم Fuzzy PD للتحكم بناظم الخطى القلبي، وتم فيه استخدام خوارزمية أمثلة لضبط أرباح التقييم للتحكم الضبابي، كانت الاستجابة جيدة حيث تم تقليل نسبة التجاوز في الإشارة ولكن كان زمن الاستقرار كبير نوعاً ما [8].

2- مشكلة البحث

تكمن المشكلة التي نود حلها في آلية التحكم المستخدمة في ناظم الخطى القلبي، حيث يهدف البحث إلى تحسين استجابة ناظم الخطى القلبي الاصطناعي، من خلال تصميم متحكم ضبابي معتمد على نموذج مرجعي، مهمته تنظيم معدل ضربات القلب تلقائياً مع تقليل التجاوز الناتج عند بداية تشغيل المنظم وتسريع زمن الاستقرار، وإلى تأكيد أهمية خاصية التعلم من خلال المقارنة بين تصحيح إشارة التحكم بعامل تكيف ومن خلال تعديل قاعدة المعرفة للتحكم الضبابي المباشر، حيث أعطت عملية تعديل القواعد نتائج في استجابة النظام أفضل من عملية التكيف.

3- مواد البحث وطرائقه:

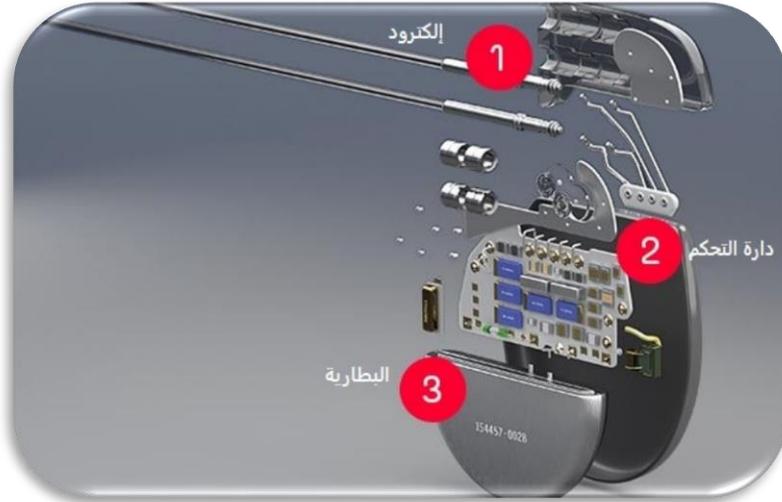
1-3 النموذج الرياضي للقلب والمنظم

ناظم الخطى القلبي pacemaker

يرجع سبب الحركة الإيقاعية للقلب إلى الجهد الذي يحدث بانتظام والذي ينطلق من ناظم الخطى القلبي الطبيعي الموجود في العقدة الجيبية الأذينية (SA)

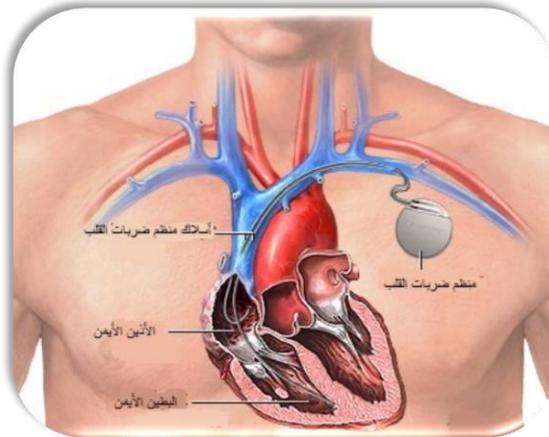
ولكن في بعض الحالات المعينة، ينبض القلب بمعدل أبطأ بكثير مما هو مطلوب، مما يؤدي إلى وضع لا يستطيع القلب فيه توفير إمدادات الدم اللازمة لتلبية المتطلبات المادية للجسم. في هذه الحالة، تكون هناك حاجة إلى توليد نبضة اصطناعية لضمان أن تكون نبضات القلب كافية لتلبية المطالب المادية للجسم. يُطلق على الجهاز القادر على توليد نبضات اصطناعية وتوصيلها إلى القلب باسم ناظم الخطى القلبي Pacemaker.

Pacemaker جهاز طبي يقوم بتنظيم إيقاع القلب من خلال نبضات كهربائية، تصل إلى القلب من خلال المجسات الإلكترونية التي تكون متصلة مع عضلة القلب. الهدف الأساسي لناظم الخطى القلبي هو الحفاظ على معدل ضربات قلب مناسب عند حدوث ببطء القلب، والذي ينتج عن السرعة غير الكافية لناظم الخطى القلبي الطبيعي، أو بسبب وجود قصور في نظام التوصيل الكهربائي. يتكون pacemaker من بطارية ودارة تحكم وأسلاك تقوم بنقل النبضات الكهربائية إلى عضلة القلب الشكل (2) [9].



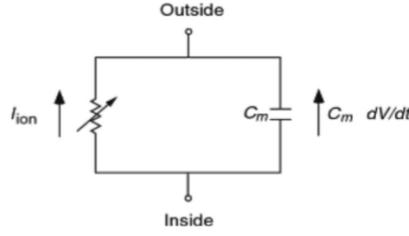
الشكل (2) المكونات الداخلية لـ Pacemaker

يوضح الشكل (3) توضع ناظم الخطى القلبي، حيث يتم وضعه تحت الجلد أسفل عظمة الترقوة، ويتم مرور الأسلاك عبر الوريد تحت الترقوة إلى القلب.



الشكل (3): توضع ناظم الخطى القلبي

تم تطوير نماذج كثيرة لخلايا ناظم الخطى القلبي الطبيعي من عام 1960، تعتمد جميع هذه النماذج على نموذج (Hodgkin, Huxley) الذي درس الفيزيولوجيا الكهربائية للخلايا، وحدد الآليات الأيونية الكامنة وراء حدوث كمون العمل للخلايا، حيث يتم اعتبار الخلايا في العقدة SA مكثفة موصولة على التفرع مع عدة تيارات أيونية [10] كما موضح بالشكل (4)، ومن النماذج التي تعتبر أكثر دقة وأقرب للتمثيل الفيزيولوجي، نموذج (Kaoru) [11] Yanagihara, Akinori Noma, Hiroshi Irisawa: YNI، وهو نموذج يشتمل على عدة تيارات، هي تيار الصوديوم I_{Na} ، وتيار بوتاسيوم I_K ، والتيار البطيء الداخل I_s والتيار المنشط بواسطة فرط الاستقطاب I_h ، والتيار المستقل عن الزمن وهو تيار التسرب I_l . واحداث قياس هذه التيارات (μA).



الشكل(4): نموذج الدارة الكهربائية للخلية [10]

$$C_m \frac{dv}{dt} + i_{Na} + i_k + i_s + i_h + i_l = I_{app} \quad \{1\}$$

هذه التيارات الأيونية يتم وصفها بالمعادلات التالية [11]:

$$I_{Na} = 0.5m^3h(v - 30) \quad \{2\}$$

$$I_s = (0.95d + 0.05)(0.95f + 0.05) \left(e^{\left(\frac{v-10}{15}\right)} - 1 \right) \quad \{3\}$$

$$I_h = 0.4q(v + 45) \quad \{4\}$$

$$I_k = 0.7p \frac{e^{(0.0277(v+90))-1}}{e^{0.0277(v+40)}} \quad \{5\}$$

$$I_l = 0.8 \left(1 - e^{\left(-\frac{v+60}{20}\right)} \right) \quad \{6\}$$

لدينا 6 متغيرات m, h, p, d, f, q تشير إلى حالة تفعيل أو عدم تفعيل التيار الأيوني، ويتم الحصول عليهما من معادلة تفاضلية من الدرجة الأولى

$$\frac{dy}{dt} = \alpha_y(1 - y) - \beta_y y \quad \{7\}$$

حيث α, β ثوابت تشير إلى إغلاق أو فتح القناة الأيونية، بالتقريب يصبح النموذج

$$C_m \frac{dv}{dt} + I_{ion} = C_m \frac{dv}{dt} + \frac{v}{R_m} = I_{app} \quad \{8\}$$

حيث R_m, C_m مقاومة وسعة الخلية، باستخدام تحويل لابلاس يصبح تابع النقل للمنظم

$$\frac{v(s)}{I_{app}(s)} = \frac{R_m}{R_m C_m s + 1} \quad \{9\}$$

يحاكي النموذج إمكانات الحركة التلقائية، ويوضح علاقة الجهد بالتيار ونلاحظ أنه يمثل مرشح تمرير ترددات منخفضة [4]، ويكون تابع النقل له من الشكل

$$G_P(S) = \frac{8}{S+8} \quad \{10\}$$

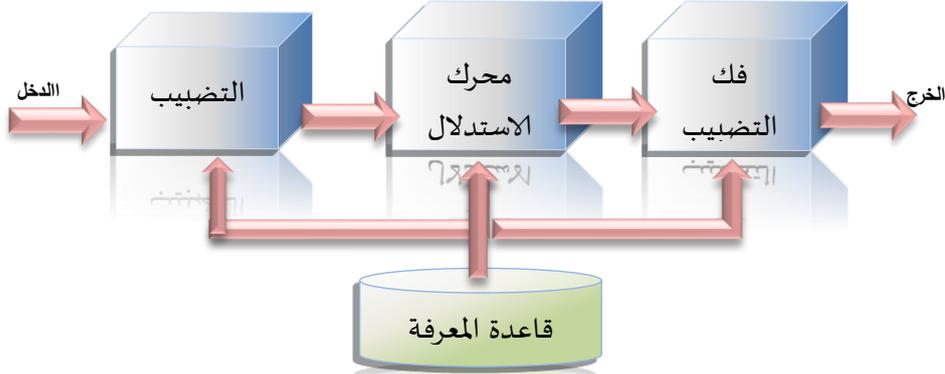
تم اعتبار القلب نظام من الدرجة الثانية [12] ويكون تابع النقل له

$$G_h(S) = \frac{169}{S^2+20.8S} \quad \{11\}$$

2-3 المتحكم الضبابي المعتمد على نموذج مرجعي

1-2-3 المتحكم الضبابي Fuzzy controller

التحكم في النظام اللاخطي هو المعيار الرئيسي في نظم التحكم، حيث تعاني هذه الأنظمة من العديد من مشكلات التحكم غير السهلة بسبب سلوكها الديناميكي الذي يجعل من الصعب إيجاد نموذج رياضي دقيق لها، لذا ظهر المنطق الضبابي للتعامل مع هذه الأنظمة المعقدة بدلا من طرق التحكم التقليدية. وبين الشكل (5) مكونات النظام الضبابي



الشكل (5) مكونات النظام الضبابي

- أ- التضبيب هو تحويل الدخل الواضح إلى ضبابي أي تصبح المتغيرات الرياضية متغيرات لغوية ذات قيم لغوية.
- ب- قاعدة المعرفة knowledge base هي نموذج لخبرة الإنسان في العلاقة المطلوبة (المرغوبة) بين دخل وخرج النظام الضبابي، وتتألف من:
 - Fuzzy set عبارة عن مجموعة من الأرقام الحقيقية ذات العضوية الجزئية في المجموعة وتتميز عن المجموعة الواضحة التقليدية crisp set بأن انتماء العناصر لها نسبي، ويتم تحديد درجة انتماء العنصر لها من خلال دالة انتماء μ .

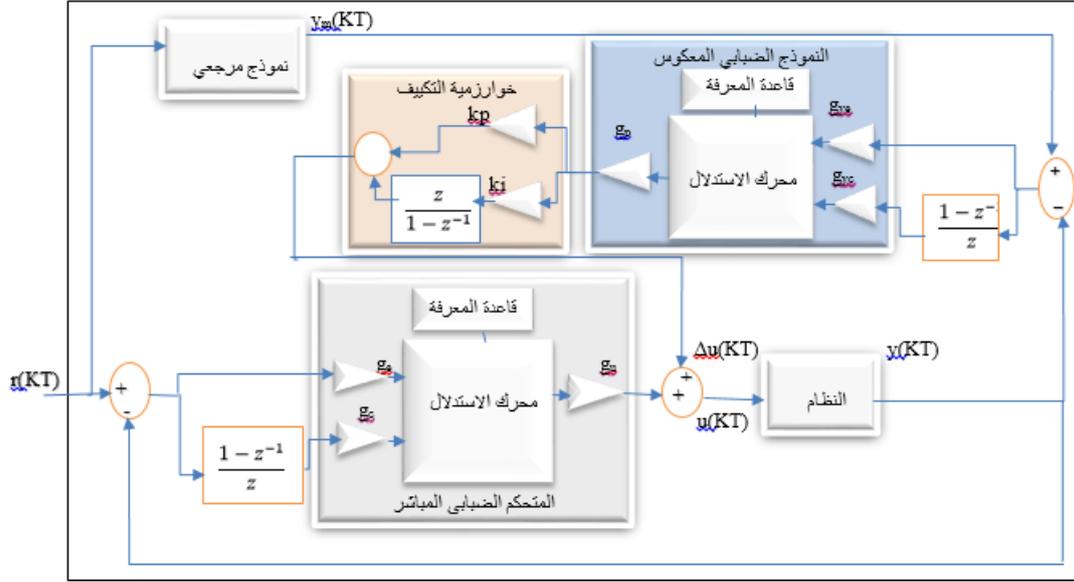
Rule base هي مجموعة من الجمل الشرطية if-then تحدد علاقة الدخل بالخرج، وتصاغ بالشكل التالي:

If (antecedent) then (consequent)

- ج- محرك الاستدلال inference engine: هو قلب النظام الضبابي يقوم بمحاكاة طريقة الانسان في اتخاذ القرار، حيث يتم الحصول على الخرج من الدخل الضبابي بناء على rule base والعمليات الضبابية الأساسية.
 - د- فك التضبيب: تحويل الخرج من قيمة ضبابية إلى قيمة واضحة
- إن التحكم الضبابي مبني على مجموعة من القواعد الضبابية التي تلخص خبرة الشخص في هذا المجال [13]. ولكن في بعض الأحيان يجد المصمم أنه من الصعب الحصول على قواعد ضبابية ذات معلومات كافية عن النظام. في هذه الحالة سيكون خرج المتحكم الضبابي الأولي غير مناسب للتحكم في العملية، ونحتاج إلى تصحيحه مع الوقت، وهذه المشكلة سيتم حلها في بحثنا.

2-2-3 المتحكم الضبابي المعتمد على نموذج مرجعي مع خوارزمية تكيف Fuzzy model reference adaptive controller:FMRAC

يستخدم FMRAC الموضح بالشكل (6) آلية التكيف التي تعتمد على معرفة المقدار الواجب إضافته إلى خرج المتحكم لجعل إشارة الخطى بين خرج النظام وخرج النموذج المرجعي أصغر ما يمكن [14].



الشكل (6) المخطط الصندوقي للمتحكم FMRAC

المكونات الأساسية لهذا المتحكم هي:

1- المتحكم الضبابي المباشر direct fuzzy control

إن مداخل المتحكم الضبابي المباشر هي عبارة عن الخطى بين الإشارة المرجعية $r(KT)$ وخرج النظام $y(KT)$. وتغير الخطى. الموصوفة كما يلي:

$$e(KT) = r(KT) - y(KT) \quad \{12\}$$

$$c(KT) = \frac{e(KT) - e(KT-T)}{T} \quad \{13\}$$

لمرونة تنفيذ المتحكم الضبابي يتم جعل نطاق تغير كل من المداخل والخرج ضمن المجال $[-1, +1]$ من خلال ما يسمى بأرباح التقييس، حيث g_e, g_c, g_u هي أرباح تقييس كل من الخطى $e(KT)$ ، وتغير الخطى $c(KT)$ وإشارة التحكم $u(KT)$.

يتم تمثيل قاعدة المعرفة للمتحكم الضبابي بمجموعة من قواعد if-then

$$\text{if } \tilde{e} \text{ is } E^j \text{ and } \tilde{c} \text{ is } C^l \text{ then } \tilde{u} \text{ is } U^{j,l}$$

حيث \tilde{e}, \tilde{c} هي المتغيرات اللغوية لكل من $e(KT)$ و $c(KT)$ ، و \tilde{u} المتغير اللغوي لإشارة التحكم $u(KT)$ ، هي دالة

انتماء $e(KT)$ ذات الرقم j ، C^l هي دالة انتماء $c(KT)$ ذات الرقم l ، U هي القيمة اللغوية للخرج u . [13]

2- النموذج المرجعي reference model

هو نموذج لكامل النظام في الحلقة المغلقة يحقق متطلبات الأداء المطلوبة (نموذج كيف يريد المصمم أن يكون خرج النظام). من الممكن أن يكون نظام خطي أو لا خطي، متغير مع الزمن أو غير متغير، من الدرجة الأولى أو الثانية، ولكن من المهم الانتباه عند اختيار النموذج المرجعي ألا يكون معقداً لكي يسهل على المتحكم ملاحظته. إن أداء كامل النظام سيتم تقييمه بناء على النموذج المرجعي من خلال إشارة الخطى $y_e(KT)$ حيث

$$y_e(KT) = y_m(KT) - y(KT) \quad \{14\}$$

حيث $y_m(KT)$ خرج النموذج المرجعي، و $y(KT)$ خرج النظام.

3- آلية التكيف adaptive mechanism

هي الآلية المسؤولة عن تعديل خرج المتحكم الضبابي المباشر لجعل كامل النظام يسلك سلوك مشابه للنموذج المرجعي، من خلال معرفة مقدار الخطى بين خرج النموذج المرجعي وخرج النظام، وجعل هذا الخطى يقترب من الصفر.

تتكون آلية التكيف من النموذج الضبابي المعكوس وخوارزمية التكيف.

• النموذج الضبابي المعكوس fuzzy inverse model

هو نظام ضبابي يمثل الديناميكيات العكسية للنظام بشكل تقريبي. الهدف منه الحصول على أفضل $p(KT)$ التي تجعل $y_e(KT)$ أصغر ما يمكن، أي يعتمد على معرفة الخطى الموجود في خرج النظام، وإيجاد مقدار التصحيح الواجب إضافته إلى دخل النظام للتخلص من هذا الخطى، بمعنى آخر يوضح كيف لدخل النظام أن يتغير ليُجعل خرج النظام أقرب ما يمكن لخرج النموذج المرجعي. يملك النموذج الضبابي المعكوس دخلين هما الخطى بين خرج النموذج المرجعي وخرج النظام $y_e(KT)$ ، وتغير هذا الخطى $y_c(KT)$

$$y_e(KT) = y_m(KT) - y(KT) \quad \{15\}$$

$$y_c(KT) = \frac{y_e(KT) - y_e(KT-T)}{T} \quad \{16\}$$

بشكل مشابه للمتحكم الضبابي المباشر، يملك النموذج الضبابي المعكوس أرباح تقيس g_{ye}, g_{yc}, g_p التي تؤثر على أداء كامل النظام. تحدد g_p مقدار التكيف، وتحدد g_{yc} التخامد في آلية التكيف أي عندما يكون الخطى بين خرج النظام وخرج النموذج المرجعي كبير. هناك اختلاف بين الإشارة المراد إدخالها إلى النظام (مقدار التصحيح $p(KT)$) إذا كان هذا الخطى يقترب من الصفر أو يبتعد عنه، لذا من الضروري أخذ مقدار التغير بعين الاعتبار لمنع الاهتزازات في النظام.

قواعد المعرفة في النموذج المعكوس تكون قواعد if-then

if \tilde{y}_e is y_e^n and \tilde{y}_c is y_c^s then \tilde{p} is $p^{n,s}$

حيث y_c^s, y_e^n هي القيم اللغوية لكل من y_c, y_e و $p^{n,s}$ هي القيمة اللغوية للخرج p .

• خوارزمية التكيف adaptive algorithm

تعتمد هذه الخوارزمية على خرج النموذج الضبابي المعكوس والذي ينبغي إضافته إلى خرج المتحكم الضبابي المباشر، وذلك يتم من خلال متحكم PI، حيث يعتبر $p(KT)$ دخل المتحكم، وخرجه $\Delta u(KT)$ الذي يعطى بالمعادلة التالية:

$$\Delta u(KT) = k_p p(KT) + \frac{z}{1-z^{-1}} p(KT) \quad \{17\}$$

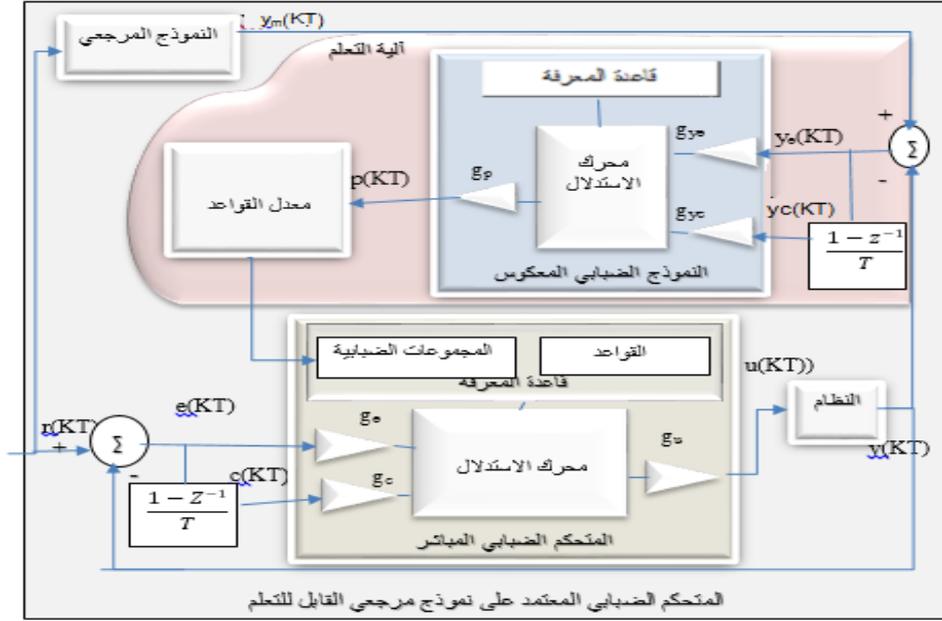
نلاحظ أن مقدار التعديل $p(KT)$ يعمل على تكيف بارامترات المتحكم PI.

3-2-3 متحكم FMRLC

يستخدم FMRLC الموضح في الشكل (7) آلية التعلم التي تستعرض بيانات المتحكم الضبابي المباشر، وتقوم بتقييم أدائه الحالي، ومن ثم ضبطه بشكل أوتوماتيكي بناء على خصائص الأداء المطلوبة التي يتم الحصول عليها من نموذج مرجعي لكامل النظام في الحلقة المغلقة.

بشكل عام، تقوم حلقة التحكم بضبط المسار من الإشارة المرجعية $r(KT)$ إلى خرج النظام $y(KT)$ عن طريق

إشارة التحكم $u(KT)$ ، وتجعل حلقة التعلم خرج النظام $y(KT)$ يتبع خرج النموذج المرجعي. [3] $y_m(KT)$



الشكل (7) المخطط الصندوقي للتحكم الضبابي المعتمد على نموذج مرجعي القابل للتعلم

المكونات الأساسية للتحكم:

- 1- المتحكم الضبابي المباشر
- 2- النموذج المرجعي
- 3- آلية التعلم

يصمم كل من المتحكم الضبابي المباشر، والنموذج المرجعي بشكل مشابه لما تم تصميمه في FMRAC والاختلاف بين المتحكمين يكمن في آلية إضافة التعديل لخرج المتحكم المباشر، حيث يعتمد FMRAC على خوارزمية تكيف تعمل على إضافة مقدار التصحيح إلى خرج المتحكم بشكل دائم ومباشر، أما FMRLC يعتمد على تعليم المتحكم، وذلك عن طريق استخدام مقدار التصحيح لضبط قواعد المتحكم الضبابي، وبالتالي تجنب عملية التصحيح عند المرور بنفس الخطى مستقبلاً.

آلية التعلم في FMRLC هي الآلية المسؤولة عن تعديل قاعدة المعرفة للمتحكم الضبابي المباشر لجعل كامل النظام يسلك سلوك مشابه للنموذج المرجعي، من خلال معرفة مقدار الخطى بين خرج النموذج المرجعي وخرج النظام، وجعل هذا الخطى يقترب من الصفر.

تتكون آلية التعلم من النموذج الضبابي المعكوس ومعدل قاعدة المعرفة.

- النموذج الضبابي المعكوس fuzzy inverse model

يصمم بشكل مشابه للنموذج الضبابي المعكوس في FMRAC

- معدل قاعدة المعرفة knowledge base modifier

يمثل معدل قاعدة المعرفة كيفية إضافة مقدار التصحيح \$p(KT)\$ الذي تم الحصول عليه في النموذج الضبابي المعكوس إلى إشارة خرج المتحكم الضبابي المباشر في اللحظة \$t=KT-T\$ وهي \$u(KT-T)\$، والتي نتج عنها الخطى \$y_e\$، بهدف الحصول على إشارة تحقق خطأ أقل بين خرج النموذج المرجعي وخرج النظام في المستقبل. ويصبح خرج المتحكم الضبابي

$$u(KT-T)=u(KT-T)+p(KT) \quad \{18\}$$

هناك عدة طرق للقيام بعملية التعديل [15]. منها طريقة إزاحة مراكز دالات الانتماء للخروج. للقيام بعملية التعديل هذه، نعتمد على تمثيل القواعد للمتحكم الضبابي المباشر على شكل مصفوفة عناصرها هي مراكز دالات انتماء الخروج.

لنفرض $b_i(KT-T)$ هو مركز دالة انتماء الخروج $u_i(KT-T)$ الذي تم تفعيله من خلال قواعد المتحكم الضبابي المباشر في اللحظة $t=KT-T$. يعتمد معدل القواعد على إزاحة $b_i(KT-T)$ بمقدار $p(KT)$. تتم العملية وفق خطوتين:

1- تحديد القواعد المفعلة في اللحظة $t=KT-T$ ، والقاعدة المفعلة هي القاعدة التي قوة قدها أكبر من 0 أي تحقق

$$\mu_i(e(KT - T), c(KT - T)) > 0 \quad \{19\}$$

2- إزاحة مركز دالة الانتماء للخروج المفعل، ويصبح

$$b_i(KT) = b_i(KT - T) + p(KT) \quad \{20\}$$

3-3 المتحكم المقترح

1-3-3 مشكلة التحكم بناظم الخطى القلبي

تكمن المشكلة في جعل معدل ضربات قلب المريض يتبع إشارة مرجعية معطاة. النظام لدينا عبارة عن تابع نقل لناظم الخطى القلبي الطبيعي موصول على التسلسل مع تابع نقل للقلب، الممثلين بالمعادلات {10}، {11}.

دخل النظام هو إشارة الخطى بين معدل ضربات القلب المرغوب $HRS(t)$ ومعدل ضربات القلب الفعلي $HR(t)$ ، وخرج النظام معدل ضربات القلب الفعلي

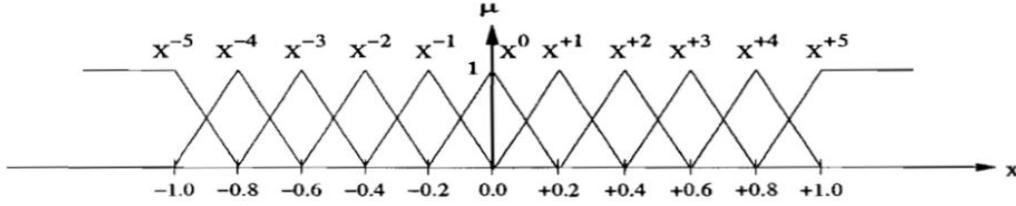
2-3-3 تصميم FMRAC

تصميم المتحكم FMRAC يتضمن:

- 1- تصميم المتحكم الضبابي المباشر
- 2- تحديد النموذج المرجعي الذي يمثل الأداء المطلوب
- 3- تصميم النموذج الضبابي المعكوس
- 4- اختيار أرباح التقييم لكل من المتحكم الضبابي المباشر والنموذج الضبابي المعكوس.
- 5- اختيار أرباح المتحكم PI

1- المتحكم الضبابي المباشر

مداخل المتحكم الضبابي المباشر هي الخطى بين معدل ضربات القلب المطلوب ومعدل ضربات القلب الفعلي $e(KT)$ ، والتغير في هذا الخطى $c(KT)$ ، وخرج المتحكم هو إشارة كهربائية $u(KT)$ تذهب إلى القلب. من أجل كل دخل للمتحكم الضبابي تم اختيار 11 دالة انتماء من الشكل المثلثي المتجانس موزعة على كامل نطاق تغير الدخل كما موضح بالشكل (8).



الشكل (8) دالات انتماء الدخل للمتحكم الضبابي المباشر

و 11 دالة انتماء لخرج المتحكم تكون مثلثية الشكل بعرض 0.4، وموزعة على كامل نطاق تغير الخرج وتم اختيار أرباح التقييم $g_e=1/450, g_c=1/450, g_u=1$ عدد القواعد يساوي عدد دالات الانتماء مرفوعة لأس عدد المداخل أي $(11)^2=121$ ، وتم وضع مصفوفة القواعد المناسبة له، وكان معدل أخذ العينات 180ms.

2- النموذج المرجعي

كما ذكرنا، هو نموذج يمثل كيف يريد المصمم لخرج النظام أن يكون، وهنا يتم اختياره نموذج من الدرجة الأولى، والمعادلة التفاضلية له من الشكل

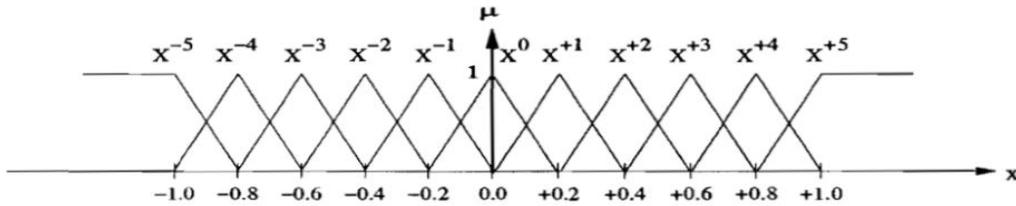
$$\frac{dy_m(t)}{dt} + 20y_m(t) = 20r(t) \quad \{21\}$$

بإجراء تحويل لابلاس يصبح تابع النقل

$$\frac{y_m(s)}{r(s)} = G_m(s) = \frac{20}{s+20} \quad \{22\}$$

3- النموذج الضبابي المعكوس

مدخل النموذج الضبابي المعكوس هي الخطى بين خرج النموذج المرجعي وخرج النظام $y_e(KT)$ ، والتغير في هذا الخطى $y_c(KT)$ ، وخرجه هي إشارة التصحيح $p(KT)$ التي تذهب إلى معدل القواعد لتعديل قاعدة المعرفة للمتحكم الضبابي المباشر. من أجل كل دخل للنموذج الضبابي المعكوس تم اختيار 11 دالة انتماء من الشكل المثلي المتجانس موزعة على كامل نطاق تغير الدخل كما موضح بالشكل (9).



الشكل (9) دالات انتماء الدخل في النموذج الضبابي المعكوس

و 11 دالة انتماء للخروج تكون مثلثية موزعة على كامل نطاق تغير الخرج، وتم اختيار أرباح التقييم $g_{ye}=1/50, g_{yc}=1/90, g_p=1.1$ بشكل مشابه للنموذج الضبابي المعكوس سيكون لدينا 121 قاعدة، وباعتبار النموذج الضبابي المعكوس متحكم ضبابي يملك معلومات أولية تعكس ديناميكية النظام، تكون مصفوفة القواعد كما موضح بالجدول (1)

الجدول (1) مصفوفة القواعد للنموذج الضبابي المعكوس

$p^{n,s}$		y_c^s										
		-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
y_e^n	-5	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-8	-6	-4	-2	0.0
	-4	-1	-1	-1	-1	-1	-8	-6	-4	-2	0.0	+2
	-3	-1	-1	-1	-1	-8	-6	-4	-2	0.0	+2	+4
	-2	-1	-1	-1	-8	-6	-4	-2	0.0	+2	+4	+6
	-1	-1	-1	-8	-6	-4	-2	0.0	+2	+4	+6	+8
	0	-1	-8	-6	-4	-2	0.0	+2	+4	+6	+8	+1
	+1	-8	-6	-4	-2	0.0	+2	+4	+6	+8	+1	+1
	+2	-6	-4	-2	0.0	+2	+4	+6	+8	+1	+1	+1
	+3	-4	-2	0.0	+2	+4	+6	+8	+1	+1	+1	+1
	+4	-2	0.0	+2	+4	+6	+8	+1	+1	+1	+1	+1
	+5	0.0	+2	+4	+6	+8	+1	+1	+1	+1	+1	+1

4- خوارزمية التكيف

تعتمد خوارزمية التكيف على خرج النموذج الضبابي المعكوس المطلوب إضافته إلى خرج المتحكم الضبابي المباشر لجعل الخطى بين النظام والنموذج المرجعي أصغر ما يمكن. حيث يعتبر $p(KT)$ دخل لمتحكم PI وخرج هذا المتحكم $\Delta u(KT)$ يتم إضافته إلى إشارة التحكم لتصبح بالشكل التالي:

$$u(KT) = u(KT) + \Delta u(KT) \quad \{23\}$$

أرباح المتحكم PI هي $K_p=50, K_i=2.2$

3-3-3 تصميم FMRLC

يتم تصميم المتحكم وفق التالي:

1- المتحكم الضبابي المباشر: يصمم بشكل مشابه للمتحكم الضبابي المباشر في FMRAC ولكن مع مصفوفة قواعد ثابتة.

2- النموذج المرجعي: يتم اختيار نفس النموذج المرجعي في FMRAC كوننا نتحكم بنفس النظام ونريد نفس متطلبات أداء الحلقة المغلقة.

3- النموذج الضبابي المعكوس: يصمم بشكل مشابه للنموذج الضبابي المعكوس الموجود في FMRAC

4- معدل قاعدة المعرفة: وهي نقطة الاختلاف عن FMRAC

مثلاً لنفرض أن الخطى في لحظة سابقة $e(KT-T)$ ينتمي إلى المجموعتين الضبابيتين (E^{+2}, E^{+3})

$$\mu_{+2}e(KT - T) > 0 \quad , \quad \mu_{+3}e(KT - T) > 0$$

وتغير الخطى في تلك اللحظة $c(KT-T)$ ينتمي إلى المجموعتين الضبابيتين (C^{-4}, C^{-3})

$$\mu_{-4}c(KT - T) > 0 \quad , \quad \mu_{-3}c(KT - T) > 0$$

وكانت إشارة التصحيح المتولدة عن هذه القيم هي $p(KT)=0.1$ ، ستتم إزاحة مراكز دالات انتماء الخرج للقواعد المفعله بمقدار هذه القيمة لتجنب هذا الخطى في المستقبل، وتصبح مصفوفة القواعد المعدلة للمتحكم الضبابي المباشر كما موضح بالجدول (2)

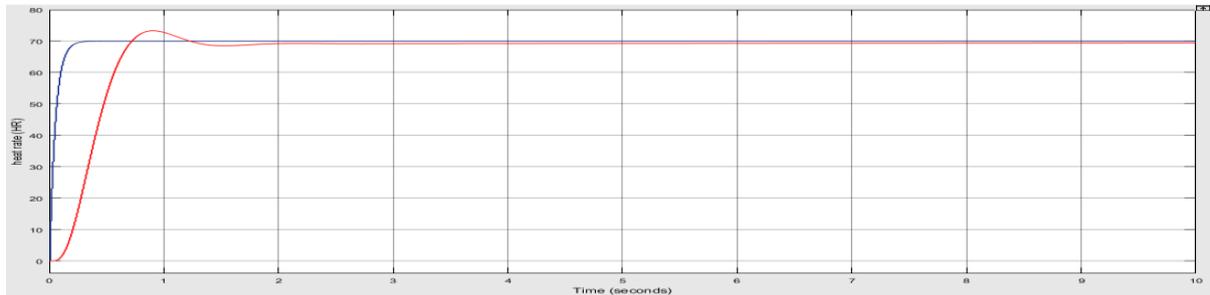
الجدول (2) مصفوفة قواعد معدلة للمتحكم الضبابي المباشر

U^{kj}		e^k											
		-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	
e^k	-5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	-1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	+1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	+2	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	+3	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	+4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	+5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

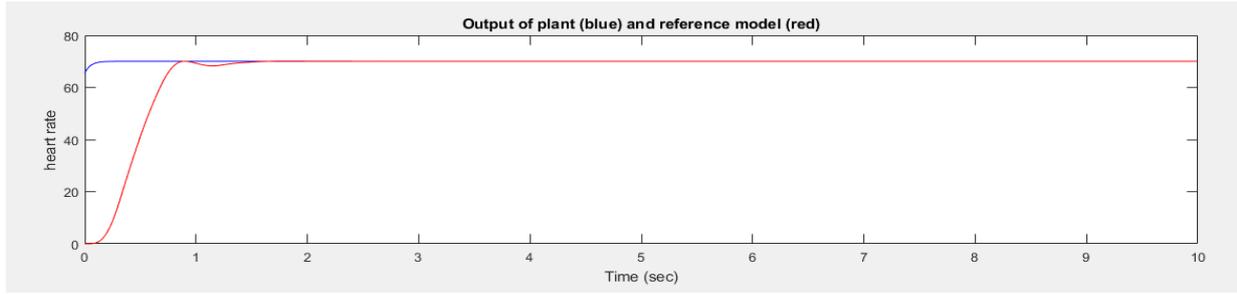
نلاحظ أن القواعد التي لم يتم تفعيلها في اللحظة $t=KT-T$ لم تتم إزاحة مراكز دالات انتماء الخرج فيها وبالتالي عملية التعلم تمت بشكل محلي.

4- المحاكاة والنتائج

تم تصميم المتحكم ومحاكاته من خلال برنامج Matlab. عند تطبيق إشارة مرجعية $r(KT)=70$ ، كانت استجابة النظام باعتماد المتحكمين المصممين كما مبين بالأشكال (10) و(11)



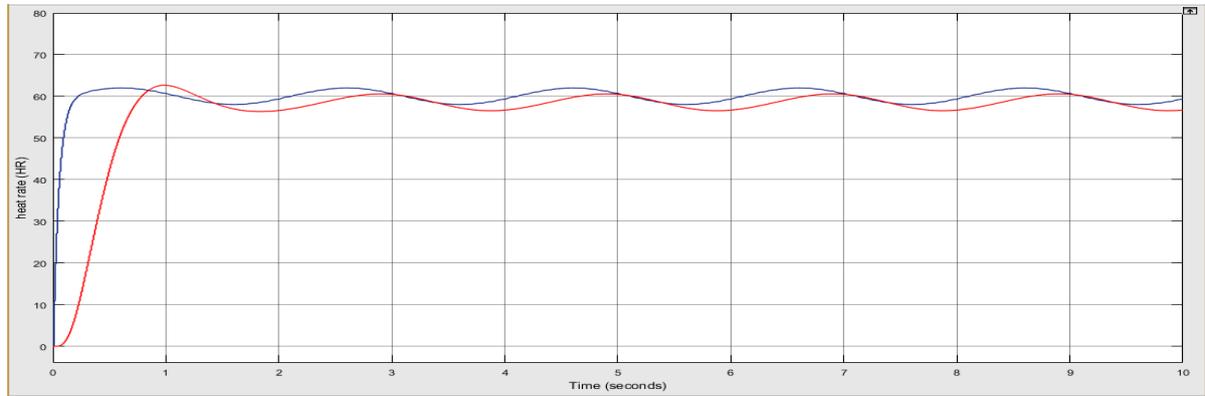
الشكل (10) استجابة النظام عند استخدام متحكم FMRAC



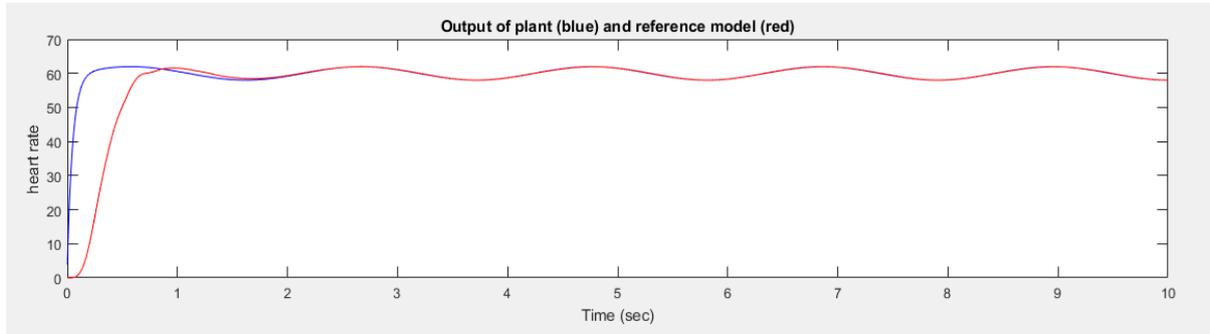
الشكل (11) استجابة النظام عند استخدام متحكم FMRLC

نلاحظ أن آلية التعلم حققت استجابة مقبولة بنسبة تجاوز قليلة، وتجنب لخطأ الحالة المستقرة الذي وجد في المتحكم FMRAC.

وعند تطبيق إشارة مرجعية متغيرة كإشارة اختبار لآلية التكيف ولآلية التعلم كانت الاستجابة كما مبينة بالأشكال (12) و(13)



الشكل (12) استجابة النظام لإشارة مرجعية متغيرة عند استخدام FMRAC



الشكل (13) استجابة النظام لإشارة مرجعية متغيرة عند استخدام FMRLC

نلاحظ من استجابة النظام في الحالتين أن آلية التعلم منعت من تكرار الخطى في المستقبل، بينما آلية التكيف قامت في كل مرة بإضافة مقدار التصحيح دون تجنب تكرار الخطى، مما سبب تأخير في ملاحقة الإشارة.

5- المناقشة

تمت مقارنة نتائج المتحكمين المصممين مع عدة متحكمات من خلال الجدول التالي
الجدول (3) مقارنة استجابة المتحكم المقترح مع استجابة متحكمات أخرى

نوع المتحكم	Rise time(sec)	Settling time(sec)	Overshoot%
PID[4]	0.36	1.06	5.48

Overhoot%	Settling time(sec)	Rise time(sec)	نوع المتحكم
2.51	0.74	0.29	Fuzzy[4]
2.9	0.27	0.13	FOPID[6]
1.5	1.97	1.39	ANFIIS[7]
0.4	2	0.5	FPD[8]
3.3	1.2	0.3	FMRAC
0.2	0.9	0.4	FMRLC

من الجدول (3) يتبين أن المتحكم FMRLC حقق تحكماً فعالاً بناظم الخطى القلبي، حيث أمن الوصول إلى الإشارة المطلوبة بنسبة تجاوز صغيرة جداً، وتم الحصول على زمن وصول صغير جداً، وزمن استقرار مقبول.

6- الخلاصة

تعتبر آلية اتخاذ القرار لدى الإنسان آلية سريعة يتم العمل على جعل المتحكمات تعتمد عليها لتحسين المتحكمات المصممة، وخاصة في الأنظمة الحساسة مثل الأجهزة الطبية، لذا تم العمل على تصميم متحكمات ذكية عدة؛ ابتداءً من متحكم ضبابي، ومتحكم ANFIS ومتحكمات أخرى. وفي بحثنا تم تصميم متحكم FMRAC ومتحكم FMRLC الذي تميز بخاصية التعلم التي تحاكي الخلايا العصبية لدى الإنسان دون الحاجة إلى عينات تدريب كما في الشبكات العصبونية، وتم تطوير أداء ناظم الخطى القلبي من خلاله وحقق استجابة بنسبة تجاوز منخفضة بحدود 0.2%، وزمن استقرار قليل 0.9 sec، وتمت مقارنة التحكم التكيفي مع التحكم المتعلم، وبنتيجة البحث تبين أن التعلم أفضل من التكيف في قدرته على تصحيح الخطى لمرة واحدة دون السماح له بالتكرار مستقبلاً.

7- التوصيات

باعتتماد المتحكم FMRLC نأمل العمل في الدراسات المستقبلية على التحكم بناظم الخطى القلبي وفق:

- ✓ حالات عدة للجسم (راحة، ومشى، وممارسة رياضة).
- ✓ نماذج أخرى لتمثيل النشاط الكهربائي للقلب مثل نموذج van der pol.
- ✓ استخدام إشارة التخطيط الكهربائي للقلب كإشارة مرجعية للنظام.

8- المراجع

المراجع الأجنبية:

- 1- Li, P., Lines, G. T., Maleckar, M. M., & Tveito, A. (2013). Mathematical models of cardiac pacemaking function. *Frontiers in Physics*, 1, 20.
- 2- Kurcheti, K. K. (2012). Understanding and implementing different modes of pacemaker.
- 3- Layne, J. R., & Passino, K. M. (1996). Fuzzy model reference learning control. Master's thesis, Dept. of Elec. Eng., The Ohio State Univ (1992).
- 4- Yadav, J., Rani, A., & Garg, G. (2011). Intelligent heart rate controller for cardiac pacemaker. *International Journal of Computer Applications*, 36(7), 22-29.

- 5- Castro, V. J. F., & Malathi, R. (2016). Design of advanced control strategies for cardiovascular system. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 1960-1966.
- 6- Arunachalam, S. P., Kapa, S., Mulpuru, S. K., Friedman, P. A., & Tolkacheva, E. G. (2016, November). Intelligent fractional-order PID (FOPID) heart rate controller for cardiac pacemaker. In 2016 IEEE Healthcare Innovation Point-Of-Care Technologies Conference (HI-POCT) (pp. 105-108). IEEE.
- 7- Aghdam, A. D., Dabanloo, N. J., Sattari, M., Attarodi, G., & Hemmati, N. (2017, September). Design and processing of a novel algorithm using ANFIS for new generation of cardiac pacemakers. In 2017 Computing in Cardiology (CinC) (pp. 1-4). IEEE.
- 8- Elnaggar, M. I., Ashour, A. S., Guo, Y., El-Khobby, H. A., & Abd Elnaby, M. M. (2019). An optimized Mamdani FPD controller design of cardiac pacemaker. *Health Information Science and Systems*, 7(1), 2.
- 9- Mattson, A. R., Eggen, M. D., & Iazzo, P. A. (2019). The Cardiac Pacemaker: A Crossroads of Engineering and Medicine. In *Engineering in Medicine* (pp. 153-178). Academic Press.
- 10- Shi, W. V., & Zhou, M. (2011). Optimal single-pulse for pacemakers based on a sinoatrial model. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18(1), 348-354.
- 11- Yanagihara, K., Noma, A., & IRISAWA, H. (1980). Reconstruction of sino-atrial node pacemaker potential based on the voltage clamp experiments. *The Japanese journal of physiology*, 30(6), 841-857.
- 12- Biswas, S. C., A. Das, and P. Guha. (2006) "Mathematical model of cardiovascular system by transfer function method." *Calcutta Medical Journal* 4 ,15-17.
- 13- Kovacic, Z., & Bogdan, S. (2018). *Fuzzy controller design: theory and applications*. CRC press.
- 14- Reay, D. S., & Dunnigan, M. W. (1997). Learning issues in model reference based fuzzy control. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 144(6), 605-611.
- 15- Zheng, L., & Xu, G. (2016, August). Robust autopilots based on the fuzzy model reference learning control. In 2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA) (pp. 1062-1069). IEEE.