

نظام التحكم التكييفي بضربات القلب بالاعتماد

على المتحكم PD المؤلف ضبابياً.

إعداد الباحثين

م. أحمد عيسى

د. م. الفت جولحة

استاذ مساعد في قسم هندسة الحاسبات
والتحكم الآلي، اللاذقية، سوريا

طالب دراسات عليا (ماجستير) في قسم هندسة
الحاسبات والتحكم الآلي، اللاذقية، سوريا.

الملخص

يتعرض نظام التوصيل الكهربائي في القلب إلى عدة أمراض تؤدي إلى خلل في إيقاع القلب أو ما يسمى "اللانظيمات"، والتي تكون في حالات شديدة منها مهددة للحياة، وبشكل خاص في حال انخفاض معدل ضربات القلب إلى ما دون القيمة اللازمة لاحتياجات الجسم من الدم؛ مما يستدعي زرع ناظم الخطى القلبي ليعيد معدل ضربات القلب إلى القيمة المطلوبة. يهدف البحث إلى تصميم متحكم الناظمة القلبية بالاعتماد على دمج المتحكم PD والمنطق الضبابي، إذ تقوم الوحدة الضبابية بضبط قيم بارامترات المتحكم PD لتكيفه مع تغيرات معدل ضربات القلب المطلوبة. تم تجربة أكثر من وحدة ضبابية ببارامترات مختلفة وهي نوع توابع العضوية، وعدد توابع العضوية لكل متحول دخل او خرج، وقد تم التوصل إلى أن توابع العضوية من النوع شبه المنحرف قد أعطت استجابة محسنة مع مختلف القيم المرجعية لمعدل ضربات القلب المطلوبة، إذ بلغت نسبة التجاوز 0.17% وبزمن استقرار مقداره 0.8 ثانية مع خطأ حالة دائمة صفري. وبذلك توصل نظام التحكم التكييفي بضربات القلب بالاعتماد على PD المؤلف ضبابياً إلى تحسين الاستجابة وتكيفها مع مطالبات مختلفة لمعدل ضربات القلب المطلوبة عند أوضاع حركية مختلفة للمريض هي: الراحة، المشي، الجري، والإجهاد.

الكلمات المفتاحية: المتحكم الضبابي بناظم الخطى القلبي، التحكم التكييفي بمعدل

ضربات القلب، المتحكم PD الضبابي.

Adaptive Heart Rate Control System Based on Fuzzy Tuned PD Controller

Presented by:

Dr. Eng. OULFAT JOLAHA Eng. AHMED EISSA
Assistant Professor in the Master student in the Department
Department of Computer and of Computer and Automatic
Automatic Control Engineering, Control Engineering, Latakia,
Latakia, Syria Syria

Abstract

The cardiovascular conductive system is exposed to several diseases that lead to an imbalance in the heart's rhythm, or the so-called "arrhythmia", which in severe cases is life-threatening, especially if the heart rate drops below the value necessary for the body's blood needs; This requires the implantation of a pacemaker to restore the heart rate to the desired value. This paper aims to design a pacemaker controller based on the integration of the PD controller and fuzzy logic, where the fuzzy unit adjusts the parameters of the PD controller to adapt it to the required heart rate changes. five fuzzy units has been tested with different parameters, namely: the type of membership function, and the number of membership functions for each input or output variable. It was concluded that the trapezoidal-type membership functions have given an improved response with the different required heart rate reference values, as the overshoot rate was 0.17%, with a settling time of 0.8 seconds, and zero steady-state error. Thus, the adaptive heart rate control system based on the fuzzy-tuned PD optimizes the response and adapts it to different heart rate amplitudes required in different movement modes: rest, walking, running, and fatigue.

Key Words: Fuzzy pacemaker's controller, Adaptive Heart Rate Control, Fuzzy PD controller.

مقدمة

تعد أمراض القلب من أهم العوامل التي تؤدي إلى الوفاة، وبشكل خاص بوجود نمط الحياة العصري الذي يعيشه الإنسان في الوقت الحالي. إحدى المشاكل الهامة التي تواجه مرضى القلب هي اختلال إيقاع القلب Arrhythmia إذ قد تؤدي في حالات شديدة منها إلى فشل القلب في تلبية احتياجات الجسم الفيزيولوجية، وفي بعض الأحيان قد تؤدي إلى السكتة القلبية heart arrest [1]. يتم ضبط إيقاع القلب عن طريق نظام توصيل كهربائي في القلب، يلعب فيه نسيج خاص يدعى "العقدة الجيبية الأذينية" Sinus Atrial node دور منظم ضربات القلب أو ناظم الخطى القلبي Pacemaker والذي ينشأ عنه معدل ضربات قلب بتردد 60-100 نبضة / الدقيقة [1]، [2]. يحدث في بعض الأحيان أن يفشل ناظم الخطى في تنظيم معدل ضربات القلب نظراً لتشوه قد يصيب النسيج الخاص به، أو أحد أجزاء نظام التوصيل الكهربائي في القلب مما يؤدي إلى حالة تعرف طبيياً بتحصّر القلب Heart Block والذي تختلف شدته تبعاً لشدة الضرر الذي أصاب جهاز التوصيل الكهربائي؛ يؤدي تحصر القلب من الدرجة الثالثة إلى انخفاض معدل ضربات القلب إلى قيم خطيرة تؤدي إلى فشل القلب في عملية تزويده لأنسجة الجسم بالطاقة التي تحتاجها [1]. يحدث التدخل الطّبي عن طريق زراعة ناظم الخطى القلبي الصناعي والذي يقوم بإعادة نظم القلب إلى طبيعته. اهتمت الأبحاث المتعلقة بتصميم متحكم ناظم الخطى القلبي بتصميم وحدات تحكم تهدف إلى تحسين استجابة نظام التحكم بضربات القلب (ناظم الخطى القلبي) من خلال تقليل زمن الاستقرار، والذي يعد عاملاً أساسياً في استعادة نظم القلب إلى طبيعته، بالإضافة إلى تقليل نسبة التجاوز إذ أنه يؤدي نظام التوصيل الكهربائي في القلب على المدى الطويل بالإضافة إلى أنه يستهلك من طاقة البطارية، إذ يعد المحافظة عليها عاملاً هاماً في تصميم ناظم الخطى القلبي الصناعي [3]. تم الاعتماد على التحكم الكلاسيكي ولاسيما استخدام PID في التحكم الذي أدى إلى استجابة سريعة إلا أن الاستجابة اتسمت بنسبة تجاوز من الممكن أن تسبب ضرراً مستقبلياً على نظام التوصيل الكهربائي

في القلب، بهدف مقارنة أداء ناظم الخطى القلبي كمتغير تابع لخوارزميات التوليف التقليدية للمتحكم PID تمت المقارنة بين عدة طرق توليف مثل Ziegler-Nichols و Tyreus-Luyben وقد تم التوصل إلى أنّ المتحكم المصمم وفق Tyreus-Luyben قد أعطى الاستجابة الأفضل من التي تم الحصول عليها باستخدام Ziegler-Nichols، إذ بلغت نسبة التجاوز 11% في حين بلغت 23% في المتحكم المصمم وفق Ziegler-Nichols مع زمن استقرار مقبول في كلا الطريقتين [3]. لذلك اتجهت بعض الدراسات الحديثة، مثل [3]، [5]، [6]، [7] و [8] إلى استخدام المنطق الضبابي في تصميم متحكمات ناظم الخطى القلبي لأن نظام القلب والأوعية الدموية يتسم باللاخطية، بالإضافة إلى التعقيدات المتعلقة بالنمذجة والغموض بين التقدير الطبيعي وغير الطبيعي للإشارات الحيوية. تم تصميم متحكم ناظم الخطى القلبي بالاعتماد على المنطق الضبابي، وقد نتج عن وحدة التحكم الضبابي نسبة تجاوز أقل من تلك الناتجة عن المتحكم PID التقليدي إذ بلغت نسبة التجاوز 2.5% وبزمن استقرار قيمته 1.01 ثانية كاستجابة لدخل قفزة مطالها 75 نبضة / دقيقة، ولم يتم مراعاة التغيرات في ضربات القلب [3]. بالنسبة إلى نواظم الخطى القلبية المعتمدة على المنطق الضبابي فقد تم في [4] تصميم وحدة ضبابية بمدخلين، كل مدخل تم تقسيمه إلى تسع مجموعات ضبابية من النوع شبه المنحرف، وبقاعدة Rule base مكونة من 81 قاعدة ضبابية، وتم التوصل باستخدام المتحكم PD إلى استجابة ذات زمن استقرار مقداره 2 ثانية، ونسبة تجاوز 0.5% [4]. في دراسة أخرى تم استخدام متحكم ضبابي قابل للتعليم باستخدام النموذج المرجعي، وذلك لتكييف قيم بارامترات المتحكم الضبابي، وقد تم التوصل إلى أن المتحكم المتعلم قد حقق أداءً أفضل، إذ بلغ زمن الاستقرار الوسطي 0.9 ثانية وبنسبة تجاوز 0.2% مع مراعاة إشارة التحكم [5]. تم استخدام الاستدلال العصبي الضبابي التكيفي ANFIS للتحكم بناظم الخطى القلبي، إذ تم استخدام الشبكة العصبية في تكييف بارامترات النظام الضبابي، وبالتالي تم التوصل إلى زمن استقرار قيمته 1.97 ثانية، ولكن نسبة التجاوز كانت عالية نسبياً فقد بلغت 1.5% [6]. في دراسة أخرى تم استخدام (ANFIS) مع وحدات ضبابية من النوع 1 والنوع 2، بعد تصميم نموذج المنطق الضبابي من النوع 1 و2، تم التحقق من استقرار النظام المصمم

في المجال الزمني (استجابة الخطوة الواحدة)، وتم استخدام طريقة Fuzzy C Means (FCM) التي تظهر نتائج أفضل في تصميم المتحكم الضبابي بالنسبة إلى نسبة التجاوز، إذ خلصت الدراسة إلى تقليل قمة التجاوز إلى قيمة مهملة، وزمن استقرار قدره 11.3 ثانية للنوع الثاني و 16.4 ثانية للنوع الأول [7]، وهي قيم مرتفعة لزمن الاستقرار وغير مناسبة.

هدف البحث وطريقته

تصميم متحكم الناظمة القلبية بالاعتماد على دمج المتحكم PD والمنطق الضبابي من أجل تقليل نسبة التجاوز وزمن الاستقرار وخطأ الحالة الدائمة وتكييف المتحكم PD مع مختلف مطالبات إشارات الدخل المرجعية. يوضح الشكل (1) المخطط الصندوقي لنظام التحكم التكيفي بالناظمة القلبية المقترح إذ يتكون من المتحكم المقترح ثم يليه على التسلسل كل من نموذج ناظم الخطى الممثل بدالة الانتقال G_1 ونموذج القلب G_2 وبتغذية عكسية سالبة واحدية تمثل حساسات الناظمة التي تقوم بقياس معدل ضربات القلب الفعلي HR ، بينما تمثل HR_{ref} الإشارة المرجعية لمعدل ضربات القلب المطلوب. تم استخدام نموذج YNI (Yanagihara, Noma, and Irisawa) من أجل نمذجة ناظم الخطى القلبي، إذ أنه ومنذ أن تم وضعه أصبح النموذج الأكثر استخداماً في نمذجة سلوك العقدة الجيبية - الأذينية SA Node [8]. من خلال المقارنة مع نماذج SA الأخرى، يعد نموذج YNI نموذجاً ثابتاً ودقيقاً لتوليد ضربات القلب وأكثر ملاءمةً من الناحية الفسيولوجية من النماذج الأخرى. تعطى دالة انتقال ناظم الخطى القلبي G_1 كالآتي [8]:

$$G_1 = \frac{8}{S + 8} \quad (1)$$

بينما تعطى دالة انتقال القلب G_2 بالعلاقة [8]:

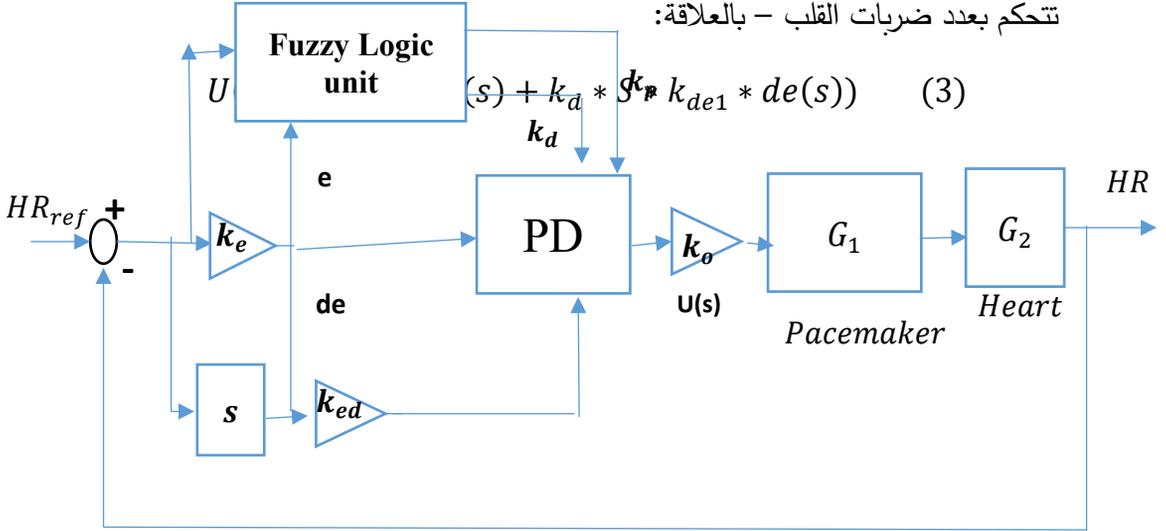
$$G_2 = \frac{169}{S^2 + 20.8 S} \quad (2)$$

تصميم نظام التحكم التكيفي المقترح للتحكم بضربات القلب

نظام التحكم التكيفي بضربات القلب بالاعتماد على المتحكم PD المؤلف ضبابياً

تتمثل الوحدة الضبابية المقترحة لمتحكم ناظم الخطى القلبي بالدمج بين المنطق الضبابي والمتحكم PD، ويبين الشكل (2) نموذج Simulink لنظام التحكم التكيفي بضربات القلب بالاعتماد على المتحكم PD المؤلف ضبابياً بحيث تعطي إشارة التحكم $U(s)$ التي

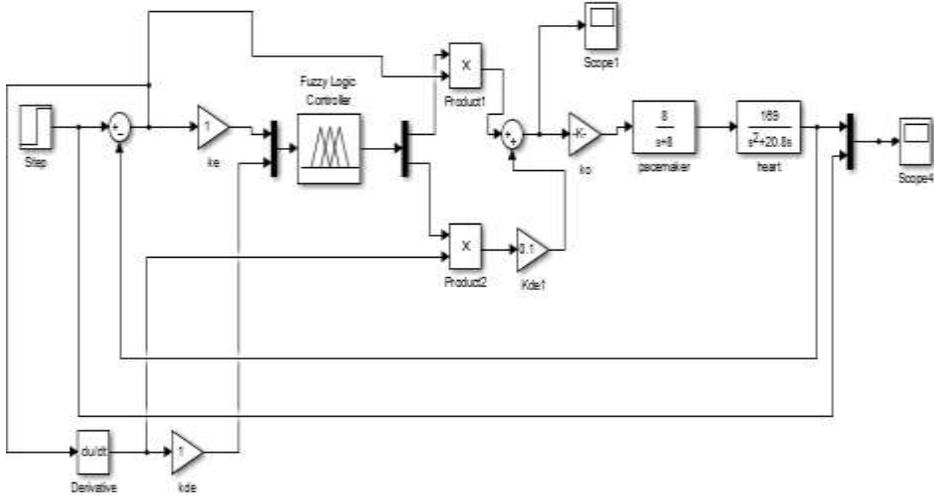
تتحكم بعدد ضربات القلب - بالعلاقة:



الشكل (1): المخطط الصندوقي لنظام التحكم التكيفي بضربات القلب بالاعتماد على المتحكم PD المؤلف ضبابياً.

حيث k_p هو ثابت الربح التناسبي للمتحكم PD، $e(s)$ هي إشارة خرج الناظمة القلبية، $de(s)$ هي مشتق إشارة خرج الناظمة القلبية و k_d هي ثابت الربح التفاضلي للمتحكم PD. K_o هو ثابت تجريبي لموائمة خرج النظام الضبابي، و k_{de1} هو ثابت تمت إضافته من أجل تحسين استجابة الجزء التفاضلي من المتحكم، وتمت الحصول على قيمته بالتجربة. تقوم الوحدة الضبابية بتكليف قيم بارامترات المتحكم PD لتصبح متغيرة مع حالة النظام ومعدل ضربات القلب. ولقد تم اختيار المتحكم PD لأنه ثبت أنه يعطي الاستجابة الأنسب مع أنظمة تنظيم ضربات القلب بالمقارنة مع المتحكمات P، PI،

وPID، إلا أنه لا يمكنه لوحده التكيف مع التغير في معدل ضربات القلب، بالإضافة إلى أنه يؤدي إلى تجاوز عالٍ يضر نظام التوصيل الكهربائي في القلب [4]، [9]. لذلك تم اقتراح نظام يجمع بين المنطق الضبابي والمتحكم PD.



الشكل (2): مخطط SIMULINK نظام التحكم التكيفي بضربات القلب بالاعتماد على المتحكم PD المؤلف ضبابياً.

وحدة المنطق الضبابي Fuzzy logical Unit

للوحدة الضبابية- كما هو واضح في الشكل (1)- مدخلان الأول هو إشارة خرج الناظمة القلبية (e)، والثاني هو مشتق إشارة خرج ناظم الخطى القلبي (de) والخرج هو قيمة ربح المتحكم التناسبي (K_P) وقيمة ربح المتحكم التفاضلي (K_D) واللذان يتغيران تبعاً لحالة النظام ككل وإشارة الدخل المرجعية.

التحويل إلى الضبابية Fuzzification

تقوم عملية التحويل إلى الضبابية بتحويل الدخل الواضح Crisp Input إلى دخل ضبابي بالاعتماد على تابع العضوية Membership function [10]، ويتم ذلك باستخدام طريقتين، الأولى: وهي الطريقة الأكثر دقة ولكنها تتطلب الخبرة ومعرفة النظام بشكل دقيق، وتعتمد على نقل كل نقطة (Data point) من مجال الدخل الواضح إلى القيمة

الضبابية المقابلة لها وفق قواعد معرفة يحددها المصمم وكنتيجة لذلك يتعين شكل المجموعة الضبابية [10]. الطريقة الثانية: وهي الطريقة الأكثر سهولة، إذ يتم أخذ مجال قيم الدخل ضمن مجال قياسي $[-1 + 1]$ واختيار اشكال قياسية لشكل المجموعة الضبابية مثل المثلثي او شبه المنحرف، وغيرهم. في هذا البحث تم الاعتماد على مزيج بين الطريقتين، إذ تم استخدام الطريقة الأولى من أجل تحديد مجالات متحولات الدخل والخرج الواضح، بالنسبة للمخارج فقد تم ذلك من خلال توليف المتحكم PID دون وجود الوحدة الضبابية ومعرفة المجال التي تأخذه البارامترات k_p, k_d واعتبار القيم التي تم توليف المتحكم عليها دون وجود الوحدة الضبابية هي مراكز للمجال الذي يجب أن تأخذه هذه البارامترات في الوحدة الضبابية. أما بالنسبة إلى المداخل فقد تم اعتماد الطريقة الثانية في تحديد المجالات، فيما يتعلق بشكل المجموعات الضبابية فقد تم اختيارها بناءً على نتائج تجربة 5 سيناريوهات. تم اعتماد 9 قيم محتملة لكل دخل/ خرج ضبابي هي عبارة عن متغيرات لغوية تعبر عن شدة قيمة متحول الدخل/الخرج، وقد تم الإشارة إليها في الجدول (1). تم في هذا البحث الاعتماد على ثلاثة أنواع من توابع العضوية وهي المثلثي، شبه المنحرف والنوصي. ومن ثم المقارنة فيما بينهم من أجل اختيار تابع العضوية الذي يعطي أفضل استجابة.

القواعد الضبابية Fuzzy rules

تقوم مجموعة القواعد الضبابية بتحديد العلاقة ما بين الدخل والخرج على شكل قواعد معرفة. ويمكن تحديدها عن طريق أخذ كافة الحالات الممكنة لتراكيب الدخل وما يقابلها من تراكيب للخرج، وبالتالي يصبح لدينا 81 قاعدة تحددان كل من k_p و k_d . تم تحديد مجموعة القواعد بالاعتماد على الخبرة في تحديد كل تركيب من تركيبات الدخل وما يجب أن يقابله كقيمة للخرج. يُظهر الجدولين (2) و(3) مجموعة القواعد المرتبطة بكل خرج على حدة. من الجدولين (2) و(3)، تُحدد القواعد المرتبطة بالخانات المظلة على النحو الآتي:

IF de is es AND e is es THEN k_p is es and k_d is es

IF de is vs AND e is es THEN kp is vs and kd is vs

IF de is ms AND e is es THEN kp is vs and kd is ms

إزالة الضبابية Defuzzification

لا يمكن أن تكون قيم بارامترات المتحكم التناسبي التفاضلي قيم ضبابية غير محددة، إذ أن المتحكم PD يعتمد على قيم واضحة للأرباح k_p, k_d ، وبالتالي لابد من تحويل قيم الخرج الضبابية إلى قيم واضحة Crisp output، يتم ذلك عن طريق إزالة الضبابية والتي تعد الخطوة الأخيرة في بناء وحدة التحكم الضبابي. يوجد عدة طرق لإزالة الضبابية، أكثرها استخداماً هي طريقة مركز الثقل Central of Gravity، اختصاراً (COG)، تعتمد هذه الطريقة على إيجاد مركز ثقل الشكل الناتج عن عملية الاستدلال الضبابي في إزالة الضبابية، والتي تعطى صيغتها الرياضية وفق المعادلة (5) [11]. يوجد طرق أخرى لإزالة الضبابية مثل bisector التي تقوم بحساب الموضع تحت المنحنى حيث تكون المساحة على جانبي ذلك الموضع متساوية، تعطى صيغتها الرياضية وفق المعادلة (6) [11].

$$U = \frac{\sum_{x=\alpha}^{x=\beta} (x \cdot \mu(x))}{\sum_{x=\alpha}^{x=\beta} (\mu(x))} \quad (5)$$

$$\int_{\alpha}^{x^*} \mu(x) dx = \int_{x^*}^{\beta} \mu(x) dx \quad (6)$$

U هي الخرج الواضح بعد إزالة الضبابية هو أحد مخارج الوحدة الضبابية، x هي قيم المحور الأفقي للمنحنى الناتج عن عملية الاستدلال، $\alpha = \min\{x | x \in X\}$ ، $\beta = \max\{x | x \in X\}$. ويبين الجدول (1)، قيم جميع المتحولات الضبابية سواء كانت دخلاً أو خرجاً في السيناريوهات التي لها 9 توابع عضوية. والجدول (2) يمثل مجموعة القواعد المقابلة للخرج K_p . أما الجدول (3) فيبين مجموعة القواعد المقابلة للخرج K_d حيث أن الدخل (de) أكثر أهمية، لأنه يعطي معلومات أوضح عن تغيرات إشارة ناظم الخطى القلبي والتي تعد ذات قيمة هامة بالنسبة للمتحكم التفاضلي؛ وبالتالي تم الاعتماد على قيمته بشكل أكبر لتحديد القواعد المرتبطة بـ K_d .

الجدول (1): المتحولات الضبابية المعتمدة.

الوصف	قيم المتحول الضبابي
أصغر ما يمكن	es
صغير جداً	vs
متوسط الصغر	ms
صغير	s
صفرى	zero
كبير	l
متوسط الكبر	ml
كبير جداً	vl
أكبر ما يمكن	el

الجدول (2): مجموعة القواعد المقابلة للخروج k_p .

Output= k_p		de								
		es	vs	ms	s	zero	l	ml	vl	El
e	es	es	vs	vs	ms	ms	s	s	l	L
	vs	es	vs	ms	ms	s	s	l	l	MI
	ms	ms	ms	ms	s	s	l	l	ml	VI
	s	ms	ms	s	s	zero	zero	ml	ml	VI
	zero	zero	zero	s	s	l	l	ml	ml	VI
	l	s	s	zero	zero	l	ml	vl	vl	El
	ml	s	zero	zero	l	l	ml	vl	el	El
	vl	s	zero	l	l	ml	vl	vl	el	El
	el	zero	zero	I	i	ml	vl	vl	el	El

الجدول (3) مجموعة القواعد المقابلة للخروج k_d .

Output= k_d		de								
		es	vs	ms	s	zero	l	ml	vl	El
e	es	es	vs	ms	ms	zero	zero	l	l	MI
	vs	es	vs	vs	ms	s	zero	l	ml	VI

ms	vs	vs	ms	ms	s	zero	l	ml	Vl
s	vs	ms	ms	s	zero	i	ml	vl	El
zero	ms	s	s	zero	l	ml	vl	el	El
l	s	s	zero	l	ml	vl	vl	el	El
ml	s	zero	zero	l	ml	vl	vl	el	El
vl	ms	s	zero	l	ml	vl	el	el	El
el	s	zero	l	ml	vl	el	el	el	El

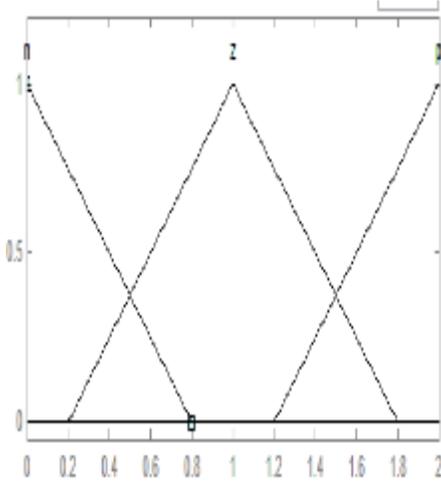
تم تصميم خمس وحدات تحكم ضبابي محتملة، كل وحدة تحكم تشكل سيناريو تجربة بهدف اختيار الوحدة التي تعطي مواصفات الاستجابة الأفضل. يمثل الجدول (4) البارامترات التي تم تصميم الوحدات المرشحة على أساسها. تم اعتماد المداخل والمخارج الضبابية لتكون بنفس الشكل لعدم وجود معلومات كافية بخصوص تمايزها عن بعضها. لذلك وفي بعض السيناريوهات سيتم الاكتفاء بعرض متغير واحد. توضّح الأشكال من (3) إلى (6) متغيرات الدخل والخرج الضبابي للوحدتين الضبابيتين الأولى والثانية، تختلف الأولى عن الثانية في أن الوحدة الضبابية الأولى تعتمد توابع عضوية من النوع المثلي، بينما تعتمد الأخرى توابع عضوية من النوع شبه المنحرف.

الجدول (4)، البارامترات التي تم تصميم وحدات المنطق الضبابي المرشحة على أساسها.

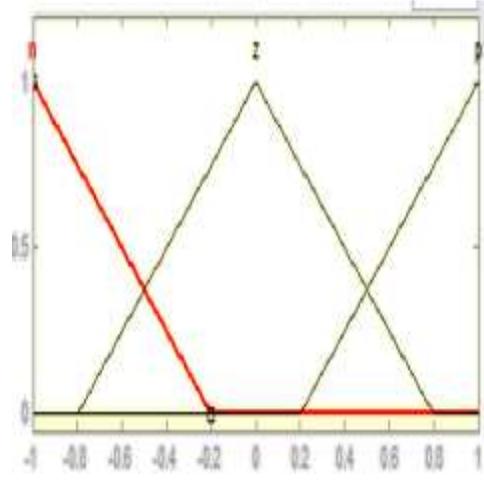
البارامتر	القيم التي تم تجربتها	وصف البارامتر
عدد المجموعات الضبابية للدخل	3 أو 9.	قيم المتحول الضبابي للدخل.
عدد المجموعات الضبابية للخروج	3 أو 9.	قيم المتحول الضبابي للخروج.
نوع التوابع العضوية	{Triangle, trapiozoid}	تؤثر توابع العضوية على الاستجابة
حجم القواعد rule base	{81, 9}	ربط المداخل بالمخارج

في السيناريو الثالث تم اعتماد توابع عضوية من النوع المثلي لمتغيرات الدخل e و de و k_e في الشكل (7)، و متغير الخرج k_d في الشكل (8). بينما في السيناريو الرابع تم اعتماد توابع عضوية من النوع شبه المنحرف (الشكل (9)) بالإضافة إلى اعتماد 9 توابع

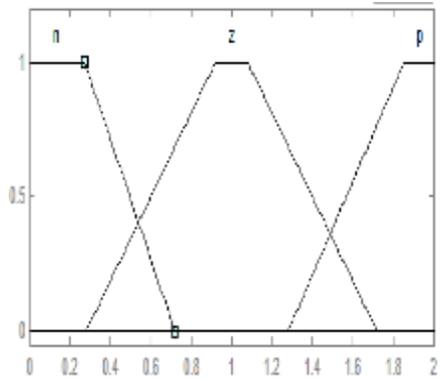
عضوية لكل من الدخل والخرج. طريقة إزالة الضبابية في السيناريوهات الخمس هي bisector. في السيناريو الخامس تم اعتماد نوعين من توابع العضوية، المثلثي لمتحولي الدخل e و de (الشكل (7))، وتم اعتماد تابع العضوية الغوسي لمتحولي الخرج k_a و k_p (الشكل (11)). بينما بقيت باقي بارامترات السيناريو الرابع نفسها.



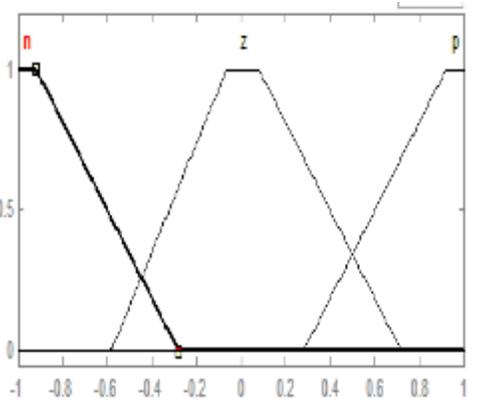
الشكل (4): متغير الخرج k_a للسيناريو الأول



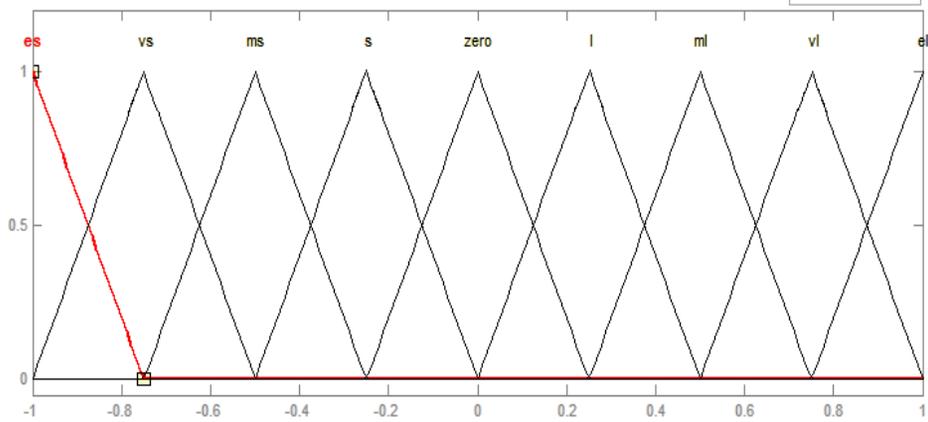
الشكل (3): متغير الدخل الضبابي e للسيناريو الأول، والشكل نفسه للمتغيرات de و k_p



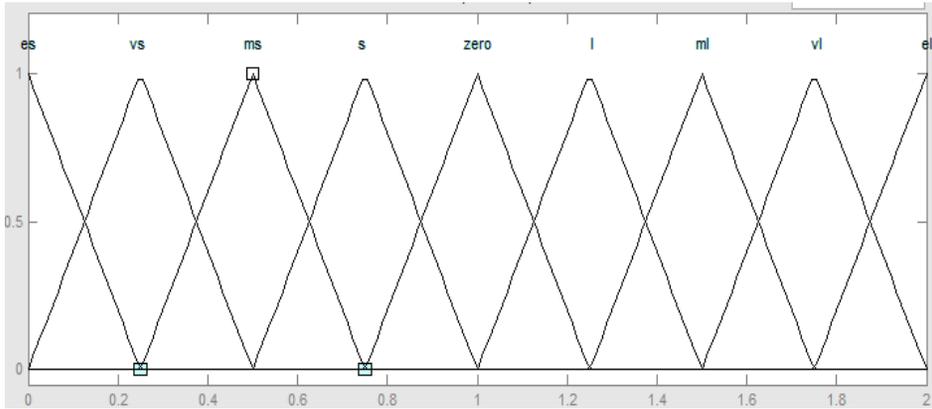
الشكل (6) متغير الخرج k_a للسيناريو الثاني.



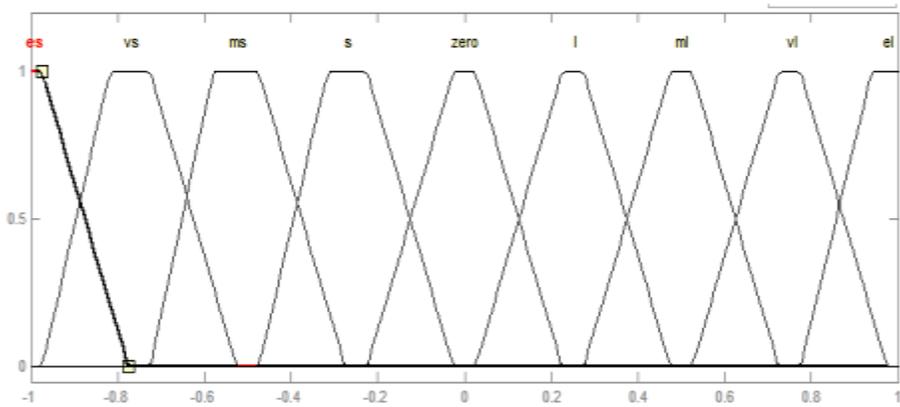
الشكل (5): متغير الدخل e للسيناريو الثاني والشكل نفسه للمتغيرين de و k_p .



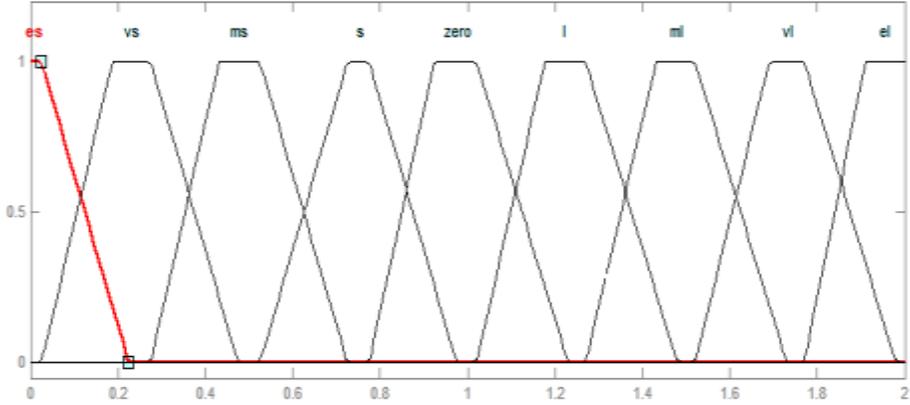
الشكل (7) متغير الدخل e للسيناريو الثالث والخامس، والشكل نفسه للمتغيرين k_p و de في السيناريو الثالث.



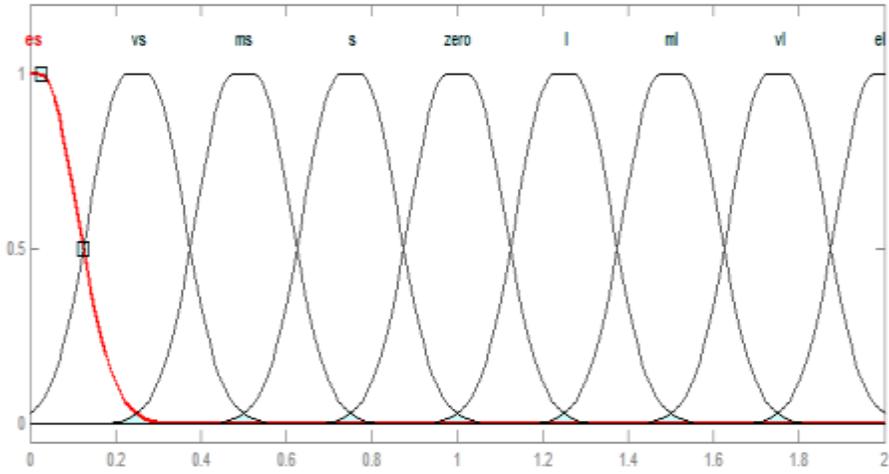
الشكل (8): متغير الخرج k_d للسيناريو الثالث.



الشكل (9): متغير الدخل e للسيناريو الرابع، والشكل نفسه للمتغيرين k_p و de .



الشكل (10): متغير الخرج k_d للسيناريو الرابع.



الشكل (11): متغير الخرج k_d في السيناريو الخامس.

المتحكم PD

ثبت أن المتحكم PD هو الأفضل بالمقارنة مع المتحكمات PID وPI وP إذ أن استجابته مع نظام التحكم بضربات القلب قد اعطت البارامترات الأفضل بالمقارنة مع الأنواع الأخرى [4]، وبالتالي تم اختياره للتحكم بنظام ضربات القلب المقترح، إلا أنه لا يمكنه لوحده التكيف مع التغير في معدل ضربات القلب، بالإضافة إلى أنه يؤدي إلى تجاوز عالٍ يضر نظام التوصيل الكهربائي في القلب. لذلك تم اقتراح نظام يجمع بين المنطق الضبابي والمتحكم PD. تم الحصول على قيم الأرباح K_e, K_{de} المتعلقة بموائمة الدخل الواضح

مع الدخل الضبابي عن طريق التجربة. كما تم الحصول على قيمة الربح K_0 باعتبار هذا الربح على أنه متحكم تناسبي وتوليفه عن طريق Nicholas-Ziegler وقيمة هذا البارامتر هي 0.65. وتُظهر الأشكال (13)، (15)، (17)، (19)، و(21) إشارة التحكم الناتجة عن كل سيناريو تجربة.

النتائج والمناقشة.

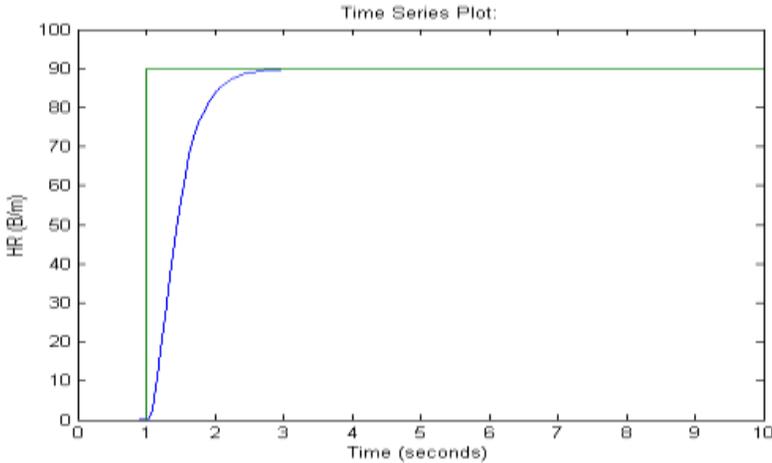
من أجل اختيار توابع العضوية الأفضل لتمثيل وحدة التحكم الضبابي، جرى اختبار النظام مع عدة أشكال لتوابع العضوية، وذلك وفق قيمة 90 نبضة/دقيقة للدخل. تم عرض السيناريوهات الخمسة بذكر توابع عضوية الدخل والخرج، وحجم القواعد لكل منها، بالنسبة إلى قيم الأرباح فقد تم الحصول عليها عن طريق محاكاة النموذج بقيم مختلفة لهذه الأرباح ضمن المجال [2 0.001]، وقد حصلنا على القيم الأفضل لهذه البارامترات وهي $k_{de} = 0.1$ ، $k_e = 1$ ، وقد عُرض في الجدول (5) أيضاً قيم بارامترات الاستجابة التي تتمثل بزمان الاستقرار، ونسبة التجاوز، وخطا الحالة الدائمة التي تم التوصل إليها من خلال تجربة استجابة النظام مع السيناريوهات الخمسة.

الجدول (5): السيناريوهات الخمسة للوحدات الضبابية المرشحة وتقييم ادائها.

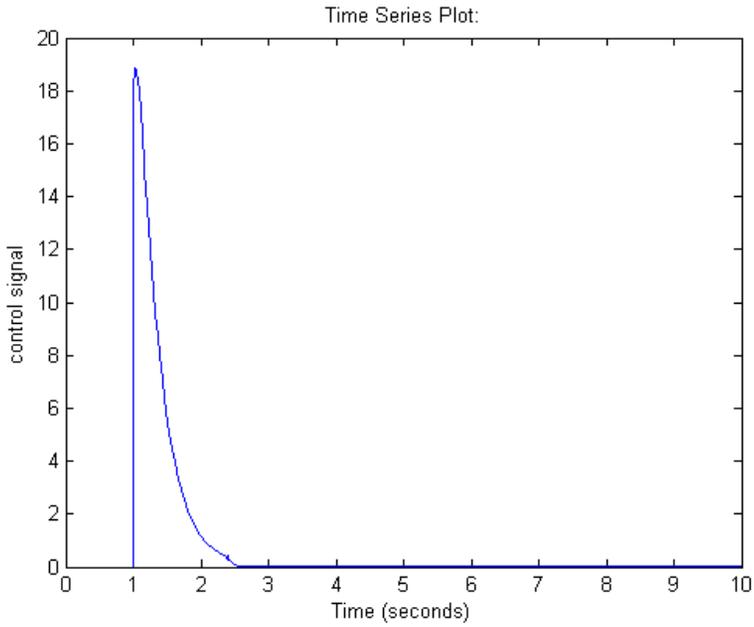
تسلسل	تابع عضوية الدخل	تابع عضوية الخرج	حجم القواعد	بارامترات الإستجابة		
				t_s [ثانية]	التجاوز %	e_{ss} %
1	مثلي	مثلي	9	1.7	0.01	0
2	شبه منحرف	شبه منحرف	9	1.7	0.007	0
3	مثلي	مثلي	81	0.8	0.18	0.01
4	شبه منحرف	شبه منحرف	81	0.8	0.17	0
5	مثلي	غوصي	81	0.8	0.18	0

بالنظر إلى المعلومات الواردة من الجدول (5)، نجد أن توابع العضوية من النوع شبه المنحرف قد أعطت الاستجابة الأفضل من بين باقي التوابع من ناحية نسبة التجاوز، و زمن

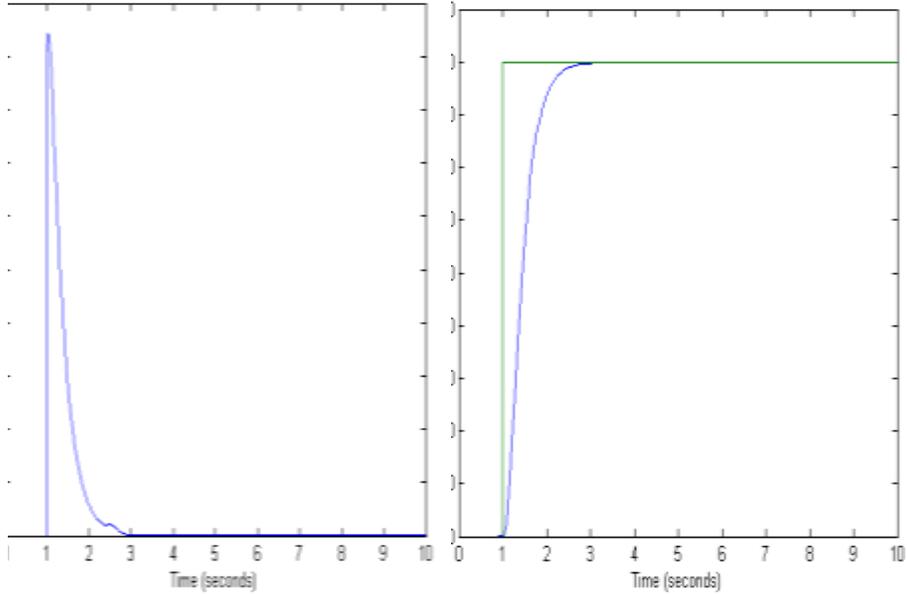
الاستقرار، ويعود ذلك لبساطة النموذج الرياضي المعبر عنها وطول المجال التي تستقر به قيمتها عند الـ 1. نستنتج من الجدول (5) أن زيادة حجم القواعد وزيادة عدد المجموعات الضبابية قد قلل بشكل كبير من زمن الاستقرار لكنه زاد التجاوز من 0.007% إلى 0.18 % والتي تعد قيمة مقبولة بالنسبة إلى نظام التحكم بضربات القلب المقترح، وبالتالي فقد تم اعتماد الوحدة الضبابية الخاصة بالسيناريو الرابع. إن معدل ضربات القلب ليس ثابتاً، إنما يتغير وفقاً للحالة الجسدية (راحة، جري، نوم، رياضة، ... والخ)، ولعوامل فيسيولوجية أخرى. من أجل التأكد من فعالية نظام التحكم المقترح وقدرته على التكيف مع تغير معدل ضربات القلب تم اختباره مع قيم مختلفة لضربات القلب من أجل المداخل الآتية: 60 BPM تكافئ وضع استرخاء كامل، 70 BPM تكافئ الوضع الطبيعي، 80 BPM تكافئ وضع المشي، 90 BPM تكافئ وضع الجري المعتدل، و 100 BPM تكافئ حالة الإجهاد. وتبين الأشكال من 17 وحتى 21، على الترتيب، استجابة النظام لدخل 90 نبضة / دقيقة والتي تكافئ حالة الجري المعتدل. يلخص الجدول (6) النتائج التي تم التوصل إليها عند اختبار نظام التحكم التكيفي بضربات القلب باستخدام المتحكم PD المؤلف ضبابياً مع القيم المختلفة لضربات القلب المطلوبة.



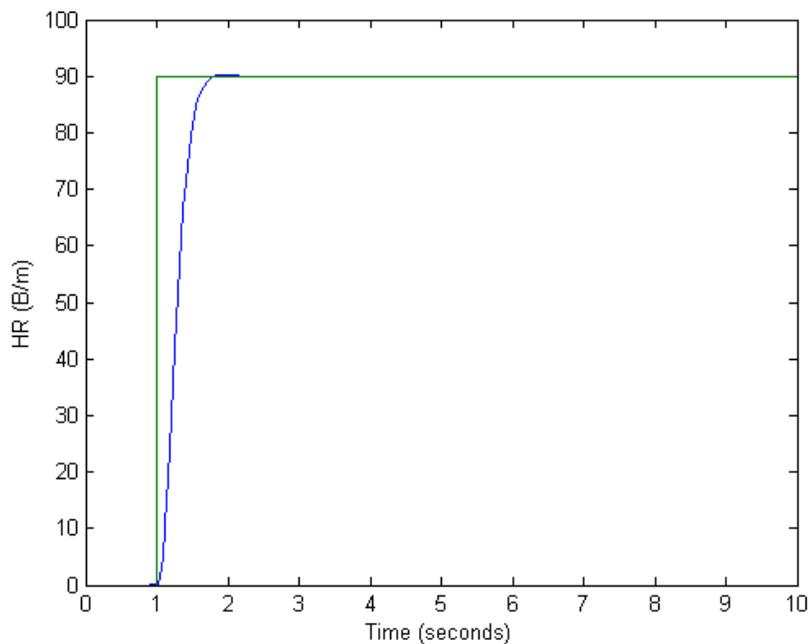
الشكل (12): استجابة النظام وفق السيناريو الأول.



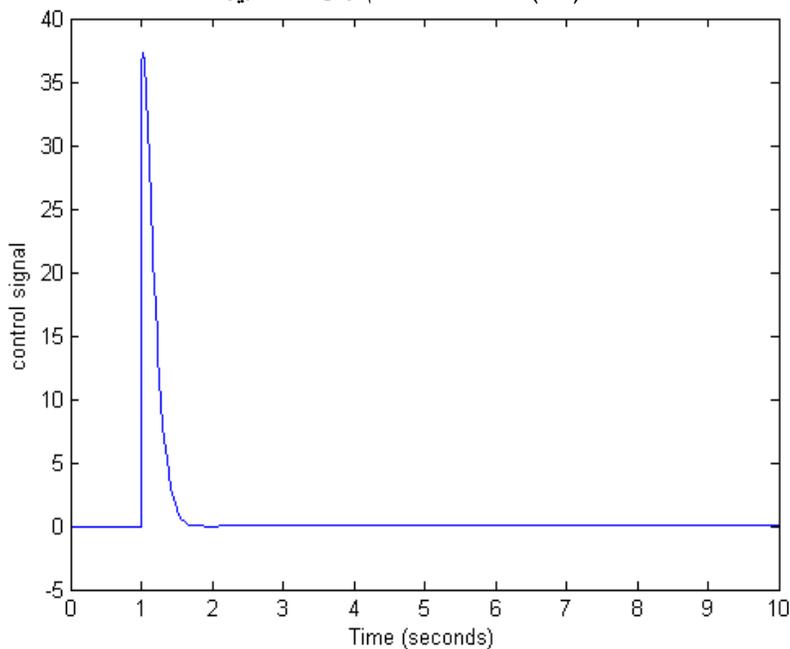
الشكل (13): إشارة التحكم في السيناريو الأول



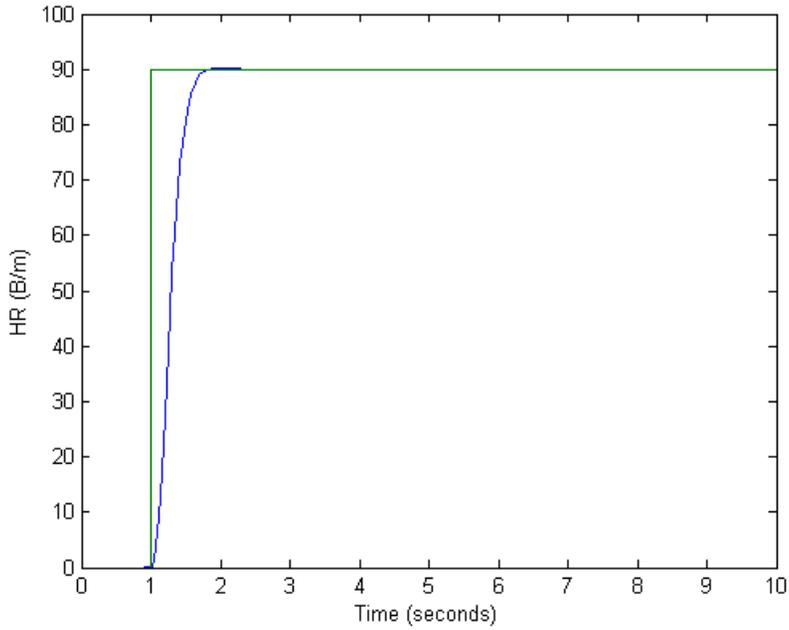
الشكل (14): استجابة النظام وفق السيناريو الثاني.
الشكل (15): إشارة التحكم في السيناريو الثاني



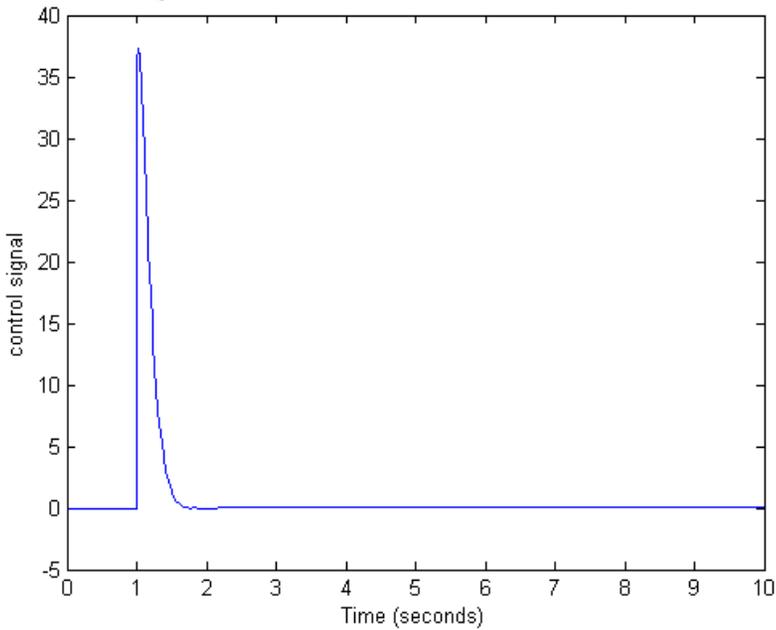
الشكل (16): استجابة النظام وفق السيناريو الثالث.



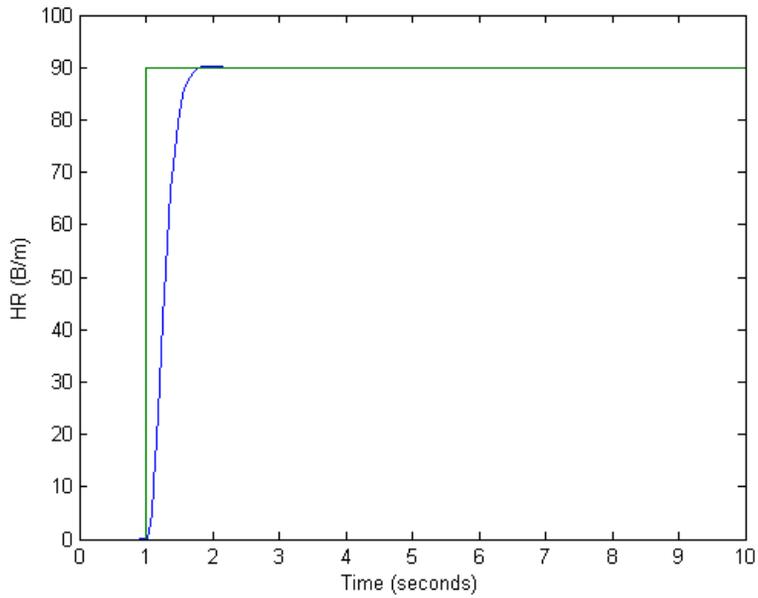
الشكل (17): إشارة التحكم في السيناريو الثالث.



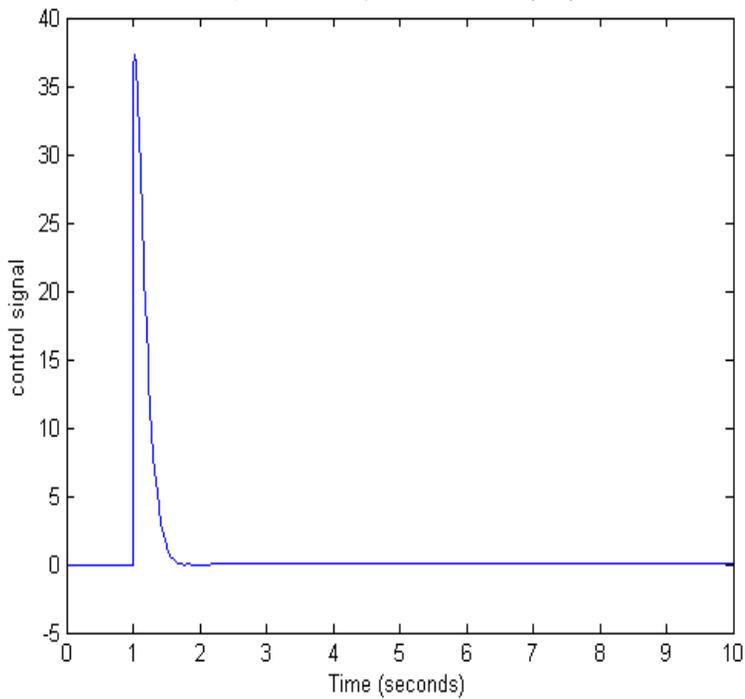
الشكل (18): استجابة النظام وفق السيناريو الرابع.



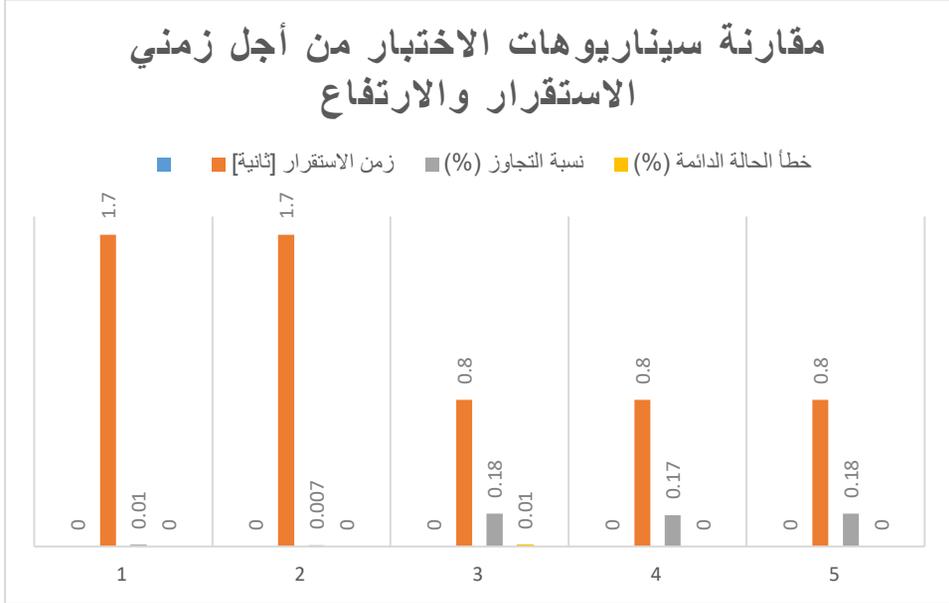
الشكل (19): إشارة التحكم في السيناريو الرابع.



الشكل (20): استجابة النظام وفق السيناريو الخامس.



الشكل (21): إشارة التحكم في السيناريو الخامس.



الشكل (22): مقارنة سيناريوهات الاختبار من أجل زمني الاستقرار والارتفاع.

الجدول (6): نتائج اختبار النظام مع حالات مختلفة لمعدل ضربات القلب.

بارامترات الاستجابة			معدل ضربات القلب [نبضة / دقيقة]	الوضع
e_{ss} %	التجاوز %	t_s [sec]		
0	0.18	0.8	60	وضع الاسترخاء
0	0.18	0.8	70	الوضع الطبيعي
0	0.18	0.8	80	وضع المشي
0	0.18	0.8	90	وضع الجري
0	0.18	0.8	100	وضع الإجهاد

بالنظر إلى المعلومات الواردة في الجدول (6) نجد أن نموذج التحكم التكيفي بمعدل ضربات القلب بالاعتماد على المتحكم PD المؤلف ضبابياً قد أعطى نتائج ثابتة مع

مختلف معدلات ضربات القلب المطلوبة ودون الحاجة إلى إعادة ضبط قيم أرباح الملائمة كما ورد في الدراسة [6] حيث أنه عند كل قيمة مختلفة لمعدل ضربات القلب وجب إعادة ضبط قيم الأرباح. يوضح الجدول (7) نتائج الدراسة المقترحة بالمقارنة مع الدراسات المرجعية.

الجدول (7) مقارنة نتائج الدراسة المقترحة مع الدراسات المرجعية.

ملاحظات	نسبة التجاوز %	زمن الاستقرار [ثانية]	الدراسة
-	0.4	2	[4]
-	1.5	1.97	[5]
-	0.4	2	[3]
-	0.2	0.9	[5]
خطأ حالة دائمة صفري	0.17	0.8	الدراسة المقترحة

وجد من الجدول (7)، أن نظام التحكم التكيفي بمعدل ضربات القلب المؤلف ضبابياً المقترح قد أعطى نسبة تجاوز هي الأقل بالمقارنة مع الدراسات المرجعية، بالإضافة إلى أن استجابة النظام المقترح في الحالة الدائمة كانت ذات خطأ صفري عند مختلف معدلات ضربات القلب المطلوبة. كما أن زمن الاستقرار كان الأقل بالنسبة له في الدراسات المرجعية.

الاستنتاجات والتوصيات

إن استخدام نظام التحكم التكيفي بضربات القلب بالاعتماد على المتحكم PD المؤلف ضبابياً أعطى نتائج جيدة، ومن خلال السيناريوهات الخمس واختبار النظام المقترح من أجل معدل ضربات قلب مختلف حسب الحالة الجسدية، تم التوصل إلى الآتي:

- نسبة تجاوز مهمة مع مختلف معدلات ضربات القلب، مما يزيد من موثوقية متحكم ناظم الخطى القلبي، ويخفف ضررها على نظام التوصيل الكهربائي في القلب، ويقلل من استهلاك الطاقة في البطارية مما يزيد من عمرها.
 - زمن استقرار قليل (0.8 ثانية)، مما يعني موثوقية أعلى لمتحكم ناظم الخطى.
 - توابع العضوية من النوع شبه المنحرف هي الأفضل من بين توابع العضوية المثلي والغوسي فيما يتعلق بتصميم متحكم ناظم الخطى.
 - تكيف قيم بارامترات المتحكم PD، إذ قد أعطى استجابة أكثر استقراراً مع مختلف معدلات ضربات القلب المطلوبة.
 - زيادة حجم القواعد الضبابية قد قلل من زمن الاستقرار مع زيادة نسبة التجاوز.
 - أثبت نظام التحكم التكميلي بضربات القلب بالاعتماد على المتحكم PD المؤلف ضبابياً المقترح فعاليته من أجل التغيرات في نبضات القلب تبعاً للحالة الجسدية في حالات الاسترخاء الكامل، والوضع الطبيعي، ووضع المشي، ووضع الجري المعتدل، وأخيراً في حالة الإجهاد.
- من أجل استجابة أفضل لمتحكم ناظم الخطى القلبي فإنه يمكن مستقبلاً أمثلة قيم بارامترات الوحدة الضبابية باعتماد الخوارزميات التطورية، ودراسة الاضطراب على نظام القلب والدوران وتأثيره على أداء متحكم الناظمة القلبية.

المراجع

- 1- BENDER. J, RUSSEL. K, ROSENFELD. L, CHAUDRY. S, 2011- Oxford American Handbook of Cardiology. Oxford University Press Inc, First Edition. USA, 708.
- 2- SAJAAN. M, 2013- Learn ECG in a Day a Systematic Approach. JAYPEE BROTHERS MEDICAL PUBLISHERS, First Edition. New Delhi, 82.
- 3- Yadav, J. Rani, A. & Girisha, 2011 Intelligent Heart Rate Controller for Cardiac Pacemaker, International Journal of Computer Applications, Vol. 36, No 7, 1- 20.
- 4- 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, Vol. 7, No. 1, 1-18.
- 5- ALEBRAHEM. E, DIAB. J, ZOREKA. F, 2020 *Design Adaptive Controller and Learning Controller to Control the Pacemaker*, Journal of Engineering Sciences and Information Technology, Vol. 4, Issue.4, 1-17.
- 6- Aghdam. A, Dabanloo. N, Sattari. M, Attarodi. G, Hemmati. N, 2017 *Design and processing of a novel algorithm using ANFIS for new generation of cardiac pacemakers*, Computing in Cardiology (CinC), 1-4.
- 7- Asgha .D, et al, 2022 *An Interval Type-2 Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System based, Artificial Pacemaker Design and Stability Analysis*, Research square, 22- 30.

- 8- YALCINKAYA, F. 2013 Mathematical Modelling of Human Heart as a Hydroelectromechanical System , 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO) Nov. 2013, 28-30.
- 9- JOLAHA. O, BASHOUR. L, 2021 Prediction of the Artificial Heart Beat Using Machine Learning Algorithms. Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. 43, No.5, 201-221.
- 10- D. Hooda, V. Raich, 2017 Fuzzy Logic Models and Fuzzy Control: An Introduction, Alpha Science International Ltd, UK. 1-408.
- 11- Gao. Q, 2017 Universal Fuzzy Controllers for Non-affine Nonlinear Systems. Singapore: Springer Singapore. First Edition. UK, 1 -142.
- 12- Kararm, M. 2018 *Robust RBF Neural Network-Based Backstepping Controller for Implantable Cardiac Pacemakers* Karar, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, vol. 32 No.7, 1040–1051.
- 13- JOLAHA. O, EISSA. A, 2021 Effect of ECG Features Extraction using Curve Fitting for the Detection of Arrhythmia in ECG, 3rd Conference for Post studies Students on Engineering Sciences, 23-24 December, Tishreen University, Latakia, Syria.
- 14- JOLAHA. O, EISSA. A, 2018 Solving the Problem of Unifying the Size of Large Squares of Grid in ECG Images. Damascus University Journal for Engineering Science, Vol. 34 No. 2, 237-249.

