

تصميم نظام تحكم ذكي لتنظيم ناقلية سائل الديليزة في جهاز غسيل الكلى

أ.د. سحر عبد الكريم العلي *

م. علا عبد اللطيف أحمد **

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١/٢٩ . قُبل للنشر في ٢٠٢٥/٥/٢٠)

□ ملخص □

تعتبر عملية تحضير محلول الديليزة ذات أهمية كبيرة في نجاح عملية التنقية الدموية، فكلما كان المحلول محضراً بدقة وعناية أكثر كلما كانت عملية التنقية أفضل وأسرع. تم في هذا البحث تصميم نظام تحكم ضبابي لضبط بارامترات المتحكم PID لتنظيم ناقلية سائل الديليزة في جهاز غسيل الكلى لمرضى الفشل الكلوي، بالاعتماد على النموذج الرياضي الذي وضع من قبل (Fallman, Mans.2016)، اعتمد هذا النموذج على قياسات حقيقية وقيم معيارية لعمل مضخات كل من الحمض والبيكربونات (المكونان الأساسيان لسائل الديليزة) لجعلها تعمل بشكل آلي للحفاظ على الناقلية طيلة فترة جلسة غسيل الكلى لضمان عدم توقف الجهاز وبالتالي إيجاد منهجية أكثر وثوقيه وأكثر دقة وسرعة لتحضير محلول الديليزة الخاص من أجل تحسين كفاءة عملية غسيل الكلى. تمت المقارنة مع المتحكم PID التقليدي، وأكدت النتائج التي تم التوصل إليها كفاءة المتحكم الضبابي FUZZY PID، حيث ألغى التجاوز الأعظمي، وحسّن من زمن الاستقرار بنسبة 27%، واستقر النظام عند خطأ ستاتيكي صغير 2%.

الكلمات المفتاحية: ناقلية سائل الديليزة، المتحكم التناسبي التكاملية التفاضلية PID، المتحكم التناسبي التكاملية التفاضلية الضبابي FPID.

* أستاذ مساعد في قسم الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - طرطوس - سورية .
** طالبة ماجستير في قسم الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس - طرطوس - سورية.

Design of an intelligent control system for regulating the dialysis fluid conductivity in a hemodialysis machine

Prof. Dr. Sahar Abd Alkarim Alali *
Ola Abd Allatif Ahmad**

(Received 29/1/2025 . Accepted 20/5/2025)

□ ABSTRACT □

The dialysis solution preparation process is of great importance to the success of the hemodialysis process. The more precisely and carefully the solution is prepared, the better and faster the dialysis process. In this research, a fuzzy control system was designed to adjust the parameters of the PID controller to regulate the dialysis fluid conductivity in a dialysis machine for kidney failure patients. The system was based on a mathematical model developed by (Fallman.Mans ,2016). This model relied on real measurements and standard values of the acid and bicarbonate pumps (the two main components of the dialysis fluid) to automatically maintain conductivity throughout the dialysis session, ensuring the machine does not stop. This resulted in a more reliable, accurate, and faster methodology for preparing the dialysis solution to improve the efficiency of the dialysis process. Comparisons were made with a conventional PID controller, and the results confirmed the effectiveness of the FUZZY PID controller, as it eliminated the maximum overshoot, improved the settling time by 27%, and stabilized the system with a small static error of 2%.

Keywords: Dialysis fluid conductivity, PID controller, FPID controller.

*Assistant Professor in the Department of Industrial Automation - Faculty of Technical Engineering - Tartous University - Tartous - Syria.

**Master's student in the Department of Industrial Automation - Faculty of Technical Engineering - Tartous University - Tartous - Syria.

١- المقدمة:

الفشل الكلوي هو فشل الكلية في تصفية الفضلات من الدم، يحدث الفشل الكلوي عندما تتخفف وظيفة الكلية إلى ما دون 15% عن المستويات الطبيعية. يتم علاج هذا المرض عن طريق خضوع المريض لجلسات غسيل الكلى، حيث يقوم الجهاز بتشغيل مضختين، مضخة لسحب الحمض A وأخرى لسحب البيكربونات B، لكل مضخة معدل سحب مختلف عن الآخر وتعمل بشكل مستقل عن المضخة الأخرى، يتم التحكم بعمل هاتين المضختين لضخ كميات محددة وفق معايير ومواصفات معينة للحصول على محلول ديلزة ذو ناقلية ضمن الحدود المسموح بها [1].

الديال هو محلول كيميائي يتم تحضيره بدقة وبغاية فائقة وذلك بإضافة مكونين (حمض A، وبيكربونات B) في نفس الوقت إلى المياه المعالجة.

إن معدل الوفيات للمرضى الذين يعانون من فشل كلوي ويخضعون لجلسات غسيل الكلى ترتبط بجودة عملية غسيل الكلى، والتي تعتمد على التنظيم الدقيق لمعدل تدفق سائل الديلزة، علماً أن مجال الناقلية المسموح الذي يضمن حدود الأمان بالنسبة للمريض هو (12.8 15.8 ms/cm) [2].

من المهم أن تبقى الناقلية ضمن المجال المحدد طيلة فترة جلسة غسيل الكلى، ويمكن أن تحدث إنذارات تجعل جهاز غسيل الكلى يدخل بحالة SLEEP MODE ينعزل خلالها المريض كلياً عن الجهاز، وتستمر هذه الحالة إلى أن تتم معالجة الإنذار وتصحيح الخطأ الحاصل، ثم يعاود الجهاز الاتصال مع المريض وإكمال جلسة العلاج [2].

إحدى أهم العوامل التي تسبب حدوث مثل هذه الإنذارات هو الخطأ بعمل المضخات سواء مضخة الحمض أو مضخة البيكربونات، حيث تكون المضخة مصممة لسحب المواد بشكل متقطع بكميات ومعدل سحب محدد وأي تجاوز للقيم المسموحة سيجعل من عملية انتقال الشوارد تتم بشكل عكسي أي من محلول الديلزة إلى الدم، لذلك كان لابد من التحكم الدقيق بمعدل ضخ المضخات بحيث نحافظ على القيم المحددة والدقيقة للحصول على ناقلية ضمن الحدود المسموح، وهذا ما سعينا إليه في بحثنا هذا.

نظراً لأهمية البحث فقد تم تناوله في العديد من الدراسات والأبحاث، ففي عام 2020 نشر بحث حول كيفية تصميم وحدة تحكم PID للتحكم بالمضخة المسؤولة عن نقل جميع المكونات السائلة اللازمة لصنع محلول الديلزة بالشكل المناسب، وأظهرت النتائج قدرة المضخة التي يبلغ معدل تدفقها ٥٥ ميللتر بالدقيقة على صنع المحلول المناسب في 6.36 دقيقة [3]، كما نشر عام 2016 بحثاً تم فيه تصميم ثلاث وحدات تحكم مختلفة (LQG, PID, MPC) لتنظيم ناقلية محلول الديلزة في جهاز غسيل الكلى من خلال التحكم في معدلات ضخ مكوني التركيز (الحمض والبيكربونات)، تم تحضير محاليل الغسيل الكلوي على مرحلتين منفصلتين. تتعلق الأولى بضخ الحمض أولاً ثم تأتي مرحلة ضخ بيكربونات الصوديوم وأظهرت النتائج أن LQG هو الأكثر ملائمة [4]، وفي بحث آخر نشر عام 2019 تم استخدام المنطق الضبابي FLC لضبط بارامترات جهاز غسيل الكلى من أجل الحفاظ على استقرار الحالة الديناميكية الدموية للمريض أثناء فترة العلاج، تم تحقيق ذلك اعتماداً على معدل ضربات القلب وضغط الدم الشرياني، أظهرت النتائج أن استخدام المنطق الضبابي قلل من وقت العلاج [5]، كما نشر بحث عام 2022 تم فيه تصميم وحدة تحكم جديدة Immune-LQI لتنظيم ناقلية سائل الديلزة في جهاز غسيل الكلى حيث تم تصميم متحكم هجين (PID, Iqi, Iqi_PID) بالاعتماد على التقنيات الذكية (التحكم المناعي (IC)، المنطق الضبابي (FL)، والخوارزمية الجينية (GA))، وأظهرت النتائج أفضلية المتحكم Immune-LQI حيث أعطى تحسناً بنسبة 10% في زمن الارتفاع، و 66% في التجاوز، و 42.7% في زمن الاستقرار، عند مقارنته مع LQI بمفرده [6]، وكذلك في عام

2019 نشر بحث تناول تصميم متحكم ضبابي لقيادة عملية تحضير محلول الديليزة بالمواصفات المطلوبة وبشكل آلي مع المراقبة المستمرة للحفاظ على حدود الناقلية، تمكن هذا المتحكم من انقاص زمن المعالجة من خلال الدقة في عملية التحضير وهذا بدوره قلل من الإنذارات الناتجة عن تجاوز القيم المسموحة للناقلية (12.8-15.8) ms/cm [8]. وفقاً لما سبق وبسبب قلة الأوراق البحثية المتعلقة بالتحكم بناقلية سائل الديليزة، وتحضير محلول الديليزة على مرحلتين منفصلتين، تتعلق الأولى بضخ الحمض والثانية بضخ بيكربونات الصوديوم، وهذا ما يتعارض مع الواقع العملي حيث يتم ضخ كلا المكونين معاً بنفس الوقت، بالإضافة إلى تأكيد معظم الباحثين الذين جمعوا بين خوارزميات الذكاء الاصطناعي وتقنيات التحكم التقليدية أن هذه الخوارزميات تعمل على تحسين أداء وحدات التحكم التقليدية، كان التوجه في هذا البحث إلى تصميم نظام تحكم ذكي لتحسين استجابة المتحكم التقليدي PID للتحكم بناقلية محلول الديليزة في مرحلة واحدة أي ضخ كلا المكونان الحمض والبيكربونات معاً بعد إجراء ضبط للمتحكم وفقاً لقيم معدلات الضخ المسموحة.

2. أهمية البحث

إن إنجاز متحكم يقوم بالتحكم بعملية ضخ كل من مكوني سائل الديليزة (الحمض والبيكربونات) في آن واحد، يعمل على تحسين مؤشرات الأداء وتنظيم الناقلية المتعلقة بالضخ المتزامن لكل من مكوني المحلول، وتعزيز كفاءة عملية غسيل الكلى وبالتالي تقليل معدل الوفيات لمرضى الفشل الكلوي المزمن.

3. هدف البحث

يهدف البحث إلى استخدام الذكاء الاصطناعي (المنطق الضبابي) لضبط ناقلية محلول الديليزة ضمن الحدود المسموح بها وفق المراحل التالية:

- التحكم باستخدام متحكم تناسبي تكاملي تفاضلي تقليدي **Traditional PID** وضبط بارامتراته تجريبياً بما يتناسب والناقلية المطلوبة.

- تصميم متحكم ذكي **Fuzzy PID** لتحسين بارامترات المتحكم التقليدي باستخدام المنطق الضبابي **Fuzzy logic**.

- مقارنة عمل كل من المتحكم التقليدي **Traditional PID** والمتحكم الذكي **Fuzzy PID**.
- مقارنة النتائج مع الدراسات السابقة.

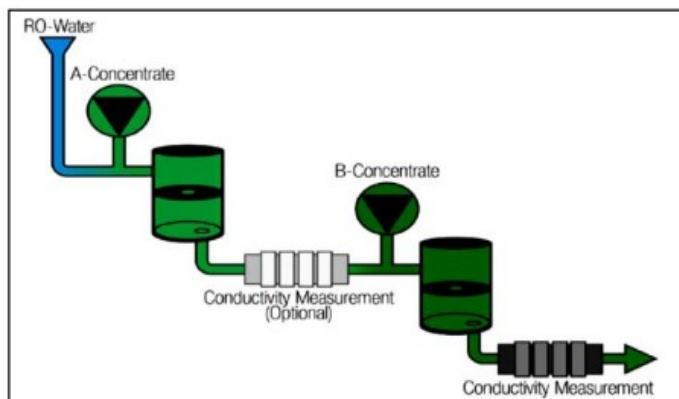
4. مواد البحث

متحكم PID، برنامج ماتلاب للنمذجة والمحاكاة.

5. طرائق البحث

5.1 النمذجة الرياضية:

اعتمدنا في بحثنا هذا على النموذج الرياضي الذي وضع من قبل الباحث (Fallman, Mans. 2016) الذي يصف آلية تحضير محلول الديليزة في فضاء الحالة بدقة. يبين الشكل (1) آلية التحضير، يتم في البداية إضافة الماء المعالج، ثم يضاف المكون الأساسي الأول (الحمض A)، يضخ الخليط الناتج إلى الحجرة الأولى، ثم يضاف المكون الأساسي الثاني (بيكربونات الصوديوم B)، يضخ الخليط الناتج إلى الحجرة الثانية، أخيراً تقاس الناقلية عند مخرج الحجرة الأخيرة، تم تقسيم كل حجرة إلى قسمين للتقليل من الإضرابات الناتجة عن عمليات الضخ. [4]



الشكل (1) مخطط توضيحي للنظام (Fallman, Mans. 2016) [4]

يعبر عن النظام الخطي في فضاء الحالة بالمعادلة التالية، [8]:

$$X' = AX + BU, Y = CX + DU \quad (1)$$

حيث X متجه حالة النظام، Y متجه خرج النظام، U متجه دخل النظام، A, B, C, D مصفوفات الحالة للنظام. نموذج الناقلية المستخدم في بحثنا هذا يتضمن أربع متغيرات حالة تتمثل بالناقلية في كل غرفة من الغرف الأربعة المحددة سابقاً، خرج النظام عبارة عن الناقلية النهائية (ناقلية محلول الديليزة)، دخل النظام عبارة عن متجه مكون من مركبتين: معدل ضخ الحمض $Pu(A)$ ، ومعدل ضخ البيكربونات $Pu(B)$:

$$U = \begin{bmatrix} Pu(A) \\ Pu(B) \end{bmatrix} \quad (2)$$

مصفوفات معادلات الحالة للنظام [8] :

$$A = \begin{bmatrix} -Q/V_1 & 0 & 0 & 0 \\ Q/V_2 & -Q/V_2 & 0 & 0 \\ 0 & Q/V_3 & -Q/V_3 & 0 \\ 0 & 0 & Q/V_4 & -Q/V_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$B = \begin{bmatrix} Q * KA/V_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & Q * KB/V_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C = [0 \ 0 \ 0 \ 1], D = [0 \ 0] \quad (5)$$

يبين الجدول (1) الرموز المستخدمة في النموذج:

الجدول (1) الرموز المستخدمة في النموذج الرياضي [8].

الرمز	دلالتة	واحدته
KA	ناقلية الحمض	ميلى سيمنس/سنتيمتر
KB	ناقلية بيكربونات الصوديوم	ميلى سيمنس/ سنتيمتر
Q	التدفق الرئيسي للماء المعقم	لتر/ثانية
V1	أكبر حجم للوعاء الأول	لتر
V2	أقل حجم للوعاء الأول	لتر
V3	أكبر حجم للوعاء الثاني	لتر
V4	أقل حجم للوعاء الثاني	لتر
PuA	تدفق مضخة الحمض	ميلى لتر/دقيقة
PuB	تدفق مضخة البيكربونات	ميلى لتر/دقيقة

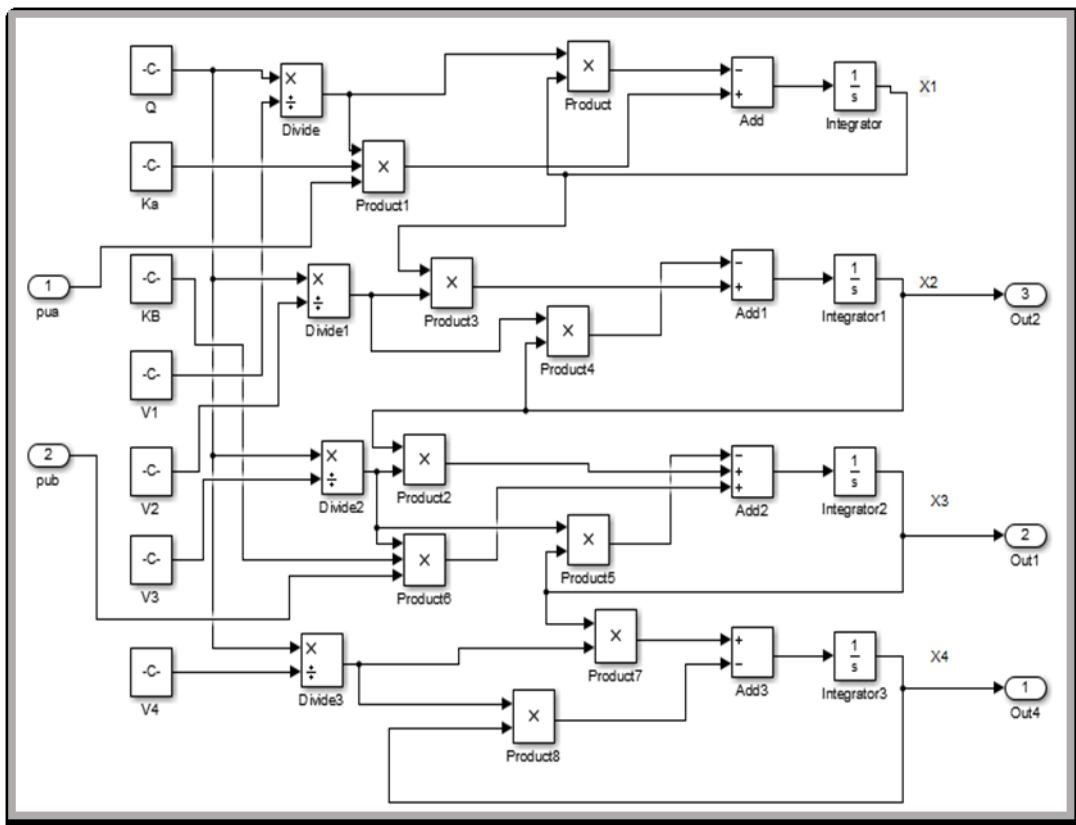
بتمثيل المعادلات السابقة ضمن بيئة Matlab/Simulink وبالاعتماد على الثوابت الموضحة بالجدول (2) ،
 نحصل على النموذج الرياضي لآلية تحضير محلول الديليزة والمبين بالشكل (2)
 الجدول (2) قيم ثوابت النموذج الرياضي [8]

Parameter	Value
Q = 0.5/60;	التدفق الرئيسي %
V1 = 0.0399; V2 = 0.0295; V3 = 0.0384; V4 = 0.0216;	حجم الوعاء %
Ka = 0.8431; Kb = 0.1328;	ناقلية الحمض وناقلية البيكربونات %

يبين الجدول (3) القيم الفعلية لمعدلات ضخ كل من الحمض والبيكربونات وكذلك الناقلية عند قيم خطأ مختلفة عند تجريب النموذج الرياضي.

الجدول (3) القيم الفعلية لمعدلات الضخ والناقلية من النموذج الرياضي [8]

الخطأ	ناقلية المحلول (ms/cm)	تدفق مضخة البيكربونات (ml/cm)	تدفق مضخة الحمض (ml/min)
12.94	2.06	3	4
7.5	7.5	12	12
5.1	9.9	20	15
2.8	12.2	25	15
6.02	8.98	18	25
3.25	11.75	24	25
0.1	14.9	28	16
5-	20	30	30



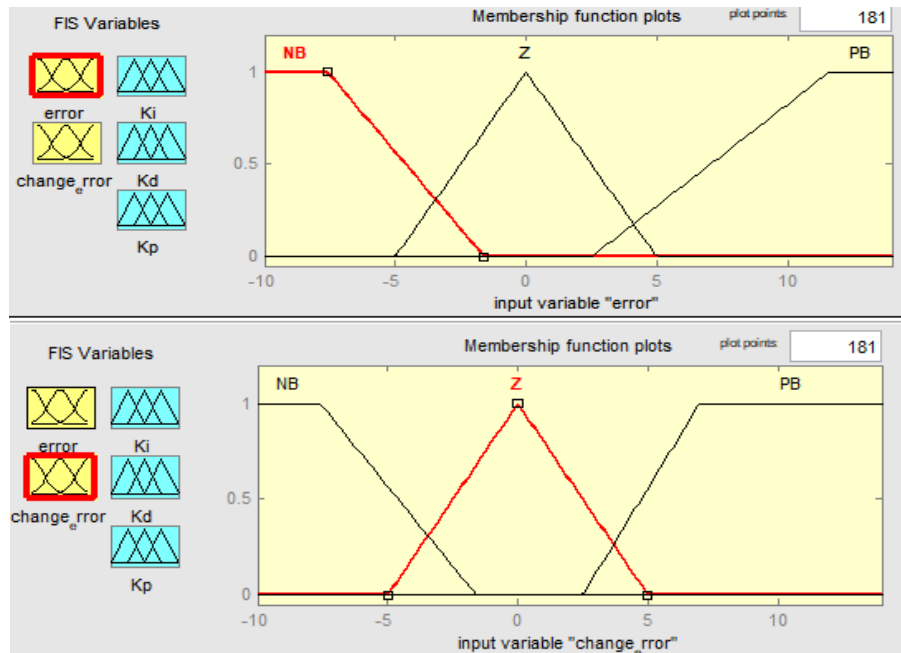
الشكل (2) محاكاة نموذج الناقلية المستخدم

5.2 التحكم باستخدام المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي التقليدي Traditional PID controller

تعطى إشارة خرج المتحكم PID (إشارة دخل النظام) بالعلاقة التالية [6]:

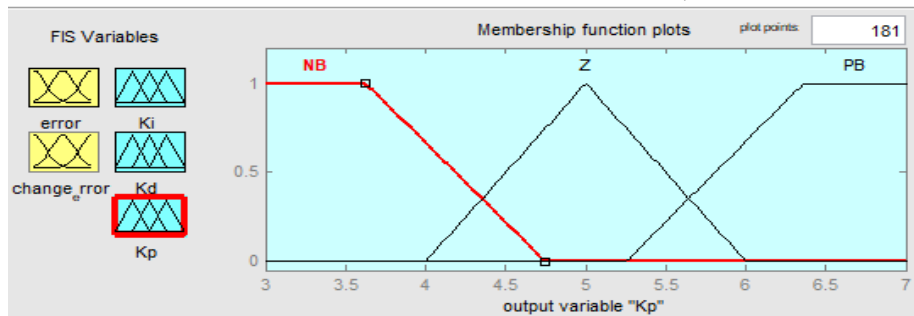
$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) d(t) + k_d \frac{de}{dt} \quad (6)$$

بالاعتماد على النموذج الرياضي لآلية تحضير محلول الديلزة الشكل (2)، تم بناء الدارة المغلقة للتحكم بناقلية محلول الديلزة الشكل (3) عن طريق التحكم بمعدل ضخ كل من الحمض والبيكربونات (pua, pub) باستخدام المتحكم PID التقليدي الموجود في برنامج Matlab، حيث تم تصميم المتحكم PID الأول المسؤول عن التحكم بمعدل تدفق الحمض Pua (الدخل الأول للنظام) وضبط البارامترات (k_p, k_i, k_d) للحصول على أفضل استجابة ممكنة عن طريق التجريب. كذلك الأمر بالنسبة للمتحكم PID الثاني المسؤول عن التحكم بمعدل ضخ البيكربونات Pub (الدخل الثاني للنظام).

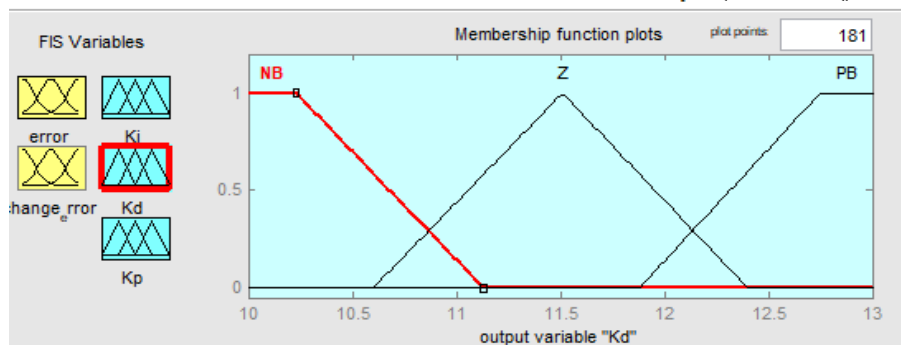


الشكل (5) توابع العضوية لكل من الخطأ ومشتق الخطأ

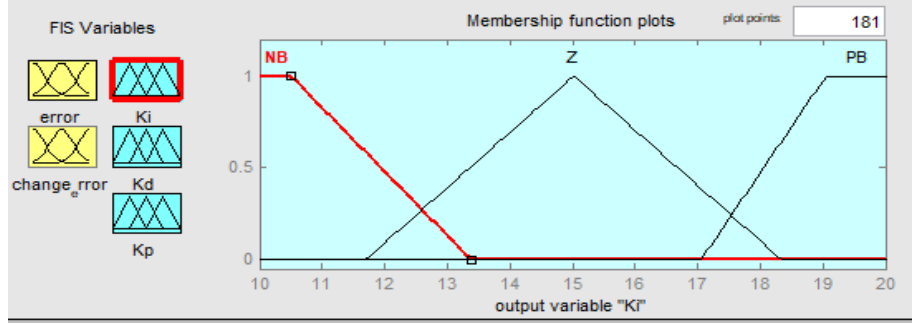
- تحديد خرج المتحكم الضبابي أيضاً بثلاث توابع انتماء كالسابقة وفقاً للمجالات الموضحة بالشكل (6).



توابع العضوية لثابت الربح k_p



توابع العضوية لثابت الربح k_d

توابع العضوية لثابت الربح k_i

الشكل (6) توابع انتماء ثوابت المتحكم PID1

-القواعد الضبابية: تم تصميم المتحكم الضبابي وفق القواعد الضبابية المبينة بالجدول (4,5,6) حيث تم تحديد القواعد بالاعتماد على الخبرة في تحديد كل تركيب من تركيبات الدخل وما يجب أن يقابله كقيمة للخروج [10] ، وبناءً على تأثير قيم أرباح المتحكم PID على الاستجابة.

الجدول (4) القواعد الضبابية للربح التناسبي k_p

e/ec	NB	ZO	PB
NB	PB	PB	ZO
ZO	PB	ZO	NB
PB	PB	NB	NB

الجدول (5) القواعد الضبابية للربح التكاملي k_i

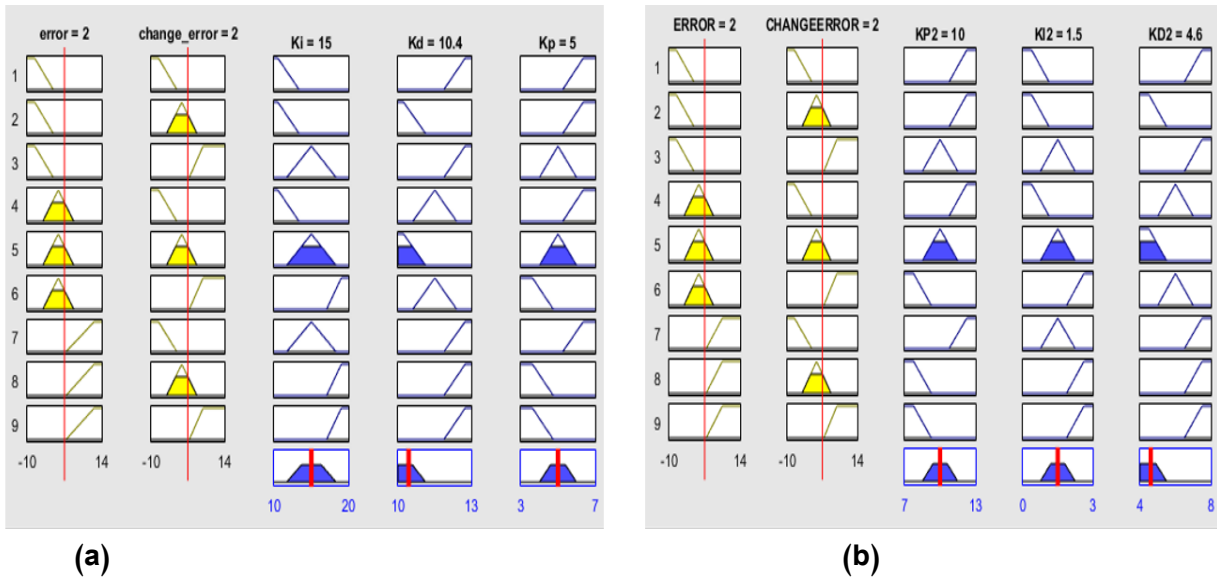
e/ec	NB	ZO	PB
NB	NB	NB	ZO
ZO	NB	ZO	PB
PB	ZO	PB	PB

الجدول (6) القواعد الضبابية للربح التفاضلي k_d

e/ec	NB	ZO	PB
NB	PB	NB	PB
ZO	ZO	NB	ZO
PB	PB	PB	PB

- الاستدلال الضبابي: بعد كتابة القواعد الضبابية، تقوم آلية الاستدلال الضبابي بمعالجة القيم الضبابية (المجالات السابقة) للتوصل إلى خرج النظام الضبابي. تبدأ العملية بحساب معاملات الانتماء للجزء if من القواعد، حيث يوجد مجموعة من التوابع الرياضية المعبرة عن العمليات المنطقية والتي يقوم المصمم بتحديددها بما يتناسب مع المسألة، أكثر هذه التوابع شيوعاً هي standards operation وصيغته Min_Max حيث تعبر Min عن علاقة And و Max عن علاقة OR [9] ، وهي التوابع المستخدمة في البحث، ويوضح الشكل (7) هذه التوابع. أما آليات الاستدلال فهي كثيرة تم الاعتماد على آلية الاستدلال Mamndani لأنها الأكثر شيوعاً والأكثر ملائمة للنظام المدروس [7].

- فك التضبيب: تتم في هذه المرحلة تحويل القيم الضبابية الناتجة عن الاستدلال الضبابي إلى قيم عددية مفهومة للمستخدم، وهنا أيضاً يوجد طرق رياضية مختلفة لإنجاز هذه العملية، أشهرها طريقة مركز الثقل (Centroid Defuzzification Method) المستخدمة في هذا البحث و المبينة أيضاً بالشكل (7) حيث من خلال هذه الطريقة تم الحصول على قيم (k_p, k_i, k_d) لكلا المتحكمين PID1, PID2 .



الشكل (7) آلية الاستدلال وفق التضييب المستخدمة

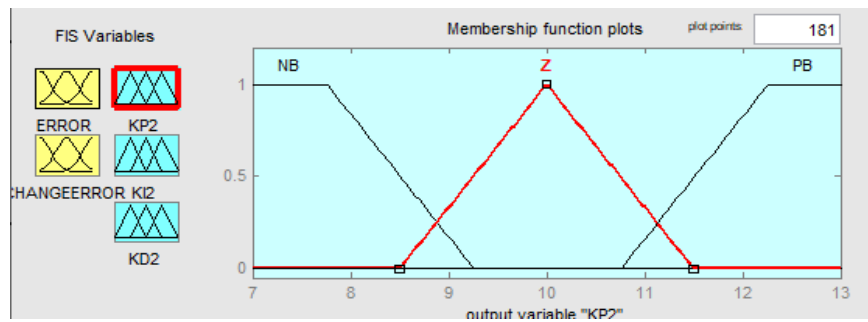
(a) للمتحكم PID1

(b) للمتحكم PID2

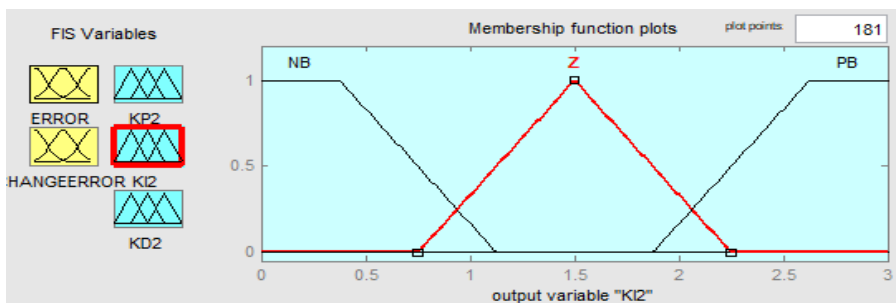
5.4.2 تصميم المتحكم الضبابي FPID2:

تم تصميم المتحكم PID2 بنفس الخطوات السابقة مع اختلاف في قيم ثوابت الربح (k_p, k_i, k_d)

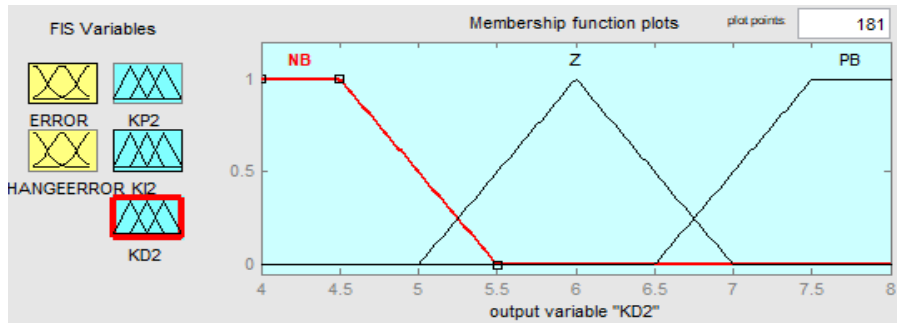
الشكل (8).



توابع العضوية لثابت الربح k_p



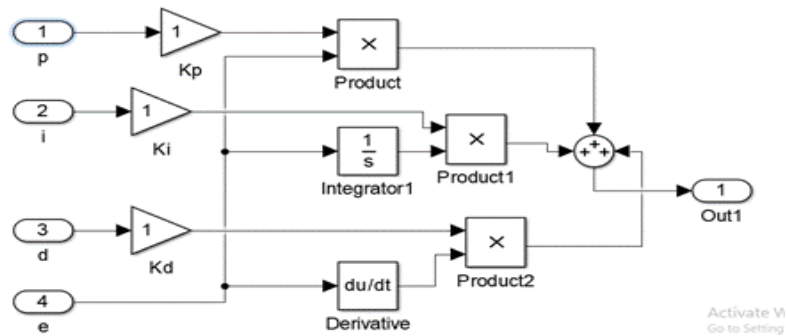
توابع العضوية لثابت الربح k_i



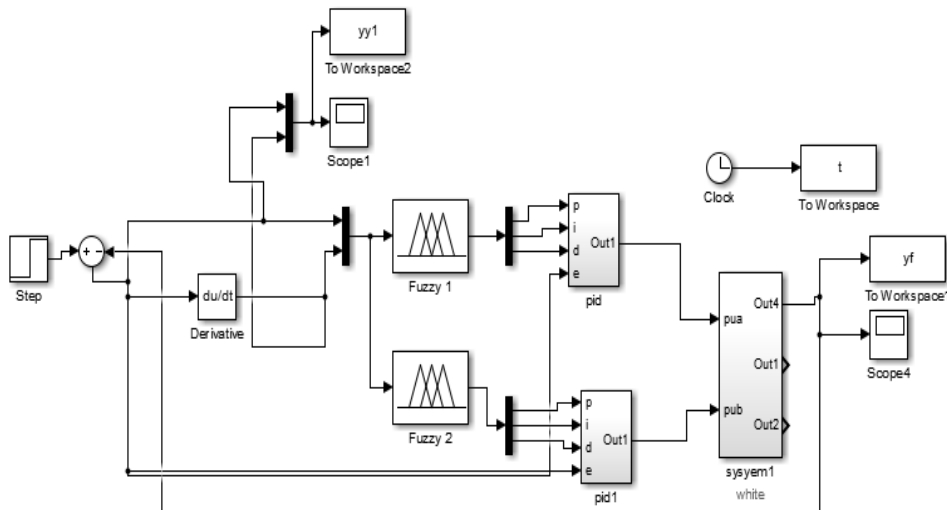
توابع العضوية لثابت الريح k_d

الشكل(8) توابع انتماء ثوابت المتحكم PID2

بعد تصميم المتحكم الضبابي، تم تطبيق كلا المتحكمين PID1, PID2 على دخلي النظام (pua, pub)،
 يبين الشكل (9) بنية المتحكم PID ، ويبين الشكل (10) محاكاة الدارة العملية للنظام باستخدام بيئة
 . Matlab/Simulink



الشكل(9) بنية المتحكم PID

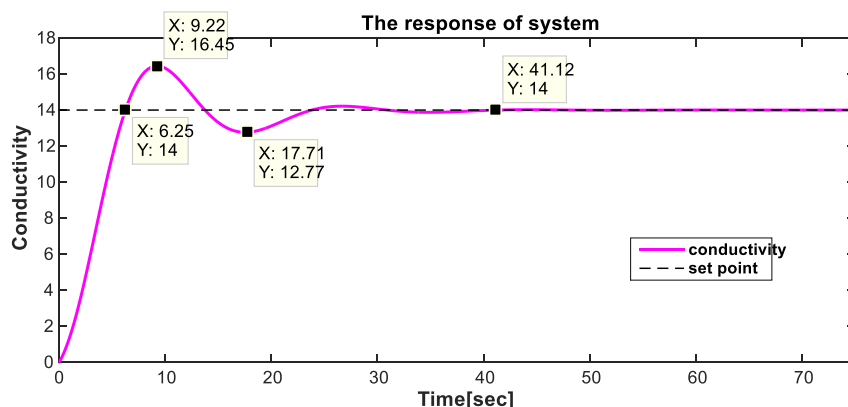


الشكل(10) نموذج النظام مع المتحكمات

6. النتائج والمناقشة:

6.1 نتائج اختبار النظام مع المتحكم PID :

عند تشغيل النموذج المبين بالشكل (٣)، وإجراء عملية ضبط للمتحكم PID، كانت قيم أرباح المتحكم الخاص بمعدل ضخ الحمض ($k_p = 2.658, k_i = 0.157, k_d = 11.178$)، في حين كانت قيم أرباح المتحكم PID الخاص بمعدل ضخ البيكربونات ($k_p = 9.02, k_i = 1.494, k_d = 6.238$)، هذه القيم أعطت الاستجابة المبينة بالشكل (11).

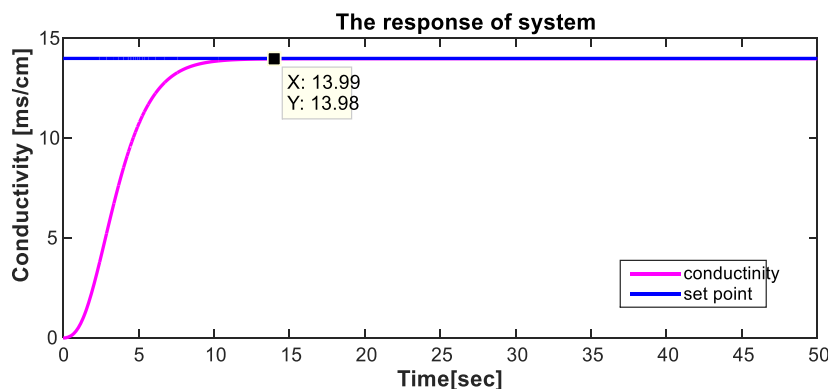


الشكل (11) استجابة النظام للمتحكم PID

نلاحظ أن استجابة النظام للمتحكم PID لم تكن استجابة مثالية، بسبب وجود تجاوز لقيمة ناقليية محلول الديليزة المطلوبة، و اهتزاز بسيط قبل الاستقرار على قيمة الناقليية المطلوبة (14sm/cm) عند الزمن $t = 41.12 \text{ sec}$.

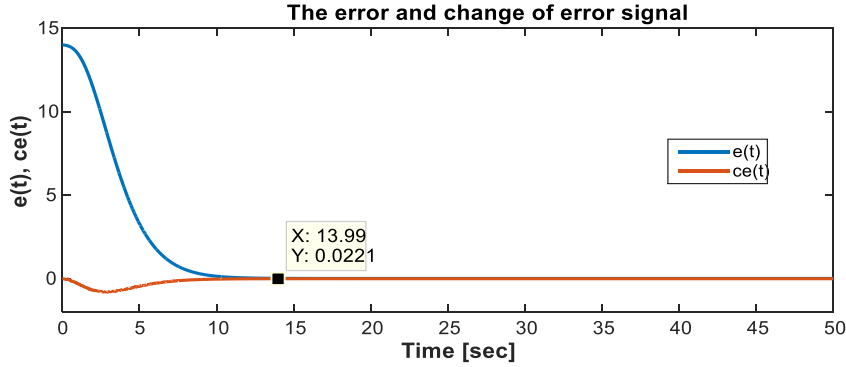
6.2 نتائج اختبار النظام مع المتحكم FPID :

بعد تشغيل النظام المبين بالشكل (10)، أعطى المتحكم الضبابي **FPID1** المسؤول عن التحكم بمعدل ضخ الحمض Pua القيم التالية ($k_p = 5, k_i = 15, k_d = 10.4$)، بينما أعطى المتحكم الضبابي **FPID2** المسؤول عن التحكم بمعدل ضخ البيكربونات Pub القيم ($k_p = 10, k_i = 1.5, k_d = 4.6$)، وكانت الاستجابة (ناقليية سائل الديليزة) كما في الشكل (12)، حيث نلاحظ عدم وجود تجاوز للهدف، خطأ ستاتيكي بنسبة 2%، وزمن استجابة أقل من 14 ثانية.



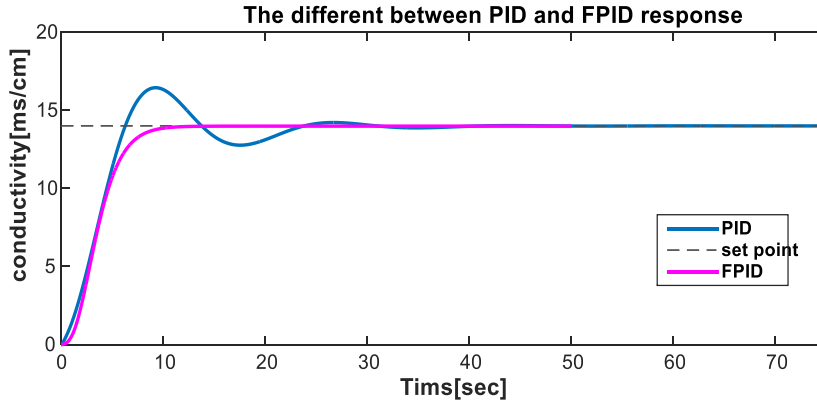
الشكل (12) استجابة النظام عند تطبيق المتحكم FPID

يبين الشكل (13) إشارات كل من الخطأ ومشتق الخطأ المطبقة على دخل المتحكم، من الواضح أنّ قيمة الخطأ كبيرة في البداية بسبب إشارات التحكم الصغيرة وانشغال المتحكم الضبابي بإيجاد القيم المثلى لبارمترات المتحكم PID وفق القواعد الضبابية، وعند الزمن 10 sec بدأ النظام بالاستقرار حيث استقر على خطأ الحالة الثابتة 2% عند الزمن 13.99 sec، وهذا يدل على أن المتحكم الضبابي تمكن من إيجاد إشارات التحكم المناسبة لضبط بارمترات المتحكم PID بشكل صحيح.



الشكل (13) إشارات الخطأ ومشتق الخطأ

تم دمج استجابة كل من المتحكمين (PID, FPID) في الشكل (14). نلاحظ أن FPID أعطى نتائج أفضل، حيث حقق قيمة الناقلية المطلوبة خلال زمن جيد حوالي 14 ثانية، مع قيمة خطأ ستاتيكي صغير (2%)، دون تجاوز للهدف، الشكل (12). في حين كان الزمن اللازم للوصول للناقلية المطلوبة عند استخدام المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي PID حوالي (41) ثانية، مع وجود تجاوز أعظمي قدره (2.45)، وقيمة الخطأ الستاتيكي معدومة، الشكل (11).



الشكل (14) مقارنة بين استجابة النظام للمتكمين PID & FPID

يبين الجدول (7) مقارنة بين أداء المتحكم التقليدي Traditional PID الذي تم ضبط بارمتراته تجريبياً للحصول على أفضل استجابة، وبين المتحكم FPID المصمم.

الجدول (7) مقارنة أداء كل من المتكمين PID, FPID المصممين في بحثنا هذا

Parameters	PID	Fuzzy PID
Overshoot	16.45	0
Rise time	6.25	13.99
Steady state error	0	0.02
Settling time	41.12	13.99

يبين الجدول (8) مقارنة أداء المتحكم الضبابي المصمم مع دراسات سابقة [4],[8]:

الجدول (8) مقارنة أداء المتحكم الضبابي المصمم مع دراسات سابقة

المتحكم	التجاوز الأعظمي	زمن الاستقرار	خطأ الحالة الثابتة
PID [4]	1.5	18	0.03
LQG [4]	لا يوجد	25	0.07
FUZZY [8]	لا يوجد	20	0.08
MPC [4]	1.8	20	0.06
Fuzzy PID	لا يوجد	13.99	0.02

نستنتج أن استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي (المنطق الضبابي) في تصميم المتحكم PID حسن من استجابة النظام في الحلقة المغلقة من خلال الدقة في ضبط قيم بارامترات المتحكم PID الصحيحة والمثلى، ومنه الوصول لقيمة ناقلية محلولة الديليزة المطلوبة بزمن قصير وبالتالي تعزيز كفاءة جلسة غسيل الكلى.

الاستنتاجات:

تم تصميم متحكم ضبابي لضبط بارامترات المتحكم PID التقليدي لتنظيم ناقلية سائل الديليزة لضمان إجراء عملية غسيل الكلى بالشروط المطلوبة، وقد تم:

- تحسين بارامترات الاستجابة الزمنية وإلغاء التجاوز.
- ضبط ناقلية سائل الديليزة في جهاز غسيل الكلى بنسبة خطأ 2% فقط، وهي ضمن المجال المسموح للناقلية.
- السرعة في الوصول لقيمة الناقلية المطلوبة، حيث بلغ زمن الصعود **tr=13.99 sec**.

اقتراحات العمل المستقبلي:

استخدام خوارزميات أمثلية أخرى لتصميم المتحكم PID كخوارزمية سرب الطيور PSO أو الخوارزمية الجينية GA ومقارنة الأداء مع المتحكم الضبابي المصمم في هذا البحث.

المراجع الأجنبية:

- [1] Ahmad, T. A. (a).” *Modeling and control of dialysis systems*”, Volume 1. London, England: Springer Heidelberg, 2013.
- [2] Ahmad, T.A. (b). "*Modeling and Control of Dialysis Systems*", Volume 2. London, England: Springer Heidelberg, 2013.
- [3] G. Samuel, A. Arifin, MH. Fatoni, R. Setiawan, “*Design and implementation control of PID controller of Dialysate pump of Hemodialysis Machine*”, Intervational conference on Computer Engineering , Network, and Intelligent Multimedia (CENIM), 2020.
- [4] Fallman, Mans, “*Model-Based Conductivity Control of Fluid Composition*”; Thesis. Department of Automatic Control. Lund University. Sweden, 2016.
- [5] Vahid, R. N., Manouchehr, E., Mohammed, R. J. M., & Fatema, Y. ‘*Fuzzy logic controller for hemodialysis machine based on human body model*’. Journal of Medical Signal and Sensors, 1(1), 36-48, 2019.
- [6] J. Diab, S. Alali, “*A new immune-LQI controller to regulate dialysate conductivity*”, Songklanakar J. Sci. Technol; Vol.44 , No.1, pp. 242-249, 2022.
- [7] A. Rehman, A.K. Singh, A. Singh, P.Dubey. “*Mamdani and Sugeno Fuzzy Logic Approach of PID Controller*“. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET), Vol.10 ,Issue V, 2022.

المراجع العربية:

- [8] شحادة. شذا، دياب. جمانا، أحمد. أحمد، المتحكم الضبابي لتحضير محلول الديليزة في جهاز غسيل الكلية"، مجلة العلوم الهندسية وتكنولوجيا المعلومات المجلد (3)، العدد (4)، 2019 .
- [9] عبد الحميد. رداح ،"توليف آلي لمتحكم PID باستخدام المنطق الضبابي"، مجلة جامعة تشرين، العلوم الهندسية، المجلد (43)، العدد (3)، 2021 .
- [10] جوحلة. الفت، عيسى. أحمد، نظام التحكم التكييفي بضربات القلب بالاعتماد على المتحكم PD المؤلف ضبابياً "، مجلة جامعة البعث، المجلد (44)، العدد (14)، 2022