

Fuzzy Controller to Prepare the Dialysate Solution in Hemodialysis Machine

Shaza Yasser Shehada

Joumana Mahmoud Diab

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering || Al Baath University || Syria

Ahmad Suliman Ahmad

Faculty of medical engineering || Al-Andalus university || Syria

Abstract: We concentrate on designing a fuzzy controller, its task is management the operation of preparing the dialysate solution with the required Specifications and continuous monitoring to set the value of conductivity that takes major role to success the bloody Purification operation, where any error in this operation lead to reduce the efficiency of hemodialysis machine so the patient will face the damage.

In this research, we reduced the time to treatment (TTT) by speeding the preparing operation of the dialysate solution, and achieve more reliable value of required conductivity so it reduces the alarms that result of override the allowable values which lead to stop the preparing operation and wait for the required values. The fuzzy controller gave us more efficiency when we compared with other controllers which was achieved in previous researches, so we can use the learning algorithms to make this controller more adaptive.

Keywords: Fuzzy Control, Hemodialysis Machine, Conductivity of Dialysate.

المتحكم الضبابي لتحضير محلول الديليزة في جهاز غسيل الكلية

شذا ياسر شحاده

جمانا محمود دياب

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية || جامعة البعث || سوريا

أحمد سليمان أحمد

كلية الهندسة الطبية || جامعة الأندلس || سوريا

المُلخَص: ركزنا في هذا البحث على تصميم متحكم ضبابي مهمته قيادة عملية تحضير محلول الديليزة بالمواصفات المطلوبة وبشكل آلي مستمر مع المراقبة المستمرة للحفاظ على قيمة ناقلية هذا المحلول، حيث إن انجاز عملية التنقية الدموية خلال الوقت المحدد وبأقل نسبة أخطاء وإنذارات ممكنة يتوقف على عدة عوامل ومن أهمها عدم تجاوز الحدود المسموحة لقيمة الناقلية حيث أن أي خلل فيها يؤدي إلى عدم كفاءة عملية الغسيل الكلوي وتعرض المريض للخطر.

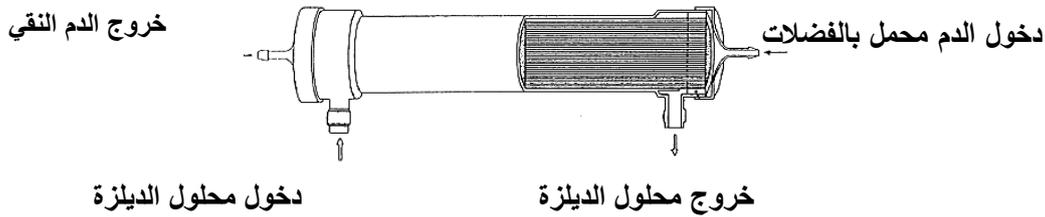
تمكنا في هذا البحث من إنقاص زمن المعالجة (Time To Treatment) TTT من خلال الدقة في عملية تحضير المحلول، وبالتالي وثوقية أكبر في قيم الناقلية المطلوبة وهذا بدوره قلل من الإنذارات الناتجة عن تجاوز الحدود المسموحة والتي يرافقها توقف عملية التحضير وتصريف المحلول الغير مناسب والانتظار لتحقيق الحدود المطلوبة، وبالتالي أعطى المتحكم الضبابي كفاءة أكبر لعملية تحضير المحلول مقارنة مع متحكمات أخرى أنجزت في دراسات سابقة.

الكلمات المفتاحية: التحكم الضبابي، جهاز غسيل الكلية، ناقلية محلول الديليزة.

1- المُقدِّمة:

إن عملية غسيل الكلية مصطلح طبي يشير إلى إزالة السموم (اليوريا) والسوائل الزائدة من الدم الناتجة عن فشل عمل الكلية، ويحافظ على مستويات الأمان لبعض الشوارد مثل البوتاسيوم والصوديوم والبيكربونات. (Azar,2013, v1 p.22)

محلول الديليزة هو عبارة عن محلول كيميائي يتم تحضيره بعناية ودقة ويتألف من ماء معالج وحمض وبيكربونات الصوديوم، حيث يتم خلطها وفق نسب محددة وبدقة عالية وتراكيز محددة للحصول على المحلول المناسب والذي يدخل إلى الفلتر المكون من شعيرات دقيقة جدا يمر عبرها الدم، حيث يملأ المحلول الفراغ بين الشعيرات فيصبح الدم على تماس مباشر مع المحلول عبر الغشاء النصف نفوذ ليتم وفق مبدأ التناضح العكسي الناتج عن اختلاف التراكيز بين المحلول والدم انتقال اليوريا (السموم) من الدم إلى المحلول وتنقية الدم والتخلص من السوائل الزائدة الشكل 1. (Ledebo, Ingrid.2002),(Azar,2013, v1, p.126)



الشكل (1) آلية التنقية الدموية

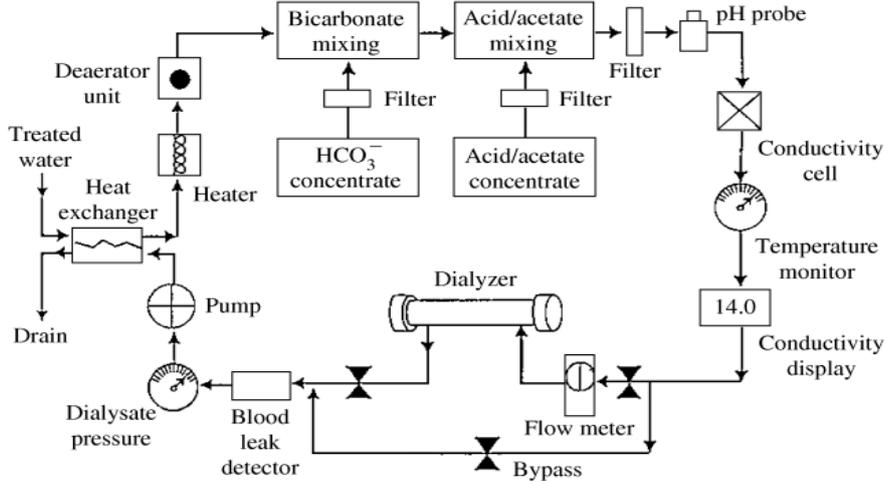
1.1 آلية تحضير محلول الديليزة: إن تحضير محلول الديليزة ذو أهمية عالية لنجاح عملية التنقية الدموية حيث كلما كان المحلول محضراً بدقة وعناية أكثر كلما كانت عملية التنقية أفضل وأسرع. يبين الشكل 2 آلية تحضير محلول الديليزة في جهاز غسيل الكلية حيث يتم جلب المياه المنزوعة الشوارد والمعقمة من المحطة المركزية للمياه في المنشأة الطبية ومن ثم تسخينها لتصل إلى درجة حرارة 37° تماثل الحرارة الطبيعية لدم المريض وتفريغها من الغازات وبعد ذلك تنتقل إلى مرحلة إضافة التراكيز (الحمض وبيكربونات الصوديوم) عن طريق مضخات محددة إلى حجرة المزج لتشكيل محلول ملحي ذو بنية قريبة من بنية الدم. (Ahmad, 2009)

إن إضافة التراكيز بغاية الخطورة لأن تجاوز القيم المسموحة سيجعل عملية انتقال الشوارد بشكل عكسي أي من محلول الديليزة إلى الدم. (Azar,2013, v1, p.128)

يتم التأكد من جودة محلول الديليزة من خلال مراقبة قيم الناقلية والتي تعني المحتوى الشاردي أو الأيوني لمحلول الديليزة ولا تعني تركيز أي من الشوارد ضمنه، وبالتالي أي خطأ في قيمة الناقلية تشير إلى خطأ في تركيب المحلول وهذا بدوره ينعكس بالضرر على المريض لذا يقود الجهاز بإصدار إنذار صوتي لحل هذه المشكلة وتفادي الخطر الممكن وقوعه على المريض. (Azar,2013, v2 p.786)

إن الأخطاء في تركيب محلول الديليزة قد تنتج عن خطأ في تشغيل المضخات لذا يتوجب أن يتم ضبط هذه المضخات بشكل آلي أكثر دقة وذلك من خلال مراقبة قيم الناقلية بشكل مستمر واتخاذ القرار المناسب في ضبط المضخات في الوقت المناسب قبل الوقوع في مشكلة توقف الجهاز، وذلك من خلال تشغيل مضخات التراكيز بقيم محددة وفق معايير ومواصفات محددة للحصول على محلول ديليزة ذو ناقلية ضمن الحدود المسموحة والمرتبطة مع حالة المريض الصحية، وبالتالي أي خلل في عمل هذه المضخات يؤدي إلى تجاوز حدود الناقلية وبالتالي خروج الجهاز

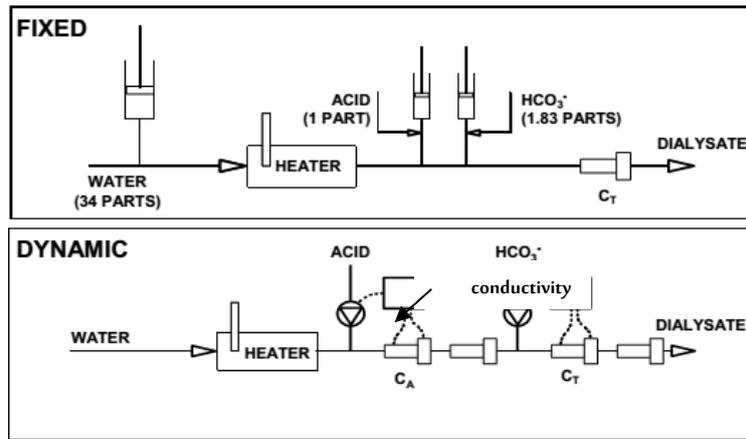
عن الخدمة ووضع المريض في حالة الانتظار ريثما يتم اصلاح المشكلة وهذا بدوره يؤدي إلى زيادة زمن المعالجة الكلي والذي نسعى في بحثنا هذا إلى تقليله قدر الإمكان. (Ledebo, Ingrid. 2002)



الشكل (2) الجزء الخاص بدارة تحضير محلول الديليزة

1.2 الدراسة المرجعية: يوجد في أجهزة غسيل الكلية عدة آليات لتحضير المحلول، تعتمد القديمة منها على الحجم الثابت من خلال تأمين المحلول بتركيز محددة وذلك بجعل المضخة مبرمجة بشكل مسبق أي تأخذ حجوم ثابتة خلال فترات زمنية محددة وهذا يتطلب أن يكون الوعاء ثابت الحجم وهذا ما يفرض علينا استخدام الوعاء المحدد من الشركة المصنعة، ولكن هذه الطريقة لم تعد مستخدمة نظراً للتقييد المفروض من الشركة المصنعة ولأضرار الخلط الكيميائي المسبق للمواد. أما الأجهزة الحديثة تعتمد على الآلية الديناميكية (الآنية) لتحضير المحلول الشكل 3 حيث يوجد حساسين لقياس الناقلية، الحساس الأول يقيس الناقلية بعد مرحلة اضافة المادة الأولى والحساس الأخر يقيس الناقلية بعد إضافة المادة الثانية وتقاس الناقلية [ms/cm] أي ميلي سيمنس/ سنتيمتر والمجال الطبيعي للناقلية هو [12 - 16] وفي حال تجاوز الحد المسموح للناقلية تقوم دارة الديليزة بإيقاف تدفق محلول الديليزة وبالتالي تمنع مرور المحلول الغير مناسب إلى المريض وتحمي المريض من أية أذية ناجمة عن ذلك. (Azar,2013, v1, p.136)

يحتاج مريض الفشل الكلوي إلى جلسة غسيل كلوي مدتها حوالي 4 ساعات تكرر 2 إلى 3 مرات اسبوعياً (Azar,2013,v1 p.24)



الشكل (3) الآلية الديناميكية والثابتة لتحضير محلول الديليزة

تم تصميم عدة أنواع من المتحكمات من قبل (Fallman, Mans. 2016) بالاعتماد على النموذج الرياضي المعتمد على الناقلية وأعطت نتائج مقبولة مع تأخيرات زمنية ملحوظة في عملية التحضير نسعى الى انقاصه في بحثنا. تم تصميم متحكم ضبابي لجهاز غسيل الكلية باستخدام نموذج الجسم البشري، باستخدام نموذج رياضي يعتمد على المعادلات الرياضية والاستجابات الفيزيولوجية لجسم الانسان وتطلب معرفة دقيقة بفيزيولوجيا الجسم البشري ولكنه لم يولي اهتمامه لعملية التحضير بل ركز على فيزيولوجيا الجسم خلال الجلسة. (Nafisi, et al. 2011) مشكلة البحث: تسعى الأبحاث جاهدة إلى تخفيف العبء الزمني عن المريض وذلك من خلال تقليل زمن المعالجة TTT قدر الامكان وذلك بتجنب التوقف المتكرر للجهاز بسبب الإنذارات الناتجة عن أي خلل في عمل الجهاز. من أهم هذه الإنذارات عدم صحة ناقلية محلول الديليزة بسبب خطأ في عمل المضخات التي تؤمن المواد اللازمة لتشكيل المحلول. وبالتالي فإن توقف الجهاز ومراجعة الخلل واصلاحه سيعطي زمن اضافي لعملية المعالجة، ونسعى من خلال بحثنا إلى تجنب هذا الزمن قدر المستطاع من خلال المتحكم الضبابي الذي يضمن محلول ديليزة مناسب ذو ناقلية محددة طيلة فترة المعالجة.

يتم في البحث ما يلي:

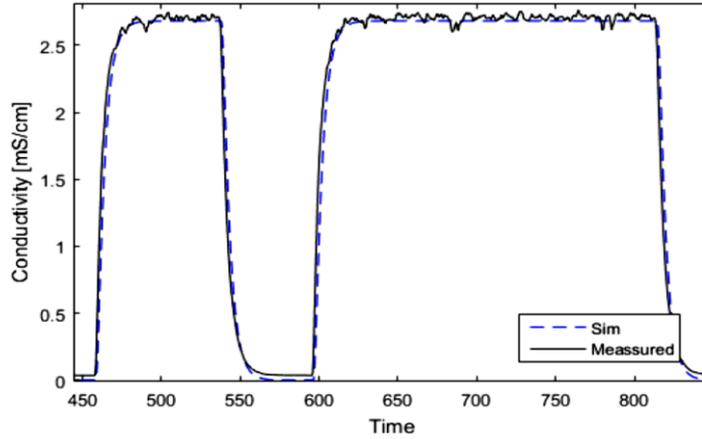
- 1- تصميم المتحكم الضبابي المسؤول عن تحضير محلول الديليزة في جهاز غسيل الكلية.
- 2- مقارنة عمل المتحكم الضبابي المصمم مع أنواع أخرى للمتحكمات مثل (PID (proportional-integral-derivative controller), MPC (Model Predictive Controller), LQG (Linear Quadratic Gaussian controller) تم إنجازها في أبحاث سابقة.

2- هدف البحث

يهدف البحث إلى استخدام تقنية التحكم الضبابي لضبط ناقلية محلول الديليزة ضمن الحدود المطلوبة وذلك بالاعتماد على نموذج رياضي للنظام يكافئ النظام الحقيقي وعلى قياسات حقيقية وقيم معيارية لعمل مضخات الحمض والبيكربونات لجعلها تعمل بألية تضمن الحفاظ على الناقلية طيلة جلسة المعالجة وذلك لضمان عدم توقف الجهاز، ومن أجل الحصول على أفضل معدل تنقية دموية يعبر عن مدى إزالة اليوريا خلال الزمن المحدد. (Maduell, Fransesco. 2009)، وبالتالي نسعى لإيجاد منهجية أكثر وثوقية لتحضير محلول الديليزة الخاص بجهاز غسيل الكلية من أجل تحسين الأداء.

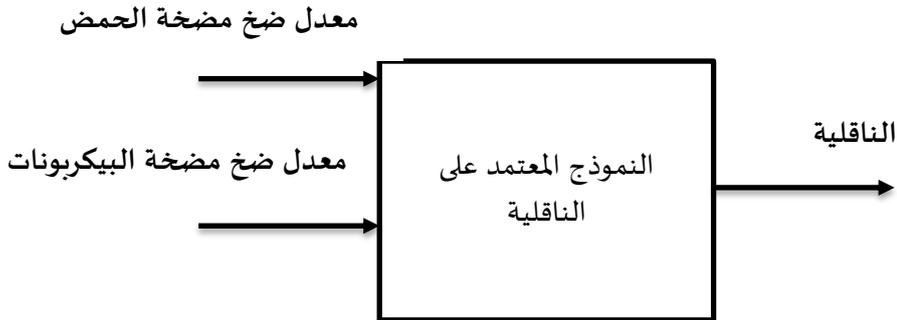
3- مواد وطرائق البحث:

1. عينة البحث: تم تطبيق البحث باستخدام النموذج الرياضي المعتمد على الناقلية (Model-Based Conductivity) لنظام الخلط الكيميائي المسؤول عن تحضير محلول الديليزة حيث قام الباحث (Måns Fällman بالتأكد من موثوقية هذا النظام ومقارنته مع النظام الحقيقي والحصول على خطأ مسموح الشكل 4. (Fallman, Mans. 2016)



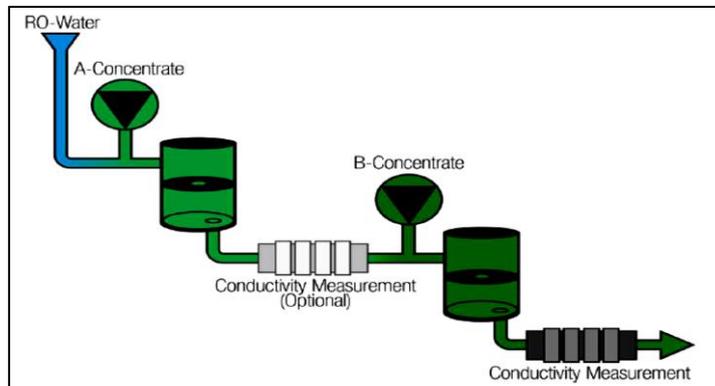
الشكل (4) مقارنة النظام الحقيقي والنموذج الرياضي (Fallman, Mans. 2016)

1.1 النموذج المعتمد على الناقلية: يعكس هذا النظام الآلية الفيزيائية والكيميائية لعملية خلط كل من الماء المقطر والبيكربونات والحمض للحصول على محلول الديلزة وذلك بالاعتماد على بارامترات محددة حيث يعطي هذا النموذج قيمة الناقلية لمحلول الديلزة من خلال معادلاته الرياضية وذلك بالاعتماد على معدل ضخ كل من مضخة الحمض وبيكربونات الصوديوم مع الأخذ بعين الاعتبار جميع الشروط الفيزيائية والكيميائية الشكل 5. (Fallman, Mans. 2016).



الشكل (5) النموذج المعتمد على الناقلية

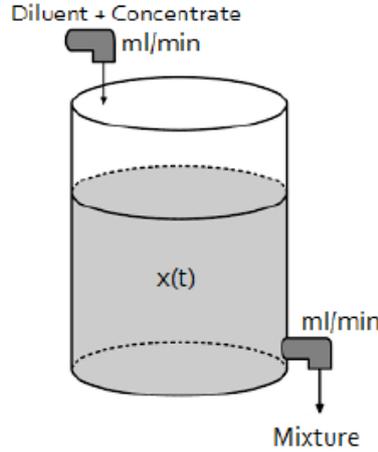
1.2 شكل النظام بين الشكل 6 مخطط توضيحي للنموذج الرياضي المستخدم



الشكل (6) مخطط توضيحي للنموذج الرياضي المستخدم (Fallman, Mans. 2016)

1.3 نمذجة النظام:

تم الاعتماد في هذا النموذج على فصل حجرة الخلط إلى وعائين أصغر حجماً الشكل 6 وبعد كل وعاء خلط يتم استخدام خلية قياس الناقلية حيث يمكن اعتبار الناقلية في كل وعاء هي متغير من متغيرات الحالة للنظام الممثل وكل وعاء يتم ملئه من التدفق الرئيسي للماء المعقم بمعدل ثابت الشكل 7. (Fallman, Mans. 2016).



الشكل (7) آلية الخلط الكيميائي في النموذج المستخدم

وبالتالي يمكن وصف معدل تغير تركيز المواد داخل الوعاء على أنه الفرق بين تركيز المواد الداخلة والمواد الخارجة وفق المعادلة التالية: (Fallman, Mans. 2016).

$$V \cdot C^\circ = Q_{in} \cdot C_{in} - Q_{out} \cdot C = Q_{in} (C_{in} - C)$$

حيث V حجم الوعاء

C تركيز المواد في الداخل

C_{in} تركيز المواد الداخلة

Q_{in} معدل تدفق المواد الداخلة

Q_{out} معدل تدفق المواد الخارجة

من أجل حجم ثابت يكون تدفق المواد الداخلة مساوي لتدفق المواد الخارجة.

سوف نقوم بتمثيل النظام في فضاء الحالة وفقاً للمعادلات التالية: (Ogata, Katsuhiko. 2002)

$$X^\circ = AX + BU \quad (1)$$

$$Y = CX + DU \quad (2)$$

X شعاع متغيرات الحالة: وهو الذي يحدد السلوك المستقبلي للنظام عند معرفة الوضع الحالي للنظام

ومعرفة إشارة الدخل.

X° المشتق الزمني لشعاع الحالة، إذ يمثل كل عنصر منه مشتق أحد متغيرات الحالة.

U : إشارة الدخل للنظام.

Y : إشارة خرج النظام.

A, B, C, D : مصفوفات الحالة.

وبالتالي تصبح معادلات الحالة بالشكل:

A=

$$\begin{bmatrix} -Q/v_1 & 0 & 0 & 0 \\ Q/v_2 & -Q/v_2 & 0 & 0 \\ 0 & Q/v_3 & -Q/v_3 & 0 \\ 0 & 0 & Q/v_4 & -Q/v_4 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} Q * KA/v_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & Q * KB/v_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

$$D = [0]$$

والدخل هو عبارة عن معدل ضخ كل من المضختين

$$u = \begin{bmatrix} PuA \\ PuB \end{bmatrix}$$

مع الأخذ بعين الاعتبار التأخير الزمني من لحظة حقن المادة إلى لحظة قياس الناقلية والذي يتعلق بطول الانبوب الذي ينقل المحلول ومساحة مقطعه:

$$\tau = L * \frac{A}{Q}$$

الجدول (1) دلالة الرموز المستخدمة في النموذج ووحدها

الرمز	دلالاته	واحدته
KA	ناقلية الحمض	ميلى سيمنس/سنتيمتر
KB	ناقلية بيكربونات الصوديوم	ميلى سيمنس / سنتيمتر
τA	التأخير الزمني لضخ الحمض	ثانية
τB	التأخير الزمني لضخ البيكربونات	ثانية
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 ليتر/دقيقة
PuB	تدفق مضخة البيكربونات	ميلى ليتر/دقيقة

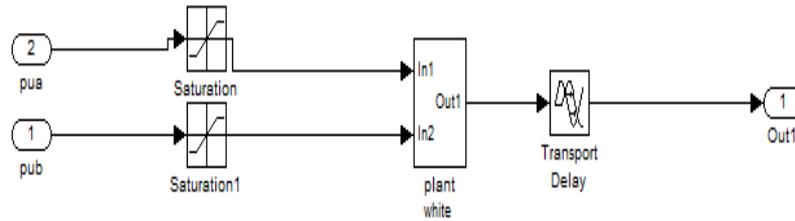
إن المراقبة المباشرة لناقلية محلول الديليزة هي عملية مفيدة لدراسة نمط توازن الصوديوم في مرضى غسيل الكلى (Ledebo, Ingrid. 2002)، ولكن التحدي الأكبر للباحثين كان من خلال تقليل وقت بدء تشغيل جهاز الغسيل الكلوي وإعادة تشغيله عن طريق استخدام حلقات التحكم المستهلكة للوقت واستكشاف تقنيات النمذجة المختلفة لإيجاد أفضل مزيج من التنوع والمطابقة للعملية. (Måns Fällman 2016)

حيث استخدم التابع التربيعي الغوصي الخطي عنصرين رئيسيين للعمل، وحدة تحكم متكاملة تربيعية خطية لتوليد إشارات التحكم ومرشح Kalman لتقدير كل من الحالات غير المقاسة والحالات التي يمكن قياسها، تم تقييم المتحكم التنبؤي المعتمد على النموذج MPC لمعرفة مدى زيادة الأداء مع خوارزمية أكثر تقدماً، باستخدام مجموعة أدوات Simulink MPC لتسريع التقييم، مع موالف MPC المصاحب الذي جعل التوليف سريعاً. استخدمت معظم الدراسات السابقة خوارزميات التحكم الرياضية لتصميم المتحكم، بينما اعتمدت دراستنا على محاكاة السلوك الطبيعي للنظام وذلك لتصميم المتحكم ضبابي.

2. أدوات البحث: حاسب، برنامج ماتلاب MATLAB.
3. إجراءات البحث: نمذجة آلية تحضير محلول الديليزة ثم تطبيق تقنية التحكم الضبابي لضبط بارامترات المحلول ومقارنتها مع تقنيات تحكم أخرى.

4- النتائج والمناقشة:

تم استخدام مكتبة المحاكاة في برنامج ال MATLAB لتمثيل النموذج الرياضي ومحاكاة النظام في الحلقة المفتوحة في الشكل 8، باعتبار أن عملية المحاكاة تتم بالاعتماد على الثوابت المحددة في الجدول 2.

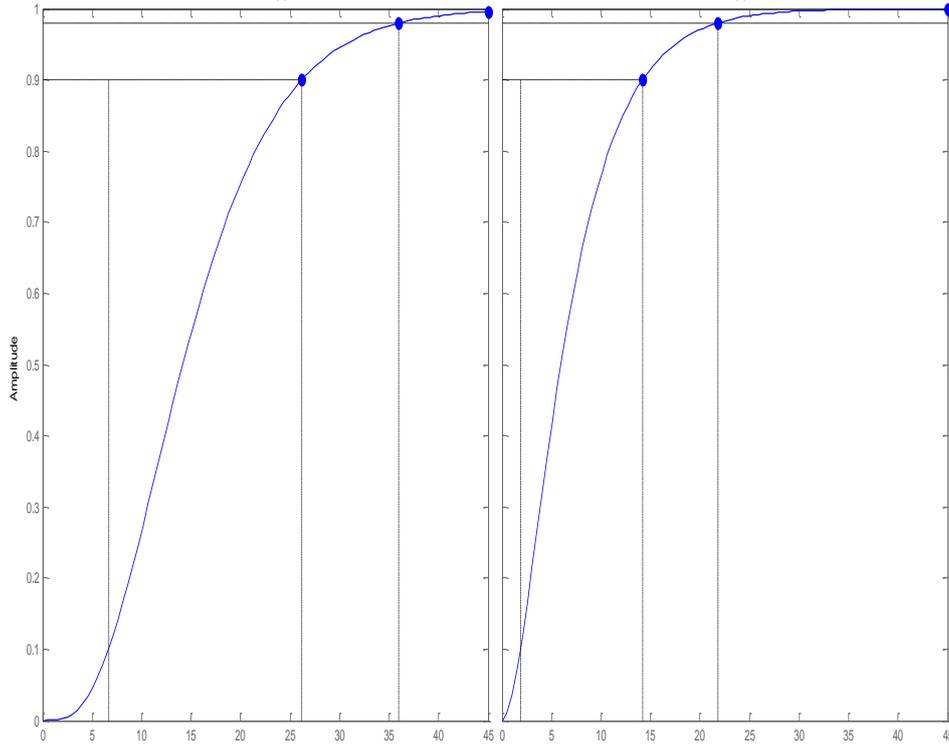


الشكل (8) تمثيل النظام في بيئة ال MATLAB

الجدول (2) قيم البارامترات المستخدمة

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 %

نلاحظ أن النظام يحتاج زمن كبير للوصول للقيمة المطلوبة كاستجابة لدخل الخطوة واحدة الشكل 9.



الشكل (9) منتهي المحاكاة لنموذج النظام في الحلقة المفتوحة

ثانياً: تصميم المتحكم الضبابي

1- تحديد متغيرات الدخل والخرج: إن المتحكم المراد تصميمه هو نظام متعدد الدخل ومتعدد الخرج MIMO (Multi Inputs Multi Outputs)، لذا سنعتبر المدخل الأول للمتحكم الضبابي هو قيمة الخطأ بين القيمة المطلوبة للناقلية والقيمة الحقيقية:

$$\text{الخطأ} = \text{القيمة المطلوبة} - \text{القيمة الحقيقية}$$

والدخول الثاني هو عبارة عن تغير الخطأ

$$\text{تغير الخطأ} = \text{القيمة الحالية} - \text{القيمة السابقة}$$

والمتحكم الضبابي سيتولى مهمة حساب معدل ضخ كل من مضخة البيكربونات ومضخة الحمض من خلال الضخ بمعدل تدفق محدد لذا سيكون لدينا مخرجين للمتحكم الضبابي هما معدل ضخ المضخة A وهو PuA والخرج الثاني هو معدل ضخ المضخة B وهو PuB.

2- إعطاء قيم لغوية لكل من متغيرات الدخل والخرج: نقوم بهذه المرحلة بتقسيم مجال كل متغير إلى عدة قيم لغوية كما يلي:

الدخل الأول error:

NH: negative high, NS: negative small ZERO: no error, PS: positive small, PH: positive high, VPH: very positive high

الدخل الثاني de/dt:

L: low, C: constant, H: high

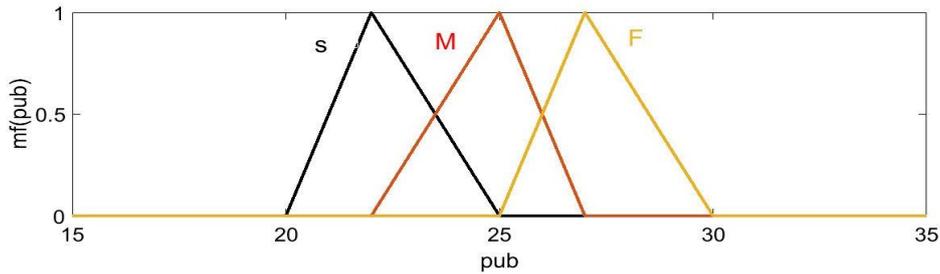
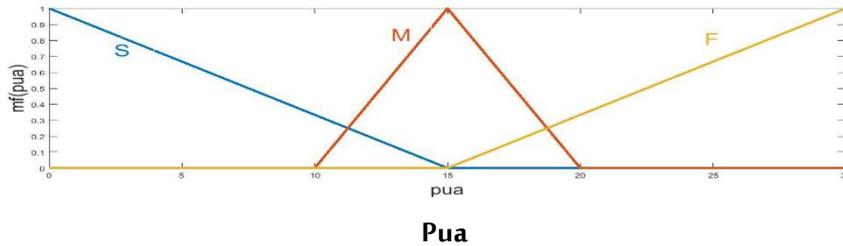
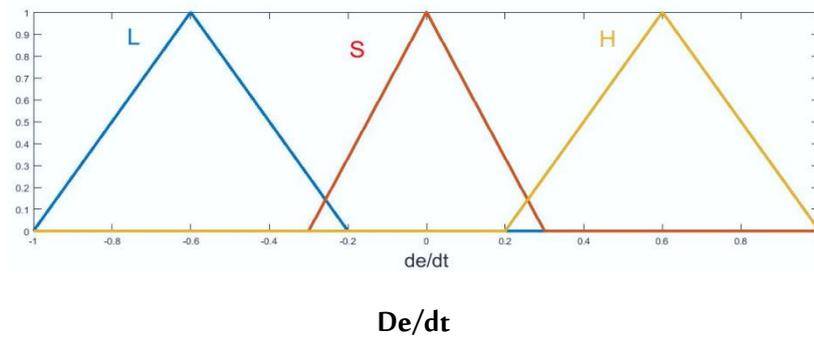
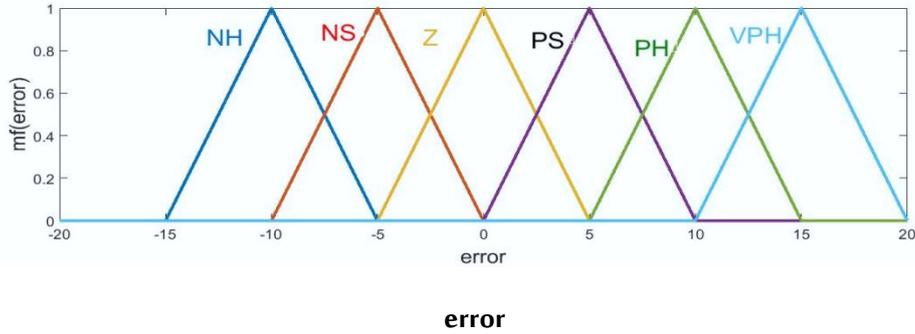
الخرج الأول PuA:

S: slow, M: medium, F: fast

الخرج الثاني PuB:

S: slow, M: medium, F: fast

3- نحدد دالات الانتماء لكل قيمة لغوية وقد تم اختيارها من النوع المثلثي المتداخلة بشكل كامل الشكل 10.



الشكل (10) دالات الانتماء للمداخل والمخارج

بالاعتماد على النموذج الرياضي المعتمد على الناقلية، نقوم بتوليد مجموعة من البيانات لمعدلات الضخ لكل من مضخة بيكربونات الصوديوم puA ومضخة الحمض puB وناقلية محلول الديليزة وذلك من خلال تطبيق قيم واقعية وحقيقية لمعدلات ضخ المضخات تحاكي القيم الطبيعية التي يتم استخدامها في الحالات العامة ليعطينا من خلالها النموذج الرياضي المستخدم في البحث قيم الناقلية الموافقة وذلك لنفهم آلية عمل النظام المستخدم ولنتمكن من كتابة القواعد الجدول 3:

الجدول (3) توليد القيم الفعلية لمعدلات الضخ والناقلية من النموذج الرياضي

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

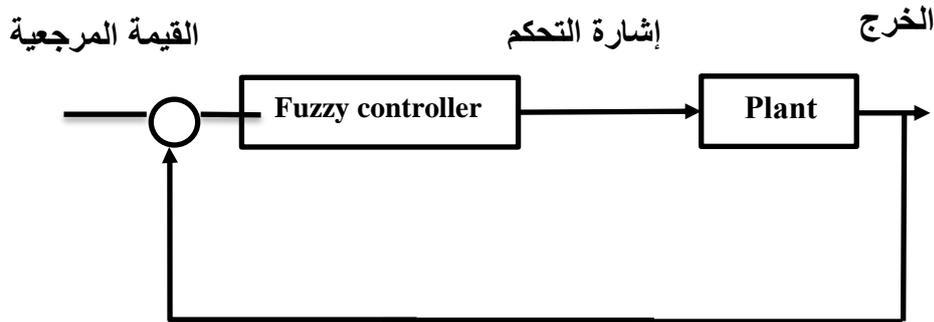
شرح الحالة الأولى: الخطأ (error=12.94) ينتمي إلى دالة الانتماء (PH: positive high) أي أن قيمة الناقلية منخفضة جداً لأن معدل التدفق منخفض لذلك يجب أن يكون معدل تدفق المضخات عالي فنحصل على القاعدة التالية:

If (error is PH) then (pua is F) and (pub is F)

شرح الحالة الأخيرة: الخطأ (error= -5) ينتمي إلى دالة الانتماء (NS: negative small) أي أن الناقلية عالية جداً ولنفترض أن معدل تغير الخطأ (de/dt) منخفض وبالتالي يجب تخفيض معدلات تدفق المضخات فنحصل على القاعدة التالية:

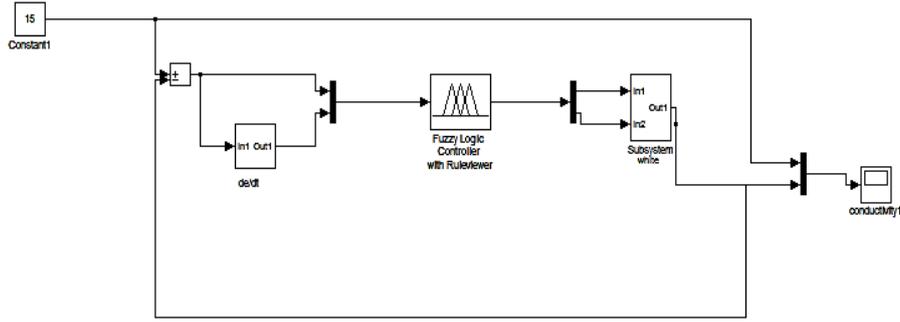
If (error is NS) and (de/dt is L) then (pua is S)(pub is S)

بعد تصميم المتحكم الضبابي ننتقل إلى دراسة استجابة النظام في الحلقة المغلقة من خلال وصل المتحكم مع نموذج النظام في الحلقة المغلقة الشكل 11 حيث سيحافظ المتحكم على قيمة الناقلية ضمن المجال المسموح خلال فترة زمنية قصيرة.



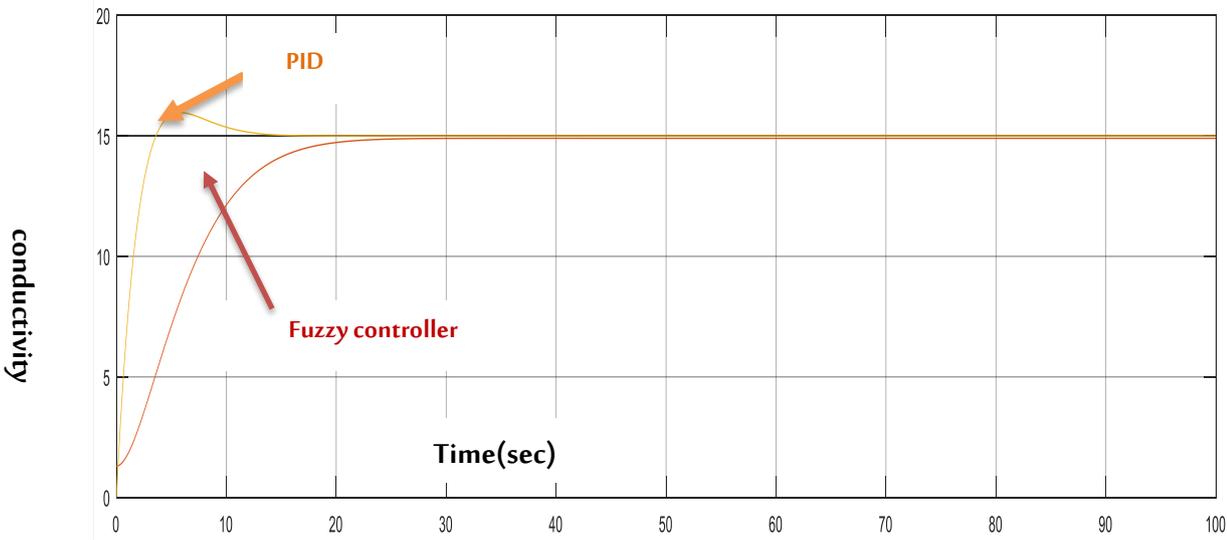
الشكل (11) المخطط الصندوقي للنظام

محاكاة الجملة: تم تصميم المتحكم الضبابي وربطه مع نموذج النظام في الحلقة المغلقة في مكتبة ال SIMULINK الخاصة بـ MATLAB في الشكل 12. (Yurkovich.1999)



الشكل (12) محاكاة الجملة باستخدام مكتبة SIMULINK

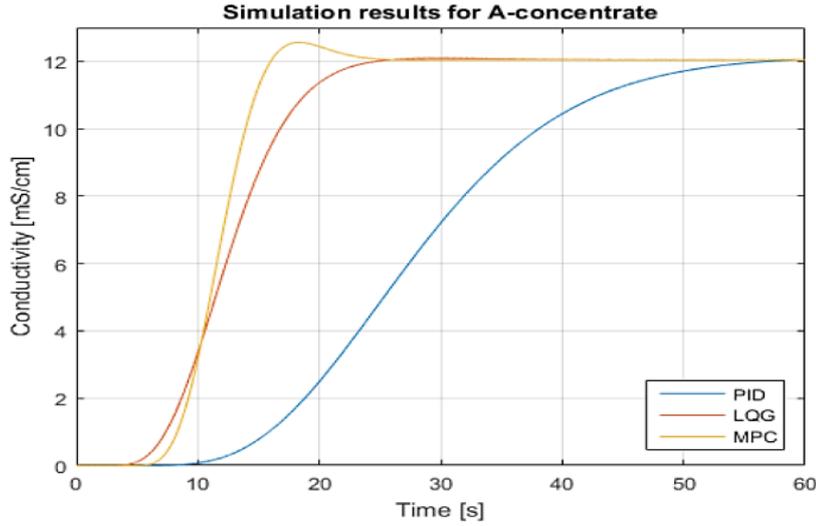
وتصبح الاستجابة في الحلقة المغلقة مع وجود المتحكم الضبابي مقارنة مع الاستجابة في الحلقة المغلقة مع استخدام المتحكم التناسبي التفاضلي التكاملي PID المصمم بطريقة MIGO (Astrom , Hagglund 2006) الشكل 13:



الشكل (13) الاستجابة في الحلقة المغلقة مع وجود المتحكم الضبابي

نستنتج: بعد إضافة المتحكم الضبابي أصبحت الاستجابة في الحلقة المغلقة أفضل، حيث حقق النظام قيمة الناقلية المطلوبة خلال زمن جيد مقارنةً مع حال استخدام المتحكم التناسبي التفاضلي التكاملي الذي عانى من مشكلة تجاوز العتبة الشكل 13، الذي يبين المقارنة بين استجابة النظام في الحلقة المغلقة باستخدام المتحكم الضبابي والاستجابة في حال استخدام المتحكم التناسبي التفاضلي التكاملي، وبالتالي نلاحظ أن قيمة الناقلية لمحلل الديليزة وصل للقيمة المطلوبة خلال زمن أقل من 20 ثانية وبدون أي تجاوز في قيمة الناقلية عن المجال المسموح به.

ثالثاً: مقارنة بارامترات الحلقة المغلقة في حال استخدام المتحكم الضبابي والمتحكم PID ومتحكمات أخرى. يظهر الشكل 14 استجابة النظام بالحلقة المغلقة باستخدام متحكمات أخرى أنجزت في دراسات سابقة وهي المتحكم التنبؤي المعتمد على النموذج MPC (Model Predictive Controller) والمتحكم التربيعي الأمثل LQG (Linear Quadratic Gaussian controller)



الشكل (14) الاستجابة بالحلقة المغلقة باستخدام متحكمات PID, LQG, MPC.

نقارن أداء المتحكمات الأربعة وهي المتحكم PID والمتحكم FUZZY والمتحكم LQG والمتحكم MPC من خلال حساب الخطأ في الحالة المستقرة وقيمة تجاوز العتبة وزمن الاستقرار الجدول 4.

الجدول (4) مقارنة أداء المتحكم الضبابي المصمم مع دراسات سابقة

المتحكم	التجاوز الأعظمي	زمن الاستقرار	الخطأ	النسبة المئوية للخطأ
PID	1.5	18	0.03	%3
LQG	لا يوجد	25	0.07	%7
FUZZY	لا يوجد	20	0.08	%8
MPC	1.8	24	0.06	6%

الاستنتاجات والمقترحات:

- حقق المتحكم الضبابي استجابة أفضل للنظام وحافظ على قيم الناقلية ضمن الحدود المسموحة بسرعة أكبر ووثوقية أفضل من باقي المتحكمات
- يقترح جعل هذا المتحكم متعلما ليتمكن من تكييف بارومتريته بما يتناسب مع الحالة المدروسة.
- دراسة تأثير ناقلية محلول الديليزة على معدل التنقية الدموية kt/v.
- دراسة مدى تأثير تغير قيم الناقلية على الحالة المرضية وعلى ضغط الدم الشرياني للمريض خلال الجلسة.
- يمكن استخدام تقنيات التعلم الآلي لجعل هذا المتحكم أكثر موثمة وتكيفيا.

المراجع الأجنبية:

- Ahmad, Suhail. (2009). Manual of Clinical Dialysis. 2nd Springer Heidelberg. New York. Londone.
- Åström, Karl Jone. Hägglund, Tore. (2006). Advanced PID control. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society. Research Triangle Park, NC 27709.
- Azar, Ahmad. (2013). Modeling and Control of Dialysis Systems. volume 1. Springer Heidelberg. New York. London.

- Azar, Ahmad. (2013). Modeling and Control of Dialysis Systems. volume 2. Springer Heidelberg. New York. London.
- Fallman, Mans. (2016). "Model-Based Conductivity Control of Fluid Composition". Unpublished MSc. Thesis. Department of Automatic Control. Lund University. Sweden.
- Ledebø, Ingrid. (2002) "On-line Preparation of Solutions for Dialysis: Practical Aspects Versus Safety and Regulations". J Am Soc Nephrol. 13(1): 78–S83
- Maduell, Fransesco. Vera, Manal. Arias, Marta. et al. (2008). "Influence of the ionic dialysance monitor on Kt measurement in hemodialysis". Am. J. Kidney Dis. 52(1): 85-92.
- Nafisi, et al. (2011). "Fuzzy logic controller for hemodialysis machine" Journal of Medical Signals & Sensors. 1(1).
- Ogata, Katsuhiko. (2002). Modern Control Engineering. Prentice Hall, 5th edition, USA.
- Yurkovich, Stephen. Passino, Kevin. (1999). Fuzzy control. Addison Wesley Longman, Inc. California