

## المساهمة في تقديم طريقة أفضل للتحكم بمعالجة مياه الصرف الصحي " دراسة حالة محطة الرويمية "

أ. د. م. نائر احمد إبراهيم\*

د. م. محسن خطيب\*\*

م. شادي علي\*\*\*

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١٠/١٠ . قُبل للنشر في ٢٠٢٦/١/٧)

### □ ملخص □

تمخّور العمل في هذه الدراسة حول إجراء مقارنة بين أربعة طرق للتحكم في عملية التهوية ضمن محطات معالجة مياه الصرف الصحي: الأولى تعتمد على فترات تشغيل وفترات إطفاء (ON/OFF)، والثانية التحكم المتعاقب بالأوكسجين المُنحل، والثالثة التحكم المتعاقب بالأمونيوم، والأخيرة التحكم التنبؤي متعدد المتغيرات. تم استخدام برنامج Matlab لتصميم أنظمة التحكم الأربعة ضمن بيئة Simulink وربطها مع نظام التهوية ومن ثم مقارنة نتائج المحاكاة، بالنتيجة تم التوصل إلى أنّ استخدام طريقة (ON/OFF) أدى إلى حدوث مشاكل تهوية زائدة واستهلاك كبير في الطاقة، أما التحكم المتعاقب بالأوكسجين المذاب فيستغرق وقت طويل للوصول إلى الاستقرار وبالتالي تقليل كفاءة عملية المعالجة، في حين أن استخدام التحكم المتعاقب بالأمونيوم أدى لتقليل زمن المعالجة إلى سبع ساعات وساهم بتوفير استهلاك الطاقة بقيمة جيدة حيث انخفضت قيمة الأوكسجين المذاب المطلوبة، وأما التحكم التنبؤي فوجدنا أنه سرّع الاستجابة حيث استغرق زمن المعالجة حوالي ثلاث ساعات فقط بالإضافة إلى أنه يمكننا من التنبؤ بكمية الحمولة البيولوجية وبالتالي التقليل من كمية الهواء المطلوب لعملية المعالجة مما يفيد في توفير استهلاك الطاقة الكهربائية بمقدار 80% مقارنة مع طرق التحكم السابقة.

قمنا بتنفيذ نموذج مخبري توضيحي لعملية التهوية والذي يمكن ربطه مع نظام التحكم التنبؤي المبني في بيئة Simulink بعد تغيير قيم سعة الحوض والتدفق الداخل والعائد بالإضافة إلى تركيز الكتلة الحيوية، وذلك بهدف اختبار إمكانية المراقبة والتحكم في الزمن الفعلي.

**الكلمات المفتاحية:** محطات معالجة مياه الصرف الصحي (نموذج الحمأة النشطة) - استهلاك الطاقة الكهربائية - التحكم بالتهوية.

\*أستاذ في قسم هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس.

\*\*أستاذ مساعد في قسم هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس.

\*\*\*طالب دكتوراه في قسم هندسة الأتمتة الصناعية - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس.

# Contributing to a better method for controlling wastewater treatment " A case study of the Ruwaimiya plant "

**Prof. Their Ahmad Ibrahim\***

**Prof.assi. Mohsen khatib\*\***

**Eng. Shadi Ali\*\*\***

(Received 1/10/2025 . Accepted 7/1/2026)

□ ABSTRACT □

This study focuses on comparing four control strategies for the aeration process in wastewater treatment plants: the first relies on ON/OFF cycling, the second is sequential dissolved oxygen control, the third is sequential ammonium control, and the last is multivariable predictive control.

MATLAB software was utilized to design all four control systems within the Simulink environment, interfacing them with the aeration system and subsequently comparing the simulation outcomes. The results demonstrated that the ON/OFF method caused issues of over-aeration and high energy consumption. Sequential dissolved oxygen control required an extended period to achieve stability, thereby reducing treatment process efficiency. In contrast, sequential ammonium control reduced the treatment time to seven hours and contributed to notable energy savings by lowering the required dissolved oxygen setpoint. Regarding predictive control, it was found to accelerate the system response, achieving a treatment duration of only about three hours. Furthermore, it enabled the prediction of biological load quantity, consequently reducing the amount of air supplied for the treatment process. This resulted in substantial savings in electrical energy consumption compared to the previously mentioned control strategies.

A demonstrative laboratory-scale model of the aeration process was implemented, which can be interfaced with the predictive control system developed in the Simulink environment after changing the values of tank capacity, inflow and return flow, as well as biomass concentration, the aim was to test the possibility of monitoring and controlling in real time.

**Key words:** Wastewater Treatment Plants (ASM Model)– electrical energy - aeration control

\*Professor in Industrial Automation Engineering, Technical Engineering College, Tartous University.

\*\* Professor Assistant, Industrial Automation, Technical Engineering College, Tartous University.

\*\*\*Phd student I, ndustrial Automation Engineering - Technical Engineering College, Tartous University.

**1- مقدمة:**

تعتبر عملية التهوية في محطات معالجة مياه الصرف الصحي (العاملة بطريقة الحمأة النشطة) من أهم مراحل المعالجة حيث يتم فيها التخلص من المواد العضوية التي تشكل أغلب الحمولة البيولوجية لكنها تستهلك من 50 إلى 90% من تكاليف الكهرباء اللازمة للمحطة [1]. يتم في هذه المرحلة ضخ الهواء في المياه القادمة من أحواض الترسيب الأولية عن طريق قوالب مسامية مثبتة في قاع الحوض ومتصلة بمواسير يضغط فيها الهواء، مع ملاحظة أن التهوية الزائدة تسبب تشكل ندف دبوسية تخرج مع مياه الصرف المتدفقة المعالجة وترفع مؤشرات التلوث وهي أيضا عملية مكلفة من حيث استهلاك الطاقة [2].

أجرى الباحث Drownowski وآخرون في عام 2019 دراستهم على محطات معالجة مياه الصرف الصحي في بولندا، وقاموا بدراسة استراتيجيات التحكم وتأثيرها على استهلاك الطاقة، وخلص الباحثون إلى أن أنظمة التحكم التقليدية التي تعتمد قيمة أوكسجين ثابتة في حوض التهوية هي غير فعالة، وإن استخدام أنظمة التحكم بالتهوية التي تعتمد على نتروجين الأمونيوم يمكن أن يوفر % (10-20) من استهلاك الطاقة ويحسن عملية نزع النتروجين. أوصى الباحثون باستخدام التحكم التنبؤي والذي يمكن أن يضمن جودة العملية وتقليل تكاليف التشغيل [1].

قام الباحث Raed Jafar وآخرون في عام 2013 بإجراء نمذجة ومحاكاة لمحطة معالجة مياه الصرف الصحي في منطقة خربة المعزة في طرطوس باستخدام برنامج STOAT، لاحظ الباحثون وصول حمولة تلوث عالية إلى المحطة بالإضافة إلى تدفقات زائدة، خلص البحث إلى أن زيادة مراحل التهوية لا يؤثر على جودة المعالجة بل يؤدي إلى تهوية زائدة واستهلاك كبير في الطاقة، أوصى الباحثون بتصميم أنظمة التحكم محلياً لتلائم الواقع السوري [2].

قام الباحث Haitham Jnad وآخرون في عام 2015 بمراقبة توزيع تراكيز الأوكسجين المنحل في محطات معالجة مرج معيربان والرومية في اللاذقية اللتين تستعملان نظام التهوية المديدة، أظهر البحث ارتفاعاً ملحوظاً في قيم الأوكسجين المنحل في أحواض التهوية المدروسة عن القيمة المرجعية (2mg/l) مما يعني استهلاكاً متزايداً من الطاقة وحدوث مشاكل تشغيلية [3].

استخدم الباحث Medinilla وآخرون في عام 2020 نظام التحكم في التهوية الذي يعتمد على الأمونيا (ABAC) في مصنع إعادة تدوير المياه رقم 1 الموجود في أونتاريو، كاليفورنيا. تم مراقبة استهلاك الطاقة لمضخات الهواء على مدار سبعة أشهر ومقارنتها بأداء النظام قبل استخدام نظام (ABAC)، لوحظ انخفاض في استهلاك الطاقة بمقدار 9% سنوياً وزيادة كفاءة عملية النترة، وأكد الباحثون على ارتباط زيادة استهلاك الطاقة بزيادة تدفق الهواء [4].

أجرى الباحث Miyahara وآخرون في عام 2019 دراستهم في مركز معالجة المياه سونوماشي في طوكيو، حيث لاحظوا أن عملية التهوية تستهلك 23% من الطاقة الكهربائية المستهلكة في المحطة ويمكن تقليل هذا الاستهلاك بواسطة تقليل كمية الهواء المتدفق، لذلك تم تطوير تقنية جديدة تعتمد على قياس حمل الصرف والتحكم في معدل تدفق الهواء، وتمكنوا من خفض كمية الهواء المتدفق المطلوب بمقدار 10% [5].

قام الباحث Farhana وآخرون في عام 2019 بإجراء دراسة تدقيق طاقي لتحليل استهلاك الطاقة في معالجة مياه الصرف الصحي في محطة تستخدم طريقة الحمأة النشطة في ماليزيا، تبين نتيجة الدراسة أن عملية

التهوية تستهلك أكبر كمية من الطاقة في المحطة، تم اقتراح استخدام ضاغط توربو عالي السرعة بدلاً من منافخ الهواء وتركيب صمامات مناسبة للتحكم بتدفق الهواء ومنع تسربه، بالنتيجة انخفض استهلاك الطاقة بمقدار 42% [6].

استعرض الباحث Ballhysa وآخرون في عام 2020 أحدث طرق التحكم في محطات معالجة مياه الصرف الصحي حيث وجدوا أن التحكم باستخدام PI يؤدي إلى وجود تقلبات ذات سعة كبيرة حول القيمة المرغوبة، ويمكن أن يساعد التحكم التنبؤي على تقليل الخطأ بين الاستجابة والقيمة المرغوبة بنسبة كبيرة، وبالتالي تحسين جودة التحكم، خلص البحث إلى أن التحكم بتركيز الأوكسجين وتركيز النيتروجين في حوض التهوية سيؤدي إلى تحسين جودة العملية والتشغيل الأمثل لمنافخ الهواء مما يؤدي إلى انخفاض تكاليف التهوية وبالتالي انخفاض تكاليف التشغيل [7].

قام الباحث Y. Chen وآخرون في عام 2022 باستخدام التحكم الأمثل متعدد المتغيرات للحد من فقدان الطاقة في عملية التهوية، تم اختيار تركيز الأوكسجين DO وكمية تصريف الحمأة  $Q_w$  كمتغيرات تحكم، بينما تم اختيار تركيز المادة S والتركيز الميكروبي X في خزان التهوية كمتغيرات حالة، مع وضع قيود على استهلاك الطاقة، بالنتيجة تمكن المتحكم المطروح من خفض استهلاك الطاقة بمقدار 20% مع الحفاظ على جودة المياه العادمة [8].

استخدم الباحث Zijian Wang وآخرون في عام 2024 تسع طرق لاختيار بارامترات التشغيل الرئيسية المؤثرة على استهلاك الطاقة في محطات معالجة مياه الصرف الصحي وفقاً لسجلات التشغيل اليومية، وتم بناء نظام ذكي لإدارة التشغيل قائم على الخوارزمية الجينية من خلال رسم خرائط للعلاقات بين استهلاك الطاقة وبارامترات التشغيل الرئيسية والتي هي (معدل تدفق المياه الداخلة - إجمالي النيتروجين في المياه الخارجة - معدل تحميل الأمونيا) أظهرت النتائج أنه يمكن تخفيض استهلاك الطاقة بمتوسط 22% [9].

تكمن مشكلة البحث في أن محطات معالجة مياه الصرف الصحي في سوريا تستهلك كمية كبيرة من الطاقة وتستغرق وقت طويل في المعالجة، لذلك تم دراسة أكبر مستهلكات الطاقة (عملية التهوية) بهدف تقديم طريقة أفضل للتحكم بها تضمن الحفاظ على جودة المعالجة مع خفض استهلاك الطاقة قدر الإمكان، أما أهمية البحث فهي توفير في تكاليف تشغيل المحطة من خلال تقليل استهلاك الطاقة وزيادة القدرة الاستيعابية للمحطة من مياه الصرف.

قمنا في هذا البحث بنمذجة عملية التهوية في إحدى هذه المحطات (محطة الرويمية في محافظة اللاذقية) والتي تعمل بطريقة الحمأة النشطة، وتم إجراء مقارنة بين أربع طرق تحكم من ناحية زمن المعالجة وتوفير استهلاك الطاقة: وهي التحكم (on/off) بدون حساسات - التحكم المتعاقب بالأوكسجين المنحل (المستخدمة حالياً في المحطة المدروسة) - التحكم المتعاقب بالأمونيوم - التحكم التنبؤي متعدد المتغيرات.

كما قمنا بتنفيذ نموذج مخبري توضيحي لعملية التهوية بهدف دراسة إمكانية ربط نموذج التحكم المصمم في بيئة Simulink مع النموذج المخبري عبر شريحة آردوينو (Arduino)، حيث لم تتوفر لدينا الحساسات المطلوبة لاختبار المتحكم وتم الاستعانة بمقاومات متغيرة عوضاً عن الحساسات، لذلك لم نحتاج إلى تغيير بارامترات نظام التحكم (مع العلم أن النموذج المصمم عام ويمكن ربطه مع أي محطة بمجرد إدخال قيم التدفق الداخل والتدفق العائد وسعة حوض التهوية وتركيز الكتلة الحيوية)، تقوم شريحة آردوينو بقراءة الحساسات وإرسالها إلى الحاسب، ليتم معالجتها ثم إرسال أوامر التحكم إلى منافخ الهواء.

## 2- تصميم نموذج عملية الحمأة النشطة:

تم دراسة كافة العمليات البيولوجية التي تجري داخل حوض التهوية في محطة معالجة مياه الصرف الصحي العاملة بطريقة الحمأة النشطة بهدف بناء نموذج رياضي يعبر عن تلك العمليات في بيئة Simulink (في Matlab) تمهيداً لربطه مع أنظمة التحكم بالتهوية المراد دراستها، ومراقبة استجابة كل من الأوكسجين المذاب و نيتروجين الأمونيوم.

### 1-2- نمذجة نظام التحكم بمستوى السائل في حوض التهوية:

إن معدل التغيير في كمية السائل الموجود داخل حوض التهوية يساوي التدفق الداخل للحوض مطروحاً منه التدفق الخارج وفق المعادلة (١): [10]

$$\frac{d}{dt} [AH(t)] = [Q_{in} + Q_r] - Q_o : Q_o = \frac{H(t)}{R} , R = k \cdot RA = \tau \quad (1)$$

$Q_{in}$ : التدفق الداخل لحوض التهوية،  $Q_r$ : التدفق العائد إلى الحوض،  $Q_o$ : التدفق الخارج من الحوض.  
 $H(t)$ : مستوى السائل داخل الحوض،  $A$ : مساحة الحوض،  $R$ : نصف قطر الحوض.  
 قمنا بتعويض قيمة  $R$  و  $Q_o$  ثم قمنا بإجراء تحويل لابلاس للمعادلة (١) لنحصل على المعادلة (٢) والتي تعبر عن مستوى السائل داخل الحوض بدلالة التدفق الداخل والتدفق العائد.

$$H(s) = \frac{k}{[\tau s + 1]} [Q_{in}(s) + Q_r(s)] \quad (2)$$

تم إجراء النمذجة لنظام التحكم بمستوى السائل ضمن بيئة Simulink بعد تعويض قيم الثوابت التي تتبع المواصفات الفنية للصمام وحساس المستوى Ultrasonic ، ثم إضافة مُتحكّم PID للتحكم بالمستوى (تم استخدام التوليف الذاتي Tuning في ماتلاب لضبط ثوابت المتحكم في كل مراحل البحث)، كما في الشكل (١): [10]

النموذج العام لتابع نقل الصمام الكهربائي هو من الدرجة الثالثة ويعطى كنسبة التدفق الداخل إلى الفولت المطبق على ملف الصمام، ولكن يمكن تبسيطه إلى نموذج من الدرجة الأولى لأن استجابة الملف الكهربائي سريعة:

$$\frac{Q_{in}(s)}{V(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (3)$$

$k$ : كسب الصمام يساوي ١ ،  $\tau$ : ثابت زمني صغير (زمن استجابة الصمام)، يتبع المواصفات الفنية للصمام.

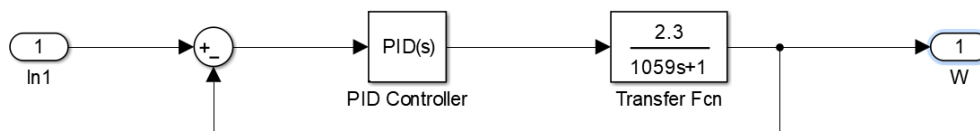
إن حساس المستوى المستخدم هو حساس أمواج فوق صوتية Ultrasonic، يمتلك زمن استجابة صغير وتأخير زمني ناتج عن القياس، وبالتالي فإن تابع النقل الأقرب للواقع هو من الدرجة الأولى ويعطى كنسبة فولت إلى مستوى:

$$\frac{V_{out}(s)}{H(s)} = \frac{k_s}{\tau_s s + 1} e^{-T_d s} \quad (4)$$

$k_s$ : كسب الحساس ،  $\tau_s$ : ثابت زمني صغير (زمن استجابة الحساس).

$T_d$ : زمن التأخير وهو صغير جداً بحيث يمكن إهماله.





الشكل (3): نموذج Simulink لنظام التحكم بالتهوية (Aeration System)

### 3-2- نمذجة العمليات البيولوجية داخل حوض التهوية:

من أجل بناء النموذج الرياضي يجب تحديد بارامترات النظام الأساسية والتي هي: معدل التدفق الداخل  $Q_{in}$ ، والتدفق العائد  $Q_r$ ، التركيز BOD (S)، وتركيز الكتلة الحيوية  $X$ ، والأوكسجين المنحل DO، لاحظ العلاقات التالية [13].

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{1}{V} Q(t) S_{in}(t) - \frac{1}{V} [Q(t) + Q_r(t)] S(t) - \frac{\mu(t)}{Y} X(t) \quad (7)$$

$$\frac{dX(t)}{dt} = \frac{1}{V} [Q(t) X_{in}(t) + Q_r(t) X_r(t)] - \frac{1}{V} [Q(t) + Q_r(t)] X(t) + \mu(t) X(t) \quad (8)$$

$$\frac{dDO(t)}{dt} = \frac{1}{V} Q(t) DO_{in}(t) - \frac{1}{V} [Q(t) + Q_r(t)] DO(t) + K_{La} [DO_{max} - DO(t)] - K_o \frac{\mu(t)}{Y} X(t) \quad (9)$$

$$\frac{dX_r(t)}{dt} = \frac{1}{V_s} [Q(t) + Q_r(t)] X(t) - \frac{1}{V_s} [Q_w(t) + Q_r(t)] X_r(t) \quad (10)$$

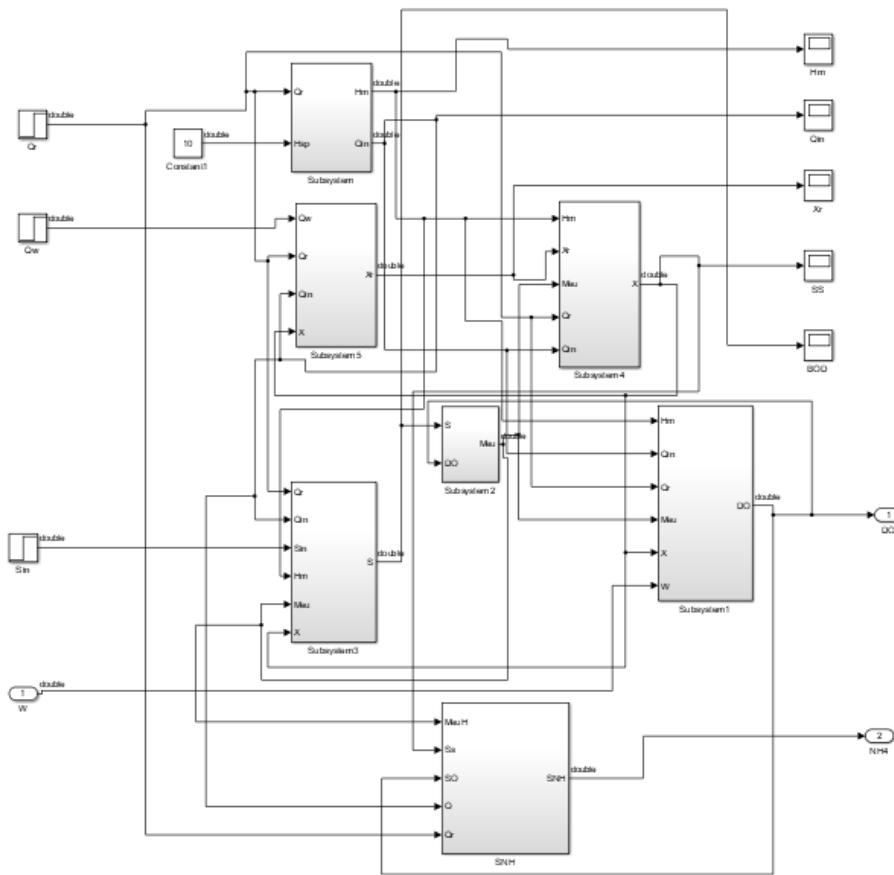
نلاحظ وجود مجموعة من الثوابت تختلف من محطة إلى أخرى تتعلق بحجم حوض التهوية  $V$ ، وكمية الكتلة الحيوية الداخلة للمحطة، بالإضافة لأعلى تركيز أوكسجين منحل مسموح، تم دراسة محطة الرويمية في محافظة اللاذقية.

جدول (١): قيم ثوابت النموذج تم الحصول عليها من المواصفات الفنية لمحطة الرويمية في اللاذقية.

البارامتر	$S_{in}$	$DO_{in}$	$DO_{max}$	$K_s$	$\mu_{max}$	$K_o$	$K_{DO}$	$Y$
القيمة	200mg/l	0.5mg/l	10mg/l	100mg/l	0.15	0.5mg/l	2mg/l	0.65

ومما سبق يمكننا ربط كافة العمليات البيولوجية التي تجري داخل حوض التهوية بنموذج واحد كما في

الشكل (٤):



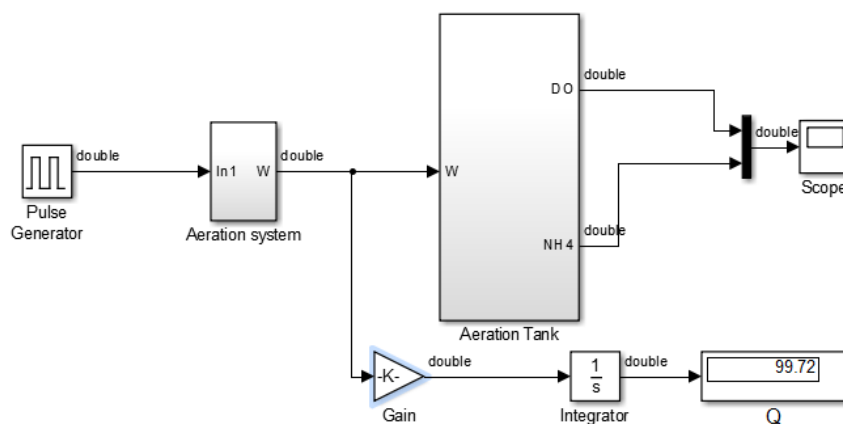
الشكل (٤): نموذج العمليات البيولوجية داخل خزان التهوية (Aeration Tank)

### 3- دراسة أنظمة التحكم:

إن معدلات نمو بكتيريا النتريجة (النيتروسومونلز والنيتروباكتر) تعتمد على تركيز الأوكسجين المُنحل، حيث وجد أنه عندما يكون ( $DO < 2 \text{ mg/l}$ ) تصبح عملية النتريجة أقل فاعلية، وإذا كان ( $DO \geq 3 \text{ mg/l}$ ) فإن خواص الحمأة المترسبة تكون غير جيدة [10]، تم دراسة استخدام أربعة طرق تحكم بعملية التهوية وتطبيقها على نموذج عملية التهوية المصمم في Simulink، ثم قمنا بإجراء مقارنة بين نتائج المحاكاة من حيث زمن المعالجة، والطاقة المستهلكة.

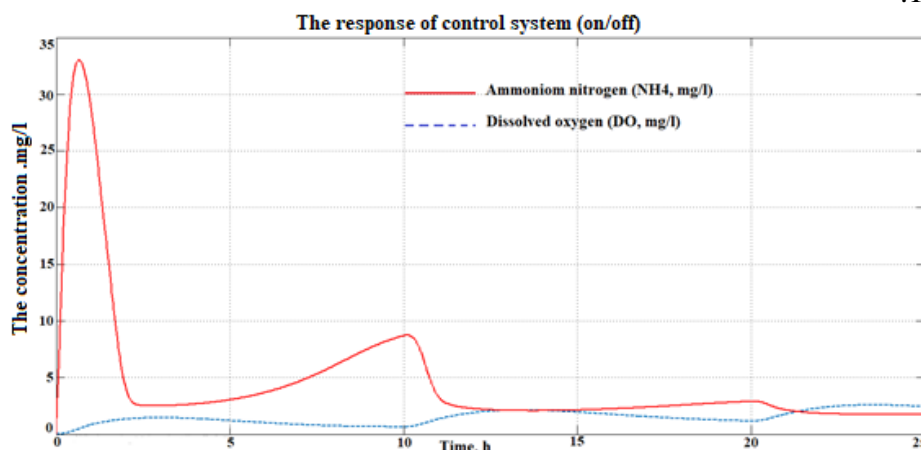
#### 3-1- نظام التحكم (ON/OFF) بدون حساسات:

تستخدم محطات معالجة مياه الصرف الصحي في سوريا طرق التحكم التقليدية والتي تعتمد فترات تشغيل وفترات إطفاء (ON/OFF)، أي وجود فاصل زمني دون حساسات، ويلاحظ هنا حدوث مشاكل التهوية الزائدة والتي تؤدي إلى تقليل كفاءة عملية المعالجة واستهلاك كبير في الطاقة [3]، لدراسة أثر استخدام هذه الأنظمة تم تطبيق سلسلة نبضات تحكم على منفاخ الهواء (Aeration system) بفواصل زمني ساعة عمل وساعتين توقف، لاحظ الشكل (٥) وتم مراقبة استجابة النظام لكل من الأوكسجين المُنحل ونيتروجين الأمونيوم والذي يعبر عن الحمولة البيولوجية.



الشكل (٥): نموذج Simulink لنظام التحكم (on/off) بدون حساسات

يوضح الشكل (٦) تغيرات كل من الأوكسجين المنحل و نيتروجين الأمونيوم في نظام التحكم (on/off)، نلاحظ ارتفاع قيمة الأوكسجين المذاب عن (2.5 mg/l) مما يؤدي إلى حدوث تهوية زائدة واستهلاك كبير في الطاقة، كما نلاحظ أن الحمولة البيولوجية لاتصل للاستقرار بسبب التدفقات المستمرة للحمأة، ومعدل تدفق الهواء 100 m<sup>3</sup>/min.

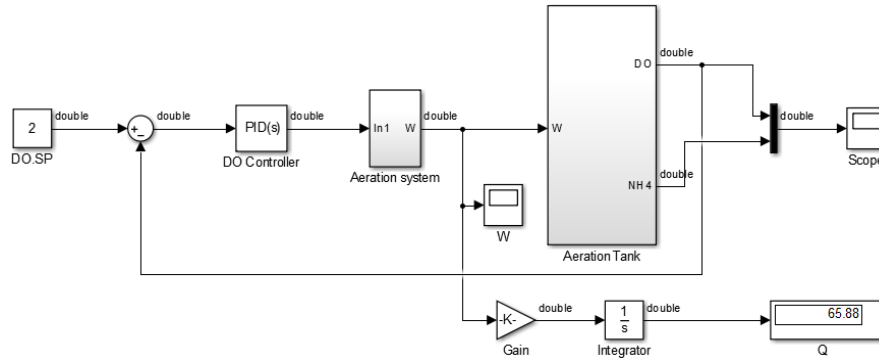


الشكل (٦): استجابة نظام التحكم (on/off) بدون حساسات

### 3-2- نظام التحكم المتعاقب بالأوكسجين (Oxygen Cascade Control System):

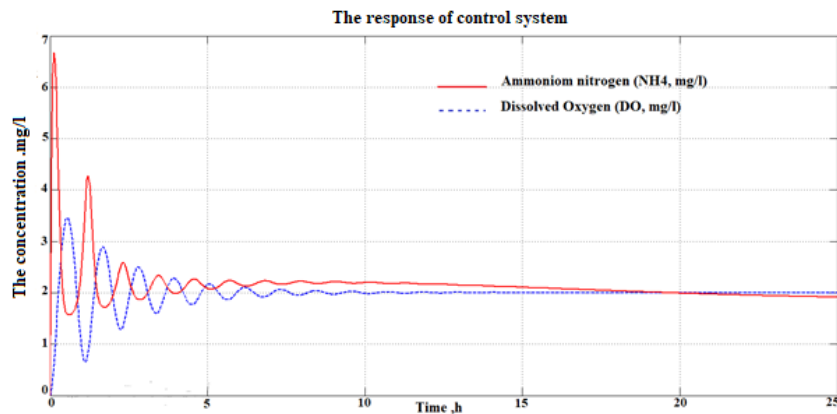
يضم نظام التحكم بالأوكسجين المنحل التعاقبي حلقتي تحكم، الأولى تتحكم بمنافخ الهواء لتقديم كمية الهواء المناسبة إلى حوض التهوية، أما حلقة التحكم الثانية يتم فيها ضبط قيمة الأوكسجين المنحل المرجعية على القيمة (DO = 2 mg/l)، ويتم استخدام حساس الأوكسجين المنحل لمتابعة تغيرات النظام داخل حوض التهوية [13].

تم نمذجة نظام التحكم بالتهوية (Aeration System) في بيئة Simulink وربطه مع نموذج المحطة المدروس (Aeration Tank) الذي تم نمذجته من أجل دراسة استجابة النظام ومراقبة تغيرات الأوكسجين المنحل وكمية الهواء المتدفق داخل حوض التهوية كما في الشكل (٧).



الشكل (٧): نموذج Simulink لنظام التحكم بالأوكسجين المنحل المتعاقب

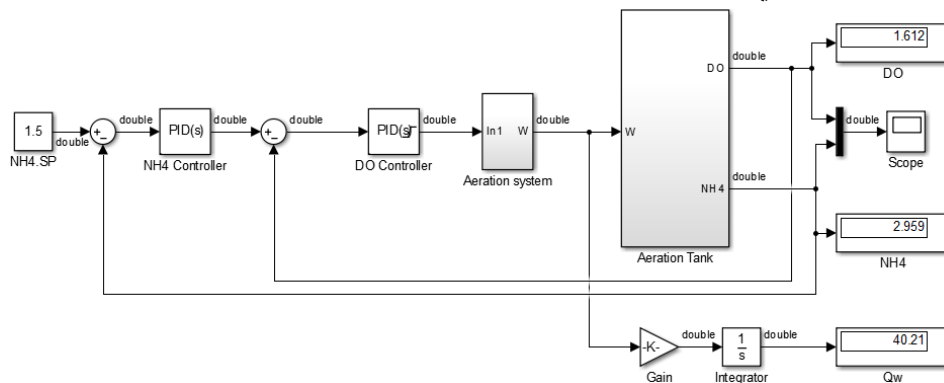
تم تشغيل النموذج ومراقبة استجابة النظام من أجل قيمة ثابتة للأوكسجين المنحل  $2 \text{ mg/l}$ ، يوضح الشكل (٨) تغيرات تركيز الأوكسجين المنحل لأجل نظام التحكم المتعاقب بالأوكسجين المنحل، نلاحظ أن النظام يتذبذب حول القيمة المرجعية  $2 \text{ mg/l}$  ثم يستقر بعد حوالي ١٢ ساعة، كما أن معدل تدفق الهواء يتراوح حول  $65 \text{ m}^3/\text{min}$  مما يعني بطئ في عملية المعالجة وهدر في الطاقة الكهربائية المستهلكة أثناء عملية المعالجة.



الشكل (٨): استجابة نظام التحكم المتعاقب بالأوكسجين المنحل

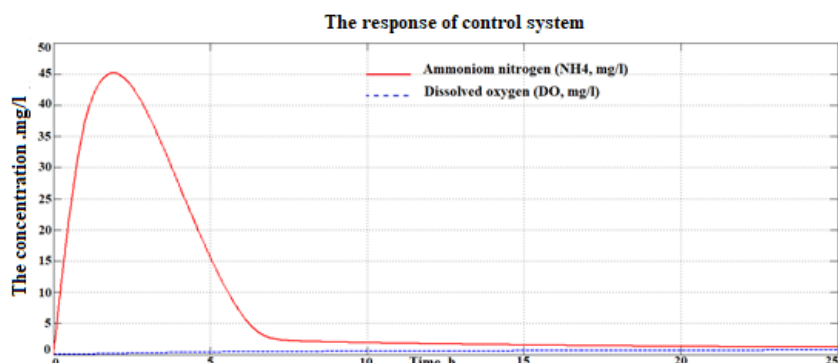
### 3-3- نظام التحكم المتعاقب بالأمونيوم (Ammonium Cascade Control System):

إن الحمولة البيولوجية متغيرة بشكل دائم وغير مستقرة وهنا ظهرت أهمية التحكم بالأمونيوم للحصول على نتائج معالجة أفضل وأقل كلفة، من أجل هذا النظام يتم إضافة حلقة تحكم بالأمونيوم على النظام السابق، حيث أن القيمة المرجعية للأوكسجين المنحل في هذه الطريقة تتغير حسب الحاجة، لإظهار قيم الاستقرار تم الاستعانة بشاشات العرض الرقمية كما في الشكل (٩) الذي يوضح نموذج لنظام التحكم بالأمونيوم.



الشكل (٩): نموذج Simulink لنظام التحكم المتعاقب بالأمونيوم

نلاحظ من الشكل (١٠) ازدياد تركيز الأوكسجين المنحل بشكل تدريجي ليستقر على القيمة 1.6 mg/l بعد حوالي 7 ساعات ومعدل تدفق الهواء يتراوح حول 40 m<sup>3</sup>/min وهذا يعني انخفاض بقيمة الطاقة الكهربائية المستهلكة، كما نلاحظ أن تركيز النتروجين يستقر بعد حوالي 7 ساعات على القيمة 3 mg/l وهذا يعني تخفيض زمن المعالجة.



الشكل (١٠): استجابة نظام التحكم المتعاقب بالأمونوم

يبين الجدول (٢) قيم ثوابت المتحكم PID المستخدمة في النموذج المصمم.

جدول (٢): قيم ثوابت المتحكم PID.

Kd	Ki	Kp	نوع النظام
٢,٤١٥	٣,٨٥٦	١٨,٤٦	نظام التحكم بالمستوى
١٠	١٥٠	٣٠٠	نظام التهوية
١٠	٢٥	٣٠٠	نظام التحكم المتعاقب بالأوكسجين

### ٣-٤ - نظام التحكم التنبؤي متعدد المتغيرات:

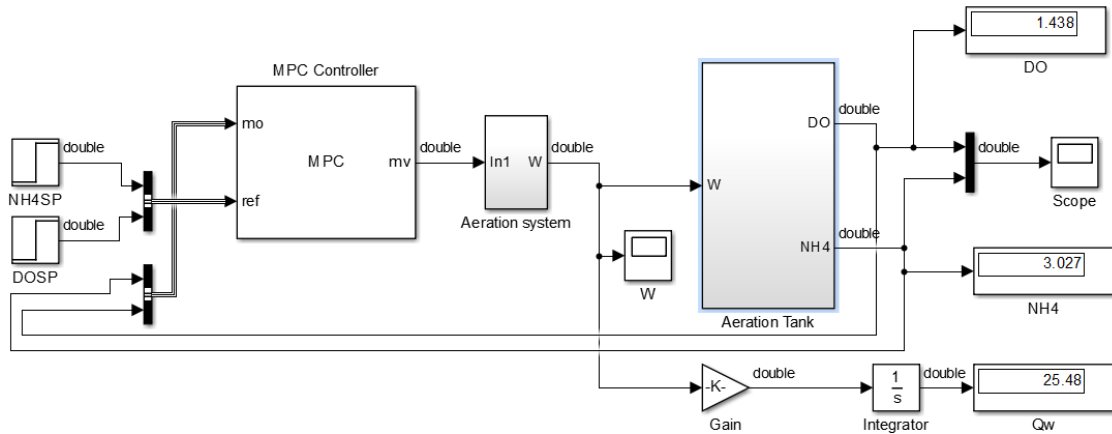
يقوم المُتحكّم التنبؤي بقراءة حساس الأوكسجين المذاب وحساس النيتروجين والتنبؤ باستجابة النظام ثم إعطاء الأوامر للتحكم بمنفاخ الهواء تبعاً للقيمة المرجعية للأوكسجين المذاب والتي تتراوح حول (2 mg/l) والقيمة المرجعية للنتروجين (1.5 mg/l) والتي تساعد بدورها في تخفيض كمية المواد العضوية الناتجة في المياه المعالجة.

تم استخدام المُتحكّم التنبؤي MPC (Model Predictive Control) الموجود في بيئة Simulink بهدف التحكم بعملية التهوية تبعاً للحمولة البيولوجية (نتروجين الأمونيوم) وقيمة الأوكسجين المنحل، وتم تضمين نموذج الجملة (نظام التهوية المصمم والعمليات البيولوجية داخل حوض التهوية) داخل المُتحكّم ووضع القيود المناسبة لقيمة نتروجين الأمونيوم (0-50 mg/l) وقيمة الأوكسجين المنحل (0.5-2 mg/l)، وتم ضبط عدد العينات التي سوف يتم التنبؤ بها (١٠ عينات) ثم متابعة الاستجابة، لإظهار قيم الاستقرار تم الاستعانة بشاشات العرض الرقمية، يوضح الشكل (١١) نموذج لنظام التحكم التنبؤي المقترح، حيث تعطى دالة الهدف للمتحكم التنبؤي بالعلاقة التالية.

$$J = \sum_{t=0}^N \lambda_1 (DO(t) - DO_{ref})^2 + \lambda_2 (NH_4(t) - NH_{4ref})^2 + \lambda_3 W(t)^2 + \lambda_4 (W(t) - W(t-1))^2 \quad (11)$$

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ : معاملات الأوزان لضبط الأهمية النسبية للأوكسجين والنتروجين وتدفق الهواء  
 $\lambda_3 W(t)^2$ : يعاقب على ارتفاع معدل التهوية (بهدف تقليل استهلاك الطاقة)،  $\lambda_3 = 1$ .  
 $\lambda_4 (W(t) - W(t-1))^2$ : يعاقب على التغيرات الكبيرة في معدل تدفق الهواء (تؤدي هذه التغيرات إلى عدم استقرار الأوكسجين وزيادة استهلاك الطاقة).  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_4 = 0.1$  (تم ضبط الأوزان بشكل تجريبي).

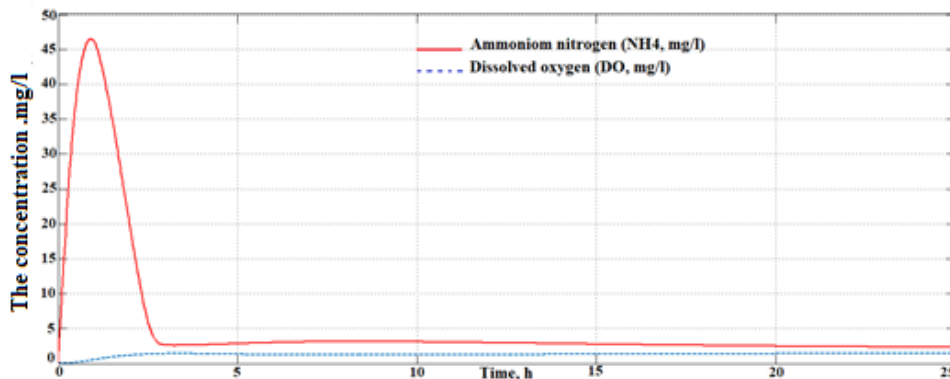
سيعمل النظام على تقليل التقلبات في معدل التهوية مع تقليل استهلاك الطاقة



الشكل (11): نموذج Simulink لنظام التحكم التنبؤي المقترح

يوضح الشكل (١٢) تغيرات تركيز الأوكسجين المنحل وتركيز نتروجين الأمونيوم لأجل نظام التحكم التنبؤي المقترح نلاحظ ازدياد تركيز الأوكسجين المنحل بشكل تدريجي بعد تشغيل منفاخ الهواء ليستقر النظام على القيمة  $1.43 \text{ mg/l}$  بعد حوالي 6 ساعات، ومعدل تدفق الهواء يتراوح حول  $25 \text{ m}^3/\text{min}$  وهذا يعني انخفاض بقيمة الطاقة الكهربائية المستهلكة، كما نلاحظ أن تركيز نتروجين الأمونيوم يستقر بعد حوالي 3 ساعات على القيمة  $3 \text{ mg/l}$  وهذا يعني سرعة في معالجة الحمولة البيولوجية.

The response of control system



الشكل (١٢): تركيز الأوكسجين المنحل عند استخدام المتحكم التنبؤي

4- حساب استهلاك الطاقة لأنظمة التحكم المدروسة:

لحساب القدرة الكهربائية المطلوبة لمنفاخ هوائي، يمكن استخدام المعادلة التالية [12]:

$$P_{electric} = \frac{Q \times P}{\mu \times 1000} \times 60 \times \text{عدد ساعات العمل في اليوم} \quad (12)$$

$P_{electric}$ : القدرة الكهربائية المستهلكة في اليوم (kw)، Q: معدل تدفق الهواء ( $\text{m}^3/\text{min}$ ).

P: الضغط (Bar)، وهو ٠,٨، للمنفخ المستخدم،  $\mu$ : كفاءة المنفخ تتراوح بين (٦٥% و ٨٥%).  
 تم إضافة 1000 للتحويل إلى كيلو واط و ٦٠ لحساب الكيلو واط الساعي، ثم نضرب بعدد ساعات التشغيل لحساب الاستهلاك اليومي، ثم قمنا بإجراء مقارنة بين طرق التحكم بالتهوية وتحديد الأفضل من حيث سرعة المعالجة وتوفير استهلاك الطاقة، كما في الجدول التالي.

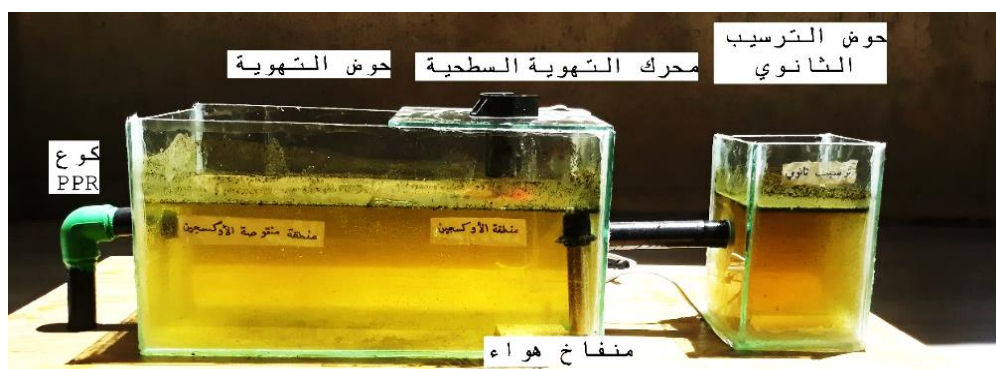
جدول (3): مقارنة طرق التحكم بالتهوية:

نظام التحكم	سرعة المعالجة	استهلاك الطاقة
التحكم (on/off) بدون حساسات	تبقى الحمولة البيولوجية غير مستقرة	استهلاك طاقة كبير نسبياً 64kw/day
التحكم المتعاقب بالأوكسجين المنحل	١٢ ساعة	49.92kw/day
التحكم المتعاقب بالأمونيوم	٧ ساعات	17.92kw/day
التحكم التنبؤي متعدد المتغيرات	٣ ساعات	9.6kw/day

نلاحظ من الجدول السابق، الجدول (٣)، أن التحكم التنبؤي بعملية التهوية ساهم بتخفيض زمن المعالجة إلى ثلاث ساعات مقارنة بالطرق الأخرى وهذا يعني زيادة كمية الصرف التي يمكن معالجتها، وخفض استهلاك الطاقة أكثر من 80% عن طريقة التحكم المتعاقب بالأوكسجين (المستخدمة في المحطة المدروسة حالياً).

#### ٥- تنفيذ نموذج مخبري توضيحي لعملية التهوية:

قمنا بتنفيذ نموذج مخبري توضيحي مكون من حوض التهوية وحوض الترسيب الثانوي بهدف اختبار طريقة التحكم التنبؤي، تم بناء النموذج من الزجاج والربط بين الأحواض عن طريق أنابيب بلاستيكية لتدفق الحمأة المُنشطة ضمنها كما هو موضح في الشكل (١٣)، تم استخدام محرك تيار مستمر 12V للتهوية السطحية، ومنفخ هواء صغير 5V.

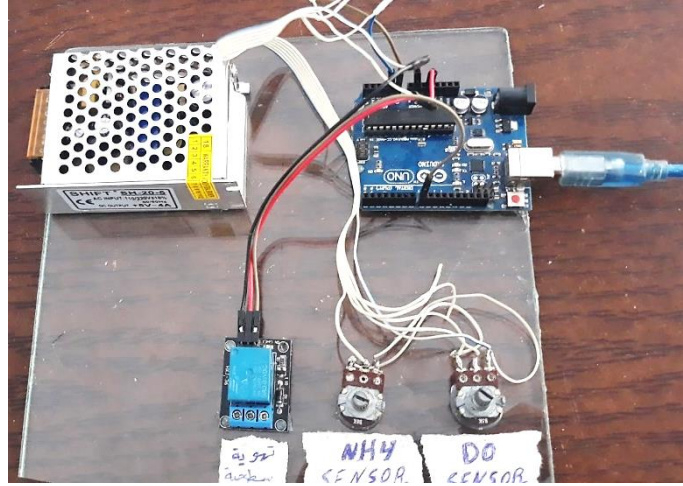


الشكل (١٣): نموذج مخبري لعملية التهوية

#### 1-5- تنفيذ لوحة التحكم:

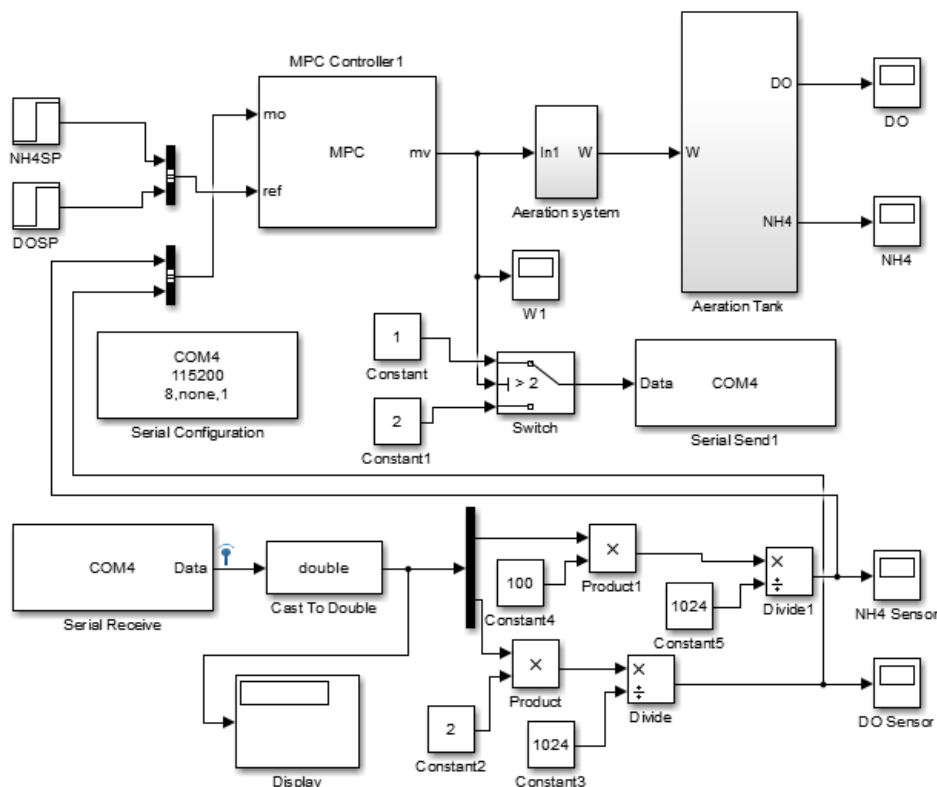
تم اختيار شريحة آردوينو أونو (Arduino Uno) لربط النموذج المصمم على برنامج الماتلاب مع النموذج المخبري السابق عبر النافذة التسلسلية، حيث تقوم شريحة الآردوينو بقراءة حساسات الأوكسجين المذاب والنتروجين وإرسالها إلى الحاسب ليقوم النموذج المصمم بالتنبؤ بالحمولة البيولوجية ثم إرسال أوامر التحكم إلى آردوينو التي تحوي ريليهات تقود منافخ الهواء ومضخة إعادة الحمأة، تم الاستعاضة عن الحساسات بمقاومات متغيرة للتغلب على التغير البطيء في الاستجابة للحمولة البيولوجية. يبين الشكل التالي، الشكل (١٤)، دارة

التحكم المُنفذة التي تحوي شريحة آردوينو أونو ومقاومات متغيرة (عوضاً عن الحساسات) وريليه التحكم، ودارة التغذية.



الشكل (١٤): لوحة التحكم المُنفذة

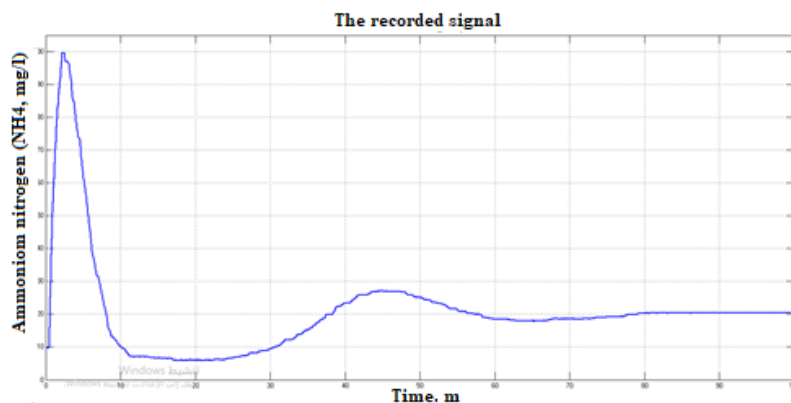
من أجل الربط بين النموذج المُصمم على ماتلاب ودارة التحكم الخارجية تم استخدام النافذة التسلسلية "UART" الموجودة في الحاسب ومكتبة "Instrument control toolbox" الموجودة في بيئة Simulink. قمنا ببناء نموذج Simulink لاستقبال البيانات على النافذة التسلسلية، كما هو موضح في الشكل (١٥)، يمكننا هذا النموذج من قراءة البيانات الواردة من لوحة التحكم وفصل إشارة الحساسات لكل من النتروجين والأوكسجين المذاب والتي هي إشارات رقمية متغيرة ضمن المجال (٠-١٠٢٤) تم ضبطها لتناسب مع الإشارات المرجعية المدخلة للأوكسجين المذاب (٠-٢) ونتروجين الأمونيوم (٠-١٠٠)، تمهيداً لربطها مع المُتحكم التنبؤي، بعد أن يتم قراءة البيانات ومعالجتها في المُتحكم التنبؤي سيتم إرسال أوامر التحكم إلى دارة التحكم لتشغيل منافخ الهواء أو إطفائها.



الشكل (١٥): نموذج Simulink لإرسال واستقبال البيانات على النافذة التسلسلية

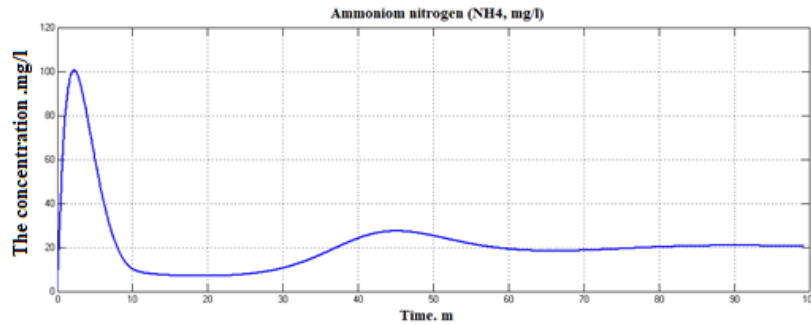
### ٢-٥- اختبار النموذج:

من أجل مراقبة سلوك نظام التحكم المنفذ ودراسة الاستجابة، تم تسجيل إشارة نتروجين الأمونيوم لمدة 100 دقيقة وذلك باستخدام المقاومة المتغيرة. يوضح الشكل التالي، الشكل (١٦)، استجابة تغيير تركيز نتروجين الأمونيوم.



الشكل (١٦): الإشارة المسجلة لتغير تركيز نتروجين الأمونيوم

نلاحظ أنه يزداد تركيز نتروجين الأمونيوم نتيجة تدفق الصرف المتغير إلى أن يصل إلى القيمة 100 mg/l ثم يعود للانخفاض نتيجة ضخ الهواء في الماء ويستقر بعد حوالي 10 دقائق على القيمة 10 mg/l، فرضنا في هذه الإشارة استمرار تدفق الحمأة ليعاود تركيز نتروجين الأمونيوم بالارتفاع ثم الاستقرار على قيمة 20 mg/l بعد حوالي 60 دقيقة، من أجل ملاحظة استجابة النظام ونظراً لعدم توفر الحسابات المطلوبة تم تسجيل إشارة نتروجين الأمونيوم على خرج النظام المصمم للمحطة، كما هو مبين في الشكل (١٧).



الشكل (17): تركيز نيتروجين الأمونيوم في نظام التحكم التنبؤي المقترح

بملاحظة الشكل (17) نجد تطابق كبير مع الإشارة المطبقة مما يعني أنه كلما زادت دقة النموذج كلما حصلنا على تنبؤ أكثر دقة ومرونة في متابعة التغيرات. كما أن النظام يستقر بعد 60 دقيقة على قيمة أوكسجين 0.5 mg/l وقيمة نيتروجين 20 mg/l وهي ضمن القيود المسموحة لكل منها.

## ٦- مناقشة النتائج:

تم بناء نموذج لعملية التهوية في محطة لمعالجة مياه الصرف الصحي في بيئة Simulink، وربط النموذج مع أربعة أنظمة تحكم بهدف مراقبة الاستجابة لكل نظام وكمية الطاقة الكهربائية المستهلكة، وتبين أن استخدام متحكم (ON/OFF) هو غير فعال حيث أن النظام لا يستقر واستهلاك الطاقة كبير نسبياً، أما بالنسبة للتحكم المتعاقب بالأوكسجين المذاب فإنه يستغرق وقت طويل للوصول إلى الاستقرار ولكنه ساعد في تخفيض استهلاك الطاقة، في حين أن استخدام التحكم المتعاقب بالأمونيوم أدى لتقليل زمن المعالجة إلى سبع ساعات وساهم بتوفير استهلاك الطاقة بقيمة جيدة، أما التحكم التنبؤي فقد أدى إلى تقليل زمن المعالجة حوالي 75% مقارنة مع طريقة التحكم المتعاقب بالأوكسجين المذاب المستخدمة في المحطة  $(100 \times \frac{Time(DO) - Time(MPC)}{Time(DO)})$  بالإضافة إلى أنه يمكننا من التنبؤ بكمية الحمولة البيولوجية وبالتالي التقليل من كمية الهواء المطلوب لعملية المعالجة وتوفير في استهلاك الطاقة الكهربائية بمقدار 80%  $(100 \times \frac{P_{electric}(DO) - P_{electric}(MPC)}{P_{electric}(DO)})$ ، كما تم تنفيذ لوحة تحكم لعملية التهوية وربطها مع النموذج المصمم في الحاسب، وبالنتيجة تمكنا من قراءة الحساسات وإرسال أوامر التحكم بالزمن الفعلي.

## 7- الاستنتاجات والتوصيات:

- وفقاً للعمل الذي قمنا به في هذا البحث توصلنا إلى أن استخدام المتحكم التنبؤي يحسن من عملية التحكم بالتهوية من حيث زمن الاستجابة وتوفير استهلاك الطاقة الكهربائية مقارنة مع طرق التحكم المستخدمة الأخرى:
- إن استخدام المتحكم التنبؤي المقترح يؤدي إلى تخفيض في زمن المعالجة (3 ساعات)
  - تستقر قيمة نيتروجين الأمونيوم على 3mg/l بعد ما يقارب 3 ساعات وبالتالي يمكن تخفيض زمن المكوث داخل حوض التهوية مما يساهم في زيادة كمية الصرف المعالجة.
  - ساهم المتحكم التنبؤي المقترح في تخفيض استهلاك الطاقة الكهربائية (بمقدار 80%).
  - كلما زادت دقة النموذج المصمم كلما حصلنا على متحكم تنبؤي أكثر فعالية.
- توصية:** من أجل الأعمال المستقبلية فإننا نوصي بدمج المتحكم التنبؤي المقترح مع إحدى تقنيات الذكاء الاصطناعي كالمنطق الضبابي لزيادة كفاءة المتحكم.

## 8 قائمة المراجع:

- [1] Jakub Drewnowski and all., "Aeration Process in Bioreactors as the Main Energy Consumer in a Wastewater Treatment Plant. Review of Solutions and Methods of Process Optimization". 2019. doi:10.3390/pr7050311.
- [2] Raed Jafar, Husam Sabboh, Mais Abd Alkader, "Modelling and Simulation of Wastewater Treatment Plant in Small Agglomeration in The Coastal Zone". Tishreen University Journal. 2013.
- [3] Haitham Jnad, Ammar Dabaliz, Hiba Mohammad, "An evaluation of the distribution of DO concentrations in aeration tanks at Lattakia WWTPs", 37(2) Tishreen University Journal. 2015
- [4] Victoria R. and all., "Impact of Ammonia-Based Aeration Control (ABAC) on Energy Consumption". 2020. doi:10.3390/app10155227.
- [5] Morio Miyahara, and all., "Aeration Control by Real-Time Nitrification Control Utilizing Activated Sludge Model". Meiden Review series No.176. 2019.
- [6] Nurul Farhana Aziz, and all., "Energy efficiency of wastewater treatment plant through aeration system". 2019 .doi:10.5004/dwt.2019.24134.
- [7] Nobel Ballhysa, Soyeon Kim and Seongjoon Byeon.(2020), *Wastewater Treatment Plant Control Strategie.* 2020 .  
<http://dx.doi.org/10.7236/IJASC.2020.9.4.16>.
- [8] Yingsong Chen, and all., "Smart energy savings for aeration control in wastewater treatment", *Energy Reports* 8 (2022) 1711–1721. 2022.
- [9] Zijian Wang. and all., "XGB-SEGA coupled energy saving method for wastewater treatment plants", *Applied Water Science*, Vol (14). 2024.
- [10] Reza Katebi. and all., "Control and instrumentation for wastewater treatment plants" *Advances in Industrial Control*, Springer, London, UK, 1999, ISBN: 1-852-33054-6.
- [11] Mohsen Daod, Fadi Motawej, Rasha Abdullah., "Improvement of Aeration System in Wastewater Treatment Plants using an Ammonium Cascade Control System", *Al-Baath University Journal*, Vol(43). 2021.
- [12] Y. Amerlinck, and all., "Arealistic dynamic blower energy consumption model for wastewater applications", *Water Science & Technology*, 74.7. 2016.
- [13] Amand, L., "Ammonium Feedback Control in Wastewater Treatment Plants". 104. 256 pp. Uppsala: Acta Universitatis Upsaliensis. 2014. ISBN 978-91-554-8900-7.