

تحسين نظام التهوية في محطات معالجة مياه الصرف الصحي باستخدام نظام التحكم المتعاقب بالأمونيوم

* أ.د. محسن داود

** د. فادي متوج

*** م. رشا عبدالله

الملخص

تخضع مياه الصرف الصحي للمعالجة وذلك للتخلص من حمل الملوثات الموجودة فيها وفق عمليات وطرائق مدروسة ومختلفة ، النوع الأكثر شيوعاً للمعالجة هي المعالجة بالحماة المنشطة .

التهوية أمر بالغ الأهمية لكفاءة عملية معالجة الحماة المنشطة. حيث تضمن كمية الهواء المناسبة للكائنات الدقيقة القدرة اللازمة لتحليل الملوثات في مياه الصرف الصحي بكفاءة عالية وبالتالي التخلص منها. في محطة معالجة نموذجية ، تمثل التهوية حوالي 60% من إجمالي تكاليف الطاقة للمحطة. ومن ثم ، فإن الفشل في تحسين التهوية لا يضر فقط بأداء المصنع ولكنه يؤدي أيضاً إلى تكبد تكاليف غير ضرورية .

توضح هذه الدراسة كيف يمكن تحقيق وفورات في تكاليف التشغيل وفي زمن المعالجة عن طريق الاستخدام الأكثر ذكاءً للتهوية في عملية الحماة المنشطة النموذجية ، حيث صممت ثلاثة أنظمة تحكم بنظام التهوية (التحكم بالأوكسجين المنحل - التحكم المتعاقب بالأوكسجين المنحل - التحكم المتعاقب بالأمونيوم) وتمت محاكاتها في حالات الطقس (معتدل - جاف - ماطر) باستخدام برنامج Matlab\Simulink .
تمت مقارنة نتائج المحاكاة بالنسبة لنظام التحكم بالأوكسجين المنحل ، وأظهرت النتائج

تحسين نظام التهوية في محطات معالجة مياه الصرف الصحي باستخدام نظام التحكم المتعاقب
بالأمونيوم

كفاءة نظام التحكم المتعاقب بالأمونيوم من حيث تخفيض زمن المعالجة و التوفير في
استهلاك الطاقة الكهربائية.

الكلمات المفتاحية : محطات معالجة مياه الصرف الصحي - التحكم بالأوكسجين
المنحل - التحكم المتعاقب بالأوكسجين المنحل - التحكم المتعاقب بالأمونيوم .

* أستاذ في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية _ جامعة تشرين

** مدرس في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية _ جامعة تشرين

*** طالبة ماجستير في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية _ جامعة تشرين

Improvement of Aeration System in Wastewater Treatment Plants using an Ammonium Cascade Control System

*Dr. Mohsen Daod

**Dr. Fadi Motawej

***Eng. Rasha Abdullah

Abstract

The wastewater is subjected to treatment in order to get rid of the pollutants load in it according to different studied processes and methods. The most common type of treatment is treatment with activated sludge.

Aeration is critical to the efficiency of any activated sludge treatment process. The right amount of air at the right time and to the right organisms ensures proper pollutant degradation. In a typical treatment plant, aeration accounts for about 60% of the total power costs of the plant. Hence, failing to optimise aeration is not only detrimental to plant performance but also incurs unnecessary costs.

This study demonstrates how savings in operating costs and processing time can be achieved through the smarter use of aeration in a typical activated sludge process. Three aeration

تحسين نظام التهوية في محطات معالجة مياه الصرف الصحي باستخدام نظام التحكم المتعاقب
بالأمونيوم

system control systems (dissolved oxygen control – dissolved oxygen cascade control – ammonium cascade control) are designed and simulated in cases: Weather (mild – dry – rain) using the Matlab \ Simulink program. The simulation results were compared for the dissolved oxygen control system, and the results showed the efficiency of the ammonium cascade control system in terms of reducing the processing time and saving electrical energy.

Key Words: Wastewater Treatment Plants – DO Control – DO Cascade Control – Ammonium Cascade Control.

1. الدراسات المرجعية:

1. قدم Ho وآخرون عام 2013 دراسة في نيوزيلندا بعنوان "تحسين كفاءة التهوية". حيث تم استخدام بيئة محاكاة desktop Biowin لمقارنة توفير طاقة التهوية بين عدة أنظمة تحكم هي (التحكم اليدوي بالتهوية - تحكم الأوكسجين المنحل- التحكم المتعاقب بالأمونيا). أظهرت النتائج أن التحكم المتعاقب بالأمونيا يحقق توفير بالطاقة بنسبة 20% بينما النظامين الآخرين لم يحققا أي توفير بالطاقة.
2. قدمت Amand وآخرون عام 2014 دراسة في السويد بعنوان "الدروس المستفادة من تقييم تحكم التغذية العكسية بالأمونيوم على نطاق واسع في ثلاث محطات كبيرة لمعالجة مياه الصرف الصحي". حيث تم اختيار وحدة تحكم التغذية العكسية بالأمونيوم كاستراتيجية تحكم، وأظهرت النتائج أهمية تنفيذ تحكم التغذية العكسية بالأمونيوم وتوفير في الطاقة بتراوح بين 7-19%.
3. قدم Uprety وآخرون عام 2015 دراسة في الولايات المتحدة الأمريكية بعنوان "تنفيذ التحكم في التهوية القائم على الأمونيا (ABAC) على نطاق واسع في محطات معالجة مياه الصرف الصحي". حيث أظهرت النتائج توفير في استهلاك الطاقة بنسبة 10% شهرياً، وتخفيض كبير في الكربون الإضافي اللازم لنزع النتروجين وتقليل الحاجة إلى زيادة حجم المفاعل.

4. قدم Malovanyy وآخرون عام 2016 دراسة في أوكرانيا بعنوان " التحليل المقارن لفعالية تنظيم التهوية اعتماداً على الخصائص الكمية لمياه الصرف الصحي". حيث أظهر تحليل البيانات لخزانات التهوية في محطة (Lviv) حاجة هذه المحطة للتحسين، وشمل التحسين استخدام نظام تحكم بالتهوية يعتمد على تركيز أيونات الأمونيوم بدلاً من تركيز الأوكسجين المنحل. أظهرت النتائج أن التحكم المعتمد على الأمونيوم متفوق على استراتيجية التحكم مع تركيز مستقر للأوكسجين المنحل.

5. قدم Sun وآخرون عام 2017 دراسة في الصين بعنوان " تقليل استهلاك طاقة عملية التهوية في MBRs". حيث اعتمدت الدراسة على معايرة نموذج ASM بشكل مناسب مع MBRs، ثم استخدام استراتيجية تحكم التغذية العكسية القائم على الأمونيا من أجل التهوية. أظهرت النتائج أنه يمكن تحقيق انخفاض في معدل التهوية بنسبة 20% من خلال تنفيذ التحكم في التهوية بناءً على تركيز الأمونيا بدلاً من التحكم في العملية بناءً على الأوكسجين المنحل.

6. قدم Rosenthal وآخرون عام 2020 دراسة في كندا بعنوان " تقييم استراتيجيات التحكم في التهوية لأنظمة النترجة الجزئية القائمة على الأغشية الحيوية /أناموكس". حيث تمت مقارنة إزالة النروجين في أنظمة أناموكس بين ثلاث أنظمة تحكم هي (ضبط ثابت للأوكسجين المنحل- تهوية متقطعة - التحكم في التهوية القائم على الأمونيا (ABAC)). أظهرت النتائج أن التحكم الثابت في الأوكسجين المنحل لا يمكن أن يفي بالحدود المسموح بها للأمونيوم، بينما تظهر التهوية المتقطعة تحسناً ولكنها تتطلب تحسين دورة التهوية، في حين

يظهر (ABAC) أفضل أداء معالجة مع مزايا التشغيل المستمر وتوفير في الطاقة بنسبة 20% مقارنةً بالتهوية المتقطعة.

7. قدم Medinilla وآخرون عام 2020 دراسة في الولايات المتحدة الأمريكية بعنوان " تأثير التحكم في التهوية القائم على الأومنيا (ABAC) على استهلاك الطاقة ". حيث ركزت الدراسة على أهمية استخدام أنظمة التحكم (ABAC) وأهميتها في تخفيض تكاليف استهلاك الطاقة. أظهرت النتائج توفير في استهلاك الطاقة بنسبة 9%، مع المحافظة على جودة المياه الناتجة عن عملية المعالجة.

2. مقدمة:

مياه الصرف الصحي هي المياه التي يتم إنتاجها بواسطة الانسان والصناعات، وتختلط فيها مواد مختلفة منها ما هو صلب أو ذائب ومعلق والغروي سواء كانت هذه المواد عضوية مثل الدهون والشحوم والزيوت أو المواد الغير عضوية مثل الرمل والحصى وأملاح المعادن.

لهذا، فإن مياه الصرف الصحي تتم معالجتها في محطات تنقية مياه الصرف الصحي حتى لا تكون خطراً على الصحة العامة وسبباً في انتشار الأمراض [1].

تخضع مياه المجاري بشكل عام إلى مراحل المعالجة الرئيسية الآتية:

1. مرحلة المعالجة الابتدائية.

2. مرحلة المعالجة الأولية.

3. مرحلة المعالجة الثانوية (البيولوجية).

4. مرحلة المعالجة الثالثة.

5. معالجة الحمأة.

6. تعقيم المياه.

1.2. المعالجة الابتدائية:

تهدف هذه المعالجة بشكل عام إلى إزالة المواد الصلبة اللاعضوية كبيرة الحجم من مياه المجاري، لحماية التجهيزات الميكانيكية والمضخات المختلفة الموجودة في المراحل اللاحقة من المعالجة. [2]

2.2. المعالجة الأولية:

تهدف هذه المعالجة إلى تخفيض قيم الملوثات الموجودة في مياه المجاري، وبخاصة التخلص من كامل العوالق الصلبة السهلة الترسيب، وبالتالي تخفيض تركيز المواد الصلبة المعلقة والتلوث العضوي. [2]

3.2. المعالجة الثانوية (البيولوجية):

تصمم على أنها عملية بيولوجية تزيل النفايات المنحلة القابلة للتحلل البيولوجي، وهي تتألف من جزأين :

أ- تحلل النفايات المنحلة بتقديمها للبكتريا على شكل غذاء، وبذلك تتحول النفايات العضوية من الشكل المنحل إلى مواد عضوية ميكروبية، وتجري هذه العملية ضمن المفاعل الحيوي .

ب- إزالة المواد الصلبة بالترسيب في أحواض الترسيب الثانوية، بحيث يمكن إعادتها إلى بداية حوض التهوية من أجل إضافة البكتريا إلى مياه الصرف القادمة من منطقة المعالجة الابتدائية، أو تتم إزالتها إلى وحدات معالجة الحمأة.

ولحدوث معالجة ثانوية يلزم عوامل عدة هي:

1. الأحياء الدقيقة المسؤولة عن المعالجة .
2. مصدر لإمداد الأوكسجين اللازم لتنفس البكتريا (نظام التهوية).
3. مياه الصرف الحاوية على المواد العضوية والتي تعتبر غذاء للبكتريا. [2]

4.2. المعالجة الثالثة:

تتم فيها إزالة الفوسفور عن طريق الترسيب . هناك عدة طرق مستخدمة حيث يمكن استخدام مواد كيميائية مختلفة للترسيب وإضافتها في مواقع مختلفة في المحطة.[3]

5.2. معالجة الحمأة:

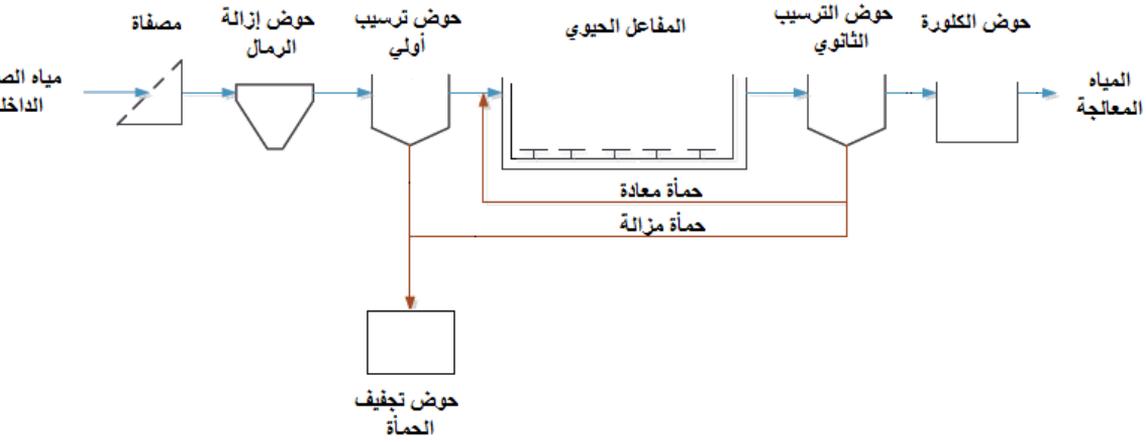
الحمأة الناتجة من معالجة مياه الصرف تحتوي على بكتريا ممرضة، لذلك تتم معالجة الحمأة عن طريق تجفيفها بواسطة إما المكبس الكيسي أو ساحات تجفيف الحمأة.[2]

6.2. تعقيم المياه:

تحسين نظام التهوية في محطات معالجة مياه الصرف الصحي باستخدام نظام التحكم المتعاقب بالأمنوميوم

هناك طرق مختلفة لتعقيم المياه الناتجة عن المعالجة (غاز الكلور - الأوزون - الأشعة فوق البنفسجية)، والأكثر شيوعاً هو تعقيم المياه بالكلور ويتم ذلك ضمن حوض الكلورة. [2].

يوضح الشكل (1) مراحل معالجة مياه الصرف الصحي.



الشكل (1): مراحل معالجة مياه الصرف الصحي. [6].

7.2. المعالجة البيولوجية للنتروجين:

النوع الأكثر شيوعاً للمعالجة البيولوجية هو المعالجة بالحمأة المنشطة، وهي عبارة عن خليط من الكائنات الحية العالقة في مياه الصرف الصحي.

لإزالة النتروجين بالكامل يتطلب ذلك عمليتان :

النتريجة (nitrification) - إزالة النترات (denitrification) .

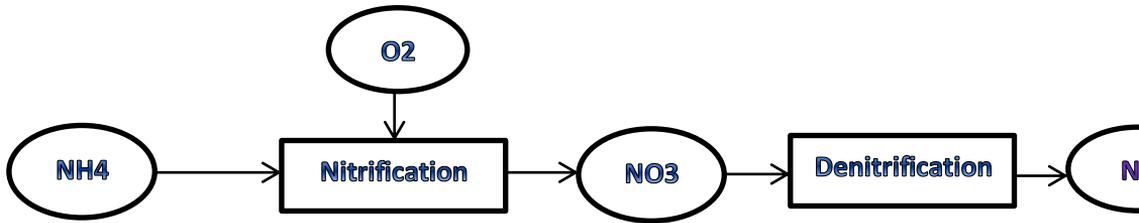
1.7.2. النتريجة:

هي عملية يتأكسد فيها الأمونيوم إلى نترات عن طريق مجموعتين مختلفتين من البكتريا [3]. المجموعة الأولى هي بكتريا (Nitrosomonas) حيث تؤكسد الأمونيوم إلى نترت، والمجموعة الثانية هي بكتريا (Nitrobacter) تحول النترت إلى نترات. [4]

2.7.2. إزالة النترات:

هي عملية يتم فيها تخفيض النترات لتشكيل غاز النتروجين الذي يترك الماء عبر سطحه إلى الهواء، تتم هذه العملية بواسطة بكتريا (denitrifying). [4]

يوضح الشكل (2) عملية إزالة النتروجين المبسطة.



الشكل (2) : عملية إزالة النتروجين المبسطة. [5]

إن معدلات نمو بكتيريا النتجة تعتمد على تركيز الأوكسجين المنحل، حيث وجد أنه عندما يكون $(DO < 2 \text{ mg/L})$ تصبح عملية النتجة أقل فعالية، وإذا كان $(DO \geq 3 \text{ mg/L})$ فإن خواص الحمأة المترسبة تكون غير جيدة، لذلك وجد أن تركيز الأوكسجين المنحل المناسب لعملية المعالجة هو $(DO = 2 \text{ mg/L})$. [6]

من أجل إزالة الأمونيوم فإن مطلب الأوكسجين لأكسدة الأمونيوم هو (4.57) ، وأظهرت الدراسات أنه من أجل $(NH_4 \leq 1.5)$ فإن قيمة الأوكسجين الكافية لعملية المعالجة هي $(DO = 0.5 \text{ mg/L})$ ، ومن أجل $(NH_4 > 1.5)$ فإن قيمة الأوكسجين الكافية لعملية المعالجة هي $(DO = 2 \text{ mg/L})$. [8]

3. هدف البحث:

تطبيق نظام التحكم في التهوية القائم على الأمونيوم لتحسين التهوية وتخفيض استهلاك الطاقة وزمن المعالجة.

4. شرح الأنظمة المدروسة:

عادةً ما يكون نظام التهوية في محطة معالجة مياه الصرف هو المستهلك الأكبر للطاقة في المحطة. الضواغط أو النافخات (Blowers) تتطلب أكبر قدر من الطاقة الكهربائية في المحطة وبالتالي أي تخفيض في التهوية سوف يقلل من تكاليف التشغيل بشكل كبير. لهذا السبب يتم استثمار قدر كبير من الأبحاث في التحكم بنظام التهوية أكثر من تطوير وحدات التحكم الأخرى أو تحسينها [5].

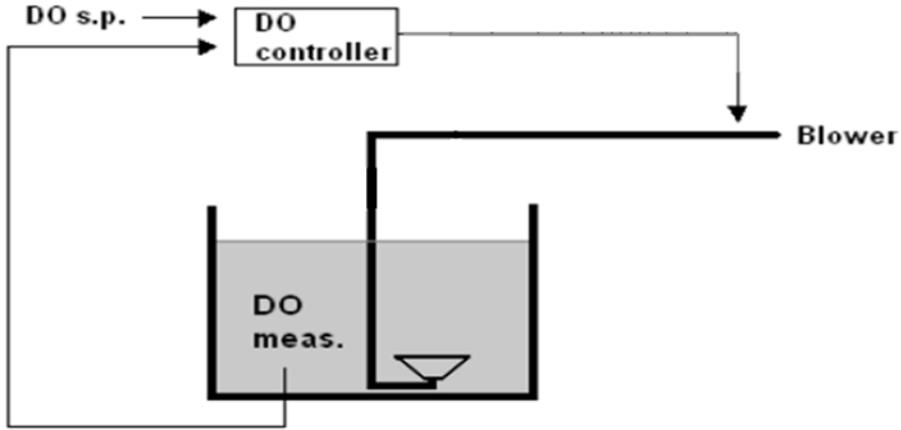
هناك عدة أنظمة للتحكم بنظام التهوية في المحطة وهي:

1. التحكم بالأكسجين المنحل (DO control).
2. التحكم المتعاقب بالأكسجين المنحل (DO cascade control).
3. التحكم المتعاقب بالأمونيوم (Ammonium cascade control).

1.4 التحكم بالأكسجين المنحل (DO control):

الاستراتيجية الأساسية لنظام التحكم بالأكسجين المنحل هي استخدام حساس الأكسجين المنحل، بحيث تتم مقارنة قيمة تركيز الأكسجين في المفاعل الحيوي مع قيمة (setpoint) والتي يتم تحديدها من قبل موظفو المحطة. يتم تشغيل التهوية إذا كان تركيز الأكسجين المنحل في المفاعل الحيوي أصغر من قيمة (setpoint)،

وإطفاءه عند يصبح تركيز الأوكسجين المنحل في المفاعل الحيوي أكبر أو يساوي قيمة (*setpoint*). كما يظهر بالشكل (3). [3].

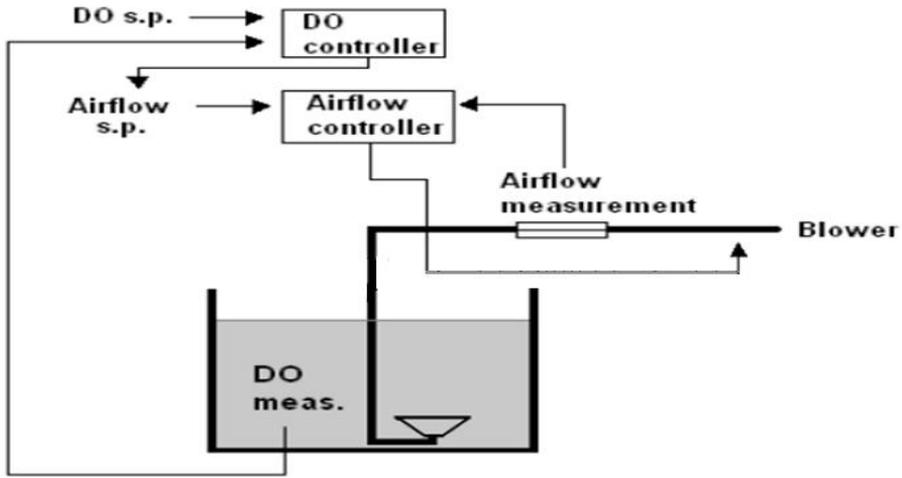


الشكل (3) : تحكم الأوكسجين المنحل. [3].

2.4. التحكم المتعاقب بالأوكسجين المنحل (*DO cascade control*):

هو عبارة عن عدة متحكمات متصلة مع بعضها تسلسلياً، حيث حلقة التحكم الداخلية تتحكم بتدفق الهواء، وحلقة التحكم الخارجية تتحكم بتركيز الأوكسجين المنحل. لتحقيق ذلك، يتطلب قياس الأوكسجين المنحل و تدفق الهواء. حلقة التحكم الخارجية أي حلقة التحكم بالأوكسجين المنحل تأخذ قيم (*setpoint*) من موظفي المحطة. بالاعتماد على قيمة (*setpoint*) والقيمة الفعلية للأوكسجين المنحل وبارامترات (K, T_i) يحسب المتحكم إشارة التحكم والتي هي قيمة (*setpoint*) لتدفق الهواء.

حلقة تدفق الهواء أي الحلقة الداخلية تقارن قيمة (*setpoint*) مع قيمة تدفق الهواء الحالية وبعدها تعطي إشارة التحكم للمشغل ومنه للمنفاخ. كما يظهر بالشكل (4). [3].



الشكل (4) : التحكم المتعاقب بالأكسجين المنحل. [3]

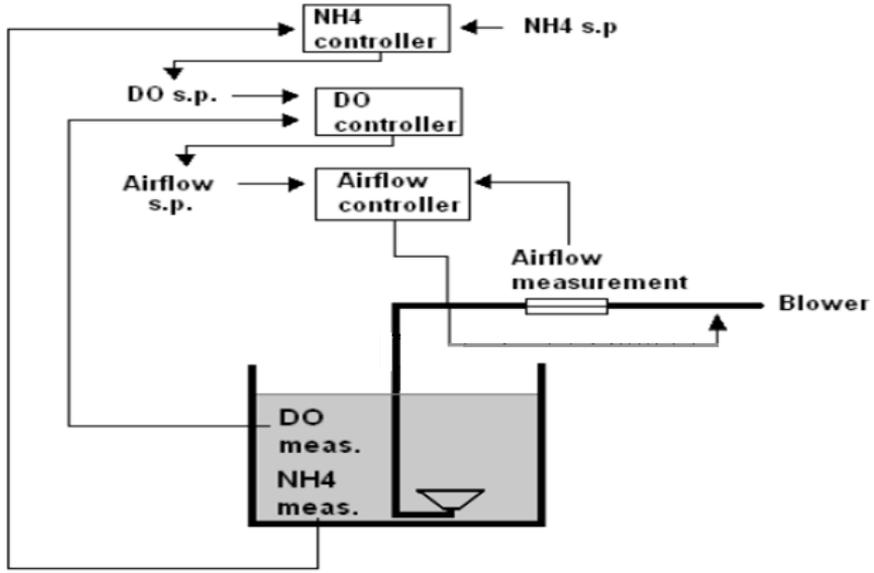
3.4. التحكم المتعاقب بالأمونيوم (Ammonium cascade control):

التحكم المتعاقب بالأمونيوم هو خطوة أبعد من التحكم، حيث تضاف حلقة تحكم إضافية حول التحكم المتعاقب بالأكسجين المنحل. ويتطلب متحكم PI إضافي وأيضاً مقياس أمونيوم.

يتم تحديد قيمة (*setpoint*) للأمونيوم من قبل موظفي المحطة، والتي سوف يستخدمها متحكم الأمونيوم لحساب قيمة (*setpoint*) للأكسجين المنحل والتي سوف تستخدم كما ذكر في الفقرة السابقة .

تحكم الأمونيوم مفيد جداً لسبب أن طاقة النترجة تتغير على مدار السنة (كنتيجة لتغير الحمل، درجة الحرارة... الخ)، وبالتالي لكي تكون نتائج المعالجة المطلوبة جيدة على مدار السنة، نحتاج لأن نتغير قيمة (*setpoint*) للأكسجين المنحل بشكل مستمر.

السمة السلبية لتحكم الأمونيوم هي أن حساس الأمونيوم مكلف جداً. [3]



الشكل (5): تحكم المتعاقب بالأمنيوم. [3]

5. النموذج الرياضي:

الفرضيات :

1. اعتماد زمن المكوث (24 ساعة).

2. اعتماد التدفق الداخل على المحطة هو التدفق الوسطي (1039.39

$[m^3/d]$).

1.5. نمذجة المفاعل الحيوي:

النموذج الأكثر شيوعاً المستخدم لوصف عمليات الحمأة المنشطة ضمن محطات معالجة مياه الصرف الصحي هو النموذج ASM1، والذي تم تطويره من قبل جمعية المياه العالمية IWA عام 1983.

$$\begin{aligned}
 R_{S_s} &= -\frac{1}{Y_H} \hat{\mu}_H \left(\frac{S_s}{K_S + S_s} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H} \\
 &- \frac{1}{Y_H} \hat{\mu}_H \left(\frac{S_s}{K_S + S_s} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) n_g X_{B,H} \\
 &+ k_h \frac{\frac{X_S}{X_{B,H}}}{K_X + \frac{X_S}{X_{B,H}}} \left(\left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) \right. \\
 &\left. + n_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right) X_{B,H} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{X_I} &= f_P (b_H X_{B,H} \\
 &+ b_A X_{B,A}) \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{X_S} &= (1 - f_P) (b_H X_{B,H} + b_A X_{B,A}) \\
 &- k_h \frac{\frac{X_S}{X_{B,H}}}{K_X + \frac{X_S}{X_{B,H}}} \left(\left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) \right. \\
 &\left. + n_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right) X_{B,H} \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_{X_{B,H}} &= \hat{\mu}_H \left(\frac{S_s}{K_S + S_s} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H} \\
 &+ \hat{\mu}_H \left(\frac{S_s}{K_S + S_s} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) n_g X_{B,H} \\
 &- b_H X_{B,H} \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$R_{X_{B,A}} = \hat{\mu}_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A} - b_A X_{B,A} \quad (5)$$

$$R_{S_O} = -\frac{1 - Y_H}{Y_H} \hat{\mu}_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H} - \frac{4.57 - Y_A}{Y_A} \hat{\mu}_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A} + K_{La} (S_{O,sat} - S_O) \quad (6)$$

$$R_{S_{NO}} = -\frac{1 - Y_H}{2.86 Y_H} \hat{\mu}_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) n_g X_{B,H} + \frac{1}{Y_A} \hat{\mu}_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A} \quad (7)$$

$$R_{S_{NH}} = -i_{XB} \hat{\mu}_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H} - i_{XB} \hat{\mu}_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) n_g X_{B,H} - \left(i_{XB} + \frac{1}{Y_A} \right) \hat{\mu}_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A} + k_a S_{ND} X_{B,H} \quad (8)$$

$$R_{S_{ND}} = -k_a S_{ND} X_{B,H} + \frac{X_{ND}}{X_S} k_h \frac{\frac{X_S}{X_{B,H}}}{K_X + \frac{X_S}{X_{B,H}}} \left(\left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) + n_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right) X_{B,H} \quad (9)$$

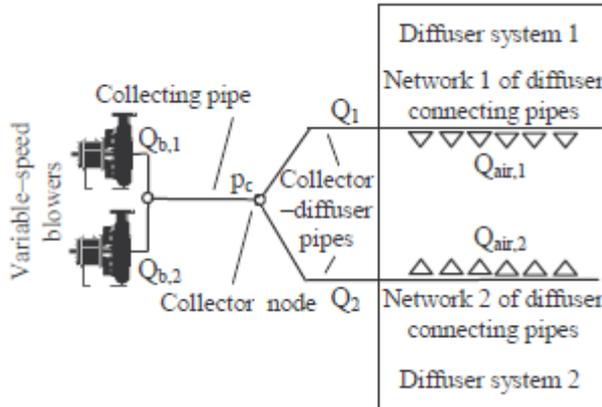
$$\begin{aligned}
 & R_{X_{ND}} \\
 & = (i_{XB} - f_P i_{XP})(b_H X_{B,H} + b_A X_{B,A}) \\
 & - \frac{X_{ND}}{X_S} k_h \frac{\frac{X_S}{X_{B,H}}}{K_X + \frac{X_S}{X_{B,H}}} \left(\left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) \right. \\
 & \left. + n_h \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right) X_{B,H} \quad (10)
 \end{aligned}$$

2.5. نمذجة نظام التهوية:

يتألف نظام التهوية من:

Blowers - أنبوب الهواء - الأنابيب الموزعة للنواشر - نظام النواشر.

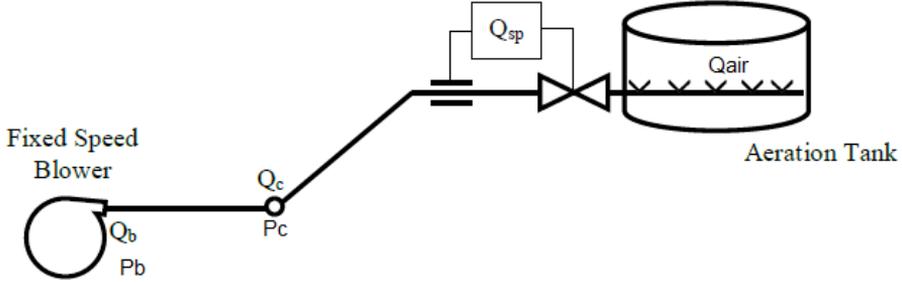
تقوم *Blowers* بضخ الهواء عبر أنبوب الهواء، ومنه عبر الأنابيب الموزعة للنواشر إلى نظام النواشر، والذي يتألف من شبكة من الناشرات (*Diffusers*) موزعة على التفرع في أسفل المفاعل الحيوي، تقوم بنشر الهواء إلى مياه الصرف في المفاعل الحيوي. [8]



الشكل (6): نظام التهوية. [7]

حسب (Wendimu Fanta Gemechu) تمت نمذجة نظام التهوية من أجل

Blower واحدة المفاعل الحيوي. [7]



الشكل (7): رسم تخطيطي لنظام Blower مفردة ووحوض التهوية. [7]

$$Q_b = f_b(x_b, \Delta P_b, n_b) \quad (11)$$

حيث :

f_b : تابع لا خطي متوفر من بيانات الشركة.

$x_b = 1$: إذا كانت الـ Blower تعمل (on).

$x_b = 0$: إذا كانت الـ Blower لا تعمل (off).

n_b : سرعة دوران المحرك.

$\Delta P_b = P_b - P_a$: هبوط الضغط عبر الـ Blower ويساوي الفرق بين الضغط

عندها والضغط الجوي.

$$Q_{air} = \begin{cases} \frac{\Delta P_d - \Delta P_d^{open}}{R_d} & \text{for } \Delta P_d \geq \Delta P_d^{open} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$$R_d \cdot C_d \cdot \frac{dQ_{air}}{dt} + Q_{air} = \frac{T_d}{T_b} \cdot Q_b \quad (13)$$

$$\frac{T_d}{T_b} = \frac{P_d}{P_b} \quad (14)$$

$$R_d = 0.74 \frac{kPa \cdot h}{m^3}, \quad \Delta P_d^{open} = 2 kPa$$

فيكون تابع النقل لنظام التهوية:

$$\frac{Q_{air}}{Q_b} = \frac{P_d/P_b}{R_d \cdot C_d s + 1} \quad (15)$$

بتطبيق قيم بارامترات النموذج ASM1 يصبح تابع النقل بالشكل التالي:

$$G(s) = \frac{2.3}{1059 s + 1}$$

الجدول (1) : قيم بارامترات نظام التهوية وفق النموذج ASM1

البارامتر	القيمة	الواحدة
-----------	--------	---------

KPa	50	P_b
KPa	115	P_d
$KP.m^3$	1432	C_d
$\frac{kPa.h}{m^3}$	0.74	R_d

6. نتائج الدراسة التحليلية:

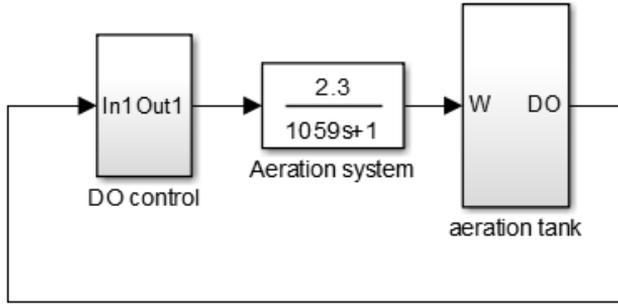
تمت دراسة أنظمة التحكم (التحكم بالأوكسجين المنحل - التحكم المتعاقب بالأوكسجين المنحل - التحكم المتعاقب بالأوكسجين المنحل) حيث تم إجراء المحاكاة في بيئة (Matlab-Simulink)، وتم تطبيقها في حالات الطقس (المعتدل - الجاف - الماطر)، ومقارنة النتائج مع نظام التحكم بالأوكسجين المنحل.

1.6. حالة الطقس معتدل :

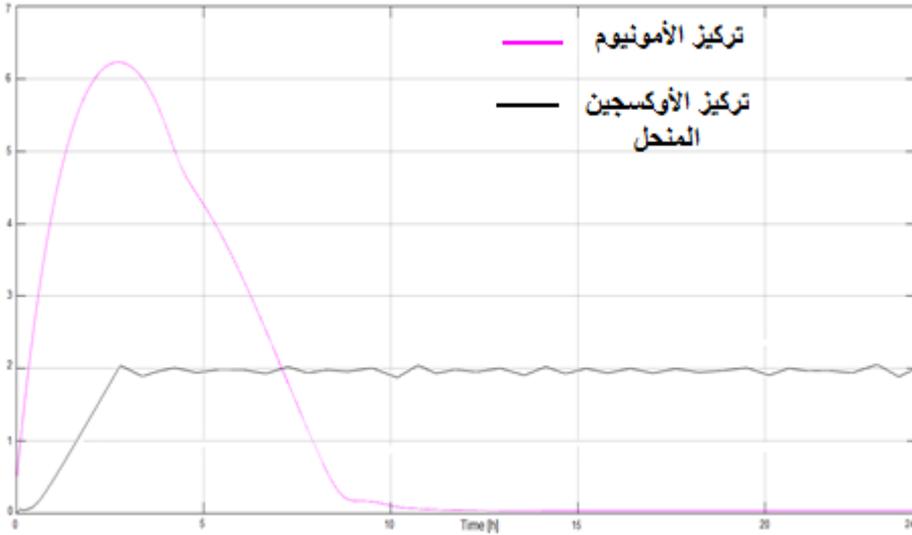
1.1.6. محاكاة نظام التحكم بالأوكسجين المنحل (DO control):

بتطبيق نظام التحكم بالأوكسجين المنحل على المحطة حيث تتم قراءة قيمة الأوكسجين المنحل في المفاعل من حساس الأوكسجين ، ويتم تشغيل نظام التهوية عندما تكون قيمة $DO < 2$ ، و إطفاء نظام التهوية عندما تكون $DO \geq 2$. تظهر نتائج المحاكاة بالشكل (9) :

تحسين نظام التهوية في محطات معالجة مياه الصرف الصحي باستخدام نظام التحكم المتعاقب بالأمونيوم



الشكل (8): نظام DO control عند تطبيقه على المحطة في بيئة (Matlab-) .Simulink



الشكل (9): تركيز الأوكسجين المنحل- تركيز الأمونيوم عند تطبيق نظام DO control على المحطة (طقس معتدل).

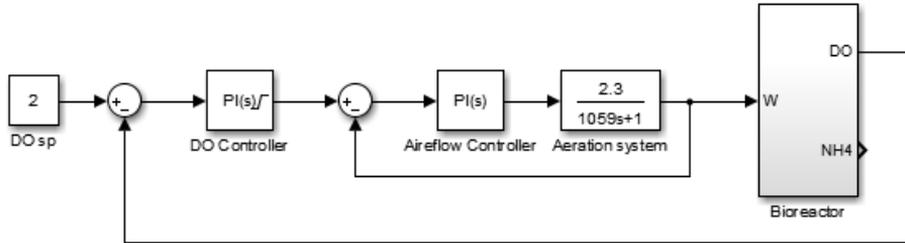
نلاحظ أن تركيز الأوكسجين المنحل يزداد للقيمة (2 [mg/l])، ثم يتراوح عند هذه القيمة بسبب إطفاء نظام التهوية وتشغيله من جديد ليحافظ على قيمة الأوكسجين المنحل (2 [mg/l]) بالرغم من انخفاض تركيز الأمونيوم. أما بالنسبة لتركيز الأمونيوم فإنه

ينخفض بسبب التهوية ويأخذ زمن معالجة قريب من ($10 [h]$) (أي بطئ في عملية المعالجة ، ويوجد هدر في الطاقة بسبب استمرار عمل نظام التهوية، ليحافظ على قيمة تركيز الاوكسجين المنحل ($2 [mg/l]$) بالرغم من انخفاض تركيز الأمونيوم في مياه الصرف الصحي).

2.1.6. محاكاة نظام التحكم المتعاقب بالأوكسجين المنحل على المحطة:

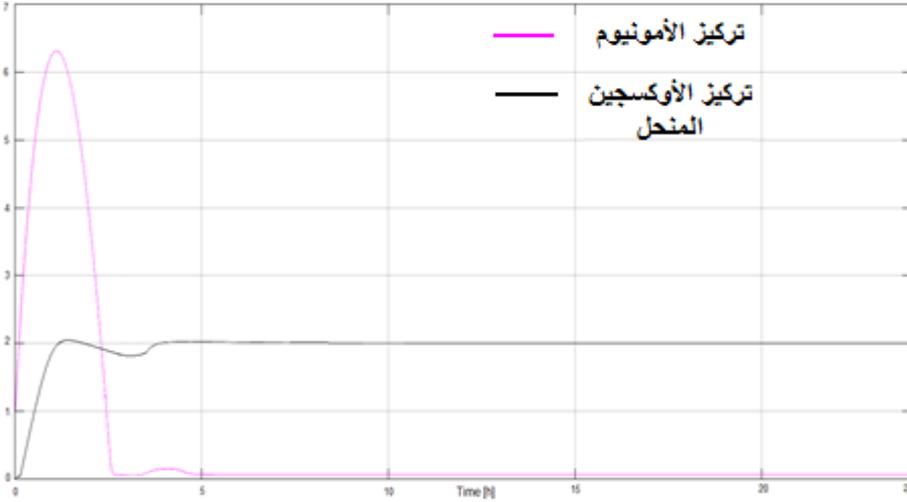
هو عبارة عن عدة متحكمات متصلة مع بعضها تسلسلياً، حيث حلقة التحكم الداخلية تتحكم بتدفق الهواء وحلقة التحكم الخارجية تتحكم بتركيز الاكسجين المنحل.

حلقة التحكم الخارجية (حلقة التحكم بالأوكسجين المنحل) تأخذ قيمة ($setpoint_{DO} = 2 [mg/l]$) وبالمقارنة مع قيمة الأوكسجين المنحل الفعلية الآتية من حساس الأوكسجين المنحل، يحسب المتحكم إشارة التحكم والتي هي قيمة ($setpoint$) لحلقة التحكم الداخلية (حلقة التحكم بتدفق الهواء)، يظهر الشكل (11) نتائج المحاكاة.



الشكل (10) : نظام التحكم المتعاقب بالأوكسجين المنحل عند تطبيقه على المحطة في بيئة (Matlab-Simulink).

تحسين نظام التهوية في محطات معالجة مياه الصرف الصحي باستخدام نظام التحكم المتعاقب بالأمونيوم

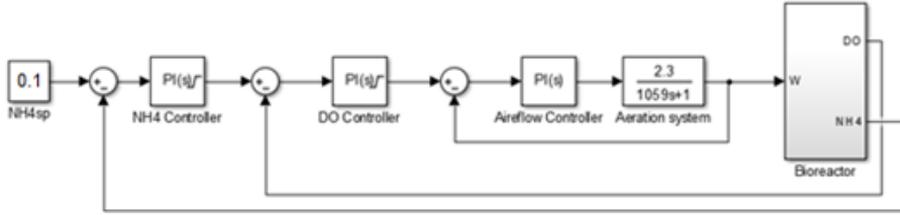


الشكل (12): تركيز الأوكسجين المنحل - تركيز الأمونيوم عند تطبيق نظام التحكم المتعاقب بالأمونيوم (طقس معتدل).

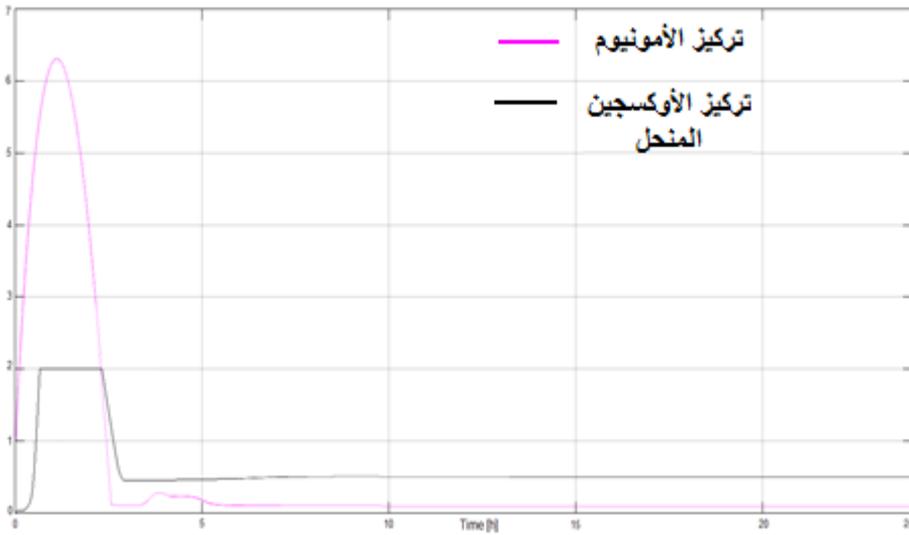
نلاحظ من الشكل تحسين عملية المعالجة وانخفاض زمن المعالجة بنسبة تقارب 50% بالمقارنة مع نظام التحكم بالأمونيوم المنحل، واستقرار قيمة الأوكسجين المنحل عند القيمة ($setpoint_{DO} = 2 [mg/l]$) بالرغم من إتمام عملية المعالجة (أي تحسين في عملية المعالجة وهدر في الطاقة).

3.1.6. محاكاة نظام التحكم المتعاقب بالأمونيوم على المحطة:

نضيف متحكم PI على نظام التحكم المتعاقب بالأمونيوم المنحل، حيث تكون إشارة الخطأ حاصل طرح قيمة ($setpoint_{NH_4}$) مع القيمة الفعلية لتركيز الأمونيوم في المفاعل الحيوي الآتية من حساس الأمونيوم، يظهر الشكل (13) نظام التحكم بالأمونيوم، وتظهر نتائج المحاكاة للنظام عند قيمة ($setpoint_{NH_4} = 0.1$) بالشكل (14).



الشكل (13): نظام التحكم المتعاقب بالأمونيوم عند تطبيقه على المحطة في بيئة (Matlab-Simulink).



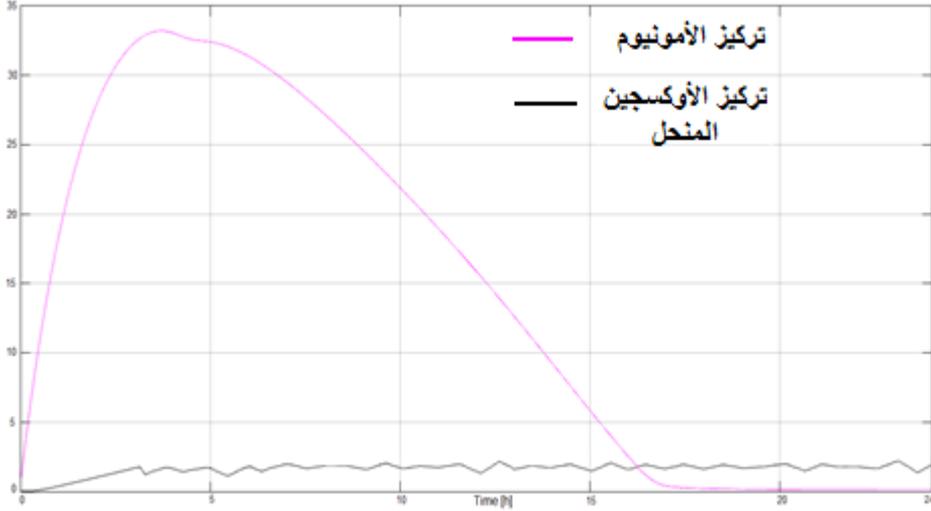
الشكل (14): تركيز الأوكسجين المنحل - تركيز الأمونيوم عند تطبيق نظام التحكم بالأمونيوم (طقس معتدل).

نلاحظ من الشكل انخفاض زمن المعالجة أيضاً بنسبة تقارب 50%، وانخفاض تركيز الأوكسجين المنحل بنسبة 25% (أي تحسين في عملية المعالجة وتوفير في استهلاك الطاقة).

2.6. حالة الطقس جاف:

في هذه الحالة يكون تركيز الأمونيوم عند أعلى قيمة بسبب تبخر مياه الصرف الصحي.

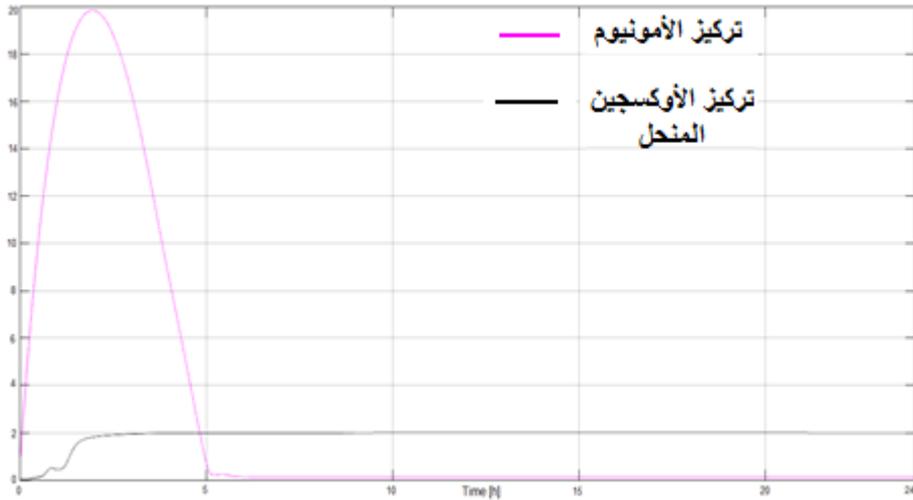
1.2.6. محاكاة نظام التحكم بالأمونيوم المنحل (DO control):



الشكل (15): تركيز الأوكسجين المنحل- تركيز الأمونيوم عند تطبيق نظام DO control على المحطة (طقس جاف).

نلاحظ من الشكل أن تركيز الأوكسجين المنحل يتراوح حول قيمة $(setpoint_{DO} = 2 [mg/l])$ ، وأن زمن المعالجة ازداد ليصل لحوالي $(17 [h])$ بسبب زيادة تركيز الأمونيوم في مياه الصرف الصحي (أي بطئ في عملية المعالجة وهدر في الطاقة).

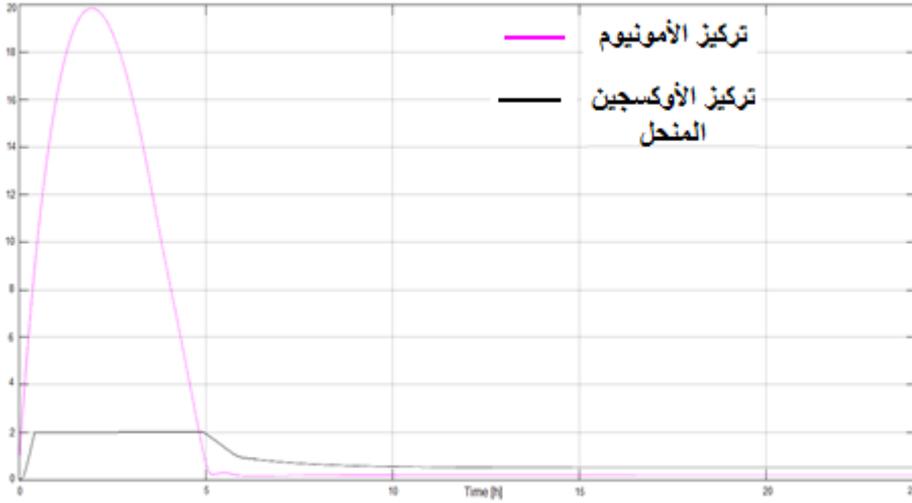
2.2.6. محاكاة نظام التحكم المتعاقب بالأوكسجين المنحل على المحطة:



الشكل (16): تركيز الأوكسجين المنحل - تركيز الأمونيوم عند تطبيق نظام التحكم المتعاقب بالأوكسجين (طقس جاف).

نلاحظ من الشكل أن زمن المعالجة انخفض بنسبة تقارب 29.5% بالمقارنة مع نظام التحكم بالأوكسجين المنحل، وأن تركيز الأوكسجين المنحل يستقر عند القيمة ($setpoint_{DO} = 2 [mg/l]$) بالرغم من إتمام عملية المعالجة (أي تحسين في عملية المعالجة وهدر في الطاقة).

3.2.6. محاكاة نظام التحكم المتعاقب بالأمونيوم على المحطة :



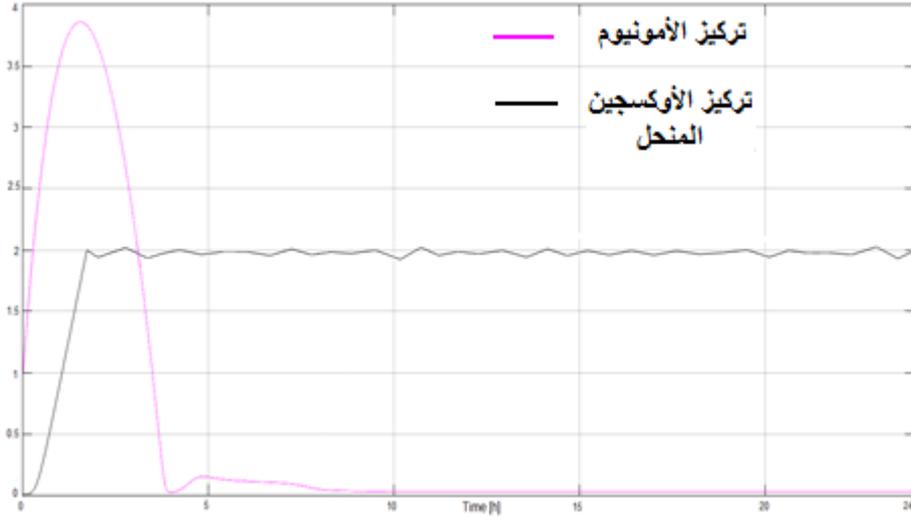
الشكل (17): تركيز الأوكسجين المنحل - تركيز الأمونيوم عند تطبيق نظام التحكم بالأمونيوم (طقس جاف).

نلاحظ من الشكل انخفاض زمن المعالجة بنسبة تقارب 29.5%، وانخفاض في تركيز الأوكسجين المنحل بنسبة 25% (أي تحسين في عملية المعالجة وتوفير في الطاقة).

3.6. حالة الطقس ماطر :

في هذه الحالة يتم تمديد مياه الصرف الصحي بمياه الأمطار فيكون تركيز الأمونيوم بأصغر قيمه له.

1.3.6. محاكاة نظام التحكم بالأوكسجين المنحل (DO control):

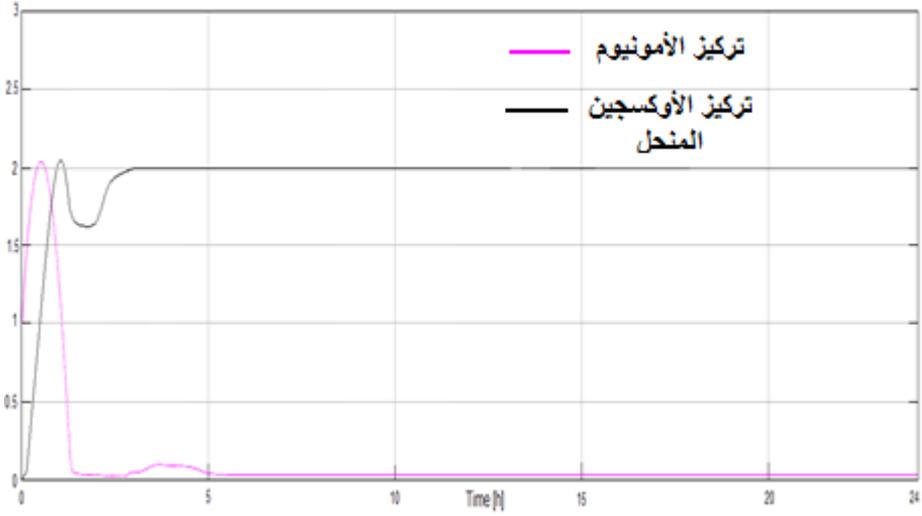


الشكل (18): تركيز الأوكسجين المنحل- تركيز الأمونيوم عند تطبيق نظام DO control على المحطة (طقس ماطر).

نلاحظ من الشكل أن تركيز الأوكسجين المنحل يتراوح حول قيمة ($setpoint_{DO} = 2 [mg/l]$)، وأن زمن المعالجة انخفض إلى القيمة ($8 [h]$) بسبب انخفاض تركيز الأمونيوم في مياه الصرف الصحي بفعل الأمطار.

2.3.6. محاكاة نظام التحكم المتعاقب بالأوكسجين المنحل على المحطة:

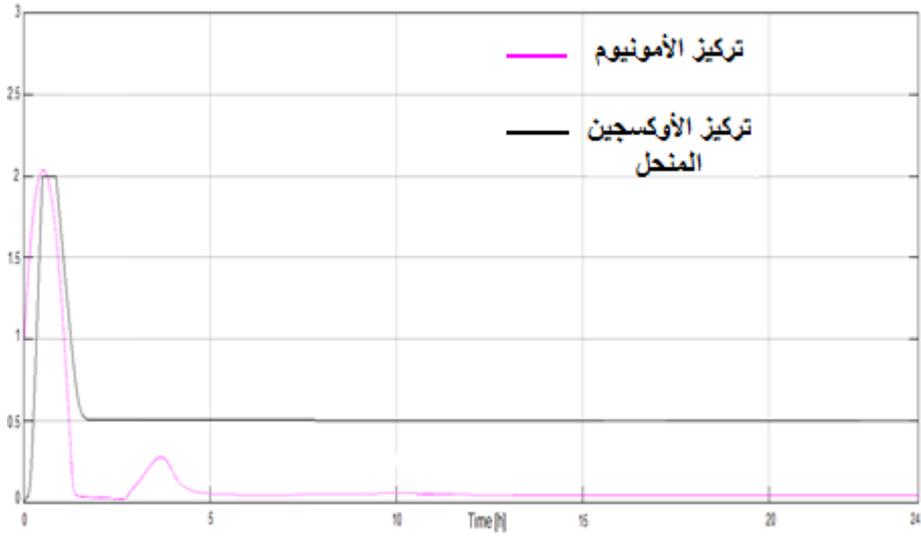
تحسين نظام التهوية في محطات معالجة مياه الصرف الصحي باستخدام نظام التحكم المتعاقب بالألمونيوم



الشكل (19): تركيز الأوكسجين المنحل - تركيز الألمونيوم عند تطبيق نظام التحكم المتعاقب بالأوكسجين (طقس ماطر).

نلاحظ من الشكل تحسين عملية المعالجة وتخفيض زمن المعالجة بنسبة تقارب 62%، واستقرار تركيز الأوكسجين المنحل عند قيمة ($setpoint_{DO} = 2 [mg/l]$) بالرغم من إتمام عملية المعالجة (أي تحسين في عملية المعالجة وهدر في الطاقة).

3.3.6. محاكاة نظام التحكم المتعاقب بالألمونيوم على المحطة:



الشكل (20): تركيز الأوكسجين المنحل - تركيز الأمونيوم عند تطبيق نظام التحكم بالأمونيوم (طقس ماطر).

نلاحظ من الشكل تخفيض زمن المعالجة بنسبة تقارب 62.5%، وتخفيض تركيز الأوكسجين المنحل بنسبة 25% (أي تحسين في عملية المعالجة وتوفير في الطاقة).

يظهر الجدول التالي ملخص النتائج بين الأنظمة.

الجدول (2) ملخص النتائج بين الأنظمة الثلاثة

الميزات	تركيز الأوكسجين المنحل	زمن المعالجة	نظام التحكم
- بطئ في عملية المعالجة. - هدر في الطاقة	يتراوح حول قيمة 2 [mg/l]	17-8 ساعة	DO control

تحسين نظام التهوية في محطات معالجة مياه الصرف الصحي باستخدام نظام التحكم المتعاقب
بالأمونيوم

<p>- تخفيض زمن المعالجة بما يقارب (50 - 29.5 - 62.5 %) في حالات الطقس (معتدل - جاف - ماطر) بالترتيب . - هدر بالطاقة .</p>	<p>2 [mg/l]</p>	<p>5 ساعات</p>	<p>cascade Do control</p>
<p>- تخفيض زمن المعالجة بما يقارب (50 - 29.5 - 62.5 %) في حالات الطقس (معتدل - جاف - ماطر) بالترتيب . - تخفيض قيمة DO بنسبة 25% وبالتالي تخفيض في استهلاك الطاقة</p>	<p>if $NH_4 > 1.5[mg/l]$ then $DO = 2[mg/l]$ if $NH_4 \leq 1.5[mg/l]$ then $DO = 0.5[mg/l]$</p>	<p>5 ساعات</p>	<p>NH_4 control</p>

7. الاستنتاجات :

1. عمل نظام التحكم بالأمونيوم المتعاقب بكفاءة إذ سرع عملية المعالجة بنسبة تقارب (50 - 29.5 - 62.5%) في حالات الطقس (معتدل - جاف - ماطر) بالترتيب، ولكنه لم يخفض من استهلاك الطاقة بالمحطة بالمقارنة مع نظام التحكم بالأمونيوم المنحل.

2. عمل نظام التحكم المتعاقب بالأمونيوم بكفاءة عالية حيث سرع عملية المعالجة بنسبة تقارب (50 - 29.5 - 62.5 %) في حالات الطقس (معتدل - جاف - ماطر) بالترتيب، وخفض تركيز الأوكسجين المنحل بنسبة 25%، أي خفض من استهلاك الطاقة الكهربائية في المحطة.

3. بسبب تخفيض نظام التحكم المتعاقب بالأمونيوم لزمن المعالجة، يمكننا معالجة كميات مياه أكبر وبالتالي يمكن استقبال مياه من القرى المجاورة لمعالجتها، أو معالجة مياه منطقة تواجد المحطة عند الزيادة السكانية للقرية وبالتالي تأخير عملية التوسع للمحطة عدة سنوات لاحقة.

8. المقترحات:

1. ملاحظة نظام التحكم المتعاقب بالأمونيوم وإمكانية تطبيقه في محطات المعالجة قيد الدراسة.

2. أخذ نظام التحكم المتعاقب بالأمونيوم بالحسبان عند دراسة حالات التوسع في محطات المعالجة القائمة، كونه يخفض من زمن المعالجة وبالتالي إمكانية استقبال كميات مياه أكبر، أي توفير تكاليف إنشاء أحواض إضافية للمحطة.

المراجع

- [1] Langergraber G, Simunek J, 2006– The Multi Component Reactive Transport Module. University of California Riverside, USA, p 72.
- [2] Samulesson P, 2005– Control of Nitrogen Removal in Activated sludge Processes. Uppsala University , Sweden, p 168.
- [3] Larsson V,2011– Energy savings with a new aeration and control system in a mid–size Swedish wastewater treatment plant. Uppsala University, Department of Information Technology, Sweden, p 78.
- [4] Amand L, 2014–Ammonium Feedback Control in Wastewater Treatment Plants. Uppsala University, Sweden, p 258.
- [5] Kern P, 2016– Computational Intelligence Techniques for Control and Optimization of Wastewater Treatment Plants. Maynooth University, Ireland, p 179.

- [6] Henze M, Brdjanovic D, 2019– Biological Wastewater Treatment Principles, Modelling and Design. IWA Publishing, London, p 615.
- [7] Gemechu W, 2010– The Design of Automated Control System for Wastewater Treatment Plant. Universiti Teknologi Petronas, Tronoh, Perak, p 64.
- [8] Rieger L, 2012 – Myths About Ammonia Feedforward Aeration Control. Proceedings of the Water Environment Federation, USA, p20.
- [9] Robert P, Tomasz U, 2020 –Designing Control Strategies of Aeration System in Biological WWTP. Energies, Switzerland, p170.
- [10] Victoria R, Travis S, 2020–Impact of Ammonia-Based Aeration Control (ABAC) on Energy Consumption. Applied Sciences, Switzerland, p178.

تحسين نظام التهوية في محطات معالجة مياه الصرف الصحي باستخدام نظام التحكم المتعاقب
بالأمونيوم
