مقارنة أداء نزع النترات غيري التغذية التقليدية و نزع النترات ذاتية التغذية الغير تقليدية في الإزالة الثالثية للنترات من مياه الصرف الصحي

اعداد : د.نبراس حمدان

الملخص :

يهدف هذا البحث إلى تقييم أداء نظامين حيويين لنزع النترات من مياه الصرف الصحي المعالجة ثانوياً، هما النظام غيري التغذية المعتمد على مصدر كربون عضوي خارجي، ونظام نزع النترات ذاتي التغذية باستخدام مفاعل كلس/كبريت، وذلك تحت ظروف مخبرية مضبوطة باستخدام مياه تركيبية.

شملت الدراسة تحليل تأثير ثلاثة عوامل تشغيلية رئيسية هي: تركيز النترات الداخل، وزمن المكث الهيدروليكي، ودرجة الحرارة.

أظهرت النتائج أن النظام غيري التغذية حقق كفاءة إزالة مرتفعة عند التراكيز المنخفضة والمتوسطة للنترات، إلا أن أداؤه تراجع عند التراكيز المرتفعة نتيجة محدودية الكربون العضوي ، كما أظهر حساسية واضحة للتغيرات الحرارية ، وبالمقابل أظهر مفاعل كلس/كبريت استقراراً تشغيلياً أعلى عبر مختلف الظروف، إذ حافظ على كفاءة جيدة حتى عند التراكيز المرتفعة للنترات، وبين قدرة أكبر على تحمل الانخفاض الحراري بفضل طبيعة البكتريا ذاتية التغذية ودور الحجر الكلسي في ضبط الحموضة. كما أظهرت النتائج أن زيادة زمن المكث حسنت أداء النظامين، إلا أن الاستجابة كانت أسرع في النظام غيري التغذية بينما احتاج النظام ذاتي التغذية إلى زمن أطول نسبياً للوصول إلى أعلى كفاءة.

من الناحية البيئية والتشغيلية تميز النظام غيري التغذية بارتفاع إنتاج الحمأة وحاجته المستمرة لمصدر كربون خارجي ومراقبة دقيقة للظروف اللاهوائية، بالمقابل تميز مفاعل كلس/كبريت بانخفاض إنتاج الحمأة واستقرار الوسط الحيوي، وغياب الحاجة لإضافة كربون خارجي، وتشير النتائج إلى أن مفاعل الكلس/ كبريت يمثل خياراً أكثر استدامة وملاءمة للمعالجة الثالثية للنترات، خاصة في المياه منخفضة المحتوى الكربوني أو الظروف التشغيلية المتقلبة. وتوفر هذه الدراسة أساساً عملياً يساعد في اختيار تقنية نزع النترات الأنسب وفقاً لظروف التشغيل المحلية واحتياجات محطات المعالجة.

كلمات مفتاحية: النترات، بكتريا ذاتية التغذية، بكتريا غيرية التغذية، مياه الصرف

Comparative Evaluation of Conventional Heterotrophic and Non-Conventional Autotrophic Denitrification for Tretiary Nitrate removal from Wastewater

Abstract:

This study evaluates the performance of two biological systems for tertiary nitrate removal from secondary-treated wastewater : a conventional heterotrophic denitrification reactor requiring an external organic carbon source, and a non-conventional sulfur-limestone autotrophic denitrification reactor. Laboratory experiments were conducted using synthetic wastewater under controlled conditions to examine the effects of three operational parameters: influent nitrate concentration, hydraulic retention time (HRT), and temperature.

The heterotrophic system achieved high removal efficiency at low and moderate nitrate loads, however, its performance declined at higher concentration due to carbon limitation and increased sensitivity to temperature fluctuation. In contrast, the sulfur-limestone reactor exhibited greater operational stability across all tested conditions, maintaining effective nitrate removal even at elevated influent concentrations and lower temperatures, owing to the characteristics of sulfur-oxidizing autotrophic bacteria and the buffering capacity of limestone.

Increasing the HRT improved the performance of both systems, although the heterotrophic reactor responded more rapidly while the autotrophic system required a longer retention time to reach optimal efficiency. From an

environmental and operational perspective, the heterotrophic system produced more sludge and required continuous carbon dosing and strict anaerobic control, whereas the sulfur–limestone reactor generated significantly less sludge, maintained a stable biological environment, and did not require external carbon addition.

Overall, the comparative analysis indicates that the sulfur–limestone autotrophic system represents a more stable and sustainable option for tertiary nitrate removal, particularly in low-carbon wastewater or under variable operational conditions. These findings provide a practical basis for selecting the most appropriate denitrification technology according to local treatment requirements.

Keywords: nitrates, heterotrophic Bacteria, Autotrophic Bacteria, Wastewater.

1. المقدمة :

أصبحت إزالة النترات من مياه الصرف الصحي المعالجة ثانوياً ضرورة بيئية وصحية ملحة نظراً لما تسببه التراكيز المرتفعة من النترات من مشكلات خطيرة مثل الإثراء الغذائي للمسطحات المائية (Eutrophication) ، تدهور جودة المياه الجوفية، والمخاطر الصحية المرتبطة باستخدام هذه المياه لأغراض الشرب أو الري [1]، وبسبب التحول الواسع في تطبيق المعالجة الثانوية في محطات المعالجة، غالباً ماتبقى النترات بتراكيز مرتفعة في المياه الخارجة مما يستدعى اعتماد تقنيات معالجة ثالثية فعالة.

تعد عملية نزع النترات غيرية التغذية (Heterotrophic Denitrification) من أكثر الطرق التقليدية شيوعاً في المعالجة الثالثية حيث تعتمد على استخدام بكتريا غيرية التغذية وتقوم باختزال النترات إلى غاز النتروجين بوجود مصدر كربون عضوي خارجي[2] مثل الميتانول أو أستيات الصوديوم وعلى الرغم من كفاءتها العالية إلا أن هذه الطريقة تعاني من عدة تحديات تشغيلية وبيئية أبرزها الحاجة المستمرة لإضافة مصادر كربون عضوية، زيادة إنتاج الحمأة الحيوية، الحساسية العالية للتغيرات الحرارية والتشغيلية، وارتفاع الكلفة التشغيلية على المدى الطويل[3].

في المقابل برزت في السنوات الأخيرة تقنيات غير تقليدية تعتمد على نزع النترات ذاتي التغذية (Denitrification Autotrophic) مثل المعالجة بمفاعل كلس/ كبريت والتي تستخدم بكتريا قادرة على استهلاك مركبات لاعضوية مثل الكبريت كمصدر للإلكترونات[4]، مع الاستفادة من الحجر الكلسي كمصدر للكربون اللاعضوي وكعامل منظم لقيم الـ pH

وتتميز هذه التقنيات بانخفاض إنتاج الحمأة وعدم الحاجة لإضافة مصادر كربون عضوية، واستقرار تشغيلي أفضل[4]، مما يجعلها خياراً واعداً للمعالجة الثالثية خاصة في مياه الصرف منخفضة المحتوى الكربوني.

ورغم توفر العديد من الدراسات التي تناولت كل من النظامين بشكل منفصل إلا أن الدراسات المقارنة المباشرة بين نزع النترات غيري التغذية (التقليدية) ونزع النترات ذاتي التغذية باستخدام مفاعل كلس/كبريت (غير تقليدي) لاتزال محدودة، خاصة فيما يتعلق بتقييم تأثير العوامل التشغيلية الأساسية تحت نفس ظروف التشغيل.

ومن هنا تنبع أهمية هذه الدراسة التي تهدف إلى إجراء مقارنة منهجية بين النظامين من خلال دراسة تأثير تركيز النترات الداخل، درجة الحرارة، وزمن المكث الهيدروليكي على كفاءة إزالة النترات والاستقرار التشغيلي لكل النظام.

2.هدف البحث:

يهدف البحث إلى إجراء تقييم مقارن بين نزع النترات غيري التغذية (**الطريقة التقليدية**) ونزع النترات ذاتي التغذية باستخدام مفاعل كلس/كبريت (**الطريقة غير تقليدية**)كمعالجة ثالثية لمياه الصرف الصحي المعالجة ثانوياً، وذلك تحت نفس ظروف التشغيل ويمكن تلخيص أهداف البحث بمايلي:

1. دراسة تأثير تركيز النترات الداخل على كفاءة إزالة النترات في كلا النظامين.
2. تقييم أثر درجة الحرارة على أداء واستقرار نزع النترات غيري التغذية وذاتي التغذية.
3. دراسة تأثير زمن المكث الهيدروليكي (HRT) على كفاءة إزالة النترات لكلا النظامين.

إجراء مقارنة شاملة بين النظامين من حيث الكفاءة و الاستقرار التشغيلي و الأثر البيئي وبالتالي تحديد النظام الأنسب للتطبيق العملي في محطات معالجة مياه الصرف، خاصة في الظروف المحلية ذات المحتوى الكربوني المنخفض.

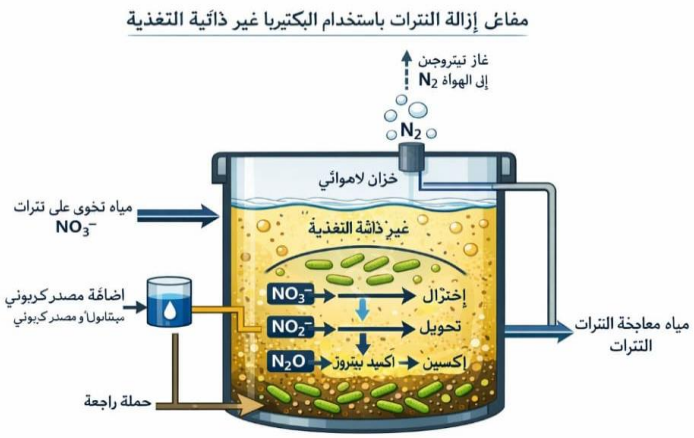
3. المواد وطرائق الدراسة:

تم تصميم الدراسة على أساس مقارنة مباشرة بين نظامين للمعالجة الثالثية لإزالة النترات، هما نظام نزع النترات غيري التغذية ونظام نزع النترات ذاتي التغذية باستخدام مفاعل كلس/كبريت، تم تشغيل النظامين تحت نفس المتغيرات التشغيلية لضمان صحة المقارنة مع تثبيت باقي العوامل الغير مدروسة.

3.1 مفاعل نزع النترات غيري التغذية:

تم استخدام مفاعل حيوي مخبري لنزع النترات غيري التغذية يعمل في ظروف لاهوائية الموضح بالشكل()، يتألف المفاعل من عمود زجاجي أسطواني الشكل يعمل بالجريان العمودي ومجهز بنظام تغذية مستمرة، ولتأمين مجتمع ميكروبي غني بالبكتريا غيرية التغذية تم استخدام حمأة منشطة مأخوذة من محطة معالجة صرف صحي ثم إخضاعها لمرحلة تكييف تدريجية على النترات ومصدر الكربون العضوي (أسيتات الصوديوم) لضمان سيادة البكتريا غيرية التغذية وتم الحفاظ على ظروف لاهوائية صارمة من خلال إبقاء تركيز الأوكسجين المذاب أقل من 0.2 mg/l وضبط الـ pH

ضمن المجال 8–7إضافة إلى تثبيت نسبة C/N بين 6–4 وهي شروط موثقة في الدراسات لضمان نمو مجتمع



ميكروبي فعال في نزع النترات[5]

مفاعل إزالة النترات باستخدام البكتريا غيرية التغذية

وتم العمل على مراحل:

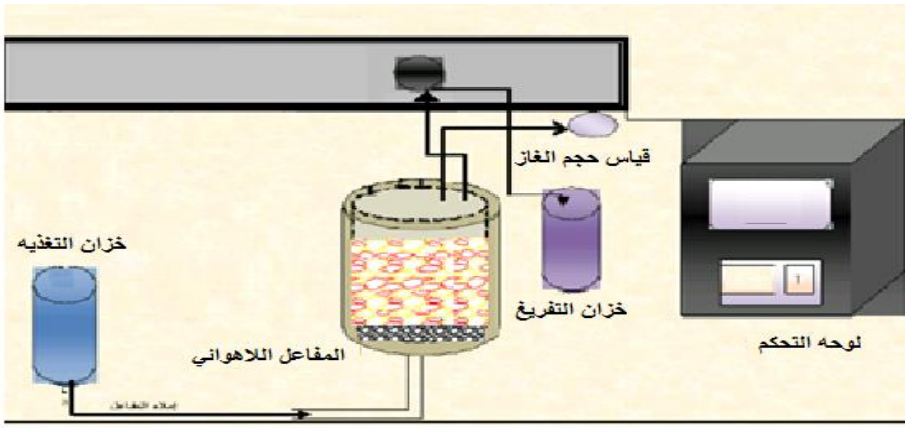
1. التحكم بتركيز النترات الداخل مع تثبيت (درجة الحرارة– زمن المكث)
2. التحكم بدرجة الحرارة مع تثبيت (زمن المكث – تركيز النترات الداخل)
3. التحكم بزمن المكث مع تثبيت (تركيز النترات الداخل– درجة الحرارة)

إضافة إلى مراقبة إنتاج الحمأة الحيوية لتقييم الاستقرار التشغيلي والأثر البيئي لعملية المعالجة.

3.2 مفاعل نزع النترات ذاتي التغذية (كلس/ كبريت):

تم استخدام مفاعل لاهوائي مخبري لنزع النترات ذاتي التغذية الموضح بالشكل()، يتألف من عمود أسطواني زجاجي يعمل بالجريان من الأسفل إلى الأعلى لتفادي انسداد الوسط الحشوي، تم حشو المفاعل بطبقة دعم من الحصى تعلوها طبقة من مزيج الكبريت والحجر الكلسي بنسبة حجمية ثابتة1:1 وهي نسبة موثقة في الأدبيات الحديثة[6] حيث أظهرت

هذه النسبة توفر توازناً مناسباً بين توفر الإلكترونات من الكبريت وقدرة الحجر الكلسي على ضبط الحموضة مما يضمن استقرار الوسط الحيوي وكفاءة إزالة مرتفعة .



مفاعل إزالة النترات باستخدام البكتريا ذاتية التغذية

يتم إزالة النترات بتحويلها إلى غاز النتروجين وفق المعادلة التالية

$$1.06NO3^{-} + 1.11S + 0.3CO2 + 0.78H2O \rightarrow 0.5N2 + 1.11SO4^{-2} + 1.16H^{+} + 0.06C5H7O2N \quad (1)$$

حيث يتحول النترات إلى غاز النتروجين وبذلك يتم التخفيض للنترات بيولوجياً

ومن معاينة المعادلة السابقة نجد زيادة في الكبريتات، وزيادة في شوارد الهيدروجين أي زيادة حموضة الوسط ولكي تستمر البكتريا في عملها يتم إضافة الحجر الكلسي($CaCO3$) والذي يعدل الوسط من جهة ويخفض الحموضة، ويعتبر مصدراً للكربون اللاعضوي للبكتريا ذاتية التغذية من جهة أخرى وفق المعادلة التالية[7]:

$$CaCO_3 + H^{+} \rightarrow Ca^{+2} + HCO^{-3} \quad (2)$$

ولتأمين مجتمع ميكروبي غني بالبكتريا ذاتية التغذية تم الحفاظ على ظروف ناقصة الأوكسجين تماماً بحيث يكون DO قريباً من الصفر وتم إخضاع المفاعل لمرحلة تكييف تدريجية على النترات لضمان سيادة البكتريا الكبريتيه القادرة على أكسدة الكبريت واختزال النترات وتم ضبط درجة الحموضة بين 7-8 [8-9]

وبغرض المقارنة الصحيحة تم العمل على نفس المراحل للمفاعل غيري التغذية وذلك كما يلي:

1. التحكم بتركيز النترات الداخل مع تثبيت (درجة الحرارة– زمن المكث)
2. التحكم بدرجة الحرارة مع تثبيت (زمن المكث – تركيز النترات الداخل)
3. التحكم بزمن المكث مع تثبيت (تركيز النترات الداخل– درجة الحرارة)

كما تمت مراقبة تركيز الكبريتات الناتجة لتقييم الاستقرار التشغيلي والأثر البيئي لعملية المعالجة.

3.3 **المياه التركيبية:**

تم استخدام مياه تركيبية بتراكيز وفق الجدول(1) وذلك بحسب ماورد في الدراسة [10]

الجدول(1) يوضح تركيب المياه المستخدمة في الدراسة

اسم المركب	$Na_2S_2O_3.5H_2O$	KH_2PO_4	KNO_3	$NAHCO_3$	NH_4CL	$MgCL_2.6H_2O$
التركيز mg/l	500	4.4	86	100	3.92	0.03

تم استخدام مياه تركيبية لمحاكاة خصائص مياه الصرف الصحي المعالجة ثانوياً، وذلك بهدف توفير وسط تجريبي ثابت يمكن التحكم فيه بدقة، من حيث تركيز النترات والعناصر المغذية، لضمان ثبات الظروف التشغيلية خلال مراحل الدراسة، ويعد استخدام المياه التركيبية خطوة شائعة في الدراسات المخبرية الخاصة بنزع النترات لأنها تقلل من التباين الكبير الموجود في مياه الصرف الحقيقية، وتسمح بتقييم تأثير المتغيرات التشغيلية بشكل معزول وموثوق، كما أن تركيب المياه المستخدمة في هذه الدراسة يتوافق مع ما ورد في الأدبيات الحديثة، التي تعتمد مزيجاً من الأملاح الأساسية لضمان نمو مجتمع ميكروبي مستقر قبل الإنتقال إلى مياه الصرف الحقيقية [11–12]

4.النتائج والمناقشة:

4.1 تأثير تركيز النترات الداخل:

باعتبار درجة الحرارة C°25 وزمن المكث hr6

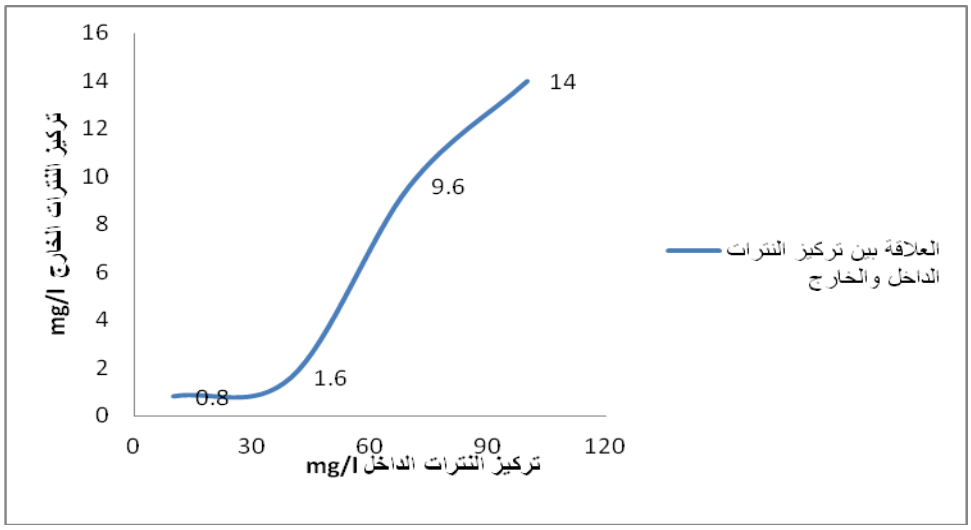
4.1.1 نزع النترات غيري التغذية:

من أجل تراكيز داخلة mg/l(10−40−70−100) تم قياس تراكيز النترات الخارج بعد المعالجة ومن ثم حساب كفاءة المعالجة عند كل تركيز فكانت النتائج كما في الجدول(2):

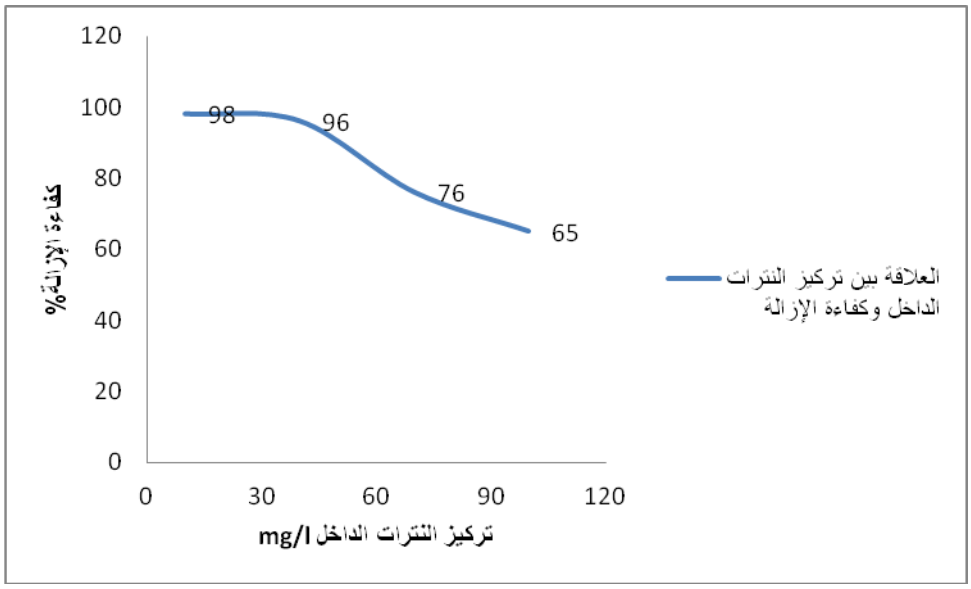
الجدول(2): تأثير التركيز الداخل على كفاءة المعالجة% بالطريقة التقليدية

تركيز النترات الداخل mg/l	10	40	70	100
تركيز النترات الخارج mg/l	0.8	1.6	9.6	14
كفاءة المعالجة %	98	96	76	65

والتمثيل البياني للجدول السابق تجلى بالشكلين (1)،(2) التاليين:



الشكل(1) : العلاقة بين تركيز النترات الداخل وتركيز النترات الخارج بالمعالجة التقليدية



الشكل(2): العلاقة بين تركيز النترات الداخل وكفاءة المعالجة% بالطريقة التقليدية

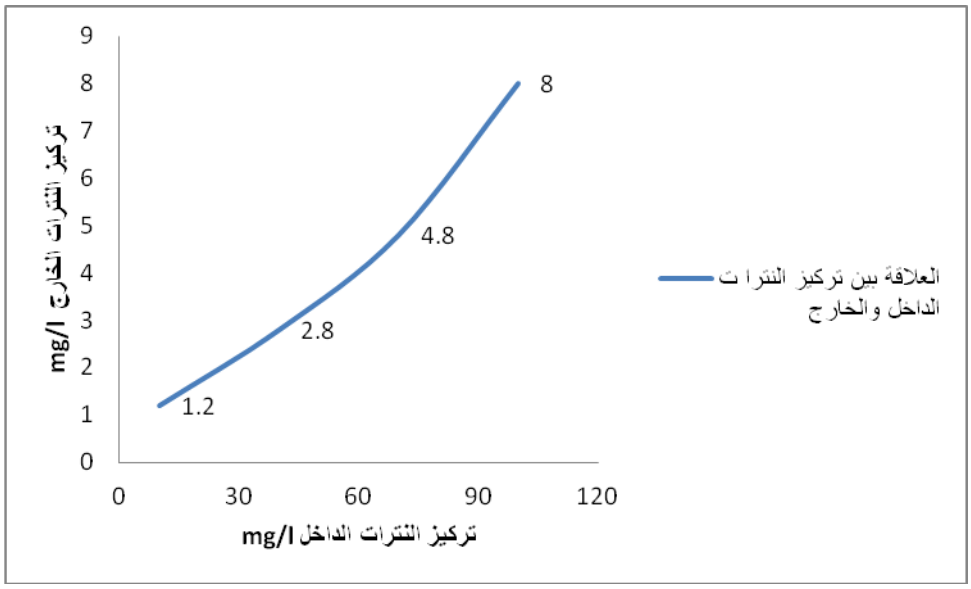
4.1.2 نزع النترات ذاتي التغذية:

من أجل تراكيز داخلة mg/l(10–40–70–100) تم قياس تركيز النترات الخارج بعد المعالجة ومن ثم حساب كفاءة المعالجة عند كل تركيز فكانت النتائج المدونة في الجدول(3):

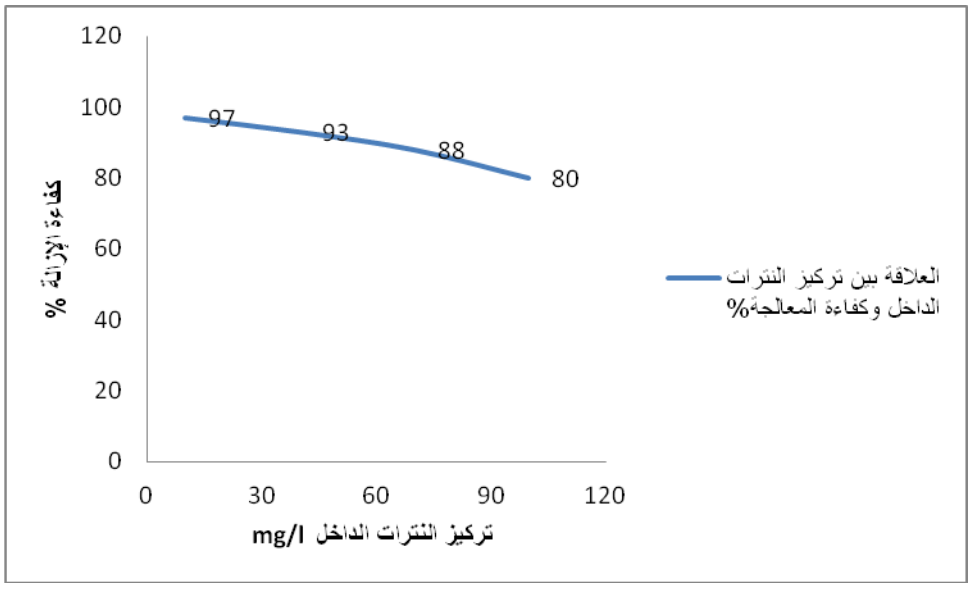
الجدول(3): تأثير تركيز النترات الداخلة على كفاءة المعالجة% بالطريقة الغير تقليدية

تركيز النترات الداخل mg/l	10	40	70	100
تركيز النترات الخارج mg/l	1.2	2.8	4.8	8
كفاءة المعالجة %	97	93	88	80

والتمثيل البياني للجدول السابق تجلى بالشكلين (3)،(4) التاليين:



الشكل(3) : العلاقة بين تركيز النترات الداخل وتركيز النترات الخارج بالمعالجة الغير تقليدية



الشكل(4): العلاقة بين تركيز النترات الداخل وكفاءة المعالجة% بالطريقة الغير تقليدية

4.1.3 مقارنة وتحليل:

تظهر النتائج أن نزع النترات غيرية التغذية و ذاتية التغذية يحقق كفاءة مرتفعة، عند التراكيز المنخفضة والمتوسطة، إلا أن انخفاض الكفاءة لنزع النترات غيري التغذية عند التركيز 100 mg/l يعود إلى عدم كفاية نسبة C/N وازدياد النواتج الوسيطة [5]، وهو سلوك لم يلاحظ في المفاعل كلس/ كبريت حيث أظهر تطوراً أفضل في الكفاءة عند التراكيز المرتفعة نسبياً لأن البكتريا ذاتية التغذية تعتمد على الكبريت كمصدر للإلكترونات ولاتتأثر بنقص الكربون العضوي، إضافة إلى دور الحجر الكلسي في ضبط الحموضة واستقرار الوسط الحيوي و عدم الحاجة لمصدر كربون عضوي، وهذا مايجعله أكثر ملائمة للتعامل مع التغيرات المفاجئة في نوعية المياه الداخلة [8]

4.2 تأثير درجة الحرارة:

باعتبار التركيز الداخل للنترات 40 mg/l وزمن المكث 6 hr

4.2.1 نزع النترات غيري التغذية:

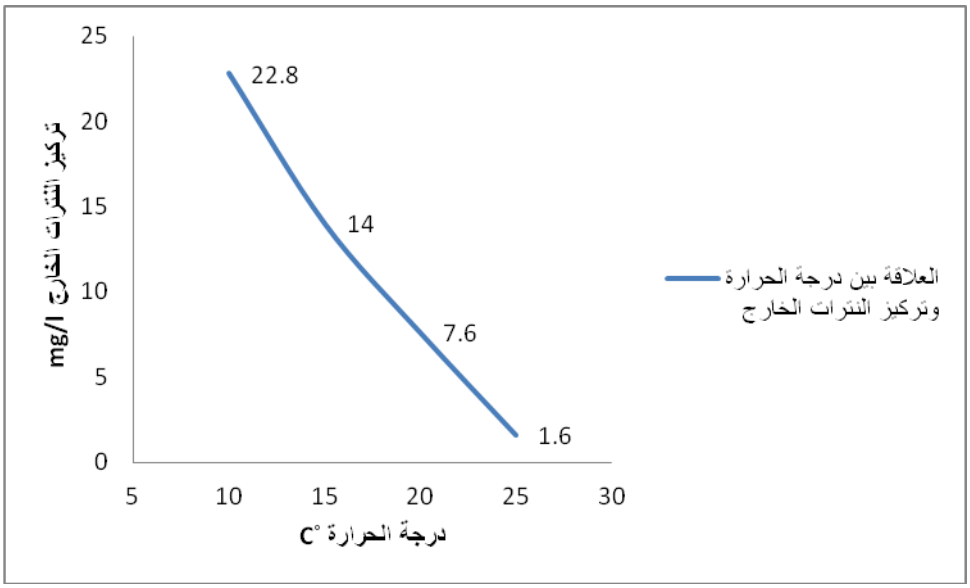
تم الاختبار على درجات الحرارة التالية (25-20-15-10)C°

وتم قياس تركيز النترات الخارج بعد المعالجة وكفاءة المعالجة عند كل درجة حرارة فكانت النتائج المدونة في الجدول(4):

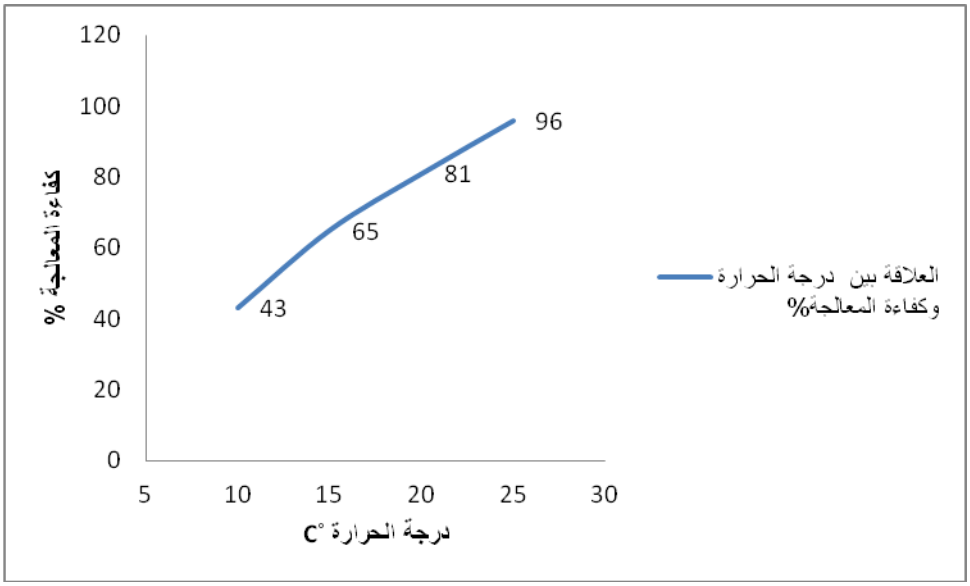
الجدول(4): تأثير درجة الحرارة على كفاءة المعالجة% بالطريقة التقليدية

درجة الحرارة C°	25	20	15	10
تركيز النترات الخارج mg/l	1.6	7.6	14	22.8
كفاءة المعالجة %	96	81	65	43

والتمثيل البياني للجدول السابق تجلى بالشكلين (5)،(6) التاليين:



الشكل(5): العلاقة بين درجة الحرارة وتركيز النترات الخارج بالطريقة التقليدية



الشكل(6): العلاقة بين درجة الحرارة وكفاءة المعالجة% بالطريقة التقليدية

4.2.2 نزع النترات ذاتي التغذية:

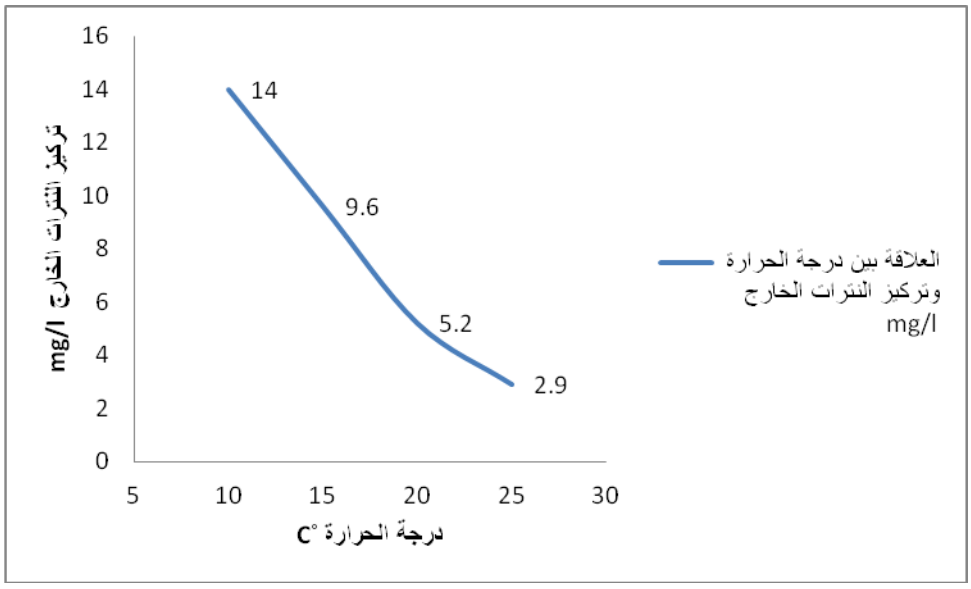
تم الاختبار على درجات الحرارة التالية C° (25-20-15-10)

وتم قياس تركيز النترات الخارج بعد المعالجة وكفاءة المعالجة عند كل درجة حرارة فكانت النتائج المدونة في الجدول (5):

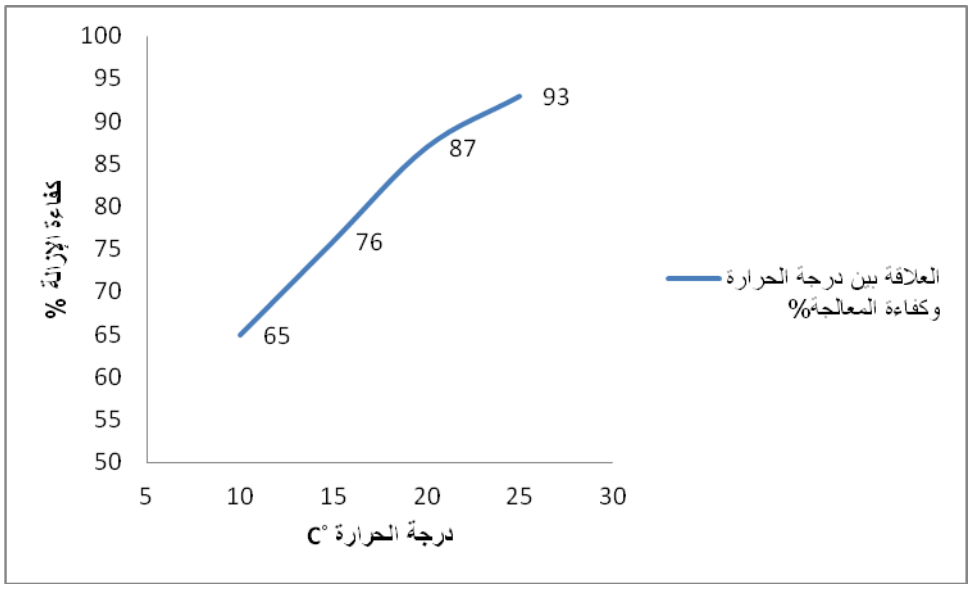
الجدول(5) تأثير درجة الحرارة على كفاءة المعالجة بالطريقة الغير تقليدية

درجة الحرارة C°	25	20	15	10
تركيز النترات الخارج mg/l	2.9	5.2	9.6	14
كفاءة المعالجة %	93	87	76	65

والتمثيل البياني للجدول السابق تجلى بالشكلين (7)،(8) التاليين:



الشكل (7) العلاقة بين درجة الحرارة وتركيز النترات الخارج بالطريقة الغير تقليدية



الشكل(8) العلاقة بين درجة الحرارة وكفاءة المعالجة % بالطريقة الغير تقليدية

4.2.3 مقارنة وتحليل:

تؤكد النتائج الحساسية العالية للبكتريا غيرية التغذية تجاه درجة الحرارة، حيث ينخفض النشاط الميكروبي بشكل ملحوظ عند درجات الحرارة المنخفضة وهذا يؤدي إلى بطء معدل اختزال النترات [13]، ولوحظ أن المفاعل

كلس/كبريت أظهر استقراراً أعلى لأن البكتريا ذاتية التغذية الكبريتيه تمتلك قدرة أفضل على العمل ضمن مجال حراري أوسع وأن وجود الحجر الكلسي يساهم في الحفاظ على ثبات الوسط وتقليل تأثير التغيرات الحرارية على نشاط البكتريا [14] وبالتالي يتميز باستقرار تشغيلي أفضل مما يعزز إمكانية تطبيقه في الظروف المناخية المحلية الأكثر برودة.

4.3 تأثير زمن المكث:

باعتبار تركيز النترات الداخل = 40mg/l، درجة الحرارة 25 C°

4.3.1 نزع النترات غيري التغذية :

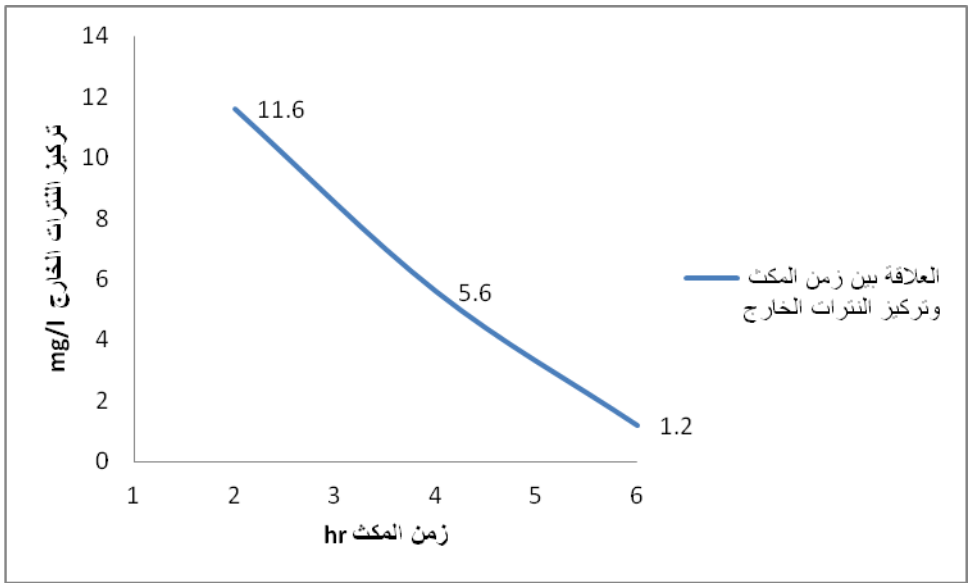
تم الاختبار على الأزمنة التالية hr (2-4-6)

وتم قياس تركيز النترات الخارج عند كل زمن وحساب كفاءة المعالجة % فكان النتائج المدونة بالجدول(6):

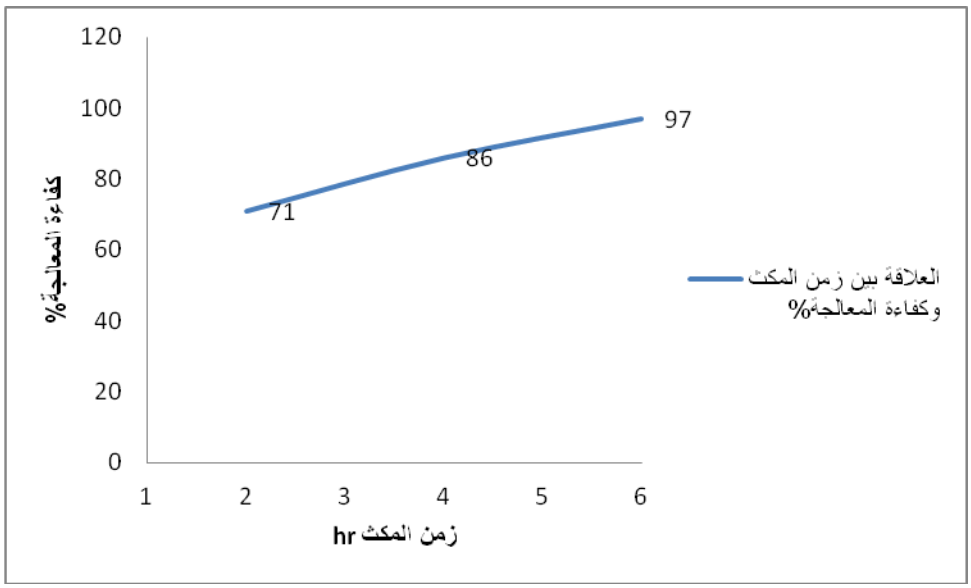
الجدول(6): تأثير زمن المكث على كفاءة المعالجة% بالطريقة التقليدية

زمن المكث hr	2	4	6
تركيز النترات الخارج mg/l	11.6	5.6	1.2
كفاءة المعالجة%	71	86	97

والتمثيل البياني للجدول السابق تجلى بالشكلين (9)،(10) التاليين:



الشكل(9): العلاقة بين زمن المكث وتركيز النترات الخارج بالطريقة التقليدية



الشكل(10): العلاقة بين زمن المكث وكفاءة المعالجة% بالطريقة التقليدية

4.3.2 نزع النترات ذاتي التغذية:

تم الاختبار على الأزمنة التالية hr (2-4-6-8)

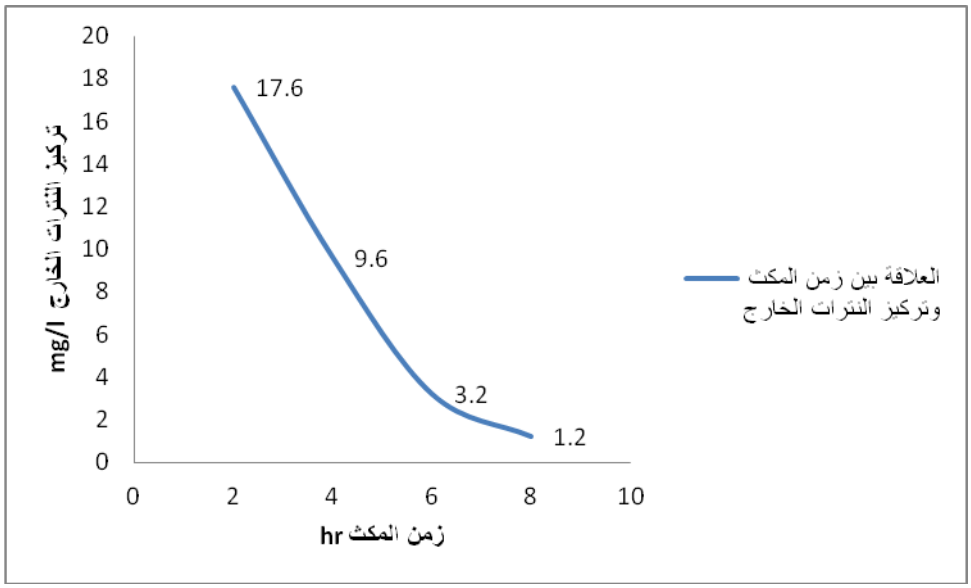
تمت إضافة تجربة إضافية عند زمن مكث 8 ساعات بهدف تقييم أداء النظامين عند زمن أطول والتحقق من إمكانية تحقيق تحسن إضافي في كفاءة الإزالة.

وتم قياس تركيز النترات الخارج عند كل زمن وحساب كفاءة المعالجة % فكانت النتائج المدونة بالجدول(7):

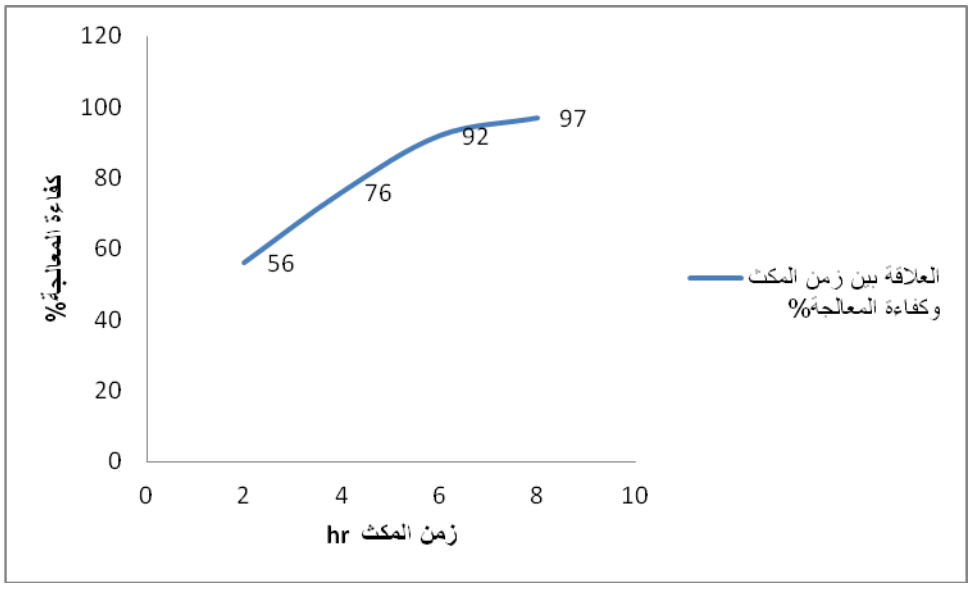
الجدول(7): تأثير زمن المكث على كفاءة المعالجة% بالطريقة الغير تقليدية

زمن المكث hr	2	4	6	8
تركيز النترات الخارج mg/l	17.6	9.6	3.2	1.2
كفاءة المعالجة%	56	76	92	97

والتمثيل البياني للجدول السابق تجلى بالشكلين (11)،(12) التاليين:



الشكل (11):العلاقة بين زمن المكث وتركيز النترات الخارج بالطريقة الغير التقليدية



الشكل(12) العلاقة بين زمن المكث وكفاءة المعالجة% بالطريقة الغير تقليدية

4.3.3 مقارنة وتحليل:

يمكن تفسير تحسن كفاءة نزع النترات في كلا النظامين مع زيادة زمن المكث بأن إطالة زمن بقاء المياه داخل المفاعل تمنح البكتريا وقتاً أطول لإتمام عملية الاختزال، مما يقلل من تراكم النواتج الوسيطة ويزيد من معدل التحويل النهائي للنترات. إلا أن النظام غيري التغذية يستجيب بسرعة أكبر لزيادة زمن المكث بسبب اعتماده على مسارات أيضيه سريعة عند توفر الكربون العضوي[15]، في حين يحتاج النظام ذاتي التغذية إلى زمن أطول نسبياً نظراً لبطء معدل الأكسدة الكبريتيه مقارنة بالمسارات غيرية التغذية. ومع ذلك يبقى النظام ذاتي التغذية أكثر استقراراً على المدى الطويل نتيجة ثبات مصدر الإلكترونات وعدم الحاجة لإضافة كربون خارجي [16]

4.4 الاعتبارات البيئية والتشغيلية:

4.4.1 المفاعل غيري التغذية:

يعد إنتاج الحمأة الحيوية أحد أبرز التحديات التشغيلية في نظام نزع النترات غيري التغذية، إذ يؤدي الاعتماد على مصادر الكربون العضوي الخارجية إلى زيادة النمو الميكروبي وبالتالي ارتفاع كمية الحماة المتولدة فحسب الدراسة [17] يتراوح إنتاج الحمأة بين $gr_{vss}/gr(0.6-0.4)$ ممايستلزم عمليات معالجة إضافية ورفع الكلفة التشغيلية. كما

أن هذا النظام حساس لتقلبات نسبة C/N حيث يؤدي أي نقص في الكربون العضوي إلى انخفاض في كفاءة الإزالة، بينما يؤدي الفائض إلى زيادة الحمل العضوي غير المرغوب [5].

إضافة إلى ذلك يتطلب النظام مراقبة دقيقة لمستويات الأوكسجين المذاب ودرجة الحموضة لضمان بقاء الظروف لاهوائية مناسبة لنشاط البكتريا غيرية التغذية مما يزيد من متطلبات التشغيل اليومية [13]

4.4.2 المفاعل ذاتي التغذية:

يتميز نظام نزع النترات ذاتي التغذية باستخدام مفاعل كلس/كبريت بانخفاض كبير في إنتاج الحمأة الحيوية مقارنة بالنظام غيري التغذية فحسب الدراسة[18] إذ يتراوح إنتاج الحمأة بين $gr_{vss}/gr(0.15-0.05)$ نظراً لاعتماد البكتريا ذاتية التغذية على مصادر غير عضوية للإلكترونات والكربون مما يقلل من النمو الميكروبي الزائد [9]، كما يساهم وجود الحجر الكلسي في ضبط الحموضة ومنع الانخفاض الحاد في الـ pH الناتج عن أكسدة الكبريت وهو مايحافظ على استقرار الوسط الحيوي ويحد من التقلبات التشغيلية، أما الزيادة في تركيز الكبريتات فهي متوقعة وفق آلية التفاعل، لكنها تبقى ضمن الحدود البيئية المسموح بها، خاصة مع قدرة الكلس على ترسيب جزء منها على شكل أملاح غير ذائبة مما يقلل من مخاطرها المحتملة [8]

4.5 مقارنة شاملة بين النظامين وتحديد الخيار الأنسب للتطبيق العملي:

تكشف النتائج التجريبية أن كلا النظامين قادران على تحقيق إزالة فعالة للنترات ضمن ظروف التشغيل المختلفة، إلا أن الفروقات في السلوك التشغيلي والأثر البيئي تجعل لكل منهما مجالاً تطبيقياً مميزاً. فقد أظهر نظام نزع النترات غيري التغذية كفاءة مرتفعة وسرعة في الإزالة عند التراكيز المنخفضة والمتوسطة إضافة إلى قدرته على الوصول إلى إزالة شبه كاملة بزمن مكث قصير نسبياً، غير أن هذا الأداء يبقى معتمداً بشكل مباشر على توفر مصدر كربون عضوي خارجي بنسبة C/N مناسبة، ما يجعله أكثر حساسية للتقلبات في نوعية المياه ودرجات الحرارة، فضلاً عن إرتفاع إنتاج الحمأة ومايرافقه من متطلبات تشغيلية وبيئية إضافية.

في المقابل أثبت نظام نزع النترات ذاتي التغذية باستخدام كلس /كبريت استقراراً تشغيلياً أعلى خاصة عند التراكيز المرتفعة للنترات أو في درجات الحرارة المنخفضة، حيث حافظ على كفاءة إزالة جيدة دون الحاجة لأي إضافات من الكربون العضوي. كما تميز بانخفاض كبير في إنتاج الحمأة واقتصر أثره البيئي على زيادة معتدلة في تركيز الكبريتات حيث بقيت ضمن الحدود المسموح بها، وهو مايعكس الاستدامة التشغيلية وملاءمته للظروف ذات المحتوى الكربوني المنخفض.

وبناءً على ذلك فإن المقارنة الشاملة تشير إلى أن النظام غيري التغذية مناسب في الحالات التي تتوفر فيها مصادر كربون عضوية وإمكانيات تشغيلية كافية، بينما يمثل النظام ذاتي التغذية باستخدام مفاعل كلس/كبريت الخيار الأكثر ملائمة للتطبيق العملي في محطات معالجة مياه الصرف خصوصاً في البيئات التي تتسم بانخفاض المحتوى الكربوني أو التغيرات المفاجئة في نوعية المياه، نظراً لاستقراره التشغيلي وأثره البيئي الأقل.

5.الاستنتاجات:

بناءً على النتائج التجريبية والتحليل المقارن بين نزع النترات غيري التغذية (الطريقة التقليدية) ونزع النترات ذاتي التغذية باستخدام مفاعل كلس/كبريت (الطريقة غير تقليدية) يمكن استخلاص الاستنتاجات التالية:

1. أظهرت نتائج الدراسة أن كلا نظامي نزع النترات غيري التغذية وذاتي التغذية باستخدام مفاعل كلس/كبريت قادران على تحقيق إزالة فعالة للنترات عند التراكيز المنخفضة والمتوسطة مما يؤكد إمكانية استخدامهما كمعالجة ثالثية لمياه الصرف الصحي المعالجة ثانوياً
2. عند التراكيز المرتفعة حتى 100 mg/l انخفضت كفاءة النظام غيري التغذية بشكل واضح نتيجة محدودية نسبة C/N وتراكم النواتج الوسيطة، في حين حافظ النظام ذاتي التغذية على كفاءة أعلى بفضل اعتماده على الكبريت كمصدر للإلكترونات وعدم حاجته لمصدر كربون عضوي خارجي
3. بينت النتائج أن زيادة زمن المكث الهيدروليكي أدت إلى تحسين كفاءة الإزالة في كلا النظامين، إلا أن النظام غيري التغذية حقق إزالة شبه كاملة بزمن مكث أقصر، مقابل متطلبات تشغيلية أعلى شملت الحاجة المستمرة لإضافة الكربون وارتفاع إنتاج الحمأة.
4. احتاج النظام ذاتي التغذية زمناً أطول للوصول إلى إزالة شبه كاملة لكنه تميز بانخفاض كبير في إنتاج الحمأة وبساطة أكبر في التشغيل، مما يجعله خياراً مناسباً في البيئات ذات الموارد التشغيلية المحدودة

5. أظهرت الدراسة أن النظام غيري التغذية أكثر حساسية لانخفاض درجات الحرارة، حيث تراجعت كفاءة الإزالة بشكل ملحوظ في الظروف الباردة، بينما احتفظ مفاعل كلس/كبريت بكفاءة مقبولة ضمن المجال المدروس، مما يعزز ملاءمته للمناخات الباردة.
6. من الناحية البيئية، اقتصر الأثر الجانبي للنظام ذاتي التغذية على إنتاج الكبريتات التي بقيت ضمن الحدود المسموح بها، في حين شكل تراكم الحمأة في النظام غيري التغذية تحدياً بيئياً وتشغيلياً يتطلب معالجة إضافية.
7. تشير النتائج الإجمالية إلى أن نظام نزع النترات ذاتي التغذية باستخدام مفاعل كلس/كبريت يمثل خياراً واعداً ومستداماً للمعالجة الثالثية، خاصة في مياه الصرف منخفضة المحتوى الكربوني أو في الظروف التشغيلية المتقلبة.
8. يبقى النظام غيري التغذية مناسباً في الحالات التي تتوفر فيها مصادر كربون عضوية وإمكانيات تشغيلية كافية، مع ضرورة مراعاة تحديات الحمأة والكلفة التشغيلية.
9. تؤكد هذه الدراسة أن اختيار تقنية نزع النترات الأنسب يجب أن يستند إلى تقييم متكامل للجوانب التشغيلية والبيئية والاقتصادية وليس إلى كفاءة الإزالة فقط بما يدعم اتخاذ القرار الهندسي السليم في محطات معالجة مياه الصرف الصحي.

6. **التوصيات:**

1. استخدام مفاعل كلس/كبريت في مياه الصرف منخفضة المحتوى الكربوني بسبب استقراره وقلة متطلباته التشغيلية.
2. اعتماد نزع النترات غيري التغذية عند توفر مصدر كربون عضوي مع ضرورة ضبط نسبة C/N
3. ينصح بزيادة زمن المكث في المفاعل ذاتي التغذية للوصول إلى أعلى كفاءة إزالة خاصة عند التراكيز المرتفعة.
4. ضرورة مراقبة إنتاج الحمأة في النظام غيري التغذية ووضع خطة لمعالجتها لتقليل الأثر البيئي.
5. متابعة تراكيز الكبريتات في مفاعل كلس/كبريت لضمان بقائها ضمن الحدود المسموح بها
6. إجراء اختبارات مستقبلية على مياه صرف حقيقية لتأكيد النتائج المخبرية وتقييم الأداء في ظروف تشغيلية أكثر تعقيداً.

6.المراجع:

1 Camargo, j.A., Alonso, A.(2006). Ecological and toxicological effects of ingoranic nitrogen pollution in aquatic ecosystems. Environment international.

2 Tchobanoglous, G., Burton, F., Stensel, H.(2003). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse

3 Rocca CD, Belgiorno V, Meric S.(2007).Heterotrophic / autotrophic denitrification (HAD) of drinking water :prospective use for permeable reactive barrier. Desalination. 2007;210(1-3):194-204

4 Zhang, T.C., Lampe, D.G.(1999). Sulfur-limestone autotrophic denitrification processes. Water Research.

5 Zhang, Y., Chen, L.,Zhao,H.(2020). Influence of C/N ratio on heterotrophic denitrification performance and microbial enrichment. Journal of Environmental.Chemical Engineering, 8(5), 104260

6 Oh, S. E., Silverstein, J.(2011). Sulfur-limestone autotrophic denitrification: Effect of S/L ratio and nitrate loading. Bioresource Technology, 102(3),2080-2087

7 Zheng Wang, et al.(2018) Comparison of heterotrophic and autotrophic denitrification processes for nitrate removal from phosphorus-limited surface water. Environmental pollution;238:562-572

8 Li, X.,Wang, S.,Zhou, Y.(2022). Enhanced autotrophic denitrification using sulfur-limestone reactors: Microbial enrichment, pH buffering, and sulfate generation. Bioresource Technology, 351,127054

9 Chen, Q., Li, X., Huang, J.(2023). Microbial community development and operational stability in sulfur-based autotrophic denitrification systems. Journal

of Environmental Management, 336,117658.

10 Ruihua LI, Yulin Yuan, Xinmin Zhan, Bo liu.(2014) Phosphorus removal in a sulfur-limestone autotrophic denitrification (SLAD) biofilter. Environmental Science and pollution Research;21:972-978

11 Zhao, Y., Chen. L., Wang, s.(2021). Synthetic wastewater as a controlled medium for evaluating denitrification performance under variable operational condition. Journal of Environmental Chemical Engineering, 9(4), 105684.

12 Li, X., Huang, J., Zhou, Y.(2023). Performance evaluation of sulfur-limestone autotrophic denitrification using synthetic wastewater with controlled nitrate loading. Bioresource Technology, 368,128268.

13 Wang, Y., Liu, S., Zhang, T.(2021). Operational challenges of heterophic denitrification: Effects of dissolved oxygen and carbon dosage on nitrate removal. Bioresource Technology, 320, 124350

14 Chen, Q., Li, X., Huang, J.(2023). Thermal and operational stability of sulfur-based autotrophic denitrification systems and the role of limestone buffering. Journal of Environmental Management, 336, 117658.

15 Huang, J., Wang, Y., Liu, S. (2020). Influence of hydraulic retention time on heterotrophic denitrification performance and microbial activity. Journal of Environmental Chemical Engineering, 8(6), 104564

16 Li, X., Chen, Q., Zhou, Y.(2021). Performance of sulfur-based autotrophic denitrification under varying hydraulic retention times: Implications for reactor stability. Bioresource Technology, 331, 125030

17 Zhang, T., Li, X., Wang, D.(2015). Performance and microbial characteristics of sulfur-based autotrophic denitrification. Journal of Environmental Sciences, 30,1-10

18 Oh, S. E., Silverstein, j.(2011). Sulfur-limestone autotrophic denitrification: Effect of S/L ratio and nitrate loading. Bioresource Technology, 102(3), 2030-2087