كلاريفكس

نظام ترشيح غشائي آلي مصمم لفصل الجسيمات الدقيقة عن السوائل بدقة عالية وتحكم ذكي في العمليات



د. بروبير داس
أستاذ باحث مشارك،
مركز التنمية المستدامة،
كلية الآداب والعلوم – جامعة قطر

في وقت أصبحت فيه الكفاءة الصناعية والاستدامة البيئية من الأولويات المُلحَّة، تزايد الطلب على تقنيات عالية الدقة وفعَّالة من حيث التكلفة. وعلى مدى عقود، اعتمدت الصناعات على أنظمة الترشيح الغشائي التقليدية، ولا سِيَّما الترشيح الدقيق والترشيح الفائق، لفصل الجسيمات العالقة أو الغروية عن السوائل. ورغم أهميتها في العديد من القطاعات، فإن هذه الأساليب لا تخلو من تحديات تشغيلية، أبرزها الاعتماد الكبير على التدخل البشري، وعدم انتظام جمع البيانات، وتكرار عمليات الصيانة التي تؤثر في استمرارية التشغيل.

ولمعالجة هذه التحديات، طوَّر فريق بحثي من مركز التنمية المستدامة بجامعة قطر حلاً آليًا يدمج بين تقنيات الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء وتقنيات الأغشية. وقد حصل الفريق البحثي، المكوَّن من الدكتور بروبير داس، وشعيب خان، ومريم محمد حسن العمادي، على براءة اختراع أمريكية مؤقتة بعنوان: «الفصل الآلي للجسيمات الغروية أو العالقة من السوائل بمساعدة الأغشية (US 63/733,369).

الابتكار: سد الفجوة في السوق

تكمن القيمة الابتكارية لهذا الاختراع في نقله أنظمة الترشيح من معدات تقليدية تُشغَّل يدويًا إلى منظومة ذكية ذاتية التنظيم. ففي الأنظمة التقليدية، تُعد إدارة وحدات الأغشية المتعددة لمعالجة كميات كبيرة من السوائل مهمة معقدة ومعرضة للأخطاء؛ إذ يتعين على المشغلين مراقبة النظام ميدانيًا، وسحب العينات يدويًا على فترات متباعدة، واتخاذ قرارات تنظيف الأغشية بناءً على التقدير الشخصي. ويقدم ابتكار فريق جامعة قطر تحولاً نوعيًا من خلال تطوير نظام مستقل بالكامل يتجاوز هذه التحديات، ويعتمد على بُنية برمجية متقدمة قائمة على لغة «بايثون» للتحكم في شبكة من أجهزة إنترنت الأشياء، تشمل المتحكمات الدقيقة (أجهزة أردوينو)، وحساسات التدفق عالية الدقة، والمضخات، والصمامات.

ويحوِّل هذا الابتكار عملية ميكانيكية تقليدية إلى منظومة تشغيل ذكية وقابلة للتكيف. إذ يستطيع النظام مراقبة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للسائل بصورة مستقلة، مثل درجة العكارة، والرقم الهيدروجيني (pH)، ودرجة الحرارة، كما يمكنه توظيف تقنيات الرؤية الحاسوبية لتقييم الخصائص الخلوية آنيًا. ومن خلال التحليل المستمر لهذه البيانات، يحدد النظام بدقة متى تبدأ عملية الترشيح، ومتى يجب إيقافها مؤقتًا لأغراض الصيانة، ومتى تكتمل العملية، مما يلغي الاعتماد على التخمين والتفاوت المرتبطين بالتدخل البشري، ويضمن نتائج دقيقة ومتسقة وقابلة للتكرار بدرجة عالية. وإضافة إلى ذلك، يرسل النظام تلقائيًا بريدًا إلكترونيًا يتضمن بيانات العملية إلى المستلمين المحددين فور الانتهاء منها.

الخصائص الرئيسة للنظام الآلي

طوَّر الفريق نموذجًا أوليًا على نطاق تجريبي يتكون من وحدتي ترشيح فائق كبيرتين، تبلغ مساحة كل منهما ٥٠ مترًا مربعًا. ويعمل هذا النموذج حاليًا عند مستوى جاهزية تقنية مرتفع (7-TRL 6)، مع قدرة تشغيلية تصل إلى معالجة 2000 لتر من مزارع الطحالب الدقيقة في الساعة (الشكل 1). ويتمتع النموذج الأولي بالخصائص التالية (جدول 1):



الشكل (1): النموذج الأولي التجريبي أثناء التشغيل في مرفق جامعة قطر التجريبي لعرض تقنيات الطحالب الدقيقة (QUADF).

الجدول (1): خصائص النموذج الأولي.

الخاصية الرئيسة	الوصف التقني	الميزة التشغيلية
التنظيف العكسي الذكي التلقائي	يراقب النظام باستمرار معدلات تدفق السائل النافذ عبر الأغشية. وعند انخفاض التدفق عن الحد المحدد نتيجة تراكم الترسبات على الغشاء، يوقف التشغيل تلقائيًا، ويُجري عملية تنظيف عكسي للوحدة المتأثرة، ثم يستأنف العمل.	يمنع تلف الأغشية غير القابل للإصلاح، ويطيل عمرها التشغيلي بصورة ملحوظة، ويلغي الحاجة إلى عمليات التنظيف اليدوية المسببة لتعطُّل التشغيل.
أخذ العينات المستمر وعن بُعد	يعتمد على مجموعة من الحساسات المدمجة لتقييم الخصائص المتغيرة للسائل بشكلٍ متواصل دون الحاجة إلى سحب عينات ماديًا.	يتيح تشغيل النظام في البيئات الخطرة أو النائية، مع ضمان اتخاذ القرارات استنادًا إلى بيانات آنية وعالية التواتر.
تحمل الأعطال وعزلها	صُمم النظام لاكتشاف أعطال وحدات الأغشية بصورة فردية؛ فعند تعطل إحدى الوحدات، يعزلها البرنامج تلقائيًا ويعيد توزيع الحمل التشغيلي على الوحدات السليمة.	يضمن استمرارية المعالجة ويمنع توقف النظام بالكامل، مما يعزز موثوقية التشغيل.
التسجيل الآلي للبيانات وواجهة المستخدم الرسومية	يوثق جميع أحداث التشغيل والضغوط ومعدلات التدفق، ويصدرها مباشرة إلى ملفات منظمة بصيغة Microsoft Excel، مع عرض المؤشرات التشغيلية لحظيًا عبر واجهة مستخدم رسومية (GUI).	يعالج مشكلة عدم اتساق البيانات بشكلٍ كامل، ويوفر لأصحاب المصلحة معلومات واضحة وقابلة للتوظيف في تحسين الأداء واتخاذ القرار.
إعداد التقارير والتنظيف في الموقع (CIP) تلقائيًا	عند انتهاء كل دورة تشغيل، يفعِّل النظام بروتوكول التنظيف في الموقع (Clean-In-Place) استعدادًا للدورة التالية، كما يرسل تلقائيًا تقريرًا شاملاً إلى المعنيين يتضمن ملخصًا لبيانات العملية.	يقلل بصورة كبيرة الزمن الفاصل بين الدورات التشغيلية، ويُبقي الإدارة على اطلاع مستمر بأقل جهد ممكن.

التطبيقات المحتملة عبر مختلف القطاعات الصناعية

يمثل نظام الترشيح المعتمد على الذكاء الاصطناعي نموذجًا لالتزام جامعة قطر بتطوير حلول عملية للتحديات الواقعية، ويفتح آفاقًا نحو مستقبل تصبح فيه العمليات الصناعية أكثر ذكاءً وكفاءة وربحية، وأكثر انسجامًا مع متطلبات الاستدامة في العالم المعاصر. ومن خلال ما يوفره من مراقبة عن بُعد، وتحكم عالي الدقة، وأخذ عينات مستمر، تتجاوز الإمكانات التجارية لهذا النظام تطبيقات تنقية المياه التقليدية، لتشمل طيفًا واسعًا من القطاعات ذات القيمة المضافة العالية (جدول 2):

الجدول (2): القطاعات الصناعية.

القطاع الصناعي	التطبيق المحدد	القيمة المضافة للقطاع
التقنية الحيوية والاستزراع المائي	حصاد الطحالب الدقيقة والبكتيريا وتركيزها، واسترجاع الإنزيمات الحساسة.	يحدُّ من التكاليف المرتفعة لحصاد الكتلة الحيوية للطحالب الدقيقة، مما يسرِّع تطوير الأعلاف المستدامة وغيرها من المنتجات واسعة النطاق.
الصناعات الدوائية	عزل الجسيمات في الأوساط السائلة وفصل المكونات الخلوية الدقيقة والحساسة.	يضمن مستويات النقاء والتجانس الصارمة المطلوبة في تطوير الأدوية، مع تقليل مخاطر التلوث بفضل التشغيل الآلي دون تدخل مباشر.
المعالجة الصناعية	استرجاع المواد العالقة ذات القيمة، مثل المحفزات الغروية، من المخاليط الكيميائية.	يسهم مباشرة في تحسين مردود العمليات الكيميائية، وتقليل النفايات الصناعية، وتعزيز مبادئ الاقتصاد الدائري في التصنيع.
مراقبة جودة المياه	أخذ عينات جودة المياه تلقائيًا وعن بُعد، وإزالة الشوائب العالقة بكفاءة من المسطحات المائية الطبيعية.	يدعم جهود حماية البيئة بصورة مستمرة، دون الحاجة إلى وجود فِرق عمل دائمة في المواقع النائية أو القاسية.
معالجة مياه الصرف الصحي	معالجة مياه الصرف الصناعية والبلدية بهدف التصريف الآمن أو استرداد الموارد.	يخفض بصورة ملحوظة استهلاك الطاقة والتكاليف التشغيلية المرتبطة بعمليات تنقية المياه واسعة النطاق.

الأثر المتوقع على الاقتصاد والاستدامة

يُتوقع أن يُحدث هذا الاختراع، المشمول ببراءة اختراع أمريكية مؤقتة، أثرًا اقتصاديًا ملموسًا يتماشى مع أهداف الاستدامة العالمية، ولا سِيَّما رؤية قطر الوطنية 2030. فمن شأنه تطوير معالجة مياه الصرف ودعم نمو صناعة الطحالب الدقيقة من خلال دمج إنتاج الكتلة الحيوية مع المعالجة الحيوية لمياه الصرف واسترداد المغذيات، بما يعزز الاقتصاد الدائري المستدام.

كما تمثل زراعة الطحالب الدقيقة وسيلة واعدة لاحتجاز الكربون، إذ يستهلك إنتاج كل كيلوغرام من الكتلة الحيوية للطحالب نحو 1.8 كيلوغرام من ثاني أكسيد الكربون (CO_2). وستتيح هذه التقنية حصاد الكتلة الحيوية بكفاءة أعلى وتكلفة أقل، مما يوسِّع استخدامات الطحالب الدقيقة، خاصةً أن عمليات الحصاد التقليدية تُعد من أبرز معوقات التوسع الصناعي وقد تُمثل ما يصل إلى 40% من تكاليف الإنتاج.