

الابتكار في البحث العلمي المدعوم بالذكاء الاصطناعي الوكيل الاتجاهات والتطبيقات والتحديات الناشئة

Agentic AI-Enabled Innovation in Scientific Research: Emerging Trends, Applications, and Challenges

الدكتورة: خلود محمد اللنجاري

عضو هيئة التدريس بكلية الشرطة - الإمارات العربية المتحدة

ملخص:

يتناول البحث الابتكار في البحث العلمي المدعوم بالذكاء الاصطناعي الوكيل، في ضوء الانتقال من استخدام الذكاء الاصطناعي بوصفه أداة مساعدة إلى أنظمة قادرة على التخطيط، واستخدام الأدوات، وتنفيذ مهام بحثية مترابطة بدرجات متفاوتة من الاستقلالية. ويهدف إلى تأصيل مفهوم الذكاء الاصطناعي الوكيل، وتحليل تطبيقاته في مراحل البحث العلمي، وبيان أبرز تحدياته المنهجية والعلمية والحوكمة. واعتمد البحث المنهج الوصفي التحليلي من خلال مراجعة الأدبيات العلمية الحديثة ذات الصلة وتحليل اتجاهاتها وتطبيقاتها. وأظهرت النتائج أن الذكاء الاصطناعي الوكيل يختلف عن الاستخدام التقليدي للذكاء الاصطناعي التوليدي بقدرته على إدارة مهام متعددة نحو هدف محدد، وأن تطبيقاته تمتد من توليد الأفكار والفرضيات إلى الاكتشاف والتحليل العلمي والتجريب المؤتمت والمختبرات ذاتية القيادة. كما تبين أن زيادة استقلالية هذه الأنظمة ترافقها تحديات تتعلق بدقة المخرجات، وانتقال الأخطاء بين مراحل التنفيذ، وقابلية التتبع والتحقق، والنزاهة العلمية، وتحديد المسؤولية. وخلص البحث إلى أن القيمة الحقيقية للذكاء الاصطناعي الوكيل لا تكمن في استبدال الباحث، بل في إعادة تنظيم سير العمل البحثي ضمن تكامل منضبط بين القدرات الوكيلية والحكم العلمي البشري. ويوصي البحث بالتحقق البشري من المراحل الجوهرية، وتوثيق استخدام الأنظمة الوكيلية، وتقييم العملية البحثية كاملة، وتحديد مستويات واضحة لتفويض المهام وفق طبيعتها ومخاطرها. كما يدعو إلى دراسات تقارن أداء الباحث والنظام الوكيل والعمل المشترك بينهما في مراحل البحث المختلفة. الكلمات المفتاحية: الذكاء الاصطناعي الوكيل؛ البحث العلمي؛ الابتكار البحثي؛ الأتمتة البحثية؛ التكامل البشري-الآلي.

Abstract

This study examines innovation in scientific research enabled by agentic artificial intelligence, reflecting the shift from using AI as a supporting tool to employing systems capable of planning, using tools, and executing interconnected research tasks with varying degrees of autonomy. It aims to establish the concept of agentic AI, analyze its applications across the research process, and identify its main methodological, scientific, and governance challenges. The study adopts a descriptive analytical approach through reviewing and analyzing recent relevant scientific literature. The findings show that agentic AI differs from conventional generative AI use through its capacity to manage multiple tasks toward a defined goal. Its applications extend from generating research ideas and hypotheses to scientific discovery, analysis, automated experimentation, and self-driving laboratories. The analysis also indicates that greater autonomy is accompanied by challenges related to output accuracy, error propagation across stages, traceability, verification, research integrity, and accountability. The study concludes that the principal value of agentic AI lies not in replacing researchers, but in reorganizing research workflows through disciplined integration between agentic capabilities and human scientific judgment. It recommends human verification of critical stages, transparent documentation, process-level evaluation, and clearly defined levels of task delegation according to risk and task characteristics.

Keywords: Agentic Artificial Intelligence; Scientific Research; Research Innovation; Research Automation; Human-AI Integration.

المقدمة:

شهد البحث العلمي خلال السنوات الأخيرة توسعاً متسارعاً في توظيف تطبيقات الذكاء الاصطناعي، وانتقل هذا التوظيف تدريجياً من أدوات مساعدة في البحث والكتابة والتحليل إلى أنظمة أكثر قدرة على تنفيذ مهام مترابطة داخل العملية البحثية. وفي هذا السياق برز الذكاء الاصطناعي الوكيل بوصفه اتجاهاً متقدماً يقوم على أنظمة تستطيع العمل نحو هدف محدد، والتخطيط، واستخدام الأدوات، وإدارة خطوات متتابعة بدرجات متفاوتة من الاستقلالية، مع إمكان التفاعل مع البيانات والبرمجيات والبيئات التجريبية.

وقد بدأت تطبيقات هذا النوع من الذكاء الاصطناعي تمتد إلى مراحل متعددة من البحث العلمي، تشمل توليد الأفكار والفرضيات، ومراجعة الأدبيات، والتحليل والمحاكاة، والاكتشاف العلمي، والتجريب المؤتمت، والمختبرات ذاتية القيادة. ويكشف هذا التطور عن إمكانات مهمة لإعادة تنظيم سير العمل البحثي وتسريع بعض مراحل، لكنه يثير في الوقت نفسه تحديات منهجية وعلمية تتعلق بدقة المخرجات، وقابلية التحقق والتكرار، وانتقال الأخطاء بين مراحل التنفيذ، وحدود الاعتماد على القرارات التي ينتجها النظام.

كما ترتبط هذه التطبيقات بقضايا النزاهة والحوكمة البحثية، ولا سيما الشفافية، وتحديد المسؤولية، وتوثيق استخدام الأنظمة الوكيلية، وحدود التفويض الممنوح لها. ومن ثم، لا يمكن تقييم قيمة الذكاء الاصطناعي الوكيل في البحث العلمي من خلال مستوى الاستقلالية أو سرعة الإنجاز وحدهما، بل من خلال قدرته على دعم إنتاج معرفة موثوقة وقابلة للفحص ضمن إشراف علمي بشري واضح. وانطلاقاً من ذلك، تسعى هذه الدراسة إلى تحليل مفهوم الذكاء الاصطناعي الوكيل، وتطبيقاته في البحث العلمي، وأبرز تحدياته الناشئة.

وتنبع أهمية هذا التحليل من الحاجة إلى فهم التحول الذي تحدثه الأنظمة الوكيلية في أدوار الباحث، وفي العلاقة بين التفكير العلمي والتنفيذ الآلي، وفي المعايير اللازمة للحفاظ على جودة العملية البحثية ومسؤوليتها العلمية المعاصرة.

أولاً - مشكلة البحث:

يشهد البحث العلمي انتقالاً متسارعاً من استخدام الذكاء الاصطناعي بوصفه أداة مساعدة إلى توظيف أنظمة وكيلية قادرة على التخطيط، واستخدام الأدوات، وتنفيذ مهام بحثية متعددة المراحل بدرجات متفاوتة من الاستقلالية. وقد امتدت تطبيقاتها إلى توليد الأفكار والفرضيات، ومراجعة الأدبيات، والتحليل والمحاكاة، والاكتشاف العلمي، والتجريب المؤتمت، في مقابل تحديات تتعلق بالدقة، وقابلية التحقق، والنزاهة العلمية، والحوكمة، وحدود الإشراف البشري. إلا أن الأدبيات المتاحة تتوزع بين دراسات تقنية وتطبيقات تخصصية وأبحاث للحوكمة والمخاطر، بما يترك حاجة إلى تحليل متكامل يحدد طبيعة الابتكار الذي يقدمه الذكاء الاصطناعي الوكيل للبحث العلمي، ومجالات تطبيقه، وحدوده وتحدياته الناشئة.

ثانياً - أهمية البحث:

يكتسب الذكاء الاصطناعي الوكيل أهمية متزايدة في البحث العلمي مع انتقال تطبيقات الذكاء الاصطناعي من المساندة المحدودة إلى أنظمة قادرة على تنفيذ مهام بحثية مترابطة بدرجات متفاوتة من الاستقلالية. وتستدعي هذه التحولات فهماً أدق لطبيعة هذه الأنظمة، وتطبيقاتها، وحدود استخدامها في الممارسة البحثية.

تحدد أهمية البحث في الآتي:

1. تأصيل مفهوم الذكاء الاصطناعي الوكيل والتمييز بينه وبين الوكلاء الذكيين ونماذج الذكاء الاصطناعي التوليدي، بما يدعم وضوحه المفاهيمي في الدراسات البحثية.

2. تحليل تطبيقاته في مراحل البحث العلمي، ولا سيما توليد الأفكار والفرضيات، ومراجعة الأدبيات، والتحليل والمحاكاة، والاكتشاف العلمي، والتجريب المؤتمت.
3. تحديد أوجه الابتكار التي يضيفها للبحث العلمي من حيث أتمتة المهام، وتسريع بعض مراحل الاكتشاف، وتوسيع إمكانات التكامل بين الباحث والأدوات الذكية.
4. تحليل التحديات المنهجية والعلمية والأخلاقية المرتبطة بالدقة، وقابلية التحقق، والنزاهة العلمية، والحوكمة، والإشراف البشري.
5. تقديم معالجة تحليلية متكاملة تربط بين المفهوم والتطبيقات والتحديات، بما يعزز وضوح المساهمة العلمية واتساقها مع مشكلة البحث ومنهجها.

ثالثاً - أهداف البحث:

في ضوء التطور المتسارع للذكاء الاصطناعي الوكيل وتزايد تطبيقاته في مراحل متعددة من البحث العلمي، تبرز الحاجة إلى تحديد طبيعته، وتحليل استخداماته، وفهم التحديات المرتبطة بتوظيفه في الممارسة البحثية. وانطلاقاً من ذلك، يسعى البحث إلى تحقيق الأهداف الآتية:

1. تأصيل مفهوم الذكاء الاصطناعي الوكيل وبيان خصائصه ونماذجه وعلاقته بالابتكار في البحث العلمي.
2. تحليل تطبيقات الذكاء الاصطناعي الوكيل في البحث العلمي في توليد الأفكار والفرضيات، والاكتشاف والتحليل العلمي، والتجريب والأتمتة البحثية.
3. تحليل تحديات توظيف الذكاء الاصطناعي الوكيل في البحث العلمي من الجوانب المنهجية والعلمية، والنزاهة والحوكمة البحثية، والتكامل البشري-الآلي.

رابعاً - تساؤلات البحث:

ينطلق البحث من تساؤل رئيس يتمثل في: ما طبيعة الابتكار الذي يتيح الذكاء الاصطناعي الوكيل في البحث العلمي من حيث مفهومه وتطبيقاته وتحدياته؟ وتتفرع عنه التساؤلات الآتية:

1. ما الإطار المفاهيمي للذكاء الاصطناعي الوكيل، وما أبرز خصائصه ونماذجه وصلته بالابتكار البحثي؟
2. ما أبرز تطبيقات الذكاء الاصطناعي الوكيل في مراحل البحث العلمي، من توليد الأفكار والفرضيات إلى الاكتشاف والتحليل والتجريب المؤتمت؟
3. ما أبرز التحديات المنهجية والعلمية والحوكمة المرتبطة بتوظيف الذكاء الاصطناعي الوكيل في البحث العلمي، وما حدود التكامل البشري-الآلي؟

خامساً - منهج البحث:

يعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي، من خلال مراجعة الأدبيات العلمية المحكمة ذات الصلة بالذكاء الاصطناعي الوكيل والبحث العلمي، ووصف مفاهيمه وخصائصه ونماذجه، ثم تحليل تطبيقاته في مراحل البحث العلمي، ومناقشة التحديات المنهجية والعلمية والحوكمة المرتبطة بتوظيفه، وصولاً إلى استخلاص الاتجاهات الرئيسة التي تكشف طبيعة إسهامه وحدود استخدامه في البحث العلمي.

سادساً – الدراسات السابقة والفجوة البحثية:

تكشف الأدبيات الحديثة عن تطور متسارع في دراسة الذكاء الاصطناعي الوكيل، بدءاً من تأصيل مفهومه وخصائصه، وصولاً إلى توظيفه في الاكتشاف العلمي وأتمتة بعض مراحل البحث، بالتوازي مع الاهتمام المتزايد بحدود التكامل بين الإنسان والذكاء الاصطناعي. وفيما يأتي أبرز الدراسات الأكثر ارتباطاً بموضوع البحث، مرتبة من الأحدث إلى الأقدم:

1. دراسة Gottweis وزملائه¹: تناول البحث تطوير نظام متعدد الوكلاء لدعم الاكتشاف العلمي من خلال توليد الفرضيات ونقدها وتحسينها بصورة تكرارية، مع تطبيقه في مجالات من البحث الطبي الحيوي. وأبرزت إمكانات الأنظمة الوكيلية في تنفيذ مهام بحثية مترابطة تتجاوز الاستخدام التقليدي للذكاء الاصطناعي بوصفه أداة مساعدة. ومع ذلك، ركز البحث على تطبيقات محددة للاكتشاف العلمي ولم تتناول توظيف الذكاء الاصطناعي الوكيل عبر مراحل البحث العلمي المختلفة ضمن إطار تحليلي متكامل.

2. دراسة Sapkota وزملائه²: قدم البحث تأصيلاً مفاهيمياً للتمييز بين وكلاء الذكاء الاصطناعي والذكاء الاصطناعي الوكيل، مع تحليل خصائصهما وبنيتهما وتطبيقاتهما وتحدياتهما. وأسهمت في توضيح السمات التي تميز الأنظمة الوكيلية من حيث الاستقلالية والتخطيط وتنفيذ المهام واستخدام الأدوات. إلا أن نطاقها تناول الذكاء الاصطناعي الوكيل بصورة عامة، دون تركيز محدد على البحث العلمي بوصفه مجالاً مستقلاً للتحليل.

3. دراسة Vaccaro وزملائه³: تناول البحث، من خلال مراجعة منهجية وتحليل تلوي، أداء الإنسان والذكاء الاصطناعي والعمل المشترك بينهما. وأظهرت أن الجمع بين الإنسان والذكاء الاصطناعي لا يؤدي بالضرورة إلى أداء يتجاوز أفضل أداء منفرد، وأن قيمة التكامل تختلف باختلاف طبيعة المهمة. وتفيد هذه النتائج في تحليل حدود التكامل البشري-الآلي، إلا أن البحث لم يختص بالذكاء الاصطناعي الوكيل أو بتطبيقاته في البحث العلمي تحديداً.

الفجوة البحثية:

تكشف المقارنة بين الدراسات السابقة عن فجوة تكاملية في الأدبيات؛ إذ تناولت الدراسات القائمة جوانب منفصلة من الموضوع، شملت التأصيل المفاهيمي للذكاء الاصطناعي الوكيل، وتطبيقات محددة في الاكتشاف العلمي ومراجعة الأدبيات، والتكامل بين الإنسان والذكاء الاصطناعي. وفي حدود الأدبيات التي شملتها المراجعة، لم تتضح معالجة تحليلية تجمع في إطار واحد بين مفهوم الذكاء الاصطناعي الوكيل وخصائصه، وتطبيقاته في مراحل البحث العلمي، والتحديات المنهجية والعلمية والحوكمة المرتبطة باستخدامه، وحدود التكامل البشري-الآلي. وعليه، يسعى البحث الحالي إلى معالجة هذه الفجوة من خلال تقديم تحليل متكامل لهذه الأبعاد في إطار المنهج الوصفي التحليلي.

سابعاً - تقسيم البحث:

الفصل الأول: الذكاء الاصطناعي الوكيل والبحث العلمي:

- المبحث الأول: مفهوم الذكاء الاصطناعي الوكيل وتطوره.
 - المبحث الثاني: خصائص ونماذج الذكاء الاصطناعي الوكيل.
 - المبحث الثالث: الذكاء الاصطناعي الوكيل والابتكار البحثي.
- الفصل الثاني: تطبيقات الذكاء الاصطناعي الوكيل في البحث العلمي:

1 J. Gottweis, W.-H. Weng, A. Daryin, et al., "Accelerating Scientific Discovery with Co-Scientist," *Nature*, 2026, <https://doi.org/10.1038/s41586-026-10644-y>.

2 R. Sapkota, K. I. Roumeliotis, and M. Karkee, "AI Agents vs. Agentic AI: A Conceptual Taxonomy, Applications and Challenges," *Information Fusion* (2025): 103599, <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2025.103599>.

3 M. Vaccaro, A. Almaatouq, and T. Malone, "When Combinations of Humans and AI Are Useful: A Systematic Review and Meta-Analysis," *Nature Human Behaviour* 8 (2024): 2293–2303, <https://doi.org/10.1038/s41562-024-02024-1>.

- المبحث الأول: توليد الأفكار والفرضيات البحثية .
- المبحث الثاني: الاكتشاف والتحليل العلمي .
- المبحث الثالث: التجريب والأتمتة البحثية .
- الفصل الثالث: تحديات الذكاء الاصطناعي الوكيل في البحث العلمي:
- المبحث الأول: التحديات المنهجية والعلمية .
- المبحث الثاني: النزاهة والحوكمة البحثية .
- المبحث الثالث: التكامل البشري-الآلي و آفاق التطوير .
- الخاتمة: النتائج - التوصيات

قائمة المصادر والمراجع

الفصل الأول: الذكاء الاصطناعي الوكيل والبحث العلمي

تمهيد:

يمثل الذكاء الاصطناعي الوكيل مرحلة متقدمة في تطور تطبيقات الذكاء الاصطناعي؛ إذ يتجاوز إنتاج المحتوى أو الاستجابة المباشرة للأوامر إلى أنظمة تستطيع العمل نحو هدف محدد، وتخطيط المهام، واستخدام الأدوات، ومراجعة خطواتها، وتنفيذ سلاسل من الإجراءات بدرجات متفاوتة من الاستقلالية. وقد بدأ هذا التحول ينعكس على البحث العلمي، خاصة في توليد الفرضيات، وتحليل المعرفة، والمحاكاة، والاكتشاف العلمي، والأتمتة التجريبية⁴. ومن ثم، يتناول هذا الفصل الأساس المفاهيمي للذكاء الاصطناعي الوكيل، وخصائصه ونماذجه الرئيسية، ثم علاقته بالابتكار في البحث العلمي، بما يوفر أساسًا تحليليًا لفهم تطبيقاته وحدود توظيفه في المراحل اللاحقة من البحث.

المبحث الأول: مفهوم الذكاء الاصطناعي الوكيل وتطوره:

يرتبط مفهوم الذكاء الاصطناعي الوكيل (Agentic AI) بقدرة النظام على الانتقال من الاستجابة لمهمة منفردة إلى العمل المنظم لتحقيق هدف من خلال مجموعة من الخطوات المترابطة. وتشمل هذه العملية تحديد المهام الفرعية، والتخطيط لتنفيذها، واختيار الأدوات المناسبة، والاستفادة من المعلومات المتاحة، ومراجعة النتائج، وتعديل مسار العمل عند الحاجة. ولذلك لا تتحدد الصفة الوكيلية بمجرد قدرة النموذج على توليد استجابة متقدمة، وإنما بقدرته على إدارة عملية متعددة المراحل لتحقيق غاية محددة⁵. وتبرز هنا ضرورة التمييز بين وكيل الذكاء الاصطناعي (AI Agent) والذكاء الاصطناعي الوكيل (Agentic AI) فالوكيل يمثل نظامًا مصممًا لتنفيذ مهام أو وظائف محددة في بيئة معينة، في حين يشير الذكاء الاصطناعي الوكيل إلى نطاق أوسع من القدرات التي تسمح بالتخطيط والتكيف واستخدام الأدوات والتنسيق بين مهام أو وكلاء متعددين. وهذا التمييز ليس لغويًا فقط، بل يحدد مستوى الاستقلالية وطبيعة العلاقة بين النظام والمستخدم والبيئة التي يعمل فيها⁶. وقد ارتبط تطور الذكاء الاصطناعي الوكيل بالتقدم في نماذج اللغة الكبيرة، ولا سيما قدرتها على الاستدلال، والتعامل مع السياقات الممتدة، والتفاعل مع الأدوات الخارجية. وأدى الجمع بين النموذج اللغوي والذاكرة والتخطيط والوصول إلى الأدوات

4 M. Abou Ali, F. Dornaika, and J. Charafeddine, "Agentic AI: A Comprehensive Survey of Architectures, Applications, and Future Directions," *Artificial Intelligence Review*, 2025, <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11422-4>; Ajay Bandi et al., "The Rise of Agentic AI: A Review of Definitions, Frameworks, Architectures, Applications, Evaluation Metrics, and Challenges," *Future Internet* 17, no. 9 (2025): 404, <https://doi.org/10.3390/fi17090404>; Sapkota, Roumeliotis, and Karkee, "AI Agents vs. Agentic AI."

5 Sapkota, Roumeliotis, and Karkee, "AI Agents vs. Agentic AI."

6 Abou Ali, Dornaika, and Charafeddine, "Agentic AI"; Sapkota, Roumeliotis, and Karkee, "AI Agents vs. Agentic AI."

إلى ظهور أنظمة لا تكتفي بإنتاج النص، وإنما تستطيع تنفيذ سلسلة من الإجراءات وصولاً إلى نتيجة مستهدفة. ومع تطور هذه البنى، اتجه الاهتمام من الوكيل المنفرد إلى الأنظمة متعددة الوكلاء، حيث توزع المهام على وكلاء يؤدي كل منهم وظيفة محددة ويتفاعلون ضمن آلية تنسيق مشتركة. وانتقل هذا التطور سريعاً إلى المجال العلمي. فقد أظهرت تطبيقات حديثة إمكانية استخدام الوكلاء في البحث الكيميائي المستقل، والتفكير العلمي متعدد الوكلاء، وتوليد الفرضيات وتقييمها، وربط النماذج اللغوية بأدوات ومصادر علمية متخصصة. وهو انتقال مهم؛ لأن النظام لم يعد يؤدي وظيفة بحثية منفردة فقط، بل أصبح قادراً في بعض التطبيقات على تنسيق خطوات متعددة داخل مسار علمي واحد.

ومع ذلك، فإن الاستقلالية في هذا السياق لا تعني الاستقلال الكامل عن الباحث. فهي متدرجة، وتتغير وفق تصميم النظام، وطبيعة المهمة، ومستوى الوصول إلى البيانات والأدوات، وآليات الإشراف والتقييم. لذلك فإن وصف النظام بأنه «وكيلي» لا يساوي منحه سلطة بحثية مطلقة، وإنما يشير إلى ارتفاع قدرته على إدارة العمل واتخاذ قرارات تشغيلية داخل حدود محددة مسبقاً.

المبحث الثاني: خصائص ونماذج الذكاء الاصطناعي للوكيل:

تقوم الأنظمة الوكيلية على مجموعة من الخصائص المترابطة التي تميزها عن الاستخدام التقليدي للذكاء الاصطناعي التوليدي. ويأتي في مقدمتها التوجه نحو الهدف؛ إذ يعمل النظام لتحقيق نتيجة محددة بدل الاقتصاد على إنتاج استجابة لأمر منفرد. وترتبط بذلك القدرة على التخطيط وتقسيم الهدف إلى مهام فرعية وتحديد ترتيب تنفيذها وفق المعلومات والموارد المتاحة. وتعد الذاكرة وإدارة السياق من الخصائص الأساسية أيضاً، لأنها تسمح للنظام بالاستفادة من النتائج السابقة والمحافظة على ترابط العمل عبر خطوات متعددة. كما تمثل القدرة على استخدام الأدوات عنصراً حاسماً في البيئة البحثية؛ فالوكيل قد يحتاج إلى البحث في قواعد البيانات، أو تشغيل أدوات تحليلية، أو التعامل مع البرمجيات والمصادر الخارجية، أو استدعاء أدوات علمية متخصصة لإنجاز المهمة المطلوبة. وقد أظهرت تطبيقات في العلوم الكيميائية أن دمج نماذج اللغة الكبيرة مع أدوات تخصصية يوسع قدرتها على أداء مهام تتجاوز حدود المعرفة المخزنة في النموذج نفسه.

وتتسم الأنظمة الوكيلية كذلك بقدرتها على التقييم والتغذية الراجعة: إذ يمكن تصميمها لمراجعة النتائج الوسيطة، واكتشاف أوجه القصور، وإعادة تنفيذ بعض الخطوات أو تعديلها. وفي الأنظمة متعددة الوكلاء، يمكن أن يؤدي وكلاء مختلفون وظائف متخصصة، كال توليد النقد والتقييم والترتيب، ثم تتكامل مخرجاتهم للوصول إلى نتيجة نهائية. وتبرز هذه الخاصية بوضوح في نظم الاكتشاف العلمي متعددة الوكلاء التي تعتمد التفاعل والتقييم المتبادل بين مكونات النظام.

ومن حيث البناء، يمكن التمييز بين عدة نماذج رئيسية. يتمثل الأول في النموذج أحادي الوكيل الذي يتولى فيه وكيل واحد التخطيط والتنفيذ والتقييم. أما النموذج متعدد الوكلاء فيوزع العمل بين عدة وكلاء متخصصين تربطهم آلية للتواصل والتنسيق. ويظهر كذلك النموذج المعزب بالأدوات الذي ترتبط فيه قدرات النموذج اللغوي ببرمجيات وقواعد بيانات وأدوات

7 Bandi et al., "The Rise of Agentic AI"; L. Wang, C. Ma, X. Feng, et al., "A Survey on Large Language Model Based Autonomous Agents," *Frontiers of Computer Science* 18, no. 6 (2024), <https://doi.org/10.1007/s11704-024-40231-1>.

8 D. A. Boiko et al., "Autonomous Chemical Research with Large Language Models," *Nature* 624 (2023): 570–578, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06792-0>; A. Ghafarollahi and M. J. Buehler, "SciAgents: Automating Scientific Discovery through Bioinspired Multi-Agent Intelligent Graph Reasoning," *Advanced Materials*, 2024, <https://doi.org/10.1002/adma.202413523>.

9 Abou Ali, Dornaika, and Charafeddine, "Agentic AI"; Bandi et al., "The Rise of Agentic AI."

10 Andres M. Bran et al., "Augmenting Large Language Models with Chemistry Tools," *Nature Machine Intelligence* 6 (2024): 525–535, <https://doi.org/10.1038/s42256-024-00832-8>.

11 Ghafarollahi and Buehler, "SciAgents."

تحليلية أو تجريبية، إضافة إلى النموذج القائم على التفاعل بين الإنسان والوكيل الذي يحتفظ فيه الباحث بدور مباشر في الإشراف أو الاعتماد أو تعديل مسار العمل¹².

ولا تمثل هذه النماذج درجات متتابعة بالضرورة؛ فقد يجمع النظام الواحد بينها. يمكن مثلاً أن يتكون من عدة وكلاء، يستخدم كل منهم أدوات خارجية، بينما يحتفظ الباحث بنقاط تدخل محددة لاعتماد النتائج أو إعادة توجيه المهمة. ومن هنا يصبح تصميم النظام الوكيل مرتبباً بطبيعة المهمة أكثر من ارتباطه بنموذج معماري واحد ثابت.

وتزداد أهمية هذه الخصائص في البحث العلمي لأن المهام البحثية لا تعتمد على التنفيذ وحده، بل تتطلب قابلية المخرجات للفحص والتتبع والتحقق. ولذلك لا يكفي تقييم النظام الوكيل من خلال قدرته على إكمال المهمة؛ بل ينبغي النظر أيضاً إلى موثوقية النتائج، ووضوح خطوات الوصول إليها، وإمكان مراجعتها، وحدود الاستقلال الممنوح للنظام. وهي اعتبارات تزداد أهميتها كلما انتقل النظام من المساندة إلى المشاركة الفعلية في عملية إنتاج المعرفة.

المبحث الثالث: الذكاء الاصطناعي الوكيل والابتكار البحثي:

تتضح العلاقة بين الذكاء الاصطناعي الوكيل والابتكار البحثي عندما ينتقل استخدام الذكاء الاصطناعي من تحسين مهمة منفردة إلى إعادة تنظيم سلسلة من المهام العلمية المترابطة. فالقيمة المحتملة لهذه الأنظمة لا تقتصر على اختصار الوقت، وإنما تمتد إلى قدرتها على الجمع بين البحث في المعرفة، وتوليد الأفكار، وبناء الفرضيات، واستخدام الأدوات، وتحليل البدائل، ومراجعة المخرجات ضمن عملية واحدة. ويظهر ذلك في المراحل الأولى من البحث العلمي. فقد تناولت الأدبيات استخدام الذكاء الاصطناعي في دعم مراجعات الأدبيات والبحث عن الدراسات وفرزها واستخراج المعلومات منها، مع الإشارة في الوقت نفسه إلى تحديات تتعلق بجودة المخرجات والتقييم والاعتماد عليها¹³. كما ظهرت تطبيقات تستفيد من الشخصيات الخيرة المحاكاة بواسطة نماذج اللغة لتعزيز توليد الأفكار البحثية، وهو ما يوسع مجال استخدام الذكاء الاصطناعي من معالجة المعلومات القائمة إلى دعم بناء أسئلة واتجاهات بحثية جديدة¹⁴. وفي مجال الاكتشاف العلمي، أصبحت التطبيقات أكثر تقدماً. فقد أثبتت دراسات إمكانية استخدام نماذج اللغة الكبيرة في تنفيذ مهام بحث كيميائي بدرجات مرتفعة من الأتمتة، وربطها بأدوات علمية، وتوظيف الأنظمة متعددة الوكلاء في استكشاف العلاقات العلمية وتوليد مقترحات جديدة¹⁵. كما امتد الاستخدام إلى النمذجة والمحاكاة المعتمدة على الوكلاء، بما يسمح بتوسيع نطاق المسائل التي يمكن للذكاء الاصطناعي المشاركة في تحليلها¹⁶. ويمثل نظام Co-Scientist مثالاً واضحاً على الاتجاه نحو جعل الوكيل جزءاً من عملية التفكير العلمي، من خلال نظام متعدد الوكلاء يولد الفرضيات وينقدها ويرتها ويطورها بصورة تكرارية. وتكشف هذه التطبيقات عن اختلاف جوهري بين استخدام نموذج لغوي لإعطاء إجابة وبين بناء منظومة تستطيع إدارة حلقات متتابعة من التفكير والتقييم العلمي¹⁷.

ويتمد الابتكار إلى التجريب ذاته. فقد أظهرت المختبرات ذاتية القيادة إمكانية الربط بين الذكاء الاصطناعي والأتمتة والروبوتات لتخطيط التجارب وتنفيذها وتحليل نتائجها واستخدام تلك النتائج لتوجيه التجربة التالية. وظهرت تطبيقات في اكتشاف المواد والكيمياء وهندسة البروتينات، بما يشير إلى انتقال بعض مجالات البحث من الأتمتة الجزئية إلى حلقات تجريبية أكثر

12 Abou Ali, Dornaika, and Charafeddine, "Agentic AI"; Bandi et al., "The Rise of Agentic AI."

13 F. Bolaños et al., "Artificial Intelligence for Literature Reviews: Opportunities and Challenges," *Artificial Intelligence Review* 57 (2024): 259, <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10902-3>.

14 Yiren Liu et al., "PersonaFlow: Designing LLM-Simulated Expert Perspectives for Enhanced Research Ideation," in *DIS 2025: Proceedings of the 2025 ACM Designing Interactive Systems Conference* (Association for Computing Machinery, 2025), 506–534, <https://doi.org/10.1145/3715336.3735789>.

15 Boiko et al., "Autonomous Chemical Research with Large Language Models"; Ghafarollahi and Buehler, "SciAgents."

16 C. Gao, X. Lan, N. Li, et al., "Large Language Models Empowered Agent-Based Modeling and Simulation: A Survey and Perspectives," *Humanities and Social Sciences Communications* 11 (2024): 1259, <https://doi.org/10.1057/s41599-024-03611-3>.

17 Gottweis et al., "Accelerating Scientific Discovery with Co-Scientist."

استقلالية 18 غير أن الابتكار البحثي لا ينبغي قياسه بمقدار الاستقلالية وحدها. فزيادة استقلال النظام لا تعني تلقائيًا زيادة جودة المعرفة الناتجة عنه. وتؤكد نتائج المراجعة المنهجية والتحليل التلوي التي قدمها Vaccaro وزملاؤه 19 أن دمج الإنسان والذكاء الاصطناعي لا يؤدي بصورة تلقائية إلى أداء يفوق أفضل أداء منفرد؛ إذ تتغير النتائج تبعًا لطبيعة المهمة وطريقة توزيع الأدوار. وهذه نتيجة مهمة في تقييم القيمة البحثية للأنظمة الوكيلية، لأنها تنقل النقاش من سؤال «هل يمكن للنظام أداء المهمة؟» إلى سؤال أكثر دقة: ما توزيع الأدوار الذي ينتج معرفة علمية أفضل؟ ويرى الباحث أن القيمة الجوهرية للذكاء الاصطناعي الوكيل في البحث العلمي لا تكمن في استبدال الباحث أو في أتمتة أكبر عدد ممكن من المهام، بل في إعادة تنظيم العلاقة بين التفكير البشري والقدرات الحسابية داخل دورة البحث. فالتحول الحقيقي يحدث عندما يستطيع النظام ربط مراحل كانت تُنفذ بصورة منفصلة، مع بقاء تحديد المشكلة، وتقييم الدليل، والحكم على المعنى العلمي، وتحمل المسؤولية عن النتيجة ضمن الدور البشري.

الفصل الثاني : تطبيقات الذكاء الاصطناعي الوكيل في البحث العلمي

تمهيد:

انتقل استخدام الذكاء الاصطناعي في البحث العلمي من أدوات مساعدة في البحث والكتابة والتحليل إلى أنظمة أكثر قدرة على تنفيذ مهام مترابطة داخل العملية البحثية. ويظهر هذا التحول في ثلاثة مجالات رئيسية: دعم توليد الأفكار والفرضيات، والمشاركة في الاكتشاف والتحليل العلمي، ثم الانتقال إلى التجريب والأتمتة التي تربط بين البرمجيات والأدوات والبيئات المختبرية. ولا تتساوى هذه التطبيقات في مستوى النضج أو الاستقلالية، إلا أنها تكشف اتجاهًا واضحًا نحو توسيع الدور التشغيلي للأنظمة الوكيلية داخل البحث العلمي.

المبحث الأول: توليد الأفكار والفرضيات البحثية:

يعد توليد الأفكار والفرضيات من أكثر مراحل البحث حساسية؛ لأن القيمة العلمية للبحث تبدأ من القدرة على تحديد سؤال ذي معنى، وربط المعرفة المتاحة بعلاقة أو تفسير يستحق الاختبار. وقد أتاحت نماذج الذكاء الاصطناعي الحديثة إمكانات جديدة في هذا المجال من خلال معالجة كميات كبيرة من المعرفة، واكتشاف أنماط وعلاقات قد تساعد الباحث على صياغة تصورات أولية أو فرضيات قابلة للفحص. وقد تناول Makke و Chawla 20 الاكتشاف العلمي القابل للتفسير باستخدام الانحدار الرمزي، موضحين قدرة الأساليب المدعومة بالذكاء الاصطناعي على استنتاج علاقات رياضية وتفسيرية من البيانات، بدل الاقتصار على التنبؤ دون تفسير. وتكتسب هذه المقاربة أهمية بحثية لأنها تربط بين تحليل البيانات وبناء علاقات يمكن للباحث فحصها علميًا، وهو ما يضع الذكاء الاصطناعي في موقع يتجاوز التحليل الوصفي إلى دعم اكتشاف أنماط قد تكون أساسًا لفرضيات جديدة. ومن زاوية أخرى، بحث Zhao وزملاؤه 21 الإبداع في نماذج اللغة الكبيرة، وسعوا إلى تقييم قدرتها على إنتاج مخرجات تتسم بالأصالة والملاءمة. وتهم هذه المسألة البحث العلمي لأن توليد الأفكار لا يقوم على كثرة المقترحات، بل على قدرتها

18 M. Abolhasani and E. Kumacheva, "The Rise of Self-Driving Labs in Chemical and Materials Sciences," *Nature Synthesis* 2 (2023): 483–492,

<https://doi.org/10.1038/s44160-022-00231-0>; J. T. Rapp, B. J. Bremer, and P. A. Romero, "Self-Driving Laboratories to Autonomously Navigate the Protein Fitness Landscape," *Nature Chemical Engineering* 1 (2024): 97–107, <https://doi.org/10.1038/s44286-023-00002-4>; N. J. Szymanski, B. Rendy, Y. Fei, et al., "An Autonomous Laboratory for the Accelerated Synthesis of Novel Materials," *Nature* 624 (2023): 86–91, <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06734-w>.

19 Vaccaro, Almaatouq, and Malone, "When Combinations of Humans and AI Are Useful."

20 N. Makke and S. Chawla, "Interpretable Scientific Discovery with Symbolic Regression: A Review," *Artificial Intelligence Review* 57 (2024): 2, <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10622-0>.

21 Y. Zhao, R. Zhang, W. Li, et al., "Assessing and Understanding Creativity in Large Language Models," *Machine Intelligence Research*, 2025, <https://doi.org/10.1007/s11633-025-1546-4>.

على تقديم اتجاه جديد ومبرر يمكن تطويره إلى سؤال أو فرضية. ومع ذلك، فإن قدرة النموذج على إنتاج فكرة تبدو جديدة لا تعني تلقائياً أنها تمثل فجوة بحثية حقيقية؛ إذ يتطلب ذلك مقارنتها بالأدبيات والتحقق من أصالتها وقابليتها للاختبار. وتكشف تطبيقات الذكاء الاصطناعي في هذا المستوى عن وظيفة مهمة يمكن وصفها بتوسيع فضاء الاحتمالات البحثية أمام الباحث. فبدل الاقتصار على الأفكار التي يستحضرها من قراءاته المباشرة، يمكن للنظام اقتراح روابط متعددة بين مفاهيم أو نتائج أو متغيرات. لكن الانتقال من الاقتراح إلى الفرضية العلمية يحتاج إلى تدخل بشري يحدد المبرر النظري، وطبيعة العلاقة، وقابلية القياس، ومدى اتصال الفكرة بالمعرفة القائمة. وعليه، لا ينبغي التعامل مع توليد الفرضيات بواسطة الذكاء الاصطناعي بوصفه إنتاجاً آلياً للمعرفة الجديدة، بل بوصفه مرحلة استكشافية يمكن أن تزيد عدد البدائل المتاحة للباحث. القيمة الحقيقية تبدأ بعد ذلك: في الفرز، والمقارنة، والتحقق، واستبعاد ما هو مكرر أو غير قابل للفحص.

المبحث الثاني: الاكتشاف والتحليل العلمي:

يتجاوز الاستخدام الويكلي في الاكتشاف العلمي توليد الأفكار إلى التعامل المباشر مع البيانات والأدوات والنماذج العلمية. ويشمل ذلك تحليل المعرفة التخصصية، والمحاكاة، وربط نماذج اللغة بأدوات علمية، وتنسيق خطوات متعددة للوصول إلى نتيجة قابلة للتقييم. قدّم Ramos وزملاؤه²² مراجعة لاستخدام نماذج اللغة الكبيرة والوكلاء المستقلين في الكيمياء، وأظهرت أن هذه التقنيات بدأت تؤدي وظائف تشمل التعامل مع المعرفة الكيميائية، ودعم تصميم التجارب، والتفاعل مع أدوات وبرمجيات متخصصة. وتوضح هذه التطبيقات أن الوكيل يصبح أكثر فاعلية عندما لا يعتمد على النموذج اللغوي وحده، وإنما يعمل ضمن منظومة تتصل بمصادر معرفية وأدوات تنفيذية خارجية. وفي السياق نفسه، ناقش Hartung²³ التقاطع بين النماذج الوكيلية وأتمتة المختبرات في الاكتشاف العلمي، مشيراً إلى اتجاه متزايد نحو دمج الذكاء الاصطناعي في منظومات علمية تستطيع الانتقال بين التفكير والتحليل والتنفيذ. وتكمن أهمية هذا الاتجاه في أنه يغير موضع الذكاء الاصطناعي داخل البحث؛ فبدل أن يأتي بعد إنتاج البيانات لتحليلها، يمكن أن يصبح جزءاً من دورة توليد المعرفة نفسها. وقدم Zimmermann وزملاؤه²⁴ مجموعة واسعة من تطبيقات نماذج اللغة الكبيرة في علوم المواد والكيمياء، تمتد من الاستخدام كمساعد إلى تطبيقات أقرب إلى الوكلاء والأتمتة والاكتشاف المتسارع. وتبرز هذه الأمثلة تعدد مستويات تدخل الذكاء الاصطناعي في العملية العلمية، كما تؤكد أن وصف كل استخدام بأنه «ويكلي» ليس دقيقاً؛ فالفرق يرتبط بدرجة الاستقلالية، وعدد الخطوات التي يديرها النظام، وطبيعة الأدوات التي يتفاعل معها، وفي التطبيقات التجريبية، أظهر Su وزملاؤه²⁵ إمكان دمج الأتمتة والتعلم الآلي ونماذج اللغة الكبيرة في دراسة متخصصة في التحفيز الكيميائي. وتكشف هذه المقاربة عن تحول مهم في التحليل العلمي؛ إذ يمكن ربط مصادر بيانات وأساليب تحليل وأدوات تنفيذ ضمن بنية واحدة، بما يسمح بتقليل الفصل التقليدي بين جمع البيانات وتحليلها واتخاذ القرار بشأن الخطوة التالية.

وتظهر التطبيقات القطاعية امتداد هذا الاتجاه إلى مجالات أخرى. فقد تناول Zhao وزملاؤه²⁶ الوكلاء في الرعاية الصحية من حيث التطبيقات والتقييم والاتجاهات المستقبلية، بما يعكس توسع البحث في النظم الوكيلية خارج المجالات التجريبية البحتة.

22 M. C. Ramos, C. J. Collison, and A. D. White, "A Review of Large Language Models and Autonomous Agents in Chemistry," *Chemical Science*, 2024, <https://doi.org/10.1039/D4SC03921A>.

23 T. Hartung, "AI, Agentic Models and Lab Automation for Scientific Discovery—The Beginning of scAInce," *Frontiers in Artificial Intelligence* 8 (2025): 1649155, <https://doi.org/10.3389/frai.2025.1649155>.

24 Y. Zimmermann et al., "32 Examples of LLM Applications in Materials Science and Chemistry: Towards Automation, Assistants, Agents, and Accelerated Scientific Discovery," *Machine Learning: Science and Technology*, 2025, <https://doi.org/10.1088/2632-2153/ae011a>.

25 Y. Su, X. Wang, Y. Ye, et al., "Automation and Machine Learning Augmented by Large Language Models in a Catalysis Study," *Chemical Science*, 2024, <https://doi.org/10.1039/D3SC07012C>.

26 L. Zhao, S. Liu, T. Xin, et al., "AI Agent in Healthcare: Applications, Evaluations, and Future Directions," *npj Artificial Intelligence* 2 (2026), <https://doi.org/10.1038/s44387-026-00076-4>.

كما قدم Yang و Velazquez-Villarreal نموذجًا يعتمد على وكيل حواري لدمج البيانات السريرية والجينومية في أبحاث الطب الدقيق، وهو مثال على قيمة الوكيل عندما تتطلب المهمة دمج مصادر معرفية وبيانية متعددة. ويكشف ذلك أن الاكتشاف العلمي المدعوم بالوكلاء لا يقوم على «ذكاء» النموذج وحده، بل على البنية التي تربطه بالمعرفة والأدوات والبيانات وآليات التقييم. وكلما اتسعت مساحة التنفيذ، أصبحت قابلية تتبع خطوات النظام والتحقق منها أكثر أهمية، لأن النتيجة العلمية لا تقاس فقط بسرعة الوصول إليها، بل بإمكان تفسير مصدرها وإعادة فحصها.

المبحث الثالث: التجريب والأتمتة البحثية:

يمثل التجريب المؤتمت أكثر صور الذكاء الاصطناعي الوكيل تقدمًا من الناحية التشغيلية؛ لأنه ينقل النظام من التعامل مع المعلومات الرقمية إلى التفاعل مع أدوات أو أجهزة أو بيئات تجريبية، ثم استخدام النتائج في اتخاذ قرارات لاحقة داخل الدورة البحثية. أظهر Dai وزملاؤه²⁸ استخدام روبوتات متحركة مستقلة في الكيمياء التركيبية الاستكشافية، بما يسمح بتنفيذ مهام مختبرية في بيئات تتطلب الحركة والتفاعل مع معدات مختلفة. ويبرز هذا النموذج انتقال الأتمتة من الأجهزة الثابتة ذات الوظائف المحددة إلى أنظمة أكثر مرونة تستطيع العمل في بيئة مختبرية متغيرة. وقدم Bai وزملاؤه²⁹ نهجًا يعتمد على الرسوم البيانية المعرفية الديناميكية لربط المختبرات ذاتية القيادة الموزعة. وتكمن أهمية هذا النهج في معالجة مشكلة التنسيق بين المعرفة والبيانات والأجهزة داخل بنية موزعة، وهو مستوى أكثر تعقيدًا من أتمتة تجربة منفردة؛ لأنه يتطلب المحافظة على ترابط المعلومات والقرارات عبر مكونات متعددة.

وطور Sim وزملاؤه³⁰ معمارية ChemOS 2.0 لتنظيم عمليات المختبرات الكيميائية ذاتية القيادة. ويكشف هذا النوع من البنى أن الأتمتة البحثية لا تعتمد على الروبوتات وحدها، وإنما تحتاج إلى طبقة تنسيق تربط بين تصميم التجربة، والأجهزة، والبيانات، والخوارزميات، وقرارات الانتقال من تجربة إلى أخرى. وتناول Bayley وزملاؤه³¹ تطور الكيمياء المستقلة والمختبرات ذاتية القيادة، موضحين الإمكانيات والتحديات المرتبطة بتحويل مراحل من التجريب الكيميائي إلى عمليات أكثر استقلالية. ويشير هذا الاتجاه إلى أن المختبر الذاتي لا يعني إلغاء الإنسان، بل إعادة توزيع الوظائف بين الباحث والمنظومة المؤتمتة.

وعالج Hysmith وزملاؤه³² مستقبل المختبرات ذاتية القيادة من خلال الانتقال من نماذج يكون الإنسان حاضراً بصورة مستمرة في دورة القرار إلى أنماط مختلفة من التفاعل بين الإنسان والذكاء الاصطناعي. وتؤكد هذه الرؤية أن الأتمتة ليست حالة ثنائية بين العمل اليدوي والاستقلال الكامل، وإنما طيف تتغير فيه نقاط تدخل الباحث وفق طبيعة التجربة والمخاطر ومستوى الثقة في النظام. أما Volk وزملاؤه³³ فقد قدموا نظام AlphaFlow لاكتشاف والتحسين المستقل في عمليات كيميائية متعددة

27 E.-W. Yang and E. Velazquez-Villarreal, "AI-HOPE: An AI-Driven Conversational Agent for Enhanced Clinical and Genomic Data Integration in Precision Medicine Research," *Bioinformatics* 41, no. 7 (2025), <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btaf359>.

28 T. Dai, S. Vijayakrishnan, F. T. Szczepiński, et al., "Autonomous Mobile Robots for Exploratory Synthetic Chemistry," *Nature* 635 (2024): 890–897, <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08173-7>.

29 J. Bai, S. Mosbach, C. J. Taylor, et al., "A Dynamic Knowledge Graph Approach to Distributed Self-Driving Laboratories," *Nature Communications* 15 (2024): 462, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44599-9>.

30 M. Sim, M. Ghazi Vakili, F. Strieth-Kalthoff, et al., "ChemOS 2.0: An Orchestration Architecture for Chemical Self-Driving Laboratories," *Matter* 7, no. 9 (2024): 2959–2977, <https://doi.org/10.1016/j.matt.2024.04.022>.

31 O. Bayley, E. Savino, A. Slattery, et al., "Autonomous Chemistry: Navigating Self-Driving Labs in Chemical and Material Sciences," *Matter* 7, no. 8 (2024): 2382–2398, <https://doi.org/10.1016/j.matt.2024.06.003>.

32 H. Hysmith, E. Foadian, S. P. Padhy, et al., "The Future of Self-Driving Laboratories: From Human-in-the-Loop Interactive AI to Gamification," *Digital Discovery* 3 (2024): 621–636, <https://doi.org/10.1039/D4DD00040D>.

33 A. A. Volk, R. W. Epps, D. T. Yonemoto, et al., "AlphaFlow: Autonomous Discovery and Optimization of Multi-Step Chemistry Using a Self-Driven Fluidic Lab Guided by Reinforcement Learning," *Nature Communications* 14 (2023): 1403, <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37139-y>.

الخطوات باستخدام مختبر تدفق ذاتي موجّه بالتعلم المعزز. وبرز هذا التطبيق فكرة الحلقة المغلقة؛ حيث تستخدم نتائج التجربة لتوجيه الاختيار التالي، بدل تنفيذ قائمة ثابتة من التجارب المحددة مسبقاً.

وفي اتجاه يرتبط بالتعاون المباشر بين الإنسان والذكاء الاصطناعي والروبوت، تناول Orouji وزملاؤه³⁴ البحث المستقل في التحفيز الكيميائي ضمن نموذج يجمع هذه الأطراف داخل عملية بحثية واحدة. وتوضح هذه المقاربة أن التطور نحو الأتمتة لا يستلزم بالضرورة إبعاد الباحث، بل قد يقود إلى نماذج جديدة لتقسيم العمل بين الخبرة البشرية والقدرات الحسابية والتنفيذ الروبوتي. كما اختبر Mandal وزملاؤه³⁵ وكلاء نماذج اللغة الكبيرة في أتمتة المجهر بالقوة الذرية، وهو تطبيق مهم لأنه ينقل استخدام الوكلاء إلى التعامل مع أجهزة علمية دقيقة، وي طرح بصورة عملية مسألة قدرة الوكيل على تحويل التعليمات والأهداف إلى إجراءات تشغيلية قابلة للتنفيذ. وفي مجال الروبوتات الكيميائية، درس Yoshikawa وزملاؤه³⁶ استخدام نماذج اللغة الكبيرة في التحكم والتفاعل مع أنظمة روبوتية مخصصة للمهام الكيميائية. وتوضح هذه التطبيقات أن اللغة الطبيعية يمكن أن تصبح واجهة بين الباحث والأنظمة التجريبية، إلا أن نجاحها يعتمد على طبقات إضافية للترجمة والتنفيذ والتحقق، ولا يمكن افتراض أن المخرج اللغوي صالح للتنفيذ المباشر دون قيود. وتبين هذه التطبيقات مجتمعة أن الأتمتة البحثية تتجه من أتمتة المهام المفردة إلى أتمتة حلقات القرار؛ أي الانتقال من تنفيذ الإجراء إلى اختيار الإجراء التالي بناءً على النتائج المتولدة. وهذه النقطة هي التي تمنح الذكاء الاصطناعي الوكيل أهميته في التجريب، لكنها في الوقت نفسه ترفع متطلبات التحقق والرقابة، لأن الخطأ في بيئة تجريبية مؤتمتة يمكن أن ينتقل من خطوة إلى أخرى داخل الحلقة نفسها.

ويرى الباحث أن التطبيقات الوكيلية الأكثر أهمية في البحث العلمي ليست تلك التي تستبدل أكبر عدد من الخطوات البشرية، بل تلك التي تربط المراحل البحثية بطريقة تقلل الانقطاع بينها مع المحافظة على إمكانية مراجعة القرار العلمي. فالقيمة لا تكمن في أن يولد النظام فرضية أو يشغل جهازاً بصورة مستقلة، وإنما في قدرته على الانتقال المنضبط بين المعرفة والفرضية والتحليل والتجريب، بينما يحتفظ الباحث بسلطة تحديد السؤال، وتقييم المعنى، والتحقق من الدليل. وبهذا المعنى، يمثل الذكاء الاصطناعي الوكيل تحولاً في بنية سير العمل البحثي أكثر من كونه مجرد أداة أسرع لتنفيذ المهام القائمة.

الفصل الثالث: تحديات الذكاء الاصطناعي الوكيل في البحث العلمي

تمهيد:

تتسع تطبيقات الذكاء الاصطناعي الوكيل في البحث العلمي كلما ازدادت قدرة الأنظمة على التخطيط، واستخدام الأدوات، وتنفيذ المهام المتتالية بدرجات أعلى من الاستقلالية. غير أن اتساع هذه القدرة يرافقه انتقال نوعي في طبيعة التحديات؛ فالمسألة لم تعد مقتصرة على دقة مخرج يولده نموذج لغوي، بل أصبحت تشمل سلامة سلسلة من القرارات والإجراءات التي قد يؤثر بعضها في بعض. وعليه، فإن تقييم الذكاء الاصطناعي الوكيل في البحث العلمي يقتضي النظر إلى ثلاثة مستويات مترابطة: موثوقية العملية العلمية ومخرجاتها، وضوابط النزاهة والحوكمة التي تحكم استخدامها، ثم طبيعة العلاقة بين الباحث والنظام الوكيل ومستقبل هذه العلاقة.

34 N. Orouji, J. A. Bennett, R. B. Canty, et al., "Autonomous Catalysis Research with Human—AI—Robot Collaboration," *Nature Catalysis*, 2025, <https://doi.org/10.1038/s41929-025-01430-6>.

35 I. Mandal, J. Soni, M. Zaki, et al., "Evaluating Large Language Model Agents for Automation of Atomic Force Microscopy," *Nature Communications* 16 (2025), <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64105-7>.

36 N. Yoshikawa, M. Skreta, K. Darvish, et al., "Large Language Models for Chemistry Robotics," *Autonomous Robots* 47 (2023): 1057–1086, <https://doi.org/10.1007/s10514-023-10136-2>.

المبحث الأول: التحديات المنهجية والعلمية:

تتبع التحديات المنهجية للذكاء الاصطناعي الوكيل من طبيعة عمله متعدد المراحل. فالنظام قد يبدأ بتحليل المهمة، ثم يضع خطة، ويختار مصادر أو أدوات، وينفذ إجراءات متتابعة، ويقيم نتائج وسيطة قبل الانتقال إلى الخطوة التالية. وفي هذا السياق لا يرتبط الخطأ بالمرجع النهائي فقط؛ إذ يمكن لقرار غير دقيق في مرحلة مبكرة أن ينتقل إلى المراحل التالية ويؤثر في النتيجة النهائية. وقد تناول Ferrag وزملاؤه³⁷ الانتقال من قدرات الاستدلال في نماذج اللغة الكبيرة إلى الوكلاء المستقلين، وهو انتقال يوضح أن زيادة القدرة على تنفيذ المهام بصورة مستقلة ترفع في المقابل أهمية التحقق من عمليات الاستدلال والتنفيذ. ومن المنظور البحثي، يعني ذلك أن جودة النظام لا ينبغي أن تقاس فقط بقدرته على إكمال المهمة، وإنما بسلامة المسار الذي اتبعه للوصول إلى النتيجة. ويزداد هذا التحدي مع الطبيعة الاحتمالية لنماذج اللغة الكبيرة. فقد عرض Zhao وزملاؤه³⁸ تطور نماذج اللغة الكبيرة وخصائصها العامة، وهي القاعدة التقنية التي تستند إليها نسبة كبيرة من الأنظمة الوكيلية الحديثة. واستناد النظام الوكيل إلى نموذج لغوي لا يلغي القيود المرتبطة بالمرجات غير الدقيقة أو غير المتسقة، بل قد يزيد أثرها عندما تستخدم تلك المخرجات أساساً لاتخاذ إجراء لاحق.

وتظهر هنا مشكلة قابلية التكرار والتحقق، وهي من المبادئ الأساسية للبحث العلمي. فإذا استخدم الوكيل مساراً متغيراً في البحث أو التحليل أو اختبار الأدوات، فقد يصبح من الضروري توثيق الخطوات والقرارات والمصادر التي استند إليها النظام بدرجة تسمح بفهم كيفية إنتاج النتيجة. فالنتيجة العلمية التي يصعب تفسير مسار الوصول إليها تظل محدودة القيمة مهما بدت مقنعة في صورتها النهائية.

كما تبرز مسألة صلاحية التعميم. فنجاح نظام وكيلي في مجال أو مهمة أو بيئة بحثية محددة لا يثبت تلقائياً نجاحه في مجالات أخرى تختلف في طبيعة البيانات أو درجة الغموض أو حساسية القرارات. وقد تناول Yigit وزملاؤه³⁹ تطبيقات الذكاء الاصطناعي التوليدي ونماذج اللغة والذكاء الاصطناعي الوكيل في حماية البنية التحتية الحرجة، مع التركيز على معايير التقييم والتحديات والفرص. وتوضح طبيعة هذا المجال أن متطلبات تقييم الوكيل تتغير باختلاف السياق؛ فالمهام ذات الحساسية المرتفعة تحتاج إلى مستويات أشد من الاختبار والتحقق قبل الاعتماد على المخرجات. وعليه، لا يكفي في البحث العلمي إثبات أن النظام الوكيل يستطيع تنفيذ مهمة معينة. السؤال المنهجي الأهم هو ما إذا كان تنفيذها صحيحاً، وقابلاً للتتبع، ويمكن التحقق منه وإعادة فحصه. وهذه المعايير هي التي تفصل بين القدرة التقنية والقيمة العلمية.

المبحث الثاني: النزاهة والحوكمة البحثية:

تزداد أهمية النزاهة البحثية عندما ينتقل الذكاء الاصطناعي من أداة يستخدمها الباحث في مهمة محددة إلى نظام يؤدي سلسلة من المهام بدرجة من الاستقلالية. ففي هذه الحالة تصبح المسؤولية عن المخرج أكثر تعقيداً؛ لأن النظام قد يختار بعض المصادر أو الأدوات أو مسارات التحليل دون تدخل مباشر في كل خطوة. ناقش Bengio وزملاؤه⁴⁰ إدارة المخاطر المتقدمة للذكاء الاصطناعي في ظل التطور السريع لهذه التقنيات. وعلى الرغم من اتساع نطاق المخاطر التي تناولها البحث، فإن المبدأ ذي الصلة بالبحث العلمي واضح: ارتفاع القدرة والاستقلالية يستوجب أن يقابله ارتفاع في مستوى الرقابة وإدارة المخاطر. ولا يصح افتراض

37 M. A. Ferrag, N. Tihanyi, and M. Debbah, "From LLM Reasoning to Autonomous AI Agents: A Comprehensive Review," *IEEE Access*, 2026,

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3698694>.

38 W. X. Zhao, K. Zhou, J. Li, et al., "A Survey of Large Language Models," *Frontiers of Computer Science*, 2026, <https://doi.org/10.1007/s11704-026-60308-3>.

39 Y. Yigit, M. A. Ferrag, M. C. Ghanem, et al., "Generative AI and LLMs for Critical Infrastructure Protection: Evaluation Benchmarks, Agentic AI, Challenges, and Opportunities," *Sensors* 25, no. 6 (2025): 1666, <https://doi.org/10.3390/s25061666>.

40 Y. Bengio, G. Hinton, A. Yao, et al., "Managing Extreme AI Risks amid Rapid Progress," *Science* 384, no. 6698 (2024): 842–845,

<https://doi.org/10.1126/science.adn0117>.

أن التحسن التقني يقلل تلقائيًا الحاجة إلى الحوكمة. وتناول Taeihagh⁴¹ حوكمة الذكاء الاصطناعي التوليدي، بما يبرز أن إدارة هذه الأنظمة لا تقتصر على وضع قيود تقنية، وإنما تشمل تحديد المسؤوليات، وآليات الرقابة، والقواعد المنظمة للاستخدام. ويكتسب ذلك أهمية مباشرة في البحث العلمي؛ لأن المسؤولية العلمية لا يمكن نقلها إلى النظام. فالباحث يظل مسؤولًا عن سلامة البيانات، ودقة التحليل، وصحة الاستشهادات، ومشروعية الإجراءات، والنتائج التي ينسبها إلى دراسته. وتزداد المسألة تعقيدًا في الأنظمة الوكيلية الموثوقة. فقد تناول Adabara وزملاؤه⁴² موثوقية الذكاء الاصطناعي الوكيل من خلال مراجعة شملت البنى ونماذج التهديد واستراتيجيات الحوكمة اللازمة للتطبيق في البيئات الواقعية. ويشير هذا الاتجاه إلى أن الموثوقية لا تنتج عن عنصر منفرد؛ فهي ترتبط بالبنية التقنية، وأمن النظام، وآليات الرقابة، وحدود الصلاحيات الممنوحة له. وفي النشر العلمي تحديدًا، تصبح الشفافية في استخدام الذكاء الاصطناعي جزءًا من النزاهة البحثية. فقد حلل Ganjavi وزملاؤه⁴³ تعليمات الناشرين والمجلات المتعلقة باستخدام الذكاء الاصطناعي التوليدي في النشر الأكاديمي والعلمي، بما يعكس انتقال التعامل مع الذكاء الاصطناعي من مسألة تقنية إلى قضية تحريرية وأخلاقية تتصل بمسؤولية المؤلف والإفصاح عن الاستخدام. ومن ثم، فإن حوكمة الذكاء الاصطناعي الوكيل في البحث العلمي ينبغي فهمها بوصفها وسيلة للحفاظ على قابلية مساءلة الباحث، لا مجرد ضبط لسلوك النظام. وكلما ازدادت استقلالية الوكيل، أصبحت الحاجة أكبر إلى تحديد ما يجوز له تنفيذه، وما يحتاج إلى مراجعة بشرية، وما يجب توثيقه، ومن يتحمل المسؤولية عن النتيجة. ولا تمثل هذه الضوابط عائقًا أمام الابتكار. بل هي شرط لاستدامته؛ لأن القيمة العلمية لأي أداة بحثية تراجع إذا تعذر الوثوق بطريقة استخدامها أو التحقق من مخرجاتها.

المبحث الثالث: التكامل البشري-الآلي و آفاق التطوير:

لا يقتصر مستقبل الذكاء الاصطناعي الوكيل في البحث العلمي على تطوير أنظمة أكثر استقلالية. فالسؤال الأكثر أهمية هو كيفية توزيع الوظائف بين الباحث والنظام بطريقة تستفيد من القدرات الحسابية للآخر من دون إضعاف الحكم العلمي والمسؤولية البشرية.

ويقدم Huang⁴⁴ معالجة للذكاء الاصطناعي الوكيل من منظور تطوره وبنيته وتطبيقاته، بما يعكس اتساع هذا المجال وانتقاله نحو أنظمة أكثر قدرة على العمل نحو أهداف مركبة. وي طرح هذا التطور سؤالاً جوهريًا حول حدود استقلال النظام: ما المهام التي يمكن تفويضها؟ وما القرارات التي ينبغي أن تبقى تحت الإشراف المباشر للباحث؟ في البيئة البحثية، يمكن للوكيل أن يتفوق في المهام التي تعتمد على معالجة حجم كبير من المعلومات، وتنظيم العمليات المتكررة، واستخدام أدوات متعددة، وتتبع عدد كبير من البدائل. لكن مهام أخرى تظل مرتبطة بالحكم العلمي؛ ومنها تحديد أهمية المشكلة، وتقييم معنى النتيجة، واختيار حدود الادعاء العلمي، وفهم السياق، وتحمل المسؤولية عن القرارات.

وبذلك لا ينبغي تصور العلاقة المستقبلية بين الباحث والذكاء الاصطناعي الوكيل على أنها منافسة تنتهي بتغلب أحد الطرفين. الأكثر اتساقًا مع طبيعة البحث العلمي هو بناء تكامل وظيفي؛ يؤدي فيه النظام المهام التي تناسب قدراته، بينما يحتفظ الباحث بالوظائف التي تتطلب الحكم النقدي والمسؤولية العلمية. ويقتضي تطوير هذا النموذج تحسين عدة جوانب في الأنظمة الوكيلية، أهمها قابلية تفسير القرارات، وإمكان تتبع خطوات التنفيذ، وضبط الصلاحيات، ورفع موثوقية استخدام الأدوات

41 A. Taeihagh, "Governance of Generative AI," *Policy and Society* 44, no. 1 (2025): 1–22, <https://doi.org/10.1093/polsoc/puaf001>.

42 I. Adabara et al., "Trustworthy Agentic AI Systems: A Cross-Layer Review of Architectures, Threat Models, and Governance Strategies for Real-World Deployment," *F1000Research* 14 (2025): 905, <https://doi.org/10.12688/f1000research.169927.1>.

43 C. Ganjavi et al., "Publishers' and Journals' Instructions to Authors on Use of Generative Artificial Intelligence in Academic and Scientific Publishing: Bibliometric Analysis," *BMJ* 384 (2024): e077192, <https://doi.org/10.1136/bmj-2023-077192>.

44 K. Huang, *Agentic AI*, Progress in IS (Springer, 2025), <https://doi.org/10.1007/978-3-031-90026-6>.

والمصادر، وتحديد نقاط واضحة للتدخل البشري. كما ينبغي أن ينتقل تقييم هذه الأنظمة من التركيز على نجاح المهمة النهائية إلى تقييم العملية كاملة: ماذا فعل النظام، ولماذا، وبأي مصادر وأدوات، وهل يستطيع الباحث مراجعة ذلك المسار؟ وتبدو هذه النقطة حاسمة في مستقبل الاستخدام البحثي. فالاستقلالية القصوى ليست هدفاً علمياً في ذاتها. قد يكون النظام الأقل استقلالاً، لكنه أكثر شفافية وقابلية للضبط، أنسب للبحث العلمي من نظام يؤدي عدداً أكبر من المهام دون أن يستطيع الباحث فهم قراراته أو التحقق منها.

ويرى الباحث أن التحدي الحقيقي الذي سيحدد قيمة الذكاء الاصطناعي الوكيل في البحث العلمي ليس مقدار ما يستطيع النظام القيام به دون الإنسان، وإنما مقدار ما يستطيع القيام به مع بقاء العملية العلمية قابلة للفهم والتحقق والمساءلة. فالبحث العلمي لا يقوم على الوصول إلى إجابة فقط؛ بل على معرفة كيف تم الوصول إليها، ولماذا يمكن الوثوق بها، ومن يتحمل مسؤوليتها. ومن ثم، فإن الاتجاه الأكثر نضجاً ليس بناء «باحث آلي مستقل»، وإنما بناء منظومة بحثية متكاملة فيها الذكاء البشري والقدرة الوكيلية ضمن حدود واضحة، بحيث تزيد التقنية قدرة الباحث من دون أن تنتزع منه سلطته العلمية أو مسؤوليته عن المعرفة التي ينتجها.

الخاتمة :

أظهر التحليل أن الذكاء الاصطناعي الوكيل يمثل تطوراً نوعياً في استخدام الذكاء الاصطناعي داخل البحث العلمي؛ إذ ينتقل من أداء مهام منفردة استجابةً لتوجيه الباحث إلى أنظمة تستطيع التخطيط، واستخدام الأدوات، وتنفيذ سلسلة من المهام المترابطة، ومراجعة بعض خطواتها، والعمل بدرجات متفاوتة من الاستقلالية. وهذا التحول يغير طبيعة العلاقة بين الباحث والتقنية، لأنه يوسع دور الذكاء الاصطناعي من المساندة إلى المشاركة في أجزاء متزايدة من العملية البحثية.

وكشف البحث أن تطبيقات الذكاء الاصطناعي الوكيل تمتد عبر مراحل متعددة من البحث العلمي. ففي المراحل الأولى، يمكن توظيفه في استكشاف المعرفة، وتوليد الأفكار والفرضيات، وتوسيع البدائل المتاحة أمام الباحث. وفي مراحل أكثر تقدماً، ظهرت تطبيقات في التحليل والمحاكاة والاكتشاف العلمي، وصولاً إلى المختبرات ذاتية القيادة والتجريب المؤتمت الذي يربط بين تصميم التجربة وتنفيذها وتحليل نتائجها وتوجيه الخطوة اللاحقة. وتؤكد هذه التطبيقات أن القيمة المحتملة للذكاء الاصطناعي الوكيل لا ترتبط بأتمتة مهمة منفردة بقدر ارتباطها بقدرته على الربط بين مهام بحثية كانت تُنفذ بصورة منفصلة. وفي المقابل، تبين أن ارتفاع مستوى الاستقلالية يضيف تحديات تتجاوز المشكلات المعروفة في الذكاء الاصطناعي التوليدي. فالخطأ في النظام الوكيل قد لا يبقى محصوراً في مخرج واحد، بل يمكن أن ينتقل عبر سلسلة من القرارات والإجراءات. ومن هنا تبرز قضايا الدقة، وقابلية التحقق والتكرار، وتتبع خطوات النظام، وصلاحية النتائج، إلى جانب قضايا النزاهة العلمية، والشفافية، وتحديد المسؤولية، وحدود الصلاحيات الممنوحة للوكيل. لذلك لا يكفي أن يكون النظام قادراً على إنجاز المهمة؛ بل يجب أن تكون طريقة إنجازها قابلة للفهم والمراجعة والتحقق العلمي.

كما أظهر التحليل أن العلاقة بين الإنسان والذكاء الاصطناعي لا ينبغي اختزالها في ثنائية الاستبدال أو الاستقلال الكامل. فالاستقلالية التقنية ليست قيمة علمية في ذاتها، كما أن زيادة عدد المهام التي يؤديها النظام لا تعني بالضرورة ارتفاع جودة البحث. تظل للباحث وظائف جوهرية لا تنفصل عن طبيعة المعرفة العلمية؛ أبرزها تحديد أهمية المشكلة، وتقدير قوة الدليل، وتفسير النتائج في سياقها، وضبط حدود الادعاء، وتحمل المسؤولية العلمية عن المخرجات.

وعليه، فإن الابتكار الحقيقي الذي يتيح الذكاء الاصطناعي الوكيل في البحث العلمي يتمثل في إعادة تنظيم سير العمل البحثي ورفع قدرته على الربط بين المعرفة والتحليل والتجريب، لا في إحلال النظام محل الباحث. وكلما اتسعت صلاحيات الوكيل، ازدادت الحاجة إلى إشراف بشري واضح، وحوكمة مناسبة، وآليات تسمح بتتبع قراراته والتحقق من مخرجاته.

نتائج البحث:

في ضوء التحليل الوصفي للأدبيات المرتبطة بالذكاء الاصطناعي الوكيل وتطبيقاته في البحث العلمي، توصل البحث إلى النتائج الآتية بما يجيب مباشرة عن تساؤلاته:

أولاً: النتائج المتعلقة بالإطار المفاهيمي للذكاء الاصطناعي الوكيل:

1. يتميز الذكاء الاصطناعي الوكيل عن الاستخدام التقليدي للذكاء الاصطناعي التوليدي وعن الوكلاء المنفردين بقدرته على العمل نحو هدف محدد، وتخطيط المهام، واستخدام الأدوات، وإدارة خطوات مترابطة، ومراجعة بعض مخرجاته بدرجات متفاوتة من الاستقلالية.

2. لا تمثل الوكيلية خاصية واحدة ثابتة، بل مجموعة من القدرات تشمل التخطيط، والذاكرة، واستخدام الأدوات، والتقييم، والتكيف، والتنسيق بين عدة وكلاء. كما تختلف البنى الوكيلية بين أنظمة أحادية الوكيل، ومتعددة الوكلاء، ومعززة بالأدوات، وأنظمة يحتفظ فيها الإنسان بنقاط تدخل وإشراف محددة.

3. يرتبط الابتكار البحثي الذي يتيح الذكاء الاصطناعي الوكيل بقدرته على ربط مهام بحثية متعددة داخل سير عمل واحد، وليس بمجرد إنتاج محتوى أو تنفيذ مهمة منفردة.

ثانياً: النتائج المتعلقة بتطبيقات الذكاء الاصطناعي الوكيل في البحث العلمي:

4. تمتد التطبيقات الحالية من توليد الأفكار والفرضيات إلى التحليل والمحاكاة والاكتشاف العلمي، ثم إلى التجريب المؤتمت والمختبرات ذاتية القيادة، بما يكشف اتساع الدور المحتمل للأنظمة الوكيلية عبر مراحل متعددة من البحث العلمي.

5. يظهر أعلى مستوى من التطور التطبيقي عندما يرتبط النظام الوكيل بقواعد المعرفة والأدوات العلمية والبرمجيات والأجهزة التجريبية؛ لأن القيمة البحثية لا تنتج عن النموذج اللغوي منفرداً، بل عن تكامل مكونات منظومة العمل البحثي.

6. تكشف تطبيقات المختبرات ذاتية القيادة عن تحول من أتمتة المهام إلى أتمتة حلقات القرار؛ حيث يمكن استخدام نتائج تجربة سابقة في توجيه الخطوة أو التجربة التالية ضمن دورة مترابطة.

7. لا يعني نجاح تطبيقات الذكاء الاصطناعي الوكيل في تخصصات محددة إمكان تعميم النتائج تلقائياً على جميع مجالات البحث العلمي؛ إذ تختلف طبيعة البيانات، والأدوات، ومتطلبات التحقق، ومستويات المخاطر بين التخصصات.

ثالثاً: النتائج المتعلقة بالتحديات والتكامل البشري-الآلي:

8. يؤدي تعدد خطوات العمل الوكيل إلى تحدٍ منهجي جوهري يتمثل في إمكان انتقال الخطأ وتراكمه عبر مراحل التنفيذ؛ ولذلك لا يكفي تقييم المخرج النهائي بمعزل عن المسار الذي أدى إليه.

9. تزداد أهمية قابلية التتبع والتفسير والتحقق كلما ارتفعت استقلالية النظام؛ لأن سلامة البحث العلمي تتطلب معرفة مصادر المعلومات، والأدوات المستخدمة، والقرارات التي اتخذها النظام، وإمكان مراجعة هذه الخطوات.

10. تفرض الأنظمة الوكيلية تحديات مباشرة تتعلق بالنزاهة العلمية والشفافية وتحديد المسؤولية، خصوصاً عندما يتولى النظام اختيار المصادر أو تنفيذ إجراءات أو إنتاج تحليلات متعددة المراحل.

11. لا تدعم الأدبيات افتراض أن التكامل بين الإنسان والذكاء الاصطناعي يؤدي تلقائياً إلى نتائج أفضل؛ إذ تتوقف قيمة التكامل على طبيعة المهمة وطريقة توزيع الأدوار ومستوى الإشراف.

12. يظل الباحث مسؤولاً عن تحديد المشكلة، وتقييم قوة الأدلة، وتفسير النتائج، وضبط حدود الادعاء، والتحقق من المخرجات. ومن ثم، فإن الاتجاه الأكثر اتساقاً مع طبيعة البحث العلمي هو التكامل المنضبط بين القدرات الوكيلية والحكم العلمي البشري، وليس الاستقلال الكامل للنظام.

التوصيات:

استناداً إلى النتائج السابقة، يوصي البحث بما يأتي:

1. اعتماد التحقق البشري في المراحل البحثية الجوهرية، وبخاصة عند اعتماد الفرضيات، واختيار الأدلة، وتفسير النتائج، وصياغة الاستنتاجات، وعدم التعامل مع استقلالية النظام الوكيل بوصفها بديلاً عن الحكم العلمي للباحث.
2. توثيق استخدام الأنظمة الوكيلية داخل العملية البحثية بصورة تسمح بتتبع المهام التي نفذها النظام، والمصادر والأدوات التي استخدمها، ونقاط التدخل البشري، بما يعزز قابلية المراجعة والتحقق وإعادة الفحص.
3. تقييم الأنظمة الوكيلية على مستوى العملية البحثية كاملة، لا على أساس المخرج النهائي فقط، بحيث يشمل التقييم دقة الخطوات الوسيطة، وموثوقية المصادر، وصحة استخدام الأدوات، واحتمال انتقال الأخطاء بين مراحل التنفيذ.
4. تحديد مستويات واضحة لتفويض المهام البحثية للذكاء الاصطناعي الوكيل وفق طبيعة المهمة ومستوى مخاطرها؛ بحيث تزيد الرقابة البشرية في المهام التي ترتبط بتفسير النتائج أو سلامة البيانات أو اتخاذ قرارات علمية جوهرية.
5. توجيه الدراسات المستقبلية نحو اختبار القيمة الفعلية للتكامل البشري-الآلي في مراحل البحث المختلفة من خلال المقارنة بين أداء الباحث، والنظام الوكيل، والعمل المشترك بينهما، بدل افتراض أن زيادة الأتمتة أو الاستقلالية تمثل في ذاتها تحسناً في جودة البحث العلمي.

❖ قائمة المصادر والمراجع:

- Abolhasani, M., and E. Kumacheva. "The Rise of Self-Driving Labs in Chemical and Materials Sciences." *Nature Synthesis* 2 (2023): 483–492. <https://doi.org/10.1038/s44160-022-00231-0>.
- Abou Ali, M., F. Dornaika, and J. Charafeddine. "Agentic AI: A Comprehensive Survey of Architectures, Applications, and Future Directions." *Artificial Intelligence Review*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11422-4>.
- Adabara, I., B. O. Sadiq, A. N. Shuaibu, et al. "Trustworthy Agentic AI Systems: A Cross-Layer Review of Architectures, Threat Models, and Governance Strategies for Real-World Deployment." *F1000Research* 14 (2025): 905. <https://doi.org/10.12688/f1000research.169927.1>.
- Bai, J., S. Mosbach, C. J. Taylor, et al. "A Dynamic Knowledge Graph Approach to Distributed Self-Driving Laboratories." *Nature Communications* 15 (2024): 462. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44599-9>.
- Bandi, Ajay, Bhavani Kongari, Roshini Naguru, Sahitya Pasnoor, and Sri Vidya Vilipala. "The Rise of Agentic AI: A Review of Definitions, Frameworks, Architectures, Applications, Evaluation Metrics, and Challenges." *Future Internet* 17, no. 9 (2025): 404. <https://doi.org/10.3390/fi17090404>.
- Bayley, O., E. Savino, A. Slattery, et al. "Autonomous Chemistry: Navigating Self-Driving Labs in Chemical and Material Sciences." *Matter* 7, no. 8 (2024): 2382–2398. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2024.06.003>.
- Bengio, Y., G. Hinton, A. Yao, et al. "Managing Extreme AI Risks amid Rapid Progress." *Science* 384, no. 6698 (2024): 842–845. <https://doi.org/10.1126/science.adn0117>.
- Boiko, D. A., R. MacKnight, B. Kline, and G. Gomes. "Autonomous Chemical Research with Large Language Models." *Nature* 624 (2023): 570–578. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06792-0>.
- Bolaños, F., A. A. Salatino, F. Osborne, and E. Motta. "Artificial Intelligence for Literature Reviews: Opportunities and Challenges." *Artificial Intelligence Review* 57 (2024): 259. <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10902-3>.
- Bran, Andres M., Sam Cox, Oliver Schilter, Carlo Baldassari, Andrew D. White, and Philippe Schwaller. "Augmenting Large Language Models with Chemistry Tools." *Nature Machine Intelligence* 6 (2024): 525–535. <https://doi.org/10.1038/s42256-024-00832-8>.

- Dai, T., S. Vijayakrishnan, F. T. Szczypiński, et al. "Autonomous Mobile Robots for Exploratory Synthetic Chemistry." *Nature* 635 (2024): 890–897. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08173-7>.
- Ferrag, M. A., N. Tihanyi, and M. Debbah. "From LLM Reasoning to Autonomous AI Agents: A Comprehensive Review." *IEEE Access*, 2026. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3698694>.
- Ganjavi, C., M. B. Eppler, A. Pekcan, et al. "Publishers' and Journals' Instructions to Authors on Use of Generative Artificial Intelligence in Academic and Scientific Publishing: Bibliometric Analysis." *BMJ* 384 (2024): e077192. <https://doi.org/10.1136/bmj-2023-077192>.
- Gao, C., X. Lan, N. Li, et al. "Large Language Models Empowered Agent-Based Modeling and Simulation: A Survey and Perspectives." *Humanities and Social Sciences Communications* 11 (2024): 1259. <https://doi.org/10.1057/s41599-024-03611-3>.
- Ghafarollahi, A., and M. J. Buehler. "SciAgents: Automating Scientific Discovery through Bioinspired Multi-Agent Intelligent Graph Reasoning." *Advanced Materials*, 2024. <https://doi.org/10.1002/adma.202413523>.
- Gottweis, J., W.-H. Weng, A. Daryin, et al. "Accelerating Scientific Discovery with Co-Scientist." *Nature*, 2026. <https://doi.org/10.1038/s41586-026-10644-y>.
- Hartung, T. "AI, Agentic Models and Lab Automation for Scientific Discovery—The Beginning of scAlnce." *Frontiers in Artificial Intelligence* 8 (2025): 1649155. <https://doi.org/10.3389/frai.2025.1649155>.
- Huang, K. *Agentic AI*. Progress in IS. Springer, 2025. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-90026-6>.
- Hysmith, H., E. Foadian, S. P. Padhy, et al. "The Future of Self-Driving Laboratories: From Human-in-the-Loop Interactive AI to Gamification." *Digital Discovery* 3 (2024): 621–636. <https://doi.org/10.1039/D4DD00040D>.
- Liu, Yiren, Pranav Sharma, Mehul Oswal, Haijun Xia, and Yun Huang. "PersonaFlow: Designing LLM-Simulated Expert Perspectives for Enhanced Research Ideation." In *DIS 2025: Proceedings of the 2025 ACM Designing Interactive Systems Conference*, 506–534. Association for Computing Machinery, 2025. <https://doi.org/10.1145/3715336.3735789>.
- Makke, N., and S. Chawla. "Interpretable Scientific Discovery with Symbolic Regression: A Review." *Artificial Intelligence Review* 57 (2024): 2. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10622-0>.
- Mandal, I., J. Soni, M. Zaki, et al. "Evaluating Large Language Model Agents for Automation of Atomic Force Microscopy." *Nature Communications* 16 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41467-025-64105-7>.
- Orouji, N., J. A. Bennett, R. B. Canty, et al. "Autonomous Catalysis Research with Human–AI–Robot Collaboration." *Nature Catalysis*, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41929-025-01430-6>.
- Ramos, M. C., C. J. Collison, and A. D. White. "A Review of Large Language Models and Autonomous Agents in Chemistry." *Chemical Science*, 2024. <https://doi.org/10.1039/D4SC03921A>.
- Rapp, J. T., B. J. Bremer, and P. A. Romero. "Self-Driving Laboratories to Autonomously Navigate the Protein Fitness Landscape." *Nature Chemical Engineering* 1 (2024): 97–107. <https://doi.org/10.1038/s44286-023-00002-4>.
- Sapkota, R., K. I. Roumeliotis, and M. Karkee. "AI Agents vs. Agentic AI: A Conceptual Taxonomy, Applications and Challenges." *Information Fusion* (2025): 103599. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2025.103599>.
- Sim, M., M. Ghazi Vakili, F. Strieth-Kalthoff, et al. "ChemOS 2.0: An Orchestration Architecture for Chemical Self-Driving Laboratories." *Matter* 7, no. 9 (2024): 2959–2977. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2024.04.022>.

- Su, Y., X. Wang, Y. Ye, et al. "Automation and Machine Learning Augmented by Large Language Models in a Catalysis Study." *Chemical Science*, 2024. <https://doi.org/10.1039/D3SC07012C>.
- Szymanski, N. J., B. Rendy, Y. Fei, et al. "An Autonomous Laboratory for the Accelerated Synthesis of Novel Materials." *Nature* 624 (2023): 86–91. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06734-w>.
- Taeiagh, A. "Governance of Generative AI." *Policy and Society* 44, no. 1 (2025): 1–22. <https://doi.org/10.1093/polsoc/puaf001>.
- Vaccaro, M., A. Almaatouq, and T. Malone. "When Combinations of Humans and AI Are Useful: A Systematic Review and Meta-Analysis." *Nature Human Behaviour* 8 (2024): 2293–2303. <https://doi.org/10.1038/s41562-024-02024-1>.
- Volk, A. A., R. W. Epps, D. T. Yonemoto, et al. "AlphaFlow: Autonomous Discovery and Optimization of Multi-Step Chemistry Using a Self-Driven Fluidic Lab Guided by Reinforcement Learning." *Nature Communications* 14 (2023): 1403. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37139-y>.
- Wang, L., C. Ma, X. Feng, et al. "A Survey on Large Language Model Based Autonomous Agents." *Frontiers of Computer Science* 18, no. 6 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11704-024-40231-1>.
- Yang, E.-W., and E. Velazquez-Villarreal. "AI-HOPE: An AI-Driven Conversational Agent for Enhanced Clinical and Genomic Data Integration in Precision Medicine Research." *Bioinformatics* 41, no. 7 (2025). <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btaf359>.
- Yigit, Y., M. A. Ferrag, M. C. Ghanem, et al. "Generative AI and LLMs for Critical Infrastructure Protection: Evaluation Benchmarks, Agentic AI, Challenges, and Opportunities." *Sensors* 25, no. 6 (2025): 1666. <https://doi.org/10.3390/s25061666>.
- Yoshikawa, N., M. Skreta, K. Darvish, et al. "Large Language Models for Chemistry Robotics." *Autonomous Robots* 47 (2023): 1057–1086. <https://doi.org/10.1007/s10514-023-10136-2>.
- Zhao, L., S. Liu, T. Xin, et al. "AI Agent in Healthcare: Applications, Evaluations, and Future Directions." *npj Artificial Intelligence* 2 (2026). <https://doi.org/10.1038/s44387-026-00076-4>.
- Zhao, W. X., K. Zhou, J. Li, et al. "A Survey of Large Language Models." *Frontiers of Computer Science*, 2026. <https://doi.org/10.1007/s11704-026-60308-3>.
- Zhao, Y., R. Zhang, W. Li, et al. "Assessing and Understanding Creativity in Large Language Models." *Machine Intelligence Research*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11633-025-1546-4>.
- Zimmermann, Y., A. Bazgir, A. Al-Feghali, et al. "32 Examples of LLM Applications in Materials Science and Chemistry: Towards Automation, Assistants, Agents, and Accelerated Scientific Discovery." *Machine Learning: Science and Technology*, 2025. <https://doi.org/10.1088/2632-2153/ae011a>.