MESR
منار الشرق للدراسات والأبحاث
Manar Elsharq for Studies & Research
Middle East Journal
of Educational and Psychological Sciences
Homepage:
http://meijournals.com/ar/index.php/mejeps/index
مجلة الشرق الأوسط
للعلوم التربوية والنفسية
ISSN 2789-1828

تطوير طرق صديقة للبيئة لتحضير المركبات العضوية باستخدام المحفزات النانوية

Developing eco-friendly methods for the preparation of .organic compounds using nanocatalysts

اسراء عبد المنعم شهاب احمد الأمين

Israa Abdel-Moneim Shehab Ahmed Al-Amin

مديرية تربية صلاح الدين – قسم تربية تكريت

Salah al-Din Education Directorate - Tikrit Education Department

استلام البحث: 14/06/2026 **مراجعة البحث: 12/07/2026** **قبول البحث: 09/08/2026**

الملخص:

تناول هذا البحث تطوير طرق صديقة للبيئة لتحضير المركبات العضوية باستخدام المحفزات النانوية، باعتبارها أحد الاتجاهات الحديثة في مجال الكيمياء العضوية والكيمياء الخضراء. يركز البحث على دراسة الخصائص الأساسية للمحفزات النانوية والعوامل التي تؤثر في كفاءتها، بالإضافة إلى تحليل دورها في تحسين سرعة التفاعلات العضوية، وزيادة مردود النواتج، وتقليل استهلاك الطاقة والمذيبات والمواد الكيميائية الضارة. كما استعرض البحث التطبيقات العملية للمحفزات النانوية في البيئة البحثية العراقية وأثرها في تطوير طرق أكثر كفاءة واستدامة لتحضير المركبات العضوية. وتوصل البحث إلى أن استخدام الجسيمات النانوية المعدنية، وأكاسيد الفلزات النانوية، والمحفزات النانوية المغناطيسية، والمواد النانوية الكربونية يسهم بفعالية في تحسين النشاط والانتقائية التحفيزية، وتقليل زمن التفاعل والنفايات الكيميائية، فضلًا عن إمكانية استرجاع بعض المحفزات وإعادة استخدامها. ويوصي البحث بالتركيز على الدراسات التطبيقية البينية، وتعزيز التعاون البحثي المحلي والدولي، وتوفير الدعم المؤسسي والمختبري لضمان نقل نتائج البحث من المختبر إلى التطبيقات العملية والصناعية، بما يسهم في تطوير عمليات تحضير عضوية أكثر أمانًا وكفاءة واستدامة.

الكلمات المفتاحية: الكيمياء العضوية، الكيمياء الخضراء، المحفزات النانوية، التحضير العضوي، الاستدامة البيئية.

Abstract

This study addresses the development of environmentally friendly methods for the synthesis of organic compounds using nanocatalysts, as one of the modern approaches in organic and green chemistry. The research focuses on investigating the fundamental properties of nanocatalysts and the factors affecting their efficiency, as well as analyzing their role in improving the rate of organic reactions, increasing product yields, and reducing energy consumption and the use of harmful solvents and chemicals. The study also reviews practical applications of nanocatalysts within the Iraqi research environment and their impact on developing more efficient and sustainable methods for organic synthesis. The research concludes that the use of metal nanoparticles, metal oxide nanoparticles, magnetic nanocatalysts, and carbon-based nanomaterials can effectively enhance catalytic activity and selectivity, reduce reaction time and chemical waste, and enable the recovery and reuse of certain catalysts. The study recommends focusing on applied interdisciplinary research, strengthening local and international research collaboration, and providing institutional and laboratory support to facilitate the transfer of research outcomes from laboratory scale to practical and industrial applications, thereby contributing to the development of safer, more efficient, and more sustainable organic synthesis processes.

Keywords: Organic Chemistry, Green Chemistry, Nanocatalysts, Organic Synthesis, Environmental Sustainability.

المقدمة

أصبحت قضايا التلوث البيئي والاستدامة في العصر الحديث من أبرز التحديات التي تواجه المجتمعات الإنسانية، ولا سيما في ظل التوسع المستمر في الصناعات الكيميائية، والاعتماد المتزايد على المواد والمذيبات التقليدية، فضلا عن الآثار البيئية السلبية الناجمة عن العمليات الكيميائية المختلفة، مثل تراكم النفايات الخطرة، وزيادة الانبعاثات، واستهلاك كميات كبيرة من الطاقة والمواد الأولية. وقد أدى ذلك إلى تنامي الاهتمام العالمي بمفاهيم الكيمياء الخضراء بوصفها توجها علميا حديثا يهدف إلى تطوير عمليات كيميائية أكثر أمانا واستدامة، من خلال تقليل استخدام المواد الضارة والحد من تكوين النفايات وتحسين كفاءة التفاعلات الكيميائية. وتُعدّ الكيمياء العضوية من أكثر المجالات ارتباطا بهذا التوجه، نظرا إلى الدور الواسع الذي تؤديه المركبات العضوية في الصناعات الدوائية والغذائية والبتروكيميائية والبوليمرية وغيرها من التطبيقات المختلفة وفي هذا السياق حظيت عمليات تحضير المركبات العضوية باهتمام كبير باعتبارها من العمليات الأساسية في الصناعات الكيميائية والبحث العلمي. وعلى الرغم من التطور الملحوظ الذي شهدته طرائق التحضير العضوي التقليدية، إلا أن بعض هذه الطرائق ما تزال تعتمد على ظروف تفاعل قاسية، ودرجات حرارة مرتفعة، وكميات كبيرة من المذيبات والمواد الكيميائية، فضلا عن الحاجة إلى أزمنة تفاعل طويلة وإنتاج نواتج ثانوية قد تكون ضارة بالبيئة. وقد دفعت هذه التحديات الباحثين إلى استكشاف طرائق جديدة أكثر كفاءة وأقل تأثيرا في البيئة، تجمع بين تحسين مردود التفاعلات وتقليل استهلاك الطاقة والمواد الكيميائية الخطرة ، ومن هنا برز استخدام المحفزات النانوية بوصفه أحد الاتجاهات الواعدة في تطوير طرائق صديقة للبيئة لتحضير المركبات العضوية، لما تمتلكه هذه المحفزات من خصائص متميزة تتمثل في صغر حجم الجسيمات، وارتفاع مساحة السطح الفعالة، وزيادة عدد المواقع النشطة، الأمر الذي يؤدي إلى تحسين سرعة التفاعلات الكيميائية ورفع كفاءتها وتقليل كمية المحفز المستخدمة. كما يمكن استرجاع بعض أنواع المحفزات النانوية وإعادة استخدامها في أكثر من دورة تفاعلية، مما يسهم في تقليل النفايات وخفض الكلفة وتحقيق مبادئ الاستدامة في العمليات الكيميائية ، إلا أن استخدام المحفزات النانوية في تحضير المركبات العضوية لا يخلو من تحديات جوهرية، إذ تتطلب كفاءة هذه المحفزات التحكم الدقيق في حجم الجسيمات وشكلها وتركيبها الكيميائي وطرق تثبيتها، فضلا عن

ضرورة ضمان استقرارها أثناء التفاعل وإمكانية فصلها واسترجاعها دون فقدان فعاليتها التحفيزية. وقد شكّلت هذه الجوانب محورا مهما في الدراسات الحديثة الهادفة إلى تطوير أنظمة تحفيزية نانوية قادرة على تحقيق تفاعلات عضوية بكفاءة عالية وفي ظروف أكثر اعتدالا وأمانا ، وفي ضوء هذه التحديات، برزت تقنيات النانو بوصفها أحد المسارات العلمية الحديثة القادرة على إحداث نقلة نوعية في مجال التحضير العضوي المستدام، إذ تتيح التحكم في خصائص المواد المحفزة على المستويين الذري والجزيئي، بما يسمح بتحسين نشاطها وانتقائيتها وثباتها أثناء التفاعلات الكيميائية. كما أن توظيف المحفزات النانوية في التفاعلات العضوية يسهم في تقليل درجات الحرارة وأزمنة التفاعل، وتحسين نسبة الناتج، والحد من استخدام المذيبات والمواد الضارة، الأمر الذي ينعكس إيجابا على تطوير طرائق تحضير أكثر توافقا مع مبادئ الكيمياء الخضراء وأكثر ملاءمة للمتطلبات البيئية والصناعية الحديثة.

أولا : مشكلة البحث

على الرغم من التطورات المتسارعة في مجال الكيمياء العضوية والكيمياء الخضراء، إلا أن العديد من طرق تحضير المركبات العضوية ما تزال تعتمد على استخدام مذيبات ومواد كيميائية قد تكون ضارة بالبيئة، فضلًا عن حاجتها إلى درجات حرارة مرتفعة، وأزمنة تفاعل طويلة، واستهلاك كميات كبيرة من الطاقة، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة النفايات الكيميائية وارتفاع الكلفة وتقليل الاستدامة البيئية للعمليات التحضيرية. وتعود هذه المشكلة إلى مجموعة من العوامل، من أبرزها انخفاض كفاءة بعض المحفزات التقليدية، وصعوبة استرجاعها وإعادة استخدامها، والحاجة إلى تحسين انتقائية التفاعلات ومردود النواتج، فضلًا عن ضرورة تقليل استخدام المواد والمذيبات الخطرة. ومن هنا تتحدد مشكلة البحث في التساؤل الرئيس الآتي: **إلى أي مدى يمكن لتطوير طرق صديقة للبيئة باستخدام المحفزات النانوية أن يسهم في تحسين كفاءة تحضير المركبات العضوية وتقليل الآثار البيئية المرتبطة بالطرق التقليدية؟**

ثانيا : أهمية البحث

تتجلى أهمية البحث في كونه يتناول أحد الموضوعات العلمية الحديثة ذات الأبعاد التطبيقية والبيئية، ولا سيما في ظل التوجه العالمي نحو اعتماد مبادئ الكيمياء الخضراء وتقليل الآثار السلبية الناتجة عن العمليات الكيميائية التقليدية. وتنبع أهمية هذا البحث من إسهامه في توضيح الدور الذي تؤديه المحفزات النانوية في تطوير طرق أكثر كفاءة وأمانًا لتحضير المركبات العضوية، بما يسهم في تقليل استهلاك الطاقة والمواد الكيميائية الضارة وتحسين مردود التفاعلات. كما تكمن أهميته في إثراء الجانب النظري والمعرفي في مجال الكيمياء العضوية وتقنيات النانو، وتقديم إطار علمي يمكن أن يفيد الباحثين والمهتمين بهذا المجال، فضلًا عن دعم الجهود الرامية إلى تطوير طرق تحضيرية صديقة للبيئة ومنخفضة الكلفة وأكثر توافقًا مع متطلبات الاستدامة الحديثة.

ثالثا : أهداف البحث

يهدف البحث إلى تحقيق مجموعة من الأهداف، تتمثل في:

1. دراسة الأسس والمبادئ المرتبطة بتحضير المركبات العضوية باستخدام الطرق الصديقة للبيئة.

2. تحليل دور المحفزات النانوية في تحسين كفاءة التفاعلات العضوية وتقليل استهلاك الطاقة والمواد الكيميائية الضارة.
3. استعراض وتقييم أبرز أنواع المحفزات النانوية المستخدمة في تحضير المركبات العضوية.
4. بيان أثر استخدام المحفزات النانوية في تحسين مردود التفاعلات وتقليل النواتج الثانوية والمخلفات الكيميائية.
5. تقديم تصور علمي يمكن الاستفادة منه في تطوير أبحاث مستقبلية تسهم في اعتماد طرق أكثر استدامة وأمانًا لتحضير المركبات العضوية.

رابعا : فرضيات البحث

ينطلق البحث من مجموعة من الفرضيات العلمية، من أبرزها:

1. توجد علاقة ذات دلالة علمية بين استخدام المحفزات النانوية وتطوير طرق صديقة للبيئة لتحضير المركبات العضوية.
2. يسهم استخدام المحفزات النانوية في تحسين كفاءة التفاعلات العضوية وتقليل استهلاك الطاقة والمواد الكيميائية الضارة.
3. تؤدي الخصائص السطحية والحجم النانوي للمحفزات إلى زيادة سرعة التفاعلات وتحسين مردود النواتج العضوية.
4. ينعكس استخدام المحفزات النانوية إيجابًا على تقليل النفايات الكيميائية وإمكانية استرجاع المحفزات وإعادة استخدامها، بما يعزز الاستدامة البيئية لعمليات التحضير العضوي.

خامسا : حدود البحث

يتحدد البحث ضمن الحدود الآتية:

الحدود الموضوعية: يقتصر البحث على دراسة تطوير الطرق الصديقة للبيئة لتحضير المركبات العضوية باستخدام المحفزات النانوية، دون التطرق بصورة تفصيلية إلى طرق التحضير التقليدية أو المجالات الكيميائية الأخرى غير المرتبطة بموضوع البحث.

الحدود المكانية: تقتصر الدراسة على البيانات والتجارب والدراسات التي يمكن الوصول إليها ضمن المختبرات والمصادر العلمية المتاحة.

سادسا : منهجية البحث

يعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي من خلال مراجعة وتحليل الأدبيات العلمية والدراسات السابقة المتعلقة بطرق تحضير المركبات العضوية والمحفزات النانوية والكيمياء الخضراء، بهدف استخلاص النتائج العلمية ذات الصلة بموضوع البحث، كما يستعين البحث بالمنهج المقارن لمقارنة كفاءة طرق التحضير العضوي التقليدية والطرق الصديقة للبيئة المعتمدة على المحفزات النانوية، وفي حال توفر الإمكانات، يمكن توظيف المنهج التجريبي لدراسة تأثير بعض المحفزات النانوية على كفاءة التفاعلات العضوية ومردود النواتج وتقليل استهلاك الطاقة والمواد الكيميائية الضارة بشكل عملي.

الفصل الأول
الإطار النظري والمفاهيمي

أولاً: مفهوم المحفزات النانوية وتطورها

المحفزات النانوية (Nanocatalysts) تمثل فئة من المواد المحفزة التي تكون أبعادها أو مكوناتها الفعالة ضمن المقياس النانوي، وتُستخدم لتسريع التفاعلات الكيميائية وتحسين كفاءتها من خلال زيادة المساحة السطحية الفعالة وتوفير عدد أكبر من المواقع النشطة مقارنة بالمحفزات التقليدية. وتقوم فكرة التحفيز النانوي على استثمار الخصائص الفيزيائية والكيميائية المميزة للمواد عند الأبعاد النانوية، الأمر الذي يسهم في زيادة النشاط التحفيزي وتحسين الانتقائية وتقليل كمية المحفز المطلوبة لإتمام التفاعل. وقد أصبحت هذه المحفزات من الأدوات المهمة في الكيمياء العضوية الخضراء، إذ تُستخدم في تحضير العديد من المركبات العضوية ضمن ظروف تفاعل أكثر اعتدالًا وأقل استهلاكًا للطاقة والمواد الكيميائية الضارة [1]

وحظيت المحفزات النانوية باهتمام كبير خلال السنوات الماضية بسبب مميزاتها الأساسية، ومنها **ارتفاع النشاط التحفيزي، وزيادة مساحة السطح، وتحسين الانتقائية، وإمكانية الاسترجاع وإعادة الاستخدام لبعض أنواعها** .كما أسهم استخدامها في تطوير العديد من التفاعلات العضوية من خلال تقليل زمن التفاعل ودرجات الحرارة اللازمة، وتحسين مردود النواتج، والحد من تكوين النواتج الثانوية والمخلفات الكيميائية. وأصبح توظيف المحفزات النانوية ضمن مبادئ الكيمياء الخضراء أحد الاتجاهات الحديثة التي تهدف إلى تطوير طرق تحضير عضوية أكثر أمانًا واقتصادية واستدامة، ولا سيما مع استخدام الماء والإيثانول والمذيبات الخضراء أو إجراء بعض التفاعلات في ظروف خالية من المذيبات[2]

ويعود تطور استخدام المحفزات النانوية في تحضير المركبات العضوية إلى مراحل متعددة:

في البداية اعتمدت عمليات التحفيز العضوي بصورة رئيسة على **المحفزات التقليدية المتجانسة وغير المتجانسة،** التي حققت نتائج جيدة في كثير من التفاعلات، إلا أن بعضها واجه مشكلات تتعلق بصعوبة الفصل وإعادة الاستخدام وتكوين المخلفات الكيميائية.

ثم تطور الاتجاه نحو استخدام **الجسيمات النانوية المعدنية وأكاسيد الفلزات النانوية** بوصفها محفزات ذات مساحة سطحية مرتفعة ونشاط تحفيزي أكبر، مما أسهم في تحسين سرعة التفاعلات العضوية ومردود النواتج.

ثانيا ثانياً: أساسيات الكيمياء الخضراء وتطبيقاتها في التحضير العضوي

[1] Agarwal, N., Solanki, V. S., Pare, B., Singh, N., & Jonnalagadda, S. B. (2023). Current trends in nanocatalysis for green chemistry and its applications: A mini-review. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 41, 100788.
[2] Chaudhary, K., & Masram, D. T. (2024). Application of Nanocatalysts in Greener Synthesis of Chemical Compounds. In M. Sen (Ed.), Sustainable Green Catalytic Processes. Wiley.

الكيمياء الخضراء (Green Chemistry) هي مجال علمي يهتم بتصميم وتطوير العمليات والمنتجات الكيميائية بطريقة تقلل أو تمنع استخدام وتكوين المواد الخطرة، مع العمل على خفض استهلاك الطاقة والمواد الأولية والحد من النفايات الناتجة عن التفاعلات الكيميائية. وفي مجال تحضير المركبات العضوية، تسهم مبادئ الكيمياء الخضراء في تطوير طرق أكثر أمانًا واستدامة من خلال زيادة اقتصاد الذرة، واستخدام المذيبات الآمنة، وتقليل استهلاك الطاقة، والاعتماد على التحفيز بدلًا من الكواشف المتكافئة، مما يساعد على تحسين كفاءة عمليات التحضير وتقليل تأثيراتها البيئية[3].

تتضمن تطبيقات الكيمياء الخضراء والمحفزات النانوية في تحضير المركبات العضوية عدة استراتيجيات، مثل:

1. المحفزات النانوية المعدنية وأكاسيد الفلزات التي تمتلك مساحة سطحية مرتفعة وعددًا كبيرًا من المواقع النشطة، مما يساعد في تسريع التفاعلات العضوية وتحسين مردود النواتج مع استخدام كميات أقل من المحفز.

2. المحفزات النانوية المغناطيسية التي تتميز بسهولة فصلها عن وسط التفاعل باستخدام المجال المغناطيسي، وإمكانية استرجاعها وإعادة استخدامها لعدة دورات، الأمر الذي يسهم في تقليل النفايات الكيميائية وخفض استهلاك المواد.

3. المحفزات النانوية الضوئية التي تستفيد من الطاقة الضوئية، ولا سيما الضوء المرئي، في تنشيط بعض التفاعلات العضوية تحت ظروف أكثر اعتدالًا، مما يسهم في تقليل الحاجة إلى درجات الحرارة المرتفعة ومصادر الطاقة التقليدية. [4]

وتلعب الكيمياء الخضراء وتقنيات التحفيز النانوي دورًا بالغ الأهمية في تطوير طرق تحضير المركبات العضوية، إذ تسهم في تقليل استخدام المذيبات العضوية الخطرة، وخفض كمية المخلفات، وتحسين كفاءة التفاعلات وانتقائيتها، وتقليل استهلاك الطاقة. كما تفتح المجال أمام ابتكار طرق تحضير حديثة تعتمد على الماء أو المذيبات الصديقة للبيئة والتحفيز النانوي، بما يحقق قدرًا أكبر من الاستدامة والأمان في الصناعات الكيميائية والدوائية [5]

ثالثاً: آليات فقد الكفاءة في التحضير العضوي باستخدام المحفزات النانوية

رغم المزايا المتعددة للمحفزات النانوية في تحضير المركبات العضوية، تواجه هذه المحفزات سلسلة من العوامل التي قد تحد من كفاءتها أثناء التفاعلات الكيميائية، ولا سيما عند تكرار استخدامها أو تطبيقها على نطاق واسع. ويمكن تلخيص هذه العوامل في العناصر التالية:

1. تكتل الجسيمات النانوية (Nanoparticle Aggregation)

تمتلك الجسيمات النانوية طاقة سطحية مرتفعة بسبب صغر حجمها ومساحتها السطحية الكبيرة، مما قد يؤدي إلى تجمعها وتكتلها أثناء التفاعل. ويؤدي هذا التكتل إلى انخفاض المساحة السطحية الفعالة وتقليل عدد المواقع التحفيزية المتاحة، الأمر الذي يسبب انخفاض النشاط التحفيزي وكفاءة التفاعل مع مرور الوقت

2. تسرب المكونات الفعالة من المحفز (Catalyst Leaching)

[3] American Chemical Society (ACS). 12 Principles of Green Chemistry. Green Chemistry Institute.
[4] Sharma, S., Gallou, F., & Handa, S. (2024). Towards a sustainable tomorrow: advancing green practices in organic chemistry. Green Chemistry, 26, 6289–6317.
[5] https://www.acs.org/green-chemistry-sustainability/principles/12-principles-of-green-chemistry.html?utm_source=chatgpt.com "12 Principles of Green Chemistry - American Chemical Society"

قد تتعرض بعض المحفزات النانوية، ولا سيما المحفزات المحتوية على الفلزات، إلى تسرب جزء من مكوناتها الفعالة إلى وسط التفاعل. ويؤدي ذلك إلى انخفاض كمية المادة التحفيزية المتاحة، فضلًا عن احتمال تلوث النواتج ببقايا الفلزات، مما يقلل من استقرار المحفز وإمكانية إعادة استخدامه بكفاءة [6]

3. انخفاض الانتقائية وتكوين النواتج الثانوية

تعتمد كفاءة المحفز النانوي بصورة كبيرة على حجمه وشكله وتركيبه وطبيعة المواقع النشطة الموجودة على سطحه. وفي حال عدم التحكم الدقيق في هذه الخصائص، قد تحدث تفاعلات جانبية تؤدي إلى تكوين نواتج غير مرغوبة، الأمر الذي يقلل من انتقائية التفاعل ومردود المركب العضوي المطلوب. لذلك يُعد التحكم في الخصائص السطحية والبنيوية للمحفز من العوامل الأساسية لتحقيق كفاءة تحفيزية مرتفعة

4. فقد النشاط أثناء الاسترجاع وإعادة الاستخدام

بعد انتهاء التفاعل، يمكن فصل بعض المحفزات النانوية واسترجاعها لاستخدامها في دورات تفاعلية أخرى، إلا أن عمليات الفصل والغسل وإعادة الاستخدام المتكررة قد تؤدي إلى تغير في تركيب المحفز أو فقد جزء من مواقعه النشطة، مما يسبب انخفاض النشاط التحفيزي تدريجيًا وتقليل كفاءة عملية التحضير العضوي. ولذلك تُعد قابلية الاسترجاع والثبات من أهم المعايير المستخدمة في تقييم المحفزات النانوية الصديقة للبيئة [7]

الفصل الثاني

التقنيات النانوية المستخدمة في تطوير طرق صديقة للبيئة لتحضير المركبات العضوية

تمثل تقنية النانو أحد أهم التطورات العلمية الحديثة في مجال الكيمياء العضوية الخضراء، وذلك لأنها تسمح بالتحكم في حجم وشكل وتركيب المواد المحفزة على المستوى النانوي، مما يؤدي إلى زيادة المساحة السطحية وعدد المواقع الفعالة وتحسين النشاط والانتقائية التحفيزية. ويسهم ذلك في إجراء العديد من التفاعلات العضوية تحت ظروف أكثر اعتدالًا، مع تقليل زمن التفاعل واستهلاك الطاقة والمذيبات والكواشف الكيميائية، فضلًا عن إمكانية فصل بعض المحفزات واسترجاعها وإعادة استخدامها، وهو ما ينسجم مع مبادئ الكيمياء الخضراء والاستدامة البيئية.

1. الجسيمات النانوية المعدنية وأكاسيد الفلزات

تُعد الجسيمات النانوية المعدنية وأكاسيد الفلزات من أهم أنواع المحفزات المستخدمة في تطوير طرق صديقة للبيئة لتحضير المركبات العضوية، ومن أمثلتها الجسيمات النانوية لأكاسيد الزنك والتيتانيوم والزركونيوم والحديد والنحاس وغيرها. وتمتلك هذه المواد مساحة سطحية مرتفعة مقارنة بحجمها، مما يوفر عددًا كبيرًا من المواقع النشطة القادرة على التفاعل مع المواد المتفاعلة وتسريع عملية التحول الكيميائي.[8]

وقد استُخدمت محفزات أكاسيد الفلزات النانوية في العديد من التفاعلات العضوية، مثل تفاعلات الأكسدة والاختزال والتكاثف وتكوين الروابط وتحضير المركبات الحلقية غير المتجانسة. ويساعد استخدامها على تحسين مردود النواتج وتقليل كمية المحفز

[6] Sharma, S., Gallou, F., & Handa, S. (2024). Towards a sustainable tomorrow: advancing green practices in organic chemistry. Green Chemistry, 26.
[7] Agarwal, N., Solanki, V. S., Pare, B., Singh, N., & Jonnalagadda, S. B. (2023). Current trends in nanocatalysis for green chemistry and its applications: A mini-review. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 41, 100788.
[8] Agarwal, N., Solanki, V. S., Pare, B., Singh, N., & Jonnalagadda, S. B. (2023). Current trends in nanocatalysis for green chemistry and its applications: A mini-review. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 41, 100788.

والكواشف المستخدمة، فضلًا عن إمكانية تنفيذ بعض التفاعلات في ظروف معتدلة أو خالية من المذيبات. ويُظهر ذلك أهمية التحكم في حجم وشكل ومساحة سطح الجسيمات النانوية في تعزيز النشاط التحفيزي وتحقيق طرق تحضير أكثر توافقًا مع متطلبات الكيمياء الخضراء.

2. المحفزات النانوية المغناطيسية والهياكل من نوع القلب–الغلاف (Core–Shell)

تلعب المحفزات النانوية المغناطيسية دورًا مهمًا في التحضير العضوي المستدام، ولا سيما الجسيمات القائمة على أكاسيد الحديد المغناطيسية التي يمكن تعديل سطحها أو تغليفها بمواد فعالة لتكوين هياكل من نوع القلب–الغلاف (Core–Shell). ويسمح هذا التصميم بالجمع بين النشاط التحفيزي المرتفع وإمكانية فصل المحفز بسهولة عن مزيج التفاعل باستخدام مجال مغناطيسي خارجي.[9]

وتتمثل إحدى أهم مزايا هذه المحفزات في إمكانية استرجاعها وإعادة استخدامها لعدة دورات تفاعلية، مما يقلل من استهلاك المواد وتكوين النفايات الكيميائية، ويسهم في خفض الكلفة التشغيلية. كما يمكن تعديل الطبقة الخارجية للمحفز وإضافة مجموعات وظيفية أو فلزات إليها بهدف تحسين الانتقائية والنشاط والثبات أثناء التفاعلات العضوية. وقد استُخدمت هذه الأنظمة في تفاعلات الاقتران والأكسدة والاختزال والتفاعلات متعددة المكونات وتحضير المركبات الحلقية المختلفة.

3. المحفزات النانوية الهجينة ومتعددة الوظائف

بالإضافة إلى المحفزات النانوية البسيطة، تم تطوير محفزات نانوية هجينة ومتعددة الوظائف تجمع بين أكثر من مادة أو خاصية داخل نظام تحفيزي واحد. ومن أمثلتها الجسيمات المعدنية المثبتة على مواد نانوية مسامية، والمحفزات القائمة على الأطر الفلزية العضوية (Metal–Organic Frameworks – MOFs)، التي تمتلك مساحة سطحية كبيرة وبنية مسامية قابلة للتحكم.

يساعد هذا النوع من المحفزات على توفير بيئة مناسبة لامتزاز المواد المتفاعلة وزيادة تفاعلها مع المواقع النشطة، مما قد يؤدي إلى تحسين سرعة التفاعل والانتقائية ومردود الناتج. كما يمكن تصميم هذه المحفزات لتلائم تفاعلات عضوية معينة، مثل تفاعلات الأكسدة والإبوكسدة وتفاعلات الاقتران من نوع Suzuki وHeck وSonogashira. ويعكس ذلك أهمية الدمج بين البنية النانوية والوظائف الكيميائية المختلفة في تطوير أنظمة تحفيزية أكثر كفاءة وقابلية لإعادة الاستخدام.

4. المحفزات النانوية الضوئية في التحضير العضوي

أظهرت المحفزات النانوية الضوئية (Nanophotocatalysts) أهمية متزايدة في مجال الكيمياء العضوية الخضراء، إذ تستطيع امتصاص الطاقة الضوئية واستخدامها في تنشيط التفاعلات الكيميائية بدلًا من الاعتماد الكامل على التسخين التقليدي. وتشمل هذه المواد ثاني أكسيد التيتانيوم وبعض أشباه الموصلات والنقاط الكمومية والمواد الكربونية النانوية.[10]

وقد استُخدمت هذه المحفزات في عدد من التحولات العضوية، ولا سيما تفاعلات الأكسدة والاختزال وتكوين الروابط وتحويل المجموعات الوظيفية تحت تأثير الأشعة فوق البنفسجية أو الضوء المرئي. ويساعد استخدام الضوء، وخاصة عندما يكون مصدره الطاقة الشمسية أو مصادر منخفضة الاستهلاك، على تقليل الحاجة إلى درجات الحرارة والضغوط المرتفعة، مما يجعل التحفيز الضوئي أحد الاتجاهات الواعدة في تطوير طرق أكثر استدامة لتحضير المركبات العضوية.[11]

[9] Sharma, R. K., Bandichhor, R., Mishra, V., Sharma, S., Yadav, S., et al. (2023). Advanced metal oxide-based nanocatalysts for the oxidative synthesis of fine chemicals. Materials Advances, 4, 1795–1830.

[10] Green magnetic nanoparticles in catalysis/catalysts for organic transformations. (2024). In Green Magnetic Nanoparticles: Recent Developments in Preparation and Application, pp. 175–204.

[11] Xia, C., Wu, J., Delbari, S. A., Namini, A. S., Yuan, Y., et al. (2023). Metal-organic framework-based nanostructured catalysts: Applications in efficient organic transformations. Molecular Catalysis, 546, 113217.

5. المواد النانوية الكربونية والمحفزات المدعومة

تلعب المواد النانوية الكربونية، مثل الغرافين وأكسيد الغرافين والأنابيب الكربونية النانوية، دورًا متزايدًا في التحفيز العضوي، إذ يمكن استخدامها بصورة مباشرة كمحفزات أو بوصفها دعامات لتثبيت الجسيمات النانوية المعدنية. وتتميز هذه المواد بمساحتها السطحية المرتفعة واستقرارها الكيميائي وإمكانية تعديل سطحها بمجموعات وظيفية مختلفة، الأمر الذي يساعد على زيادة التفاعل بين المحفز والمواد العضوية[12].

كما يسهم تثبيت الجسيمات النانوية على الدعامات المناسبة في تقليل تكتل الجسيمات وتحسين ثباتها وسهولة فصلها وإعادة استخدامها، فضلًا عن إمكانية تحسين النشاط والانتقائية من خلال التفاعل المشترك بين المادة الداعمة والمكون النانوي الفعال. وتؤكد هذه الاستراتيجية أن التحكم في الحجم والشكل والتوزيع السطحي والتركيب الكيميائي للمحفزات النانوية لا يهدف فقط إلى زيادة سرعة التفاعل، بل يسهم كذلك في تقليل الفاقد والنفايات وتحسين كفاءة استخدام المواد، بما يدعم تطوير عمليات تحضير عضوية أكثر استدامة وصداقة للبيئة. [13]

الفصل الثالث

التحليل والتطبيقات العملية للمحفزات النانوية في التحضير العضوي الصديق للبيئة

يُعنى هذا الفصل بتحليل التطبيقات العملية للمحفزات النانوية في مجال تحضير المركبات العضوية بطرق صديقة للبيئة، مع التركيز على الجهود البحثية والأكاديمية التي أُنجزت في الجامعات والمراكز البحثية العراقية، وبيان مدى إسهامها في تطوير هذا المجال، سواء على المستوى النظري أو التطبيقي. كما يسعى الفصل إلى ربط الإطار النظري الذي تم عرضه في الفصلين السابقين بالواقع البحثي المحلي، بما ينسجم مع متطلبات البحث العلمي والتوجهات الحديثة في مجال الكيمياء الخضراء والتحفيز النانوي.

أولاً: واقع البحث في المحفزات النانوية والكيمياء الخضراء في العراق

شهدت الجامعات العراقية خلال السنوات الأخيرة اهتمامًا متزايدًا بمجالات الكيمياء الخضراء وتقنيات النانو والتحفيز الكيميائي، ولا سيما في كليات العلوم والتربية للعلوم الصرفة والصيدلة والهندسة. وقد ركزت العديد من الدراسات العراقية على تطوير طرق أكثر استدامة لتحضير المواد والمركبات الكيميائية، من خلال استخدام المحفزات غير المتجانسة والجسيمات النانوية والمواد الطبيعية والمخلفات الزراعية بوصفها مصادر أولية منخفضة الكلفة وأكثر توافقًا مع المتطلبات البيئية. وتظهر أعمال بحثية حديثة في جامعات عراقية مثل واسط وديالى والموصل والقادسية توجّهًا نحو الجمع بين الكيمياء العضوية والكيمياء الخضراء والمواد النانوية. [14]

[12] A review on photocatalysis and nanocatalysts for advanced organic synthesis. (2024). Hybrid Advances, 6, 100268.
[13] Roy, B., & Basu, B. (2024). Graphene-based nanomaterials as catalysts for the synthesis of medicinally privileged heterocycles: Importance and outlook. Current Green Chemistry.
[14] Abaies, J. K., Sager, A. G., & Katoof, Z. R. (2026). Synthesis and Characterization of 1,3-thiazolidin-4-ones Using Recyclable, Magnetically Nanocatalyst in the Solvent-Free Microwave Medium. Baghdad Science Journal, 23(4), 1425–1441. DOI: 10.21123/2411-7986.5274.

وأظهرت بعض الأبحاث العراقية إمكانية توظيف المحفزات النانوية المغناطيسية والمواد النانوية المحضرة بطرق خضراء في التطبيقات الكيميائية المختلفة. فقد استُخدم محفز نانوي مغناطيسي قائم على أكسيد الحديد والسيليكا المستخلصة من قشور الأرز في تحضير مشتقات عضوية من نوع thiazolidin−4−one−1,3، وأظهرت النتائج إمكانية فصل المحفز مغناطيسيًا وإعادة استخدامه مع المحافظة على نشاط تحفيزي مرتفع. كما تناولت دراسات عراقية أخرى التحضير الأخضر للجسيمات النانوية باستخدام المستخلصات النباتية، بما يعزز الاتجاه نحو تقليل استخدام المواد الكيميائية الضارة في عمليات التحضير

ثانياً: التطبيقات النانوية في تحسين كفاءة التحضير العضوي

تناولت دراسات عراقية متعددة استخدام مبادئ الكيمياء الخضراء وتقنيات النانو في عمليات التحضير الكيميائي، حيث تبين أن:[15]

1. استخدام المحفزات النانوية ذات المساحة السطحية المرتفعة يساعد على زيادة عدد المواقع الفعالة وتسريع التفاعلات العضوية وتحسين مردود النواتج.

2. توظيف المحفزات النانوية مع تقنيات حديثة، مثل التسخين بالموجات الدقيقة واستخدام المذيبات الأقل ضررًا، يسهم في تقليل زمن التفاعل واستهلاك الطاقة مقارنة ببعض الطرق التقليدية.

3. استخدام المحفزات النانوية المغناطيسية يساعد على تسهيل فصل المحفز واسترجاعه وإعادة استخدامه، مما يقلل من كمية المخلفات الكيميائية وكلفة عملية التحضير.

وقد بينت إحدى الدراسات المنجزة في جامعة واسط أن استخدام المحفز النانوي المغناطيسي $\gamma-Fe_2O_3RHA@SO_3H$ في تحضير مشتقات thiazolidin−4−one−1,3 حقق مردودًا وصل إلى 94% في الظروف المثلى، كما حافظ المحفز على نشاط تحفيزي مرتفع بعد إعادة استخدامه ثلاث مرات على الأقل، وهو ما يوضح أهمية الجمع بين الكفاءة التحفيزية وقابلية إعادة الاستخدام في تطوير طرق التحضير العضوي الصديقة للبيئة

ثالثاً: التحليل المقارن لنتائج الد النانوية.

3. أظهرت نتائج واعدة من حيث تحسين مردود التفاعلات وقابلية استرجاع بعض المحفزات وإعادة استخدامها، إلا أن معظم التطبيقات ما تزال ضمن النطاق المختبري والبحثي وتحتاج إلى توسيع نطاقها للوصول إلى التطبيقات الصناعية.

كما يلاحظ وجود اهتمام بحثي عراقي بطرق التحضير الأخضر للمركبات العضوية؛ إذ تناول باحثون من جامعة ديالى طرق التحضير الأخضر لقواعد شيف، مع التركيز على استخدام مواد أولية أقل سمية، والماء أو الإيثانول بدلًا من بعض المذيبات الخطرة، وظروف تفاعل معتدلة وتقليل النفايات الناتجة عن عمليات التحضير. كما تناولت دراسة حديثة شارك فيها باحثون من

[15] Ali, R., Saleh, M. Y., Amshawee, A. M., Alshamsi, H. A., Al-Nayili, A., Oleiwi, B. M., & Youssef, A. J. (2026). Recent advances in rice-derived heterogeneous catalysts for green organic synthesis. Molecular Diversity, 30(4), 5115–5153. DOI: 10.1007/s11030-026-11523-4.

جامعات عراقية استخدام المحفزات غير المتجانسة المشتقة من الأرز ومخلفاته في عدد من التفاعلات العضوية الخضراء، وهو ما يعكس تنامي الاهتمام بهذا الاتجاه البحثي [16]

رابعاً: مناقشة النتائج في ضوء الإطار النظري

عند ربط نتائج الدراسات العراقية بالإطار النظري الذي تناول خصائص المحفزات النانوية ودورها في تطوير طرق تحضير المركبات العضوية، يتضح أن:

1. استخدام المحفزات النانوية يسهم في زيادة كفاءة التفاعلات العضوية نتيجة المساحة السطحية المرتفعة وتوافر عدد أكبر من المواقع التحفيزية الفعالة.

2. المحفزات النانوية القابلة للاسترجاع، ولا سيما المحفزات المغناطيسية، تساعد على تقليل النفايات الكيميائية وإعادة استخدام المحفز في أكثر من دورة تفاعلية، مما يتوافق مع مبادئ الكيمياء الخضراء.

3. النتائج التطبيقية المحلية تتفق في مجملها مع الاتجاهات الحديثة في الكيمياء الخضراء التي تؤكد أهمية استخدام المواد المتجددة والمحفزات القابلة لإعادة الاستخدام وتقليل استهلاك المذيبات والطاقة، وإن كانت الحاجة ما تزال قائمة إلى المزيد من الدراسات المتعلقة بتقييم الكفاءة الاقتصادية والبيئية عند الانتقال من المختبر إلى التطبيق الصناعي[17]

خامساً: آفاق التطوير المستقبلية في البيئة العراقية

تشير نتائج هذا الفصل إلى ضرورة:

1. توسيع الدراسات التطبيقية المتعلقة باستخدام المحفزات النانوية في تحضير المركبات العضوية، ولا سيما المركبات ذات التطبيقات الدوائية والصناعية، مع الاعتماد بصورة أكبر على المواد الطبيعية والمخلفات الزراعية المحلية في تحضير المحفزات.

2. دعم المشاريع البحثية المشتركة بين الجامعات العراقية والمراكز البحثية والمؤسسات الصناعية من أجل تطوير محفزات نانوية ذات كفاءة عالية وقابلة للاسترجاع وإعادة الاستخدام.

3. تشجيع الدراسات البينية التي تجمع بين الكيمياء العضوية والكيمياء الخضراء وتقنيات النانو والهندسة الكيميائية، مع الاهتمام بتقييم الأثر البيئي والكلفة الاقتصادية وإمكانية توسيع العمليات المختبرية إلى المستوى الصناعي.

[16] Abaies, J. K., Sager, A. G., & Katoof, Z. R. (2026). Synthesis and Characterization of 1,3-thiazolidin-4-ones Using Recyclable, Magnetically Nanocatalyst in the Solvent-Free Microwave Medium. Baghdad Science Journal, 23(4), 1425–1441. DOI: 10.21123/2411-7986.5274.
[17] Ali, R., Saleh, M. Y., Amshawee, A. M., Alshamsi, H. A., Al-Nayili, A., Oleiwi, B. M., & Youssef, A. J. (2026). Recent advances in rice-derived heterogeneous catalysts for green organic synthesis. Molecular Diversity, 30(4), 5115–5153. DOI: 10.1007/s11030-026-11523-4.

الخاتمة

خلص هذا البحث إلى دراسة تطوير طرق صديقة للبيئة لتحضير المركبات العضوية باستخدام المحفزات النانوية، من خلال تناول الأسس النظرية والمفاهيمية للكيمياء الخضراء والتحفيز النانوي، وبيان العوامل التي تحد من كفاءة بعض طرق التحضير العضوي التقليدية، ثم تحليل أهم أنواع المحفزات النانوية المستخدمة في تحسين التفاعلات العضوية، وصولًا إلى استعراض التطبيقات العملية والجهود البحثية، ولا سيما في البيئة الأكاديمية العراقية. وقد أظهر البحث أن استخدام المحفزات النانوية يمثل اتجاهًا واعدًا في مجال الكيمياء العضوية لما تمتاز به هذه المحفزات من مساحة سطحية مرتفعة، ونشاط تحفيزي عالٍ، وإمكانية التحكم في خواصها الفيزيائية والكيميائية، فضلًا عن إمكانية استرجاع بعض أنواعها وإعادة استخدامها. إلا أن بعض التحديات المرتبطة بتكتل الجسيمات النانوية، وفقدان النشاط التحفيزي، وتسرب بعض المكونات الفعالة، ما تزال تتطلب مزيدًا من البحث والتطوير. كما بينت الدراسة أن توظيف المحفزات النانوية ضمن مبادئ الكيمياء الخضراء يوفر حلولًا علمية فعالة لتحسين مردود التفاعلات، وتقليل زمن التحضير واستهلاك الطاقة والمذيبات الضارة، والحد من تكوين النفايات الكيميائية، الأمر الذي يؤكد أهمية هذا الاتجاه البحثي في تطوير طرق أكثر كفاءة وأمانًا واستدامة لتحضير المركبات العضوية.

أولاً: الاستنتاجات

1. تمثل المحفزات النانوية خيارًا واعدًا في تطوير طرق صديقة للبيئة لتحضير المركبات العضوية، لما تمتلكه من مساحة سطحية كبيرة ونشاط تحفيزي مرتفع.

2. ترتبط بعض مشكلات طرق التحضير العضوي التقليدية بارتفاع استهلاك الطاقة، واستخدام المذيبات والمواد الكيميائية الضارة، وطول زمن التفاعل، وتكوين كميات من النفايات والنواتج الثانوية.

3. يسهم استخدام المحفزات النانوية بفعالية في تحسين كفاءة التفاعلات العضوية وزيادة مردود النواتج وتقليل استهلاك الطاقة والمواد الكيميائية.

4. يؤدي التحكم في حجم وشكل وتركيب وتوزيع الجسيمات النانوية إلى تحسين النشاط والانتقائية التحفيزية، كما تسهم قابلية بعض المحفزات للاسترجاع وإعادة الاستخدام في تعزيز الاستدامة البيئية والاقتصادية.

5. أظهرت الدراسات العراقية نتائج مشجعة في مجال التحضير الأخضر واستخدام المحفزات والمواد النانوية في التطبيقات الكيميائية، مع ضرورة توسيع نطاق البحوث التطبيقية وربطها بصورة أكبر بالتطبيقات الصناعية.

ثانياً: التوصيات

1. تشجيع الدراسات المستقبلية التي تركز على تطوير محفزات نانوية أكثر كفاءة وثباتًا وانتقائية لاستخدامها في تحضير المركبات العضوية بطرق صديقة للبيئة.

2. دعم البحوث التطبيقية التي تجمع بين مبادئ الكيمياء الخضراء والتجارب المختبرية للتحقق من كفاءة المحفزات النانوية وقابليتها للاسترجاع وإعادة الاستخدام.

3. تعزيز التعاون البحثي بين الجامعات العراقية والمراكز البحثية والمؤسسات الصناعية للاستفادة من الخبرات والتقنيات الحديثة في مجال الكيمياء الخضراء والتحفيز النانوي.

4. اعتماد الدراسات البينية التي تجمع بين الكيمياء العضوية والكيمياء الخضراء وتقنية النانو والهندسة الكيميائية لتطوير طرق تحضير أكثر كفاءة واستدامة.

5. توفير الدعم المؤسسي والمختبري للباحثين وتحديث الأجهزة والتقنيات المستخدمة، بما يسهم في نقل تطبيقات المحفزات النانوية من النطاق المختبري إلى التطبيقات العملية والصناعية.

المصادر

1. Abaies, J. K., Sager, A. G., & Katoof, Z. R. (2026). Synthesis and Characterization of 1,3-thiazolidin-4-ones Using Recyclable, Magnetically Nanocatalyst in the Solvent-Free Microwave Medium. Baghdad Science Journal, 23(4), 1425–1441. DOI: 10.21123/2411-7986.5274.
2. Ali, R., Saleh, M. Y., Amshawee, A. M., Alshamsi, H. A., Al-Nayili, A., Oleiwi, B. M., & Youssef, A. J. (2026). Recent advances in rice-derived heterogeneous catalysts for green organic synthesis. Molecular Diversity, 30(4), 5115–5153. DOI: 10.1007/s11030-026-11523-4.
3. A review on photocatalysis and nanocatalysts for advanced organic synthesis. (2024). Hybrid Advances, 6, 100268.
4. Agarwal, N., Solanki, V. S., Pare, B., Singh, N., & Jonnalagadda, S. B. (2023). Current trends in nanocatalysis for green chemistry and its applications: A mini-review. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 41, 100788.
5. Agarwal, N., Solanki, V. S., Pare, B., Singh, N., & Jonnalagadda, S. B. (2023). Current trends in nanocatalysis for green chemistry and its applications: A mini-review. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 41, 100788.
6. American Chemical Society (ACS). 12 Principles of Green Chemistry. Green Chemistry Institute.
7. Chaudhary, K., & Masram, D. T. (2024). Application of Nanocatalysts in Greener Synthesis of Chemical Compounds. In M. Sen (Ed.), Sustainable Green Catalytic Processes. Wiley.
8. Green magnetic nanoparticles in catalysis/catalysts for organic transformations. (2024). In Green Magnetic Nanoparticles: Recent Developments in Preparation and Application, pp. 175–204.

9. https://www.acs.org/green-chemistry-sustainability/principles/12-principles-of-green-chemistry.html?utm_source=chatgpt.com "12 Principles of Green Chemistry - American Chemical Society"
10. Roy, B., & Basu, B. (2024). Graphene-based nanomaterials as catalysts for the synthesis of medicinally privileged heterocycles: Importance and outlook. Current Green Chemistry.
11. Sharma, R. K., Bandichhor, R., Mishra, V., Sharma, S., Yadav, S., et al. (2023). Advanced metal oxide-based nanocatalysts for the oxidative synthesis of fine chemicals. Materials Advances, 4, 1795–1830.
12. Sharma, S., Gallou, F., & Handa, S. (2024). Towards a sustainable tomorrow: advancing green practices in organic chemistry. Green Chemistry, 26, 6289–6317.
13. Sharma, S., Gallou, F., & Handa, S. (2024). Towards a sustainable tomorrow: advancing green practices in organic chemistry. Green Chemistry, 26.
14. Xia, C., Wu, J., Delbari, S. A., Namini, A. S., Yuan, Y., et al. (2023). Metal-organic framework-based nanostructured catalysts: Applications in efficient organic transformations. Molecular Catalysis, 546, 113217.