

عندما تتحكم الفيزياء في الجينات

د. سمير عبد الحميد

2026-04-29

في مارس 2026، نُشرت [ورقة علمية](#) لافتة بعنوان "Structural basis of supercoiling-induced CRISPR-Cas9 off-target activity" في مجلة Nature، بإشراف فريق بحثي دولي، وشارك فيه باحثون من تخصصات الفيزياء الحيوية والهندسة الجزيئية، ومن بينهم باحثون من خلفيات عربية يعملون ضمن مختبرات أوروبية في هذا المجال المتداخل. تعكس الورقة تحولاً عميقاً في فهم التكنولوجيا الحيوية، حيث لم تعد العمليات الجينية تُفسر فقط من خلال الكيمياء الحيوية، بل أصبحت تُقرأ أيضاً من خلال قوانين الفيزياء التي تحكم سلوك الجزيئات داخل الخلية.

تتناول [الورقة](#) واحدة من أهم التحديات في تقنيات التعديل الجيني، وهي مشكلة "الاستهداف الخاطئ" في نظام CRISPR-Cas9، حيث يمكن للإنزيم أن يرتبط بمواقع غير مقصودة في الجينوم. ورغم التطور الكبير في هذه التقنية، بقيت هذه المشكلة عائقاً أمام استخدامها الآمن في التطبيقات الطبية. الجديد في هذه الورقة أنها تنقل تفسير هذه الظاهرة من المستوى الكيميائي إلى المستوى الفيزيائي، إذ تبين أن بنية الحمض النووي نفسها، من حيث حالته الميكانيكية، تلعب دوراً حاسماً في تحديد دقة التعديل.

تكشف النتائج أن الحمض النووي لا يوجد داخل الخلية في صورة مستقيمة أو ثابتة، بل يكون في حالة ديناميكية مستمرة من الالتواء والانحناء، وهي ظاهرة تُعرف بالـ DNA supercoiling. هذا الالتواء ليس مجرد خاصية شكلية، بل يؤثر بشكل مباشر على كيفية تفاعل البروتينات مع الجينوم.

عندما يكون الـ DNA في حالة التواء معين، تتغير المسافات بين القواعد النيتروجينية، وتتبدل البنية الفراغية للجزيء، مما يجعل بعض المواقع أكثر عرضة للارتباط، حتى وإن لم تكن مطابقة تماماً للتسلسل المطلوب. بهذا المعنى، يصبح الخطأ في التعديل الجيني نتيجة لحالة فيزيائية، وليس فقط لخلل في التعرف الجزيئي.

اعتمد الباحثون في هذه الدراسة على أدوات متقدمة في الفيزياء الحيوية، مثل المجهر الإلكتروني فائق البرودة وتقنيات القياس على المستوى النانوي، ما أتاح لهم مراقبة سلوك الحمض النووي في ظروف قريبة من بيئته الطبيعية داخل الخلية. وقد أظهرت التجارب أن تغيرات صغيرة في درجة الالتواء يمكن أن تؤدي إلى فروق كبيرة في دقة الارتباط، وهو ما يفسر التباين الذي كان يصعب تفسيره في نتائج تجارب CRISPR السابقة.

هذا النوع من القياس يعكس كيف أصبحت الفيزياء أداة أساسية لفهم الحياة على المستوى الجزيئي.

تقدم الورقة أيضًا إطارًا نظريًا يعتمد على مفاهيم من الفيزياء الإحصائية، حيث يتم تفسير التفاعلات بين CRISPR والحمض النووي من خلال ما يُعرف بمنظر الطاقة الحرة. في هذا النموذج، لا يكون الارتباط مجرد حدث ثنائي (صحيح أو خاطئ)، بل نتيجة لتوازن معقد بين الطاقة الحرارية والإجهاد الميكانيكي ومرونة الجزيء. هذا التصور يسمح بفهم أعمق لكيفية اتخاذ "القرار الجزيئي" داخل الخلية، وهو قرار تحكمه احتمالات فيزيائية بقدر ما تحكمه تطابقات كيميائية.

تتجاوز أهمية هذه النتائج الجانب النظري، إذ تفتح آفاقًا جديدة في تطبيقات التكنولوجيا الحيوية. في المجال الطبي، يمكن أن يؤدي فهم الحالة الفيزيائية للحمض النووي إلى تطوير استراتيجيات جديدة لزيادة دقة التعديل الجيني، مثل التحكم في البيئة الخلوية أو تصميم إنزيمات أكثر حساسية للتشوهات البنيوية. هذا قد يساهم في جعل العلاجات الجينية أكثر أمانًا، خاصة في الأمراض الوراثية المعقدة. أما في المجال الصناعي، فيمكن استخدام هذه المعرفة لتصميم كائنات دقيقة محسنة، حيث يتم التحكم ليس فقط في جيناتها، بل في حالتها الفيزيائية أيضًا لتحقيق أداء أعلى.

ما تكشفه هذه الورقة في جوهره هو أن الحدود بين الفيزياء والأحياء لم تعد قائمة كما كانت. فالحياة، على المستوى الجزيئي، هي نظام فيزيائي يخضع لقوانين الطاقة والحركة والاحتمال. هذا الفهم الجديد يعيد تعريف التكنولوجيا الحيوية بوصفها علمًا هجينًا، يعتمد على التكامل بين التخصصات، ويضع الفيزياء في قلب تفسير العمليات الحيوية.

في النهاية، يمكن القول إن هذه الدراسة تمثل خطوة مهمة نحو ما يمكن تسميته بالهندسة الفيزيائية للجينوم، حيث لا يقتصر التدخل العلمي على تعديل الشيفرة الوراثية، بل يمتد إلى التحكم في البنية الفيزيائية التي تحمل هذه الشيفرة. وهذا التحول قد يكون هو المفتاح الحقيقي للجيل القادم من الابتكارات في الطب والهندسة الحيوية.

المصادر

Phys.org <https://www.nature.com/articles/s41586-026-10255-7> | Nature
<https://phys.org/news/2026-03-dna-crucial-gene-therapy.html> |
[/https://www.imperial.ac.uk/news/2026](https://www.imperial.ac.uk/news/2026) | Imperial College London
[crispr-dna-structure-study](#)

تواصل مع الكاتب: drsamirabdulhamid@gmail.com