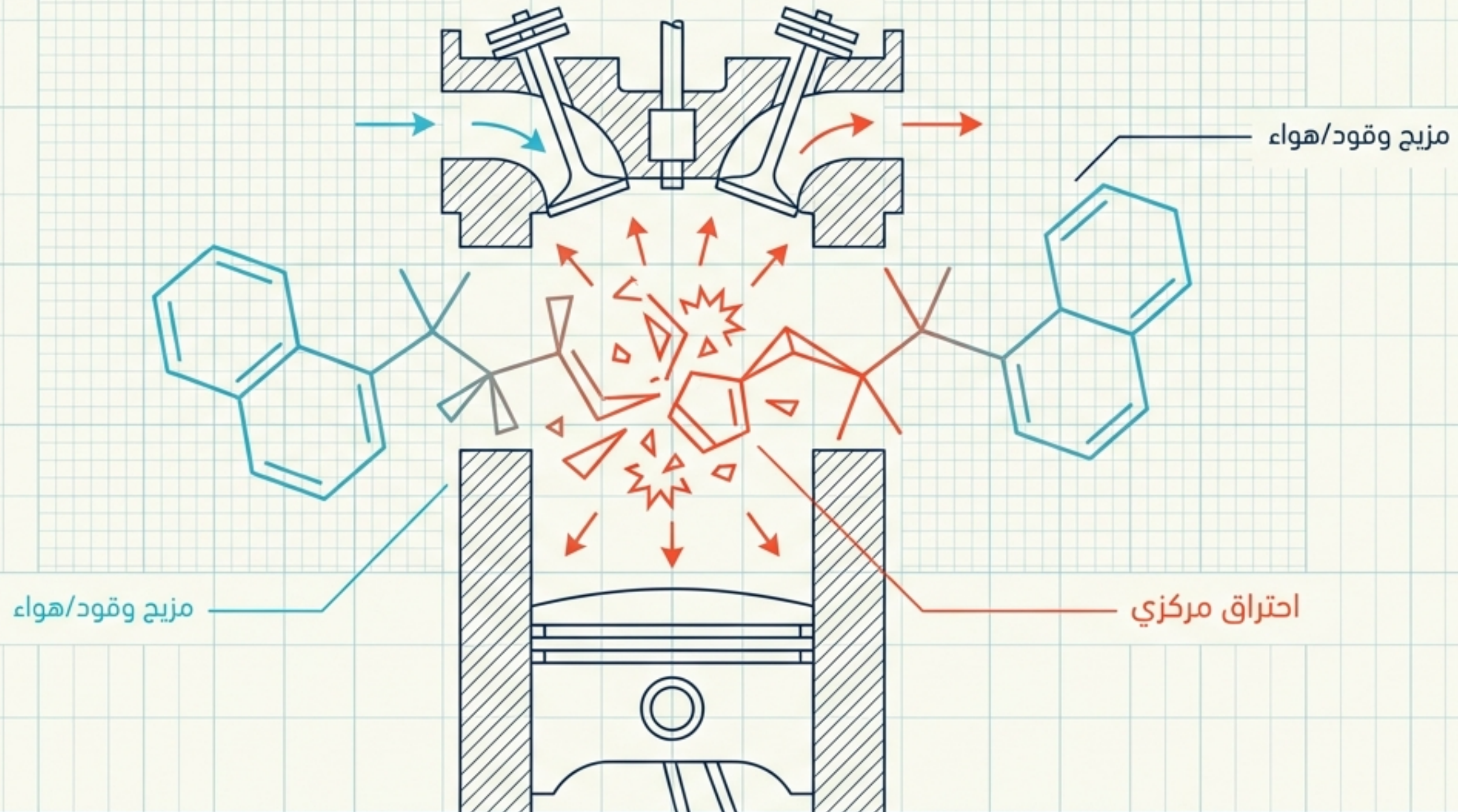
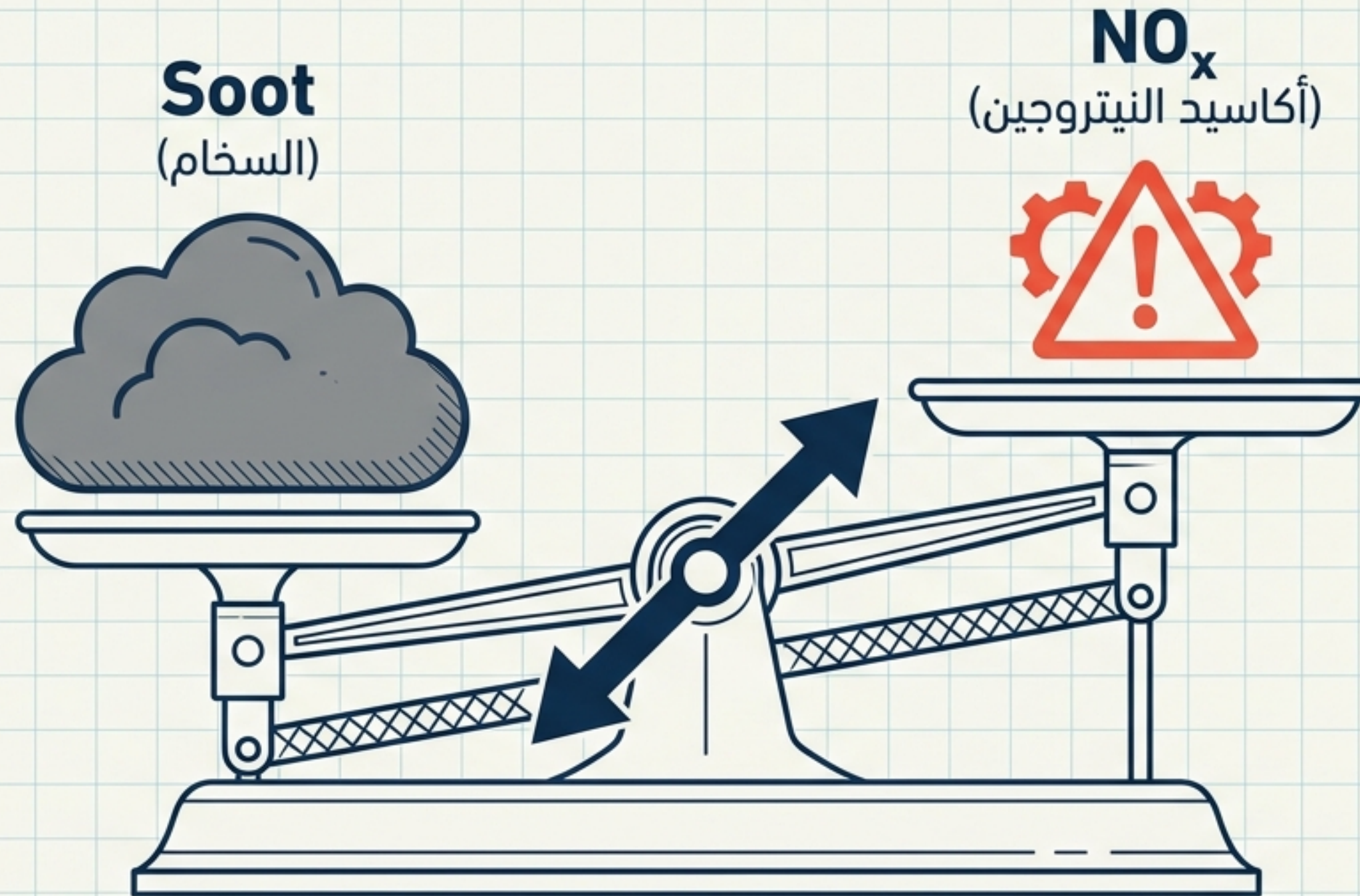


تشرح محركات الانضغاط: من الديناميكا الحرارية إلى الكيمياء الجزيئية

نهج طبقي لتحسين الأداء وكسر معضلة الانبعاثات في أنظمة الاحتراق المتقدمة.



المعضلة الأبدية: التوازن المستحيل بين السخام وأكاسيد النيتروجين



• الديزل التقليدي يُنتج السخام في المناطق الغنية بالوقود.



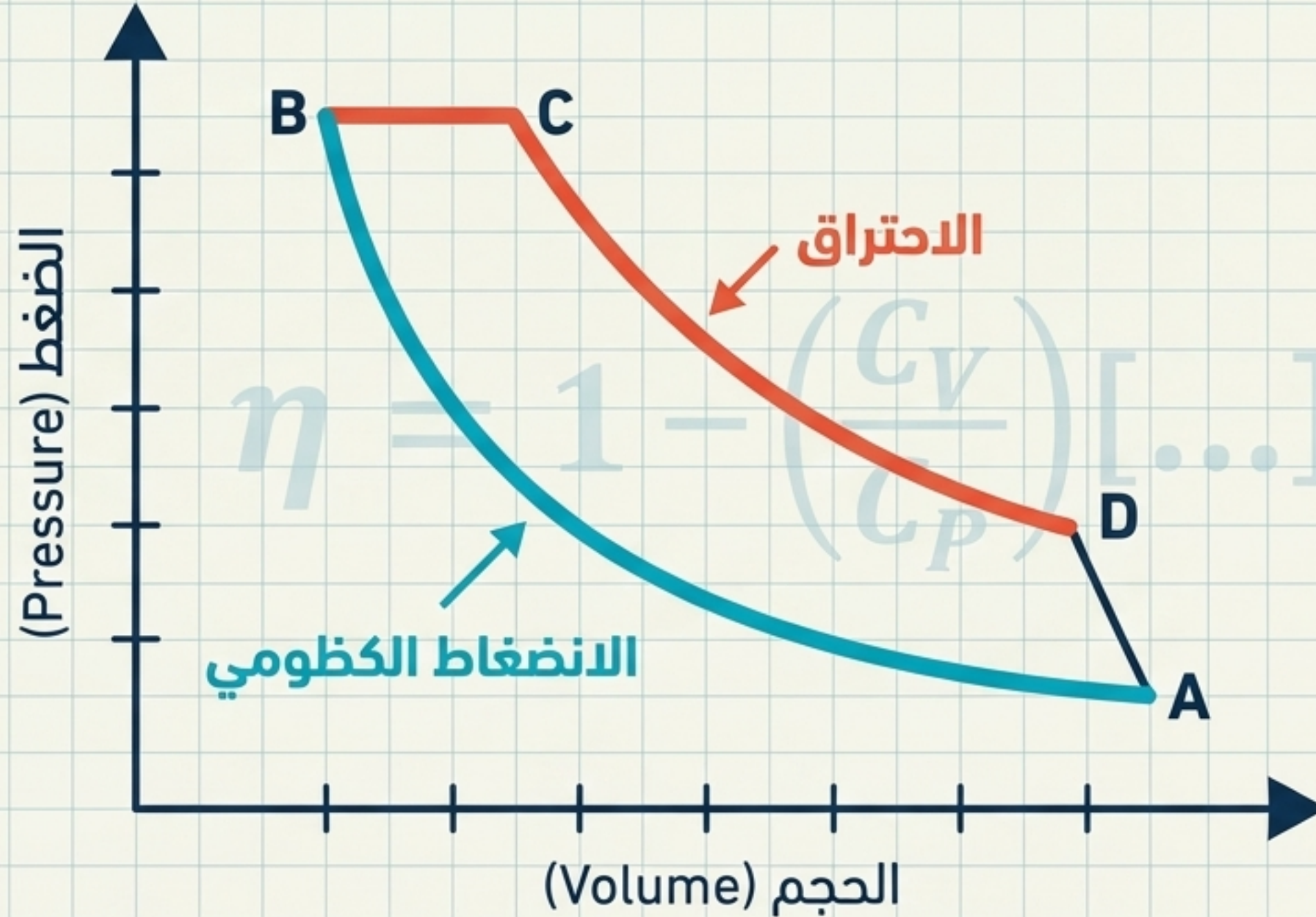
• محاولات تقليل السخام (عبر رفع الحرارة والضغط) تؤدي حتماً إلى ارتفاع أكاسيد النيتروجين.



• الهدف الهندسي: كسر هذا المنحنى التجاري عبر استراتيجيات الحقن المتقدمة وكيمياء الوقود.



الطبقة الأولى: الأساس الديناميكي الحراري لدورة الديزل



• A-B: سحب هواء نقي (بدون وقود).

• B-C: **انضغاط كظومي** يرفع الحرارة إلى ما يقارب 2000 K.

• C-D: **حقن الوقود واحتراقه** بضغط ثابت.

• المعادلة الأساسية للكفاءة:

$$\eta = 1 - \left(\frac{C_v}{C_p}\right) \left[\dots \right]$$



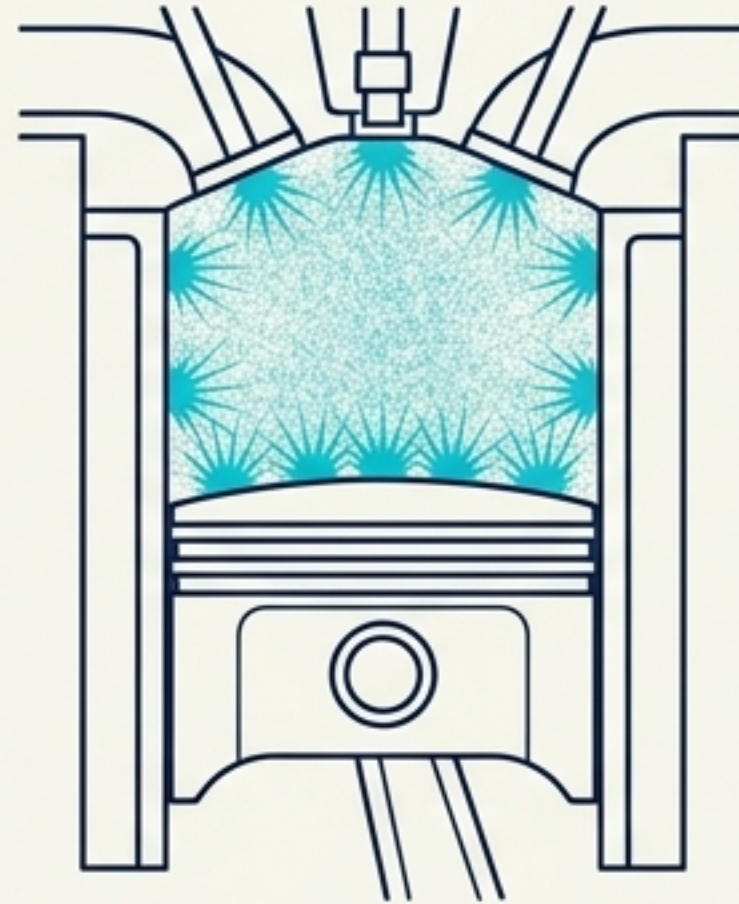
الطبقة الثانية: تطور معمارية الاحتراق للتغلب على الانبعاثات

الاحتراق التقليدي (Conventional)



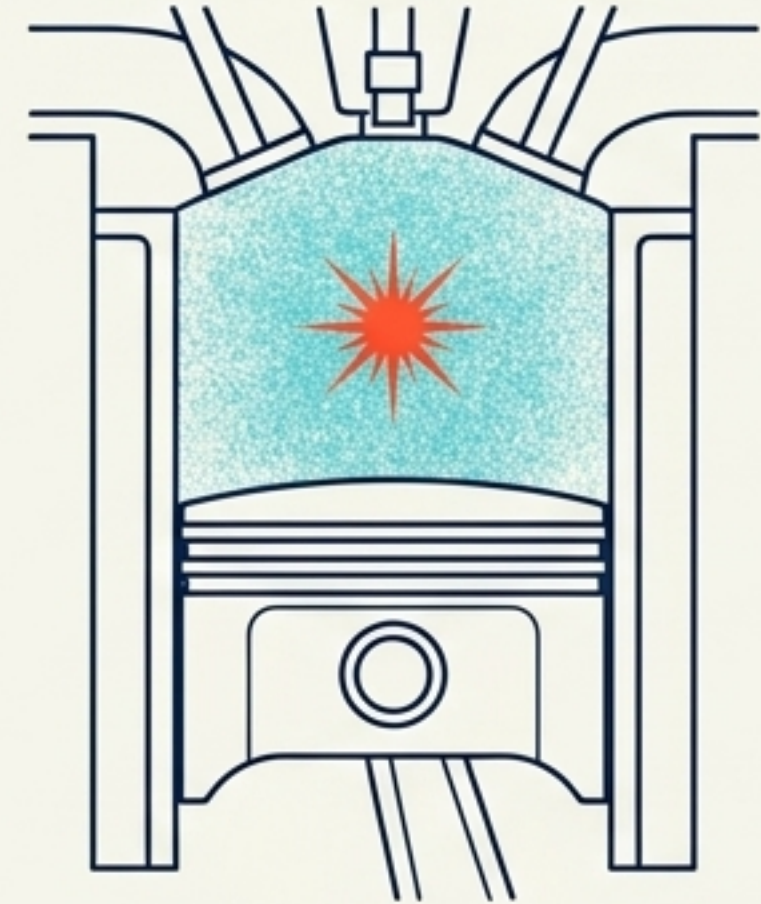
انتشار لهبي، مناطق غنية بالوقود
يؤدي إلى سخام عالي.

HCCI (شحنة متجانسة بالكامل)



خلط مبكر ومثالي، احتراق منخفض الحرارة.
انبعاثات شبه معدومة، لكن يصعب
التحكم في توقيت الإشعال.

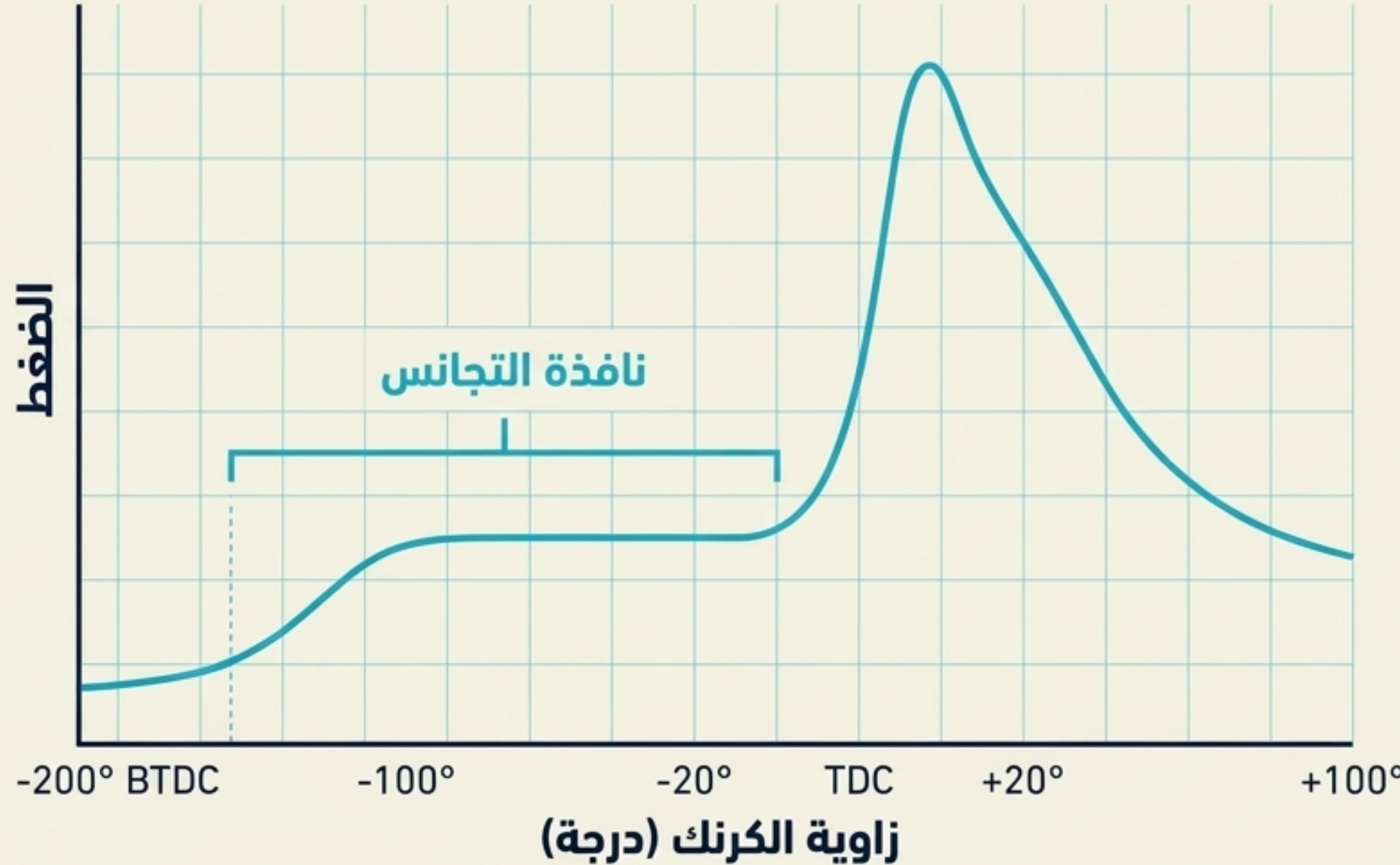
PCCI (النهج الهجين)



خليط متجانس جزئياً، يجمع بين انخفاض
الانبعاثات والتحكم الدقيق في الإشعال.

استراتيجية الحقن المبكر: كسب الوقت للتجانس الكيميائي

الضغط مقابل زاوية الكرنك

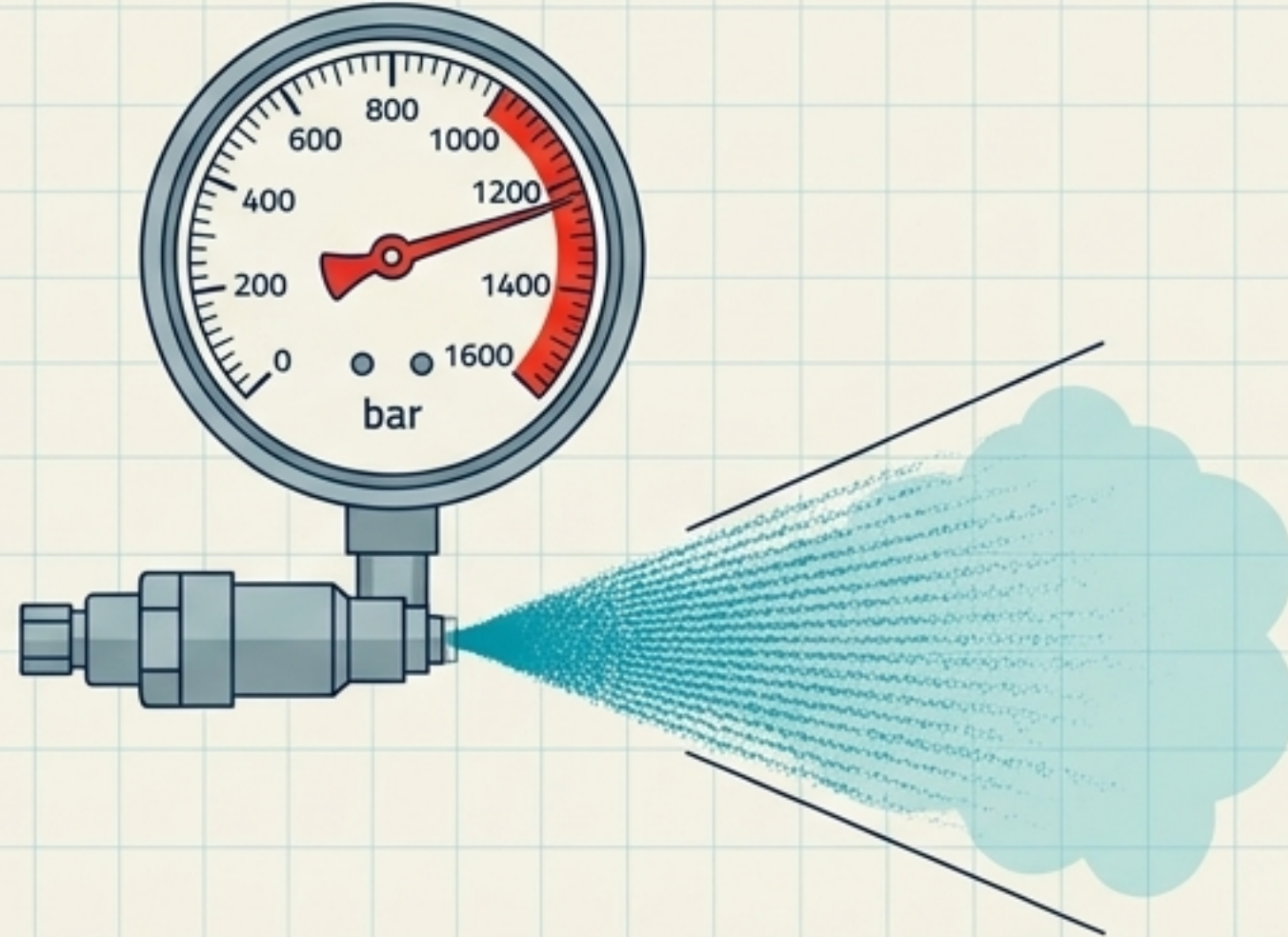


تفاصيل الاستراتيجية

- **الحقن العادي** يحدث قريباً من النقطة الميتة العليا (TDC).
- **الحقن المبكر:** يقع بين 20° و 200° قبل النقطة الميتة العليا (BTDC).
- **الهدف:** إطالة فترة تأخر الإشعال للسماح بتبخر الوقود وامتزاجه بالهواء، مما يمنع تكون بؤر غنية بالوقود المسببة للسخام.

الطبقة الثالثة: أذرع التحكم الميكانيكية (الضغط والزاوية)

الضغط (1200 - 1600 bar):



- **الميزة:** تذرية ممتازة، انخفاض حاد في السخام.
- **الخطر:** اختراق زائد للرذاذ يؤدي إلى **تبلييل الجدران**.

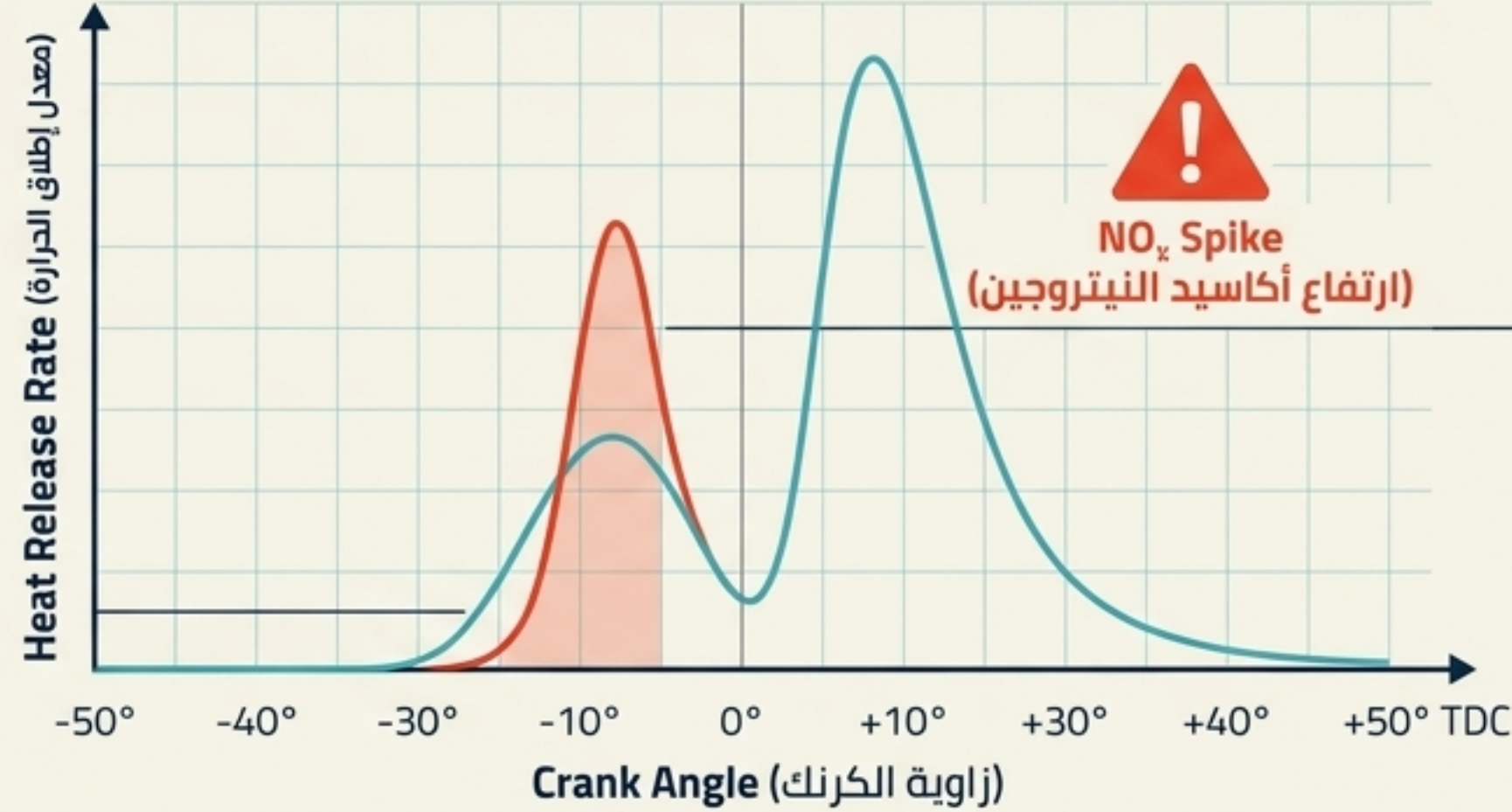
زاوية الحقن (Injection Angle):



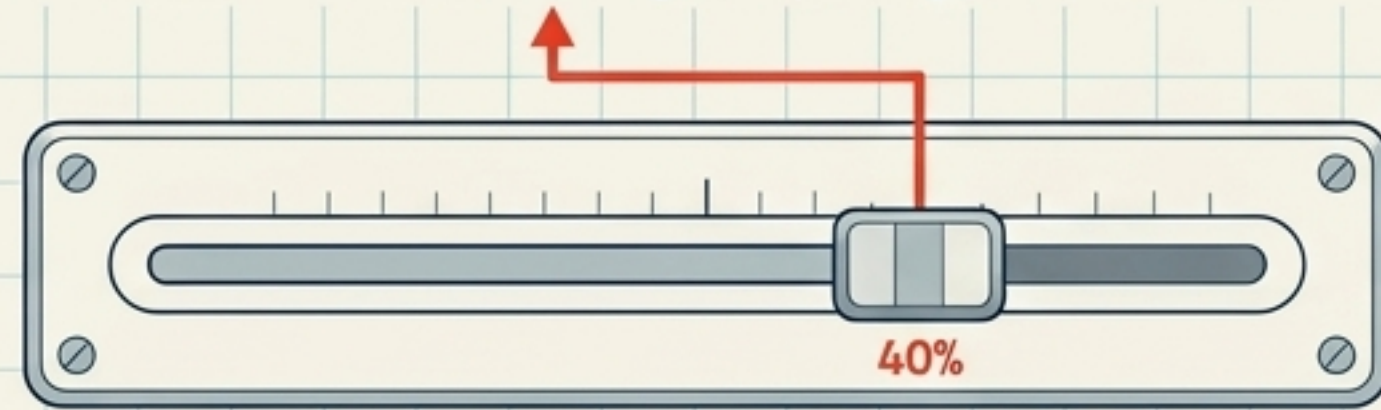
- **التعديل:** تضيق الزاوية (مثلاً 70° بدلاً من 150°).
- **النتيجة:** حصر الرذاذ داخل وعاء المكبس، تقليل تبلييل الجدران وانخفاض انبعاثات HC و CO.

أذرع التحكم الميكانيكية: معايرة التوقيت والكمية (الحقن المزدوج)

• توقيت الحقن الأول: التبكير المفرط يقلل السخام وأكاسيد النيتروجين، لكنه يزيد من العمل السلبي ويقلل الكفاءة.



• كمية الحقن الأول: زيادتها (حتى 40%) ترفع نسبة الاحتراق المتجانس، ولكن تجاوز هذا الحد يسبب ارتفاعاً حاداً في درجات حرارة العودة ومستويات NO_x للارتفاع.

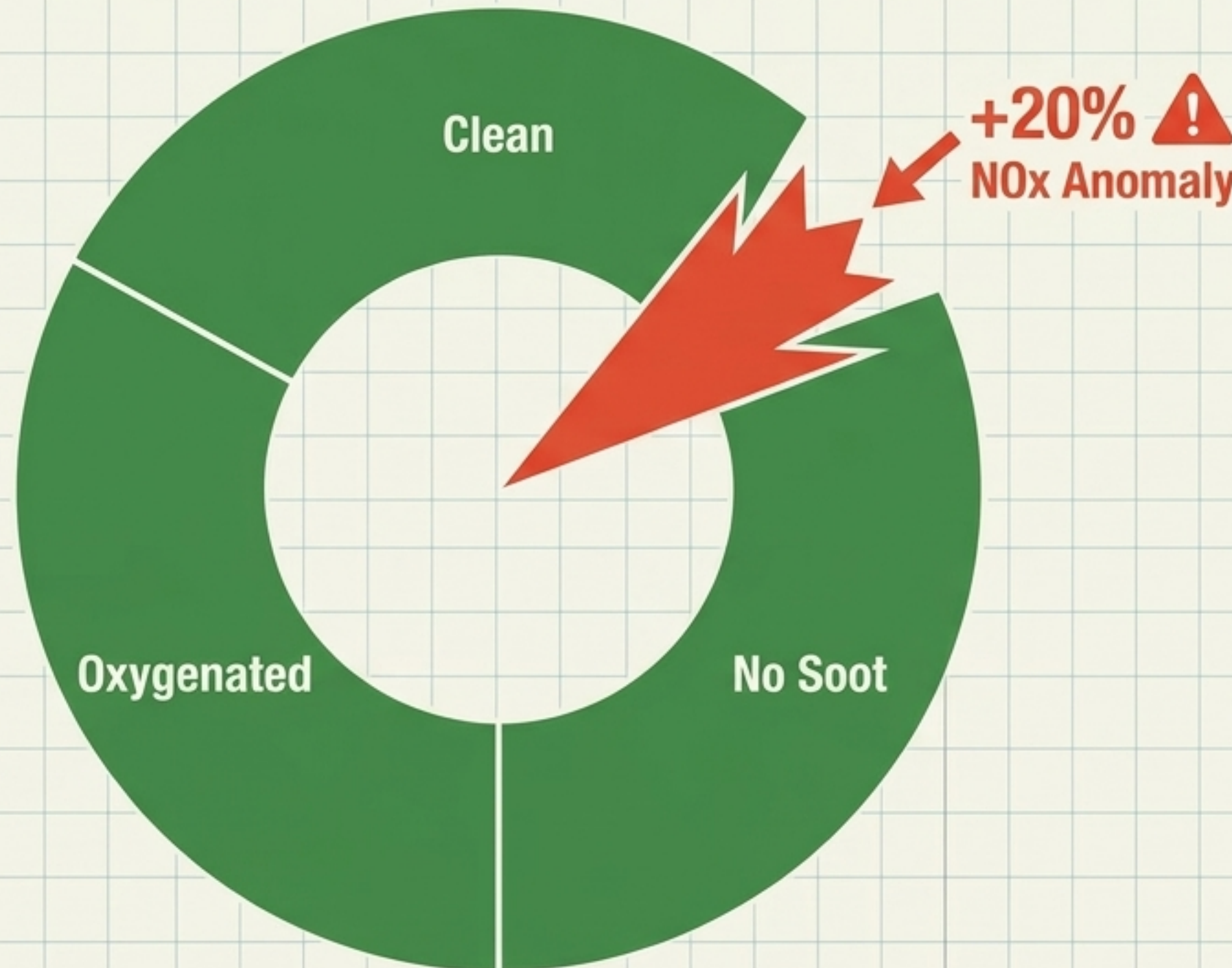


Pilot Quantity (كمية الحقن الأول)

مصفوفة التشخيص الشاملة للمتغيرات الميكانيكية

المتغيرات الميكانيكية	الكفاءة	NOx	السخام	HC/CO
زيادة الضغط	↑	↑	↓↓	-
تأخير التوقيت	↓	↓↓	-	↑↑
تضييق الزاوية	تآكل الجدران ↓	-	-	↓
زيادة كمية الحقن الأول (<40%)	↓	↑↑	-	-

الطبقة الرابعة: متغير الوقود ولغز أكاسيد النيتروجين

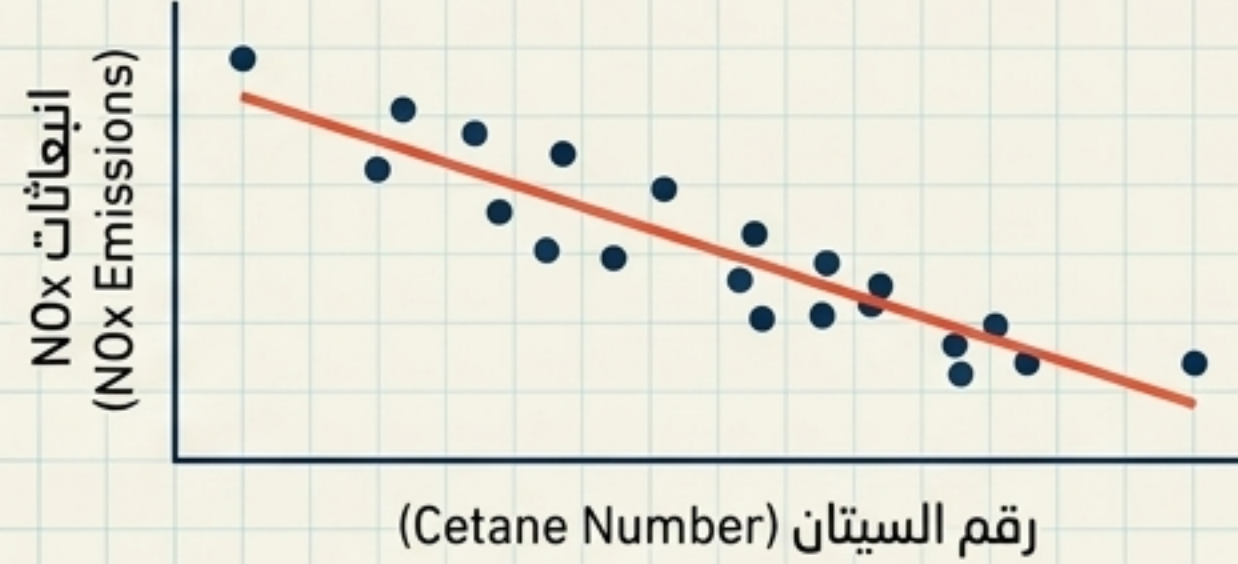


- الديزل الحيوي (Biodiesel) يغير قواعد اللعبة الكيميائية.

- **مزاياه:** متجدد، يحتوي على أكسجين مدمج، يقضي تقريباً على السخام و HC و CO.

- **الشذوذ الكيميائي (The Anomaly):** رغم انخفاض السخام، يسجل الديزل الحيوي دائماً زيادة طفيفة وشاذة (تصل إلى 20%) في انبعاثات NOx مقارنة بالديزل البترولي.

النظريات الميكانيكية التقليدية لتفسير زيادة NO_x



رقم السيتان: الديزل الحيوي ذو السيتان المرتفع يقلل تأخر الإشعال. العلاقة عكسية، لكنها لا تفسر الزيادة بشكل كامل.



رقم السيتان

معامل الحجم: يؤدي لتبكير الحقن ميكانيكياً، لكن الزيادة مستمرة حتى في أنظمة الحقن الحديثة.



معامل الحجم

إشعاع السخام: قلة السخام تعني فقدان التبريد الإشعاعي، مما يبقي اللهب حاراً.



إشعاع السخام

الرابط المفقود: كيمياء الجزيئات والروابط المزدوجة



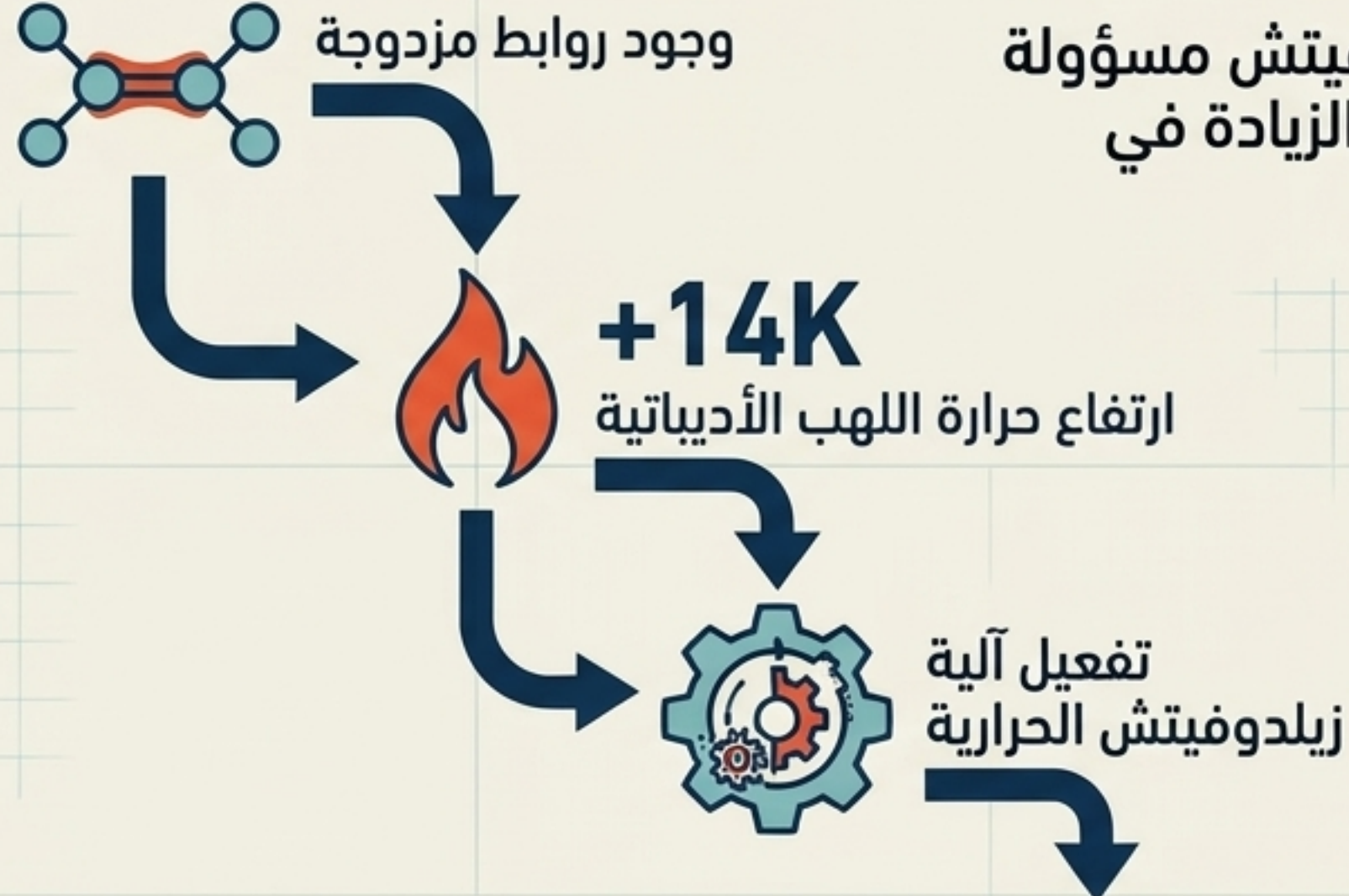
- السر يكمن في الهيكل الجزيئي. الديزل الحيوي يحتوي على جزيئات غير مشبعة بروابط كربونية مزدوجة.
- الجزيئات المشبعة (بدون روابط مزدوجة) تنتج NO_x أقل بكثير.
- الروابط المزدوجة ترفع طاقة الاحتراق الأساسية.

تأثير الروابط المزدوجة على انبعاثات NO_x



سلسلة زيلدوفيتش: كيف يولد الكيمياء حرارة تدمر التوازن

- وجود روابط مزدوجة يؤدي إلى درجات حرارة لهب أديباتية أعلى بحوالي 14K.
- هذا الارتفاع الطفيف جداً في الحرارة كافٍ لتفعيل آلية زيلدوفيتش الحرارية.



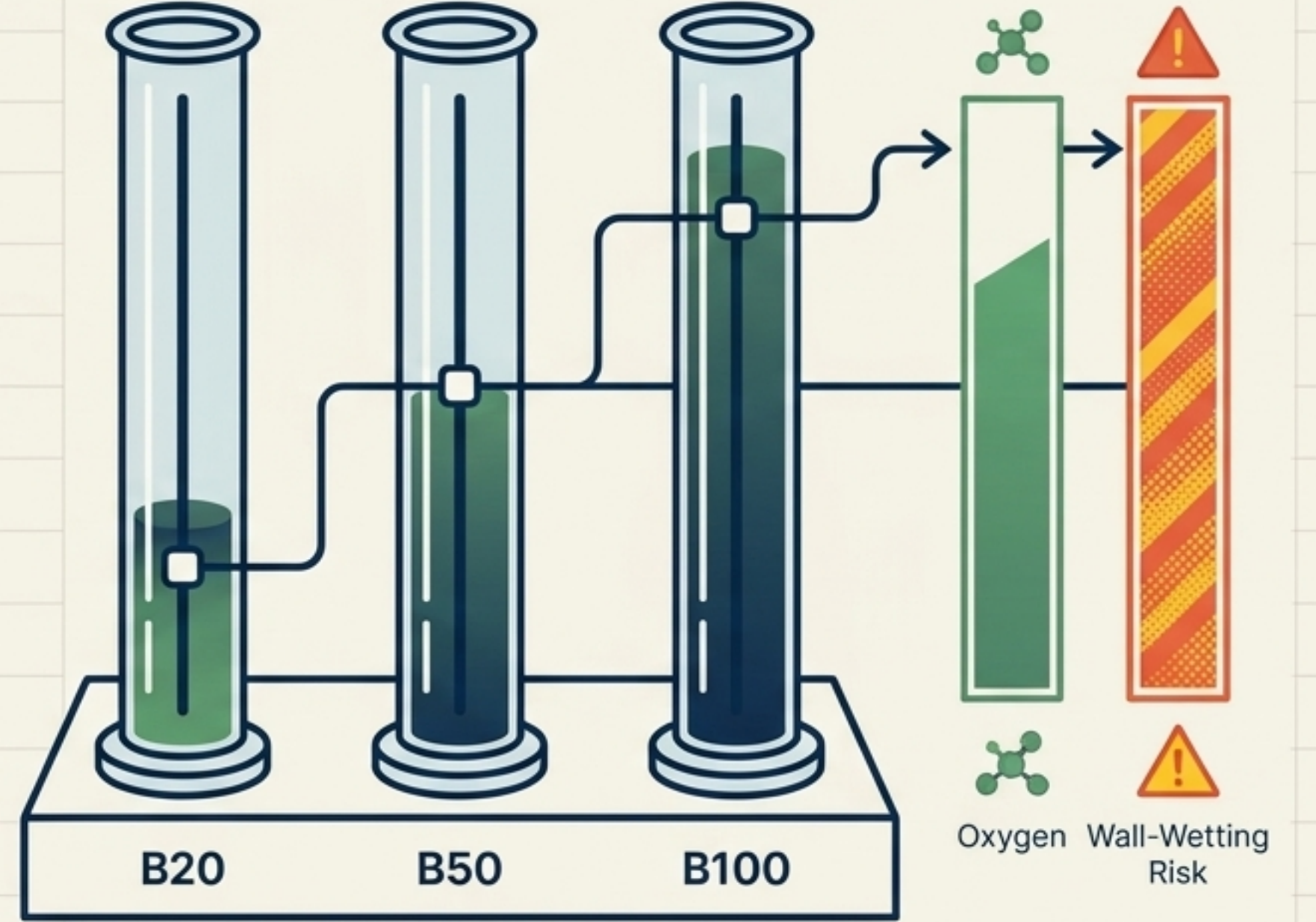
- النتيجة: آلية زيلدوفيتش مسؤولة عن 92% من هذه الزيادة في أكاسيد النيتروجين.

زيادة أكاسيد	النيتروجين (NOx)
آلية زيلدوفيتش	مسؤولة عن 92% من الزيادة

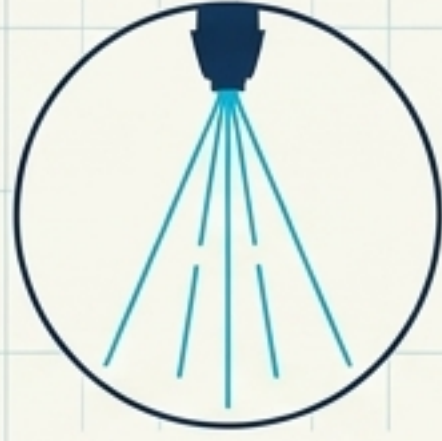


معادلة الخلط: موازنة الكيمياء والفيزياء

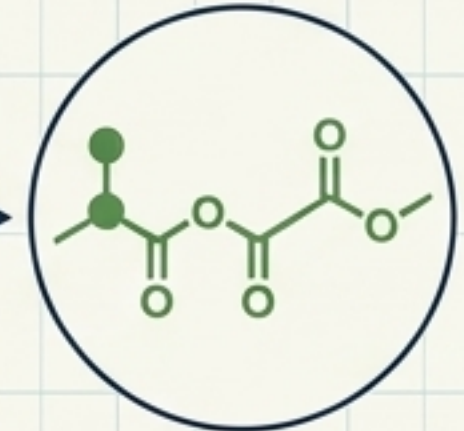
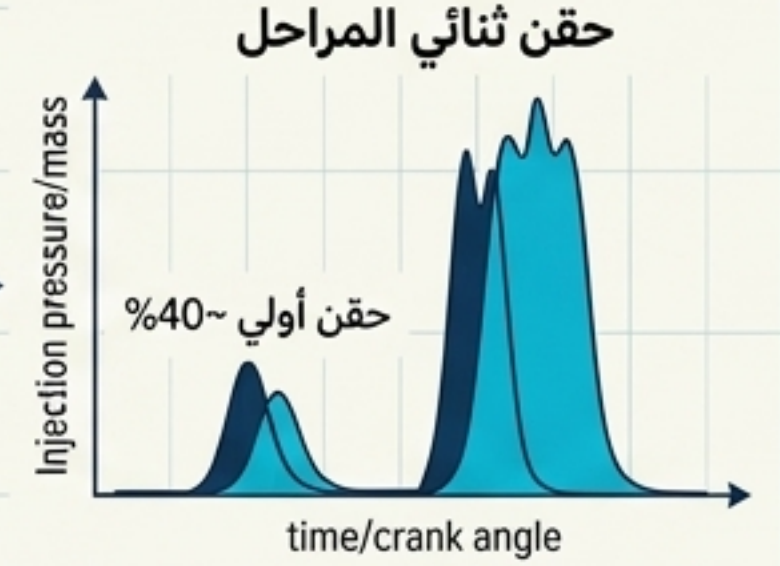
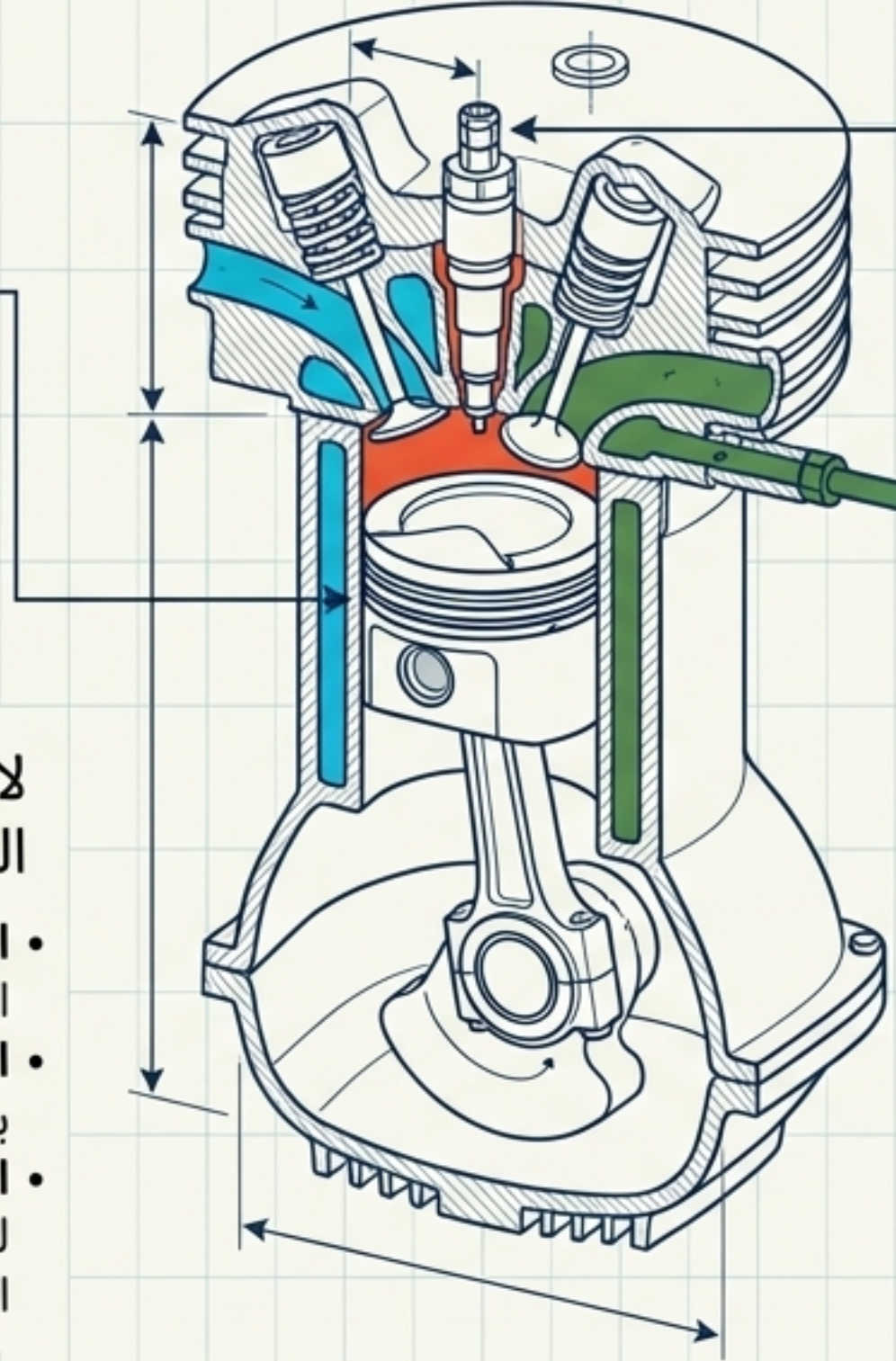
- إضافة الكحوليات (الإيثانول/البيوتانول) أو الديزل الحيوي للديزل العادي.
- الأكسجين الإضافي يقضي على بؤر السخام.
- ولكن.. كلما زادت نسبة الخلط، طالت فترة الاحتراق السائل، مما يُعيد خطر تبليل الجدران.
- **التحدي:** إيجاد النسبة التي تمنع السخام ولا تفعل حرارة زيلدوفيتش العالية.



التوليف النهائي: مصفوفة التحسين الكبرى



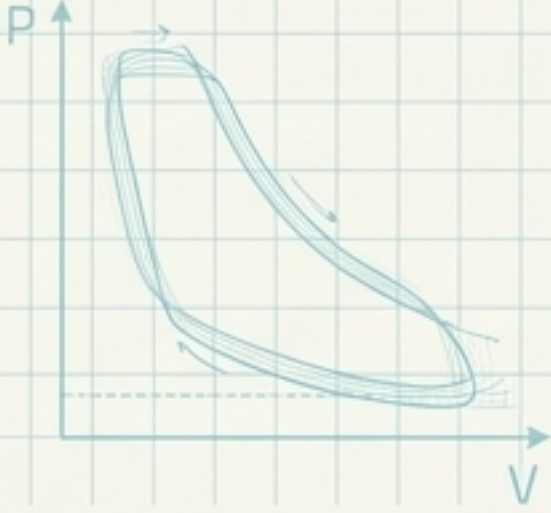
زاوية رش ضيقة



مزيج الديزل الحيوي

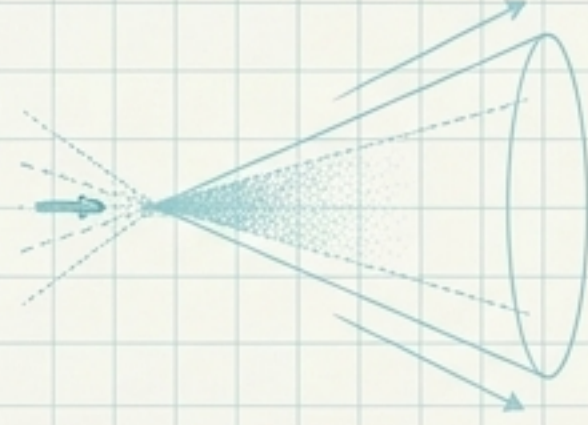
- لا يوجد حل سحري أحادي البعد. المحرك الحديث هو سيمفونية متكاملة:
- **المعمارية:** استخدام PCCI لدمج أفضل ما في الاحتراق المتجانس والتقليدي.
- **الميكانيكا:** حقن مبكر ثنائي المراحل (~40% كمية أولية)، بضغط عالي وزاوية ضيقة لحماية الجدران.
- **الكيمياء:** استخدام نسب خلط محسوبة للديزل الحيوي للحد من السخام، مع تبريد الشحنة لتعويض ارتفاع حرارة الروابط المزدوجة.

الخلاصة التشغيلية: قوانين الاحتراق الحديث



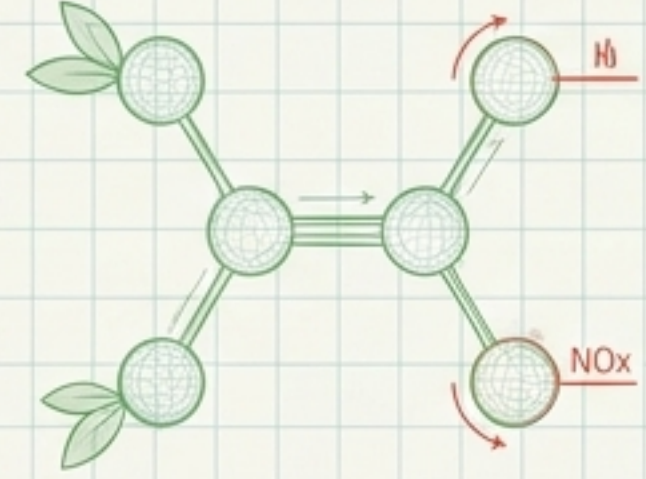
الحدود الميكانيكية

أنظمة PCCI تكشف أن التلاعب بالضغط والتوقيت هو لعبة توازنات؛ لا توجد فائدة مجانية دون تكلفة في الانبعاثات الأخرى.



الفخ الهندسي

تضييق زاوية الحقن هو السلاح السري لاستراتيجية الحقن المبكر لمنع تبليل الجدران وخسارة الكفاءة.



السيادة الكيميائية

مهما بلغت دقة الهندسة الميكانيكية، فإن البنية الجزيئية للوقود (الروابط المزدوجة) هي من تحلي درجات الحرارة القصوى وتحدد سقف NO_x .