بحث تقني · حدود ميكانيكا الموائع

انفجار نافييه–ستوكس: هل يصمد CFD المراوح؟

تحوّل 2026 في بحوث نافييه–ستوكس ليس انهيارًا للـCFD، بل تحديد أدق للمواضع التي تصلح فيها المعادلات وتلك التي يحتاج فيها مهندس المروحة إلى بيانات الاختبار.

ورقة بحثية · فريق التحرير التقني في SUNXFAN · 2026-11

Web: https://en.sunxfan.com/ar/blog/navier-stokes-blowup-cfd-fan-engineering/

في عالم المراوح نتفاوض مع الهواء كل يوم. كل قوس في ريشة مروحة، وكل انحناء في الحلزون، يستند إلى المجموعة نفسها من المعادلات: نافييه–ستوكس. فهي تصف حركة مائع لزج، وهي الأرضية الرياضية التي تقف عليها النماذج المناخية وتصميم الطائرات والديناميكا الهوائية لكل مروحة طرد مركزي أو محورية نصنعها.

ومنذ أكثر من عشرين عامًا يظل سؤال واحد معلقًا فوق هذه الأرضية: في الأبعاد الثلاثة، وبمعطيات ابتدائية ملساء، هل يبقى الحل ملسًا إلى الأبد، أم يمكن أن «ينفجر» في زمن منتهٍ فتذهب السرعة أو الدوامية إلى ما لا نهاية؟

في 2026 تحوّل هذا السؤال تحوّلًا حقيقيًا. لا لأنه حُلّ، بل لأن الوسط الرياضي بدأ يأخذ بجدية احتمالًا طالما قاومه: أن الانفجار قد يكون السلوك الجوهري للمائع في ظروف قصوى، وأن السلاسة هي الحالة التي تحتاج إلى تفسير إضافي.

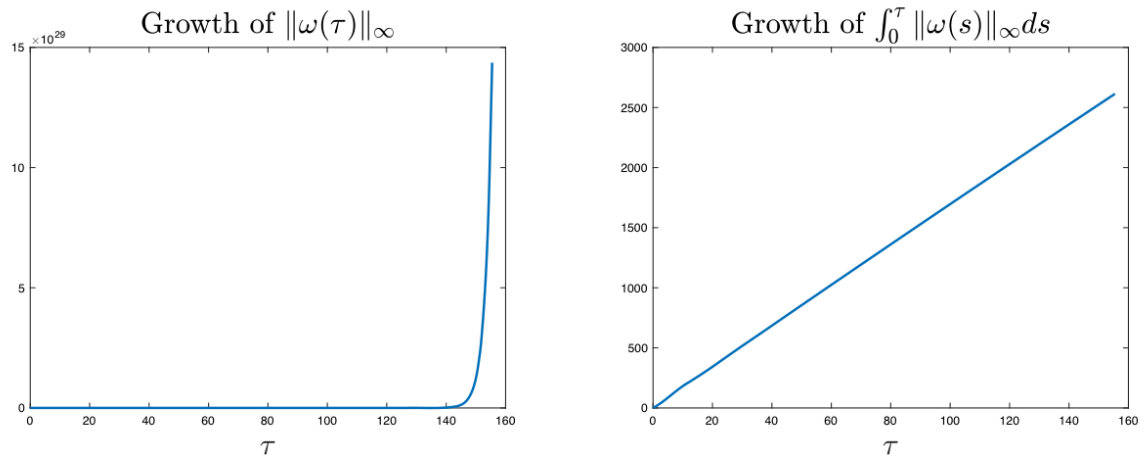


Fig. 15 Growth of maximum vorticity for the rescaled Navier-Stokes model. Left plot: the amplification of

الشكل 1 — تطوّر الدوامية لمعادلات نافييه–ستوكس ثلاثية الأبعاد في إعداد محوري التماثل معمَّم. تنمو ذروة الدوامية بحدّة في زمن منتهٍ، وتنتهك الدوامية المتكاملة معيار Beale–Kato–Majda، وهي بالضبط البصمة العددية التي كان سيتركها تفرد في زمن منتهٍ. الشكل الأصلي: المرجع 1 (Hou, J. FoCM 2026, Fig. 15/16).

1. تحوّل 2026: ثلاثة مسارات من الأدلة تشير إلى الاتجاه نفسه

1.1 انفجار OpenAI بقوة خارجية: صدمة للمجال لا حكم نهائي

في 8 سبتمبر 2026 أعلنت OpenAI أن نظامًا متعدد الوكلاء أنجز، في نحو 88 ساعة، بناء انفجار في زمن منتهٍ لمعادلات نافييه–ستوكس ثلاثية الأبعاد غير القابلة للانضغاط، مدفوعة بحد قسري أملس ومحدود الحمل، ومُتحقَّق منه في Lean 4. اقرأ العنوان وحده فيبدو جوابًا مباشرًا على مسألة جائزة الألفية.

لكن التدقيق جاء سريعًا. فقد كشف تدقيق مستقل في Lean أن الصياغة المترجمة لم تنقل المخطوطة اللغوية بأمانة: المسألة 8.6 تدّعي التحكم في المؤثر العكسي بمشتقات من الرتبة m+4، بينما يشترط كود Lean الرتبة m+5. والاعتراض الأعمق يتعلق بنص المسألة نفسه: نسخة جائزة الألفية بلا قوة خارجية وبطاقة منتهية، أما بناء OpenAI فيعتمد على قوة خارجية مصمَّمة تُضخّ الإنستروفية باستمرار في الأعداد الموجية العالية. وهل يجيب انفجارٌ بقوة خارجية عن سؤالٍ بلا قوة خارجية؟ الأمر أبعد ما يكون عن الحسم. ولم يعتمد معهد كلاي شيئًا، وقالت OpenAI نفسها إنها لن تطالب بالجائزة.

1.2 شبكة Caltech العصبية الفيزيائية: مقطع ذاتي التشابه في عالم بلا قوة خارجية

النقيض لمسار OpenAI القائم على القوة الخارجية هو ما بناه فريق في Caltech بشبكة عصبية مقيَّدة بالفيزياء (PINN) لمقطع انفجار ذاتي التشابه في معادلات أويلر ثلاثية الأبعاد — بلا قوة خارجية، وفي فضاء غير محدود. وقد أيّد Terence

Tao هذا النهج علنًا في الليلة السابقة لإعلان OpenAI. وأهمية العمل منهجية: لا شيء يُحقن من الخارج، بل تُترك المعادلات لتُنمّي تفردها بنفسها، وهو أقرب إلى صورة عدم استقرار هيدروديناميكي جوهري.

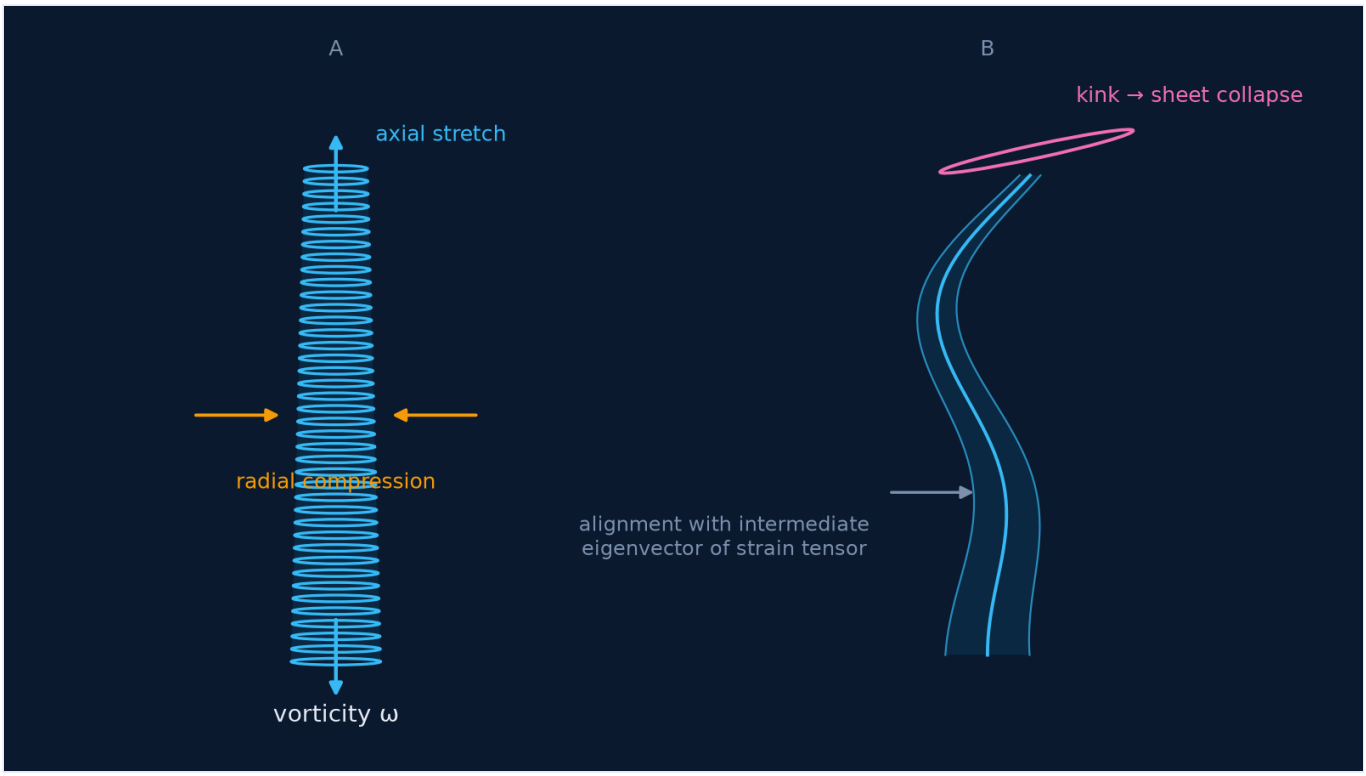
1.3 الإجماع يتحرك: من «إثبات السلاسة» إلى «فهم الانفجار»

الأهم من أي برهان منفرد أن الإجماع نفسه في حركة. في 2026 قال Tao صراحة إن طريقة التفكير في هذا المجال تغيّرت، وإن حدس الانتظام يُعدّ اليوم على نطاق واسع خطأً — أي إن معطيات ابتدائية معينة ستنفجر في زمن منتهٍ. وخلال 2025–2026 أبلغت مجموعات مستقلة عن بناءات أو أدلة قوية مستمدة من تسلسل تمدد أنابيب الدوامية، والاقفال الطوبولوجي، وآليات السلسلة المتتالية. والجهد الجماعي ينتقل من إثبات أن الحلول تبقى ملساء إلى وصف متى، وبأي طريقة، تتعطل.

2. الهندسة الكامنة وراء الانفجار: حلقة تغذية راجعة للتمدد الدوامي

السبب في إمكانية انفلات نافييه–ستوكس آلية هندسية لا يستطيع التدفق الثلاثي الأبعاد تجنّبها: تمدد الدوامية. مدّ أنبوب دوامية على طول محوره، فيفرض حفظ الزخم الزاوي أن يدور أسرع وأرقّ؛ والدوران الأسرع يضخّم التمدد أكثر. هذه حلقة تغذية راجعة موجبة. والسؤال الرياضي هو هل التبدد اللزج قوي بما يكفي دائمًا لكبحها.

تُظهر حسابات Caltech النتيجة بوضوح: في المعادلات المعمّمة المحورية التماثل، تنمو ذروة الدوامية بمقدار $O(1/(T-t))$ في زمن منتهٍ، وتنتهك الدوامية المتكاملة معيار Beale–Kato–Majda، وهو ما يعلن تشكّل تفرد في زمن منتهٍ. وهنا تؤدي اللزوجة دورًا مخالفًا للحدس: لأن التنظيم اللزج يجعل الحل أكثر سلاسة واستقرارًا، فقد يعزّز في الواقع المحاذاة غير الخطية التي تقود تمدد الدوامية بدل أن يخمّدها.



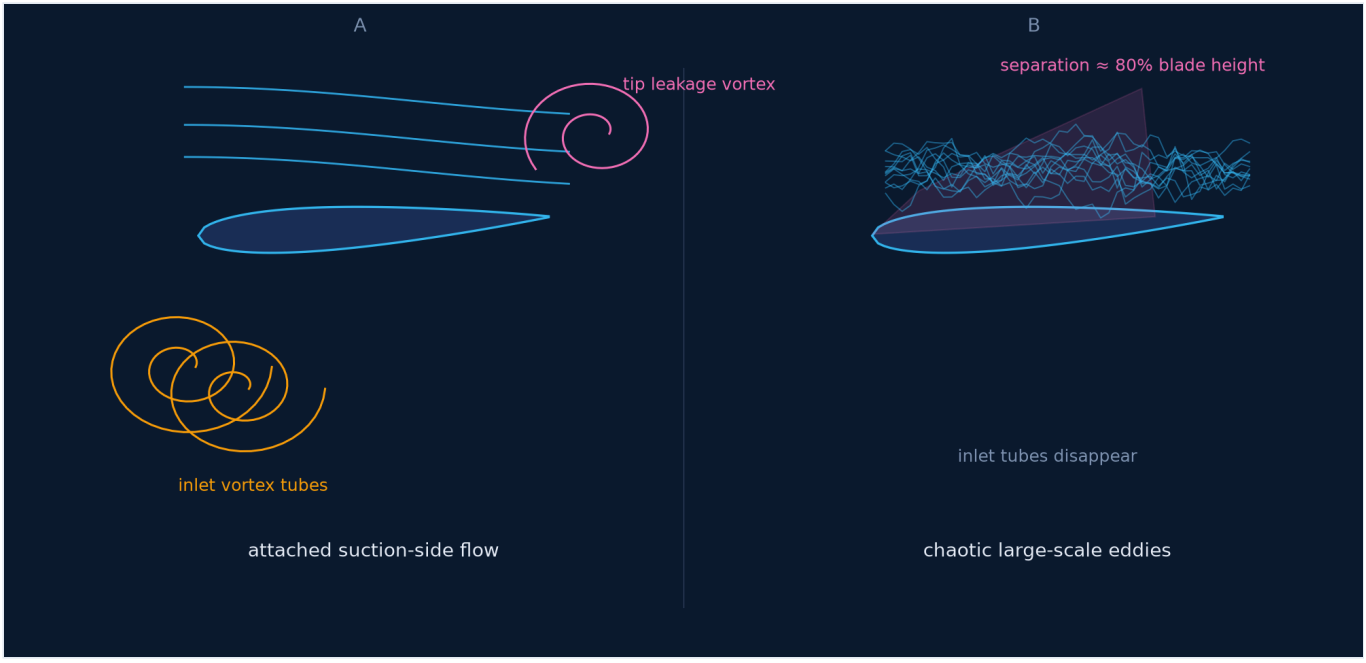
الشكل 2 — رسم تخطيطي لتمدد أنبوب الدوامية. مع تمدد الأنبوب محوريًا وانضغاطه قطريًا، تنزع الدوامية إلى المحاذاة مع المتجه الذاتي الأوسط لموتر معدل التشوه، وينتهي الأنبوب إلى الالتواء والانهيار في صفائح. هذه هي هندسة حد التمدد نفسه. الشكل الأصلي: المرجع 2 (Ruhr-Universität Bochum, Fig. 2.3)؛ أعيد رسمه هنا للتوضيح.

3. ماذا يعني هذا لمهندسي المراوح: نتيجة يُساء قراءتها على نطاق واسع

القراءة الخاطئة الشائعة تقول: إذا كان نافييه–ستوكس قابلًا للانفجار، فإن CFD وتصميم المراوح المبني عليه غير صالحين.

والحقيقة عكس ذلك. الانفجار حكم على نموذج وسط متصل بدقة لا نهائية وفي ظروف قصوى. CFD الهندسي لا يحل تلك المسألة أبدًا؛ بل يحل نسخة مروّضة: هندسة محدودة، وشبكة متقطعة، ونموذج إغلاق اضطراب من نوع RANS أو LES، وهدف معرَّف بدلالة التدفق المتوسط. وما يكافحه المهندسون فعليًا كل يوم ليس دوامية تذهب إلى اللانهاية، بل تدرجات حادة، ودوامات غير محلولة بالقدر الكافي، وانفصالًا، ونماذج إغلاق تتوقف بهدوء عن العمل في أنماط تشغيل معينة.

وفي محاكاة LES عام 2025 لمراوح محورية مخصصة لتبريد الإلكترونيات يصبح هذا «اللاسلاسة الهندسي» مرئيًا. عند ضغوط ارتداد عادية (0 و6 mmH_2O) يبقى التدفق على جانب الشفط متصلًا، وتظهر أزواج أنابيب دوامية عند المدخل بتماسك جيد، وتكون دوامات التسرب عند الطرف محددة بوضوح. وعند 12 mmH_2O تظهر منطقة انفصال عند الحافة الأمامية، وتلتف الدوامة المنفصلة صاعدة نحو الطرف. وعند حالة الانهيار 18 mmH_2O تختفي أنابيب الدوامية عند المدخل كليًا، ويحل محلها اضطراب عشوائي منتشر واسع النطاق، بينما تمتد منطقة الانفصال على جانب الشفط إلى نحو 80% من ارتفاع الريشة و20% من الوتر. ولا يظهر أي تفرد في هذه الصورة كلها — لكن تظهر حقيقة: نماذج إغلاق الاضطراب تصمد في التدفق المتصل وتفقد مصداقيتها في الانفصال الواسع والانهيار.

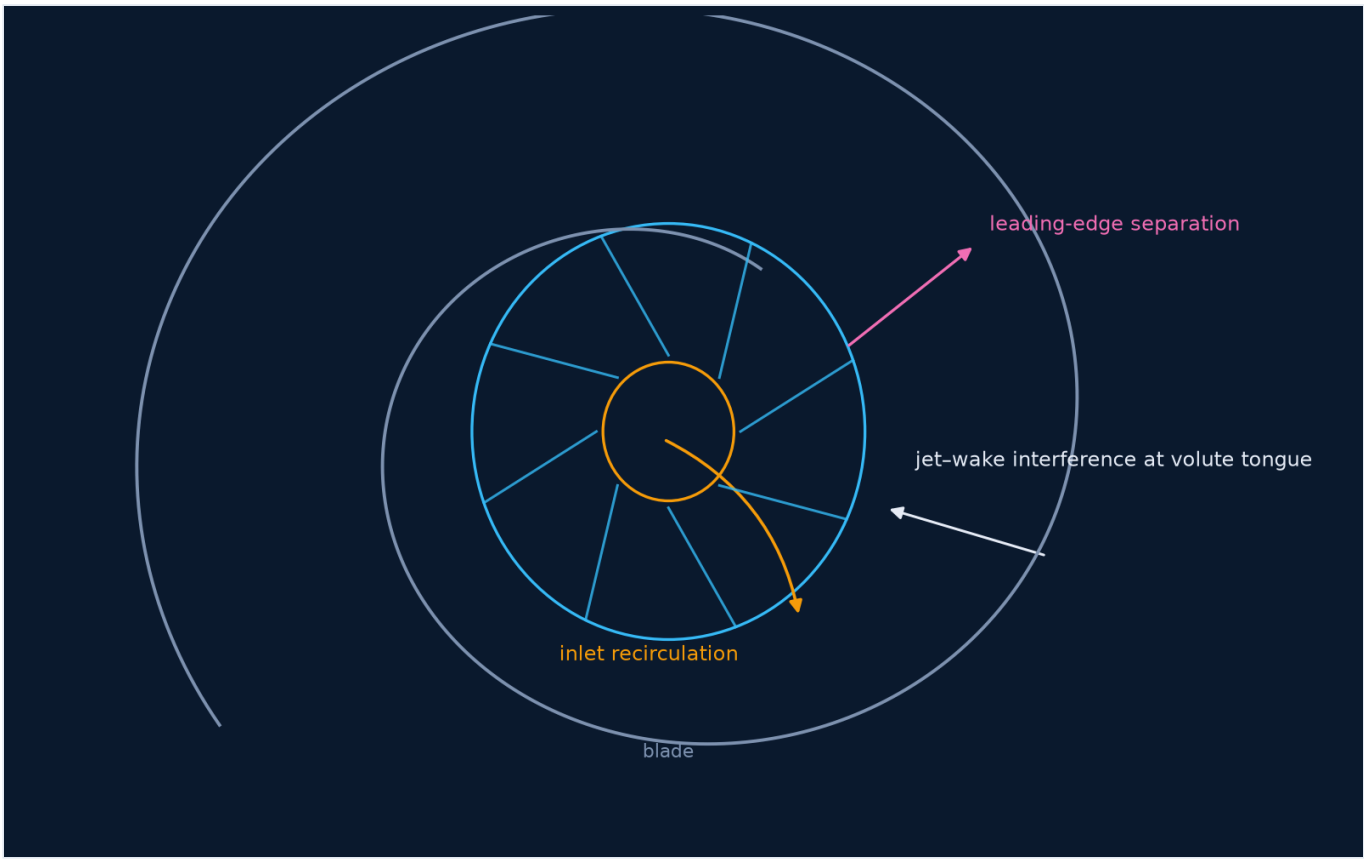


الشكل 3 — بنية التدفق في مروحة محورية: عادي مقابل الانهيار. على اليسار تدفق متصل على جانب الشفط مع أنابيب دوامية متماسكة عند المدخل ودوامات تسرب محددة عند الطرف؛ وعلى اليمين اختفت أنابيب المدخل، وسيطر اضطراب واسع النطاق، وامتدت منطقة الانفصال على عرض الريشة. هذه هي الحقيقة غير الملساء التي يتعامل معها CFD الهندسي كل يوم، وهي ترسم حدّ صلاحية نموذج الإغلاق. الأشكال الأصلية: المرجع 3 (Applied Acoustics 2025, Fig. 15–18)؛ أعيد رسم التخطيط هنا.

4. رؤية SUNXFAN: النموذج الدقيق متغيّر في الكفاءة والضوضاء

هناك حقيقة يسهل الاستهانة بها في صناعة المراوح: كل نقطة في الكفاءة الإيروديناميكية، وكل ديسيبل في خفض الضوضاء، تأتي في نهاية المطاف من وصف أدق لبنية التدفق.

هل تحافظ مروحة طرد مركزي EC على جزيرتها عالية الكفاءة عند الحمل الجزئي؟ يعتمد ذلك على ما إذا كان التدفق الثانوي ودوامات الانفصال داخل الدفاعة يبقيان ضمن النطاق المقصود. وقد وجدت دراسة CFD لمروحة طرد مركزي متعددة الريش ذات انحناء أمامي منطقة إعادة تدوير كبيرة في الانحناء عند مدخل الدفاعة، وانفصالًا واضحًا ينطلق عند الحافة الأمامية للريشة، وتفاعل نافورة–استدارة بين لسان الحلزون واستدارة الدفاعة — وهو مصدر رئيسي لعدم الاستقرار في التدفق وللضوضاء المنفصلة. ودراسة أخرى للتدفق الداخلي في مراوح طرد مركزي متعددة الريش لاحظت بدورها إعادة تدوير ودوامات كبيرة داخل ممرات الريش، حتى عند نقطة أفضل كفاءة. لا شيء من هذا تفرد رياضي، لكنه كله المعادلات نفسها معبَّرًا عنها بالمقياس الهندسي.



الشكل 4 — خطوط الانسياب وحقل السرعة داخل دفاعة طرد مركزي. إعادة التدوير عند المدخل، والانفصال عند الحافة الأمامية، وتداخل النافورة والاستدارة قرب لسان الحلزون، هي المصادر الأساسية لفقد الكفاءة وللضوضاء المنفصلة. لا تفرد هنا، ومع ذلك فهذه معادلات نافييه–ستوكس بالمقياس الهندسي. الأشكال الأصلية: المرجع 4 (TU Darmstadt, Fig. 9/12)؛ أعيد رسم التخطيط هنا.

القيمة العملية لأفق 2026 الرياضي ليست في برهان الانفجار نفسه، بل في ثقافة المحاكاة التي يشجعها: CFD واعٍ بالصلاحية، تعرف فيه أي نقاط تشغيل يستطيع النموذج حملها، وأيها يحتاج إلى تحسين محلي أو إلى نموذج إغلاق مختلف أو إلى عودة إلى الاختبار الفيزيائي. وبالنسبة إلى مهام HVAC، والتبريد في مراكز البيانات وأنظمة تخزين الطاقة، والهواء النقي، ومعماريات 800V HVDC التي تخدمها SUNXFAN، يعني ذلك تمييزًا أوضح بين القرارات الإيروديناميكية التي يمكن تسليمها إلى CFD وتلك التي يجب إسنادها إلى بيانات مقيسة.

5. خاتمة: الرياضيات تعترف بأن المائع قد ينفلت، والهندسة تتعلم التعايش مع ذلك

مسألة الوجود والسلاسة لنافييه–ستوكس لا تزال بعيدة عن الحل في 2026. فنتيجة OpenAI محل جدل، وبناء Caltech لا يزال يحتاج إلى تحقق مستقل، ومليون دولار معهد كلاي لم يطالب بها أحد. الذي تغيّر فعلًا هو الافتراض المسبق: لم تعد السلاسة الشاملة أمرًا مسلَّمًا به، وصارت بنية الانفجار وظروفه وتبعاته هدفًا بحثيًا مشروعًا.

وبالنسبة إلى المهندسين الذين يقفون خلف مروحة، هذا موقف مألوف. لم نملك يومًا عالمًا بتدفق ملساء إلى الأبد. نملك الانفصال والخطل واللاإستقرار وطبقات الحدود التي تصارع تدرج ضغط معاكسًا. تحرّكت الحدود لأن الرياضيات اعترفت أخيرًا، بأكثر لغاتها صرامة، بما يواجهه المهندسون يوميًا: الهواء لا يتصرف دائمًا كما ينبغي. والهندسة الحقيقية تظل تسليم مروحة كفؤة وهادئة وموثوقة حين لا يتصرف كذلك.

References

1. Hou, T. Y. *J. FoCM* (2026): النمو السريع لأقصى دوامية ومعيار BKM للانفجار في معادلات نافييه–ستوكس المعمّمة المحورية التماثل.
2. Ruhr-Universität Bochum، أطروحة دكتوراه، الشكل 2.3: تمدد أنبوب الدوامية والانهيار الشبيه بالصفائح.
3. *Applied Acoustics* (2025): محاكاة LES لمراوح محورية لتبريد الإلكترونيات في الظروف العادية وحالة الانهيار، الشكل 15–18.
4. TU Darmstadt: تحليل CFD لمروحة طرد مركزي، السرعات وخطوط الانسياب، الشكل 9–12.
5. «A Structural Dismantling of OpenAI's "Finite-Time blowup for Navier–Stokes"»، Zenodo، سبتمبر 2026.
6. «Navier–Stokes Lost in Translation»، Zenodo، أكتوبر 2026: بشأن عدم تطابق صياغة Lean، والفرق بين المسألة المفروضة عليها قوى خارجية والمسألة الخالية منها.
7. Terence Tao، تعليقات علنية على تحوّل الإجماع في حدس الانتظام لنافييه–ستوكس، 2026.

عن SUNXFAN®: تُصنّع SUNXFAN مراوح طرد مركزي ومحورية صناعية من نوع EC وDC وAC لتطبيقات HVAC، والإدارة الحرارية لمراكز البيانات وأنظمة تخزين الطاقة، وتطبيقات الهواء النقي، بما في ذلك وحدات مراوح مبنية لمعماريات 800V HVDC. ونؤمن بأن الانتباه المستمر إلى أكثر أسئلة ميكانيكا الموائع أساسية هو ما يُبقي أنظمة المراوح كفؤة وموثوقة على المدى الطويل.