RICERCA TECNICA · FRONTIERA DELLA MECCANICA DEI FLUIDI

Blow-up di Navier–Stokes: regge ancora la CFD dei ventilatori?

Il cambio di rotta del 2026 non segna il crollo della CFD: dice dove le equazioni di Navier–Stokes sono affidabili e dove serve il dato sperimentale.

Articolo tecnico · Redazione tecnica SUNXFAN · 2026-11

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

Nel mondo dei ventilatori trattiamo con l'aria ogni giorno. Ogni arco di girante e ogni profilo di voluta poggia su un unico sistema di equazioni, quelle di Navier–Stokes: descrivono il moto di un fluido viscoso e costituiscono il fondamento matematico delle previsioni meteo, della progettazione aeronautica e dell'aerodinamica di ogni ventilatore centrifugo e assiale che costruiamo.

Da più di vent'anni, su questo fondamento pesa un interrogativo: in tre dimensioni, a partire da dati iniziali regolari, la soluzione resta regolare per sempre oppure può “esplodere” in tempo finito, spingendo velocità o vorticità all'infinito?

Il 2026 ha segnato una svolta reale su quel interrogativo. Non perché sia stato risolto, ma perché la comunità matematica ha cominciato a prendere sul serio uno scenario che per lungo tempo aveva respinto: che il blow-up sia il comportamento intrinseco di un fluido in condizioni estreme e che la regolarità sia il caso da motivare.

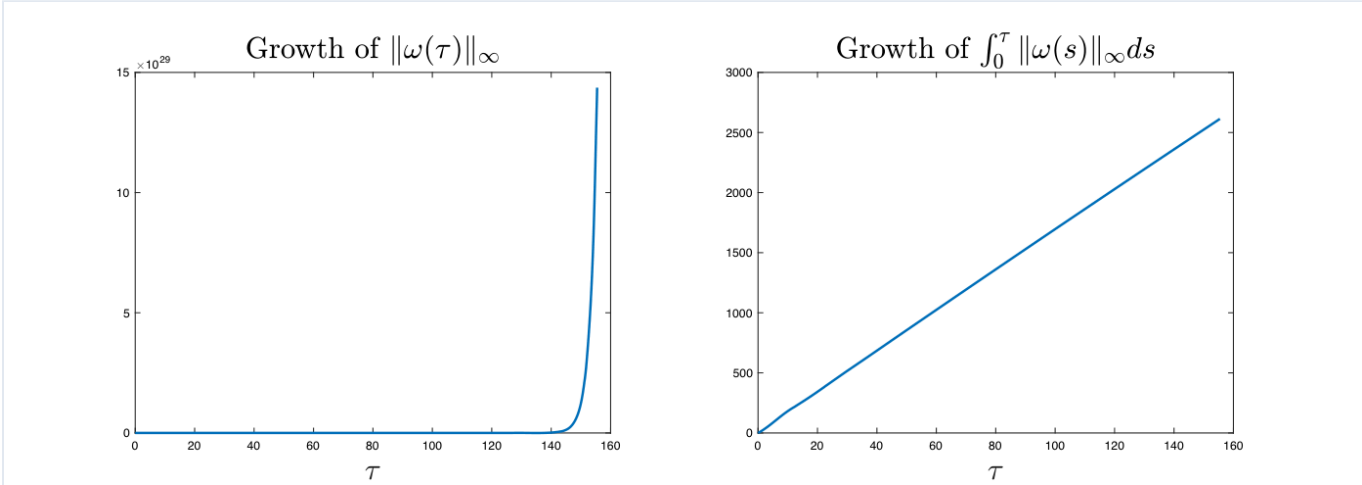


Fig. 15 Growth of maximum vorticity for the rescaled Navier-Stokes model. Left plot: the amplification of

Figura 1 — Evoluzione della vorticità per le equazioni di Navier–Stokes 3D in un'impostazione assialsimmetrica generalizzata. La vorticità di picco cresce bruscamente in tempo finito e la vorticità integrata viola il criterio di Beale–Kato–Majda, esattamente l'impronta numerica che lascerebbe una singolarità in tempo finito. Figura originale: riferimento 1 (Hou, J. FoCM 2026, fig. 15/16).

1. La svolta del 2026: tre filoni di prove che convergono

1.1 Il blow-up forzato di OpenAI: uno shock per il settore, non una sentenza

L'8 settembre 2026 OpenAI ha annunciato che un sistema multi-agente aveva costruito, in circa 88 ore, un blow-up in tempo finito per le equazioni di Navier–Stokes incomprimibili 3D, con un termine di forza regolare e a supporto compatto, verificato in Lean 4. Fermandosi al titolo, sembra la risposta diretta al problema del Millennium Prize.

Le verifiche sono arrivate presto. Un audit indipendente in Lean ha rilevato che la formalizzazione compilata non traduce fedelmente il manoscritto in linguaggio naturale: il Lemma 8.6 afferma il controllo dell'operatore inverso con m+4 derivate, mentre il codice Lean ne richiede m+5. L'obiezione più profonda riguarda la formulazione stessa del problema. La versione del Millennium è non forzata e a energia finita; la costruzione di

OpenAI si appoggia a una forza regolare progettata ad hoc che continua a immettere enstrofia nelle alte frequenze spaziali. Che un blow-up forzato risponda a una domanda non forzata è tutt'altro che assodato. Il Clay Mathematics Institute non ha accettato nulla e la stessa OpenAI ha dichiarato che non rivendicherà il premio.

1.2 Il PINN del Caltech: un profilo auto-simile in un mondo non forzato

Il contraltare alla via forzata di OpenAI è il lavoro di un gruppo del Caltech, che con una rete neurale informata dalla fisica ha costruito un profilo di blow-up auto-simile per le equazioni di Eulero 3D: non forzate, senza confini, nello spazio libero. Terence Tao ha espresso pubblicamente sostegno a questo approccio la sera prima dell'annuncio di OpenAI. Il valore è metodologico: dall'esterno non viene iniettato nulla; sono le equazioni stesse a sviluppare la propria singolarità, il che è più vicino all'idea di un'instabilità idrodinamica intrinseca.

1.3 Il consenso si sposta: da “dimostrare la regolarità” a “capire il blow-up”

Più di qualunque singola dimostrazione conta il fatto che il consenso stesso si stia muovendo. Nel 2026 Tao ha affermato senza giri di parole che l'orientamento del settore è cambiato e che la congettura di regolarità è ormai ampiamente considerata falsa: dati iniziali specifici esploderanno in tempo finito. Nel corso del 2025–2026 gruppi indipendenti hanno riportato costruzioni o prove numeriche solide basate su stiramento concatenato di tubi di vortice, blocco topologico e meccanismi a cascata. Lo sforzo collettivo migra dal dimostrare che le soluzioni restano regolari al descrivere quando, e in che modo, smettono di esserlo.

2. La geometria dietro il blow-up: un anello di retroazione dello stiramento di vorticità

Il motivo per cui Navier–Stokes può “scappare” è un meccanismo geometrico che il flusso 3D non può evitare: lo stiramento dei vortici. Se si stira un tubo di vortice lungo il proprio asse, la conservazione del momento angolare lo costringe a girare più veloce e a diventare più sottile; girare più veloce amplifica ulteriormente lo stiramento. È un anello di retroazione positiva. La questione matematica è se la dissipazione viscosa sia sempre abbastanza forte da tenerlo a bada.

La numerica del Caltech ne mostra la conseguenza in modo netto: nelle equazioni assialsimmetriche generalizzate la vorticità di picco cresce come $O(1/(T-t))$ in tempo finito e la vorticità integrata viola il criterio di Beale–Kato–Majda, segnalando la formazione di una singolarità in tempo finito. Qui la viscosità gioca un ruolo controintuitivo. Poiché la regolarizzazione viscosa rende la soluzione più liscia e più stabile, può in realtà rafforzare l'allineamento non lineare che alimenta lo stiramento invece di smorzarlo.

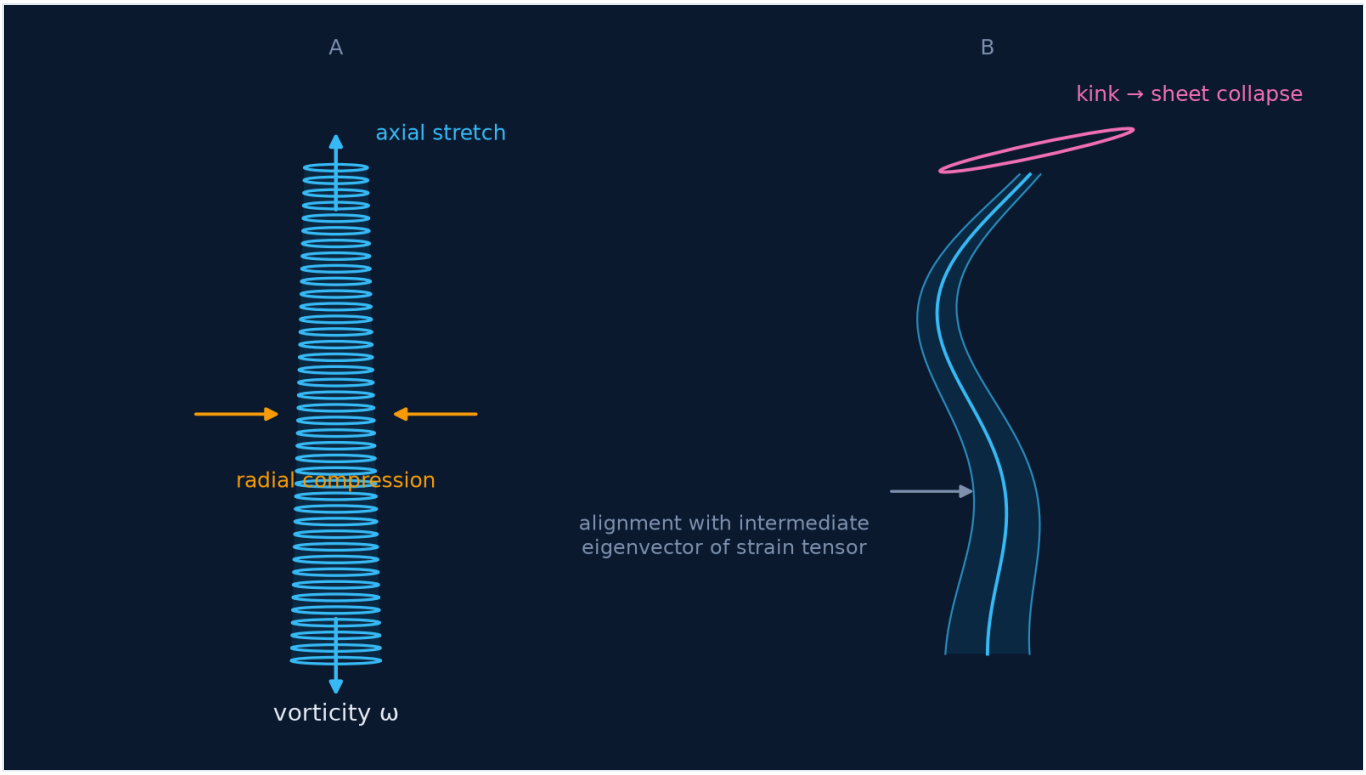


Figura 2 — Schema dello stiramento di un tubo di vortice. Quando il tubo viene stirato in direzione assiale e compresso in direzione radiale, la vorticità tende ad allinearsi all'autovettore intermedio del tensore del rateo di deformazione, finché il tubo si piega e collassa in fogli. È la geometria del termine di stiramento stesso. Figura originale: riferimento 2 (Ruhr-Universität Bochum, fig. 2.3); ridisegnata qui per chiarezza.

3. Cosa significa per i progettisti di ventilatori: una conclusione largamente fraintesa

La lettura sbagliata più diffusa è questa: se Navier–Stokes può esplodere, allora la CFD e la progettazione dei ventilatori che su di essa si basa non sono valide.

Vale l'esatto contrario. Il blow-up è un'affermazione su un modello continuo a risoluzione infinita, in condizioni estreme. La CFD ingegneristica non risolve mai quel problema: ne risolve una versione addomesticata, con geometria limitata, una maglia discreta, un modello di chiusura RANS o LES e un obiettivo definito in termini di flusso medio. Ciò contro cui il progettista si batte ogni giorno non è la vorticità che va all'infinito, ma i gradienti ripidi, i vortici sotto-risolti, la separazione e chiusure che smettono silenziosamente di funzionare in certi regimi operativi.

Una simulazione LES del 2025 su ventilatori assiali per il raffreddamento dell'elettronica rende visibile proprio questa “non regolarità ingegneristica”. Alle pressioni di mandata normali (0 e 6 mmH_2O) il flusso sul lato in depressione resta aderente, compaiono coppie coerenti di tubi di vortice in ingresso e i vortici di fuga all'estremità sono ben definiti. A 12 mmH_2O si forma una zona di separazione al bordo d'attacco e il vortice separato si avvita verso l'estremità. Nella condizione di stallo, a 18 mmH_2O, i tubi di vortice in ingresso scompaiono del tutto, sostituiti da turbolenza caotica e diffusa su larga scala, mentre la zona di separazione sul lato in depressione si estende fino a circa l'80% dell'altezza pala e al 20% della corda. In questo quadro

non appare alcuna singolarità, ma un fatto sì: le chiusure della turbolenza tengono in flusso aderente e perdono credibilità in separazione ampia e in stallo.

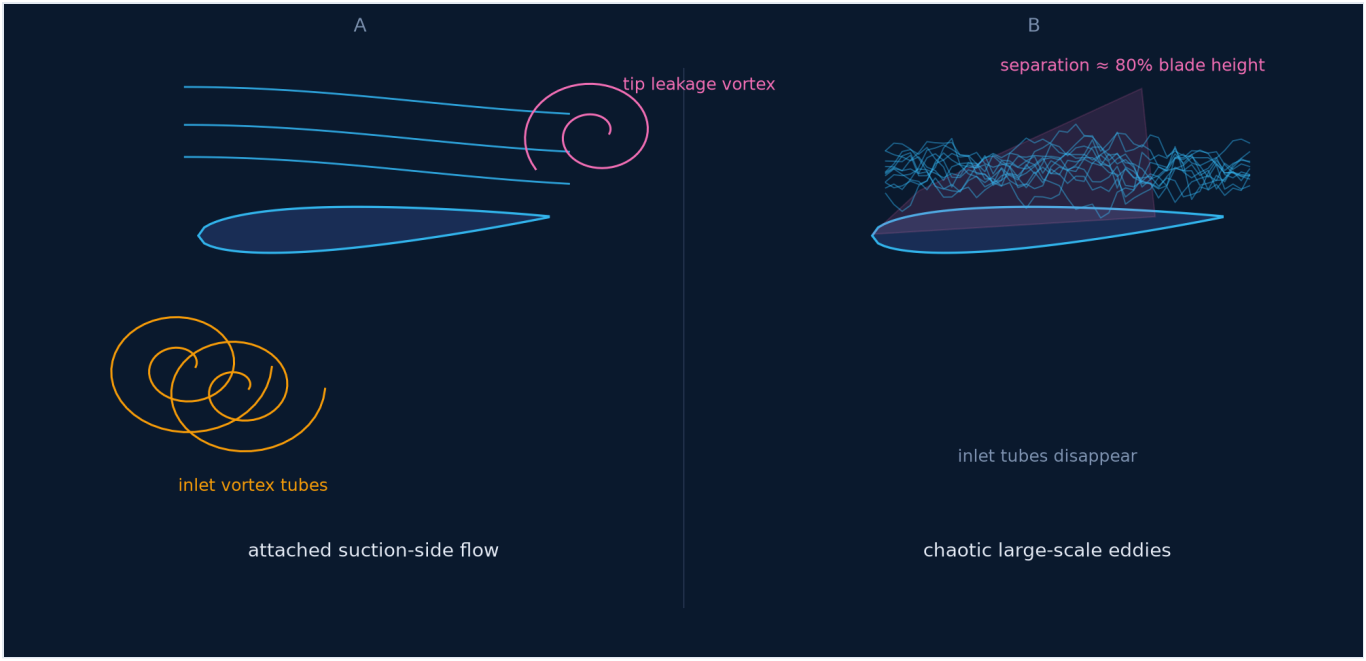


Figura 3 — Struttura del flusso di un ventilatore assiale, normale contro stallo. A sinistra flusso aderente sul lato in depressione, con tubi di vortice in ingresso coerenti e vortici di fuga all'estremità ben definiti; a destra i tubi in ingresso sono scomparsi, domina la turbolenza di larga scala e la zona di separazione si estende su tutta la pala. È la realtà non regolare che la CFD ingegneristica affronta ogni giorno, e segna il confine di validità della chiusura. Figure originali: riferimento 3 (Applied Acoustics 2025, fig. 15–18); schema ridisegnato qui.

4. La posizione SUNXFAN: un modello accurato è una variabile di efficienza e di rumore

Un fatto spesso sottovalutato nel settore: ogni punto di efficienza aerodinamica e ogni decibel di rumore in meno nascono, in ultima analisi, da una descrizione più accurata della struttura del flusso.

Che un ventilatore centrifugo EC conservi la sua isola di alto rendimento a carico parziale dipende dal fatto che i flussi secondari e i vortici di separazione all'interno della girante restino entro l'inviluppo previsto. Uno studio CFD su un ventilatore centrifugo multipalare a pale curve in avanti ha rilevato una vasta zona di ricircolo nella curva all'ingresso della girante, una separazione marcata innescata al bordo d'attacco delle pale e l'interazione getto–scia tra la lingua della voluta e la scia della girante, una fonte principale di instabilità del flusso e di rumore discreto. Un altro studio sul flusso interno di ventilatori centrifughi multipalari ha parimenti osservato ricircolo e grandi vortici nei condotti tra le pale già al punto di massima efficienza. Nulla di tutto ciò è una singolarità matematica, ma tutto è la stessa equazione di Navier–Stokes espressa alla scala dell'ingegneria.

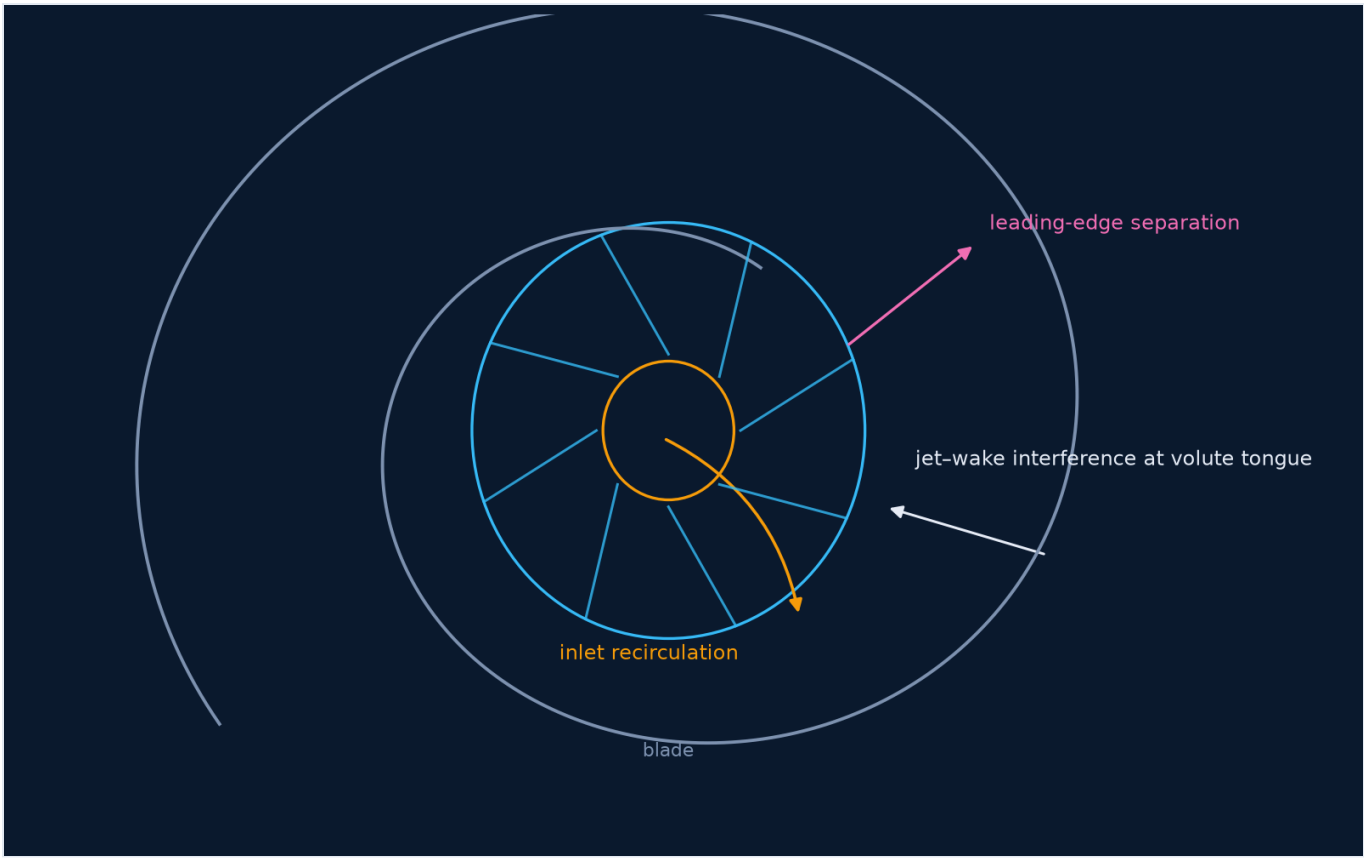


Figura 4 — Linee di flusso e campo di velocità all'interno di una girante centrifuga. Ricircolo in ingresso, separazione al bordo d'attacco e interferenza getto–scia presso la lingua della voluta sono le fonti principali di perdita di efficienza e di rumore discreto. Nessuna singolarità è coinvolta, eppure questa è l'equazione di Navier–Stokes alla scala dell'ingegneria. Figure originali: riferimento 4 (TU Darmstadt, fig. 9/12); schema ridisegnato qui.

Il valore pratico della frontiera matematica del 2026 non sta nella dimostrazione del blow-up in sé: sta nella cultura di simulazione che incoraggia, una CFD consapevole della validità, in cui si sa quali punti di funzionamento il modello può sostenere e quali richiedono raffinamento locale, una chiusura diversa o il ritorno alla prova fisica. Per le applicazioni HVAC, per il raffreddamento di data centre e sistemi di accumulo, per l'aria pulita e per i compiti a 800V HVDC che SUNXFAN serve, questo significa giudicare con maggiore chiarezza quali decisioni aerodinamiche possono essere affidate alla CFD e quali devono essere ancorate a dati misurati.

5. Chiusura: la matematica ammette che il fluido può scappare, l'ingegneria impara a conviverci

Il problema dell'esistenza e della regolarità per Navier–Stokes è lungi dall'essere risolto nel 2026. Il risultato di OpenAI è contestato, la costruzione del Caltech attende ancora una verifica indipendente e il milione di dollari del Clay Institute resta non assegnato. Ciò che è cambiato è l'ipotesi di partenza: la regolarità globale non è più data per scontata, e struttura, condizioni e conseguenze del blow-up sono ormai un legittimo obiettivo di ricerca.

Per chi sta dietro a un ventilatore, è una posizione familiare. Non abbiamo mai posseduto un mondo di flusso permanentemente regolare. Il nostro mondo è fatto di separazione, mescolamento, instabilità e strati limite

che lottano contro un gradiente di pressione avverso. La frontiera si è spostata perché la matematica ha finalmente ammesso, nel suo linguaggio più rigoroso, ciò che l'ingegneria affronta ogni giorno: l'aria non si comporta sempre come dovrebbe. La vera ingegneria continua a fornire un ventilatore efficiente, silenzioso e affidabile proprio dove non si comporta bene.

References

1. Hou, T. Y. *J. FoCM* (2026): crescita rapida della vorticità massima e criterio di blow-up di BKM nelle equazioni assialsimmetriche generalizzate di Navier–Stokes.
2. Ruhr-Universität Bochum, dissertazione di dottorato, figura 2.3: stiramento di tubi di vortice e collasso a fogli.
3. *Applied Acoustics* (2025): LES di ventilatori assiali per il raffreddamento dell'elettronica in condizioni normali e di stallo, fig. 15–18.
4. TU Darmstadt: analisi CFD di un ventilatore centrifugo, velocità e linee di flusso, fig. 9–12.
5. Zenodo, “A Structural Dismantling of OpenAI's ‘Finite-Time blowup for Navier–Stokes’”, settembre 2026.
6. Zenodo, “Navier–Stokes Lost in Translation”, ottobre 2026: sul disallineamento della formalizzazione in Lean e sulle formulazioni forzata e non forzata.
7. Terence Tao, dichiarazioni pubbliche sul cambio di consenso riguardo alla regolarità di Navier–Stokes, 2026.

About SUNXFAN®: SUNXFAN produce ventilatori centrifughi e assiali industriali EC, DC e AC per HVAC, per la gestione termica di data centre e sistemi di accumulo e per applicazioni di aria pulita, comprese unità ventilanti realizzate per architetture 800V HVDC. Crediamo che l'attenzione costante alle domande più fondamentali della meccanica dei fluidi sia ciò che mantiene i sistemi di ventilazione efficienti e affidabili nel lungo periodo.