AI și matematica între demonstrație și înțelegere

De la profesorii care protestau împotriva calculatorului la o ipoteză veche de 167 de ani verificată cu ajutorul inteligenței artificiale

Catalin VRABIE | 23 noiembrie 2026

În fotografia de mai jos (1986), câțiva profesori de matematică mărșăluiesc pe un trotuar din *Washington* cu pancarte împotriva folosirii calculatoarelor de buzunar de către elevii claselor primare. Nu le contestau utilitatea în orice împrejurare; se temeau doar că, dacă elevii ar avea acces la ele prea devreme, nu ar mai învăța ce se ascunde în spatele operațiilor. Protestul, organizat de autorul de manuale John Saxon în timpul conferinței *National Council of Teachers of Mathematics (NCTM)*, a adunat doar un grup mic, nu întreaga comunitate[1]; dar întrebarea pusă atunci a supraviețuit celor patruzeci de ani care au urmat: *ce pierdem din ceea ce știm să facem atunci când o mașină începe să facă acel lucru în locul nostru?* [1]

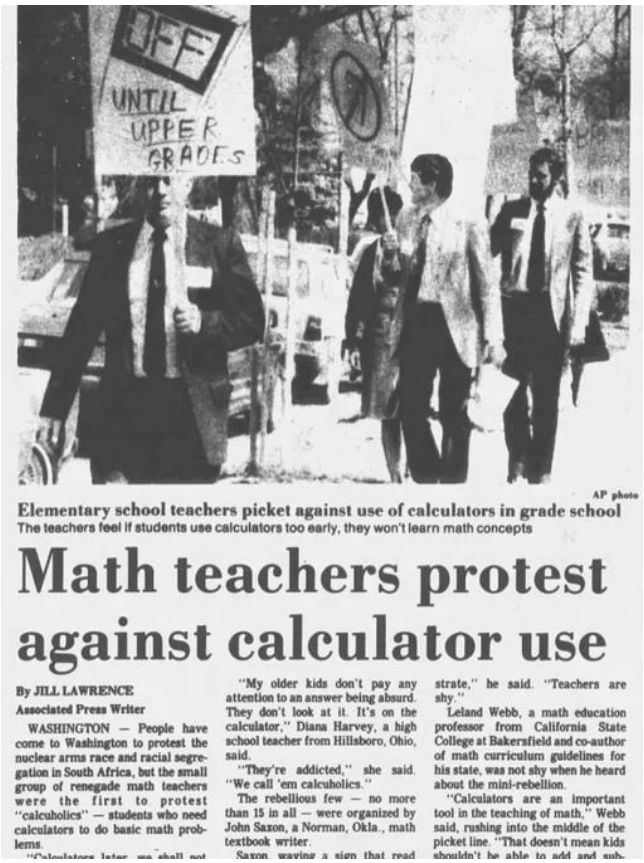

Fig. 1. Protestul din Washington, 3 aprilie 1986. Fotografie Associated Press [1].

Este tentant să privim scena cu superioritatea celor care cunosc deja finalul poveștii. Calculatoarele nu au distrus matematica, iar NCTM recomanda încă din 1980 integrarea lor în școală [2]. Mai mult,

[1] Relatarea *Associated Press* descria o prezență de aproximativ 15 protestatari din cei circa 6.500 de participanti.

o analiză a 79 de studii publicată în 1986 arăta că, folosite alături de predarea tradițională, puteau îmbunătăți în medie inclusiv performanțele la exerciții cu creionul pe hârtie; autorii semnalau însă o excepție la clasa a IV-a [3], așadar nu tehnologia în sine hotăra rezultatul, ci și vârsta elevilor și felul în care era folosită.

Astăzi nu mai discutăm despre un instrument care execută doar operații matematice... AI poate sugera strategia abordării unei probleme, poate scrie demonstrația și poate încerca să o verifice. Uneori poate propune și idei la care nici specialiștii nu ajunseseră. Comparația cu 1986 este, așadar, utilă numai până la un punct. Pe atunci, calculatorul scurta execuția, astăzi inteligența artificială poate prelua o parte din însăși activitatea intelectuală… și de aici începe povestea noastră.

Când soluțiile se înmulțesc mai repede decât explicațiile

Terence Tao, profesor la UCLA și laureat al Medaliei Fields, a formulat schimbarea într-un mod memorabil: matematica trece dintr-o epocă a rarității demonstrațiilor într-una a abundenței lor. În interviul acordat *Numberphile* în octombrie 2026, el descrie cercetarea de odinioară ca pe un drum lung: citeai ce făcuseră alții, încercai idei, discutai cu colegii, greșeai, reluai și tot așa pentru ca la capătul drumului să obții, de regulă, nu numai o demonstrație, ci și o înțelegere a motivului pentru care aceasta funcționează. Acum, rezultatul poate apărea înainte ca cineva să fi parcurs acest drum [4]. În eseul său despre matematica în epoca AI, Tao întreabă ce valori trebuie să protejeze comunitatea (iar noi, plecând de la argumentele lui, putem extinde la întreaga societate) atunci când rezolvarea problemelor devine mai ieftină și mai rapidă [5].

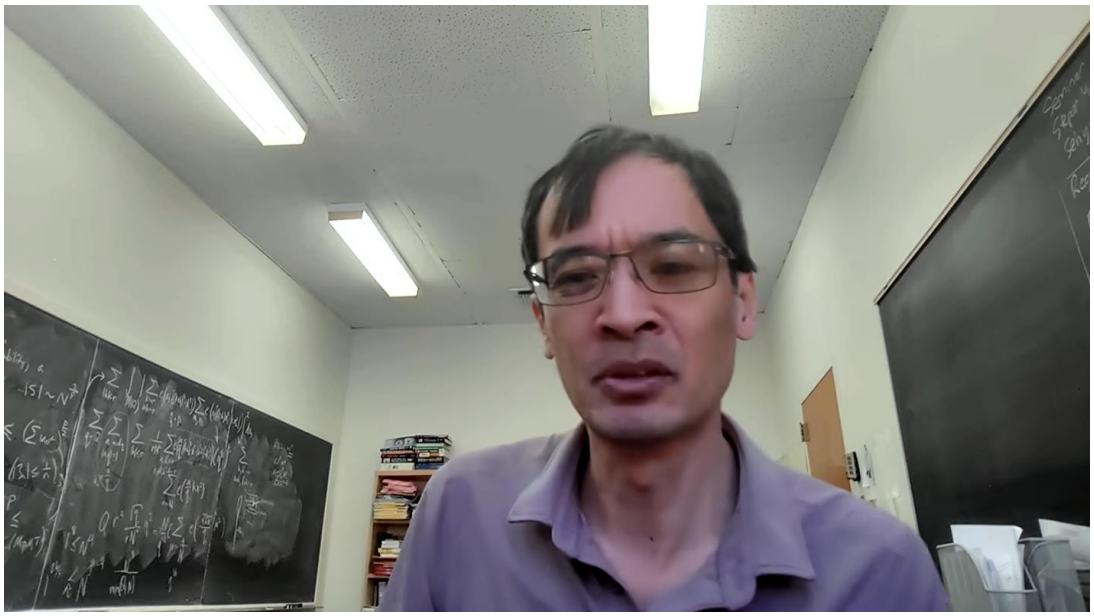

Fig. 2. Terence Tao, în dialog cu Numberphile despre viitorul matematicii [4].

Merită să despărțim trei lucruri care în știrile despre AI se amestecă adesea. Primul este **răspunsul**: de exemplu, bănuim că o regulă este adevărată. Al doilea este **demonstrația**: o succesiune de argumente care arată că regula rezultă din ipotezele adoptate. Al treilea este **înțelegerea**: capacitatea de a explica ideea, de a recunoaște unde mai poate fi folosită și de a vedea ce întrebări noi deschide – faptul că am verificat o mie de triunghiuri nu demonstrează ceva despre toate triunghiurile posibile, iar o demonstrație foarte lungă poate fi corectă fără să ne spună, dintr-o privire, ce idee o face să funcționeze.

Aici intervine *Lean*, un limbaj și un instrument *software* dezvoltat special pentru verificarea demonstrațiilor matematice. Îi putem cere să controleze, pas cu pas, dacă un argument respectă regulile logice și definițiile introduse. Este cu mult mai mult decât un *chatbot* care produce un text convingător, el nefiind impresionat de stilul frazei, ci de validitatea relațiilor formale [6]. Dar nici el nu hotărăște singur dacă problema a fost formulată așa cum intenționam sau de ce rezultatul contează.

Îmi place o comparație simplă: un ghid de călătorie sau un sistem de navigație ne poate conduce fără greșeală printr-un oraș necunoscut. Ajungem la destinație, dar asta nu înseamnă că am înțeles orașul și că am putea descoperi singuri un traseu alternativ. În cercetare, verificarea vine ca urmare corectă a tuturor indicațiilor; înțelegerea însă este harta pe care o construim în minte. Avem nevoie de amândouă, chiar dacă nu le obținem în același timp.

Două probleme celebre și o surpriză mai mare decât rezultatul

În septembrie 2026, *OpenAI* a anunțat un rezultat privind ecuațiile Navier–Stokes, folosite pentru a descrie mișcarea fluidelor (apă, aer etc.). Gândiți-vă la turbulențele din jurul unei aripi de avion sau la felul în care se formează un vârtej în apă. Ecuațiile urmăresc asemenea mișcări, dar matematicienii se întrebau dacă, în anumite condiții, modelul poate ajunge într-un punct în care viteza calculată crește fără limită. Potrivit *OpenAI*, circa 10.000 de agenți AI au lucrat împreună aproximativ 88 de ore pentru a construi un astfel de exemplu și a-l formaliza în *Lean* [7].

Este important de luat în considerare aici un anumit detaliu: exemplul publicat implică o forță exterioară atent construită și respectă o anumită variantă a problemei oficiale. Nu înseamnă că în orice pahar cu apă se pot produce fizic viteze infinite și nici nu demonstrează toate variantele ecuațiilor. În discuțiile publice despre acest caz, Hannah Fry și, separat, astrofizicianul Neil deGrasse Tyson cu Mordecai-Mark Mac Low au explicat diferența dintre un model matematic, care simplifică realitatea, și lumea materială, care nu este obligată să urmeze toate idealizările noastre – ecuațiile testate de *OpenAI* tratează fluidul ca pe un mediu continuu, deși materia are o structură moleculară (deci granulară) [8] [9]. Descoperirea unei limite a modelului poate fi un progres și nu înseamnă că toate utilizările sale anterioare devin inutile.

Doar câteva săptămâni mai târziu, atenția s-a mutat spre ipoteza Riemann, formulată în 1859. Ea pornește de la numerele prime: 2, 3, 5, 7, 11 și tot așa. Le întâlnim aparent fără un ritm clar pe axa numerelor naturale. Totuși, matematicienii pot estima câte numere prime se găsesc până la o anumită valoare. Ipoteza Riemann spune, în esență, cât de bine pot fi controlate abaterile dintre aceste estimări și distribuția reală. Riemann a legat problema de o expresie numită *funcția zeta* și de locurile în care aceasta devine zero – practic posibilitatea de a trasa un grafic ce poate reprezenta întreaga mulțime de numere prime existente. El a presupus că toate zerourile relevante se aliniază pe o anumită linie, descrisă prin numărul 1/2. Afirmația a rezistat vreme de peste un secol și jumătate fără demonstrație.

La începutul lui octombrie, *OpenAI* a publicat o colecție de manuscrise matematice generate cu un model intern [10]. Unul dintre ele anunța un rezultat numit *quasi-Riemann*: nu demonstra ipoteza completă, dar excludea existența unor zerouri dincolo de limita 7/8, o regiune pe care teorema clasică nu o eliminase în aceeași formă [11]. Imaginați-vă că o carte ar trebui să se afle pe un anumit raft dintr-o bibliotecă imensă. Dacă reușim să excludem mai multe săli ale bibliotecii în care nu poate fi găsită facem evident un progres real, dar suntem departe de a demonstra faptul că ea se află exact pe poziția bănuită.

Apoi a venit 20 noiembrie. Levent Alpöge, matematician la *Anthropic*, a declarat că, lucrând cu modelul *Claude*, a obținut o demonstrație a ipotezei Riemann și a unei versiuni generalizate pentru o familie de funcții înrudite. În locul unei lucrări obișnuite, a publicat o notă de patru pagini și o arhivă *Lean* care cuprinde aproximativ 17 milioane de linii de cod [12]. Un secol și jumătate de așteptare s-au întâlnit, brusc, cu un rezultat pe care aproape nimeni nu are cum să-l citească în forma sa integrală.

Și totuși, povestea nu se reduce la un anunț spectaculos. Pe 21 noiembrie, comunitățile *Lean* și *Mathlib*, cu susținerea organizațiilor care dezvoltă aceste instrumente, au declarat că au verificat atât enunțul formal al ipotezei Riemann, cât și demonstrația publicată de Alpöge. Codul a fost compilat și verificat prin mai multe instrumente independente [13]. Andrew Sutherland, de la MIT, a documentat public aceste teste și a arătat cum a fost controlată inclusiv corespondența dintre problema matematică și ceea ce dovedește programul [14]. Este, prin urmare, mai mult decât o promisiune dintr-un comunicat de presă: există o certificare formală serioasă.

Aceasta nu echivalează însă cu încheierea tuturor etapelor prin care știința acceptă și folosește un rezultat. *Clay Mathematics Institute (CMI)* încă listează ipoteza Riemann printre Problemele nerezolvate ale Mileniului[2], iar recunoașterea instituțională are propriile proceduri [15]. Revista *Nature* a consemnat reacții contrastante: James Maynard, laureat al Medaliei Fields, vedea un potențial rezultat istoric, în timp ce Andrew Granville (un alt matematician valoros al lumii) critica prezentarea prea greu de urmărit. Publicația relatează și apariția unui manuscris separat, redactat fără AI, care revendica o demonstrație a aceleiași probleme, dar care are la rândul lui nevoie de verificare [16]. Tocmai această aglomerare de rezultate ne obligă să nu confundăm certificarea logică, explicația matematică și recunoașterea socială a descoperirii.

Aici este, cred, adevărata surpriză a finalului de an 2026. Nu doar că un sistem AI poate contribui la o demonstrație celebră, ci că putem avea o demonstrație certificată formal înainte ca explicația ei să fie suficient de clară pentru colegii care vor să învețe din ea. A afirma că numai oamenii pot înțelege ar fi prematur. A crede că înțelegerea vine automat odată cu demonstrația ar fi la fel de pripit.

Ce rămâne de făcut după ce mașina a terminat?

Ar fi nedrept să transformăm neliniștea matematicienilor într-o simplă rezistență la nou, dar nici nu putem declara lipsit de valoare un rezultat doar pentru că l-a produs o mașină. Richard Borcherds, și el laureat al Medaliei Fields, amintea că și oamenii descoperă uneori demonstrații greoaie, pe care abia mai târziu reușesc să le simplifice [17]. Dificultatea de a înțelege un argument la prima lectură nu este dovada că argumentul ar fi inutil.

Ceea ce se schimbă este ritmul; când o demonstrație lua ani, timpul necesar pentru explicații făcea parte, adesea, din proces. Când însă se pot produce multe demonstrații într-o zi, comunitatea riscă să acumuleze rezultate pe care nu mai are cine să le explice, să le compare cu literatura științifică publicată anterior sau să le transforme în noi metode. Pentru o companie, numărul de probleme rezolvate este o cifră; pentru știință, valoarea apare și atunci când altcineva poate folosi rezultatul. Tocmai de aceea parteneriatul anunțat în octombrie de *Simons Foundation*, *OpenAI* și *Anthropic* – cu fonduri și resurse însumând 15 milioane de dolari – urmărește inclusiv evaluarea rezultatelor AI și dezvoltarea unor standarde comune [18].

Există, din fericire, și o latură mai puțin spectaculoasă, dar foarte promițătoare. Într-un studiu publicat în *Nature* în 2021, Alex Davies și colaboratorii au arătat cum algoritmii pot identifica tipare

[2] Șapte la numar, acestea au fost lansate în anul 2000, cu un premiu de 1.000.000 de dolari pentru rezolvarea fiecăreia.

care orientează intuiția matematicianului; descoperirea și justificarea relațiilor rămâneau rezultatul colaborării dintre om și mașină [19]. Este o altă utilizare decât aceea de a cere „rezolvă tot”: AI ne poate arăta unde merită să privim, fără să decidă singur ce înțelegem.

Am mai discutat în AIoT această reorganizare a cercetării pornind de la *AlphaFold* și Premiul Nobel pentru Chimie (2024) [20]. Comparația nu trebuie dusă prea departe: predicția formei unei proteine și demonstrarea unei teoreme cer tipuri diferite de validare; dar lecția comună este relevantă: dacă un instrument face mult mai ieftină o etapă a muncii, întrebarea interesantă devine ce facem cu timpul și capacitatea de cercetare câștigate... accelerăm doar producția sau folosim noua putere ca să punem întrebări mai bune?

Ce îi mai cerem studentului dacă AI poate rezolva problema?

Evident, întrebarea nu se adresează exclusiv studenților la matematică. În *Education 2.0: Universities' E-Learning Methods* și în *NET Generation. Thinking outside the box by using online learning methods* am discutat, cu ani înainte de explozia AI generative, despre felul în care tehnologia schimbă metodele universitare de învățare [21] [22]. Nu susțineam că orice ecran produce automat educație mai bună; conta activitatea pe care o face posibilă. Aceeași preocupare a ghidat ulterior cercetările despre gamificare și instrumente AI în învățământul superior, inclusiv *Education 3.0* și studiul publicat recent în *Teaching Public Administration* [23] [24]. Rezultatele observate în acele contexte nu pot fi transferate mecanic asupra matematicii, dar obligă la o întrebare comună: *ce poate face studentul singur când instrumentul nu mai este disponibil?*

În articolul AIoT *Inteligența artificială și educația* am insistat asupra evaluării procesului de gândire, nu numai asupra produsului predat [25]. O problemă rezolvată impecabil cu AI poate ascunde două situații foarte diferite: un student care a verificat și înțeles fiecare pas și unul care a copiat un rezultat pe care nu l-ar putea explica. Dacă îi evaluăm numai după foaia de examen, îi vom trata ca și cum ar ști același lucru.

Avem și dovezi experimentale despre această diferență. Într-un studiu publicat în *Proceedings of the National Academy of Sciences* în 2025, aproape o mie de liceeni din Turcia au exersat matematică fie fără AI, fie cu un *chatbot* obișnuit, fie cu un asistent special conceput să ofere indicii. În timpul exercițiilor, cele două instrumente au îmbunătățit performanța. La testul ulterior, desfășurat fără ajutor, elevii care avuseseră acces la *chatbot*-ul obișnuit au obținut însă rezultate cu circa 17% mai slabe decât grupul fără AI. În cazul asistentului care oferea indicii, această scădere nu a fost observată în mod semnificativ statistic; nici un progres net al învățării față de grupul de control nu a fost demonstrat [26]. Studiul privește o singură școală și efecte pe termen scurt, dar diferența dintre *a rezolva asistat* și ***a învăța*** este greu de ignorat.

Nu aș propune, prin urmare, restrângerea AI în educație, aș schimba felul în care construim problema. Studentul încearcă mai întâi singur; apoi îi poate cere instrumentului o soluție alternativă. Următoarea cerință nu este „copiază răspunsul”, ci „identifică ipoteza ascunsă, găsește un pas discutabil și explică rezultatul fără ajutor”. La final, profesorul îi poate modifica datele problemei pentru a vedea dacă a înțeles ideea sau doar a „memorat traseul”. Sunt evident doar propuneri pedagogice ce trebuie evaluate și nicidecum rețete miraculoase.

Există și un paradox mai incomod: pentru a supraveghea critic o mașină care rezolvă probleme de orice natură, trebuie să știi suficient de mult încât să recunoști când greșește sau când aplică o regulă nepotrivită. Cum formăm această competență dacă delegăm tocmai exercițiile prin care se dobândea? În *Între Automatizare și Augmentare: Noua Ecuație a Muncii în Era AI* am discutat

tensiunea dintre eficiența pe termen scurt și păstrarea expertizei umane [27]. În educație, soluția probabil nu va fi renunțarea la exercițiul individual, ci alegerea mai atentă a momentului în care introducem AI-ul.

Dincolo de tablă

Toate acestea ating societatea care folosește rezultatele progreselor științifice și chiar pedagogice. Un algoritm poate calcula impecabil o recomandare pentru o rețea energetică, un sistem de trafic sau un serviciu public, dar calculul nu garantează că a fost aleasă soluția potrivită, că datele sunt bune sau că efectele asupra oamenilor au fost anticipate. În asemenea situații, a înțelege nu este un lux academic; este o condiție pentru asumarea responsabilității.

Revin, în final, la pancartele din *Washington*. Profesorii din 1986 nu aveau dreptate în toate temerile lor, dar au pus o întrebare pe care istoria nu a închis-o. Astăzi mașinile pot face mult mai mult decât calcule aritmetice: pot ajuta la demonstrarea unor afirmații care au rezistat generațiilor de cercetători. Ar fi absurd să refuzăm această putere numai pentru a păstra romantismul tablei și al cretei. La fel de absurd ar fi să confundăm numărul răspunsurilor produse cu progresul cunoașterii. Dacă AI ne ajută să descoperim mai repede, adevărata provocare este să învățăm și să înțelegem suficient de bine încât să putem merge mai departe.

References

[1] J. Lawrence, “Math teachers protest against calculator use,” The Daily Item, Sumter, SC, USA, p. 10A, Apr. 5, 1986, Associated Press. [Online]. Available: https://www.transum.org/Maths/Activity/Calculator/Survey/.

[2] National Council of Teachers of Mathematics, An Agenda for Action: Recommendations for School Mathematics of the 1980s. Reston, VA, USA: NCTM, 1980. [Online]. Available: https://eric.ed.gov/?id=ED186265.

[3] R. Hembree and D. J. Dessart, “Effects of hand-held calculators in precollege mathematics education: A meta-analysis,” Journal for Research in Mathematics Education, vol. 17, no. 2, pp. 83–99, 1986, doi: 10.2307/749255.

[4] B. Haran and T. Tao, “No More Heroes – Terence Tao on AI,” Numberphile, Oct. 15, 2026. [Video]. Available: https://www.numberphile.com/videos/tao-ai.

[5] T. Tao, “Mathematics in the age of AI,” arXiv:2608.16753, Aug. 2026, doi: 10.48550/arXiv.2608.16753.

[6] The Lean Community, Theorem Proving in Lean 4, “Introduction.” [Online]. Available: https://lean-lang.org/theorem_proving_in_lean4/Introduction/.

[7] OpenAI, “On the Navier–Stokes Millennium Prize Problem,” Sep. 8, 2026. [Online]. Available: https://openai.com/index/navier-stokes-solution/.

[8] H. Fry and M. Stevens, “Mathematicians Are The Canary Down The AI Coal Mine,” The Rest Is Science, episode 96, Oct. 18, 2026. [Podcast]. Available: https://podcasts.apple.com/us/podcast/mathematicians-are-the-canary-down-the-ai-coal-mine/id1853007888?i=1000796970296.

[9] N. deGrasse Tyson and M.-M. Mac Low, “Did AI Solve One of Math’s Hardest Problems?,” StarTalk, 2026. [Video]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=s7KhLuc3Mck.

[10] OpenAI, “Sharing AI progress in mathematics,” Oct. 6, 2026, updated Oct. 15, 2026. [Online]. Available: https://openai.com/index/sharing-ai-progress-in-mathematics/.

[11] OpenAI, “The Quasi-Riemann Hypothesis: A Zero-Free Half-Plane Re(s) > 7/8,” preprint, Sep. 30, 2026. [Online]. Available: https://github.com/openai/math/tree/main/preprints/The-Quasi-Riemann-Hypothesis-September-30-2026.

[12] L. Alpöge, “Note on the Riemann Hypothesis,” Nov. 20, 2026. [Online]. Available: https://arxiv.org/html/1707.01770v2.

[13] Lean and Mathlib Communities, “Lean verification of the Riemann Hypothesis,” joint statement endorsed by the Lean FRO and Mathlib Initiative, Nov. 21, 2026. [Online]. Available: https://leanprover-community.github.io/blog/posts/riemann-hypothesis/.

[14] A. V. Sutherland, “Verification files for the Lean proof of the Riemann Hypothesis,” Massachusetts Institute of Technology, updated Nov. 22, 2026. [Online]. Available: https://math.mit.edu/~drew/grh/.

[15] Clay Mathematics Institute, “The Millennium Prize Problems,” 2026. [Online]. Available: https://www.claymath.org/millennium-problems/.

[16] D. Castelvecchi, “Mathematicians astounded by AI and human-written proofs of iconic Riemann hypothesis,” Nature, Nov. 20, 2026, updated Nov. 21, 2026. [Online]. Available: https://www.nature.com/articles/d41586-026-03812-7.

[17] C. Jaimungal, R. Borcherds, and E. Weinstein, “Fields Medalist & Eric Weinstein on the Future of Mathematics,” Theories of Everything with Curt Jaimungal, Nov. 9, 2026. [Video podcast]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=XqgnJyQZGG4.

[18] Simons Foundation, “Simons Foundation launches $15M effort to help mathematicians navigate AI era,” Oct. 15, 2026. [Online]. Available: https://www.simonsfoundation.org/news/simons-foundation-launches-15m-effort-to-help-mathematicians-navigate-ai-era/.

[19] A. Davies et al., “Advancing mathematics by guiding human intuition with AI,” Nature, vol. 600, pp. 70–74, 2021, doi: 10.1038/s41586-021-04086-x.

[20] C. Vrabie, “AlfaFold și Premiul Nobel în Chimie (2024),” All in on Tech (AIoT), vol. 1, 2025. [Online]. Available: https://scrd.eu/index.php/aiot/article/view/613.

[21] A.-M. Tîrziu and C. Vrabie, Education 2.0: Universities’ E-Learning Methods. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2015. ISBN: 978-3-659-70559-5.

[22] A.-M. Tîrziu and C. Vrabie, “NET Generation. Thinking outside the box by using online learning methods,” New Trends and Issues Proceedings on Humanities and Social Sciences, vol. 2, no. 7, pp. 41–47, 2016, doi: 10.18844/prosoc.v2i7.1178.

[23] C. Vrabie, “Education 3.0 – AI and Gamification Tools for Increasing Student Engagement and Knowledge Retention,” in Digital Transformation, Lecture Notes in Business Information Processing, vol. 495. Cham, Switzerland: Springer, 2023, pp. 74–87, doi: 10.1007/978-3-031-43590-4_5.

[24] C. Vrabie, “Using advanced digital tools for asynchronous courses delivery designed for students enrolled in public administration programs,” Teaching Public Administration, 2026, doi: 10.1177/01447394261502444.

[25] C. Vrabie, “Inteligența artificială și educația,” All in on Tech (AIoT), vol. 1, 2025. [Online]. Available: https://scrd.eu/index.php/aiot/article/view/680.

[26] H. Bastani, O. Bastani, A. Sungu, H. Ge, Ö. Kabakcı, and R. Mariman, “Generative AI without guardrails can harm learning: Evidence from high school mathematics,” Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 122, no. 26, art. e2422633122, 2025, doi: 10.1073/pnas.2422633122.

[27] C. Vrabie, “Între Automatizare și Augmentare: Noua Ecuație a Muncii în Era AI,” All in on Tech (AIoT), vol. 2, Feb. 2026. [Online]. Available: https://scrd.eu/index.php/aiot/article/view/784.