

Mesterséges intelligencia alkalmazása a betonminőség elérésének valószínűség-számításában a betonkeverő üzemekben

The use of AI in the probability of achieving concrete quality in batching plants

SIMÓ Ferenc-Zoltán¹ doktorandusz, okl. építőmérnök, dr. KISS Zoltán², egyetemi tanár, okl. építőmérnök, dr. PUSKÁS Attila³, egyetemi docens, okl. építőmérnök

^{1,2,3}Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Szerkezetek Tanszék, Kolozsvár, Gheorghe Barițiu u.25, 400394, ferenc.simo@campus.utcluj.ro

Abstract Concrete quality control in Romania remains a deterministic, reactive process: compressive strength is verified exclusively through destructive 28-day cube tests, precluding real-time intervention during construction. The current SonReb-based NDT standard (NP 137-2014) was calibrated predominantly on Portland cement (CEM I) concretes; applied to modern CEM II/III blended cements, it introduces strength estimation errors of $\pm 25\text{--}35\%$, rising to $\pm 15\text{--}30$ MPa at low curing temperatures. This paper presents a doctoral research plan that integrates four data-source layers – SCADA batching data, ERA5 climatic variables corrected by local IoT sensors, SonReb NDT measurements, and destructive laboratory compression tests (324 cubes, DoE $3 \times 3 \times 6 \times 6$) – into a four-tier machine learning architecture (XGBoost \rightarrow residual ANN \rightarrow MC Dropout \rightarrow Conformal Prediction), delivering a hybrid predictive system with a mathematically guaranteed $\geq 90\%$ confidence interval

Objectives: $RMSE < 3.8$ MPa, $R^2 > 0.90$, $CI\text{-coverage} \geq 90\%$.

Keywords: SonReb recalibration, concrete strength prediction, machine learning, maturity index, Conformal Prediction, NDT

Kivonat A romániai betongyártásban a minőség-ellenőrzés ma is determinisztikus és reaktív: kizárólag a 28 napos roncsolásos próbatest-vizsgálaton alapul, ami kizárja a valós idejű beavatkozást a kivitelezés során. A hatályos SonReb-alapú NDT-módszer kalibrációs görbéi döntően CEM I alapú adatbázison nyugszanak, ezért modern CEM II/III keverékcementeknél $\pm 25\text{--}35\%$ -os szilárdsági becslési hiba léphet fel – alacsony keményedési hőmérsékleten akár $\pm 15\text{--}30$ MPa eltéréssel. Jelen cikk egy doktori kutatási tervet mutat be: négy adatforrást – SCADA üzemi adatok, ERA5 éghajlati változók IoT-korrektúrával, SonReb NDT-mérések és laboratóriumi törési kísérletek (324 kocka, DoE $3 \times 3 \times 6 \times 6$) – négy szintű gépi tanulási architektúrába (XGBoost \rightarrow reziduális ANN \rightarrow MC Dropout \rightarrow Conformal Prediction) integrál, matematikailag garantált $\geq 90\%$ -os megbízhatósági intervallummal. Célkitűzés: $RMSE < 3,8$ MPa, $R^2 > 0,90$, $CI\text{-lefedettség} \geq 90\%$.

Célkitűzés: $RMSE < 3,8$ MPa, $R^2 > 0,90$, $CI\text{-lefedettség} \geq 90\%$.

Kulcsszavak: SonReb kalibrálás, betonszilárdság-előrejelzés, gépi tanulás, érettségi index, Conformal Prediction, NDT

1. BEVEZETÉS – A KUTATÁS KONTEXTUSA

Az építőipari karbonsemlegességi célkitűzések következtében a romániai piacon forgalmazott cementek összetétele az elmúlt két évtizedben gyökeresen megváltozott: a tiszta klinkert (CEM I) fokozatosan váltja fel a CEM II és CEM III típus, amelyek kohósalakot (GGBS) vagy pernyét tartalmaznak. E cementek hidratációs kinetikája alapvetően eltér az 90-es évek előtt használtaktól, ami szisztematikus hibákhoz vezet a roncsolásmentesen (NDT) becsült szilárdságban.

A jelenlegi NDT minőség-ellenőrzési módszer alapját képező SonReb összefüggés az ultrahangos terjedési sebesség (V) és a visszapattanási érték (Q) empirikus kombinációja:

$$f_c = a \cdot V^b \cdot Q^c \quad (1)$$

ahol f_c a nyomószilárdság [MPa], V az ultrahang terjedési sebessége [m/s], Q visszapattanási érték (pl. Proceq Silver Schmidt), a , b , c pedig empirikusan meghatározott kalibrációs együtthatók.

Az NP 137-2014 [23] szabvány tartalmazza a SonReb módszer kalibrációs görbéit és empirikus együtthatóit, és lehetővé teszi ezek helyszíni magmintás (Δf) eltolással korrigálva. A C 26-85 előírásból [21] egyedül a II. rész 6–9. fejezete maradt érvényes, kizárólag azért, mert az ultrahangos impulzusterjedés fizikai mérési módszertanát írja le. Az NP 137-2014 saját kalibrációs adatbázisa azonban döntően CEM I alapú betonon alapul; a szabvány maga ismeri el, hogy ismeretlen összetételű beton esetén a módszer hibája akár ± 25 – 35% is lehet.

A szakirodalom egyértelműen igazolja, hogy az együtthatók szignifikánsan függenek a cementtípustól és a szilárdulási hőmérséklettől. CEM III/B beton 5°C -on a 28 napos korra csupán a 20°C -on elért szilárdság 65 – 75% -át éri el [14], ami az (1) egyenlet kalibrációs hibáját ± 15 – 30 MPa-ra növelheti.

A jelen kutatás célja ennek a kettős hiányosságnak – a kalibrációs elavultságnak és a determinisztikus pontbecslésnek – az egyidejű lehetséges javítása egy hibrid ML-alapú rendszerrel.

2. AZ NDT-MÓDSZEREK FIZIKAI ALAPJAI ÉS AZ ÉRETTSÉGI MODELLEK

2.1. Az ultrahanghullám-sebesség (UPV – Ultrasonic Pulse Velocity) és a beton rugalmas modulusa (E-modulus)

A P-hullám terjedési sebessége (V_p) egy homogén, izotróp és rugalmas közegben a dinamikus rugalmassági modulussal (E_d) és a Poisson-tényező (ν) az alábbi összefüggésen keresztül kapcsolódik össze [12]:

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \text{ ezzel egyenértékű: } E_d = V_L^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (2)$$

ahol ρ a beton látszólagos sűrűsége [kg/m^3]. Mivel E_d szorosan kapcsolódik az anyag keménységével és ezáltal a nyomószilárdsággal is, az UPV a hidratációs folyamat érzékeny, roncsolásmentesen mérhető jelzője. A Proceq Pundit 200 készülék $0,1 \mu\text{s}$ felbontású időmérést biztosít, amelyből az $V_p = d/t$ összefüggéssel (d = mérőfej távolság [m], t = terjedési idő [s]) a sebesség meghatározható.

Ugyanakkor megfelelő S-hullámú mérőfejjel kiegészítve (40 kHz) képes a dinamikus Poisson-tényező (ν) meghatározására:

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

2.2. Az érettségi index (Maturity Index) és az ekvivalens kor

A hőmérséklet-történetnek a szilárdságfejlődésre gyakorolt hatását a Nurse–Saul érettségi index számszerűsíti [14]:

$$M(t) = \sum (T_{avg,i} - T_0) \cdot \Delta t_i \quad (3)$$

ahol $T_{avg,i}$ az i -edik időlépésbeli átlaghőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$], $T_0 = -10^{\circ}\text{C}$ a referencia-hőmérséklet (portlandcement esetén), Δt_i az időlépés [h]. Az Arrhenius-típusú ekvivalens kor pontosabb leírást ad, különösen CEM III esetén [14]: Megjegyzés: CEM III esetén egyes szerzők $T_0 = -10^{\circ}\text{C}$ helyett $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$ értéket alkalmaznak; a kísérlet egyik mellékeredménye éppen ennek empirikus tisztázása lesz a vizsgált CEM III/A 42,5N cementre.

$$t_e = \sum_0^t \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{273+T_r} - \frac{1}{273+T_a} \right) \right] \Delta t [h] \quad (4)$$

ahol E_a az aktiválási energia [J/mol] (CEM I: $\sim 33\,500$ J/mol; CEM III: $\sim 40\,000$ – $50\,000$ J/mol), $R = 8,314$ J/(mol \cdot K), T_r a referencia hőmérséklet (20°C), T_a a beton átlagos belső hőmérséklete az adott Δt időköz alatt ($^{\circ}\text{C}$).

A kutatás OS3 célkitűzése a (3) és a (4) összefüggések összehasonlítása CEM III esetén alacsony hőmérsékleten. Az ERA5 reanalízis adatok [13] és a helyi SmartRock IoT-szenzorok kombinált alkalmazása biztosítja a hőmérséklet-történet pontos rekonstrukcióját: $\Delta T(t) = T_{IoT(t)} - T_{ERA5(t)}$.

3. KÍSÉRLETI TERV ÉS AZ NDT MÉRÉSI PROTOKOLL

3.1. A faktoriális kísérleti mátrix

A laboratóriumi program teljes faktoriális elrendezést alkalmaz (DoE $3 \times 3 \times 6 \times 6$), amely 324 kockára ($150 \times 150 \times 150$ mm) terjed ki, az 1. táblázatban részletezett paraméterek szerint.

Faktoriális kísérleti mátrix (DoE $3 \times 3 \times 6 \times 6$)

1. táblázat

Tényező	Szintek	Értékek	Indoklás
A: Cement típusa	3	CEM I 42,5N / CEM II/A-S 42,5N / CEM III/A 42,5N	Romániai piac 85%+ lefedése
B: tárolási hőmérséklet	3	5°C / 20°C / 35°C	Téli / normál / nyári feltételek
C: Vizsgálati kor	6	2 / 7 / 14 / 28 / 56 / 90 nap	Teljes érettségi görbe (aszimptotikus szilárds.)
D: Párhuzamos próbatestek	6	6 kocka/csoport (EN 12390-2)	ANOVA statisztikai teljesítmény $\geq 0,80$
ÖSSZESEN	324	$3 \times 3 \times 6 \times 6 = 324$ kocka	ML-tanítás + ANOVA elvégzéséhez elegendő

A 14 napos vizsgálati kor különösen informatív: ez a CEM I és CEM III szilárdságfejlődési görbéinek maximális divergencia-pontja. A 90 napos vizsgálat a CEM III aszimptotikus szilárdságának meghatározásához szükséges (tipikusan 10–20%-kal meghaladja a 28 napos értéket [14]).

3.2. Az alkalmazott NDT-műszerek

Az NDT-mérések két egymást kiegészítő eszközzel készülnek, amelyek együttes alkalmazása képezi a SonReb módszer alapját.

A Proceq Pundit 200 berendezés transzmissziós (direkt sugárzásos) technológiával határozza meg az ultrahangos impulzusok terjedési idejét a betonkeresztmetszeten keresztül (felbontás: $0,1 \mu\text{s}$). Az

alkalmazott 54 kHz-es mérőfejek P-hullámot gerjesztenek, amelyek terjedési sebessége a (2) összefüggés alapján kapcsolható a beton dinamikus rugalmas modulusához. A mérés előtt a kockafelületek P80 csiszolópapírral kerülnek előkészítésre, majd 30 percig levegőn száradnak. A nullázás minden mérési sorozat elején elvégzendő [16]. A vizsgálat módszertanához tartozik, hogy egymás után a P-hullámmal és S-hullámmal is vizsgáljuk a mintákat.

A Proceq/Screening Eagle által gyártott Silver Schmidt OS8200 szabadalmaztatott optikai módszerrel méri az ütőtömeg ütközés előtti (v_i) és utáni (v_r) sebességét, amelyből a Q-értéke ($Q = v_r/v_i \times 100$) irányfüggetlen korrekció nélkül adódik – szemben a klasszikus R-értékkel [11].

Relatív páratartalom >75% esetén +4 Q-egység korrekciót számítunk [17]. Minden próbatesten minimum 12 ütés, a 2 maximális és 2 minimális érték kizárásával, a fennmaradó 8 ütés átlaga kerül rögzítésre.

3.3. Az NDT mérési sorrend

Az SR EN 12390-3:2019 [26], SR EN 12504-2:2021 [19] és SR EN 12504-4:2021 [20] szabványok előírásai szerint minden vizsgálati korban és minden próbatesten azonos sorrendben hajtjuk végre a méréseket: (1) tömegmérés, látszólagos sűrűség meghatározása (± 1 g); (2) UPV primer hullámmal, V_p [m/s] rögzítése, valamint V_s [m/s]; (3) Schmidt-kalapács mérés, Q-érték [-]; (4) fenolftaleines karbonátosodás-vizsgálat (≥ 28 napos koron); (5) nyomószilárdsági vizsgálat ($0,6 \pm 0,2$ MPa/s), a modell Ground Truth értéke. A Giatec SmartRock 3 szenzorok a kockapopuláció 20%-ába kerülnek beépítésre (15 perces automatikus hőmérséklet-rögzítés t_0 -tól t_{90} -ig), az ERA5-IoT kalibráció elvégzéséhez.

4. A HIBRID GÉPI TANULÁSI ARCHITEKTÚRA

4.1. Az együtthatók ANOVA-alapú (varianciaanalízis) vizsgálata

A H1 munkahipotézis szerint az (1) egyenlet a, b, c koefficienseinek értéke szignifikánsan eltér cementtípus (C) és keményedési hőmérséklet (T) függvényében. A kétfaktoros ANOVA-modell:

$$f_{c, \text{SonReb}} = a(C, T) \cdot V^{b(C, T)} \cdot Q^{c(C, T)} + \varepsilon \quad (5)$$

ahol ε a véletlen hibtag. A nullhipotézis: $H_0: a, b, c \neq f(C, T)$, azaz az együtthatók függetlenek a cementtípustól és a hőmérséklettől. A szignifikancia-szint $\alpha = 0,05$, a vizsgálat alapját az összes 324 kocka 28 napos adatai képezik. Az eredmény 9 (C,T)-kombinációhoz tartozó kalibrált koefficiens-hármas lesz.

4.2. A négy szintű ML-architektúra

Az ML-rendszer az előző szint reziduálisain tanul, négy progresszív rétegben: (1. szint) XGBoost regresszor – alapmodell, SHAP-értékekkel interpretálható pontbecslés [1, 3, 5]; (2. szint) reziduális ANN skip-connection MLP-vel – 5–10%-os RMSE-javítás [2, 5]; (3. szint) Monte Carlo Dropout (N = 200 inferencia) – véletlen bizonytalanság és percentilis-intervallumok; (4. szint) Conformal Prediction – matematikailag garantált lefedettség:

$$P(f_{c,\text{valós}} \in [\hat{f}_c - q, \hat{f}_c + q]) \geq 0,90 \quad (6)$$

Ez az állítás minden, az alkalmazott eloszlásból vett új mintára érvényes, eloszlási feltételezések nélkül (Angelopoulos és Bates [8]) – ez a CP döntő előnye a Bayesi neurális hálókval (BNN) szemben, különösen korlátozott (~2000–5000 mintás) SCADA-adatbázis esetén (Gal és Ghahramani [7]) – az A üzem becsült adagszáma alapján ez a mennyiség 18–24 hónap alatt érhető el; az adathozzáférés feltételei az OS1 keretében tisztázandók. A végső kimenet: $f_c \pm CI_{90}$ [MPa], amely az üzem kezelőjének döntési alapja a zsaluzat eltávolítása, az utófesztítés időzítése, stb.

4.3. Teljesítménymutatók és validációs célok

A 2. táblázat összefoglalja az alkalmazott teljesítménymutatókat, célértékekkel és indoklással.

A modell teljesítménymutatói és célértékei

2. táblázat

Mutató	Képlet	Célérték	Mérnöki relevanciája
RMSE	$\sqrt{\frac{\sum(\hat{f}_c - f_c)^2}{n}}$	< 3,8 MPa	Közvetlen mérnöki értelmezhetőség (Referencia: kalibrált SonReb RMSE \approx 4–7 MPa [10, 12]; a javasolt modell < 3,8 MPa célja ~20–40%-os pontosságjavulást jelent.)
MAE	$\frac{\sum \hat{f}_c - f_c }{n}$	< 2,5 MPa	Kiugró értékekre robusztusabb
MAPE	$\frac{100\%}{n} \cdot \sum \left \frac{\hat{f}_c - f_c}{f_c} \right $	< 10%	Százalékos értelmezhetőség
R ²	$1 - \frac{\sum(f_c - \hat{f}_c)^2}{\sum(f_c - \bar{f}_c)^2}$	> 0,90	Magyarázott variancia aránya
CI-lefedettség	$P(f_c \in CI_{90}\%) \geq 0,90$	$\geq 90\%$	Conformal Prediction matematikai garancia [8] (A CP matematikailag garantált $\geq 90\%$ -os lefedettséget nyújt eloszlási feltételezések nélkül – Angelopoulos & Bates [8].)
RMSE (B üzem)	<i>RMSE fine-tuning \leq 200 adaggal</i>	< 4,5 MPa	Átvihetőség küszöbértéke (OS4)

5. VÁRHATÓ EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A kutatás három, egymást kiegészítő tudományos hozzájárulást céloz.

Az első egy kalibrált SonReb-koefficiens-adatbázis, amely az (5) egyenlet a(C,T), b(C,T), c(C,T) paramétereit tartalmazza 9 (C,T) kombinációra. Amennyiben az ANOVA-teszt megerősíti a H1 hipotézist ($p < 0,05$), ez tudományos megalapozást nyújt a NP 137-2014 [23] szabvány CEM I alapú kalibrációs görbéinek CEM II/III keverékcementekre való kiterjesztéséhez és korszerűsítéséhez és a roncsolásmentes vizsgálatokra vonatkozó SR EN 13791:2019 [18] szabvány hazai alkalmazásának pontosításához.

A második a prediktív modell validált teljesítménye: RMSE < 3,8 MPa és CI₉₀-lefedettség $\geq 90\%$ laboratóriumi és ipari körülmények között. Ez lehetővé teszi a 28 napos szilárdság megbízható becslését

már 7–14 napos korban, 2–3 hetes döntés-előrehozást biztosítva a zsaluzat eltávolítása és a post-tensionálás vonatkozásában.

A harmadik a modell átvihetőségének demonstrálása: $N^* < 200$ kalibrálási adaggal az A üzemen tanított rendszer adaptálható a B üzemre (OS4 – validálás tervezett; a küszöbérték Li et al. [6] transzfer-tanulási eredményei alapján becsült), ami a módszer országos léptékű alkalmazhatóságát megalapozza. Az eszközzrendszer a UTCN Harghita-megyei partnerlaboratóriumában kerül validálásra, ahol a helyi adalékanyagok (Udvarhelyi medence) és CEM II/III cementek különösen reprezentatívak a romániai körülmények szempontjából.

Irodalmi hivatkozások.

- [1] Yang Y. et al., Predicting the Compressive Strength of Environmentally Friendly Concrete Using Multiple Machine Learning Algorithms. *Buildings*, 14, 190, 2024.
- [2] Yeh I.C., Modeling of Strength of High Performance Concrete Using Artificial Neural Networks. *Cement and Concrete Research*, 28, 1797–1808, 1998.
- [3] Rana Md S. et al., Comparative Analysis of ML Models for Predicting Compressive Strength of UHPSFRC. *Journal of Engineering Research*, 13, DOI:10.1016/j.jer.2025.01.004, 2025.
- [4] Xin P. et al., A digital twin approach for sustainable construction. *Scientific Reports*, 16, DOI:10.1038/s41598-025-32276-4, 2025.
- [5] Mouawad F. et al., Predicting Compressive Strength of Sustainable Concrete Using ML and ANN. *Construction Materials*, 5(3), 56, 2025.
- [6] Li Z. et al., Simulation-Based Transfer Learning for Concrete Strength Prediction. In: *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, DOI:10.1007/978-3-031-53389-1_98, 2024.
- [7] Gal Y. & Ghahramani Z., Dropout as a Bayesian Approximation: Representing Model Uncertainty in Deep Learning. *ICML 2016*.
- [8] Angelopoulos A.N. & Bates S., Conformal Prediction: A Gentle Introduction. *Foundations and Trends in Machine Learning*, 2023.
- [9] Ivanchev I. et al., Assessment of Concrete Compressive Strength at Early Age Using SonReb Method. DOI:10.1109/MMA62616.2024.10817684, 2024.
- [10] Martin N. & Alavi S.A., Uncertainty and Prediction Intervals of New ML Approach for NDT Evaluation of Concrete. *Buildings*, DOI:10.3390/buildings15040544, 2025.
- [11] Szilágyi K. & Borosnyói A., 50 years of experience with the Schmidt rebound hammer. *Concrete Structures*, 10, 46–56, 2009.
- [12] Pucinotti R., Non destructive in situ strength assessment of concrete. *Construction and Building Materials*, 75, 331–341, 2014.
- [13] Soci C. et al., The ERA5 global reanalysis from 1940 to 2022. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(764), 4014–4048, 2024.
- [14] Tang K. & Tan Y., Modelling In Situ Concrete Temperature Development: Impact of Ambient Temperature and GGBS Replacement. *CivilEng*, DOI:10.3390/civileng5030037, 2024.
- [15] ***, SR EN 206+A2:2021 – Beton. Specificatie, performanta, productie si conformitate. ASRO, Bucuresti, 2021.
- [16] ***, Proceq / Screening Eagle Technologies, Pundit 200 – Ultrasonic Pulse Velocity Instrument, Operating Instructions. www.screeningeagle.com (Utolsó letöltés: 2026. 05. 13.).
- [17] ***, Proceq / Screening Eagle Technologies, Silver Schmidt OS8200 – Technical Specifications. www.screeningeagle.com (Utolsó letöltés: 2026. 05. 13.).
- [18] ***, SR EN 13791:2019 – Evaluarea rezistentei la compresiune a betonului din structuri si prefabricate. ASRO, Bucuresti, 2019.
- [19] ***, SR EN 12504-2:2021 – Incercari pe beton in structuri. Determinarea indicelui de recul. ASRO, Bucuresti, 2021.
- [20] ***, SR EN 12504-4:2021 – Incercari pe beton in structuri. Determinarea vitezei de propagare a sunetelor. ASRO, Bucuresti, 2021.
- [21] ***, C 26-85 – Instructiuni tehnice pentru determinarea rezistentei betonului prin metode nedistructive combinate. INCERC, Bucuresti, 1985. [Nagyreszt hatályon kívül helyezve. A II. rész 6–9. fejezete érvényes

marad, kizárólag az ultrahangos impulzusterjedés fizikai mérési módszertana miatt. A SonReb kalibrációs görbék az NP 137-2014 tartalmazza.]

[22] Kiss Z., Onet T., Proiectarea structurilor de beton dupa SR EN 1992-1. Ed. Abel, Cluj-Napoca, 2008.

[23] ***, NP 137-2014 – Normativ pentru evaluarea in situ a rezistenței betonului din construcțiile existente. MDRAP, București, 2014.

[24] ***, NE 012/1-2022 – Normativ pentru producerea betonului și executarea lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat. Partea 1: Producerea betonului. MDLPA, București, 2023 (Ord. nr. 30/2023).

[25] ***, NE 012/2-2022 – Normativ pentru producerea betonului și executarea lucrărilor din beton, beton armat și beton precomprimat. Partea 2: Executarea lucrărilor din beton. MDLPA, București, 2023.

[26] ***, SR EN 12390-3:2019 – Încercări pe beton întărit. Partea 3: Rezistența la compresiune a epruvetelor. ASRO, București, 2019.