

# Raport de etapă

**Denumire grant:** Soluție integrată pentru printarea 3D a elementelor specifice arhitecturii ecleziastice și clădirilor monument

**Acronim:** ARHIPRINT

**Director de proiect:** dr.ing. Dragoș Ungureanu

**Membru echipă de cercetare:** drd.ing. Stelian Cazan

## Printarea tridimensională (3D) în industria construcțiilor

Printarea tridimensională (3D) este un proces care permite fabricarea obiectelor solide pe baza unui model digital. Acesta implică depunerea succesivă a straturilor de material (de exemplu, plastic, mortar, argilă, metal sau ceramică), începând de la bază și continuând până la partea superioară a modelului digital, până când obiectul real este finalizat (Alami et al., 2023). În prezent, printarea 3D este utilizată într-o mare varietate de industrii, inclusiv ingineria civilă și mecanică, aero-spațială și domeniul medical, transformând modul în care sunt proiectate și fabricate produsele (Lam et al., 2023; Al-Tamimi et al., 2023). Cele mai notabile beneficii pe care această tehnologie le poate oferi includ prototipuri mai rapide, fabricație mai rapidă, reducerea deșeurilor, creșterea calității și personalizare înaltă (Fonseca și Matos, 2023).

În domeniul ingineriei civile, cel mai comun material, potrivit pentru printarea 3D, este mortarul/betonul (Quah et al., 2023; Mendřický et al., 2023). Procesul constă, în mod obișnuit, într-un amestec de ciment, apă și agregate care este extrudat printr-un cap de printare personalizat și depus într-un mod precis pentru a forma geometria dorită (Dams et al., 2023). Structurile printate în 3D pot avea o rezistență excepțională (la compresiune și tracțiune) și durabilitate, ceea ce le face potrivite pentru diverse utilizări în construcții și aplicații de infrastructură (Bello et al., 2022; García-Alvarado et al., 2022). În comparație cu metodele tradiționale de construcție, această tehnică oferă mai multe avantaje, inclusiv cele menționate mai sus, și posibilitatea de a crea geometrii unice și intricate, precum și capacitatea de a printa componente integrate, cum ar fi sistemele electrice și sanitare direct în structură (Salandin et al., 2022; Ibrahim et al., 2022).

În industria construcțiilor, implementarea fabricației aditive (en. Additive manufacturing) este strâns legată de căutarea oportunităților de a îmbunătăți eficiența și profitabilitatea în acest domeniu (Korniejenko et al., 2020). Recent, printarea 3D a fost aplicată nu numai în construcția clădirilor rezidențiale, ci și în fabricarea diferitelor structuri și componente urbane. Acestea includ, printre altele, construcții remarcabile precum: un pod printat 3D în Shanghai realizat de profesorul Xu Weiguo de la Universitatea Tsinghua (Școala de Arhitectură), clădirea Primăriei din Dubai,

case prefabricate de dimensiuni mari create de compania Winsun din Shanghai, sediul Fundației Dubai Future (DFF), podul peste Oudezijds Achterburgwal din Amsterdam și case printate 3D în Austin, Texas, proiectate de Icon (Mierzwiński, 2023).

Mortarul 3D trebuie să îndeplinească anumite proprietăți în stare proaspătă, cum ar fi printabilitatea, pomparea, capacitatea de construcție și timpul de lucru, precum și să aibă caracteristici mecanice satisfăcătoare odată întărit (Chen et al., 2018). Pentru a obține aceste proprietăți în starea proaspătă, cercetătorii au utilizat diverse adaosuri, cum ar fi plastifiantii, îngroșători și agenții tixotropi, pentru a echilibra vâscozitatea, retenția formei, reologia, fluiditatea, tixotropia și curgerea materialului 3D (Hou et al., 2021). Pe lângă aceste adaosuri, acceleratorii sunt frecvent utilizați pentru a facilita solidificarea rapidă și dezvoltarea timpurie a rezistențelor mortarelor 3D (Wang et al., 2020). Acceleratorii utilizați în industria betonului și, în special, în printarea 3D, sunt fie produse alcaline, fie fără alcalii. Indiferent de tipul de acceleratori, rata de întărire și stabilizarea timpurie a mortarului/betonului 3D sunt crescute în aproape toate cazurile. Cu toate acestea, din cauza compoziției complexe a mortarului/betonului 3D, în unele cazuri particulare, anumiți acceleratori pot avea probleme de compatibilitate cu cimentul și alte adaosuri (de exemplu, produsele reducătoare de apă). În aceste cazuri unice, acceleratorii nu au niciun efect asupra întăririi materialului și pot cauza timpi instabili de lucru și pierderi serioase de rezistență în timp. Cercetări detaliate privind compatibilitatea dintre beton și diferiți acceleratori sunt prezentate de Su et al. în (Su et al., 2014).

În ultimii ani, diferiți cercetători s-au arătat interesați de posibilitatea printării 3D a materialelor activate alcalin, cunoscute și sub numele de geopolimere. Aceasta se datorează capacității lor de a diminua semnificativ amprenta de CO<sub>2</sub> asociată aplicațiilor clasice de beton. Geopolimerii sunt amestecuri compuse din două părți obținute prin combinarea unei soluții alcaline cu precursori realizați din materiale bogate în alumino-silicați și/sau alumină. Recent, a fost dezvoltat un material numit *laterit* care a fost utilizat ca precursor cu performanțe remarcabile. Cercetări extinse despre geopolimeri și despre fezabilitatea utilizării lor ca substitut pentru ciment sunt prezentate de Su și colaboratorii săi în (Su et al., 2023).

Pe de altă parte, pentru a asigura ductilitatea structurilor printate 3D, precum și pentru a îndeplini anumite condiții referitoare la caracteristicile mecanice, diferite metode de sporire a rezistențelor au fost propuse și analizate de către cercetători. Pe baza studiului literaturii, unele dintre cele mai investigate metode de armare, potrivite pentru mortarul/betonul 3D, includ fibre polimerice (polipropilenă, sticlă și carbon), fibre metalice, bare de oțel (plasate înainte sau în timpul procesului de printare), plase din polimeri sau oțel (plasate înainte sau în timpul procesului de printare), cuie sau tije scurte (plasate perpendicular pe cel puțin două straturi consecutive de material tipărit), cuie în formă de U (plasate într-un model specific pe fiecare strat de material), fire întinse (similare cu elementele post-tensionate din beton armat) și cabluri de oțel (capabile să urmeze traseul de printare).

Toate metodele menționate mai sus pot fi perfect adaptate la anumite aplicații și dispozitive de printare, dar este dificil să fie aplicate în toate cazurile din cauza limitărilor hardware sau a cerințelor structurale specifice. Prin urmare, în prezent, o soluție optimă ar putea fi obținută prin combinarea diferitelor alternative și prin dezvoltarea fie a unui mortar/beton 3D personalizat pentru anumite configurații de imprimantă, fie a unei noi configurații hardware pentru amestecurile de mortar 3D existente.

## **Rezultate Etapa II**

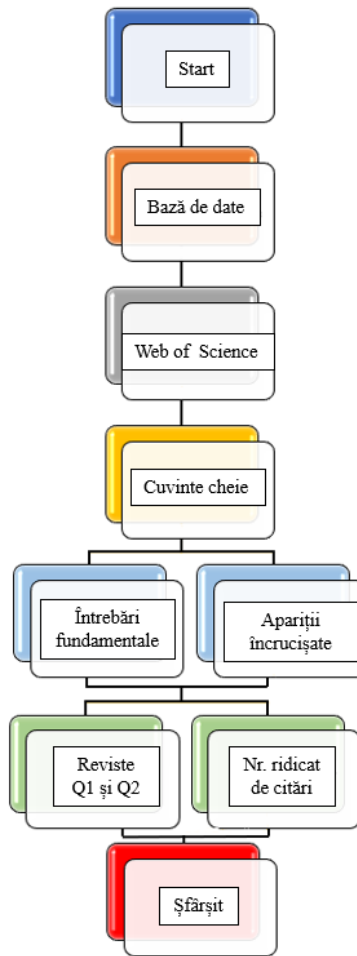
În cadrul Etapei II au fost realizate mai multe activități de cercetare, axate pe dezvoltarea materialelor de printare 3D. Se prezintă în continuare, succint, activitățile principale, rezultatele obținute și modul de valorificare a acestora.

### **➤ Identificarea și descrierea tehnologiilor moderne implementate la nivel mondial în domeniul ingineriei civile**

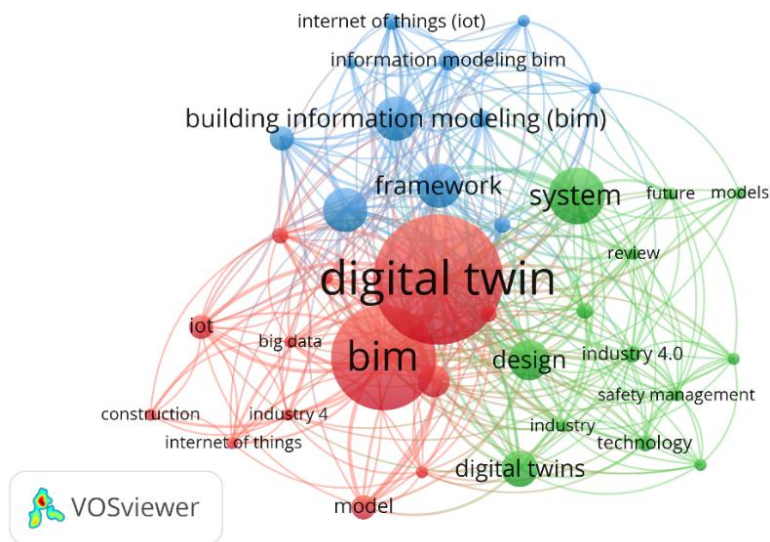
Digitalizarea a devenit un element cheie în transformarea continuă a industriei construcțiilor. Acest proces implică integrarea tehnologiilor digitale, a analizei datelor și a automatizării în toate aspectele procesului de construcție, de la proiectare și planificare până la execuție și gestionarea operării. De la proiectarea asistată de calculator și BIM până la utilizarea dispozitivelor IoT, a roboților și a analizei datelor, digitalizarea a îmbunătățit toate aspectele procesului de construcție.

#### **Rezultate:**

- Analiză bibliometrică
- Analiză tematică
- Utilizări practice ale tehnologiei BIM existente și limitări în ceea ce privește abordarea întregului ciclu de viață al proiectelor de inginerie civilă
- Identificarea dezvoltărilor recente din domeniul DT și legăturile dintre acestea și aplicațiile din ingineria civilă
- Propunerea unui cadru integrat BIM-DT pentru aplicații de printare 3D



**Figura 1** Schema logică a metodologiei de cercetare



**Figura 2** Rețea de „co-ocurență” autori/cuvinte cheie pentru topicul: „*BIM*”, „*Digital Twin*” și „*construcții*”

### ➤ Metodă de calcul a costurilor pentru printarea 3D a betonului/mortarului, în contextul definit de Internetul lucrurilor (IoT)

Pentru a realiza adopția IoT, este imperativ să existe o înțelegere cuprinzătoare a costurilor asociate cu printarea 3D și a strategiilor posibile pentru a le minimiza. Această înțelegere este crucială pentru formularea strategiilor de dezvoltare pentru IoT în industria construcțiilor, asigurând accesibilitatea la un spectru mai larg de companii, în loc să se limiteze utilizarea sa la companiile mari. Prin urmare, o examinare amănunțită a metodologiei și structurii de calcul a costurilor în construcții este indispensabilă.

#### Rezultate:

- Rețetă beton 3D optimizată.
- Obținerea unor economii semnificative prin utilizarea materialelor accesibile. Costul per metru cub al amestecului original (290 de euro) a fost comparat cu diverse amestecuri modificate. Cel mai mare cost a fost obținut prin adăugarea a 20% silică ultrafină, rezultând o creștere a costurilor cu 34,83% (476 de euro). Alte creșteri de costuri includ 29,31% pentru ciment alb (340 de euro), 21,38% pentru fibre de carbon (400 de euro), 19,14% pentru fibre de bazalt (370 de euro), 22,07% pentru fibre aramidice (396 de euro) și combinații ale acestora.
- Stabilirea categoriilor de costuri asociate printării 3D pe șantier și în fabrică.
- Identificarea unor direcții viitoare de cercetare.

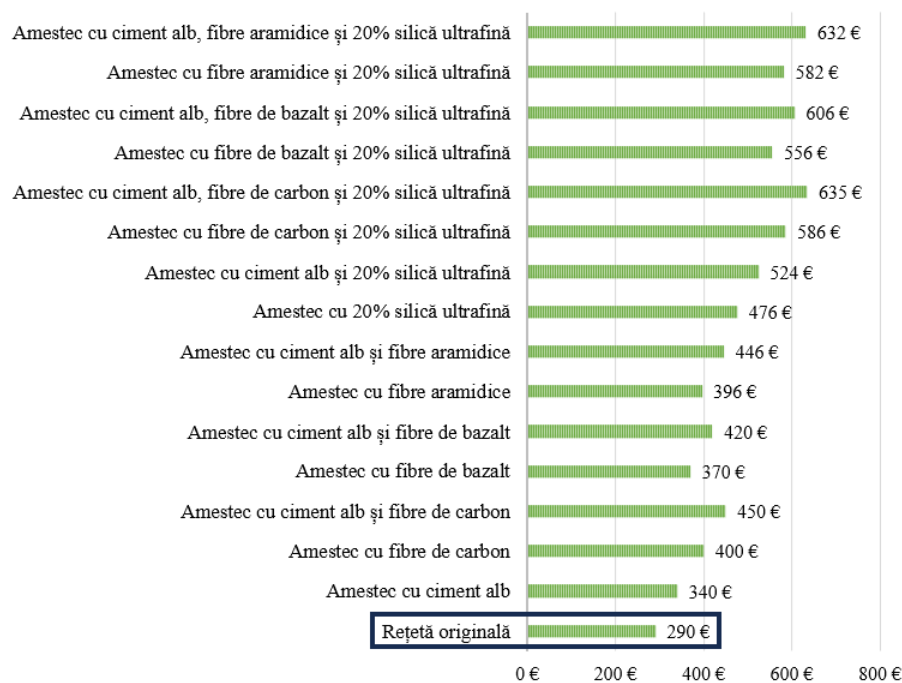
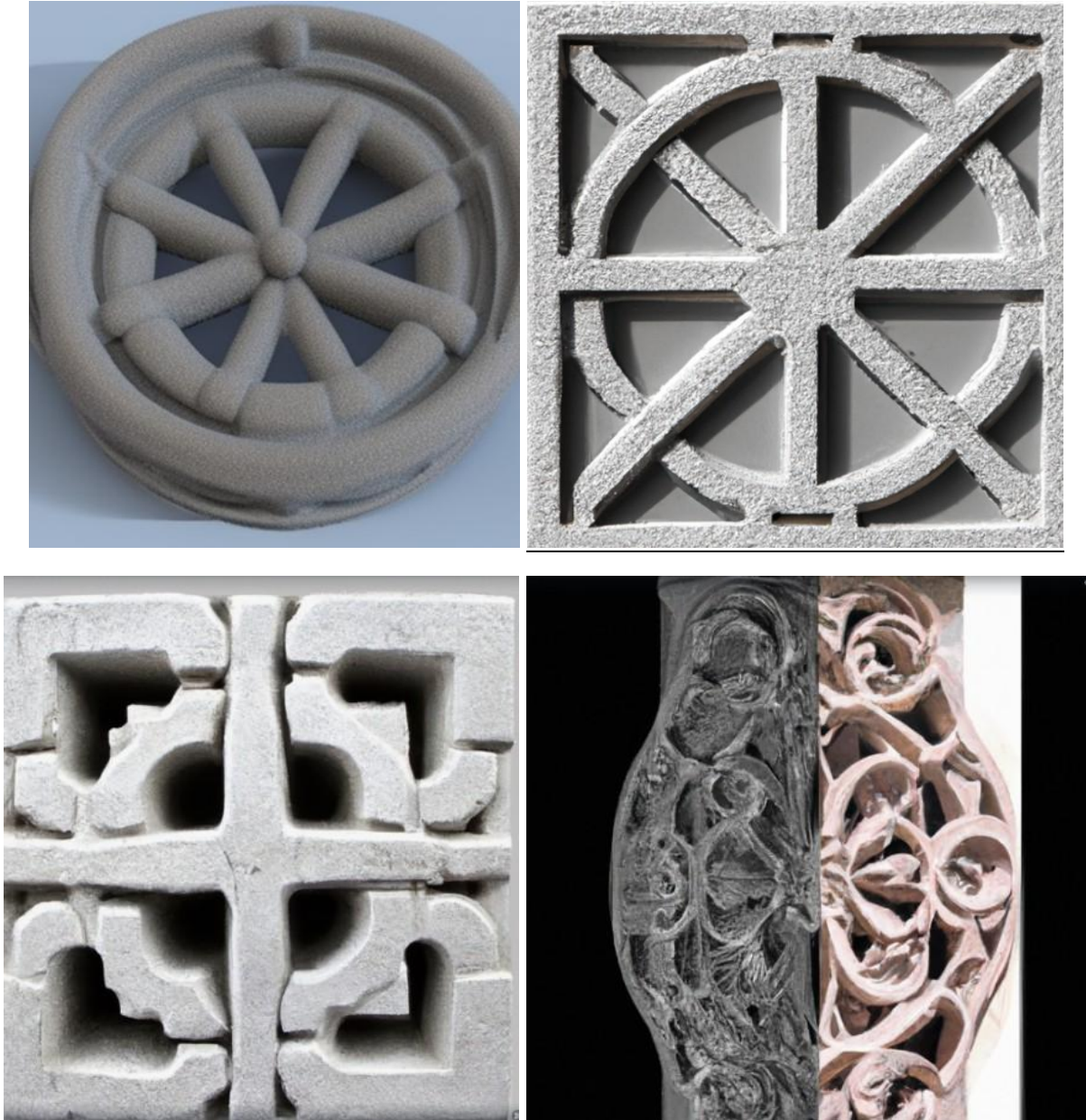


Figura 3 Analiză comparativă a costurilor per metru cub

➤ **Reproducerea unor elemente arhitecturale complexe utilizând scanarea 3D și printarea 3D**

Pentru validarea materialelor dezvoltate în cadrul proiectului au fost reproduse prin printare 3D o serie de elemente arhitecturale cu caracteristici geometrice complexe.



**Figura 4** Elemente printate prin tehnologia 3D

## Diseminarea rezultatelor Etapei II

Diseminarea rezultatelor Etapei II s-a realizat prin publicarea de articole științifice, respectiv prin participarea la conferințe științifice, după cum urmează:

- **Ungureanu, D.**; Onuțu, C.; Țăranu, N.; Vornicu, N.; Zghibarcea, Ș.V.; Ghiga, D.A.; Spiridon, I.A. Microstructure and Mechanical Properties of Cost-Efficient 3D Printed Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers. *Buildings* 2023, 13, 2813. <https://doi.org/10.3390/buildings13112813>, (IF 3,8)
- Participarea cu prezentare la conferința internațională: *art'23 14th International Conference on non-destructive investigations and microanalysis for the diagnostics and conservation of cultural and environmental heritage*.
- Selectarea de către *International Atomic Energy Agency (IAEA)* pentru participarea în cadrul restrâns la *Prezentarea a 125 de ani de studiu a Giuliului din Torino*, eveniment ce a reunit oameni din știință cu rezultate remarcabile, din întreaga lume.
- Participarea cu prezentare la 2 conferințe:
  1. Onuțu C, **Ungureanu D.** (2023) Replicating Heritage Architectural Elements within the BIM Framework through LaserScanning, 3D Modeling, and 3D Printing with Cementitious Materials, Conferință Științifică Internațională în Contextul Zilelor Europene ale Patrimoniului Cultural, Academia de Științe a Moldovei
  2. Țăranu N, **Ungureanu D**, Onuțu C (2023) An in-depth analysis of material aspects in extrusion-based concrete 3D printing. Science for a healthy society. Scientific Conference Academy of Romanian Scientists





**buildings**

an Open Access Journal by MDPI



# CERTIFICATE OF PUBLICATION

Certificate of publication for the article titled:  
Microstructure and Mechanical Properties of Cost-Efficient 3D Printed Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers

Authored by:  
Dragoş Ungureanu; Cătălin Onuţu; Nicolae Tăranu; Nicoleta Vornicu; Ştefan Vladimir Zghibarcea; Dan Alexandru Ghiga; Ionuţ Alexandru Spiridon

Published in:  
*Buildings* 2023, Volume 13, Issue 11, 2813



Academic Open Access Publishing since 2006

Basel, November 2023



AIPnD

## art'23

14<sup>th</sup> International Conference on  
non-destructive investigations and microanalysis  
for the diagnostics and conservation  
of cultural and environmental heritage

November 28<sup>th</sup>/30<sup>th</sup>, 2023 – Brescia (Italy)

This is to certify that

**Ungureanu Dragoş**

nato a Iasi (ROMANIA) il 03/08/1990

has attended the Conference

E. Tuberosa  
AIPnD President

M. Voljnia  
Coordinator of the Organization Committee

AIPnD ETS  
Italian Society for Non-Destructive Testing Monitoring Diagnostics  
Via Corfu, 48 - 25124, Brescia - www.aipnd.it - eventi@aipnd.it



SĂRBĂTORIM ÎMPREUNĂ, PE 26 SEPTEMBRIE,  
ZILELE EUROPENE ALE PATRIMONIULUI CULTURAL  
CU TEMA *LIVING HERITAGE – PATRIMONIUL VIU*



**Invitație-program**  
**26 septembrie 2023, ora 10.00**  
**Sala Azurie, Academia de Științe**  
**a Moldovei (Ștefan cel Mare și**  
**Sfânt I)**  
conferința științifică internațională  
„Patrimoniul cultural de ieri –  
implicații în dezvoltarea societății  
durabile de mâine” („Cultural  
heritage of yesterday – contribution  
to the development of a sustainable  
society of tomorrow”)

**Link platforma ZOOM:**

<https://us02web.zoom.us/j/86249013800?pwd=UzNoQTNBT2djSFdGaVpGL0ZZN2xrUT09>

**Transmisiune online de IDSI:** <https://www.youtube.com/watch?v=niCnqNC15cY>

**Dr., inginer Cătălin ONUȚU** („Gheorghe Asachi” Technical University of Iași, Romania), **Dr. ing. Dragoș UNGUREANU** („Gheorghe Asachi” Technical University of Iași, The Academy of Romanian Scientists, Bucuresti, Romania), *Replicating Heritage Architectural Elements within the BIM Framework through Laser Scanning, 3D Modeling, and 3D Printing with Cementitious Materials*



**ACADEMIA OAMENILOR DE ȘTIINȚĂ DIN ROMÂNIA**  
**Filiala CONSTANȚA**

**Universitatea "OVIDIUS" din Constanța**



**CONFERINȚA NAȚIONALĂ ȘTIINȚIFICĂ**  
**DE TOAMNĂ a AOSR 2023**

**”Știința pentru o societate sănătoasă”**

**Joi 21 septembrie 2023 - sâmbătă 23 septembrie 2023,**

15

- 1. Dr.ing. Dragoș UNGUREANU** - Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași/ Academia Oamenilor de Știință din România, [dragos.ungureanu@staff.tuiasi.ro](mailto:dragos.ungureanu@staff.tuiasi.ro)
- 2. Prof. univ. dr. ing. Nicolae ȚĂRANU** - Membru titular al Academiei Oamenilor de Știință din România / Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași
- 3. Șef lucr.dr.ing. Cătălin ONUȚU** - Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași

**Analiză Detaliată a Caracteristicilor Materialelor**  
**Utilizate în Printarea 3D prin Extruziune a Betonelor**

**An In-Depth Analysis of Material Aspects in Extrusion-**  
**Based Concrete 3D Printing**

## Bibliografie

- A.H. Alami, A.G. Olabi, M. Ayoub, H. Aljaghoub, S. Alasad, M.A. Abdelkareem, 3D Concrete Printing: Recent Progress, Applications, Challenges, and Role in Achieving Sustainable Development Goals. *Buildings* 13 (2023) 924, <https://doi.org/10.3390/buildings13040924>.
- N.D. Bello, A.M. Memari, Comparative Review of the Technology and Case Studies of 3D Concrete Printing of Buildings by Several Companies. *Buildings* 13 (2022) 106. <https://doi.org/10.3390/buildings13010106>.
- M. Chen, L. Li, Y. Zheng, P. Zhao, L. Lu, X. Cheng, Rheological and mechanical properties of admixtures modified 3D printing sulphoaluminate cementitious materials. *Constr. Build. Mater.* 189 (2018) 601–611. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.037>.
- B. Dams, B. Chen, P. Shepherd, R.J. Ball, Development of Cementitious Mortars for Aerial Additive Manufacturing. *Appl. Sci.* 13 (2023) 641. <https://doi.org/10.3390/app13010641>.
- M. Fonseca, A.M. Matos, 3D Construction Printing Standing for Sustainability and Circularity: Material-Level Opportunities. *Materials* 16 (2023) 2458. <https://doi.org/10.3390/ma16062458>.
- R. García-Alvarado, G. Moroni-Orellana, P. Banda, Development of Variable Residential Buildings with 3D-Printed Walls. *Buildings* 12 (2022) 1796. <https://doi.org/10.3390/buildings12111796>.
- K. Korniejenko, M. Łach, Geopolymers reinforced by short and long fibres—Innovative materials for additive manufacturing. *Curr. Opin. Chem. Eng.* 28 (2020) 167–172. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.06.005>.
- E.H.Y. Lam, F. Yu, S. Zhu, Z. Wang, 3D Bioprinting for Next-Generation Personalized Medicine. *Int. J. Mol. Sci.* 24 (2023) 6357. <https://doi.org/10.3390/ijms24076357>.
- R. Mendřický, P. Keller, Analysis of Object Deformations Printed by Extrusion of Concrete Mixtures Using 3D Scanning. *Buildings* 13 (2023) 191. <https://doi.org/10.3390/buildings13010191>.

- D. Mierzwiński, M. Łach, S. Gądek, W.-T. Lin, D.H. Tran, K. Korniejenko, A brief overview of the use of additive manufacturing of concrete materials in construction. *Acta Innov.* 48 (2023) 22–37. <https://doi.org/10.32933/actainnovations.48.2>.
- S. Hou, J. Xiao, Z. Duan, G. Ma, Fresh properties of 3D printed mortar with recycled powder. *Constr. Build. Mater.* 309 (2021) 125186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125186>.
- Ibrahim, F. Eltarabishi, H. Abdalla, M. Abdallah, 3D Printing in Sustainable Buildings: Systematic Review and Applications in the United Arab Emirates. *Buildings* 12 (2022) 1703. <https://doi.org/10.3390/buildings12101703>.
- T.K.N. Quah, Y.W.D. Tay, J.H. Lim, M.J. Tan, T.N. Wong, K.H.H. Li, Concrete 3D Printing: Process Parameters for Process Control, Monitoring and Diagnosis in Automation and Construction. *Mathematics* 11 (2023) 1499. <https://doi.org/10.3390/math11061499>.
- Salandin, A. Quintana-Gallardo, V. Gómez-Lozano, I. Guillén-Guillamón, The First 3D-Printed Building in Spain: A Study on Its Acoustic, Thermal and Environmental Performance. *Sustainability* 14 (2022) 13204. <https://doi.org/10.3390/su142013204>.
- Y. Su, B. Luo, Z. Luo, H. Huang, J. Li, D. Wang, Effect of Accelerators on the Workability, Strength, and Microstructure of Ultra-High-Performance Concrete. *Materials* 15 (2022) 159. <https://doi.org/10.3390/ma15010159>.
- Su, B. Luo, Z. Luo, F. Xu, H. Huang, Z. Long, C. Shen, Mechanical characteristics and solidification mechanism of slag/fly ash-based geopolymer and cement solidified organic clay: A comparative study. *J. Build. Eng.* 71 (2023) 106459. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106459>.
- A.K. Al-Tamimi, H.H. Alqamish, A. Khaldoune, H. Alhaidary, K. Shirvanimoghaddam, Framework of 3D Concrete Printing Potential and Challenges. *Buildings* 13 (2023) 827. <https://doi.org/10.3390/buildings13030827>.