



UNIVERSITATEA TEHNICĂ „GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII



**CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA
ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR
REZULTATE DIN CONVERSIA CU
PLASMĂ CU HIDROGEN A
DEȘEURILOR
REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT**

Doctorand:

Ing. **Marius Lucian LUPU**

Conducător de doctorat:

Prof.univ.dr.ing. **Dorina-Nicolina ISOPESCU**

IAȘI – 2024

UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAȘI

R E C T O R A T U L

Către,

Vă facem cunoscut că, în ziua de 27.09.2024 la ora 10:30 în Sala 0.1R, Corpul R al Facultății de Construcții și Instalații, Iași, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

***„CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR
REZULTATE DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR”***

elaborate de domnul **ing. Marius Lucian LUPU** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

- | | |
|--|--------------------------------------|
| 1. Prof. univ.dr.ing. Andrei BURLACU ,
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași | <i>președinte</i> |
| 2. Prof.univ.dr.ing. Dorina-Nicolina ISOPESCU
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași | <i>conducător de doctorat</i> |
| 3. Prof. univ.dr.ing. Carmen Elena MAFTEI
Universitatea Transilvania din Brașov | <i>referent oficial</i> |
| 4. Prof. univ.dr.ing. Dan Paul GEORGESCU
Universitatea Tehnică de Construcții București | <i>referent oficial</i> |
| 5. Prof. univ.dr.ing. Nicolae ȚĂRANU
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași | <i>referent oficial</i> |

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.

RECTOR,

Prof.univ.dr.ing.Dan Cascaval

Secretar universitate,

Ing. Cristina Nagit

CUPRINS

	Teză	Rezumat
CUPRINS	I	I
REZUMAT	V	-
LISTA FIGURILOR	VII	-
LISTA TABELELOR	XIII	-
Capitolul 1 – INTRODUCERE	1	1
1.1. Aspecte generale	1	1
1.2. Motivația și obiectivele tezei de doctorat	3	1
1.3. Conținutul tezei de doctorat	4	2
Capitolul 2 - STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII	9	4
2.1. Utilizarea deșeurilor în construcții	9	4
2.2. Deșeuri de fibră de sticlă: surse și modalități de reciclare	22	6
2.3. Concluzii parțiale	30	7
Capitolul 3 - STUDII PRIVIND RECICLAREA DEȘEURILOR DE FIBRĂ DE STICLĂ PRIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN	33	9
3.1. Introducere	33	9
3.2. Principiile conversiei cu plasmă cu hidrogen a deșeurilor	34	9
3.3. Tehnologii de tratare cu plasmă	35	10
3.4. Impactul economic al conversiei cu plasmă cu hidrogen	39	11
3.5. Impactul de mediu și avantajele tehnologice	41	12
3.6. Avantajele conversiei cu plasmă cu hidrogen	45	12
3.7. Tehnologia de reciclarea a fibrelor de sticlă prin conversia cu plasmă cu hidrogen	45	13
3.8. Concluzii parțiale	49	14
Capitolul 4 - STUDII DE MICROSCOPIE ELECTRONICĂ DE SUPRAFAȚĂ ȘI ANALIZA ELEMENTALĂ A DEȘEULUI DE FIBRĂ DE STICLĂ	51	15
4.1. Microscopie electronică de scanare (SEM)	51	15
4.2. Spectroscopie de raze X cu dispersie de energie (EDX)	54	16

4.3. Difrakția de raze X (XRD)	57	17
4.4. Spectroscopie de fluorescență cu raze X (XRF) a fibrei de sticlă vitrificată	61	18
4.5. Concluzii parțiale	64	20
Capitolul 5 - CERCETĂRI PRIVIND EVALUAREA PROPRIETĂȚILOR MECANICE ALE MORTARELOR ȘI BETOANELOR REALIZATE CU FIBRĂ DE STICLĂ VITRIFICATĂ	67	21
5.1. Program de cercetare nr. 1 – Încercări experimentale pentru evaluarea caracteristicilor mecanice ale mortarelor realizate cu fibră de sticlă vitrificată	67	21
5.1.1. Determinarea modurilor de elasticitate și de rigiditate pentru mortare de ciment aditivate cu produse obținute din tratarea cu plasmă a deșeurilor din fibră de sticlă	69	22
5.1.1.1. Metode experimentale	69	22
5.1.1.2. Echipamente	71	23
5.1.1.3. Pregătirea probelor	71	23
5.1.1.4. Determinarea prin măsurarea modului de vibrație longitudinal	72	24
5.1.1.5. Determinarea prin măsurarea modului de vibrație torsional	73	25
5.1.1.6. Rezultate obținute	74	25
5.1.1.7. Concluzii parțiale	76	26
5.1.2. Încercări experimentale pentru determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere	77	26
5.1.2.1. Proceduri de testare	77	26
5.1.2.2. Rezultate obținute	78	27
5.1.3. Încercări experimentale pentru determinarea rezistenței la compresiune	82	27
5.1.3.1. Proceduri de testare	82	27
5.1.3.2. Rezultate obținute	82	28
5.1.4. Concluzii parțiale	86	28

*CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE DIN
CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR*

5.2. Program de cercetare nr. 2 - Încercări experimentale pentru determinarea rezistențelor betonului realizat cu adaos de fibră de sticlă vitrificată cu plasmă	88	29
5.2.1. Determinarea rezistențelor betonului ca material	88	29
5.2.1.1. Pregătirea și condiționarea probelor	91	30
5.2.1.2. Evaluarea experimentală a rezistenței la întindere prin încovoiere	94	31
5.2.1.3. Proceduri de încercări - Rezistența la compresiune	94	31
5.2.1.4. Rezultate obținute - Rezistența la întindere prin încovoiere	95	31
5.2.1.5. Rezultate obținute - Rezistență la compresiune	98	32
5.2.1.6. Concluzii parțiale	102	33
5.2.2. Determinarea capacității portante a unei grinzi din beton armat	103	33
5.2.2.1. Pregătirea grinzilor	103	33
5.2.2.2. Metodologie experimentală	105	34
5.2.2.3. Rezultate obținute	107	35
5.2.2.4. Concluzii parțiale	110	36
Capitolul 6 - STUDII PRIVIND MODELAREA NUMERICĂ A GRINZILOR REALIZATE DIN BETON CU ADAOS DE FIBRĂ DE STICLĂ VITRIFICATĂ EVALUATE ÎN PROGRAMUL EXPERIMENTAL	113	37
6.1. Descrierea metodei aplicate pentru modelarea cu element finit	113	37
6.2. Metodologia cercetării	117	38
6.2.1. Stabilirea proprietăților materialelor	117	38
6.2.2. Conceperea modelului geometric tridimensional	124	39
6.2.3. Stabilirea condițiilor de rezemare și încărcare	125	40
6.2.4. Discretizarea modelului	125	40
6.3. Rezultatele simulării numerice	127	41
6.3.1. Distribuția deformațiilor elastice normale	129	41
6.3.2. Distribuția tensiunilor normale	130	42
6.3.3. Distribuția deformațiilor totale	131	42
6.3.4. Diagramele Tensiune-Deformație	132	43

6.4. Concluzii parțiale	134	44
Capitolul 7 - STUDIU PRIVIND EVALUAREA CICLULUI DE VIAȚĂ (LCA - LIFE CYCLE ASSESSMENT) A BETONULUI CU DEȘEURI DE FIBRĂ DE STICLĂ TRATATĂ CU PLASMĂ CU HIDROGEN	135	46
7.1. Introducere	135	46
7.2. Metodologia LCA	136	47
7.3. Inventarul Ciclului de Viață (LCI)	138	47
7.4. Evaluarea Impactului Ciclului de Viață	138	47
7.5. Scenarii de evaluare a impactului ecologic al betonului cu fibră de sticlă tratată cu plasmă cu hidrogen	139	47
7.6. Evaluare a impactului ecologic al betonului. Studii de caz	141	48
7.6.1. Studiul de caz 1 - rețeta martor – PMB	141	48
7.6.2. Studiul de caz 2 – beton cu 3% fibră de sticlă vitrificată cu plasmă – PB3	143	48
7.6.3. Studiul de caz 3 – beton cu 6% fibră de sticlă vitrificată cu plasmă – PB6	145	49
7.6.4. Studiul de caz 4 – beton cu 10% fibră de sticlă vitrificată cu plasmă – PB10	146	49
7.7. Interpretarea rezultatelor obținute în studiile de caz efectuate	148	49
7.8. Concluzii parțiale	152	51
Capitolul 8 - CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. VALORIFICAREA REZULTATELOR OBȚINUTE ÎN CADRUL PROGRAMULUI. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	155	52
8.1. Concluzii generale	155	52
8.2. Contribuții personale	159	53
8.3. Valorificarea rezultatelor obținute în cadrul programului	161	54
8.4. Direcții viitoare de cercetare	163	57
BIBLIOGRAFIE	165	58

Capitolul 1

INTRODUCERE

1.1. Aspecte generale

Gestionarea deșeurilor reprezintă o problemă complexă cu un impact major asupra mediului, cât și asupra economiei și societății. În ultimele decenii, cantitatea de deșeuri generate la nivel global a crescut exponențial, provocată de creșterea populației, urbanizarea rapidă și dezvoltarea industrială accelerată. În mod special, deșeurile de fibră de sticlă au devenit o preocupare majoră, având în vedere utilizarea lor pe scară largă în diverse sectoare industriale și dificultățile asociate cu reciclarea și gestionarea acestora (Lupu, 2019; Maxineasa et al., 2020).

Gestionarea deșeurilor de fibră de sticlă este dificilă din mai multe motive. În primul rând, materialul este foarte durabil și rezistent la degradare, ceea ce înseamnă că, odată ce ajunge în mediu, poate persista pentru perioade lungi de timp, contribuind la poluarea solului și a apei. În al doilea rând, compoziția chimică complexă a fibrei de sticlă, care include sticlă și rășini polimerice, face ca reciclarea să fie extrem de dificilă și costisitoare prin metode tradiționale (Tao et al., 2023). Majoritatea metodelor de gestionare a deșeurilor de fibră de sticlă implică fie depozitarea acestora în gropi de gunoi, fie incinerarea, ambele având dezavantaje semnificative. Depozitarea ocupă spațiu considerabil și poate duce la contaminarea solului și a apei subterane, în timp ce incinerarea produce emisii de gaze toxice și dioxine, contribuind la poluarea aerului și, implicit, la schimbările climatice (Fuentes Molina et al., 2021).

1.2. Motivația și obiectivele tezei de doctorat

Programul de cercetare din cadrul tezei de doctorat are ca obiectiv principal dezvoltarea și fundamentarea unor metode și soluții inovatoare și sustenabile pentru gestionarea deșeurilor generate de industria construcțiilor.

CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR

Motivația studiilor și cercetărilor efectuate este legată de nevoia de a proteja mediul și de a conserva resursele naturale, dar și de oportunitatea de a contribui la progresul tehnologic și la dezvoltarea unor soluții economice viabile pentru reciclarea materialelor compozite. Într-o economie globală care se îndreaptă din ce în ce mai mult către modele circulare, în care materialele sunt reciclate și reutilizate într-un ciclu continuu, tehnologiile inovatoare de gestionare a deșeurilor joacă un rol important. Astfel, această cercetare își propune să răspundă atât nevoilor actuale ale industriei construcțiilor, cât și cerințelor viitoare de a se conforma principiilor de sustenabilitate implementate la nivel internațional.

1.3. Conținutul tezei de doctorat

Teza de doctorat *Contribuții privind utilizarea în construcții a produselor rezultate din conversia cu plasmă cu hidrogen a deșeurilor* este structurată pe 8 capitole. În cadrul celor opt capitole, au fost abordate următoarele aspecte principale:

Capitolul 1 (Introducere) prezintă o sinteză a fundamentelor teoretice și conceptuale pentru cercetarea propusă, subliniind importanța reciclării deșeurilor de fibră de sticlă în contextul problemelor globale de mediu și sustenabilitate.

Capitolul 2 (Stadiul actual al cunoașterii) oferă o analiză cuprinzătoare a literaturii de specialitate, fiind prezentate diferitele metode de gestionare și reciclare a deșeurilor de fibră de sticlă. Capitolul analizează critic tehnologiile convenționale, precum incinerarea și depozitarea în gropi de gunoi, evidențiind limitările acestora, cum ar fi impactul ecologic negativ și eficiența redusă.

Capitolul 3 (Studii privind reciclarea deșeurilor de fibră de sticlă prin conversia cu plasmă cu hidrogen) descrie în detaliu procesul de conversie cu plasmă cu hidrogen, explicând atât principiile fundamentale ale acestei tehnologii, cât și aplicațiile sale practice în reciclarea deșeurilor. Capitolul prezintă configurația experimentală utilizată, incluzând specificațiile reactorului de plasmă, sursa de alimentare, sistemul de alimentare cu gaz și metodele de colectare a produselor rezultate.

În **Capitolul 4 (Studii de microscopie electronică de suprafață și analiza elementală a deșeurilor de fibră de sticlă)** cuprinde caracterizarea fibrei de sticlă vitrificată obținută prin procesul de conversie cu plasmă, utilizând tehnici de microscopie electronică și analiză chimică. Capitolul explorează structura morfologică a suprafețelor, structura microcristalină și compoziția chimică ale materialelor vitrificate, subliniind modul în care aceste caracteristici influențează performanțele lor în diverse aplicații. Prin utilizarea microscopiei electronice de baleiaj (SEM), a spectrometriei de dispersie a energiei (EDX), a difracției de raze X (XRD)

CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR

și fluorescenței de raze X (XRF) acest capitol oferă o analiză detaliată a morfologiei, a microstructurii și a compoziției elementale a materialelor vitrificate, evidențiind omogenitatea și stabilitatea acestora.

Capitolul 5 (*Cercetări privind evaluarea proprietăților mecanice ale mortarelor și betoanelor realizate cu fibră de sticlă vitrificată*) evaluează impactul integrării materialelor vitrificate în compozițiile de mortare și betoane, concentrându-se pe analiza proprietăților mecanice. Capitolul prezintă rezultatele testelor experimentale realizate pentru a evalua performanțele mecanice ale compozițiilor modificate, incluzând metode nedistructive, cât și teste de laborator determinarea rezistenței la compresiune și a rezistenței la întindere prin încovoiere.

Capitolul 6 (*Studii privind modelarea numerică a grinzilor realizate din beton cu adaos de fibră de sticlă vitrificată evaluate în programul experimental*) explorează utilizarea modelării numerice pentru a simula comportamentul structurilor realizate din compoziții de beton care includ fibra de sticlă vitrificată. Utilizând programul software ANSYS, acest capitol dezvoltă și validează modele numerice detaliate care prezic comportamentul structural.

Capitolul 7 (*Studiu privind evaluarea ciclului de viață (LCA - Life Cycle Assessment) a betonului cu deșeuri de fibră de sticlă tratată cu plasmă cu hidrogen*) detaliază impactul ecologic al utilizării fibrei de sticlă vitrificată în construcții printr-o evaluare a ciclului de viață (LCA). Capitolul analizează toate etapele ciclului de viață al materialelor, de la extracția resurselor și producerea materialelor, până la utilizarea și eliminarea acestora, evaluând impactul asupra mediului, incluzând emisiile de gaze cu efect de seră, consumul de energie și alte categorii de impact.

În **Capitolul 8 (*Concluzii generale. Contribuții personale. Valorificarea rezultatelor obținute în cadrul programului. Direcții viitoare de cercetare*)** sunt prezentate principalele concluzii ale cercetării, subliniind contribuțiile aduse de această teză în domeniul reciclării deșeurilor și al utilizării materialelor inovatoare în construcții. Capitolul abordează impactul potențial al rezultatelor asupra practicilor industriale și mediului, precum și direcțiile viitoare de cercetare care ar putea extinde și aprofunda cunoștințele dobândite.

Capitolul 2

STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII

Prezentul capitol abordează stadiul actual al cunoașterii în domeniul utilizării deșeurilor în construcții, cu aprofundare pe deșeurile de fibră de sticlă, fiind definite și exemplificate sursele, proprietățile acestora, metodele de reciclare existente, și metodele inovatoare, precum reciclarea mecanică, piroliza, gazeificarea, solvoliza.

2.1. Utilizarea deșeurilor în construcții

Deșeurile reprezintă resturi materiale generate în urma diverselor procese tehnologice, industriale, activități agricole, fluxuri de transport (rutier, feroviar sau naval) sau activități casnice. Aceste deșeuri pot fi de natură organică sau anorganică, existând sub forme solide, lichide sau gazoase, ori combinații ale acestor stări (Lupu, 2019).

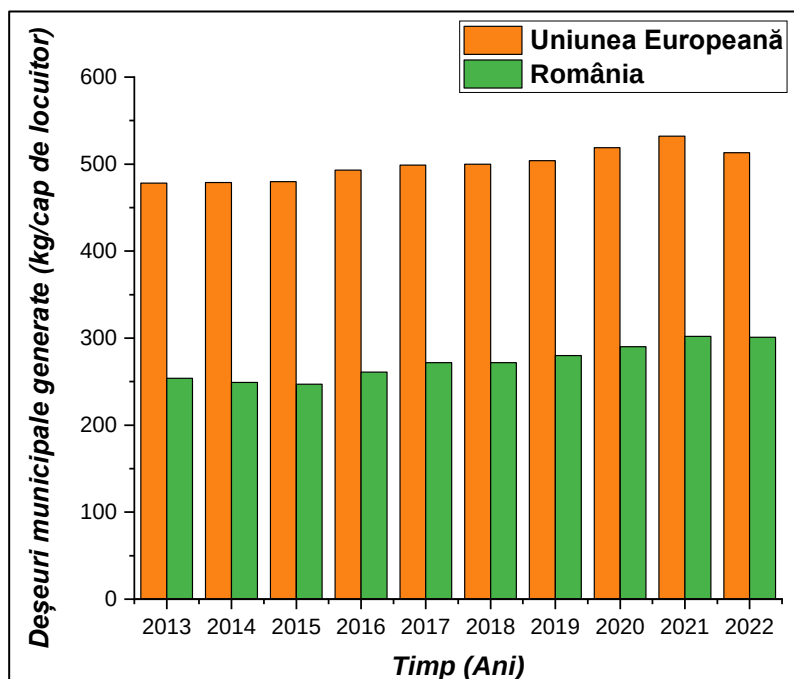


Figura 2.1. Evoluția deșeurilor municipale generate în Uniunea Europeană și România (Eurostat, 2024).

CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR

Rapoartele generate de Eurostat arată că, în anul 2022, doar în România s-au generat 301 kg de deșeuri municipale pe cap de locuitor, iar în Uniunea Europeană, în medie, 513 kg de deșeuri municipale pe cap de locuitor. În figura 2.1. este prezentată evoluția cantităților de deșeuri municipale generate în România și Uniunea Europeană între anii 2013-2022 (Eurostat, 2024). În plus, industria construcțiilor și demolărilor contribuie semnificativ la volumul total de deșeuri municipale, iar această contribuție va continua să crească pe măsură ce urbanizarea și dezvoltarea infrastructurii se accelerează, în special în regiunile în curs de dezvoltare (Hoornweg & Bhada-Tata, 2012; Lupu et al., 2019).

În analiza unui produs este esențial să considerăm întregul său ciclu de viață, de la proiectare până la sfârșitul utilizării. Conform modelului tradițional, produsele erau, în general, eliminate la finalul ciclului lor de viață. Însă, economia circulară introduce o nouă paradigmă, bazată pe principiile de reducere, reutilizare și reciclare (Parlamentul European, 2023; Urbinati et al., 2020). La sfârșitul duratei de viață a unui produs, materialele din componența acestuia sunt menținute în economia circulară cât mai mult posibil. Aceste materiale pot fi refolosite repetat, generând astfel valoare adăugată (Innocent et al., 2022; Maxineasa et al., 2020).

Principiile economiei circulare în construcții se aplică de la proiectarea și execuția clădirilor și a infrastructurii, astfel încât produsele/elementele componente să poată fi reutilizate la sfârșitul ciclului de viață al construcției, ceea ce implică utilizarea de elemente modulare și standardizate care pot fi ușor recuperate și reasamblate (Maxineasa et al., 2021; Mazur, 2021). Înlocuirea materialelor tradiționale cu materiale reciclate și regenerabile, cum ar fi utilizarea betonului reciclat, a oțelului reciclat și a lemnului provenit din surse durabile, sunt principiile de bază de funcționare a unei economii circulare în sectorul construcțiilor (Grădinaru et al., 2020). De asemenea, crearea de structuri flexibile și adaptabile, care pot fi reconfigurate pentru a răspunde nevoilor în schimbare, reduce necesitatea de demolare și reconstrucție (Bertino et al., 2021).

Un alt aspect important este implementarea unor practici de gestionare a deșeurilor pe șantier, care să minimizeze cantitatea de deșeuri generate, să maximizeze utilizarea eficientă și apoi reciclarea și reutilizarea materialelor (Mazzi & Gatto, 2020). Totodată, încurajarea utilizării în comun a resurselor și echipamentelor între diferite proiecte de construcții, la implementarea acestora, poate contribui la reducerea cererii de noi resurse și echipamente (Bertino et al., 2021). Soluția este însă dificil de implementat și necesită existența unor

particularități inițiale ce țin de aspecte precum ar fi: natura investiției, procesul de achiziție etc.

Având în vedere dezavantajele metodelor tradiționale de eliminare a deșeurilor, identificarea unei soluții mai ecologice pentru gestionarea acestora a devenit o necesitate stringentă. În acest sens, cercetările recente în domeniul managementului deșeurilor indică faptul că integrarea deșeurilor în procesul de producție a betoanelor ecologice și durabile prezintă o perspectivă promițătoare (Gupta et al., 2021; X. Zhang et al., 2019). Această abordare nu doar că generează beneficii economice și de mediu semnificative, dar poate îmbunătățiri și caracteristicile tehnice ale materialelor din beton.

2.2. Deșeuri de fibră de sticlă: surse și modalități de reciclare

Fibra de sticlă este un material compozit obținut din sticlă specială, procesată pentru a forma fibre extrem de fine. Aceste fibre pot fi dispuse într-o varietate de moduri, de la aranjamente aleatorii până la țesături, pentru a crea materiale adaptate unor necesități specifice, fiind inerte din punct de vedere chimic. Fibrele de sticlă se caracterizează printr-o rezistență remarcabilă la variațiile de temperatură, la expunerea la substanțe chimice agresive și comportament în timp favorabil (Fitzer et al., 2008; Nair et al., 2018).

Una dintre principalele surse de deșeuri de fibră de sticlă este industria construcțiilor și demolărilor, unde este frecvent utilizată în izolații, acoperișuri și alte elemente de construcție (Antonescu et al., 2021). De asemenea, în urma proceselor industriale de fabricație a fibrei de sticlă rezultă cantități semnificative de deșeuri. Producția ridicată și cererea tot mai mare pentru materiale compozite au contribuit la acumularea de deșeuri solide non-biodegradabile, ceea ce necesită explorarea unor soluții durabile de reciclare (Fuentes Molina et al., 2021).

În prezent, principale metode de reciclare a deșeurilor de fibră de sticlă sunt:

- **reciclarea mecanică,**
- **piroliza,**
- **gazeificarea,**
- **solvoliza.**

Reciclarea mecanică implică zdrobirea fibrei de sticlă în fragmente mici sau chiar pulbere, în funcție de aplicație (Karuppannan Gopalraj & Kärki, 2020). Acest proces se desfășoară în mai multe etape.

Piroliza este una dintre metodele de reciclare termică, în care legătura dintre matrice și fibră este descompusă într-un mediu fără oxigen sau cu un aport minim oxigen. Fiind un

CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR

proces endotermic, necesită o cantitate semnificativă de energie pentru a atinge temperaturile înalte necesare pentru volatilizarea compușilor organici (Bonczidai et al., 2011; Diaconescu et al., 2016).

Gazificarea este, de asemenea, o metodă de reciclare termică care utilizează un flux de gaz pentru a transfera căldura către deșeurile de fibră de sticlă amplasate pe un pat de nisip de siliciu pentru degradarea termică a matricei.

Reciclarea chimică prin solvoliză transformă polimerii în monomeri utili care pot fi reintroduși în industria petrochimică (Fuentes Molina et al., 2021). Solvoliza este un proces de separare a fibrelor din compozite care utilizează un solvent chimic, adăugând catalizatori sau aditivi pentru a descompune legătura matricei la o anumită presiune și temperatură.

Pentru a sublinia progresele recente în reciclarea fibrei de sticlă, au fost analizate metodele tradiționale de reciclare și au fost comparate eficiența lor, impactul economic și de mediu. Aceste comparații sunt prezentate în tabelul 2.2, oferind o perspectivă asupra avantajelor și limitărilor fiecărei metode (Karuppannan Gopalraj & Kärki, 2020).

Studiul realizat de Suwatthikul et al. (2017) arată că piroliza este o metodă eficientă din punct de vedere al emisiilor de CO₂, producând doar 50 kg/tonă, și un consum de aproximativ 2500 MJ/tonă. Piroliza descompune fibra de sticlă la temperaturi înalte în absența oxigenului, ceea ce reduce semnificativ emisiile de carbon. Aceasta face din piroliză o opțiune atractivă pentru reciclarea fibrei de sticlă din punct de vedere al impactului asupra mediului (Suwatthikul et al., 2017).

Una dintre metodele recente și eficiente de tratare a deșeurilor este **conversia cu plasmă cu hidrogen**. Această tehnologie are potențialul de a transforma deșeurile în resurse valoroase și de a diminua impactul negativ asupra mediului înconjurător (Lupu et al., 2021). În capitolul următor vor fi exemplificate principiile acestui proces și tehnologia de prelucrare a deșeurilor folosind acest procedeu.

2.3. Concluzii parțiale

Examinând diverse metode de tratare a deșeurilor din fibră de sticlă, conversia cu plasmă cu hidrogen a acestora se distinge ca o abordare eficientă, contribuind la protecția mediului. Procesul de conversie cu plasmă cu hidrogen implică folosirea unui gaz neutru, care este supus unui curent electric puternic, pentru a deveni ionizat și a-și crește conductivitatea electrică. În acest proces, deșeurile nu sunt supuse arderii, ci sunt disociate în elementele primare din care sunt alcătuite, ceea ce reprezintă un pas important în gestionarea sustenabilă a deșeurilor.

CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR

Prin urmare, se poate concluziona că adoptarea metodei de conversie cu plasmă cu hidrogen pentru reciclarea deșeurilor de fibră de sticlă are un impact pozitiv asupra mediului din următoarele considerente:

- eliminarea, rapidă și totală a unui poluant de mediu a cărui descompunere durează câteva sute de ani;
- reducerea emisiilor de CO₂ în cazul în care se poate înlocui o cantitate echivalentă de ciment, cunoscându-se faptul că echipamentul cu plasmă cu hidrogen, în procesul de conversie a fibrei de sticlă, produce gaz sintetic, care poate deveni sursă de auto-generare de curent electric pentru funcționarea echipamentului. De asemenea pot fi folosite și alte surse neconvenționale pentru producerea energiei electrice necesare: energie solară cu panouri fotovoltaice, energie eoliană cu turbine etc.
- crearea unui ciclu sustenabil de utilizare a materialelor în industria construcțiilor.

În acest mod, pot fi abordate simultan două dintre cele mai mari provocări ale sectorului construcțiilor: **gestionarea deșeurilor de fibră de sticlă și reducerea impactului negativ al producției de beton asupra mediului**. Aceasta reprezintă o abordare integrată și sustenabilă, cu potențial de a contribui semnificativ la obiectivele de dezvoltare durabilă la nivel global.

Capitolul 3

STUDII PRIVIND RECICLAREA DEȘEURILOR DE FIBRĂ DE STICLĂ PRIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN

3.1. Introducere

Prezentul capitol detaliază principiile de funcționare a echipamentelor cu plasmă cu hidrogen, punând accent pe utilizarea lor în tratarea deșeurilor, evidențiind potențialul acestora de a transforma deșeurile într-o resursă valoroasă. Această tehnologie poate reduce semnificativ volumul deșeurilor și elimină substanțele toxice, dar poate contribui și la producerea de energie regenerabilă și materiale reutilizabile, susținând astfel obiectivele de sustenabilitate și protecția mediului.

3.2. Principiile conversiei cu plasmă cu hidrogen a deșeurilor

Plasma, cunoscută ca fiind „a patra stare a materiei”, a fost inițial descrisă de chimistul american Irving Langmuir în anul 1920 și este termenul folosit pentru a descrie un gaz care a fost ionizat. Procesul de generare a plamei implică aplicarea unui câmp electric puternic asupra unui gaz neutru, ceea ce duce la ionizarea acestuia și la creșterea semnificativă a conductivității electrice a gazului. În acest context, electronii, datorită masei lor reduse, sunt capabili să absoarbă și să rețină cea mai mare parte a energiei cinetice din câmpul electric. Această energie este apoi transferată către atomii și moleculele gazului prin coliziuni, contribuind la menținerea stării de plasmă (Goldston, 2020; Morozov, 2013).

Comparativ cu tehnologiile tradiționale de tratare a deșeurilor, cum ar fi incinerarea și gazificarea convențională, tratamentul cu plasmă oferă avantaje semnificative, inclusiv o eficiență energetică mai mare și un impact ambiental redus. În timp ce incinerarea produce emisii de dioxine și furani, tratamentul cu plasmă reduce semnificativ aceste emisii datorită temperaturilor extrem de ridicate care favorizează descompunerea completă a compușilor toxici. De asemenea, plasma permite un control precis al procesului, făcând-o adaptabilă

pentru o gamă largă de tipuri de deșeuri, de la cele industriale la cele periculoase (Kusano & Kusano, 2024).

3.3. Tehnologii de tratare cu plasmă

Sistemele de conversie cu plasmă cu hidrogen transformă orice tip de deșeu (lichid, solid sau gazos) prin utilizarea unui gaz neutru care este supus unui câmp electromagnetic puternic, până când gazul devine ionizat și își crește conductivitatea electrică. Gazul ionizat este format din atomi de gaz care și-au pierdut unul sau mai mulți electroni și au devenit încărcăți electric.

În cadrul acestui proces, apare un fenomen numit disociere moleculară, deșeurile fiind descompuse în elemente de bază, nu arse, ceea ce reprezintă un pas important în gestionarea sustenabilă a deșeurilor și protejarea mediului înconjurător (Gibbon, 2016; Morozov, 2013). Acest proces descompune complet legăturile moleculare, în urma acestuia rămân doar atomii și moleculele componente.

În general, plasmăle pot fi:

- plasmă termice;
- plasmă non-termice.

Plasmăle termice pot fi produse fie prin intermediul unui arc electric, printr-o descărcare de inducție în radiofrecvență, fie prin intermediul microundelor. În domeniul tratării deșeurilor, plasmăle cu arc sunt predominante datorită rezistenței lor la variațiile condițiilor de procesare.

Plasma generată prin arc electric este utilizată în două configurații principale (Tabu et al., 2022; Wu et al., 2023):

- Arc transferat, în care unul dintre electrozi este, în general, materialul care urmează să fie tratat;
- Arc netransferat, în care arcul este conținut în interiorul unei torțe cu plasmă, iar jetul de plasmă emis la ieșirea din torță este utilizat pentru prelucrarea materialului.

În contrast, plasmăle non-termice sunt plasmă aflate în dezechilibru, cu temperaturi neutre, cuprinse între aproximativ 27 și 130 °C (Huang & Tang, 2007). Ionii și electronii din această plasmă sunt generați prin furnizarea de energie ridicată gazului purtător. Argonul este adesea utilizat ca gaz purtător de plasmă, deși și azotul, hidrogenul și vaporii de apă sunt folosiți în mod similar (Bhatt et al., 2022).

În industria de tratare a deșeurilor periculoase, utilizarea arcului transferat a demonstrat capacitatea de a reduce emisiile toxice și de a neutraliza substanțele periculoase, precum circuitele imprimate și metalele grele, transformându-le în zgură vitrificată și gaze inerte. În industria semiconductoarelor, torțele cu arc netransferat sunt esențiale pentru procesele de gravare și depunere, unde controlul precis al energiei plasmă este critic pentru calitatea produsului final (Wu et al., 2023).

3.4. Impactul economic al conversiei cu plasmă cu hidrogen

Costurile operaționale ale sistemelor de conversie cu plasmă sunt influențate de mai mulți factori, printre care consumul de energie electrică, întreținerea echipamentelor și costurile cu forța de muncă calificată. Energia electrică este unul dintre principalele componente de cost, având în vedere că generarea și menținerea plasmă necesită un aport energetic semnificativ. Totuși, eficiența energetică a sistemelor moderne de plasmă a crescut în mod constant, reducând astfel impactul costurilor energetice asupra rentabilității generale.

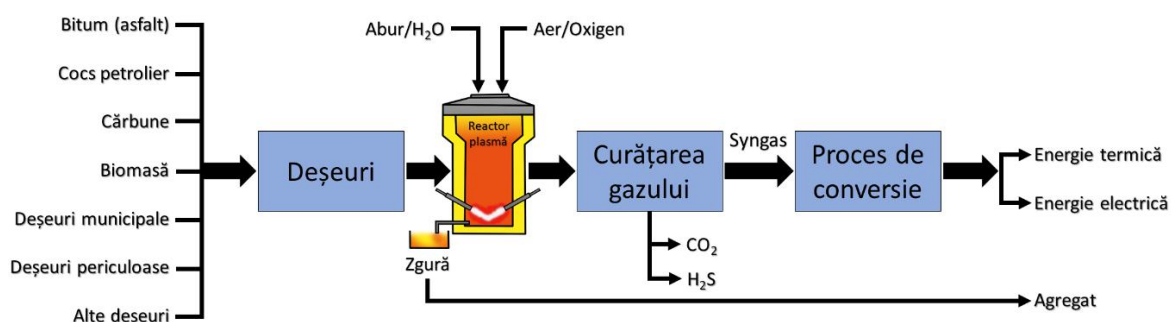


Figura 3.1. Schema fluxului tehnologic al unei instalații de conversie cu plasmă a deșeurilor (Alfagroup, 2023).

Unul dintre principalele avantaje economice ale tehnologiei de conversie cu plasmă este recuperarea materialelor valoroase din deșeuri (Figura 3.1). Zgura vitrificată, produsă în urma procesului de disociere moleculară, poate fi reutilizată în industria construcțiilor, reducând astfel costurile cu materiile prime și contribuind la o economie circulară. De asemenea, gazul de sinteză produs poate fi utilizat pentru generarea de energie electrică sau termică, contribuind la reducerea dependenței de combustibilii fosili. Într-un studiu recent, Kusano & Kusano (2024) au estimat că valorificarea gazului de sinteză produs prin conversia cu plasmă poate reduce costurile energetice ale unei instalații industriale cu până la 25%, asigurând astfel o sursă sustenabilă de energie (Kusano & Kusano, 2024).

3.5. Impactul de mediu și avantajele tehnologice

În tabelul 3.1 sunt prezentate comparativ emisiile de dioxid de carbon (CO₂), monoxid de carbon (CO), dioxidul de sulf (SO₂), acid clorhidric (HCl) și dioxine produse de incinerare și cele produse de conversia cu plasmă.

Tabel 3.1. Tabel comparativ al emisiilor generate de incinerare și conversia cu plasmă (Cudjoe & Wang, 2022).

Poluator	Incinerare	Conversie cu plasmă
CO ₂ (kg)	331,3	331,4
CO (kg)	0,4	0,2
SO ₂ (kg)	0,4	0,1
HCl (kg)	0,3	0,1
Dioxine (kg I-TEQ)	5,1x10 ⁻⁷	2,5x10 ⁻⁷

Prin utilizarea zgurii vitrificate în industria construcțiilor și valorificarea gazului de sinteză pentru generarea de energie sau în alte procese industriale, tehnologia de plasmă contribuie la economia circulară, reducând nevoia de resurse virgine și promovând sustenabilitatea. De asemenea, recuperarea energiei din deșeuri prin tehnologia de plasmă poate compensa utilizarea energiei electrice necesare pentru generarea plasmei, asigurând astfel un bilanț energetic pozitiv (Gomez et al., 2009).

Tehnologia cu plasmă oferă un control precis asupra procesului de tratare a deșeurilor, permițând ajustarea temperaturii și compoziției gazului de proces în funcție de tipul de deșeu tratat. Această flexibilitate face posibilă tratarea unei game largi de deșeuri, de la deșeuri organice și anorganice, până la deșeuri periculoase, cum ar fi circuitele imprimate și metalele grele (Dobslaw & Glocker, 2020).

3.6. Avantajele conversiei cu plasmă cu hidrogen

Principalele avantaje ale utilizării plasmei în procesele de tratare a deșeurilor includ:

- a. Densități mari de energie și temperaturi înalte, care permit:
 - încălzirea rapidă și pornirea eficientă a reactorului;
 - viteze ridicate de transfer termic și de reacție a reactanților;
 - reducerea dimensiunii instalației necesare pentru un anumit debit de deșeuri;
 - disocierea materialelor la temperaturi foarte înalte;

CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR

- obținerea rapidă de compoziții neechilibrate sau materiale metastabile datorită vitezelor mari de răcire.
- b. Utilizarea energiei electrice ca sursă principală de energie, ceea ce conduce la:
- separarea generării de căldură de necesitatea unui potențial de oxigen și de debitul masic de oxidant sau aer;
 - un control precis asupra mediului de procesare;
 - posibilitatea de a diversifica chimia procesului;
 - reducerea volumului de gaze reziduale și, implicit, scăderea costurilor asociate curățării acestora;
 - oportunitatea de a produce coproduse care pot fi valorificate comercial.

3.7. Tehnologia de reciclarea a fibrelor de sticlă prin conversia cu plasmă cu hidrogen

Cercetările analizează eficiența și viabilitatea acestei metode, evaluând performanțele tehnice ale materialelor obținute, precum și beneficiile economice și de mediu pe termen lung. Astfel, se dorește demonstrarea faptului că inovațiile tehnologice pot susține obiectivele de sustenabilitate, oferind soluții practice și eficiente pentru reutilizarea materialelor în construcții moderne și ecologice.



Figura 3.2. Instalație de conversie a deșeurilor cu plasmă cu hidrogen.

Instalația de conversie cu plasmă cu hidrogen (Figura 3.2.) folosită pentru prelucrarea deșeurilor de fibră de sticlă este un echipament conceput la Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași și se află în cadrul laboratorului de cercetare din Facultatea de Hidrotehnică, Geodezie și Ingineria Mediului (Lupu et al., 2020).

Având în vedere că echipamentul de conversie cu plasmă reprezintă un prototip, înainte de punerea sa în funcțiune, a fost necesară o optimizare detaliată a parametrilor de

CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR

operare a torțelor de plasmă. Inițial, s-au ajustat tensiunea și intensitatea arcului electric, urmate de reglarea debitului de apă pulverizat în plasmă. În acest context, s-au testat duze cu diametre de 1,5 mm și 2,5 mm, concluzionându-se că duzele de 2,5 mm contribuie semnificativ la creșterea intensității plasmei.

Ulterior proceselor de optimizare, echipamentul de conversie cu plasmă cu hidrogen (Figura 3.7.) a fost utilizat pentru a realiza procesul de disociere moleculară, transformând deșeurile de fibră de sticlă (Figura 3.3.a) într-o pulbere denumită fibră de sticlă vitrificată cu plasmă (Figura 3.3.b). După efectuarea tratamentului cu plasmă, fibra de sticlă vitrificată a fost procesată cu ajutorul unei mori cu bile, rezultând o pulbere fină, figura 3.3.c. Pulberea de fibră de sticlă vitrificată se va utiliza în programul experimental ca adaos în mortar și beton.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.3. (a) deșeu din fibră de sticlă; (b) fibră de sticlă vitrificată; (c) pulbere fină de fibră de sticlă vitrificată cu plasmă.

3.8. Concluzii parțiale

Studiile au arătat că, deși costurile inițiale ale tehnologiei de plasmă sunt ridicate, acestea sunt compensate pe termen lung prin valorificarea produselor secundare, cum ar fi gazul de sinteză și zgura vitrificată. Această tehnologie reduce volumul de deșeuri și contribuie la producerea de energie regenerabilă, oferind astfel o soluție economică viabilă pentru gestionarea deșeurilor.

Capitolul 4

STUDII DE MICROSCOPIE ELECTRONICĂ DE SUPRAFAȚĂ ȘI ANALIZA ELEMENTALĂ A DEȘEULUI DE FIBRĂ DE STICLĂ

4.1. Microscopie electronică de scanare (SEM)

În cadrul programului de cercetare, au fost realizate două studii privind evaluarea deșeurilor de fibră de sticlă cu ajutorul microscopului electronic model Quanta 3D 200i (FEI Company, 2023), și anume: studiul deșeurilor de fibră de sticlă înainte de tratamentul cu plasma de hidrogen și studiul deșeurilor de fibră de sticlă după tratament.

Pentru primul studiu realizat, rezultatele sunt prezentate în figura 4.1, care prezintă detaliat analiza realizată pentru fibra de sticlă cu ajutorul microscopiei electronice de scanare (SEM), luând în considerare parametri diferiți: magnificație, distanță de lucru (WD), lățime a câmpului de vizualizare (HFW), dimensiune imagine.

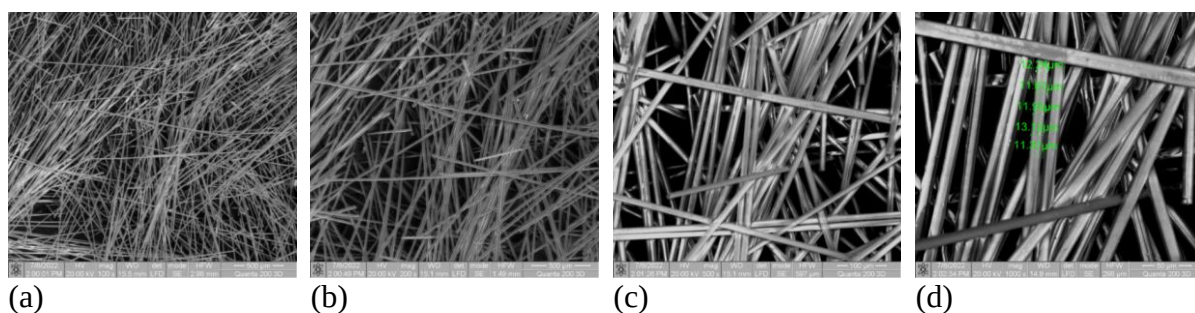


Figura 4.1. Reprezentare detaliată a fibrei de sticlă prin analiza microscopiei electronice de scanare (SEM): (a) magnificație 100x; (b) magnificație 200x; (c) magnificație 500x; (d) magnificație 1000x (Lupu et al., 2021).

Cel de al doilea studiu a fost realizat pentru fibra de sticlă vitrificată (Figura 4.2), astfel fiind inițiate patru sesiuni de evaluare cu diferiți parametri. Parametrii stabiliți în cadrul primei sesiuni au fost: tensiune de 20,00 kV, magnificație de 100x și distanța de lucru de 13,5 mm.

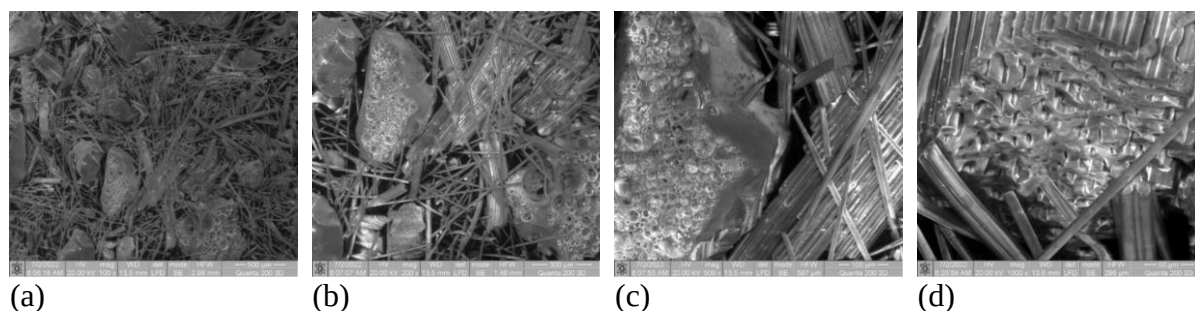


Figura 4.2. Reprezentări microscopice ale fibrei de sticlă vitrificată cu plasmă de hidrogen obținute prin microscopia electronică de scanare (SEM): (a) magnificație de 100x; (b) magnificație de 200x; (c) magnificație de 500x; (d) magnificație de 1000x (Lupu et al., 2021).

4.2. Spectroscopie de raze X cu dispersie de energie (EDX)

În momentul investigării semnalul specific siliciului (Si) la 1.9 keV, s-au identificat diferențe pronunțate între mostrele tratate și cele netratate (Figura 4.3). Majorarea intensității semnalului la 5.1 KCnt pentru mostrele supuse tratamentului sugerează că tratamentul cu plasmă cu hidrogen ar fi putut contribui la consolidarea sau accentuarea prezenței siliciului în compoziție, indicând o modificare structurală sau chimică relevantă datorită tratamentului (Lupu et al., 2021).

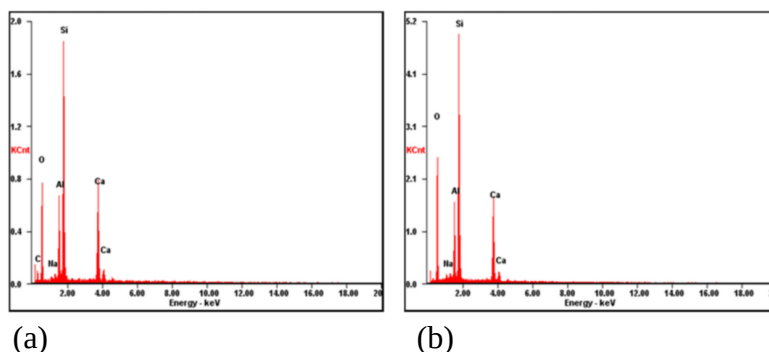


Figura 4.3. Analiza EDX pentru: (a) deșeurile de fibră de sticlă; (b) fibra de sticlă vitrificată cu plasmă cu hidrogen (Lupu et al., 2021).

În tabelul 4.1, compoziția chimică a fibrei de sticlă este prezentată în detaliu, evidențiind o diversitate de elemente, concentrație ponderală (Wt%) și proporție atomică (At%).

Tabel 4.1. Analiza EDX pentru deșeurile de fibră de sticlă.

Element	Wt%	At%
CK	0,45	0,84
OK	38,55	54,68

*CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE
DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR*

AlK	8,71	7,33
SiK	31,14	25,16
NaK	0,48	0,28
CaK	20,67	11,70
Matrix	Correction	ZAF

Tratamentul cu plasmă pe hidrogen asupra fibrei de sticlă induce modificări semnificative în compoziția chimică, prin analiza datelor din tabelele 4.2. și 4.3.

Tabel 4.2. Analiza EDX pentru fibra de sticlă vitrificată.

Element	Wt%	At%
OK	40,27	56,33
NaK	00,78	00,75
AlK	08,63	07,16
SiK	32,13	25,60
CaK	18,19	10,15
Matrix	Correction	ZAF

4.3. Difrakția de raze X (XRD)

În contextul cercetărilor actuale asupra proprietăților materialelor avansate, analiza spectrală ocupă o poziție centrală în identificarea și caracterizarea structurilor cristaline. Având în vedere complexitatea acestei analize, este esențial să se țină cont de parametrii specifici ai scanării. Pe baza parametrilor, s-a realizat o analiză spectrală aprofundată a unei probe de fibră de sticlă vitrificată cu plasmă pe bază de hidrogen. Analiza a relevat un profil de difracție bine definit, cu un vârf principal asociat unui unghi de difracție de 26,64°, ce corespunde fazei dominante de SiO₂. De asemenea, s-a identificat un vârf secundar la 51,15°, evidențiat în figura 4.4.

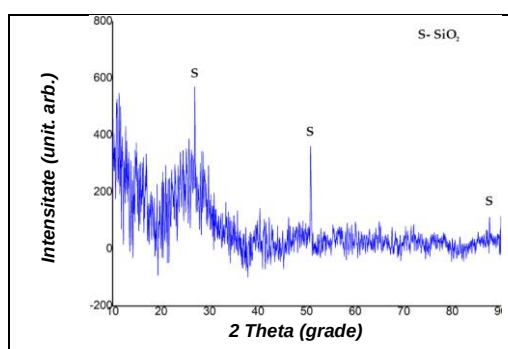


Figura 4.4. Spectrul de difracție XRD pentru fibra de sticlă vitrificată cu plasmă de hidrogen (Lupu et al., 2021).

4.4. Spectroscopie de fluorescență cu raze X (XRF) a fibrei de sticlă vitrificată

Tabelul 4.4. prezintă rezultatele analizei XRF pentru fibra de sticlă vitrificată tratată cu plasmă pe hidrogen, evidențiind compoziția sa chimică. Siliciul (Si) este predominant, cu o concentrație de 3.4816114%, urmat de calciu (Ca) și aluminiu (Al), indicând că acestea sunt componentele principale ale fibrei. Alte elemente, precum magneziu (Mg), sodiu (Na) și cupru (Cu), sunt prezente în concentrații mai mici, sugerând că acestea pot fi impurități sau aditivi intenționați pentru a modifica proprietățile fibrei.

Tabel 4.3. Analiza XRF, conținut matrice pură, pentru fibra de sticlă vitrificată cu plasmă cu hidrogen (cu boreox).

Element	(%)
Si	3,4816114
Ca	2,118096
Al	0,8966804
Mg	0,0945
Na	0,0872
Cu	0,07814714
Ti	0,053
Fe	0,0493235
P	0,011274
K	0,0361
As	0,0072
Zr	0,00519
Rb	0,0036
Sr	0,0025
Zn	0,00134
Boreox	93,0742

Utilizând metoda „Best Detection-AtmHe34mm”, analiza XRF a garantat acuratețea datelor obținute și oferit o perspectivă clară asupra proprietăților intrinseci ale fibrei de sticlă vitrificată cu plasmă pe hidrogen (Tabelul 4.5).

*CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE
DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR*

Tabel 4. 4. Analiza XRF pentru fibra de sticlă vitrificată cu plasmă cu hidrogen.

SiO₂	CaO	Al₂O₃	MgO	Na₂O	P₂O₅	CuO
28,9 KCps	58,6 KCps	5,4 KCps	0,5 KCps	0,2 KCps	0,6 KCps	5,6 KCps
7,25 %	2,94 %	1,69 %	0,151 %	0,139 %	0,108 %	992 PPM
TiO₂	Fe₂O₃	K₂O	As₂O₃	ZrO₂	Rb₂O	Ru
1,8 KCps	6,8 KCps	0,8 KCps	4,4 KCps	5,7 KCps	3,3 KCps	0,1 KCps
921 PPM	699 PPM	380 PPM	93,2 PPM	69,3 PPM	39,6 PPM	33,1 PPM
SrO	MnO	ZnO	SO₃	Cl	Sc₂O₃	V₂O₅
2,5 KCps	0,2 KCps	0,4 KCps	0,1 KCps	0,1 KCps	0 KCps	0,1 KCps
30,5 PPM	26,1 PPM	14,4 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM
Cr₂O₃	CoO	NiO	Ga₂O₃	GeO₂	SeO₂	Br
0,1 KCps	0 KCps	0 KCps	-0,1 KCps	0 KCps	0,1 KCps	0,2 KCps
0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM
Y₂O₃	Nb₂O₅	MoO₃	Rh	Pd	Ag	CdO
0,8 KCps	0,5 KCps	1,3 KCps	-0,0 KCps	0,0 KCps	-0,0 KCps	-0,0 KCps
0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM
In₂O₃	SnO₂	Sb₂O₃	TeO₂	I	Cs₂O	BaO
0 KCps	0,2 KCps	0,4 KCps	0,4 KCps	0 KCps	0 KCps	0 KCps
0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM
La₂O₃	CeO₂	Pr₆O₁₁	Nd₂O₃	Sm₂O₃	Eu₂O₃	Gd₂O₃
0,0 KCps	0,1 KCps	-0,0 KCps	0,0 KCps	0,0 KCps	0,0 KCps	-0,1 KCps
0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM
Tb₄O₇	Dy₂O₃	Ho₂O₃	Er₂O₃	Yb₂O₃	HfO₂	Ta₂O₅
0,0 KCps	0,0 KCps	-0,1 KCps	0,0 KCps	0,0 KCps	0,1 KCps	0,0 KCps
0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM
WO₃	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	PbO
0,0 KCps	-0,1 KCps	0,0 KCps	0,0 KCps	-0,1 KCps	0,1 KCps	0,0 KCps
0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM
Bi₂O₃	ThO₂	UO₂	Sum	C₁₂H₂₂O₁₁	Rh	
0,2 KCps	0,1 KCps	-0,1 KCps			84,7 KCps	
0,0 PPM	0,0 PPM	0,0 PPM	100 %	87 %	104 %	

4.5. Concluzii parțiale

Microscopia electronică de scanare (SEM) a evidențiat modificări morfologice semnificative ale fibrei de sticlă după tratamentul cu plasmă. Aceste modificări sugerează că tratamentul a avut un impact direct asupra structurii și compoziției fibrei, cu apariția neregularităților structurale și a glomerulelor, indicând posibile interacțiuni chimice sau structurale cauzate de tratament.

Spectroscopia de raze X cu dispersie de energie (EDX) a confirmat schimbări semnificative în compoziția chimică a fibrei de sticlă după tratament. Dispariția carbonului sugerează o transformare complexă a materialului.

Difracția de raze X (XRD) a validat existența dioxidului de siliciu (SiO_2) în fibra de sticlă vitrificată, indicând o structură cristalină predominantă de cuarț. Transformarea cristalografică observată sugerează că tratamentul cu plasma de hidrogen poate modifica proprietățile mecanice și optice ale fibrei de sticlă.

Spectroscopia de fluorescență cu raze X (XRF) a confirmat compoziția chimică a fibrei de sticlă vitrificată, evidențiind prezența predominantă a siliciului, calciului și aluminiului. Prezența acestor elemente în fibra de sticlă sugerează potențiale beneficii pentru utilizarea sa în beton, datorită compatibilității cu componentele majore ale cimentului Portland.

Capitolul 5

CERCETĂRI PRIVIND EVALUAREA PROPRIETĂȚILOR MECANICE ALE MORTARELOR ȘI BETOANELOR REALIZATE CU FIBRĂ DE STICLĂ VITRIFICATĂ

5.1. Program de cercetare nr. 1 – Încercări experimentale pentru evaluarea caracteristicilor mecanice ale mortarelor realizate cu fibră de sticlă vitrificată

În cadrul primei etape din programul de cercetare a tezei de doctorat au fost realizate studii privind caracteristicile mecanice ale mortarelor. În concordanță cu normele stabilite de SR EN 196-1, s-a evaluat rezistența la compresiune și întindere prin încovoiere utilizând epruvete prismatice de mortar, cu dimensiuni de 40 mm x 40 mm x 160 mm. Epruvetele au fost realizate dintr-o compoziție cu o parte ciment și trei părți de nisip normalizat, apa din amestec fiind stabilită pentru un raport apă-ciment de 0,50.

În compoziția probelor martor, s-au respectat rapoartele masice de o parte ciment, trei părți nisip standardizat și jumătate de parte apă, ceea ce conduce la un raport apă/ciment de 0,5. Dimensiunile matriței permit obținerea a 3 epruvete dintr-un pachet de nisip standard CEN. În consecință, pentru un lot de 3 epruvete martor au fost folosite următoarele cantități de materiale:

- 450 ± 2 g ciment;
- 1350 ± 5 g nisip standardizat CEN;
- 225 ± 1 g apă.

Având ca punct de plecare aceste proporții, s-au realizat diverse modificări ale conținutului de ciment, urmărindu-se dezvoltarea unor compoziții noi care să încorporeze produse rezultate din procesul de conversie cu plasma cu hidrogen a deșeurilor din fibră de sticlă, respectiv fibră de sticlă vitrificată. Aceste compoziții modificate sunt rezultate ca urmare a reducerii cantității de ciment cu 3%, 6% și 10%, care s-a înlocuit cu fibră de sticlă vitrificată în masă echivalentă. În tabelul 5.1. sunt prezentate compozițiile modificate.

*CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE
DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR*

Tabel 5.1. Compozițiile modificate care conțin fibră de sticlă vitrificată.

	Ciment	Fibră de sticlă vitrificată cu plasmă	Nisip standardizat CEN	Apă
<i>Probele cu 3% fibră de sticlă vitrificată</i>	436,5 g ± 1 g	13,5 g ± 0,5 g	1350 ± 5 g	225 ± 1 g
<i>Probele cu 6% fibră de sticlă vitrificată</i>	423 g ± 1 g	27 g ± 0,5 g	1350 ± 5 g	225 ± 1 g
<i>Probele cu 10% fibră de sticlă vitrificată</i>	405 g ± 1 g	45 g ± 0,5 g	1350 ± 5 g	225 ± 1 g

La 24 de ore după turnare, s-a efectuat decofrarea și marcarea fiecărui set de probe, după cum urmează (ASRO, 2004; Lupu et al., 2021):

- PM – probă martor;
- PS3 – probă cu 3% fibră de sticlă vitrificată;
- PS6 – probă cu 6% fibră de sticlă vitrificată;
- PS10 – probă cu 10% fibră de sticlă vitrificată.

Intervalul pentru testare a probelor a fost determinat pornind de la momentul de referință (realizarea amestecului), cu următorii parametrii temporali specifici:

- 48 h ± 30 min;
- 7 zile ± 30 min;
- 28 zile ± 30 min.

Echipamentul utilizat pentru determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere și a rezistenței la compresiune a fost WAW-600E (Figura 5.1), cu o încărcare maximă de 600 kN și o viteză de deplasare 200 mm/min.

5.1.1. Determinarea modulilor de elasticitate și de rigiditate pentru mortare de ciment aditivate cu produse obținute din tratarea cu plasmă a deșeurilor din fibră de sticlă

5.1.1.1. Metode experimentale

Evaluările dinamice reprezintă metode nedistructive esențiale în analiza proprietăților materialelor, având la bază identificarea frecvențelor de rezonanță specifice epruvetelor examinate. Există două procedee principale de determinare a acestor frecvențe: **metoda oscilațiilor forțate** și **metoda impactului**.

CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR

Modulul de elasticitate dinamic, determinat prin această metodologie de testare, prezintă în general valori superioare față de modulul de elasticitate static, a cărui determinare se realizează în conformitate cu standardul ASTM C469/C469M (ASTM International, 2014).

Valorile pentru modulul de elasticitate dinamic și modulul de rigiditate dinamic pot fi utilizate la calcularea coeficientului lui Poisson, cu ajutorul ecuației (5.1), conform ASTM Standard C469/C469M-14 (ASTM International, 2014):

$$\mu = \frac{E}{2 \cdot G} - 1 \quad (5.1)$$

unde:

μ = coeficientului lui Poisson;

E = modul de elasticitate dinamic, [GPa];

G = modulul de rigiditate dinamic, [GPa].

5.1.1.2. Echipamente

Metoda impactului se realizează utilizând configurația experimentală prezentată în figura 5.2. Sistemul constă din trei componente principale: un impactor, un accelerometru și o placă de achiziții interconectată cu un sistem informatic.

Conform specificațiilor standardului ASTM C215, s-au respectat următoarele criterii referitoare la impactor și accelerometru (ASTM International, 2019):

- impactor fabricat din material metalic;
- accelerometru având o masă inferioară valorii de 30 g, cu o capacitate de măsurare cuprinsă între minimum 100 Hz și maximum 15000 Hz și o frecvență de rezonanță intrinsecă ce trebuie să depășească de două ori frecvența maximă admisă în funcționare (ASTM International, 2019).

5.1.1.3. Pregătirea probelor

Probele prismatice au fost realizate respectând normele stipulate în standardul SR EN 196-1:2016. Masa și dimensiunile probelor sunt expuse în detaliu în cadrul tabelului 5.2.

Tabel 5.2. Caracteristici geometrice și fizice ale probelor încercate.

Proba	Masa (kg)	b/t (mm)				L (mm)		ρ (kg/m³)
		1	2	3	4	1	2	
PM	0,559	40,18	40,24	40,95	40,18	159,6	159,97	2145,04
		40,3875				159,765		
PS3	0,547	39,98	40,57	40,25	41,34	160,1	160,07	2079,39

*CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE
DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR*

		40,535				160,1		
PS6	0,545	40,18	39,95	42,68	40,12	160	159,92	2053,67
		40,7325				159,95		
PS10	0,539	39,98	40,72	40,33	40,22	160,1	160,19	2071,08
		40,3125				160,145		

5.1.1.4. Determinarea prin măsurarea modului de vibrație longitudinal

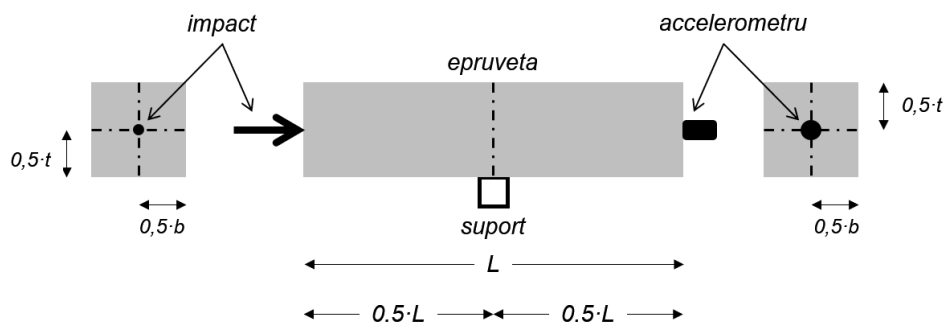


Figura 5.1. Aranjamentul experimental pentru determinarea frecvenței de rezonanță longitudinală.

Cu ajutorul sistemului prezentat în figura 5.1, în aranjamentul longitudinal s-a determinat frecvența de rezonanță care, împreună cu parametrii specifici ai probei, ai condus la determinarea modului de elasticitate dinamic.

Modulul de elasticitate dinamic a fost calculat folosind ecuația (5.2) (ASTM International, 2014):

$$E_d = D \cdot m \cdot f_L^2 \quad (5.2)$$

unde:

E_d = modul de elasticitate dinamic, [GPa];

$D = 4 \cdot \frac{L}{b \cdot t}$, [m^{-1}];

L = lungimea prisme, [m];

b = înălțimea prisme, [m];

t = lățimea prisme, [m];

m = masa prisme, [kg];

f_L = frecvența longitudinală, [Hz].

5.1.1.5. Determinarea prin măsurarea modului de vibrație torsional

Frecvența de rezonanță înregistrată în sistemul prezentat în figura 5.2, în configurație torsională, s-a utilizat în combinație cu parametrii caracteristici ai epruvetei pentru estimarea modului de rigiditate dinamic (ASTM International, 2014).

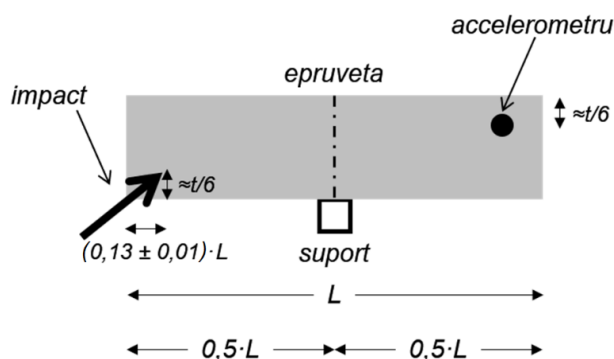


Figura 5. 2. Aranjamentul experimental pentru determinarea frecvenței de rezonanță torsională.

Valoarea frecvenței de rezonanță în regim torsional s-a obținut ca medie a mai multor încercări (impacturi). Modulul de rigiditate dinamic a fost determinat utilizând ecuația (5.3) (ASTM International, 2014):

$$G_d = B \cdot m \cdot f_t^2 \quad (5.3)$$

unde:

G_d = modul de rigiditate dinamic, [GPa];

$B = 4 \cdot \frac{L \cdot R}{A}$, [m^{-1}];

R = factor de formă = 1,183 (secțiune pătrată a prisme – cazul de față);

L = lungimea prisme, [m];

A = aria secțiunii transversale a prisme, [m^2];

m = masa prisme, [kg];

f_t = frecvența torsională, [Hz].

5.1.1.6. Rezultate obținute

În figurile 5.3. și 5.4. sunt prezentate sub formă de grafic, într-o manieră comparativă, datele referitoare la modulii de elasticitate și de rigiditate, determinate dinamic, specific eșantioanelor examinate.

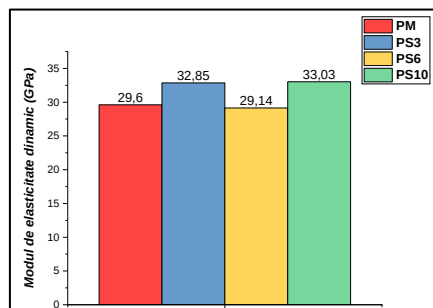


Figura 5.3. Modul de elasticitate dinamic pentru epruvetele încercate.

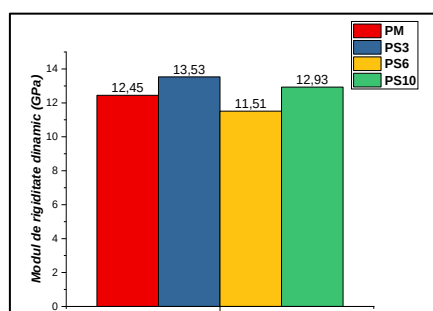


Figura 5.4. Modulul de rigiditate dinamic pentru epruvetele încercate.

5.1.1.7. Concluzii parțiale

Investigațiile realizate asupra diverselor compoziții de mortar oferă o înțelegere semnificativă asupra caracteristicilor mecanice ale acestora. Pe baza încercărilor efectuate, se deduce că majoritatea noilor compoziții prezintă un modul de elasticitate dinamic îmbunătățit în comparație cu compoziția martor. Acest fapt sugerează că compozițiile inovatoare propuse pot avea un impact pozitiv în ceea ce privește performanțele de elasticitate.

5.1.2. Încercări experimentale pentru determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere

5.1.2.1. Proceduri de testare

Procesul de testare s-a desfășurat conform SR EN 196-1:2016 și a implicat utilizarea metodei de sarcină în trei puncte. Proba prismatică a fost plasată în dispozitivul de testare astfel încât una dintre laturile sale să fie perpendiculară pe rolele de susținere, și cu axa sa longitudinală în poziție verticală în raport cu acestea.

Conform SR EN 196-1:2016, rezistența finală la întindere prin încovoiere, R_f , a fost determinată cu ecuația (5.4) (ASRO, 2004):

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b^3} \quad (5.4)$$

unde:

R_f = rezistența finală la întindere prin încovoiere, [MPa];

b = latura prisme cu secțiune pătrată, [mm];

F_f = sarcina maximă aplicată în centrul prisme la momentul cedării, [N];

l = distanța între rulourile de susținere, [mm].

5.1.2.2. Rezultate obținute

Valorile rezultate în urma determinării rezistenței la întindere prin încovoiere au fost calculate ca medie aritmetică a trei determinări individuale, fiecare dintre acestea fiind exprimată cu o precizie de 0,1 MPa, provenite din evaluarea unui set de trei prisme. Fiecare dintre aceste valori a fost consemnată separat și raportată la media calculată (ASRO, 2004).

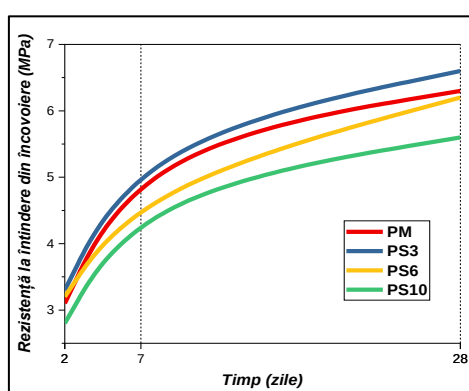


Figura 5.5. Evoluția rezultatelor obținute pentru rezistența la întindere prin încovoiere pentru probele analizate (Lupu et al., 2021).

Figura 5.5. reprezintă grafic valorile obținute la încercările la întindere prin încovoiere pentru probele cu 3%, 6% și 10% fibră de sticlă vitrificată (PS3, PS6 și PS10), pentru toate cele 3 perioade de testare (2 zile, 7 zile și 28 zile), care permite analiza comparativă și identificarea aportului adus de adaosul de sticlă vitrificată (Lupu et al., 2021).

5.1.3. Încercări experimentale pentru determinarea rezistenței la compresiune

5.1.3.1. Proceduri de testare

Încercarea la compresiune s-a realizat pe segmentele prismatice rezultate în urma determinării rezistenței la întindere prin încovoiere. Fiecare fragment prismatic a fost testat prin aplicarea sarcinii pe fețele sale laterale folosind plăci din oțel (Figura 5.14.).

Încărcarea a fost aplicată fără șocuri, constant, în mod uniform, cu o viteză de 150 N/s până la cedare (ASRO, 2004; Lupu et al., 2021). Conform SR EN 196-1:2016, rezistența la compresiune, R_c , a fost determinată conform ecuației (5.5) (ASRO, 2004; Lupu et al., 2021):

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (5.5)$$

unde:

R_c = rezistența la compresiune, [MPa]

F_c = sarcina maximă în momentul cedării, [N]

1600 = aria platanelor, [mm²]

5.1.3.2. Rezultate obținute

Rezistența la compresiune a fost obținută ca medie aritmetică a șase rezultate individuale, fiecare exprimat cu o precizie de 0,1 MPa, obținute prin efectuarea a șase încercări pe un set de șase jumătăți de prismă, rezultate în urma determinării rezistenței la întindere prin încovoiere. Fiecare rezultat a fost înregistrat individual și raportat în conformitate cu media calculată (ASRO, 2004; Lupu et al., 2021).

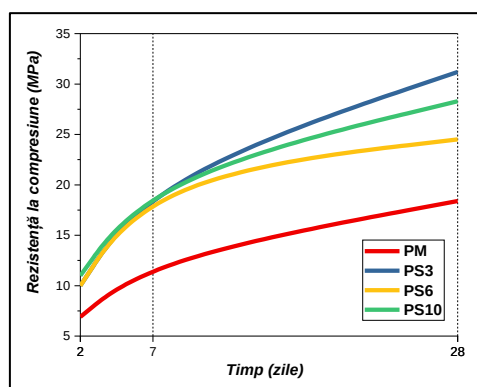


Figura 5.6. Evoluția rezistențelor la compresiune pentru probele de mortar încercate experimental.

Figura 5.6 expune grafic rezultatele obținute în cadrul testelor de compresiune pentru compozițiile cu 3%, 6% și 10% fibră de sticlă vitrificată (PS3, PS6 și PS10), la cele trei etape de examinare: 2 zile, 7 zile și 28 zile (Lupu et al., 2021). Acest grafic evidențiază influența adaosului de fibră de sticlă vitrificată cu plasmă în compoziție, constatându-se o evoluție similară reprezentărilor grafice din figura 5.3.

5.1.4. Concluzii parțiale

În ceea ce privește rezistența la întindere prin încovoiere, datele obținute la 2, 7 și 28 de zile arată o tendință generală de îmbunătățire a rezistenței pentru compozițiile cu adaos de fibră de sticlă vitrificată. La 2 zile, compozițiile cu 3 % și 6 % fibră de sticlă vitrificată au prezentat o creștere a rezistenței în comparație cu proba martor. Compoziția cu 3 % fibră de sticlă vitrificată a atins o valoare medie a rezistenței de 3,3 MPa, evidențiind o îmbunătățire față de proba martor care a înregistrat o valoare medie de 3,1 MPa. La 7 zile, această tendință se

menține, cu o valoare medie de 5,6 MPa pentru compoziția cu 3% fibră de sticlă vitrificată, comparativ cu 5,5 MPa pentru proba martor. La 28 de zile, compozițiile cu adaosuri de fibră de sticlă vitrificată continuă să comporte mai bine decât proba martor, însă compoziția cu 10 % fibră de sticlă vitrificată a înregistrat o scădere ușoară a rezistenței, ceea ce sugerează că efectele fibrei de sticlă vitrificată pe termen lung pot varia în funcție de concentrație, sau că aportul acesteia limitează reducerea cantității de ciment la procente sub 10 %.

Rezistența la compresiune a fost evaluată pentru aceleași compoziții de mortar. La 2 zile, compozițiile cu 3 %, 6 % și 10 % fibră de sticlă vitrificată au arătat o îmbunătățire a rezistenței la compresiune în comparație cu proba martor. În special, compoziția cu 10 % fibră a înregistrat o valoare medie de 11,0 MPa, ceea ce reprezintă o creștere semnificativă față de 6,9 MPa pentru proba martor. La 7 zile, această tendință de creștere continuă, cu valori medii ale rezistenței de 21,0 MPa pentru compozițiile cu 3% și 6% fibră, comparativ cu 12,8 MPa pentru proba martor. La 28 de zile, compozițiile cu adaos de fibră de sticlă vitrificată au continuat să prezinte valori superioare ale rezistenței la compresiune. Compoziția cu 3% fibră de sticlă vitrificată a atins o valoare medie de 31,2 MPa, evidențiind o îmbunătățire semnificativă față de valoarea de 18,4 MPa obținută pentru proba martor.

5.2. Program de cercetare nr. 2 - Încercări experimentale pentru determinarea rezistențelor betonului realizat cu adaos de fibră de sticlă vitrificată cu plasmă

5.2.1. Determinarea rezistențelor betonului ca material

Cel de al doilea program experimental a constat în evaluarea parametrilor mecanici ai betonului cu fibră de sticlă vitrificată cu plasmă, rezistența la compresiune și la întindere prin încovoiere. Această etapă a fost efectuată în conformitate cu normativele SR EN 12390-3:2019 și SR EN 12390-5:2019. Epruvetele utilizate pentru încercările experimentale au fost de formă prismatică, având dimensiuni standardizate de 100 mm x 100 mm x 550 mm (ASRO, 2019a, 2019b).

Betonul utilizat pentru aceste epruvete a fost de tipul C20/25, o clasă de beton cunoscută pentru utilizarea extinsă în mediul construit.

În plus, s-a inclus în mixtură un aditiv specializat, MC – Power Flow 3100, pentru a îmbunătăți diverse caracteristici ale betonului. Acest aditiv a fost selectat pentru proprietățile sale de a reduce timpul de mixare, de reducere a cantității de apă și de a îmbunătăți rezistența

*CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE
DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR*

inițială, fără a introduce componente care ar putea accelera procesele de degradare care apar sub diverse solicitări.

5.2.1.1. Pregătirea și condiționarea probelor

În cadrul experimentului, s-au stabilit proporțiile de masă pentru trei epruvete martor, detaliile fiind cuprinse în tabelul 5.3. Un aspect important a fost raportul apă/ciment de 0,4, ales pentru a asigura o coeziune optimă și proprietăți mecanice superioare ale betonului.

Tabel 5.3. Compoziție beton de clasă C20/25.

Cantitate [m ³]	Ciment [kg]	Apă [kg]	Agregat total [kg]	Agregat [kg]			Aditiv [kg]
				0/4 [mm]	4/8 [mm]	8/16 [mm]	
1	390	156	1790	662	447	680	3,9

În tabelul 5.4., este prezentată compoziția specifică a betonului ce conține adaosuri de 3 % , 6 % și 10 % fibră de sticlă vitrificată prin tratament cu plasmă pe hidrogen.

Tabel 5.4. Compozițiile de beton utilizate pentru cele trei tipuri de probe.

Cantitate [m³]	Ciment [kg]	Apă [kg]	Fibră de sticlă vitrificată cu plasma [kg]	Agregat total [kg]	Agregat [kg]			Aditiv [kg]
					0/4 [mm]	4/8 [mm]	8/16 [mm]	
Beton cu 3 % adaos de fibră de sticlă vitrificată cu plasmă (PB3)								
1	378,3	151,3	11,7	1790	662	447	680	3,79
Beton cu 6 % adaos de fibră de sticlă vitrificată cu plasmă (PB6)								
1	366,6	146,6	23,4	1790	662	447	680	3,7
Beton cu 10 % adaos de fibră de sticlă vitrificată cu plasmă (PB10)								
1	351	140,4	39	1790	662	447	680	3,5

Epruvetele cu compozițiile prezentate în tabelele 5.13 și 5.14 au fost marcate astfel:

- PMB - probele martor, (tabelul 5.13);

CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR

- PB3 - probele cu 3 % fibră de sticlă vitrificată cu plasmă, (tabel 5.14);
- PB6 - probele cu 6 % fibră de sticlă vitrificată cu plasmă, (tabel 5.14) ;
- PB10 - probele cu 10 % fibră de sticlă vitrificată, (tabel 5.14).

Perioada de încercare pentru epruvete a fost stabilită începând cu momentul zero, având limite temporale de: 7 zile $\pm$ 30 minute și 28 de zile $\pm$ 30 minute. Aceste perioade au avut ca scop realizarea de evaluări standardizate și comparabile.

5.2.1.2. Evaluarea experimentală a rezistenței la întindere prin încovoiere

Calculul rezistenței la încovoiere, f_{tf} , a fost efectuat în acord cu standardul cu SR EN 12390-5:2019, conform relației (5.6):

$$f_{tf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \quad (5.6)$$

unde:

f_{tf} = rezistența la întindere prin încovoiere [MPa];

F = încărcarea maximă, [N];

l = distanța între reazeme, [mm];

d_1 și d_2 = dimensiunile laterale ale epruvetei, [mm].

5.2.1.3. Proceduri de încercări - Rezistența la compresiune

Rezistența la compresiune, f_c , a fost calculată în conformitate SR EN 12390-3:2019, conform ecuației (5.7):

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (5.7)$$

unde:

f_c = rezistența la compresiune, [MPa]

F = sarcina maximă în momentul cedării, [N]

A_c = secțiunea transversală a epruvetei pe care acționează forța de compresiune, calculată din mărimea desemnată a epruvetei sau de la măsurările epruvetei, [mm²].

5.2.1.4. Rezultate obținute - Rezistența la întindere prin încovoiere

Rezistența la întindere prin încovoiere a fost obținută ca medie aritmetică a trei rezultate individuale, fiecare exprimat prin rotunjire la 0,1 MPa, obținute de la o determinare efectuată pe un set de trei prisme (ASRO, 2019b).

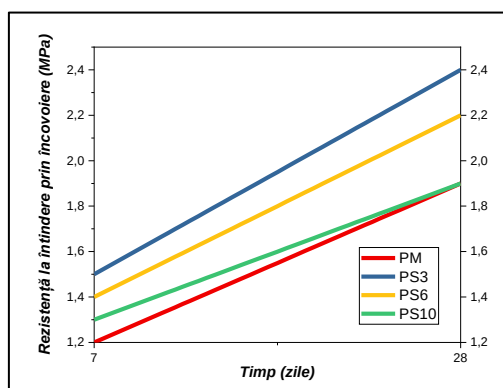


Figura 5.7. Evoluția rezistențelor la întindere prin încovoiere pentru toate probele încercate experimental.

Figura 5.7 oferă o privire de ansamblu asupra comportamentului mediu al fiecărui lot de probe pe parcursul celor două perioade de încercare, evidențiind tendințele generale și modul în care compoziția betonului influențează evoluția rezistenței în timp. Graficul arată că adăugarea de fibră de sticlă vitrificată cu plasmă în proporții moderate (3-6%) contribuie la îmbunătățirea semnificativă a performanțelor betonului în ceea ce privește rezistența la întindere prin încovoiere.

5.2.1.5. Rezultate obținute - Rezistență la compresiune

Rezistența la compresiune a fost obținută ca medie aritmetică a șase rezultate individuale, fiecare exprimat prin rotunjire la 0,1 MPa, obținute de la șase determinări efectuate pe capetele de prismă de la un set de trei prisme (ASRO, 2019a).

Figura 5.8 oferă o privire de ansamblu asupra valorilor obținute la încercările de compresiune pentru toate probele analizate. Din figură se poate observa că, deși toate probele au înregistrat o creștere a rezistenței odată cu maturarea betonului, cele cu adaos de fibră de sticlă vitrificată au avut performanțe superioare în comparație cu probele martor.

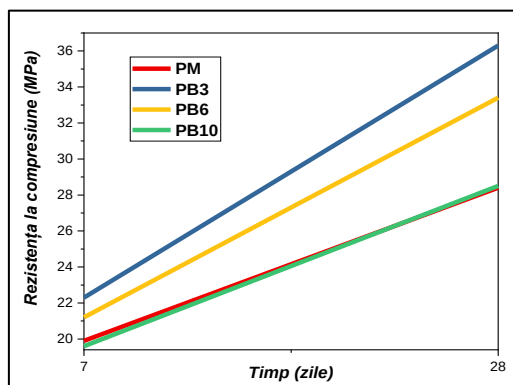


Figura 5.8. Evoluția rezistențelor la compresiune pentru toate probele încercate experimental.

5.2.1.6. Concluzii parțiale

Rezultatele rezistenței la întindere prin încovoiere după 7 zile indică o îmbunătățire semnificativă a performanței pentru probele în care cimentul a fost înlocuit cu fibră de sticlă vitrificată cu plasmă. Probele PB3, cu o înlocuire de 3% au demonstrat o creștere considerabilă a rezistenței la întindere prin încovoiere comparativ cu probele martor. În mod similar, probele PB6 și PB10 cu o înlocuire de 6% și 10% au prezentat valori ușor mai scăzute, dar totuși superioare probelor martor.

În ceea ce privește rezistența la compresiune, rezultatele după 7 zile indică o îmbunătățire remarcabilă pentru probele în care cimentul a fost înlocuit cu fibră de sticlă vitrificată. Probele PB3 au înregistrat o creștere semnificativă a rezistenței la compresiune, în timp ce PB6 și PB10 au avut valori mai moderate. Comparativ, probele martor au prezentat valori mai scăzute.

Încercările realizate la 28 de zile au confirmat aceste tendințe, cu probele PB3 cu cea mai mare rezistență medie la compresiune, urmate de probele PB6 și PB10. Probele martor au înregistrat valori mai scăzute, subliniind din nou că înlocuirea cimentului cu 3% fibră de sticlă vitrificată este cea mai eficientă pentru îmbunătățirea rezistenței la compresiune pe termen lung. Procentajele mai mari de fibră nu au adus îmbunătățiri suplimentare și chiar au diminuat performanța datorită posibilelor efecte de agregare sau distribuție inegală în matricea de beton.

5.2.2. Determinarea capacității portante a unei grinzi din beton armat

Programul experimental din această etapă a avut ca obiectiv studierea influenței pe care o are înlocuirea unei cantități de ciment cu fibră de sticlă vitrificată asupra comportamentului elementelor din beton armat solícitate la încovoiere în 4 puncte.

5.2.2.1. Pregătirea grinzilor

Programul experimental a inclus evaluarea a nouă grinzi din beton armat, având formă prismatică o lungime de 750 mm și o secțiune transversală de 100 x 100 mm², grupate astfel:

- trei grinzi, utilizate ca probe martor, din beton clasic, cu codul MBA (compoziție prezentată în tabelul 5.3);
- trei grinzi din beton cu un adaos de 3% fibră de sticlă vitrificată cu plasmă, cu codul FSBA3 (compoziție prezentată în tabelul 5.4);
- trei grinzi din beton cu un adaos de 6% fibră de sticlă vitrificată cu plasmă, cu codul FSBA6 (compoziție prezentată în tabelul 5.4).

CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR

Armarea longitudinală a grinzilor a fost realizată la partea superioară și inferioară cu bare din oțel PC52 având un diametru nominal de 10 mm. Armarea transversală s-a efectuat folosind etrieri OB37, având o secțiune circulară cu un diametru de 3 mm, poziționați la intervale de 45 mm, pentru a evita cedarea din cauza forței tăietoare.

Soluția de armare adoptată este prezentată în figura 5.9, unde se observă eliminarea etrierilor în zona centrală a elementului structural. Această opțiune a fost motivată de evitarea confinării betonului aflat în stare comprimată, având ca rezultat îmbunătățirea comportamentului general al elementului, ceea ce ar fi condus la o alterare a rezultatelor.

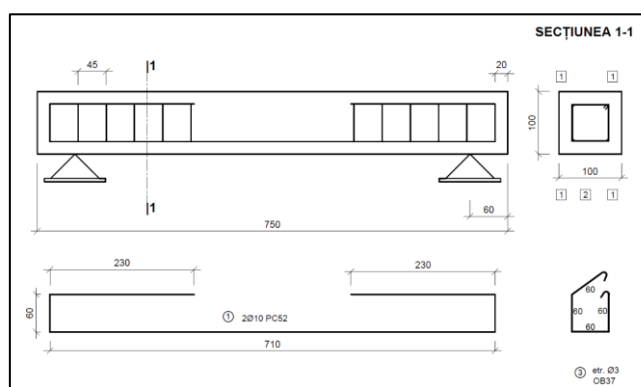


Figura 5.9. Armarea grinzii.

5.2.2.2. Metodologie experimentală

Grinzile din beton armat au fost supuse testelor la mașina universală de încercare WAW-600E, având o capacitate de 3000 kN (Figura 5.10.). Standul de încercări a fost proiectat pentru a permite încadrarea simplă a grinzilor din beton armat conform unei scheme statice, cu o deschidere între reazeme de 630 mm (Figura 5.11.).



Figura 5.10. Încercarea la întindere prin încovoiere în patru puncte.

Grinzile au fost supuse la încovoiere, cu un moment încovoiator constant dezvoltat sub acțiunea încărcărilor pe treimea centrală a grinzii. Încărcarea totală a fost aplicată cu ajutorul a

*CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE
DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR*

două piese metalice cilindrice, creându-se o zonă de solicitare la încovoiere pură și două zone de solicitare la încovoiere cu forfecare. În secțiunile caracteristice din zona mediană se dezvoltă tensiuni de compresiune la partea superioară, existând premisele ca cedarea să apară din depășirea rezistenței la compresiune a betonului.

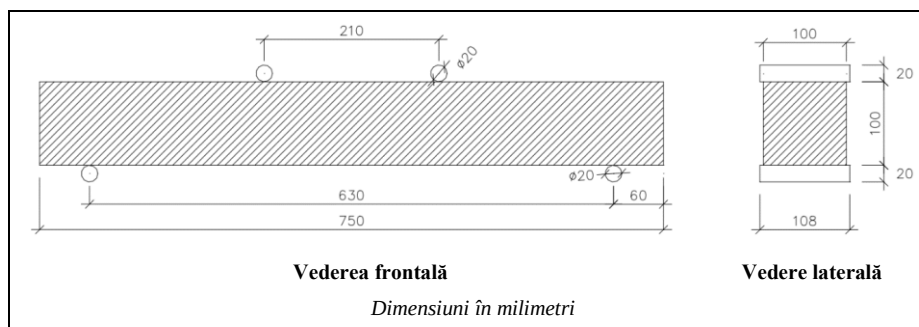


Figura 5.11. Schema experimentală pentru determinarea rezistenței la întindere prin încovoiere în 4 puncte.

5.2.2.3. Rezultate obținute

Grinzile din beton armat au fost supuse încercărilor până la cedare, sub acțiunea unor încărcări statice crescătoare. Pe parcursul experimentului, au fost monitorizate atât forța aplicată, cât și deplasarea rezultată. În tabelul 5.6. sunt prezentate rezultatele experimentale pentru toate seriile de grinzi testate.

Tabel 5.5. Rezultatele obținute în urma încercărilor realizate.

Serie	Grinzi	Cedare grindă		Mod cedare
		Forța de cedare (kN)	Deplasare (mm)	
MBA	MBA1	95,9	7,5	Ductilă
	MBA2	98,6	8,6	
	MBA3	100,5	8,7	
FSBA3	FSBA3.1	116,2	6,6	Ductilă
	FSBA3.2	111,8	6,8	
	FSBA3.3	108,1	6,7	
FSBA6	FSBA6.1	100,9	11,4	Ductilă
	FSBA6.2	99,2	10,3	
	FSBA6.3	98,9	11,3	

5.2.2.4. Concluzii parțiale

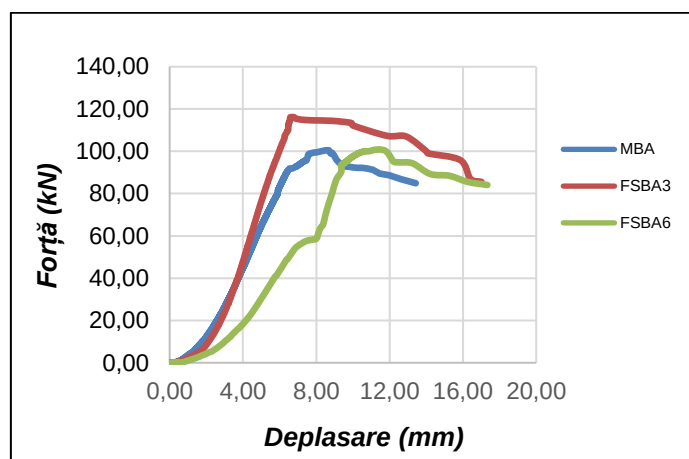


Figura 5.12. Diagrama forță – deplasare pentru toate seriile de grinzi.

Grinzile FSBA3 au prezentat o îmbunătățire semnificativă a capacității de încărcare comparativ cu grinzile martor (Figura 5.12.). Valorile maxime ale forței au variat între 108,1 kN și 116,2 kN, reprezentând o creștere de aproximativ 12% până la 16% față de grinzile MBA, iar deplasările asociate punctelor de cedare au fost ușor mai mici, indicând o rigiditate mai mare. Aceste rezultate sugerează că utilizarea betonului cu 3% fibră de sticlă vitrificată poate fi o soluție eficientă pentru îmbunătățirea capacității de încărcare și a rigidității grinzilor din beton armat.

Seria de probe FSBA6 au arătat un comportament diferit, caracterizat prin cedări la deplasări mai mari (Figura 5.44). Forțele maxime atinse au fost similare cu cele ale grinzilor martor, în jur de 100 kN, însă deplasările maxime au fost semnificativ mai mari, ajungând la aproximativ 11,4 mm.

Rezultatele obținute pot fi valorificate în diverse aplicații structurale, oferind o flexibilitate sporită în proiectarea și optimizarea unor structuri sustenabile din beton armat, având în vedere reducerea amprente de CO₂ asociată, prin reducerea cimentului utilizat în aceste compoziții.

Capitolul 6

STUDII PRIVIND MODELAREA NUMERICĂ A GRINZILOR REALIZATE DIN BETON CU ADAOS DE FIBRĂ DE STICLĂ VITRIFICATĂ EVALUATE ÎN PROGRAMUL EXPERIMENTAL

Acest capitol își propune să exploreze comportamentul structural al unui element de tip grindă din beton armat, studiate în programul experimental, prin intermediul modelării numerice cu elemente finite, utilizând aplicația software ANSYS. Scopul este de a dezvolta un model numeric care să permită analiza distribuției tensiunilor și deformațiilor în grindă sub diferite condiții de încărcare și de a investiga modul în care diverși parametri influențează comportamentul structural al acesteia. Validarea modelului realizat cu elemente finite de rezultatele obținute experimental, va conduce la construirea unui model digital al unei grinzi din beton armat, într-o alcătuire precizată.

6.1. Descrierea metodei aplicate pentru modelarea cu element finit

Evaluarea elementelor structurale de tip grindă din beton armat prin modelare numerică utilizând MEF poate fi organizată în trei etape:

- Etapa 1 – Introducerea datelor de intrare:
 - Definirea caracteristicilor materialelor;
 - Conceperea modelului geometric în format tridimensional;
 - Stabilirea încărcărilor și a condițiilor de rezemare.
- Etapa 2 – Elaborarea modelului prin metoda elementului finit;
- Etapa 3 – Rularea modelului și interpretarea rezultatelor.

În ingineria civilă, modelele matematice se bazează pe ipotezele de calcul fundamentale ale teoriei elasticității și plasticității materialelor. Aceste ipoteze implică o serie de simplificări matematice care permit determinarea tensiunilor și deformațiilor specifice, adică a stării de

solicitare care include atât starea de tensiune, cât și starea de deformare specifică, ce se manifestă în interiorul elementelor supuse încărcărilor.

6.2. Metodologia cercetării

6.2.1. Stabilirea proprietăților materialelor

În cazul de față, luând în considerare comportamentul elasto-plastic al betonului, elementele (grinzile) studiate au fost modelate cu ajutorul modelelor Drucker-Prager și Menétrey-Willam.

Proprietățile necesare ale betonului, cum ar fi modulul de elasticitate, - coeficientul lui Poisson ș.a., au fost definite conform caracteristicilor materialului obținute prin teste experimentale care au făcut obiectul cercetărilor experimentale din subcapitolul 5.2.1, prin calcule și din literatura de specialitate, pentru a reflecta cât mai fidel comportamentul betonului sub sarcină. Sistemul de axe cartezian utilizat în ANSYS a fost definit prin corespondența axelor X, Y și Z cu direcțiile longitudinale și transversale ale epruvetelor din beton, asigurând astfel o reprezentare corectă și precisă a distribuției tensiunilor și deformațiilor în cadrul simulărilor numerice.

Modulul de elasticitate al betonului a fost calculat conform standardului ACI 318-19 (ACI, 2022).

Au fost selectate grinzile cu următoarele compoziții ale betonului:

- beton normal (martor) – PMB;
- beton în care a fost înlocuit cimentul în cantitate egală de 3% cu pulbere din fibră de sticlă vitrifiată – PB3
- beton în care a fost înlocuit cimentul în cantitate egală de 6% cu pulbere din fibră de sticlă vitrifiată – PB6.

Au fost alese 2 studii de caz pentru compoziția de beton cu fibră de sticlă, pentru o verificare aprofundată a modelului numeric. În urma efectuării calculelor, au fost determinate proprietățile compozițiilor de beton (Tabelul 6.1).

Tabel 6.1. Proprietățile compozițiilor de beton analizate.

Proprietăți	Cazul 1 beton PMB	Cazul 3 beton PB3	Cazul 3 beton PB6
Modul de elasticitate E_b [MPa]	25040,61	28330,77	27173,92
Coeficientul lui Poisson ν	0,2	0,2	0,2

*CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE DIN
CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR*

Modul de elasticitate cubică K [MPa]	13911,45	15739,32	15096,62
Modul de rigiditate G [MPa]	10433,59	11804,49	11322,47
Rezistența la compresiune f_c [MPa]	28,39	36,33	33,43
Rezistența la încovoiere f_{tf} [MPa]	1,86	2,40	2,16
Rezistența la compresiune biaxială f_{cb} [MPa]	34,06	43,60	40,11

Curbele caracteristice tensiune-deformație (Figura 6.1) specifice pentru fiecare compoziție de beton au fost determinate în conformitate cu reglementările tehnice din standardul ACI 318-19.

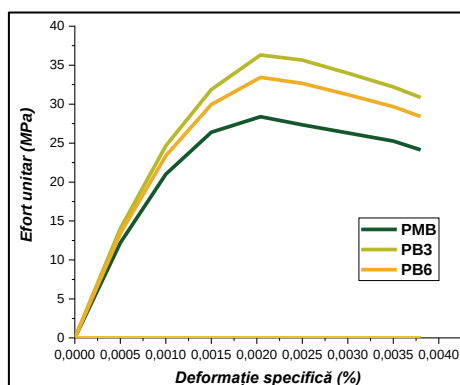


Figura 6.1. Grafic tensiune-deformație pentru toate compozițiile de beton.

Caracteristicile mecanice ale armăturii din oțel sunt detaliate în figura 6.2.

Outline of Schematic D2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data			
2	Material			
3	Armare			
4	Beton			
5	Reazem			
Properties of Outline Row 3: Armare				
	A	B	C	D
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Isotropic Elasticity			
4	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
5	Young's Modulus	2.1E+05	MPa	
6	Poisson's Ratio	0.3		
7	Bulk Modulus	1.79E+11	Pa	
8	Shear Modulus	8.0769E+10	Pa	
9	Bilinear Isotropic Hardening			
10	Active Table	Plastic		
11	Yield Strength	345	MPa	
12	Tangent Modulus	6894.8	MPa	

Figura 6. 2. Proprietățile armăturii de oțel.

6.2.2. Conceperea modelului geometric tridimensional

În acest studiu au fost analizate trei grinzi din beton armat, identice din punct de vedere geometric și al configurației armaturii, diferențele fiind date de tipul de beton utilizat, conform configurației folosită în cadrul programului experimental din cadrul subcapitolului 5.2.2.

Pentru realizarea modelului tridimensional a fost folosit programul SpaceClaim. Cu ajutorul acestui program au fost concepute modelele tridimensionale ale prisme de beton (Figura

6.3), ale armăturii (Figura 6.4) și ale impactorilor. După realizarea modelului, acesta a fost transferat în ANSYS pentru a se atribui proprietățile materialelor.

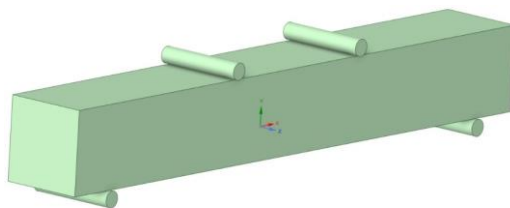


Figura 6.3. Modelul tridimensional al grinzii din beton.

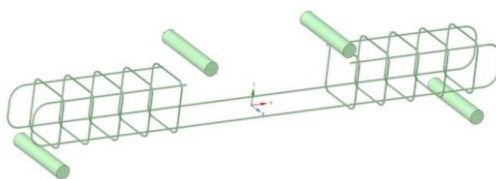


Figura 6.4. Modelul tridimensional al armăturii.

6.2.3. Stabilirea condițiilor de rezemare și încărcare

Pentru a asigura o corelare cât mai precisă între modelarea numerică și rezultatele experimentale, condițiile de rezemare și încărcare au fost configurate astfel încât să reflecte cu fidelitate scenariile experimentale descrise în subcapitolul 5.2.1.

6.2.4. Discretizarea modelului

Luând în considerare geometria regulată a modelului, discretizarea a fost realizată utilizând o rețea regulată. Modelele numerice tridimensionale finale au fost discretizate cu ajutorul elementelor finite dreptunghiulare.

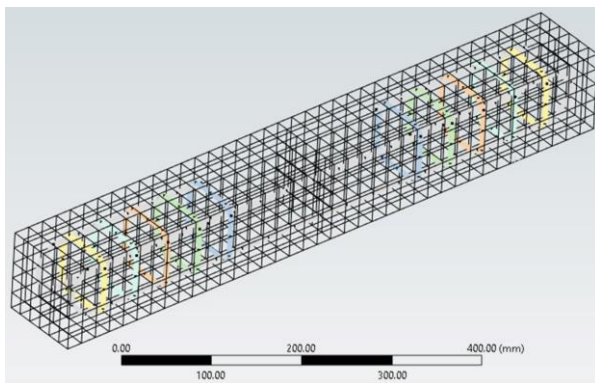


Figura 6.5. Discretizarea modelului tridimensional al grinzii.

După multiple rulări efectuate pentru a determina rețeaua optimă de discretizare, care să asigure un timp de procesare rezonabil și să respecte criteriul de convergență impus de 2%, s-a stabilit dimensiunea maximă a elementelor la 20 mm. În urma acestei configurări, a rezultat un total de 1892 de elemente, compuse din 3072 de noduri (Figura 6.5).

6.3. Rezultatele simulării numerice

Rezultatele experimentale obținute pentru seriile MBA, FSBA3 și FSBA6, prezentate în tabelul 6.2, au fost utilizate pentru validarea simulărilor numerice realizate în ANSYS pentru cazurile C1, C2 și C3.

Tabel 6.2. Rezultatele medii obținute în urma încercărilor realizate experimental.

Serie	Forța de cedare [kN]	Deplasare [mm]
MBA	98,33	8,27
FSBA3	112,03	6,70
FSBA6	99,67	11,00

6.3.1. Distribuția deformațiilor elastice normale

Rezultatele obținute pentru distribuția deformațiilor specifice pentru cele trei grinzi studiate, sunt ilustrate în figurile 6.6.-6.8.

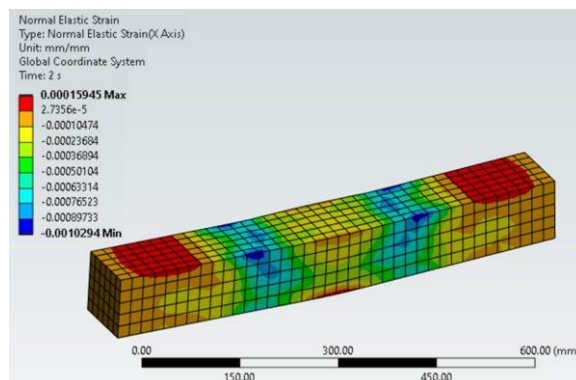


Figura 6.6. Variația deformațiilor specifice pentru cazul C1

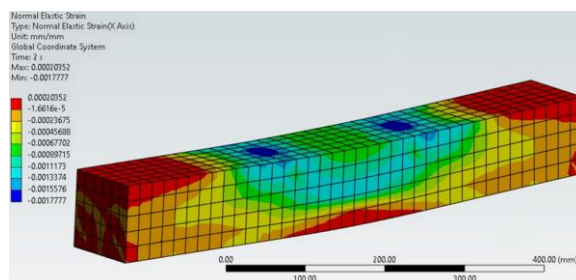


Figura 6. 7. Variația deformațiilor specifice pentru cazul C2

CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA ÎN CONSTRUCȚII A PRODUSELOR REZULTATE DIN CONVERSIA CU PLASMĂ CU HIDROGEN A DEȘEURILOR

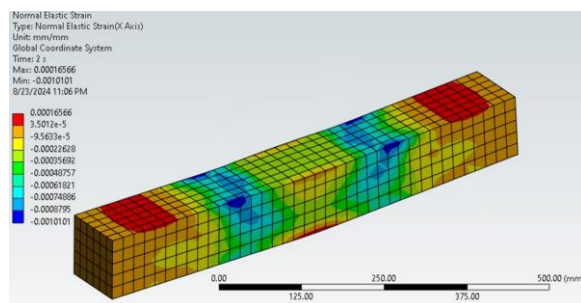


Figura 6.8. Variația deformațiilor specifice pentru cazul C3

6.3.2. Distribuția tensiunilor normale

În figurile 6.9.-6.11. sunt prezentate distribuțiile tensiunilor normale după axa X, cu evidențierea unor noduri fixate care indică punctele critice ale grinzii, acolo unde tensiunile au valori maxime sau minime, pentru toate cazurile studiate.

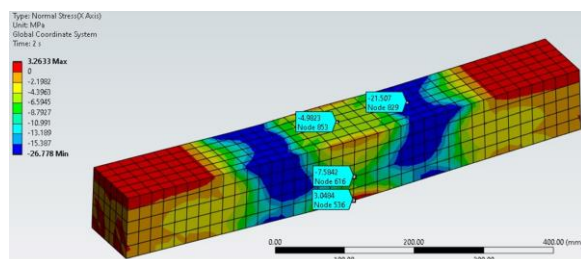


Figura 6.9. Variația tensiunilor normale pentru cazul C1.

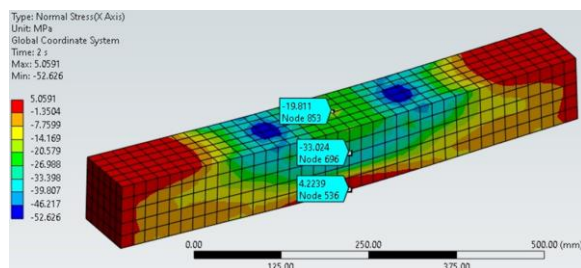


Figura 6.10. Variația tensiunilor normale pentru cazul C2.

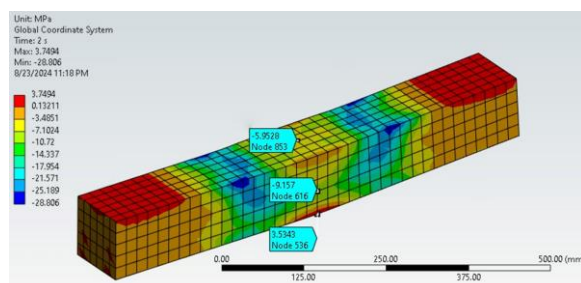


Figura 6.11. Variația tensiunilor normale pentru cazul C3.

6.3.3. Distribuția deformațiilor totale

În figurile 6.12.-6.14. sunt prezentate distribuțiile deplasărilor (deformațiilor totale) pentru cele trei cazuri analizate.

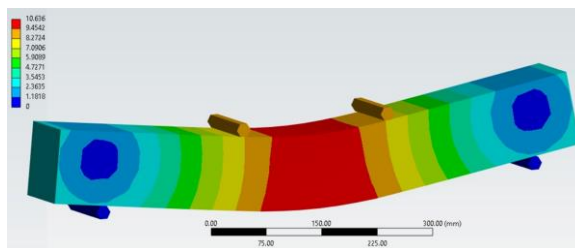


Figura 6.12. Distribuția deformațiilor totale pentru cazul C1.

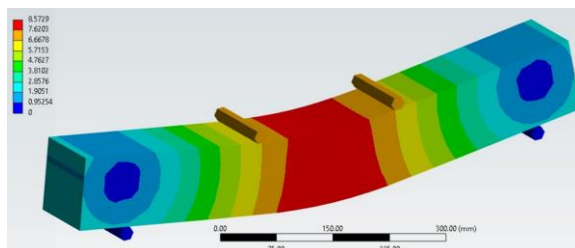


Figura 6.13. Distribuția deformațiilor totale pentru cazul C2.

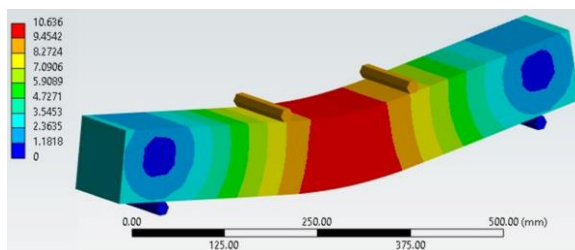


Figura 6. 14. Distribuția deformațiilor totale pentru cazul C3.

6.3.4. Diagramele Tensiune-Deformație

În figura 6.15. sunt prezentate curbele tensiune-deformație specifică obținute cu ajutorul datelor din experiment pentru probele martor și simulările numerice utilizând modelele Drucker-Prager și Menétrey-Willam.

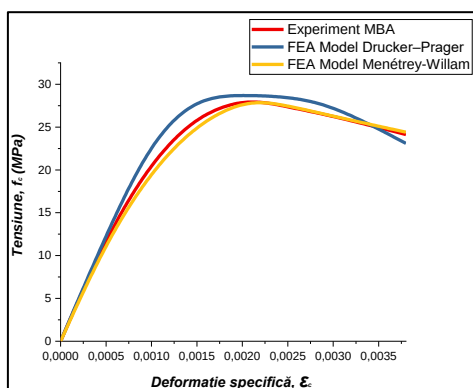


Figura 6.15. Diagrama tensiune-deformație a betonului pentru cazul C1 (beton clasic).

În figura 6.16. curbele tensiune-deformație specifică rezultate din datele calculele experimentale pentru probele cu 3% fibră de sticlă vitrificată și modelele numerice prezintă o bună corelare.

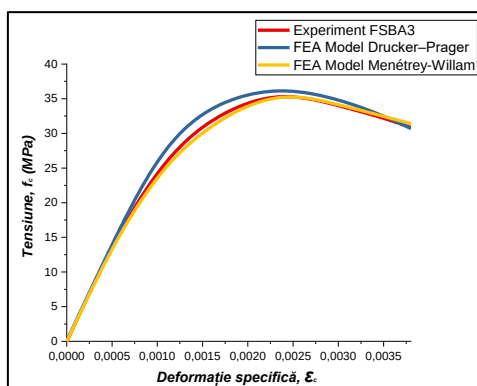


Figura 6.16. Diagrama tensiune-deformație a betonului pentru cazul C2 (beton cu 3% fibră de sticlă vitrificată)

În Figura 6.17. curba rezultată din calculele experimentale pentru probele cu 6 % fibră de sticlă vitrificată (linia roșie) și simulările numerice arată o ușoară divergență în faza post cedare.

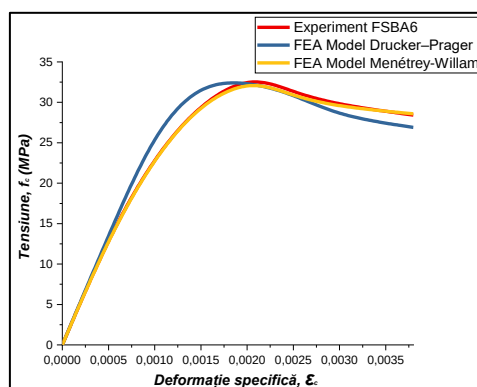


Figura 6.17. Diagrama tensiune-deformație a betonului pentru cazul C3 (beton cu 6% fibră de sticlă vitrificată)

6.4. Concluzii parțiale

Analiza deformațiilor specifice evidențiază faptul că în cazul betonului cu 3% fibră de sticlă vitrificată, deformațiile sunt distribuite mai uniform în zona centrală a grinzii, dar cu valori maxime concentrate sub și în apropierea punctelor de aplicare a încărcării. Această observație corespunde în mod direct cu rezultatele experimentale, confirmând că tensiunile au valori mari. În comparație, grinzile din beton clasic și beton cu 6% fibră de sticlă vitrificată prezintă deformații similare.

Distribuția tensiunilor normale arată o consistență în toate cazurile, cu tensiuni de compresiune în zona superioară și tensiuni de tracțiune în zona inferioară a grinzii. Totuși, în cazul betonului cu 3% fibră de sticlă vitrificată, tensiunile sunt mai pronunțate sub punctele de aplicare a încărcării, validând astfel observațiile experimentale. Această concentrare a tensiunilor poate reprezenta un factor important în proiectare și necesită o evaluare atentă pentru a preveni posibilele cedări structurale. În continuare, analiza deformațiilor totale arată că grinda cu 3% fibră de sticlă vitrificată manifestă o concentrare a deformațiilor totale sub punctele de aplicare a încărcării, ceea ce poate indica o sensibilitate mai mare a acestui material la solicitări locale. Pe de altă parte, grinzile cu 6% fibră de sticlă vitrificată și cele din beton clasic prezintă deformații în același tipar. Diagramele tensiune-deformație arată că modelul Menétrey-Willam oferă predicții mai precise pentru toate tipurile de beton, mai ales în faza post cedare (zona plastică), în timp ce modelul Drucker-Prager tinde să supraestimeze capacitatea materialului după atingerea tensiunii maxime. În cazul betonului cu 3% fibră de sticlă vitrificată, modelul Menétrey-Willam reflectă cel mai bine comportamentul materialului, în special în condițiile de încărcare continuă după cedare.

Capitolul 7

STUDIU PRIVIND EVALUAREA CICLULUI DE VIAȚĂ (LCA - LIFE CYCLE ASSESSMENT) A BETONULUI CU DEȘEURI DE FIBRĂ DE STICLĂ TRATATĂ CU PLASMĂ CU HIDROGEN

Acest studiu explorează utilizarea fibrei de sticlă vitrificată cu plasmă în diverse procente ca substitut parțial pentru ciment în producția de beton și evaluează impactul acestora asupra mediului printr-o analiză a ciclului de viață (LCA). Patru compoziții de beton au fost analizate, incluzând o compoziția martor (PMB) și trei compoziții cu adaosuri de 3%, 6% și 10% fibră de sticlă vitrificată cu plasmă (PB3, PB6, PB10). Compozițiile selectate sunt acelea care au făcut obiectul cercetărilor experimentale din capitolul 5. Evaluarea a inclus impactul asupra încălzirii globale, toxicitatea potențială asupra oamenilor și degradarea stratului de ozon.

7.1. Introducere

LCA este o analiză relevantă în contextul materialelor de construcții, având în vedere că producția acestora, cum ar fi betonul, are un impact semnificativ asupra mediului. Procesele de fabricație implică extracția, procesarea și transportul unor volume mari de materii prime, precum agregate, ciment și apă, ceea ce necesită consumuri ridicate de energie. Aceste activități conduc la efecte negative majore, inclusiv emisii de gaze cu efect de seră, epuizarea resurselor naturale și deteriorarea ecosistemelor. Având în vedere faptul că sectorul construcțiilor este un contribuitor major la aceste probleme este necesară evaluarea LCA pentru a cuantifica, înțelege și reduce amprenta ecologică asociată materialelor de construcție. Analiza ciclului de viață permite factorilor de decizie să adopte măsuri informate, să implementeze strategii eficiente și să dezvolte alternative mai sustenabile pentru a minimiza impactul asupra mediului (Hájek et al., 2011; Horáková et al., 2019).

7.2. Metodologia LCA

Metodologia evaluării ciclului de viață (LCA) aplicată în prezentul studiu urmărește îndeaproape standardele internaționale ISO 14040 și ISO 14044, care oferă un cadru sistematic pentru realizarea unei evaluări riguroase a impactului asupra mediului pe parcursul întregului ciclu de viață al unui produs, serviciu sau proces. Aceste standarde asigură o abordare consecventă, de la extracția materiilor prime până la eliminarea sau reciclarea produsului.

Analizele LCA efectuate în prezentul capitol, pentru a modela procesele de producție ale betonului cu adaos de fibră de sticlă tratată cu plasmă și pentru a calcula categoriile de impact asupra mediului rezultate, au fost realizate cu Sphera/GaBi.

7.3. Inventarul Ciclului de Viață (LCI)

Procesul de inventar al ciclului de viață (LCI - Life Cycle Inventory) a implicat colectarea și compilarea cuprinzătoare a datelor privind toate fluxurile de intrare și ieșire pentru diversele procese implicate în producția de beton, inclusiv aprovizionarea, procesarea și tratarea materialului deșeu de fibră de sticlă.

7.4. Evaluarea Impactului Ciclului de Viață

Evaluarea impactului ciclului de viață a examinat următoarele categorii cheie de impact asupra mediului:

- încălzirea globală;
- impactul toxic asupra oamenilor;
- degradarea stratului de ozon.

7.5. Scenarii de evaluare a impactului ecologic al betonului cu fibră de sticlă tratată cu plasmă cu hidrogen

Analiza a inclus următoarele etape ale ciclului de viață al materialelor utilizate în cele șapte scenarii propuse:

- extracția și pre-procesarea materiilor prime;
- fabricarea produselor din materialele analizate;
- transportul produselor de la punctul de fabricare până la punerea în operă pe șantier;
- evaluarea impactului asupra mediului al produselor realizate.

În tabelul 7.1 sunt prezentate categoriile de impact utilizate pentru evaluarea efectelor asupra mediului înconjurător în cadrul acestui studiu. Categoriile de impact considerate sunt: încălzirea globală, impactul toxic asupra oamenilor și degradarea stratului de ozon. Fiecare categorie este asociată cu un parametru de caracterizare specific, cum ar fi potențialul de

încălzire globală (GWP), exprimat în echivalenți de CO₂, potențialul toxic asupra oamenilor (HTPc), măsurat în CTUh (cancer toxic units), și potențialul de degradare a stratului de ozon (ODP), exprimat în echivalenți de CFC-11.

Tabel 7.1. Categoriile de impact considerate (Maxineasa, 2015).

Categorie de impact	Parametru de caracterizare	Unitate de măsură
Încălzire globală (Global Warming)	Potențialul de încălzire globală – incluzând carbonul biogenic (Global Warming Potential – GWP)	kg. CO ₂ - Echiv.
Impact toxic asupra oamenilor (Human Toxicity)	Impact toxic potențial asupra oamenilor, efecte cancerigene (Human toxicity potential, cancer effects – HTPc)	CTUh
Degradarea stratului de ozon (Ozone Depletion)	Potențialul de degradare a stratului de ozon (Ozone Depletion Potential – ODP)	kg. CFC-11 Echiv.

7.6. Evaluare a impactului ecologic al betonului. Studii de caz

7.6.1. Studiul de caz 1 - rețeta martor – PMB

În tabelul 7.2. sunt prezentate datele de intrare pentru rețeta martor (PMB). Componentele principale includ ciment, apă, nisip și pietriș, precum și energia necesară pentru malaxare.

Tabel 7.2. Date de intrare.

Ciment [kg]	Apă [kg]	Nisip [kg]	Pietriș [kg]	Malaxare [MJ]
390	156	662	1127	39,672

7.6.2. Studiul de caz 2 – beton cu 3% fibră de sticlă vitrificată cu plasmă – PB3

În tabelul 7.3. sunt detaliate datele de intrare pentru betonul cu 3 % din ciment este înlocuit cu fibră de sticlă vitrificată. În cazul acesta a fost introdus, adițional, și consumul de energie și apă aferent procesului de conversie cu plasmă cu hidrogen.

Tabel 7.3. Date de intrare.

Ciment [kg]	Apă [kg]	Nisip [kg]	Pietriș [kg]	Malaxare [MJ]	Electricitate – vitrificare [MJ]	Apă – vitrificare [l]
378,30	151,30	662	1127	39,672	8,33	0,19

7.6.3. Studiul de caz 3 – beton cu 6% fibră de sticlă vitrificată cu plasmă – PB6

În tabelul 7.4. prezintate datele de intrare pentru rețeta PB6, în acest caz a fost introdus, suplimentar, consumul de energie electrică necesar procesului de vitrificare cu plasmă cu hidrogen (16,661 MJ), iar cimentul este redus la 366,60 kg.

Tabel 7.4. Date de intrare.

Ciment [kg]	Apă [kg]	Nisip [kg]	Pietriș [kg]	Malaxare [MJ]	Electricitate – vitrificare [MJ]	Apă - vitrificare [l]
366,60	146,60	662	1127	39,672	16,661	0,39

7.6.4. Studiul de caz 4 – beton cu 10% fibră de sticlă vitrificată cu plasmă – PB10

Pentru ultima rețetă analizată, PB10, cantitatea de ciment a fost redusă la 351 kg, în timp ce consumul de energie pentru vitrificare a crescut la 27,768 MJ (Tabelul 7.5).

Tabel 7.5. Date de intrare.

Ciment [kg]	Apă [kg]	Nisip [kg]	Pietriș [kg]	Malaxare [MJ]	Electricitate – vitrificare [MJ]	Apă - vitrificare [l]
351	140,40	662	1127	39,672	27,768	0,66

7.7. Interpretarea rezultatelor obținute în studiile de caz efectuate

Conform datelor prezentate în figura 7.1, rețeta martor (PMB) prezintă cel mai mare potențial de încălzire globală, cu un total de 298,18 kg CO₂-echivalent. Valoarea obținută este influențată semnificativ de utilizarea cimentului, care contribuie cu 265,46 kg CO₂-echivalent, reprezentând aproximativ 89,03%, deci cea mai mare parte a emisiilor totale de gaze cu efect de seră.

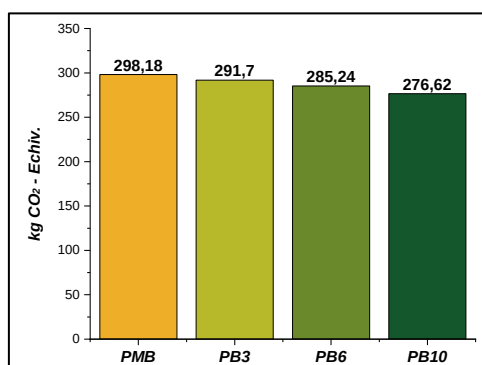


Figura 7.1. Rezultatele obținute pentru categoria de impact potențialul de încălzire globală.

Impactul toxic potențial asupra oamenilor, exprimat în unități CTUh (Comparative Toxic Unit for humans), a fost analizat pentru fiecare dintre compoziție studiată, iar rezultatele sunt prezentate în figura 7.2.

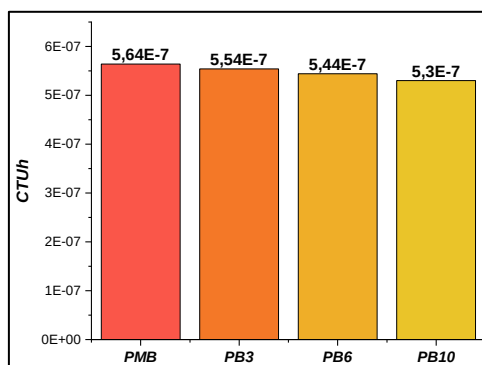


Figura 7.2. Rezultatele obținute pentru categoria de impact: impactul toxic potențial asupra oamenilor, efecte cancerigene.

În figura 7.3, sunt prezentate valorile potențialului de degradare a stratului de ozon pentru fiecare compoziție analizată. Compoziția martor (PMB) înregistrează un total de 1,94E-08 kg CFC-11 echivalent, în timp ce rețetele PB3, PB6 și PB10 prezintă valori de 1,93E-08 kg CFC-11 echivalent, 1,92E-08 kg CFC-11 echivalent și, respectiv, 1,89E-08 kg CFC-11 echivalent.

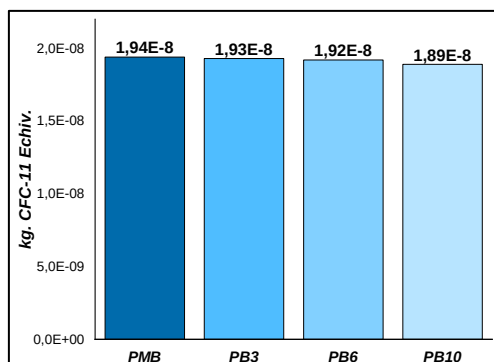


Figura 7.3. Rezultatele obținute pentru categoria de impact: potențialul de degradare a stratului de ozon.

7.8. Concluzii parțiale

Pe baza acestor rezultate, se poate concluziona că utilizarea fibrei de sticlă vitrificată este o strategie eficientă pentru reducerea amprente de carbon a betonului, contribuind la crearea unor materiale de construcții sustenabile. Deși există un consum energetic suplimentar asociat procesului de vitrificare, acesta poate fi acoperit din surse neconvenționale (energie solară, eoliană, geotermală etc.), aflate în amplasamentul de colectare a deșeurilor din fibră de sticlă. Totodată trebuie menționat și efectul pozitiv asupra mediului prin eliminarea unui deșeu cu perioadă extrem de lungă de timp pentru o degradare în depozit amenajat (groapă de gunoi), precum și reducerea cantităților de materii prime (calcar) extrase din cariere pentru producerea cimentului. Studiul LCA subliniază complexitatea impactului betonului asupra mediului și necesitatea unei abordări integrate pentru a reduce acest impact negativ. Producția de ciment, procesul de vitrificare a fibrei de sticlă și transportul materialelor sunt factori importanți care necesită optimizare. Investițiile în tehnologii de producție mai eficiente, adoptarea materialelor reciclate și alternative, precum și implementarea principiilor economiei circulare sunt pași esențiali pentru a îmbunătăți sustenabilitatea sectorului construcțiilor. Prin abordarea acestor aspecte, se poate contribui la dezvoltarea unui mediu construit mai durabil și la reducerea amprente ecologice globale.

Capitolul 8

CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. VALORIFICAREA REZULTATELOR OBȚINUTE ÎN CADRUL PROGRAMULUI. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

8.1. Concluzii generale

Programul de cercetare dezvoltat în teză aduce o contribuție semnificativă în domeniul reciclării deșeurilor de fibră de sticlă, explorând metode inovatoare de valorificare a acestora prin intermediul tehnologiei de conversie cu plasmă cu hidrogen. Soluțiile inovatoare studiate sunt o necesitate a perioadei, oferind argumente fundamentate pe rezultate, care pot contribui la reducerea impactului asupra mediului a infrastructurii construite.

Capitolul 2 evidențiază, în baza datelor statistice identificate la nivel global, necesitatea de a dezvolta metode eficiente și ecologice pentru gestionarea deșeurilor de fibră de sticlă, care reprezintă o provocare atât pentru mediul înconjurător, cât și pentru industria de reciclare în domeniul construcțiilor.

Capitolul 3 prezintă tehnologia de reciclarea deșeurilor de fibră de sticlă prin conversia cu plasmă cu hidrogen. Această tehnologie reprezintă o inovație în domeniul reciclării, având potențialul de a transforma modul de gestionare a deșeurilor generate de sectorul construcțiilor. Studiile experimentale prezentate în acest capitol au demonstrat că această tehnologie poate reduce considerabil volumul deșeurilor, transformându-le în produse secundare pentru reutilizare, cum ar fi materialele vitrificate, care sunt caracterizate printr-o rezistență mecanică și stabilitate chimică superioare, fiind ideale pentru utilizarea în industria construcțiilor.

Capitolul 4 conține o analiză detaliată a compoziției chimice și structurale a deșeurilor de fibră de sticlă și a materialelor vitrificate obținute prin conversie cu plasmă. Prin utilizarea tehnicilor avansate de microscopie electronică de suprafață și analiză elementală, s-au identificat proprietățile critice ale acestor materiale, cum ar fi stabilitatea chimică și integritatea structurală, care le fac potrivite pentru utilizarea în aplicații industriale.

În **Capitolul 5** studiile efectuate au evidențiat impactul înlocuirii cimentului, în procente de până la 10%, cu fibră de sticlă vitrificată, în compozițiile de mortare și betoane, punând accent pe analiza caracteristicilor mecanice acestora. Cercetările experimentale au demonstrat că utilizarea fibrei de sticlă vitrificată în aceste compoziții contribuie la îmbunătățirea performanțelor mecanice, crescând astfel rezistența de ansamblu a elementelor și structurilor realizate.

Modelarea numerică realizată în **Capitolul 6** a fost dezvoltată pentru a identifica un model virtual al grinzilor de beton, într-o configurație predefinită, realizat prin utilizarea elementelor finite, care, după validarea cu rezultatele obținute experimental, să permită efectuarea de cercetări multiple pentru utilizarea soluțiilor inovative studiate în programul de cercetare în vederea optimizării acestora.

Evaluarea ciclului de viață (LCA) realizată în **Capitolul 7** a demonstrat beneficiile ecologice ale utilizării fibrei de sticlă vitrificate în construcții. Studiul a arătat că aceste materiale contribuie la economisirea resurselor naturale și la scăderea emisiilor de gaze cu efect de seră. Studiile LCA au evidențiat că utilizarea fibrei de sticlă vitrificate în betoane și mortare reduce amprenta ecologică a clădirilor și infrastructurii construite, sprijinind astfel obiectivele globale de sustenabilitate.

8.2. Contribuții personale

Contribuțiile personale importante obținute din programele de cercetare desfășurate, care au o valoare științifică specifică unei teze de doctorat:

- **Elaborarea unui studiu de sinteză care prezintă aspecte cu privire la reciclarea și introducerea în circuitul economic a deșeurilor, în context național și european;**
- **Identificarea și analiza critică a politicilor naționale și europene care vizează promovarea produselor pentru construcții realizate din deșeuri reciclate;**
- **Definirea și explicarea noțiunilor de sustenabilitate și economie circulară;**
- **Conceperea și elaborarea unui program experimental complex care a avut, în principal, două obiective;**
- **Implementarea tehnologiei de conversie cu plasmă cu hidrogen pentru reciclarea deșeurilor de fibră de sticlă;**
- **Producerea și caracterizarea materialelor vitrificate;**
- **Efectuarea microscopiei electronice de suprafață (SEM) pentru identificarea structurii interne a fibrei de sticlă înainte și după aplicarea tratamentului cu plasmă cu hidrogen;**

- Efectuarea de analize detaliate pentru a stabili compoziția chimică a fibrelor de sticlă vitrificate prin spectroscopie de raze X cu dispersie de energie (EDX), prin difracție de raze X (XRD) și prin spectroscopie de fluorescență cu raze X (XRF);
- Efectuarea de studii și cercetări experimentale pentru utilizarea materialelor vitrificate în compoziții de mortare;
- Efectuarea de studii și cercetări experimentale pentru utilizarea materialelor vitrificate în compoziții de betoane;
- Efectuarea de studii și cercetări experimentale privind modul de comportare până la cedare, a unor elemente de tip grindă realizate la scară redusă (de laborator);
- Dezvoltarea și validarea prin comparare cu rezultatele obținute experimental, a unor modele numerice cu element finit pentru simularea virtuală a modului de comportare a grinzilor din beton armat în care au fost utilizate compoziții de beton cu fibră de sticlă vitrificată;
- Evaluarea impactului asupra mediului înconjurător prin analize detaliate a ciclului de viață (LCA) pentru toate compozițiile de beton studiate, privind următoarele categorii de impact: încălzirea globală, impactul toxic asupra oamenilor și degradarea stratului de ozon;
- Studiul comparativ privind impactul asupra mediului a compozițiilor de beton cu fibră de sticlă vitrificată cu cel al materialelor tradiționale, evidențiind avantajele ecologice ale utilizării acestora în construcții;
- Realizarea listei bibliografice și identificarea celor mai reprezentative lucrări de specialitate, din domeniul reciclării și valorificării deșeurilor ca tratamente sau produse noi pentru piața construcțiilor.

8.3. Valorificarea rezultatelor obținute în cadrul programului

Rezultatele obținute în cadrul programului de cercetare doctorală desfășurat au fost valorificate prin:

➤ **Publicarea în calitate de autor și coautor a unui număr de 14 lucrări științifice, după cum urmează:**

- Lucrări publicate în reviste cotate ISI, cu factor de impact:

[1] **Lupu, M. L.**, Isopescu, D. N., Tuns, I., Baci, I.-R., Maxineasa, S. G. (2021). *Determination of Physicomechanical Characteristics of the Cement Mortar with Added Fiberglass Waste Treated with Hydrogen Plasma*. Materials, 14(7), 1718. <https://doi.org/10.3390/ma14071718>.

[2] Maxineasa, S. G., Isopescu, D. N., Baci, I.-R., **Lupu, M. L.** (2021). *Environmental Performances of a Cubic Modular Steel Structure: A Solution for a Sustainable Development in the Construction Sector*. Sustainability, 13(21), 12062. <https://doi.org/10.3390/su132112062>

• Lucrări publicate în reviste indexate BDI:

[3] **Lupu, M. L.**, Baci, I.-R., Maxineasa, S. G. (2019). *Differences between a passive house and a nearly zero energy building*. Buletinul Institutului Politehnic din Iași, 65 (69)(3).

[4] Baci, I.-R., **Lupu, M. L.**, Maxineasa, S. G. (2019). *Principles of green roofs design*. Buletinul Institutului Politehnic din Iași, 65 (69)(3).

• Lucrări publicate în volumele unor manifestații științifice indexate ISI:

[5] Baci, I.-R., Isopescu, D. N., Taranu, N., **Lupu, M. L.**, Maxineasa, S. G. (2020). *Comparative Analysis of the Effect of Different Types of Green Roofs over the Linear Thermal Bridges*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 916(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/916/1/012004>.

• Lucrări publicate în volumele unor manifestații științifice indexate BDI:

[6] **Lupu, M. L.**, Isopescu, D. N., Baci, I.-R., Maxineasa, S. G., Pruna, L., Gheorghiu, R. (2022). *Hempcrete—Modern solutions for green buildings*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1242(1), 012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1242/1/012021>

[7] Baci, I.-R., Isopescu, D. N., **Lupu, M. L.**, Maxineasa, S. G., Pruna, L., Dan, S. (2022). *Ventilated façade solutions*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1242(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1242/1/012002>

[8] Maxineasa, S. G., Isopescu, D. N., **Lupu, M. L.**, Baci, I.-R., Pruna, L., Somacescu, C. (2022). *The use of perlite in civil engineering applications*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1242(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1242/1/012022>

[9] **Lupu, M. L.**, Isopescu, D. N., Maxineasa, S. G., Baci, I.-R., Antonescu, I., Cucos, I. (2021). *Advanced technology of municipal solid waste conversion for a circular economy*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1138(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1138/1/012028>.

[10] Antonescu, I., Isopescu, D. N., Cucos, I., Caunii, V., Alecu, I. C., **Lupu, M. L.** (2021). *Researches on energy-efficient plasma conversion of fibreglass waste into new ecological materials for building industry*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1138(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1138/1/012001>.

[11] **Lupu, M. L.**, Isopescu, D. N., Cucos, I., Antonescu, I., Maxineasa, S. G., Baci, I.-R. (2020). *Researches on energy conversion of municipal waste by plasma decomposition for*

energy-efficiency in civil engineering. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 789(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/789/1/012035>.

[12] Baci, I. R., Taranu, N., Isopescu, D. N., **Lupu, M. L.**, Dragan, T. C., Maxineasa, S. G. (2020). *Green roofs – modern solutions for greening buildings*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 789(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/789/1/012001>.

[13] Maxineasa, S. G., Isopescu, D. N., Baci, I. R., **Lupu, M. L.**, Dragan, T. C. (2020). *Thermal analysis of a structure made by using cold formed steel sections*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 789(1), 012039. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/789/1/012039>.

• Lucrări publicate în volumele unor manifestații științifice naționale:

[14] **Lupu, M. L.**, (2019), *Deșeurile municipale, sursă de energie neconvențională pentru clădiri*, Al XII-lea Simpozion Național Creații universitare, 2019, Iași.

➤ **Cereri de brevet:**

○ Maxineasa, S. G., Isopescu, D. N., Baci, I.-R., **Lupu, M. L.**, Drăgan, T. C. (2022). *Sistem de izolare termică a plăcilor pe sol din beton armat* (OSIM nr. 00033).

➤ **Premii:**

○ Premiul rezultatelor cercetării de către UEFISCDI, competiția 2021, pentru articolului: **Lupu, M. L.**, Isopescu, D. N., Tuns, I., Baci, I.-R., Maxineasa, S. G. (2021). *Determination of Physicomechanical Characteristics of the Cement Mortar with Added Fiberglass Waste Treated with Hydrogen Plasma*. Materials, 14(7), 1718. <https://doi.org/10.3390/ma14071718>, cod premiere: PN-III-P1-1.1-PRECISI2021-62004.

○ Premiul rezultatelor cercetării de către UEFISCDI, competiția 2023, pentru articolului: Maxineasa, S. G., Isopescu, D. N., Baci, I.-R., **Lupu, M. L.** (2021). *Environmental Performances of a Cubic Modular Steel Structure: A Solution for a Sustainable Development in the Construction Sector*. Sustainability, 13(21), 12062. <https://doi.org/10.3390/su132112062>, cod premiere: PN-IV-P2-2.3-PRECISI2023-82578.

➤ **Participarea, în calitate de membru al echipe de cercetare, la implementarea unui proiect de cercetare-dezvoltare națională**

Proiect POC 2014-2020, Axa prioritară 1, Acțiunea 1.2.3, „Produse și tehnologii ecoinovatoare pentru eficiență energetică în construcții - EFECON”, ID P_40_295/MySMIS 105524, contractele 19226/14.01.2020 și 19404/05.03.2020.

8.4. Direcții viitoare de cercetare

Pe baza rezultatelor obținute în cadrul acestei cercetări, s-au identificat mai multe direcții viitoare de cercetare care ar putea extinde și aprofunda cunoștințele despre utilizarea tehnologiei de conversie cu plasmă cu hidrogen și utilizarea deșeurilor în construcții:

- **Optimizarea parametrilor de proces ai conversia cu plasmă cu hidrogen.**
- **Studiul interacțiunii fibrei de sticlă vitrificată cu alte materiale de construcții.**
- **Evaluarea pe termen lung a durabilității materialelor vitrificate.**
- **Continuarea cercetărilor cu ajutorul modelării cu element finit.**

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- ACI. (2022). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) [and] Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-19)*.
https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/318-19_preview.pdf
- Alfagroup. (2023). *Green energy solution*. <https://www.alfaenergysolutions.com/home/energy-management/>
- Antonescu, I., Isopescu, D. N., Cucos, I., Caunii, V., Alecu, I. C., & Lupu, M. L. (2021). *Researches on energy-efficient plasma conversion of fibreglass waste into new ecological materials for building industry*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1138(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1138/1/012001>
- ASRO. (2004). *SR EN 1992-1-1:2004 Eurocod 2: Proiectarea structurilor de beton. Partea 1-1: Reguli generale și reguli pentru clădiri*. ASRO.
- ASRO. (2019a). *SR EN 12390-3:2019 Încercare pe beton întărit. Partea 3: Rezistența la compresiune a epruvetelor*.
- ASRO. (2019b). *SR EN 12390-5:2019 Încercare pe beton întărit. Partea 5: Rezistența la încovoiere a epruvetelor*.
- ASTM Standard C469/C469M-14. (2014). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*.
- Bertino, G., Kisser, J., Zeilinger, J., Langergraber, G., Fischer, T., & Österreichischer, D. (2021). *Fundamentals of Building Deconstruction as a Circular Economy Strategy for the Reuse of Construction Materials*. Applied Sciences, 11(3), 939. <https://doi.org/10.3390/app11030939>
- Bhatt, K. P., Patel, S., Upadhyay, D. S., & Patel, R. N. (2022). *A critical review on solid waste treatment using plasma pyrolysis technology*. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 177, 108989. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108989>
- Bonczidai, R.-D., Chicinaș, R. C., & Nemeș, O. (2011). *Piroliza deșeurilor solide prin procedeul „purox”*. A XI-a Conferință Națională multidisciplinară - cu participare internațională, „Profesorul Dorin PAVEL - fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș. <https://stiintasiinginerie.ro/wp-content/uploads/2014/01/76-PIROLIZA-DE%C5%9EEURILOR-SOLIDE-PRIN.pdf>

- C09 Committee. (2019). *Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0215-19>
- Cudjoe, D., & Wang, H. (2022). *Plasma gasification versus incineration of plastic waste: Energy, economic and environmental analysis*. *Fuel Processing Technology*, 237, 107470. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107470>
- Diaconescu, I., Grigorescu, L., Patrascu, R., & Minciuc, E. (2016). *Energy efficiency aspects of urban waste recovery*. 2016 8th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 1–6. <https://doi.org/10.1109/ECAI.2016.7861169>
- Dobslaw, C., & Glocker, B. (2020). *Plasma Technology and Its Relevance in Waste Air and Waste Gas Treatment*. *Sustainability*, 12(21). <https://doi.org/10.3390/su12218981>
- Eurostat. (2024, februarie 8). *Municipal waste statistics*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics
- FEI Company. (2023). *The Quanta 200 3D Simplified Operation Manual*. <https://cfamm.ucr.edu/sites/default/files/2019-09/Q3D-SEM-short.pdf>
- Fitzer, E., Kleinholz, R., Tiesler, H., Stacey, M. H., De Bruyne, R., Lefever, I., Foley, A., Frohs, W., Hauke, T., Heine, M., Jäger, H., & Sitter, S. (2008). *Fibers*, 5. Synthetic Inorganic. În Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA (Ed.), *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (p. a11_001.pub2). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/14356007.a11_001.pub2
- Fuentes Molina, N., Fragozo Brito, Y., & Polo Benavides, J. M. (2021). *Recycling of Residual Polymers Reinforced with Natural Fibers as a Sustainable Alternative: A Review*. *Polymers*, 13(21), 3612. <https://doi.org/10.3390/polym13213612>
- Gibbon, P. (2016). *Introduction to Plasma Physics*. CERN Yellow Reports, 51 Pages. <https://doi.org/10.5170/CERN-2016-001.51>
- Goldston, R. J. (2020). *Introduction to Plasma Physics*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780367806958>
- Gomez, E., Rani, D. A., Cheeseman, C. R., Deegan, D., Wise, M., & Boccaccini, A. R. (2009). *Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review*. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2–3), 614–626. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.017>
- Grădinaru, C. M., Muntean, R., Șerbănoiu, A. A., Ciocan, V., & Burlacu, A. (2020). *Sustainable Development of Human Society in Terms of Natural Depleting Resources Preservation*

- Using Natural Renewable Raw Materials in a Novel Ecological Material Production.* Sustainability, 12(7), 2651. <https://doi.org/10.3390/su12072651>
- Gupta, N., Siddique, R., & Belarbi, R. (2021). *Sustainable and Greener Self-Compacting Concrete incorporating Industrial By-Products: A Review.* Journal of Cleaner Production, 284, 124803. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124803>
- Hájek, P., Fiala, C., & Kynčlová, M. (2011). *Life cycle assessments of concrete structures – a step towards environmental savings.* Structural Concrete, 12(1), 13–22. <https://doi.org/10.1002/suco.201000026>
- Hoornweg, D., & Bhada-Tata, P. (2012). *What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management.* Washington, DC: World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/1a464650-9d7a-58bb-b0ea-33ac4cd1f73c>
- Horáková, A., Broukalová, I., & Kohoutková, A. (2019). *Choice of Sustainable and Durable Concrete Structure Using LCA.* IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 290(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/290/1/012016>
- Huang, H., & Tang, L. (2007). *Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology.* Energy Conversion and Management, 48(4), 1331–1337. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.08.013>
- Innocent, N., Dorcas, O., Duncan, O., Emma, O., Lamech, O., Salome, G., & Edwin, O. (2022). *Defining green economy aspects for eco-friendly industrial approaches; their linkages across the sustainable innovation paradigm.* Scientific Research and Essays, 17(2), 17–23. <https://doi.org/10.5897/SRE2022.6745>
- Karuppannan Gopalraj, S., & Kärki, T. (2020). *A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: Fibre recovery, properties and life-cycle analysis.* SN Applied Sciences, 2(3), 433. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2195-4>
- Kusano, R., & Kusano, Y. (2024). *Applications of Plasma Technologies in Recycling Processes.* Materials, 17(7). <https://doi.org/10.3390/ma17071687>
- Lupu, M. L. (2019). *Deșeurile municipale, sursă de energie neconvențională pentru clădiri.* Al XII-lea Simpozion Național “Creații universitare 2019”, Iași.
- Lupu, M. L., Baci, I.-R., & Maxineasa, S. G. (2019). *Differences between a passive house and a nearly zero energy building.* Buletinul Institutului Politehnic din Iași, 65 (69)(3).
- Lupu, M. L., Isopescu, D. N., Cucoș, I., Antonescu, I., Maxineasa, S. G., & Baci, I.-R. (2020). *Researches on energy conversion of municipal waste by plasma decomposition for*

- energy-efficiency in civil engineering*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 789(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/789/1/012035>
- Lupu, M. L., Isopescu, D. N., Tuns, I., Baci, I.-R., & Maxineasa, S. G. (2021). *Determination of Physicomechanical Characteristics of the Cement Mortar with Added Fiberglass Waste Treated with Hydrogen Plasma*. Materials, 14(7), 1718. <https://doi.org/10.3390/ma14071718>
- Maxineasa, S. G. (2015). *Solutii compozite și hibride pentru dezvoltarea sustenabilă în construcții*. Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași.
- Maxineasa, S. G., Isopescu, D. N., Baci, I. R., Lupu, M. L., & Dragan, T. C. (2020). *Thermal analysis of a structure made by using cold formed steel sections*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 789(1), 012039. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/789/1/012039>
- Maxineasa, S. G., Isopescu, D. N., Baci, I.-R., & Lupu, M. L. (2021). *Environmental Performances of a Cubic Modular Steel Structure: A Solution for a Sustainable Development in the Construction Sector*. Sustainability, 13(21), 12062. <https://doi.org/10.3390/su132112062>
- Mazur, Ł. (2021). *Circular economy in housing architecture: Methods of implementation*. ACTA SCIENTIARUM POLONORUM - Architectura Budownictwo, 20(2), 65–74. <https://doi.org/10.22630/ASPA.2021.20.2.15>
- Mazzi, A., & Gatto, B. (2020). *Circular Economy Concept in Sustainable Building Design*. Athens Journal of Technology & Engineering, 7(1), 31–50. <https://doi.org/10.30958/ajte.7-1-3>
- Morozov, A. I. (2013). *Introduction to plasma dynamics*. CRC Press / Taylor & Francis.
- Nair, A., Cai, C. S., & Kong, X. (2018). *Studying Failure Modes of GFRP Laminate Coupon Specimens Using Scanning Electron Microscopy Technique*. Journal of Aerospace Engineering, 31(6), 04018085. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0000916](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000916)
- Parlamentul European. (2023, iunie 1). *Economia circulară: Definiție, importanță și beneficii*. <https://www.europarl.europa.eu/topics/ro/article/20151201STO05603/economia-circulara-definitie-importanta-si-beneficii>
- Suwatthikul, A., Limprachaya, S., Kittisupakorn, P., & Mujtaba, I. (2017). *Simulation of Steam Gasification in a Fluidized Bed Reactor with Energy Self-Sufficient Condition*. Energies, 10(3), 314. <https://doi.org/10.3390/en10030314>
- Tabu, B., Akers, K., Yu, P., Baghirzade, M., Brack, E., Drew, C., Mack, J. H., Wong, H.-W., & Trelles, J. P. (2022). *Nonthermal Atmospheric Plasma Reactors for Hydrogen*

- Production from Low-Density Polyethylene.* arXiv.
<https://doi.org/10.48550/ARXIV.2210.11367>
- Tao, Y., Hadigheh, S. A., & Wei, Y. (2023). *Recycling of glass fibre reinforced polymer (GFRP) composite wastes in concrete: A critical review and cost benefit analysis.* Structures, 53, 1540–1556. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.018>
- Urbinati, A., Rosa, P., Sassanelli, C., Chiaroni, D., & Terzi, S. (2020). *Circular business models in the European manufacturing industry: A multiple case study analysis.* Journal of Cleaner Production, 274, 122964. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122964>
- Wu, C., Wang, W., Long, R., Li, H., Zhou, L., & Liu, P. (2023). *Fast Current Regulation and Persistent Current Maintenance of High-Temperature Superconducting Magnets with Contact Power Supply and Flux Pump.* arXiv.
<https://doi.org/10.48550/ARXIV.2307.10557>
- Zhang, X., Chen, N., Sheng, H., Ip, C., Yang, L., Chen, Y., Sang, Z., Tadesse, T., Lim, T. P. Y., Rajabifard, A., Bueti, C., Zeng, L., Wardlow, B., Wang, S., Tang, S., Xiong, Z., Li, D., & Niyogi, D. (2019). *Urban drought challenge to 2030 sustainable development goals.* Science of The Total Environment, 693, 133536.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.342>