

Evoluția cercetării privind biogazul: o analiză bibliometrică globală

The evolution of biogas research: a global bibliometric analysis

Ana-Maria Pîrvu¹

¹ Academy of Economic Studies and Faculty of Agri-Food and Environmental Economics, Bucharest, Romania; pîrvuana22@stud.ase.ro

Rezumat: Prezenta lucrare analizează evoluția cercetării privind biogazul prin intermediul unei analize bibliometrice globale, evidențiind tendințele de dezvoltare, principalele direcții de cercetare, contribuțiile țărilor, instituțiilor și autorilor cu cea mai mare influență în domeniu. De asemenea, sunt identificate rețelele de colaborare științifică, dinamica publicațiilor și temele de interes reflectate prin analiza cuvintelor-cheie și a relațiilor de co-citare. Rezultatele cercetării evidențiază o creștere constantă a numărului de publicații dedicate biogazului, determinată de preocupările privind securitatea energetică, gestionarea sustenabilă a deșeurilor și reducerea impactului schimbărilor climatice. Totodată, analiza relevă faptul că direcțiile actuale de cercetare sunt orientate către optimizarea proceselor de digestie anaerobă, creșterea eficienței producției de biogaz, integrarea tehnologiilor inovatoare și dezvoltarea unor soluții sustenabile pentru valorificarea biomasei. Studiul demonstrează importanța analizei bibliometrice ca instrument de evaluare a evoluției cunoașterii științifice și oferă o imagine de ansamblu asupra tendințelor globale din domeniul biogazului, constituind un suport relevant pentru orientarea cercetărilor viitoare și pentru fundamentarea strategiilor de dezvoltare a energiei regenerabile.

Cuvinte cheie: biogaz; analiză bibliometrică; digestie anaerobă;

Abstract: Biogas is one of the most important renewable energy sources, contributing to the valorization of organic waste, the reduction of greenhouse gas emissions, and the promotion of a circular economy. In the context of the growing global interest in the energy transition and sustainable development, research on biogas has experienced significant growth worldwide. This paper examines the evolution of biogas research through a global bibliometric analysis, highlighting publication trends, major research directions, and the contributions of the most influential countries, institutions, and authors in the field. Furthermore, it identifies scientific collaboration networks, publication dynamics, and emerging research themes through keyword co-occurrence and co-citation analyses. The findings reveal a steady increase in the number of scientific publications on biogas, driven by concerns related to energy security, sustainable waste management, and climate change mitigation. The analysis also shows that current research is increasingly focused on optimizing anaerobic digestion processes, improving biogas production efficiency, integrating innovative technologies, and developing sustainable solutions for biomass valorization. The study demonstrates the importance of bibliometric analysis as an effective tool for assessing the evolution of scientific knowledge and provides a comprehensive overview of global research trends in the field of biogas. The results offer valuable insights for future research and support the development of strategies aimed at promoting renewable energy and sustainable resource management.

Keywords: biogas; bibliometric analysis; anaerobic digestion

Clasificare JEL: Q42

Clasificare REL: 14J

Introducere

În contextul intensificării schimbărilor climatice, al creșterii cererii globale de energie și al necesității reducerii dependenței de combustibilii fosili, dezvoltarea surselor regenerabile de energie a devenit o prioritate strategică la nivel internațional (Ignat et al., 2022; Dinu et al., 2020; Popović, 2025). Biogazul reprezintă una dintre cele mai promițătoare surse de energie regenerabilă, datorită capacității sale de a valorifica deșeurile organice și biomasa prin procesul de digestie anaerobă, contribuind simultan la producerea de energie, reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră și implementarea principiilor economiei circulare. Astfel, biogazul îndeplinește un rol esențial în tranziția către un sistem energetic sustenabil și eficient din punctul de vedere al utilizării resurselor. Interesul comunității științifice pentru biogaz a cunoscut o dezvoltare semnificativă în ultimele decenii, pe fondul preocupărilor privind securitatea energetică, gestionarea sustenabilă a deșeurilor și atingerea obiectivelor asumate prin Agenda 2030 pentru Dezvoltare Durabilă și Pactul Verde European.

Analiza bibliometrică reprezintă o metodă modernă de evaluare cantitativă și calitativă a producției științifice, utilizată pentru identificarea tendințelor de cercetare, a principalilor autori, instituții și țări cu contribuții relevante, precum și a relațiilor de colaborare și a temelor emergente dintr-un anumit domeniu. Prin utilizarea unor instrumente specializate, precum VOSviewer, analiza bibliometrică permite reprezentarea grafică a rețelelor de coautorat, co-citare și co-ocurență a cuvintelor-cheie, oferind o imagine de ansamblu asupra evoluției și structurii cercetării științifice.

Scopul prezentei lucrări este de a analiza evoluția cercetării privind biogazul la nivel global prin intermediul unei analize bibliometrice, evidențiind dinamica publicațiilor, principalele direcții de cercetare, distribuția geografică a contribuțiilor științifice, colaborările internaționale și tendințele emergente în domeniu. Totodată, cercetarea urmărește identificarea perspectivelor viitoare de dezvoltare și evidențierea rolului biogazului în promovarea energiei regenerabile, a economiei circulare și a dezvoltării durabile.

1. Fundamente teoretice privind biogazul și analiza bibliometrică

Biogazul reprezintă un combustibil gazos regenerabil rezultat în urma procesului de digestie anaerobă a materiei organice, desfășurat în absența oxigenului. Acest proces implică degradarea biologică a biomasei de către microorganisme, generând un amestec de gaze alcătuit în principal din metan (CH_4) și dioxid de carbon (CO_2), alături de cantități reduse de hidrogen sulfurat, vapori de apă și alte gaze. Datorită conținutului ridicat de metan, biogazul constituie o sursă importantă de energie regenerabilă, utilizată pentru producerea energiei electrice, a en Interesul pentru valorificarea biogazului a crescut semnificativ în ultimele decenii, pe fondul preocupărilor privind reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră, diminuarea dependenței de combustibilii fosili și promovarea unui model energetic sustenabil. În plus, producerea biogazului contribuie la gestionarea eficientă a deșeurilor organice provenite din agricultură, industria alimentară, stațiile de epurare și deșeurile

municipale biodegradabile, transformând aceste resurse într-o sursă de energie cu impact redus asupra mediului. Energiei termice sau drept combustibil după procesul de purificare.

1.1. Rolul biogazului în economia circulară și dezvoltarea durabilă

Economia circulară promovează utilizarea eficientă a resurselor prin prevenirea generării de deșeuri, reutilizarea materialelor și valorificarea acestora în cadrul unor cicluri economice închise. În acest context, biogazul ocupă un loc important, deoarece permite transformarea deșeurilor organice în energie și produse secundare utile, contribuind la reducerea impactului asupra mediului și la conservarea resurselor naturale.

Integrarea tehnologiilor de producere a biogazului în sistemele economice contribuie la reducerea cantităților de deșeuri depozitate, la diminuarea emisiilor de metan rezultate din descompunerea necontrolată a materiei organice și la înlocuirea parțială a combustibililor convenționali. Totodată, digestatul rezultat în urma digestiei anaerobe poate fi utilizat ca fertilizant organic, favorizând dezvoltarea agriculturii durabile și închiderea ciclului nutrienților.

Din perspectivă economică, investițiile în instalații de producere a biogazului stimulează dezvoltarea economiei locale prin crearea de locuri de muncă, diversificarea veniturilor în mediul rural și reducerea dependenței de combustibilii fosili importați. În plus, producerea locală a energiei contribuie la creșterea securității energetice și la stabilizarea costurilor asociate consumului de energie.

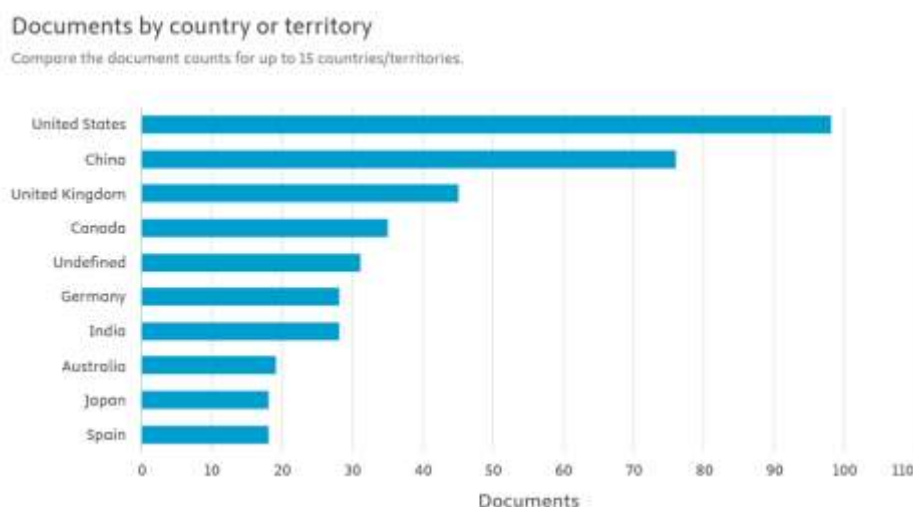
2. Analiza bibliometrică a cercetărilor privind biogazul la nivel global

Analiza bibliometrică reprezintă o metodă cantitativă de evaluare a producției științifice, utilizată pentru măsurarea și interpretarea evoluției cercetării într-un anumit domeniu. Aceasta se bazează pe analiza publicațiilor științifice și a relațiilor existente între acestea, precum numărul de articole, citările, colaborările dintre autori și instituții, cuvintele-cheie și rețelele tematice. În ultimele decenii, bibliometria a devenit un instrument esențial pentru evaluarea performanței cercetării și identificarea tendințelor de dezvoltare ale diferitelor discipline științifice.

În domeniul biogazului, analiza bibliometrică permite evidențierea ritmului de dezvoltare a cercetărilor, identificarea principalelor direcții de interes, precum și a autorilor, instituțiilor și țărilor care contribuie cel mai mult la progresul cunoașterii. Spre deosebire de o revizuire tradițională a literaturii, bibliometria oferă o perspectivă obiectivă asupra evoluției cercetării prin utilizarea unor indicatori statistici și a unor instrumente informatice specializate.

2.1. Distribuția cercetărilor pe țări, instituții și autori

Uniunea Europeană este considerată unul dintre liderii globali în promovarea politicilor publice.



nr. 1. Distribuția documentelor pe țări
Sursa: Scopus

Figura

Figura 1 prezintă distribuția publicațiilor științifice privind biogazul în funcție de țara de afiliere a autorilor, evidențiind statele care au avut cea mai mare contribuție la dezvoltarea acestui domeniu de cercetare. Se observă că Statele Unite ale Americii ocupă primul loc, cu aproximativ 95 de documente, ceea ce reflectă rolul major al instituțiilor americane în cercetarea privind biogazul și bioenergia. Acest rezultat poate fi explicat prin investițiile consistente în cercetare și dezvoltare, infrastructura științifică avansată și interesul pentru dezvoltarea surselor regenerabile de energie.

Pe locul al doilea se situează China, cu aproximativ 75 de publicații, demonstrând dezvoltarea accelerată a cercetării în domeniul energiilor regenerabile și preocuparea pentru valorificarea deșeurilor organice în contextul reducerii emisiilor de gaze cu efect de seră.

Regatul Unit ocupă poziția a treia, cu aproximativ 44 de documente, fiind urmat de Canada. Aceste rezultate evidențiază implicarea semnificativă a instituțiilor de cercetare din aceste state în dezvoltarea tehnologiilor bazate pe digestia anaerobă și producerea biogazului.

Un număr apropiat de publicații este înregistrat de Germania și India, fiecare cu aproximativ 28 de documente. Germania este recunoscută pentru implementarea pe scară largă a instalațiilor de biogaz și pentru politicile de promovare a energiei regenerabile, în timp ce India acordă o atenție deosebită utilizării biogazului în mediul rural și în gestionarea deșeurilor agricole.

În partea inferioară a clasamentului se regăsesc Australia, Japonia și Spania, fiecare contribuind cu aproximativ 18–20 de publicații. Deși numărul documentelor este mai redus comparativ cu primele state din clasament, cercetările realizate în aceste țări completează literatura de specialitate prin abordări inovatoare privind eficiența proceselor de digestie anaerobă, integrarea biometanului în sistemele energetice și valorificarea sustenabilă a biomasei.

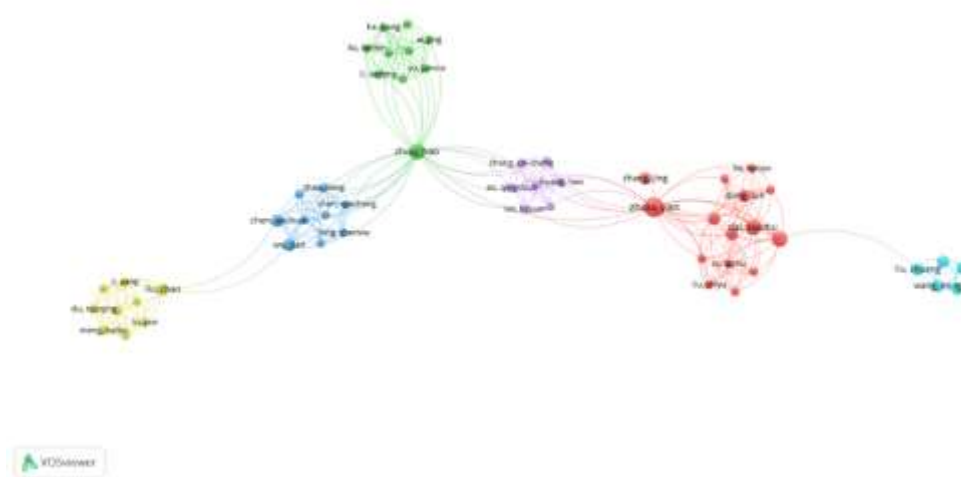


Figura nr. 2. Reprezentarea grafică a autorilor
Sursa: Conceptualizare proprie în VOSviewer

Figura de mai sus reprezintă rețeaua de colaborare dintre autorii care au publicat lucrări în domeniul biogazului. Analiza rețelei evidențiază existența mai multor cluster distincte de cercetare, ceea ce demonstrează că domeniul biogazului este dezvoltat prin colaborări între echipe și instituții de cercetare. Autorii din cadrul aceluiași cluster publică frecvent împreună și contribuie la dezvoltarea unor direcții comune de cercetare.

Un rol central în rețea îl ocupă Zhou Hao, care apare ca unul dintre principalii autori de legătură între mai multe grupuri de cercetare. Numărul mare de conexiuni ale acestuia sugerează o colaborare extinsă cu alți cercetători și o influență semnificativă asupra dezvoltării domeniului. În mod similar, autorii Zhou Yan și Zhang Jing ocupă poziții importante în cadrul clusterului reprezentat cu roșu, fiind conectați cu numeroși colaboratori și facilitând schimbul de cunoștințe între echipele de cercetare.

Se observă că clusterul roșu este cel mai numeros și prezintă cea mai mare densitate de conexiuni, ceea ce indică existența unei colaborări intense între autorii care îl compun. Această structură sugerează că acești cercetători publică frecvent împreună și contribuie la dezvoltarea unor direcții importante privind producerea și utilizarea biogazului.

Celelalte cluster verde, albastru, și galben reprezintă grupuri de cercetare mai restrânse, dar bine conectate intern. Deși acestea au un număr mai redus de autori, relațiile existente între membrii lor demonstrează existența unor colaborări stabile și a unor interese științifice comune.

2.2 Analiza cuvintelor-cheie și a direcțiilor de cercetare

Analiza co-apariției cuvintelor-cheie reprezintă una dintre cele mai importante componente ale unei cercetări bibliometrice, deoarece permite identificarea principalelor teme abordate în literatura de specialitate.

Prin intermediul acestei metode pot fi determinate direcțiile dominante de cercetare, gradul de interconectare dintre diferite subiecte și evoluția interesului științific în timp. În plus,

analiza cuvintelor-cheie oferă o imagine de ansamblu asupra structurii conceptuale a unui domeniu și contribuie la identificarea tendințelor emergente și a perspectivelor viitoare de dezvoltare.

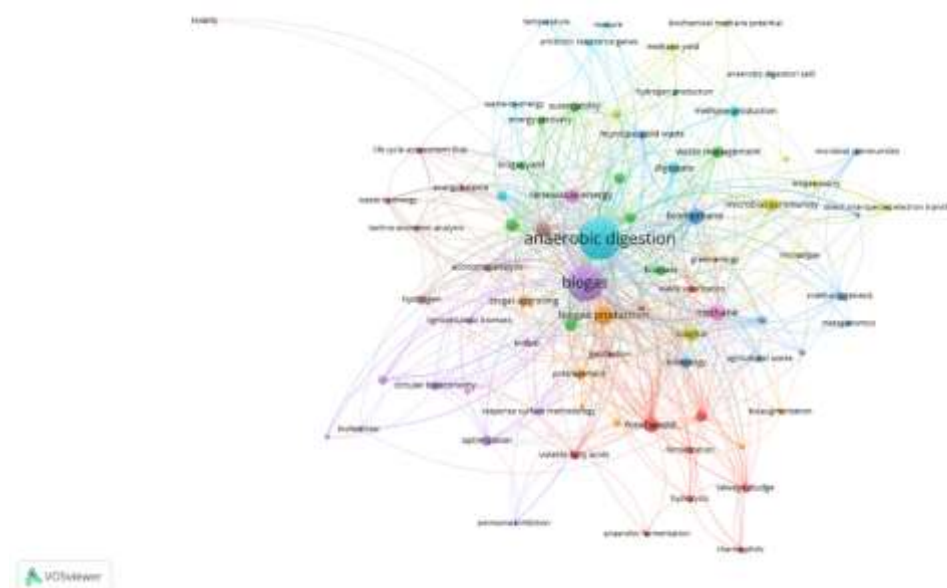


Figura nr. 3. Reprezentarea grafică a autorilor
Sursa: Conceptualizare proprie în VOSviewer

Figura 3 prezintă harta de co-apariție a cuvintelor-cheie din literatura științifică privind biogazul, realizată cu ajutorul aplicației VOSviewer. În cadrul acestei reprezentări, fiecare nod corespunde unui cuvânt-cheie identificat în publicațiile analizate, dimensiunea nodului reflectă frecvența utilizării termenului, iar liniile dintre noduri indică relațiile de co-apariție dintre concepte. Culorile diferite delimitează cluster tematice, fiecare reprezentând o direcție distinctă de cercetare.

Analiza evidențiază faptul că termenii „anaerobic digestion” și „biogas” ocupă poziții centrale în rețea, având cele mai numeroase conexiuni cu celelalte concepte. Acest aspect demonstrează că digestia anaerobă reprezintă fundamentul cercetărilor privind producerea biogazului, fiind nucleul în jurul căruia gravitează majoritatea studiilor din domeniu. Poziționarea centrală a acestor termeni indică importanța lor atât din perspectiva dezvoltării tehnologice, cât și a aplicațiilor practice în producerea energiei regenerabile și valorificarea deșeurilor organice.

Un prim cluster, reprezentat prin culoarea verde, este concentrat asupra producției de biogaz și a surselor regenerabile de energie, reunind termeni precum renewable energy, biogas production, waste valorization, biogas yield și energy recovery. Acest grup de concepte reflectă interesul cercetătorilor pentru creșterea eficienței proceselor de producere a biogazului și integrarea acestuia în sistemele energetice sustenabile.

Clusterul albastru este orientat către aspectele microbiologice și biochimice ale digestiei anaerobe, incluzând termeni precum microbial community, methanogenesis, biomethane, microbial communities și direct interspecies electron transfer. Frecvența ridicată a acestor concepte evidențiază importanța înțelegerii mecanismelor microbiologice implicate în

producerea metanului și dezvoltarea unor tehnologii capabile să optimizeze performanța instalațiilor de biogaz.

Clusterul roșu reunește cercetările privind gestionarea deșeurilor organice și optimizarea proceselor tehnologice, fiind asociat cu termeni precum food waste, fermentation, volatile fatty acids, hydrolysis, sewage sludge și thermophilic. Studiile din această categorie urmăresc identificarea celor mai eficiente metode de valorificare a diferitelor tipuri de deșeuri și optimizarea etapelor procesului de digestie anaerobă în vederea creșterii randamentului energetic.

Clusterul galben evidențiază direcțiile de cercetare privind potențialul biochimic al metanului și managementul deșeurilor, prin termeni precum biochemical methane potential, waste management, hydrogen production, anaerobic digestion (AD) și methane production. Aceste cercetări sunt orientate spre evaluarea eficienței diferitelor substraturi utilizate în digestia anaerobă și spre dezvoltarea unor metode inovatoare de conversie energetică.

Clusterul mov este asociat cu optimizarea proceselor și evaluarea sustenabilității, incluzând termeni precum optimization, response surface methodology, circular bioeconomy și biofertilizer. Aceste rezultate evidențiază preocuparea tot mai accentuată pentru integrarea biogazului în economia circulară și pentru dezvoltarea unor modele de producție sustenabile, care să maximizeze utilizarea resurselor și să reducă impactul asupra mediului.

Concluzii

Prezenta lucrare evidențiază evoluția și tendințele actuale ale literaturii științifice privind biogazul prin utilizarea analizei bibliometrice, metodă care permite evaluarea obiectivă a dezvoltării unui domeniu de cercetare și identificarea principalelor direcții științifice. Rezultatele obținute demonstrează că interesul pentru biogaz a crescut semnificativ în ultimele decenii, pe fondul intensificării preocupărilor privind schimbările climatice, securitatea energetică și tranziția către o economie cu emisii reduse de carbon.

Analiza distribuției publicațiilor pe țări a evidențiat faptul că Statele Unite și China ocupă pozițiile dominante în producția științifică, fiind urmate de Regatul Unit, Canada, Germania și India. Aceste rezultate reflectă investițiile consistente în cercetare și dezvoltare, precum și interesul strategic al acestor state pentru dezvoltarea tehnologiilor bazate pe surse regenerabile de energie și valorificarea sustenabilă a deșeurilor organice.

Rețeaua de colaborare dintre autori a demonstrat existența unor grupuri de cercetare bine consolidate și a unor colaborări internaționale extinse. Autorii cu un număr ridicat de conexiuni joacă un rol esențial în transferul de cunoștințe și în dezvoltarea unor direcții comune de cercetare, contribuind la creșterea vizibilității și impactului științific al domeniului. Totodată, existența mai multor clustere de colaborare confirmă caracterul interdisciplinar și global al cercetărilor privind biogazul.

Rezultatele bibliometrice indică, de asemenea, o orientare tot mai accentuată către optimizarea proceselor de digestie anaerobă, creșterea eficienței producerii biometanului, valorificarea deșeurilor organice și integrarea biogazului în strategiile de decarbonizare și în

modelele economiei circulare. În același timp, creșterea numărului de studii privind analiza ciclului de viață, evaluarea tehnico-economică și reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră confirmă faptul că biogazul este analizat din perspectiva contribuției sale la atingerea obiectivelor de dezvoltare durabilă.

Referințe bibliografice

References

1. Comisia Europeană, 2020. Pactul verde european 2019–2024. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_ro
2. International Energy Agency (IEA), 2020. Outlook for Biogas and Biomethane: Prospects for Organic Growth. <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane-prospects-for-organic-growth>
3. United Nations, 2015. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
4. Scopus, Elsevier, 2025. Scopus Database – Abstract and Citation Database. <https://www.scopus.com>
5. Van Eck, N.J. & Waltman, L., 2023. VOSviewer Manual – Manual for VOSviewer Version 1.6.20. <https://www.vosviewer.com/documentation>
6. Mizger-Ortega, J., Vanegas Chamorro, M. & Quintero, M.C., 2022. Anaerobic Digestion in Biogas Production from Organic Matter: A Bibliometric Analysis from 2000 to 2021. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 12(5), pp. 505–514. <https://doi.org/10.32479/ijeep.13367>
7. Alvarez, Y.C., Cordero Noa, J.J., Quispe Soto, G.V. & Jiménez Borges, R., 2026. Efficiency and Sustainability in Industrial Biogas Plants: Bibliometric Review of Key Operating Parameters and Emerging Process Metrics. *Sci*, 8(4), 71. <https://doi.org/10.3390/sci8040071>
8. Springer Nature, 2025. Bibliometric Guide to Future Biogas Technology for Sustainable Energy Transition. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10098-025-03242-5.pdf>
9. World Bank, 2023. World Development Indicators. <https://databank.worldbank.org/source/world-development-indicators>
10. Eurostat, 2024. Energy from Renewable Sources. <https://ec.europa.eu/eurostat>
11. Ignat, R., Chiripuci, B.C., Pătărlăgeanu, S.R., Constantin, M., & Lazăr, V. (2022). Tackling market opportunities for the biomass production in Romania. *Proceedings of the International Conference on Business Excellence*, 16(1), pp. 338–348. <https://doi.org/10.2478/picbe-2022-0032>
12. Dinu, M., Pătărlăgeanu, S. R., Petrariu, R., Constantin, M., & Potcovaru, A.-M. (2020). Empowering Sustainable Consumer Behavior in the EU by Consolidating the Roles of Waste Recycling and Energy Productivity. *Sustainability*, 12(23), 9794. <https://doi.org/10.3390/su12239794>.
13. Popović, I., Radosavljević, K., Pătărlăgeanu, S.R., Plavšić, M., Subić, J. & Marina Stević, I. (2025). Financial controlling in the energy sector in the Republic of Serbia. *Management & Marketing*, 20(3), 1–14. <https://doi.org/10.2478/mmcks-2025-0013>