

**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII
AL REPUBLICII MOLDOVA**

**Universitatea Tehnică a Moldovei
Facultatea Energetică și Inginerie Electrică
Departamentul Energetică**

Admis la susținere

Șefă departament:

HLUSOV Viorica, conf. univ., dr.

„_____” _____ 2026

**Evaluarea potențialului de reciclare a
panourilor fotovoltaice**

Teză de master

Masterand: _____ **MIHĂILĂ Iurie,**
gr. EM-23M

Conducător: _____ **GUȚU-CHETRUȘCA Corina,**
prof. univ., dr.

Chișinău, 2026

Evaluarea potențialului de reciclare a panourilor fotovoltaice.

Structura lucrării: Lucrarea conține 1 introducere, 5 capitole, bibliografie formată din 16 titluri, 13 link-uri utilizate, 4 anexe, 61 de pagini, 2 figuri și 3 tabele.

Cuvinte-cheie: panouri fotovoltaice, ciclul de viață, deșeurile electronice, rata de recuperare, delaminare, reciclare, managementul deșeurilor periculoase, amprentă de carbon, etc.

Problematika studiului: problema principală constă în **decalajul** dintre volumul uriaș de deșeurile estimate la milioane de tone până în 2050 și lipsa unei infrastructuri de reciclare care să recupereze materialele de înaltă puritate (în special siliciul și argintul), nu doar sticla și aluminiul, mai ales prin prisma statului Republica Moldova.

Obiectivele studiului: identificarea soluțiilor optime pentru majorarea marjei de reciclare a PV cu un impact minim asupra mediului înconjurător.

Rezultate obținute: în urma studiului s-a demonstrat că problema reciclării panourilor fotovoltaice este foarte importantă pentru noi, chiar dacă prezintă o problemă a „viitorului”, din motiv că PV sunt la începutul ciclului de viață, dar oricum problema dată va avea un impact major asupra vieții cotidiene a fiecărui dintre noi prin mai multe aspecte: ecologic, economic, etc.

ABSTRACT

Author – MIHĂILĂ Iurie. **Title** – *Evaluation of the Recycling Potential of Photovoltaic Panels.*

Thesis Structure: The paper consists of an introduction, five chapters, a bibliography of 16 titles, 13 links used, a 4 annexes, 58 pages, 2 figure, 3 tables.

Keywords: photovoltaic (PV) panels / PV modules, life cycle, electronic waste (E-waste), recovery rate, delamination, recycling, hazardous waste management, carbon footprint, etc.

Study issues: the main problem lies in the gap between the massive volume of waste, estimated at millions of tons by 2050, and the lack of a recycling infrastructure capable of recovering high-purity materials (specifically silicon and silver) beyond glass and aluminum, particularly from the perspective of the Republic of Moldova.

The study's objectives: identifying optimal solutions for increasing the recycling rate of PV panels while ensuring a minimal impact on the environment.

Result obtained: the study demonstrates that the issue of photovoltaic panel recycling is of paramount importance, even if it is perceived as a 'future problem' due to most systems currently being at the beginning of their life cycle. Nevertheless, this challenge will have a major impact on our daily lives through multiple dimensions: ecological, economic, and social.

CUPRINS

INTRODUCERE	9
1. EVOLUȚIA PROBLEMEI RECICLĂRII	11
1.1. Tendințele energiilor regenerabile.....	11
1.2. Generarea deșeurilor din instalațiile de energii regenerabile	18
1.3. Durata de viață a instalațiilor fotovoltaice	20
1.4. Necesitatea și provocările reciclării.....	22
2. POLITICI ȘI CADRUL NORMATIV ÎN SUSȚINEREA RECICLĂRII	25
2.1. Politici și reglementări în domeniul reciclării la nivel internațional.....	25
2.2. Cadrul legislativ al Republicii Moldova în domeniul reciclării	28
2.3. Instrumente economice și mecanisme de susținere a reciclării	29
3. IMPACTUL ENERGIILOR REGENERABILE ASUPRA MEDIULUI	31
3.1. Impactul sectorului energetic supra mediului	31
3.2. Riscurile asupra mediului în absența reciclării panourilor fotovoltaice.....	34
3.3. Beneficiile ecologice ale reciclării panourilor fotovoltaice	37
4. TEHNOLOGII ȘI EFICIENȚĂ ECONOMICĂ A RECICLĂRII INSTALAȚIILOR ROTOVOLTAICE	41
4.1. Metode de reciclare a panourilor fotovoltaice (mecanice , chimice și depozitare)	41
4.2. Costurile și investițiile necesare proceselor de reciclare.....	48
4.3. Valorificarea materialelor și rentabilitatea reciclării	50
CONCLUZII	56
BIBLIOGRAFIE	58
ANEXE	61

INTRODUCERE

Odată cu dezvoltarea omenirii necesitățile acesteia sunt în permanentă creștere, acest fapt favorizează și creșterea generărilor de deșeuri. Pentru a nu transforma planeta într-o imensă groapă de gunoi și pentru a reduce consumul de materie primă și desigur pentru a reduce consumul de energie și nivelul de contaminare a mediului natural a apărut conceptul de reciclare. Reciclarea reprezintă un proces prin care deșeurile sau materialele care nu mai prezintă un bun util, sunt transformate în alte materii care ar putea fi utilizate pentru fabricarea produselor noi.

Reciclarea are un șir de beneficii care deseori vin de comun cu cheltuieli financiare, însă necăutând la acest fapt cheltuielile suportate în unele cazuri sunt greu de comparat cu beneficiile aduse de aceasta. Tendințele dezvoltării sectorului energetic, la momentul actual, tot mai des este orientat spre sursele energiilor regenerabile sau altfel spus inepuizabile, și dacă e să vorbim despre sursele energiilor inepuizabile, cum ar fi vântul, apa sau radiația solară, atunci energia înglobată în acestea ne-ar putea asigura cu energia necesară pentru a acoperi întreg necesarul omenirii.

Totodată însă, este de menționat că până la moment, toate tehnologiile create care sunt capabile de a converti energiile disponibile în cele necesare, au o durată limitată de viață, un motiv care ne face să ne gândim cum procedăm în continuare cu acestea. La sfârșitul utilității tehnologiilor, de orice tip, acestea de obicei devin deșeuri. În ceea ce ține de tehnologiile energetice, o mică parte din aceste deșeuri sunt reutilizate, însă acestea constituie o parte ne-considerabilă. În scopul minimalizării efectului negativ asupra mediului ambiant ce ne încojoară, autoritățile din toată lumea, atât la nivel național cât și mondial, încearcă a găsi soluții și metode pentru ameliorarea acestei situații. În acest scop deja sunt primite un șir de acorduri, regulamente, legi, strategii și alte mecanisme orientate spre atingerea acestui scop. Deoarece din topul tendințelor de dezvoltare a energiilor regenerabile face parte și tehnologia de captare a energie solare, aceasta are și tendința de a produce deșeuri tehnice cu aceeași progresivitate.

Tehnologiile de reciclare a panourilor fotovoltaice astăzi sunt la începutul dezvoltării, de aceea în mare parte acestea se limitează la recuperarea aluminiului și cuprului care este scos din cadrul panourilor și cutiilor de joncțiune, în rest acestea sunt pur și simplu zdrobite. Rezultatele acestei reciclări ajung să fie o masă de sticlă impură din care nu sunt recuperate alte elemente mai prețioase, cum ar fi celulele de siliciu care sunt acoperite cu un electrod de argint și lipite cu staniu și plumb.

Deși crucială pentru tranziția către energia curată, instalarea în număr tot mai mare, putem spune chiar la nivel global a panourilor fotovoltaice prezintă a cea problemă, cum o numim „*de viitor*”, în vederea soluționării nivelului major de panourilor fotovoltaice ajunse la sfârșitul duratei de viață

(EOL) (Tao et al., 2020, Ko et al., 2023, Ndalloka et al., 2024). Panourile fotovoltaice aruncate vor deveni o problemă semnificativă de mediu fără strategii eficiente de reciclare sau eliminare. Prin urmare, reciclarea panourilor fotovoltaice ajunse la sfârșitul duratei de viață este esențială pentru promovarea unei economii circulare și minimizarea amprentei de carbon prin dezvoltarea și implementarea unor tehnologii de reciclare adecvate și eficiente din punct de vedere al costurilor (Fiandra et al., 2019, Deng et al., 2022).

Pe baza rapoartelor Agenției Internaționale pentru Energie Regenerabilă (IRENA) și Agenției Internaționale pentru Energie (IEA) și presupunând o durată medie de viață a panourilor de 25 de ani, se așteaptă ca deșeurile fotovoltaice la nivel global să ajungă la 4-14% din capacitatea totală instalată până în 2030. Studiile de modelare estimează că până în 2030 vor fi generate la nivel global 1,7-8 Mt de deșuri de panouri fotovoltaice, acestea crescând la 60-78 Mt până în 2050, peste 80% fiind reprezentate de panouri fotovoltaice din siliciu cristalin (c-Si) (Weckend et al., 2016, Deng et al., 2022).

Dincolo de preocupările legate de mediu, gestionarea responsabilă a deșeurilor fotovoltaice este esențială pentru asigurarea aprovizionării viitoare cu materiale. Mai multe materiale utilizate în panourile fotovoltaice sunt clasificate drept materii prime critice datorită importanței lor economice și a riscurilor potențiale la adresa aprovizionării. În 2023, UE a identificat siliciul, aluminiul și cuprul (Cu) ca fiind critice sau strategice (Comisia Europeană, 2023), în timp ce SUA le-a clasificat drept aproape critice pentru viitorul pe termen mediu (USDOE, 2023). Clasificări similare există în Regatul Unit (2021) (Lusty și colab., 2021) și China (Planul Național de Resurse Minerale, 2016–2020) (Xu și colab., 2024). Structura complexă, multi-componentă și natura încapsulată a panourilor fotovoltaice necesită dezvoltarea unor metode adecvate de recuperare și purificare. Panourile solare sunt alcătuite din diverse componente, cum ar fi celule solare, rame metalice, foi de sticlă, fire și plexiglas.

Deși majoritatea componentelor pot fi reciclate, recuperarea Si de înaltă puritate din celulele uzate este cea mai dificilă din punct de vedere economic și tehnic (Klugmann și Ostrowski, 2010). În ciuda provocărilor asociate cu recuperarea celulelor c-Si, recuperarea economică a altor materiale valoroase, cum ar fi sticla, Al și Ag, prezintă oportunități semnificative (Tao și Yu, 2010; Dias et al., 2016a, Dias et al., 2016b). Într-un final, la moment sunt necesare cercetări pe această ramură astfel ca să poată fi stabilite tehnologii și metode de a recupera la maxim elementele și pentru a evita risipirea materiei prime. Energia radiației solare este declarată o energie verde, însă pentru ca aceasta să-și mențină acest statut este strict necesar de a stabili ce facem cu panourile fotovoltaice atunci când acestea își ating limita exploatareii.

BIBLIOGRAFIE

1. AMAN, M.M.; SOLANGI, K.H.; HOSSAIN, M.S.; BADARUDIN, A.; JASMON, G.B.; MOKHLIS, H.; BAKAR, A.H.A.; KAZI, S.N.; *A review of Safety, Health and Environmental (SHE) issues of solar energy system, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 2015, Pages 1190-1204, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.086>.
2. AL-AJMI, M. S.; MUSTAPHA, F.; YUNUS, N. A. M.; HALIN, I. A.; *A True Hybrid Solar Wind Turbine Electric Generator System for Smaller Hybrid Renewable Energy Power Plants, In MATEC Web of Conferences*, 2018, 215, p. 01015, EDP Sciences, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821501015>.
3. ALMOMANI, F.; AL KETIFE, A.; JUDD, S.; SHURAIR, M.; BHOSALE, R.; ZNAD, H.; TAWALBEH, M.; *Impact of CO₂ Concentration and Ambient Conditions on Microalgal Growth and Nutrient Removal from Wastewater by A Photobioreactor, Science of The Total Environment*, 662, 2019, Pp. 662-671, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.144>.
4. BISTLINE, E.T.; YOUNG, T.; *Emissions impacts of future battery storage deployment on regional power systems, Applied Energy*, 264, 2020, 114678, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114678>.
5. CHENG, J.; YEH, C.; TU, C.; *Trust and Knowledge Sharing in Green Supply Chains, Supply Chain Management*, 2008, 13 (4), Pp. 283–295, <https://doi.org/10.1108/13598540810882170>.
6. CUCCHIELLA, F.; DADAMO, I.; *Estimation of The Energetic and Environmental Impacts of a RoofMounted Building-Integrated Photovoltaic Systems*, 2012, *Renewable and Sustainable Energy Rev.*
7. TSOUTSOS, T.; FRANTZESKAKI, N.; GEKAS, V.; *Environmental Impacts from The Solar Energy Technologies, Energy Policy*, 33 (3), 2005, Pp. 289-296, SSN 0301-4215, [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00241-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00241-6).
8. TAWALBEH, M.; AL-OTHMAN, A.; KAFIAH, F.; ABDELSALAM, E.; ALMOMANI, F.; ALKASRAWI, M.; *Environmental Impacts of Solar Photovoltaic Systems: A Critical Review of Recent Progress and Future Outlook, Science of the Total Environment*, 759, 2021, 143528, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528>.
9. YANG, D.; LIU, J.; YANG, J. and DING, N.; *Life-Cycle Assessment of China's Multi-crystalline Silicon Photovoltaic Modules Considering International Trade*, 2015, *Journal of Cleaner Production*, 94, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.003>.

10. DEHGHANI-SANIJ, A.R.; THARUMALINGAM, E.; DUSSEAUULT, M.B.; FRASER, R.; *Study of energy storage systems and environmental challenges of batteries, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 2019, Pages 192-208, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.023>.
11. D. Marinescu, V. Nicolae *Surse regenerabile de energie*, București 2004
ISBN 973-87023-1-3 <https://sunrecycling.ro/>
12. JIN, Y.; BEHRENS, P.; TUKKER, A.; SCHERER, L.; *Water Use of Electricity Technologies: A Global Meta-Analysis, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 2019, 109391, ISSN 1364- 0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109391>.
13. FUTURISM; *What's A Proton Battery Three Things You Need to Know, No, it's not from Star Trek*, [online]. [accesat 2.22.2022]. Disponibil: <https://futurism.com/proton-battery>.
14. SOLAR, *Magazine; Transparent Solar Panels: Reforming Future Energy Supply, Feb. 2020*, [online]. [accesat 2.22.2022]. Disponibil: <https://solarmagazine.com/solar-panels/transparent-solar-panels/>
15. FTHENAKIS, V.; WANG, W.; KIM, H. C.; *Life Cycle Inventory Analysis of The Production of Metals Used in Photovoltaics, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (3), 2009, Pages 493- 517, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.11.012>.
16. PEARLMUTTER, D.; THEOCHARI, D.; NEHLS, T.; PINHO, P.; PIRO, P.; KOROLOVA, A.; PAPAETHIMIOU, S.; MATEO, M. C. G.; CALHEIROS, C.; ZLUWA, I.; PITHA, U.; SCHOSSELER, P.; YAAKOV, F.; OUANNOU, S.; GAL, E.; AICHER, A.; ARNOLD, K.; IGONDOVÁ, E.; PUCHER, B.; *Enhancing The Circular Economy With Nature-Based Solutions In The Built Urban Environment: Green Building Materials, Systems And Sites, Blue-Green Systems*, 1 January 2020, 2 (1): 46–72, <https://doi.org/10.2166/bgs.2019.928>.
17. SANTAFÉ, Miguel Redón; GISBERT, Pablo S. Ferrer; ROMERO, Francisco Javier Sánchez; SOLER, Juan Bautista Torregrosa; GOZÁLVEZ, José Javier Ferrán; GISBERT, Carlos M. Ferrer; *Implementation of A Photovoltaic Floating Cover for Irrigation Reservoirs, Journal of Cleaner Production*, 66, 2014, Pages 568-570, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.006>.
18. TAWALBEH, M.; AL MOJJLY, A.; AL-OTHMAN, A.; HILAL, N.; *Membrane Separation as A PreTreatment Process for Oily Saline Water, Desalination*, 447, 2018, Pp. 182-202, ISSN 0011-9164, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.029>.
19. TSOUTSOS, T.; FRANTZESKAKI, N.; GEKAS, V.; *Environmental Impacts from The Solar Energy Technologies, Energy Policy*, 33(3), 2005, Pages 289-296, ISSN 0301-4215, [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00241-6](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00241-6).

20. US-BLM; *Final Staff Assessment and Draft Environmental Impact Statement and Draft California Desert Conservation Area Plan Amendment: Ivanpah Solar Electric Generating System, Sacramento, CA, U.S. BLM, California-Energy-Commission, [online]. 2009, [accesat 2.22.2022]. Disponibil: https://eplanning.blm.gov/public_projects/nepa/65894/79903/92668/Supplemental-DEISIvanpahSolar.pdf.*
21. US-BLM, US-DOE; *Final Programmatic Environmental Impact Statement for Solar Energy Development in Six Southwestern States, 2010, 1 (1-7), Pp. 14-16, [online]. [accesat 2.22.2022]. Disponibil: https://www.energy.gov/sites/default/files/EIS-0403-FEIS-Volume1-2012_0.pdf.*
22. <https://lionrecycle.ro/colectare-reciclare-panouri-fotovoltaice-deseu-panouri-solare/>
23. <https://www.irena.org/>
24. <https://macosolar.ro/blog/impactul-asupra-mediului-cum-se-recicleaza-panourile-fotovoltaic>
25. <https://blacksolar.ro/reciclarea-panourilor-fotovoltaice-solutii-sustenabile-si-adaptate-romaniei/>
26. <https://pvcycle.org/photovoltaic-waste-legislation>
27. <https://www.nlr.gov/>
28. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2024/80/e3sconf_ys2024_01040.pdf
29. <https://iea-pvps.org/>
30. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024822005682>
31. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X24007801>
32. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X25005033>
33. <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/1/60>
34. <https://www.irena.org/Energy-Transition/Policy/Circular-economy>