



Modelarea și dimensionarea optimă a sistemelor de stocare a energiei solare prin integrarea sustenabilă a acumulatorilor de la vehiculele electrice folosind tehnici de inteligență artificială

RAPORT ETAPĂ II

Ș.l. dr. ing. Maria CRISTEA¹

As. dr. ing. Thomas Imre Cyrille BUIDIN²

As. drd. ing. Daniela-Florentina NISTE¹

¹Facultatea de Inginerie Electrică, UTCN

²Facultatea de Autovehicule Rutiere, Mecatronică și Mecanică, UTCN



1. Introducere

În Uniunea Europeană (UE), piața autovehiculelor electrice (EV - Electric Vehicle) a înregistrat o creștere accelerată în ultimii 5 ani, numărul de autovehicule electrice echipate cu acumulatori (BEV = Battery Electric Vehicle) noi înmatriculate depășind 1,5 milioane în anul 2023. În același an, cota de piață a EV a ajuns la 22,5% și reprezintă aproximativ un sfert din toate autovehiculele achiziționate și înmatriculate în acel an, după cum se observă în Figura 1. În anul 2024, în țările UE-27 s-a înregistrat o mică scădere a numărului de înmatriculări de BEV, comparativ cu anul anterior, în mare parte datorită eliminării stimulentei pentru achiziționarea vehiculelor electrice [1].

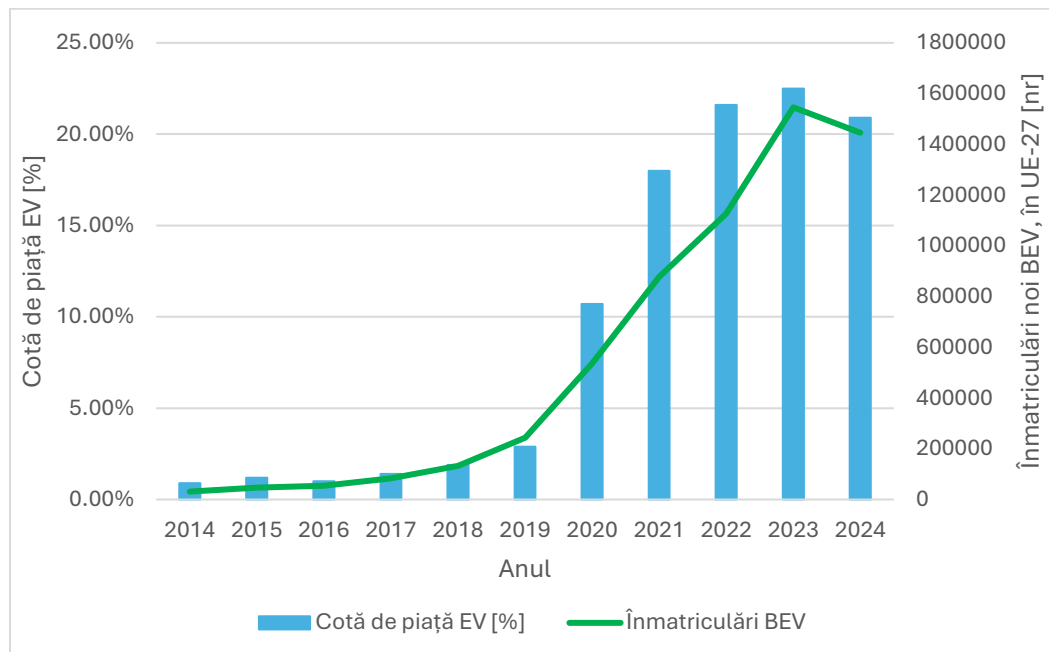


Fig. 1 Cotă de piață EV și înmatriculări noi BEV în perioada 2014 – 2024 [1]

Pe lângă diversitatea ofertei de EV, a crescut și autonomia medie a vehiculelor electrice înmatriculate în statele membre UE-27. Datorită progreselor privind tehnologia bateriilor, au fost dezvoltate baterii cu o capacitate mai mare și sisteme de propulsie din ce în ce mai eficiente. Așadar, multe BEV oferă autonomii care depășesc 400 de kilometri, în timp ce unele modele ating acum peste 500 km cu o singură încărcare [1].

În acest sens, este necesară realizarea unei analize de piață detaliate, pentru a identifica modelele de BEV înmatriculate în ultimii ani în țările membre UE-27, precum și conturarea profilului de acumulatori uzăți proveniți de la acestea, cu scopul de a studia potențialul reutilizării lor ca sisteme de stocare a energiei electrice integrate în sistemele fotovoltaice conectate la rețea.



2. Analiză de piață pentru identificarea modelelor de BEV înmatriculate în UE-27

Pentru a identifica brandurile și modelele de BEV cele mai comercializate, în Figura 2 sunt prezentate țările din UE-27 care au înregistrat cel mai mare număr de înmatriculări în anul 2024. Astfel, țările cu un număr mai mare de 15.000 de înmatriculări BEV vor fi analizate în continuare. Acestea sunt Germania, Franța, Belgia, Olanda, Suedia, Spania, Italia, Danemarca, Portugalia, Austria, Irlanda și Finlanda [1].

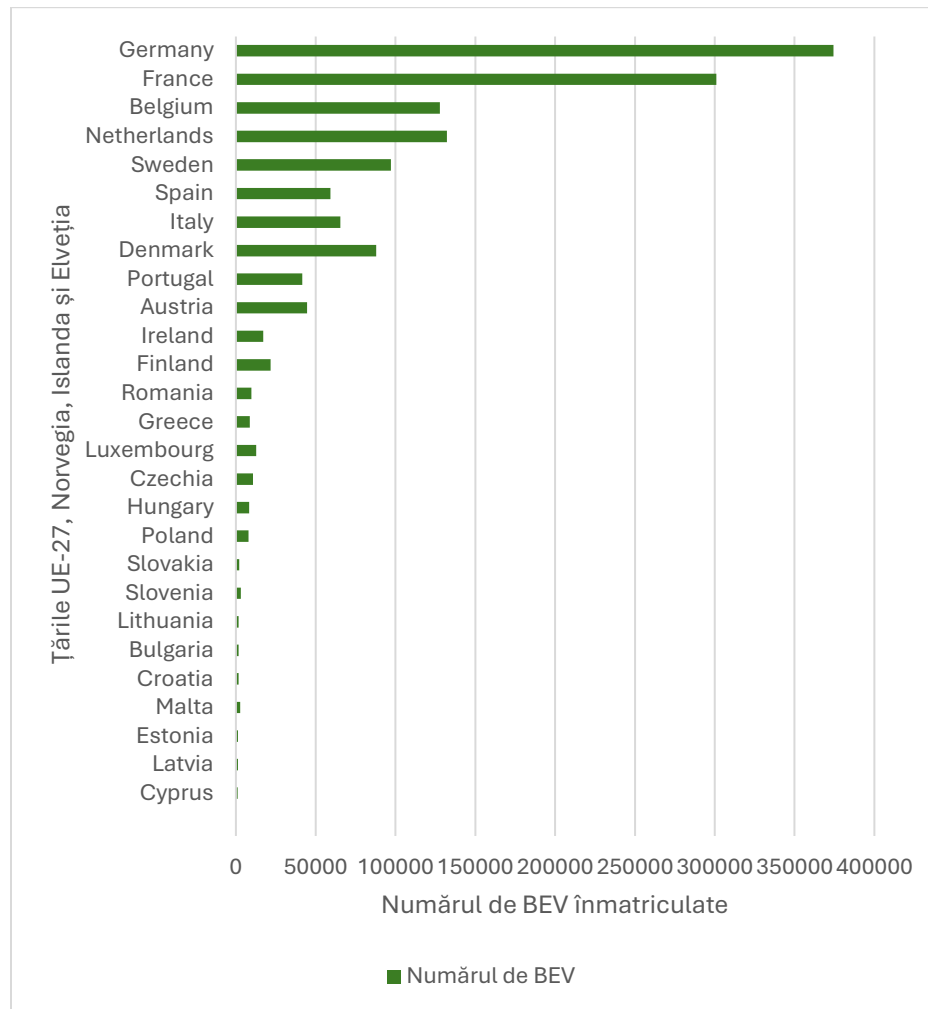


Fig. 2 Înmatriculările noi de BEV din anul 2024 în țările UE-27 [1]

În perioada 2017 – 2024, cele mai vândute și înmatriculate branduri în țările analizate sunt Tesla, cu peste 900.000 BEV, Volkswagen, cu aproximativ 775.000 BEV, și Renault, cu peste 500.000 BEV, după cum se observă în Figura 3 [2].

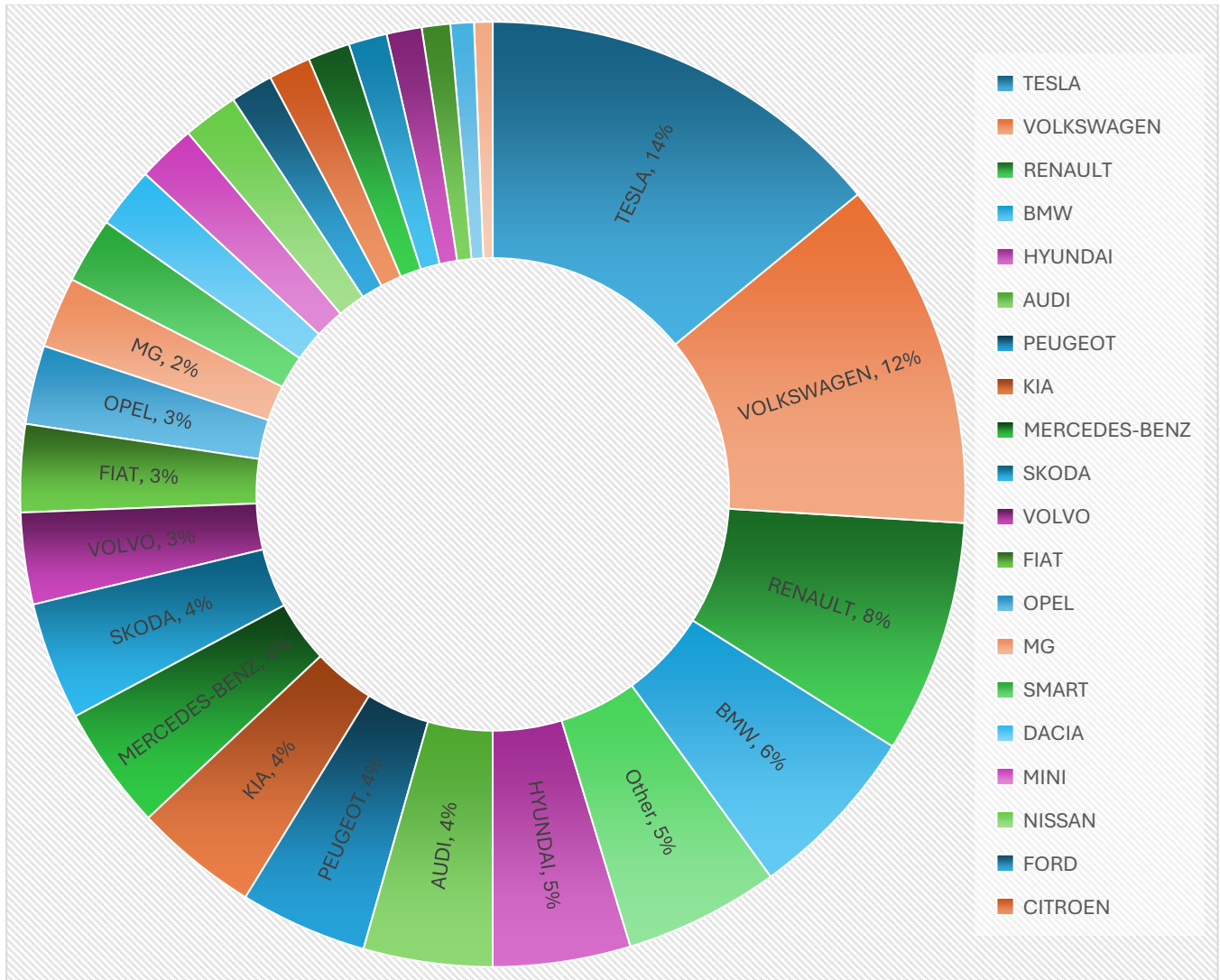


Fig. 3 Brandurile de vehicule electrice înmatriculate în țările analizate [2]

Pentru aceeași perioadă, în Figura 4 sunt evidențiate modelele de BEV care au înregistrat peste 100.000 de înmatriculări în țările analizate. Pe primele două locuri se situează Modelul Y și Modelul 3 de la Tesla, cu aproximativ 400.000 de înmatriculări, urmate de modelul Zoe de la Renault, cu puțin peste 250.000 de înmatriculări [2].

Modelele identificate sunt analizate pentru a identifica tipul de baterie și caracteristicile tehnice specifice fiecărei electrochimii, care au potențial în reutilizarea ca sisteme de stocare a energiei electrice integrate în sistemele fotovoltaice. În Tabelul 1 sunt prezentați parametrii tehnici pentru bateriile Modelului Y de la Tesla. Se pot observa atât caracteristicile bateriei, cât și date privind modalitățile de încărcare a bateriei, autonomie, consum, echivalentul de combustibil și prețul practicat pentru achiziția vehiculului din Germania [3].

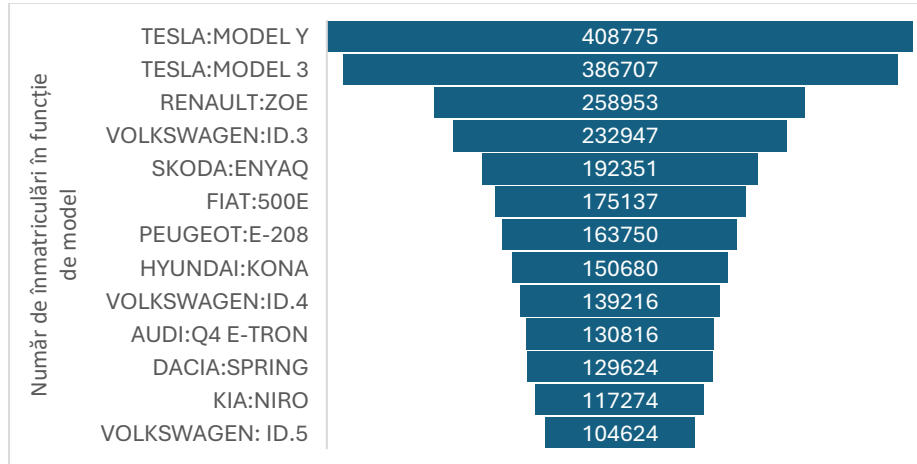


Fig. 4 Modelele de BEV cu peste 100.000 de înmatriculări în țările analizate [2]

Tabel 1. Caracteristicile tehnice ale bateriilor modelului Y, Tesla [3]

Tesla: Model Y					
	Long Range AWD (Juniper)	RWD (Juniper)	Premium AWD (Juniper)	RWD (CATL LFP)	Long Range AWD
Tip baterie	Litiu-ion	Litiu-ion	Litiu-ion	Litiu-ion	Litiu-ion
Denumire	LG M50	CATL LFP64	LG 5M	CATL LFP60	LG M48
Material catod	NMC	LFP	NMC	LFP	NMC
Capacitate nominală [kWh]	78,1	64	82	60	75
Capacitate utilă [kWh]	75	60	79	57	72
Număr celule	4416	no data	no data	108	4416
Arhitectură [V]	400	400	400	400	400
Tensiune nominală [V]	357	no data	no data	340	357
Garanție [ani]	8	8	8	8	8
Garanție [km]	192000	160000	192000	160000	192000
Putere încărcare [kW] AC	11	11	11	11	11
Timp încărcare [h]	8h15m	6h30min	8h30min	6h15min	7h45min
Viteză încărcare [km/h]	57	58	56	57	55
Putere încărcare rapidă (max) [kW] DC	250	175	250	170	210
Timp încărcare rapidă (45-364 km)	27min	24min	29min	23min	29min
Viteză încărcare rapidă [km/h]	700	650	680	630	610
Autonomie [km]	455	375	475	345	425
Consum [Wh/km]	165	160	166	165	169
Emisii CO2 [g/km]	0	0	0	0	0
Echivalent combustibil [l/100 km]	1.9	1.8	1.9	1.9	1.9
Preț [euro] - Germania	52.990	45.970	53.970	45.970	59.965



3. Analiza ciclului de viață a bateriilor

În Uniunea Europeană, regulamentul 2023/1542, adoptat de către Parlamentul și Consiliul European prevede cote minime de materiale reciclate din compoziția bateriilor comercializate pe piața UE, cu scopul promovării utilizării unor materii prime reciclate. Mai exact, regulamentul impune ca fiecare model de baterie, pe an și fabrică, să conțină cel puțin 16% Co, 6% Li, 6% Ni, începând din august 2031, și 26% Co, 12% Li, 15% Ni, începând din august 2036. Astfel, aceste materii prime trebuie să fie recuperate din deșeuri de fabricare sau post-consum ale bateriilor. Regulamentul încurajează reciclarea materiilor prime, reducerea dependenței de alte țări pentru procurarea acestora și susținerea obiectivelor UE în privința sustenabilității și a economiei circulare [4].

În consecință, ciclul de viață al unei baterii ce echipază un vehicul cu propulsie electrică nu poate fi privit singular, ci este nevoie de o analiză holistică, care să surprindă dinamica întregii piețe de baterii și din care să rezulte care baterii trebuie reciclate la finalul vieții (ca și sursă de energie pentru vehiculul electric) pentru îndeplinirea normelor minime de reciclare impuse, respectiv care pot fi refolosite ca și surse de stocare a energiei. O astfel de analiză necesită următoarele date de intrare:

- Numărul vehiculelor electrice vândute (pe an);
- Capacitatea și electrochimia bateriilor ce echipază vehiculele electrice (respectiv variația acestora în timp);
- Durata de viață a bateriilor;
- Starea de sănătate (SoH = State-of-Health) a bateriilor în funcție de vechime (degradarea acestora);

Pentru numărul anual de vehiculele electrice vândute în Europa se folosesc datele istorice disponibile [5]. Pentru vânzările până în 2040 se realizează diferite scenarii, în funcție de implementarea politicilor propuse în prezent (interdicția vânzării de autovehicule noi propulsate cu combustibili fosili începând din 2035), respectiv viteza de revenire a pieței autovehiculelor noi la valori pre-pandemie (~18 milioane de unități vândute pe an).

Evoluția în timp a capacității bateriilor (Figura 5), respectiv a electrochimiei (Figura 6), s-a realizat prin determinarea mediei datelor istorice, precum și a predicțiilor din [6] - [16], care prevăd o plafonare a capacității medii în jurul valorii de 80 kWh.

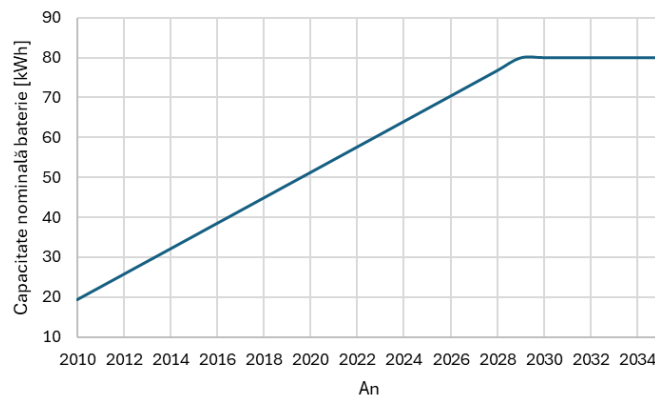


Fig. 5 Variația capacității nominale a bateriilor

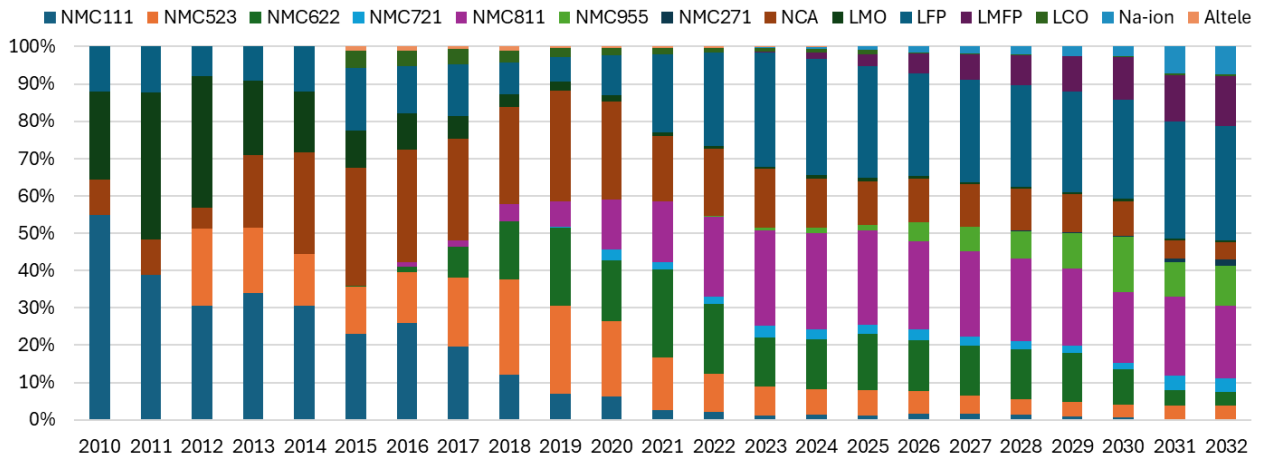


Fig. 6 Variația cotei de piață a electrochimiei bateriilor

Pentru estimarea ieșirii din uz a autovehiculelor electrice, s-au luat în considerare atât distribuția istorică a distanței parcurse în funcție de vechimea autovehiculelor convenționale (echipate cu motor cu ardere internă) [8], cât și limitarea indusă de către durata de viață a bateriilor (care, la rândul ei, variază odată cu anul de fabricare) [17], obținându-se distribuția prezentată în Figura 7. Astfel, se obține numărul de autovehicule electrice scoase din uz pentru fiecare an și prin aplicarea distribuției de SoH în funcție de vârsta bateriei, se calculează capacitatea reală, disponibilă pentru a fi utilizată pentru aplicații de stocare a energiei, pe an (Figura 8.a), respectiv cumulată în timp (Figura 8.b).

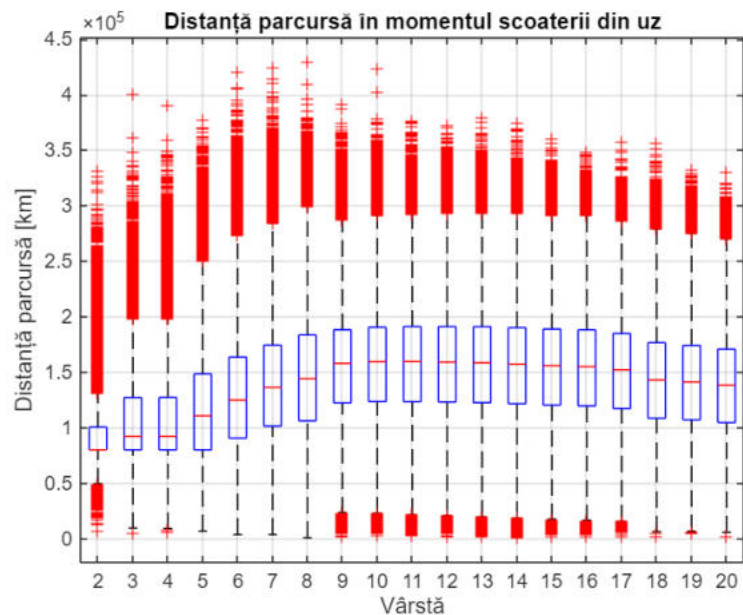


Fig. 7 Diagramă boxplot a distanței parcurse de către BEV în momentul scoaterii acestora din uz

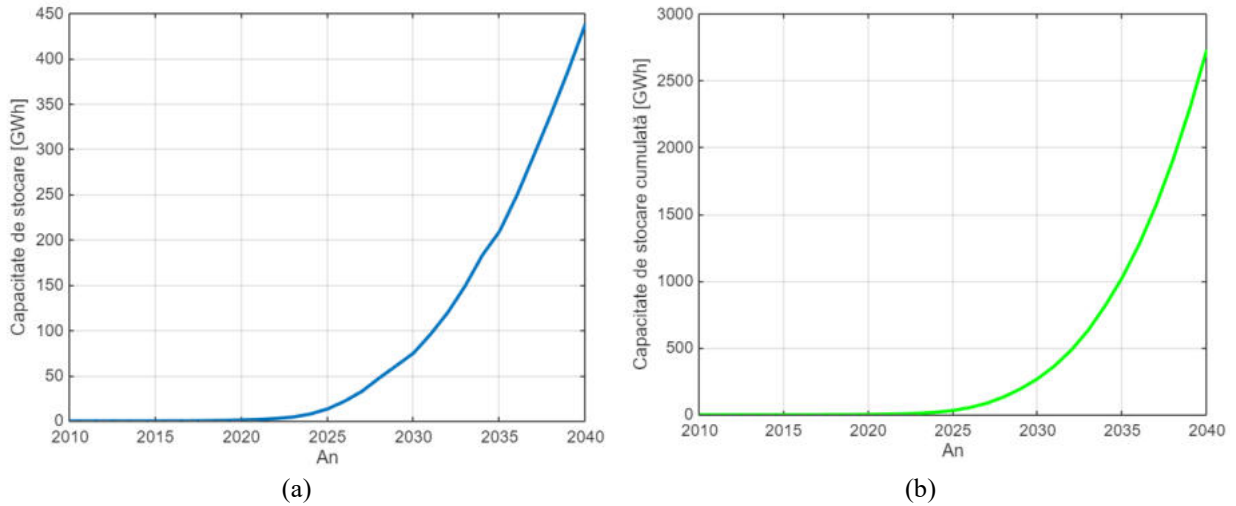


Fig. 8 Capacitate de stocare disponibilă prin scoaterea din uz a BEV (a) pe an; (b) cumulat în timp

Totodată, folosirea cotei de piață a electrochimiei și calculul proporțiilor masice ale materialelor ce formează compoziția chimică a acestora, permite determinarea masei totale ce ar deveni disponibilă din fiecare material în parte pentru o eventuală reciclare, ilustrată în Figura 9. Ulterior, prin aplicarea eficiențelor de reciclare, se obține masa de materie primă rezultantă, ce poate fi reintrodusă în procesele de fabricare ale noilor baterii.

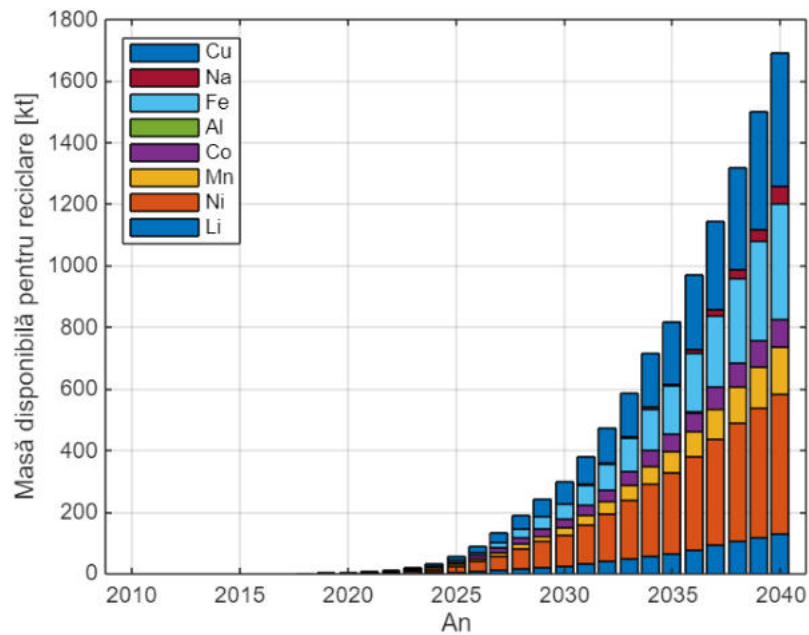


Fig. 9 Cantitate reciclabilă anual

Regulamentul UE 2023/1542 impune ca o parte din bateriile scoase din uz să fie reciclate, conform Figurii 10. Astfel, reciclarea se realizează imediat după scoaterea din uz din autovehiculul pe care l-au echipat. În algoritmul creat se propune reciclarea bateriilor care au cel mai scăzut SoH, până în punctul în care se ating cotele minime de reciclare impuse pentru fiecare materie primă.



Așadar, doar bateriile rămase pot fi integrate real în sisteme staționare de stocare a energiei electrice, conform Figurii 11. Pe baza istoricului acestora, se cunoaște (și se pot face predicții cu privire la) distribuția acestora în funcție de capacitate (atât nominală, cât și reală, aplicând valoarea SoH), electrochimie, vârstă, sau SoH, informații esențiale în proiectarea și realizarea unor sisteme omogene de stocare a energiei electrice, care să maximizeze capacitatea disponibilă și care să încetinească degradarea acestora.

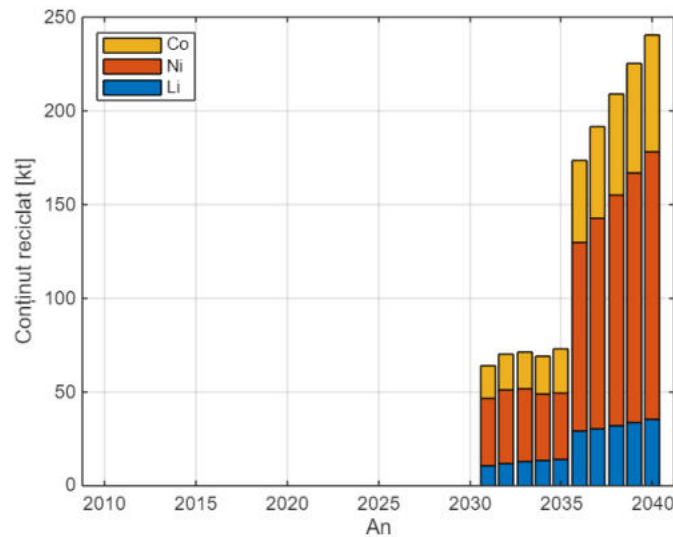


Fig. 10 Conținut impus de reciclare în bateriilor noi conform cotelor impuse de UE

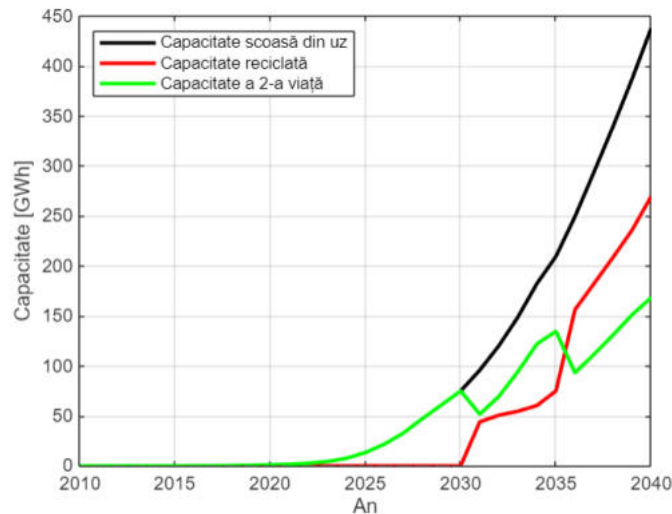


Fig. 11 Distribuția ciclului de viață al bateriilor

Suplimentar, se poate adăuga un alt sistem de distribuții normale care modelează durata de supraviețuire a bateriilor în a doua viață, în funcție de vârsta acestora [18]. Astfel, se poate obține rata naturală de finalizare a celei de-a doua vieți a bateriilor, care vor contribui cu materiile lor prime la îndeplinirea normelor europene de reciclare. Deși retragerea lor va scădea capacitatea de stocare a sistemelor din care au făcut parte, această acțiune va face loc pentru noile generații de



baterii provenite de la autovehiculele scoase din uz, care vor avea un SoH mai bun și capacități de stocare din ce în ce mai mari.

4. Diseminarea rezultatelor

Rezultatele obținute în urma analizei de piață pentru a identifica modelele de BEV înmatriculate în ultimii ani în țările membre UE-27 vor fi diseminate în revista de specialitate Applied Science, în cadrul ediției speciale “New Trends in Sustainable Energy Technology”, având un factor de impact de 2.5 și fiind încadrată Q2 (termen limită pentru trimitere: Februarie 2026)

Rezultatele analizei de piață cu modelele de BEV înmatriculate în România vor fi diseminate la o conferință din domeniu IEEE (Advanced Power Systems 2026, termen limită trimitere: Ianuarie 2026).

Rezultatele obținute în analiza ciclului de viață a bateriilor la nivelul UE vor fi diseminate în Jurnalul Green Energy and Intelligent Transportation, pentru a onora invitația primită, având un factor de impact 16.4 și fiind încadrată Q1 (termen limita pentru trimitere: Decembrie 2025).

Bibliografie

- [1] Agenția Europeană de Mediu – EEA, New registrations of electric cars in Europe, 6 Noiembrie 2025, <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/new-registrations-of-electric-vehicles>, accesat în 10 Noiembrie 2025.
- [2] EU-EVS, <https://eu-evs.com>, accesat în 16 Noiembrie 2025.
- [3] Electric Vehicle Database, <https://ev-database.org/>, accesat în 17 Noiembrie 2025.
- [4] THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, *REGULATION (EU) 2023/1542 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*. 2023.
- [5] Agenția Internațională de Energie, Global EV Data Explorer, 31 Iulie 2025, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer>, accesat în 2 Noiembrie 2025.
- [6] Battery monitor 2024/2025. The value chain between economy and ecology. 2025.
- [7] Bolech, M., Rossi, M., van Berkum, S.,. *Battery composition*. 2023.
- [8] Casals, LC., Etxandi-santolaya, M., Bibiloni-mulet, PA., Corchero, C.,. *Electric Vehicle Battery Health Expected at End of Life in the Upcoming Years Based on UK Data*. 2022.
- [9] Dunn, J., Slattery, M., Kendall, A., Ambrose, H., Shen, S.,. *Circularity of Lithium-Ion Battery Materials in Electric Vehicles*. Environ Sci Technol. 2021:5189–5198.
doi:10.1021/acs.est.0c07030
- [10] European Parliament.,. *Powering the EU 's future : Strengthening the battery industry*. 2025.
- [11] International Energy Agency.,. *Global EV Outlook 2025 Expanding sales in diverse markets*. 2025.
- [12] International Renewable Energy., Agency.,. *Critical materials. Batteries for electric vehicles*. 2024.



- [13] Kampker, A., Heimes, HH., Offermanns, C., Frank, M., Klohs, D.,. *Prediction of Battery Return Volumes for 3R : Remanufacturing , Reuse , and Recycling*. 2023.
- [14] Kastanaki, E., Giannis, A.,. *Dynamic estimation of end-of-life electric vehicle batteries in the EU-27 considering reuse , remanufacturing and recycling options*. *Journal of Cleaner Production*. 2025:136349. doi:10.1016/j.jclepro.2023.136349
- [15] Takahashi, M.,. *Plug-in Hybrid and Battery Electric Cars 2025-2045: Technologies, Players, Regulations, Market Forecasts*. 2024.
- [16] *Unlocking the Value of the EU Battery Passport*. 2024.
- [17] *Navigating the unknowns : drivers and projections for EV battery recycling*. 2024
- [18] Fallah, N., Fitzpatrick, C.,. *Exploring the state of health of electric vehicle batteries at end of use ; hierarchical waste flow analysis to determine the recycling and reuse potential*. *Journal of Remanufacturing*. 2024:155–168. doi:10.1007/s13243-024-00137-4.