CZU: 332.142.6 https://doi.org/10.59295/dnwe2025.12

THE PRODUCT LIFE CYCLE IN THE CIRCULAR ECONOMY AND THE INDUSTRY 4.0 PARADIGM

Andrei POPA
Bogdan Petriceicu Hasdeu State University of Cahul, 1 Independence Square, Cahul, Republic of Moldova
4andreipopa@gmail.com
ORCID iD: 0000-0003-2006-6923

Circular economy is an important issue for the future and the competitiveness of businesses. It aims the reconfiguration of production processes with a view to reducing their impact on the natural system, the development of new eco-sustainable products and the redesign of the business model. The Circular Economy fundamentally describes a regenerative economic system that expands the traditional linear concept of "produce – consume-throw" which same is named "End of Life" through the reduction, reuse, and recycling of materials and products. These principles, also referred as R-principles, provide insights into the general structure of returning the products.

Digitalization is crucial for transitioning to this model, serving as an enabler for enhancing circular principles. Thus the Industry 4.0 technologies have been recognized as key enablers of Circular economy. Using a literature review, this study explores how Industry 4.0 can support the implementation of a Circular Economy model.

***The purpose of this paper** is to present the experience of the ERASMUS-EDU-2023-CBHE "EnhaNcing MEchanical Engineering EDUcation in Moldova for Industry 4.0" (NEEDEDU4.0), ref. nr. 101128623 which aims to increase the skills and practical abilities of future engineers and managers in the manufacturing sector.*

Keywords: *NEEDEDU4.0, product life cycle, circular economy, Industry 4.0.*
JEL Classifications: *Q01, O33, L23*

INTRODUCERE

Paradigma dezvoltării durabile, ce își are începutul odată cu prezentarea in august 1987 în ONU a raportului „Viitorul nostrum Comun" (*Our Common Future*) (United Nations Organisation, 1987) denumit și *Raportul Brundtland* (Gro Harlem Brundtland – președintele Comisiei mondiale a ONU pentru Mediu și Dezvoltare), a devenit pilonul politicilor de dezvoltare a statelor lumii care se axează, în primul rând, pe asigurarea unui echilibru între aspectele sociale, economice și de mediu (ecologia și resursele naturale (Figura 1).

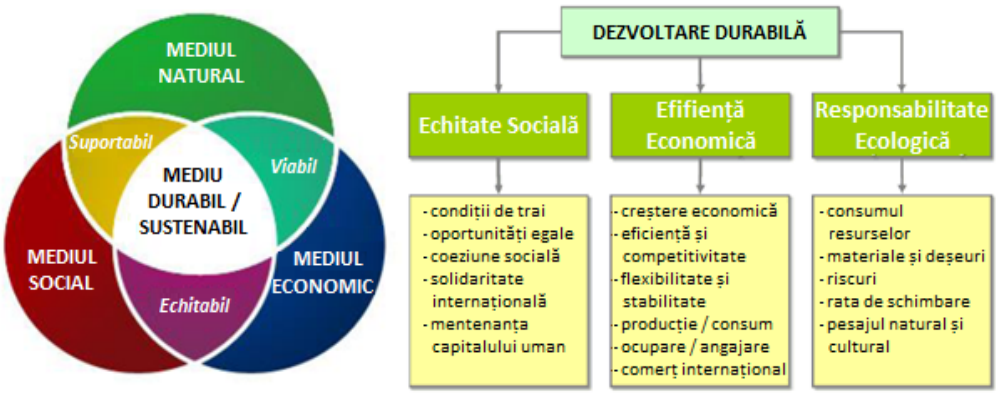


Figura 1. Dezvoltarea durabilă (diagrama Venn) și factorii ei de echilibru.
Sursa: *adaptat de autor în baza: (Jha, N.K., 2015).*

Uniunea Europeană, lansând în anul 2019 *Pactul verde European* (Pactul verde european, 2025) a adoptat un pachet de inițiative ce vizează politicile care ghidează o tranziție spre o economie „verde", cu scopul de a atinge neutralitatea climatică până în 2050. Această cale presupune transformarea UE într-o societate echitabilă și prosperă, cu o economie modernă și competitivă, bazată pe cele 17 Obiective de dezvoltare Durabilă (ODD) stabilite în *Agenda de dezvoltare durabilă*

2030 (United Nations Organisation, 2015). La fel, Republica Moldova, fiind semnatara Rezoluției ONU cu privire la Agenda de dezvoltare durabilă 2030, dar țară cu statut de candidat pentru aderarea la Uniunea Europeană, pentru a fi pregătită de etapa de armonizare a legislației naționale cu cea comunitară și de adoptarea acquis-ului comunitar, implementează obiectivele de dezvoltare durabilă conform Strategiei naționale *„Moldova Europeană 2030"* (Parlamentul Republicii Moldova. *Legea Nr. 315 din 17-11-2022*). În aspect economic (mediul economic) ODD-urile din Agenda 2030 și din strategia „Moldova Europeană 2023" sunt realizate prin *Programul de promovare a economiei verzi și circulare în Republica Moldova pentru perioada 2024-2028* (Guvernul Republicii Moldova., 2024).

O economie circulară este un sistem economic care reduce *liniaritatea* sistemelor economice tradiționale și promovează utilizarea proceselor regenerative pentru a menține calitatea resurselor și a prelungi durata ciclului de viață a sistemului economic (Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M., 2017). În cadrul acestui sistem, este important să se examineze activitățile din cadrul ciclului de viață a unui produs, de la proiectare, până la fabricare și consum, pentru a identifica locurile (activități, procese) care necesită a fi schimbate cu scopul de reduce fluxul de materiale ieșite din circuitul economic.

Prezentul studiu a fost realizat în cadrul proiectului ERASMUS-EDU-2023-CBHE " „*EnhaNcing MEchanical Engineering EDUcation in Moldova for Industry 4.0*" (NEEDEDU4.0), nr. de ref. 101128623, cofinanțat de Uniunea Europeană, cercetările efectuate având scopul de a evidenția impactul conceptului Industriei 4.0 asupra *circularității economice* asupra activităților din diferitele faze ale ciclului de viață.

Proiectul NEEDEDU4.0 (Imaginea 1) are drept obiectiv accelerarea tranziției studiilor universitare în inginerie mecanică din Republica Moldova către Industria 4.0 și inițiativă urmărește îmbunătățirea angajabilității absolvenților în cadrul întreprinderilor naționale și internaționale și va contribui la atingerea acquis-ului Uniunii Europene privind tranziția verde și neutralitatea climatică (Lansarea proiectului NEEDEDU4.0.).

Imaginea 1. Logo-ul proiectului „NEEDEDU4.0".
Sursa: *(NEEDEDU4.0 „ Îmbunătățirea educației în domeniul ingineriei mecanice în Moldova pentru Industria 4.0". ERASMUS + Proiect nr. 101128623).*

Considerăm ca înțelegerea aspectelor paradigmei Industria 4.0 și a ciclului de viață al produsului în cadrul Economiei Circulare este esențială în procesul de pregătire a viitorilor manageri și ingineri, prin aceasta fiind garantat un viitor asigurat de impactul negativ al activității industriale asupra dezvoltării durabile.

MATERIAL ȘI METODĂ

În vederea atingerii obiectivelor cercetării, au fost utilizate următoarele metode: sinteza unor studii cu privire la Industria 4.0, Economia Circulară și ciclul de viață al produsului în cadrul Dezvoltării Durabile (sustenabile), formularea de concluzii și raționamente. În calitate de surse de informații au fost folosite o serie de publicații științifice în domeniul aferent, documente referitoare la economia circulară încadrate Pactul verde European, Programul de promovare a economiei verzi și circulare în Republica Moldova pentru perioada 2024-2028, precum și banca de date a BNS - Biroului Național de Statistică al Republicii Moldova.

RESULTATE ȘI DISCUȚII

Industria, ca ramură economică de fabricare a bunurilor de producție și de consum, pe de o parte, contribuie la creșterea standardelor de viață și a bunăstării oamenilor, iar pe daltă parte, are un impact semnificativ asupra degradării mediului și a consumului de resurse naturale (Bjørnbet, M.M., Skaar, C., Fet, A.M., Schulte, K.Ø., 2021). Din punct de vedere istoric, această dihotomie a evoluat sub conceptul unei economii *liniare*, unde cererea consumatorilor pentru produse noi stimulează producția, iar produsele sunt aruncate atunci când consumatorul nu mai are nevoie de ele.

Conform datelor Biroului Național de Statistică al Republicii Moldova (BNS), la finele anului 2023, din cantitatea totală de deșeuri generate de toate tipurile de activități, cota majoră, de 75% (275503,4 tone) a revenit celor provenite din agricultura, horticultura, acvacultura, silvicultura, vânătoare și pescuit, prepararea si prelucrarea alimentelor (Figura 2), urmată de deșeurile municipale (16%) și de la instalații de tratare a reziduurilor și tratare a apei (5%).

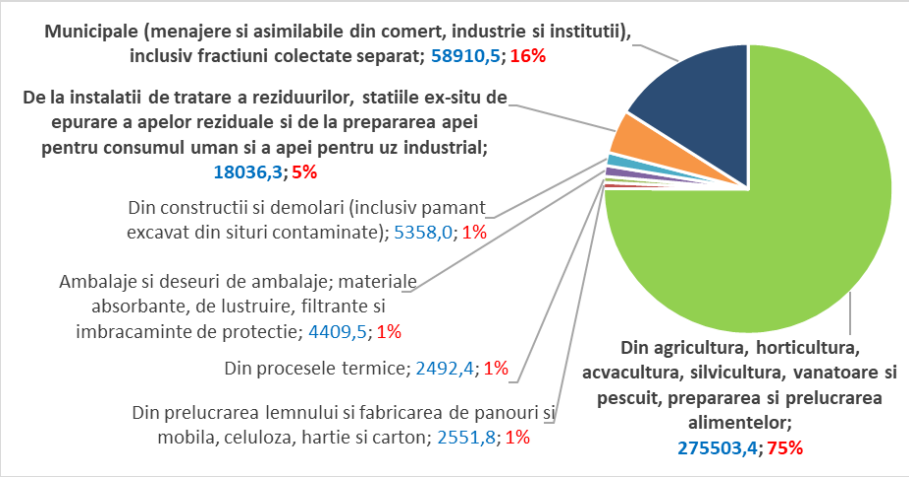


Figura 2. Generarea deșeurilor pe tipuri de activități (tone, % din total), în anul 2023.
Sursa: *întocmit de autor în baza datelor BNS (BNS, 2020-2023).*

Discrepanța raportului dintre deșeurile de toate tipurile **generate și cele valorificate** continuă să aibă un trend negativ, Astfel, dacă în anul 2020 din cantitatea totală 415045 tone de deșeuri generate erau valorificate 73,97% (307018,8 tone), atunci în anul 2023 au fost valorificate doar 51,53% (Figura 2).

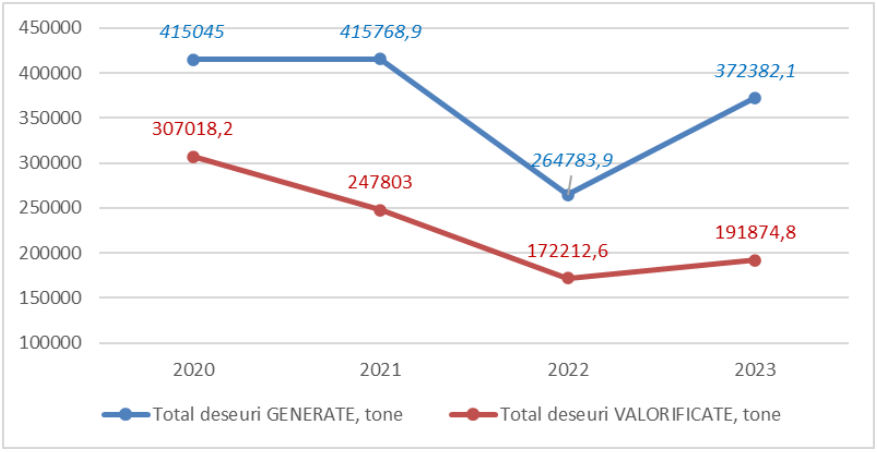


Figura 2. Republica Moldova: cantitatea anuală de deșeuri generate și valorificate, tone, 2020-2023.
Sursa: *Întocmit de autor în baza BNS (BNS, 2020-2023).*

Este necesar să fie menționată și **diminuarea numărului de întreprinderi inovatoare**, care constituie mobilul mediului inovațional din Republica Moldova și urmează să devină generatorul tehnologiilor „verzi". Datele BNS relevă scăderea numărului acestor entități cu 37,59% în perioada anilor 2015-2022 (Tabelul 1).

Tabelul 1. Republica Moldova: întreprinderi inovatoare pe activități economice, 2015-2022

Tip	2015-2016	2017-2018	2019-2020	2021-2022	Δ	Δ%
	(1)	(2)	(3)	(4)	4-1	[(4):(1)]*100-100
Întreprinderi inovatoare – total: inclusiv:	**673**	**605**	**448**	**420**	***-253***	***-37,59***
de produse	57	51	32	20	*-37*	*-64,91*
de procese	56	37	24	33	*-23*	*-41,07*
de produse si procese	42	31	18	11	*-31*	*-73,81*
de metode de organizare	72	81	33	42	*-30*	*-41,67*
de metode de marketing	99	91	56	64	*-35*	*-35,35*
de metode de organizare si marketing	71	70	62	65	*-6*	*-8,45*
care au realizat mai multe tipuri de inovări (de produs, proces, metode de organizare si marketing)	276	244	223	185	*-91*	*-32,97*

Sursa: *întocmit de autor în baza datelor BNS (BNS, 2015-2022).*

Astfel, situația agregată descrisă mai sus confirmă faptul că în Republica Moldova este **o prezență masivă a activităților economice cu economie liniară** sau, altfel spus, **modelul „ia-fă-consumă-aruncă".**

În anul 1988, Allen V. Kneese, în lucrarea sa „Economia resurselor naturale" (Kneese, A. V., 1988), a introdus conceptul de „Economie Circulară" pentru a gestiona, atenua și măsura totalitatea sistemelor economice liniare clasice care există astăzi. Mai târziu, David W. Pearce și R. Kerry Turner, în anul 1990, în lucrarea „Economia resurselor naturale și a mediului" (Pearce, D.W., Turner, R.K., 1990), au descris legăturile puternice dintre mediu și economie, caracterizând mediul ca sursă, dar și ca receptor de deșeuri, și arătând că, în condițiile unei economii liniare (ia-produce-consumă-aruncă) deschise consumului de noi cantități de resurse și în lipsa unui sistem de reciclare încorporat în economie, mediul este, propriu-zis, ignorat, ceea ce, de fapt, înseamnă că este ignorată și economia.

Într-o economie circulară (Figura 4), produsele și materialele sunt păstrate în circulație prin procese precum întreținerea, reutilizarea, recuperarea, recondiționarea, reciclarea și compostarea (*Economia circulară: definiție, importanță și beneficii*., 2023).



Figura 4. Modelul economiei circulare.

Sursa: *(Economia circulară: definiție, importanță și beneficii., 2023).*

În Economia circulară deșeurile sunt folosite ca materie primă nouă, economisind resurse naturale, energie și timp. În plus, Economia Circulară corelează cu conceptul de Dezvoltare Durabilă, adică dezvoltă activități economice și consum de bunuri care nu dăunează mediului actual sau viitor. Prin urmare, legătura dintre aceste două concepte este armonioasă - aderarea la principiile Dezvoltării Durabile și eforturile de a atinge aceste obiective permit atingerea obiectivelor Economiei Circulare - așa cum sunt subliniate în Agenda 2030, în care șapte dintre cele 17 Obiective de Dezvoltare Durabilă sunt obiective ale Economiei Circulare.

Urmează să precizăm că în literatura de specialitate sunt utilizate două noțiuni „dezvoltare durabilă" și „dezvoltare sustenabilă" pentru a descrie același concept. Respectiv:

- ***dezvoltare durabilă*** este termenul cel mai des întâlnit în documentele oficiale și în limbajul academic în limba română, provenind din traducerea raportului Brundtland (Gro Harlem Brundtland – președintele Comisiei mondiale a ONU pentru Mediu și Dezvoltare, 1987) (United Nations Organisation, 1987),
- ***dezvoltare sustenabilă*** este o interpretare directă a termenului englezesc "*sustainable development*".

Conform Fundației Ellen MacArthur (Circular economy introduction), Economia Circulară se bazează pe trei principii care au ca scop:

1) Eliminarea deșeurilor și a poluării;
2) Returnarea produselor și materialelor cu valoare maximă;
3) Restaurarea naturii.

Vom mai menționa că, prin Hotărârea Guvernului Republicii Moldova nr. 495 din 10.07.2024 a fost aprobat *Programul de promovare a economiei verzi și circulare în Republica Moldova pentru perioada 2024-2028* (Guvernul Republicii Moldova., 2024), având ca scop promovarea principiilor economiei „verzi", implementarea în Republica Moldova a politicilor și practicilor economiei circulare în armonie cu dezvoltarea economică și bunăstarea socială. Programul stabilește trei obiective generale, susținute de planuri de activități și susținere financiară, care includ:

- Consolidarea cadrului de politici și instituțional, pentru promovarea principiilor economiei verzi și circulare.
- Impulsionarea tranziției spre o dezvoltare economică verde și circulară întru atingerea obiectivelor Pactului Vede European.
- Promovarea informării, educației și conștientizării în domeniul economiei verzi și circulare.

Prin acest program antreprenorii, întreprinderile, organizațiile de cercetare-dezvoltare (inclusiv universitățile), întreprinderile inovatoare pot obține suport în atingerea obiectivelor naționale de mediu ce vizează:

- Creșterea numărului angajaților/locurilor de muncă verzi în sectoarele prioritare de dezvoltare social-economică.
- Creșterea numărului de IMM-uri verzi (inclusiv celor care au primit granturi de la ODA sau care aplica eco-inovații sau producerea mai pură).
- Creșterea ratei eco-inovațiilor/tehnologiilor de mediu aplicate în practică de agenții economici, inclusiv în parcurile industriale și zonele economice libere etc.
- Creșterea ratei achizițiilor publice durabile/verzi cu aplicarea criteriilor eco.
- Lansarea procedurii de eco-etichetare și majorarea numărului de produse și servicii autohtone care dețin eticheta ecologică.
- Sporirea ratei de deșeuri reciclate din totalul deșeurilor formate (cu posibila dezagregare pe categorii de deșeuri (plastic, sticlă, hârtie/carton, metal, DEEE etc).
- Creșterea numărului de companii si organizații, care implementează standardele de management de mediu (ISO 14 001 și sistemele EMAS).
- Creșterea numărului de persoane/funcționari publici/ instruite privind Economia Verde și Evaluarea Strategică de Mediu.

Programul vizează alinierea întreprinderilor din Republica Moldova la obiectivele ale Pactului Verde European (Pactul verde european, 2025) care promovează dezvoltarea durabilă și a devenit un pilon central pentru politicile Uniunii Europene, precum și la prioritățile stabilite de Strategia Națională de Dezvoltare „Moldova Europeană 2030" (Parlamentul Republicii Moldova) pe termen mediu și lung. Acest deziderat implică orientarea strategică a Republicii Moldova spre o creștere economică sustenabilă, dezvoltare socială echitabilă, generare de noi locuri de muncă și responsabilitate față de mediul înconjurător.

În acest context, Economia Circulară descrie, în esență, un *sistem economic regenerativ* care extinde ciclul de viață al produsului din conceptul liniar tradițional al modelului „*ia-fă-consumă-aruncă*" (Economia circulară: definiție, importanță și beneficii., 2023) (numit și „*sfârșitul ciclului de viață utilă*") prin **R**educerea, **R**eutilizarea și **R**eciclarea materialelor și produselor (Tabelul 2), numite și **principii R** ale Economiei Circulare.

Tabelul 2. Etapele de dezvoltare a Economiei Circulare în care pot fi implementate strategiile R

	Etapa	Caracteristici	Principiul R	Acțiunea de bază
Economie CIRCULARĂ ↑	**Utilizarea și fabricarea mai inteligentă a produselor**	▪ Faza de proiectare ▪ Cele mai sustenabile procese și tehnologii ▪ Adaugă valoare ▪ Utilizare și fabricare responsabile	**R0 Refuzare**	A face un produs inutil: funcția de eliminare sau de utilizare a unui produs diferit.
			R1 Regândire	A face un produs mai eficient: utilizarea în comun a produselor (de ex.: mai multe gospodării folosesc o singură instalație (centrală) termică sau utilizarea produselor multifuncționale.
			R2 Reducere	Reducerea consumului de resurse sau bunuri printr-o producție sau utilizare eficientă.
	Extinderea duratei ciclului de viață utilă a produselor și a componentelor acestora	▪ Faza de consum ▪ Utilizare optimă ▪ Conservarea și extinderea duratei ciclului de viață utilă a produselor	**R3 Reutilizare**	Reutilizarea produselor încă în stare funcțională, dar aruncate, în alte scopuri.
			R4 Reparare	Repararea și eliminarea defectelor pentru a menține funcționalitatea originală.
			R5 Recondiționare	Restaurarea și modernizarea produselor.
			R6 Refabricare / remanufacturare	Utilizarea pieselor din produsul vechi într-un produs nou cu aceeași funcție.
			R7 Reorientare	Utilizarea produselor sau pieselor vechi într-un produs nou cu o funcție diferită.
	Utilizarea rațională a materialelor	▪ Faza de consumare (sfârșitul ciclului de viață utilă) sau de returnare ▪ Captarea și păstrarea valorii ▪ Utilizarea deșeurilor ca resursă	**R8 Reciclare**	Reciclarea materialelor pentru a obține aceeași calitate (calitate înaltă) sau o calitate inferioară (calitate scăzută).
			R9 Recuperare	Incinerarea materialelor cu recuperare de energie.
Economie LINIARĂ	- Pierderea resurselor - Valoare pierdută - Poluarea mediului		**Îngropare sau incinerare**	

Sursa: adaptat de autor în baza (Larae Malooly, Tian Daphne, 2023; Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., Hanemaaijer, A., 2017; *About Circular Economy*., 2022).

„Principiile R" din Economia Circulară sunt un set de strategii care ghidează tranziția de la un model economic liniar la un sistem economic restaurator și regenerativ. În timp ce principiile „celor 3R" reprezintă fundamentul, diverse modele extinse încorporează pași mai detaliați, cum ar fi Regândirea, Repararea, Restaurarea, Recondiționarea, Reconstrucția, Reutilizarea, Recuperarea și Refuzarea, pentru a maximiza valoarea resurselor și a minimiza deșeurile prin extinderea duratei ciclului de viață utilă a produselor și materialelor.

Din multiplele principii R, cele **de bază** (cei 3R) sunt:

- ***Reducerea*** - cea mai eficientă strategie este prevenirea creării de deșeuri prin proiectare și fabricare sustenabile. (Get Acquainted with the Core Principles of a Circular Economy, 2024)
- ***Reutilizare***a - prelungirea duratei ciclului de viață utilă a unui produs sau material prin utilizarea acestuia din nou în scopul său inițial sau pentru a crea ceva nou. (Get Acquainted with the Core Principles of a Circular Economy, 2024); Larae Malooly, Tian Daphne, 2023)
- ***Reciclarea*** - descompunerea (dezmembrarea, separarea) produselor în materii prime pentru a crea articole noi, este adesea considerată o ultimă soluție în ierarhia circulară. (Larae Malooly, Tian Daphne, 2023; Kolar-Schandlbauer, G., Holly, F., 2025; What Is The Fourth Industrial Revolution?, 2018)

Pe baza celor 3R sunt formulate și adăugate principii care creează bucle (trasee circulare) mai scurte de utilizare a resurselor, dar care detaliază și extind acțiunea principiilor de bază:

- ***Regândirea*** - reconceperea designului unui produs, punându-se accent pe durabilitate, mentenabilitate și alte caracteristici circulare. (Larae Malooly, Tian Daphne, 2023;, Hübert, H.P.,2024; *About Circular Economy*., 2022)
- ***Repararea*** - repararea produselor defecte sau deteriorate pentru a le prelungi durata ciclului de viață utilă și a reduce cererea de produse noi. (Larae Malooly, Tian Daphne, 2023;, *Get Acquainted with the Core Principles of a Circular Economy*, 2024; Ribo, S., 2024)
- ***Recondiționarea*** - restaurarea produsului la o stare bună, de funcționare, ceea ce poate include adăugarea de noi caracteristici sau actualizarea aspectului său estetic. (Larae Malooly, Tian Daphne, 2023;, Segens, A., 2024)
- ***Refabricarea / remanufacturarea*** - dezasamblarea unui produs, recondiționarea (restaurarea) sau înlocuirea componentelor uzate și reasamblarea acestuia într-un produs complet funcțional. (Larae Malooly, Tian Daphne, 2023; Fohl, F., Rajčić, V., Ungureanu, V., Palermo, M., et al., 2025; Diaz, A., Schöggl, J.-P., Reyes, T., Baumgartner, R.J., 2021)
- ***Reorientarea*** - utilizarea unui produs sau material existent pentru o funcție diferită sau într-un context diferit. (Larae Malooly, Tian Daphne, 2023; Çimen, Ömer, 2023)
- ***Recuperare*** - recuperarea energiei sau a materialelor valoroase din produse care nu mai pot fi reutilizate sau reciclate, cum ar fi prin compostare sau prin recuperarea energiei din deșeuri. (Larae Malooly, Tian Daphne, 2023; Get Acquainted with the Core Principles of a Circular Economy, 2024)
- ***Refuzarea*** - alegerea conștientă de a nu consuma produse destinate să devină învechite sau care în mod inerent (adică prin însăși natura lor) sunt risipitoare de resurse. (Larae Malooly, Tian Daphne, 2023; Kolar-Schandlbauer, G., Holly, F., 2025)

Respectiv, la sfârșitul duratei lor de viață utilă, produsele Economiei Circulare pot fi reparate fiind apte pentru o nouă utilizare (în funcție de tipul de produs, material și scop) sau reutilizate sau, precum se practică (actualmente) în majoritatea cazurilor, sunt reciclate pentru a obține materii prime care stau la baza unei noi producții.

Aceasta este esența relației „*produs-deșeu-produs*", care pune accentul pe crearea condițiilor pentru o producție neîntreruptă, reducând simultan deșeurile de mediu și exploatarea resurselor naturale. Prin urmare, în Economia Circulară produsele sunt special proiectate și fabricate pentru a fi ușor reparate / modernizate sau dezasamblate ulterior, iar componentele lor să poată fi reciclate și apoi reintrate în ciclul de producție. În acest scop **Economia circulară (EC) și Industria 4.0** au pus bazele unei producții inteligente și sustenabile, bazată pe colectarea datelor în timp real.

Paradigma Industriei 4.0 se referă la transformarea tehnologică pe care societatea o experimentează în secolul XXI (Ross, Ph., Maynard, K., 2021) și care implică o nouă abordare a producției (fabricării), bazată pe introducerea masivă a tehnologiei informației în industrie, automatizarea la scară largă a proceselor de afaceri (*business processes*) și răspândirea inteligenței artificiale.

Industria 4.0 sau a patra revoluție industrială (Tabelul 3) promovează tranziția către o producție (proces de fabricare) complet digitalizată și automatizată, controlată de sisteme inteligente în timp real, în interacțiune constantă cu mediul extern și depășind limitele unei singure întreprinderi, cu perspectiva integrării bunurilor și serviciilor într-o rețea industrială globală.

Într-un sens larg, Industria 4.0 reprezintă un nou nivel de organizare a producției și de gestionare a lanțului valoric pe întregul ciclu de viață al produsului și își propune să obțină o productivitate crescută și o siguranță sporită a lucrătorilor prin eliminarea locurilor de muncă periculoase pentru sănătate.

Tabelul 3. Aportul celor 4 revoluții industriale la dezvoltarea economico-socială

Revoluția Industrială	Perioada	Inovație / descoperire	Rezultate
Prima	1760-1840	Mecanizare, puterea apei, puterea aburului	Tranziția de la economia agrară la cea industrială Dezvoltarea transportului
A doua	1871-1914	Producția în masă, liniile de asamblare, electricitatea	Căile ferate Electrificarea Producția în flux Diviziunea muncii
A treia	începând cu 1970	Computerizare și automatizare	Electronica și computerizarea Sisteme Informaționale Automatizarea și robotizarea
A patra (Industria 4.0)	începând cu 2011	Sisteme fizico-cibernetice (cyber-fizice)	*Întreprinderea inteligentă* - sisteme de producție (fabricare) cu interacțiunea oamenilor, mașinilor și sistemelor cyber-fizice conectate la datele colectate prin senzor și la modele (instalații, întreprinderi) virtuale de simulare a produceri. *Internetul lucrurilor și Internetul serviciilor* – sisteme cyber-fizice pentru planificarea, organizarea și monitorizarea fabricării producției și prestării serviciilor conform cererii individuale (personalizate). *Rețele de senzori* cu sisteme informaționale încorporate pentru a monitoriza și controla mediul fizic – distribuția automată a producției, energiei. *Rețele de consum* cu sisteme informaționale încorporate pentru a monitoriza și controla utilizarea și exploatarea bunurilor comune - permit accesul direct al producătorului la consumator și formarea economiei partajate (comune), de exemplu: folosirea în comun a autoturismului, stației (centralei) termice, instrumentarului și ustensilelor.

Sursa: *întocmit de autor în baza: (What Is The Fourth Industrial Revolution?, 2018; Четвертая промышленная революция Популярно о главном технологическом тренде XXI века., 2017).*

Conceptul de **„Industrie 4.0”** se bazează pe patru principii (Abele, E.,2016; Tarasov, I.V., 2018):

- ***interoperabilitatea*** oamenilor, mașinilor și sistemelor cyber-fizice (Întreprinderi Inteligente), care face posibilă ***comunicarea directă*** prin intermediul Internetului Lucrurilor și al Internetului Serviciilor;
- ***virtualizarea și transparența informațiilor***, precum și capacitatea sistemelor de a crea o copie virtuală a Întreprinderii Inteligente care este creată prin conectarea datelor senzoriale (din

procesele de monitorizare fizică) cu modele virtuale ale instalațiilor sau întreprinderilor (fabrici, uzine) și modele de simulare;

- ***asistență tehnică*** cu rezultate imediate (Big Data) ***din partea mașinilor*** către oameni în colectarea, combinarea și analizarea unor volume mari de date și în efectuarea unor sarcini care nu sunt sigure pentru sănătatea oamenilor;
- ***capacitatea sistemelor cyber-fizice*** din cadrul Întreprinderilor Inteligente ***de a lua decizii*** în mod independent și autonom.

Totodată, este necesar să menționăm că, în timp ce companiile încă se luptă să stăpânească Industria 4.0, următoarea revoluție, Industria 5.0, este deja în plină desfășurare, punând o dilemă pentru lideri - a investi în tehnologiile Industriei 4.0, pe de o parte, și a promova o viziune a afacerii axate pe oameni, sustenabilitate și reziliență, pe de alta. Industria 5.0 reprezintă o strategie care depășește eficiența și productivitatea ca unice obiective și consolidează responsabilitatea socială și contribuția industriei inteligente la dezvoltarea societății (Rupa, R.A., Saif, A.N.M., 2021).

Din aceste considerente, și iată de ce, este în folosul întreprinderilor să însușească și să aplice în activitatea sa principiile Economiei Circulare și a Dezvoltării Durabile. Pentru maximizarea succesului în realizarea acestui deziderat, există 5 (cinci) modele de afacere ce au scopul de a îmbunătăți procesul de tranziție de la o economie liniară la una circulară pentru a avea mai mult succes (Arponen, J., Simpanen, P., Töndevold, A.B., et.al., 2018), stimulând astfel reducerea ineficienței și creșterea valorii întreprinderilor:

1) ***Modelul Lanțului de Aprovizionare Circular*** (Circular Supply Chain) – model de afacere bazat pe *utilizarea energiei regenerabile, materialelor bio sau reciclabile*.
2) ***Modelul Platformei de Partajare*** (*Sharing Platform*) – un model de afacere bazat pe *furnizarea de servicii și schimbul de produse între consumatori*. Aceasta înseamnă că utilizatorul produsului nu este proprietarul acestuia și nu are nicio responsabilitate pentru acesta după utilizare. Acest model este utilizat în industria auto, turism și construcții.
3) ***Modelul de Prelungire a Duratei de Viață a Produsului*** (*Product Life Extension*) – în acest model de afacere, valoarea produsului și a materialelor consumate este „păstrată" mai mult timp, deoarece diverse *reparații și modernizări ale produselor existente* le prelungesc durata ciclului de viață. Compania are economii semnificative atât la materiale, cât și la toate celelalte costuri suportate de-a lungul lanțului valoric
4) ***Modelul de Recuperare a Resurselor*** (*Recovery&Recycling*) – un model de afacere care promovează eliminarea deșeurilor prin *reutilizarea materialelor și componentelor produselor cu durată de valabilitate expirată*. Acest model îmbunătățește direct eficiența economică a utilizării materiilor prime și reduce eliminarea atât a materiilor prime, cât și a deșeurilor;
5) ***Modelul Produsul ca un Serviciu*** (*Product as a Service*) – acest model de afacere presupune *folosirea produsului* de către consumator *pe baza unui contract de leasing*, în timp ce produsul rămâne proprietatea producătorului. Acest model este potrivit în special pentru toate produsele cu o durată lungă de viață.

CONCLUZII

Condițiile economice globale impun ca producătorii să își modifice obiectivul principal al afacerii, concentrat preponderent pe aspectul comercial (maximizarea profitului), spre aspecte mai largi, în care există interes pentru nevoile de mediu și sociale.

Modul în care proiectăm, producem și utilizăm în prezent produsele lasă multă valoare neutilizată și chiar irosită, pierdută, motiv pentru care trebuie să regândim economia liniară.

Scopul Economiei Circulare este de a maximiza timpul în care produsele, componentele și materialele sunt menținute în uz. Este un ciclu nesfârșit care deblochează potențialul neexploatat al valorii din cadrul lanțului valoric tradițional „*ia-fă-consumă-aruncă*".

Tehnologiile Industriei 4.0 sunt considerate esențiale pentru designul inovator de produse, unde produsul ajuns la sfârșitul ciclului de viață este recirculat (Ngan, S.L., How, B.S., Teng, S.Y., Promentilla, M.A.B., Yatim, P., Et, A.C., Lam, L., 2019).

Paradigma Economiei Circulare și progresele tehnologice ale Industriei 4.0 contribuie la promovarea inovării produselor și la crearea de valoare tehnică, ceea ce se reflectă în strategiile orientate spre valoare (Ghoreishi, M., Happonen, A., 2020; Seferlis, P., Varbanov, P.S., Papadopoulos, A.I., Chin, H.H., Klemes, J.J., 2021). Modelul economic regenerativ al economiei circulare, combinat cu Industria 4.0, transformă mașinile standard în echipamente inteligente care, pe lângă performanța lor tehnică, mai îmbunătățesc și managementul operațiunilor și producției, mentenanța (întreținerea) tehnică, performanța și productivitatea muncii (Chen, X., Eder, M.A., Shihavuddin, A., Zheng, D., 2021).

Economia Circulară utilizează deșeurile ca materie primă nouă, economisind resurse, energie și timp. Întreprinderile producătoare de bunuri utilizează economia circulară ca o nouă modalitate de a atinge obiectivele economice și financiare, și înlocuiesc treptat conceptul liniar cu unul circular. Prin reciclarea și utilizarea materiilor prime deja utilizate sau prin reutilizarea produselor, ciclul de viață al produsului este extins. Astăzi întreprinderile, aflate deja la faza de proiectare a produsului, se gândesc deja la cum să facă produsul reciclabil, acceptabil pentru mediu și asamblat într-un mod care să faciliteze utilizarea sau dezasamblarea acestuia în componentele sale constitutive. La fel, se utilizează materiale moderne care pot fi reutilizate, iar aspirația antreprenorilor este îndreptată către utilizarea surselor de energie regenerabilă, vântului, soarelui și apei, cu respectul cuvenit pentru ecosisteme și fără a deteriora resursele naturale.

Industria 4.0 contribuie la transformarea cu succes a întreprinderilor cu economie liniară în afaceri circulare și duce la o schimbare considerabilă a capacităților, mentalității și colaborării. Astăzi producția și consumul sunt dominate de Întreprinderile Inteligente care cuceresc tot mai mult teren prin individualizarea (personalizarea) cererii. Respectiv, succesul unui afaceri prospere derivă din Internetul Lucrurilor sau Internetul Serviciilor, senzori și analize de date – toate acestea îmbunătățind eficiența utilizării și reutilizării bunurilor (produselor), prelungindu-le astfel durata ciclului de viață utilă și, respectiv, reducând cererea de produse noi și irosirea resurselor din natură.

REFERINȚE

1. Abele, E. (07.03.2016). *Industry 4.0: the computerization of manufacturing*. [online] © TEKNIKER,.2016. Available online: https://www.tekniker.es/en/industry-4-0-the-computerization-of-manufacturing (accessed on 16 August 2025).
2. *About Circular Economy*. [online] © 2022 Circular Economy Portugal. Available online: https://circulareconomy.pt/en/about-circular-economy/#:~:text=To%20enable%20extended%20product%20lifetime%2C%20circular%20design,product%2Dservice%20systems%20around%20refurbishing%2C%20remanufacturing%20or%20repurposing (accessed on 22 September 2025).
3. Arponen, J., Simpanen, P., Töndevold, A.B., et.al. (2018). *Circular economy business models for the manufacturing industry Circular Economy Playbook for Finnish SMEs*. The Finnish Innovation Fund Sitra. – 171 p. [online] © 2025 SITRA. Available online: https://www.sitra.fi/wp/wp-content/uploads/2018/09/20180919_circular-economy-playbook-for-manufacturing_v1-0.pdf (accessed on 14 September 2025).
4. Bjørnbet, M.M., Skaar, C., Fet, A.M., Schulte, K.Ø. (2021). Circular economy in manufacturing companies: A review of case study literature. In: *Journal of Cleaner Production* , Volume 294, Article 126268. – 14 p. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126268 Print ISSN: 0959-6526, Online ISSN: 1879-1786. Available online: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621004881?via%3Dihub (accessed on 18 August 2025).
5. BNS – Biroul Național de Statistică al Republicii Moldova. Banca de date statistice. *Generarea deșeurilor pe tipuri si ani, 2020-2023*. Disponibil online: https://statbank.statistica.md/PxWeb/pxweb/ro/10%20Mediul%20inconjurator/10%20Mediul%20inconjurator__MED040__Intreprinderi/MED040600.px/?rxid=b2ff27d7-0b96-43c9-934b-42e1a2a9a774 (accesat la 29 August 2025).

6. BNS – Biroul Național de Statistică al Republicii Moldova. Banca de date statistice. *Intreprinderi inovatoare pe activitati economice si clase de marime, 2015-2022*. Disponibil online: https://statbank.statistica.md/PxWeb/pxweb/ro/40%20Statistica%20economica/40%20Statistica%20economica__24%20ANT__INO010/INO010100.px/?rxid=5aad211e-2f63-43c6-9796-f49f4cefe6cf (accesat la 29 August 2025).
7. BNS – Biroul Național de Statistică al Republicii Moldova. Banca de date statistice. *Valorificarea deșeurilor pe tipuri si ani, 2020-2023*. Disponibil online: https://statbank.statistica.md/PxWeb/pxweb/ro/10%20Mediul%20inconjurator/10%20Mediul%20inconjurator__MED040__Intreprinderi/MED040800.px/?rxid=b2ff27d7-0b96-43c9-934b-42e1a2a9a774 (accesat la 29 August 2025).
8. Chen, X., Eder, M.A., Shihavuddin, A., Zheng, D. (2021). A human-cyber-physical system toward intelligent wind turbine operation and mainte-nance. In: *Sustainability*, 13, Issue 2, Article 651.- 10 p. https://doi.org/10.3390/su13020561 EISSN 2071-1050. Available online: https://www.researchgate.net/publication/348351406_A_Human-Cyber-Physical_System_toward_Intelligent_Wind_Turbine_Operation_and_Maintenance (accessed on 29 August 2025).
9. Çimen, Ömer (2023). Development of a Circular Building Lifecycle Framework: Inception to Circulation. In: *Results in Engineering*, Volume 17, Article 100861. – 20 p. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100861 Online ISSN: 2590-1230. Available online: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259012302200531X#:~:text=8.%20Repurpose%20takes%20an%20item%2C%20preferably%20an,it%20for%20another%20purpose%20with%20different%20functionality (accessed on 25 Spetember 2025).
10. *Circular economy introduction. What is a circular economy?*, The Ellen MacArthur Foundation [online]. Available online: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview (accessed on 22 August 2025).
11. Diaz, A., Schöggl, J.-P., Reyes, T., Baumgartner, R.J. (2021). Sustainable product development in a circular economy: Implications for products, actors, decision-making support and lifecycle information management. In: *Sustainable Production and Consumption*, Volume 26, pp. 1031-1045. Online ISSN: 2352-5509. Available online: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550920314433 (accessed on 19 September 2025).
12. *Economia circulară: definiție, importanță și beneficii*. (01.06.2023). [online] © europarl.europa.eu.. Disponibil online: https://www.europarl.europa.eu/topics/ro/article/20151201STO05603/economia-circulara-definitie-importanta-si-beneficii (accesat la 22 August 2025).
13. Fohl, F., Rajčić, V., Ungureanu, V., Palermo, M., et al. (2025). *Circular Manufacturing*. [Chapter 5, pp. 69–91]. In: *Circular Economy Design and Management in the Built Environment A Critical Review of the State of the Art*. Springer, - 751 p. ISBN: 978-3-031-73489-2, ISBN 978-3-031-73490-8 (eBook). https://doi.org/10.1007/978-3-031-73490-8 Available online: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-031-73490-8.pdf (accessed on 12 September 2025).
14. *Get Acquainted with the Core Principles of a Circular Economy* (22.05.2024). [online] © 2023 Inogen Environmental Alliance, Inc. Available online: https://www.inogenalliance.com/blog-post/core-principles-circular-economy (accessede on 24 September 2025).
15. Ghoreishi, M., Happonen, A. (2020). New promises AI brings into circular economy accelerated product design: A review on supporting literature. In: *E3S web of conferences. EDP Sciences*, Volume 158, Article 6002. – 10 p. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015806002 eISSN: 2267-1242. Available online: https://www.researchgate.net/publication/340099855_New_promises_AI_brings_into_circular_economy_accelerated_product_design_a_review_on_supporting_literature (accessed on 31 August 2020).
16. Guvernul Republicii Moldova. (2024). *Hotărârea Nr. 495 din 10-07-2024 cu privire la aprobarea Programului de promovare a economiei verzi și circulare în Republica Moldova pentru perioada 2024-2028*. Publicat: 02-08-2024 în Monitorul Oficial Nr. 332-335 art. 664. [online] © Ministerul Justiției, 2025. Disponibil online: https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=144384&lang=ro (accesat la 12 Septembrie 2025).
17. Hübert, H.P. (20.10.2024). *R-strategies in the circular economy: Navigating the R-hierarchy*. [online] © Copyright Kezzler 2024. Available online: https://kezzler.com/blog/r-strategies/#:~:text=%E2%80%9CRethink%E2%80%9D%20involves%20designing%20products%20wit

h%20resource%20efficiency,helps%20minimize%20resource%20needs%20and%20maximizes%20utility (accessed on 24 September 2025).
18. Jha, N.K. (2015). *Integration of Green Design and Manufacturing for Sustainability in Undergraduate Engineering Curriculum*. [online] The Seventh International Conference on Engineering Education for Sustainable Development June 9-12, 2015, Vancouver, Canada. *Conference paper*. – 10 p. Available online: https://www.researchgate.net/publication/280599372_Integration_of_Green_Design_and_Manufacturing_for_Sustainability_in_Undergraduate_Engineering_Curriculum (accesat la 2 Septembrie 2025).
19. Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In: *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 127, pp. 221-232. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005 Print ISSN: 0921-3449, Online ISSN: 1879-0658. Available online: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917302835?via%3Dihub (accessed on 5 October 2024).
20. Kneese, A. V. (1988), The Economics of Natural Resources. In: *Population and Development Review*, vol. 14, Supplement, pp. 281-309. https://doi.org/10.2307/2808100 ISSN: 0098-7921, EISSN: 1728-4457. Available online: https://www.jstor.org/stable/2808100 (accessed on 6 September 2025).
21. Kolar-Schandlbauer, G., Holly, F. (24.03.2025). *The R-Strategies for a Circular Economy: From 3R to 10R – Pathways to Resource Conservation*. [online] © 2023 Inogen Environmental Alliance, Inc. Available online: https://efs.consulting/en/insight/r-strategies-cicular-economy/#:~:text=The%20circular%20economy%20was%20originally,thereby%20lowering%20emissions%20and%20pollution. (accessede on 24 September 2025).
22. Larae Malooly, Tian Daphne (09.11.2023). *R-Strategies for a Circular Economy*. [online] ©2023 Circularise. Available online: https://www.circularise.com/blogs/r-strategies-for-a-circular-economy (accessed on 25 September 2025).
23. *Lansarea proiectului NEEDEDU4.0*. [online] © 2025 Universitatea de Stat "Bogdan Petriceicu Hasdeu" din Cahul. Disponibil online: https://www.usch.md/lansarea-proiectului-neededu4-0/ (accesat la 7 Septembrie 2025).
24. *NEEDEDU4.0 „ Îmbunătățirea educației în domeniul ingineriei mecanice în Moldova pentru Industria 4.0”. ERASMUS + Proiect nr. 101128623*. [online] © 025 utm.md. Disponibil online: https://www.usch.md/lansarea-proiectului-neededu4-0/ (accesat la 7 Septembrie 2025).
25. Ngan, S.L., How, B.S., Teng, S.Y., Promentilla, M.A.B., Yatim, P., Et, A.C., Lam, L. (2019). Prioritization of sustainability indicators forpromoting the circular economy: The case of developing countries. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 111, pp. 314–331. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.001 ISSN: 1364-0321 (Print), ISSN: 1879-0690 (Online). Available online (download): https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119303077?via%3Dihub (accessed on 28 September 2025).
26. *Pactul verde european* [online]. © Consiliul European, Consiliul Uniunii Europene. Disponibil online: https://www.consilium.europa.eu/ro/policies/european-green-deal/ (accesat la 12 Septembrie 2025).
27. Parlamentul Republicii Moldova. *Legea Nr. 315 din 17-11-2022 pentru aprobarea Strategiei naționale de dezvoltare „Moldova Europeană 2030”.* Publicat: 21-12-2022 în Monitorul Oficial Nr. 409-410 art. 758. [online] © Ministerul Justiției, 2025. Disponibil online: https://www.legis.md/cautare/getResults?doc_id=134582&lang=ro (accesat la 13 Septembrie 2025).
28. Pearce, D.W., Turner, R.K. (1990), *Economics of natural resources and the environment*. Pub: Baltimore: Johns Hopkins University Press. - 392 p. ISBN-10: 9780801839870, ISBN-13: 978-0801839870.
29. Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., Hanemaaijer, A. (2017). *Circular economy: measuring innovation in the product chain (policy report)*. PBL Netherlands EnvironmentalAssesment Agency. Hague, 2017, PBL publication number: 2544. - 46 p. [online] Available online: https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf (accessed on 23 Septembrie 2025).
30. Ribo, S. *The 13R's of the circular economy: beyond the 3R's of reduce, reuse and recycle*. (23.10.2024). [online] © 2025 REVIVACK. Available online: https://revivack.com/the-13-rs-of-the-circular-economy-beyond-the-3-

rs/#:~:text=Fixing%20damaged%20products%20instead%20of%20throwing%20them,look%20the%20same%20as%20the%20other%20three (accessed on 22 September 2025).
31. Ross, Ph., Maynard, K. (2021). Towards a 4th industrial revolution. In: *Intelligent Buildings International*, Volume 13, Issue 3. pp. 159–161. https://doi.org/10.1080/17508975.2021.1873625 ISSN: 1750-8975 (Print), ISSN : 1756-6932 (Online). Available online: https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/17508975.2021.1873625?needAccess=true (accessed on 26 August 2025).
32. Rupa, R.A., Saif, A.N.M. (2021). Impact of green supply chain management (GSCM) on business performance and environmental sustainability: Case of a developing country. In: *Business Perspectives and Research*, Volume, 10, Issue 1, pp. 140–163. https://doi.org/10.1177/2278533720983089 ISSN: 2278-5337 (Print); ISSN: 2394-9937 (Online). Available online (download): https://www.researchgate.net/publication/348633013_Impact_of_Green_Supply_Chain_Management_GSCM_on_Business_Performance_and_Environmental_Sustainability_Case_of_a_Developing_Country (accessed on 28 September 2025).
33. Seferlis, P., Varbanov, P.S., Papadopoulos, A.I., Chin, H.H., Klemes, J.J.(2021). Sustainable design, integration, and operation for energy high-performance process systems. In: Energy, Volume 224, Article 120158. ISSN: 0360-5442 (Print) ISSN: 1873-6785 (Online). Available online: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221004072?via%3Dihub (accessed on 29 August 2025).
34. Segens, A. (29.07.2024). *The R Strategies - where circularity begins*. [online] LinkedIn Corporation © 2025. Available online: https://www.linkedin.com/pulse/r-strategies-where-circularity-begins-adrian-segens-frsa-ukohe/ (accessed on 23 September 2025).
35. Tarasov, I.V. (2018). Industry 4.0: Technologies and their impact on productivity of industrial companies. In: *Strategic Decisions and Risk Management*. Volume 2. pp. 62-69. https://doi.org/10.17747/2078-8886-2018-2-62-69 ISSN 2618-947X (Print), ISSN 2618-9984 (Online) Available online: https://www.jsdrm.ru/jour/article/view/772 (accessed on 23 August 2025).
36. United Nations Organisation (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. [New York]: UN, 4 Aug. 1987. - 374 p. [online] © UN Digitaly Library. Available online: https://digitallibrary.un.org/record/139811?v=pdf or https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf (accessed on 24 September 2025).
37. United Nations Organisation (2015). *Transforming our world:the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Resolution A/RES/70/1. - 40 p. [online] Available online: https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf (accessed on 24 August 2025).
38. *What Is The Fourth Industrial Revolution?* (18.06.2018). [online] © MEDIUM: Manufactory. Available online: https://medium.com/@Manufactory/what-is-the-fourth-industrial-revolution-2d4c501a9ec2 (accessed on 21 August 2025).
39. Zorpas, A.A. (2024). The hidden concept and the beauty of multiple "R" in the framework of waste strategies development reflecting to circular economy principles. In: *Science of The Total Environment*, Volume 952, Article 175508. ISSN: 0048-9697 (Print). Available online: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175508 (accessed on 22 August 2025).
40. *Четвертая промышленная революция Популярно о главном технологическом тренде XXI века*. (17.10.2017). [online] © 2005-2025 TADVISER,. Available at: https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%A7%D0%B5%D1%82%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BC%D1%8B%D1%88%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D1%8E%D1%86%D0%B8%D1%8F_(Industry_%D0%98%D0%BD%D0%B4%D1%83%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%8F_4.0 (accessed on 16 August 2025).