



PROIECT DE CERCETARE

RAPORT DE CERCETARE INTERMEDIAR ETAPA 4: IULIE-NOIEMBRIE 2023

**OPTIMIZAREA TEHNICO-ECONOMICĂ ȘI DE
MEDIU A INTEGRĂRII PROCESELOR PRE- ȘI
POST-COMBUSTIE DE CAPTARE CO₂
UTILIZÂND MEMBRANE POLIMERICE ÎN
SISTEME ENERGETICE ȘI NON-ENERGETICE**

Echipa de cercetare
Director de proiect: Ș.l.dr.ing. Nela SLAVU

OPTIMIZAREA TEHNICO-ECONOMICĂ ȘI DE MEDIU A INTEGRĂRII PROCESELOR PRE- ȘI POST-COMBUSTIE DE CAPTARE CO₂ UTILIZÂND **MEMBRANE POLIMERICE** ÎN SISTEME ENERGETICE ȘI NON-ENERGETICE

Obiectivul general al proiectului



creșterea performanțelor membranelor utilizate în procesul de captare CO₂ pentru a reduce efectele negative (penalizarea eficienței, sau costurile CAPEX și OPEX) ale integrării acestora în procesele industriale sau energetice.

Etape proiect de cercetare

Nr.	Titlu etapă	Lună de început	Lună de sfârșit	Livrabil tehnic
1	Dezvoltarea modelului matematic al procesului de captare a CO ₂ -ului prin membrane	1	4	L4
2	Modelarea și simularea procesului de captare a CO ₂ -ului prin membrane	5	9	L9
3	Studiu experimental al procesului de captare a CO ₂ -ului prin membrane	10	15	L15
4	Evaluarea tehnico-economică și de mediu a procesului de captare a CO ₂ -ului prin membrane	16	20	L20

EVALUAREA TEHNICO-ECONOMICĂ ȘI DE MEDIU A PROCESULUI DE CAPTARE CO₂ POST-COMBUSTIE

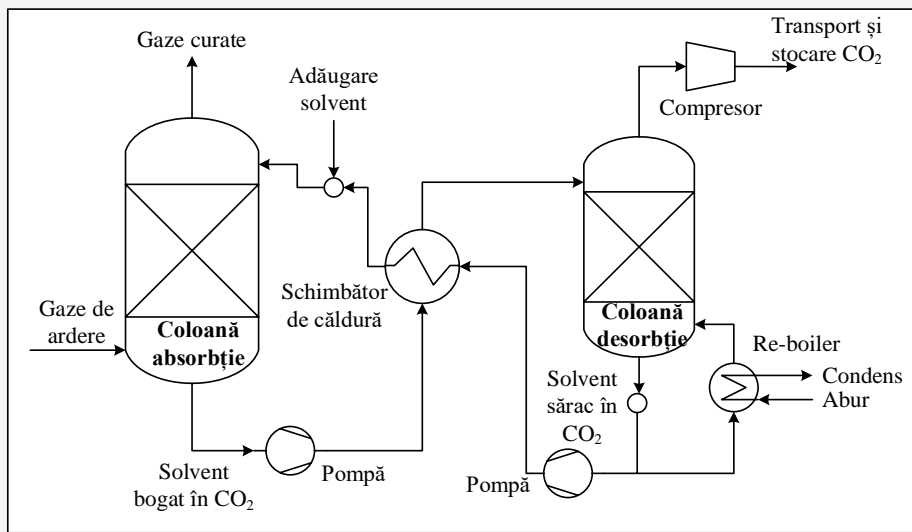
Integrarea procesului de captare CO₂ post-combustie în cadrul CTE

Date de intrare	
Flux de alimentare	Gaze de ardere CTE pe cărbune
Putere CTE	330 MW
Debit gaze de ardere	52430 kmol/h
Compoziție gaze de ardere (vol.%)	
CO ₂	13.3
N ₂	81.4
O ₂	5.2
SO ₂	0.05

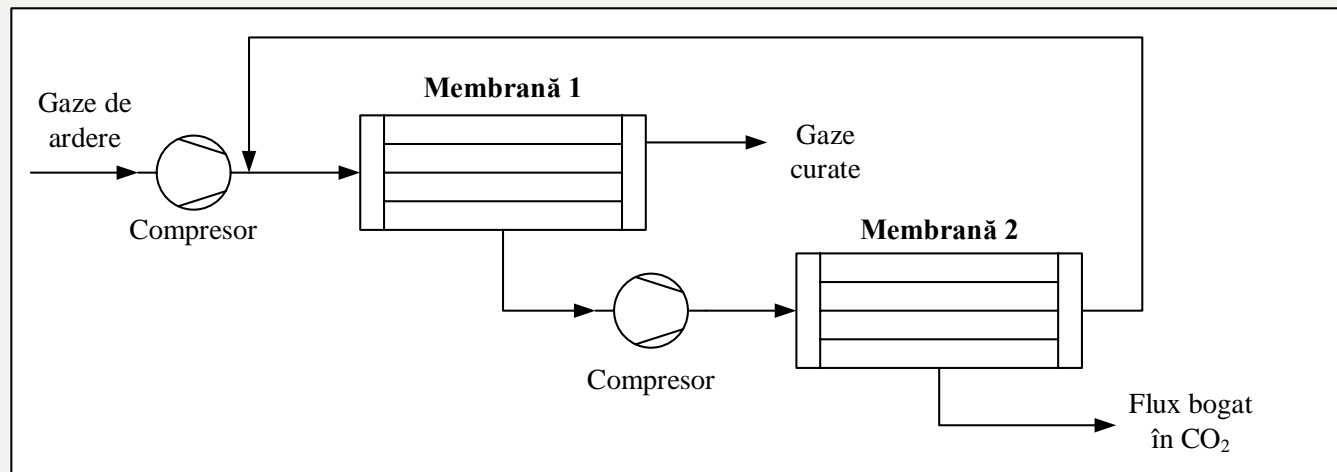
Cazuri analizate:

- **Cazul I:** CTE fără captare CO₂
- **Cazul II:** CTE cu captare CO₂ post-combustie prin absorbție chimică
- **Cazul III:** CTE cu captare CO₂ post-combustie prin membrane
- **Cazul IV:** CTE cu captare CO₂ prin membrane și absorbție chimică (așezare în paralel)
- **Cazul V:** CTE cu captare CO₂ prin membrane și absorbție chimică (așezare în serie)

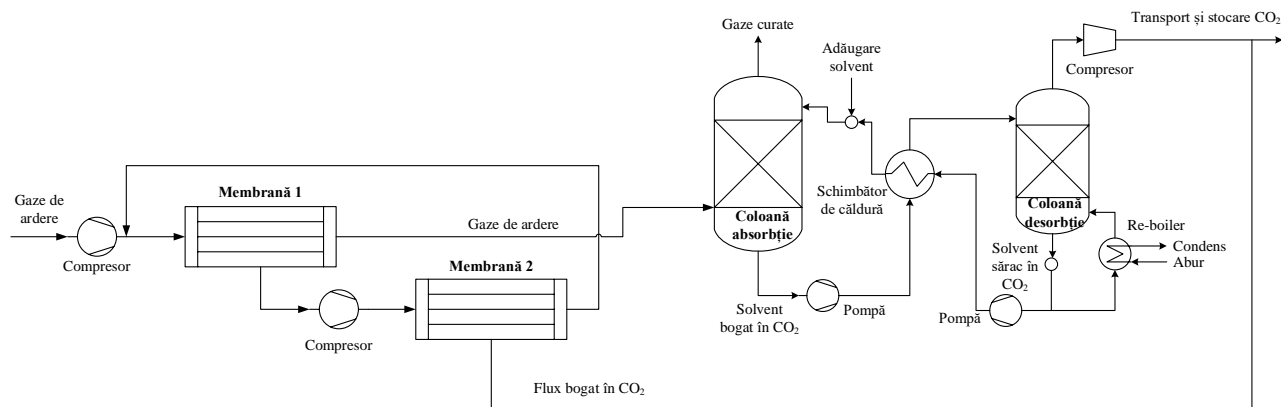
Procesul de captare CO₂ post-combustie



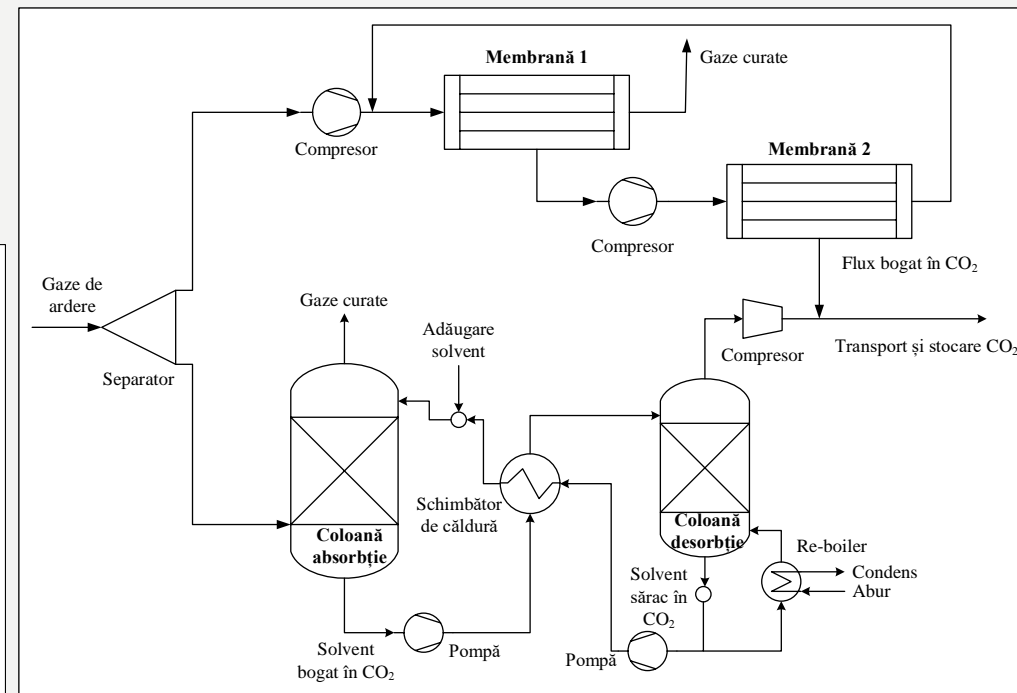
Proces de captare CO₂ post-combustie prin absorbție chimică (Caz II)



Proces de captare CO₂ prin membrane (Caz III)



Proces de captare CO₂ prin membrane și absorbție chimică (așezare în serie, Caz V)



Proces de captare CO₂ prin membrane și absorbție chimică (așezare în paralel, Caz IV)

3. EVALUAREA TEHNICO-ECONOMICĂ ȘI DE MEDIU A PROCESULUI DE CAPTARE CO₂ POST-COMBUSTIE

Integrarea procesului de captare CO₂ post-combustie în cadrul CTE

Optimizarea tehnico-economică și de mediu a integrării proceselor pre- și post-combustie de captare CO₂ utilizând membrane polimerice în sisteme energetice și non-energetice

Rezultatele cercetării

Date de intrare analiză economică

Putere netă, MW	330
Durata anuală de funcționare, h/an	7446
Factor de încărcare, %	85
Preț energie electrică, €/MWh	160
Rata de actualizare, %	8
Durata de studiu, an	30

Absorbție chimică (MEA 30%)

Unitate absorbție, M€	27.7
Pompă și schimbător de căldură solvent bogat/sărac în CO ₂ , M€	6.89
Unitate desorboție, M€	31.4
Unitate amină, apă, CO ₂ , M€	16.9

Unitate membranară

Cost investiție specific, €/m ²	50
Durată de viață, an	5
Compresor gaze de ardere, €/kW	850
Pompă vacuum, €/kW	1300
Pompă CO ₂ , €/kW	1350
Compresor CO ₂ , €/kW	1800
Înlocuire membrană	20% din costul inițial
Salarii, €/kW	15

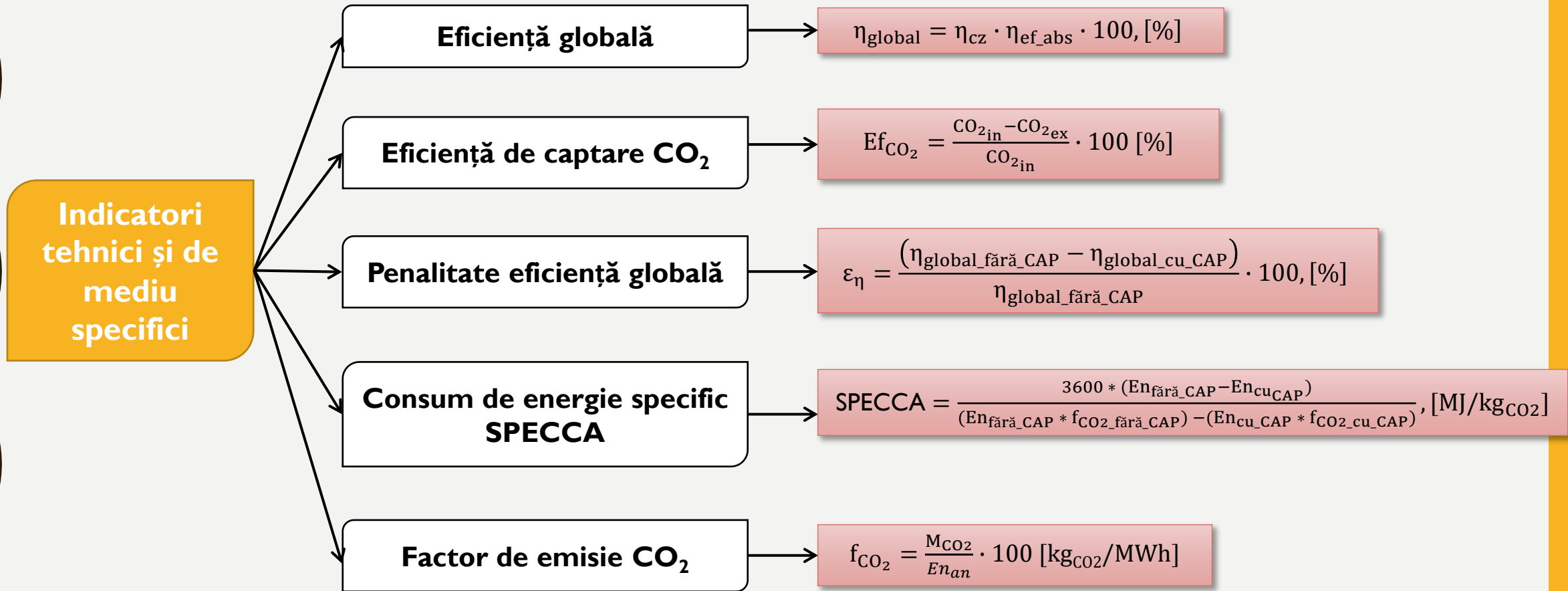
Compresie CO₂

Compresor CO ₂ , M€	11.7
Răcire, separare M€	0.87

Impactul integrării tehnologiei de captare CO₂ post-combustie asupra indicatorilor tehnici și de mediu

Optimizarea tehnico-economică și de mediu a integrării proceselor pre- și post-combustie de captare CO₂ utilizând membrane polimerice în sisteme energetice și non-energetice

Rezultatele cercetării



Impactul integrării tehnologiei de captare CO₂ post-combustie asupra indicatorilor economici

Optimizarea tehnico-economică și de mediu a integrării proceselor pre- și post-combustie de captare CO₂ utilizând membrane polimerice în sisteme energetice și non-energetice

Indicatori economici specifici

Costul actualizat al energiei electrice – LCOE

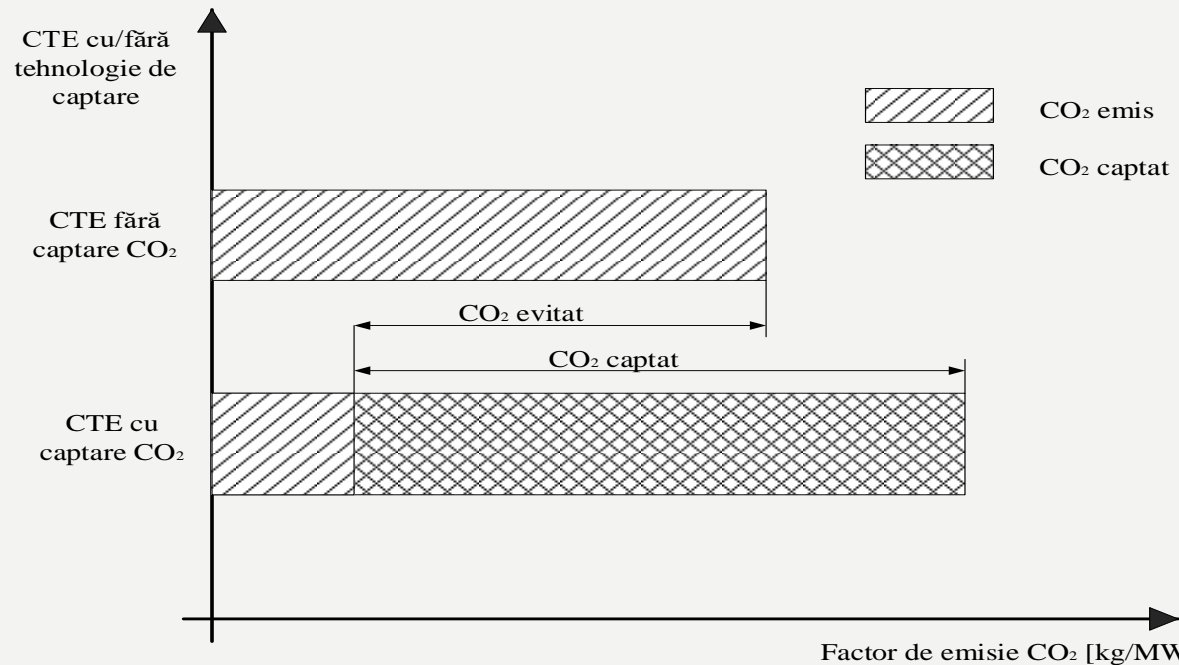
Costul actualizat al energiei electrice cu taxa emisiilor de CO₂

Costul de captare pentru o tonă de CO₂

$$LCOE = \frac{\sum_{i=1}^n (I + C_0 + C_m + C_d) \cdot (1+r)^{-i}}{\sum_{i=1}^n E_{el} \cdot (1+r)^{-i}} = \frac{(I + n \cdot C_0 + n \cdot C_m) \cdot (1+r)^{-n}}{n \cdot E_{el} \cdot (1+r)^{-n}}, [\text{€/MWh}]$$

$$Cost_{CO_2_{captat}} = \frac{LCOE_{cu_CAP} - LCOE_{fără_CAP}}{CO_2_{captat}}, [\text{€/t}]$$

CO₂ captat/evitat pentru CTE cu și fără integrarea unei tehnologii de captare



Rezultate – Integrarea procesului de captare CO₂ post-combustie în cadrul CTE

Indicatori	Caz I	Caz II	Caz III	Caz IV	Caz V
Putere brută, kW _e	356 190	494 784	511 095	536 230	553 756
Putere auxiliară , kW _e	26 190	164 784	181 095	206 230	223 756
Putere netă, kW _e	330 000	330 000	330 000	330 000	330 000
Debit cărbune, t/h	92.22	119.06	125.39	132.81	140.8
Eficiență de captare CO ₂ , %	-	90	90	90	90
Eficiență globală, %	45.78	35.45	33.67	31.78	29.98
Penalitate eficiență globală, %	-	22.56	26.45	30.58	34.51
Putere consumată proces membrane , kW _e	-	-	154 905	82 038	125 419
Putere consumată proces absorbție chimică, kW _e	-	138 594	-	98 002	72 147
Putere termică necesară, kW _{th}	-	277 410	-	154 730	80 400
Energie termică necesară, GJ/t _{CO2}	-	3.15	-	3.18	2.85
Cost investitie, €/kW	2 753.79	4 663.55	4 926.99	5 183.75	4 130.67
Factor de emisie CO₂, kg/MWh	741.15	95.71	100.77	106.75	113.18
Cost evitat CO ₂ , €/t _{CO2}	-	37.88	39.98	50.69	66.98
Cost captare CO ₂ , €/t _{CO2}	-	28.38	28.23	33.47	41.29
SPECCA _{th} , MJ _{th} /kg _{CO2}	-	3.55	4.42	5.46	6.60
SPECCA _{el} , MJ _{el} /kg _{CO2}	-	1.22	1.43	1.65	1.86
LCOE_{CO2tax}, €/kWh	0.0756	0.1000	0.1012	0.1078	0.1177
LCOE , €/kWh	0.0513	0.0969	0.0979	0.1043	0.114

Impactul integrării tehnologiei de captare CO₂ post-combustie asupra indicatorilor economico-financiari

Optimizarea tehnico-economică și de mediu a integrării proceselor pre- și post-combustie de captare CO₂ utilizând membrane polimerice în sisteme energetice și non-energetice

Indicatori economico-financiari

Venitul Net Actualizat – VNA

$$VNA = \sum_{i=1}^{n_f} \frac{IN_i - C_i - A_i}{(1+r)^i} - \sum_{i=1}^{n_r} I_i \cdot (1+r)^i, [\text{€}]$$

Rata Internă de Rentabilitate – RIR

$$VNA = \sum_{i=1}^n \frac{IN_i - C_i - I_i}{(1+RIR)^i} = 0, [\text{€}]$$

Termenul de Recuperare a Investiției Brut – TRB

$$VNA = \sum_{i=1}^{TRB} IN_i - C_i - I_i, [\text{€}]$$

Termenul de Recuperare a Investiției Net – TRN

$$VNA = \sum_{i=1}^{TRA} \frac{IN_i - C_i - I_i}{(1+r)^i}, [\text{€}]$$

Indicele de Profitabilitate – IP

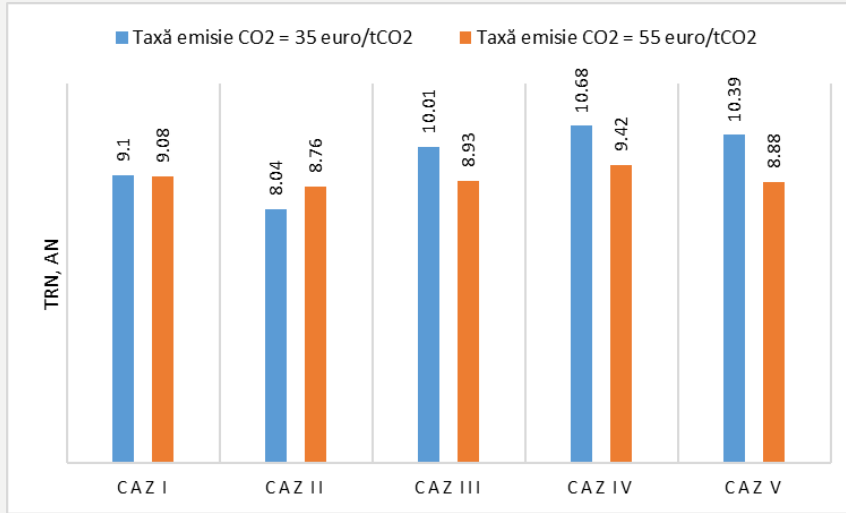
$$IP = \frac{VBA}{IA} = \frac{INA - CA}{IA} = \frac{VNA + IA}{IA}$$

Rezultate

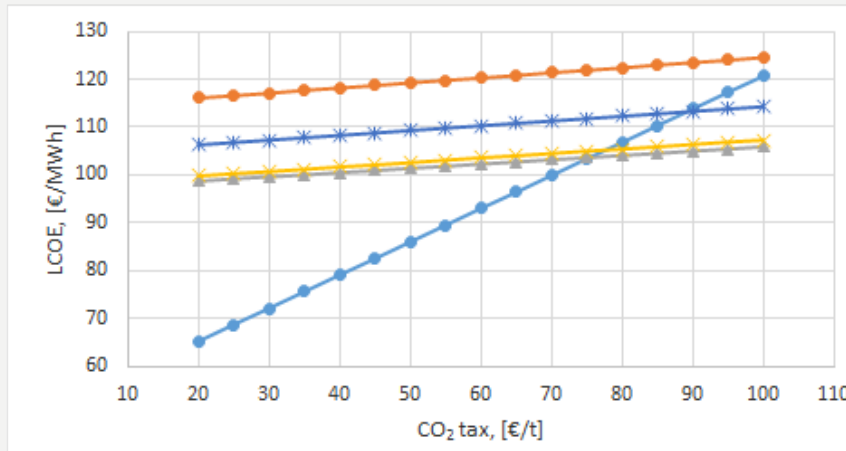
Indicatori	Caz I	Caz II	Caz III	Caz IV	Caz V
VNA, M€	1 001.5	1 497.2	1 258.6	1 159.7	978.9
RIR, %	17.73	20.04	16.2	15.27	15.66
TRB, an	7.06	6.47	7.53	7.85	7.71
TRN, an	9.1	8.04	10.01	10.68	10.39
IP, -	1.93	2.19	1.77	1.68	1.72

Impactul integrării tehnologiei de captare CO₂ post-combustie asupra indicatorilor economico-financiari

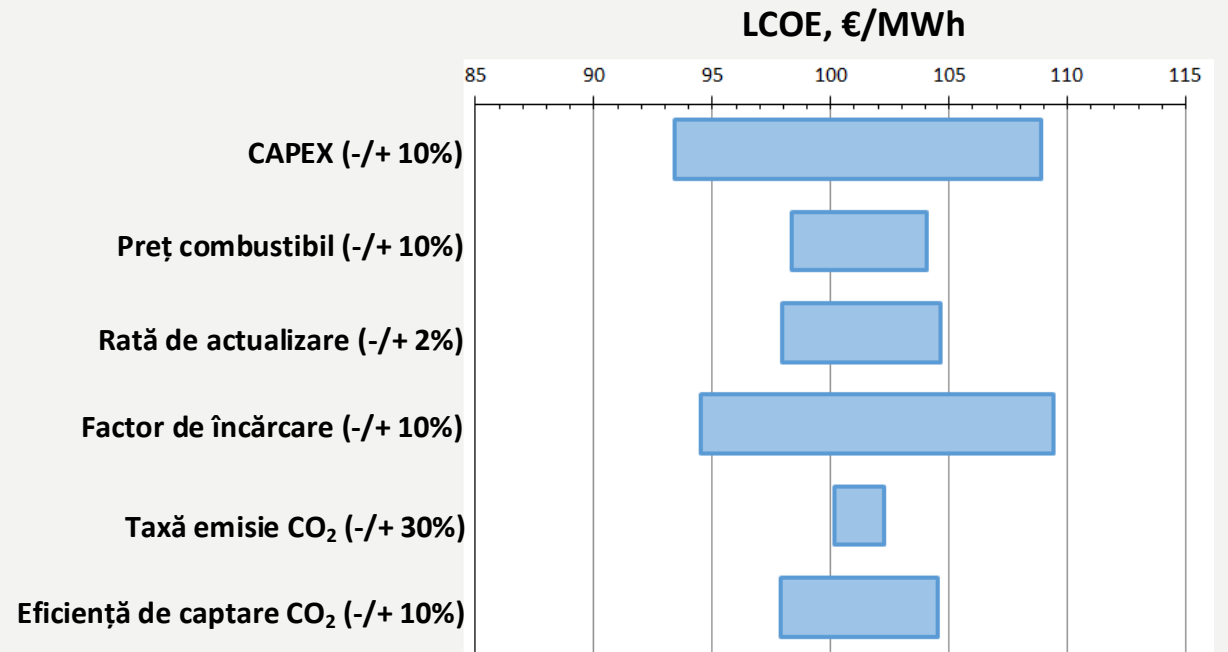
Optimizarea tehnico-economică și de mediu a integrării proceselor pre- și post-combustie de captare CO₂ utilizând membrane polimerice în sisteme energetice și non-energetice



TRN în funcție taxa emisiei de CO₂



LCOE în funcție taxa emisiei de CO₂



Analiza ciclului de viață

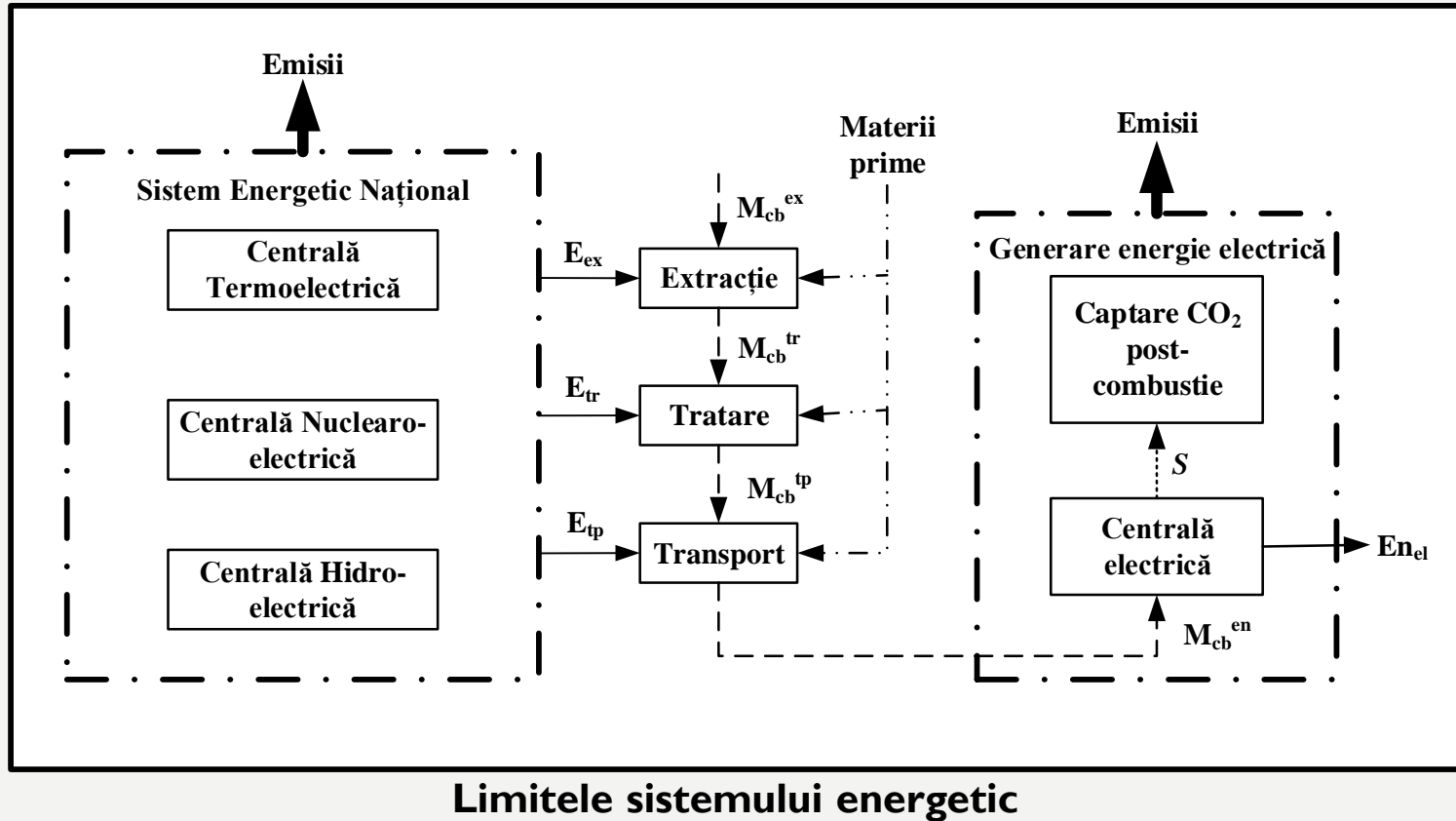
Optimizarea tehnico-economică și de mediu a integrării proceselor pre- și post-combustie de captare CO₂ utilizând membrane polimerice în sisteme energetice și non-energetice

Rezultatele cercetării

Colectarea datelor și a informațiilor

O definiție clară a scopului studiului și a limitelor sistemului energetic analizat

Colectarea datelor referitoare la fluxurile de materii prime și energiile de intrare și ieșire din câmpul de studiu al ciclului de viață al combustibilului

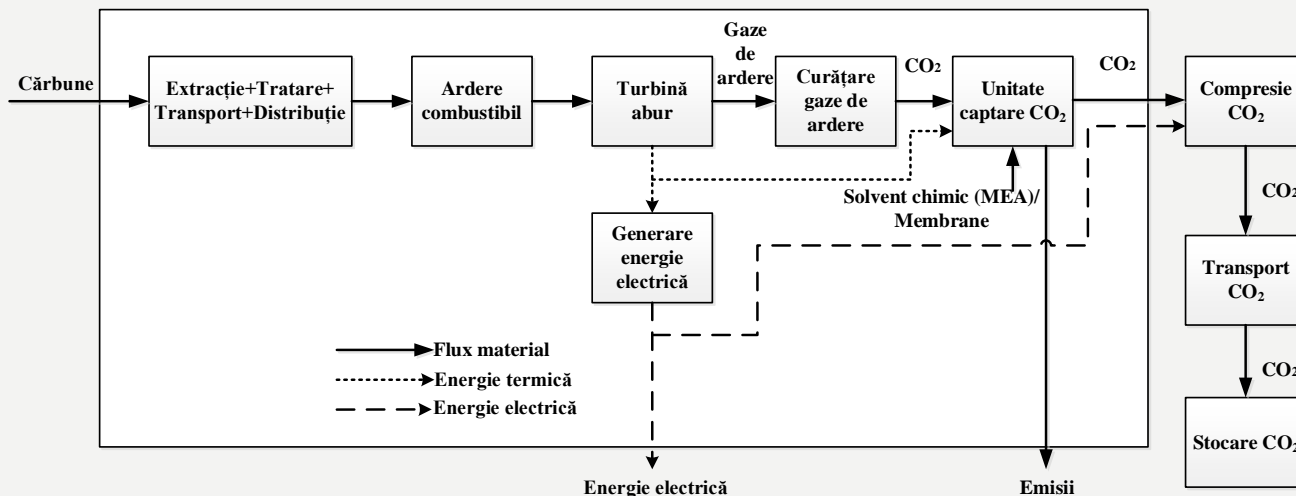


Unitatea Funcțională = U.F.

Cantitatea anuală de energie electrică

$P = 330 \text{ MW}$

$E_{an} = 1970 \text{ GWh/an}$



Procesele luate în considerare în ciclul de viață

Randamentele etapelor ciclului de viață al combustibilului

Etapă	Caz I	Caz II	Caz III	Caz IV	Caz V
η_c	0.45	0.35	0.33	0.31	0.29
η_{tp}			0.9		
η_{tr}			0.85		
η_{ex}			0.9		

Masele de combustibil pentru etapele ciclului de viață al combustibilului

Mase combustibil, [t/U.F.]	Caz I	Caz II	Caz III	Caz IV	Caz V
M_c	686 670	886 520	933 653	988 903	1 048 396
M_{tr}	762 966	985 023	1 037 393	1 098 781	1 164 885
M_{tr}	897 608	1 158 850	1 220 462	1 292 684	1 370 453
M_{tr}	997 342	1 287 611	1 356 069	1 436 315	1 522 725

Calculul indicatorilor de impact

$$I = \sum_i I_i \cdot M_i, [\text{kg/U.F.}]$$

Clasificarea și cuantificarea emisiilor

Clasă de impact	Poluant	Valoare
Epuizarea resurselor naturale – ADP, [kg_echiv_sb/kg]	Cărbune	0.00671
	CO ₂	1
Schimbările climatice – GWP, [kg_echiv_CO₂/kg]	CH ₄	21
	N ₂ O	310
	CFC – 11	4000
	CFC – 12	8500
	CFC – 13	11700
Eutrofizarea – EP, [kg_echiv_PO₄³⁻/kg]	NO	0.2
	NO _x	0.13
	NH ₃	0.35
Acidificarea – AP, [kg_echiv_SO₂/kg]	NH ₃	1.6
	NO _x (NO ₂)	0.5
Poluarea fotochimică – POCP, [kg_echiv_C₂H₄/kg]	SO ₂	1.2
	C ₂ H ₄	1
	CO	0.04
	CH ₂ O	0.3
	CH ₄	0.007
	NO _x	1.2
Toxicitatea umană – HTP, [kg_echiv_DCB/kg]	Praf (particule solide)	0.82
	SO ₂	0.096
	NH ₃	0.1
	Pb (impact asupra solului industrial)	292
	Pb (impact asupra solului)	3 300
	C ₆ H ₆	1 900
	Fenoli (impact asupra solului industrial)	0.52

Etapa de extracție

Poluant, kg/U.F.	Caz I	Caz II	Caz III	Caz IV	Caz V
NH ₃	49568	63994	67397	71385	75679
CO ₂	3713105	4793779	5048647	5347403	5669109
CO	3999	5163	5438	5760	6106
HCl	0.001356	0.001751	0.001844	0.001953	0.002071
HF	0.002453	0.003168	0.003336	0.003533	0.003746
H ₂ S	0.001057	0.001365	0.001437	0.001522	0.001614
CH ₄	643385	830638	874801	926567	982310
NO _x	19747	25495	26850	28439	30150
N ₂ O	329	425	447	474	502
PS	8318	10739	11310	11979	12700
SO ₂	43085	55625	58582	62049	65782

Etapa de tratare

Poluant, kg/U.F.	Caz I	Caz II	Caz III	Caz IV	Caz V
NH ₃	0.7408	0.9565	1.0073	1.0669	1.1311
CO ₂	106052	136918	144198	152731	161919
CO	40605	52423	55210	58477	61995
HCl	0.001054	0.00136	0.001433	0.001517	0.001609
HF	6.97E-05	9E-05	9.48E-05	0.0001	0.000106
H ₂ S	1.1E-06	1.42E-06	1.49E-06	1.58E-06	1.67E-06
CH ₄	13.0010	16.7848	17.6772	18.7232	19.8496
NO _x	1650	2131	2244	2377	2520
N ₂ O	3.0519	3.9401	4.1496	4.3951	4.6595
PS	117	151	159	169	179
SO ₂	1116	1441	1518	1608	1704

Etapa de transport

Poluant, kg/U.F.	Caz I	Caz II	Caz III	Caz IV	Caz V
NH ₃	22261	28739	30267	32059	33987
CO ₂	3428863	4426810	4662167	4938053	5235132
CO	3070	3963	4174	4421	4687
HCl	0.002783	0.003592	0.003783	0.004007	0.004248
HF	0.004748	0.00613	0.006456	0.006838	0.00725
H ₂ S	0.001032	0.001333	0.001404	0.001487	0.001576
CH ₄	6678	8622	9080	9618	10196
NO _x	16157	20859	21968	23268	24668
N ₂ O	431	556	586	620	658
PS	1414	1825	1922	2036	2158
SO ₂	10502	13559	14279	15124	16034

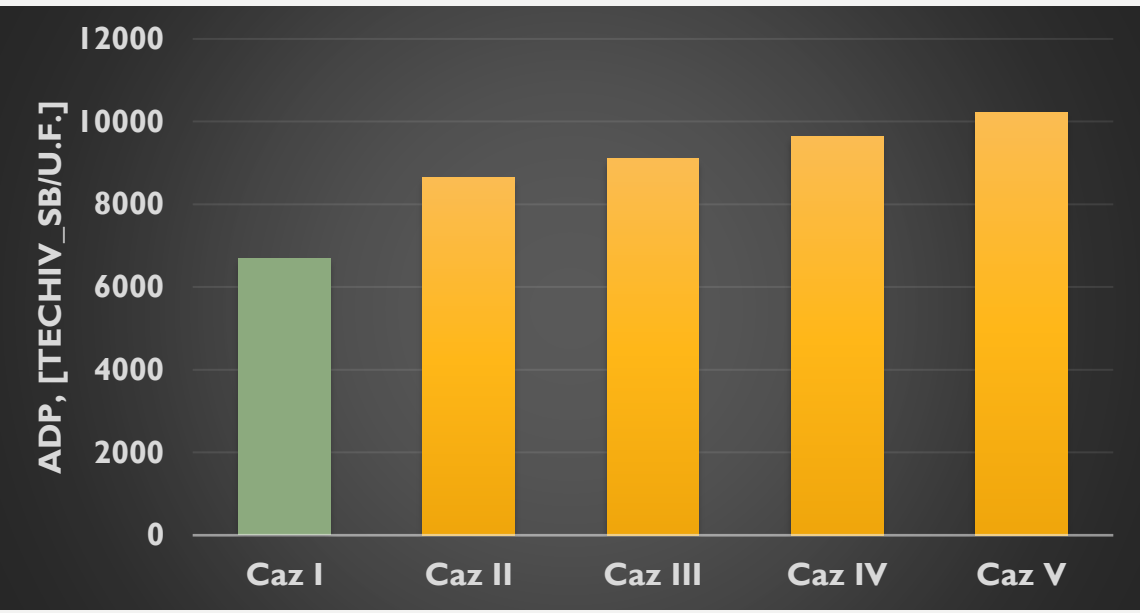
Etapa de combustie

Poluant kg/U.F.	Caz I	Caz II	Caz III	Caz IV	Caz V
CO ₂	1460318455	188533415	198557071	210306760	222959053
NO _x	7394527	9546654	10054216	10649178	11289844
SO ₂	8789378	11347466	11950770	12657962	13419479
PS	216210	279136	293977	311373	330105

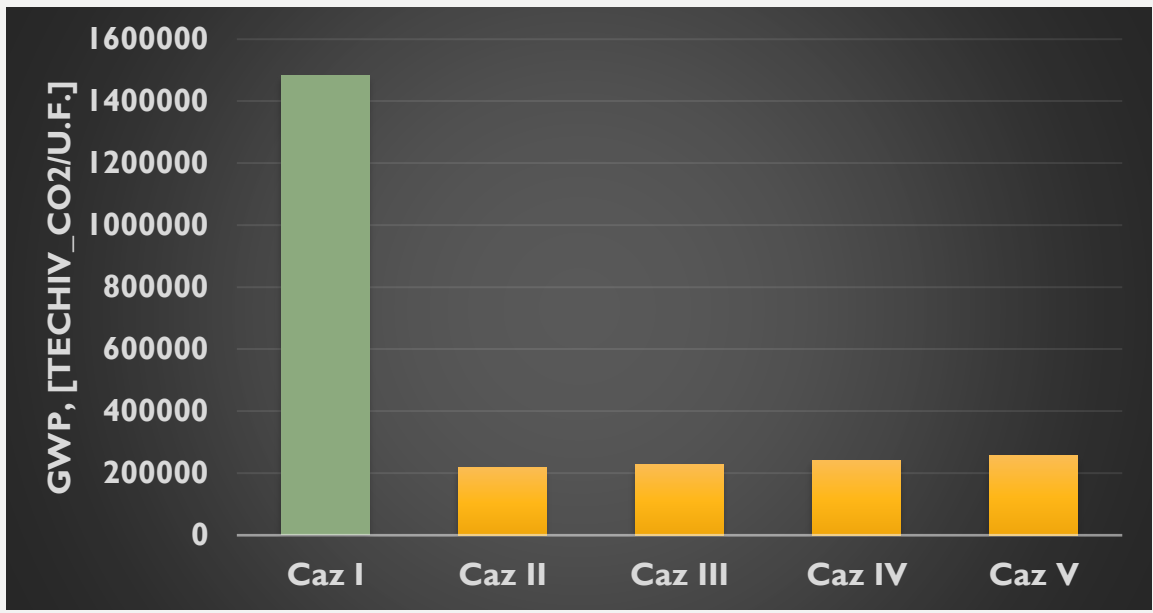
Optimizarea tehnico-economică și de mediu a integrării proceselor pre- și post-combustie de captare CO₂ utilizând membrane polimerice în sisteme energetice și non-energetice

Rezultatele cercetării

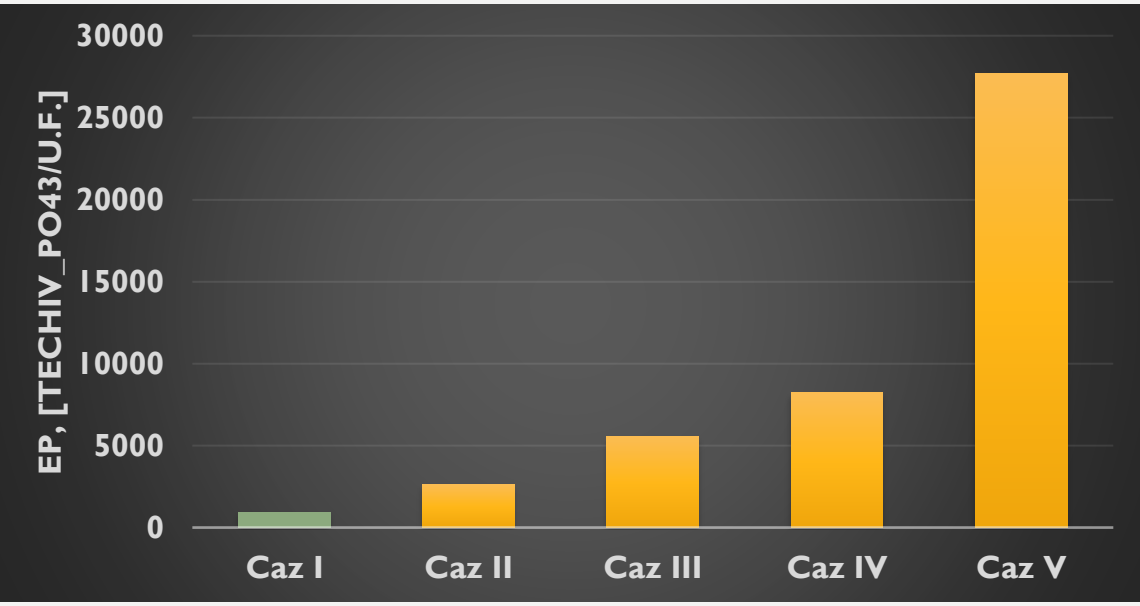
Epuizarea resurselor naturale



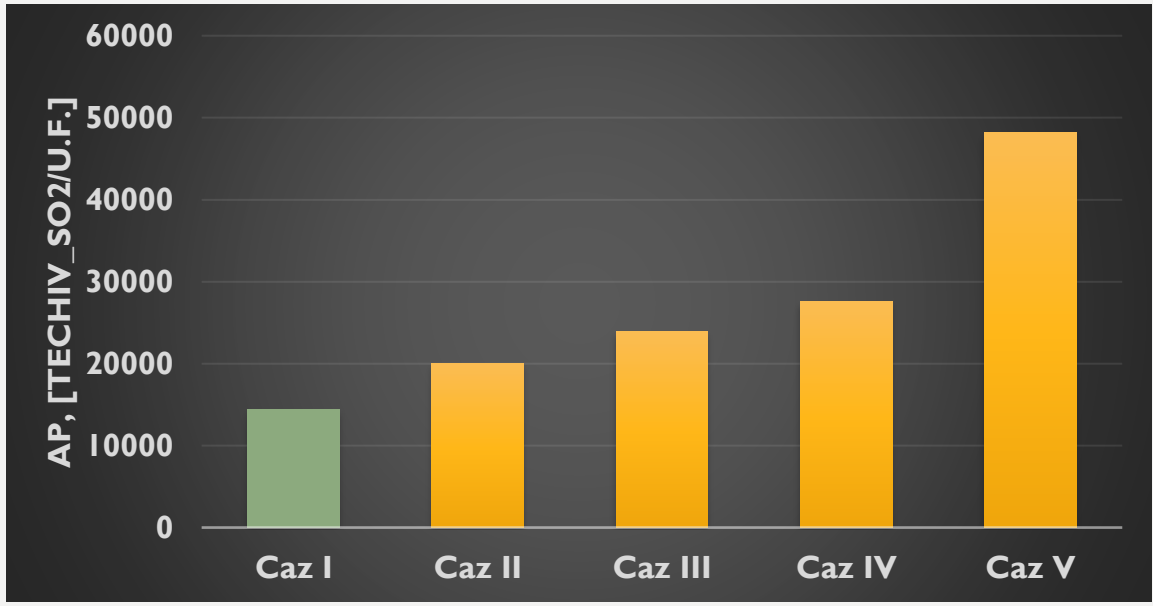
Schimbările climatice



Eutrofizarea



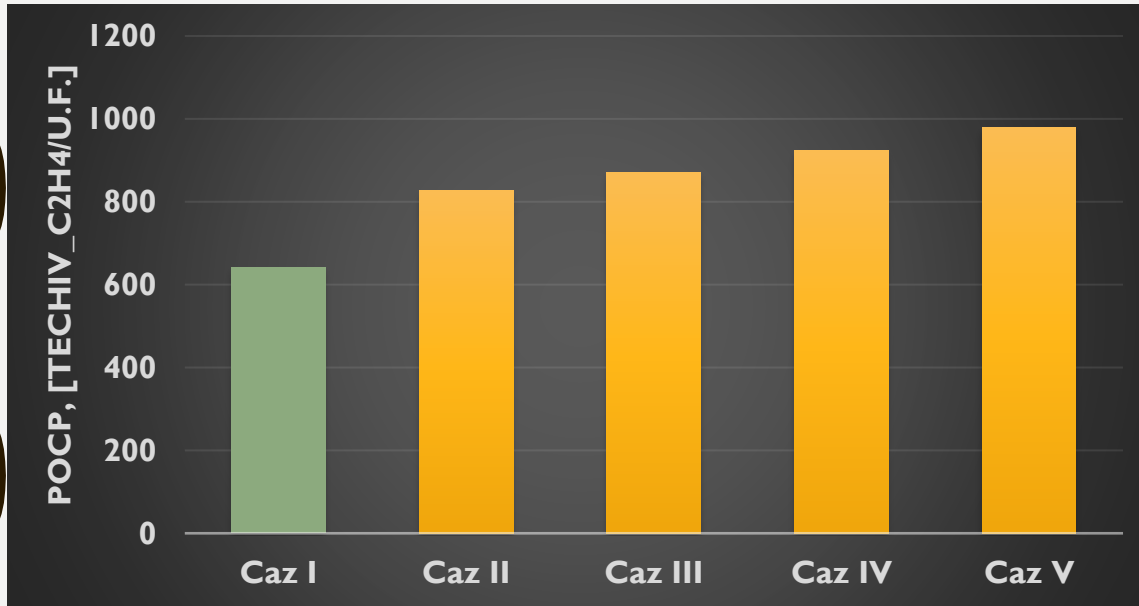
Acidificarea



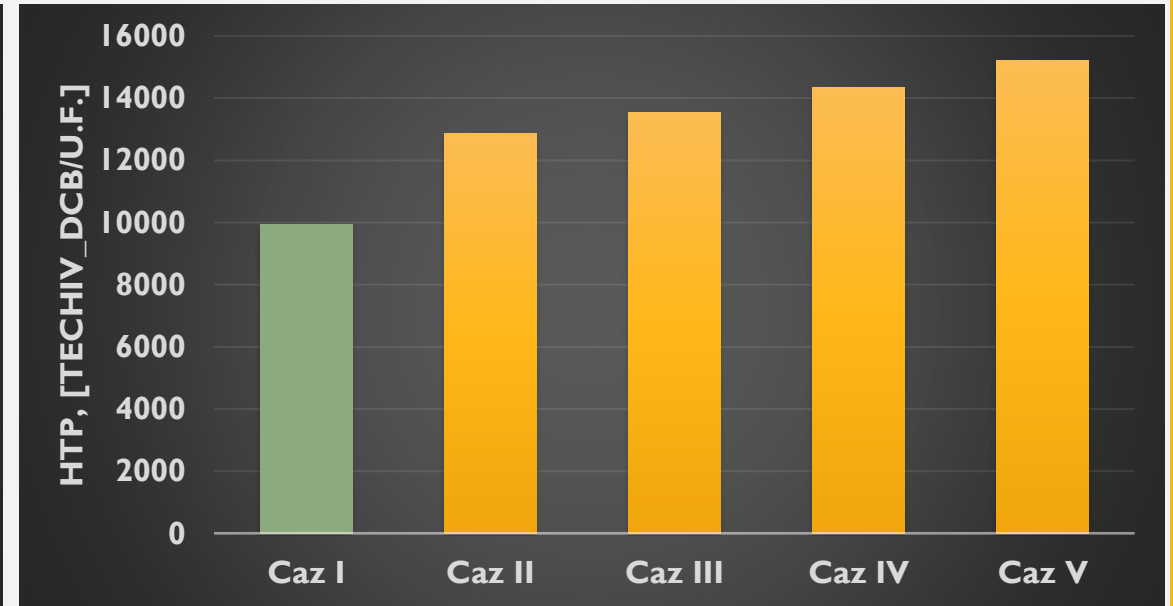
Calculul indicatorilor de impact

Optimizarea tehnico-economică și de mediu a integrării proceselor pre- și post-combustie de captare CO₂ utilizând membrane polimerice în sisteme energetice și non-energetice

Poluarea fotochimică



Toxicitatea umană



Rezultatele cercetării

Valorile indicatorilor de impact raportați la 1 MWh



Indicator de impact	Caz I	Caz II	Caz III	Caz IV	Caz V
ADP, kg_sb/MWh	3.39	4.38	4.61	4.89	5.18
GWP, kg_CO₂/MWh	752.35	110.16	115.99	122.88	130.26
EP, kg_PO ₄ ³ /MWh	0.50	1.35	2.83	4.18	14.06
AP, kg_SO ₂ /MWh	7.33	10.17	12.12	14.02	24.49
POCP, kg_C ₂ H ₄ /MWh	0.32	0.42	0.44	0.46	0.49
HTP, kg_DCB/MWh	5.05	6.52	6.87	7.28	7.71

Indicatori de rezultat proiect de cercetare

Diseminarea rezultatelor obținute

Articole în reviste de specialitate

1. **Nela Slavu**, Adrian Badea, Cristian Dinca. Technical and Economical Assessment of CO₂ Capture-Based Ammonia Aqueous. Processes 10.5 (2022): 859, <https://doi.org/10.3390/pr10050859>. Journal Impact Factor: 3.5, Q2.
2. **Nela Slavu**, Cristian Dinca. Clean Energy from Poplar and Plastic Mix Valorisation in a Gas Turbine with CO₂ Capture Process. Processes 11.10 (2023): 2922. <https://doi.org/10.3390/pr11102922>. Journal Impact Factor: 3.5, Q2.





Indicatori de rezultat proiect de cercetare

Diseminarea rezultatelor obținute

Articole de conferință

1. Dinca Cristian, **Nela Slavu**. Influence of CO₂ Capture by Chemical Absorption on Biomass Gasification Process." Available at SSRN 4273007 (2022). <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4273007>.
2. **Slavu Nela**, Maytham Alabid, Marius Sandru, Cristian Dinca. A techno-economic assessment of biomass combustion with CO₂ capture technology. Computer Aided Chemical Engineering. Vol. 52. Elsevier, 2023. 3219-3225. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15274-0.50513-8>.
3. Maytham Alabid, **Nela Slavu**, Marius Sandru, Cristian Dinca. Hybrid polymeric membrane–chemical absorption system for pre-combustion CO₂ capture. Computer Aided Chemical Engineering. Vol. 52. Elsevier, 2023. 3073-3078. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15274-0.50490-X>

Indicatori de rezultat proiect de cercetare

Diseminarea rezultatelor obținute

Participare conferințe naționale

1. **Nela Slavu**, Alexandra-Iuliana Tanase, Cristian Dinca. Integrarea tehnologiilor de captare CO₂ în industria cimentului. CONFERINȚA NAȚIONALĂ ȘTIINȚIFICĂ DE TOAMNĂ a AOSR 2022, Rolul științei în soluționarea crizelor contemporane, Joi 3 noiembrie 2022 – sâmbătă 5 noiembrie 2022, Cluj-Napoca.
2. **Nela SLAVU**. Integrarea tehnologiilor de captare CO₂ în industria energetică. CONFERINȚA ȘTIINȚIFICĂ DE PRIMĂVARĂ a AOSR, 2023, BUCUREȘTI, Transformarea digitală în științe, 19-20 mai 2023, București.
3. **Nela Slavu**, Adrian Badea, Cristian Dinca. Analiză tehnico-economică de producere a energiei electrice pe bază de biomasă cu captare de CO₂. CONFERINȚA NAȚIONALĂ ȘTIINȚIFICĂ DE TOAMNĂ a AOSR 2023, Știința pentru o societate sănătoasă, Joi 21 septembrie 2023 – sâmbătă 23 septembrie 2023, Constanța.
4. Cristian Dinca, Adrian Badea, **Nela Slavu**. Evaluarea comparativa a soluțiilor hibride bazate pe tehnologiile de captare CO₂ prin absorbție chimică și membrane în procesele post-combustie. CONFERINȚA NAȚIONALĂ ȘTIINȚIFICĂ DE TOAMNĂ a AOSR 2023, Știința pentru o societate sănătoasă, Joi 21 septembrie 2023 – sâmbătă 23 septembrie 2023, Constanța.





VĂ MULTUMESC PENTRU ATENȚIA ACORDATĂ!

Ș.I.dr.ing. Nela SLAVU

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București

Facultatea de Energetică

Departamentul de Producere și Utilizare a Energiei

slavunela@yahoo.com