



**UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI**

ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ



REZUMAT EXTINS TEZĂ DE DOCTORAT

Conversia energiei valurilor în zona litoralului Mării Negre

Doctorand:

Ing. Theo-Andrei TEODOROF

Conducător științific:

Prof.Dr.Ing. Mihai Octavian POPESCU

**BUCUREȘTI
2026**

Cuprins

1	Introducere.....	4
1.1	Actualitatea și importanța temei.....	4
1.2	Obiectivele cercetării.....	4
1.3	Structura tezei.....	5
2	Marea Neagră și valurile marine	6
2.1	Marea Neagră	6
2.1.1	Relieful.....	7
2.1.2	Clima.....	7
2.2	Spațiul maritim al României	7
2.2.1	Litoralul românesc al Mării Negre.....	8
2.2.2	Planul de amenajare al spațiului maritim.....	8
2.3	Valurile Marine	9
2.3.1	Regimul valurilor din Marea Neagră	10
3	Surse de energie	11
3.1	Energie	11
3.2	Conversia energiei.....	11
3.2.1	Mașini energetice	11
3.3	Stocarea energiei	11
3.3.1	Sisteme de stocare electrochimice	12
3.3.2	Acumulatori de energie mecanică și termică.....	12
3.3.3	Sisteme de stocare electromagnetice	12
3.4	Surse regenerabile de energie (SRE).....	12
3.4.1	Surse de energie regenerabilă offshore	12
3.4.2	SRE în România.....	13
3.5	Energia valurilor.....	13
3.5.1	Valorificarea energiei valurilor în mări cu potențial energetic redus	13
4	Sisteme de captare și conversie a energiei valurilor	14
4.1	Istoric.....	15
4.1.1	Sisteme de captare și conversie a energiei valurilor dezvoltate în România	15
4.2	Clasificare.....	16
4.3	Procedee de captare și conversie PTO - Power Take-Off.....	17
4.4	Modalități practice de stocare a energiei valurilor	17
4.5	Sisteme moderne	17
4.5.1	CorPower Ocean	17
4.5.2	AquaBuoy	17
4.5.3	AWS (Archimedes WaveSwing)	18
4.5.4	OEBuoy.....	18
4.5.5	Pontoon	18
4.5.6	Langlee.....	18
4.5.7	CETO	18
4.5.8	Oyster 2	19
4.5.9	Oyster.....	19
4.5.10	SeaBased AB	19
4.5.11	SSG	19
4.5.12	BFHB (Bottom Fixed Heave Buoy)	20
4.5.13	Oceantec.....	20
4.5.14	WaveStar.....	20

4.5.15	PWEC	20
4.5.16	Pelamis.....	20
4.5.17	WaveBob.....	21
4.5.18	Wave Dragon	21
4.5.19	Centrală electrică hidropneumatică acționată de valuri MV-5	21
4.6	Valorificarea la scară mare.....	21
5	Valorificarea energiei valurilor în zona litoralului românesc al Mării Negre.....	22
5.1	Metodologia de cercetare vizată.....	22
5.2	Amplasare.....	24
5.3	Sisteme de valorificare a energiei valurilor analizate în cadrul cercetării	25
5.4	Simulare	25
5.5	Studiu aprofundat asupra soluției CorPower Ocean	25
5.6	Rezultate.....	26
5.6.1	Producția anuală de energie și eficiența energetică	26
5.6.2	Redimensionare.....	28
6	Concluzii	30
6.1	Rezultate obținute.....	30
6.2	Contribuții originale	31
6.3	Lista lucrărilor publicate	31
6.4	Perspective și provocări în valorificarea energiei valurilor	31
	Bibliografie	32

1 Introducere

Dintre mișcările oscilatorii, cele mai importante sunt valurile și mareele. În principal, valurile sunt generate de vânt și influențează mai ales straturile superficiale ale apei. Studiile începute în ultimele decenii urmăresc atât aprofundarea cunoașterii și explicarea acestor fenomene, cât și identificarea metodelor prin care aceste forme de energie hidrolică pot fi captate și valorificate.

Valurile înmagazinează un potențial energetic imens, conform cercetărilor potențialul teoretic global al valurilor fiind de aproximativ 32000 TWh/an [1] din care potențialul energetic exploatabil al Mării Negre în zonele cele mai energice (Burgas–Rezovo), pe baza unor simulări pe 31 de ani, se apreciază a fi 44 MWh/m/an [2].

Costurile de producție ale electricității din sistemele de conversie a energiei valurilor variază între 0,28–0,52 €/kWh, ceea ce face ca soluție să fie una costisitoare pentru generarea de electricitate din surse regenerabile [3].

1.1 Actualitatea și importanța temei

Cercetarea sistemelor de valorificare a energiei valurilor (WEC - Wave Energy Converter) este esențială pentru transformarea potențialului teoretic al oceanelor în energie utilizabilă. Importanța studiilor ce abordează valorificarea energiei valurilor rezidă în necesitatea de a depăși barierele tehnice și economice.

În România, cercetările s-au concentrat pe evaluarea potențialului energetic al valurilor din Marea Neagră și pe analiza impactului captării energiei marine asupra mediului marin. Doar un număr restrâns de studii a investigat posibilitatea implementării sistemelor de captare și conversie a energiei valurilor pe sectorul litoral românesc al Mării Negre [4], [5], [6], [7].

Evaluarea producției de energie pe baza condițiilor locale ale stării mării este un aspect cheie în determinarea fezabilității implementării sistemelor de valorificare a energiei valurilor. Acest studiu se concentrează exclusiv pe faza de evaluare inițială, fără a aborda factorii de cost sau impactul asupra mediului.

Scopul studiului prezentat este de a investiga eficiența energetică, respectiv de a identifica dimensiunea optimă a mai multor sisteme reprezentative. În cadrul acestei lucrări au fost evaluate 18 sisteme de valorificare a energiei valurilor, pe o perioadă de 35 de ani, în trei puncte de studiu situate în zona litoralului românesc al Mării Negre.

1.2 Obiectivele cercetării

Teza are un caracter multidisciplinar ce implică cunoștințe din multiple domenii precum: inginerie electrică, inginerie energetică, inginerie mecanică, fizică, oceanografie și economie. Studiul propune și evaluează soluții tehnologice adaptabile condițiilor specifice zonei de cercetare, având ca obiectiv identificarea sistemelor de captare a energiei valurilor capabile să valorifice potențialul energetic al Mării Negre.

Lucrarea se bazează pe tehnici analitice fundamentate pe căutări sistematice în cadrul unui cadru de analiză structurat, orientat spre compararea și selectarea celor mai eficiente tehnologii de tip WEC. Demersul de cercetare a inclus: consultarea extinsă a literaturii de specialitate, extragerea și sistematizarea informațiilor relevante și elaborarea cadrului de analiză. Etapa aplicativă a presupus procesarea datelor oceanografice de lungă durată,

cartografierea amplasamentelor optime și realizarea unor simulări avansate pentru determinarea performanței energetice și a randamentului de conversie a sistemelor analizate.

Obiectivul general al acestei cercetări doctorale constă în identificarea și evaluarea sistemelor de captare și conversie a energiei valurilor pentru care există date tehnice, în vederea determinării viabilității acestora în condițiile specifice ale Mării Negre.

1.3 Structura tezei

Teza de doctorat intitulată “Conversia energiei valurilor în zona litoralului Mării Negre” este structurată în șase capitole, după cum urmează:

Capitolul 1 aduce în vedere actualitatea și importanța temei de cercetare, prezintă un scurt istoric al domeniului și definește obiectivele centrale ale tezei.

Capitolul 2 analizează caracteristicile fizico-geografice ale Mării Negre, cu o atenție sporită către regimul climatic, morfologia batimetrică și caracteristicile specifice ale valurilor.

Capitolul 3 este un capitol teoretic, ce sintetizează concepte de baza din domeniul energeticii precum conversia și stocarea energiei.

Capitolul 4 sintetizează tehnologiile de valorificare a energiei valurilor. Sunt analizate evoluția istorică a sistemelor, incluzând și contribuții autohtone, metode de captare și conversie a energiei respectiv modalitățile practice de stocare a energiei.

Capitolul 5 reprezintă componenta practică a tezei, fiind prezentată metodologia de cercetare vizată și definită zona de studiu. Capitolul abordează evoluția a 18 sisteme WEC în condițiile a 3 puncte de studiu pe o durată de 35 de ani (1990-2024) urmărind producția anuală și eficiența energetică a acestora, fiind investigată posibilitatea redimensionării.

Capitolul 6 încheie teza prin formularea concluziilor principale ale cercetării și afirmarea contribuțiilor originale ale cercetării.

Bibliografia cuprinde principalele surse de documentare utilizate în elaborarea tezei și reflectă nivelul actual al cunoașterii în domeniul valorificării energiei valurilor.

2 Marea Neagră și valurile marine

Marea Neagră este o mare semi-închisă, componentă a Mării Mediterane, conectată la bazinul principal al Mării Mediterane prin strâmtoarele Bosfor și Dardanele, precum și prin Marea Marmara și Marea Egee. Dintre bazinele bine individualizate ale Mării Mediterane, Marea Neagră are cea mai mare suprafață (aproximativ 466200 km²). Linia țărmului se întinde pe 4340 km, segmentul costier al României fiind de 245 km [8].

Bazinul Mării Negre dispune de resurse naturale promițătoare pentru dezvoltarea infrastructurii de energie regenerabilă marină. Regiunea prezintă un potențial energetic localizat favorabil pentru instalarea sistemelor de valorificare a energiei valurilor [9]. Regimul valurilor este strâns corelat cu regimul vânturilor.

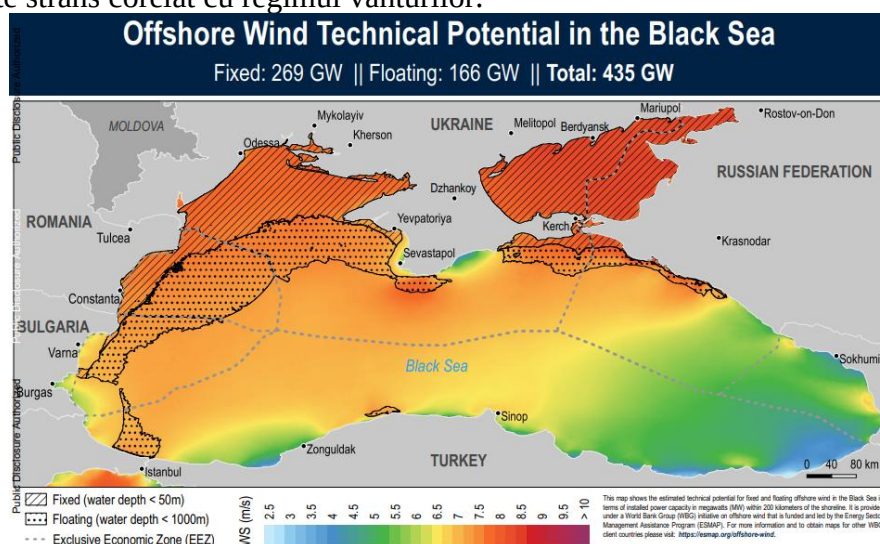


Figura 2.1 Harta privind potențialul energetic eolian în Marea Neagră [25]

Regimul valurilor în Marea Neagră se manifestă mai intens în larg decât în zona costieră, prezentând parametri dinamici medii moderați, cu o predominanță a valurilor de vânt în curs de formare.

2.1 Marea Neagră

Din punct de vedere geografic Marea Neagră este situată în estul Europei de Sud-Est, între 40°55'–46°32' latitudine nordică și 27°27'–41°42' longitudine estică. Deschiderea largă către stepele pontice în partea nordică favorizează pătrunderea maselor de aer continentale reci și uscate, cu influențe semnificative asupra proceselor din bazinul vestic.

Din lungimea totală a liniei țărmului (4340 km), cele mai extinse sectoare aparțin Turciei și Ucrainei (câte 1400 km fiecare), urmate de Rusia (475 km), Georgia (310 km) și Bulgaria (300 km) [10], în timp ce România deține o deschidere de doar 245 km.

Analiza hărții batimetrice a Mării Negre evidențiază faptul că platforma continentală se extinde sub apele mării până la adâncimea de 180 m. Izobata de 180 m se află în proximitatea țărmului în sectoarele de nord-est, sud și sud-est, în timp ce în partea de nord-vest, pe aliniamentul dintre Sevastopol și Burgas, se îndepărtează la peste 160 km de coastă, conturând un bazin relativ puțin adânc. În dreptul litoralului românesc, panta este deosebit de domoală, iar izobata de 180 m ajunge la o distanță de aproximativ 200 km față de țărm [10].

2.1.1 Relieful

Platoul continental reprezintă continuarea submarină a continentului cu adâncimi de până la aproximativ 200 m. Limita reală a platoului continental nu este dată strict de adâncime, ci de schimbarea pantei. În Marea Neagră, schimbarea accentuată a pantei se produce între izobatele de 180 - 200 m [10].

Regiunea platoului continental este alcătuită din trei subzone: zona prelitorală, zona litorală și zona sublitorală. Zona prelitorală reprezintă partea mării care rămâne descoperită în timpul refluxului, ea se întinde între limita maximă de acțiune a valurilor și linia până la care apele se retrag de la țărm spre larg, sub influența vânturilor. Zona litorală cuprinde sectorul de mare situat între zona prelitorală și izobata de 100 m. Zona sublitorală reprezintă porțiunea de mare cuprinsă între zona litorală și marginea platoului continental.

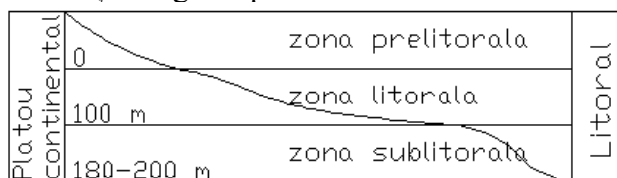


Figura 2.2 Delimitarea zonelor litorale

Principalul factor geodinamic al sedimentogenezei în zona de țărm îl reprezintă acțiunea valurilor și a curenților marini. Mișcarea periodică a apei generată de valuri în regiunile puțin adânci constituie un mecanism esențial care asigură redistribuirea, modificarea și acumularea materialului sedimentar adus în bazinul marin.

2.1.2 Clima

Clima de deasupra acvatoriului este influențată de principalii centri barici care controlează circulația generală a atmosferei în Europa de Sud-Est, precum anticicloul continental eurasiatic, anticicloul subtropical al Azorelor, cicloul nord-atlantic și cel mediteranean [10].

Pe timpul verii, temperatura aerului este uniform distribuită, diferențele fiind de ordinul zecimilor de grad. În sezonul rece distribuția termică devine neuniformă, cu valori minime în colțul nord-vestic ($-0,7^{\circ}\text{C}$) și maxime în sud-estul bazinului ($6,9^{\circ}\text{C}$) [10].

Regimul circulației atmosferice prezintă o variabilitate semnificativă, vânturile caracterizându-se prin instabilitate atât în ceea ce privește viteza, cât și direcția. Vitezele medii sunt în general reduse, iar furtunile apar relativ rar. Regimul valurilor este strâns corelat cu regimul vânturilor. Marea Neagră se află sub influența regimului continental al circulației atmosferice.

În sezonul de iarnă, distribuția temperaturii la suprafața Mării Negre prezintă un gradient termic ce crește pe axa Nord-Sud: media este de 2°C în zona litoralului românesc (Constanța), 6°C în centrul bazinului, 7°C în zona peninsulei Crimeea (Sevastopol) și atinge 8°C în sectorul sud-estic, izotermele urmărind îndeaproape configurația morfologică a țărmurilor [11].

2.2 Spațiul maritim al României

Conform Legii nr. 17/1990 [12], marea teritorială a României cuprinde fâșia de mare adiacentă țărmului și apelor maritime interioare, având o lățime de 22224 km (12 mile marine). Apele maritime interioare, marea teritorială, solul și subsolul acestora, precum și spațiul aerian de deasupra lor constituie parte integrantă a teritoriului României. În aceste spații, statul român

își exercită suveranitatea în concordanță cu legislația națională, cu prevederile convențiilor internaționale la care este parte și cu principiile generale ale dreptului internațional.

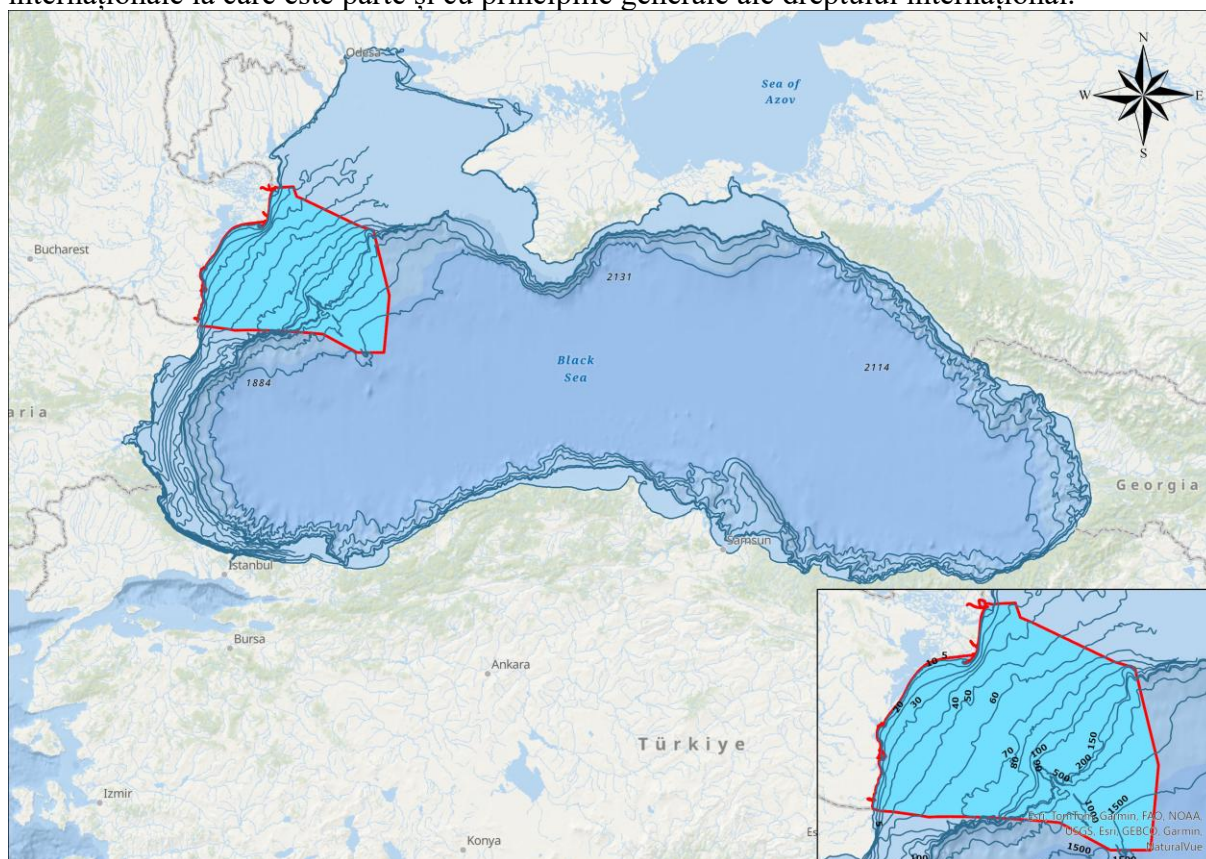


Figura 2.3 Delimitarea spațiului maritim al României

Zona offshore a României se întinde pe aproximativ 22000 km² și atinge adâncimi de peste 1000 m. Zona este împărțită în mai multe perimetre de dimensiuni diferite, dintre care unele concesionate unor titulari pentru desfășurarea activităților de explorare, dezvoltare și exploatare [13].

2.2.1 Litoralul românesc al Mării Negre

Litoralul reprezintă zona de uscat aflată în vecinătatea mării, ale cărei particularități sunt modelate de influența acesteia, în timp ce marea este, la rândul său, influențată de specificul litoralului. Acesta se întinde de la limita superioară a țărmului și cuprinde zona prelitorală, precum și ansamblul zonei litorale marine, în cazul Mării Negre situată între izobatele de 180 m și 200 m.

Litoralul românesc se află în partea estică a Dobrogei și se întinde sub forma unei fâșii cu direcția nord-sud, pe aproximativ 245 km, între delta Chiliei și Vama Veche. De la linia țărmului și până la adâncimi de 180–200 m se desfășoară o câmpie submarină relativ uniformă și aproape plană, platforma continentală, caracterizată printr-o pantă foarte domoală [10].

2.2.2 Planul de amenajare al spațiului maritim

Planificarea spațiului maritim, urmărește coordonarea și armonizarea dezvoltării activităților maritime. Analiza spațială a modului de utilizare a spațiului maritim evidențiază faptul că suprapunerea ariilor naturale protejate cu infrastructura de protecție a zonei costiere, infrastructura de transport, precum și cu zonele destinate pescuitului și activităților de explorare și exploatare a resurselor minerale poate constitui un factor care influențează apariția și evoluția

conflictelor între diferitele tipuri de utilizări ale spațiului marin și obiectivele de conservare, respectiv de protecție a biodiversității și habitatelor marine.

Relațiile de compatibilitate și incompatibilitate dintre diversele utilizări ale spațiului maritim pot fi grupate în următoarele categorii [14]:

- zone exclusive destinate dezvoltării unor activități reglementate prin norme speciale;
- zone susceptibile pentru dezvoltare;
- zone propice care pot fi avute în vedere pentru dezvoltarea unor activități în viitor.

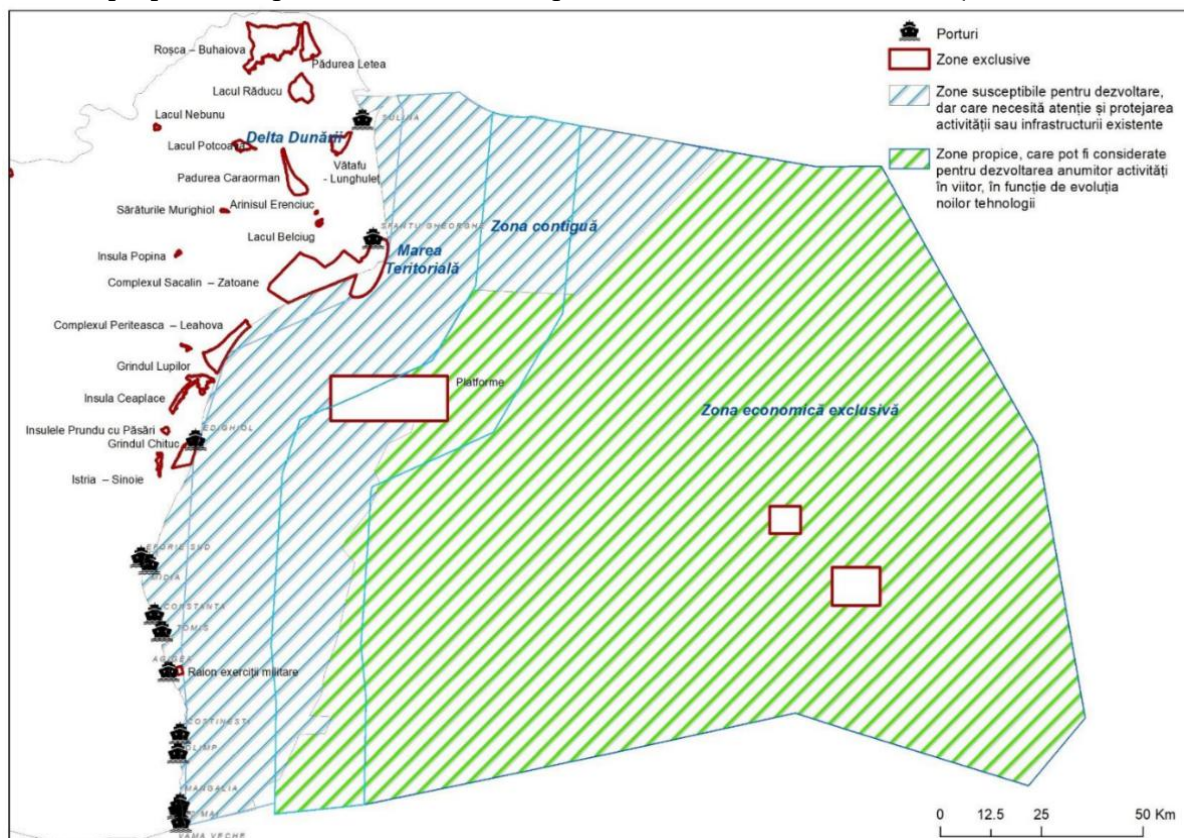


Figura 2.4 Zone exclusive, susceptibile pentru dezvoltare și zone propice [48]

2.3 Valurile Marine

Valul reprezintă un fenomen fizic temporar, manifestat prin deformarea suprafeței unui lichid. Energia valurilor este direct proporțională cu variația suprafeței de apă deplasate. Valurile de la suprafața oceanelor și mărilor sunt generate în principal de acțiunea vântului la contactul dintre atmosferă și apă. Ele tind să crească în înălțime mai ales atunci când vântul acționează în sens opus unui curent. Lungimea valurilor este determinată de viteza vântului și se află într-o strânsă corelație cu înălțimea acestora. Viteza de propagare a valurilor depinde de intensitatea vânturilor generatoare, valorile medii situându-se între 11 și 12,5 m/s, iar în zonele dominate de alizee pot depăși 14 m/s [15].

Valurile pot avea origini diverse, din punct de vedere energetic cea mai relevantă categorie este reprezentată de valurile de vânt, sau valurile de origine eoliană, care constituie tipul predominant de undă din Oceanul Planetar. Acestea sunt generate și menținute prin acțiunea vântului asupra suprafeței apei, prin transferul direct al energiei cinetice a maselor de aer către mediul acvatic [16]. Principalii factori care influențează generarea și evoluția valurilor sunt: viteza vântului, durata de acțiune și lungimea drumului de acțiune (fetch).

Parametri principali ai valurilor sunt lungimea de undă (λ sau L), perioada (T) și înălțimea (h). Lungimea de undă reprezintă distanța pe orizontală dintre două depresiuni sau două creste consecutive ale profilului valului. Perioada valului este intervalul de timp necesar pentru ca două depresiuni sau creste succesive să treacă prin dreptul aceluiași punct fix. Înălțimea valului se definește ca distanța pe verticală dintre creastă și depresiune.

2.3.1 Regimul valurilor din Marea Neagră

În Marea Neagră, regimul valurilor este dominat de valurile generate de vânt și de cele de hulă. De-a lungul litoralului, nivelul energiei valurilor variază în funcție de orientarea țărmului, de particularitățile batimetrice din zona coastei și de prezența structurilor costiere.

Vânturile din bazinul Mării Negre influențează direct caracteristicile valurilor, respectiv înălțimea și perioada acestora, existând o corelație clară între acești parametri [17]. Caracteristicile dinamice medii ale valurilor sunt relativ reduse, acestea având o înălțime medie de 1,0 m, o perioadă de 4,5 s și o lungime de undă de 28,7 m [10]. Înălțimea maximă estimată prin calcule a atins 9,8 m în timpul furtunii excepționale din ianuarie–februarie 1962 [18].

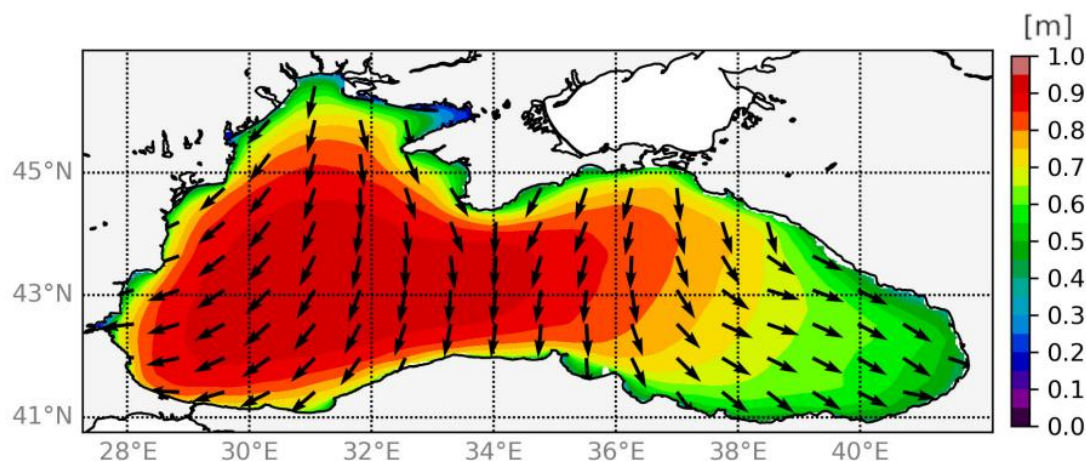


Figura 2.5 Înălțimea semnificativă a valurilor din Marea Neagră (1988-2021) [63]

2.3.1.1 Regimul valurilor din zona litoralului românesc

Estimările pentru litoralul românesc al Mării Negre indică o energie brută medie de aproximativ 12200 kWh/an pentru fiecare metru de front instalat [18], [19]. Există situații excepționale generate de fenomene meteorologice extreme; de exemplu în timpul unei furtuni din ianuarie 2023 s-a estimat o înălțime maximă a valurilor de 9 m, valoare obținută pe baza unor modele matematice corelate cu viteza vântului [20].

În zona litoralului românesc al Mării Negre se remarcă predominanța valurilor provenite din sectorul N–NNE–NE, precum și o frecvență ridicată a valurilor din sectorul E–SE. Distribuția evidențiază expunerea accentuată a țărmului la acțiunea factorilor marini, în contextul orientării N–S a liniei de coastă.

Datorită regimului calm al Mării Negre în comparație cu alte mări, potențialul energetic din aria litoralului românesc este relativ mic. Cercetările au concluzionat că pentru un metru de front maritim amenajat se pot obține aproximativ 50 MWh/an, corelați cu 245 km de coastă, valurile din apele teritoriale ar putea produce 10-11,25 TWh/an, în ipoteza unui singur front de captare linia cu raport de captare și conversie maxim [19].

3 Surse de energie

Încă de la începuturile existenței sale, omenirea a interacționat cu mediul natural și a încercat să îl domine. Pe parcursul evoluției sale, a constatat că energia obținută direct prin forța musculară este insuficientă, fapt care a generat necesitatea utilizării unor surse externe de energie.

3.1 Energie

Conceptul de „energie” a fost introdus în studiul fizicii în secolul al XVIII-lea, iar mai târziu, Einstein a demonstrat că există o relație între masa unui corp și energia sa. Principalele forme de energie includ energia electrică, energia mecanică și energia termică.

3.2 Conversia energiei

Principalele modalități de conversie a energiei primare în energie utilă includ: transformarea energiei chimice în căldură, conversia energiei de fisiune în energie termică, transformarea energiei de fuziune în plasmă, conversia energiei termice în energie mecanică, transformarea energiei mecanice în energie electrică, precum și conversia energiei chimice direct în energie electrică.

Cea mai folosită și versatilă formă de energie în prezent este energia electrică. Energia generată de valuri poate fi stocată sub diferite forme: mecanică, electrică și chimică.

3.2.1 Mașini energetice

O mașină reprezintă un ansamblu complex de elemente (unele mobile, altele fixe) proiectat pentru a transforma energia într-un scop util.

3.2.1.1 Mașini hidraulice și pneumatice

Energia hidraulică este energia asociată unui fluid incompresibil. Mașinile hidraulice sunt mașini de forță în cadrul cărora energia hidraulică se transformă în energie mecanică și invers.

Mașinile pneumatice realizează fie transformarea energiei mecanice în energie pneumatică, fie transformarea energiei pneumatice în energie mecanică.

3.2.1.2 Mașini electrice

O mașină electrică este un convertor de energie care transformă energia electrică în energie mecanică sau energia mecanică în energie electrică.

3.3 Stocarea energiei

O provocare majoră asociată multor surse regenerabile este caracterul lor intermitent. Panourile fotovoltaice și turbinele eoliene produc energie doar atunci când există radiație solară sau vânt suficient. Pentru compensarea intermitenței energetice poate fi utilizată energia stocată în perioadele de surplus.

3.3.1 Sisteme de stocare electrochimice

Sistemele electrochimice de stocare a energiei pot fi realizate utilizând acumulatori clasice sau neclasice. Din categoria celor clasice fac parte acumulatorii acide și cele alcaline. Cel mai răspândit și utilizat tip este acumulatorul cu plumb, care poate atinge, la rate reduse de descărcare, o densitate energetică de până la 40 Wh/kg [21].

3.3.2 Acumulatori de energie mecanică și termică

Sistemele de stocare a energiei mecanice și termice pot înmagazina energia prin diverse metode, precum: resorturi (arcuri), volanți și girostate, inducerea unor defecte în rețelele cristaline ale materialelor, gaz comprimat, dispozitive hidrostatice, materiale ceramice.

3.3.3 Sisteme de stocare electromagnetice

Sistemele de stocare electromagnetică rețin energia în câmpul electric sau magnetic al unor dispozitive precum condensatoare, electreți, magneți permanenți sau bobine supraconductoare.

3.4 Surse regenerabile de energie (SRE)

Conceptul de surse regenerabile de energie (SRE) se referă la sursele naturale ‘inepuizabile’ de energie precum energia solară, energia eoliană, energia hidrolică, energia biomasei, energia mediilor cu potențial termic redus, inclusiv cea geotermală dar se extinde și asupra sistemelor tehnologice care permit conversia acestor surse naturale de energie regenerabile în energie utilă (în principal electrică și termică) [22].

3.4.1 Surse de energie regenerabilă offshore

Energia regenerabilă offshore reprezintă una dintre cele mai promițătoare direcții pentru creșterea producției de energie în anii următori, contribuind la atingerea obiectivelor de decarbonizare ale Europei și la acoperirea creșterii preconizate a cererii de energie electrică.

Sursele de energie regenerabilă ale mediului marin sunt variate și includ hula, valurile, curenții marini, fluxurile mareelor, diferențele de temperatură dintre apele de suprafață și cele de adâncime, precum și vânturile [23]. Conversia și captarea energiei din surse regenerabile offshore include o gamă variată de tehnologii, tehnici și metode specifice sectorului energiei

Tabel 3.1 SRE offshore [24]

Nr. crt	Tehnologie din domeniul energiei din SRE offshore	Cost producție [€/MWh]
1	Turbine eoliene offshore	66-106
2	Turbine eoliene flotante	124-194
3	Panouri fotovoltaice flotante	354
4	Sisteme de valorificare a energiei valurilor	260-600

Studii realizate în zone în care apele sunt protejate și închise [25], precum în cazul Mării Negre, au confirmat faptul că utilizarea unor sisteme WEC în zone cu potențial energetic redus implică costuri de implementare, operare și mentenanță semnificativ mai mici. Sistemele de valorificare a energiei valurilor dimensionate pentru valori mici și zone cu agitație redusă pot oferi multiple beneficii precum: rată mare de conservare a construcției, costuri reduse de mentenanță și un risc financiar scăzut.

3.4.2 SRE în România

Sectorul energetic reprezintă un element esențial în dezvoltarea unei națiuni, ce evoluează în concordanță cu politica de dezvoltare a statului respectiv și cu necesitatea de a răspunde cerințelor economiei și ale populației. Tehnologiile SRE au devenit competitive cu cele clasice, fapt demonstrat de scăderea continuă a indicatorului LCOE sub pragurile înregistrate de centralele pe cărbune sau gaz.

3.5 Energia valurilor

Energia valurilor este energie solară condensată deoarece viteza vântului și durata sa de acțiune sunt factorii determinanți în procesul de formare a valurilor de vânt, iar variațiile de potențial baric își au originea în energia radiației solare repartizate neuniform [18].

Energia valurilor este proporțională cu variația suprafeței de apei deplasată. Aceasta este formată din energia cinetică a particulelor de apă în mișcare și energia potențială datorată greutateii apei ridicate deasupra nivelului mării. Energia valurilor se manifestă la suprafața apei, 95% din energia valurilor este prezentă între suprafața și 1/4 din lungimea de undă a valului.

3.5.1 Valorificarea energiei valurilor în mări cu potențial energetic redus

Sistemele actuale sunt concepute pentru valorificarea energiei valurilor cu potențial energetic ridicat. Studiile subliniază că mediile marine foarte energetice sunt puternic susceptibile la fenomene meteorologice severe. Condițiile de furtună impun trecerea echipamentelor în modul de conservare și periclitează direct integritatea structurală a sistemelor WEC, generând un risc major de compromitere a întregii investiții [5], [26], [27]. Necesitatea de a proiecta structuri capabile să reziste la aceste solicitări excepționale crește exponențial costurile de capital (CAPEX) și de mentenanță (OPEX).

3.5.1.1 Valorificarea energiei valurilor în Marea Neagră

Cercetările recente arată că sectorul de nord-vest al Mării Negre (coasta României și o parte din coasta Ucrainei) prezintă cel mai promițător potențial combinat din bazin. Exploatarea optimă nu se îndreaptă către ferme individuale de valuri, ci către proiecte hibride eolian-valuri (wind-wave exploitation). Amplasarea unor sisteme de valorificare a energiei valurilor alături de turbine eoliene offshore ar stabiliza producția, energia valurilor compensând perioadele cu vânt slab [17].

Sistemele de valorificare a energiei valurilor proiectate pentru valuri mici și pentru zone cu agitație redusă pot oferi mai multe avantaje, precum o rată mai mare de conservare a structurii, costuri de mentenanță mai reduse și un risc financiar diminuat. Fezabilitatea valorificării energiei valurilor în zona Mării Negre a fost analizată în numeroase studii, inclusiv în cercetările realizate de Eugen Rusu, Ajab Gul Majidi și alți autori [4], [5], [7], [17], [25], [28], [29], [30], [31].

4 Sisteme de captare și conversie a energiei valurilor

Exploatarea potențialului energetic al valurilor reprezintă o preocupare constantă la nivel mondial, implementarea unor soluții tehnice eficiente rămâne un demers complex.

Procesul de valorificare a energiei valurilor cuprinde patru etape principale: captarea și extragerea energiei, conversia acesteia, stocarea energiei și utilizarea finală. În prima etapă, energia valului este captată și extrasă, obținându-se, în majoritatea cazurilor, energie mecanică transmisă la axul unei turbine, la o articulație pneumatică sau la un piston atașat unei pompe. Etapa a doua constă în conversia energiei mecanice în alte forme. A treia etapă presupune stocarea energiei obținute în etapa precedentă. Această etapă poate fi omisă atunci când consumatorul este conectat direct la sistemul de conversie dar devine esențială pentru asigurarea autonomiei dacă sursa de energie valurilor este singura sursă. Ultima etapă constă în utilizarea energiei obținute, care poate fi sub formă de curent electric alternativ sau continuu, apă de mare, aer comprimat, aburi etc. Din schemă rezultă diversitatea largă a modurilor în care energia valurilor poate fi transformată și valorificată [19].

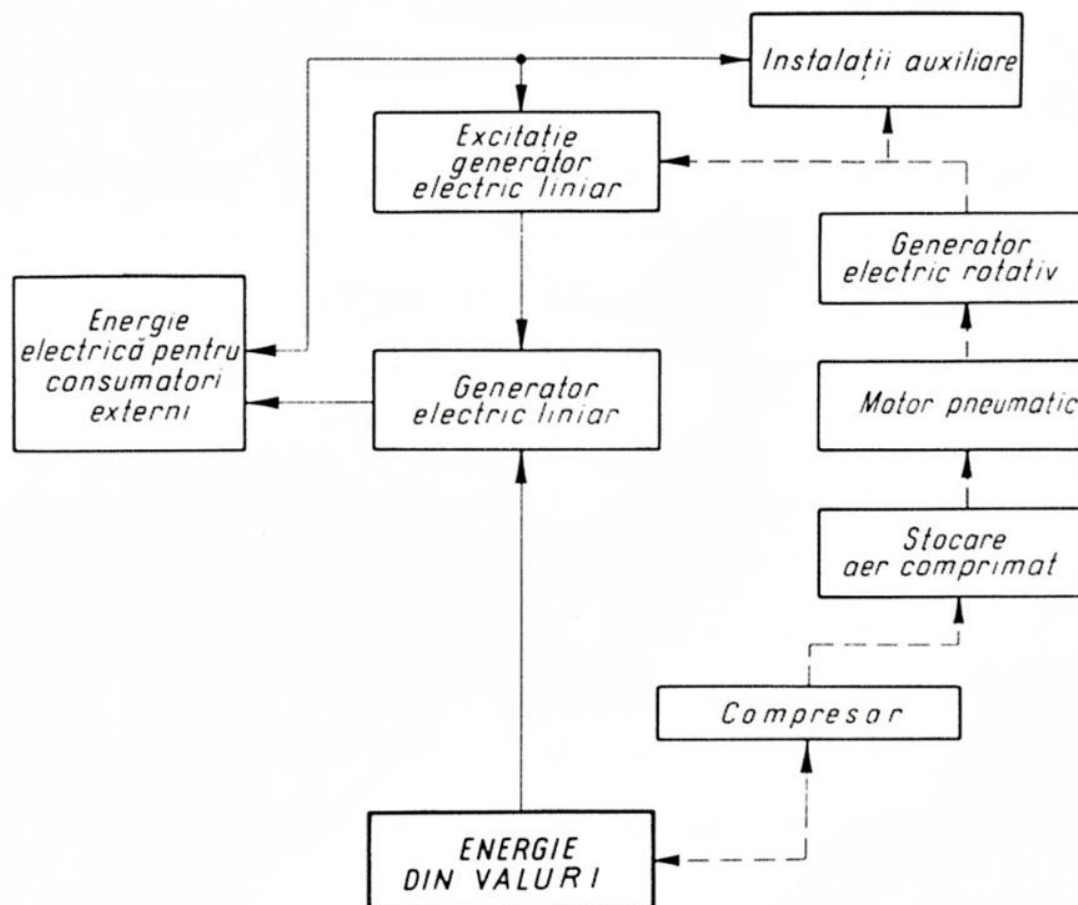


Figura 4.1 Principiu de funcționare al unui sistem de valorificare a energiei valurilor [19]

Cea mai mare provocare a sistemelor de valorificare a energiei valurilor constă în captarea mișcării oscilatorii, de mică frecvență și aleatorie, și transformarea acesteia într-o formă de energie stabilă. Variabilitatea caracteristicilor valurilor influențează direct puterea generată. Proiectarea structurilor pentru captarea energiei valurilor este complexă, deoarece acestea trebuie să fie capabile să utilizeze atât valuri de mică amplitudine, cât și valuri mari.

4.1 Istoric

Problematica valorificării energiei valurilor a fost analizată încă din cele mai vechi timpuri, în prezent este abordată prin metode moderne, cu un interes tot mai mare pentru transformarea energiei cinetice a valurilor în energie electrică.

4.1.1 Sisteme de captare și conversie a energiei valurilor dezvoltate în România

În România, cercetările privind energia valurilor au început încă din perioada 1980–1985, fiind desfășurate în institute precum ICH, ISPH, ICPE, precum și în laboratoarele de hidraulică ale Institutului Politehnic București și ale Institutului de Construcții București. În această perioadă, s-au realizat studii extensive pe modele în canale de valuri și s-au evaluat posibilitățile de captare și conversie a energiei valurilor în Marea Neagră. Au fost construite două modele experimentale, bazate pe Brevetul ICPE 79184/1981 – „Mașină motrică pentru utilizarea energiei valurilor”, testate în condiții reale, cu rezultate promițătoare: geamandura oscilantă cu turbină unisens G-2 și microcentrala hidropneumatică cu coloană oscilantă MV-1.

4.1.1.1 Sistemul de conversie tip geamandură G-1

Dispozitivul este echipat cu o turbină unidirecțională, montată pe un cadru susținut de un flotor, iar axul turbinei antrenează generatorul printr-un multiplicator de viteză. Turbina este formată din 18 palete oscilante, fiecare prevăzută cu un opritor care limitează amplitudinea oscilațiilor, montate pe axe radiale [19].

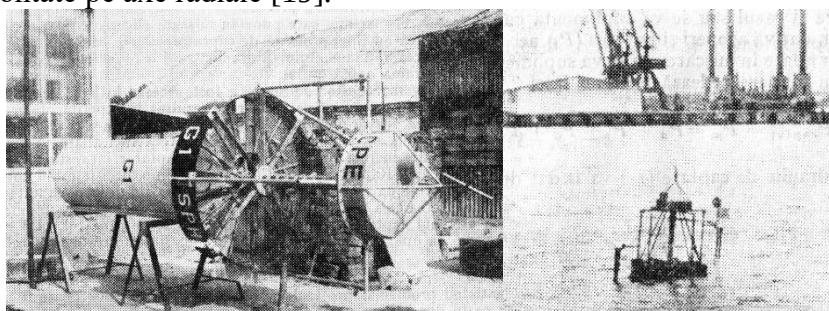


Figura 4.2 Model experimental G-1[19]

4.1.1.2 Sistemul de conversie tip geamandură G-2

Sistemul este conceput sub forma unei geamanduri și funcționează pe principiul OWC. Structura principală constă într-un cilindru în care se formează pistonul lichid, având un diametru de 1,5 m și o înălțime de 2,5 m, prevăzut în partea superioară cu un capac conic și deschis în partea inferioară[18].

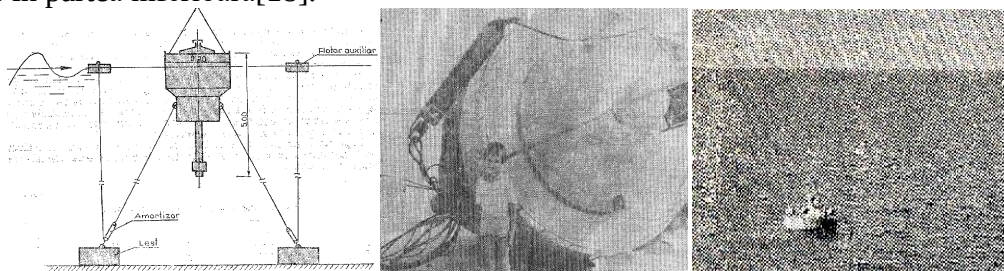


Figura 4.3 Model experimental G-2 [19]

4.1.1.3 Microcentrala de valuri MV-1

Sistemul MV-1 se bazează pe principiul coloanei oscilante, spre deosebire de alte instalații similare, dispune de o geometrie care permite obținerea unei coloane oscilante reziduale cu amplitudine mai mare decât cea a valurilor generatoare [19].

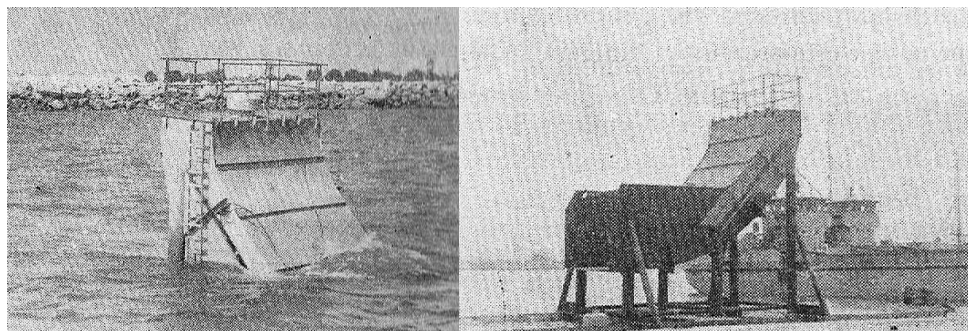


Figura 4.3 Model experimental MV-1 [19]

4.2 Clasificare

De-a lungul timpului au fost dezvoltate numeroase tehnologii pentru valorificarea energiei valurilor, care pot fi clasificate după diferite criterii, cum ar fi principiul de operare, dimensiunea, orientarea sau destinația acestora[32].

În pofida unui număr mare de tehnologii pentru conversia energiei valurilor, acestea pot fi clasificate în funcție de distanța față de țărm (figura 4.19). Se disting:

- Sisteme de coastă (on-shore) – instalate direct pe coastă;
- Sisteme apropiate de coastă (nearshore);
- Sisteme în larg (offshore) – proiectate să funcționeze la adâncimi mai mari de 100 m.

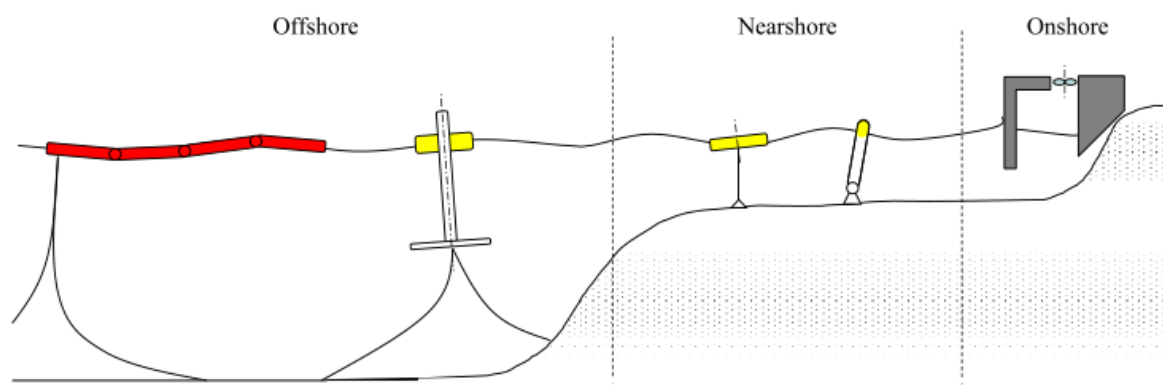


Figura 4.4 Clasificare în funcție de distanța față de țărm [33]

Aproximativ 80% dintre tehnologiile actuale se încadrează în următoarele tipuri de sisteme de valorificare a energiei valurilor [34], [35]:

- Absorbitoare Punctuale (Point Absorbers)
- Atenuatoare/ Converteoare cu profil de undă (Attenuators/WPD – Wave Profile device)
- Coloane de Apă Oscilante (OWC - Oscillating Water Columns)
- Sisteme ce utilizează principiul obstacolului intenționat (OWP - Overtopping Wave Power)
- Converteoare Oscilante de Val (OWSC - Oscillating Wave Surge Converters)

4.3 Procedee de captare și conversie PTO - Power Take-Off

Sistemele de captare și conversie denumite și Power Take-Off (PTO) transformă mișcarea oscilatorie a dispozitivului de captare (flotor, coloană de apă sau clapetă) în energie electrică, gestionând în același timp iregularitățile de frecvență și amplitudine specifice valurilor. În funcție de principiul de funcționare, sistemele PTO se împart [26]:

- Hidraulice.
- Hidropneumatice.
- Tip Coloană de Apă Oscilantă.
- Generatoare Electrice Liniare.

4.4 Modalități practice de stocare a energiei valurilor

Datorită caracterului intermitent al energiei se impune identificarea unor soluții de stocare sub diferite forme. Mijloacele tehnice permit stocarea energiei generate de valuri în [18], [36]: acumulatoare electrice, hidrogen (prin hidroliza apei), acumulatoare hidraulice, aer comprimat.

4.5 Sisteme moderne

Începând cu anii 1970, tehnologiile pentru valorificarea surselor regenerabile de energie au suferit progrese remarcabile, îmbunătățindu-se considerabil atât sub aspectul performanțelor cât și al costurilor. În ultimii ani, progresele în electronica modernă și alte domenii științifice au influențat semnificativ cercetările în domeniul valorificării energiei valurilor. Au fost dezvoltate noi generații de sisteme capabile să valorifice eficient energia valurilor de mică înălțime.

4.5.1 CorPower Ocean

Tehnologia dezvoltată de CorPower Ocean se bazează pe dispozitive flotante de tip geamandură, ancorate pe fundul mării, care se deplasează vertical sub acțiunea valurilor. Mișcarea este transmisă unui sistem mecanic și hidraulic intern, unde energia cinetică a valurilor este transformată în energie electrică. Un element distinctiv al tehnologiei companiei îl reprezintă sistemul WaveSpring, inspirat din principiile biomecanice ale funcționării inimii umane, care permite reglarea dinamică a dispozitivului pentru a maximiza captarea energiei în condiții normale de operare și pentru a asigura protecția structurii în timpul furtunilor sau al valurilor extreme [37].

4.5.2 AquaBuoy

AquaBuoy este un WEC de tip point absorber, conceput pentru a transforma energia mecanică a valurilor oceanice în energie electrică. Sistemul AquaBuoy este alcătuit dintr-o geamandură cilindrică flotantă, cu un diametru de 6 m, conectată la un tub vertical lung, amplasat sub suprafața apei. Întregul sistem are o lungime de 30 m și este proiectat pentru a opera în ape cu adâncimi de peste 50 m[38]. Principiul de funcționare se bazează pe mișcarea verticală a geamandurii sub acțiunea valurilor.

4.5.3 AWS (Archimedes WaveSwing)

Archimedes Wave Swing (AWS) reprezintă o tehnologie de conversie a energiei valurilor bazată de tip Point Absorber imersat, care funcționează prin captarea variațiilor de presiune hidrostatică induse de trecerea valurilor. Sistemul este compus din două structuri cilindrice telescopice: o parte inferioară fixată pe fundul mării (baza) și o parte superioară mobilă, numită flotor sau „clopot”. Interiorul sistemului este umplut cu aer sub presiune, acționând ca un „arc pneumatic”. Atunci când creasta unui val trece deasupra dispozitivului, presiunea hidrostatică crește, comprimând aerul interior și forțând flotorul să coboare

4.5.4 OEBuoy

Sistemul OEBuoy este un WEC de tip flotor, bazat pe tehnologia Coloanei de Apă Oscilante (OWC). Dispozitivul se distinge prin geometria sa hidrodinamică asimetrică, fiind proiectat pentru a extrage energie atât din mișcarea verticală a valului, cât și din presiunea exercitată de frontul de undă. Dispozitivul utilizează o structură parțial imersată, deschisă la bază sub nivelul mării, care captează o masă de apă în interiorul unei camere pneumatice. Pe măsură ce valurile trec prin dreptul dispozitivului, nivelul apei în interiorul coloanei oscilează. Mișcarea acționează ca un piston, comprimând și decomprimând volumul de aer captat deasupra coloanei de apă. Aerul comprimat este forțat să treacă printr-o turbină bidirecțională, care menține același sens de rotație indiferent de direcția fluxului de aer.

4.5.5 Pontoon

Sistemul Pontoon (cunoscut și sub denumirea de Floating Pontoon Wave Energy Converter) face parte din categoria dispozitivelor de tip point absorber, fiind una dintre cele mai simple și robuste soluții pentru captarea energiei marine. Pontoon este compus din două elemente distincte [39]: corpul flotant, o structură cu flotabilitate mare, de obicei din oțel sau beton special, care oscilează pe verticală sub acțiunea forței hidrostatice a valurilor și sistemul de ancorare care menține pontonul într-o poziție fixă.

4.5.6 Langlee

Sistemul Langlee este un sistem conceput pentru a opera în zone semi-imersate (nearshore sau offshore). Acesta se bazează pe oscilația unor aripi mecanice activate de mișcarea circulară a particulelor de apă sub nivelul mării, spre deosebire de absorbantele punctuale care utilizează oscilația verticală, Langlee extrage energie prin utilizarea componentelor orizontale și verticale ale valului. Dispozitivul este dotat cu două aripi articulate care se mișcă înainte și înapoi sub acțiunea presiunii dinamice a valurilor. Brațele aripilor acționează pistoane hidraulice care pompează fluid sub înaltă presiune către un motor hidraulic cuplat la un generator electric convențional.

4.5.7 CETO

Soluția CETO constă în conectarea unei geamanduri submerse, prin intermediul unor legături flexibile, la o structură fixă amplasată pe fundul mării, unde este instalat un motor hidraulic. Mișcarea geamandurii acționează cilindri hidraulici (în versiunile anterioare, precum CETO 5) sau generatoare electrice directe (în versiunile noi, CETO 6) [40].

4.5.8 Oyster 2

Oyster 2 este un WEC conceput pentru a fi instalat în zone costiere (nearshore), la adâncimi cuprinse între 10 și 15 metri. Tehnologia se bazează pe captarea energiei cinetice și potențiale a valurilor de translație care se propagă spre mal. Sistemul utilizează o structură oscilantă de mari dimensiuni, similară unei porți, articulată la bază pe fundul mării. Pe măsură ce valurile trec peste dispozitiv, corpul oscilant (flap-ul) este împins înainte și înapoi de mișcarea orbitală și de translație a apei. Oscilația flap-ului acționează două pistoane hidraulice cu dublu efect, care pompează apă dulce sub înaltă presiune printr-o conductă submarină către o turbină situată pe țărm. O structură metalică modulară, umplută parțial cu aer pentru a asigura flotabilitatea necesară menținerii unei poziții verticale în repaus.

4.5.9 Oyster

Oyster este un dispozitiv conceput pentru a capta energia valurilor de coastă, fiind instalat de obicei la adâncimi relativ mici (10-15 metri). Sistemul folosește o suprafață mare de captare poziționată perpendicular pe direcția de înaintare a valurilor. Axa de oscilație a acestui panou este ancorată ferm pe fundul mării. Forța orizontală a valurilor împinge panoul înainte și înapoi. Mișcarea mecanică este preluată de un braț pivotant care acționează un sistem de pompare[41].

4.5.10 SeaBased AB

Sistemul SeaBased este un WEC de tip absorbant punctual imersat, caracterizat prin utilizarea unui generator liniar cu magneți permanenți amplasați pe fundul mării. Unitatea de suprafață, sau flotorul, este o baliză cilindrică sau sferică care plutește la suprafața apei și este proiectată să urmeze mișcarea verticală a valurilor. Aceasta este conectată prin intermediul unui sistem de transmisie, constând într-un cablu de oțel de înaltă rezistență, direct la unitatea de conversie, respectiv generatorul liniar. Generatorul liniar este amplasat într-o carcasă etanșă din beton sau oțel fixată pe fundul mării și cuprinde un stator și un traducător echipat cu magneți permanenți, transformând mișcarea mecanică a flotorului în energie electrică.

4.5.11 SSG

SSG reprezintă o tehnologie de conversie a energiei valurilor bazată pe principiul obstacolului intenționat. Spre deosebire de absorbantele punctuale, SSG nu utilizează mișcarea de oscilație, ci captează energia potențială a apei colectate deasupra nivelului mării.

Dispozitivul este construit ca o structură masivă cu o față frontală în formă de rampă sau con, echipată cu mai multe rezervoare suprapuse. Rampa de ascensiune direcționează valurile incidente să urce și să depășească marginile rezervoarelor, în timp ce rezervoarele de stocare, amplasate la înălțimi diferite, permit captarea apei atât din valurile mici, cât și din cele mari, maximizând eficiența hidraulică. Energia acumulată este transformată în electricitate prin intermediul sistemului PTO, care constă într-o turbină hidraulică de joasă cădere, de tip Kaplan sau o turbină multi-etajată patentată, cuplată la un generator electric.

4.5.12 BFHB (Bottom Fixed Heave Buoy)

BFHB (Bottom Fixed Heave Buoy) reprezintă un WEC proiectat pentru captarea energiei marine prin mișcarea verticală a valurilor. Dispozitivul este ancorat rigid pe fundul mării, ceea ce îi conferă stabilitate și permite exploatarea eficientă a mișcării de oscilație verticală a flotorului. Prin fixarea pe fundul mării și operarea pe principiul mișcării relative dintre flotor și structura de bază, BFHB asigură o captare constantă și eficientă a energiei valurilor, reducând influența curenților laterali și a deplasărilor necontrolate, fiind potrivit pentru exploatarea resurselor energetice marine în zone cu adâncimi moderate până la mari.

4.5.13 Oceantec

Oceantec este un sistem de conversie a energiei valurilor dezvoltat de compania spaniolă Oceantec Energías Marinas, susținută de Tecnalia Corporación Tecnológica și Iberdrola pentru valorificarea resurselor marine regenerabile. Un flotor de mari dimensiuni generează variații ale unei coloane de apă care comprimă și decomprimă aerul într-o cameră superioară, acest flux de aer fiind utilizat pentru a acționa turbine conectate la generatoare electrice. Dispozitivul captează energia valurilor prin mișcarea coloanei de apă internă, ceea ce comprimă aerul de deasupra și pune în mișcare turbinele plasate în partea superioară, generând energie electrică.

4.5.14 WaveStar

WaveStar este un convertizor de energie a valurilor de tip point absorber, dezvoltat inițial de compania daneză Wave Star Energy pentru captarea energiei valurilor marine și generarea de electricitate printr-un sistem flotant cu multiple geamanduri. Dispozitivul constă dintr-o platformă susținută pe piloni fixați pe fundul mării, pe care sunt montate 20 de flotoare semi submersibile dispuse în serie, care urmează mișcarea verticală a valurilor. Mișcările ascendente și descendente ale acestor flotoare sunt convertite hidraulic într-un cuplu de rotație constant asupra unui generator electric printr-un sistem PTO optimizat, asigurând un flux de energie continuu și neted adecvat racordării la rețeaua electrică.

4.5.15 PWECE

PWECE (Pendulum Wave Energy Converter) este un WEC conceput pentru captarea și conversia energiei cinetice a mișcării valurilor în energie electrică printr-un mecanism oscilant. Sistemul utilizează un pendul sau braț articulat, ancorat pe fundul mării sau pe o structură fixă, care oscilează sub acțiunea valurilor incidente. Mișcarea pendulului este transmisă către un sistem PTO, care poate fi hidraulic, mecanic sau electric, pentru a genera energie electrică.

4.5.16 Pelamis

Sistemul Pelamis este bazat pe o structură segmentată și articulată. Ansamblul este alcătuit din mai multe tuburi cilindrice rigide, interconectate prin articulații mecanice flexibile. Trecerea valurilor provoacă înclinații unghiulare la nivelul articulațiilor. Mișcarea de încovoiere acționează pompe hidraulice care trimit lichid sub presiune către turbine, antrenând generatoarele electrice [42].

4.5.17 WaveBob

WaveBob este un WEC de tip point absorber cu două corpuri dezvoltat inițial de compania irlandeză Wavebob Ltd. pentru captarea energiei undelor marine și conversia acesteia în energie electrică. Dispozitivul este conceput ca o geamandură compusă din două structuri oscilante care se mișcă relativ sub acțiunea valurilor, operațiune utilizată pentru a extrage energia undelor printr-un sistem PTO hidraulic sau generator liniar. Wavebob este proiectat să fie amplasat în ape adânci, în ansambluri offshore modulare, unde mișcarea relativă dintre cele două corpuri este optimizată pentru absorbția energiei valurilor și pentru generarea electrică continuă.

4.5.18 Wave Dragon

Acesta este un sistem de valorificare a energiei valurilor care combină principiul obstacolului intenționat cu cel al planului înclinat. Obstacolul constă din două aripi de ghidare, care concentrează masa de apă într-un bazin amplasat la un nivel superior față de nivelul mării. Apa acumulată cade apoi asupra unei baterii de turbine, conectate la generatoare electrice, generând energie electrică. Dezvoltarea sistemului a fost susținută financiar de Uniunea Europeană și de autoritățile daneze, reprezentând o soluție scalabilă pentru exploatarea energiei valurilor. Performanța ridicată a sistemului se datorează eficienței mari de captare și conversie hidraulică, precum și întreținerii simple și cu costuri reduse[43].

4.5.19 Centrală electrică hidropneumatică acționată de valuri MV-5

Soluția a fost elaborată de Academia Navală “Mircea cel Bătrân”, în colaborare cu Centrul de Cercetare Științifică pentru Forțele Navale și Facultatea de Inginerie Electrică a Universității Tehnice “Gh. Asachi”. Principalele componente ale centralei electrice hidropneumatice sunt captatorul hidropneumatic și turbina cu mai multe pale. Captatorul se bazează pe principiul obstacolului intenționat, iar oscilațiile coloanei de apă din incintă sunt puternic influențate de rezistența aerodinamică a coloanei de aer[44].

4.6 Valorificarea la scară mare

Inițiativele de implementare a sistemelor de mare capacitate s-au confruntat frecvent cu probleme tehnice. Vibrațiile puternice induse în flotoare de dinamica valurilor generează solicitări mecanice, care pot conduce la degradarea elementelor constructive, dezalinierea ansamblului cinematic și, în cazuri severe, la distrugerea totală a sistemului.

Implementarea la scară largă a sistemelor WEC solicită investigații ample, dinamica inovațiilor conturează o traiectorie optimistă către obținerea unor prețuri competitive pe piața de energie. Pentru un bazin închis precum Marea Neagră, atingerea pragului de rentabilitate va impune o schimbare de paradigmă: trecerea de la convertoare individuale la sisteme hibride multi-sursă și exploatarea structurilor de tip dig (breakwater-integrated WEC) ca platforme de captare, o strategie ce promite integrarea eficientă a energiei valurilor în portofoliul energetic național.

5 Valorificarea energiei valurilor în zona litoralului românesc al Mării Negre

Variabilitatea relativ redusă a regimului valurilor din bazinul Mării Negre constituie un avantaj pentru implementarea sistemelor destinate valorificării energiei valurilor. Nivelul energetic mai scăzut al acestora necesită adaptarea tehnologiilor existente, concepute în mod obișnuit pentru regimuri energetice mai ridicate.

Cercetarea actuală oferă o evaluare preliminară a fezabilității implementării sistemelor de valorificare a energiei valurilor în zona litoralului românesc al Mării Negre. Acesta analizează eficiența energetică și explorează ipoteza conform căreia versiuni redimensionate ale acestor sisteme ar conduce la creșterea eficienței în contextul condițiilor locale. Pentru a testa ipoteza, au fost evaluate și redimensionate 18 tehnologii reprezentative WEC, eficiența acestora fiind evaluată în trei puncte de studiu. Rezultatele oferă informații valoroase cu privire la eficiența și compatibilitatea diferitelor tehnologii de energie a valurilor pentru această regiune.

5.1 Metodologia de cercetare vizată

Eficiența a 18 sisteme de conversie a energiei valurilor a fost evaluată pe baza datelor oceanografice obținute prin modelare matematică a stării de agitație a mării furnizate de CMEMS prin ERA5 reanalysis dataset[45], datele de batimetrice au fost extrase din platforma GEBCO[46] acoperind perioada 1990–2024 pentru cele 3 puncte de studiu (P1, P2, P3). Datele furnizate de CMEMS prin ERA5 reanalysis dataset sunt date cu o rezoluție spațială de 1° și rezoluție temporală de 1 ora.

Producția anuală de energie (Annual Energy Production *AEP*), măsurată în MWh, este estimată prin interpolare biliniară a matricei de putere a WEC-ului cu matricea caracteristică a stării mării corespunzătoare regiunii analizate. Aceasta poate fi calculată folosind următoarea formula [25]:

$$AEP = \sum_{i=1}^{nT} \sum_{j=1}^{nH} p_{ij} \cdot P_{ij} \quad (5.1)$$

unde, nT reprezintă numărul de celule pe axa orizontală, corespunzătoare discretizării perioadei valului; nH reprezintă numărul de celule pe axa verticală, corespunzătoare discretizării înălțimii valului; p_{ij} – descrie starea mării într-un anumit punct, definită de rândul i (corespunzător perioadei valului T_e) și coloana j (corespunzătoare înălțimii valului H_s) conform celulei din matricea stării mării, iar P_{ij} reprezintă puterea electrică produsă de sistemul de valorificare a energiei valurilor corespunzătoare celulei definite de combinația specifică dintre perioada valului (definită de rândul i) și înălțimea valului (definită de coloana j).

Eficiența energetică (capacity factor C_f) este definit ca raportul dintre puterea maximă produsă, cunoscută și sub denumirea de putere nominală, a WEC-ului și puterea teoretică disponibilă din resursa de energie a valurilor pe o perioadă dată, exprimată în %. C_f evidențiază energia anuală furnizată de dispozitiv în raport cu energia teoretică maximă pe care ar putea-o livra dacă ar funcționa continuu la puterea sa nominală. Acesta reprezintă un parametru esențial

pentru evaluarea performanței WEC-urilor în ceea ce privește capacitatea de generare a energiei. Poate fi calculat folosind următoarea ecuație [31]:

$$C_f = 100 \times \frac{P_e}{P_n} \quad (5.2)$$

unde P_e prezintă puterea maximă produsă, cunoscută și ca putere nominală, iar P_n este puterea produsă de WEC într-un context specific (înălțimea valului și perioada valului) pentru o perioadă definită.

Lățimea de captare, în engleză capture width c_w , evaluează capacitatea reală de extracție a echipamentului și depinde în mod direct de doi factori critici: geometria și răspunsul dinamic al structurii plutitoare, respectiv eficiența modulului de captare și conversie (PTO). Lățimea de captare poate fi determinată folosind relația [47]:

$$c_w = \frac{P_e}{P_w} [m] \quad (5.3)$$

unde P_w , puterea de captare a frontului, reprezintă rezultanta dintre elementele componente ale energiei de transport a frontului de valuri în ambele direcții P_x și P_y .

Raportul de captare și conversie (c_{wr} - Capture Width Ratio) evaluează eficiența hidrodinamică a sistemului strict prin prisma gabariturii sale fizice. Parametrul c_{wr} se determină conform relației matematice:

$$c_{wr} = \frac{P_n}{d_{wec}} [\%] \quad (5.4)$$

Unde: P_n - puterea nominală a sistemului de valorificare a energiei valurilor în contextul unei anumite înălțimi și perioade [kW]; d_{wec} - diametrul flotorului sau lățimea frontului activ

Legea de redimensionare Froude stipulează că înălțimea valurilor se redimensionează liniar cu λ , perioadele valurilor se redimensionează cu rădăcina pătrată a lui λ , iar puterea se redimensionează cu $\lambda^{3.5}$ a scalei geometrice[39]. Fiecare WEC selectat a fost supus unei analize de redimensionare folosind un factor de scară (λ) cuprins între 0,69 și 1,31, în pași de 0,01, unde $\lambda = 1$ reprezintă scara originală. Valorile $\lambda < 1$ corespund unei versiuni micșorate, în timp ce valorile $\lambda > 1$ indică o versiune mărită a WEC-ului. Procesul de supradimensionare ($\lambda > 1$) sau subdimensionare ($\lambda < 1$) urmează principiul similitudinii Froude, care păstrează similitudinea dinamică între model și prototip prin menținerea egalității numărului Froude [48]:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (5.5)$$

unde U reprezintă viteza caracteristică, g este accelerația gravitațională, iar L este lungimea caracteristică (de exemplu diametrul dispozitivului).

Pentru studiu, λ a variat între 0,69 și 1,31 Conform redimensionării Froude, principalii parametri ai dispozitivului și ai câmpului de valuri sunt relaționați după cum urmează [31]:

$$L_{scaled} = L_0 \times \lambda \quad (5.6)$$

$$T_{scaled} = T_0 \times \sqrt{\lambda} \quad (5.7)$$

$$P_{scaled} = P_0 \times \lambda^{3.5} \quad (5.8)$$

Matricea de putere a prototipului $P_0(H_s, T_p)$ oferă puterea medie generată în funcție de înălțimea semnificativă a valului (H_s) și perioada de vârf (T_p). Pentru analiza dispozitivelor redimensionate, stările mării măsurate sunt convertite în condiții echivalente prototipului [31]:

$$H_{s_{proto}} = \frac{H_{s_{real}}}{\lambda} \quad (5.9)$$

$$T_{proto} = \frac{T_{real}}{\sqrt{\lambda}} \quad (5.10)$$

Puterea instantanee generată de dispozitivul redimensionat este:

$$P_{scaled} = P_0(H_{s_{proto}}, T_{proto}) \times \lambda^{3.5} \quad (5.11)$$

Pentru fiecare înregistrare a stării mării din seria temporală măsurată, puterea corespunzătoare a dispozitivului redimensionat este calculată folosind legile de redimensionare (scalare) Froude. Energia anuală totală este determinată ca media, în funcție de timp, a tuturor valorilor instantanee ale puterii pe parcursul perioadei simulate. Așadar, *AEP* este exprimată astfel [49]:

$$AEP = \frac{1}{N_{years}} \sum_{t=1}^{N_{steps}} P_{scaled}(t) \Delta t \quad (5.12)$$

unde Δt reprezintă pasul de timp (1 oră), iar N_{years} este numărul total de ani reprezentați de seria de timp.

Analiza a fost realizată pentru un total de 342399960 de iterații, pe cele trei puncte de studiu, luând în considerare 18 tehnologii WEC, 65 de factori de redimensionare și 306810 de eșantioane de stări ale valurilor (date orare pe o perioadă de 35 de ani). Toate estimările *AEP* au fost normalizate în raport cu puterea nominală redimensionată, pentru a obține un C_f mediu anual.

5.2 Amplasare

Punctele de studiu au fost selectate pe baza mai multor criterii impuse de cadrul de planificare spațială maritimă [14]. Principalii factori luați în considerare în procesul de selecție au fost: înălțimea valurilor, perioada valurilor, proximitatea față de țărm (pentru a minimiza: distanța de conectare la Sistemul Energetic Național și costurile de mentenanță, operare) și absența obstacolelor, în conformitate cu planul de amenajare a spațiului maritim.

Din zonele disponibile au fost selectate punctele de studiu P1 și P2, iar punctul P3 a fost ales în apropierea portului Constanța, pentru a permite evaluarea sistemelor în zone mai aproape de țărm, cu adâncimi mai mici și potențial energetic redus. Punctele de studiu identificate prezintă următoarele caracteristici:

Tabel 5.1 Caracteristicile punctelor de studiu P1 P2 P3

Punct de studiu	Coordonate	Distanța față de țărm (km)	Adâncime (m)	<i>H_s</i> (m)		<i>T_e</i> (s)		Putere disponibilă (kW/m)
				Medie	Max	Medie	Max	
P1	44.074444 29.956667	109	70	0.93	7.04	3.44	9.68	3.44
P2	44.308611 30.284722	130	87	0.95	7.15	3.62	9.71	3.62
P3	44.235556 28.6625	1.8	13	0.74	5.6	2.06	9.42	2.06

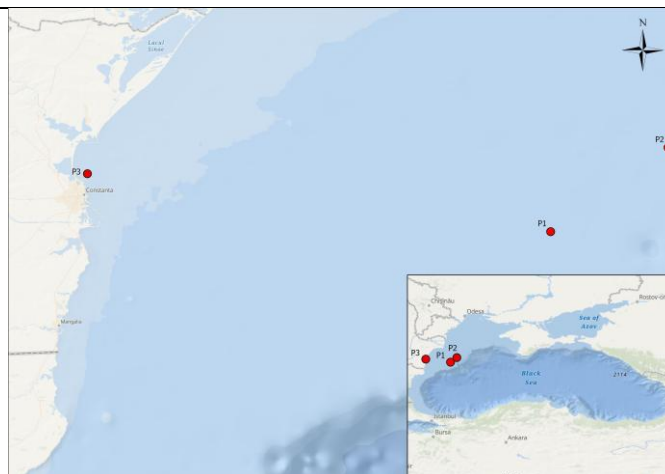


Figura 5.1 Amplasarea punctelor de studiu P1, P2 și P3

5.3 Sisteme de valorificare a energiei valurilor analizate în cadrul cercetării

Majoritatea sistemelor de valorificare a energiei valurilor pot obține rezultate bune în zona litoralului românesc al Mării Negre, cu condiția să fie redimensionate în funcție de caracteristicile hidrografice locale [31]. Studiile au arătat că raportul optim de redimensionare nu depinde de puterea brută a sistemului [39]. Din considerente tehnologice, aceste sisteme pot fi redimensionate până la 40% față de modelul original [48]. Următoarele sisteme au fost selectate spre a fi evaluate:

Tabel 5.2 Caracteristici ale sistemelor WEC analizate

WEC	Procedeu de captare și conversie (PTO)	Putere nominală/unitate P_e [kW]	Clasificare EMEC
CorPower Ocean	Pompă hidraulică	400	Point Absorber
Aqua Buoy	Turbină apă	250	Point Absorber
OEBuoy	Turbină	2880	OWC
AWS	Generator liniar	2470	Point Absorber
Pontoon	Motor hidraulic	3619	Point Absorber
Langlee	Motor hidraulic	1665	OWSC
CETO	Motor hidraulic	260	Point Absorber
Oyster	Pompă hidraulică	290	OWSC
Oyster 2	Pompă hidraulică	3332	Point Absorber
Seabased AB	Generator liniar	15	Point Absorber
SSG	Turbină	20000	OWP
Heave buoy (BFHB)	Generator liniar	2192	Point Absorber
Oceantec	Generator liniar	500	Point Absorber
Wave Star	Generator liniar	2709	Point Absorber
PWEC	Pendul	479	Point Absorber
Pelamis	Motor hidraulic	750	WPD
Wave Bob	Motor hidraulic	1000	Point Absorber
Wave Dragon	Motor hidraulic	7000	OWP

5.4 Simulare

Simularea evoluției sistemelor de valorificare a energiei valurilor a presupus utilizarea aplicației software MATLAB. Prin rularea codului a fost posibilă evaluarea sistemelor atât la scară originală cât și redimensionate, în condițiile stabilite în cadrul studiului.

5.5 Studiu aprofundat asupra soluției CorPower Ocean

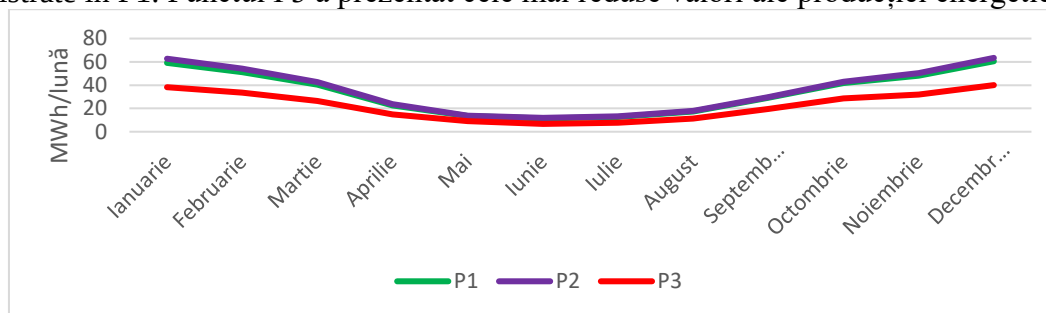
Soluția propusă de CorPower Ocean (CPO) presupune utilizarea unei geamanduri ancorate de fundul mării, inovația soluției constă în utilizarea unui sistem pretensionat ce împinge geamandura către fund în timp ce valurile o ridică, sistem numit “WaveSpring”. Mișcarea pe axă verticală este captată prin intermediul unor pistoane hidraulice care la rândul lor antrenează un motor hidraulic conectat la un generator electric.

Simularea evoluției sistemului pe o perioadă de 35 de ani (1990–2024) s-a bazat pe date furnizate de Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS), prin setul de date de reanaliză ERA5, cu o rezoluție spațială de 1°, precum și pe date batimetrice provenite din platforma General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO). Aceste informații au fost utilizate pentru caracterizarea regimului valurilor în cele trei puncte de interes (P1, P2 și P3).

Tabel 5.3 Rezultate CorPower Ocean (medie multianuală 1990-2024)

Eficiență energetică [%]			Raportul de captare și conversie [%]			Lățimea de captare [m]			Producție anuală de energie [MWh/an]		
P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
11.61	12.16	7.64	1.39	1.39	1.39	12.48	12.53	12.52	407	426	267

Rezultatele simulării sistemului de conversie a energiei valurilor evidențiază faptul că cele mai bune rezultate se pot obține în punctul de studiu P2, rezultate similare au fost înregistrate în P1. Punctul P3 a prezentat cele mai reduse valori ale producției energetice.

**Figura 5.2** Grafic evoluție producție energetică lunară CorPower Ocean (1990-2024)

Din punct de vedere al distribuției lunare a producției de energie, luna decembrie se remarcă drept cea mai productivă, în timp ce luna iulie înregistrează cele mai scăzute valori ale energiei produse în toate cele trei puncte de interes.

La nivel sezonier, toamna reprezintă perioada cea mai favorabilă pentru valorificarea energiei valurilor în cazul amplasării sistemului în punctele P1 și P2, în timp ce pentru punctul P3 iarna se dovedește a fi anotimpul cu cel mai ridicat potențial energetic.

5.6 Rezultate

Rezultate expuse au fost determinate pentru condiții ideale fără a fi luată în considerare o serie de factori datorită lipsei datelor. Nu a fost utilizată o strategie de control a sistemelor de valorificare a valurilor, utilizarea unei strategii putând crește eficiența (C_f) sistemelor.

5.6.1 Producția anuală de energie și eficiența energetică

Evaluarea celor 18 tehnologii WEC : CorPower Ocean[50], Aqua Buoy [51], AWS (Archimedes Wave Swing) [39], OEBuoy [39], Pontoon [39], Langlee (Floating 3 body Oscillating Flap) [52], CETO [53], Oyster [54], Oyster 2 (Bottom Fixed Oscillating Flap Buoy) [55], SeaBased AB [56], SSG (Sea Slot-cone Generator) [57], BFHB (Bottom Fixed Heave Buoy) [52], Oceantec [58], Wave Star [59], PWEC [60], Pelamis [61], Wave Bob [39], Wave Dragon [57] cu puteri de producție cuprinse între 250 kW și 20000 kW, permite identificarea tehnologiei WEC cea mai adecvată pentru cele trei puncte de studiu situate de-a lungul litoralului românesc al Mării Negre. Diferențe pot fi observate între tehnologiile WEC în ceea ce privește AEP și C_f în tabelul 5.4.

Figura 5.3 ilustrează comparativ producția medie anuală de energie estimată pentru sistemele WEC selectate, evaluată în cele trei puncte de studiu: P1, P2 și P3.

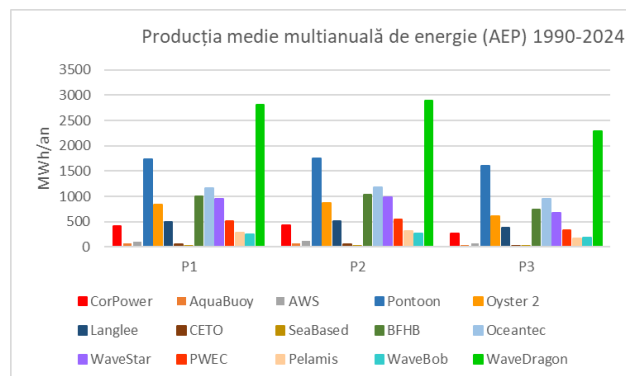


Figura 5.3 Producția medie multianuală de energie 1990-2024

Tabel 5.4 Caracteristici ale sistemelor WEC selectate ($\lambda = 1$ dimensiune originală)

WEC	Putere nominală/unitate P_e (kW)	Producția anuală de energie AEP (MWh/an)			Eficiența energetică C_f (%)		
		P1	P2	P3	P1	P2	P3
CorPower Ocean	400	410.67	429.79	271.55	11.7	12.2	7.7
Aqua Buoy	250	61.63	65	35.39	2.7	2.9	1.6
AWS	2470	109.90	116.45	67.18	0.5	0.5	0.3
OEBuoy	2880	353.99	375.94	199.26	1.4	1.4	0.7
Pontoon	3619	735.92	771.68	435.87	2.3	2.4	1.3
Langlee	1665	347.15	367.48	196.22	2.3	2.5	1.3
CETO	260	50.50	53.76	25.40	2.1	2.3	1.1
Oyster	290	298.22	314.91	184.74	11.7	12.4	7.2
Oyster 2	3332	640.85	679.28	361.63	2.2	2.3	1.2
Seabased AB	15	8.01	8.41	4.6	6.1	6.4	3.5
SSG	20000	5219	5521	3214	2.9	3.1	1.8
Heave buoy (BFHB)	2192	708.84	747.31	2192	3.7	3.9	2
Oceantec	500	452.34	482.90	266.60	10.3	11	6.1
Wave Star	600	961.60	987.75	691.72	18.2	18.7	13.2
PWEC	479	498.91	479	328.20	11.9	12.5	7.8
Pelamis	750	288	306.51	171.70	4.3	4.6	2.6
Wave Bob	1000	202.55	214.91	116.97	2.3	2.4	1.3
Wave Dragon	7000	1813.3	1924.6	1069.4	2.9	3.1	1.7

Variabilitatea sezonieră a Mării Negre oferă o complementaritate perfectă cu energia solară: deficitul fotovoltaic din timpul poate fi compensat de energia produsa prin valorificarea energiei valurilor.

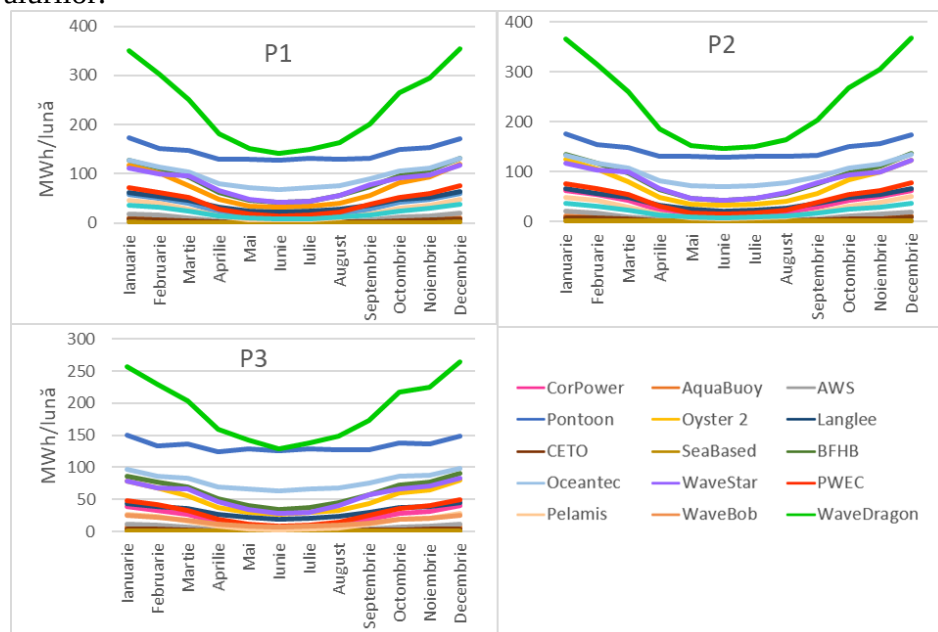


Figura 5.4 Producția medie lunară în punctele de studiu P1 P2 P3

Variabilitatea producției de energie reflectă fluctuație sezonieră a condițiilor meteo-oceanografice de pe litoralul românesc al Mării Negre. Vârfurile de producție sunt direct corelate cu intensificarea regimului eolian din intervalul decembrie-ianuarie, care generează o agitație marină ridicată. Perioada mai-iulie este marcată de viteze eoliene scăzute, factor ce conduce inevitabil la un potențial energetic minim al resurselor de valuri în zonele studiate.

5.6.2 Redimensionare

Ca parte a metodologiei de evaluare a performanței, AEP și C_f au fost calculate pentru fiecare WEC selectat în toate locațiile de studiu (P1, P2 și P3). Pentru a evalua adaptabilitatea echipamentelor la condițiile locale, calculele au integrat aplicarea unui factor de redimensionare geometrică (λ), ale cărui valori au fost variate în intervalul 0.69 - 1.31, utilizând un pas de discretizare de 0,01.

Procesul de redimensionare a avut un impact semnificativ asupra variației C_f . Reducerea dimensiunii dispozitivului (downscaling $\lambda < 1$) a dus la creșterea C_f , indicând o eficiență mai mare în captarea energiei. În contrast, creșterea dimensiunii dispozitivului ($\lambda > 1$) a condus la scăderea C_f , sugerând o eficiență mai redusă în condițiile de val date.

Datele simulate confirmă ipoteza conform căreia reducerea dimensiunii sistemelor WEC conduce la creșterea C_f în condițiile Mării Negre.

Creșterea dimensiunii dispozitivelor (upscaling $\lambda > 1$) a dus la o scădere a C_f , afectând producția de energie în condițiile dominante ale regimului valurilor. Rezultatele indică faptul că supradimensionarea WEC-urilor reduce eficiența.

Pentru fiecare locație, dimensiunea optimă aferent fiecărei tehnologii WEC a fost identificat prin calibrarea factorului de redimensionare, urmărindu-se atingerea unui maxim pentru indicatorii AEP și C_f . Pentru a evidenția clar impactul redimensionării asupra performanței globale, rezultatele optime sunt prezentate în antiteză cu valorile de referință obținute la limitele intervalului de analiză ($\lambda = 0.69$, respectiv $\lambda = 1.31$).

Tabel 5.5 Eficiența energetică C_f la factor de redimensionare $\lambda = 0.69$, $\lambda = 1$, $\lambda = 1.31$

WEC	C_f (%) $\lambda = 0.69$			C_f (%) $\lambda = 1$			C_f (%) $\lambda = 1.31$		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
CorPower Ocean	23.86	24.78	16.74	11.71	12.26	7.74	6.19	6.51	3.98
Aqua Buoy	8.41	8.88	5.2	2.79	2.98	1.61	1.03	1.13	0.56
AWS	1.78	1.88	1.13	0.51	0.54	0.31	0.17	1.86	0.11
OEBuoy	3.98	4.21	2.35	1.4	1.49	0.79	0.56	0.59	0.29
Pontoon	5.17	5.4	3.25	2.32	2.43	1.37	1.17	1.24	0.64
Langlee	4.88	5.11	2.99	2.38	2.52	1.34	1.16	1.23	0.62
CETO	4.71	4.95	2.6	2.22	2.36	1.11	1.06	1.13	0.49
Oyster	24.31	25.29	16.63	11.73	12.39	7.27	5.79	6.16	3.37
Oyster 2	5.85	6.16	3.56	2.19	2.33	1.24	0.94	1	0.49
Seabased AB	11.68	12.1	7.58	6.09	6.39	3.5	3.32	3.52	1.71
SSG	7.81	8.19	4.97	2.98	3.15	1.83	1.31	1.39	0.79
BFHB	7.79	8.13	4.78	3.69	3.89	2.05	1.89	2.01	0.96
Oceantec	23.24	24.66	14.21	10.32	11.02	6.08	4.3	4.58	2.51
Wave Star	22.26	22.57	17.19	18.28	18.78	13.15	13.59	14.02	9.36
PWEC	21.76	22.59	15.74	11.88	12.48	7.82	6.43	6.81	3.99
Pelamis	10.5	11.04	6.51	4.39	4.66	2.61	1.9	2.02	1.11
Wave Bob	6.56	6.92	4.03	2.31	2.45	1.33	0.96	1.02	0.52
Wave Dragon	7.67	8.06	4.89	2.96	3.14	1.74	1.32	1.41	0.73

În toate punctele de studiu din Marea Neagră, eficiența energetică pentru WEC-urile evaluate rămân sub 26%, un rezultat care este în concordanță cu așteptările pentru mările cu potențial energetic redus, precum Marea Neagră [25].

Tabel 5.6 Producția energetică anuală AEP la $\lambda=0.69$, $\lambda=1$ și $\lambda=1.31$

WEC	AEP (MWh/an), $\lambda=0.69$			AEP (MWh/an), $\lambda=1$			AEP (MWh/an), $\lambda=1.31$		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
CorPower Ocean	228.3	237.1	160.1	410.7	429.8	271.6	559	587.1	359.4
Aqua Buoy	50.3	53.1	31.1	61.4	65.3	35.4	58	62.1	31.4
AWS	105.4	111.2	66.8	109.9	116.5	67.2	97.5	103.9	58.8
OEbuoy	274.2	289.8	162.2	353.9	375.9	199.3	361.7	385.7	193.7
Pontoon	447.5	468.1	281.5	735.9	771.7	435.9	956.9	1010.9	519.2
Langlee	194.4	203.5	118.9	347.2	367.5	196.2	435.4	463.5	231.5
CETO	29.3	30.8	16.2	50.5	53.7	25.4	62	66.5	29.1
Oyster	168.6	175.5	115.4	298.3	314.9	184.8	379	403.2	220.1
Oyster 2	466.5	491.2	284.1	640.9	679.3	361.6	704.6	750.5	371.8
Seabased AB	4.19	4.34	2.72	8.01	8.41	4.6	11.2	11.89	5.78
SSG	3735.3	3919.4	2377.2	5219	5521.8	3214	5908.1	6273.3	3574.5
BFHB	408.6	426.1	250.5	708.8	747.3	393.2	935.3	994.9	474.7
Oceantec	278	294.9	170	452.4	482.9	266.6	485.4	517	282.8
Wave Star	319.5	323.9	246.7	961.6	987.8	691.7	1838.9	1897.9	1266.1
PWEC	249.3	258.9	180.4	498.9	524.1	328.2	695.2	735.9	431.5
Pelamis	188.4	198	116.8	288.9	306.5	171.7	321.4	342	187.4
Wave Bob	157	165.5	96.51	202.6	214.9	116.9	215.8	230	116.9
Wave Dragon	819.6	1348.8	986	1813.3	1925	1069.3	2083.6	2225	1155.8

În ceea ce privește producția anuală de energie (AEP), ierarhia spațială a productivității ($P2 > P1 > P3$) identificată anterior la nivel general nu se mai menține uniformă.

Tabel 5.7 Factor de redimensionare optim pentru tehnologiile WEC

WEC	P1				P2				P3			
	λ	AEP (MWh/an)	λ	C_f (%)	λ	AEP (MWh/an)	λ	C_f (%)	λ	AEP (MWh/an)	λ	C_f (%)
CorPower Ocean	1.31	559	0.69	23.8	1.31	587	0.69	24.8	1.31	359	0.69	16.7
Aqua Buoy	1.07	63.9	0.69	8.41	1.07	65.6	0.69	8.88	0.95	35.4	0.69	5.2
AWS	0.89	110.3	0.69	1.78	0.89	116.8	0.69	1.88	0.84	68.9	0.69	1.13
OEbuoy	1.19	364.1	0.69	3.98	1.20	387.8	0.69	4.21	1.09	200.1	0.69	2.35
Pontoon	1.31	957	0.69	5.17	1.31	1011	0.69	5.41	1.31	519.3	0.69	3.25
Langlee	1.31	435.4	0.69	4.88	1.31	463.5	0.69	5.11	1.31	231.5	0.69	2.99
CETO	1.31	62	0.69	4.71	1.31	66.5	0.69	4.95	1.31	29.1	0.69	2.6
Oyster	1.31	379	0.69	24.3	1.31	403.2	0.69	25.3	1.31	220.1	0.69	16.6
Oyster 2	1.31	704.6	0.69	5.85	1.31	750.5	0.69	6.16	1.31	371.8	0.69	3.56
Seabased AB	1.31	11.2	0.69	11.7	1.31	11.9	0.69	12.1	1.31	5.8	0.69	7.58
SSG	1.30	5914	0.69	7.81	1.31	6273	0.69	8.19	1.29	3577	0.69	4.97
BFHB	1.31	935	0.69	7.79	1.31	995	0.69	8.13	1.31	474.7	0.69	7.78
Oceantec	1.27	494.2	0.69	23.2	1.27	526.4	0.69	24.6	1.27	287	0.69	14.2
Wave Star	1.31	1839	0.69	22.3	1.31	1898	0.69	22.6	1.31	1266	0.69	17.2
PWEC	1.31	695.2	0.69	21.8	1.31	735.9	0.69	22.6	1.31	431.5	0.69	15.7
Pelamis	1.29	321.7	0.69	10.5	1.29	342.2	0.69	10	1.28	187.6	0.69	6.6
Wave Bob	1.31	215.8	0.69	6.56	1.31	230	0.69	6.92	1.12	118.7	0.69	4.03
Wave Dragon	1.30	2084	0.69	7.67	1.30	2225	0.69	8.06	1.28	1159	0.69	4.89

Reducerea dimensiunii are un efect benefic asupra C_f , deoarece toate tehnologiile evaluate au obținut cele mai bune rezultate la factorul de redimensionare minim considerat, $\lambda = 0.69$. Mărirea dimensiunii pentru toate WEC-urile evaluate conduce la o scădere a valorii C_f . În ceea ce privește redimensionarea în raport cu AEP, factorul de redimensionare optim variază în funcție de tehnologie, producția maximă de energie putând fi obținută fie prin mărirea, fie prin reducerea dimensiunii, în funcție de caracteristicile specifice ale fiecărui WEC.

Rezultatele pentru cele trei puncte de studiu, confirmă faptul că supradimensionarea conduce la o creștere a AEP, aceasta se face adesea în detrimentul unei eficiențe energetice C_f mai scăzută.

6 Concluzii

Energia valurilor reprezintă o sursă regenerabilă încă nevalorificată în România, care ar putea contribui la atingerea noilor obiective energetice naționale. Din cauza regimului relativ calm al mării, potențialul energetic brut al valurilor de la litoralul românesc este modest. Până în prezent, studiile efectuate nu au putut concluziona rentabilitatea implementării sistemelor de valorificare a energiei valurilor pentru litoralul Mării Negre.

Rezultatele prezentate au fost determinate pentru condiții ideale, fără a lua în considerare variabilitatea regimului de valuri, din cauza lipsei datelor disponibile. Nu a fost aplicată o strategie de control pentru sistemele de valorificare a energiei valurilor, utilizarea unei strategii ar putea conduce la creșterea eficienței acestora. Studiul a utilizat matrici de putere pentru mai multe sisteme de valorificare a energiei valurilor, care prezintă un nivel de incertitudine cuprins între 10% și 40%, conform Babarit et al. Rezultatele trebuie interpretate ținând cont de acest grad de incertitudine [55].

Cercetarea a vizat evaluarea performanțelor unui portofoliu de 18 tehnologii WEC, atât la dimensiune originală cât și pentru dimensiuni subdimensionate și supradimensionate, în trei puncte de interes, având în vedere producția energetică anuală AEP și eficiența energetică Cf, parametrii esențiali în selecția tehnologiei optime. Performanța energetică nu corespunde întotdeauna cu performanța economică. Toate WEC-urile evaluate prezintă un comportament similar în ceea ce privește producția de energie la toate punctele de studiu.

Rezultatele indică faptul că utilizarea WEC-urilor redimensionate ar putea îmbunătăți valorificarea energiei valurilor pe litoralul românesc al Mării Negre. Prin optimizarea dimensiunii sistemelor pentru condiții specifice de valuri, este posibilă creșterea captării totale de energie. Strategia ar putea conduce la o generare de energie mai eficientă și mai fiabilă, valorificând mai bine importantă resursă marină. Rezultatele subliniază că proiectarea optimă a unui WEC nu este absolută, ci depinde de factorii economici specifici ai proiectului, precum dacă obiectivul este maximizarea veniturilor totale (favorizând AEP) sau asigurarea unei utilizări ridicate și constante a capacității nominale (favorizând Cf). Fiecare tehnologie WEC are o capacitate specifică de adaptare la condiții diferite de mediu și dimensiuni operaționale.

Studiul actual poate reprezenta o resursă valoroasă pentru factorii de decizie, investitori și dezvoltatori de proiecte în identificarea celei mai potrivite tehnologii WEC pentru implementare pe litoralul românesc al Mării Negre, în funcție de obiectivul urmărit: maximizarea producției totale de energie sau optimizarea eficienței conversiei.

6.1 Rezultate obținute

Prezenta cercetare a evaluat fezabilitatea implementării a 18 tehnologii de valorificare a energiei valurilor pe litoralul românesc al Mării Negre, scoțând în evidență următoarele particularități:

- Analiza comparativă a indicat punctul de studiu P2 ca fiind cel mai favorabil amplasament pentru extragerea energiei valurilor, surclasând punctele P1 și P3 prin resurse superioare și o stabilitate mai mare a randamentului energetic pe termen lung.
- Studiul demonstrează că utilizarea directă, fără a fi adaptate, a sistemelor proiectate pentru regimuri oceanice nu este eficientă în bazinul pontic.

În concluzie, implementarea sistemelor de valorificare a energiei valurilor în Marea Neagră este fezabilă din punct de vedere tehnic, cu condiția adaptării sistemelor la spectrul energetic local.

6.2 Contribuții originale

Prezenta lucrare aduce o serie de elemente de noutate în domeniul evaluării resurselor energetice regenerabile din bazinul Mării Negre, cele mai relevante contribuții fiind:

- O contribuție originală constă în selectarea celor trei puncte de studiu.
- Elaborarea unui cadru metodologic unitar pentru evaluarea performanțelor sistemelor WEC.
- Analiza comportamentului sistemului CorPower C4 în regimul de valuri din zona litoralului românesc al Mării Negre.
- Evaluarea multi-criterială a 18 tehnologii WEC.
- Întocmirea unui cadru de analiză bazat pe variația fină (pas de 0,01) a factorului de redimensionare (λ), permițând identificarea precisă a factorului de redimensionare optim [63].

6.3 Lista lucrărilor publicate

Rezultatele cercetărilor teoretice și ale simulărilor numerice privind optimizarea sistemelor de conversie a energiei valurilor și evaluarea eficienței energetice în sectorul românesc al Mării Negre, obținute pe durata efectuării studiilor doctorale, au fost valorificate după cum urmează:

Articole publicate în reviste de specialitate indexate BDI:

- T.-A. Teodorof, A. G. Majidi, M. O. Popescu, „SCALING WAVE ENERGY CONVERTERS FOR MAXIMUM EFFICIENCY ALONG THE ROMANIAN BLACK SEA COAST”, *AnnalsARSciEng*, vol. 17, nr. 2, pp. 32-50, dec. 2025, doi: 10.56082/annalsarscieng.2025.2.32.

Articole publicate în reviste de specialitate indexate WoS:

- T.-A. Teodorof, A. G. Majidi, M. O. Popescu, „WAVE ENERGY POTENTIAL AND WEC PERFORMANCE ALONG THE ROMANIAN BLACK SEA COAST”, *SCIENTIFIC BULLETIN Series C: Electrical Engineering & Computer Science*, vol. 88, nr. 1, pp. 465-478, 2026.

6.4 Perspective și provocări în valorificarea energiei valurilor

Analiza fundamentelor teoretice și a contextului tehnologic actual evidențiază faptul că energia valurilor reprezintă o resursă regenerabilă cu un potențial strategic major, caracterizată prin cea mai înaltă densitate de putere dintre toate sursele derivate din radiația solară. Integrarea acestuia în portofoliul energetic național și european răspunde direct directivelor actuale de decarbonizare (precum REPowerEU) și promite diversificarea și creșterea rezilienței Sistemului Electroenergetic.

Avansarea cercetărilor și implementarea cu succes a tehnologiilor de valorificare a energiei valurilor în zona Mării Negre sunt condiționate de soluționarea unor provocări tehnice, economice și de reglementare majore.

Potențialul de perfecționare tehnologică în domeniul valorificării energiei marine este substanțial. O direcție de cercetare deosebit de promițătoare o reprezintă optimizarea algoritmilor de control automat (pilotajul predictiv și reactiv) a sistemelor WEC.

Bibliografie

- [1] Y. Wen și Y. M. Low, „Long-term resource assessment and decarbonization potential of wave energy”, *Renewable Energy*, vol. 256, p. 124287, ian. 2026, doi: 10.1016/j.renene.2025.124287.
- [2] A. Akpınar, B. Bingölbalı, și G. Ph. Van Vledder, „Long-term analysis of wave power potential in the Black Sea, based on 31-year SWAN simulations”, *Ocean Engineering*, vol. 130, pp. 482-497, ian. 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.12.023.
- [3] S. Foteinis, „Wave energy converters in low energy seas: Current state and opportunities”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 162, p. 112448, iul. 2022, doi: 10.1016/j.rser.2022.112448.
- [4] L. Rusu, „Assessment of the Wave Energy in the Black Sea Based on a 15-Year Hindcast with Data Assimilation”, *Energies*, vol. 8, nr. 9, pp. 10370-10388, sep. 2015, doi: 10.3390/en80910370.
- [5] E. Rusu, „Wave energy assessments in the Black Sea”, *J Mar Sci Technol*, vol. 14, nr. 3, pp. 359-372, sep. 2009, doi: 10.1007/s00773-009-0053-6.
- [6] V.-M. Tanase, B.-C. Chiotoroiu, și N. Vatu, „Wave energy along the Romanian Southern Black Sea coast”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1122, p. 012029, nov. 2018, doi: 10.1088/1742-6596/1122/1/012029.
- [7] Ajab G. Majidi, Bilal Bingölbalı, și Adem Akpınar, „Power Production Performance of Different Wave Energy Converters in the Southwestern Black Sea”, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 14, nr. 7, pp. 191-195, 2020.
- [8] R. National Institute of Statistics, „Romanian Statistical Yearbook 2023 (Anuarul Statistic al României 2023)”. National Institute of Statistics, Bucharest, Romania, 2023.
- [9] World Bank Group, „Offshore Wind Technical Potential in the Black Sea”. ESMAP, Washington, DC, USA, 2020.
- [10] E. Vespremeanu, *Geografia Mării Negre*. București: Editura Universitară, 2005.
- [11] A. Posea, *Oceanografie*, Ed. a 3-A, Rev. București: Editura Fundației "România de Măine, 2006.
- [12] PARLAMENTUL ROMÂNIEI, „Legea nr. 17/1990 privind regimul juridic al apelor maritime interioare, al mării teritoriale, al zonei contigue și al zonei economice exclusive ale României”. Monitorul Oficial nr. 99, august 1990.
- [13] Ministerul Energiei, „Strategia Energetică a României 2025-2035, cu perspectiva anului 2050”. București, România, 2024.
- [14] Guvernul României, „Ordonanța de urgență nr. 97/2023 pentru aprobarea Planului de amenajare a spațiului maritim”. Monitorul Oficial al României, 2023.
- [15] David A. Ross, *Introducere în OCEANOGRAFIE*. Editura științifică și enciclopedică, 1976.
- [16] E. A. Pora și I. Oros, *LIMNOLOGIE ȘI OCEANOGRAFIE*. Editura didactică și pedagogică, 1974.
- [17] L. Rusu, „The wave and wind power potential in the western Black Sea”, *Renewable Energy*, vol. 139, pp. 1146-1158, aug. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.03.017.
- [18] C. Iulian și P.D. Lazăr, *Energia valurilor captare și conversie*. în Știința pentru toți, no. 181. București: Editura Științifică și Enciclopedică, 1982.
- [19] C. Iulian, *Utilizarea energiei valurilor*. București: Editura Tehnică, 1990.
- [20] E. Vlăsceanu, I. Omer, D. Niculescu, D. Marin, R. Mateescu, și L. Rusu, „Extreme Waves Conditions at the Entrance of Constanta Port”, *CM*, vol. 52, nr. 1, pp. 36-51, dec. 2022, doi: 10.55268/CM.2022.52.36.

- [21] L. Oniciu, *Conversia electrochimică a energiei*. Editura științifică și enciclopedică, 1977.
- [22] V. Lucian, *Surse nepoluante de producere a energiei electrice*. București: AGIR, 2005.
- [23] European Commission, „Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: An EU Strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future”. Brussels, Belgium, 2020.
- [24] European Scalable Offshore Renewable Energy Source și (EU-SCORES), „D7.9 LCOE Analysis for baseline project scenarios”. octombrie 2022.
- [25] A. G. Majidi, B. Bingölbalı, A. Akpınar, și E. Rusu, „Wave power performance of wave energy converters at high-energy areas of a semi-enclosed sea”, *Energy*, vol. 220, p. 119705, apr. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.119705.
- [26] B. Drew, A. R. Plummer, și M. N. Sahinkaya, „A review of wave energy converter technology”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 223, nr. 8, pp. 887-902, dec. 2009, doi: 10.1243/09576509JPE782.
- [27] A.-T. NEDELCU, Dinu ATODIRESEI, și Alecu TOMA, „ASSESSMENT OF THE MARINE WAVE ENERGY FOR THE NORTH-WESTERN AREA OF THE BLACK SEA”, *SBNA*, iun. 2017, doi: 10.21279/1454-864X-17-I1-011.
- [28] A. Silion și L. Rusu, „A Review Concerning the Offshore Wind and Wave Energy Potential in the Black Sea”, *JMSE*, vol. 13, nr. 9, p. 1643, aug. 2025, doi: 10.3390/jmse13091643.
- [29] A. G. Majidi, V. Ramos, P. Rosa-Santos, L. Das Neves, și F. Taveira-Pinto, „Power production assessment of wave energy converters in mainland Portugal”, *Renewable Energy*, vol. 243, p. 122540, apr. 2025, doi: 10.1016/j.renene.2025.122540.
- [30] A. G. Majidi, V. Ramos, K. Amarouche, P. Rosa Santos, L. Das Neves, și F. Taveira-Pinto, „Assessing the impact of wave model calibration in the uncertainty of wave energy estimation”, *Renewable Energy*, vol. 212, pp. 415-429, aug. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.05.049.
- [31] A. Majidi, B. Bingölbalı, A. Akpınar, G. Iglesias, și H. Jafali, „Downscaling wave energy converters for optimum performance in low-energy seas”, *Renewable Energy*, vol. 168, pp. 705-722, mai 2021, doi: 10.1016/j.renene.2020.12.092.
- [32] D. Ning și B. Ding, *Modelling and Optimisation of Wave Energy Converters*, 1 ed. Boca Raton: CRC Press, 2022. doi: 10.1201/9781003198956.
- [33] A. Babarit și H. Mouslim, „Récupération de l'énergie des vagues”, *Ressources énergétiques et stockage*, ian. 2013, doi: 10.51257/a-v1-be8570.
- [34] P. J. Tavner, *Wave and tidal generation devices: reliability and availability*. în Renewable Energy series, no. 18. London: Institution of Engineering and Technology, 2017.
- [35] M. Karimirad, *Offshore Energy Structures: For Wind Power, Wave Energy and Hybrid Marine Platforms*. Cham: Springer International Publishing, 2014. doi: 10.1007/978-3-319-12175-8.
- [36] Th. MICLESCU, *UTILIZAREA ENERGIEI ELECTRICE*. Editura didactică și pedagogică, 1980.
- [37] S. Pennock, M. Dickson, K. Rebenius, și J. Hals Todalshaug, „Results and Lessons Learned from CorPower Ocean's Full Scale C4 Wave Energy Converter First Ocean Deployment Period”, *Proc. EWTEC*, vol. 16, sep. 2025, doi: 10.36688/ewtec-2025-958.
- [38] A. Weinstein, G. Fredrikson, M. J. Parks, și K. Nielsen, „AquaBuOY - the offshore wave energy converter numerical modeling and optimization”, în *Oceans '04 MTS/IEEE Techno-Ocean '04 (IEEE Cat. No.04CH37600)*, Kobe, Japan: IEEE, 2004, pp. 1854-1859. doi: 10.1109/OCEANS.2004.1406425.

- [39] S. Bozzi, G. Besio, și G. Passoni, „Wave power technologies for the Mediterranean offshore: Scaling and performance analysis”, *Coastal Engineering*, vol. 136, pp. 130-146, iun. 2018, doi: 10.1016/j.coastaleng.2018.03.001.
- [40] A. Roach, M. Meek, R. Ali, B. DuPont, și B. Roberston, „A state-of-the-art review of submerged wave energy converters”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 222, p. 115901, oct. 2025, doi: 10.1016/j.rser.2025.115901.
- [41] Z. Mohd Yusop, M. Z. Ibrahim, M. A. Jusoh, A. Albani, și S. J. A. Rahman, „Wave-Activated-Body Energy Converters Technologies: A Review”, *ARFMTS*, vol. 76, nr. 1, pp. 76-104, oct. 2020, doi: 10.37934/arfmts.76.1.76104.
- [42] M. R. Shipon, M. S. Ali, M. A. Kabir, Md. Abdullah-Al-Mamun, și O. Farrok, „Pelamis Wave Energy Converter”, în *Oceanic Wave Energy Conversion*, O. Farrok și M. R. Islam, Ed., Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, pp. 45-66. doi: 10.1007/978-981-99-9814-2_3.
- [43] J. P. Kofoed, P. Frigaard, E. Friis-Madsen, și H. Chr. Sørensen, „Prototype testing of the wave energy converter wave dragon”, *Renewable Energy*, vol. 31, nr. 2, pp. 181-189, feb. 2006, doi: 10.1016/j.renene.2005.09.005.
- [44] Constantin-Cristian STROE și Valeriu PANAITESCU, „CENTRALA ELECTRICĂ HIDROPNEUMATICĂ ACȚIONATĂ DE VALURI”, *Buletinul AGIR*, vol. 4, pp. 80-85, 2015.
- [45] European Union-Copernicus Marine Service, „Black Sea wave power”. Mercator Ocean International, 2024. doi: 10.48670/MDS-00350.
- [46] D. C. Kapoor, „General bathymetric chart of the oceans (GEBCO)”, *Marine Geodesy*, vol. 5, nr. 1, pp. 73-80, ian. 1981, doi: 10.1080/15210608109379408.
- [47] A. Babarit, „A database of capture width ratio of wave energy converters”, *Renewable Energy*, vol. 80, pp. 610-628, aug. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.02.049.
- [48] G. Giannini *et al.*, „Wave Energy Converter Power Take-Off System Scaling and Physical Modelling”, *JMSE*, vol. 8, nr. 9, p. 632, aug. 2020, doi: 10.3390/jmse8090632.
- [49] International Electrotechnical Commission, „Marine energy-wave, tidal and other water current converters—part 100: electricity producing wave energy converters-power performance assessment”. Geneva: IEC, 62600-100, 2023.
- [50] A. Ulazia, M. Penalba, A. Rabanal, G. Ibarra-Berastegi, J. Ringwood, și J. Sáenz, „Historical Evolution of the Wave Resource and Energy Production off the Chilean Coast over the 20th Century”, *Energies*, vol. 11, nr. 9, p. 2289, aug. 2018, doi: 10.3390/en11092289.
- [51] L. Castro-Santos, D. Silva, A. R. Bento, N. Salvação, și C. Guedes Soares, „Economic Feasibility of Wave Energy Farms in Portugal”, *Energies*, vol. 11, nr. 11, p. 3149, nov. 2018, doi: 10.3390/en11113149.
- [52] G. Reikard, B. Robertson, și J.-R. Bidlot, „Combining wave energy with wind and solar: Short-term forecasting”, *Renewable Energy*, vol. 81, pp. 442-456, sep. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2015.03.032.
- [53] J. Morim, N. Cartwright, M. Hemer, A. Etemad-Shahidi, și D. Strauss, „Inter- and intra-annual variability of potential power production from wave energy converters”, *Energy*, vol. 169, pp. 1224-1241, feb. 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.080.
- [54] A. Gul Majidi, B. Bingölbalı, A. Akpınar, și E. Rusu, „Dimensionless Normalized Wave Power in the Hot-spot Areas of the Black Sea”, *E3S Web Conf.*, vol. 173, p. 01001, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202017301001.
- [55] A. Babarit, J. Hals, M. J. Muliawan, A. Kurniawan, T. Moan, și J. Krokstad, „Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters”, *Renewable Energy*, vol. 41, pp. 44-63, mai 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.10.002.

- [56] N. Almonacid, „Evaluating a project for wave energy generation at a coastal site in Chile”, 2015, *Unpublished*. doi: 10.13140/RG.2.1.2131.5447.
- [57] J. C. Pacaldo, P. H. T. Bilgera, și M. L. S. Abundo, „Nearshore Wave Energy Resource Assessment for Off-Grid Islands: A Case Study in Cuyo Island, Palawan, Philippines”, *Energies*, vol. 15, nr. 22, p. 8637, nov. 2022, doi: 10.3390/en15228637.
- [58] X. Shi, S. Li, B. Liang, J. Zhao, Y. Liu, și Z. Wang, „Numerical study on the impact of wave-current interaction on wave energy resource assessments in Zhoushan sea area, China”, *Renewable Energy*, vol. 215, p. 119017, oct. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.119017.
- [59] H. R. Ghafari, H. Ghassemi, și A. Neisi, „Power matrix and dynamic response of the hybrid Wavestar-DeepCwind platform under different diameters and regular wave conditions”, *Ocean Engineering*, vol. 247, p. 110734, mar. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.110734.
- [60] G. Giannini, P. Rosa-Santos, V. Ramos, și F. Taveira-Pinto, „Wave energy converters design combining hydrodynamic performance and structural assessment”, *Energy*, vol. 249, p. 123641, iun. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123641.
- [61] D. Silva, E. Rusu, și C. Soares, „Evaluation of Various Technologies for Wave Energy Conversion in the Portuguese Nearshore”, *Energies*, vol. 6, nr. 3, pp. 1344-1364, mar. 2013, doi: 10.3390/en6031344.
- [62] T.-A. Teodorof, A. G. Majidi, și M. O. Popescu, „WAVE ENERGY POTENTIAL AND WEC PERFORMANCE ALONG THE ROMANIAN BLACK SEA COAST”, *SCIENTIFIC BULLETIN Series C: Electrical Engineering & Computer Science*, vol. 88, nr. 1, pp. 465-478, 2026.
- [63] T.-A. Teodorof, A. G. Majidi, și M. O. Popescu, „SCALING WAVE ENERGY CONVERTERS FOR MAXIMUM EFFICIENCY ALONG THE ROMANIAN BLACK SEA COAST”, *AnnalsARSciEng*, vol. 17, nr. 2, pp. 32-50, dec. 2025, doi: 10.56082/annalsarscieng.2025.2.32.