



Universitatea Națională de Știință și
Tehnologie Politehnica București
Școala Doctorală de Inginerie Energetică



Rezumat

ABORDARI MULTICRITERIALE PENTRU DETERMINAREA CIRCULATIEI OPTIME DE PUTERE FOLOSIND TEHNICI DE OPTIMIZARE METAEURISTICĂ

Autor:

Ing. Murtadha Mahmood Sadkhan AL-KAABI

Conducător de Doctorat:

Prof. Em. Dr. Eng. Mircea EREMIA

Romania, Bucharest, 2023

Contents

DEDICATION	ii
ACKNOWLEDGMENT	iii
Abstract	iv
Rezumat	v
Abbreviations	ix
Nomenclature	x
List of Tables	xii
List of Figures	xiv
1. GENERAL INTRODUCTION	1
1.1. Thesis context	1
1.2. Main objective	2
1.3. Thesis structure	2
1.4. Literature Review	4
2. THE FORMULATION OF THE OPF PROBLEM	9
2.1. Conventional and intelligent optimization methods of OPF	9
2.2. Mathematical Model	11
2.2.1. The State and Variables	12
2.2.2. Objective Constraints	12
2.2.3. Objective Functions	14
3. THE MATHEMATICAL MODEL OF MODERN METAHEURISTIC OPTIMIZATION TECHNIQUES	17
3.1. Introduction	17
3.2. Grey Wolf Optimizer (GWO)	18
3.2.1. Encircling Prey	19
3.2.2. Hunting	19
3.2.3. Attacking	19
3.2.4. Searching	20
3.3. Harries Hawks Optimizer (HHO)	21
3.3.1. Exploration phase	21

3.3.2. Transformation from exploration to exploitation	22
3.3.3. Exploitation phase	22
3.4. Hunger Games Search (HGS)	23
3.4.1. Approach food	23
3.4.2. Hunger role	25
3.5. Slime Mould Algorithm (SMA)	25
3.5.1. Approach food	27
3.5.2. Wrap food	27
3.5.3. Oscillation	27
4. MULTI-OBJECTIVE OPTIMAL POWER FLOW (MOOPF)	28
4.1. Pareto concept optimization (PCO)	28
4.1.1. Pareto concept (PC)	28
4.1.2. The best compromise solution (BCS)	28
4.1.3. Crowding distance strategy	29
4.2. Multi-Objective Grey Wolf optimizer (MOGWO)	29
4.3. Multi-Objective Harries Hawks Optimizer (MOHHO)	30
4.4. Multi-Objective Hunger Games Search (MOHGS)	31
4.5. Multi - Objective Slime Mould Algorithm (MOSMA)	32
5. APPLICATION OF MODERN METAHEURISTIC OPTIMIZATION ALGORITHMS TO SOLVE SINGLE AND MULTI OBJECTIVE OPTIMAL POWER FLOW PROBLEMS	34
5.1. Generalities	34
5.2. Standard study Cases	36
5.2.1. Study case on IEEE 30 bus power system	36
5.2.1.1 Single-Objective OPF on IEEE 30-Bus Power System	37
5.2.1.2 Multiple-Objective OPF on IEEE 30-Bus Power System	44 a) Bi-
objective OPF	44
b) Triple-objective OPF	60
c)Quad and Quinta objective OPF	75
5.2.2. Study cases on the IEEE 57-bus power system	78
5.2.1.3 Single-objective OPF on IEEE 57-bus power system	78

5.2.1.4 Multiple-Objective OPF on IEEE 57-Bus Power System	81 a)
Bi-objective OPF	81
b) Triple-objective OPF on IEEE 57-bus.....	85
c) Quad and Quinta objective OPF on IEEE 57-bus	87
5.3. Practical Case Study: Iraqi Super Grid High Voltage (ISGHV) 400 kV	89
5.3.1. An Overview of the energy system in Iraq	89
5.3.2. Iraqi Super Grid High Voltage (ISGHV) 28 bus	91
5.3.3. Application of proposed algorithms to solve OPF problems on ISGHV 28 bus	91
5.3.3.1 Case no. 43	92
5.3.3.2 Case no. 44	92
5.3.3.3 Case no. 45	92
5.3.3.4 Case no. 46	93
5.4. Performance comparison	97
5.5. Summary	97
6. CONCLUSIONS, CONTRIBUTIONS, AND PERSPECTIVES	99
6.1. Conclusions	99
6.2. Thesis Contributions	101
6.3. Perspectives	102
7. APPENDICES	103
7.1. IEEE 57-bus power system	103
7.2. Iraqi Super Grid High Voltage 400 kV	137
Publications	141
REFERENCES	143

CAPITOLUL 1

INTRODUCERE GENERALĂ

1.1. Contextul tezei

Una dintre cele mai importante preocupări în sistemele electrice de alimentare cu energie este circulația de putere (PF). Scopul principal al studierii analizei circulațiilor de putere este de a determina puterea reactivă furnizată în liniile de transport, tensiunea la noduri și pierderile totale ale sistemului în condiții de operare normale. În ultimele decenii, circulația de putere optimă (OPF) a fost intens studiat de cercetători, deoarece este una dintre cele mai importante instrumente folosite în sistemele de gestionare a energiei pentru a asigura operarea fiabilă și planificarea sistemelor electroenergetice [1]. Pentru a optimiza funcțiile obiectiv în modelele matematice construite pentru sistemele electroenergetice, OPF trebuie să seteze variabilele de control respectând restricțiile de egalitate și inegalitate, deoarece OPF este o problemă non-convexă, neliniară și de mari dimensiuni. Puterea activă furnizată de grupurile de producție, exceptând nodul de referință, tensiunile la nodurile PU, compensatoarele de putere reactivă și setările ploturilor transformatoarelor sunt variabilele de control care sunt ajustate. Costul combustibilului pentru producția de energie electrică (GFC), pierderile reale de putere activă (RPL) în liniile de transport, emisiile de noxe în producerea energiei electrice (Em), abaterile de tensiune (VD) și indicele de stabilitate a tensiunii (VSI) în întregul sistem electroenergetic sunt funcțiile obiectiv care sunt de regula optimizate. OPF a fost prezentat pentru prima dată de Carpentier în 1962 [2].

Scopul principal al studierii OPF este de a obține valorile optime ale funcțiilor obiectiv, cum ar fi costul total al combustibilului, pierderile reale de putere activă, emisiile totale, profilurile de tensiune în nodurile rețelei și indicele de stabilitate a tensiunii pentru întregul sistem electroenergetic, prin setarea variabilelor de control și respectarea restricțiilor de egalitate și inegalitate [3]. Restricțiile modelelor matematice vor fi clasificate în restricții de egalitate și restricții de inegalitate. Primele reprezintă ecuațiile de echilibru ale fluxului de putere optim (OPF). Restricțiile de inegalitate reprezintă limitele variabilelor de stare și ale variabilelor de control. OPF este o problemă non-convexă, neliniară, statică și de mari dimensiuni, cu variabile de control discrete și continue [4].

1.2. Obiectiv principal

Principalele obiective ale acestei teze sunt rezolvarea problemelor de circulație de putere optima (OPF) cu obiective unice și multiple folosind patru tehnici recente de optimizare inteligentă. Tehnicile de optimizare selectate din literatura de specialitate pentru rezolvarea problemelor de circulație de putere optima cu obiectiv unic (SOOPF) în sistemele electroenergetice sunt *Grey Wolf Optimizer* (GWO), *Harris Hawks Optimizer* (HHO), *Hunger Games Search* (HGS) și *Slime Mold Algorithm* (SMA). Circulația optima de puteri multi-obiectiv (MOOPF) este foarte importantă în operarea și planificarea sistemelor electroenergetice datorită capacității sale de a găsi cea mai bună soluție de compromis pentru mai mult de o funcție obiectivă simultan [14]. Conceptul Pareto încorporează multe metode de optimizare pentru a ordona soluțiile nedominate și pentru a stabili probabilitatea de generare pentru indivizi. Algoritmii selectați din literatura de specialitate (GWO, HHO, HGS și SMA) au fost dezvoltati în cadrul acestei teze pentru

a rezolva probleme de circulație optima de putere (OPF) cu un singur obiectiv și multi-obiectiv și pentru a obține beneficii economice, de mediu, precum și beneficii tehnice. Conceptul Pareto este încorporat cu algoritmi selectați (GWO, HHO, HGS și SMA) pentru a rezolva probleme OPF multi-obiectiv. Abordarea folosită pentru a extrage cea mai bună soluție de compromis este teoria mulțimilor fuzzy. Costul combustibilului folosit de grupurile generatoare (GFC), emisiile de noxe (Em), pierderile reale de putere activa (RPL), deviația de tensiune (VD) și indicele de stabilitate a tensiunii (VSI) sunt funcțiile obiectiv care vor fi optimizate.

1.3. Structura tezei

Pentru a atinge obiectivele menționate mai sus, se vor explica pe scurt pașii pentru fiecare secțiune a tezei, după cum urmează:

Capitolul unu este o prezentare generală a introducerii circulației optime de puteri (OPF), a metodelor convenționale și inteligente de optimizare, analizei literaturii de specialitate, precum și prezentării obiectivului tezei și a metodologiei acestei teze. Prima parte a acestui capitol prezintă importanța studierii circulației optime de puteri pentru a obține beneficiile economice, tehnice și de mediu. A doua parte a acestui capitol reprezintă o trecere în revistă a literaturii de specialitate referitoare la aplicațiile optime ale circulației de puteri în sistemele electroenergetice. Tot aici se prezintă, de asemenea, clasificarea funcțiilor obiectiv pentru circulațiile optime de puteri în funcții unice și multi-obiectiv. Partea a patra cuprinde prezentarea obiectivului principal al acestei teze. Ultima parte este dedicată metodologiei utilizată în cadrul tezei.

Capitolul doi include modelul matematic al circulației optime de puteri. Acest capitol prezintă funcțiile obiectiv care vor fi optimizate de variabilele de control stabilite în mod optim cu restricțiile de egalitate și inegalitate satisfăcute. Aceste funcții obiectiv sunt costul total al combustibilului, emisiile de noxe, pierderile de putere activă, variația de tensiune și indicele de stabilitate a tensiunii. Funcțiile obiectiv vor fi considerate prin funcții unice și multi-obiectiv. De asemenea, acest capitol va prezenta modelul matematic de optimizare prin conceptul Pareto, teoria mulțimilor fuzzy și distanța de aglomerare pentru a rezolva funcții multi-obiective.

Capitolul 3 prezintă patru tehnici moderne de optimizare metaeuristică selectate pe baza performanțelor lor din literatura de specialitate, Grey Wolf Optimizer (GWO), Harris Hawks Optimizer (HHO), Hunger Games Search (HGS) și Slime Mold Algorithm (SMA). Acești algoritmi au fost propuși în literatura de specialitate pentru a rezolva probleme de circulație optimă de puteri cu un singur obiectiv (SOOPF) în sistemele electroenergetice. Pseudo-codurile și schemele logice ale algoritmilor selectați (GWO, HHO, HGS și SMA) au fost prezentate de asemenea în acest capitol.

Capitolul 4 descrie abordările care au fost utilizate pentru rezolvarea problemelor de circulație optimă de puteri (MOOPF) cu funcții multi-obiectiv. Autorul a dezvoltat algoritmi selectați (GWO, HHO, HGS și SMA) în abordări originale numite Multi-Obiective Grey Wolf Optimizer (MOGWO), Multi-Obiective Harris Hawk's Optimization (MOHHO), Multi-Obiective Hunger Games Search (MOHGS), și algoritmul multi-obiectiv Slime Mold Algorithm (MOSMA) pentru a se putea folosi în rezolvarea problemelor de circulație optimă de puteri multiobiectiv (MOOPF).

De asemenea, acest capitol prezintă schema logică și secvențele de calcul pentru aplicarea și rezolvarea problemelor MOOPF ale algoritmilor dezvoltate de autor (MOGWO, MOHHO, MOHGS și MOSMA).

Capitolul 5 tratează aplicarea tehnicilor de optimizare metaeuristică pentru a rezolva circulația optimă de puteri cu un singur și multi-obiectiv în sistemele electroenergetice. Algoritmii selectați (GWO, HHO, HGS și SMA) sunt utilizați pentru a rezolva probleme cu o singură funcție obiectiv pentru circulația optimă de puteri (SOOPF). Abordările dezvoltate de autor (MOGWO, MOHHO, MOHGS și MOSMA) au fost propuse pentru a rezolva probleme de circulație optimă de putere multi-obiectiv (MOOPF). Funcțiile obiectiv care vor fi optimizate sunt costul total al combustibilului al grupurilor generatoare, pierderile de putere activă pe liniile de transport, emisia totală de noxe a grupurilor termice pe combustibili fosili, abaterea tensiunii în **nodurile rețelei** și indicele de stabilitate a tensiunii pentru întregul sistem. Pentru investigarea performanței algoritmilor autorul a folosit două sisteme electroenergetice de testare standardizate: Sistemul IEEE 30-bus (sistem mic) și sistemul IEEE 57-bus (sistem mediu), precum și sistemul real „Superrețea irakiană de înaltă tensiune 400 kV”. De asemenea, în acest capitol se vor compara rezultatele optime ale funcțiilor obiective obținute prin algoritmii selectați din literatura de specialitate (GWO, HHO, HGS și SMA) și abordările originale dezvoltate de autor (MOGWO, MOHHO, MOHGS și MOSMA) referitor la rezultatele optime obținute prin tehnici moderne de optimizare metaeuristică. raportate în literatura de specialitate pentru a demonstra viabilitatea și eficiența algoritmilor și a abordărilor dezvoltate de autor. Au fost efectuate diferite teste pentru a realiza simultan funcții multi-obiectiv unice și conflictuale (funcții obiective unice, Bi, Tri, Quad și Quinta) pentru rezolvarea problemelor OPF cu un singur și multi-obiectiv. Autorul a aplicat 46 de studii de caz pe sistemele de test IEEE 30, IEEE 57 și sistemul IRAK 400 kV ale algoritmilor selectați (GWO, HHO, HGS și SMA) precum și a dezvoltărilor realizate de autor (MOGWO, MOHHO, MOHGS și MOSMA). Din aceste 46 de studii de caz, 14 au fost studii de caz pentru un singur obiectiv, 12 studii de caz pentru funcții Bi obiectiv, 12 studii de caz pentru funcții tri obiectiv, 6 studii de caz pentru funcții obiectiv Quad, două studii de caz pentru funcțiile obiectiv Quinta. Conceptul Pareto este metoda de optimizare care a fost folosită pentru a găsi soluții nedominate. Teoria mulțimilor fuzzy este tehnica care a fost aplicată pentru a extrage cea mai bună soluție de compromis (BCS). Pentru a ordona și a reduce soluțiile nedominate, distanța de compactare este tehnica care a fost aplicată.

Ultimul capitol tratează concluziile și lucrările viitoare. Referințele și anexele datelor pentru sistemele de test IEEE 30-bus, IEEE 57-bus și Iraqi Super Grid High Voltage 28-bus sunt prezentate la sfârșitul acestei teze

CAPITOLUL 2 FORMULAREA PROBLEMEI OPF

2.1. Metode convenționale și inteligente de optimizare a OPF

Metodele de optimizare convenționale și inteligente sunt tehnicile care vor fi folosite pentru a rezolva problemele OPF. Au fost prezentați algoritmi meta-euristici pentru a ilustra limitele acestor metode, permițând rezolvarea eficientă a problemelor OPF cu funcții unice și multiobiectiv. Fig. 2.1 prezintă clasificarea metodelor de optimizare.

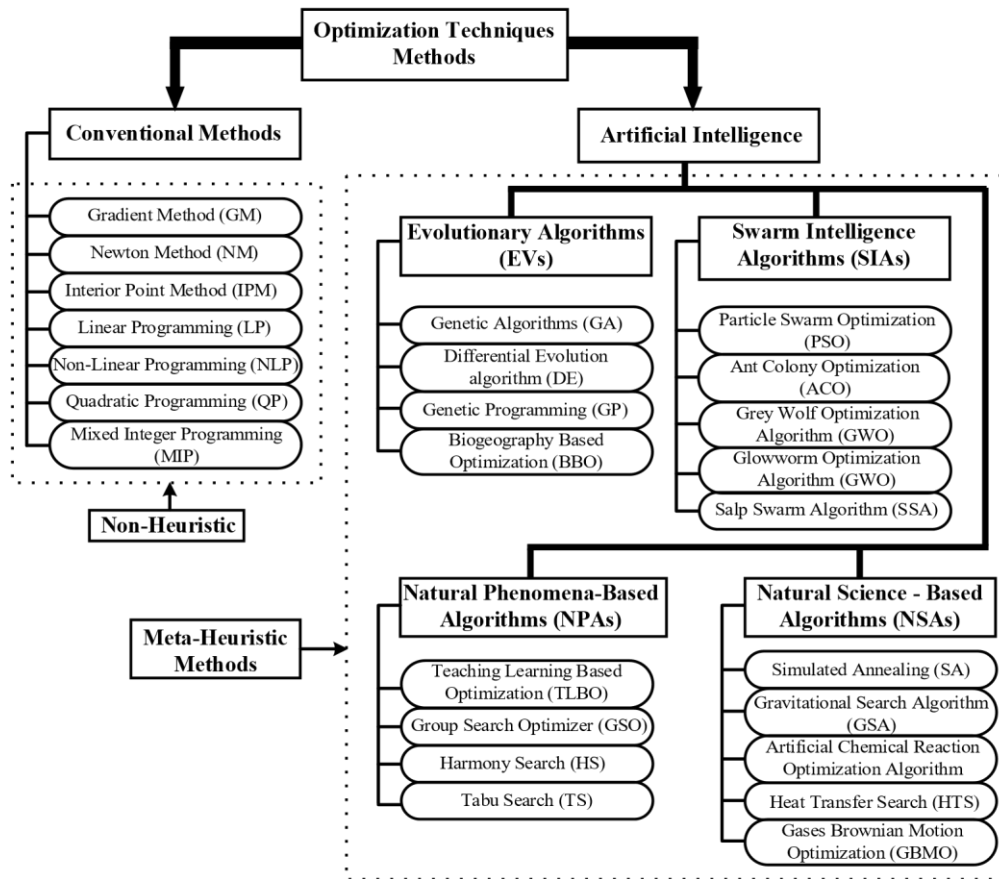


Figure 2. 1 Clasificarea metodelor de optimizare.

2.2. Model matematic

Scopul principal al optimizării OPF cu obiectiv unic sau multiplu în sistemele electroenergetice constă în optimizarea funcțiilor obiectiv de tip unic și multiplu (Bi, Tri, Quad și Quinta), prin stabilirea unor variabile de control optime (puterea activă produsă de generatoare, cu excepția puterii active produse de nodul de echilibru, marimea tensiunii la nodurile PV, compensatorii surselor VAR și reglajul setărilor ploturilor transformatoarelor), satisfăcând simultan restricțiile de egalitate și inegalitate. Modelul matematic poate fi formulat astfel:

$$\text{Optimize } f(x, u) = f(x, u_1, u_2, \dots, u_{Nobj})$$

$$\begin{aligned} \text{subjected to } \quad & g(x, u) = 0 \\ & h(x, u) \leq 0 \end{aligned} \tag{2.1}$$

2.2.1. Funcții obiectiv

În acest articol, cele cinci funcții obiectiv cele mai comune în literatura de specialitate au fost optimizate pentru a rezolva problemele OPF, acestea fiind costul combustibilului, pierderile de putere activă, emisiile de noxe, deviația tensiunii și indicele de stabilitate a tensiunii.

- *Costul total al combustibilului [\$/h]*
- *Pierderi de putere activă [MW]*
- *Emisia totală de emisii [ton/h]*
- *Abaterea tensiunii [p.u.]*
- *Indicele de stabilitate a tensiunii*

CAPITOLUL 3 MODELUL MATEMATIC AL TEHNICILOR MODERNE DE OPTIMIZARE METAHEURISTICA

În această teză, sunt selectati patru algoritmi meta-euristici recenti: *Grey Wolf Optimizer* (GWO), *Harris Hawks Optimizer* (HHO), *Hunger Games Search* (HGS), și *Slime Mold Algorithm* (SMA).

3.1. Grey Wolf Optimizer (GWO)

Grey Wolf Optimizer (GWO) este o tehnică de optimizare euristică recentă, inspirată de comportamentul social al lupilor cenușii, care fac parte din familia Canidae. Lupii cenușii sunt împărțiți în patru niveluri de conducere, denumiți alfa (α), beta (β), delta (δ) și omega (ω). Principali pași ai vânătorii lupilor cenușii sunt următorii:

3.1.1. Încercuire Pradă

3.1.2. Vânătoare

3.1.3. Atacul

3.1.4. Cautarea

3.2. Harris Hawks Optimizer (HHO)

Harris Hawks Optimizer (HHO) este o tehnică de optimizare bazată pe populație recent descoperită, propusă de A. Heidari și colaboratorii săi [5]. Cele două procese principale ale MOHHO, explorarea și exploatarea, sunt procese esențiale. Algoritmul HHO poate fi descris pe scurt astfel:

3.2.1. Faza de explorare

3.2.2. Transformarea de la explorare la exploatare

3.2.3. Faza de exploatare

3.3. Hunger Games Search (HGS)

Hunger Games Search (HGS) este o nouă tehnică de optimizare inspirată de comportamentul cooperativ al animalelor sociale, comportamentul fiind proporțional cu nivelul lor de foame.

Procesele caracteristice ale acestui algoritm pot fi rezumate în două etape, după cum urmează:

3.3.1. Apropiere de mâncare

3.3.2. Rolul foamei

3.4. Slime Mold Algorithm (SMA)

Slime Mold Algorithm (SMA) este o nouă tehnică de optimizare inspirată natură și propusă de S. Li și colaboratorii săi în 2021 [6]. Procesele SMA legate de abordarea hranei, învăluirea hranei și oscilație pot fi rezumate astfel:

3.4.1. Apropierea de mâncare

3.4.2. Învaluirea mâncării

3.4.3. Oscilație

CAPITOLUL 4 CIRCULATII OPTIME DE PUTERI MULTI-OBIECTIV (MOOPF)

Au fost propuse noi abordări pentru rezolvarea problemelor MOOPF (multi-obiective optimal power flow) cu două sau mai multe funcții obiectiv optimizate simultan. Aceste abordări includ Multi Obiectiv Grey Wolf Optimizer (MOGWO), Multi-Obiectiv Harris Hawks Optimizer (MOHHO), Multi-Obiectiv Hunger Games Search (MOHGS) și Multi-Obiectiv Slime Mold Algorithm (MOSMA). Pe baza numărului de funcții obiectiv, conceptul Pareto (PC) este abordarea propusă pentru identificarea soluțiilor dominate și nedominate. Alegerea ce revine decidentului este de a determina cea mai bună soluție de compromis (BCS) din rândul soluțiilor nedominante (NDS). În această teză, funcția de apartenență fuzzy (FMF) este ecuația utilizată pentru a extrage BCS din NDS. În final, strategia specifică utilizată pentru a reduce și a aranja NDPF (NonDominated Point Front) este distanța de aglomerare (CD).

4.1. Multi Obiectiv Grey Wolf Optimizer (MOGWO)

În această teză, Grey Wolf Optimizer (GWO) a fost dezvoltat pentru a deveni un Multi Obiectiv Grey Wolf Optimizer (MOGWO) cu scopul de a rezolva problemele de circulații de puteri optime multi-obiectiv. Cele două proceduri principale ale MOGWO, așa cum au fost menționate anterior, respectiv învăluirea și vânătoarea, reprezintă etapele cruciale.

4.2. Multi-Obiectiv Harris Hawks Optimizer (MOHHO)

Cel de-a doua abordare dezvoltată pentru a rezolva MOOPF este Multi-Obiectiv Harris Hawks Optimizer (MOHHO).

4.3. Multi-Obiectiv Obiectiv Hunger Games Search (MOHGS) A treia abordare

propusă pentru rezolvarea problemelor MOOPF (Optimizare Multi-Obiectivă a Fluxului de Putere Optimal) cu două sau mai multe funcții obiectiv, optimizate simultan, poartă numele de Multi-Obiectiv Obiectiv Hunger Games Search (MOHGS).

4.4. Multi - Obiectiv Slime Mould Algorithm (MOSMA)

Ultima metodă din această teză este Multi-Obiectiv Obiectiv Slime Mold Algorithm (MOSMA).

CAPITOLUL 5 APLICAREA ALGORITMILOR MODERNI DE OPTIMIZARE METAHEURISTICĂ PENTRU REZOLVAREA

PROBLEMELE DE CIRCULAȚII OPTIME DE PUTERE CU UN SINGUR OBIECTIV ȘI MULTI-OBIECTIV

5.1. Generalități

Pentru a demonstra eficacitatea și performanța algoritmilor selectați din literatura de specialitate (GWO, HHO, HGS și SMA) precum și a dezvoltărilor originale ale autorului (MOGWO, MOHHO, MOHGS și MOSMA) în rezolvarea problemelor OPF, au fost utilizate două sisteme de testare standard (sistemul IEEE-30 de 30 de noduri și sistemul de test IEEE-57 cu 57 de noduri) și un sistem real (Sistemul de Înaltă Tensiune din Irak ISGHV cu 28 de noduri), pentru un total de 46 de cazuri cu diferite funcții obiectiv. Tabelul 5.1 descrie diversele studii de caz care au fost rezolvate. Rezultatele simulărilor au fost obținute pe un sistem Intel Core (TM) i5-2540 cu o frecvență de 2.6GHz și 6.00 GB de RAM (64 de biți).

Tabelul 5. 2 Diverse studii de caz.

Tip de sistem	Tipe de OF	Cazul #	FC	Em	Loss	VD	VSI	
IEEE 30-bus	Single OF	Cazul #1	□					
		Cazul #2			□			
		Cazul #3		□				
		Cazul #4				□		
		Cazul #5					□	
	Bi-OF(s)	Cazul #6	□	□				
		Cazul #7	□			□		
		Cazul #8	□			□		
		Cazul #9	□					□
		Cazul #10		□			□	
		Cazul #11				□	□	
		Cazul #12					□	□
	Triple-OF(s)	Cazul #13	□	□		□		
		Cazul #14	□	□			□	
		Cazul #15	□			□	□	
		Cazul #16	□			□		□
		Cazul #17	□	□				□
		Cazul #18	□				□	□
		Cazul #19		□		□	□	
	Quad-OF(s)	Cazul #20	□	□		□	□	
		Cazul #21	□	□		□		□
	Quinta-OF(s)	Cazul #22	□	□		□	□	□
IEEE 57-bus	Single OF(s)	Cazul #23	□					
		Cazul #24		□				

		Cazul #25			<input type="checkbox"/>			
		Cazul #26				<input type="checkbox"/>		
		Cazul #27					<input type="checkbox"/>	
	Bi-OF(s)	Cazul #28	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				
		Cazul #29	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>			
		Cazul #30		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
		Cazul #31	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>		
		Cazul #32	<input type="checkbox"/>					<input type="checkbox"/>
		Cazul #33	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		Cazul #34		<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		
	Triple-OF(s)	Cazul #35	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
		Cazul #36	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>		
		Cazul #37	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		Cazul #38		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		Cazul #39	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Quad-OF(s)	Cazul #40	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
		Cazul #41	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>
	Quinta-OF(s)	Cazul #42	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	ISGHV 28-bus	Single OF(s)	Cazul #43	<input type="checkbox"/>				
Cazul #44					<input type="checkbox"/>			
Cazul #45						<input type="checkbox"/>		
Cazul #46							<input type="checkbox"/>	

5.2. Sisteme de testare standard

În această teză, au fost testate două sisteme electroenergetice cu 30 și 57 de noduri conform standardului IEEE, în patruzeci și patru de atudii de caz care au fost investigate pentru a demonstra fezabilitatea și eficiența abordărilor propuse.

5.2.1 Studiu de caz IEEE 30

A) OPF cu un singur obiectiv pe sistemul de alimentare IEEE 30

Cinci funcții obiectiv au fost optimizate pentru a rezolva problema OPF (Optimal Power Flow) — costul de combustibil folosit de grupurile generatoare (GFC), pierderile de putere activă (RPL), emisiile de noxe (Em), deviația tensiunii (VD) și indicele de stabilitate a tensiunii (VSI) — prin stabilirea parametrilor variabilelor de control (puterea activă produsă de generatoare, cu excepția nodului de echilibru, tensiunea la nodurile PV, raportul de transformare al transformatoarelor și compensatorii surselor de VAR).

Au fost luate în considerare cinci cazuri cu funcții obiectiv diferite pentru a demonstra eficacitatea algoritmilor propuși GWO, HHO, HGS și SMS. Aceste cazuri sunt următoarele: Cazul 1: Minimizarea costurilor totale cu combustibil pentru grupurile generatoare.

Cazul 2: Minimizarea emisiilor totale de noxe ale grupurilor termice pe combustibili fosili.

Cazul 3: Reducerea pierderilor de putere activă în liniile de transport.

Cazul 4: Îmbunătățirea profilurilor de tensiune. Cazul

5: Îmbunătățirea stabilității tensiunii.

Tablelul 5.3 Rezultatele optime pentru funcția cu un singur obiectiv pe sistemul de test IEEE 30

Funcție obiectivă	Inițială	Cazul 1				Cazul 2			
		GWO	HHO	HGS	SMA	GWO	HHO	HGS	SMA
FC [\$/h]	901.6391	799.5214	799.7265	799.2202	799.2557	938.30	934.13	933.70	936.12
Em [ton/h]	0.2253	0.364	0.369	0.367	0.368	0.2176	0.2175	0.2174	0.2175
loss [MW]	5.6891	8.638	8.817	8.642	8.669	3.673	3.496	3.352	3.594
VD [p.u.]	1.1747	1.324	0.493	1.567	1.419	0.413	0.644	0.797	0.475
VSI	0.1727	0.126	0.136	0.120	0.124	0.143	0.139	0.131	0.148
Red. Rate	-	11.326%	11.303%	11.359%	11.355%	3.42%	3.48%	3.51%	3.46%
Funcție obiectivă	Inițială	Cazul 3				Cazul 4			
		GWO	HHO	HGS	SMA	GWO	HHO	HGS	SMA
FC [\$/h]	901.6391	966.19	967.50	966.84	964.57	839.20	816.141	889.278	868.051
Em [ton/h]	0.2253	0.221	0.2216	0.2216	0.2213	7.6644	8.1454	5.1253	6.2099
loss [MW]	5.6891	3.082	3.056	2.911	2.993	0.297	0.2964	0.2343	0.2569
VD [p.u.]	1.1747	1.129	0.7621	1.71	1.47	0.1413	0.1281	0.1195	0.1100
VSI	0.1727	0.134	0.1331	0.119	0.123	0.1385	0.1358	0.1375	0.1371
Red. Rate	-	45.83%	46.28%	48.83%	47.38%	87.97%	89.09%	89.83%	90.63%
Funcție obiectivă	Inițială	Cazul 5							
		GWO	HHO	HGS	SMA				
FC [\$/h]	901.6391	811.18	931.86	920.183	834.02				
Em [ton/h]	0.2253	6.721	3.5918	3.5803	6.3446				
loss [MW]	5.6891	0.293	0.2208	0.2204	0.31				
VD [p.u.]	1.1747	1.644	1.3991	1.9699	1.7545				
VSI	0.1727	0.1172	0.1150	0.1119	0.1157				
Red. Rate	-	32.16%	33.44%	35.20%	32.98%				

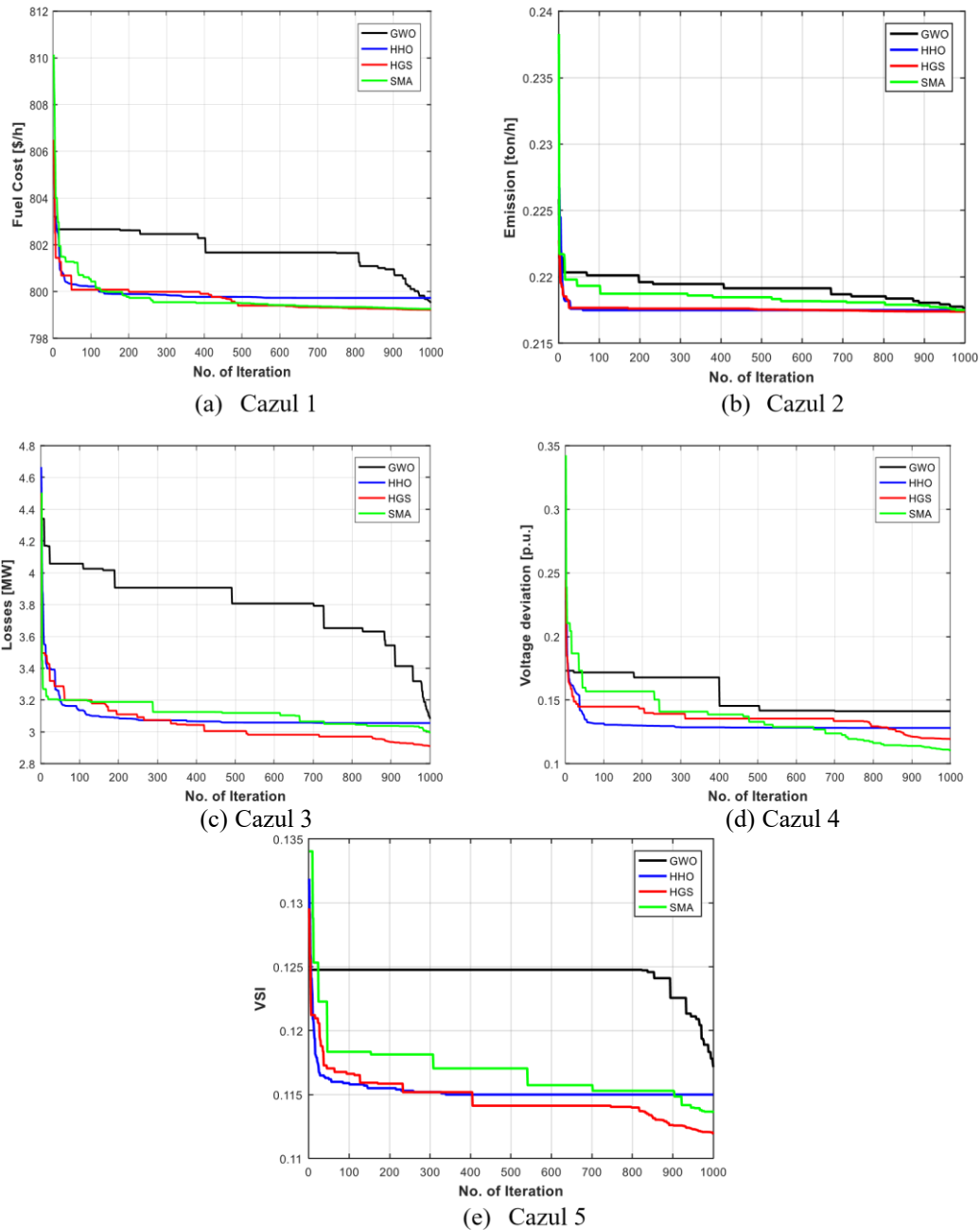


Figura 5. 4 Viteza de convergență pentru cazurile (1-5)

B) Optimizarea Multi-Obiectiv OPF pe Sistemul electroenergetic de test IEEE de 30 de Noduri

În această subsecțiune, două, trei, patru și cinci funcții obiectiv au fost optimizate simultan pentru a obține cea mai bună soluție de compromis (BCS) din rândul soluțiilor nedominante (NDS).

a) OPF cu două obiective

În această subsecțiune, două funcții obiectiv au fost optimizate simultan pentru a obține cea mai bună soluție de compromis (BCS) din rândul soluțiilor nedominante (NDS). În această

subsecțiune, s-au propus șapte studii de caz pentru a demonstra eficiența și superioritatea algoritmilor (MOGWO, MOHHO, MOHGS și MOSMA). Aceste cazuri pot fi rezumate astfel:

Cazul 6: Minimizarea costului combustibilului și a emisiilor simultan

Cazul 7: Minimizarea costului combustibilului și a pierderilor de putere activă simultan

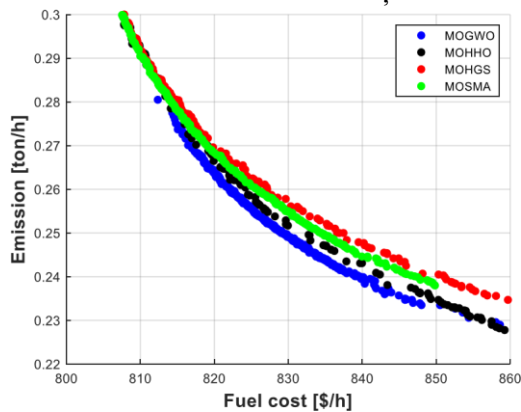
Cazul 8: Minimizarea costului combustibilului și a deviației tensiunii simultan

Cazul 9: Minimizarea costului combustibilului și a indicelui de stabilitate a tensiunii simultan

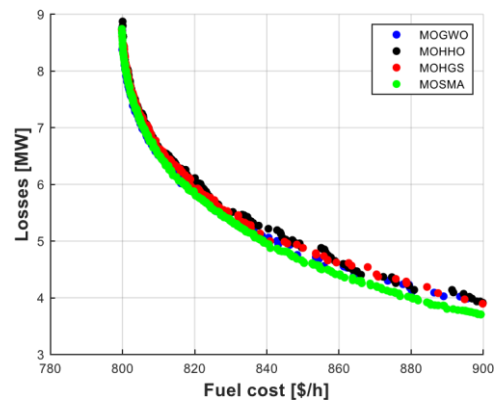
Cazul 10: Minimizarea emisiilor și a deviației tensiunii simultan

Cazul 11: Minimizarea pierderilor de putere activă și a deviației tensiunii simultan

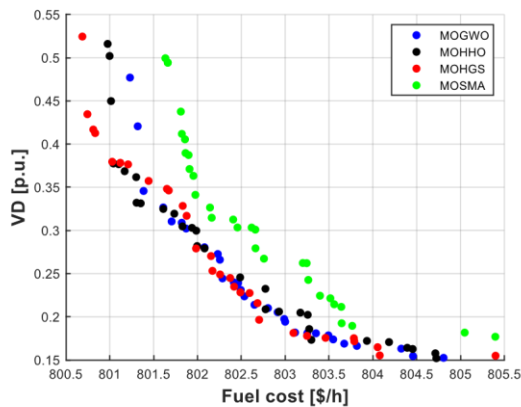
Cazul 12: Minimizarea deviației tensiunii și a indicelui de stabilitate a tensiunii simultan



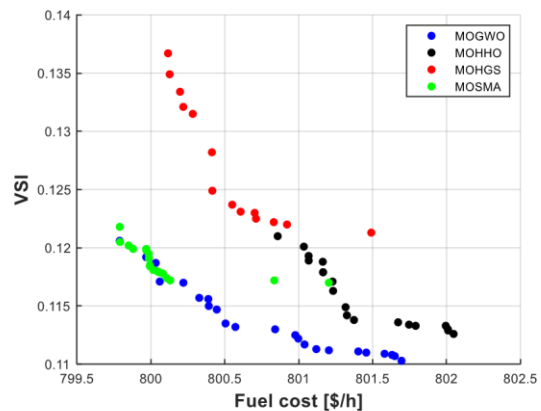
(a) Cazul #6 (FC & Em)



(b) Cazul #6 (FC & Loss)



(c) Cazul #8 (FC & VD)



(d) Cazul #9 (FC & VSI)

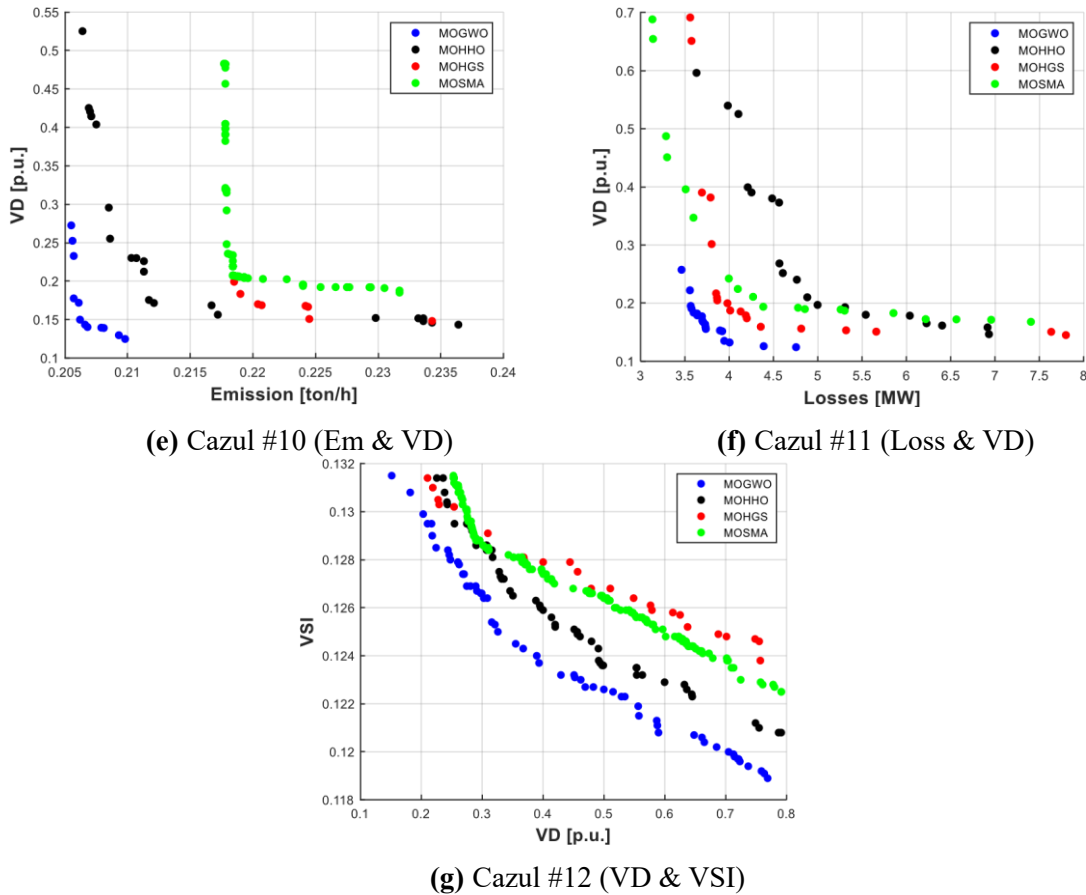


Figura 5.5 Soluție nedominată Pareto Front pentru cazurile (6-12).

b) OPF cu triplu obiectiv

În acest caz, au fost luate în considerare trei funcții obiectiv simultan pentru a obține cea mai bună soluție de compromis (BCS) din rândul soluțiilor nedominante (NDS) din setul nedominant.

Au fost propuse șapte studii de caz, care pot fi rezumate astfel:

Cazul 13: Minimizarea costului combustibilului, a emisiilor și a pierderilor

Cazul 14: Minimizarea costului combustibilului, a emisiilor și a abaterii tensiunii

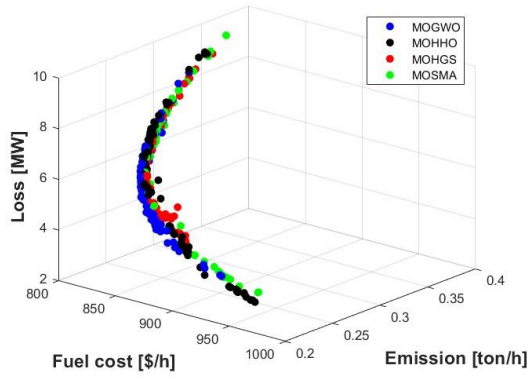
Cazul 15: Minimizarea costului combustibilului, pierderile reale de putere activa si abaterea tensiunii

Cazul 16: Minimizarea pierderilor, emisiilor și abaterii de tensiune

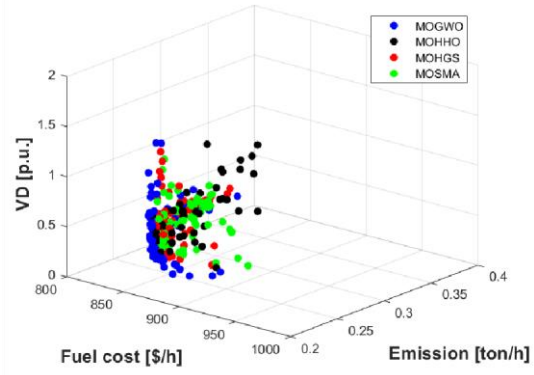
Cazul 17: Minimizarea costului combustibilului, pierderilor si a indicelui de stabilitate a tensiunii

Cazul 18: Minimizarea costului combustibilului, a emisiilor și a indicelui de stabilitate a tensiunii

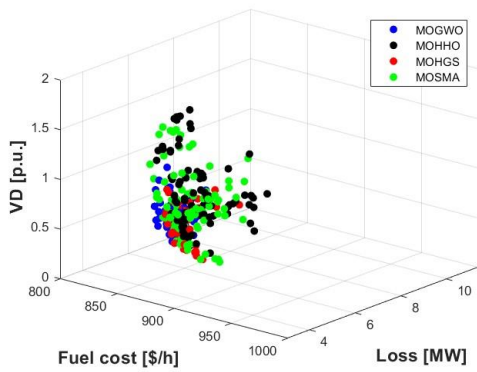
Cazul 19: Minimizarea costului combustibilului, abaterea tensiunii și a indicelui de stabilitate a tensiunii



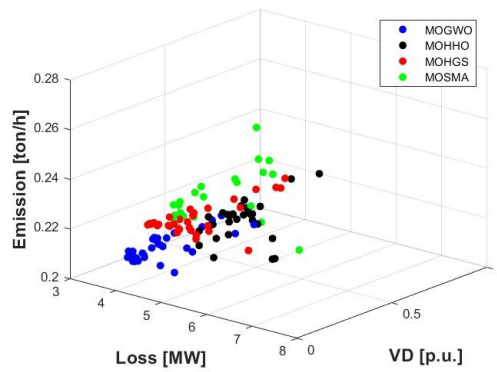
(a) Cazul #13 (FC & Loss & Em)



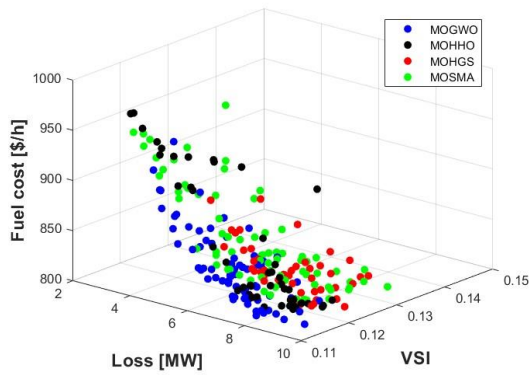
(b) Cazul #14 (FC & VD & Em)



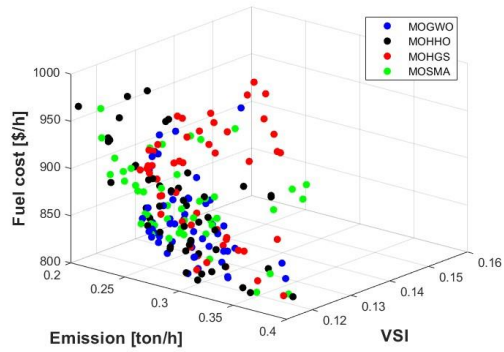
(c) Cazul #15 (FC & VD & Loss)



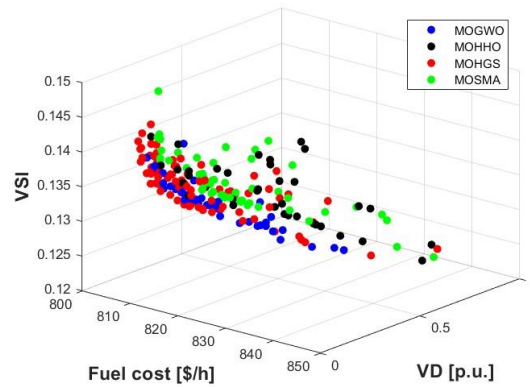
(d) Cazul #16 (Loss & Em & VD)



(e) Cazul #17 (Loss & FC & VSI)



(f) Cazul #18 (Em & FC & VSI)



(g) Cazul #19 (FC &VD & VSI)

Figura 5.6 Soluție nedominată Pareto Front pentru cazurile (13-19).

c) Quad și Quinta obiectiv OPF(

Cazul 20: Minimizarea costului combustibilului, emisiilor, pierderilor și abaterii de tensiune.

Cazul 21: Minimizarea costului combustibilului, a emisiilor, a pierderilor și a indicelui de stabilitate a tensiunii.

Cazul 22: Minimizarea costului combustibilului, a emisiilor, a pierderilor, a abaterii tensiunii și a indicelui de stabilitate a tensiunii.

Tabelul 5.3 Rezultatul optim pentru funcția Quad și Quinta-obiectiv pe sistemul de magistrală IEEE 30

Funcție obiectivă	Cazul 20				Cazul 21			
	GWO	HHO	HGS	SMA	GWO	HHO	HGS	SMA
FC [\$ /h]	836.5049	863.4444	845.4721	832.3665	819.2675	861.4731	819.4061	847.723
loss [MW]	5.9222	5.2679	5.7458	6.4495	6.6427	4.8018	7.4137	5.1423
Em [ton/h]	0.2460	0.2320	0.2507	0.2675	0.2692	0.2324	0.2898	0.2466
VD [p.u.]	0.2264	0.7258	0.1400	0.2189	1.4733	1.4139	0.3514	1.6979
VSI	0.1417	0.1317	0.1456	0.1408	0.1143	0.1193	0.1389	0.1183
Funcție obiectivă	Cazul 22							
	GWO	HHO	HGS	SMA				
FC [\$ /h]	827.746	844.3225	818.7575	824.7751				
loss [MW]	6.5865	6.1965	7.4471	6.3599				
Em [ton/h]	0.2625	0.2485	0.2912	0.2753				
VD [p.u.]	0.2575	0.3369	0.3272	0.5111				
VSI	0.1421	0.1342	0.1399	0.1290				

5.2.2 Studii de caz pe sistemul de test IEEE 57

În această subsecțiune, sistemul electroenergetic de test IEEE 57-bus este utilizat pentru a valida performanța algoritmilor selectați GWO, HHO, HGS și SMA. Capacitatea totală de generare a acestui sistem este de 1975,9 MW [18].

A) OPF cu un singur obiectiv pe sistemul de test IEEE 57 Pentru a demonstra superioritatea și performanța metodei propuse pe sistemul de test de 57 de noduri IEEE, au fost

luate în considerare cinci funcții obiectiv de tip unic (Cazul 23 până la Cazul 27). Viteza de convergență a metodei propuse este ilustrată în Figura 5.7. Au fost luate în considerare cinci cazuri cu funcții obiectiv diferite pentru a demonstra eficacitatea algoritmilor selectati GWO, HHO, HGS și SMS. Aceste cazuri sunt următoarele:

Cazul 23: Minimizarea costurilor totale cu combustibil pentru grupurile de generare.

Cazul 24: Minimizarea emisiilor totale de noxe produse de unitățile termice pe combustibili fosili.

Cazul 25: Reducerea pierderilor de putere activă în liniile de transport.

Cazul 26: Îmbunătățirea profilurilor de tensiune. Cazul

27: Îmbunătățirea stabilității tensiunii.

Tabelul 5.4 Rezultatul optim pentru funcția cu un singur obiectiv pe sistemul de test IEEE 57

Funcție obiectivă	Inițială	Cazul 23				Cazul 24			
		GWO	HHO	HGS	SMA	GWO	HHO	HGS	SMA
FC [\$ /h]	51353	41766.97	41728.48	41778.24	41617.33	45310	45313	45093	45092
Em [ton/h]	2.413	1.505	1.3913	1.3679	1.3589	0.9645	0.9626	0.9565	0.9645
loss [MW]	27.868	32.371	16.271	17.355	14.003	16.627	15.192	13.798	16.699
VD [p.u.]	1.126	4.0191	3.0688	3.0544	4.0085	4.0169	2.8481	2.5322	3.7026
VSI	0.28	0.3349	0.2775	0.2732	0.2223	0.4093	0.2912	0.2838	0.3600
Red. Rate	-	18.67%	18.74%	18.64%	18.96%	60.03%	60.10%	60.36%	60.03%
Funcție obiectivă	Inițială	Cazul 25				Cazul 26			
		GWO	HHO	HGS	SMA	GWO	HHO	HGS	SMA
FC [\$ /h]	51353	42848	44310	44558	44343	52679	56932	96339	97896
Em [ton/h]	2.413	1.3724	1.0334	1.0943	1.1069	2.3937	2.3162	4.9997	5.3157
loss [MW]	27.868	12.201	12.082	10.184	9.240	33.12	42.849	106.477	110.01
VD [p.u.]	1.126	1.637	2.255	1.937	3.744	0.8283	0.7416	0.7016	0.7151
VSI	0.28	0.2425	0.2631	0.2330	0.2513	0.2477	0.2467	0.2369	0.2699
Red. Rate	-	56.22%	56.65%	63.45%	66.84%	26.44%	34.2%	37.71%	36.52%
Funcție obiectivă	Inițială	Cazul 27							
		GWO	HHO	HGS	SMA				
FC [\$ /h]	51353	59448	56694	56692	82082				
Em [ton/h]	2.413	2.3328	2.5001	2.1099	4.1188				
loss [MW]	27.868	42.6415	50.080	41.125	91.261				
VD [p.u.]	1.126	3.6066	2.646	6.139	1.930				
VSI	0.28	0.21678	0.2033	0.1804	0.2141				
Red. Rate		22.58%	27.32%	35.52%	23.50%				

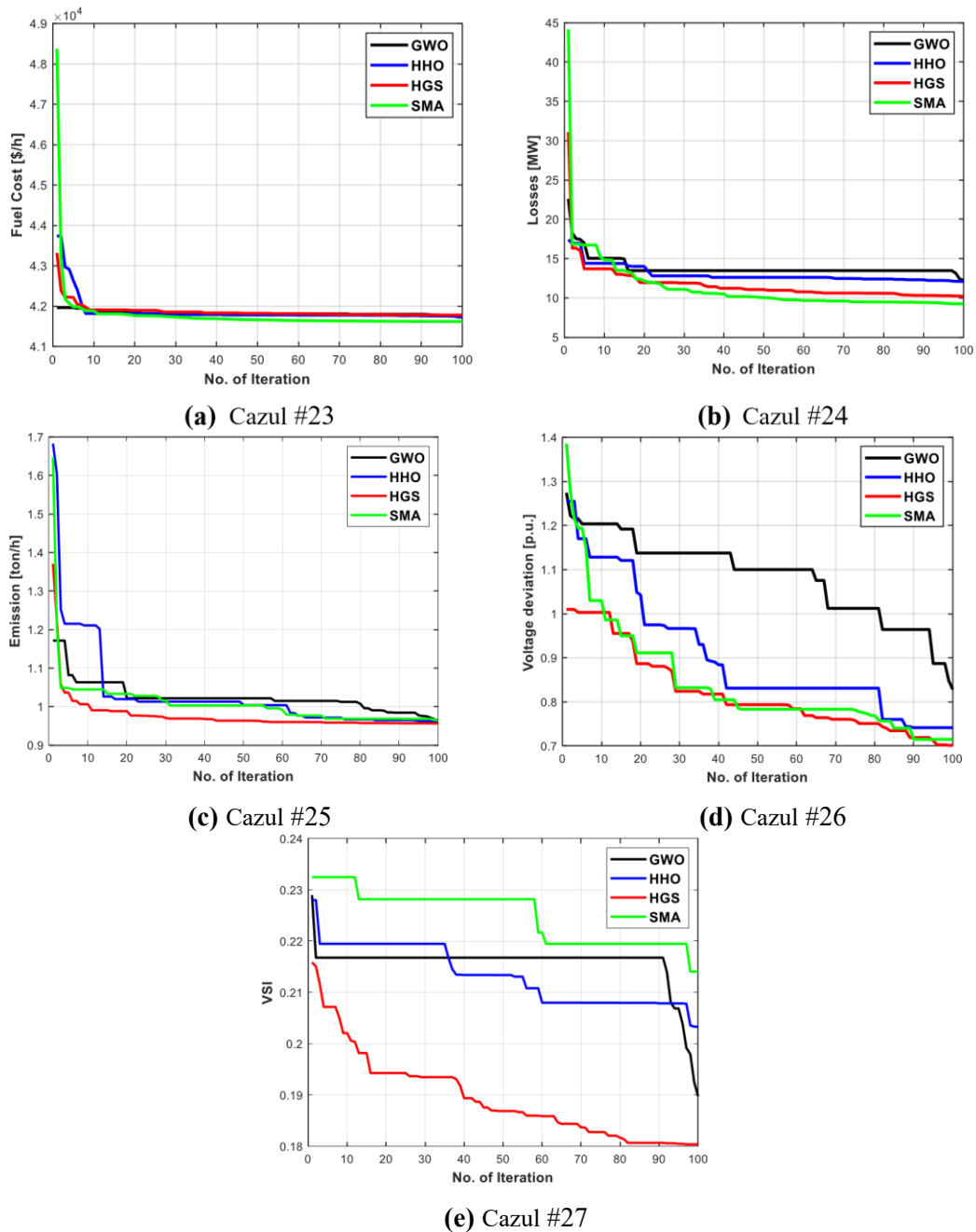


Figura 5.7 Caracteristicile de convergență ale algoritmilor pentru cazurile (23-27).

B) *OPF cu obiective multiple pe sistemul de test IEEE 57-Bus*

În această subsecțiune, două, trei, patru și cinci funcții obiectiv au fost optimizate simultan pentru a obține cea mai bună soluție de compromis (BCS) din rândul soluțiilor nedominante (NDS).

a) *OPF bi-obiectiv*

Aceste cazuri pot fi rezumate astfel:

Cazul 28: Minimizarea costului combustibilului și a emisiilor simultan.

Cazul 29: Minimizarea costului combustibilului și a pierderilor de putere activă

Cazul 30: Minimizarea pierderilor de putere activă și a emisiilor de noxe

Cazul 31: Minimizarea costului combustibilului și a deviației tensiunii

Cazul 32: Minimizarea costului combustibilului și a indicelui de stabilitate a tensiunii

Cazul 33: Minimizarea pierderilor de putere activă și a deviației tensiunii Cazul 34:

Minimizarea emisiilor de noxe și a deviației tensiunii.

b) OPF cu triplu obiectiv pe IEEE 57-bus

În acest caz, au fost luate în considerare simultan trei funcții obiectiv pentru a obține cea mai bună soluție de compromis (BCS) din rândul soluțiilor nedominante (NDS) din setul nedominant. Au fost propuse cinci studii de caz, care pot fi rezumate astfel:

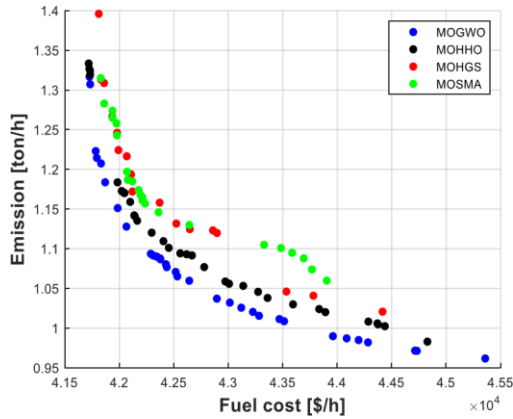
Cazul 35: Minimizarea costului combustibilului, emisiilor și pierderilor de putere activă.

Cazul 36: Minimizarea costului combustibilului, emisiilor și deviației tensiunii.

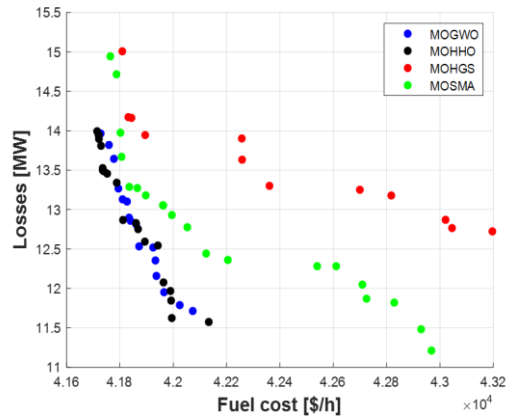
Cazul 37: Minimizarea costului combustibilului, pierderilor de putere activă și a deviației tensiunii.

Cazul 38: Minimizarea emisiilor, pierderilor de putere activă și deviației tensiunii simultan.

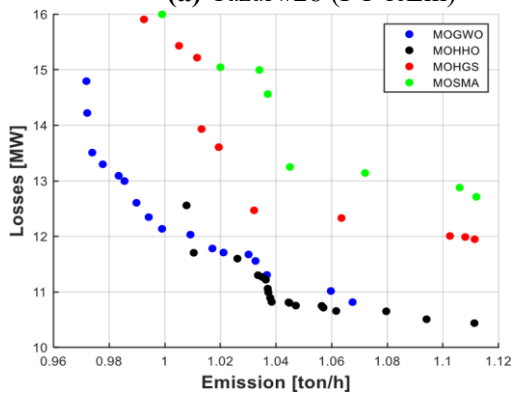
Cazul 39: Minimizarea costului combustibilului, deviației tensiunii și indicelui de stabilitate a tensiunii.



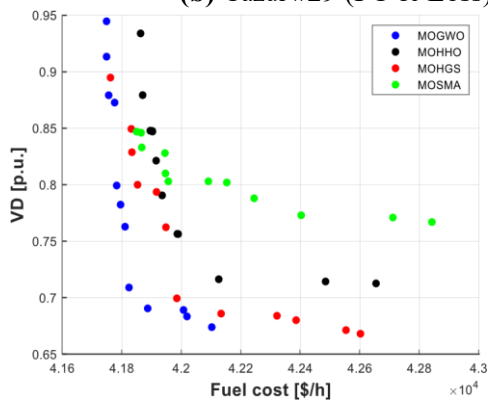
(a) Cazul #28 (FC & Em)



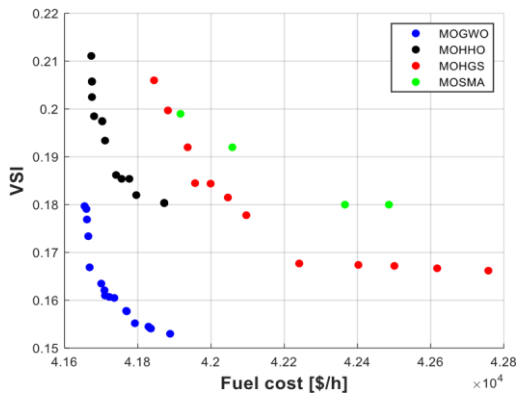
(b) Cazul #29 (FC & Loss)



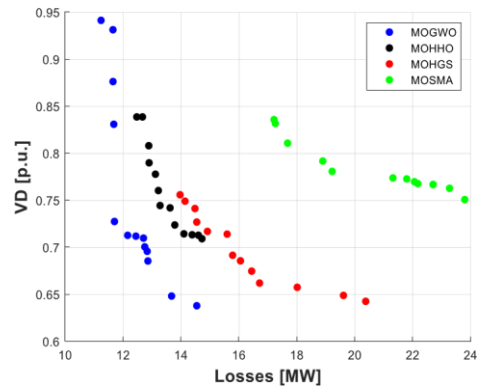
(c) Cazul #30 (Loss & Em)



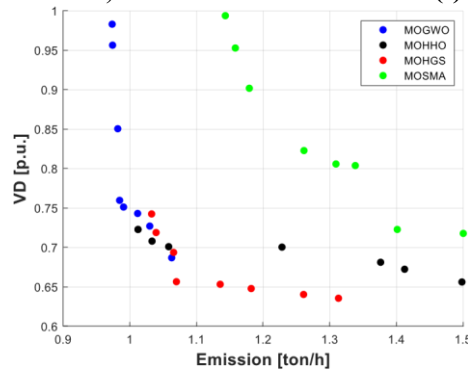
(d) Cazul #31 (FC & VD)



(e) Cazul #32 (FC & VSI)



(f) Cazul #33 (Loss & VD)

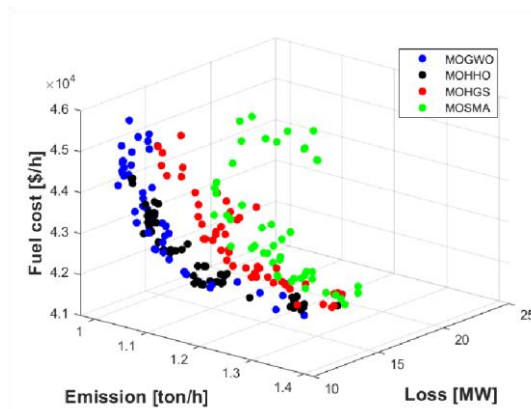


(g) Cazul #34 (Em & VD)

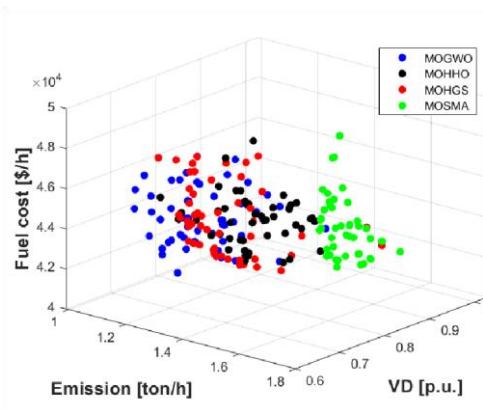
Figura 5.8 Soluție nedominată Pareto Front pentru cazuri (28-34).

a) Obiectiv Quad și Quinta OPF pe IEEE 57-bus

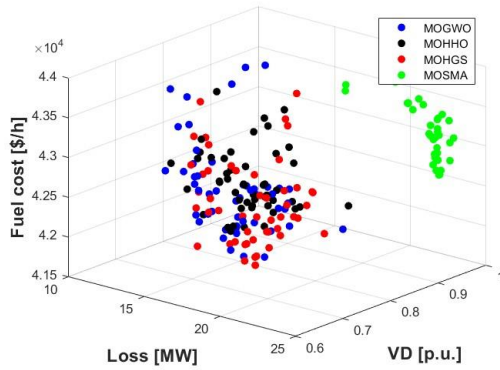
Ultimul tip de funcție obiectiv în testul IEEE-57 de 57 de noduri reprezintă funcțiile obiectiv Quad și Quinta, așa cum sunt prezentate în Tabelul 5.1. Au fost sugerate două studii de caz cu funcții obiectiv Quad și un studiu de caz cu funcție obiectiv Quinta pentru a rezolva MOOPF în acest tip. Acestea pot fi rezumate astfel:



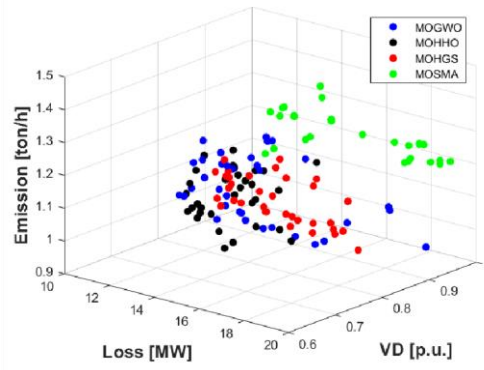
(a) Cazul #35 (Em & FC & Loss)



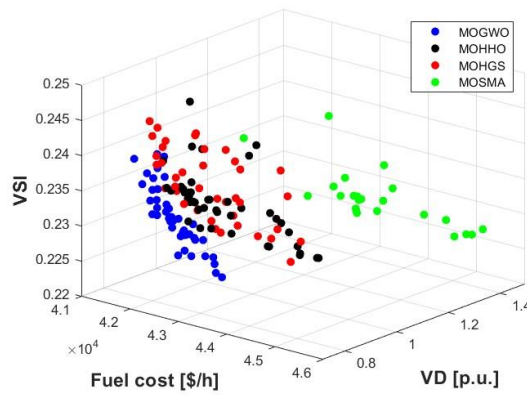
(b) Cazul #36 (Em & FC & VD)



(c) Cazul #37 (Loss & FC & VD)



(d) Cazul #38 (Loss & Em & VD)



(e) Cazul #39 (FC & VSI & VD)

Figura 5.6 Soluție nedominată Pareto Front pentru cazuri (35-39).

Cazul 40: Minimizarea costului combustibilului, emisiilor, pierderilor de putere activă și deviației tensiunii.

Cazul 41: Minimizarea costului combustibilului, emisiilor, pierderilor de putere activă și indicelui de stabilitate a tensiunii.

Cazul 42: Minimizarea costului combustibilului, emisiilor, pierderilor de putere activă, deviației tensiunii și indicelui de stabilitate a tensiunii.

Table 5.5 Rezultatele optime pentru funcția Quad și Quinta-obiectiv pe sistemul de test IEEE 57

Funcție obiectiv	Cazul 40				Cazul 41			
	GWO	HHO	HGS	SMA	GWO	HHO	HGS	SMA
FC [\$/h]	42876.63	42241.61	43535.32	44410.01	42144.44	43252.14	43069.32	43018.98
loss [MW]	1.0801	1.2809	1.1547	1.3665	1.1595	1.0406	1.0722	1.1899
Em [ton/h]	11.8224	16.2366	15.2100	23.5669	11.652	11.639	14.753	12.948
VD [p.u.]	0.8300	0.8384	0.7338	1.0149	4.9898	4.3952	5.7594	2.6095
VSI	0.2631	0.2485	0.2723	0.2509	0.1863	0.1902	0.1805	0.2236
Funcție obiectiv	Cazul 42							
	GWO	HHO	HGS	SMA				

FC [\$/h]	47750.98	48389	43996.96	44665
loss [MW]	1.7452	1.4185	1.2241	1.2741
Em [ton/h]	33.746	38.040	22.862	20.957
VD [p.u.]	1.0092	1.4185	1.3421	1.0216
VSI	0.2361	0.2210	0.2260	0.2347

5.3. Studiu de caz practic: Iraqi Super Grid High Voltage (ISGHV) 400 kV

Instalațiile de generare a energiei, rețeaua de transport și rețeaua de distribuție formează super-rețea de înaltă tensiune din Irak. Există două niveluri de tensiune ale rețelelor de transport - una cu o tensiune de 400 kV (ISGHV) și cealaltă cu o tensiune de 132 kV (IGHV). Rețeaua irakiană de super-înaltă tensiune constă din grupuri de producere a energiei, rețele de transport și distribuție. Stațiile de transport funcționează adesea la două niveluri de tensiune (400 kV și 132 kV), prin urmare există două rețele de transport, una cu o tensiune de 400 kV (rețeaua ISHV) și cealaltă cu o tensiune de 132 kV (rețeaua IHV). Datorită temperaturilor mai scăzute de vară pentru 2020, Irakul a înregistrat o creștere a capacității sale de generare a energiei electrice de la 16,25 la 18,6 GW. Ultimele statistici legate de ISGHV raportate de Centrul Național de Control Irakian al Ministerului Electricității (NCCIME) din 2022 au fost prezentate în Tabel. 5.6 și Fig. 5.7.

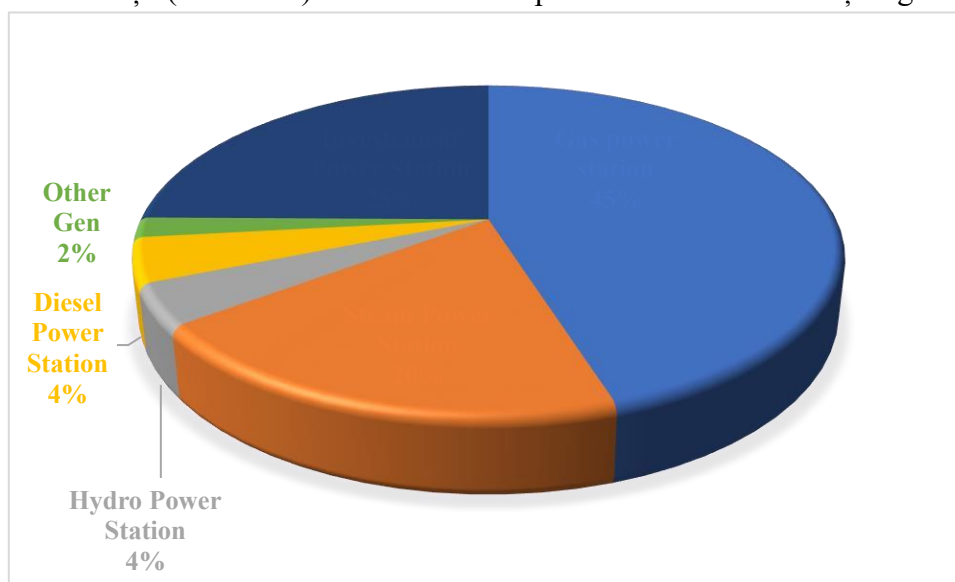


Figura 5. 7 Instalații curente de generare a sistemului energetic irakian.

Tabelul 5. 6 Centrale electrice din sistemul energetic irakian.

Nr.	Tipuri de centrale electrice	Capacitatea instalată (MW)
1	Centrală pe gaz	16433
2	Centrală cu abur	7183
3	Centrală Hidroelectrică	1477
4	Centrală Diesel	1594
5	Alte gen	710

6	Centrală de investiții	9038
Total		36435

5.3.1 Aplicarea algoritmilor selecți pentru rezolvarea problemelor OPF pe rețeaua ISGHV 28

În 2013, ISGHV400 kV conținea 14 generatoare, 28 de noduri și 43 de linii de transport. Numărul de nod 01 (MUSP) reprezintă nodul de echilibru, iar cererea totală de putere este de 5994 MW [19]. În această subsecțiune, au fost luate în considerare patru funcții cu un singur obiectiv (costul combustibilului, pierderile de putere activa, abaterea tensiunii și indicele de stabilitate a tensiunii). Numărul de iterații și dimensiunea populației este de 100, respectiv 250. Viteza de convergență a metodei propuse este ilustrată în Fig. 5.8.

Cazul 43: Minimizarea costului combustibilului de generare pe rețeaua ISGHV 28

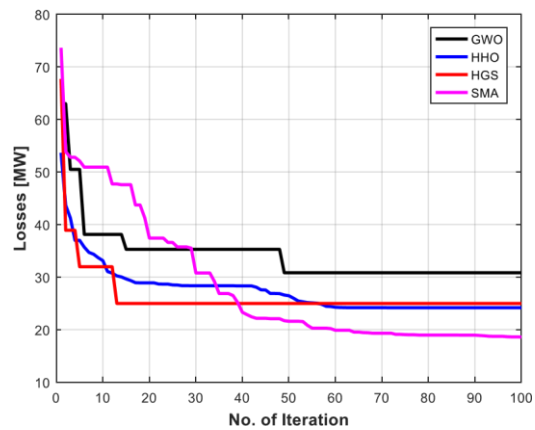
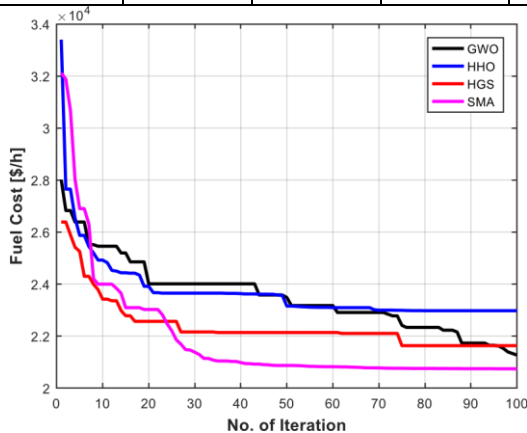
Cazul 44: Minimizarea pierderilor de putere activa pe ISGHV 28-bus

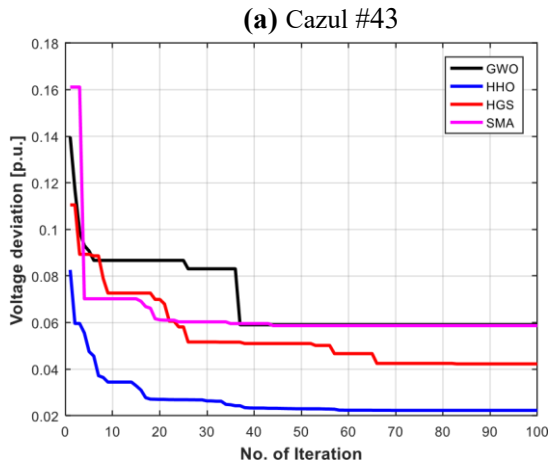
Cazul 45: Minimizarea abaterii tensiunii pe magistrala ISGHV 28

Cazul 46: Minimizarea indicelui de stabilitate a tensiunii pe rețeaua ISGHV 28

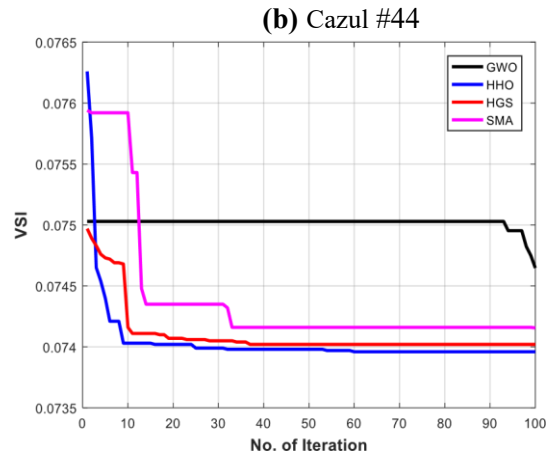
Table 5.5 Rezultatul optim pentru funcția cu un singur obiectiv pe sistemul de test ISGHV 28

Funcție obiectiv	Inițială	Cazul 43				Cazul 44			
		GWO	HHO	HGS	SMA	GWO	HHO	HGS	SMA
FC [\$ /h]	39565	21729	22974	21631	20740	49536	47224	36533	36784
loss [MW]	42.383	73.15	111.60	45.238	45.225	30.82	24.18	24.984	18.61
VD [p.u.]	0.2013	0.4404	0.6043	0.528	0.4678	0.5721	1.3504	1.301	0.7725
VSI	0.0886	0.0777	0.0996	0.084	0.0826	0.0892	0.0747	0.075	0.0815
Red. Rate	-	45.08%	41.93%	45.33%	47.58%	27.28%	42.96%	41.05%	56.09%
Funcție obiectiv	Inițială	Cazul 45				Cazul 46			
		GWO	HHO	HGS	SMA	GWO	HHO	HGS	SMA
FC [\$ /h]	39565	72230	66099	48550	49843	39565	55559	46396	46396
loss [MW]	42.383	94.49	86.979	120.98	54.843	81.88	116	118.0	117.99
VD [p.u.]	0.2013	0.0591	0.022	0.042	0.0625	0.7167	0.499	0.514	0.514
VSI	0.0886	0.0906	0.089	0.089	0.0917	0.075	0.074	0.074	0.074
Red. Rate	-	70.64%	88.90%	78.99%	68.95%	15.40%	16.52%	16.52%	16.46%





(c) Cazul #45



(d) Cazul #46

5.4. Comparație de performanță

Această subsecțiune prezintă performanța și eficiența algoritmilor selectați (GWO, HHO, HGS și SMA) și abordările dezvoltate (MOGWO, MOHHO, MOHGS și MOSMA) pentru a rezolva problemele de circulație optimă de puteri cu un singur și multi-obiectiv. Algoritmii selectați (GWO, HHO, HGS și SMA) și cei originali dezvoltați de autor (MOGWO, MOHHO, MOHGS și MOSMA) au fost implementați în toate studiile de caz pentru a obține soluția optimă și o bună convergență pentru o circulație optimă de puteri cu un singur obiectiv și cea mai bună soluție de compromis cu o bună distribuție în frontul Pareto pentru o circulație optimă de puteri multiobiectiv. Autorul s-a confruntat cu două provocări principale pentru rezolvarea problemelor cu OPF unice și multiple, și anume: viteza de convergență către optimul global (funcția unică și multiobiectivă) și buna distribuție a frontului Pareto (funcția multi-obiectiv). Cu alte cuvinte, echilibrul dintre convergență și acoperire a trebuit găsit pentru a determina eficiența algoritmului. De exemplu, rezultatele obținute de algoritmii selectați (GWO, HHO, HGS și SMA) din cazurile (15 și 23-27) și dezvoltate (MOGWO, MOHHO, MOHGS și MOSMA) pentru cazurile (6-8, 13, 2829 și 35) au fost comparați cu alți algoritmi recenți, așa cum se arată în tabelele 5. (7, 12, 13, 18, A1.5, A1.10 și A1.14). Aceste rezultate au confirmat eficiența și superioritatea algoritmilor propuși. Merită menționat că niciunul dintre algoritmii meta-euristici nu poate fi superior tuturor algoritmilor de optimizare în rezolvarea tuturor problemelor de optimizare, conform teoremei *no free lunch* (NFL) [20]. Acesta este motivul principal care duce la lipsa unui algoritm superior din toate punctele de vedere (acoperire și convergență). Acest lucru este foarte clar atunci când se aplică abordarea propusă la funcțiile multi-obiectiv. Prin urmare, este dificil să se compare abordările propuse (MOGWO, MOHHO, MOHGS și MOSMA) cu alte metode în ceea ce privește rezultatele.

Pe baza celor de mai sus, rezultatele simulării obținute prin algoritmii selectați (GWO, HHO, HGS, SMA) și abordările dezvoltate (MOGWO, MOHHO, MOHGS și MOSMA) atât pentru un singur obiectiv, cât și pentru multi-obiectiv au o performanță ridicată și oferă soluții de calitate pentru rezolvarea problemelor OPF. Timpii de calcul ai algoritmilor selectați și dezvoltate abordate sunt competitivi față de alți algoritmi recenți. În funcția multi-obiectiv și bazată pe proprietatea de căutare aleatorie de înaltă calitate a MOGWO, MOHHO, MOHGS și MOSMA, funcțiile obiectiv

(chiar dacă sunt în conflict între ele) oferă soluții de compromis între fiecare funcție obiectiv. În fronturile Pareto, MOGWO, MOHHO, MOHGS și MOSMA oferă o convergență bună, eficiență ridicată și o bună distribuție a două și trei dimensiuni.

5.5. Rezumat

În acest capitol, au fost folosite două sisteme de test standard pentru a rezolva probleme de circulație optimă de puteri cu un singur obiectiv și multi-obiectiv folosind patru algoritmi metaeuristici (GWO, HHO, HGS și SMA). Patruzeci și șase de cazuri au fost studiate cu diferite funcții obiectiv (single, bi, tri, quad și Quinta). Se poate spune în continuare ca cea mai bună alegere dintre acești algoritmi este, după cum urmează:

- Sistem IEEE 30-bus: rezultatele obținute de algoritmul HGS într-o singură funcție obiectiv reprezintă cele mai bune rezultate în comparație cu alți algoritmi (GWO, HHO și SMA) deoarece au cele mai bune patru rezultate ale funcțiilor obiectiv, inclusiv costul combustibilului, pierderile de putere activă, emisiile de noxe și indicele de stabilitate a tensiunii. În funcțiile obiectiv multiple (Bi, Tri, Quad și Quinta), rezultatele obținute prin metoda MOGWO reprezintă cele mai bune rezultate în comparație cu alți algoritmi (MOHHO, MOHGS și MOSMA), deoarece rezultatele obținute de MOGWO nu domină alte metode. (MOHHO, MOHGS și MOSMA).
- Sistem IEEE 57-bus: rezultatele obținute de algoritmul HGS într-o singură funcție obiectiv reprezintă cele mai bune rezultate în comparație cu alți algoritmi (GWO, HHO și SMA), deoarece au cele mai bune două rezultate ale funcțiilor obiectiv, inclusiv costul combustibilului și indicele de stabilitate a tensiunii. În funcțiile obiectiv multiple (Bi, Tri, Quad și Quinta), rezultatele obținute prin metoda MOGWO reprezintă cele mai bune rezultate în comparație cu alți algoritmi (MOHHO, MOHGS și MOSMA), deoarece rezultatele obținute de MOGWO nu domină alte metode. (MOHHO, MOHGS și MOSMA).
- ISGHV 28-bus: rezultatele obținute de algoritmi HHO și SMA într-o singură funcție obiectiv reprezintă cele mai bune rezultate în comparație cu alți algoritmi (GWO și HGS), deoarece au cele mai bune două rezultate ale funcțiilor obiectiv pentru fiecare, inclusiv costul combustibilului, pierderile de putere activă ale algoritmului SMA și deviația de tensiune și indicele de stabilitate a tensiunii al algoritmului HHO.

De asemenea, autorul a confirmat că mărimea tensiunii în nodurile rețelei poate fi controlată în valorile limită ([0,95-1,05 p.u.] ale IEEE 30-bus și [0,94-1,06 p.u.] ale sistemelor de test IEEE 57bus) atunci când abaterea tensiunii este considerată o funcție obiectiv, cum ar fi cazurile (4, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 19, 20 și 22) ale sistemului de test IEEE 30, cazurile (26, 31, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40 și 42) ale sistemelor de test IEEE 57-bus.

CAPITOLUL 6

CONCLUZII, CONTRIBUȚII ȘI PERSPECTIVE

6.1. Concluzii

În această teză, noi algoritmi de optimizare meta-euristică inspirați din natură, numiți Grey Wolf Optimizer (GWO), Harries Hawks Optimization (HHO), Hunger Games Search (HGS) și Slime Mold Algorithm (SMA) au fost propuși pentru a rezolva probleme OPF cu o singură funcție obiectiv respectiv cu funcții multi-obiectiv. Funcțiile obiectiv care au fost luate în considerare sunt costul total al combustibilului pentru unitățile de generare, pierderile de putere activă în liniile de transport, emisiile totale de noxe produse de unitățile de generare pe combustibili fosili, abaterea tensiunii la nodurile de sarcină și indicele de stabilitate a tensiunii a întregului sistem. Conceptul Pareto este abordarea propusă pentru rezolvarea problemelor OPF cu multi-obiective prin determinarea setului de soluții nedominante (front Pareto). Teoria folosită pentru a extrage cea mai bună soluție de compromis este teoria mulțimilor fuzzy. Strategia aplicată pentru ordonarea/clasarea și reducerea soluțiilor front Pareto nedominante este distanța de aglomerare.

Algoritmii selectați (GWO, HHO, HGS, SMA) au fost dezvoltați în abordări originale MultiObjective Grey Wolf Optimizer (MOGWO), Multi-Objective Harries Hawks Optimization (MOHHO), Multi-Objective Hunger Games Search (MOHGS) și Algoritmul Multi-Objective Slime Mold (MOSMA) pentru a găsi soluția optimă pentru două până la cinci funcții obiectiv conflictuale simultan (Bi, Tri, Quad și Quinta). Pentru a valida performanța algoritmilor selectați (GWO, HHO, HGS și SMA) și a abordărilor originale dezvoltate de autor (MOGWO, MOHHO, MOHGS și MOSMA), au fost utilizate trei sisteme electroenergetice de testare diferite, IEEE 30 bus, IEEE 57 bus și sistemul Iraqi Super Grid High Voltage 28-bus, în 46 de studii cu funcții cu un singur și mai multe obiective. Rezultatele simulărilor au confirmat că viteza de convergență a algoritmilor selectați GWO, HHO, HGS și SMA este impresionantă pentru a rezolva o singură funcție obiectiv, iar abordările dezvoltate MOGWO, MOHHO, MOHGS și MOSMA oferă o convergență bună, eficiență ridicată și o bună distribuție de două și trei dimensiuni. Pentru a demonstra robustețea și superioritatea algoritmilor selectați și a abordărilor dezvoltate, rezultatele optime ale funcției obiectiv au fost comparate cu alte metode recente de optimizare meta-euristică. Algoritmii selectați GWO, HHO, HGS și SMA și abordările originale dezvoltate MOGWO, MOHHO, MOHGS și MOSMA oferă o performanță favorabilă, o optimizare competitivă și o viteză de convergență mai bună pentru a rezolva problemele OPF cu funcții obiectiv unice și multiple în sistemele electroenergetice.

6.2. Contribuții la teză

Contribuțiile autorului pot fi rezumate după cum urmează:

- 1- În acest studiu, cinci funcții obiective au fost optimizate pentru a rezolva funcția unică și multi-obiectiv. Aceste funcții obiectiv sunt costul total al combustibilului al unităților de generare, emisiile produse de unitățile termice cu combustibili fosili, pierderile de putere

- activa pe liniile de transport, profilurile de tensiune la nodurile de sarcină și indicele de stabilitate a tensiunii pe întregul sistem — Contribuția 1
- 2- În această teză au fost propuse patru tehnici de optimizare meta-euristică, Grey Wolf Optimizer (GWO), Harris Hawk's Optimizer (HHO), Hunger Games Search (HGS) și Slime Mould Algorithm, pentru a rezolva problema circulației optime de putere cu un singur obiectiv și pentru a atinge nivelul economic. beneficiile de protecție a mediului și tehnice ale sistemelor electroenergetice – Contribuția 2
 - 3- Algoritmii selectați (GWO, HHO, HGS și SMA) au fost dezvoltati pentru a rezolva si probleme ale circulației optime de putere cu functii multi-obiectiv (MOOPF) în sistemele de alimentare, denumite Multi-Objective Grey Wolf Optimizer (MOGWO), Multi-Objective Harries Hawks Optimization (MOHHO), Multi-Objective Hunger Games Search (MOHGS) și Multi-Objective Slime Mould Algorithm (MOSMA). – Contribuția 3
 - 4- Pe baza numărului de funcții obiectiv, conceptul Pareto (PC) este abordarea propusă pentru a afla soluțiile dominante și nedominante. Factorul de decizie este responsabil pentru determinarea celei mai bune soluții de compromis (BCS) din soluțiile nedominante (NDS). Distanța de aglomerare este mecanismul folosit pentru a aranja și reduce setul de soluții nedominante pentru a obține cele mai bune soluții Pareto pentru setul frontal – Contribuția 4.
 - 5- Au fost utilizate trei sisteme de testare pentru a rezolva funcții obiective unice și multiple (Bi, Triple, Quad și Quinta). : Două sisteme standard, s IEEE 30-bus și IEEE 57-bus și o rețea electrică reală, Iraq Super Grid High Voltage 400 kV – Contribuție 5.
 - 6- Rezultatele funcțiilor obiectiv (costul combustibilului, emisiile de noxe, pierderile de putere activa, abaterea tensiunii și indicele de stabilitate a tensiunii) obținute prin algoritmi selectați (GWO, HHO, HGS și SMS) și abordările originale dezvoltate (MOHGS, MOHHO, MOHGS, și MOSMA) sunt mai bune decât cu alte tehnici de optimizare metaeuristice raportate în literatură. Aceste comparații dovedesc capacitatea și eficiența algoritmilor selectați (GWO, HHO, HGS și SMS) și abordărilor dezvoltate (MOHGS, MOHHO, MOHGS și MOSMA) de a rezolva circulația optima de putere cu funcții cu un singur și multi-obiectiv in sisteme cu restricțiile de egalitate și inegalitate satisfăcute – Contribuția 6

6.3. Perspective

În lucrările viitoare, algoritmi selectați (GWO, HHO, HGS și SMA) și metodele originale dezvoltate (MOGWO, MOHHO, MOHGS și MOSMA) vor putea fi utilizate pentru a rezolva probleme de circulație optima de putere cu o singura funcție obiectiv și multi-obiectiv, in sisteme electroenergetice mai complexe și cu mai multe variabile de control, cum ar fi sistemele IEEE 118 bus, IEEE 300 bus și cea mai recentă rețea a sistemului electroenergetic din țara mea (Irak). În plus, se pot aplica algoritmi selectați și metode dezvoltate pentru a rezolva alte probleme de optimizare, cum ar fi funcționarea economică, amplasarea optimă și dimensionarea pentru a

încorporează dispozitivele FACTS, generarea distribuită și sursele de energie regenerabilă în sistemele electroenergetice.

References

- [1] D. Çelik and M. E. Meral, “Current control based power management strategy for distributed power generation system,” *Control Eng. Pract.*, vol. 82, pp. 72–85, 2019.
- [2] J. Carpentier, “Contribution to the economic dispatch problem,” *Bull. la Soc. Fr. des Electr.*, vol. 3, no. 8, pp. 431–447, 1962.
- [3] N. Mo, Z. Y. Zou, K. W. Chan, and T. Y. G. Pong, “Transient stability constrained optimal power flow using particle swarm optimisation,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 1, no. 3, pp. 476–483, 2007.
- [4] P. E. O. Yumbla, J. M. Ramirez, and C. A. C. Coello, “Optimal power flow subject to security constraints solved with a particle swarm optimizer,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 1, pp. 33–40, 2008.
- [5] A. A. Heidari, S. Mirjalili, H. Faris, I. Aljarah, M. Mafarja, and H. Chen, “Harris hawks optimization: Algorithm and applications,” *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 97, pp. 849–872, 2019.
- [6] S. Li, H. Chen, M. Wang, A. A. Heidari, and S. Mirjalili, “Slime mould algorithm: A new method for stochastic optimization,” *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 111, pp. 300–323, 2020.
- [7] I. power systems test Case., “<http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>”.
- [8] A.-B. L. T. A. Ali, “Optimal Power Flow (OPF) with different Objective Function based on modern heuristic optimization techniques.” Politehnica University of Bucharest, Bucharest, Romania, 2015.
- [9] D. H. Wolpert and W. G. Macready, “No free lunch theorems for search,” Technical Report SFI-TR-95-02-010, Santa Fe Institute, 1995.