Cercetări privind ingineria și managementul energiei verzi în contextul dezvoltării sustenabile

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie și Management

autor ing. Alexandra-Maria Coroian

conducător științific Prof.univ.habil.dr.ing. Victoria-Larisa Ivașcu

luna 07 anul 2026

Industria automotive traversează o perioadă de transformare profundă, determinată de obiectivele privind neutralitatea climatică, electrificarea transportului și reducerea consumului energetic. În acest sens, integrarea surselor regenerabile de energie în procesele industriale nu reprezintă doar o obligație de mediu, ci și o oportunitate de creștere a competitivității economice. În această lucrare sunt prezentate exemple din România privind dezvoltarea unor facilități industriale bazate pe energie regenerabilă, evidențiindu-se impactul pozitiv asupra reducerii emisiilor și asupra dezvoltării regionale.

Este prezentat contextul european al tranziției energetice, evidențiind obiectivele asumate prin politicile Uniunii Europene privind creșterea ponderii energiei regenerabile și reducerea emisiilor de carbon. Sunt discutate dificultățile actuale ale sistemului energetic european, precum dependența de importurile de energie, volatilitatea prețurilor și necesitatea consolidării securității energetice. În acest context, România este prezentată ca o țară cu un potențial ridicat de dezvoltare a energiei hidro, eoliene și solare, capabilă să contribuie semnificativ la obiectivele europene de decarbonizare.

Obiectivul general constă în dezvoltarea unei metode de analiză și evaluare a managementului energiei verzi prin proiectarea unui model inteligent de suport decizional bazat pe logică fuzzy. Pentru atingerea acestui obiectiv sunt formulate șapte obiective specifice care urmăresc fundamentarea conceptuală a cercetării, analiza contextului energetic, identificarea limitărilor dezvoltării energiei regenerabile în România, realizarea unei cercetări empirice asupra percepției publice, analiza modelelor existente de management energetic, dezvoltarea modelului fuzzy și validarea acestuia în contexte industriale.

Obiectivele specifice ale tezei de doctorat sunt enumerate în continuare:

1. **OS1**. Descrierea discutarea conceptelor fundamentale ale energiei verzi, managementului energiei și dezvoltării sustenabile.
2. **OS2**. Analizarea stării actuale a dezvoltării energiei regenerabile și înțelegerea factorilor care afectează tranziția energetică.
3. **OS3**. Identificarea și evaluarea principalelor constrângeri tehnice, economice, sociale și legale privind dezvoltarea energiei regenerabile în România.
4. **OS4**. Evaluarea atitudinii publicului față de energia verde prin realizarea unui chestionar analizarea datelor obținute aplicând metode statistice în software-ul PSPP.
5. **OS5**. Cercetarea a 15 modele din literatura de specialitate privind managementul energiei
6. **OS6**. Proiectarea și testarea unui model logic fuzzy pentru a evalua factorii care afectează implementările și managementul sistemelor de energie verde în contextul dezvoltării sustenabile.
7. **OS7**. Testarea cadrului propus în cadrul celor două industrii selectate

Capitolul 1, intitulat **Introducere. Motivarea și importanța temei de cercetare,** stabilește cadrul general al cercetării și argumentează necesitatea abordării managementului energiei verzi în contextul dezvoltării sustenabile. Se pornește de la premisa că transformările economice și tehnologice

din ultimele decenii, alături de efectele schimbărilor climatice și de necesitatea reducerii emisiilor de gaze cu efect de seră, au determinat apariția unor noi provocări pentru sistemele energetice și pentru industrie. În acest context, sursele regenerabile de energie devin o componentă esențială a strategiilor de dezvoltare economică și de protecție a mediului.

Motivația cercetării este fundamentată atât pe pregătirea profesională în domeniile ingineriei și managementului, cât și pe experiența acumulată în industria automotive. Aceste experiențe au evidențiat necesitatea dezvoltării unor sisteme de producție capabile să utilizeze energie provenită din surse regenerabile și să reducă dependența de combustibilii fosili. În același timp, cercetarea literaturii de specialitate a arătat că, deși România dispune de un potențial semnificativ pentru dezvoltarea energiei verzi, există încă numeroase bariere tehnice, economice și instituționale care limitează valorificarea acestuia.

În partea finală a capitolului este prezentată structura tezei și relația dintre capitole și obiectivele cercetării. Este explicat faptul că fiecare capitol contribuie la atingerea unui obiectiv specific, iar împreună acestea formează un cadru metodologic integrat. Capitolul se încheie prin sublinierea faptului că dezvoltarea și implementarea energiei verzi reprezintă una dintre cele mai importante direcții pentru dezvoltarea sustenabilă a industriei și a economiei, iar instrumentele moderne de analiză și suport decizional pot contribui la accelerarea acestui proces.

Capitolul 2, intitulat **Definirea cadrului conceptual al tezei de doctorat,** are rolul de a construi fundamentul teoretic al cercetării și de a defini conceptele utilizate în dezvoltarea modelului propus. Capitolul începe prin prezentarea noțiunilor fundamentale privind energia verde și dezvoltarea sustenabilă, evidențiind faptul că tranziția energetică reprezintă una dintre cele mai importante provocări ale societății contemporane. Creșterea consumului energetic, epuizarea resurselor fosile și efectele schimbărilor climatice impun dezvoltarea unor sisteme energetice bazate pe surse regenerabile și pe utilizarea eficientă a resurselor disponibile.

Energia verde este definită ca fiind energia produsă din surse regenerabile precum energia solară, eoliană, hidroenergia, biomasa și energia geotermală. Aceste surse sunt caracterizate prin disponibilitate ridicată, impact redus asupra mediului și capacitatea de a contribui la diminuarea emisiilor de dioxid de carbon. Spre deosebire de combustibilii fosili, resursele regenerabile permit dezvoltarea unui sistem energetic sustenabil și reduc dependența statelor de importurile de energie. Capitolul evidențiază legătura directă dintre dezvoltarea energiei regenerabile și atingerea obiectivelor globale privind protecția mediului și combaterea schimbărilor climatice.

Un alt concept analizat este dezvoltarea sustenabilă, prezentată ca un echilibru între dimensiunea economică, socială și de mediu. Autorul subliniază că dezvoltarea economică trebuie realizată fără compromiterea resurselor naturale necesare generațiilor viitoare. În acest context, energia verde devine un element central al strategiilor de sustenabilitate, contribuind simultan la reducerea poluării, la creșterea securității energetice și la dezvoltarea economică. De asemenea, sunt analizate efectele schimbărilor climatice asupra mediului, biodiversității și sănătății populației, argumentând necesitatea accelerării tranziției către surse regenerabile de energie.

Capitolul continuă cu prezentarea sistemului energetic al României și a principalelor surse de producere a energiei electrice. Sunt analizate avantajele și limitările hidroenergiei, energiei eoliene, energiei solare și biomasei, fiind evidențiat potențialul ridicat al României pentru dezvoltarea acestora. Sunt discutate și provocările generate de caracterul intermitent al unor surse regenerabile, subliniind importanța dezvoltării tehnologiilor de stocare și a sistemelor inteligente de gestionare a energiei. În acest context sunt prezentate conceptele de microrețele, rețele inteligente (Smart Grid) și sisteme autonome de producere și distribuție a energiei.

O atenție deosebită este acordată relației dintre energia regenerabilă și sectorul construcțiilor. Se analizează conceptul de clădire verde și se evidențiază modul în care integrarea panourilor fotovoltaice, a sistemelor de stocare și a tehnologiilor eficiente energetic contribuie la reducerea consumului și la atingerea obiectivelor privind clădirile cu consum aproape zero de energie. Sunt prezentate avantajele

utilizării sistemelor moderne de management energetic al clădirilor (BEMS), tehnologiilor BIM și soluțiilor blockchain pentru optimizarea consumului și gestionarea schimburilor de energie.

Capitolul tratează și problematica evaluării ciclului de viață (Life Cycle Assessment – LCA), metodă utilizată pentru analiza impactului asupra mediului al tehnologiilor de energie regenerabilă pe întreaga durată de funcționare. Se argumentează că utilizarea acestei metode permite identificarea etapelor cu impact ridicat asupra mediului și contribuie la optimizarea investițiilor în infrastructura energetică. Totodată, sunt prezentate cele mai importante direcții de dezvoltare tehnologică în domeniul eficienței energetice, precum sistemele inteligente de iluminat, managementul automatizat al clădirilor și integrarea tehnologiilor digitale în administrarea resurselor energetice.

În ansamblu, capitolul construiește cadrul conceptual necesar întregii cercetări și demonstrează că dezvoltarea sustenabilă depinde de integrarea tehnologiilor inovatoare, a politicilor publice și a managementului eficient al energiei. Toate conceptele prezentate constituie baza teoretică pentru analiza limitărilor energiei regenerabile și pentru dezvoltarea modelului fuzzy de suport decizional propus în capitolele următoare.

Capitolul 3, intitulat **Definirea cadrului contextual al cercetărilor,** are rolul de a prezenta contextul în care se desfășoară cercetarea și de a analiza stadiul actual al dezvoltării energiei regenerabile atât la nivel internațional, cât și în România. Dacă în capitolul anterior au fost definite conceptele fundamentale care stau la baza cercetării, acest capitol urmărește modul în care acestea sunt transpuse în practică și influențează dezvoltarea diferitelor sectoare economice. Accentul este pus pe analiza contextului energetic, a politicilor publice și a strategiilor de management adoptate pentru accelerarea tranziției către un sistem energetic sustenabil.

Se evidențiază faptul că dezvoltarea energiei regenerabile este determinată de o serie de factori economici, tehnologici și legislativi. Creșterea consumului mondial de energie, diminuarea rezervelor de combustibili fosili și obiectivele internaționale privind reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră au determinat statele să investească în surse regenerabile și în tehnologii inovatoare pentru producerea și gestionarea energiei. În acest context, Uniunea Europeană promovează politici care urmăresc creșterea eficienței energetice, dezvoltarea infrastructurii inteligente și reducerea dependenței energetice, iar România trebuie să își adapteze strategiile naționale pentru a răspunde acestor cerințe.

În continuare este analizată evoluția sectorului energetic românesc, fiind evidențiate principalele transformări produse în ultimii ani. Se arată că România beneficiază de un potențial important pentru dezvoltarea energiei regenerabile datorită resurselor naturale disponibile, în special în domeniul energiei hidroelectrice, eoliene și solare. Cu toate acestea, valorificarea acestui potențial este influențată de o serie de constrângeri tehnice și economice, precum infrastructura energetică insuficient dezvoltată, costurile ridicate ale investițiilor și lipsa unor mecanisme eficiente de stocare a energiei produse din surse regenerabile.

Un aspect important analizat în acest capitol îl reprezintă rolul inovării tehnologice în dezvoltarea sistemelor energetice moderne. Este subliniat faptul că digitalizarea și automatizarea proceselor industriale permit monitorizarea permanentă a consumului energetic și optimizarea utilizării resurselor. Sunt prezentate concepte precum Internet of Things (IoT), inteligența artificială și platformele digitale de management energetic, care contribuie la creșterea eficienței operaționale și la reducerea consumului de energie. Implementarea acestor tehnologii facilitează dezvoltarea unor sisteme energetice inteligente, capabile să răspundă rapid modificărilor cererii și să integreze eficient producția din surse regenerabile.

Capitolul acordă o atenție deosebită managementului energiei în sectorul construcțiilor. Sunt analizate principalele măsuri adoptate pentru reducerea consumului energetic al clădirilor, printre care utilizarea materialelor cu performanțe termoizolante ridicate, instalarea sistemelor fotovoltaice, utilizarea pompelor de căldură și implementarea sistemelor inteligente de control al consumului. Se evidențiază faptul că dezvoltarea clădirilor cu consum aproape zero de energie (Nearly Zero Energy

Buildings – NZEB) reprezintă una dintre direcțiile prioritare ale politicilor europene privind eficiența energetică și reducerea emisiilor de carbon.

O altă componentă importantă a capitolului este dedicată industriei automotive, sector considerat strategic pentru economia României și unul dintre cei mai mari consumatori industriali de energie. Se prezintă transformările prin care trece această industrie în contextul electrificării transportului și al implementării strategiilor de sustenabilitate. Sunt analizate măsurile adoptate de companii pentru reducerea consumului energetic, utilizarea surselor regenerabile în procesele de producție și implementarea sistemelor de management energetic conforme standardelor internaționale. Totodată, este evidențiat rolul auditurilor energetice în identificarea pierderilor de energie și în fundamentarea investițiilor pentru creșterea eficienței energetice.

Capitolul analizează și factorii economici care influențează implementarea energiei verzi. Sunt discutate costurile investițiilor inițiale, perioada de recuperare a investițiilor, mecanismele de finanțare și stimulentele economice oferite prin programele europene și naționale. Se arată că succesul tranziției energetice depinde nu doar de progresul tehnologic, ci și de existența unor politici publice stabile, capabile să încurajeze investițiile private și dezvoltarea infrastructurii energetice.

În partea de cercetare contextuală sunt prezentate analize statistice privind evoluția sectorului automotive și a consumului energetic, utilizând indicatori economici și de performanță. Sunt analizate relațiile dintre investițiile în energie regenerabilă, competitivitatea întreprinderilor și performanțele economice ale acestora. Rezultatele evidențiază faptul că organizațiile care investesc în tehnologii verzi beneficiază nu doar de reducerea costurilor operaționale, ci și de îmbunătățirea imaginii organizaționale și de creșterea competitivității pe piață.

Se evidențiază, de asemenea, importanța factorului uman în procesul de tranziție energetică. Implementarea tehnologiilor moderne necesită dezvoltarea competențelor profesionale și adaptarea culturii organizaționale la noile cerințe privind sustenabilitatea. În acest sens, formarea profesională continuă și implicarea managementului în promovarea eficienței energetice sunt considerate elemente esențiale pentru succesul implementării strategiilor de energie verde.

Capitolul se încheie prin sintetizarea principalelor tendințe și provocări identificate în analiza contextuală. Cercetătorul concluzionează că dezvoltarea energiei regenerabile reprezintă un proces complex, influențat simultan de factori tehnologici, economici, sociali și instituționali. Înțelegerea acestor relații este esențială pentru fundamentarea modelului de suport decizional propus în capitolele următoare. Totodată, concluziile formulate demonstrează necesitatea dezvoltării unor instrumente inteligente capabile să integreze simultan numeroase variabile și să ofere decidenților soluții obiective pentru optimizarea managementului energiei verzi.

Capitolul 4, intitulat **Evaluarea capacității României pentru energia regenerabilă,** are ca obiectiv evaluarea critică a capacității României de a dezvolta și integra sursele regenerabile de energie în sistemul energetic național. Spre deosebire de capitolele anterioare, care au avut un caracter predominant teoretic și contextual, acest capitol urmărește identificarea limitărilor reale care influențează procesul de tranziție energetică. Analiza este realizată dintr-o perspectivă multidisciplinară, luând în considerare aspecte tehnice, economice, sociale, instituționale și de mediu. Cercetătorul subliniază faptul că, deși România dispune de resurse naturale importante și beneficiază de sprijinul politicilor europene, dezvoltarea energiei regenerabile este influențată de numeroase constrângeri structurale care necesită soluții integrate și politici coerente.

În prima parte a capitolului este prezentat cadrul contextual al cercetărilor aplicative. Cercetătorul evidențiază că România trebuie să își alinieze sistemul energetic la obiectivele asumate prin Pactul Verde European și prin pachetul legislativ „Fit for 55”, care prevăd reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră, creșterea ponderii energiei regenerabile și îmbunătățirea eficienței energetice. Deși țara dispune de un potențial ridicat pentru dezvoltarea energiei hidroelectrice, eoliene și fotovoltaice, infrastructura energetică existentă este caracterizată de un grad ridicat de centralizare și de o capacitate limitată de

integrare a noilor tehnologii. Aceste caracteristici reduc flexibilitatea sistemului și îngreunează adaptarea la cerințele unui mix energetic modern.

Cercetătorul analizează apoi una dintre cele mai importante provocări tehnice ale energiei regenerabile, și anume caracterul intermitent al producției de energie eoliană și solară. Producția acestor surse depinde de condițiile meteorologice și nu poate fi controlată în aceeași măsură ca producția bazată pe combustibili convenționali. În lipsa unor sisteme eficiente de stocare și a unei rețele electrice suficient de flexibile, variațiile dintre producție și consum pot conduce la dezechilibre în funcționarea sistemului energetic. Capitolul arată că actuala infrastructură energetică a României nu este încă pregătită pentru integrarea unui volum foarte mare de energie regenerabilă fără investiții consistente în digitalizare, modernizarea rețelelor și dezvoltarea tehnologiilor de stocare.

O analiză detaliată este dedicată dependenței României de energia hidroelectrică. Deși aceasta reprezintă principala sursă regenerabilă de energie și contribuie semnificativ la securitatea energetică, cercetătorul evidențiază faptul că schimbările climatice au redus gradul de predictibilitate al producției hidroenergetice. Secetele prelungite și modificările regimului precipitațiilor determină scăderea debitelor râurilor și, implicit, reducerea producției de energie electrică exact în perioadele cu cerere ridicată. În plus, dezvoltarea unor noi hidrocentrale este limitată atât de considerente economice, cât și de impactul asupra ecosistemelor și biodiversității. Din acest motiv, cercetarea concluzionează că energia hidroelectrică trebuie integrată într-un portofoliu diversificat de surse regenerabile și completată prin sisteme moderne de stocare și management al resurselor de apă.

Capitolul continuă cu analiza barierelor economice și financiare. Cercetătorul arată că, în ciuda reducerii costurilor tehnologiilor regenerabile la nivel internațional, investițiile inițiale necesare implementării acestora rămân ridicate pentru numeroși investitori. Accesul limitat la finanțare, instabilitatea cadrului legislativ și modificările frecvente ale mecanismelor de sprijin reduc atractivitatea investițiilor și încetinesc ritmul dezvoltării proiectelor energetice. În plus, recuperarea investițiilor depinde de evoluția pieței energiei și de stabilitatea politicilor publice, ceea ce generează un nivel ridicat de incertitudine pentru investitori.

Pe lângă aspectele economice, cercetătorul acordă o atenție deosebită impactului social al dezvoltării energiei regenerabile. Sunt analizate percepțiile comunităților locale asupra proiectelor eoliene și fotovoltaice, evidențiindu-se faptul că opoziția publică este determinată nu doar de efectele asupra peisajului sau asupra utilizării terenurilor agricole, ci și de lipsa implicării populației în procesul decizional. În multe situații, comunitățile percep distribuția beneficiilor economice ca fiind inechitabilă, iar lipsa unei comunicări transparente conduce la scăderea nivelului de acceptare socială. Cercetătorul subliniază că succesul tranziției energetice depinde în mare măsură de implicarea activă a cetățenilor și de dezvoltarea unor mecanisme eficiente de consultare publică.

Ultima parte a capitolului este dedicată analizei comparative a cincisprezece modele de management al energiei identificate în literatura de specialitate. Aceste modele sunt evaluate din perspectiva structurii, a criteriilor utilizate și a aplicabilității lor în diferite domenii. Analiza evidențiază faptul că majoritatea modelelor existente tratează separat factorii tehnici, economici sau sociali și nu reușesc să integreze într-un singur cadru complexitatea procesului decizional asociat managementului energiei regenerabile. Pornind de la aceste limitări, cercetătorul selectează variabilele relevante care vor constitui baza dezvoltării modelului de inferență fuzzy prezentat în capitolul următor. Prin această etapă se realizează trecerea de la analiza critică a literaturii și a datelor empirice la proiectarea unui instrument decizional capabil să gestioneze incertitudinea și interdependențele dintre factorii care influențează performanța sistemelor de energie verde.

Capitolul 5, intitulat **Metodologia sistemului fuzzy,** reprezintă nucleul cercetării doctorale și evidențiază principala contribuție originală a cercetătorului prin dezvoltarea unui model inteligent de suport decizional bazat pe logica fuzzy pentru evaluarea managementului energiei verzi. Dacă în capitolele anterioare au fost analizate cadrul conceptual, contextul actual al dezvoltării energiei

regenerabile și limitările sistemelor existente, acest capitol propune o soluție capabilă să răspundă complexității procesului decizional din domeniul energetic.

Cercetătorul pornește de la ideea că deciziile privind implementarea și managementul energiei regenerabile sunt influențate simultan de numeroși factori tehnologici, economici, sociali și instituționali. În practică, acești factori nu pot fi descriși întotdeauna prin valori exacte sau relații strict matematice, deoarece multe dintre informațiile utilizate provin din evaluări subiective, estimări ale experților sau date caracterizate prin incertitudine. Din acest motiv, metodele clasice de analiză statistică și modelele deterministe sunt insuficiente pentru a surprinde complexitatea reală a procesului decizional. În acest context, logica fuzzy este aleasă ca metodă principală de modelare datorită capacității sale de a integra informații incerte și de a reproduce modul în care experții formulează deciziile în situații complexe.

În prima parte a capitolului este prezentată fundamentarea teoretică a logicii fuzzy. Cercetătorul explică diferențele dintre logica clasică și logica fuzzy, evidențiind faptul că, spre deosebire de sistemele binare, în care un element aparține sau nu unei categorii, logica fuzzy permite existența unor grade de apartenență cu valori cuprinse între 0 și 1. Această caracteristică oferă posibilitatea modelării fenomenelor reale, unde limitele dintre categorii sunt rareori clare și unde deciziile sunt influențate de percepții și interpretări. Prin utilizarea funcțiilor de apartenență și a regulilor de inferență, sistemul fuzzy poate transforma informațiile calitative în rezultate cantitative utile pentru procesul decizional.

Cercetătorul justifică alegerea logicii fuzzy prin comparație cu alte metode multicriteriale identificate în literatura de specialitate. Analiza realizată în capitolul anterior a arătat că majoritatea modelelor existente tratează separat diferitele dimensiuni ale managementului energetic și nu permit integrarea simultană a tuturor factorilor relevanți. Modelul propus urmărește depășirea acestor limitări prin construirea unui sistem capabil să analizeze relațiile dintre indicatorii tehnologici, economici, sociali și manageriali într-o manieră unitară și flexibilă.

Procesul de dezvoltare a modelului începe cu identificarea variabilelor de intrare. Acestea sunt selectate pe baza analizei literaturii de specialitate și a rezultatelor cercetării empirice. Variabilele reflectă principalele dimensiuni ale managementului energiei verzi, incluzând eficiența energetică, gradul de utilizare a surselor regenerabile, nivelul investițiilor, sustenabilitatea economică, impactul asupra mediului, acceptarea socială și performanța managerială. Alegerea acestor indicatori urmărește construirea unui model cât mai apropiat de realitatea organizațională și capabil să surprindă interdependențele dintre diferitele componente ale sistemului energetic.

După definirea variabilelor, cercetătorul dezvoltă funcțiile de apartenență utilizate în sistemul fuzzy. Pentru fiecare variabilă sunt stabilite niveluri lingvistice precum „scăzut”, „mediu” și „ridicat”, fiecare fiind reprezentat prin funcții matematice specifice. Aceste funcții permit transformarea valorilor numerice în informații compatibile cu mecanismul de inferență fuzzy. Cercetătorul explică faptul că alegerea tipului de funcții și a intervalelor de apartenență influențează direct sensibilitatea modelului și calitatea rezultatelor obținute.

O etapă esențială în dezvoltarea modelului este construirea bazei de reguli fuzzy. Regulile sunt formulate sub forma unor relații de tipul „Dacă... atunci...”, care descriu modul în care diferitele combinații ale variabilelor de intrare influențează rezultatul final. Aceste reguli sunt elaborate pe baza concluziilor desprinse din literatura de specialitate, a experienței practice și a rezultatelor cercetării empirice. Prin utilizarea unui număr mare de reguli, modelul poate reproduce procesul de raționament al unui expert și poate evalua simultan efectele mai multor factori asupra performanței managementului energetic.

După definirea regulilor, cercetătorul descrie mecanismul de inferență fuzzy utilizat pentru procesarea informațiilor. Sistemul analizează valorile introduse pentru fiecare variabilă, identifică regulile aplicabile și reunește rezultatele obținute într-o singură valoare fuzzy. Pentru transformarea acesteia într-un rezultat ușor de interpretat este aplicată procedura de defuzzificare, prin care se obține o valoare numerică finală ce exprimă nivelul de performanță al managementului energiei verzi. Acest

rezultat poate fi utilizat ulterior de manageri și factori de decizie pentru evaluarea situației existente și pentru identificarea măsurilor de îmbunătățire.

Implementarea modelului este realizată în MATLAB, utilizând instrumentele dedicate dezvoltării sistemelor fuzzy. Cercetătorul prezintă arhitectura modelului, etapele de implementare și interfața utilizată pentru introducerea datelor și interpretarea rezultatelor. Alegerea platformei MATLAB este justificată prin flexibilitatea oferită în proiectarea sistemelor fuzzy, posibilitatea simulării diferitelor scenarii și existența unor instrumente performante pentru analiza sensibilității și validarea modelelor.

Un element important al metodologiei îl reprezintă integrarea rezultatelor cercetării empirice în procesul de construire a modelului. Datele obținute prin aplicarea chestionarului și analizate statistic în PSPP sunt utilizate pentru validarea variabilelor și pentru ajustarea funcțiilor de apartenență. În acest mod, modelul nu este construit exclusiv pe baza ipotezelor teoretice, ci reflectă și percepțiile reale ale respondenților privind managementul energiei verzi, ceea ce îi conferă un grad ridicat de aplicabilitate practică.

Cercetătorul evidențiază că principalul avantaj al modelului propus constă în capacitatea de a integra simultan informații cantitative și calitative, reducând efectele incertitudinii care caracterizează procesele decizionale din domeniul energetic. Spre deosebire de modelele clasice, sistemul fuzzy permite evaluarea unor situații în care informațiile sunt incomplete sau dificil de cuantificat și oferă rezultate flexibile, adaptabile la contexte organizaționale diferite. În plus, modelul poate fi actualizat prin introducerea unor noi variabile sau reguli de inferență, ceea ce îi conferă un caracter dinamic și posibilitatea utilizării în cercetări viitoare.

Capitolul se încheie prin sublinierea faptului că modelul fuzzy dezvoltat reprezintă o contribuție originală la domeniul managementului energiei verzi. Prin integrarea factorilor tehnologici, economici, sociali și manageriali într-un singur cadru de analiză, acesta oferă un instrument de sprijin pentru fundamentarea deciziilor strategice privind dezvoltarea energiilor regenerabile. Totodată, cercetătorul evidențiază că performanța și fiabilitatea modelului trebuie demonstrate printr-un proces riguros de testare și validare, etapă care constituie obiectul capitolului următor.

Capitolul 6, intitulat **Testarea, validarea și forma finală a cadrului fuzzy propus,** este dedicat procesului de testare, validare și optimizare a modelului fuzzy dezvoltat în cadrul cercetării. După elaborarea arhitecturii sistemului și implementarea acestuia în MATLAB, cercetătorul urmărește verificarea performanței modelului în diferite scenarii și evaluarea capacității acestuia de a sprijini procesul decizional privind managementul energiei verzi. Acest capitol are un rol esențial în demonstrarea aplicabilității practice a modelului și în confirmarea faptului că soluția propusă poate reprezenta un instrument eficient pentru organizațiile care implementează strategii de dezvoltare sustenabilă.

Procesul de validare începe prin verificarea funcționării fiecărei componente a sistemului fuzzy. Cercetătorul analizează funcțiile de apartenență, baza de reguli și mecanismul de inferență, urmărind dacă acestea răspund corect diferitelor combinații ale variabilelor de intrare. Sunt efectuate numeroase simulări pentru a observa comportamentul sistemului în situații variate și pentru a identifica eventualele inconsistențe sau suprapuneri între regulile de inferență. Această etapă permite ajustarea parametrilor modelului și eliminarea eventualelor erori înainte de aplicarea acestuia în analiza datelor reale.

O etapă importantă a validării constă în testarea modelului prin intermediul unor scenarii reprezentative pentru managementul energiei verzi. Cercetătorul construiește mai multe combinații ale variabilelor de intrare, corespunzătoare unor situații întâlnite în practică, precum niveluri diferite ale eficienței energetice, investițiilor în energie regenerabilă, performanței manageriale și gradului de acceptare socială. Pentru fiecare scenariu, sistemul fuzzy generează un rezultat care exprimă nivelul estimat al performanței managementului energetic. Analiza acestor rezultate permite observarea modului în care modificarea unei singure variabile sau a unui grup de variabile influențează evaluarea finală.

Cercetătorul acordă o atenție deosebită analizei sensibilității modelului. Scopul acestei etape este de a determina cât de sensibil este sistemul la variațiile valorilor de intrare și dacă modificările produse sunt reflectate într-un mod logic și coerent în rezultatele finale. Analiza demonstrează că modelul reacționează gradual la schimbările parametrilor și evită apariția unor variații bruște sau disproporționate, caracteristică esențială pentru un instrument destinat sprijinirii procesului decizional. Această proprietate confirmă faptul că logica fuzzy permite modelarea unor relații complexe fără a genera instabilitate în evaluare.

În continuare este realizată validarea modelului prin raportarea rezultatelor generate de sistem la informațiile obținute în cadrul cercetării empirice prezentate în capitolul anterior. Cercetătorul compară comportamentul modelului cu percepțiile și răspunsurile celor 120 de participanți la chestionar, urmărind gradul de concordanță dintre evaluările generate automat și tendințele identificate în analiza statistică. Rezultatele arată că modelul reproduce într-o măsură ridicată relațiile observate în datele empirice și oferă evaluări compatibile cu opiniile exprimate de respondenți. Această concordanță contribuie la validarea externă a sistemului și demonstrează că regulile fuzzy formulate reflectă corespunzător realitatea analizată.

Un alt element important al capitolului îl reprezintă evaluarea robusteții modelului. Cercetătorul testează funcționarea sistemului în condiții caracterizate prin informații incomplete sau incerte, simulând situații în care unele variabile prezintă valori intermediare sau dificil de interpretat. Rezultatele demonstrează că modelul își păstrează stabilitatea și furnizează evaluări coerente chiar și atunci când datele disponibile nu sunt exacte sau complete. Această caracteristică reprezintă unul dintre principalele avantaje ale logicii fuzzy și justifică alegerea acestei metode pentru managementul energiei verzi, domeniu în care procesul decizional este frecvent influențat de incertitudine și de existența unor criterii dificil de cuantificat.

Capitolul include și o analiză comparativă între modelul propus și metodele clasice de evaluare a performanței energetice. Cercetătorul evidențiază faptul că abordările tradiționale utilizează, în general, indicatori rigizi și relații matematice deterministe, ceea ce limitează capacitatea acestora de a integra simultan informații cantitative și calitative. În schimb, modelul fuzzy permite includerea unor variabile precum percepția utilizatorilor, nivelul de acceptare socială, experiența managerială sau gradul de maturitate organizațională, factori care influențează semnificativ succesul implementării proiectelor de energie regenerabilă, dar care sunt dificil de exprimat prin metode convenționale.

Rezultatele testelor confirmă faptul că sistemul dezvoltă evaluări consistente și stabile pentru toate scenariile analizate. Cercetătorul demonstrează că modelul poate fi utilizat atât pentru evaluarea situației curente a unei organizații, cât și pentru simularea efectelor unor decizii strategice privind investițiile în tehnologii regenerabile, îmbunătățirea eficienței energetice sau dezvoltarea politicilor organizaționale orientate spre sustenabilitate. În acest mod, sistemul nu se limitează la o simplă funcție de evaluare, ci devine un instrument de planificare și suport pentru managementul strategic.

Pe baza rezultatelor obținute în urma testării și validării, cercetătorul realizează optimizarea modelului și stabilește forma finală a cadrului fuzzy propus. Sunt ajustate anumite funcții de apartenență și sunt revizuite unele reguli de inferență pentru a îmbunătăți precizia evaluărilor și pentru a reduce eventualele suprapuneri dintre diferitele categorii lingvistice. Forma finală a modelului este prezentată ca un sistem flexibil și adaptabil, care poate fi utilizat în organizații din domenii diferite și care poate fi extins prin introducerea unor noi indicatori sau reguli, în funcție de evoluția tehnologiilor și a politicilor energetice.

În concluzie, cercetătorul demonstrează că modelul fuzzy dezvoltat în cadrul tezei reprezintă un instrument eficient pentru evaluarea managementului energiei verzi. Validarea realizată prin simulări, analize de sensibilitate și comparația cu rezultatele cercetării empirice confirmă fiabilitatea și robustețea sistemului. Totodată, cercetarea evidențiază faptul că utilizarea logicii fuzzy permite integrarea simultană a unor factori tehnici, economici, sociali și manageriali, oferind decidenților o imagine

complexă asupra performanței energetice și facilitând adoptarea unor decizii fundamentate în condiții de incertitudine.

Capitolul 7, intitulat **Concluzii. Contribuții personale. Perspective ale cercetării,** sintetizează principalele rezultate obținute pe parcursul cercetării și evidențiază contribuțiile originale aduse în domeniul managementului energiei verzi. Cercetătorul revine asupra obiectivelor formulate în primul capitol și demonstrează că acestea au fost îndeplinite prin combinarea unei analize teoretice aprofundate cu o cercetare empirică și prin dezvoltarea unui model inteligent de suport decizional bazat pe logica fuzzy. În acest mod, cercetarea oferă atât o contribuție științifică, cât și una practică, adresată organizațiilor și factorilor de decizie implicați în procesul de tranziție energetică.

Prima concluzie importantă formulată este că dezvoltarea energiei regenerabile nu depinde exclusiv de existența resurselor naturale sau de progresul tehnologic. Implementarea cu succes a strategiilor de energie verde este influențată de un ansamblu complex de factori economici, sociali, instituționali și manageriali, care interacționează permanent. În consecință, procesul decizional nu poate fi fundamentat doar pe indicatori tehnici sau economici, ci trebuie să integreze simultan informații provenite din domenii diferite, uneori caracterizate prin incertitudine sau dificultăți de cuantificare.

Analiza realizată pe parcursul tezei demonstrează că România dispune de un potențial semnificativ pentru dezvoltarea energiei regenerabile, datorită resurselor sale naturale și poziției geografice favorabile. Totuși, valorificarea acestui potențial este limitată de existența unor obstacole importante. Printre acestea se numără infrastructura energetică insuficient modernizată, capacitatea redusă de stocare a energiei, volatilitatea cadrului legislativ, dificultățile de finanțare și lipsa unei coordonări eficiente între instituțiile implicate în implementarea politicilor energetice. De asemenea, cercetătorul evidențiază faptul că acceptarea socială și nivelul de informare al populației influențează semnificativ succesul proiectelor de energie regenerabilă, ceea ce impune dezvoltarea unor politici publice orientate spre comunicare și implicarea comunităților locale.

Un rezultat important al cercetării îl reprezintă analiza comparativă a modelelor existente de management energetic. Studiul literaturii de specialitate evidențiază faptul că majoritatea modelelor disponibile sunt orientate către evaluarea unor dimensiuni specifice, precum eficiența energetică sau performanța economică, fără a integra simultan factorii tehnologici, sociali și manageriali. Pornind de la această limitare, cercetătorul justifică necesitatea dezvoltării unui model nou, capabil să ofere o abordare integrată și adaptată complexității procesului decizional din domeniul energiei verzi.

Contribuția originală principală a tezei constă în proiectarea și dezvoltarea unui sistem inteligent de suport decizional bazat pe logica fuzzy. Modelul propus permite evaluarea managementului energiei verzi prin integrarea unor variabile multiple, reprezentând dimensiunile tehnologice, economice, sociale și manageriale ale procesului de tranziție energetică. Utilizarea logicii fuzzy oferă posibilitatea modelării relațiilor dintre aceste variabile chiar și în condițiile în care informațiile disponibile sunt incomplete sau caracterizate prin incertitudine. Astfel, sistemul reproduce într-o manieră apropiată de raționamentul uman procesul de luare a deciziilor și generează rezultate ușor de interpretat și utilizat în practică.

Cercetătorul subliniază că unul dintre punctele forte ale modelului îl reprezintă flexibilitatea acestuia. Structura sistemului permite introducerea unor noi indicatori sau modificarea regulilor de inferență în funcție de particularitățile domeniului de aplicare. În consecință, modelul poate fi adaptat nu doar pentru sectorul automotive și industria construcțiilor, analizate în cadrul cercetării, ci și pentru alte domenii economice în care managementul energiei joacă un rol strategic. Această caracteristică conferă modelului un potențial ridicat de extindere și dezvoltare în cercetări viitoare.

Un alt rezultat important al tezei este validarea practică a modelului. Testele efectuate în MATLAB și comparația cu rezultatele cercetării empirice demonstrează că sistemul fuzzy produce evaluări coerente și stabile, fiind capabil să reflecte influența diferitelor categorii de factori asupra performanței managementului energetic. Analiza de sensibilitate confirmă robustețea modelului și capacitatea acestuia de a funcționa în condiții caracterizate prin informații incomplete sau variabile. Aceste rezultate

demonstrează aplicabilitatea practică a modelului și posibilitatea utilizării sale ca instrument de sprijin pentru manageri și factori de decizie.

Cercetătorul evidențiază și implicațiile practice ale cercetării. Modelul poate contribui la fundamentarea strategiilor organizaționale privind utilizarea surselor regenerabile de energie, optimizarea consumului energetic și planificarea investițiilor în tehnologii verzi. De asemenea, sistemul poate sprijini autoritățile publice în evaluarea proiectelor energetice și în elaborarea politicilor destinate accelerării tranziției către o economie cu emisii reduse de carbon. Prin integrarea informațiilor provenite din surse diferite, modelul facilitează identificarea soluțiilor optime și reduce riscul adoptării unor decizii bazate exclusiv pe criterii economice sau tehnice.

În ceea ce privește contribuțiile personale, cercetătorul evidențiază mai multe elemente care diferențiază această cercetare de studiile existente. Printre acestea se numără realizarea unei analize complexe a cadrului conceptual și contextual al energiei verzi, evaluarea critică a limitărilor sistemului energetic din România, dezvoltarea și implementarea unui model fuzzy original, realizarea unei cercetări empirice bazate pe chestionar și integrarea rezultatelor acesteia în arhitectura modelului de suport decizional. Toate aceste componente contribuie la dezvoltarea unui instrument inovator, cu aplicabilitate atât în cercetare, cât și în practică.

Cercetătorul recunoaște totodată existența unor limite ale cercetării. Dimensiunea eșantionului utilizat în cercetarea empirică, concentrarea asupra anumitor sectoare economice și utilizarea unui număr limitat de variabile reprezintă aspecte care pot influența gradul de generalizare a rezultatelor. De asemenea, evoluția rapidă a tehnologiilor din domeniul energiei regenerabile impune actualizarea periodică a modelului și adaptarea acestuia la noile condiții economice și legislative.

Pornind de la aceste limitări, sunt propuse mai multe direcții de cercetare viitoare. Cercetătorul recomandă extinderea modelului prin integrarea unor tehnici moderne de inteligență artificială și învățare automată, care ar putea îmbunătăți capacitatea sistemului de a învăța din date și de a adapta automat regulile de inferență. Totodată, este sugerată aplicarea modelului în alte sectoare economice, precum agricultura, transporturile sau administrația publică, precum și realizarea unor studii comparative între România și alte state europene pentru evaluarea diferențelor privind managementul energiei verzi.

În concluzie, teza demonstrează că dezvoltarea sustenabilă a sectorului energetic necesită utilizarea unor instrumente moderne de analiză și suport decizional, capabile să gestioneze complexitatea și incertitudinea caracteristice acestui domeniu. Modelul fuzzy propus reprezintă o contribuție originală și valoroasă, oferind o abordare integrată a managementului energiei verzi și constituind un instrument util atât pentru mediul academic, cât și pentru organizațiile implicate în procesul de tranziție energetică.

Teza de doctorat realizează o abordare interdisciplinară a managementului energiei verzi, integrând perspective din domeniul ingineriei, managementului, dezvoltării sustenabile și inteligenței artificiale. Cercetarea pornește de la analiza conceptelor fundamentale și a contextului energetic european și național, continuă cu identificarea limitărilor existente în dezvoltarea energiei regenerabile și cu realizarea unei cercetări empirice privind percepția asupra energiei verzi, iar în final propune și validează un model inteligent de suport decizional bazat pe logica fuzzy.

Originalitatea tezei constă în dezvoltarea unui cadru metodologic care permite integrarea simultană a factorilor tehnologici, economici, sociali și manageriali în evaluarea performanței managementului energiei verzi. Rezultatele demonstrează că logica fuzzy reprezintă o metodă eficientă pentru fundamentarea deciziilor în condiții de incertitudine și complexitate, oferind o alternativă modernă la metodele tradiționale de evaluare.