

**UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI
CENTRUL UNIVERSITAR PITEȘTI**

**ȘCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ
DOMENIUL INFORMATICĂ**



TEZĂ DE DOCTORAT

- REZUMAT -

**Sisteme web distribuite: specificare, verificare și
validare**

Conducător științific

Prof. univ. dr. Tudor BĂLĂNESCU

Doctorand

Marian ILEANA

PITEȘTI 2026

**UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE
POLITEHNICA BUCUREȘTI
CENTRUL UNIVERSITAR PITEȘTI**

**ȘCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ
DOMENIUL INFORMATICĂ**



**TEZĂ DE DOCTORAT
- REZUMAT -**

**Sisteme web distribuite: specificare, verificare și validare
(Distributed Web Systems: Specification, Verification and
Validation)**

Conducător științific

Prof. univ. dr. Tudor BĂLĂNESCU

Comisia de îndrumare

Prof. univ. dr. Horia GEORGESCU

Conf. univ. dr. Radu BORIGA

Conf. univ. dr. Costel BĂLCĂU

Conf. univ. dr. Doru CONSTANTIN

Doctorand

Marian ILEANA

PITEȘTI 2026

Cuprins

Problema fundamentală abordată	5
Ipotezele și obiectivele cercetării	5
Metodologia cercetării.....	6
Contribuții personale	7
Capitolul I. Introducere	8
Capitolul II. Cadru conceptual și studiu critic al literaturii.....	9
Capitolul III. Fundamente formale și metodologice în sistemele web distribuite	11
Capitolul IV. Testare automată și validare în sisteme distribuite	12
Capitolul V. Arhitecturi moderne și tehnologii pentru optimizare	13
Capitolul VI. Securitate, confidențialitate și protecția datelor	14
Capitolul VII. Aplicații în educație și sănătate	15
Capitolul VIII. Arhitecturi avansate și interoperabilitate	15
Concluzii	16
Lista lucrărilor științifice care susțin teza	18
Bibliografie selectivă.....	21

Problema fundamentală abordată

Nucleul științific al cercetării îl constituie necesitatea asigurării corectitudinii, fiabilității, securității și performanței sistemelor web distribuite moderne, într-un context tehnologic marcat de complexitate structurală ridicată, concurență, asincronism, scalabilitate dinamică și integrarea extensivă a tehnologiilor emergente precum Internet of Things (IoT), inteligența artificială, arhitecturile cloud și microserviciile.

Sistemele web distribuite constituie infrastructura critică a numeroaselor domenii strategice, precum sănătatea digitală, educația inteligentă, comerțul electronic, managementul clinic și monitorizarea industrială, unde disfuncționalitățile pot genera consecințe majore asupra integrității datelor, continuității serviciilor și protecției informațiilor sensibile. În aceste contexte, defectele de proiectare, inconsistențele comportamentale, vulnerabilitățile de securitate sau degradarea performanței nu reprezintă simple inconveniente tehnice, ci pot afecta procese operaționale critice și încrederea utilizatorilor.

În pofida evoluției rapide a tehnologiilor distribuite, literatura de specialitate evidențiază fragmentarea abordărilor existente: metodele formale sunt rareori integrate cu mecanisme automate de testare bazate pe învățare automată, iar tehnicile de optimizare și securizare sunt frecvent tratate separat de procesul de specificare și verificare. Această discontinuitate metodologică generează dificultăți în garantarea unei validări complete și coerente a sistemelor distribuite, în special în condiții de încărcare variabilă, comportament asincron și integrare multi-nod.

Prin urmare, problema științifică centrală a tezei constă în dezvoltarea unui cadru integrat care să permită:

- Modelarea formală riguroasă a comportamentului sistemelor web distribuite, utilizând mașini cu stări finite și automate temporizate;
- Verificarea proprietăților de corectitudine funcțională, consistență și sincronizare;
- Validarea experimentală prin testare automată inteligentă și mecanisme adaptative;
- Optimizarea performanței și a securității prin tehnici evolutive și algoritmi de învățare automată;
- Integrarea cerințelor de conformitate normativă (GDPR, HIPAA) în arhitectura sistemelor.

Astfel, teza răspunde unei nevoi reale și actuale din domeniul informaticii aplicate: construirea unui ecosistem metodologic unitar care să coreleze specificarea formală, verificarea comportamentală și validarea practică a sistemelor web distribuite, asigurând totodată scalabilitate, reziliență, eficiență energetică și protecția datelor într-un mediu digital în continuă transformare.

Ipotezele și obiectivele cercetării

Formularea ipotezelor și definirea obiectivelor cercetării reprezintă un demers esențial în structurarea cadrului conceptual și metodologic al prezentei lucrări. În contextul complexității crescute a arhitecturilor distribuite moderne, devine necesară delimitarea clară a premiselor teoretice și a direcțiilor de investigare care fundamentează contribuțiile științifice propuse.

Cercetarea pornește de la următoarele ipoteze fundamentale:

1. Integrarea metodelor formale cu tehnici moderne de testare automată conduce la creșterea nivelului de corectitudine și fiabilitate al sistemelor web distribuite. Se presupune că utilizarea mașinilor cu stări finite (FSM) și a automatelor

temporizate (TA), corelate cu mecanisme automate de testare, permite identificarea timpurie a erorilor comportamentale și a inconsecvențelor logice dificil de detectat prin metode empirice tradiționale;

2. Aplicarea tehnicilor de învățare automată și a algoritmilor evolutivi îmbunătățește semnificativ procesul de validare și optimizare a arhitecturilor distribuite. Se consideră că algoritmi precum Random Forest, rețele neuronale, Isolation Forest sau algoritmi genetici pot crește acuratețea detecției anomaliilor, pot optimiza performanța și pot contribui la adaptarea sistemului în condiții de încărcare variabilă;
3. Arhitecturile distribuite proiectate pe baza unui cadru metodologic unitar asigură scalabilitate, reziliență și securitate superioară față de abordările fragmentate. Ipoteza susține că unificarea etapelor de specificare, verificare și validare într-un ecosistem coerent conduce la creșterea robusteții și la reducerea vulnerabilităților;
4. Integrarea cerințelor de conformitate normativă încă din faza de proiectare contribuie la consolidarea securității și protecției datelor în sisteme distribuite. Se presupune că abordarea "security and privacy by design" reduce riscul neconformităților și facilitează implementarea mecanismelor tehnice adecvate.

Obiectivul general al cercetării îl constituie dezvoltarea unui cadru integrat pentru specificarea, verificarea și validarea sistemelor web distribuite moderne, capabil să asigure performanță, securitate și scalabilitate în medii dinamice. În acest sens, demersul științific urmărește modelarea formală a comportamentului sistemelor prin utilizarea mașinilor cu stări finite și a automatelor temporizate, validarea acestor modele prin instrumente de verificare formală și dezvoltarea unor mecanisme automate de testare bazate pe tehnici de învățare automată pentru detecția anomaliilor.

Totodată, cercetarea vizează optimizarea performanței și a securității prin algoritmi genetici, proiectarea și evaluarea unor arhitecturi distribuite bazate pe microservicii și tehnologii cloud, precum și integrarea cerințelor de protecție a datelor în procesul de proiectare. Prin atingerea acestor obiective, teza demonstrează viabilitatea unei abordări integrate care conduce la creșterea fiabilității, eficienței și rezilienței sistemelor web distribuite.

Metodologia cercetării

Demersul științific adoptat în cadrul acestei lucrări se bazează pe o abordare integrată, care combină analiza teoretică, modelarea formală, dezvoltarea experimentală și validarea empirică a soluțiilor propuse. Cercetarea a fost structurată progresiv, pornind de la studiul critic al literaturii de specialitate și identificarea limitărilor existente, continuând cu definirea cadrului conceptual și formal, iar ulterior cu implementarea și testarea soluțiilor în medii experimentale controlate.

În etapa de modelare, au fost utilizate metode formale, în special mașini cu stări finite și automate temporizate, pentru descrierea riguroasă a comportamentului sistemelor distribuite. Verificarea proprietăților de corectitudine, consistență și sincronizare a fost realizată prin instrumente consacrate de model checking și simulare.

Componenta experimentală a inclus dezvoltarea unor prototipuri și arhitecturi distribuite bazate pe microservicii și orchestrare, precum și aplicarea tehnicilor de învățare automată pentru detecția anomaliilor și a algoritmilor genetici pentru optimizarea performanței și securității. Evaluarea soluțiilor a fost realizată prin măsurarea indicatorilor relevanți de performanță, precum latența, utilizarea resurselor și acuratețea clasificării, în scenarii aplicative din domenii critice. Prin această abordare, metodologia îmbină rigoarea formală cu validarea practică, asigurând coerența dintre specificare, verificare și validare în analiza arhitecturilor web distribuite moderne.

Contribuții personale

Teză de doctorat aduce contribuții originale în domeniul sistemelor web distribuite prin dezvoltarea unui cadru integrat de specificare formală, verificare și validare, susținut prin implementări experimentale și rezultate diseminate în publicații științifice indexate. Contribuțiile realizate se situează la intersecția modelării formale, optimizării distribuite, securității informatice și aplicațiilor interdisciplinare.

O primă direcție de contribuție o reprezintă modelarea formală și verificarea sistemelor distribuite, prin integrarea mașinilor cu stări finite (FSM) și a automatelor cu cronometru în procesele de testare și analiză comportamentală. Implementarea practică a metodologiei FSM în MATLAB și validarea acesteia în contexte distribuite sunt prezentate în [A13], iar extinderea către optimizarea arhitecturilor distribuite este detaliată în [A14]. Această abordare permite identificarea erorilor logice și temporale dificil de surprins prin testare empirică clasică.

În plan metodologic, teza introduce un model original de optimizare distribuită - D-GA-CO (Distributed Genetic Algorithm Cooperative Optimization) - fundamentat în [A12] și extins în lucrările privind securitatea și performanța infrastructurilor distribuite. De asemenea, sunt dezvoltate mecanisme de detecție a anomaliilor bazate pe tehnici de învățare automată (CNN, LSTM, Random Forest), aplicate în sisteme IoT și arhitecturi web distribuite, rezultatele fiind prezentate în [A1, A3, A5]. Implementarea unui mecanism de detecție a intruziunilor pentru rețele IoT este detaliată în [A5].

Din perspectivă arhitecturală, contribuțiile includ proiectarea unui mecanism propriu de load balancing adaptiv și implementarea unei infrastructuri containerizate distribuite utilizând Docker Swarm, validate experimental în [A18, A34]. De asemenea, teza propune o abordare orientată Green Computing pentru optimizarea consumului energetic în aplicații distribuite, prezentată în [A12].

În domeniul securității și protecției datelor, este dezvoltat un model de tip privacy-by-design pentru integrarea cerințelor GDPR și HIPAA în arhitecturi distribuite medicale, cu aplicații în sisteme EHR și CRM, conform lucrărilor [A2, A28, A35]. Aceste contribuții demonstrează fezabilitatea unei infrastructuri distribuite sigure pentru gestionarea datelor sensibile.

Componenta aplicativă a cercetării este validată prin dezvoltarea unor prototipuri funcționale în educație și industrie. În domeniul educațional, sunt implementate o aplicație mobilă distribuită bazată pe gamificare [A37], o platformă VR integrată în arhitectură distribuită [A7, A17], precum și o arhitectură blockchain pentru certificarea competențelor academice [A15]. Sistemul educațional distribuit DESY, care integrează RFID, blockchain și gamificare, este prezentat în [A32].

În domeniul integrării IoT cu CRM, este propusă și validată experimental o arhitectură distribuită capabilă să gestioneze până la 10.000 de cereri simultane, cu un algoritm de personalizare ce atinge o acuratețe de aproximativ 90%, rezultatele fiind publicate în [A3]. Această contribuție demonstrează superioritatea modelelor distribuite față de soluțiile monolitice tradiționale.

Contribuția centrală a tezei constă în dezvoltarea unui cadru integrat pentru specificarea, verificarea și optimizarea sistemelor web distribuite, prin corelarea modelării formale cu tehnici moderne de testare automată, optimizare distribuită și arhitecturi software scalabile. Abordarea propusă combină metode de analiză formală cu implementări experimentale în infrastructuri distribuite, demonstrând aplicabilitatea practică a soluțiilor dezvoltate în contexte reale. Rezultatele cercetării sunt validate experimental și diseminate în lucrările științifice asociate tezei [A1-A39], evidențiind caracterul coerent, extensibil și aplicativ al cadrului metodologic propus pentru sisteme web distribuite.

Capitolul I. Introducere

Capitolul I fundamentează cadrul conceptual al cercetării și poziționează tema tezei în contextul evoluției arhitecturilor web distribuite, marcate de transformarea digitală accelerată, interconectivitate globală și integrarea tehnologiilor emergente. În prezent, sistemele web distribuite constituie infrastructura esențială a aplicațiilor critice din domenii precum sănătatea, educația, comerțul electronic, administrația publică și Internetul Lucrurilor, unde cerințele de disponibilitate, scalabilitate, consistență și securitate sunt din ce în ce mai riguroase.

Complexitatea acestor sisteme derivă din distribuția geografică a componentelor, comunicarea asincronă, concurența proceselor și integrarea microserviciilor orchestrate în medii cloud și edge. Deși aceste arhitecturi oferă flexibilitate și elasticitate operațională, ele introduc simultan riscuri sporite privind inconsistența datelor, apariția blocajelor, vulnerabilitățile de securitate și dificultățile de validare funcțională. Capitolul argumentează că metodele empirice tradiționale de dezvoltare și testare nu mai sunt suficiente pentru a garanta corectitudinea și reziliența sistemelor distribuite moderne.

Problema fundamentală identificată constă în absența unui cadru metodologic integrat care să coreleze modelarea formală a comportamentului sistemelor cu mecanisme automate de testare și optimizare inteligentă. În practică, soluțiile bazate pe microservicii și containere sunt frecvent implementate fără o specificare formală riguroasă și fără verificarea sistematică a proprietăților critice, ceea ce conduce la erori subtile dificil de detectat și la vulnerabilități structurale.

Motivația cercetării este determinată de necesitatea reducerii acestui decalaj dintre complexitatea arhitecturală și nivelul de formalizare aplicat în dezvoltarea sistemelor distribuite. Teza propune o abordare unificatoare care integrează metode formale, tehnici de învățare automată și algoritmi evolutivi într-un cadru coerent destinat specificării, verificării și validării sistemelor web distribuite.

Obiectivul general formulat în acest capitol constă în elaborarea unui cadru metodologic extensibil, capabil să modeleze riguros comportamentul sistemelor distribuite, să verifice proprietăți de corectitudine și sincronizare și să valideze performanța și securitatea acestora prin mecanisme automate. Accentul este pus pe aplicabilitatea interdisciplinară a soluțiilor propuse, în special în domenii sensibile precum infrastructurile medicale, platformele educaționale și ecosistemele IoT.

Contribuțiile originale sunt prezentate pe mai multe niveluri complementare. La nivel teoretic, este definit un cadru formal unificat pentru modelarea sistemelor distribuite, bazat pe mașini cu stări finite și automate temporizate, capabil să surprindă atât comportamente deterministe, cât și constrângeri temporale și interacțiuni asincrone. La nivel metodologic, sunt propuse mecanisme automate de generare a cazurilor de test și detecție a anomaliilor utilizând modele de învățare automată și tehnici evulative. La nivel tehnologic, sunt proiectate și validate arhitecturi distribuite scalabile, integrate cu mecanisme de securitate și optimizare a performanței.

Capitolul evidențiază caracterul interdisciplinar al cercetării, care îmbină fundamente din teoria automatelor, ingineria software, inteligența artificială și securitatea cibernetică. Integrarea cerințelor de protecție a datelor și conformitate normativă este tratată ca o componentă structurală a proiectării arhitecturale, nu ca un mecanism adiacent.

Totodată, sunt prezentate experiențele academice și profesionale care au contribuit la maturizarea direcției de cercetare, incluzând colaborări internaționale și aplicații în infrastructuri informatice critice. Aceste contexte au evidențiat necesitatea unor mecanisme sistematice de specificare și validare și au confirmat relevanța practică a soluțiilor propuse.

Capitolul se încheie cu prezentarea structurii tezei, realizată printr-o sinteză argumentată a celor opt capitole și a rolului specific pe care fiecare îl are în construcția progresivă a

demersului științific. Organizarea lucrării reflectă o evoluție logică, de la definirea cadrului conceptual și a fundamentelor teoretice, către dezvoltarea modelelor formale, integrarea mecanismelor de testare automată și optimizare, consolidarea securității și, în final, validarea soluțiilor prin aplicații interdisciplinare concrete.

Primele capitole stabilesc baza metodologică, prin analiza critică a literaturii și formularea cadrului formal de modelare și verificare, care susține întregul demers ulterior. Capitolul dedicat testării automate și validării extinde această fundamentare prin integrarea tehnicilor de învățare automată și a metodelor evolutive pentru detecția anomaliilor și optimizarea performanței. Capitolele următoare aprofundează dimensiunea tehnologică și operațională, prin proiectarea și implementarea unor arhitecturi distribuite moderne, bazate pe microservicii, containerizare și orchestrare, precum și prin integrarea mecanismelor de securitate și conformitate normativă. Ultimele capitole demonstrează aplicabilitatea practică a cadrului propus în domenii critice precum educația și sănătatea, inclusiv prin utilizarea blockchain, IoT și CRM în arhitecturi interoperabile și scalabile.

Această structură etapizată evidențiază coerența internă a lucrării și susține demonstrarea sistematică a viabilității abordării integrate propuse, asigurând tranziția firească de la fundamentare teoretică la validare experimentală și aplicare în contexte reale.

În ansamblu, Capitolul I stabilește premisele științifice ale tezei și justifică necesitatea dezvoltării unui cadru formal și aplicativ unitar pentru sistemele web distribuite, poziționând contribuțiile cercetării în raport cu provocările actuale ale infrastructurilor digitale moderne.

Capitolul II. Cadru conceptual și studiu critic al literaturii

Capitolul II are rolul de a fundamenta teoretic și conceptual cercetarea printr-o analiză critică extinsă a literaturii de specialitate din domeniul sistemelor web distribuite, cu accent pe modelarea formală, testarea automată, optimizarea performanței, securitate și integrarea tehnologiilor emergente. Studiul combină analiza calitativă a lucrărilor reprezentative cu evaluări bibliometrice realizate prin platforma Dimensions.ai și vizualizate cu VOSviewer, oferind o perspectivă obiectivă asupra maturității domeniului, distribuției geografice și rețelilor de colaborare științifică.

Secțiunea 2.1 analizează utilizarea mașinilor cu stări finite (FSM) și a modelelor EFSM în testarea aplicațiilor web, prin studii aplicative relevante. Lucrările examinate demonstrează eficiența metodologiilor Model-Based Testing (MBT) în identificarea disfuncționalităților și în creșterea acoperirii stărilor și tranzițiilor. Integrarea unor algoritmi precum "Postman Problem" pentru acoperire completă și combinarea modelelor Mealy și Moore confirmă utilitatea modelării formale în aplicații web reale. Analizele bibliometrice arată un interes internațional semnificativ pentru tema "Finite State Machine și MATLAB", evidențiind mii de autori și colaborări consolidate, ceea ce validează relevanța metodologică a acestei direcții.

Secțiunea 2.2 extinde analiza către fundamentele sistemelor web distribuite, bazându-se pe lucrări consacrate privind arhitecturile distribuite, consistența datelor, toleranța la erori și gestionarea comunicației între componente. Sunt evidențiate provocările structurale ale sistemelor distribuite moderne: sincronizarea, scalabilitatea, securitatea și gestionarea concurenței. Analiza bibliometrică confirmă existența unor nuclee academice active și a unei rețele globale de cercetare în domeniu.

În secțiunea 2.3 este abordată integrarea tehnicilor de învățare automată în procesele de testare și validare. Sunt prezentate modele bazate pe LSTM și alte metode ML pentru predicția defecțiunilor și detectarea anomaliilor în sisteme complexe, cu performanțe ridicate raportate în literatura recentă. Analiza bibliometrică evidențiază caracterul global al cercetării și consolidarea unei direcții clare de integrare a ML în procesele critice de validare a sistemelor distribuite.

Secțiunea 2.4 tratează optimizarea performanței prin algoritmi genetici și metaeuristici, incluzând abordări de tip Parallel Genetic Algorithms și integrarea algoritmilor evolutivi cu tehnici de clustering. Literatura confirmă eficiența acestora în probleme complexe de optimizare și management al resurselor distribuite, dar semnalează limitări privind scalabilitatea și integrarea în arhitecturi dinamice. Analizele bibliometrice indică existența unor comunități de cercetare consolidate pe această temă.

Secțiunea 2.5 examinează framework-uri inteligente pentru rețele IoT, evidențiind utilizarea autoencoderelor, rețelelor neuronale profunde și metodelor ensemble pentru detectarea atacurilor și a comportamentelor anormale. Studiile arată acurateți ridicate în detectarea atacurilor DoS și a altor tipuri de anomalii, însă subliniază provocări legate de resurse limitate și confidențialitate.

Secțiunile 2.6 și 2.7 abordează echilibrarea sarcinilor și tehnologiile de containerizare și orchestrare, în special Docker Swarm și Kubernetes. Literatura confirmă maturizarea acestor tehnologii și rolul lor esențial în asigurarea scalabilității și rezilienței aplicațiilor distribuite. Analizele bibliometrice evidențiază un interes global susținut pentru aceste tehnologii, cu mii de autori și colaborări internaționale.

Secțiunea 2.8 tratează optimizarea energetică a aplicațiilor distribuite, corelând performanța tehnologică cu sustenabilitatea și reducerea emisiilor. Literatura discută politici publice, standarde și mecanisme de eficiență energetică aplicabile infrastructurilor digitale.

Secțiunea 2.9 analizează provocările de securitate în IoT, incluzând arhitecturi distribuite, deep learning și mecanisme de protecție a datelor. Sunt discutate soluții precum DistPrivacy și cadre de tip deep co-inference, evidențiind echilibrul necesar între latență, protecția datelor și resurse limitate.

Secțiunea 2.10 examinează integrarea sistemelor EHR cu soluții distribuite și CRM, în contextul digitalizării sănătății. Sunt analizate standarde precum HL7, utilizarea blockchain și integrarea modelelor AI pentru decizii clinice. Analiza bibliometrică confirmă consolidarea domeniului prin colaborări internaționale și formarea unor clustere de expertiză.

Secțiunile 2.11-2.12 abordează educația digitală, sistemele mobile de evaluare și instruirea bazată pe realitate virtuală. Literatura evidențiază rolul gamificării, al microlearning-ului și al VR imersiv în creșterea motivației și performanței academice. Analizele bibliometrice arată o creștere accelerată a cercetărilor în aceste direcții.

Secțiunile 2.13-2.14 tratează monitorizarea inteligentă a pacientului și managementul clinic asistat prin CRM și sisteme distribuite. Sunt analizate contribuții privind informatica medicală, PRM, integrarea AI în CRM și provocările de conformitate cu GDPR și HIPAA. Rezultatele bibliometrice indică un caracter interdisciplinar pronunțat și o distribuție globală a cercetării.

Secțiunile 2.15-2.16 examinează utilizarea blockchain în educație pentru validarea competențelor și dezvoltarea sistemelor distribuite educaționale integrate cu RFID și IoT. Literatura confirmă avantajele descentralizării, securității și imutabilității datelor, precum și potențialul gamificării în susținerea învățării.

Secțiunea 2.17 analizează integrarea IoT și CRM pentru optimizarea experienței utilizatorului în sisteme distribuite, evidențiind atât progresele, cât și limitările privind scalabilitatea, securitatea și validarea empirică a performanței.

Capitolul se încheie printr-o sinteză critică a constatărilor. Literatura validează importanța modelării formale, a testării automate bazate pe ML, a algoritmilor genetici și a tehnologiilor de orchestrare în dezvoltarea sistemelor web distribuite moderne. Totuși, analiza evidențiază absența unui cadru unitar care să integreze coerent specificarea formală, verificarea, validarea operațională și optimizarea performanței în condiții reale de exploatare. Această lacună conceptuală și metodologică fundamentează necesitatea contribuțiilor originale dezvoltate în capitolele următoare ale tezei.

Capitolul III. Fundamente formale și metodologice în sistemele web distribuite

Capitolul III construiește fundamentul formal și metodologic al tezei, prin articularea unui parcurs coerent de la specificarea abstractă a comportamentului la verificarea riguroasă și validarea experimentală a sistemelor web distribuite. Capitolul valorifică structurat rezultatele celor cinci rapoarte de cercetare susținute în cadrul stagiului doctoral și le integrează într-un cadru unitar, centrat pe trei direcții complementare: (i) modelarea comportamentală prin mașini cu stări finite (FSM), (ii) formalizarea și verificarea constrângerilor temporale prin automate cu cronometru (Timed Automata - TA) în mediul UPPAAL și (iii) ancorarea principiilor de calcul distribuit în implementări și optimizări concrete, sprijinite de instrumente precum MATLAB și Python. Prin această structurare, capitolul asigură trecerea logică de la concepte teoretice la studii aplicative validate, constituind baza necesară dezvoltării metodelor de testare automată, optimizare și securizare discutate ulterior în teză.

În secțiunea 3.1, capitolul abordează testarea sistemelor specificate prin FSM, pornind de la fundamentele formale ale automatelor finite și rolul lor în descrierea sistemelor reactive. Sunt prezentate elementele definitorii ale unui FSM și conexiunile cu limbajele regulate, care permit o reprezentare riguroasă și verificabilă a comportamentului. În context distribuit, FSM-urile sunt evidențiate ca instrumente adecvate pentru modelarea fluxurilor de interacțiune, a tranzițiilor generate de evenimente și a mecanismelor de sincronizare între componente, fiind discutate și tehnici de reducere a complexității, precum minimizarea și echivalența automatelor.

Partea metodologică este consolidată prin prezentarea metodelor clasice de generare a testelor (W și W_p), utilizate pentru obținerea unei acoperiri robuste și pentru diferențierea stărilor în scenarii complexe. Acest cadru teoretic este transpus într-o contribuție aplicativă explicită în secțiunea 3.1.4, unde este detaliată implementarea practică a unei metodologii de testare bazate pe FSM în MATLAB, utilizată pentru modelarea și evaluarea funcționalității unui website. Rezultatele acestei cercetări sunt diseminate în articolul [A13], prezentat în cadrul unei conferințe internaționale, demonstrând aplicabilitatea modelării formale în generarea sistematică a scenariilor de test și în analiza comportamentului aplicațiilor web distribuite.

Secțiunea 3.2 introduce specificarea sistemelor de timp real prin automate cu cronometru, subliniind faptul că, în arhitecturi distribuite, corectitudinea este condiționată nu doar de rezultatul funcțional, ci și de respectarea constrângerilor temporale. Sunt prezentate conceptele fundamentale ale TA și avantajele utilizării acestora în raport cu alte modele, fiind evidențiată verificarea proprietăților de tip safety și liveness. Componenta practică este dezvoltată prin utilizarea mediului UPPAAL, unde sunt ilustrate mecanismele de modelare, simulare și verificare automată în logica TCTL, justificând integrarea verificării temporale în validarea sistemelor web distribuite.

Secțiunea 3.3 consolidează legătura dintre modelarea formală și arhitecturile reale prin prezentarea principiilor de calcul distribuit, a modelelor arhitecturale consacrate (client-server, peer-to-peer, grid, edge-fog-cloud) și a mecanismelor de comunicare specifice. Sunt introduse relații matematice pentru evaluarea performanței, oferind suport formal pentru interpretarea rezultatelor experimentale. În secțiunea 3.3.7 este dezvoltat un studiu aplicativ de modelare a sistemelor web distribuite prin FSM în Python, orientat către optimizarea performanței și gestionarea erorilor în condiții de trafic variabil. Aceste rezultate sunt fundamentate în articolul [A14], publicat într-un jurnal cu factor de impact ridicat, confirmând relevanța modelării comportamentale în optimizarea arhitecturilor distribuite.

Secțiunea 3.4 aprofundează verificarea formală în sisteme distribuite, analizând diferența dintre testarea clasică și explorarea exhaustivă prin model checking, precum și metodele de analiză a echivalenței comportamentale. Sunt discutate provocări precum explozia de stare și sunt prezentate tehnici de control și instrumente consacrate (UPPAAL, NuSMV,

SPIN), evidențiindu-se posibilitatea integrării verificării în fluxuri CI/CD pentru creșterea fiabilității.

Secțiunea 3.5 analizează criteriile de validare prin testare, evidențiind complementaritatea dintre verificarea formală și evaluarea empirică a implementării. Sunt delimitate criterii funcționale și nefuncționale, criterii de consistență și toleranță la erori, iar definirea criteriilor de acceptare transformă validarea într-un proces sistematic și reproductibil.

În ansamblu, Capitolul III demonstrează că asigurarea corectitudinii și fiabilității în sisteme web distribuite presupune integrarea coerentă a modelării formale, a verificării riguroase și a validării prin testare. Prin corelarea cadrului teoretic cu rezultatele publicate în [A13, A14], capitolul consolidează fundamentul metodologic al tezei și furnizează infrastructura conceptuală necesară dezvoltării mecanismelor inteligente de testare, optimizare și securizare prezentate în capitolele următoare.

Capitolul IV. Testare automată și validare în sisteme distribuite

Capitolul IV abordează dezvoltarea unor metodologii avansate de testare automată și validare, necesare pentru garantarea fiabilității sistemelor web distribuite în medii de execuție reale. Capitolul pornește de la limitările testării convenționale în contexte distribuite (dinamism, heterogenitate, execuții asincrone) și propune integrarea inteligenței artificiale și a algoritmilor evolutivi pentru a crește acoperirea testelor, a reduce alarmele false și a îmbunătăți capacitatea de identificare a scenariilor de eroare sau degradare sub sarcină.

Un element central al capitolului îl constituie faptul că soluțiile sunt motivate și susținute prin rezultate diseminate în publicații științifice relevante, organizate pe trei direcții complementare: (i) automatizare și testare bazată pe Machine Learning, (ii) verificarea performanței și a securității prin algoritmi genetici distribuiți și (iii) framework-uri inteligente de testare pentru rețele IoT în arhitecturi cloud-edge. Această organizare reflectă o progresie metodologică firească, de la monitorizare și detecție automată, către optimizare evolutivă și, ulterior, către validare robustă în ecosisteme IoT caracterizate de volum ridicat de date și constrângeri operaționale stricte.

În secțiunea 4.1 este prezentat un cadru de testare automată bazat pe Machine Learning, detaliat în lucrarea [A36], care utilizează analiza logurilor pentru detectarea anomaliilor și a comportamentelor deviate în timp real. Abordarea urmărește depășirea limitărilor metodelor tradiționale (reguli fixe și acoperire redusă) prin învățarea tiparelor normale de funcționare și marcarea abaterilor, cu aplicabilitate directă în validarea performanței și a securității în sisteme distribuite. Originalitatea este consolidată prin integrarea mecanismelor de eficientizare a procesului de validare automată la nivel de infrastructură, inclusiv prin strategii asociate echilibrării sarcinii, astfel încât analiza și decizia să rămână stabile și scalabile pe volume mari de evenimente.

Secțiunea 4.2 dezvoltă o contribuție originală orientată spre optimizare evolutivă, prin modelul D-GA-CO (Distributed Genetic Algorithm Cooperative Optimization), ale cărui rezultate sunt diseminate în lucrările [A9-A11]. Modelul extinde algoritmi genetici într-un cadru distribuit și cooperativ, având ca obiectiv optimizarea performanței și susținerea verificării securității cibernetice în contexte cu resurse multiple. Din punct de vedere metodologic, D-GA-CO combină generarea soluțiilor candidate prin GA cu acordarea parametrilor prin mecanisme cooperative și cu distribuția controlată a sarcinilor pe noduri, pe baza unor funcții de fitness care echilibrează calitatea, costul de execuție și încărcarea resurselor. Analiza experimentală evidențiază un compromis clar între rapiditatea GA clasic și îmbunătățirile de fitness obținute prin optimizare cooperativă, varianta distribuită atingând performanțe superioare, cu un cost de timp justificat de extinderea spațiului de căutare și de robustețea optimizării.

În secțiunea 4.3 capitolul extinde testarea automată către rețele IoT, unde distribuția masivă a dispozitivelor, traficul variabil și protocoalele simplificate cresc semnificativ suprafața de atac și dificultatea validării. Contribuția prezentată în [A16] (ICAI 2024) propune un framework inteligent pentru infrastructuri cloud-edge, care utilizează învățarea nesupravegheată pentru detecția anomaliilor fără dependență de date pre-etichetate. Metodologia integrează colectarea și preprocesarea datelor, antrenarea modelelor și evaluarea lor pe indicatori relevanți (acuratețe, rata alarmelor false, eficiență și scalabilitate), iar folosirea tehnicilor precum Isolation Forest și autoencodere permite atât detecție rapidă, cât și surprinderea unor tipare neliniare mai subtile. Prin această integrare, framework-ul sprijină monitorizarea continuă și reziliența nodurilor distribuite în scenarii operaționale diverse.

Concluziile capitolului sintetizează faptul că integrarea metodelor bazate pe Machine Learning și a tehnicilor evolutive conduce la o validare mai riguroasă și mai adaptivă în sisteme distribuite, prin automatizarea detecției anomaliilor, optimizarea resurselor și reducerea limitărilor testării tradiționale în contexte asincrone și dinamice. În ansamblu, Capitolul IV nu tratează soluții izolate, ci conturează un ecosistem coerent de validare automată, care completează fundamentele formale din capitolele anterioare și susține tranziția către implementare și evaluare experimentală în scenarii cu complexitate ridicată.

Capitolul V. Arhitecturi moderne și tehnologii pentru optimizare

Prezentul capitol explorează soluții avansate pentru optimizarea sistemelor web distribuite, urmărind creșterea performanței, a rezilienței și a sustenabilității prin arhitecturi moderne și mecanisme adaptive. Accentul este pus pe trecerea de la fundamente teoretice către implementări validate experimental, în care optimizarea este abordată sistematic, prin proiectare, măsurare și analiză comparativă în medii de execuție dinamice.

Structura capitolului este organizată pe trei direcții complementare: echilibrarea adaptivă a sarcinilor, orchestrarea containerelor prin Docker Swarm și optimizarea energetică prin principii de Green Computing. Această organizare reflectă o viziune integrată, în care performanța, disponibilitatea și sustenabilitatea sunt tratate unitar, nu ca obiective separate.

În secțiunea 5.1 este propus un mecanism original de echilibrare a sarcinilor, validat prin lucrarea [A34], prezentată la o conferință internațională. Algoritmul introduce un mecanism adaptiv de redistribuire a pachetelor de date, corelând în timp real capacitatea nodurilor cu gradul lor de încărcare. Spre deosebire de metodele tradiționale (round-robin sau distribuție uniformă), soluția propusă urmărește prevenirea formării punctelor de supraîncărcare și menținerea unor timpi de răspuns predictibili în condiții de trafic variabil.

Contextual, secțiunea analizează avantajele și limitările principalelor categorii de algoritmi utilizați în sistemele distribuite: distribuția sarcinilor, echilibrarea încărcării, redirectionarea traficului, detectarea și recuperarea nodurilor defecte. Este evidențiat faptul că metodele simple sunt ușor de implementat, dar pot genera dezechilibre persistente în infrastructuri eterogene. Evaluarea experimentală, realizată pe configurații cu număr variabil de noduri, arată că algoritmul propus reduce timpul de răspuns și optimizează utilizarea CPU și memoriei, chiar dacă presupune o implementare mai complexă.

Secțiunea 5.2 dezvoltă o arhitectură originală bazată pe orchestrarea containerelor cu Docker Swarm, susținută de publicația [A18]. În contextul adoptării infrastructurilor multi-cloud și al arhitecturilor bazate pe microservicii, containerizarea este prezentată ca soluție pentru portabilitate, izolare și reproductibilitate. Contribuția practică constă în proiectarea și implementarea unui cluster Swarm (manager/worker), capabil să asigure scalare automată, echilibrare a sarcinilor și auto-recuperare în caz de defectare.

Sunt detaliate mecanismele de routing mesh, distribuția traficului prin ingress și monitorizarea serviciilor, iar experimentul este realizat pe o infrastructură hardware explicit descrisă. Configurația utilizată este inclusă în Anexa 1, asigurând reproductibilitatea

rezultatelor. Analiza evidențiază îmbunătățirea stabilității și a disponibilității serviciilor în scenarii controlate, subliniind rolul orchestrării în gestionarea aplicațiilor distribuite de amploare.

Secțiunea 5.3 introduce dimensiunea sustenabilității prin integrarea principiilor Green Computing, fundamentate în lucrarea [A12]. Creșterea accelerată a aplicațiilor distribuite implică un consum energetic semnificativ, iar optimizarea performanței trebuie corelată cu eficiența utilizării resurselor. Contribuția originală constă în formularea unei proceduri de proiectare inspirate de principiul "căii rezistenței minime", care integrează optimizarea algoritmilor, simplificarea expresiilor logice, exploatarea paralelismului și selecția limbajelor de programare în funcție de eficiența energetică.

Analiza comparativă a limbajelor de programare arată că viteza de execuție nu coincide întotdeauna cu eficiența energetică, iar alegerea tehnologiilor influențează simultan energia consumată, timpul și memoria utilizată. Prin utilizarea instrumentelor de analiză statică și dinamică, este propus un cadru iterativ de măsurare și optimizare, în care reducerea amprenteii energetice nu compromite performanța, ci o susține prin utilizarea echilibrată a resurselor.

În ansamblu, Capitolul V consolidează o abordare integrată de optimizare a sistemelor web distribuite. Algoritmii adaptivi de echilibrare a sarcinilor, arhitectura bazată pe Docker Swarm și cadrul de tip Green Computing sunt validate prin publicațiile [A12, A18, A34], confirmând caracterul aplicativ al cercetării. Capitolul demonstrează că performanța, scalabilitatea și sustenabilitatea pot fi armonizate într-un model unitar de proiectare și implementare, oferind fundamentul necesar etapelor ulterioare ale tezei, dedicate automatizării, validării și securizării infrastructurilor distribuite moderne.

Capitolul VI. Securitate, confidențialitate și protecția datelor

Capitolul VI analizează securitatea, confidențialitatea și protecția datelor ca elemente structurale ale stabilității sistemelor web distribuite, în special în contexte cu suprafață de atac extinsă precum IoT și sănătatea digitală. În această logică, capitolul urmărește trecerea de la măsuri reactive la mecanisme proactive și la integrarea principiilor "privacy-by-design", astfel încât protecția informației să fie tratată ca parte intrinsecă a arhitecturii.

În secțiunea 6.1, este prezentată o contribuție aplicativă validată prin articolul [A5], care propune un mecanism de detecție a intruziunilor pentru rețele IoT, implementat în Python cu Scapy și completat cu alertare prin SMS. Soluția vizează identificarea în timp real a tiparelor asociate atacurilor DDoS și DNS, oferind un punct de pornire robust și extensibil pentru integrarea ulterioară a metodelor de detecție a anomaliilor bazate pe ML.

Secțiunea 6.2 dezvoltă dimensiunea confidențialității prin integrarea cerințelor GDPR și HIPAA direct în proiectarea arhitecturilor distribuite, pe baza lucrărilor [A28, A35]. Noutatea constă în tratarea conformității ca set de constrângeri tehnice implementabile (de exemplu, tokenizare și criptare end-to-end), susținute de politici de acces și mecanisme de audit, astfel încât gestionarea datelor sensibile să fie controlată unitar la nivel de sistem.

În secțiunea 6.3 este prezentată o arhitectură integrată EHR-CRM-IoT pentru modernizarea infrastructurilor medicale, validată prin articolul [A2]. Soluția propune un cadru modular, containerizat (Docker Swarm), care sincronizează fluxurile de date și susține decizia clinică în condiții de sarcină ridicată; evaluările experimentale indică menținerea unor latențe reduse și a unei fiabilități ridicate a transmisiei, confirmând fezabilitatea utilizării în medii medicale critice.

În concluzie, Capitolul VI consolidează ideea că securitatea și confidențialitatea trebuie proiectate și verificate în paralel cu cerințele de performanță și scalabilitate. Prin corelarea mecanismelor IDS pentru IoT, a arhitecturilor conforme GDPR/HIPAA și a integrării EHR-CRM-IoT validate experimental, capitolul furnizează baza necesară pentru etapele

următoare ale tezei, orientate către soluții distribuite reziliente, sigure și aplicabile în domenii sensibile.

Capitolul VII. Aplicații în educație și sănătate

Capitolul VII evidențiază dimensiunea aplicativă a tezei prin implementarea și evaluarea unor soluții bazate pe arhitecturi web distribuite în două domenii cu impact major: educația și sănătatea. În această etapă, contribuțiile urmăresc nu doar scalabilitatea și interoperabilitatea, ci și creșterea calității serviciilor prin personalizare, feedback în timp real și integrarea controlată a tehnologiilor emergente.

În secțiunea 7.1 este prezentată o aplicație educațională mobilă, validată prin lucrarea [A37] (conferință internațională), care îmbină gamificarea cu evaluarea automatizată într-un cadru distribuit. Contribuția constă în proiectarea unui flux complet student-platformă-profesor, în care rezultatele sunt colectate și procesate la nivel de servicii web și baze de date distribuite, permițând feedback imediat, monitorizarea progresului și susținerea unui număr mare de utilizatori simultan.

Secțiunea 7.2 dezvoltă o platformă de instruire bazată pe realitate virtuală, sprijinită de infrastructuri distribuite și baze de date scalabile, cu rezultate diseminate prin articolul [A7] (jurnal internațional) și completate prin contribuția prezentată în [A17] (conferință internațională). Soluția urmărește oferirea unui mediu imersiv și sigur pentru discipline STEM, cu accent pe accesibilitate pentru studenții din medii defavorizate, reducerea riscurilor asociate laboratoarelor clasice și creșterea implicării prin interacțiune și experimentare controlată.

În subcapitolul 7.3 este introdus un model de monitorizare inteligentă a pacienților prin sisteme web distribuite, validat prin lucrarea [A1] (conferință internațională). Contribuția vizează utilizarea nodurilor distribuite pentru colectarea și procesarea datelor medicale, corelată cu algoritmi de inteligență artificială pentru suport decizional, astfel încât fluxurile clinice să fie optimizate, iar intervențiile să fie susținute de date actualizate în timp real, cu menținerea controlului asupra securității și disponibilității.

În final, secțiunea 7.4 extinde perspectiva către managementul clinic asistat prin CRM, diseminat prin lucrarea [A8] (conferință internațională), prin integrarea fluxurilor clinice cu procesele administrative într-o arhitectură distribuită. Noutatea constă în reducerea fragmentării informaționale dintre monitorizarea medicală și gestiunea operațională (programări, interacțiuni, notificări, evidențe), ceea ce permite o coordonare mai eficientă a resurselor și o îngrijire mai coerentă, centrată pe pacient.

În ansamblu, Capitolul VII demonstrează că arhitecturile web distribuite pot fi transpuse în soluții funcționale, validate prin publicații, care îmbunătățesc atât procesele educaționale (prin evaluare mobilă și VR), cât și serviciile medicale (prin monitorizare inteligentă și integrare CRM). Prin această corelare între experimente, infrastructură și impact, capitolul susține tranziția tezei de la modele și mecanisme generale la aplicații concrete, pregătind terenul pentru concluziile și sinteza contribuțiilor originale.

Capitolul VIII. Arhitecturi avansate și interoperabilitate

Capitolul VIII extinde demersul tezei către integrarea tehnologiilor emergente în arhitecturi web distribuite capabile să asigure interoperabilitate, integritate și scalabilitate la nivel instituțional. Accentul este pus pe convergența registrelor distribuite de tip blockchain, a sistemelor de identificare RFID și a fluxurilor masive de date IoT într-un cadru unitar, în care securitatea și performanța sunt tratate simultan, nu separat.

În secțiunea 8.1 este propusă o arhitectură originală bazată pe blockchain pentru validarea și certificarea competențelor academice, validată prin lucrarea [A15]. Contribuția constă în utilizarea unui registru distribuit imutabil pentru stocarea rezultatelor academice și

emiterea diplomelor digitale securizate prin coduri QR unice. Modelul elimină riscul de fraudă prin mecanisme de hash și consens distribuit, oferind un sistem transparent, verificabil internațional și adaptat mobilității academice. Integrarea catalogului electronic cu infrastructura blockchain permite automatizarea proceselor de certificare și reduce dependența de verificări birocratice tradiționale, fundamentând un ecosistem educațional bazat pe încredere tehnologică.

Secțiunea 8.2 dezvoltă sistemul DESY, validat prin publicația [A32], care integrează blockchain, RFID și componente interactive într-o arhitectură educațională distribuită. Inovația constă în corelarea prezenței fizice (prin carduri RFID inteligente) cu progresul academic stocat în blockchain, într-un mediu susținut de load balancing, cache distribuit și baze de date replicabile. Testele pilot au evidențiat timpi medii de autentificare de aproximativ 1,2 secunde și confirmări blockchain sub 2 secunde, cu o disponibilitate a sistemului peste 99,9%. Integrarea gamificării și a stațiilor interactive VR/AR a condus la o creștere a implicării studenților și la îmbunătățirea performanței academice, demonstrând fezabilitatea unui model educațional distribuit, securizat și orientat spre personalizare.

În secțiunea 8.3 este analizată integrarea datelor IoT în sistemele CRM printr-o arhitectură web distribuită, rezultatele fiind publicate în jurnalul internațional [A3]. Contribuția constă în proiectarea unui model bazat pe edge computing și filtrare colaborativă pentru recomandări personalizate în timp real. Arhitectura experimentală, implementată pe un cluster de patru noduri, a gestionat până la 10.000 de cereri simultane, menținând latențe controlate și o acuratețe de aproximativ 90%, demonstrând avantajele abordării distribuite față de CRM-urile monolitice.

În ansamblu, Capitolul VIII demonstrează că interoperabilitatea avansată nu este doar o problemă de integrare tehnică, ci o condiție strategică pentru dezvoltarea ecosistemelor digitale moderne. Prin corelarea registrelor blockchain, a identificării RFID și a fluxurilor IoT cu arhitecturi distribuite scalabile, capitolul fundamentează un model arhitectural capabil să asigure integritate, personalizare și performanță în contexte educaționale și comerciale complexe. Aceste rezultate consolidează contribuția originală a tezei și validează direcția integrării tehnologice ca suport pentru transformarea digitală sustenabilă.

Concluzii

Prezenta teză de doctorat a urmărit elaborarea unui cadru metodologic și aplicativ coerent pentru specificarea formală, verificarea și validarea sistemelor web distribuite, cu scopul creșterii fiabilității, securității și performanței acestora în contexte critice precum educația, sănătatea, comerțul electronic și Internet of Things (IoT). Lucrarea a abordat complexitatea tot mai ridicată a arhitecturilor distribuite printr-o strategie multidimensională, care a combinat modele formale, tehnici de testare automată, algoritmi de optimizare și infrastructuri moderne, validate prin implementări și experimente. Rezultatele obținute susțin că integrarea metodelor riguroase în ciclul de viață al sistemelor distribuite reprezintă o condiție esențială pentru stabilitatea și predictibilitatea acestora pe termen lung.

Din perspectivă teoretică, teza a contribuit la conturarea unui cadru formal unitar pentru descrierea și analiza comportamentului sistemelor web distribuite. Integrarea mașinilor cu stări finite (FSM) și a automatelor cu cronometru (Timed Automata - TA) în procesele de modelare și verificare a permis surprinderea atât a comportamentelor funcționale deterministe, cât și a constrângerilor temporale și a interacțiunilor asincrone specifice mediilor distribuite. Modelarea a fost susținută de instrumente consacrate, precum MATLAB și UPPAAL, iar analizele au evidențiat utilitatea cadrului propus în identificarea unor defecte logice subtile (de exemplu, condiții de cursă, blocaje sau situații de sincronizare incorectă) care rămân frecvent nedetectate prin testarea empirică tradițională.

Pe plan metodologic, lucrarea a introdus soluții pentru testarea și validarea automată a sistemelor distribuite, prin corelarea analizelor de trafic cu tehnici avansate de învățare

automată (CNN, LSTM, Random Forest, K-Means) și cu algoritmi genetici pentru optimizarea resurselor și detecția proactivă a anomaliilor. Contribuția originală în acest segment este materializată prin modelul D-GA-CO (Distributed Genetic Algorithm Cooperative Optimization), care extinde paradigma algoritmilor genetici în medii distribuite și urmărește utilizarea eficientă a infrastructurii, îmbunătățind calitatea proceselor de evaluare și monitorizare. În paralel, au fost dezvoltate mecanisme de testare inteligentă pentru rețele IoT, capabile să scaleze evaluarea și să izoleze atacuri fără a depinde strict de seturi de date pre-etichetate, aspect relevant în scenarii reale, caracterizate de variabilitate ridicată.

La nivel tehnologic, teza a adus contribuții prin proiectarea și implementarea unor arhitecturi distribuite moderne, bazate pe microservicii, containere orchestrate cu Docker Swarm, edge/fog computing și infrastructuri cloud. Printre realizările tehnice se evidențiază un algoritm propriu de echilibrare a sarcinilor (load balancing), care corelează în timp real capacitatea nodurilor cu gradul lor de încărcare, precum și definirea unei proceduri de proiectare orientate Green Computing. Această abordare a arătat că optimizarea energetică poate fi obținută prin selecția riguroasă a tehnologiilor și prin eficientizarea implementării, fără a compromite performanța și scalabilitatea sistemului.

În sfera securității și a protecției datelor, teza a propus o integrare de tip privacy by design, în care cerințele normative (GDPR și HIPAA) sunt reflectate direct în arhitectura tehnică. A fost demonstrată fezabilitatea unei infrastructuri distribuite pentru gestionarea dosarelor electronice de sănătate (EHR) și a sistemelor CRM medicale, cu măsuri precum criptare end-to-end și mecanisme de control al accesului. Totodată, mecanismele de detecție a intruziunilor dezvoltate în Python/Scapy au confirmat capacitatea de protecție a nodurilor IoT periferice în fața amenințărilor complexe (inclusiv atacuri de tip DDoS și abuzuri asupra infrastructurilor DNS), contribuind la creșterea rezilienței ecosistemelor distribuite.

Impactul aplicativ al cercetării este susținut prin prototipuri funcționale dezvoltate în domenii interdisciplinare. În educație, aplicațiile mobile gamificate și platformele de instruire bazate pe realitate virtuală au evidențiat beneficii concrete în retenția cunoștințelor și în implicarea studenților. Utilizarea tehnologiilor blockchain și RFID pentru certificarea competențelor academice a consolidat un mecanism imutabil de validare, reducând riscul de fraudă și facilitând mobilitatea internațională. În zona comercială, integrarea IoT cu sisteme CRM a demonstrat o acuratețe de 90% a recomandărilor personalizate, susținând un model proactiv de relaționare cu utilizatorii, adaptat cerințelor pieței digitale.

Calitatea și originalitatea rezultatelor sunt reflectate și de activitatea de diseminare științifică, materializată în peste 39 de lucrări publicate în jurnale și volume de conferințe indexate (IEEE Xplore, Scopus, ACM), precum și prin obținerea unor distincții de tip Best Paper Award, care confirmă relevanța și vizibilitatea internațională a contribuțiilor.

În concluzie, teza aduce un aport relevant domeniului informaticii prin definirea și validarea unui cadru coerent pentru proiectarea, specificarea și verificarea sistemelor web distribuite, integrând modele formale, testare automată, optimizare și arhitecturi distribuite orientate spre scalabilitate, securitate și performanță. Rezultatele obținute evidențiază fezabilitatea integrării verificării formale și a testării inteligente în infrastructuri moderne bazate pe microservicii și containerizare, contribuind la creșterea robusteții și predictibilității sistemelor complexe.

În perspectivă, cercetarea poate fi extinsă prin mecanisme adaptive de optimizare și orchestrare, integrarea verificării formale în DevOps și îmbunătățirea toleranței la erori în arhitecturi Edge-Cloud-Blockchain. De asemenea, optimizarea energetică și consolidarea interoperabilității pot sprijini dezvoltarea aplicațiilor IoT și a sistemelor medicale distribuite.

Lista lucrărilor științifice care susțin teza

- [A1] **M. Ileana**, "Elevating Medical Efficiency and Personalized Care Through the Integration of Artificial Intelligence and Distributed Web Systems", in Proc. 20th Int. Conf. Generative Intelligence and Intelligent Tutoring Systems (ITS 2024), Lecture Notes in Computer Science, vol. 14799, pp. 3-11, ISBN 978-3-031-63030-9 (Print), ISBN 978-3-031-63031-6 (Online), Thessaloniki, Greece, June 10-13, 2024, DOI: 10.1007/978-3-031-63031-6_1. - B
- [A2] **M. Ileana**, P. Petrov, și V. Milev, "Secure Integration of Sensor Networks and Distributed Web Systems for Electronic Health Records and Custom CRM", MDPI - Sensors, vol. 25, no. 16, p. 5102, EISSN 1424-8220, 2025, DOI: 10.3390/s25165102. - B
- [A3] **M. Ileana**, P. Petrov, și V. Milev, "Optimizing Customer Experience by Exploiting Real-Time Data Generated by IoT and Leveraging Distributed Web Systems in CRM Systems", MDPI - IoT, vol. 6, no. 2, p. 24, EISSN 2624-831X, 2025, DOI: 10.3390/iot6020024. - B
- [A4] **M. Ileana**, P. Petrov, și V. Milev, "AI-Enabled Secure and Scalable Distributed Web Architecture for Medical Informatics", MDPI - Applied Sciences, 15(19), 10710, EISSN 2076-3417, 2025, DOI: 10.3390/app151910710. - B
- [A5] **M. Ileana**, "The Impact of Distributed Web Systems on Security and Privacy in IoT Networks", TEM Journal, vol. 14, no. 2, pp. 1097-1106, ISSN 2217-8309, 2025, DOI: 10.18421/TEM142-11. - C
- [A6] D. Cacovean și **M. Ileana**, "Advanced Neurological Imaging Analysis Using Diffusion Tensor Techniques and Distributed Web Systems", Revue Roumaine des Sciences Techniques - Série Électrotechnique et Énergétique, vol. 70, no. 2, pp. 269-274, ISSN 0035-4066, 2025, DOI: 10.59277/RRST-EE.2025.2.20. - C
- [A7] **M. Ileana**, R. Sfăt, și C. V. Marian, "Virtual Reality-Based E-Learning System Using Distributed Web Systems", Scientific Bulletin of the University Politehnica of Bucharest, Series C, Vol. 87, Iss. 2, ISSN 2286-3540, 2025, LINK: https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rezae5_175341.pdf. - C
- [A8] **M. Ileana**, P. Petrov, și V. Milev, "A Distributed Web System for Patient Monitoring Integrating CRM for Improved Clinical Management", in Proc. 12th Int. Work-Conf. on Bioinformatics and Biomedical Engineering, Lecture Notes in Bioinformatics part of LNCS, ISBN 978-3-032-08454-5 (Print), ISBN 978-3-032-08455-2 (Online), 2025, DOI: 10.1007/978-3-032-08455-2_31. - C
- [A9] D. A. Popescu, **M. Ileana**, și N. Bold, "Advanced Security in Distributed Web Systems Using Genetic Algorithm-Based Techniques", Tehnički vjesnik - Technical Gazette, ISSN 1330-3651 (Print), ISSN 1848-6339 (Online), 2025, DOI: 10.17559/TV-20250218002392. - C
- [A10] D. A. Popescu, **M. Ileana**, și N. Bold, "Analyzing the Performance of Distributed Web Systems within an Educational Assessment Framework", in Proc. 1st Int. Workshop BBGI 2024, Thessaloniki, Greece, June 10, 2024, Communications in Computer and Information Science, vol. 2162, pp. 102-115, ISBN 978-3-031-65995-9 (Print), ISBN 978-3-031-65996-6 (Online), DOI: 10.1007/978-3-031-65996-6_9. - C
- [A11] D. A. Popescu, N. Bold, și **M. Ileana**, "Performance and Scalability Challenges of a Revised Implementation Model of Assessment Test Generation Using Distributed Systems", in Proc. 8th Int. Symp. SETE 2023, Lecture Notes in Computer Science, vol. 14607, pp. 167-181, ISBN 978-981-97-4245-5 (Print), ISBN 978-981-97-4246-2 (Online), 2023, DOI: 10.1007/978-981-97-4246-2_15. - C
- [A12] **M. Ileana**, "Optimizing Energy Efficiency in Distributed Web Systems", in Proc. 2023 7th Int. Symp. ISAS, IEEE, pp. 1-5, Istanbul, Turkey, 2023, DOI: 10.1109/ISAS60782.2023.10391617. - D
- [A13] **M. Ileana**, "Strategic Website Evaluation Through Finite State Machine Analysis Employing MATLAB", 2024 Advanced Topics on Measurement and Simulation (ATOMS),

IEEE, pp. 152-155, Constanța, România, 2024, DOI: 10.1109/ATOMS60779.2024.10921602. - D

[A14] **M. Ileana**, "Optimizing Performance of Distributed Web Systems", *Informatica Economica*, vol. 27, no. 4, pp. 78-87, ISSN 1453-1305, EISSN 1842-8088, 2023, DOI: 10.24818/issn14531305/27.4.2023.06. - D

[A15] **M. Ileana** și A. Popgeorgiev, "The Use of Blockchain Technology for the Validation and Certification of Competencies in Education", in *Proc. CompSysTech '24*, ACM, pp. 24-28, 2024, DOI: 10.1145/3674912.3674933. - D (Best paper)

[A16] **M. Ileana** și M. Miroiu, "Intelligent Automated Testing Frameworks for IoT Networks Utilizing Machine Learning for Advanced Anomaly Detection", in *Proc. 2024 ICAI*, IEEE, 2024, DOI: 10.1109/ICAI63388.2024.10851706. - D

[A17] **M. Ileana** și C. V. Marian, "Unlocking New Horizons with Virtual Reality and Digital Learning to Facilitate Career Transitions in IT and Science", *International Conference on Virtual Learning*, ISSN 2971-9291, ISSN-L 1844-8933, vol. 19, pp. 81-92, 2024, DOI: 10.58503/icvl-v19y202407. - D

[A18] **M. Ileana**, M. I. Oproiu, și C. V. Marian, "Using Docker Swarm to Improve Performance in Distributed Web Systems", in *Proc. 2024 DAS*, IEEE, pp. 1-6, Suceava, România, 2024, DOI: 10.1109/DAS61944.2024.10541234. - D

[A19] **M. Ileana**, M. I. Oproiu, și C. V. Marian, "E-commerce Solutions using Distributed Web Systems with Microservices-Based Architecture for High-Performance Online Stores", in *Proceedings 2024 47th MIPRO*, IEEE, pp. 994-999, Opatija, Croatia, 2024, DOI: 10.1109/MIPRO60963.2024.10569273. - D

[A20] **M. Ileana**, M. I. Oproiu, și C. V. Marian, "Exploring and Analyzing Internet of Things Devices for Process Optimization in Industrial Environments", *2024 Advanced Topics on Measurement and Simulation (ATOMS)*, IEEE, pp. 148-151, Constanța, România, 2024, DOI: 10.1109/ATOMS60779.2024.10921554. - D

[A21] **M. Ileana**, P. Petrov, și V. Milev, "Advancing Education Management through Integrated CRM Solutions Leveraging the Scalability and Efficiency of a Distributed Web Systems Architecture", *International Conference on Virtual Learning*, ISSN 2971-9291, ISSN-L 1844-8933, vol. 20, pp. 384-394, 2025, DOI: 10.58503/icvl-v20y202532. - D

[A22] **M. Ileana**, P. Petrov, și V. Milev, "Integrating Distributed Web Systems into CRM Platforms to Optimize User Experience and Business", in *Proc. 8th Computational Methods in Systems and Software 2024*, vol 1491, ISBN 978-3-031-96379-7 (Print), ISBN 978-3-031-96380-3 (Online), Vsetin, Cehia, Springer, 2025, DOI: 10.1007/978-3-031-96380-3_22. - D

[A23] **M. Ileana**, P. Petrov, și V. Milev, "Optimizing CRM Platforms with Distributed Cloud Architectures for Scalable Performance and Security", in *Proc. 2024 8th Int. Symp. ISAS*, IEEE, pp. 1-6, Istanbul, Turkey, 2024, DOI: 10.1109/ISAS64331.2024.10845520. - D

[A24] **M. Ileana**, P. Petrov, și V. Milev, "Improving CRM Functionality in Medical Systems through Blockchain and Distributed Web Systems", in *Proc. 2025 9th Int. Symp. ISAS*, IEEE, pp. 1-5, Gaziantep, Turkey, 2025, DOI: 10.1109/ISAS66241.2025.11101886. - D

[A25] **M. Ileana**, P. Petrov, și V. Milev, "Quantum Distributed Computing for Educational Innovation: Challenges, Opportunities, and Future Perspectives", in *Proc. 2025 9th Int. Symp. ISAS*, IEEE, pp. 1-5, Gaziantep, Turkey, 2025, DOI: 10.1109/ISAS66241.2025.11101922. - D

[A26] **M. Ileana**, P. Petrov, și V. Milev, "Transforming Customer Relationship Management with Distributed Quantum Computing Opportunities and Challenges", in *Proc. 2025 9th Int. Symp. ISAS*, IEEE, pp. 1-5, Gaziantep, Turkey, 2025, DOI: 10.1109/ISAS66241.2025.11101908. - D

[A27] **M. Ileana**, P. Petrov, și V. Milev, "Intelligent Intrusion Detection in IoT with Explainable AI and Distributed Web Systems", in *Proc. International Conference on*

Cybersecurity and AI-Based Systems (Cyber-AI), IEEE, 2025, DOI: 10.1109/Cyber-AI66431.2025.11233693. - D

[A28] E. Sârghi și **M. Ileana**, "Evolution of Legal Systems in the Digital Era: An Analysis of Artificial Intelligence in E-Business", *Analele Științifice ale Universității Alexandru Ioan Cuza din Iași - Științe Juridice*, vol. 70, no. 2, pp. 53-64, 2024, DOI: 10.47743/jss-2024-70-2-4. - D

[A29] M. I. Oproiu, **M. Ileana**, și C. V. Marian, "Exploring the Intricacies of the Architectural Framework Underlying the Internet of Things Ecosystem", in *Proc. 2024 16th Int. Conf. ECAI*, IEEE, pp. 1-6, Iași, România, 2024, DOI: 10.1109/ECAI61503.2024.10607423. - D

[A30] V. Milev, **M. Ileana**, și P. Petrov, "Improving Personalized Customer Engagement in E-Commerce through Distributed Web Systems and Advanced CRM Solutions", in *Proc. 2025 17th Int. Conf. ECAI*, IEEE, pp. 1-5, Târgoviște, România, 2025, DOI: 10.1109/ECAI65401.2025.11095546. - D

[A31] V. Milev, **M. Ileana**, și P. Petrov, "AI-Based CRM Platforms for Transforming Customer Experience with Distributed Web Systems", in *Proc. 2025 9th Int. Symp. ISAS*, IEEE, pp. 1-5, Gaziantep, Turkey, 2025, DOI: 10.1109/ISAS66241.2025.11101774. - D

[A32] **M. Ileana**, A. Popgeorgiev, P. Petrov, și V. Milev, "Gamification of Student Assessment in a Distributed Educational System via RFID, Smart Simulators, and Blockchain", in *Proc. 2025 CompSysTech'25*, IEEE, pp. 1-7, Ruse, Bulgaria, 2025, DOI: 10.1109/CompSysTech65493.2025.11137208. - D (Best paper)

[A33] P. Petrov, V. Milev, și **M. Ileana**, "Building an Ontology for Supporting Relationship Management with Future Employers of Students in Higher Education Institutions", in *Proc. 8th Computational Methods in Systems and Software 2024*, Vsetin, Cehia, Springer, Lecture Notes in Networks and Systems vol. 1471, pp. 1-12, ISBN 978-3-031-94770-4 (Online), 2025, DOI: 10.1007/978-3-031-94770-4_43. - D

[A34] **M. Ileana**, "A Dynamic Load Balancing Algorithm for Distributed Web Systems", in *Proc. University of Ruse 2023*, vol. 62, book 3.2, pp. 9-14, LINK: <https://conf.uni-ruse.bg/bg/docs/cp23/3.2/3.2-2.pdf>. - (Best paper)

[A35] E. Sârghi și **M. Ileana**, "Protection of Personal Data within Platforms Developed in the Context of Artificial Intelligence from the Perspective of National and European Law", *Analele Universității "Dunărea de Jos" din Galați - Seria Științe Juridice, Legal Sciences, Fascicle*, 7(1), vol. 26, pp. 275-286, 2024.

[A36] **M. Ileana**, "Automated Testing Methodologies for Distributed Web Systems: A Machine Learning-Based Approach to Anomaly Detection", in *Proc. Conf. Integrare prin Cercetare și Inovare*, Chișinău, Moldova, USM, 2024, DOI: 10.59295/spd2024n.102.

[A37] **M. Ileana** și A. Popgeorgiev, "Mobile Game Application for Student Knowledge Practice Developed with an Architecture using Distributed Web Systems", in *Proc. University of Ruse 2024*, vol. 63, book 3.2, LINK: <https://conf.uni-ruse.bg/bg/docs/cp24/3.2/3.2-1.pdf>.

[A38] **M. Ileana**, P. Petrov, și V. Milev, "Integrating CRM into Education through Distributed Web Architecture", *Mathematics, Computer Science and Education - Journal of the Faculty of Mathematics and Informatics*, St. "Cyril and St. Methodius" University of Veliko Tarnovo, Bulgaria, vol. 8, iss. 1, pp. 25-33, 2025, DOI: 10.54664/ONGA8321.

[A39] M. M. Angel, P. Ianc, **M. Ileana**, și L. I. Modi, "The Influence of Privacy and Security on the Future of IoT", *Informatica Economica*, vol. 24, no. 2, pp. 42-53, 2020, DOI: 10.24818/issn14531305/24.2.2020.04.

Bibliografie selectivă

- [1] B. Burns, *Designing Distributed Systems: Patterns and Paradigms for Scalable, Reliable Systems Using Kubernetes*. ediția a II-a, Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2025.
- [2] M. van Steen și A. S. Tanenbaum, *Distributed Systems*. ediția a IV-a, Amsterdam, Olanda: distributed-systems.net, 2025.
- [3] M. Ileana, P. Petrov, și V. Milev, "Integrating CRM into Education through Distributed Web Architecture", *Mathematics, Computer Science and Education - Journal of the Faculty of Mathematics and Informatics, St. "Cyril and St. Methodius" University of Veliko Tarnovo*, Bulgaria, 2025, DOI: 10.54664/ONGA8321.
- [4] M. van Steen și A. S. Tanenbaum, "A Brief Introduction to Distributed Systems", *Computing*, vol. 98, pp. 967-1009, 2016, DOI: 10.1007/s00607-016-0508-7.
- [5] P. C. Ölveczky, *Designing Reliable Distributed Systems: A Formal Methods Approach Based on Executable Modeling in Maude*. Cham, Switzerland: Springer, 2018.
- [6] M. Kleppmann, *Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems*. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2017.
- [7] M. Ileana și A. Popgeorgiev, "Mobile Game Application for Student Knowledge Practice Developed with an Architecture using Distributed Web Systems", in *Proc. University of Ruse 2024*, vol. 63, book 3.2, LINK: <https://conf.uni-ruse.bg/bg/docs/cp24/3.2/3.2-1.pdf>.
- [8] G. Coulouris, J. Dollimore, T. Kindberg, și G. Blair, *Distributed Systems: Concepts and Design*. Ediția a V-a, Boston, MA, USA: Addison-Wesley, 2011.
- [9] R. Alur și D. L. Dill, "A Theory of Timed Automata", *Theoretical Computer Science*, vol. 126, no. 2, pp. 183-235, 1994, DOI: 10.1016/0304-3975(94)90010-8.
- [10] F. Ipate și T. Bălănescu, "Refinement in Finite State Machine Testing", *Fundamenta Informaticae*, vol. 64, no. 1-4, pp. 191-203, 2005.
- [11] M. Ileana, P. Petrov, și V. Milev, "Optimizing Customer Experience by Exploiting Real-Time Data Generated by IoT and Leveraging Distributed Web Systems in CRM Systems", *MDPI - IoT*, vol. 6, no. 2, p. 24, EISSN 2624-831X, 2025, DOI: 10.3390/iot6020024.
- [12] D. Tormow, *Think Distributed Systems*. Shelter Island, NY, USA: Manning Publications, 2024.
- [13] C. Sridharan, *Distributed Systems Observability: A Guide to Building Robust Systems*. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2018.
- [14] C. V. Marian, *Operating Systems and Web Applications Fundamentals*. București, România: Editura Politehnica Press, 2021, cod CNCSIS 19, ISBN 978-606-515-989-1, 306 p.
- [15] A. Popgeorgiev, E. Ibryamova, și G. Ivanova, "Enhancing the Understanding of Computer Engineering Students in Financial Analysis through Educational Authoring Software", in *Proc. 24th Int. Conf. on Computer Systems and Technologies (CompSysTech)*, pp. 151-156, 2023, DOI: 10.1145/3606305.3606331.
- [16] M. Ileana, P. Petrov, și V. Milev, "AI-Enabled Secure and Scalable Distributed Web Architecture for Medical Informatics", *MDPI - Applied Sciences*, EISSN 2076-3417, 2025, DOI: 10.3390/app151910710.
- [17] A.-C. Dăscălescu, R.-E. Boriga, și I. Priescu, "A New Keyed Hash Function Based on Compounded Chaotic Maps", *IEEE Access*, vol. 13, pp. 75363-75376, 2025, DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3563108.
- [18] D. Raptis, *Distributed Systems for Practitioners*. Amazon Kindle Edition, 2020.
- [19] M. Ileana, "The Impact of Distributed Web Systems on Security and Privacy in IoT Networks", *TEM Journal*, vol. 14, no. 2, pp. 1097-1106, ISSN 2217-8309, 2025, DOI: 10.18421/TEM142-11.
- [20] D. Cacovean și M. Ileana, "Advanced Neurological Imaging Analysis Using Diffusion Tensor Techniques and Distributed Web Systems", *Revue Roumaine des Sciences Techniques*

- Série Électrotechnique et Énergétique, vol. 70, no. 2, pp. 269-274, ISSN 0035-4066, 2025, DOI: 10.59277/RRST-EE.2025.2.20.
- [21] N. Marathe, A. Gandhi, și J. Shah, "Docker Swarm and Kubernetes in Cloud Computing Environment", in Proc. 2019 3rd Int. Conf. Trends Electron. Informatics (ICOEI), 2019, DOI: 10.1109/ICOEI.2019.8862654.
- [22] M. Ileana, R. Sfât, și C. V. Marian, "Virtual Reality-Based E-Learning System Using Distributed Web Systems", Scientific Bulletin of the University Politehnica of Bucharest, Series C, Vol. 87, Iss. 2, ISSN 2286-3540, 2025, LINK: https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rezae5_175341.pdf.
- [23] O. V. Unanah și O. J. Mbanugo, "Integration of AI into CRM for Effective US Healthcare and Pharmaceutical Marketing", World Journal of Advanced Research and Reviews, vol. 25, no. 2, pp. 609-630, 2025, DOI: 10.30574/wjarr.2025.25.2.0396.
- [24] M. Ileana, P. Petrov, și V. Milev, "A Distributed Web System for Patient Monitoring Integrating CRM for Improved Clinical Management", in Proc. 12th Int. Work-Conf. Bioinformatics and Biomedical Engineering (IWBBIO), Granada, Spain, 2024, DOI: 10.1007/978-3-032-08455-2_31.
- [25] R. Pereira, M. Couto, F. Ribeiro, R. Rua, J. Cunha, J. P. Fernandes, și J. Saraiva, "Energy Efficiency across Programming Languages: How Do Energy, Time, and Memory Relate?", in Proc. 10th ACM SIGPLAN Int. Conf. Softw. Lang. Eng. (SLE), 2017, DOI: 10.1145/3136014.3136031.
- [26] F. Fachrizal și O. Nugroho, "Load Balancing Optimization through Multi-Label Classification of Network Traffic Using Deep Learning in Distributed Computing Systems", Engineering, Technology & Applied Science Research, vol. 16, no. 1, pp. 31310-31317, 2026.
- [27] Y. Li, R. Ji, Y. Su, Y. Zhang, A. Zhang, și L. Li, "Dynamic Load Balancing for Distributed Large Model Training: A Hybrid Framework of Gray Markov Chain and MDP", Concurrency and Computation: Practice and Experience, vol. 38, no. 1, Art. nr. e70456, 2026.
- [28] A. M. Oytizha, A. Saha, și F. A. Bushra, "A Secure and Load Balancing Cloud Architecture for Cloud Computing", in Proc. Int. Conf. on Communication and Computational Technologies (ICCCT 2025), vol. 4, Cham, Switzerland: Springer Nature, 2026, p. 443.
- [29] V. Thirupathi, K. Sagar, S. Chitti, și S. Shwetha, "Optimizing message queuing telemetry transport broker load balancing and fault tolerance in internet of things with a greedy genetic algorithm", Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 164, Art. nr. 112714, 2026.
- [30] R. Leszko, *Continuous Delivery with Docker and Jenkins*. Packt Publishing Ltd., 2017.
- [31] T. Bălănescu, M. Gheorghe, F. Ipate, și M. Holcombe, "Formal Black Box Testing for Partially Specified Deterministic Finite State Machines", Foundations of Computing and Decision Sciences, vol. 28, no. 1, pp. 17-28, 2003.
- [32] A. Gill, *Introduction to the Theory of Finite-State Machines*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1962.
- [33] A. P. Mathur, *Foundations of Software Testing*. India: Pearson, 2008.
- [34] S. Newman, *Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems*. ediția a II-a, Sebastopol, CA, USA: O'Reilly Media, 2021.
- [35] D. A. Popescu, M. Ileana, și N. Bold, "Advanced Security in Distributed Web Systems Using Genetic Algorithm-Based Techniques", Tehnički vjesnik - Technical Gazette, ISSN 1330-3651 (Print), ISSN 1848-6339 (Online), 2025, DOI: 10.17559/TV-20250218002392.