

# Raport Științific și Tehnic

SAGE: O Simbioză între Verificarea Satisfiabilității, Rețele Neuronale pe Grafuri și Calculul Simbolic

Conform cerințelor publicate pe site-ul UEFISCDI (<https://uefiscdi.gov.ro/proiecte-de-cercetare-pentru-stimularea-tinerelor-echipe-independente>), prezentul raport trebuie să îndeplinească următoarele cerințe:

1. să aibă max. 20 pag;
2. să conțină descrierea științifică cu punerea în evidență a rezultatelor etapei anuale și gradul de realizare a obiectivelor;
3. să prezinte un sumar al progresului (livrabile realizate, indicatori de rezultat, diseminarea rezultatelor, justificare diferențe, dacă e cazul);
4. Să includă un rezumat executiv al activităților realizate în perioada de implementare (max. 1 pag.). Acesta poate fi publicat de către Autoritatea Contractantă în pagina web a competiției.

Itemii 1-3 sunt abordați în descrierea aferentă raportului științific și tehnic, iar itemul 4 este realizat în Anexa 1 fiind un document de sine stătător.

## Identificare

Contractor: Universitatea de Vest din Timișoara (UVT)

Director de proiect: Mădălina Erașcu

Cod: PN-III-P1-1.1-TE-2021-0676

Etapa 3: Ianuarie - August 2024

Pagina web: <https://merascu.github.io/links/SAGE.html>

## Rezumatul etapei

Proiectul *SAGE (A Symbiosis of Satisfiability Checking, Graph Neural Networks and Symbolic Computation)* abordează problema dificilă a analizei programelor prin dezvoltarea unor tehnici matematice riguroase care se ocupă de părțile logic complexe ale software-ului. În acest scop, obiectivul acestuia este să utilizeze, să rafineze și să combine metode din verificarea satisfiabilității, rețele neuronale pe grafuri și calcul simbolic pentru a face posibilă analiza software-ului care depășește capacitățile metodelor existente, deoarece tehnici avansate de calcul simbolic (teoria invariantilor) și rețele neuronale pe grafuri combinate cu verificarea satisfiabilității (unelte SAT/SMT) nu sunt exploatate în metodele și instrumentele actuale de analiză a programelor.

Activitățile parcurse în cadrul etapei 3 au dus spre îndeplinirea O4 și O5, și anume:

(O4) studierea eficacității computaționale a tehnicilor nou dezvoltate de rupere a simetriei și de rupere a similarității;

(O5) în cele din urmă, efectuarea rezolvării automate a problemelor de satisfacție a constrângerilor (CSP) la scară largă.

Rezultatele obținute în cadrul proiectului în anul 2024 sunt:

- Valorificarea datelor istorice pentru a crea un model al aplicației software care va rula (deployed) în Cloud. În acest scop am utilizat rețelele neuronale grape grafurifice (graph neural networks), codificând planurile de implementare anterioare ca grafuri, cu componente și mașini virtuale ca noduri și interacțiunile acestora ca muchii. Modelul format poate învăța din datele istorice să prezică alocările optime prin rezolvarea problemei corespunzătoare de clasificare a marginilor. Aceste predicții sunt apoi utilizate ca constrângeri soft în soluțiile exacte livrate de solverul Z3, ghidând eficient soluția către soluția optimă. Rezultatele au fost acceptate la o conferință de categoria B (cf. core.edu) iar implementarea este publică la <https://github.com/SAGE-Project/SAGE-GNN/tree/IJCNN2024>.
- Verificarea comparativă a instrumentelor rețelelor neuronale pe rețelele neuronale binarizate pentru clasificarea semnelor de circulație. Prima dată, am comparat și interpretat rezultatele livrate de către toolurile care au participat în competiția VNN-COMP 2023 (Verification of Neural Networks Competition) și care au obținut rezultate de verificare a robusteții rețelelor neuronale propuse de noi. Apoi am instalat aceste tooluri local pentru teste mai detaliate. Implementarea și testele sunt publice la <https://github.com/andabranh/sage>.
- Articole științifice publicate, în curs de publicare, sau în pregătire în volumele unor conferințe/workshopuri internaționale:
  - *Fast and Exact Synthesis of Application Deployment Plans using Graph Neural Networks and Satisfiability Modulo Theory*. Eduard Laitin, Mădălina Erașcu. Accepted International Joint Conference on Neural Networks 2024 (IJCNN 2024), part of [IEEE WCCI 2024](#) (IEEE Proceedings).
  - *Benchmarking Verification of Neural Networks Tools on Binarized Neural Networks for Traffic Signs Classification*. Anda Leșeanu, Mădălina Erașcu. Raport tehnic de progres.
  - [Optimization Modulo Theory: A Tutorial Using Z3 and Practical Case Studies](#), Mădălina Erașcu, Tutorial paper la [Eighth Working Formal Methods Symposium \(FROM 2024\)](#) September 16-18, 2024, Timisoara, Romania, afiliat SYNASC 2024, Timisoara, Romania.

La activitățile de diseminare de mai sus, se adaugă mai multe activități în sprijinul comunităților de cercetare din care facem parte (recenzii conferințe, organizare și participare la evenimente științifice, etc.) care sunt prezentate în secțiunea următoare.

Obiectivele planificate în anul 2024, cât și activitățile aferente acestora au fost realizate în totalitate, și desfășurate conform cu planul de realizare al proiectului. Prin activitățile de diseminare am contribuit la criteriile de performanță asumate în implementarea proiectului.

## Descriere științifică și tehnică

*Obiectivul general* proiectului este de a avansa teoria de ultimă generație și algoritmi de verificare a satisfiabilității, calcul simbolic și rețele neuronale binarizate pentru rezolvarea problemelor de satisfacere a constrângerilor pe scară largă. Ne propunem să:

(O1) oferim o explicație a simetriilor (O1.1) și asemănărilor (O1.2) pentru probleme practice importante, cum ar fi (a) gestionarea resurselor în cloud, (b) verificarea rețelelor neuronale binarizate (O2) dezvoltăm metode (O2.1) pentru spargerea simetriilor în, și (O2.2) pentru învățarea șabloanelor din problemele enumerate mai sus.

(O3) inventăm teorie și algoritmi pentru (O3.1) abstractizarea simetriilor acestor studii de caz și pentru descrierea tehnicilor de rupere a simetriei folosind teoria grupurilor invariante și rezolvarea SAT/SMT; (O3.2) învățarea șabloanelor de probleme prin formalizarea problemei ca rețea neuronală pe grafuri și aplicarea bibliotecilor existente de rețele neuronale pe grafuri pentru diferite predicții

(O4) studiem eficiența computațională a tehnicilor de rupere a simetriei și a șabloanelor nou dezvoltate;

(O5) pentru, în cele din urmă, rezolvarea automată a problemelor de satisfacție a constrângerilor la scară largă.

Rezultatele estimate ale proiectului sunt:

- 1. rapoarte științifice și tehnice care conțin metodele originale din sfera logicii computaționale (SAT/SMT solving), algebră computațională (teoria invarianților grupurilor finite) și învățare automată (rețele neuronale pe grafuri) care combinate să permită rezolvarea automată a problemelor de satisfacție a constrângerilor la scară largă.
- 2. publicații științifice pentru diseminarea rezultatelor științifice obținute;
- 3. prototipuri software (incluse în sistemul SAGE <https://github.com/SAGE-Project>) care implementează metodele menționate la punctul 2.

Obiectivele etapei 3 (ianuarie - august 2024) au implementarea și validarea algoritmilor, metodelor și metodologiilor dezvoltate în Etapele 1 și 2.

(O4) studiem eficiența computațională a tehnicilor de rupere a simetriei și a șabloanelor nou dezvoltate;

(O5) pentru, în cele din urmă, rezolvarea automată a problemelor de satisfacție a constrângerilor la scară largă.

Activitățile științifice și tehnice aferente îndeplinirii obiectivelor sunt:

Activitate 3.1	Definirea arhitecturii și instrumente suport
Activitate 3.2	Implementarea algoritmilor/metodelor de rupere a simetriilor
Activitate 3.3	Implementarea șabloanelor
Activitate 3.4	Validarea implementării

Gradul de îndeplinire a obiectivelor etapei

Obiectivele științifice și tehnice ale etapei a fost îndeplinit în totalitate, cum vom prezenta mai jos. Reamintim pachetele de lucru și activitățile stabilite în descrierea inițială a proiectului. După cum se observă din tabelul de mai jos, activitățile din WP1 și WP2 sunt preponderent teoretice iar cele din WP3 le implementează, testează și rafinează. În Etapa 3 am definitivat activitățile din WP2, lucrând preponderent la activitățile din WP3.

WP / Task	Name	Start Month	End Month
WP1	Case Studies Analysis		
T1.1	Identification of symmetries and investigation of the symmetry breaking techniques for the Case Study A (resource provisioning in the Cloud)	M01	M12
T1.2	Identification of symmetries and investigation of the symmetry breaking techniques for the Case Study B (property verification of BNNs)	M01	M12
T1.3	Identification of similarities and investigation of how the learning templates are applicable for Case Study A (resource provisioning in the Cloud)	M01	M12
WP2	Theoretical and Algorithmic Framework		
T2.1	Suitable abstraction techniques for symmetries and symmetry breaking	M03	M18
T2.2	Theoretical framework for symmetry breaking	M03	M18
T2.3	Algorithmic framework for template learning	M03	M18
WP3	Integrated Framework		

<b>T3.1</b>	Architecture definition and support tools	M06	M12
<b>T3.2</b>	Implementation of the symmetry breaking framework	M09	M21
<b>T3.3</b>	Integration of the learning templates	M09	M21
<b>T3.4</b>	Validation of the implementation	M12	M24
<b>WP4</b>	<b>Dissemination and Project Management</b>		
<b>T4.1</b>	Dissemination, communication, exploitation	M01	M24
<b>T4.2</b>	Project Management	M01	M24

Considerăm că obiectivele tehnice ale etapei, inclusiv diseminarea, sunt îndeplinite după cum reiese din livrabilele [L1] - [L4].

- [L1] *Fast and Exact Synthesis of Application Deployment Plans using Graph Neural Networks and Satisfiability Modulo Theory*. Eduard Laitin, Mădălina Eraşcu. Accepted International Joint Conference on Neural Networks 2024 (IJCNN 2024), part of [IEEE WCCI 2024](#) (IEEE Proceedings) - în cadrul activităţilor 3.1 - 3.4.
- [L2] *Benchmarking Verification of Neural Networks Tools on Binarized Neural Networks for Traffic Signs Classification*. Anda Leşeanu, Mădălina Eraşcu. Raport tehnic de progres - în cadrul activităţilor 3.1 - 3.4.
- [L3] Implementare şi testare aferentă [L1]: <https://github.com/SAGE-Project/SAGE-GNN/tree/IJCNN2024> - în cadrul activităţilor 3.1 - 3.4.
- [L4] Implementare şi testare aferentă [L2]: <https://github.com/andabranh/sage> - în cadrul activităţilor 3.1 - 3.4.

## Diseminare

Diseminarea în cadrul *conferinţelor* s-a făcut prin [L1], [L3]. Articolele au fost însoţite de prezentări. Mădălina Eraşcu va livra un tutorial cu tematica [Optimization Modulo Theory: A Tutorial Using Z3 and Practical Case Studies](#) ([Eighth Working Formal Methods Symposium \(FROM 2024\)](#) September 16-18, 2024, Timisoara, Romania, afiliat SYNASC 2024, Timisoara, Romania) care va prezenta o parte din rezultatele obţinute în cadrul proiectului, mai precis cele referitoare la ruperea de simetrii şi utilizarea şabloanelor pentru studiul de caz resource provisioning in the Cloud.

Următorii studenţi au luat parte la echipa proiectului:

- Vlad Luca - student doctorand cu tematica *resource management in Kubernetes Clusters*.
- Anda Leşeanu - student masterand în cadrul masterului de cercetare Artificial Intelligence and Distributed Computing din cadrul Departamentului de Informatică, cu tematica training and verification of binarized neural networks.
- Letiția Iliescu şi Darian Bârsan - studenţi la licenţă practicanţi cu tematica training and verification of (binarized) neural networks.

## Alte Activităţi

- Mădălina este co-chair al comitetului de program al Integrated Formal Methods (iFM) 2024 PhD Symposium (<https://ifm2024.cs.manchester.ac.uk/phd-symposium.html>).
- Mădălina este membru al comitetului de program al Formal Techniques for Java-like Programs (FTfJP), care are loc în conjuncţie cu ISSTA/ECOOP, 16 - 20 septembrie 2024 Viena, Austria (<https://conf.researchr.org/home/issta-ecoop-2024/FTfJP-2024>).
- Mădălina este membru al comitetului de program al 26th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC 2024), Timişoara,

România, pentru secțiunea Logic and Programming (<https://synasc.ro/2024/logic-and-programming/>).

- **În data de 26 aprilie 2024, Mădălina a susținut Teza de Abilitare cu titlul Formal Methods Supported by Symbolic Computation for Engineering Applications in Cloud Computing and Artificial Intelligence.** Comisia de examinare a fost formată din Laura Kovacs (Universitatea Tehnică din Viena), Dorel Lucanu (Universitatea Al. I. Cuza, Iași) și Alin Ștefănescu (Universitatea București).
- Mădălina este membru al comitetului de program al celei de-a 33-a Conferințe internaționale privind rețelele neuronale artificiale (ICANN 2024), organizată de Institutul Dalle Molle pentru cercetarea inteligenței artificiale (IDSIA USI-SUPSI) din Lugano, Elveția, în colaborare cu proiectele AIDD și AiChemist Horizon MSCA; USI-SUPSI Campus Est, Via la Santa 1, 6962 Lugano-Viganello, Elveția (<https://e-nns.org/icann2024/>)
- Mădălina este membru PC pentru cea de-a 20-a ediție Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI 2024), Ionian University, Corfu, Grecia; 27-30 iunie 2024 (<https://ifipaiai.org/2024/committees/>).
- **Benchmarkul propune rețele neuronale binarizate pentru recunoașterea semnelor de circulație, din cadrul VNN-COMP 2023 a primit un premiu** [https://merascu.github.io/links/SAGEResources/vnncomp2023\\_certificate\\_traffic-signs-recognition.pdf](https://merascu.github.io/links/SAGEResources/vnncomp2023_certificate_traffic-signs-recognition.pdf).

## Buget și echipă

Costurile de personal sunt conforme cu efortul depus și estimările inițiale, cu observația că echipa a suferit unele modificări prin absolvirea masterului de către studenții implicați în proiect. Dintre aceștia, studentul Vlad Luca a devenit doctorand în cadrul Școlii Doctorale de Informatică de la 1 octombrie 2023. Am cooptat în echipa și pe studenta Anda Leșeanu, masterandă în anul 1 la specializarea Artificial Intelligence and Distributed Computing (master de cercetare în cadrul Departamentului de Informatică, Universitatea de Vest din Timișoara).

## Concluzii

- Obiectivele etapei au fost îndeplinite în totalitate.
- Implementarea conceptelor este în faza avansată.
- Au existat activități de diseminare variate.
- Informații actualizate despre proiect se pot afla la <https://merascu.github.io/links/SAGE.html>.
- Prototipurile și benchmarkurile aferente proiectului se află la <https://github.com/SAGE-Project>.

# Anexa 1

## Rezumat executiv al activităților realizate în cadrul proiectului *SAGE: O Simbioză între Verificarea Satisfiabilității, Rețele Neuronale pe Grafuri și Calculul Simbolic*

**Contractor:** Universitatea de Vest din Timișoara (UVT)

**Cod:** PN-III-P1-1.1-TE-2021-0676

**Etapa 3:** Ianuarie - August 2024

**Pagina web:** <https://merascu.github.io/links/SAGE.html>

### **Problemă**

Viața noastră depinde de software și sisteme care folosesc software. În zilele noastre, software-ul este complex și, prin urmare, este predispus la erori. Pentru a depăși această problemă, avem nevoie de metode pentru a sprijini dezvoltarea software-ului.

### **Soluție**

Acest proiect abordează problema provocatoare a analizei software prin dezvoltarea de tehnici matematice riguroase care se ocupă de părțile complexe ale software-ului. În acest scop, vom folosi, rafina și combina metode de verificare a satisfacerii de constrângeri, rețele neuronale pe grafuri și calcul simbolic. Acestea vor face posibilă analiza software-ului care depășește puterea metodelor existente, deoarece tehnici avansate de calcul simbolic (teoria invarianților), rețele neuronale pe grafuri și combinarea lor cu metode de satisfacere de constrângeri (unelte SAT/SMT) nu este exploatată în literatură.

### **Metodologie**

Vom dezvolta noi teorii și algoritmi care detectează simetrii ale problemei și similitudini între probleme din aceeași familie prin combinarea teoriei invarianților, a rețelelor neuronale pe grafuri și a metodelor SAT/SMT care, spre deosebire de metodele curente, ar permite rezolvarea eficientă a problemelor intractabile din punct de vedere teoretic.

Proiectul nostru de cercetare vizează analiza software-ului complex și urmărește trei direcții principale de cercetare: (1) Metode de eliminare a simetriilor și de învățare a similitudinilor între probleme, (2) Teorie și algoritmi, (3) Instrumente și evaluări.

**Rezultatele** obținute în cadrul etapei 3 sunt:

- Valorificarea datelor istorice pentru a crea un model al aplicației software care va rula (deployed) în Cloud. În acest scop am utilizat rețelele neuronale grape grafurifice (graph neural networks), codificând planurile de implementare anterioare ca grafuri, cu componente și mașini virtuale ca noduri și interacțiunile acestora ca muchii. Modelul format poate învăța din datele istorice să prezică alocările optime prin rezolvarea problemei corespunzătoare de clasificare a marginilor. Aceste predicții sunt apoi utilizate ca constrângeri soft în soluțiile exacte livrate de solverul Z3, ghidând eficient soluția către soluția optimă. Rezultatele au fost acceptate la o conferință de categoria B (cf. core.edu) iar implementarea este publică la <https://github.com/SAGE-Project/SAGE-GNN/tree/IJCNN2024>.
- Verificarea comparativă a instrumentelor rețelelor neuronale pe rețele neuronale binarizate pentru clasificarea semnelor de circulație. Prima dată, am comparat și interpretat rezultatele livrate de către toolurile care au participat în competiția VNN-COMP 2023 și care au obținut rezultate de verificare a robusteții rețelelor neuronale propuse de noi. Apoi am instalat aceste tooluri local pentru teste mai detaliate. Implementarea și testele sunt publice la <https://github.com/andabbranch/sage>.

La activitățile de diseminare de la punctul 4, se adaugă mai multe activități în sprijinul comunităților de cercetare (recenzii conferințe, organizare și participare la evenimente științifice).

Obiectivele planificate pe anul 2024, cât și activitățile aferente acestora au fost realizate în totalitate, și desfășurate conform cu planul de realizare al proiectului. Prin activitățile de diseminare am contribuit la criteriile de performanță asumate în implementarea proiectului.

### **Concluziile Etapei 3**

- Obiectivele etapei au fost îndeplinite în totalitate.
- Implementarea conceptelor este în faza finală.
- Au existat activități de diseminare variate.
- Prototipurile și benchmarkurile aferente proiectului se află la <https://github.com/SAGE-Project>.