

Predviđanje profila izvršavanja programa tehnikama mašinskog učenja

dr Milan Čugurović
MATF, Oracle

NAUČNO-STRUČNI SKUP INFORMATIKA 2026 “Novi trendovi u
razvoju informacionih sistema”
21. 05. 2026.

- Kako do efikasnih programa?

Kako do efikasnih programa?

- **Generisanje *profila* izvršavanja programa**
- *Profil* izvršavanja programa: informacije o načinu na koji se program izvršava
- Omogućava agresivne optimizacije kompilatora i kompiliranje efikasnih programa

Kako do efikasnih programa?

- Optimizacije vođene profilom (eng. *profile guided optimizations*, PGO)
- Primeri optimizacija:
 - umetanje,
 - duplikacija koda i pozicioniranje koda,
 - optimizacije keša,
 - optimizacije petlji i
 - analiza delimičnog izlaska
- Rezultat: značajno brži i manji programi

Umetanje

- Sortiranje niza od 10 miliona slučajno generisanih celih brojeva
- Ukoliko kompajler umetne pozive funkcije *pushDown*, vreme izvršavanja metoda je **1.80 s**
- Ukoliko kompajler ne umetne pozive funkcije *pushDown*, vreme sortiranja je **2.18 s**
- Usporenje od 21.11%

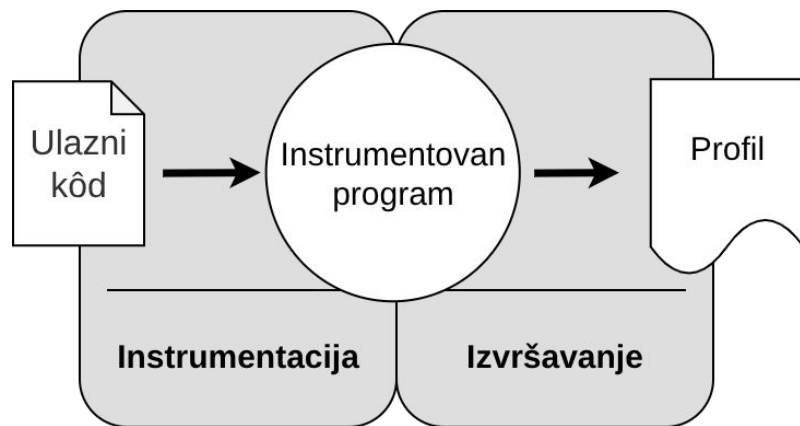
```
private static void heapSort(int[] a, int low, int high) {  
    for (int k = (low + high) >>> 1; k > low; ) {  
        pushDown(a, --k, a[k], low, high);  
    }  
    while (--high > low) {  
        int max = a[low];  
        pushDown(a, low, a[high], low, high);  
        a[high] = max;  
    }  
}
```

- Kako do profila izvršavanja programa?

Dinamički profajleri

Prikupljaju profil za vreme izvršavanja programa:

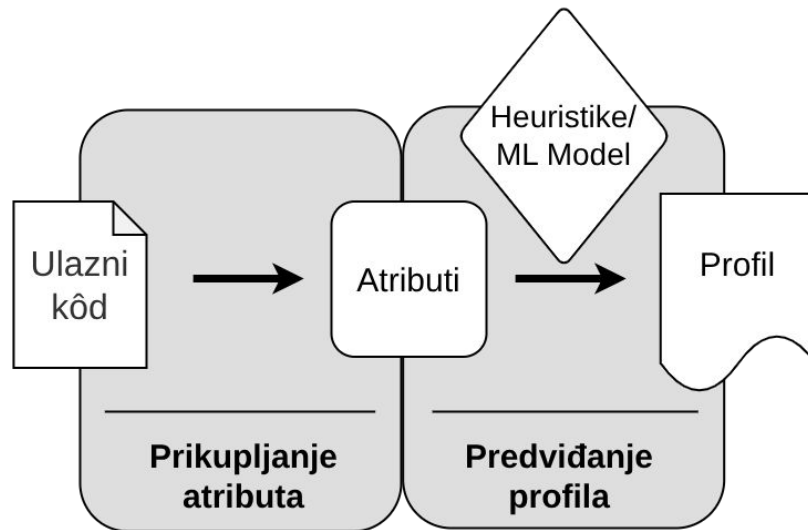
- Kvalitetan profil
- Značajno veće vreme i memorijski zahtevi kompilacije
- Potrebno pronaći odgovarajuće ulaze za prikupljanje profila
- Nekada čak nije moguće



Statički profajleri

Predviđaju profile programa statički: bez izvršavanja samog programa

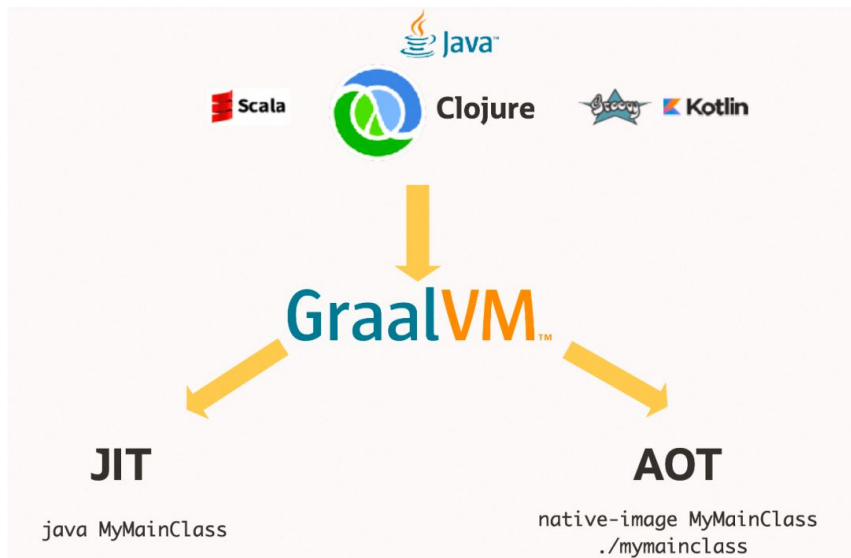
- Smanjeni vremenski i memorijski zahtevi profajliranja
- Nije potrebno pronalaziti odgovarajuće ulaze za prikupljanje profila
- Kvalitet profila nešto lošiji nego u slučaju dinamički sakupljenih profila



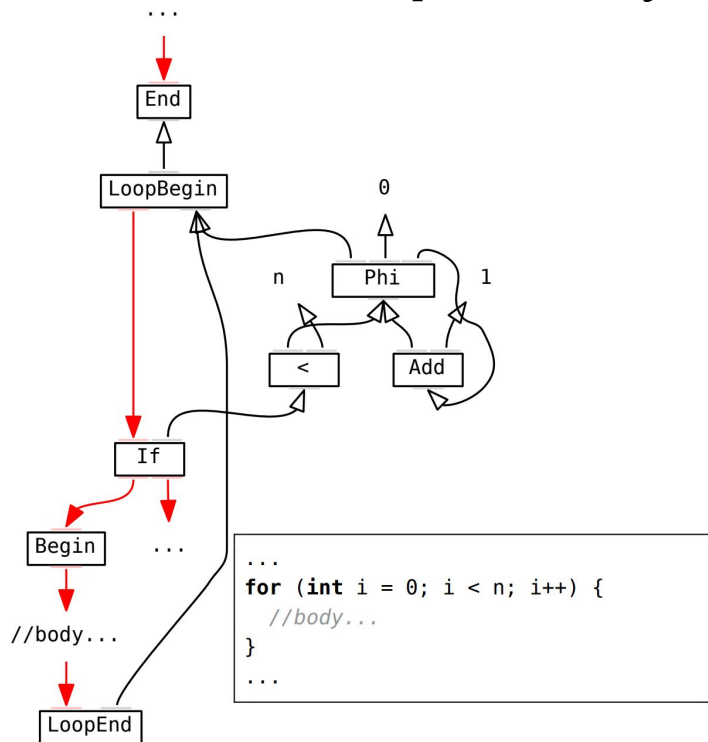
- Statički profajleri GraalSP, GraalNN, GraalMHC i GraalMHC++

Ekosistem GraalVM by Oracle

Kompilator Oracle GraalVM Native Image

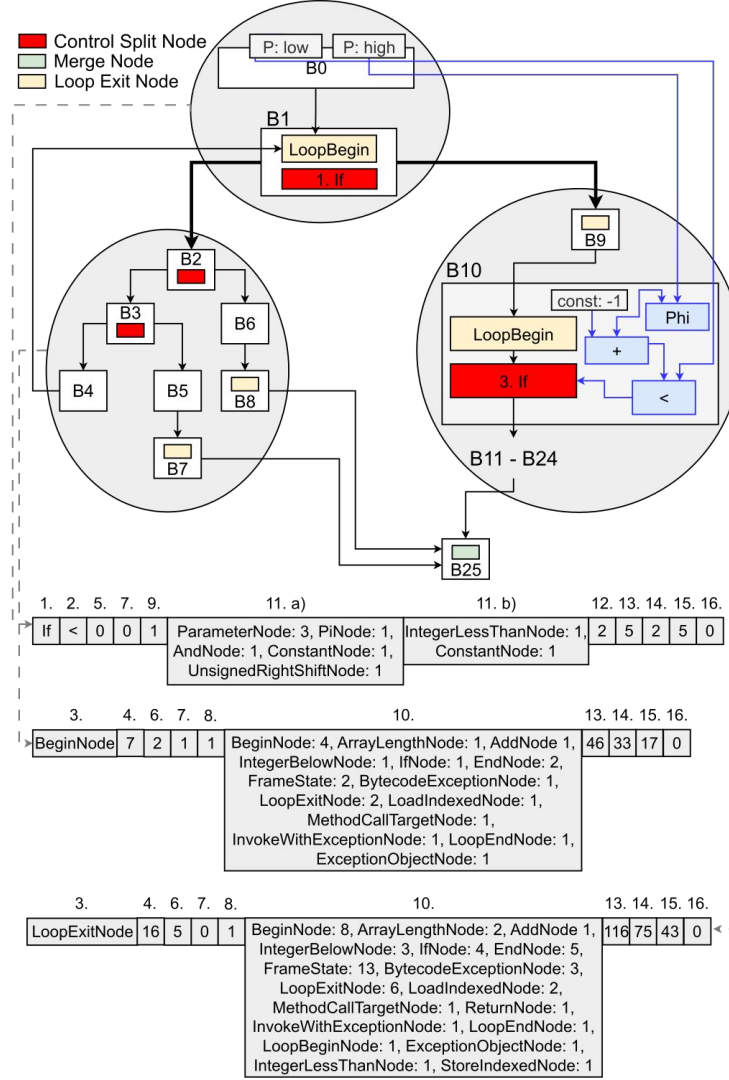


Graal Interna Rerezentacija (Graal IR)



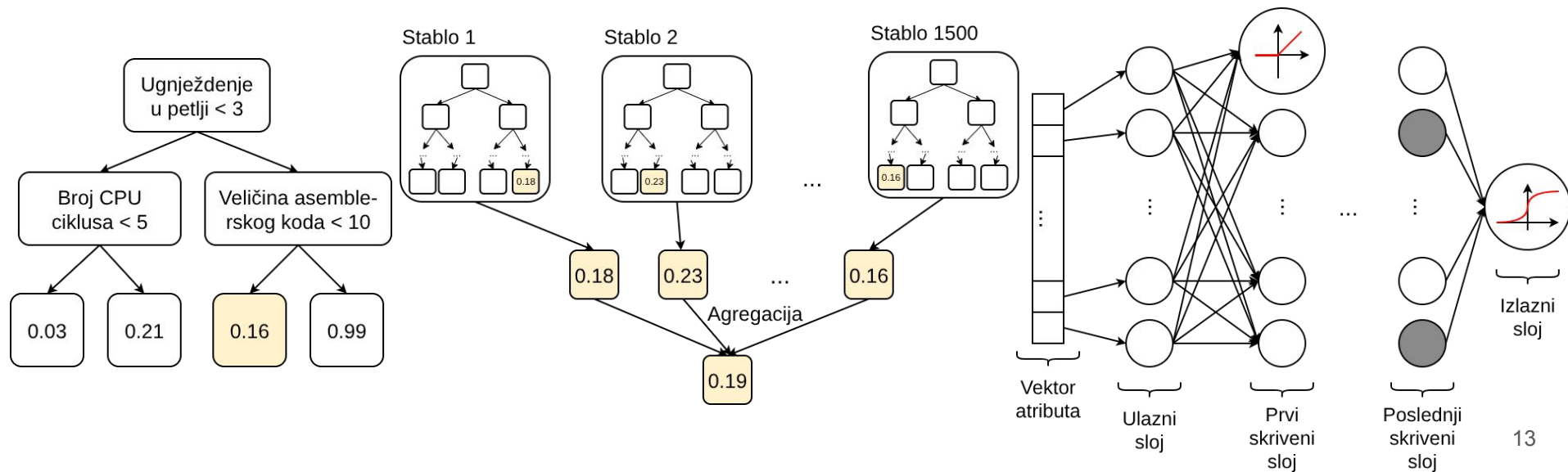
GraalSP

- Opisati čvor IF:
 - Blok u kom se nalazi čvor IF (blok “domaćin”)
 - Blokovi koji vode u blok “domaćina”
 - Blokovi “tačne” grane
 - Blokovi “netačne” grane



GraalSP: Modeli mašinskog učenja

Stablo odlučivanja (eng. *decision tree*, DT), ansambl stabala odlučivanja (eng. *gradient boosting*, XGBoost) i duboka neuronska mreža (eng. *deep neural network*, DNN)

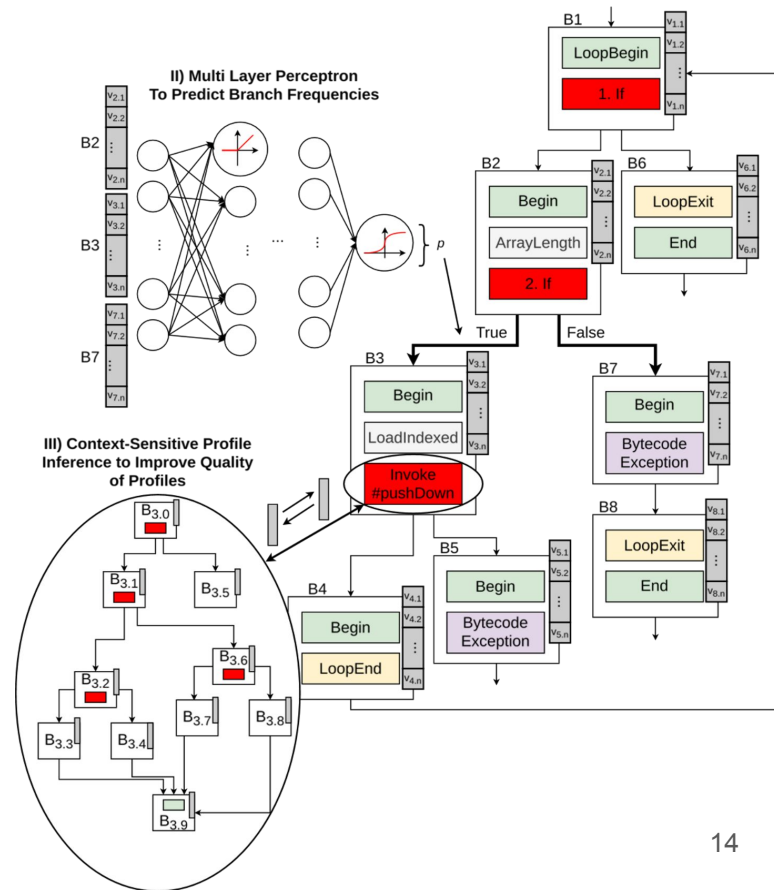


$$\mathbf{h}_{\mathcal{N}(v)}^k \leftarrow \text{AGGREGATE}_k(\{\mathbf{h}_u^{k-1}, \forall u \in \mathcal{N}(v)\})$$

$$\mathbf{h}_v^k \leftarrow \sigma(\mathbf{W}^k \cdot \text{CONCAT}(\mathbf{h}_v^{k-1}, \mathbf{h}_{\mathcal{N}(v)}^k))$$

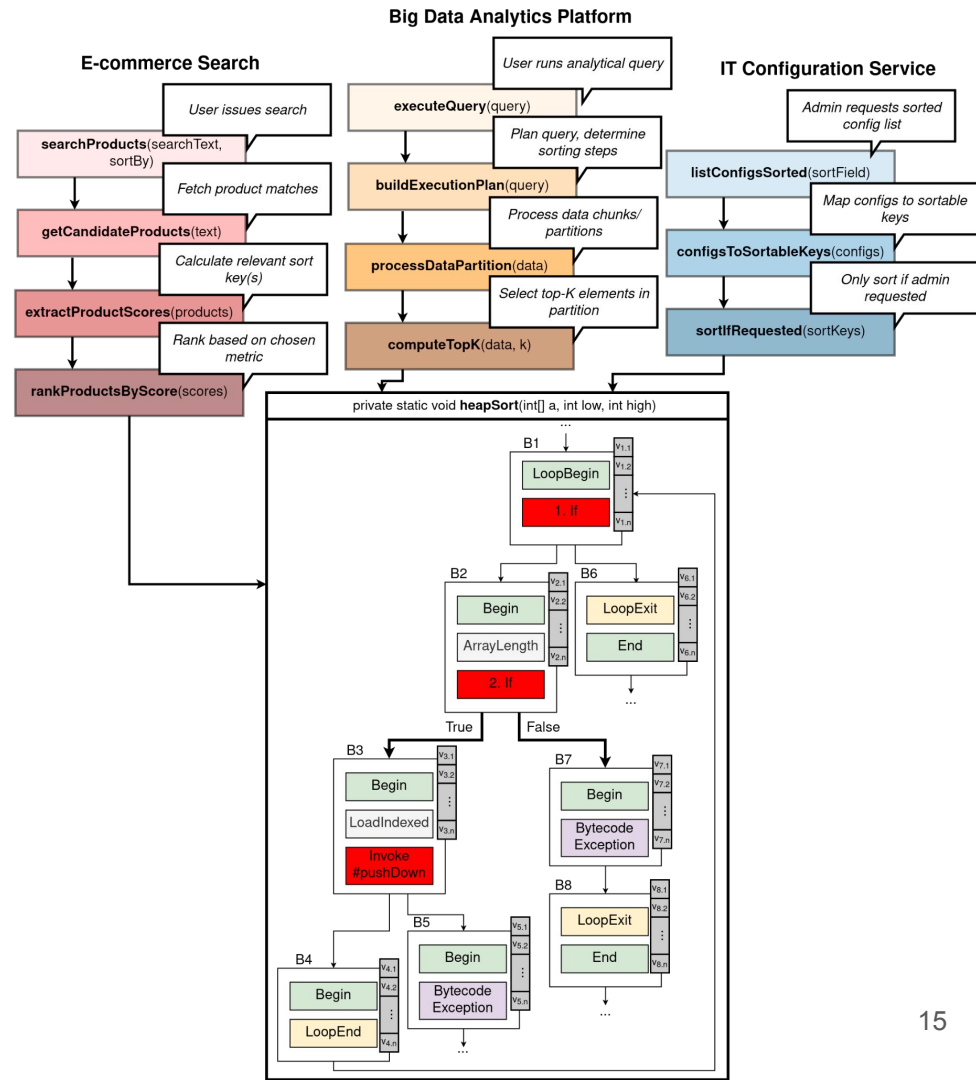
GraalNN: Grafovska neuronska mreža

- GraalNN (CGO '25) prevazilazi problem “ručnog” definisanja atributa za opisivanje grana naredbi grananja
- Proširuje domen statičkog profajlera na funkciju pozivaoca:
 - Predviđanje kontekstno neosetljivih profila tokom parsiranja
 - Predviđanje kontekstno osetljivih profila tokom umetanja

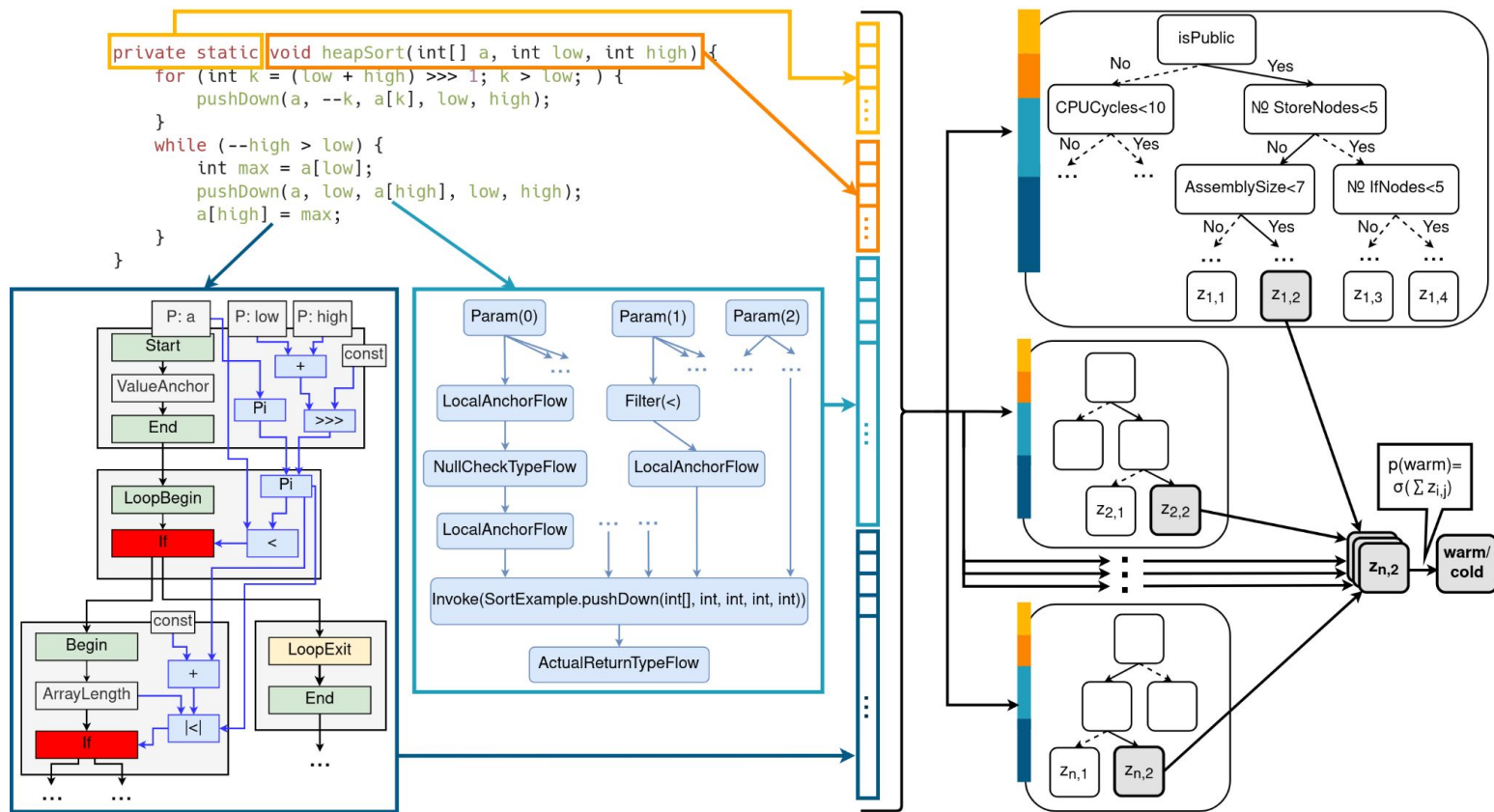


GraalMHC: Klasifikacija učestalosti izvršavanja metoda

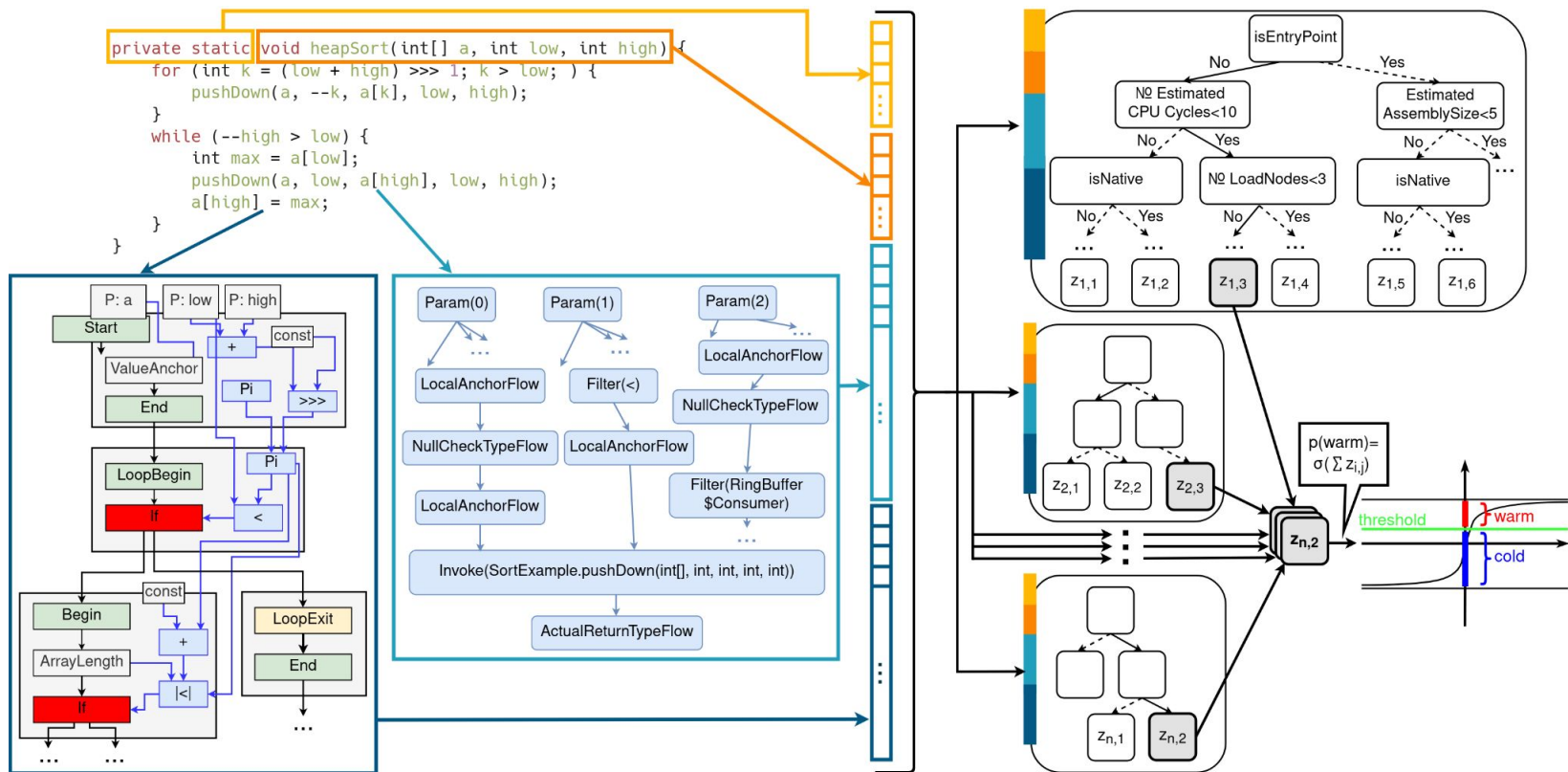
- *GraalSP* i *GraalNN*: intra-proceduralne optimizacije
- Proširiti domen optimizacija na inter-proceduralni nivo
- *GraalMHC* (CC '26): Prvi statički profajler za predviđanje i klasifikaciju izvršavanja metoda zasnovan na mašinskom učenju



GraalMHC: Binarna klasifikacija metoda



GraalMHC++: Konfigurabilan prag klasifikacije

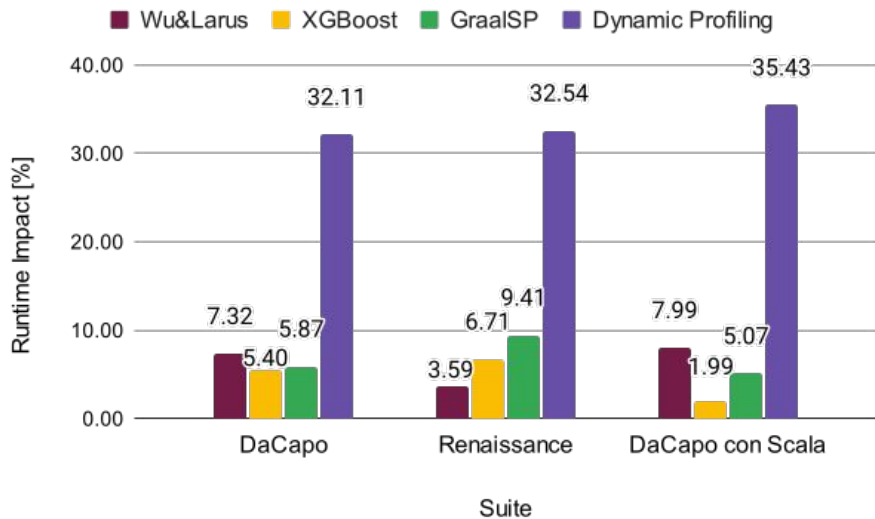


- Ostvareni rezultati

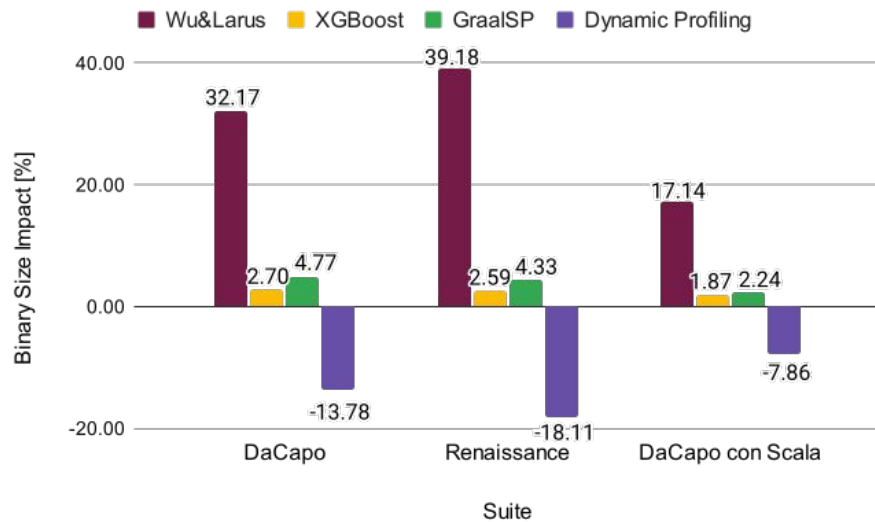
GraalSP: Ostvareni rezultati

Ubrzanje aplikacija od 7.46%

- Moderne komercijalne aplikacije iz skupova programa *Renaissance*, *DaCapo* i *DaCapo con Scala*



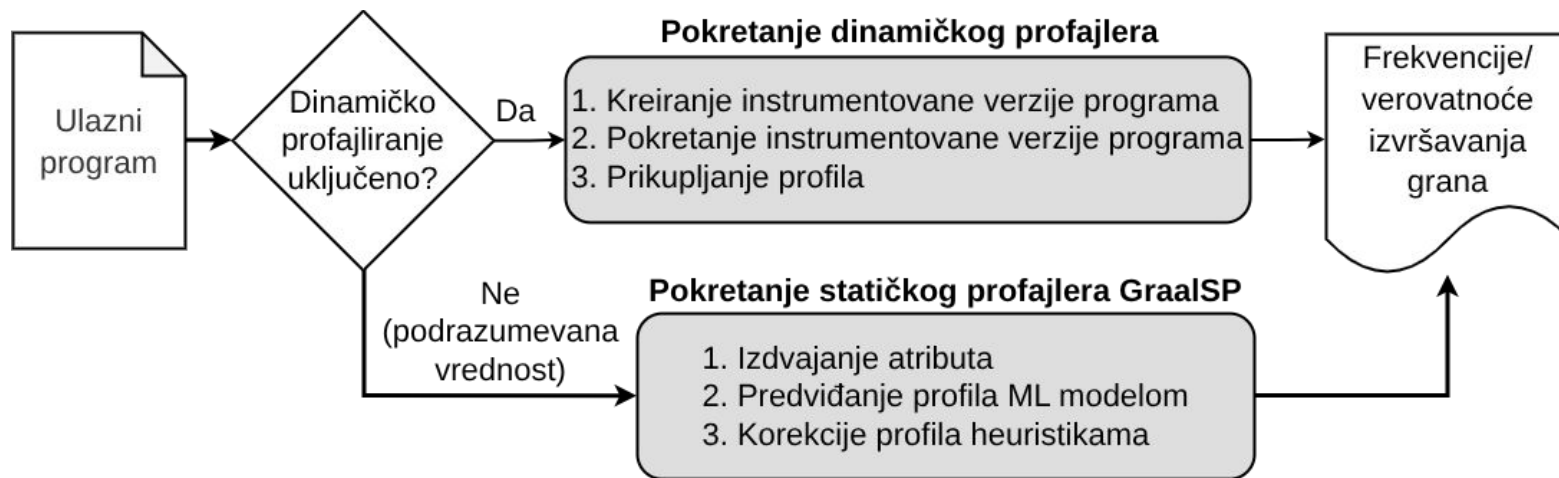
Povećavanje veličine optimizovanih programa od 3.91%



GraalSP: Integracija

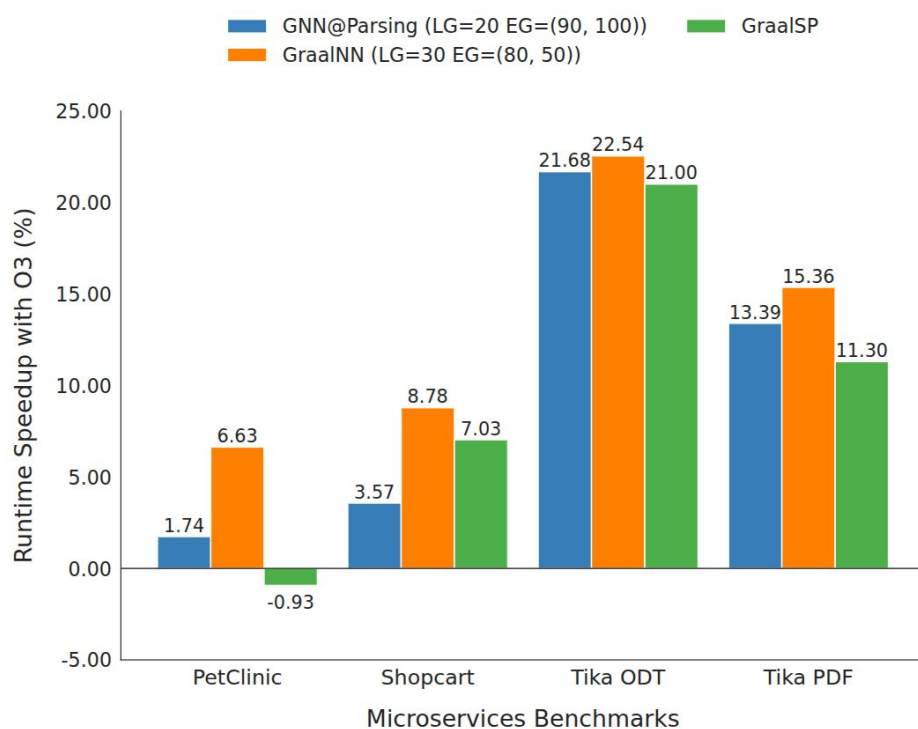
Od Juna 2023. godine u GraalVM
Native Image enterprise verziji
kompilatora

Arhitekture: Windows x86-64,
Linux x86-64 i aarch64, Darwin
x86-64 and aarch64



GraalNN: Rezultati

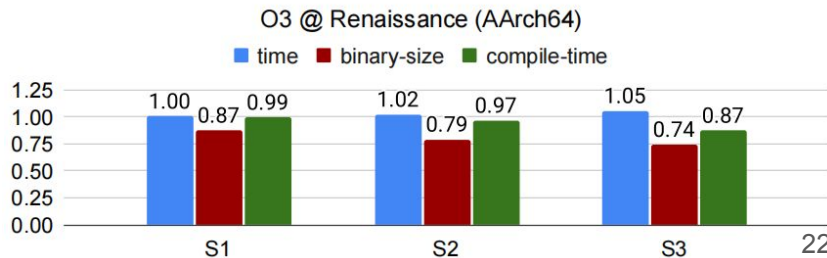
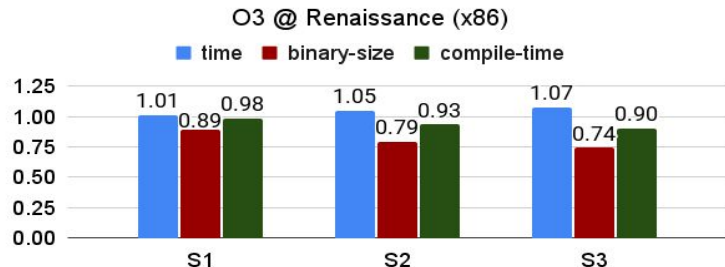
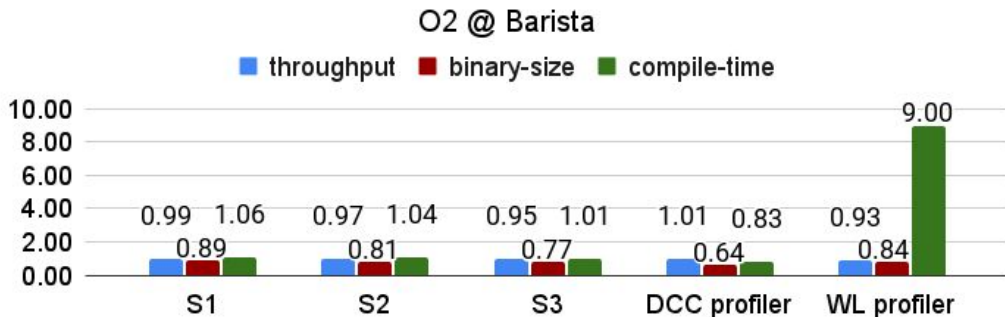
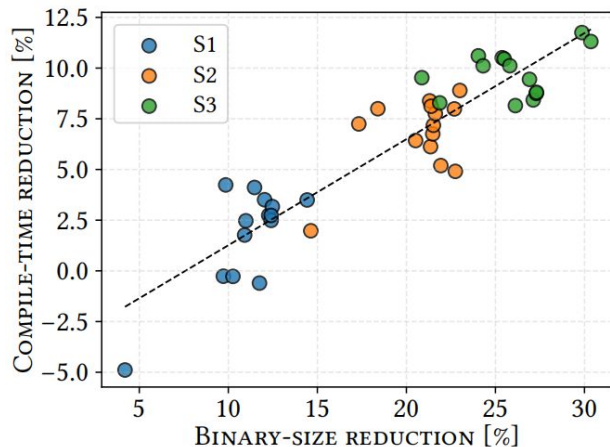
- Prvi statički profajler sa dvocifrenim prosečnim poboljšanjem performansi: 10.13%
- Dodatna evaluacija na najmodernijim mikroservisima
- Podrazumevano uključen u O3



Configuration	Runtime Speedup (%)	Binary Size Incr. (%)	Compile Time Incr. (%)
GNN@Parsing (No-Guards)	8.20	2.60	14.19
GNN@Parsing (LG=20 EG=(80, 50))	7.16	2.67	14.36
GNN@Parsing (LG=20 EG=(90, 100))	7.55	2.59	14.22
GraalNN (No-Guards)	9.48	2.65	21.25
GraalNN (LG=20 EG=(80, 50))	9.15	2.70	20.07
GraalNN (LG=30 EG=(80, 50))	10.13	2.94	20.85

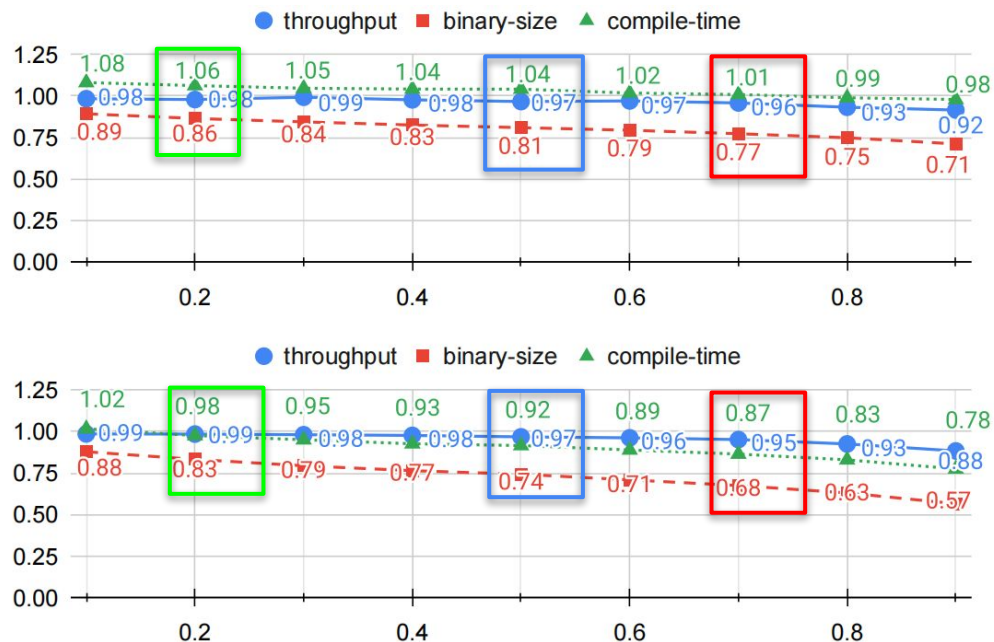
GraalMHC: Ostvareni rezultati

- S1: veličina 9-13%, izvršavanje 1-2%
- S2: veličina 15-25%, izvršavanje 3-5%
- S3: veličina 17-35%, izvršavanje 5-7%



GraalMHC++: Ostvareni rezultati

- Veličine GraalMHC modela:
 - S1: 117.8 KB
 - S2: 1.2 MB
 - S3: 2.7 MB
- Pragovi klasifikacije od 0.1 i 0.7 precizno modeluju ponašanje modela S1 i S3
- ~50% manje podataka za distribuciju korisnicima a moguća i preciznija podešavanja



- Zaključak

Zaključak

- Statički profajleri: *GraalSP*, *GraalNN*, *GraalMHC* i *GraalMHC++*
- Integrisani u AOT kompilator *Oracle GraalVM Native Image* (počev od verzije 23.0)
- Ostvarena značajna poboljšanja
 - Performanse izvršavanja: 10%
 - Smanjenje veličine optimizovanih programa: 35%

Pitanja?

Hvala na pažnji
milan.cugurovic@matf.bg.ac.rs
milan.c.cugurovic@oracle.com

Dodatak

- Koautori i saradnici na projektima

Koautori i saradnici na projektima

- **prof. dr Milena Vujošević Janičić**, MatF, Principal Researcher, Oracle
- **dr Vojin Jovanović**, Consulting Researcher, Oracle, PhD @ EPFL, Switzerland
- **dr Aleksandar Prokopec**, Software Development Director, Oracle, PhD @ EPFL, Switzerland
- **dr Boris Spasojevic**, Principal Researcher, Oracle, PhD @ University of Bern
- **dr Thomas Wuerthinger**, Vice President, Oracle, PhD @ JKU Linz, Austria
- **dr Christian Wirth**, Research Director, Oracle, PhD @ JKU Linz, Austria
- **Lazar Milikić**, PhD student @ EPFL, Switzerland
- **Stefan Milenkovic**, master student na Matematičkom fakultetu
- Ostale kolege iz *Oracle*-a i sa Matematičkog fakulteta

- Najvažnije publikacije

Međunarodni časopisi

[1] Čugurović Milan, Vujošević Janičić Milena, Jovanović Vojin, Würthinger Tomas, [“GraalSP: Polyglot, efficient, and robust machine learning-based static profiler”](#), Journal of Systems and Software. 2024 Jul 1;213:112058.

[2] Milan Čugurović, Aleksandar Prokopec, Boris Spasojević, Vojin Jovanović, Milena Vujošević Janičić, “GraalMHC ++ : A Tunable ML Framework for Size-Aware Optimizing Compilation”, Software: Practice and Experience, Research Article, Under Review, 2026.

Međunardone konferencije

[3] Milan Čugurović, Aleksandar Prokopec, Boris Spasojević, Vojin Jovanović, Milena Vujošević Janićić. [“GraalMHC: ML-Based Method-Hotness Classification for Binary-Size Reduction in Optimizing Compilers.”](#) Proceedings of the 35th ACM SIGPLAN International Conference on Compiler Construction 2026 (CC '26). ACM. Sydney, NSW, Australia. DOI: [10.1145/3771775.3786276](#).

[4] Lazar Milikić, Milan Čugurović, Vojin Jovanović, [“GraalNN: Context-Sensitive Static Profiling with Graph Neural Networks”](#), Proceedings of the 23rd ACM/IEEE International Symposium on Code Generation and Optimization. 2025. Las Vegas, Nevada, USA. DOI: [10.1145/3696443.3708958](#).

[5] Milan Čugurović, Aleksandar Prokopec, Boris Spasojević, Vojin Jovanović, Milena Vujošević Janićić, [“The Promise of Static Profiling: Exploring the Limits”](#), Companion Proceedings of the 10th International Conference on the Art, Science, and Engineering of Programming (⟨Programming⟩ Companion '26), March 16-20, 2026, Munich, Germany.

Patenti u Sjedinjenim Američkim Državama

[6] Čugurović Milan, Vujošević Janičić Milena, Prokopec Aleksandar, Spasojević Boris, Jovanović Vojin. “A Tunable ML Framework for Size-Aware Optimizing Compilation”, United States Letter Patent Application IDF-141617. (In progress, 2026).

[7] Čugurović Milan, Vujošević Janičić Milena, Prokopec Aleksandar, Spasojević Boris, Jovanović Vojin. “ML-Based Method-Hotness Classification for Binary-Size Reduction in Optimizing Compilers.” United States Letter Patent Application ORC26140781-US-NPR. (In progress, 2025).

[8] Jovanović Vojin, Čugurović Milan, Milikić Lazar, [“Static Profiling with Graph Neural Networks”](#), United States Letter Patent, US20260126977A1. (Published 2026).

[9] Čugurović Milan, Vujošević Janičić Milena, Jovanović Vojin, Würthinger Tomas, [“Machine Learning Based Static Profiling”](#), United States Letter Patent, US20250244979A1. (Published 2025).

Radovi u nacionalnim časopisima

[10] Чугуровић, Милан. ["Динамичко прикупљање и статичко предвиђање профила извршавања програма у контексту компајлерских оптимизација"](#) ИнфоМ - Часопис за информационе технологије и мултимедијалне системе 23.78 (2023): 17-27.

Saopštenja na konferencijama štampana u izvodu

[11] Stefan Milenković, Milan Čugurović, Milena Vujošević Janičić. “[Improving ML-Based Static Profiling Using Method Names](#).” XV Symposium on Mathematics and Applications, Faculty of Mathematics, University of Belgrade, 2025, Vol. XV. ISBN 978-86-7589-206-9.

[12] Milan Čugurović, Milena Vujošević Janičić. “[GaalSP Profiles Logger: A Tool for Analyzing and Interpreting Predictions of the ML-Based Static Profilers](#).” Artificial Intelligence Conference, Department of Technical Sciences SASA and Mathematical Institute SASA, December 26-27, 2024.

[13] Милан Чугуровић, Милена Вујошевић Јаничић. “[Креирање и анализа скупа података за предвиђање вероватноћа извршавања виртуелних метода у објектно-оријентисаним програмима](#)”, Конференција „Вештачка интелигенција”, Математички институт САНУ, децембар 26-27, 2023.

Izlaganja na seminarima

[14] Милан Чугуровић, Милена Вујошевић Јаничић, [“Предвиђање профила програма методама машинског учења”](#), Семинар за вештачку интелигенцију, Математички институт САНУ, Март 2022.