Sigurnost operacijskih sustava i aplikacija

Dinamička analiza koda: Fuzzing

Ante Čavar, 23.05.2025

Pregled predavanja

- Pitanja za ispite
- Motivacija
- Uvod u *fuzzing*
- Vrste *fuzzinga*
- *Fuzzing* alati
- Primjeri *fuzzinga*
- Izazovi *fuzzinga*
- Zaključak
- Literatura

Pitanja za ispite

- Objasnite razliku između black-box, white-box i grey-box *fuzzing* pristupa.
- Navedite i opišite najmanje tri vrste tehnika generiranja ulaznih podataka u *fuzzingu*.
- Navedite barem 2 uspješna primjera korištenja *fuzzinga* u industriji te ih ukratko opišite
- Opišite neke od (barem 3) glavnih izazova moderne *fuzzing* metodologije i kako se adresiraju.
- Navedite najmanje tri popularna *fuzzing* alata te im opišite svrhu tj. domenu u kojoj se koriste

Motivacija

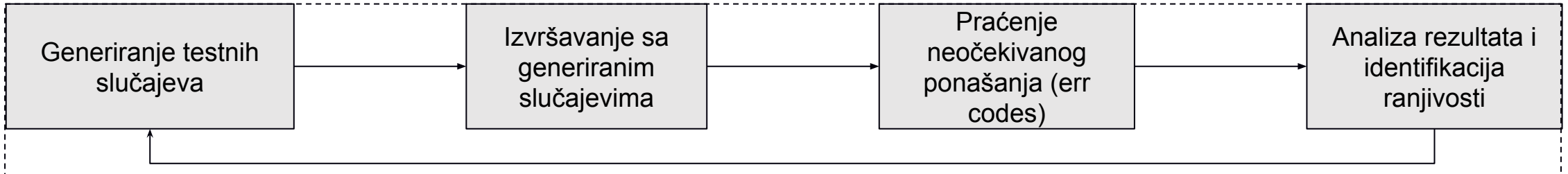
- **Problem sigurnosti softvera**
  - Sigurnosni propusti u softveru uzrokuju milijarde dolara štete godišnje
  - Tradicionalno testiranje često propušta rubne slučajeve i neočekivane ulaze
  - Ručna provjera koda je spora i podložna ljudskim greškama
- **Ograničenja postojećih pristupa**
  - Statička analiza koda ne može otkriti sve vrste ranjivosti
  - Ručno penetracijsko testiranje nije skalabilno
  - Standardni testovi često pokrivaju samo očekivane putanje izvršavanja

Motivacija

- **Primjeri skupih sigurnosnih propusta**
  - Equifax breach (2017): preko 147 milijuna korisnika, trošak >$1.7 milijardi
  - Heartbleed (2014): ranjivost u OpenSSL-u koja je pogodila 2/3 web poslužitelja
  - Log4Shell (2021): kritična ranjivost u široko korištenom logging okviru
- **Financijski i reputacijski rizici**
  - Prekidi poslovanja
  - Gubitak povjerenja klijenata
  - Regulatorne kazne (GDPR, CCPA)

Uvod u *fuzzing* - osnove

- **Definicija**
  - (Automatizirana) tehnika testiranja koja šalje neočekivane ili nepravilne podatke programu
  - Cilj je pronaći sigurnosne propuste i ranjivosti koji se ne otkrivaju standardnim testiranjem
- **Temeljna ideja**
  - "Zbuniti" program nevaljanim, neočekivanim ili nasumičnim ulazima
  - Izazvati rušenja, curenja memorije ili druga neispravna ponašanja
  - hackeri već desetljećima koriste *fuzzing* za otkrivanje ranjivosti



Princip rada *fuzzinga*

Uvod u fuzzing - povijest

- **Rane tehnike (1990-e)**
  - Jednostavno nasumično generiranje ulaznih podataka
  - Niska uspješnost i efikasnost
  - Ograničena primjena
- **Srednja faza (2000-e)**
  - Razvoj format-aware fuzzinga
  - Fuzzing kao dio sigurnosnih audita
  - Prve primjene u industriji
- **Moderni fuzzing (2010-e do danas)**
  - Coverage-guided fuzzing
  - Integracija s CI/CD pipeline-ima
  - Genetski algoritmi i evolucijski pristup
  - *Manès et al*. (2019): "revolucionarni skok u učinkovitosti"
- **Najnoviji trendovi**
  - Integrirani fuzzing u razvojne alate
  - Specijalizirani fuzzing za različite domene
  - Kombinacija s drugim sigurnosnim tehnikama

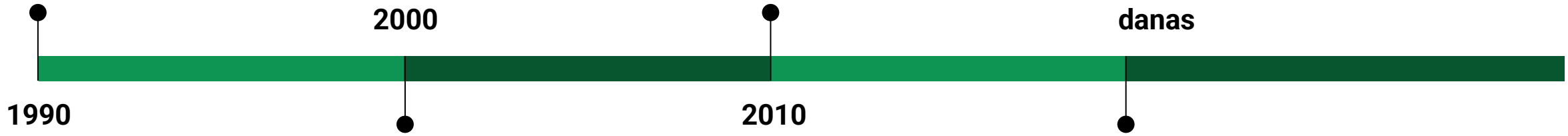
Uvod u *fuzzing* - povijest

Rane tehnike

- Jednostavno nasumično generiranje ulaznih podataka
- Niska uspješnost i efikasnost
- Ograničena primjena

Moderni *fuzzing*

- Coverage-guided *fuzzing*
- Integracija s CI/CD pipeline-ima
- Genetski algoritmi i evolucijski pristup
- *Manès et al*. (2019): "revolucionarni skok u učinkovitosti"



Srednja faza

- Razvoj format-aware *fuzzinga*
- *Fuzzing* kao dio sigurnosnih audita
- Prve primjene u industriji

Najnoviji trendovi

- Integrirani *fuzzing* u razvojne alate
- Specijalizirani *fuzzing* za različite domene
- Kombinacija s drugim sigurnosnim tehnikama

Vrste *fuzzinga* - tehnike generiranja ulaza

- **Mutacijski *fuzzing***
  - Modificira postojeće validne ulazne podatke
  - Nasumične promjene bitova, bajtova ili blokova podataka
  - Efikasno za testiranje formata datoteka i protokola
  - najčešće korištena tehnika u praksi
- **Generativni *fuzzing***
  - Stvara ulazne podatke od početka prema specifikaciji
  - Zahtijeva model ili specifikaciju formata
  - Bolja pokrivenost kompleksnih formata podataka
- **Gramatički *fuzzing***
  - Koristi formalnu gramatiku za generiranje ulaza
  - Idealan za jezike i strukturirane protokole
  - Primjeri: testiranje parsera, interpretera, kompajlera
- **Hibridni pristupi**
  - Kombinacija različitih tehnika generiranja
  - Prilagodba specifičnim potrebama i ciljanim aplikacijama

Vrste fuzzinga - Crna kutija

- **Karakteristike**
  - Nema pristupa izvornom kodu ili internim strukturama programa
  - Tretira program kao "crnu kutiju"
  - najjednostavniji ali i najmanje učinkovit pristup
- **Primjene**
  - Testiranje vlastitih programa kad izvorni kod nije dostupan
  - Penetracijska testiranja vanjskih sustava
  - Implementiran u alatima kao što su Radamsa i OWASP ZAP

Vrste fuzzinga - Crna kutija

- **Prednosti**
  - Jednostavna implementacija
  - Nema potrebe za poznavanjem implementacije
  - Može se primijeniti na bilo koji program
  - jedini način testiranja softvera zatvorenog koda (*closed source*)
- **Nedostaci**
  - Niska pokrivenost koda
  - Neučinkovito pronalaženje dubokih grešaka
  - Teško pronalazi ranjivosti koje zahtijevaju specifične ulaze

Vrste *fuzzinga* - Bijela kutija

- **Karakteristike**
  - Potpuni pristup izvornom kodu programa
  - Koristi statičku analizu, simboličko izvršavanje i praćenje putanja
  - omogućuje dubinsko testiranje kompleksnih uvjeta
- **Primjeri**
  - SAGE (Microsoft)
  - KLEE
  - Mayhem

Vrste *fuzzinga* - Bijela kutija

- **Prednosti**
  - Visoka pokrivenost koda
  - Efikasno pronalaženje kompleksnih ranjivosti
  - Može ciljano testirati kritične dijelove koda
  - Mogućnost zaobilaženja složenih uvjeta
- **Nedostaci**
  - Skupo za implementaciju i održavanje
  - Zahtijeva specijalizirane alate i znanje
  - Problemi sa skalabilnošću kod velikih programa
  - "Path explosion" problem

Vrste *fuzzinga* - Siva kutija

- **Karakteristike**
  - Djelomični pristup informacijama o strukturi programa (najčešće dobiveni reverzingom)
  - Koristi instrumentaciju za praćenje pokrivenosti koda
  - najpopularniji pristup u modernom *fuzzingu*
- **Primjeri alata**
  - AFL (American Fuzzy Lop)
  - libFuzzer
  - honggfuzz

Vrste *fuzzinga* - Siva kutija

- **Prednosti**
  - Bolja pokrivenost koda od pristupa crne kutije
  - Manje resursa od pristupa bijele kutije
  - Praktično primjenjiv na veće sustave
  - Ravnoteža između efikasnosti i implementacijske složenosti
- **Tehnike**
  - (*Coverage-guided*) *fuzzing* vođen pokrivenošću
  - Reakcijski (*Feedback-driven*) *fuzzing*
  - Evolucijski *fuzzing*

Vrste *fuzzinga* - usporedba

- **Usporedba prema efikasnosti pronalaska ranjivosti**

Pristup	Pokrivenost koda	Zahtjevnost implementacije	Brzina izvođenja	Skalabilnost
Crna kutija	Niska	Niska	Visoka	Visoka
Bijela kutija	Vrlo visoka	Vrlo visoka	Niska	Niska
Siva kutija	Srednja	Srednja	Srednja-visoka	Srednja-visoka

- **Odabir pristupa prema cilju**
  - Za nepoznate sustave bez pristupa kodu: crna kutija
  - Za kritične komponente gdje je važna visoka pokrivenost: bijela kutija
  - Za većinu modernih primjena u industriji: siva kutija

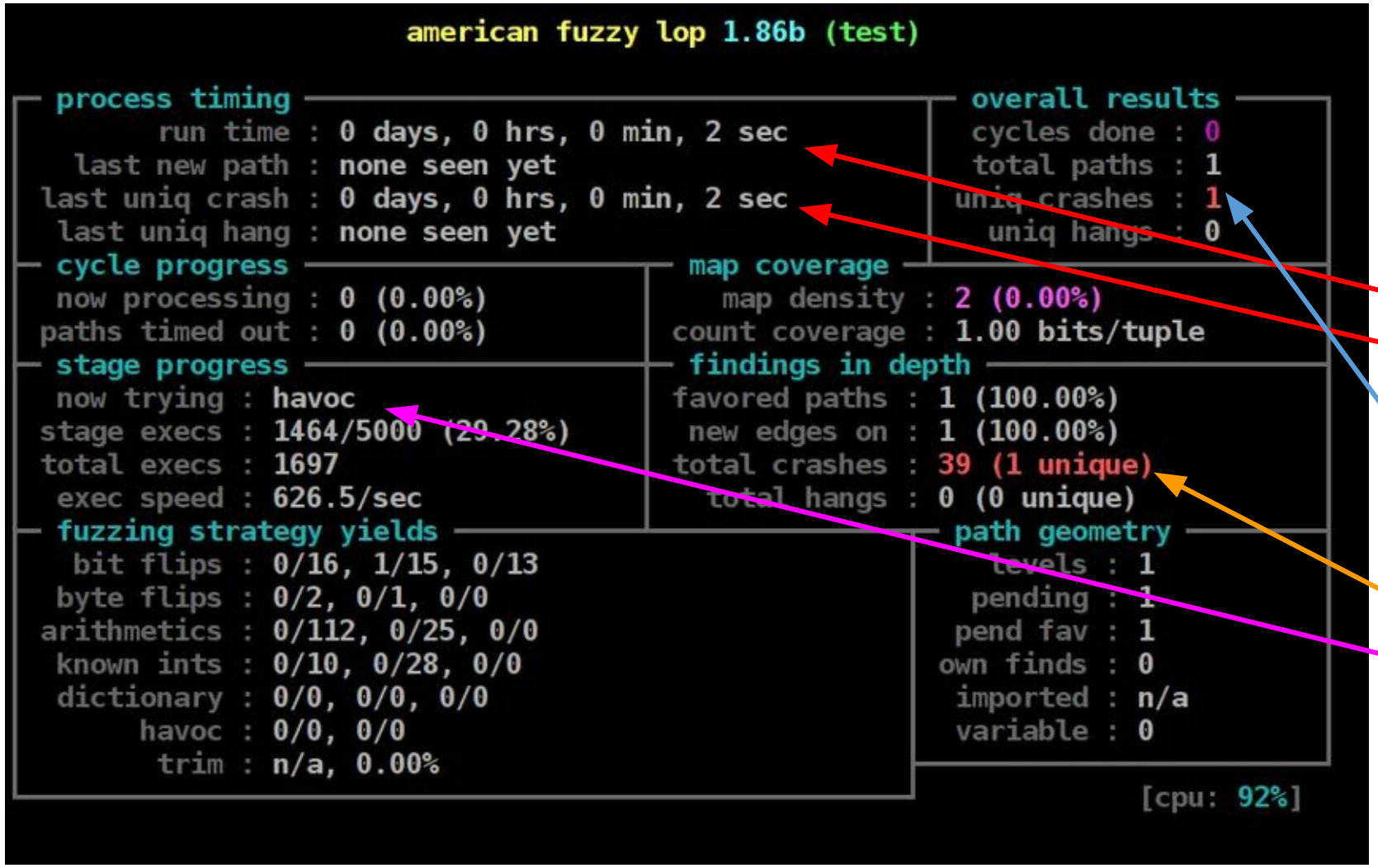
Fuzzing alati - pregled

- **Evolucija *fuzzing* alata**
  - Rani alati: jednostavni generatori nasumičnih ulaza
  - Srednja generacija: *fuzzeri* svjesni formata
  - Moderna generacija: inteligentni, *fuzzeri* vođeni pokrivenošću
- **Kategorizacija alata po primjeni**
  - Opći *fuzzeri* (za razne aplikacije)
  - Specijalizirani *fuzzeri* (za protokole, parsere, itd.)
  - *In-process* i *out-of-process fuzzeri*
  - Kontinuirani *fuzzing* sustavi (CI/CD integracija)

Fuzzing alati - otvorenog koda

- **AFL (American Fuzzy Lop)**
  - Najpopularniji *grey-box fuzzer*
  - Koristi genetske algoritme za generiranje ulaza
  - *Instrumentation-guided fuzzing*
  - revolucionirao *fuzzing* tehnologiju
  - AFL++ je moderne nadogradnja originalnog AFL-a
- **libFuzzer**
  - *In-process, coverage-guided fuzzer*
  - Integriran s LLVM kompajlerom
  - Vrlo brz zbog izbjegavanja fork()
  - Pogodan za jedinične testove
- **Honggfuzz**
  - Podržava više hardverskih povratnih kanala
  - Efikasan na višejezgrenim sustavima
  - Podržava povratnu informaciju temeljenu na hardwareu (Intel PT)
- **Syzkaller:**
  - Specijaliziran za testiranje jezgre OS-a
  - Razvijen od strane Googlea
  - Pronašao tisuće kritičnih ranjivosti u Linux jezgri

Fuzzing alati - AFL



Primjer *fuzziranja* programa koristeći AFL

Možemo primjetiti metrike poput:

- vrijeme od pokretanja
- vrijeme od zadnjeg pada sustava
- koliko putova je otkriveno
- koliko unikatnih padova je detektirano
- ukupno padova
- trenutno stanje (koji skup testova/podataka se vrti)

Fuzzing alati - komercijalni i cloud

- **Komercijalni alati**
  - **Peach Fuzzer**
    - Profesionalni okvir
    - Podržava složene protokole i formate
    - Koristi se u velikim poduzećima
  - **Defensics (Synopsys):**
    - Specijaliziran za testiranje mrežnih protokola
    - Ekstenzivna biblioteka gotovih testnih slučajeva
    - Fokus na sigurnost industrijskih sustava
- **Cloud *fuzzing* platforme**
  - **Google OSS-Fuzz**
    - Kontinuirani *fuzzing* projekt za open-source projekte
    - otkrio preko 16,000 grešaka u brojnim projektima
    - Besplatno dostupan za open-source projekte
  - **Google ClusterFuzz**
    - Distribuirana infrastruktura za skalabilni *fuzzing*
    - Automatizira cijeli proces pronalaska, reprodukcije i praćenja greški
  - **Microsoft Security Risk Detection:**
    - Cloud-bazirani *white-box fuzzing* servis
    - Kombinira simboličko izvršavanje i *fuzzing*

Primjeri *fuzzinga* - uspješne primjene

- **Google Project Zero**
  - Elitni tim sigurnosnih istraživača
  - Koriste *fuzzing* za pronalazak *zero-day* ranjivosti
  - Otkrili tisuće sigurnosnih propusta u kritičnom *softveru*
  - jedan od najuspješnijih primjera primjene *fuzzinga*
- **Microsoft Security Development Lifecycle (SDL)**
  - *Fuzzing* kao obavezni dio razvoja *softvera*
  - Implementirano za sve Microsoft proizvode
  - Značajno smanjenje sigurnosnih incidenata

Primjeri *fuzzinga* - uspješne primjene

- **Apple Security Bounty program**
  - Nagrade za pronalazak ranjivosti
  - Fokus na *fuzzing* testiranje
  - Poboljšava sigurnost iOS i macOS platformi
- **Uspješni open-source projekti**
  - Chrome Browser - ClusterFuzz
  - OpenSSL - nakon Heartbleed-a
  - Linux jezgra - Syzkaller
  - Firefox - ContinuousFuzzing program

Izazovi *fuzzinga* - ograničenja pristupa

- **Logička ograničenja**
  - Teško otkrivanje složenih logičkih grešaka
  - Nemogućnost verificiranja poslovne logike
  - *fuzzing* nije prikladan za pronalazak semantičkih grešaka
  - Ograničenja u validaciji ispravnosti funkcioniranja
- **Dubinske barijere**
  - checksum provjere i kompleksni preduvjeti značajno otežavaju *fuzzing*
  - Format-specifična ograničenja
  - Magični bajtovi i složene strukture formata
  - Višefazne autentikacije i autorizacije

Izazovi *fuzzinga* - ograničenja pristupa

- **Strukturni izazovi**
  - Nelinearni programski tokovi
  - Velike aplikacije s kompleksnim arhitekturama
  - Virtualizirani i skriveni slojevi
  - Distribuirane aplikacije i mikroservisi
- **Izazovi praćenja**
  - Teško praćenje pokrivenosti koda u nekim okruženjima
  - JIT kompilacija i dinamički generirani kod
  - Interpretirani jezici
  - Hardverske komponente

Izazovi *fuzzinga* - praktična primjena

- **Organizacijski izazovi**
  - Integracija *fuzzinga* u postojeće razvojne procese
  - Budžetiranje i resursi za sigurnosno testiranje
  - Educiranje razvijača o *fuzzing* tehnikama
  - Mjerenje povrata investicije (ROI) za *fuzzing*
- **Vremenski okvir**
  - Balansiranje između vremena razvoja i vremena testiranja
  - Određivanje optimalnog trajanja *fuzzing* kampanje
  - Godefroid (2020) navodi "problem određivanja kada prestati s *fuzzingom*"
  - Strategije za brzu identifikaciju visoko-vrijednih ranjivosti

Izazovi *fuzzinga* - praktična primjena

- **Regulatorni aspekti**
  - Usklađenost s industrijskim standardima
  - Regulatorni zahtjevi za sigurnosno testiranje
  - Dokumentiranje procesa za certifikaciju
  - Pravna odgovornost za neotkrivene ranjivosti
- **Zakonska ograničenja**
  - Etičke i pravne granice testiranja
  - Testiranje sustava trećih strana
  - Odgovornost i transparentnost u otkrivanju ranjivosti
  - Usklađenost s GDPR-om i drugim propisima o privatnosti

Zaključak

- Automatizirajući pronalazak ranjivosti, *fuzzing* uvelike pridonosi sigurnosti i stabilnosti programa kojima se svakodnevno služimo
- Još dugo godina će ostati jedna od dominantnih tehnika testiranja programa zbog automatizacije te pokrivenosti slučajeva
- Smatram da će u budućnosti *fuzzing* biti više integriran sa DevSecOps procesima te da će se uz razvoj kako strojnog učenja tako i LLM-ova *fuzzing* još više unaprijediti

Literatura

- Chen, Chen, et al. "A systematic review of fuzzing techniques." Computers & Security 75 (2018): 118-137.
- Godefroid, Patrice. "Fuzzing: Hack, art, and science." Communications of the ACM 63.2 (2020): 70-76.
- Zhu, Xiaogang, et al. "Fuzzing: a survey for roadmap." ACM Computing Surveys (CSUR) 54.11s (2022): 1-36.
- Manès, Valentin J.M., et al. "The art, science, and engineering of fuzzing: A survey." IEEE Transactions on Software Engineering 47.11 (2019): 2312-2331.
- Liang, Hongliang, et al. "Fuzzing: State of the art." IEEE Transactions on Reliability 67.3 (2018): 1199-1218.

Dodatna literatura

- Zeller, Andreas and Gopinath, Rahul and Böhme, Marcel and Fraser, Gordon and Holler, Christian (2019) The Fuzzing Book
  - alt: https://www.fuzzingbook.org/
- Honggfuzz: https://github.com/google/honggfuzz
- Syzkaller: https://github.com/google/syzkaller
- Radamsa: https://gitlab.com/akihe/radamsa
- OWASP ZAP: https://www.zaproxy.org/
- KLEE: https://klee.github.io/
- Peach Fuzzer: https://peachtech.gitlab.io/
- Defensics (Synopsys): https://www.blackduck.com/fuzz-testing.html
- Google OSS-Fuzz: https://github.com/google/oss-fuzz
- Google ClusterFuzz: https://github.com/google/clusterfuzz
- AFL++: https://github.com/AFLplusplus/AFLplusplus
- libFuzzer: https://llvm.org/docs/LibFuzzer.html

Hvala!