Sigurnost računalnih sustava

Sigurnost programske podrške – ranjivosti i napadi

doc. dr. sc. Ante Đerek
doc. dr. sc. Stjepan Groš
izv. prof. dr. sc. Miljenko Mikuc
izv. prof. dr. sc. Marin Vuković

Motivacija: prvi program koji ste vidjeli na FER-u

datoteka prog1.c

```c
#include <stdio.h>

int main(void) {
   int n, rez;
   scanf("%d", &n);

   // izracunaj apsolutnu vrijednost
   if (n < 0) {
      rez = -1 * n;
   } else {
      rez = n;
   }

   printf("Ulaz: %d Rezultat: %d", n, rez);
   return 0;
}
```

Razuman ulaz

```
$ ./a.out
-12
Ulaz: -12 Rezultat: 12
```

Nerazuman ulaz

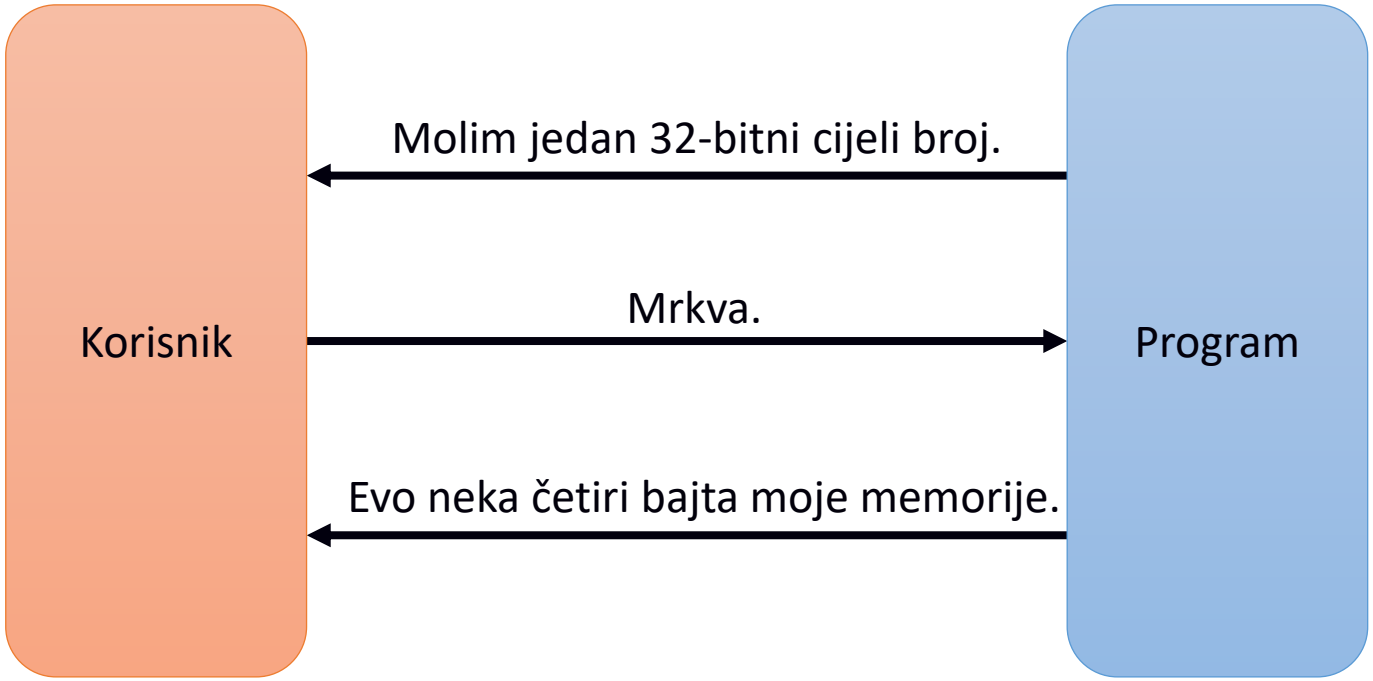
```
$ ./a.out
Mrkva
Ulaz: -34521342 Rezultat: 34521342
```

Izvor: FER, Uvod u programiranje 2019./2020.

Vrijednost neinicijaliziranih lokalnih varijabli?

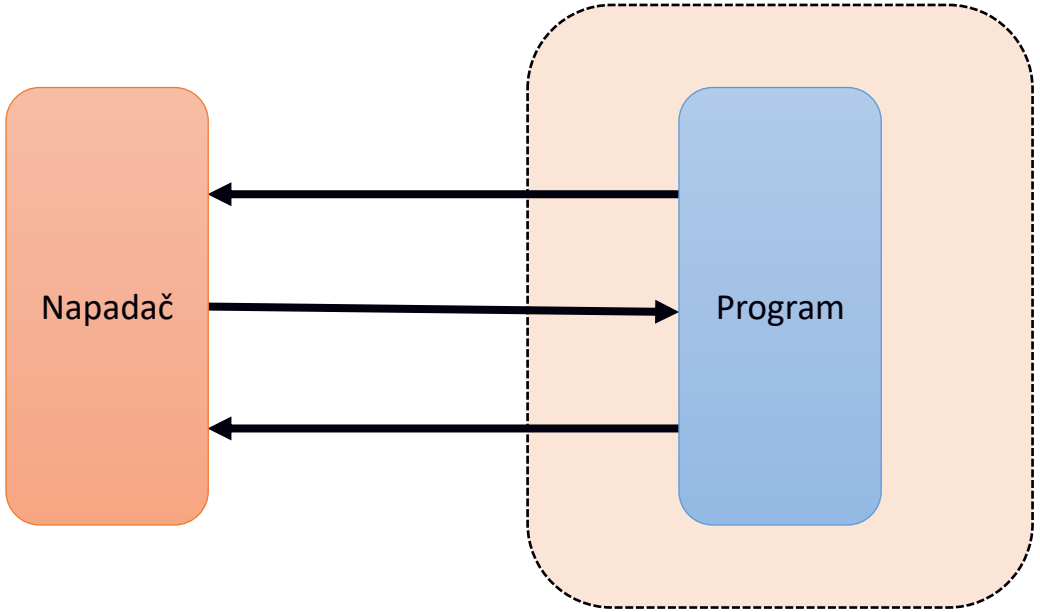
```
int check_password(char *s) {
  char pwd[21] = "super_tajna_lozinka!";
  return strcmp(pwd, s);
}

int my_main(void) {
  int n, rez;
  scanf("%d", &n);
  // izracunaj apsol
  if (n < 0) {
    rez = -1 * n;
  } else {
    rez = n;
  }
  printf("Ulaz: %d Rezultat: %d", n, rez);
  return 0;
}

int main(int argc, char *argv[]) {
  check_password(argv[1]);
  my_main();
}
```

```
$ ./a.out blabla
Mrkva
Ulaz: 560032622 Rezultat: 560032622
$ python -c "print hex(560032622)[2:].decode('hex')"
!akn
```


Korisnik
Program
Molim jedan 32-bitni cijeli broj.
Mrkva.
Evo neka četiri bajta moje memorije.

Pretpostavke

- Program se izvršava u privilegiranom okružju u odnosu na napadača.
  - Program je na jednom računalu, napadač na drugom.
  - Program ima administratorske ovlasti, napadač je obični korisnik.
  - Program je hipervizor, napadač ima kontrolu nad virtualnom mašinom.
  - …
- Ciljevi napadača mogu biti:
  - Dohvaćanje povjerljivih informacija.
  - Preuzimanje kontrole odnosno *eskalacija privilegija*.
  - …



Defenzivno programiranje

- „Obično” programiranje:
  - *Program u razumnim okolnostima, za razumne ulaze treba davati razumne izlaze.*
- Defenzivno programiranje:
  - *Čak i u potpuno nerazumnim okolnostima i za potpuno nerazumne ulaze, program se ne smije ponašati nerazumno.*
- Potreban je konzervativan (paranoičan) pristup prilikom:
  - … interakcije s korisnikom i svim dijelovima sustava izvan direktne kontrole programera.
  - … formiranja pretpostavki o okolnostima u kojima će se programski kod koristiti.
- Nije nužan:
  - … elegantan oporavak od svih mogućih pogrešaka.

Naši ciljevi u ovom predavanju

- Potrebno je razumjeti napade kako bi shvatili rizike i oblikovali obrane.
- Primjeri čestih i opasnih ranjivosti programske podrške!
  - Provjera ispravnosti ulaza *(input validation)*
  - Napadi prelijevanjem međuspremnika (*buffer overflow attacks)*
  - Interakcija s okolinom i operacijskim sustavom

Rank	ID	Name	Score	2020 Rank Change
[1]	CWE-787	Out-of-bounds Write	65.93	+1
[2]	CWE-79	Improper Neutralization of Input During Web Page Generation ('Cross-site Scripting')	46.84	-1
[3]	CWE-125	Out-of-bounds Read	24.9	+1
[4]	CWE-20	Improper Input Validation	20.47	-1
[5]	CWE-78	Improper Neutralization of Special Elements used in an OS Command ('OS Command Injection')	19.55	+5
[6]	CWE-89	Improper Neutralization of Special Elements used in an SQL Command ('SQL Injection')	19.54	0
[7]	CWE-416	Use After Free	16.83	+1
[8]	CWE-22	Improper Limitation of a Pathname to a Restricted Directory ('Path Traversal')	14.69	+4
[9]	CWE-352	Cross-Site Request Forgery (CSRF)	14.46	0
[10]	CWE-434	Unrestricted Upload of File with Dangerous Type	8.45	+5
[11]	CWE-306	Missing Authentication for Critical Function	7.93	+13
[12]	CWE-190	Integer Overflow or Wraparound	7.12	-1
[13]	CWE-502	Deserialization of Untrusted Data	6.71	+8
[14]	CWE-287	Improper Authentication	6.58	0
[15]	CWE-476	NULL Pointer Dereference	6.54	-2
[16]	CWE-798	Use of Hard-coded Credentials	6.27	+4
[17]	CWE-119	Improper Restriction of Operations within the Bounds of a Memory Buffer	5.84	-12
[18]	CWE-862	Missing Authorization	5.47	+7
[19]	CWE-276	Incorrect Default Permissions	5.09	+22
[20]	CWE-200	Exposure of Sensitive Information to an Unauthorized Actor	4.74	-13
[21]	CWE-522	Insufficiently Protected Credentials	4.21	-3
[22]	CWE-732	Incorrect Permission Assignment for Critical Resource	4.2	-6
[23]	CWE-611	Improper Restriction of XML External Entity Reference	4.02	-4
[24]	CWE-918	Server-Side Request Forgery (SSRF)	3.78	+3
[25]	CWE-77	Improper Neutralization of Special Elements used in a Command ('Command Injection')	3.58	+6

Izvor: 2021 CWE Top 25 Most Dangerous Software Weaknesses

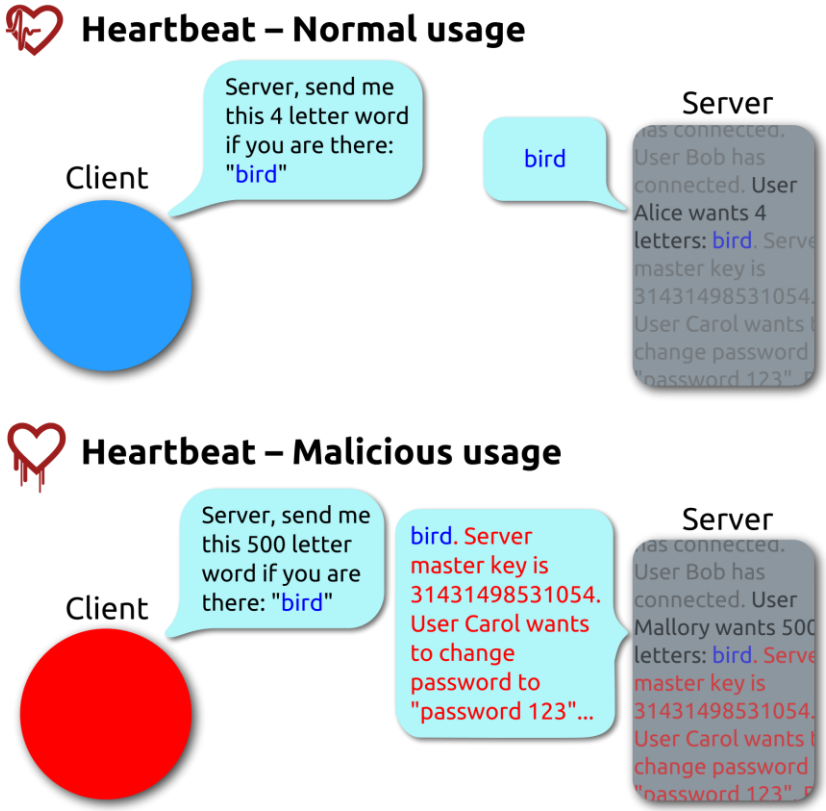
Sigurnost programske podrške – ranjivosti i napadi

Provjera ispravnosti ulaza

Provjera ispravnosti ulaza

- Provjera sintakse ulaza
  - Je li ulaz ispravne veličine?
    - Primjer ranjivosti: Prelijevanje međuspremnika
  - Je li ulaz ispravno formatiran?
    - Primjer ranjivosti: Razni *injection* napadi
- Provjera semantike (značenja) ulaza
  - Ima li ulaz smisla u kontekstu programa?
    - Primjer ranjivosti: *Heartbleed*

Primjer: *Heartbleed* ranjivost (CVE-2014-0160)



Izvor: wikipedia.org

- Ranjivost u OpenSSL kriptografskoj biblioteci.
- Moguće doći do sadržaja memorije web poslužitelja koji koristi TLS protokol.
  - Zaporke, kriptografski ključevi, kolačići, …
- Jedna od posljedica: https://www.coreinfrastructure.org/

Primjer: *Heartbleed* ranjivost – izvorni kod

26 ssl/d1_both.c

```
@@ -1459,26 +1459,36 @@ dtls1_process_heartbeat(SSL *s)
        unsigned int payload;
        unsigned int padding = 16; /* Use minimum padding */

-       /* Read type and payload length first */
-       hbtype = *p++;
-       n2s(p, payload);
-       pl = p;
-
        if (s->msg_callback)
                s->msg_callback(0, s->version, TLS1_RT_HEARTBEAT,
                        &s->s3->rrec.data[0], s->s3->rrec.length,
                        s, s->msg_callback_arg);

+       /* Read type and payload length first */
+       if (1 + 2 + 16 > s->s3->rrec.length)
+               return 0; /* silently discard */
+       hbtype = *p++;
+       n2s(p, payload);
+       if (1 + 2 + payload + 16 > s->s3->rrec.length)
```

Izvor: github.com/openssl/openssl/commit/96db9023b881d7cd9f379b0c154650d6c108e9a3

Primjer: *Command injection*

```
$userName = $_POST["user"];
$command = 'ls -l /home/' . $userName;
system($command);
```

Izvor: https://cwe.mitre.org/data/definitions/78.html

- Napadač pošalje ”;`rm -rf /`” kao parameter `user`.
- php skripta izvrši ”`ls -l /home/;rm -rf /`”

Izazov: parsiranje je teško ☺

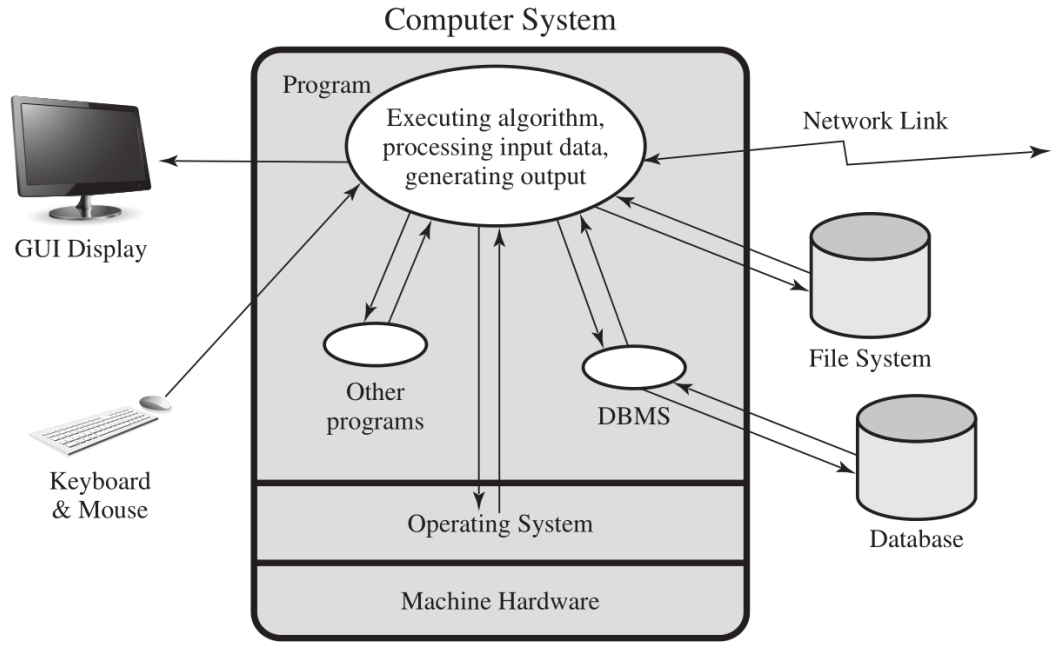
- Primjer: Kako pomoću regularnog izraza zabraniti *localhost* URI?

  http://localhost
  http://0.0.0.0
  http://127.0.0.1
  http://[::]
  http://[0000::1
  http://[0:0:0:0:0:ffff:127.0.0.1]
  http://2130706433
  http://017700000001
  http://0x7f000001/
  http://www.google.com@127.0.0.1

- Sintakse “jednostavnih” objekata (ime datoteke, putanja, email adresa, IP adresa, URI, …) su dosta komplicirane.
- Treba voditi računa o različitim jezicima, kodiranjima znakova.
- *Blacklist vs whitelist* pristup?
- Regularni izrazi?
- Preporuka: sve pretvarati u kanonski oblik pa onda provjeravati ispravnost?

Izazov: što je točno ulaz u program?

- Potrebno je odlučiti što su točno ulazi u vaš program i kojim komponentama (ne)možete vjerovati.
- Primjer: Ako pišete Python program, koji koristi Python biblioteku, koja koristi prevedenu C biblioteku, koja čita /etc/localtime prilikom inicijalizacije, je li ta datoteka ulaz u vaš program i može li joj se uvijek vjerovati?



Izvor: Stallings, Brown, Computer security: principles and practice

Sigurnost programske podrške – ranjivosti i napadi

Preljev međuspremnika *(buffer overflow)*

Buffer overflow napadi – crtice iz povijesti

- Morris crv (1988)
  - *buffer overflow* u *fingerd* servisu je jedan od načina širenja
- Smashing the Stack for Fun and Profit (1996)
  - http://phrack.org/issues/49/14.html
- Code Red crv (2001)
  - *buffer overflow* u Microsoft IIS 5.0, oko 359000 zaraženih računala
- The Slammer crv (2003)
  - *buffer overflow* u Microsoft SQL Server 2000, deseci tisuća zaraženih računala u prvih 10 minuta
- Iphone ranjivosti (2010-te)
  - Steaks4uce, SHAtter (*heap overflow, use-after-free*)

- Konverzijska specifikacija %s omogućuje čitanje niza znakova do pojave prve praznine, oznake novog retka ili tabulatora

```
char ime[10 + 1], prezime[10 + 1];
scanf("%s %s", ime, prezime);
printf("%s, %s", prezime, ime);
```

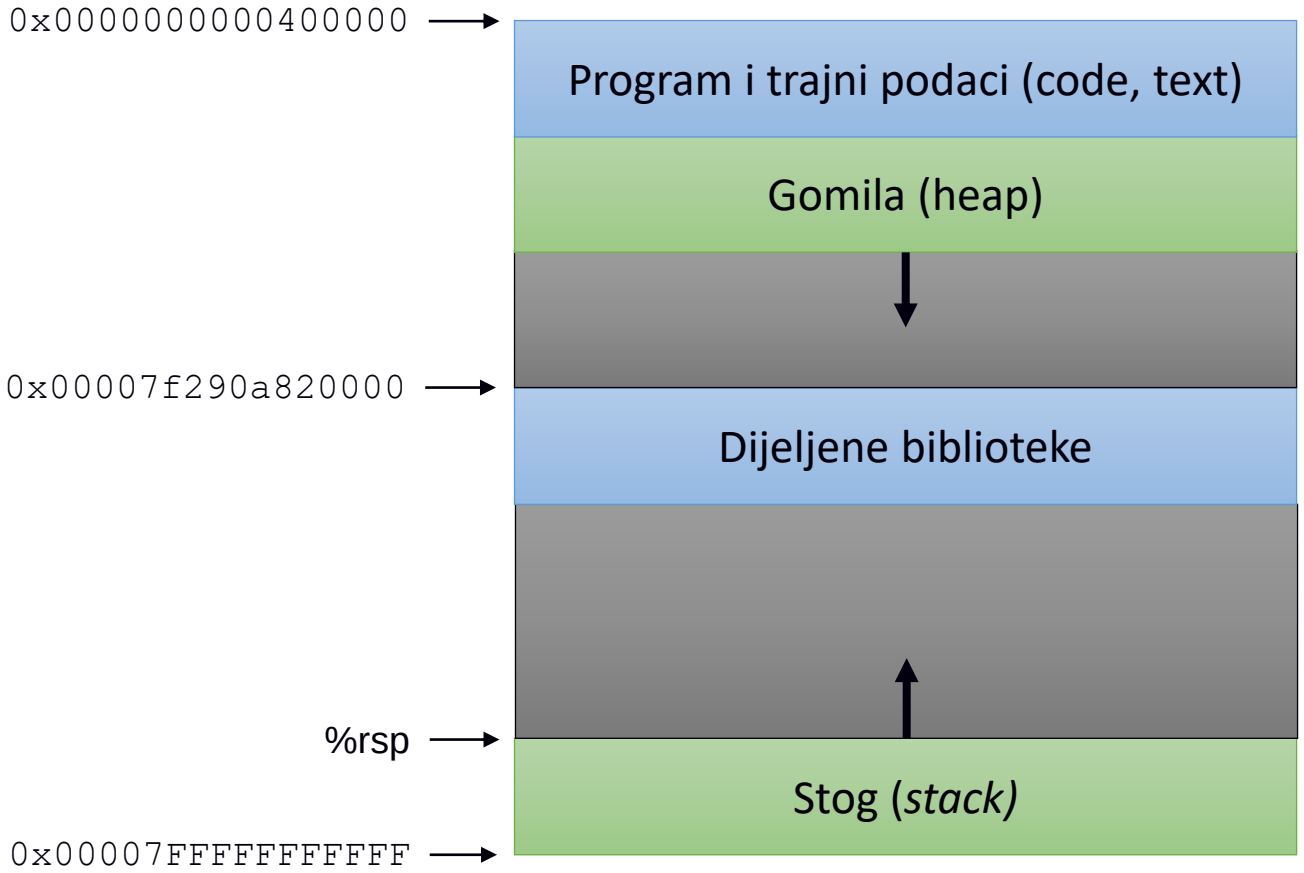
```
Anamarija Horvat Novak↵
Horvat, Anamarija
```

- Čitanje konverzijskom specifikacijom %s na kraj niza ugrađuje '\0'
- Čitanje niza znakova pomoću funkcije scanf i konverzijske specifikacije %s je potencijalno opasno
  - što će se dogoditi ako korisnik upiše predugo ime ili prezime (u odnosu na duljinu niza znakova navedenu u definiciji)

```
Anamarija Horvat-Novak↵
```

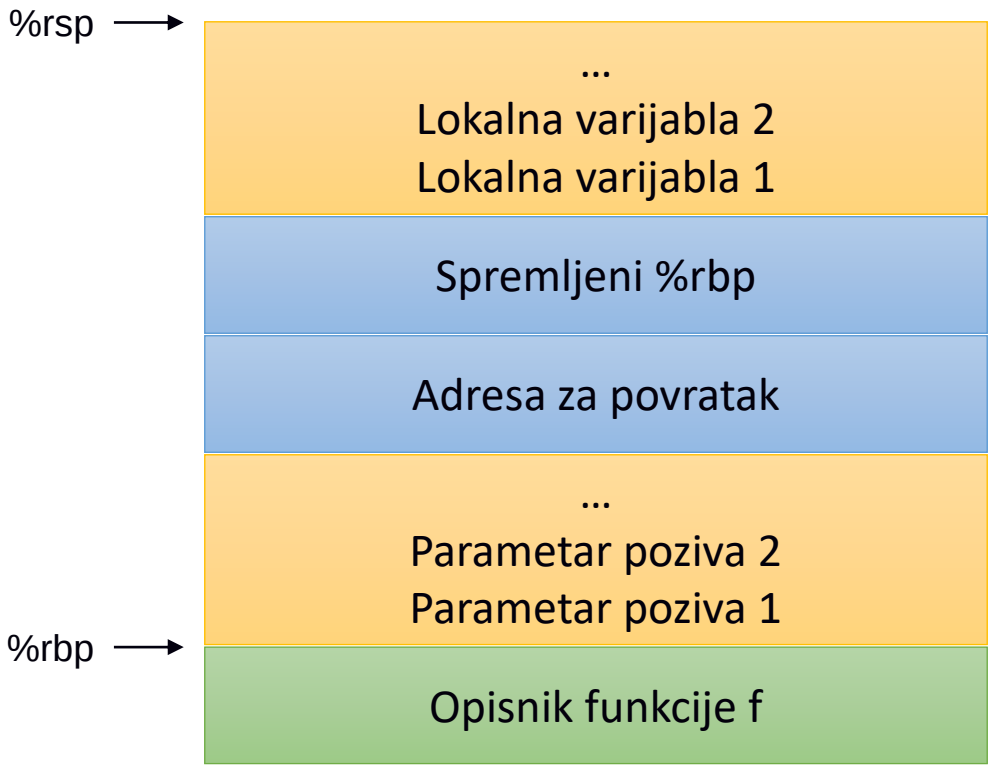
Izvor: FER, Uvod u programiranje 2019./2020.

Memorijski prostor tipičnog procesa (Linux x86-64, pojednostavljeno)



- Na stog se spremaju opisnici funkcija (*call frame)* prilikom poziva
- Stog raste prema gore (prema manjim adresama)
- Za dinamički alociranu memoriju se koristi gomila (mislimo i na područja alocirana kroz mmap)

Stog i pozivanje funkcija (cdecl, pojednostavljeno)



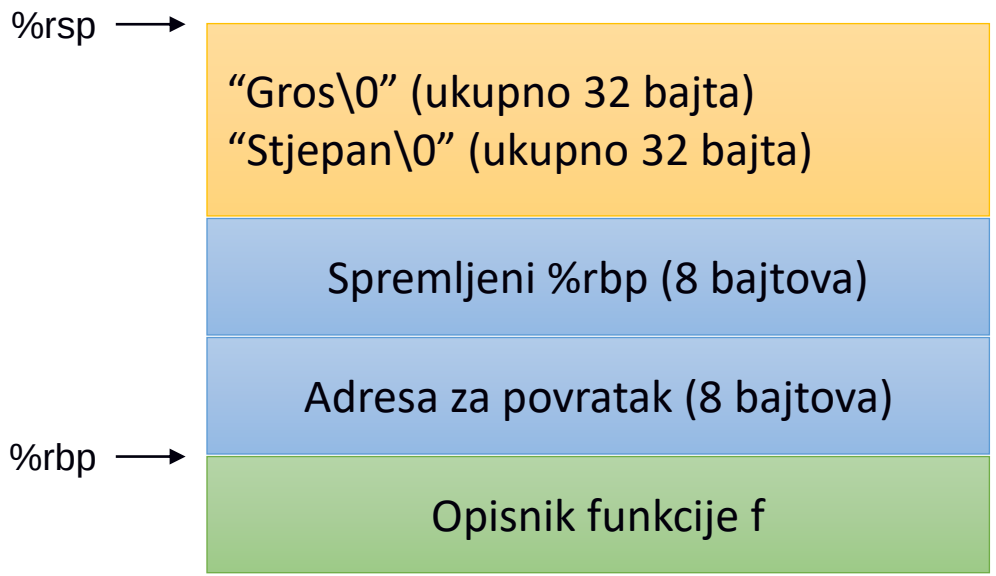
Funkcija f zove funkciju g

1. f stavi vrijednosti parametara na stog
2. instrukcija `call` spremi adresu trenutne instrukcije (%rip) na stog da bi znali gdje nastaviti s izvođenjem kad g završi
3. g spremi bazu starog opisnika (%rbp) na stog i napravi mjesto na stogu za novi opisnik (smanjivanjem %rsp-a)
4. g se izvršava i koristi opisnik za lokalne varijable
5. g „izbriše” svoj opisnik (prilagođavanjem %rsp-a i čitanjem %rbp-a)
6. instrukcija `ret` pročita adresu sa vrha stoga i nastavi izvođenje od te adrese.

Normalno izvršavanje

```c
#include <stdio.h>

int main() {
  char ime[31 + 1], prezime[31 + 1];
  scanf("%s %s", ime, prezime);
  printf("%s, %s", prezime, ime);
  return 0;
}
```

```
$ echo “Stjepan Gros” | ./a.out
Stjepan Gros
```



Prelijevanje međuspremnika

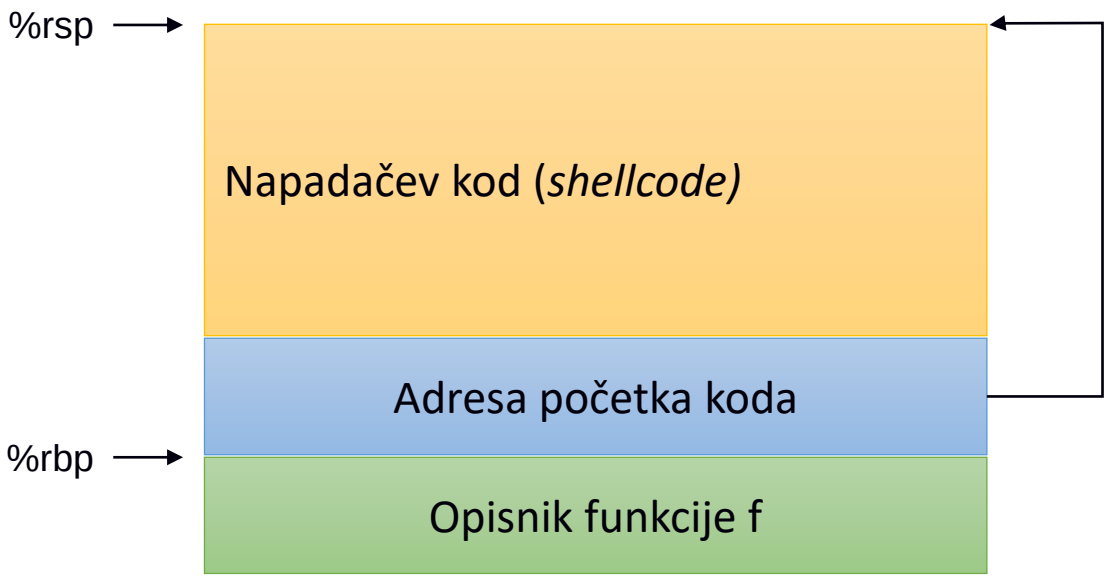
```
$ echo "Stjepan A<80 puta>" | ./a.out
Segmentation fault (core dumped)
```

- Prepisali smo adresu za povratak na stogu!
- Nakon instrukcije `ret` program je pokušao nastaviti izvršavanje na adresi koja odgovara nizu znakova „AAAAAAAA” (0x4141414141414141)!

Prelijevanje međuspremnika – iskorištavanje ranjivosti

```
$ echo "Stjepan <kod>..<adresa>" | ./a.out
…root password changed…
```

- Napadač kao ulaz daje strojni kod koji želi da se izvrši te njegovu očekivanu adresu
- Ulaz je pažljivo namješten tako da adresa točno prepiše adresu za povratak na spremljenu na stogu.
- Nakon instrukcije `ret` izvršava se kod napadača!



Shellcode

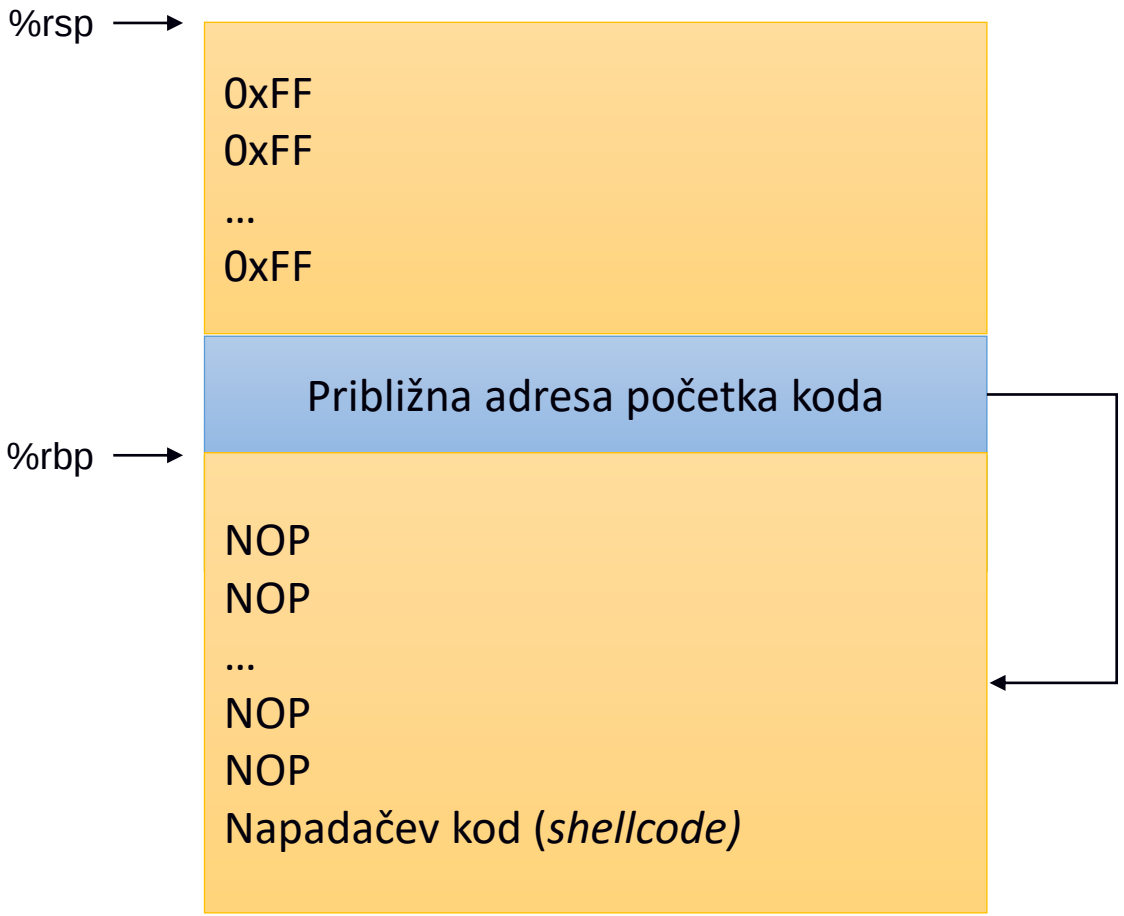
- Najčešće kratak strojni kod koji omogućuje ili olakšava napadaču postizanje cilja.
- Postoji puno lako dostupnih primjera za razne ciljeve i okoline.

- Linux/x86-64 - Dynamic null-free reverse TCP shell - 65 bytes *by Philippe Dugre*
- Linux/x86-64 - execveat("/bin//sh") - 29 bytes *by ZadYree, vaelio and DaShrooms*
- Linux/x86-64 - Add map in /etc/hosts file - 110 bytes *by Osanda Malith Jayathissa*
- Linux/x86-64 - Connect Back Shellcode - 139 bytes *by MadMouse*
- Linux/x86-64 - access() Egghunter - 49 bytes *by Doreth.Z10*
- Linux/x86-64 - Shutdown - 64 bytes *by Keyman*
- Linux/x86-64 - Read password - 105 bytes *by Keyman*
- Linux/x86-64 - Password Protected Reverse Shell - 136 bytes *by Keyman*
- Linux/x86-64 - Password Protected Bind Shell - 147 bytes *by Keyman*
- Linux/x86-64 - Add root - Polymorphic - 273 bytes *by Keyman*
- Linux/x86-64 - Bind TCP stager with egghunter - 157 bytes *by Christophe G*
- Linux/x86-64 - Add user and password with open,write,close - 358 bytes *by Christophe G*
- Linux/x86-64 - Add user and password with echo cmd - 273 bytes *by Christophe G*
- Linux/x86-64 - Read /etc/passwd - 82 bytes *by Mr.Un1k0d3r*
- Linux/x86-64 - shutdown -h now - 65 bytes *by Osanda Malith Jayathissa*
- Linux/x86-64 - TCP Bind 4444 with password - 173 bytes *by Christophe G*

Izvor: shell-storm.org

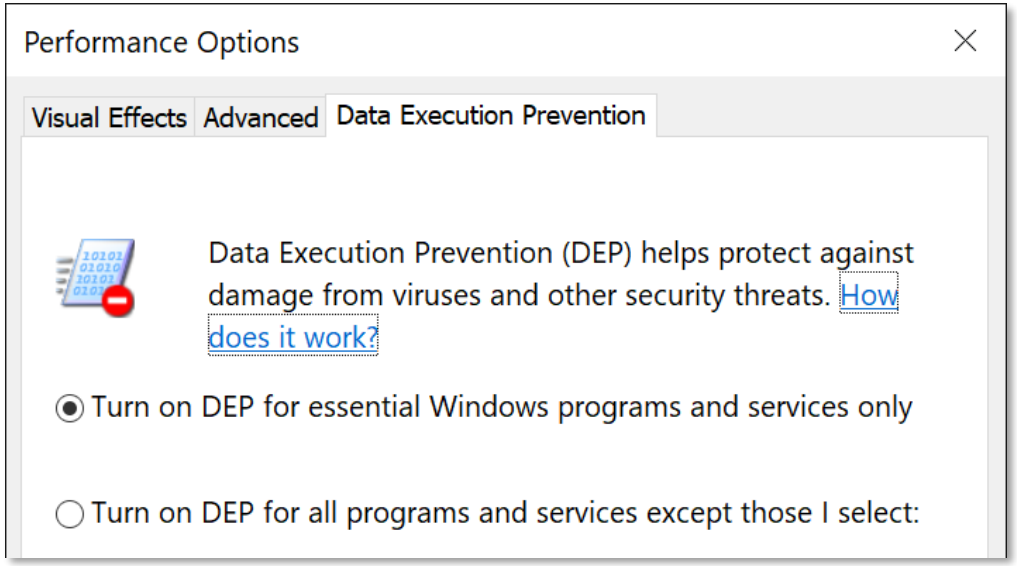
Prelijevanje međuspremnika – kako pogoditi adrese?

- Napadač na temelju strojnog koda programa može znati točno kako izgleda opisnik.
- Međutim, napadač ne može skroz pouzdano predvidjeti točnu adresu vrha stoga.
- Rješenje: prije samog koda staviti dugačak niz `nop` instrukcija (ili drugih instrukcija koje ništa ne rade) – sada je dovoljno da napadač pogodi *približnu* adresu koda.
- Niz `nop` instrukcija se naziva NOP sanjke (*NOP sled)*



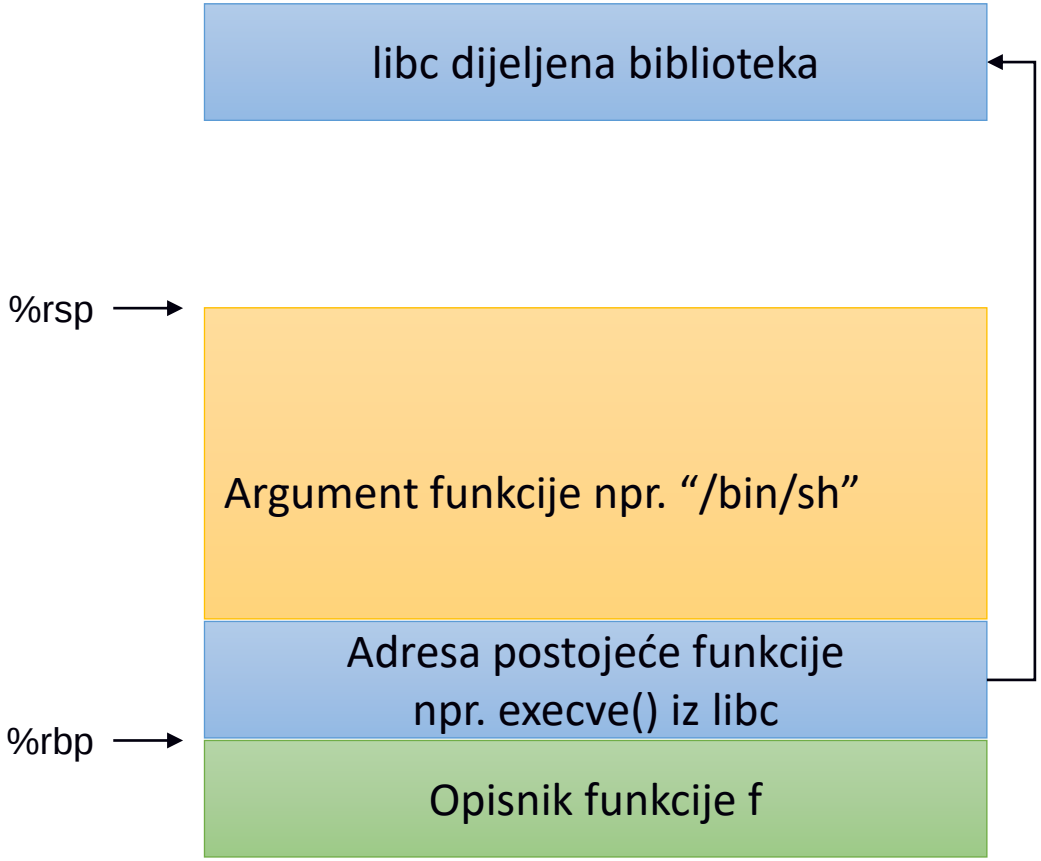
Obrana: *write xor execute*

- Razlikujemo podatke i programe: procesoru kažemo da neke memorijske stranice sadrže podatke te da se *ne smiju* izvršavati (NX bit).
- Općenito, ako se u memorijsku stranica može pisati (*writable)* onda se nikad ne može izvršavati kao kod (*executable*) – i obratno
- Većina modernih sustava (Windows, Linux, IOS) ima uključenu ovu obranu.



Zaobiliženje NX bita – *return-to-libc* napad

- Napadač prepisuje stog tako da se poziva postojeća funkcija
- Dodatno, napadač na prepisani stog stavlja i argumente za tu funkciju po njegovoj želji (pojednostavljeno jer će u praksi prvih par argumenata funkcije biti u registrima).
- Generalizacija ove ideje je *Return Oriented Programming.*
  - https://doi.org/10.1145/2133375.2133377



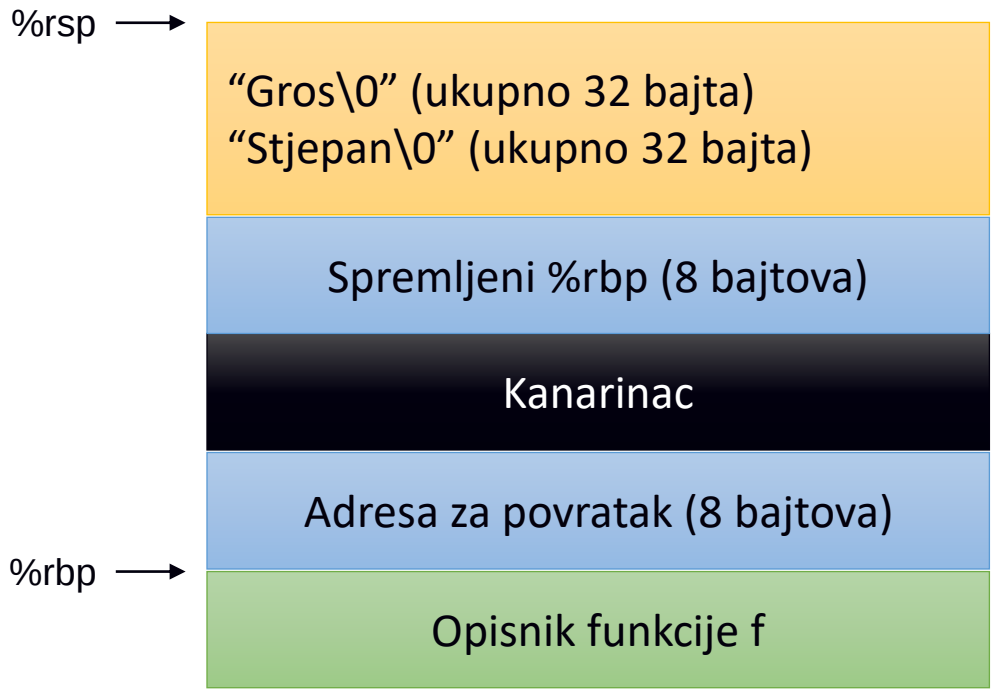
Obrana: randomizacija memorijskog prostora

- *Address space layout randomization* (ASLR)
- Adrese memorijskih stranica su (djelomično) slučajno odabrane.
- Većina modernih sustava (Windows, Linux, IOS) ima uključenu neku varijantu ove obrane.
- U 32-bitnim sustavima obrana nije efikasna zbog malo moguće entropije.

```
650:   ./a.out
000055b6d43fc000      4K r-x-- a.out
000055b6d45fc000      4K r---- a.out
000055b6d45fd000      4K rw--- a.out
000055b6d4f70000    132K rw---   [ anon ]
00007fd34e3b1000    104K r-x-- libpthread-2.27.so
00007fd34e3cb000   2044K ----- libpthread-2.27.so
00007fd34e5ca000      4K r---- libpthread-2.27.so
00007fd34e5cb000      4K rw--- libpthread-2.27.so
00007fd34e5cc000     16K rw---   [ anon ]
00007fd34e5d0000     12K r-x-- libdl-2.27.so
00007fd34e5d3000   2044K ----- libdl-2.27.so
00007fd34e7d2000      4K r---- libdl-2.27.so
00007fd34e7d3000      4K rw--- libdl-2.27.so
00007fd34e7d4000   1948K r-x-- libc-2.27.so
00007fd34e9bb000   2048K ----- libc-2.27.so
00007fd34ebbb000     16K r---- libc-2.27.so
00007fd34ebbf000      8K rw--- libc-2.27.so
00007fd34ebc1000     16K rw---   [ anon ]
00007fd34ebc5000     24K r-x-- libgtk3-nocsd.so.0
00007fd34ebcb000   2044K ----- libgtk3-nocsd.so.0
00007fd34edca000      4K r---- libgtk3-nocsd.so.0
00007fd34edcb000      4K rw--- libgtk3-nocsd.so.0
00007fd34edcc000    164K r-x-- ld-2.27.so
00007fd34efd1000     16K rw---   [ anon ]
00007fd34eff5000      4K r---- ld-2.27.so
00007fd34eff6000      4K rw--- ld-2.27.so
00007fd34eff7000      4K rw---   [ anon ]
00007ffee0ee1000    132K rw---   [ stack ]
00007ffee0f17000     12K r----   [ anon ]
00007ffee0f1a000      8K r-x--   [ anon ]
ffffffffff600000      4K r-x--   [ anon ]
 total            10840K
```

Obrana: kanarinci na stogu (*stack canaries*)

- Prevoditelj generira kod koji
  - Prilikom pozivanja funkcije stavlja na stog određenu vrijednost nepoznatu napadaču.
  - Prije završetka funkcije provjerava je li točno ta vrijednost još uvijek na stogu.



Ostali slični napadi

- Preljev međuspremnika u gomili (*heap overflow)*
  - Može rezultirati izvršavanjem proizvoljnog koda, *Heap spraying* tehnika
- Korištenje dealocirane memorije (*use-after-free)*
  - Može rezultirati izvršavanjem proizvoljnog koda
- Preljev cijelih brojeva (*integer overflow)*
  - Zaobilaženje provjera
- Ranjivosti kod formatiranja (*string format vulnerabilities*)
  - Curenje informacija, pisanje proizvoljnih podataka u memoriju

Kako spriječiti *buffer overflow* napade?

- Ne koristiti nesigurne libc funkcije
  - scanf, gets, strcpy, strcmp, strncat, …
- Alati za analizu koda (Coverity)
- Pisati programe u tipiziranom „memorijski sigurnom” programskom jeziku (npr. Rust, Go za sistemsku programsku podršku, Java za aplikacije).