

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za matematiko in fiziko

Finančni praktikum

Največje neodvisne množice z lokalnim  
iskanjem

*Avtorja:*

Jaka Mrak

Žiga Gartner

*Mentorja:*

prof. dr. Sergio CABELLO

doc. dr. Janoš VIDALI

Ljubljana, 10. januar 2022

# Kazalo

Slike	1
1 Navodilo	2
2 Opis problema	2
3 Opis dela	3
3.1 Generiranje podatkov . . . . .	3
3.2 Algoritmi . . . . .	3
3.2.1 Algoritem <i>CLP</i> . . . . .	3
3.2.2 Algoritem <i>nakljucni_MIS</i> ( $G$ ) . . . . .	3
3.2.3 Algoritem <i>lokalno_iskanje</i> ( $G, I$ ) . . . . .	4
3.3 Analiza rezultatov . . . . .	4
3.3.1 Analiza algoritmov na grafih $G(30, 0.3)$ . . . . .	4
3.3.2 Analiza izboljšanih algoritmov na grafih $G(30, 0.3)$ . . . . .	6
3.3.3 Primerjava algoritmov na grafih s konstantno verjetnostjo $p$ in spre-	
menljivim številom vozlišč $n$ . . . . .	8
3.3.4 Primerjava algoritmov na grafih s konstantnim številom vozlišč $n$ in	
s spremenljivo verjetnostjo $p$ . . . . .	9
4 Zaključek	10
Literatura	11

## Slike

1	Moči neodvisnih množic za grafe $G(30, 0.3)$ . . . . .	5
2	Časovne zahtevnosti algoritmov za $G(30, 0.3)$ . . . . .	5
3	Odstopanja rešitev lokalnega iskanja do CLP. . . . .	6
4	Povprečne vrednosti rezultatov posameznih algoritmov . . . . .	6
5	Vrednosti rezultatov izboljšanih posameznih algoritmov . . . . .	7
6	Časovne zahtevnosti izboljšanih posameznih algoritmov . . . . .	8
7	Povprečne vrednosti rezultatov izboljšanih posameznih algoritmov . . . . .	8

# 1 Navodilo

Naloga je iskanje največje neodvisne množice v grafu  $G = (V, E)$  s pomočjo celoštevilskega linearnega programiranja. Velike neodvisne množice v grafu lahko poiščemo s pomočjo metode lokalnega iskanja. Začnemo s poljubno neodvisno množico  $U \subseteq V$ , kjer  $k$  vozlišč nadomestimo s  $k + 1$  vozlišči tako, da ohranjamo neodvisnost množice  $U$ . Konstanta  $k$  je dana na začetku. Primerjali bomo metodi lokalnega iskanja in optimalne rešitve ter primerjali njune rešitve za nekatere preproste grafe.

## 2 Opis problema

**Definicija 1.** Naj bo  $G = (V, E)$  graf. **Neodvisna množica**  $U$ , v grafu  $G$ , je taka podmnožica množice vozlišč  $V$ , kjer poljubni dve vozlišči iz množice  $U$  nista sosednji. **Maksimalna neodvisna množica** v grafu  $G$  pa je taka neodvisna množica, kjer ne obstaja vozlišče  $v \in V$  in  $v \notin U$ , ki bi ga lahko dodali množici  $U$  in pri tem ohranili neodvisnost množice  $U$ . Torej je neodvisna množica  $U$  največja taka, če velja ena od naslednjih dveh lastnosti:

1.  $v \in U$
2.  $S(v) \cap U \neq \emptyset$ , kjer je  $S(v)$  množica sosedov  $v$ .

**Največja neodvisna množica** je neodvisna množica, največje možne velikosti, za dan graf  $G$ . Velikosti največje neodvisne množice, za graf  $G$ , pa pravimo **neodvisnostno število** in pogosto označimo  $\alpha(G)$ .

**Definicija 2.** Celoštevilski linearni program v standardni obliki je dan z matriko  $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ , vektorjem  $b \in \mathbb{R}^m$  in vektorjem  $c \in \mathbb{R}^n$ . Iščemo

$$\max \langle c, x \rangle,$$

da bodo zadoščeni pogoji

$$Ax \leq b, x \geq 0,$$

kjer je  $x \in \mathbb{Z}^n$ .

**Posledica 1.** Problem največje neodvisne množice v grafu  $G = (V, E)$  lahko s celoštevilskim linearnim programiranjem modeliramo na sledeč način:

$$\max \sum_{v \in V} x_v,$$

da velja:

$$x_v + x_w \leq 1 \text{ za } \forall vw \in E,$$

$$x_v \in \{0, 1\}$$

$$x_u = \begin{cases} 1, & \text{za } u \in U \\ 0, & \text{za } u \notin U \end{cases}, \text{ } U \text{ neodvisna množica v grafu } G.$$

Največjo neodvisno množico v množici vseh neodvisnih podmnožic grafa  $G = (V, E)$  bomo iskali s pomočjo celoštevilskega linearnega programiranja in lokalnega iskanja. **Lokalno iskanje** temelji na izbiri začetne neodvisne podmnožice vozlišč  $U \subset V$  v kateri  $k$  vozlišč zamenjamo s  $k + 1$  vozlišči in pri tem ohranjamo neodvisnost množice  $U$ .

## 3 Opis dela

V nadaljevanju bomo največje/maksimalne neodvisne množice iskali s pomočjo *CLP* v Sage in s pomočjo implementiranega algoritma *nakljucni\_MIS(G)*, kasneje izboljšanega z lokalnim iskanjem. Algoritme bomo izvajali na grafih, generiranih s pomočjo Erdős-Rényijevega  $G(n, p)$  modela. Primerjali bomo maksimalne (ali pa največje) neodvisne množice, ki jih algoritmi poiščejo, časovno zahtevnost algoritmov, kasneje pa še, kako vpliva spreminjanje števila vozlišč in verjetnosti, v modelu, na velikost maksimalne (ali pa največje) neodvisne množice in na časovno zahtevnost algoritmov. Za reševanje problema smo uporabljali programska jezika *Sage* in *Python*, kjer sva si pomagala še s knjižnicami *NetworkX*, *Numpy*, *Pandas*, *JSON* in *Time*. Za vizualizacijo podatkov smo uporabili *R*.

### 3.1 Generiranje podatkov

Kot omenjeno, bomo grafe generirali s pomočjo Erdős-Rényijevega  $G(n, p)$  modela, kjer podamo algoritmu parameter  $n$  za število vozlišč in  $p$  za verjetnost povezave med poljubnima vozliščema v grafu.

**Definicija 3.** *Erdős-Rényijev model  $G(n, p)$  generira graf z  $n$  naključno povezanimi vozlišči. Vsaka povezava je v graf vključena neodvisno, z verjetnostjo  $p$ .*

Generirali bomo grafe s konstantima vrednostma  $(n, p)$  nato z naraščajočim  $n$  in konstantnim  $p$  in nazadnje še s konstantim  $n$  in naraščajočim  $p$ . Za generacijo podatkov v Pythonu bomo uporabili knjižnico *NetworkX*. Da bomo lahko grafe uporabljali še v okolju *Sage*, bomo le-te, s funkcijo *NetworkX.to\_dict\_of\_lists(graf)*, pretvorili v slovarje seznamov. Grafe, na katerih bomo izvajali algoritme, bomo shranili v *JSON* datoteke, da imamo evidenco na kakšnih grafih smo izvajali algoritme.

### 3.2 Algoritmi

Za iskanje maksimalne neodvisne množice grafa  $G = (V, E)$  smo implementirali algoritem *nakljucni\_MIS(G)*, čigar rešitev bomo poizkušali izboljšati še z algoritmom *lokalno\_iskanje(G, I)*. Oba algoritma bosta kot argument sprejela graf  $G$ , algoritem *lokalno\_iskanje(G, I)* pa še neko maksimalno neodvisno množico  $I$  grafa  $G$ . Poleg tega sva največje neodvisne množice iskala še s *CLP* prilagojenim za naš problem.

#### 3.2.1 Algoritem *CLP*

---

**Algoritem 1** *CLP(G)*

---

- 1:  $\max \sum_{v \in V} x_v$
  - 2: da velja  $x_v + x_w \leq 1$  za  $\forall vw \in E$
  - 3:  $x_u = \begin{cases} 1, & \text{za } u \in U \\ 0, & \text{za } u \notin U \end{cases}$ ,  $U$  neodvisna množica v grafu  $G$ .
- 

#### 3.2.2 Algoritem *nakljucni\_MIS(G)*

---

**Algoritem 2** *naključni\_MIS*( $G$ )

---

```
1:  $I = \emptyset$ 
2:  $\forall v \in V$  dobi vrednost  $P(v) \in \text{permutacija}(V)$ 
3: if  $P(v) < P(w)$  za  $\forall w \in \text{sosedi}(v)$  then
4:    $I = I \cup v$ 
5:  $V' = V \setminus (I \cup \text{sosedi}(I))$ .
6:  $E' = E \setminus \text{povezave}(I)$ .
7: return  $I \cup \text{MIS}(G' = (V', E'))$ 
```

---

### 3.2.3 Algoritem *lokalno\_iskanje*( $G, I$ )

Najprej definirajmo  $\tau(v)$ , v algoritmu imenovan *tightness*( $v$ ).

**Definicija 4.** Naj bo  $G = (V, E)$  in  $v \in S \subset G$ . Potem je:

$$\tau(v) = |W|, \text{ kjer je } W = \{w | w \in (\text{sosedi}(v) \cap V \setminus S)\}.$$

Algoritem *lokalno\_iskanje*( $G, I$ ) sprejme graf  $G$  in neko maksimalno neodvisno množico  $I$  v grafu  $G$ . Nato vsakemu vozlišču  $v \in I$  priredi množico  $L(v) = \{w \in \text{sosedi}(v) | \tau(w) = 1\}$ . Nato v vseh možnih parih  $(x, y) \in L(v) \times L(v)$ , ki zadoščajo  $x \neq y$ , poišče prvega, da velja  $y \notin \text{sosedi}(x)$ , ko najde prvi tak par iz množice  $I$  odstrani vozlišče  $v$ , in množici  $I$  doda vozlišči  $x$  in  $y$ . Algoritem vrne maksimalno neodvisno množico z lokalnim iskanjem takrat, ko ne obstaja več vozlišče v neodvisni množici, ki bi ga lahko zamenjali z dvema.

```
import networkx as nx

def tightness(graf, množica, v):
    t = 0
    for w in graf.neighbors(v):
        if w in množica:
            t += 1
    else:
        pass
    return t

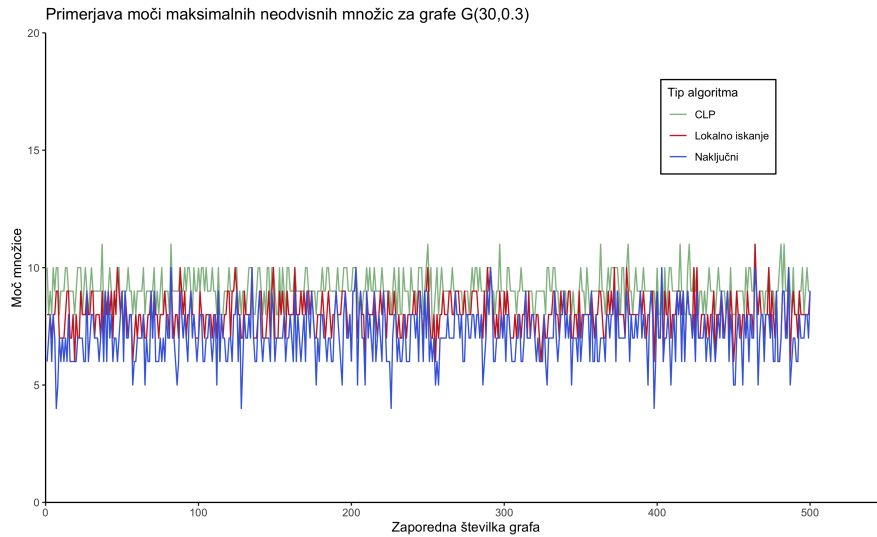
def lokalno_iskanje(G, I):
    I = list(I) # naredimo kopijo seznama I, oziroma ga pretvorimo, ce ni v obliki seznama
    J = [] # seznam vozlišc, ki niso bila nadomescena
    while I: # ponavljamo, dokler seznam ni prazen
        v = I.pop(0) # pobremo prvo vozlišce iz I
        L = [w for w in G.neighbors(v) if tightness(G, I+J, w) == 0]
        for i, vl in enumerate(L):
            for wl in L[i+1:]: # kopiramo iteratorja - da pregledamo vsak par enkrat
                if wl not in G.neighbors(vl):
                    I += [vl, wl] # dodamo vozlišci v I
                    break
            else: # notranja zanka je prisla do konca
                continue # poskusimo z drugim vl
            break # notranjo zanko smo prekinili, prekinimo se zunanjo
        else: # zunanja zanka je prisla do konca
            J.append(v) # vozlišca v nismo uspeli nadomestiti, pustimo ga v izhodu
    return J
```

## 3.3 Analiza rezultatov

### 3.3.1 Analiza algoritmov na grafih $G(30, 0.3)$

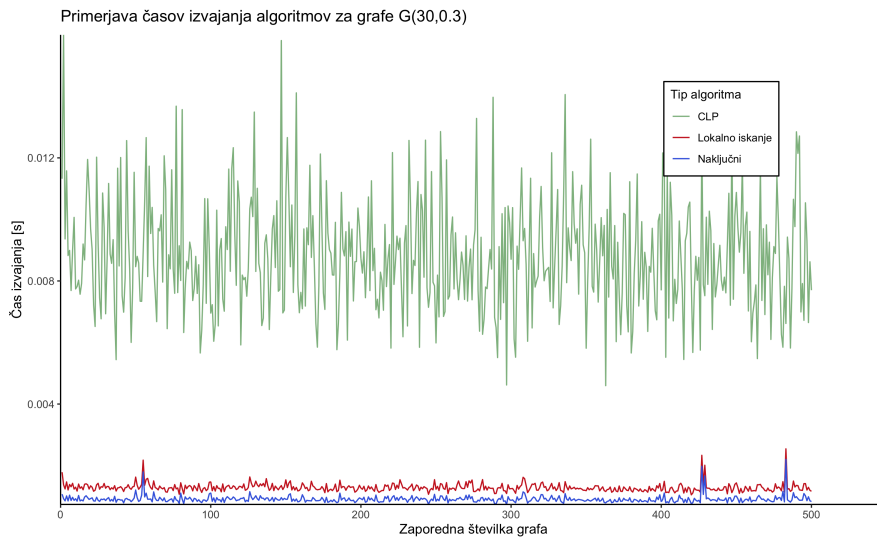
Najprej bomo primerjali algoritme na Erdős-Rényijevih  $G(30, 0.3)$  grafih. Na tak način sva generirala 500 grafov in na njih izvedla algoritma  $CLP(G)$ , *naključni\_MIS*( $G$ ), za vsak graf pa sva slednjega poskušala izboljšati še z algoritmom *lokalno\_iskanje*( $G, I$ ), ki poleg grafa  $G$  sprejme še  $I = \text{naključni\_MIS}(G)$ .

Opazimo, da neodvisne množice največjih moči najde  $CLP$ . Variacije moči neodvisnih množic, ki jih lahko vidimo na spodnjem grafu, so rezultat naključnosti pri generiranju  $G(30, 0.3)$  grafov. Od slučaja je namreč odvisno, kako bodo postavljene povezave v grafu  $G$ .



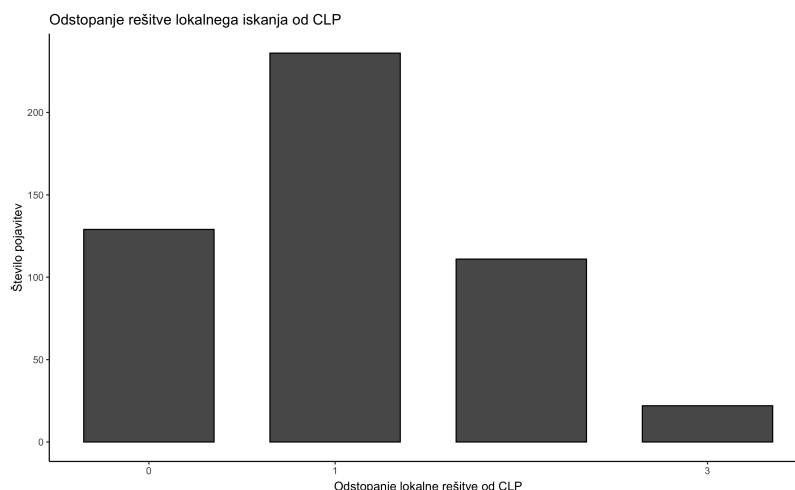
Slika 1: Moči neodvisnih množic za grafe  $G(30, 0.3)$

Kljub temu, da je, za generirane grafe, *CLP* najpogosteje vrnil najboljšo rešitev, lahko v naslednjem grafu vidimo njegovo slabost. *CLP* je namreč občutno počasnejši od preostalih dveh algoritmov.



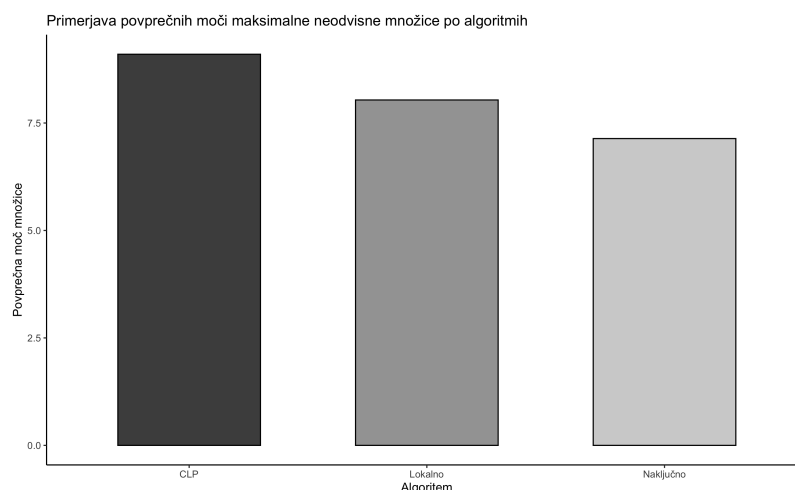
Slika 2: Časovne zahtevnosti algoritmov za  $G(30, 0.3)$

Poglejmo si sedaj še odstopanja rešitev *lokalnega\_iskanja* od rešitev dobljenih s *CLP*. Hitro pazimo, da je algoritem *lokalno\_iskanje* zelo učinkovit pri iskanju maksimalne neodvisne množice, saj velikokrt poišče neodvisno množico, ki je iste velikosti, kot največja neodvisna množica dobljena s *CLP*. Neodvisna množica, dobljena z *lokalnim\_iskanjem*, največkrat odstopa za eno vozlišče, od tiste dobljene s *CLP*, v veliko primerih se kot omenjeno ti popolnoma ujemata, najredkeje pa se razlikujeta za 3 vozlišča.



Slika 3: Odstopanja rešitev lokalnega iskanja do CLP.

Kot omenjeno, je maksimalne neodvisne množice z najvišjimi močmi vračal *CLP*, s povprečno močjo največje neodvisne množice 9. Druge največje množice je vračalo *lokalno.iskanje*, katerega množice so imele v povprečju 8 vozlišč, za eno več od povprečja moči neodvisnih množic najdenih z algoritmom *naključni\_MIS*. Rezultati so vidni na spodnjem grafu.

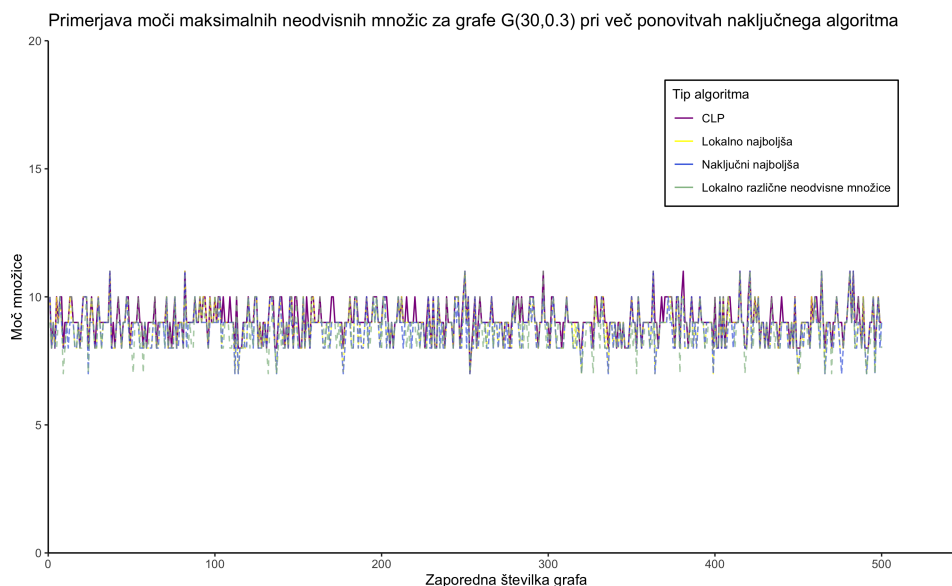


Slika 4: Povprečne vrednosti rezultatov posameznih algoritmov

### 3.3.2 Analiza izboljšanih algoritmov na grafih $G(30, 0.3)$

V nadaljevanju sva poskusila rezultat dobljen z *lokalnim.iskanjem* in algoritmom *naključni\_MIS* nekoliko izboljšati. Najprej sva za rešitev dobljeno z *naključni\_MIS* vzela najboljšo izmed dvajsetih simulacij za vsak graf, kar je na spodnjem grafu označeno z *Naključno najboljša*. Iz te dobljene neodvisne množice sva potem izhajala pri *lokalnem.iskanju* in rešitev označila kot *Lokalno najboljša*. Rešitev dobljena s *CLP* je še zmeraj enaka, sva pa dobila še maksimalne neodvisne množice na način, da sva algoritem *lokalno.iskanje* pognala na pet različnih začetnih neodvisnih množicah, dobljenih z *naključni\_MIS*. Na grafu je ta rešitev označena z *Lokalno različne neodvisne množice*. Na spodnjem grafu je razvidno, da sva na ta način dobila boljše rezultate kot z eno ponovitvijo *lokalnega.iskanja*,

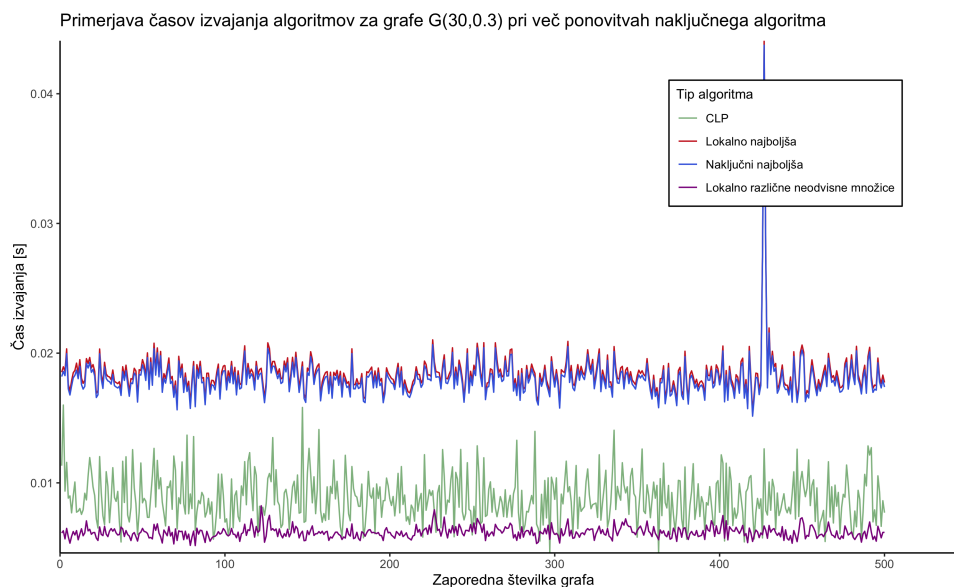
so pa še zmeraj rešitve dobljene s *CLP* najboljše, saj z le-tem v kolikor najdemo kakšno rešitev, gre za največjo neodvisno množico.



Slika 5: Vrednosti rezultatov izboljšanih posameznih algoritmov

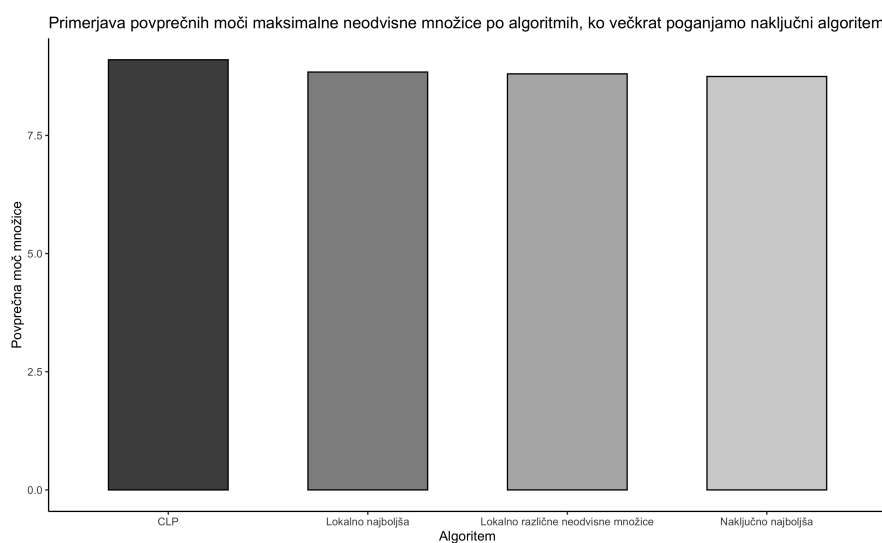
Za zgoraj opisane postopke sva nato izmerila še čase izvajanja. Časovno najbolj učinkovit algoritem je ponovno variacija *lokalnega iskanja*, kjer le-tega poženeva na pet različnih začetnih neodvisnih množicah. Sedaj je čas izvajanja tega algoritma nekoliko večji, vendar z njim dobimo rešitve, ki se zelo približajo rešitvam *CLP*. Če bi število začetnih neodvisnih množic še povečala, bi bili rezultati še boljši, vendar bi s tem naraščala tudi časovna zahtevnost. Vmes se pojavijo tudi kakšni izraziti skoki, ki pa jih lahko pripišemo slučaju, saj je čas izvajanja zelo odvisen od vrste grafa, na katerem se algoritem izvede. Ker grafe generirava naključno je prav to vzrok za opažene osamelce. Na drugi strani imamo sedaj priredbi algoritmov *naključni-MIS*, ko le-tega poženeva dvajsetkrat in vzamemo najboljšo rešitev ter algoritem še eno variacijo algoritma *lokalno iskanje*, kjer za začetno neodvisno množico vzameva prej omenjeno (najboljšo) rešitev iz *naključni-MIS*. Izkaže se, da imata prav ta dva postopka iskanja neodvisnih množic največjo časovno zahtevnost. Zanimivo pa je dejstvo, da kljub temu vrneta neodvisne množice najmanjših moči. Se pravi je ta pohlepen pristop, da bi od samega začetka *lokalno iskanje* izvajala na čim večji množici neučinkovit. Zaključimo lahko, da z večanjem začetne neodvisne množice algoritem *lokalno iskanje* vrača slabše rešitve, z večjim številom različnih začetnih neodvisnih množic pa *lokalno iskanje* vrne zelo primerljive rezultate kot *CLP*.





Slika 6: Časovne zahtevnosti izboljšanih posameznih algoritmov

Da bi se res transparentno prepričali, da v tem primeru najboljše rešitve v povprečju poiščeva z *Lokalno različne neodvisne množice*, ko naredimo algoritem *lokalno\_iskanje* na različnih začetnih neodvisnih množicah, sva izračunala povprečne moči, ki jih vračajo algoritmi. Na spodnjem grafu lahko to očitno opazimo.



Slika 7: Povprečne vrednosti rezultatov izboljšanih posameznih algoritmov

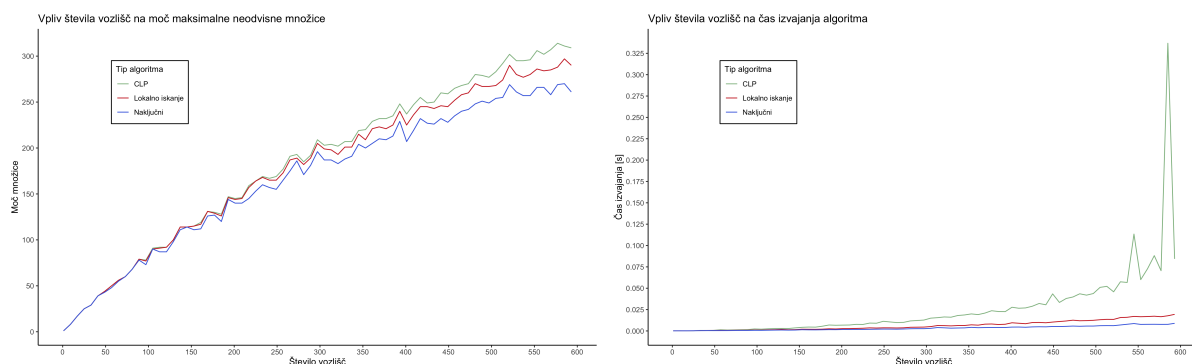
### 3.3.3 Primerjava algoritmov na grafih s konstantno verjetnostjo $p$ in spremenljivim številom vozlišč $n$

Drugo skupino grafov sva, tako kot prvo, generirala z Erdős-Rényijevim  $G(n, p)$  modelom, vendar pri tem spreminjala število vozlišč v grafih, verjetnost pa ohranila konstantno  $p = 0.005$ . Algoritme sva izvajala na grafih velikosti od 1 do 600 vozlišč. Ker je verjetnost konstantna in na rezultate nima precejšnjega vpliva, sva si lahko izbrala grafe na večjem

številih vozlišč ter pridobila več podatkov za bolj natančno analizo rezultatov.

Na grafu (a) si lahko ogledamo, kako se s povečevanjem števila vozlišč, spreminja moč maksimalnih neodvisnih množic. Pri konstantni verjetnosti  $p$ , se moč maksimalne neodvisne množice, v odvisnosti od moči množice vozlišč  $V$ , povečuje skoraj linearno, vendar moč maksimalnih neodvisnih množic dobljenih s *CLP* narašča hitreje od tistih pridobljenih z *naključni MIS* in *lokalnim iskanjem*. Opazimo tudi, da so rešitve vseh treh algoritmov v začetku, ko jih izvajamo na manjših grafih zelo primerljive kar smo opazili tudi v prejšnjem razdelu. Z večanjem števila vozlišč v grafu  $G$  vidno narašča tudi razlika med močmi najdenih neodvisnih množic. Razkorak je prvič bolj izrazit na grafu s približno 150 vozlišči. Lahko bi rekli da "napaka" narašča proporcionalno z rastjo množice vozlišč  $V$ .

Na grafu (b) ponovno opazimo največjo slabost iskanja maksimalne neodvisne množice s *CLP*, tj. časovno zahtevnost. Čas, porabljen za izvajanje *CLP*, je v odvisnosti od števila vozlišč v množici  $V$  naraščal eksponentno. Časovna zahtevnost algoritmov *naključni MIS* in *lokalnega iskanja* je prav tako naraščala, vendar občutno počasneje, kot pri *CLP*.



(a) Velikosti neodvisnih množic v odvisnosti od števila vozlišč  $n$  (b) preminjanje časovne zahtevnosti algoritmov v odvisnosti od števila vozlišč  $n$

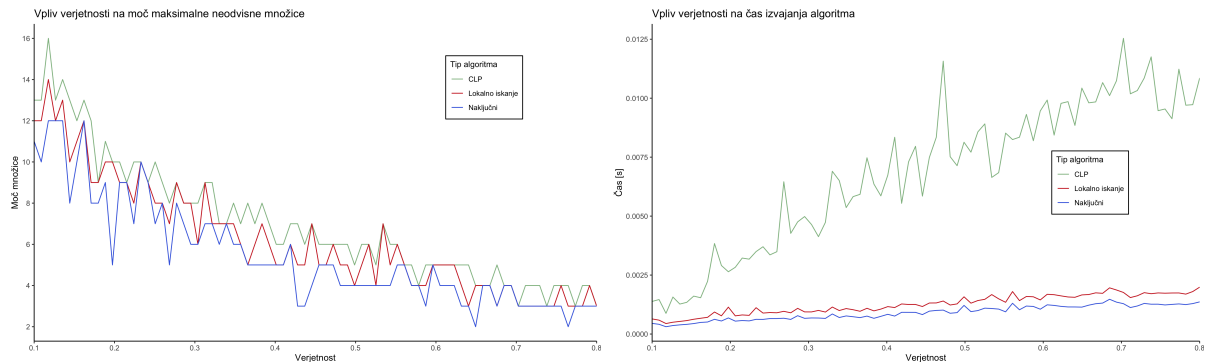
### 3.3.4 Primerjava algoritmov na grafih s konstantnim številom vozlišč $n$ in s spremenljivo verjetnostjo $p$

Tudi zadnjo skupino grafov sva generirala z Erdős-Rényijevim  $G(n, p)$  modelom, pri tem pa ohranila konstantno velikost množice vozlišč  $V$  in spreminjala verjetnosti  $p$ . Verjetnosti  $p$  sva dobila s klicom funkcije `numpy.linspace(0.1, 0.8, 80)`.

Če je s povečevanjem velikosti množice  $V$  naraščala tudi velikost maksimalne neodvisne množice, opazimo, da je v primeru povečevanja verjetnosti  $p$  vzorec nasproten, saj velikost maksimalne neodvisne množice pada, ko povečujemo verjetnost  $p$ . Razlog za to se najverjetneje skriva v vplivu verjetnosti na povezave grafa  $G$ . Večja kot je verjetnost  $p$ , večje bo število povezav v grafu, kar je za velikost neodvisne množice slabo, saj so verjetnosti, da so vozlišča v grafu sosednja, večje. Torej velikost maksimalne neodvisne množice ni odvisna le od števila vozlišč v grafu, ampak tudi od števila povezav. Ugotovitve so opazne na spodnjem grafu.

Tako kot velikost maksimalne neodvisne množice, je od števila povezav v grafu (oz. verjetnosti  $p$ ), odvisna tudi časovna zahtevnost algoritmov. Časovna zahtevnost algoritmov ob

večanju verjetnosti  $p$  (in posledično števila povezav v grafu) se obnaša podobno, kot se je obnašala pri večanju števila vozlišč v grafu  $G$ . Časovna zahtevnost vseh treh algoritmov narašča z verjetnostjo  $p$ , vendar pri  $CLP$  hitreje kot pri algoritmih *naključni\_MIS* in *lokalno\_iskanje*. Graf (b) to nazorno prikazuje in potrjuje.



(a) Vpliv verjetnosti na velikost neodvisnih množic (b) Vpliv verjetnosti na časovno zahtevnost algoritmov

## 4 Zaključek

Iz analize rezultatov lahko zaključimo, da v primeru generiranja grafov z *Erdős-Rényijevim*  $G(n, p)$  modelom, na velikost maksimalne neodvisne množice v danem grafu vplivata tako število vozlišč v grafu, kot tudi število povezav. Kot alternativo iskanju maksimalne neodvisne množice s  $CLP$ -jem, sva uspela implementirati algoritem *naključni\_MIS* in ga kasneje izboljšati z *lokalnim\_iskanjem*. Čeprav so rešitve  $CLP$  malenkost boljše v večini primerov, sta *naključni\_MIS* in *lokalno iskanje* boljša za grafe z večjim številom vozlišč, ali pa z večjim številom povezav, saj sta bolj časovno učinkovita. Morda se nam za zelo veliko vozlišč vseeno splača rešiti problem s  $CLP$ , saj kot prej omenjeno "napaka" proporcionalno narašča z večanjem števila vozlišč v grafu  $G$ . Zelo pa sva bila navdušena nad dejstvom, da sva z izboljšanim *lokalnim\_iskanjem* v primeru grafa  $G(30, 0.3)$  uspela poiskati maksimalne neodvisne množice večje moči kot s  $CLP$ .

# Literatura

- [1] Gary Miller. *Lecture 32: Luby's Algorithm for Maximal Independent Set*, dostopno na <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/15750-s18/ScribeNotes/lecture32.pdf>.
- [2] Diogo Andrade, Mauricio G. C. Resende. *Fast Local Search for the Maximum Independent Set Problem*. Conference Paper in Journal of Heuristics, May 2008, dostopno na [https://www.researchgate.net/publication/221131653\\_Fast\\_Local\\_Search\\_for\\_the\\_Maximum\\_Independent\\_Set\\_Problem](https://www.researchgate.net/publication/221131653_Fast_Local_Search_for_the_Maximum_Independent_Set_Problem).
- [3] *Maximal independent set*, v: Wikipedia: The Free Encyclopedia,[ogled 6. 1. 2022], dostopno na [https://en.wikipedia.org/wiki/Maximal\\_independent\\_set](https://en.wikipedia.org/wiki/Maximal_independent_set).
- [4] *Independent set (graph theory)*, v: Wikipedia: The Free Encyclopedia,[ogled 6. 1. 2022], dostopno na [https://en.wikipedia.org/wiki/Independent\\_set\\_\(graph\\_theory\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Independent_set_(graph_theory)).