

PROJEKTNA NALOGA

---

# PROBLEM NA NAPAKE ODPORNE METRIČNE DIMENZIJE

---

Anamarija Potokar, Hana Samsa

Mentorja: doc. dr. Janoš Vidali,  
prof. dr. Riste Škrekovski

Fakulteta za matematiko in fiziko

December 2024

---

# 1 Na napake odporna metrična dimenzija

Množica  $S \subseteq V$  v grafu  $G$  je razrešljiva, če za vsak par vozlišč  $x, y \in V(G)$  ostaja vozlišče  $s \in S$ , da velja  $d(x, s) \neq d(y, s)$ . Rečemo, da sta  $x$  in  $y$  razrešeni z vozliščem  $s$ . Množica  $S$  je odporna na napake, če je  $S \setminus \{v\}$  prav tako razrešljiva za vsak  $v \in S$ .

Metrična dimenzija neusmerjenega in povezanega grafa  $G = (V, E)$  je najmanjša podmnožica nabora vozlišč  $S \subset V$  z lastnostjo, da so vsa vozlišča v  $V$  enolično določena z njihovimi razdaljami do vozlišč podmnožice  $S$ .

Na napake odporna metrična dimenzija grafa  $G$ , je velikost najmanjše razčlenjujoče množice  $S$ , odporne na napake in jo označimo z  $ftdim(G)$ .

Naloga projektne naloge je bila, da s pomočjo celoštevilskega linearnega programa poiščemo grafe z  $dim(G) = 2$  in  $ftdim(G) = 5, 6, 7$  ali več. Pri tem se za manjše grafe, torej grafe z malo vozlišči, uporablja sistematično iskanje (ang. *systematic search*), za večje grafe pa metahevristični pristop (ang. *simulated annealing search*).

## 2 Celoštevski linearni program

Imamo povezan in neusmerjen graf  $G = (V, E)$ , kjer je  $V = \{1, 2, \dots, n\}$  množica vozlišč in  $|E| = m$ . Naj bo  $d(u, v)$  najkrajša pot med vozliščema  $u, v \in V$ .

V naslednjem celoštevilskem linearnem programu naj velja  $1 \leq u < v \leq n$  in  $1 \leq i < j \leq n$ . Najprej definirajmo matriko koeficientov  $A$ . Spremenljivka  $x_i$ , definirana s predpisom (2) nam pove ali vozlišče  $i$  pripada množici  $S$ .

$$A_{(u,v),i} = \begin{cases} 1, d(u, i) \neq d(v, i) \\ 0, d(u, i) = d(v, i) \end{cases} \quad (1)$$

$$x_i = \begin{cases} 1, i \in S \\ 0, i \notin S \end{cases} \quad (2)$$

$$\min \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n A_{(u,v),i} \cdot x_i \geq 2, \quad 1 \leq u < v \leq n \quad (4)$$

$$x_i \in \{0, 1\}, \quad 1 \leq i \leq n \quad (5)$$

---

Enačba (3) predstavlja najmanjšo podmnožico  $S$ . Enačba (4) pa nam da pogoj, da je podmnožica  $S$  razrešljiva množica, odporna na napake. To pomeni, da če za vozlišči  $i$  velja  $d(u, i) \neq d(v, i)$  in je hkrati  $i \in S$  bo potem vsota enaka 2, kar pa je ravno to kar iščemo.

### 3 Potek dela

V prvi fazi projekta sva identificirali grafe z določenimi lastnostmi glede na njihovo metrično dimenzijo in na napake odporno metrično dimenzijo za različna števila vozlišč. V najini kodi sva na začetku napisali funkciji, ki za povezan graf  $G$  izračunata njegovi  $dim$  in  $ftdim$ . Funkciji delujeta tako, da za graf  $G$  preštejeta število vozlišč in izračunata medsebojne razdalje za poljuben par, sestavita koeficientno matriko, rešita ustrezen CLP in vrneti moč razrešljive množice. Dodatno sva definirali še funkcijo, ki za željeni  $dim$  in  $ftdim$  izračuna minimalno potrebno število vozlišč grafa, ki izpolnjuje ta pogoja. V teoriji je sicer najmanjše potrebno število vozlišč enako kar  $ftdim$ , vendar pa je v praksi to število ponavadi (dosti) večje. Funkciji sva nato uporabili za iskanje ustreznih grafov, izpisali njihovo število pri dani  $dim$ ,  $ftdim$  in številu vozlišč ter jih izrisali.

Sistematično iskanje je bilo zaradi časovne zahtevnosti za večje grafe in višje  $ftdim$  zelo omejeno, zato sva v drugi fazi za iskanje grafov uporabili metahevristični algoritem *simulated annealing* oziroma *simulirano ohlajanje*, preizkusili pa sva tudi *hill climbing*. To sta vrsti algoritma v stohastični optimizaciji, ki uporabljata naključnost za iskanje čim boljših rešitev danega problema v razumnem času, še posebej, kadar je popolna rešitev zaradi kompleksnosti problema težko dosegljiva.

Za definicijo funkcije simuliranega hlajenja sva najprej implementirali funkcijo, ki grafu naključno odstrani ali doda povezavo. To sva nato uporabili za primerjavo z izhodiščnim grafom, in če je bil prilagojen graf glede na njegovi  $dim$  in  $ftdim$  bližje iskani rešitvi, sva ga sprejeli, sicer pa se vrnili na izhodiščni graf. Ko je zanka pretekla največje število iteracij, določeno z argumentom funkcije, se je prekinila, funkcija pa je izrisala najboljši najden graf ter njegovi  $dim$  in  $ftdim$ .

### 4 Koda

Komentirana koda je dostopna na povezavi.

---

## 5 Sistematično iskanje

V prvi fazi sva se iskanja ustreznih grafov z lastnostima  $\dim(G) = 2$  in  $\text{ftdim}(G) = 5, 6, 7, \dots$  lotili tako, da sva za konstantno vrednost  $\dim$  postopoma povečevali željeno  $\text{ftdim}$  in število vozlišč, za katerega iščemo ustrezne grafe. Najprej sva kodo preizkusili za vrednosti  $\dim = 2$  in  $\text{ftdim} = 4$ : V prvi fazi sva se iskanja ustreznih grafov z lastnostima  $\dim(G) = 2$  in  $\text{ftdim}(G) = 5, 6, 7, \dots$  lotili tako, da sva za konstantno vrednost  $\dim$  postopoma povečevali željeno  $\text{ftdim}$  in število vozlišč, za katerega iščemo ustrezne grafe. Najprej sva kodo preizkusili za vrednosti  $\dim = 2$  in  $\text{ftdim} = 4$ :

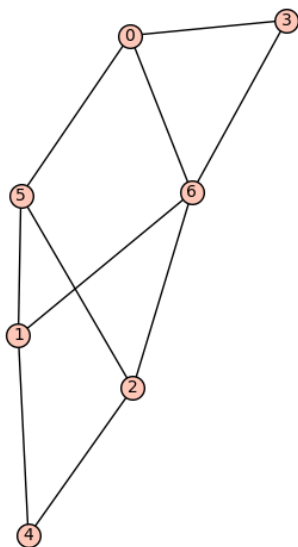
- na 4 vozliščih obstajata 2 taka grafa, čas izvajanja kode je 0.04 sekunde,
- na 5 vozliščih obstaja 8 takih grafov, čas izvajanja kode je 0.11 sekunde,
- na 6 vozliščih obstaja 46 takih grafov, čas izvajanja kode je 0.69 sekunde,
- na 7 vozliščih obstaja 232 takih grafov, čas izvajanja kode je 7.19 sekund,
- na 8 vozliščih obstaja 1525 takih grafov, čas izvajanja kode je 2 minuti in 1 sekunda.

Rezultate za  $\text{ftdim} = 4$  ponazorimo še s tabelo:

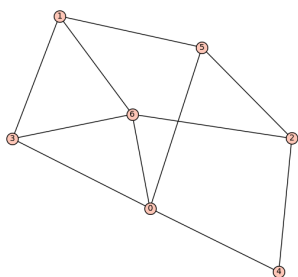
št. vozlišč	št. grafov	čas izvajanja
4	2	0.04s
5	8	0.11s
6	46	0.69s
7	232	7.19s
8	1525	2min1s

**Tabela 1:** Rezultati za  $\text{ftdim} = 4$

Nato sva se lotili iskanja odgovora na vprašanje naloge: za  $\text{ftdim}(G) = 5$  sva najprej ugotovili, da za manj kot 7 vozlišč tak graf sploh ne obstaja. Na 7 vozliščih obstajata dva ustrezna grafa, katera je algoritem našel in izrisal v 5.96 sekundah.

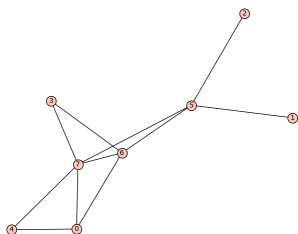


**Slika 1:** Graf pri parametrih  $\dim = 2$ ,  $ftdim = 5$ , in število vozlišč je 7.

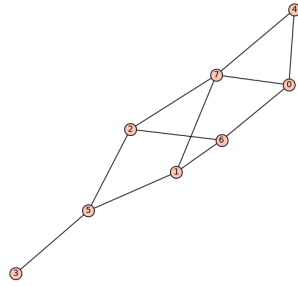


**Slika 2:** Graf pri parametrih  $\dim = 2$ ,  $ftdim = 5$ , in število vozlišč je 7.

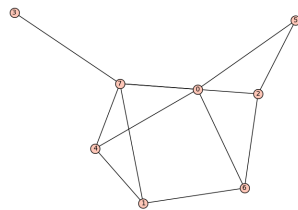
Na 8 vozliščih obstaja že bistveno več grafov, za katere velja  $\dim(G) = 2$  in  $ftdim(G) = 5$ , in sicer 65, tudi koda pa v primerjavi z grafi na 7 vozliščih rabi veliko dlje časa, da se izvede; ustrezne grafe je poiskala in izrisala v 1 minuti in 58 sekundah.



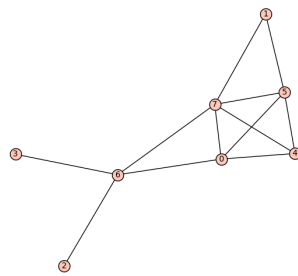
**Slika 3:** Graf pri parametrih  $\dim = 2$ ,  $ftdim = 5$ , in število vozlišč je 8.



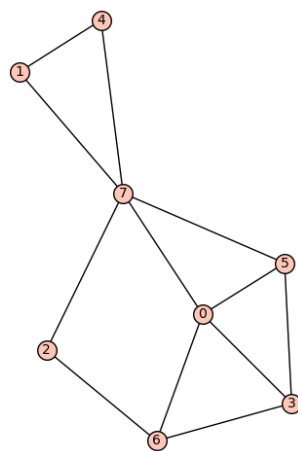
**Slika 4:** Graf pri parametrih  $dim = 2$ ,  $ftdim = 5$ , in število vozlišč je 8.



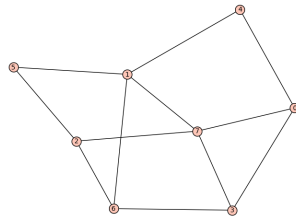
**Slika 5:** Graf pri parametrih  $dim = 2$ ,  $ftdim = 5$ , in število vozlišč je 8.



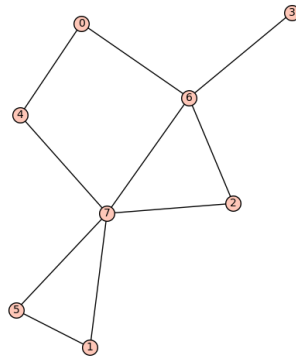
**Slika 6:** Graf pri parametrih  $dim = 2$ ,  $ftdim = 5$ , in število vozlišč je 8.



**Slika 7:** Graf pri parametrih  $dim = 2$ ,  $ftdim = 5$ , in število vozlišč je 8.

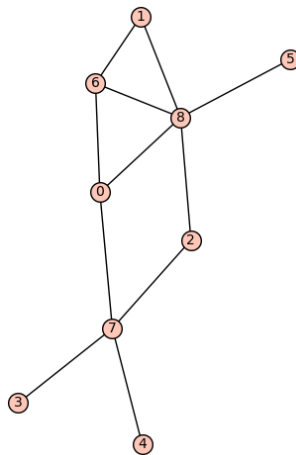


**Slika 8:** Graf pri parametrih  $dim = 2$ ,  $ftdim = 5$ , in število vozlišč je 8.

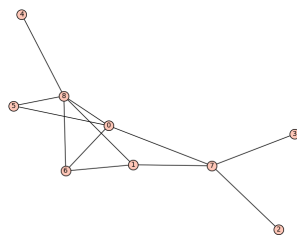


**Slika 9:** Graf pri parametrih  $dim = 2$ ,  $ftdim = 5$ , in število vozlišč je 8.

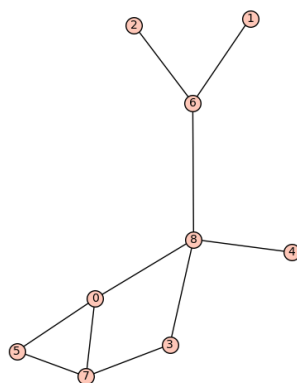
Pri iskanju in risanju takih grafov na 9 vozliščih se je koda po pol ure dela prenehala izvajati in ni našla vseh ustreznih grafov.



**Slika 10:** Graf pri parametrih  $dim = 2$ ,  $ftdim = 5$ , in število vozlišč je 9.



**Slika 11:** Graf pri parametrih  $dim = 2$ ,  $ftdim = 5$ , in število vozlišč je 9.



**Slika 12:** Graf pri parametrih  $dim = 2$ ,  $ftdim = 5$ , in število vozlišč je 9.

Rezultate za  $ftdim = 5$  ponazorimo še s tabelo:

št. vozlišč	št. grafov	čas izvajanja
7	2	5.96s
8	65	1min58s

**Tabela 2:** Rezultati za  $ftdim = 5$

Očitno se torej že pri  $ftdim = 5$  in 9 vozliščih, kar se zdi dokaj malo, koda ne izvede v sprejemljivem času. Preverili sva še, kako časovno zahtevno je iskanje grafov z  $dim = 2$  in  $ftdim = 6$ , za kar je potrebnih najmanj 12 vozlišč; tudi ta koda se ni izvedla v normalnem času, zato sva za primere pri  $ftdim = 5$  in več kot 8 vozlišč ter  $ftdim = 6, 7, \dots$  grafe iskali s pomočjo metahevrstičnih algoritmov.

## 6 Metahevrstično iskanje

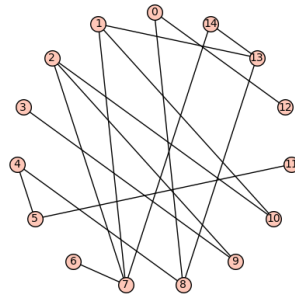
V naslednji fazi sva želeli narediti kodo, ki bi poiskala tudi večje grafe. To sva dosegli s metahevrstičnim pristopom oziroma s simuliranim ohlajanjem. Tako kot v prvi fazi sva



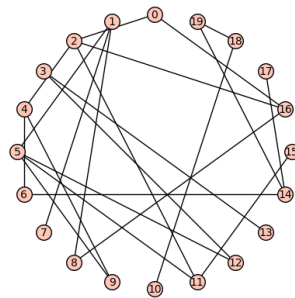
kodo najprej preizkusili za  $dim = 2$  in  $ftdim = 4$ . Pri tem sva za grafe vzeli že večje grafe s številom vozlišč od 9 do 15, poskusili pa sva tudi za grafe z 20 vozlišči.

Pri simuliranem ohlajanju se je pojavila težava pri kodah `metricna_dolzina` in `na_napake_odporna_m` zato je ta koda drugačna kot je pri sistematičnem iskanju.

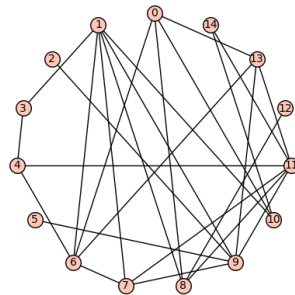
Ta pristop je definiran tako, da vrne najboljši graf pri danih  $dim$  in  $ftdim$ . S tem pristopom lahko mnogo hitreje poiščemo tudi grafe na veliko vozliščih in višjimi na napake odpornimi metričnimi dimenzijami.



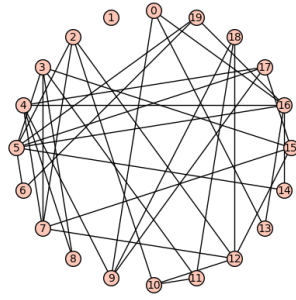
**Slika 13:** Najboljši graf pri parametrih  $dim = 2$ ,  $ftdim = 5$ , in število vozlišč je 15.



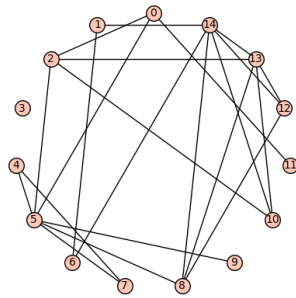
**Slika 14:** Najboljši graf pri parametrih  $dim = 2$ ,  $ftdim = 5$ , in število vozlišč je 20.



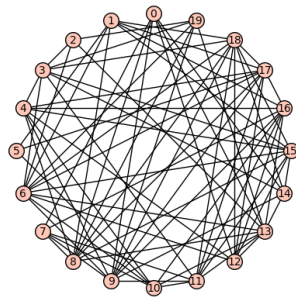
**Slika 15:** Najboljši graf pri parametrih  $dim = 2$ ,  $ftdim = 6$ , in število vozlišč je 15.



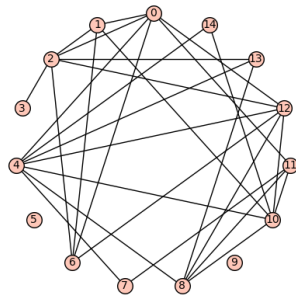
**Slika 16:** Najboljši graf pri parametrih  $dim = 2$ ,  $ftdim = 6$ , in število vozlišč je 20.



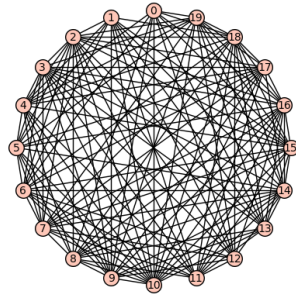
**Slika 17:** Najboljši graf pri parametrih  $dim = 2$ ,  $ftdim = 7$ , in število vozlišč je 15.



**Slika 18:** Najboljši graf pri parametrih  $dim = 2$ ,  $ftdim = 7$ , in število vozlišč je 20.



**Slika 19:** Najboljši graf pri parametrih  $dim = 2$ ,  $ftdim = 8$ , in število vozlišč je 15.



**Slika 20:** Najboljši graf pri parametrih  $\dim = 2$ ,  $ftdim = 8$ , in število vozlišč je 20.