

UTICAJ PROSTORNE I VREMENSKE OPTIMIZACIJE RASPOREDA ZEMLJANIH MASA NA STANJE ŽIVOTNE SREDINE

Nikola Milovanović¹, mast. inž. građ.

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, milovanovic_nikola@outlook.com

V. prof. dr Dejan Gavran, dipl. građ. inž.

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, gavran@eunet.rs

Doc. dr Sanja Fric, dipl. građ. inž.

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, sfric@grf.bg.ac.rs

Doc. dr Vladan Ilić, mast. inž. građ.

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, vilic@grf.bg.ac.rs

Filip Trpčevski, mast. inž. građ.

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, ftprcevski@grf.bg.ac.rs

Stefan Vranjevac, mast. inž. građ.

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, svranjevac@grf.bg.ac.rs

Miloš Lukić, mast. inž. građ.

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, mlukic@grf.bg.ac.rs

Rezime: Jedna od najvažnijih aktivnosti prilikom izgradnje auto-puteva ili velikih površinskih objekata jesu zemljani radovi, odnosno proces repetitivnih ciklusa iskopavanja, transporta i nasipanja. Ova aktivnost je izrazito finansijski zahtevna i ima veliki efekat na životnu sredinu. Efikasan plan alokacije zemljanih masa značajno smanjuje vreme i ukupne troškove, kao i emisiju neželjenih gasova u atmosferu. U osnovi optimizacije zemljanih radova stoji transportna metoda kojom se minimizira ukupna dužina transporta materijala na relaciji usek-nasip. Ovo rešenje najčešće podrazumeva deljenje radnog prostora u jedinice formata ćelija. Sa druge strane, vremenska komponenta neophodna za realistično rešenje transportnog problema najčešće nije poznata unapred. Pod vremenskom komponentom podrazumeva se realističan redosled pristupanja radovima u pojedinim ćelijama, bilo da se radi o redosledu iskopa ili o redosledu nasipanja. Pored toga, važno je uzeti u obzir i kvalitet materijala, tehničke specifikacije, raspoloživu mehanizaciju, kao i položaj frontova kojima će se pristupiti pojedinim grupama ćelija. U okviru ovog rada dat je pregled postojećih metoda za optimizaciju zemljanih radova, kao i inovativan dinamički pristup zasnovan na laminarno organizovanim ćelijama.

Ključne reči: planiranje, putogradnja, zemljani radovi, optimizacija.

EARTH MASS ALLOCATION OPTIMIZATION AND ITS IMPACT ON THE ENVIRONMENT

Nikola Milovanović, M.Sc. C.E.

Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, milovanovic_nikola@outlook.com

Accos. Prof. Dejan Gavran, Ph.D. C.E.

Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, gavran@eunet.rs

Asst. Prof. Sanja Fric, Ph.D. C.E.

Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, sfric@grf.bg.ac.rs

Asst. Prof. Vladan Ilić, Ph.D. C.E.

Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, vilic@grf.bg.ac.rs

Filip Trpčevski, M.Sc. C.E.

Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, ftprcevski@grf.bg.ac.rs

Stefan Vranjevac, M.Sc. C.E.

Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, svranjevac@grf.bg.ac.rs

Miloš Lukić, M.Sc. C.E.

Faculty of Civil Engineering, University of Belgrade, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, mlukic@grf.bg.ac.rs

Abstract: This paper gives an overview of the importance of earthworks in highway construction and highlights the financial and environmental impact of this activity. The earthworks process involves repetitive cycles of excavation, transport and backfilling, and an effective earth mass allocation plan can significantly reduce project cost, time, and CO₂ emissions. The key to earthworks optimization is a transport method that minimizes the total length of material transport, which is typically achieved by dividing the workspace into grid-like cells. However, the time component required for a realistic solution to the transportation problem is often unknown, including the sequence of work in individual cells. This paper provides an overview of existing optimization algorithms and introduces a dynamic approach that takes into account the quality of materials, technical specifications, and available machinery.

Keywords: planning, road construction, earthworks, optimization.

¹ Nikola Milovanović – milovanovic_nikola@outlook.com

1. UVOD

Čest slučaj u putogradnji, ali i u mnogim drugim privrednim oblastima jeste da ušteda novca i očuvanje životne sredine predstavljaju sučeljene optimizacione probleme. Potreba za smanjenjem troškova izgradnje rezultuje većim troškovima održavanja ili upotrebom jednostavnije tehnologije, što ima za posledicu negativan uticaj na životnu sredinu. Sa druge strane, kriterijumi vezani za očuvanje životne sredine uglavnom značajno podižu cenu izgradnje, kako infrastrukturnih tako i drugih projekata. Raspored zemljanih masa jedan je od optimizacionih problema čijim se rešavanjem pozitivno utiče i na cenu projekta i na životnu sredinu.

Smanjenjem ukupne transportne dužine zemljanog materijala iz useka u nasip, kao i iz useka na deponiju, odnosno sa pozajmišta materijala u nasip smanjuje se vreme trajanja radova, cena radova, kao i emisija CO₂ i ostalih neželjenih gasova u atmosferu kroz smanjenu potrošnju goriva. Prema savremenim procenama, sagorevanjem jednog litra dizel goriva u atmosferu se oslobađa 2.7 kilograma CO₂ [1]. Društveni trošak emisije CO₂ prema procenama Američke federativne uprave iznosi 51 dolar po toni, dok novije studije [2] procenjuju trošak od čak 185 dolara po toni.

Ukupnu cenu zemljanih radova teško je proceniti u opštem slučaju, ona kod putnih objekata primarno zavisi od računске brzine, odnosno graničnih geometrijskih elemenata u situacionom planu i podužnom profilu, i od tipa odnosno morfologije terena. Takođe bitno zavisi od broja mostova, vijadukta i tunela na trasi, ali i od usklađenosti količina zemljanih masa u useku i nasipu i od kvaliteta masa u useku. Iako je postignuta dobra usklađenost količina, čest slučaj u praksi je da materijal iz useka ne može da se koristi za nasipanje jer ne zadovoljava zahtevani kvalitet.

Bez obzira na varijabilnost od projekta do projekta, cena zemljanih radova kod putnih objekata uvek čini značajan deo ukupne cene projekta, te postoji stalna potreba za uštedom. Pored mogućnosti uštede novca, optimalan plan izvođenja zemljanih radova takođe ima pozitivan uticaj na očuvanje životne sredine.

2. METODE OPTIMIZACIJE

Postoji veliki broj optimizacionih metoda i algoritama koji se mogu primeniti sa ciljem rešavanja rasporeda zemljanih masa. Sam problem takođe može biti modeliran sa različitim nivoima kompleksnosti. Rešenje problema rasporeda zemljanih masa koje je poznato decenijama i najčešće je u praksi primenjivano u literaturi se često naziva *transportna metoda* i suštinski se oslanja na rešavanje skupa linearnih jednačina linearnim programiranjem, odnosno *SIMPLEX* metodom. Ovaj način formulacije rešava samo prostorni aspekt problema, i ne bavi se dinamikom izvođenja radova. Dinamika izvođenja radova u ovom slučaju primarno se odnosi na putanju mehanizacije koja vrši iskop (bagera ili dozera). Navedena putanja može se posmatrati kao poseban optimizacioni problem i rešavati nezavisno. Ovaj pristup rešavanju problema rasporeda zemljanih masa međutim ne dozvoljava dinamičku funkciju cene, što je u praksi često potrebno. Cena transporta zemljanog materijala ne zavisi samo od vazdušnog rastojanja tačke utovara i istovara, već zavisi i od morfologije samog terena koji na tom putu treba preći. Sa druge strane, morfologija terena zavisi od faze u kojoj se projekat nalazi, odnosno od toga koji deo zemljanih radova je do tog trenutka izvršen. Zbog svega navedenog, nameće se potreba za ujedinjenjem prostornog i vremenskog dela optimizacionog problema koji dozvoljava primenu dinamičke funkcije cene. U nastavku ovog rada, navedeni problem formulisan je kao genetski lanac, odnosno niz instrukcija, i rešen je primenom genetskog algoritma.

2.1 Čelijski proračun kubatura

Savremeni način projektovanja objekata putne i železničke infrastrukture najčešće podrazumeva izradu 3D modela, kako objekta tako i terena. Kad su putevi u pitanju, zapremina zemljanog materijala koji treba iskopati, transportovati i nasuti ograničena je površinom planuma, kosinama nasipa ili useka, i postojećom površinom terena. U softverskom paketu *GCM++* [3], sve navedene površine predstavljaju se mrežom trouglića nepravilnog oblika (*TIN* – eng. *triangulated irregular network*). Ako se navedene mreže trouglića još ograniče i nizom vertikalnih, međusobno upravnih površi na jednakom rastojanju, u njihovom preseku dobija se čelijski proračun kubatura. On govori kolika je zapreminska razlika postojećeg i projektovanog stanja terena u svakoj pojedinačnoj ćeliji, odnosno koliko materijala je potrebno dovesti u tu ćeliju u slučaju nasipa, tj. iskopati iz te ćelije u slučaju useka.

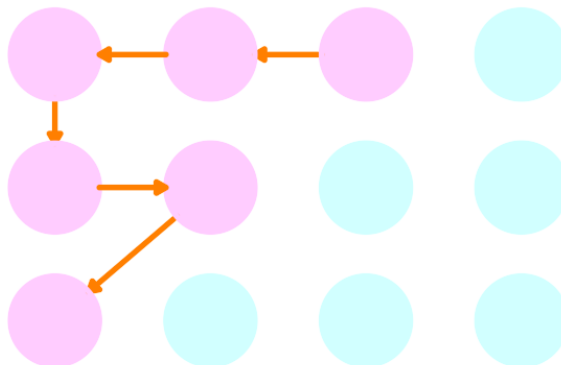
2.2. SIMPLEX metoda

Rešavanje prostornog dela problema optimizacije rasporeda zemljanih radova primenom SIMPLEX metode podrazumeva rešavanje sistema linearnih jednačina sa linearnim ograničenjima. Formulacija problema oslanja se na ćelijski proračun kubatura. Ako u proračunu kubatura postoji N ćelija, I ćelija useka i J ćelija nasipa, gde važi $I + J = N$, potrebno je rešiti M nepoznatih, gde važi da je $M = I \times J$. Vrednost nepoznate x_{ij} odnosi se na količinu zemljanog materijala koju treba transportovati iz useka i na nasip j . Ograničenja koja važe su da suma x_{ij} za svako $j \in (0, J)$ mora biti jednaka U_i gde je U_i količina zemljanog materijala u useku i , kao i da suma x_{ij} za svako $i \in (0, I)$ mora biti jednaka N_j gde je N_j potrebna količina zemljanog materijala na nasipu j . Navedena ograničenja suštinski znače da se iz svakog useka, kao i na svaki nasip mora transportovati upravo ona količina zemljanog materijala dobijena ćelijskim proračunom kubatura.

Na ovaj način dobija se globalno optimalno rešenje, bez primene heuristike, te možemo biti sigurni da je to najbolje rešenje koje postoji. Najveća mana ove metode jeste nemogućnost implementacije bilo kakve dinamike izvođenja radova, pa se rešenja evaluiraju iskučivo na osnovu transportne dužine. Ovakav način evaluacije nije realan, i nema čvrstu korelaciju za stvarnim troškovima izvođenja radova.

2.3. Najkraći put kroz graf

Kao dopuna rešenja dobijenog SIMPLEX metodom može se koristiti metod pretraživanja grafa. Rešavanje vremenskog dela optimizacionog problema, odnosno redosleda ulaska u ćelije useka podrazumeva pronalazak najkraćeg puta kroz sve čvorove grafa. Najpre je potrebno naći podgraf koji čine samo ćelije useka. Opravdano je pretpostaviti vezu svakog čvora grafa samo sa svojih 8 najbližih suseda.



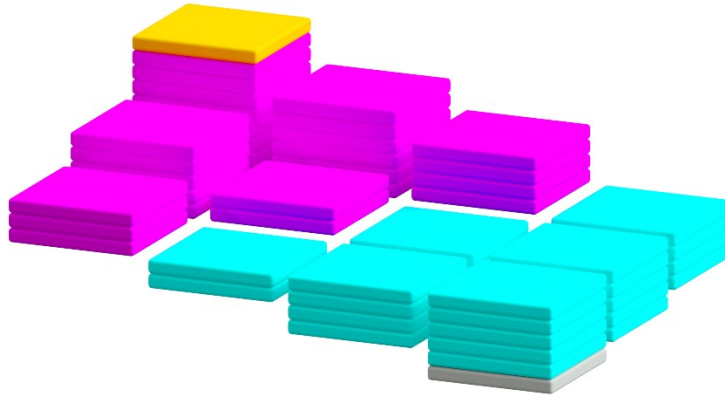
Slika 1. Pretraživanje najkraćeg puta kroz graf

Najčešće korišćen metod za određivanje najkraćeg puta između dva čvora u grafu jeste *Dijkstra* algoritam [4]. *Dijkstra* algoritam je „pohlepni“ algoritam koji se zasniva na pamćenju vrednosti $d(v)$, odnosno trenutnog najkraćeg puta za svaki čvor v . Za početni čvor ta vrednost najpre iznosi 0, tj. $d(s) = 0$, a za ostale čvorove se vrednost inicijalizuje kao beskonačna. Pri prestanku rada algoritma, $d(v)$ dobija vrednost najkraćeg puta od čvora s do čvora v , ili ostaje beskonačna u slučaju da takav put ne postoji. Koncept rada *Dijkstra* algoritma naziva se proces oslobađanja ivica, on podrazumeva da ako postoji veza od čvora u ka čvoru v , onda je $d(s, v)$ jednaka zbiru $d(s, u)$ i minimalne distance između čvorova u i v .

3. PRINCIP LAMELA

Kako bi se problem optimizacije rasporeda zemljanih masa jednim algoritmom rešio u celini, najpre je potrebno napraviti još jednu apstrakciju, ona podrazumeva podelu ćelija iz proračuna kubatura na lamele jednake zapremine. Najpre je potrebno usvojiti zapreminu jedne lamele. Nakon toga, svakoj ćeliji iz proračuna kubatura dodeljuje se broj lamela jednak količniku zapremine zemljane mase u navedenoj ćeliji i usvojene zapremine jedne lamele. Nakon podele na lamele problem se može prikazati kao na slici 2.

Ljubičastom bojom na slici prikazane su lamele koje odgovaraju ćelijama useka, dok su plavom bojom prikazane lamele koje odgovaraju ćelijama nasipa. Žutom i sivom bojom prikazan je jedan od mogućih 36 parova lamele useka i lamele nasipa. Iz useka uvek se zahvata najviša lamela, dok se uvek prvo popunjava najniža lamela u nasipu. Važno je poštovati ovakav raspored u slučaju kada evaluacija rešenja uzima u obzir i kvalitet materijala, jer u okviru jedne ćelije može postojati više lamela sa različitim kvalitetom materijala.



Slika 2. Količine zemljanog materijala u useku i nasipu predstavljene kao lamele

4. GENETSKI ALGORITAM

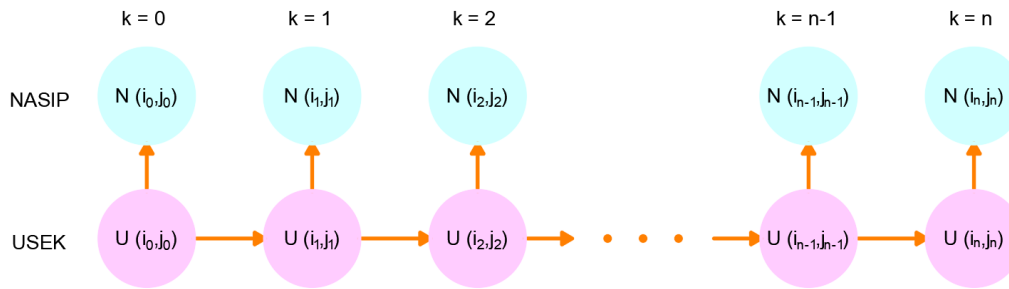
Genetski algoritam (GA), često se naziva i evolutivni algoritam (EA) i spada u globalne optimizacione metode. Metode globalne optimizacije se zasnivaju na ideji da se, „imitiranjem prirode“, pokuša sa pronalaženjem optimuma složenih funkcija više promenljivih, koje predstavljaju matematičku apstrakciju složenog inženjerskog problema [5]. Pored genetskih algoritama globalne optimizacione metode koje se takođe često koriste u praksi jesu *Particle swarm optimization (PSO)*, *Ant colony optimization (ACO)*, *Simulirano kaljenje (SA)*, *Taboo pretraživanje (TS)*, itd. Za potrebe ovog rada, kao metod optimizacije izabran je genetski algoritam zbog izuzetne efikasnosti i jednostavnosti implementacije.

Genetski algoritam radi tako što simulira proces prirodne selekcije, u kojem se članovi populacije (jedinke) najpre nasumično generišu. Svaka jedinka predstavlja jedno rešenje optimizacionog problema. Nakon što su jedinke generisane vrši se selekcija i odbacuju se jedinke sa najlošijim rezultatima. Preostale jedinke mutiraju, nalik mutacijama u prirodi, i na taj način se dobijaju nove jedinke odnosno nova generacije populacije. Svakom novom generacijom jedinke, odnosno pojedinačna rešenja optimizacionog problema, konvergiraju ka optimalnom rešenju. Proces se završava nakon unapred predviđenog broja generacija, ili kada u novim generacijama prestanu da se javljaju poboljšanja.

4.1. Genetski lanci

Kod genetskog algoritma svaka jedinka, odnosno rešenje problema može se predstaviti kao genetski lanac. Najčešći način implementacije genetskog algoritma u praksi jeste kodiranje svih rešenja iz prostora za pretraživanje u obliku binarnog niza. Ovakav niz često se naziva i binarni lanac. Zbog specifičnog skupa ograničenja, za potrebe ovog rada korišćen je nešto drugačiji način formiranja genetskog lanca.

Slika 3. pokazuje jedno opšte rešenje problema, odnosno jedan opšti genetski lanac. Svaka lamela useka predstavlja se jednim čvorom u genetskom lancu (ljubičasta boja), dok se svaka lamela nasipa na isti način predstavlja u paralelnom lancu (plava boja). Promenljiva k odnosi se na korak u vremenu kada se jedna specifična lamela iz useka premešta na mesto specifične lamele nasipa. Dužina genetskog lanca obeležena je sa n i jednaka je ukupnom broju lamela u useku odnosno nasipu. Oznakama i_k, j_k predstavljeni su red i kolona *grid* ćelije kojoj lamela, odnosno čvor u genetskom lancu pripada. Važno je napomenuti da se zemljane mase sa pozajmišta takođe mogu predstaviti kao čvorovi useka sa njihovim korespondirajućim prostornim koordinatama. Zemljane mase koje je potrebno odvesti na deponiju takođe se mogu predstaviti kao čvorovi nasipa.



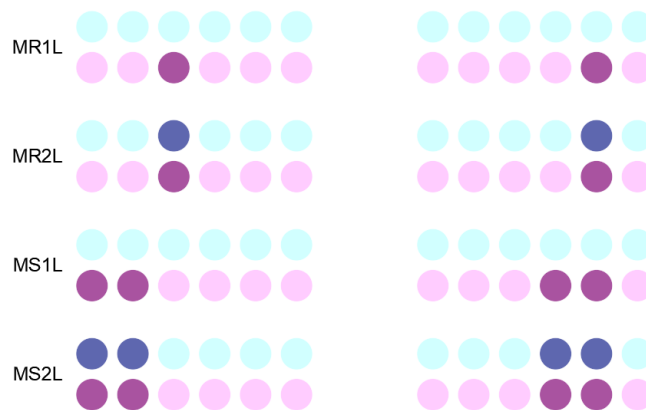
Slika 3. Nasumično rešenje predstavljeno kao *genetski lanac*

4.2. Proces selekcije i mutacije

Proces konvergencije ka optimalnom rešenju počinje tako što se, u prvoj *generaciji*, formira N jedinki, odnosno N genetskih lanaca (Slika 3.) sa nasumičnim rasporedom čvorova. Svaki od lanaca se potom evaluira, to jest određuje se povoljnost svakog lanca prema unapred definisanoj *cost* funkciji². U najjednostavnijem slučaju, *cost* funkcija predstavlja kumulativnu dužinu trasnporta, odnosno sumu koordinantnih rastojanja svih parova u genetskom lancu. Sledeći korak jeste sortiranje, genetski lanci se sortiraju prema vrednostima *cost* funkcije u rastućem redosledu tako da najbolja jedinka zauzima prvo mesto. Nakon sortiranja jedinki, dolazi do odbacivanja onih sa lošim rezultatom.

Postoje različite metode i kriterijumi za selekciju jedinki koje će biti odstranjene. Najjednostavniji, i često vrlo efikasan metod je prosto odstraniti *donju* polovinu jedinki, odnosno $N/2$ jedinki sa najlošijim rezultatom. Mana ove metode je što ona u poznim generacijama „zaključava“ populaciju u jednom lokalnom optimalnom rešenju i ne daje mogućnost pretraživanja drugih, potencijalno boljih lokalnih optimuma. Iz tog razloga, u okviru ovog rada korišćena je nešto složenija, heruistička metoda selekcije. Prema ovoj metodi, određuje se verovatnoća za odstranjivanje svake od jedinki. Ona se izračunava kao količnik rednog broja jedinke (i) u sortiranom skupu i ukupnog broja jedinki u skupu (N). Kada se koristi ovakav metod selekcije, ostavlja se mogućnost da jedinka sa lošim rezultatom ipak „preživi“ do sledeće generacije.

Nakon što je, nekom od pomenutih metoda selekcije odbačena polovina jedinki, potrebno je ponovo dopuniti skup do njegove inicijalne veličine N . Nove jedinke dodaju se u skup tako što postojeće jedinke mutiraju. Na slici 4. data su 4 tipa mutacije korišćena u okviru ovog rada.



Slika 4. Tipovi mutacije genetskog lanca

Navedene mutacije imaju sledeća značenja:

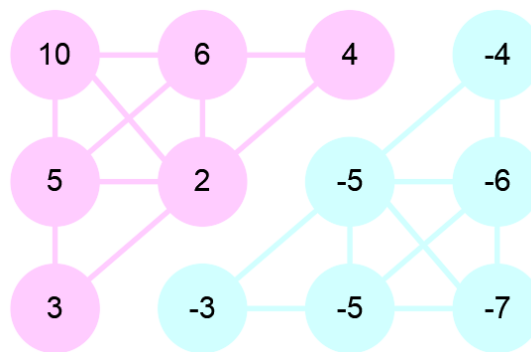
- *MR1L* – Mutacija jednog reda nad jednim genetskim lancem,
- *MR2L* – Mutacija jednog reda nad oba genetska lanca,
- *MS1L* – Mutacija serije nad jednim genetskim lancem,
- *MS2L* – Mutacija serije nad oba genetska lanca.

² Cost (*eng. cena*) ili loss (*eng. gubitak*) funkcija mapira rezultate optimizacije u niz realnih brojeva [7].

Svaka "preživela" jedinka nakon selekcije ostaje u skupu za sledeću generaciju, dok se skupu pridružuje još jedna jedinka koja nastaje mutacijom postojeće tako što se nasumično bira jedan od navedena 4 tipa mutacije. Nakon što skup ponovo sadrži N jedinki formirana je sledeća generacija, pa se nakon toga ponavlja celokupna navedena procedura dok skup ne konvergira ka optimalnom rešenju.

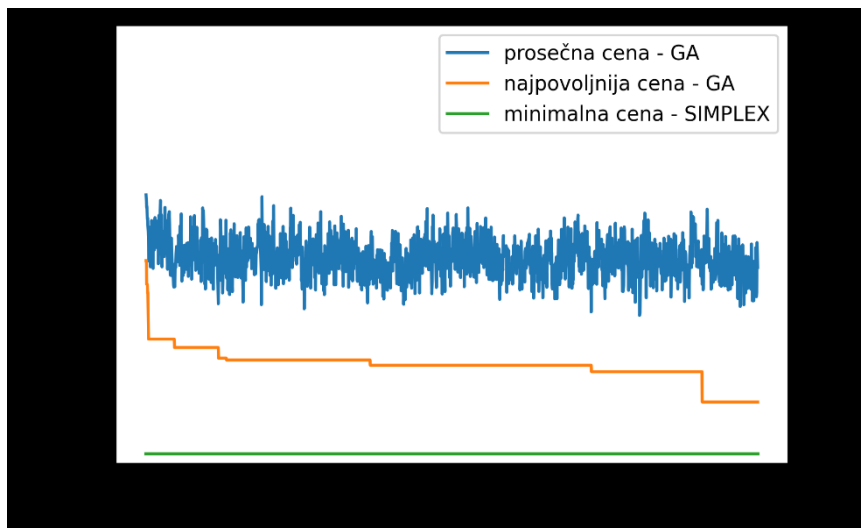
5. UPOREDNA ANALIZA

Na slici 5. prikazan je jedan karakterističan problem na kome je izvršena uporedna analiza dve optimizacione metode, SIMPLEX metode i genetskog algoritma. Problem se sastoji od jednostavne *grid* mreže dimenzija 4x3. Brojevi u središtu čvorova grafa odnose se na količine zemljanog materijala u svakoj ćeliji *grid*-a. Čvorovi grafa koji se odnose na ćelije u kojima dominira usek dati su ljubičastom bojom i količine su pozitivne, dok su čvorovi koji se odnose na ćelije gde dominira nasip dati plavom bojom i količine su negativne. Količine na grafu korespondiraju sa brojem lamela u svakoj ćeliji *grid*a, dato je ukupno 30 lamela, kako u useku tako i na nasipu, te je bilans zemljanih masa 0, i ne postoji potreba za pozajmištima ili deponijama.



Slika 5. Raspored zemljanih masa predstavljen kao graf

Kao što je ranije navedeno, rešenje rasporeda zemljanih radova dobijeno na bazi metode SIMPLEX ne može uzimati u obzir dinamiku izvođenja radova. Iz tog razloga, kao *cost* funkcija za oba algoritma usvojen je zbir linijskih rastojanja svih jediničnih transporta iz useka u nasip. *Cost* funkcija za globalno optimalno rešenje ovog problema dobijeno metodom SIMPLEX iznosi 65.29, i dato je zelenom bojom na slici 6.



Slika 6. Uporedna analiza metode SIMPLEX i genetskog algoritma (GA)

Plavom bojom na slici data su prosečna rešenja metodom GA svih jedinki u populaciji kroz 2000 generacija (epoha), dok su narandžastom bojom data najpovoljnija rešenja iz svake generacije. Genetski algoritam nije uspeo da pronađe globalno optimalno rešenje, već je posle nešto manje od 1800 generacija ostao „zarobljen“ u jednom od lokalnih optimuma. Optimum koji je pronađen metodom GA evaluiran je vrednošću *cost* funkcije od 66.82. Lokalni optimum pronađen metodom GA u ovom specifičnom slučaju tek je nešto više od 2% lošiji od globalnog optimuma.

6. ZAKLJUČAK

Usporedna analiza rezultata optimizacija rasporeda zemljanih masa primenom SIMPLEX metode i genetskog algoritma pokazala je da se heurističkim algoritmom kao što je to GA može naći rešenje vrlo blisko globalno optimalnom rešenju. Naravno, treba uzeti u obzir da bi disperzija rezultata mogla biti veća da je u analizi korišćen veći broj promenljivih, odnosno da je sam ćelijski proračun kubatura sadržao veći broj ćelija.

Uprkos nešto lošijem rešenju, ubedljiva prednost heurističke metode jeste što može uzeti u obzir dinamiku izvođenja radova, pa se zbog toga može definisati mnogo realističnija *cost* funkcija. Dok kod SIMPLEX metode *cost* funkcija uzima u obzir samo udaljenosti ćelija, kod GA ona još može uračunati i:

- Cenu transporta i tip mehanizacije koja vrši iskop,
- Različit broj i konfiguraciju otvorenih frontova iskopa,
- Različit broj i konfiguraciju mehanizacije koja vrši transport materijala,
- Različit kvalitet materijala čak i u okviru jedne ćelije useka,
- Cenu transporta koja uzima u obzir podužne nagibe odnosno stanje terena koji se na transportnom putu nalazi,
- Mogu se „kažnjavati“ rešenja koje u nekoj od faza ostavljaju lokalne depresije na terenu, odnosno prostor za akumulaciju padavina.

Evidentno je da se kroz sve navedene kriterijume evaluacije može postići vrlo efikasan i izvodljiv plan alokacije zemljanih masa. Osim smanjenja emisije CO₂ realističnom optimizacijom potrošnje goriva, algoritam može uzeti u obzir efekte na životnu sredinu još temeljnije primenom višekriterijumske optimizacije (VCO). Pored troškova izvođenja zemljanih radova, jedan od kriterijuma VCO takođe može biti i rezultat LCA [6] analize za različita rešenja. Jedno od takvih rešenja može biti upotreba slabonosivog materijala iz useka primenom tehnika stabilizacije. Uz ovakvu analizu, upravljaču bi pored cene do detalja bili poznati efekti na životnu sredinu svih analiziranih rešenja, te bi i upravljačke odluke bile jednostavnije i racionalnije.

Literatura

- [1] Jakhrani, A. Q.; Othman, Al-Khalid; Rigit, Andrew Ragai Henry; Samo, S. R. (2012). [IEEE 2012 International Conference on Green and Ubiquitous Technology (GUT) - Jakarta (2012.07.7-2012.07.8)] 2012 International Conference on Green and Ubiquitous Technology - Estimation of carbon footprints from diesel generator emissions.,78–81. doi:10.1109/gut.2012.6344193
- [2] Rennert, K., Errickson, F., Prest, B.C. *et al.* Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO₂. *Nature* 610, 687–692 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05224-9>
- [3] Gavran, D. (2013). GCM++ (GAVRAN – Civil Modeller), AutoCAD based software for modeling of civil engineering facilities. (online) available at: <http://www.gcm-gavran.com/gavran-gcm-preview.htm>
- [4] Dijkstra, E.W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numer. Math.* 1, 269–271 (1959). <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
- [5] Dašić, T., Stanić M, *Skripte pripremljene u formi detaljnih prezentacija koje prate predavanja i vežbe. Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2022.*
- [6] Matthews, H. Scott, Chris T. Hendrickson, and Deanna H. Matthews (2014). Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches for Decisions That Matter. pp. 83–95.
- [7] Hastie, Trevor; Tibshirani, Robert; Friedman, Jerome H. (2001). The Elements of Statistical Learning. Springer. p. 18. ISBN 0-387-95284-5.