

# Višeciljni optimizacijski model za izradu rezistentnih vremenskih planova izvođenja građevinskih projekata u uvjetima nesigurnosti

---

**Milat, Martina**

**Doctoral thesis / Disertacija**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

<https://doi.org/10.31534/DocT.056.MilM>

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:694182>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-22**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)





**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE  
I GEODEZIJE**

**Martina Milat, mag.ing.aedif.**

**VIŠECILJNI OPTIMIZACIJSKI MODEL ZA  
IZRADU REZISTENTNIH VREMENSKIH  
PLANOVA IZVOĐENJA GRAĐEVINSKIH  
PROJEKATA U UVJETIMA NESIGURNOSTI**

**D i s e r t a c i j a**

**Split, 2022.**

Martina Milat, mag.ing.aedif.

Redni broj: 056

**Ova disertacija predana je na ocjenu  
Sveučilištu u Splitu,  
Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije  
u svrhu stjecanja akademskog stupnja  
doktora tehničkih znanosti u  
znanstvenom polju građevinarstvo**

**Mentorica:** prof. dr. sc. Snježana Knezić

**Komentorice:** izv. prof. dr. sc. Jelena Sedlar i prof. dr. sc. Željana Nikolić

**Povjerenstvo za ocjenu:**

prof. dr. sc. Alen Harapin

prof. dr. sc. Nives Ostojić-Škomrlj

izv. prof. dr. sc. Ivan Marović

doc. dr. sc. Marko Mladineo

prof. dr. sc. Boris Trogrlić

**Povjerenstvo za obranu:**

prof. dr. sc. Alen Harapin \_\_\_\_\_

prof. dr. sc. Nives Ostojić-Škomrlj \_\_\_\_\_

izv. prof. dr. sc. Ivan Marović \_\_\_\_\_

doc. dr. sc. Marko Mladineo \_\_\_\_\_

prof. dr. sc. Boris Trogrlić \_\_\_\_\_

Rad je obranjen dana 25. studenog 2022.

Tajnica:

Saša Delić, dipl. iur.

**Rad sadrži:**

136 stranica teksta

42 slike

22 tablice

128 citiranih referenci

*Zahvaljujem mentorici što me je uvijek vodila svojim primjerom.*

Martina Milat, mag.ing.aedif.

## **Višeciljni optimizacijski model za izradu rezistentnih vremenskih planova izvođenja građevinskih projekata u uvjetima nesigurnosti**

### **Sažetak:**

Građevinski projekti su kompleksni poduhvati u čije je izvršenje involviran veliki broj sudionika, a cjelokupna izvedba ograničena je dostupnim resursima. Štoviše, kompetitivni uvjeti tržišta nameću kratke rokove i značajnu kvalitetu izvedbe, što dodatno otežava proces planiranja u ionako nesigurnim uvjetima projektnog izvršenja. Kako bi se omogućilo što pouzdanije planiranje građevinskih projekata, ovo doktorsko istraživanje primjenjuje suvremene optimizacijske metode za stvaranje početnih planova koji su rezistentni na negativan utjecaj nesigurnosti.

Rezistencija je u kontekstu vremenskog planiranja opisana kao proaktivan proces izrade optimalnih početnih planova koji će biti što stabilniji u nesigurnim uvjetima izvedbe. Osnovni cilj rezistentnog vremenskog planiranja je minimizirati odstupanja između prvotnog plana i ostvarenog stanja, tako da se u početni plan adekvatno rasporedi dovoljna količina vremenskih rezervi koje služe za apsorpciju negativnog utjecaja projektne nesigurnosti. Na ovaj način doprinosi se boljem upravljanju projekata u nesigurnim uvjetima izvođenja, koji su karakteristični za kompleksne građevinske projekte.

U ovom istraživanju naglasak je na razvoju novog optimizacijskog modela kojim se omogućuje stvaranje rezistentnih početnih planova za građevinske projekte. Rezultat optimizacijskog procesa predstavlja optimalan skup alternativnih planova, a daljnjom primjenom predloženih simulacijskih metoda i uz upotrebu razvijenog taksonomskog modela omogućena je kvantitativna analiza varijantnih rješenja. U tom smislu omogućena je efikasna procjena rezistencije za različite početne planove što unaprjeđuje proces odlučivanja u kontekstu upravljanja projektima. Rezultati istraživanja pokazali su da je primjenom predloženog pristupa omogućeno generiranje početnih planova različitog stupnja stabilnosti, tj. da je u okviru prihvatljivih vremenskih i financijskih ograničenja projekta moguće unaprijediti rezistenciju početnih planova. Upotrebom metaheurističkog algoritma za rješavanje postavljenog optimizacijskog problema predloženi pristup ostvaren je na složenoj projektnoj mreži, čime je dokazana praktična primjenjivost u kontekstu kompleksnih građevinskih projekata.

**Ključne riječi:** višeciljna optimizacija, rezistencija, vremensko planiranje, upravljanje projektima, nesigurnost u građevinskim projektima

Martina Milat, mag.ing.aedif.

## **Multi-objective optimisation model for resilient construction scheduling under uncertain conditions**

### **Abstract:**

Construction projects are complex undertakings that involve a large number of participants, while their realization is limited by available resources. Moreover, competitive market conditions impose short deadlines and high performance standards, that negatively impact uncertain conditions of project execution. In order to enhance the reliability in the planning process of construction projects, this doctoral research applies optimization methods for creating resilient baseline schedules.

In the context of project scheduling, resilience is described as a proactive approach that minimizes the deviations between planned and realized states. This is achieved through suitable allocation of time floats, so the ability of the baseline plan to absorb uncertain impacts is improved. Hence, reliability is improved in the domain of construction management under uncertainty. This doctoral dissertation describes the novel multi-objective optimization model which can be used to enable the creation of a reliable baseline plan for a construction project.

The result of the optimization process is depicted as the set of alternative baseline proposals. Further simulation and taxonomic analysis illustrate the impact of uncertainty on the project objectives. Therefore, an analytical assessment of resilience considering the potential baseline solutions facilitates decision making in construction management. Results of this research have shown that the application of the proposed methodology for proactive resilient scheduling reduces the negative impact of uncertainty. Moreover, by use of the customized metaheuristic algorithm, it is shown that the proposed resilient scheduling approach leads to more accurate forecasting and the planning calculations for a complex construction project can be accepted with increased confidence levels.

**Keywords:** multi-objective optimization; resilience; scheduling; project management; uncertainty management in construction



# SADRŽAJ

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. Upravljanje građevinskim projektima u uvjetima nesigurnosti.....	1
1.2. Optimizacijski modeli u upravljanju građevinskim projektima .....	3
1.3. Rezistencija sustava u uvjetima nesigurnosti .....	6
1.4. Pregled znanstvenog doprinosa .....	9
1.5. Cilj i hipoteze istraživanja .....	10
<b>2. REZISTENTNO PLANIRANJE PROJEKATA U UVJETIMA NESIGURNOSTI.....</b>	<b>12</b>
2.1. Rezistencija u upravljanju projektima .....	12
2.2. Rezistentno vremensko planiranje projekata .....	15
2.2.1. Proaktivno vremensko planiranje projekata .....	16
2.3. Problem vremenskog planiranja projekata s ograničenim resursima .....	19
<b>3. NESIGURNOST U GRAĐEVINSKIM PROJEKTIMA.....</b>	<b>22</b>
3.1. Interpretacija koncepta nesigurnosti u dosadašnjim istraživanjima .....	22
3.2. Izvori nesigurnosti u građevinskim projektima .....	25
3.2.1. Izrada taksonomije.....	26
3.2.2. Osnovni aspekti taksonomskog modela .....	28
<b>4. OPTIMIZACIJSKI MODEL ZA REZISTENTNO VREMENSKO PLANIRANJE GRAĐEVINSKIH PROJEKATA U UVJETIMA NESIGURNOSTI.....</b>	<b>32</b>
4.1. Metodološki koncept za rezistentno vremensko planiranje građevinskih projekata.....	34

4.2.	Surogatna mjera za evaluaciju rezistencije plana .....	38
4.2.1.	Proračun resursno-tehnološke vremenske rezerve .....	38
4.2.2.	Proračun težinskih vrijednosti vremenskih rezervi .....	43
4.3.	Optimizacijski problem za rezistentno vremensko planiranje građevinskih projekata.....	44
4.3.1.	Financijski modul za određivanje toka novca u građevinskom projektu .....	47
4.4.	Pristupi rješavanju višeciljnih optimizacijskih problema .....	49
4.5.	Genetski algoritam za rješavanje problema rezistentnog vremenskog planiranja.....	53
4.5.1.	Inicijalizacija genetskog algoritma .....	55
4.5.2.	Evaluacija, opstanak i odabir jedinki.....	59
4.5.3.	Genetski operatori.....	62
<b>5.</b>	<b>ANALIZA PERFORMANSI REZISTENIH VREMENSKIH PLANOVA U UVJETIMA NESIGURNOSTI .....</b>	<b>66</b>
5.1.	Monte Carlo metoda u kontekstu resursno ograničenih projekata .....	68
5.2.	Proširena Monte Carlo metoda s uključenim resursnim ograničenjima.....	72
5.3.	<i>Ex-ante</i> analiza rezistencije početnih vremenskih planova na teoretskim primjerima projektnih mreža .....	77
5.3.1.	Simulacija uvođenjem dodatnih resursno-tehnoloških veza .....	79
5.3.2.	Simulacija korištenjem SSGS algoritma .....	83
5.3.3.	Simulacija ponovnom optimizacijom.....	87
5.4.	<i>Ex-post</i> analiza rezistencije početnih vremenskih planova prema podacima o izvedenom stanju stvarnog građevinskog projekta.....	91
5.5.	Komentar dobivenih rezultata.....	99
<b>6.</b>	<b>ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA .....</b>	<b>103</b>
6.1.	Zaključci doktorskog rada .....	103
6.2.	Smjernice za buduća istraživanja.....	106
<b>7.</b>	<b>LITERATURA .....</b>	<b>108</b>

<b>DODATAK.....</b>	<b>121</b>
Proračun toka novca u građevinskom projektu .....	121
Algoritam za proračun resursno-tehnološke vremenske rezerve .....	127
Podaci stvarnog građevinskog projekta korišteni u ex-post analizi.....	129
<b>POPIS SLIKA.....</b>	<b>133</b>
<b>POPIS TABLICA.....</b>	<b>135</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>136</b>

## Popis oznaka i kratica

AL	eng. <i>Activity List</i> , lista aktivnosti
BIM	eng. <i>Building Information Modeling</i>
CPM	eng. <i>Critical Path Method</i> , metoda kritičnog puta
eng.	engleski
EUR	Euro valuta
$FF_i$	resursno-tehnološka vremenska rezerva za aktivnost $i$
GA	genetski algoritam
NP	eng. <i>Nondeterministic Polynomial</i> , odnosi se na klasu složenosti problema u računskoj teoriji složenosti
NSGA-II	eng. <i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i> , genetski algoritam nedominirajućeg sortiranja
PMI	eng. <i>Project Management Institute</i>
PSGS	eng. <i>Parallel Schedule Generation Scheme</i> , paralelna shema generiranja rasporeda
PSPLIB	eng. <i>Project Scheduling Problem LIBrary</i> , standardna baza problema vremenskog planiranja
<i>pymoo</i>	eng. <i>Python Multi-Objective Optimization</i> , okvir za rješavanje višeciljnih optimizacijskih problema u Python programskom jeziku
$R$	faktor kojim se ilustrira struktura direktnih troškova, $R \in [0,1]$
RCPSP	eng. <i>Resource-Constrained Project Scheduling Problem</i> , resursno ograničeno vremensko planiranje projekata
RSSGS	eng. <i>Robust Serial Schedule Generation Scheme</i> , robusna serijska shema generiranja rasporeda
SM	surogatna mjera
SSGS	eng. <i>Serial Schedule Generation Scheme</i> , serijska shema generiranja rasporeda

## 1. UVOD

### 1.1. Upravljanje građevinskim projektima u uvjetima nesigurnosti

Građevinski projekti kompleksni su poduhvati sastavljeni od niza povezanih aktivnosti, a u njihovom izvođenju sudjeluju brojni sudionici. Izvođenje građevinskih projekata odvija se u nesigurnim (eng. *uncertain*) uvjetima te je ograničeno materijalnim, financijskim i ljudskim resursima koji su potrebni za izvršenje zadanih ciljeva u određenom vremenskom okviru. Uslijed neprestanog razvoja tehnologije te zbog kompetitivnih uvjeta tržišta, građevinska industrija se u posljednje vrijeme suočava s porastom broja sve većih i složenijih projekata [1,2]. Takvi uvjeti nameću potražnju za učinkovitim rješenjima koja bi mogla doprinijeti ostvarenju građevinskih projekata u kraćim rokovima i strožim financijskim ograničenjima [3]. Ostvarenje projektnih ciljeva u uvjetima nesigurnosti kod složenih građevinskih projekata zahtijevan je zadatak te je stoga potrebno organizirano upravljati vremenom, resursima i projektnim rizicima.

U upravljanju građevinskim projektima, početni vremenski planovi od iznimne su važnosti. Za početak, takvi planovi koriste se za raspodjelu ograničenih resursa kako bi se optimizirala određena ciljna funkcija – najčešće se radi o minimizaciji duljine trajanja građevinskog projekta. Nadalje, početni vremenski planovi koriste se kao važna podloga na temelju koje se planiraju razne aktivnosti poput nabave materijala i preventivnog održavanja te se definiraju vremena isporuka pojedinih dijelova projekta [4]. Štoviše, početni planovi služe za mjerenje izvršenja te omogućavaju usporedbu planiranog i ostvarenog stanja građevinskog projekta [5]. Na temelju početnih vremenskih planova mogu se identificirati kritični faktori poput vremenskih odgoda, nedostataka resursa i nastalih troškova [6]. Izrada vremenskih planova provodi se u početnim fazama životnog ciklusa projekta, kada je mogućnost utjecaja na projektne ciljeve najveća za najmanji uloženi napor. Vremensko planiranje prethodi samom izvršenju aktivnosti na gradilištu i nužan je preduvjet za postizanje zadovoljavajućih projektnih rezultata. Vremensko planiranje može započeti nakon adekvatnog definiranja i prihvaćanja projekta, a odnosi se na izradu dinamičkog plana izvršenja s prikazom aktivnosti i resursa [7,8].

Unatoč neporecivoj koristi koju omogućuje konvencionalno vremensko planiranje projekata, isključivo determinističke metode planiranja često nisu dovoljne za efektivno upravljanje projektnim procesima, pogotovo u upravljanju kompleksnim i inovativnim projektima koji imaju visoki stupanj nesigurnosti. Zbog brojnih izvora nesigurnosti, kao što su varijabilna vremena izvršenja projektnih aktivnosti, nedostupnost resursa, kašnjenja u dopremi materijala, nepredviđene izmjene projektnog plana, odgode u izvršenju aktivnosti uslijed nepovoljnih

vremenskih uvjeta, itd., može doći do odstupanja između prvotnog plana i ostvarenog stanja, tj. javljaju se poremećaji u odnosu na početni vremenski plan. Izmjene u planu nužno imaju svoje negativne implikacije: vremenske odgode, smanjenu produktivnost radne snage [6], povećanje projektnih troškova uslijed prekoračenja ključnih događaja (eng. *milestones*) i rokova, prazni hod građevinske mehanizacije te povećanu potrebu za unošenjem izmjena u vremenski plan [4]. Štoviše, ako se tijekom životnog ciklusa projekta ne upravlja neizvjesnošću, čak i manji tehnički problemi poput neispravne dostave materijala mogu uzrokovati velike projektne gubitke po pitanju troškova i vremena [6].

Da bi se poboljšala vjerojatnost dostizanja projektnih ciljeva, nužno je prvo prepoznati izvore nesigurnosti u građevinskim projektima, a zatim primijeniti suvremene tehnike za pouzdano vremensko planiranje građevinskih projekata. Pouzdano vremensko planiranje odnosi se na težnju da se pravovremenim sagledavanjem nesigurnosti odgovori na njen negativan utjecaj u vidu što boljeg ostvarenja planiranih ciljeva projekta. U ovoj disertaciji, pojam pouzdanog vremenskog planiranja obuhvaća suvremene metode vremenskog planiranja projekata u uvjetima nesigurnosti te uključuje rezistentno vremensko planiranje kao jednu od metoda planiranja u nesigurnim uvjetima. Moderne metode planiranja predstavljaju iskorak u odnosu na postojeće tehnike jer se uobičajene determinističke postavke pri stvaranju početnih vremenskih planova proširuju uzimajući u obzir spoznaje o negativnom utjecaju projektne nesigurnosti. Generalno, u području vremenskog planiranja u uvjetima nesigurnosti razlikuje se pet osnovnih pristupa: proaktivno planiranje, reaktivno planiranje, stohastičko planiranje, planiranje neizrazitom logikom (eng. *fuzzy logic*), te analiza osjetljivosti (eng. *sensitivity analysis*) [4]. Svi navedeni pristupi primjenjivi su na vremensko planiranje projekata u širem smislu, ali zbog prirode upravljanja građevinskim projektima gdje je postojanje pouzdanih vremenskih planova od iznimne važnosti, ovo se istraživanje oslanja na proaktivni rezistentni pristup da bi se unaprijedilo upravljanje projektnim procesima u uvjetima neizvjesnosti. Svrha rezistentnog planiranja je stvoriti početne planove koji će pružiti odgovor na negativan utjecaj projektne nesigurnosti jer se nesigurna stanja i događaji sagledavaju i analiziraju već u fazi izrade vremenskog plana.

Konkretno, osnovni cilj rezistentnog pristupa planiranju je generiranje početnog vremenskog plana koji će ispravnom raspodjelom vremenskih rezervi unijeti dovoljno prostora za apsorpciju negativnog utjecaja projektne nesigurnosti. Na ovaj način se varijabilna trajanja pojedinih projektnih aktivnosti u određenoj mjeri sagledavaju već u početnoj fazi planiranja. Upotrebom rezistentnog pristupa teži se minimizaciji razlike planiranog i ostvarenog stanja, odnosno poboljšava se vjerojatnost dostizanja predviđenih projektnih ciljeva. Primjena ovog

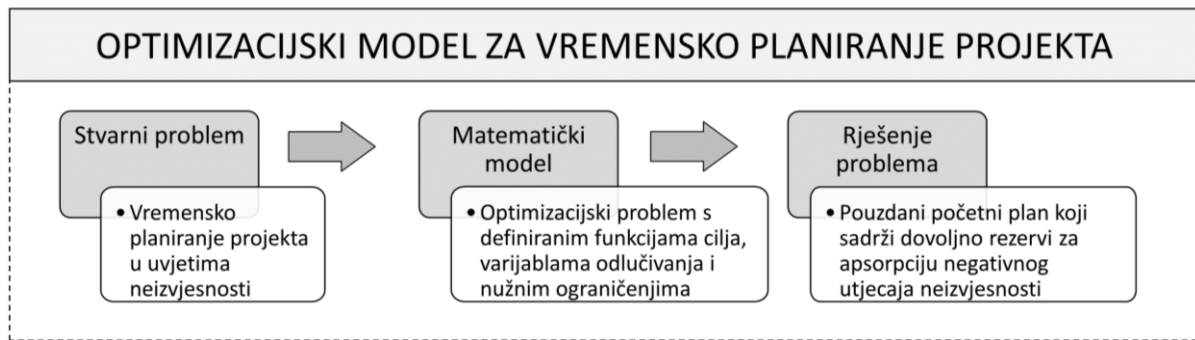
pristupa u planiranju građevinskih projekata omogućuje stvaranje pouzdanih početnih planova i posljedično bolje upravljanje u nesigurnim uvjetima izvođenja koji su karakteristični za složene građevinske projekte.

## **1.2. Optimizacijski modeli u upravljanju građevinskim projektima**

Upravljanje projektima odnosi se na primjenu znanja, vještina, alata i tehnika kako bi se dostigli projektni ciljevi [9], a dodatni zahtjevi u upravljanju građevinskim projektima odnose se na predaju konačnog proizvoda koji je u potpunosti funkcionalan te zadovoljava potrebe projektnih sudionika [10]. Upravljanje projektima obuhvaća različite procese te zahtijeva širokih spektar znanja i vještina potrebnih za efektivno upravljanje istima, pri čemu se kao neizostavan upravljački aspekt ističe upravo planiranje projekata. Planiranje projekata praktički uključuje cjelovit dio koji se odnosi na upravljanje vremenom, kao i na znatan dio sadržaja nekih drugih područja poput upravljanja troškovima, upravljanja rizikom i upravljanja nabavom. Prema tome, kako bi se omogućilo pouzdanije upravljanje projektima, fokus ovog istraživanja stavljen je na razmatranje suvremenih metoda za sveobuhvatno planiranje građevinskog projekta u uvjetima nesigurnosti. Veliki dio ovog istraživanja usmjeren je ka traženju odgovora na važno pitanje: „jesu li postojeće optimizacijske metode primjenjive za poboljšanje ključnih kriterija projektnog uspjeha u planiranju građevinskih projekata?“ Pri tome se kao bitni pokazatelji projektne uspješnosti mogu smatrati: završetak projekta na vrijeme, ostvarenje troškova unutar predviđenog proračuna i efikasnost dodjele ograničenih resursa [7].

Osnovni zadatak upravljanja projektima je uspjeh projekta i ostvarenje očekivanih koristi [7]. S obzirom na složenost procesa u upravljanju projektima, a naročito u velikim građevinskim pothvatima, upotreba inovativnih alata i tehnologija za brže, točnije i pouzdanije planiranje postala je nužan imperativ. Primjena optimizacijskih modela u upravljanju građevinskim projektima odnosi se na upotrebu matematičkih metoda s ciljem pronalaska najboljeg rješenja za određeni problem iz građevinske prakse. Upotreba optimizacije u upravljanju građevinskim projektima nužan je proces kako bi se postigle što efikasnije projektne procjene te da bi se osigurala kvantitativna potvrda pri donošenju važnih odluka u upravljanju projektima.

U ovom radu pod pojmom optimizacijskog modela podrazumijeva se sveobuhvatni računski sustav koji se sastoji od optimizacijskog problema i odgovarajuće metode rješavanja. Optimizacijski problem definiran je s ciljem opisivanja stvarnog problema u upravljanju građevinskim projektima, a konačan rezultat dan je u vidu rezistentnog rješenja za planiranje vremena i troškova te raspodjele ograničenih resursa za građevinski projekt pod utjecajem neizvjesnosti.



**Slika 1.1.** Konceptualni prikaz optimizacijskog modela za vremensko planiranje građevinskih projekata u uvjetima nesigurnosti

Neki od značajnih problema koji su pogodni za optimizacijsko modeliranje u upravljanju građevinskim projektima odnose se na općenito vremensko planiranje projekata (eng. *Project Scheduling Problems*), resursno ograničeno vremensko planiranje projekata (eng. *Resource-Constrained Project Scheduling Problems*, kratica *RCPS*), problem balansiranja trajanja i troškova projekta (eng. *Time-Cost-Trade-off Problems*, kratica *TCTO*) te na različite probleme u raspodjeli ograničenih resursa (eng. *Resource Allocation Problems*). U svom općenitom obliku, optimizacijski problem svodi se na maksimiranje ili na minimiziranje određene funkcije cilja pri čemu je važno uzeti u obzir postojeća ograničenja. Osnovni oblik općenitog optimizacijskog problema može se izraziti kao:

$$\min f(\mathbf{x}) \quad (1.1)$$

$$\text{uz ograničenja:} \quad h(\mathbf{x}) = 0 \quad (1.2)$$

$$g(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (1.3)$$

pri čemu je minimizacijska funkcija cilja (1.1) definirana varijablom odlučivanja  $\mathbf{x}$ , a ograničenja optimizacijskog problema mogu biti prikazana dvojako: kao ograničenja jednakosti (1.2) te kao ograničenja nejednakosti (1.3).

Funkcija cilja, varijable odlučivanja i problemska ograničenja u potpunosti definiraju optimizacijski problem, a prema stupnju složenosti razlikuju se optimizacijski problemi s jednom ciljnom funkcijom te višeciljni optimizacijski problemi.

U upravljanju građevinskim projektima, s naglaskom na vremensko planiranje projekata, najčešće funkcije cilja su minimizacija trajanja projekta te minimizacija ukupnih troškova projekta. Razlog tome leži u činjenici da su izvođači motivirani što kraćim vremenom izvedbe kako bi upravo njihova ponuda ostvarila prednost u fazi natječaja za izvođenje određenog građevinskog projekta [11]. Štoviše, početni vremenski plan utječe i na ukupnu cijenu



građevinskog projekta, drugim riječima minimizacija trajanja projekta ujedno minimizira indirektne troškove te pozitivno utječe na brži povrat investicijskog kapitala. Za izvođače minimizacija troškova projekta predstavlja veći profit, a minimizacija trajanja projekta smanjuje rizik od inflacije i nedostatka radne snage [12].

Iz praktičnih razloga, u primjeni optimizacijskih tehnika na problem vremenskog planiranja građevinskih projekata (eng. *project scheduling problems*), česta je upotreba višeciljnih optimizacijskih problema. Na taj se način pri izradi početnog vremenskog plana istovremeno pokušava optimizirati nekoliko funkcija cilja koje su često suprotstavljene jedna drugoj, npr. istovremena minimizacija trajanja i troškova projekta (eng. *TCTO problem*). U ovom slučaju smatra se da je smanjenje vremena izvedbe moguće ostvariti upotrebom većeg broja resursa, ali takav pristup predstavlja povećanje troškova, a može uzrokovati i probleme u fizičkoj koordinaciji resursa.

U konačnici, pri stvaranju sveobuhvatnih optimizacijskih modela u građevinarstvu potrebno je obratiti pažnju ne samo na definiranje ključnih karakteristika stvarnog problema, tj. na matematičko oblikovanje optimizacijskog problema, već i na moguće tehnike za rješavanje postavljenog problema. Pristupi rješavanju optimizacijskih problema općenito se mogu svrstati u dvije osnovne kategorije: heurističke i egzaktne metode. Ova dva pristupa razlikuju se najviše po brzini pretraživanja optimizacijskog prostora te prema stupnju optimalnosti konačnog rješenja. Prednost heurističkih metoda je u brznoj konvergenciji rezultata nego što je to slučaj kod egzaktnih metoda rješavanja, ali rješenje dobiveno primjenom heurističkih metoda ne garantira globalni optimum, već se bržom pretragom najčešće dolazi do suboptimalnih, tj. lokalnih optimuma. Kod egzaktnih metoda kao što su npr. linearno i nelinearno programiranje te njihovih podvarijanti (npr. mješovito-cjelobrojno linearno programiranje i mješovito-cjelobrojno nelinearno programiranje), glavna je prednost očekivani egzaktni optimalni rezultat, ali pretraživanje optimizacijskog prostora može biti dugotrajno čak i u slučaju relativno jednostavnih projektnih mreža [13].

Odabir odgovarajuće metode rješavanja optimizacijskog problema ovisi o složenosti problema, ali i o korisnosti dobivenog rezultata. Za kompleksne građevinske projekte, koje karakterizira veliki broj aktivnosti i složene projektne mreže, važno je doći do konačnih rezultata u prihvatljivom vremenu izračuna. S obzirom na to da je problem vremenskog planiranja projekata s ograničenim resursima (eng. *RCPSP*) definiran kao NP-težak problem [14] (eng. *Nondeterministic Polynomial*), suvremene metode rješavanja orijentirane su na razvoj heurističkih i metaheurističkih algoritama, poput genetskih algoritama (eng. *Genetic Algorithm; GA*), tabu pretraživanja (eng. *Tabu Search; SA*), simuliranog prekaljivanja (eng. *Simulated Annealing; SA*),

optimizacije kolonijom mrava (eng. *Ant Colony Optimization; ACO*), između ostalih. Upotrebom suvremenih metaheurističkih tehnika u vremenskom planiranju moguće je doći do zadovoljavajuće točnih rješenja u kratkom računskom vremenu, što je od iznimne važnosti za efektivnu primjenu optimizacijskog modela na kompleksne projektne mreže. U složenim računskim problemima, kao što je resursno ograničeno planiranje projekta (eng. *RCPSP*), zbog prevelikog broja mogućih kombinacija pri rješavanju osnovnog problema nije moguće primijeniti egzaktne metode ako do rezultata želimo doći u kratkom vremenu izračuna. U praktičnom pogledu, to znači da je veće projektne mreže (one mreže koje se sastoje od nekoliko desetaka aktivnosti ili više) trenutačno moguće rješavati isključivo metaheurističkim algoritmima, unatoč činjenici da konačno rješenje ne garantira globalni optimum.

### 1.3. Rezistencija sustava u uvjetima nesigurnosti

Koncept rezistencije (eng. *resilience*) u kontekstu znanstvenog istraživanja po prvi puta se uvodi 1973. godine u radu C. S. Hollinga [15]. Osnovna namjera spomenutog istraživanja bila je analizirati ponašanje ekoloških sistema koji su izloženi negativnom utjecaju kritičnih događaja, tj. dati teoretsku podlogu za procjenu rezistencije sustava na nepredvidiv utjecaj okoline. U tom kontekstu, Holling određuje rezistenciju kao svojstvo određenog sustava i smatra da je sustav rezistentan (eng. *resilient*) ako je u mogućnosti apsorbirati promjene i negativne utjecaje te i dalje zadržati svoju funkcionalnost [15]. Tijekom narednih godina koncept rezistencije mnogo puta se preuzimao i primjenjivao u različitim istraživačkim područjima [16], npr. u sustavnom inženjerstvu (eng. *Systems engineering*), pri upravljanju u kriznim uvjetima (eng. *Emergency management*), u zdravstvu, sociologiji, ekonomiji, prirodnim i primijenjenim znanostima, itd., a uvijek s osnovnom idejom da se pospješi potencijal dotičnog sustava za apsorpiranje i prilagodbu na nesigurne uvjete u budućnosti [15]. Danas je koncept rezistencije prepoznat kao važan element razvoja ne samo u znanstveno-istraživačkoj zajednici, već i u strateškom unaprjeđenju industrije. Rezistencija predstavlja jedan od tri temeljna elementa u novoj europskoj industrijskoj platformi "Industrija 5.0". Europska komisija u svojoj viziji nove industrijske transformacije koristi koncept rezistencije da bi se naglasila potreba za razvojem višeg stupnja robusnosti u industrijskoj proizvodnji. Rezistencija je u ovom slučaju usmjerena na bolju pripravnost uslijed neželjenih poremećaja te na osiguravanje funkcioniranja infrastrukture u kriznim uvjetima [17].

S obzirom na raznovrsnost domena te brojnost istraživanja po pitanju rezistencije sustava, gotovo je nemoguće odrediti jednoznačnu definiciju za opisivanje stabilnosti nekog sustava. No ipak, danas su se ustalila dva osnovna pristupa u kvantifikaciji rezistencije. Jedna istraživačka struja fokusirana je na opisivanje rezistencije u smislu brzine kojom se određeni sustav vraća u

početno stanje ravnoteže, nakon što je bio izložen negativnom djelovanju kritičnog događaja. Ovakav pristup naziva se još i inženjerska rezistencija (eng. *Resilience engineering*) i pogodan je za opisivanje sustava koji egzistiraju u stanju jedne stabilne ravnoteže. S druge strane, ako sustav koji promatramo može postojati u više različitih ravnotežnih stanja te je moguće utjecati na opće stanje sustava izmjenom procesnih varijabli, tada se rezistencija može definirati kao magnituda poremećaja koju sustav apsorbira prije nego što promijeni svoje ravnotežno stanje [18]. Upravo zbog toga, u kontekstu upravljanja projektima, a pogotovo u području vremenskog planiranja projekata, gdje se različita ravnotežna stanja jasno definiraju različitim projektnim ciljevima u smislu trajanja i cijene izvedbe, rezistencija se najčešće definira kao sposobnost sustava (određenog vremenskog plana) da očuva svoje performanse (projektne ciljeve), u uvjetima kada neizvjesni utjecaji iz okoline (izvori nesigurnosti) ugrožavaju početnu stabilnost sustava (prvotne prognoze) [19]. Potonji pristup karakterističan je za koncept ekološke rezistencije (eng. *Ecological resilience*) [11], a primjenjiv je ne samo za prirodne znanosti, već i za brojna druga istraživačka područja, pa tako i za vremensko planiranje projekata.

Rezistentno vremensko planiranje u suštini se svodi na izradu pouzdanih vremenskih planova koji u obzir uzimaju utjecaj nesigurnosti iz projektne okoline. U ovom proaktivnom pristupu osnovni je cilj pronaći početni plan koji će imati što manje odstupanje između prvotno planiranog i konačno ostvarenog stanja. Pri tome je jedno ravnotežno stanje definirano određenim vremenskim planom (različiti rasporedi aktivnosti daju različite ciljne funkcije u pogledu trajanja i troškova građevinskog projekta), a procesne varijable koje definiraju stanje sustava odnose se na varijabilne početke projektnih aktivnosti. Traženjem optimalnog vremenskog plana nastoji se minimizirati negativan utjecaj projektne nesigurnosti te povećati vjerojatnost dostizanja bitnih projektnih ciljeva kao što su što kraće vrijeme izvedbe i što manji troškovi projekta.

S obzirom na raspoložive podatke i vremensku fazu u kojoj se vrši procjena rezistencije određenog vremenskog plana na negativan utjecaj projektne nesigurnosti, u ovom istraživanju razmatraju se dvije vrste evaluacije: *ex-ante* i *ex-post* analiza. *Ex-ante* analiza provodi se prije ostvarenja projekta, tj. u fazi planiranja te je cilj ove analize izvršiti procjenu rezistencije početnog vremenskog plana za budući građevinski projekt. U ovom slučaju donositelj/ica odluka ne raspolaže s egzaktnim podacima o bitnim projektnim karakteristikama (kao što su npr. točna trajanja projektnih aktivnosti), već ih jedino može procijeniti na temelju postojećih znanja i iskustava sa sličnih projekata. U *ex-ante* analizi koriste se optimizacijske metode za generiranje rezistentnih početnih planova te simulacijske metode gdje se na temelju funkcija distribucije slučajnih varijabli opisuje očekivano ponašanje nesigurnih aktivnosti. Simulacijom se procjenjuje

vjerojatnost ostvarenja planiranih projektnih ciljeva poput trajanja i cijene izvedbe određenog građevinskog projekta, stoga se na ovaj način može s dostatnom pouzdanošću ocijeniti koliko je neki početni plan rezistentan na utjecaj projektne nesigurnosti. Prema tome, *ex-ante* analiza je iznimno korisna u situacijama kada donositelj/ica odluka mora odabrati konačni raspored (npr. od skupa najboljih rješenja odabire se samo jedno konačno rješenje) ili kada mora izvršiti rangiranje postojećih početnih planova u svrhu dodatne analize.



**Slika 1.2.** Osnovne istraživačke teme doktorske disertacije

Ako se procjena rezistencije početnog plana provodi nakon ostvarenja građevinskog projekta, to znači da u trenutku provođenja analize raspoložemo sa svim potrebnim podacima o izvedenom stanju te možemo usporediti koliko je određeni vremenski plan odstupao u odnosu planiranog i ostvarenog stanja. Ova vrsta analize odnosi se na tzv. *ex-post* analizu i korisna je u situacijama kada se nastoji doći do novih spoznaja i zaključaka po pitanju vremenskog planiranja građevinskih projekata. *Ex-post* analiza je primjenjiva za validaciju razvijenog pristupa rezistentnog vremenskog planiranja na konkretnom primjeru. Štoviše, detaljnom analizom izvedenih projekata proširuje se baza postojećeg znanja te tako pridonosi unaprjeđenju vremenskog planiranja za buduće građevinske projekte.

U svakom slučaju, područje rezistentnog vremenskog planiranja razvija se s težnjom da se negativan utjecaj kritičnih događaja tijekom izvršenja građevinskog projekta svede na minimum. Ključna ideja u ovom pristupu je osiguranje dovoljne količine rezervi u početnom planu. Pošto se

utjecaji nesigurnosti najčešće očituju u vidu vremenskih produljenja ili u smislu prekoračenja planiranog budžeta, ovo doktorsko istraživanje fokusirano je na analizu rezistencije početnih planova za građevinske projekte s obzirom na dvije najvažnije funkcije cilja nekog građevinskog projekta: njegovo trajanje i troškove. Okosnica rezistentnog pristupa u vremenskom planiranju je predviđanje optimalnog rasporeda resursno-tehnoloških vremenskih rezervi već u fazi planiranja projekta, jer se na taj način pravovremeno unapređuje mogućnost apsorpcije projektnih nesigurnosti. Osim toga, predloženi optimizacijski proračun na temelju početnog plana aktivnosti definira i financijski tok u projektu te se tako osigurava financijska izvodljivost, što je iznimno bitno u kontekstu kompleksnih građevinskih projekata. Integriranim optimizacijskim pristupom tako se na sveobuhvatan način planira vremenski raspored aktivnosti, resursna raspodjela te proračun financijskog toka. Pri tome se ističe važnost uvođenja vremenskih i financijskih rezervi u početnom planu da bi se u obzir uzeo negativan utjecaj projektne nesigurnosti, odnosno da bi se povećala vjerojatnost dostizanja projektnih ciljeva.

U narednim poglavljima bit će detaljnije objašnjen sveobuhvatni upravljački model kojim se omogućuje stvaranje i analiziranje rezistentnih vremenskih planova za građevinske projekte u uvjetima nesigurnosti.

### 1.4. Pregled znanstvenog doprinosa

Opći znanstveni doprinos doktorske disertacije je unapređenje postojećih pristupa za pouzdano vremensko planiranje građevinskih projekata u uvjetima nesigurnosti razvojem novog matematičkog (optimizacijskog) modela.

Partikularni aspekti znanstvenog doprinosa su sljedeći:

- Izrada novog matematičkog modela koji omogućava pouzdano vremensko planiranje građevinskih projekata u uvjetima nesigurnosti. Optimizacijski model zasniva se na resursno ograničenom problemu vremenskog planiranja projekata (eng. *Resource-Constrained Project Scheduling Problem*, kratica *RCPSP*) te se uvode dodatne funkcije cilja kako bi se poboljšali postojeći optimizacijski modeli za stvaranje stabilnih vremenskih planova u području upravljanja građevinskim projektima pod utjecajem nesigurnosti.
- Razvoj metode i programske podrške za implementaciju genetskog algoritma kako bi se omogućilo rješavanje postavljenog matematičkog (optimizacijskog) problema za projektne mreže većeg stupnja složenosti.

- Proširenje simulacijske metode i razvoj programske podrške za analizu ponašanja projektnih mreža u stohastičkim uvjetima uzimajući u obzir resursna ograničenja u projektima.
- Definiranje nove surogatne mjere kako bi se omogućilo poboljšanje računalne efikasnosti za rezistentno planiranje građevinskih projekata.
- Izrada taksonomskog modela uz pomoć programske podrške otvorenog koda za bolje razumijevanje utjecaja nesigurnosti pri izradi vremenskih planova za građevinske projekte.

Razvoj novog matematičkog modela za pouzdano vremensko planiranje građevinskih projekata u uvjetima nesigurnosti predstavlja unapređenje postojećih modela po pitanju složenijeg opisivanja stvarnog problema. Novi višeciljni problem uzet će u obzir više kriterija optimalnosti, a definiranje nove surogatne mjere omogućit će poboljšanje računalne efikasnosti za rezistentno vremensko planiranje građevinskih projekata. Implementacija genetskog algoritma kao metaheurističke tehnike rješavanja za postavljeni problem razvijena je u programskom jeziku Python te se tako omogućuje rješavanje projektnih mreža većeg stupnja složenosti. Rezultat primjene razvijenog evolucijskog (genetskog) algoritma odnosi se na skup Pareto optimalnih rješenja, koja omogućuju širi pregled i daljnju usporedbu najboljih alternativa pri odabiru konačnog vremenskog plana. Ovakav pristup predstavlja praktičnu metodu za pouzdaniju izradu i analizu početnih vremenskih planova. Uvođenje koncepta rezistencije u područje vremenskog planiranja za građevinske projekte pruža priliku za boljom pripremljenosti uzimajući u obzir negativne utjecaje nesigurnosti iz projektne okoline, a primjena novog modela za rezistentno vremensko planiranje služi za sveobuhvatniji pristup planiranju projekata jer se istovremeno sagledavaju vremenska, resursna i financijska ograničenja za građevinski projekt.

## 1.5. Cilj i hipoteze istraživanja

Osnovni cilj istraživanja je izraditi novi matematički model koji omogućava pouzdanije planiranje građevinskih projekata u uvjetima nesigurnosti. Iz navedenog cilja proizlaze sljedeće hipoteze istraživanja:

- Uspostava metodološkog okvira za rezistentno vremensko planiranje omogućit će primjenu optimizacijskog modela za pouzdaniju izradu početnih planova u kontekstu građevinskih projekata u uvjetima nesigurnosti.

- Upotrebom metaheurističkog optimizacijskog algoritma moguće je riješiti postavljeni matematički problem u računalno prihvatljivom vremenu za projektne mreže većeg stupnja složenosti.
- Uvođenje nove surogatne mjere za procjenu rezistencije početnih planova omogućit će odabir pouzdanijih početnih planova u optimizacijskom procesu.

Opravdanost postavljenih hipoteza ispitana je razvojem i primjenom računalnog alata za rješavanje i vrednovanje rezultata postavljenog problema na primjerima građevinskih projekata iz javno dostupnih baza podataka i prema teoretskim primjerima.

## **2. REZISTENTNO PLANIRANJE PROJEKATA U UVJETIMA NESIGURNOSTI**

Koncept rezistencije tek se nedavno počeo primjenjivati u području upravljanja projektima [16], a iako su istraživanja na temu projektne rezistencije u stalnom porastu, i dalje postoje različite mogućnosti za interpretaciju ovog pojma [20]. Kako bi se pobliže opisale osnovne postavke u primjeni koncepta rezistencije na upravljanje projektima, ovo poglavlje prvo donosi sažeti pregled dosadašnjih istraživanja na temu rezistentnog upravljanja projektima, a zatim i pregled specifičnijeg područja koje se odnosi na rezistentno vremensko planiranje projekata. Drugo poglavlje disertacije zaključeno je sa sažetim prikazom ishodišnog matematičkog modela za vremensko planiranje projekata s ograničenim resursima.

### **2.1. Rezistencija u upravljanju projektima**

Zajednička odlika svih dosadašnjih studija u području rezistentnog upravljanja projektima je da se uvođenjem novog koncepta rezistencije u postojeće istraživačko područje upravljanja projektima teži očuvanju projektnih performansi u slučaju neželjenih događaja, pri čemu se pouzdano upravljanje projektima nastoji omogućiti upotrebom fleksibilnih, sustavnih i specifičnih pristupa [16]. Generalno govoreći, u rezistentnom pristupu za upravljanje sustavima ističe se potreba za sagledavanjem događaja u širem kontekstu te se naglašava heterogenost sustava. Nadalje, napušta se pretpostavka da je postojeće znanje o ponašanju sustava dovoljan uvjet za učinkovito upravljanje istim te se naglašava potreba za neminovnim prihvaćanjem činjenice da će u budućnosti doći do pojave neizvjesnih događaja. Štoviše, nastoji se unaprijediti mogućnost sustava da apsorbira negativan utjecaj nesigurnosti, bez obzira na oblik pojavnosti neočekivanih događaja u samom sustavu ili u njegovoj okolini [15].

S obzirom na novitet primjene rezistentnog pristupa u upravljanju projektima, dosadašnja istraživanja još su uvijek u većoj mjeri orijentirana na definiranje teoretskih postavki. Autor K. Rahi stoga u svojoj nedavnoj studiji [16] objedinjuje postojeće prijedloge te predlaže sljedeće generalne pravce djelovanja:

- Integracija postojećih praksi u upravljanju projektima s novim, fleksibilnim metodama koje su specifične za određeni kontekst, što će pridonijeti dinamičnosti i proaktivnom pristupu u upravljanju projektnim rizicima.



- Napredak po pitanju uobičajenih praksi u upravljanju rizicima, koje se odnose na nadilaženje ustaljenih procesa kao što su detekcija rizika u fazi planiranja te praćenje i kontrola istih tijekom izvršenja projekta.
- Proširenje pristupa u procesu upravljanja rizicima: ne samo da fokus treba biti na reduciranju ranjivosti (eng. *vulnerability*) projektnog sustava već je potrebno definirati faktore i uvjete koji će omogućiti uspješan odgovor na neželjene događaje tijekom izvedbe projekta.

Razlog za upotrebom novih strategija u području upravljanja projektima leži u činjenici da su se dosadašnje prakse pokazale kao vremenski zahtjevne te nedovoljno fleksibilne u uvjetima značajne projektne nesigurnosti [21]. Štoviše, tradicionalni pristupi fokusirani su na definiranje i kvantifikaciju utjecaja projektnih rizika [22], ali nedostaju im kapaciteti koji bi pružili odgovor na negativne posljedice neočekivanih, a često neizbježnih rizika. Postojeće prakse u upravljanju rizicima stoga bi se trebale proširiti i dodatno osnažiti [23].

Rezistencija je u kontekstu upravljanja projektima po prvi puta definirana 2011. godine u radu autorice Geambasu [24] koja opisuje rezistenciju kao sposobnost projektnog sustava da se kontinuirano prilagođava promjenama te da zadovolji predviđene ciljne funkcije unatoč prijetnji neželjenih događaja iz projektne okoline. Štoviše, u spomenutom radu daju se prijedlozi za implementaciju koncepta rezistencije na svim razinama upravljanja: od strateške do operativne razine, a za svaku razinu dane su konkretne smjernice koje će omogućiti rezistentno upravljanje projektom. Tako npr. Geambasu [24] sugerira legitimnost i jasnu viziju projektnih ciljeva na najvišoj upravljačkoj razini, a zatim proaktivno planiranje, jasnu komunikaciju, široki raspon vještina i iskustava na srednjoj razini upravljanja te primjenu suvremenih tehnologija u svrhu smanjenja stupnja složenosti na operativnoj razini. Neke od smjernica primjenjive na rezistentno vremensko planiranje projekata istaknute su na slici 2.1.



**Slika 2.1.** Smjernice za implementaciju koncepta rezistencije po upravljačkim razinama s primjenom na vremensko planiranje projekata, prilagođeno prema Geambasu [24]

Navedeni prijedlozi i smjernice predstavljaju samo dio kapaciteta za uvođenje koncepta rezistencije u područje upravljanja projektima te se na ovaj način pokušava dati uvid u najznačajnija obilježja ovog suvremenog pristupa usmjerenog na poboljšanje vjerojatnosti dostizanja projektnih ciljeva. Popratne praktične strategije s primjerima iz dosadašnjih istraživanja navedene su u tablici 2.1.

**Tablica 2.1.** *Prikaz različitih strategija i praksi za implementaciju rezistentnog pristupa u upravljanju projektima, prilagođeno prema [23]*

<b>Redundancija</b>	<b>Raznovrsnost</b>	<b>Transparentnost</b>	<b>Suradnja</b>
Razvoj kapaciteta pri različitim projektnim partnerima [23]	Stvaranje organizacije koja može predložiti brojne alternative [25]	Dijeljenje detaljnih informacija o financiranju projekta između projektnih partnera [23]	Direktna i efektivna komunikacija među sudionicima projekta [23]
Angažiranost osoblja za paralelno izvršavanje aktivnosti [25]	Adaptabilni strateški planovi [25]	Pouzdana procjene troškova, pogotovo u uvjetima dugotrajnih projekata [26]	Izgradnja povjerenja upotrebom prikladnih tehnologija [23]
Alternativne projektne opcije i različiti izvori financiranja [26]	Multifunkcionalno oblikovanje prostora na idejnoj razini za projekte zgrada [26]	Formalna procjena potreba i primjena studija izvodljivosti [26]	Kapitalni zahtjevi se integriraju iz različitih izvora, prema svim razinama potraživanja [26]

Navedeni prijedlozi pridonose unapređenju osnovnih dimenzija rezistencije, a to su, kako K. Rahi [16] navodi, adaptabilnost i sveobuhvatno poznavanje sastavnih elemenata projekta. Na primjer, postojanje alternativnih projektnih rješenja može voditi ka visokoj razini adaptabilnosti pri strateškom planiranju i tako unaprijediti rezistenciju cijelog projekta, odnosno različita potencijalna rješenja mogu unaprijediti mogućnost da se prebrode neočekivana stanja i događaji za vrijeme provedbe projektnih aktivnosti. Giezen et al. [25] u svom radu donose primjer velikog infrastrukturnog projekta koji je za svoj cilj imao povezivanje nekoliko europskih gradova – ovdje se alternativna projektna rješenja odnose na različite transportne rute, a autori studije naglašavaju potrebu za postojanjem različitih projektnih rješenja u svim fazama kako bi se povećala vjerojatnost ostvarenja funkcionalnih i svrhovitih rezultata.

U suštini, koncept rezistentnog upravljanja projektima ne poriče važnost dosadašnjih praksi u upravljanju rizicima i neizvjesnošću, već nastoji komplementirati i unaprijediti

postojeće pristupe. S obzirom na to da rezistentan pristup upravljanju projektima predstavlja novost u istraživačkoj zajednici, ističe se važnost daljnjih istraživanja na ovu tematiku [16,27].

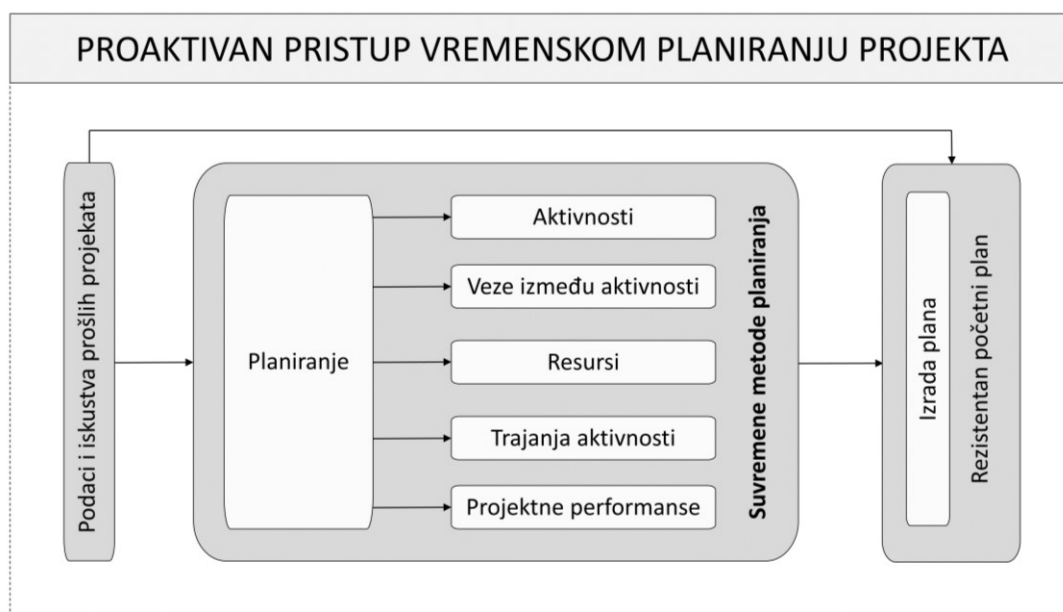
## **2.2. Rezistentno vremensko planiranje projekata**

Vremensko planiranje projekata odnosi se na operativni dio planiranja, tj. podrazumijeva se da su dostupne ulazne spoznaje o budućem projektu [7]. Vremenski planovi definiraju raspored projektnih aktivnosti u vremenu te služe za raspodjelu dostupnih resursa. S obzirom na veliki broj ulaznih varijabli i široki prostor mogućih rješenja, izrada vremenskih planova predstavlja složeni kombinatorni problem, ali razvoj suvremenih alata za pronalaženje optimalnih rješenja omogućuje rješavanje kompleksnih problema u prihvatljivom računskom vremenu. Međutim, treba imati na umu da svi budući planovi imaju tek određenu vjerojatnost da će se projektne aktivnosti izvršiti prema prvotnom proračunu. S ciljem da razlika planiranog i ostvarenog u konačnici bude čim manja, rezistentno vremensko planiranje odnosi se na područje istraživanja koje proučava metode za ublažavanje negativnog utjecaja neizvjesnosti tijekom izvedbe projekta. Takav pristup u biti obuhvaća više područja znanja u kontekstu općeg upravljanja projektima, a to su ponajprije upravljanje vremenom i rizicima, no u ovisnosti o stupnju složenosti ishodišnog kombinatornog problema može obuhvaćati i upravljanje resursima te upravljanje troškovima projekta.

S obzirom na to da je koncept rezistencije tek nedavno uveden u područje vremenskog planiranja projekata [19], i dalje postoje različiti pristupi za pobliže određivanje rezistentnog modela pri planiranju. Osnovna podjela odnosi se na razliku u proaktivnom i reaktivnom pristupu. Dok proaktivni početni planovi nastoje minimizirati utjecaj nesigurnosti već u fazi planiranja, tj. prije izvedbe projekta, reaktivni pristupi odnose se na upotrebu različitih metoda koje analiziraju i određuju moguće intervencije nakon što nastupi negativan događaj u fazi izvršenja projekta. Dahmani et al. [28] u svom nedavnom radu navode kako je većina postojećih istraživanja fokusirana na proaktivan pristup u optimizaciji problema vremenskog planiranja projekata, tj. srž rezistentnog vremenskog planiranja odnosi se na anticipaciju negativnog utjecaja projektne nesigurnosti. Kao što je ilustrirano na slici 2.2., obilježje proaktivnog pristupa je da se upotrebom suvremenih metoda planiranja djeluje unaprijed, prije pojave mogućeg događaja te se tako izvode početni planovi rezistentni na negativan utjecaj projektne nesigurnosti.

S druge strane, reagiranje nakon što se događaj ostvario odnosi se na reaktivan pristup planiranju, ali takav pristup moguće je analizirati jedino u fazi izvršenja projekta. S obzirom na jedinstveni karakter građevinskih projekata i njihovu dugotrajnu izvedbu, reaktivni pristupi

vremenskom upravljanju projekta nalaze se izvan okvira trenutnog istraživanja te neće biti obuhvaćeni ovim doktorskim radom. Unatoč tome, važno je napomenuti da reaktivno planiranje projekata predstavlja aktualno istraživačko područje, a njihova analiza i primjena u kontekstu građevinskih projekata donosi potencijalni smjer za buduća istraživanja. Više informacija po pitanju reaktivnog vremenskog planiranja moguće je pronaći u nedavnom istraživanju autora Li et al. [29].



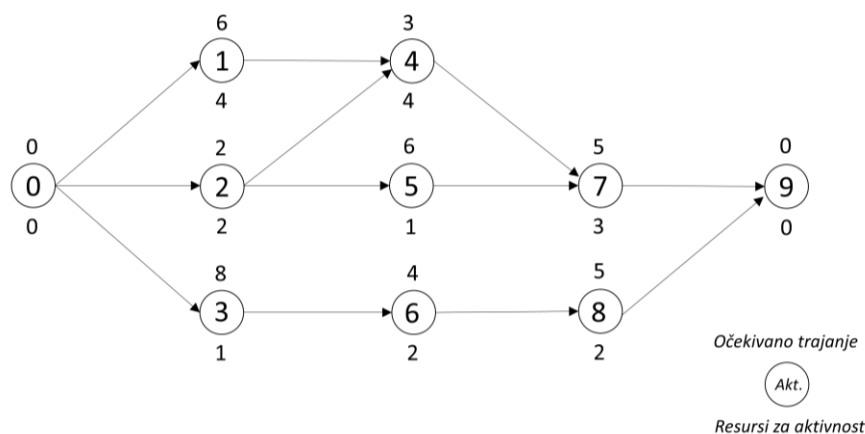
Slika 2.2. Proaktivno vremensko planiranje, prilagođeno prema [28]

Potencijalni razlog za trenutačnim prevladavanjem proaktivnih naspram reaktivnih pristupa u rezistentnom vremenskom planiranju projekata može biti činjenica da se proaktivno planiranje sagledava kao prvi korak u širem konceptu objedinjenih proaktivno-reaktivnih procedura. S obzirom na to da je ovaj pravac istraživanja tek u svojim začecima, vjerojatno je za očekivati daljnji razvoj ne samo proaktivnih, već i reaktivnih metoda za rezistentno upravljanje u fazi izvođenja građevinskih projekata.

### 2.2.1. Proaktivno vremensko planiranje projekata

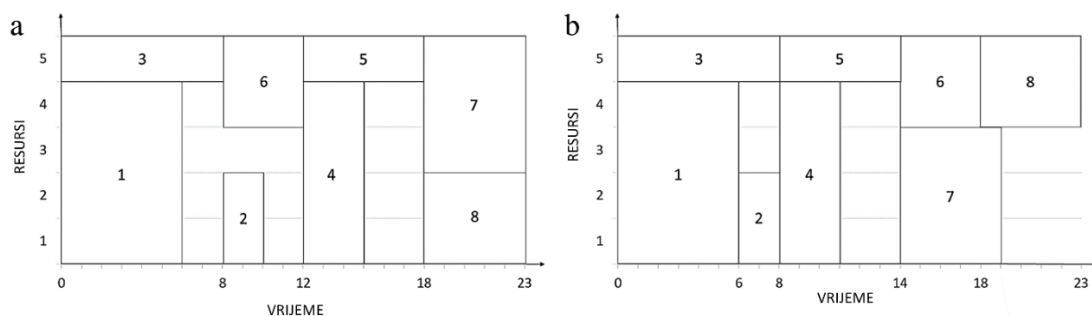
Rezistencija se u istraživačkoj domeni usmjerenoj na proaktivno vremensko planiranje projekata (eng. *proactive project scheduling*) definira kao svojstvo početnog plana da apsorbira vremenska odstupanja u trajanju aktivnosti koja su nastala uslijed neizvjesnih događaja [30]. Što je veća magnituda poremećaja koju početni plan može apsorbirati, to je vremenski plan rezistentniji na negativan utjecaj projektne nesigurnosti [19]. U suštini, ideja rezistentnog vremenskog planiranja predlaže unošenje dovoljne količine vremenskih rezervi u početni

vremenski plan, tako da se ublaže poremećaji kada dođe do promjena u predviđenom trajanju pojedinih aktivnosti. Na ovaj način umanjuje se potreba za učestalim izmjenama u planu za vrijeme izvršenja projektnih aktivnosti te se teži minimizaciji odstupanja između prvotnog plana i konačno ostvarenog stanja. Izrada rezistentnih početnih planova tako se svodi na kompromisni (eng. *trade-off*) problem u kojemu se istovremeno nastoji zadovoljiti više suprotstavljenih funkcija cilja, npr. minimizacija trajanja projekta te maksimizacija vremenskih rezervi kako bi se apsorbirao negativan utjecaj nesigurnosti. Za bolju ilustraciju predstavljenog problema dan je primjer jednostavne projektne mreže na slici 2.3. U ovom primjeru razmatra se samo jedna vrsta resursa potrebnog za izvršenje projektnih aktivnosti te se pretpostavlja da je za vrijeme izvedbe projekta na raspolaganju najviše 5 jedinica tog resursa.



Slika 2.3. Projektna mreža za ilustraciju problema rezistentnog vremenskog planiranja

Za ovaj ilustrativni projekt predstavljena su dva početna plana na slici 2.4. Iako oba rasporeda daju jednako početno trajanje projekta od 23 vremenske jedinice, razlikuju se po tome što prvi ima veći broj vremenskih rezervi, odnosno rezistentniji je na potencijalna produljenja u trajanju aktivnosti nego što je to slučaj s drugim početnim planom, koji ima manje vremenskih rezervi.



Slika 2.4. Početni vremenski planovi: (a) veći broj vremenskih rezervi; (b) manje vremenskih rezervi

Pretpostavimo sada da je tijekom izvršenja projekta došlo do produljenja trajanja na aktivnostima 1 i 2, tako da obje aktivnosti traju po jednu vremensku jedinicu dulje no što je to bilo prvotno planirano. Ostvareno trajanje aktivnosti 1 sada iznosi sedam dana, a trajanje aktivnosti 2 je tri dana. Prema prvom vremenskom planu sa slike 2.4. (a), vidljivo je da neće doći do poremećaja u odnosu prvotnog plana i ostvarenog stanja unatoč produljenju trajanja navedenih aktivnosti, jer su postojeće vremenske rezerve dovoljne da apsorbiraju nastale promjene. U prvom slučaju, vremena početaka svih aktivnosti, kao i ukupno trajanje projekta ostat će jednako prvotnome planu, unatoč tome što je pri realizaciji došlo do produljenja u trajanju pojedinih aktivnosti. U slučaju drugog vremenskog rasporeda aktivnosti sa slike 2.4. (b), može se primijetiti da će doći do izmjene u vremenima početaka pojedinih aktivnosti. Npr. početak aktivnosti 2 odgađa se za jednu vremensku jedinicu uslijed produljenja trajanja aktivnosti 1, a to za sobom vuče lančani niz reakcija pa se mijenjaju i početci ostalih aktivnosti: aktivnosti 4 i 5 zbog tehnoloških veza vidljivih sa slike 2.3. mogu početi tek kada završe sve njihove prethodne aktivnosti, što znači da je novi početak aktivnosti 4 i 5 tek vremenski trenutak 10. Posljedično, aktivnosti 6 i 7 počinju u trenutku 16, a početak aktivnosti 8 odgađa se na 20. vremenski trenutak. Ukupno trajanje projekta u ovom slučaju produžuje se s planirane 23 vremenske jedinice na 25 vremenskih jedinica te se u ovom slučaju može zaključiti da je prvi početni plan pokazao veću rezistenciju na negativan utjecaj projektne nesigurnosti koja je prikazana produljenim vremenima trajanja pojedinih aktivnosti.

U navedenom primjeru prikazala se samo jedna realizacija moguće stvarnosti, a za kompleksniju analizu ponašanja početnog plana moguće je primijeniti simulacijske tehnike poput Monte Carlo analize. U tom slučaju, za neizvjesne podatke u vidu varijabilnog trajanja određenih aktivnosti, zadaju se ulazni parametri kao funkcije distribucije slučajnih varijabli da bi se odredila vjerojatnost ostvarenja prvotnih prognoza te je tako moguće ocijeniti stupanj rezistencije pojedinog početnog plana.

S obzirom na računalnu zahtjevnost i dugotrajan proces direktne evaluacije za rezistenciju određenog vremenskog plana u slučajevima kompleksnijih projektnih mreža, dosadašnja istraživanja predlažu upotrebu tzv. surogatnih mjera (eng. *surrogate measure*) da bi se odredila rezistencija pri modeliranju početnog rasporeda aktivnosti [19,30]. Takve mjere temelje se na kvantifikaciji vremenskih rezervi u početnom planu, a dosadašnja istraživanja predlažu različite realizacije surogatnih mjera, npr. omjer slobodnih vremenskih rezervi i očekivanog trajanja aktivnosti u projektu [19] ili složeniji model koji sagledava iznose slobodnih rezervi u kombinaciji sa stupnjem nesigurnosti za pojedinu aktivnost [30]. Ovakav pristup naročito je efikasan u fazi

izrade početnog vremenskog plana, kada se rezistentno rješenje traži kao optimum matematičkog problema. Upotrebom surogatnih mjera umjesto direktnih simulacija tijekom traženja optimalnog rješenja izbjegava se dodatno računsko opterećenje pri rješavanju zahtjevnih kombinatornih problema kao što je problem vremenskog planiranja projekata s ograničenim resursima, koji će biti detaljnije objašnjen u sljedećem potpoglavlju.

### 2.3. Problem vremenskog planiranja projekata s ograničenim resursima

Problem vremenskog planiranja projekata s ograničenim resursima (eng. *RCPSP*) odnosi se na problem optimalnog raspoređivanja aktivnosti kako bi se zadovoljila određena funkcija cilja (npr. minimizacija trajanja projekta), pri čemu je nužno poštovati tehnološka i resursna ograničenja. Ovaj problem koristan je za modeliranje projektnih problema u građevinskoj industriji, ali i širim područjima djelatnosti te je zbog svoje primjenjivosti i brojnih mogućnosti proširenja osnovnog modela od iznimnog značaja i za širu istraživačku zajednicu [29,30]. Koristan prikaz najznačajnijih varijanti i proširenja *RCPSP* problema objavljen je 1999. godine u uglednom europskom časopisu za operacijska istraživanja (eng. *European Journal of Operational Research*, kratica *EJOR*) [31] te je nedavno u istom znanstvenom časopisu objavljen ažurirani pregledni rad s ciljem objedinjenog prikaza najnovijih dostignuća u vremenskom planiranju projekata s resursnim ograničenjima [32]. Dodatni pregledi različitih proširenja *RCPSP* problema i suvremenih pristupa za rješavanje postojećih problema mogu se naći u referencama [33–35].

Kao što je prethodno spomenuto, *RCPSP* problem prema računskoj teoriji složenosti spada u kategoriju NP-teških problema [14] (eng. *Nondeterministic Polynomial*), tj. za rješavanje *RCPSP* problema nije poznat algoritam polinomnog stupnja složenosti. Konkretnije, s porastom broja ulaznih varijabli, prostor mogućih rješenja za ishodišni problem postaje prevelik da bi se optimalno rješenje moglo pronaći u računalno prihvatljivom vremenu. Prema tome, rješavanje *RCPSP* problema egzaktnim metodama moguće je jedino u slučajevima manjih projektnih mreža, a kod većeg broja projektnih aktivnosti koriste se heurističke ili metaheurističke metode rješavanja. Heurističke i metaheurističke metode ne garantiraju pronalazak optimalnog rješenja, ali zato imaju mogućnost pronalaska približno optimalnih rješenja u brzom vremenu izračuna.

Konceptualni model osnovnog *RCPSP* problema može se prikazati modelom linearnog programiranja kako slijedi:

$$\min f_n \quad (2.1)$$

$$\text{uz ograničenja:} \quad f_i \leq f_j - d_j, \forall (i, j) \in A \quad (2.2)$$

$$f_1 = 0 \quad (2.3)$$

$$\sum_{i \in S_t} r_{ik} < a_k, \text{ za } k = 1, \dots, m \wedge t = 1, \dots, f_n \quad (2.4)$$

U ovom iskazu pretpostavlja se upotreba fiktivnih aktivnosti (eng. *dummy activities*), tj. aktivnosti koje predstavljaju početak ( $f_1$ ) i završetak projekta ( $f_n$ ), a čije je trajanje i potražnja za resursima jednaka nuli. Varijabla odlučivanja  $f_i$  označuje vrijeme završetka pojedine aktivnosti, a oznaka  $d_i$  obilježava trajanje pripadajuće aktivnosti  $i$ . Oznaka  $a_k$  predstavlja dostupnost resursa  $k$ -te vrste, a  $r_{ik}$  definira potražnju resursa vrste  $k$  od strane aktivnosti  $i$ . Skup  $A$  sadrži međusobne ovisnosti projektnih aktivnosti, a skup  $S_t$  korišten u izrazu (2.4) predstavlja skup aktivnosti koje traju u trenutku  $t$ .

Ciljna funkcija ovog modela prikazana izrazom (2.1) minimizira vrijeme završetka konačne *dummy* aktivnosti, odnosno minimizira ukupno trajanje projekta. Izraz (2.2) naglašava da relacijski odnosi među aktivnostima moraju biti ispoštovani, a jednačba (2.3) definira završetak početne *dummy* aktivnosti, odnosno početak projekta u trenutku 0. Konačno, izraz (2.4) ističe da resursna ograničenja moraju biti zadovoljena za cijelo vrijeme odvijanja projektnih aktivnosti [8].

Prema Bruni et al. [36], iako RCPSP problem predstavlja podrobno istražen problem u istraživačkoj zajednici, uvođenje neizvjesnosti u deterministički problem prisutno je tek posljednjih 20 godina. Kako se dalje navodi u spomenutoj studiji [36], do sada su se razvila dva alternativna pravca za rješavanje RCPSP problema u uvjetima neizvjesnosti. Prvi smjer odnosi se na stohastičko planiranje, tj. pogodan je za probleme u kojima su trajanja svih aktivnosti modelirana slučajnim varijablama poznatih funkcija distribucije. U tom slučaju vremensko planiranje predstavlja proces gdje se odluke donose prema fazama kada nove informacije postanu dostupne, a rješenje problema vremenskog planiranja u suštini je predstavljeno strategijama odlučivanja (eng. *scheduling policies*). Tipični problemi u stohastičkim projektnim mrežama odnose se npr. na određivanje najkritičnijeg puta ili najkritičnijih aktivnosti, procjenu očekivanog trajanja projekta i sl. [8]. S druge strane, proaktivno planiranje predstavlja pravac istraživanja koji zahtijeva tek parcijalno znanje o projektnoj nesigurnosti (nije nužno poznavati vjerojatnosne funkcije distribucije) pri donošenju odluka za izradu vremenskih planova. Rezultat proaktivnog planiranja predstavljen je u vidu početnih vremenskih planova koji su u određenom smislu otporni na nepovoljne događaje u budućnosti, tj. tijekom izvršenja projekta. Osnovna ideja odnosi se na realizaciju početnih vremenskih planova koji će u uvjetima nesigurnosti odstupati što je manje moguće od prvotnog rasporeda [36].



S obzirom na specifičnosti vremenskog planiranja za građevinske projekte, još jednom se naglašava primjenjivost proaktivnih metoda koje polučuju stabilne početne planove kao rezultat optimizacijskog procesa čak i u uvjetima omeđenog znanja o projektnoj nesigurnosti. U građevinskom projektima, rezistentni početni planovi od iznimne su važnosti jer služe kao osnova za raspodjelu ograničenih resursa, podloga za planiranje toka novca u projektu te kao polazišna točka za planiranje podizvoditeljskih radova. Prema tome, može se smatrati da RCPSP problem predstavlja srž rezistentnog planiranja, koje se u tom slučaju interpretira kao proširenje osnovnog problema vremenskog planiranja dodatnim funkcijama cilja. Popratne funkcije cilja pospješuju optimalne performanse po pitanju ključnih pokazatelja u upravljanju projektima.

### 3. NESIGURNOST U GRAĐEVINSKIM PROJEKTIMA

Nesigurnost, odnosno neizvjesnost (eng. *uncertainty*) se u razgovornom jeziku odnosi na stanje ili pojavu koja se ne može predvidjeti ili zaključiti s pouzdanošću, tj. ovi sinonimi (nesigurnost, neizvjesnost) opisuju stanje onoga koji je nesiguran [37]. Primjerice, u kolokvijalnom jeziku je značenje sljedeće rečenice potpuno jasno i razumljivo: „Vremenska prognoza za sljedeći tjedan je neizvjesna.“ Nasuprot tomu, u kontekstu upravljanja projektima ne postoji jednoznačna definicija koncepta neizvjesnosti [38,39], već različiti autori predlažu različite interpretacije projektne neizvjesnosti. Osim toga, u znanstvenom području koje se odnosi na upravljanje projektima može se ustvrditi isprepletenost koncepta neizvjesnosti i rizika, ali i dodatnih srodnih pojmova kao što su: „prijetnje“ (eng. *threats*), „opasnosti“ (eng. *hazards*), „varijabilnost“ (eng. *variability*), „štetni učinci“ (eng. *adverse effects*), „negativan utjecaj“ (eng. *negative impact*), „ranjivost“ (eng. *vulnerability*) i sl.

U ovom poglavlju prvo će se detaljnije analizirati klasifikacija koncepta neizvjesnosti u upravljanju projektima na temelju dosadašnjih istraživanja, a zatim će se prikazati razvijeni taksonomski model za lakši pregled i bolje razumijevanje mogućih izvora neizvjesnosti u kompleksnim građevinskim projektima.

#### 3.1. Interpretacija koncepta nesigurnosti u dosadašnjim istraživanjima

U dosadašnjim istraživanjima u području upravljanja projektima nesigurnost se često ilustrira iz aspekta projektnih rizika. Pri tome se neizvjesnost interpretira kao općenitiji pojam od rizika [7], tj. kao preduvjet za postojanje rizika. Tako na primjer, PMI (eng. *Project Management Institute*) [9] opisuje projektne rizike kao neizvjesne događaje ili uvjete koji, ukoliko se dogode, mogu uzrokovati pozitivan ili negativan utjecaj na jedan ili više projektnih ciljeva. Premda je naznačena uzročno-posljedična veza između neizvjesnosti i rizika, PMI ne specificira što se točno podrazumijeva pod pojmom neizvjesnosti, stoga Perminova et al. [38] predlažu analognu definiciju neizvjesnosti kao konteksta za pojavu rizika u vidu događaja koji mogu imati pozitivan ili negativan utjecaj na projektne performanse.

Štoviše, pojedini autori idu korak dalje te osim što ističu važnost distinkcije između pojmova rizika i neizvjesnosti, dodatno naglašavaju i potrebu za upravljanjem neizvjesnostima u projektu kao zasebnu praksu. Primjerice, Chapman i Ward [40] tvrde da rizik nije uzrok neizvjesnog utjecaja na projektne ciljeve, već je rizik implikacija neizvjesnosti o stupnju ostvarivih ciljeva te je stoga potrebno šire sagledavanje brojnih izvora neizvjesnosti da bi se uspješno upravljalo projektom. Ovakva definicija sugerira da se upravljanje projektnim rizicima zasniva na upravljanju

neizvjesnostima. Autori nadalje ističu kako je neophodno istraživanje i shvaćanje zašto neizvjesnost nastaje u projektu te kako je u konačnici važno razumjeti jeli neizvjesnost značajna za određeni projektni kontekst ili ne. Njihov pristup stoga zagovara upravljanje projektnim neizvjesnostima već od najranije faze životnog ciklusa projekta pri čemu se utvrđuje što se može napraviti, odlučuje se što će se napraviti te se nastoji osigurati da se planirano i ostvari.

Koncept neizvjesnosti u dosadašnjim istraživanjima najčešće je upotrebljavan u općem kontekstu kao nepostojanje apsolutne sigurnosti u procjeni ulaznih podataka za planiranje projekta. Nesigurnost u općem smislu može različito utjecati na važne ciljne funkcije u projektu, stoga su provedena istraživanja o utjecaju generalne projektne neizvjesnosti na ključne pokazatelje projektne uspješnosti: troškove [41–44] i vrijeme izvedbe projekta [43–46]. Međutim, pojedina istraživanja analiziraju projektnu neizvjesnost u užem smislu – uzimajući u obzir neizvjesnost samog modela u analizi važnih projektnih čimbenika [47,48]. Osim toga, određeni autori [39,49–52] naglašavaju razliku po pitanju različitih vrsta neizvjesnosti pa se spominju aleatorna (eng. *aleatoric*) i epistemična (eng. *epistemic*) neizvjesnost. Aleatorna neizvjesnost (prema lat. *alea*, kocka, i.e. ovisiti o šansi) opisuje inherentnu varijabilnost uvjeta, a epistemična neizvjesnost pomanjkanje saznanja, tj. nesavršeno modeliranje stvarnosti. Dakako, postoji još različitih interpretacija neizvjesnosti u kontekstu upravljanja projektima, a neke od njih zbog jasnijeg pregleda sažete su u tablici 3.1.

**Tablica 3.1.** Različite interpretacije nesigurnosti u upravljanju projektima

Interpretacija neizvjesnosti	Primjer/ objašnjenje
Nesigurnost u matematičkom modeliranju	Nesigurnost u ulaznim podacima, ograničenja u matematičkoj interpretaciji kompleksnih pojava iz stvarnosti [53]
	Nesigurnost u procesu modeliranja velikih projekata koji su zahtjevniji u pogledu generiranja projektne mreže, npr. projekti izgradnje tunela [54]
Različite vrste nesigurnosti	Aleatorna i epistemična nesigurnost [39,49–52]
	Pogreška, nepreciznost, varijabilnost, neodređenost, dvosmislenost, neznanje [55]
Područja nesigurnosti	Varijabilnost početnih procjena, neizvjesnost ulaznih podataka za izradu plana, neizvjesnost nacрта i logistike, neizvjesnost ciljeva i prioriteta, neizvjesnost fundamentalnih odnosa između projektnih sudionika [40]

Izvori nesigurnosti/ neizvjesni događaji	Porast cijena materijala, nezgoda tijekom gradnje, promjena mišljenja donosioca odluka (shodno i projektnih očekivanja) [56]
	Zahtjevi za promjenama, nepovoljne vremenske prilike, kašnjenje isporuke materijala [19]
	Tehnologija, tržište, zakonodavstvo, financije i organizacija [57]

Ukratko, Zhong et al. [58] u svom radu sumiraju dosadašnja istraživanja na temu neizvjesnosti u projektima prema sljedećim kategorijama:

- definiranje projektne nesigurnosti,
- diskusije o genezi projektne nesigurnosti,
- uvođenje novih pristupa za bolje upravljanje projektnim neizvjesnostima

Bez obzira na brojnost postojećih znanstvenih studija koje analiziraju projektne neizvjesnosti, definicije koncepata i klasifikacije neizvjesnosti u projektima i dalje predstavljaju fundamentalne istraživačke probleme [58]. Iako se za analizu projektne neizvjesnosti upotrebljavaju različiti koncepti, klasifikacije i metode, može se zaključiti da je zajednički motiv svih istraživanja spoznaja da nije moguće u potpunosti predvidjeti projektne izvedbe jer su planiranje i izvedba projekta uvijek izloženi varijabilnim utjecajima. U građevinskim projektima uobičajeno je odstupanje između planiranog i izvršenog stanja, ali upotrebom odgovarajućih metoda nastoji se ublažiti nesrazmjer između početnog plana i stvarnog izvršenja da bi se umanjio neželjeni utjecaj neizvjesnosti. Budući da brojni izvori neizvjesnosti u građevinskim projektima mogu značajno utjecati na projektne ciljeve, pouzdani početni planovi od iznimne su važnosti za izvođača građevinskih radova te je evidentna težnja za što manjim odstupanjima u odnosu planiranog i izvršenog stanja. Prema tomu, da bi se unaprijedilo upravljanje projektima te da bi se čim vjernije predvidjela stvarna izvedba, apsolutno je nužno nadograditi osnovni deterministički pristup propitivanjem neizvjesnosti u projektu. Ova istraživačka problematika prepoznata je još od kasnih pedesetih godina prošlog stoljeća, kada je predložena jedna od prvih tehnika mrežnog planiranja koja u obzir uzima nesigurnost u procjeni vremena događaja (PERT, eng. *Program Evaluation and Review Techniques*) [59]. Ova tehnika je orijentirana na planiranje projekata u kojima je prisutna nesigurnost, ali s vremenom je ubrzani razvoj računala omogućio složenije modeliranje projektne nesigurnosti te se PERT tehnika danas primjenjuje ograničeno [7].

S ciljem detekcije mogućih izvora neizvjesnosti u građevinskim projektima, za potrebe ovog doktorskog rada provedeno je sustavno pretraživanje relevantne literature, a tako prikupljeno

znanje strukturirano je u vidu taksonomije o izvorima neizvjesnosti u građevinskim projektima. Ovaj dio istraživanja detaljnije je predstavljen u sljedećem potpoglavlju.

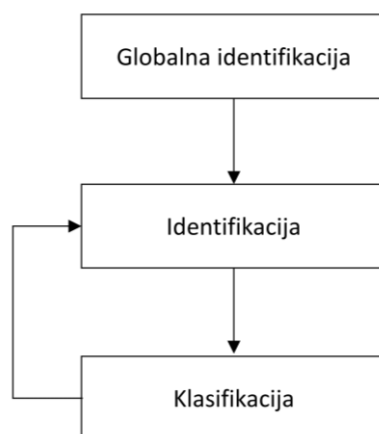
#### **3.2. Izvori nesigurnosti u građevinskim projektima**

Pojava neželjenih događaja tijekom izvedbe projekta, kao i njihov utjecaj na projektne performanse, u svojoj naravi su neizvjesni. Osim toga, neizvjesnost koja proizlazi iz nedostatka znanja u kompleksnim i dinamičnim sustavima je isprepletena s planiranjem i donošenjem odluka na svim razinama upravljanja [60]. Ukoliko se neizvjesnost u projektu zanemaruje, takav pristup može voditi prema manjkavom ostvarenju projektnih ciljeva. Prema tome, važno je pravovremeno razumjeti izvore neizvjesnosti u građevinskim projektima te prepoznati važnost adekvatnog upravljanja projektom nesigurnošću jer se time omogućuje učinkovit odgovor na neželjen utjecaj neizvjesnih događaja tijekom provedbe projekta. Identifikacija, klasifikacija i opis izvora nesigurnosti nužni su koraci u upravljanju projektom neizvjesnosti koji vode ka pouzdanijem ostvarenju projektnih ciljeva.

Prethodna istraživanja u upravljanju građevinskim projektima pokazala su da se najviše neizvjesnih uvjeta i događaja može locirati na samom gradilištu. Pojedini autori [61,62] tvrde da se preko 90% identificiranih uzroka neizvjesnosti odnosi na gradilišne aktivnosti. Osim toga, u dosadašnjim istraživanjima razmatrana je i raspodjela neizvjesnosti tijekom životnog ciklusa projekta te je ustanovljeno da se najveći broj neizvjesnih stanja i događaja može očekivati u fazi projektne inicijacije [63].

Što se tiče klasifikacije izvora nesigurnosti, većina istraživanja kategorizira projektne nesigurnosti u dvije osnovne skupine: unutrašnje i vanjske faktore, pri čemu se svaka od kategorija dalje može podijeliti na dodatne kategorije, npr. na tehničke, komercijalne, okolišne, socio-ekonomske, političke i ostale uzroke nesigurnosti [41]. Za potrebe ovog istraživanja, izvori nesigurnosti u građevinskim projektima detektirani su na temelju sustavnog pregleda relevantne literature (Slika 3.1.).

Prvo su evidentirani globalni izvori nesigurnosti u vidu uvjeta i događaja koji mogu negativno utjecati na projektne izvedbe. Zatim je provedena detaljna identifikacija da se izbjegne nedorečenost i dvosmislenost detektiranih izvora neizvjesnosti te je zatim izvršena klasifikacija pojmova po kategorijama. Koraci identifikacije i kategorizacije ponavljani su u nekoliko navrata sve dok nije dosegnut funkcionalan obuhvat taksonomije da bi se kompletirao proces identifikacije izvora neizvjesnosti u građevinskim projektima.



Slika 3.1. Proces identifikacije nezvjesnosti, prema [64]

#### 3.2.1. Izrada taksonomije

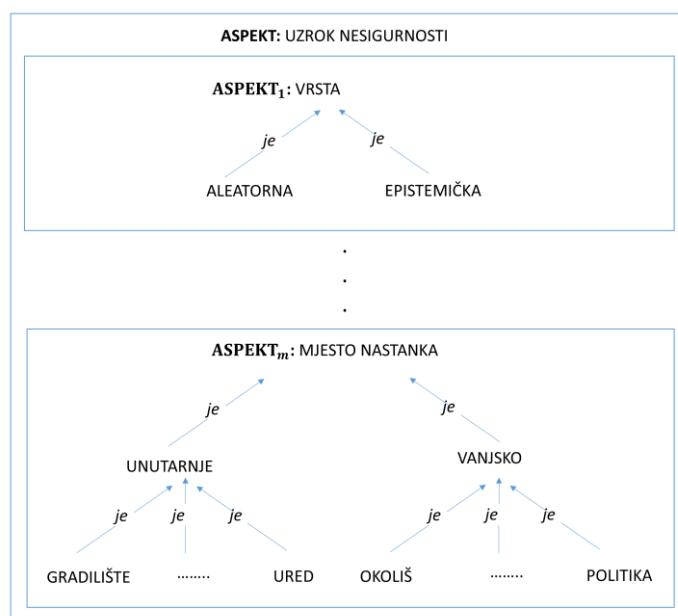
Osnovna ideja izrade taksonomije je strukturirana prezentacija prikupljenog znanja o izvorima nesigurnosti tijekom izvedbe građevinskog projekta, kako bi se informacije i spoznaje iz različitih izvora mogle ponovo koristiti i dijeliti među različitim korisnicima. Taksonomija je formirana kroz proces višedimenzionalne kategorizacije (eng. *faceted classification*) identificiranih izvora nesigurnosti, tako da se prikupljeno znanje razjasni kroz više segmenata projektne nesigurnosti. U tu svrhu upotrebljen je višenaspektni sustav (eng. *faceted system*) koji u biti predstavlja općeniti model organizacije znanja (eng. *general knowledge management model*) na temelju prikupljenih heterogenih podataka [65].

Potreba za primjenom višedimenzionalne kategorizacije proizlazi iz činjenice što je velik broj informacija dobiven iz djelomično ograničenog konteksta (npr. pojedini autori [41] razmatraju projektne nesigurnost isključivo po pitanju utjecaja na troškove projekta), a cilj izrade taksonomije je modelirati prikupljeno znanje na sveobuhvatan i općenit način. Primjena višenaspektnog sustava omogućuje sagledavanje promatranog koncepta iz različitih stajališta, npr. jedan aspekt može se odnositi na vrijeme nastanka nesigurnosti kroz životni ciklus projekta, drugi aspekt može predstavljati izvore nesigurnosti u odnosima projektnih sudionika, itd. Svaki aspekt načelno se dalje opisuje primjenom zasebnog taksonomskog modela, a ovakav pristup izradi taksonomskog modela odlikuje se jasnoćom iskaza, kompaktnim dizajnom i mogućnosti prilagodbe za daljnju uporabu [65].

Izrada taksonomskog modela u ovom istraživanju odnosi se na prikaz znanja o izvorima nesigurnosti u građevinskim projektima tako da se identificirani koncepti organiziraju u vidu

hijerarhijskih i/ ili višespektnih (eng. *faceted*) struktura. Pri tome, koncepti su međusobno povezani dvojakim vezama: prva vrsta veze među konceptima odnosi se na općenitu relaciju nazvanu „je“ relacija (eng. *is-a* ili *subclass-of*), a duga vrsta veze nazvana je „je-aspekt“ (eng. *has-a*). Ukoliko su koncepti dio hijerarhijske strukture, tada su povezani „je“ relacijom, a u slučaju da su koncepti organizirani kroz višespektnu strukturu, onda je njihova relacija analognog tipa „je-aspekt“.

Primjerice, **uzrok** nesigurnosti u građevinskom projektu može se promatrati kroz više aspekata: s obzirom na njegovu **vrstu**, **mjesto nastanka** ili neke druge aspekte. Tada je veza između koncepata u višespektnoj strukturi predstavljena „je-aspekt“ relacijom: **vrsta je aspekt uzroka**, kao što **mjesto nastanka** predstavlja dodatan aspekt (*je aspekt*) **uzroka** nesigurnosti. Pri tome se svaki aspekt uzroka nesigurnosti (**vrsta**, **mjesto nastanka**, itd.) može dalje strukturirati ili hijerarhijski ili ponovno kroz višespektnu podjelu. U ovom primjeru, koncepti **mjesto nastanka** i **vrste** nesigurnosti hijerarhijski su podijeljeni na daljnje koncepte. Radi lakšeg shvaćanja, ovaj primjer taksonomske strukture vizualiziran je na slici 3.2.



**Slika 3.2.** Primjer: aspekt „uzrok“ prikazan je daljnjim aspektima nesigurnosti

Osim toga, ovakva taksonomska struktura podrazumijeva mogućnost iskaza koncepta (konkretnog izvora nesigurnosti u građevinskom projektu) kombinacijom postojećih komponenti. Primjerice, nedostupnost određenih materijala za građenje te visoka cijena energenata mogu predstavljati konkretne izvore nesigurnosti u građevinskom projektu uslijed nepredviđene političke situacije. U vidu taksonomske strukture ovi koncepti predstavljaju kombinaciju postojećih koncepata: „epistemička vrsta nesigurnosti“ i „vanjsko mjesto nastanka nesigurnosti“.

Mogućnost stvaranja kombiniranih koncepata olakšava upotrebu taksonomije jer se na ovaj način izbjegava suvišno ponavljanje postojećih strukturnih segmenata. Ipak, kombinacija koncepata u razvijenoj strukturi predstavlja tek mogućnost, a ne nužnost pri određivanju konkretnih izvora nesigurnosti, jer su pojedini izvori nesigurnosti sastavni elementi modelirane taksonomije. Pri tome je dobro spomenuti da nije moguće kombinirati bilo koje koncepte, već je konačna validacija razvijenog modela taksonomije predviđena u fazi implementacije od strane krajnjih korisnika.

U ovom istraživanju za izradu taksonomskog modela korišten je Protégé, besplatan uređivač ontologija otvorenog koda te sustav za upravljanje znanjem koji je razvijen na Sveučilištu Stanford te trenutno predstavlja najpoznatiji alat za modeliranje ontologija [66].

#### 3.2.2. Osnovni aspekti taksonomskog modela

Osnovni koncept koji predstavlja ishodište taksonomskog modela u ovom istraživanju definiran je kao „izvori nesigurnosti u građevinskom projektu“. U tom smislu, nesigurnost građevinskog projekta odnosi se na potencijalna stanja i događaje koji mogu negativno utjecati na ostvarenje projektnih ciljeva. Izvori nesigurnosti predstavljeni su kroz više aspekata s ciljem iscrpnog opisivanja područja u kojem se iskazuje ishodišni koncept. Pri tome se svaki aspekt osnovnog koncepta dalje opisuje zasebnim taksonomskim modelom.

Pri uspostavi primarnih aspekata za iscrpni prikaz osnovnog koncepta korištene su osnovne kategorije prema univerzalnoj shemi organizacije znanja [67] (eng. *Colon classification*). Radi se o pet osnovnih aspekata nesigurnosti u građevinskim projektima kako slijedi:

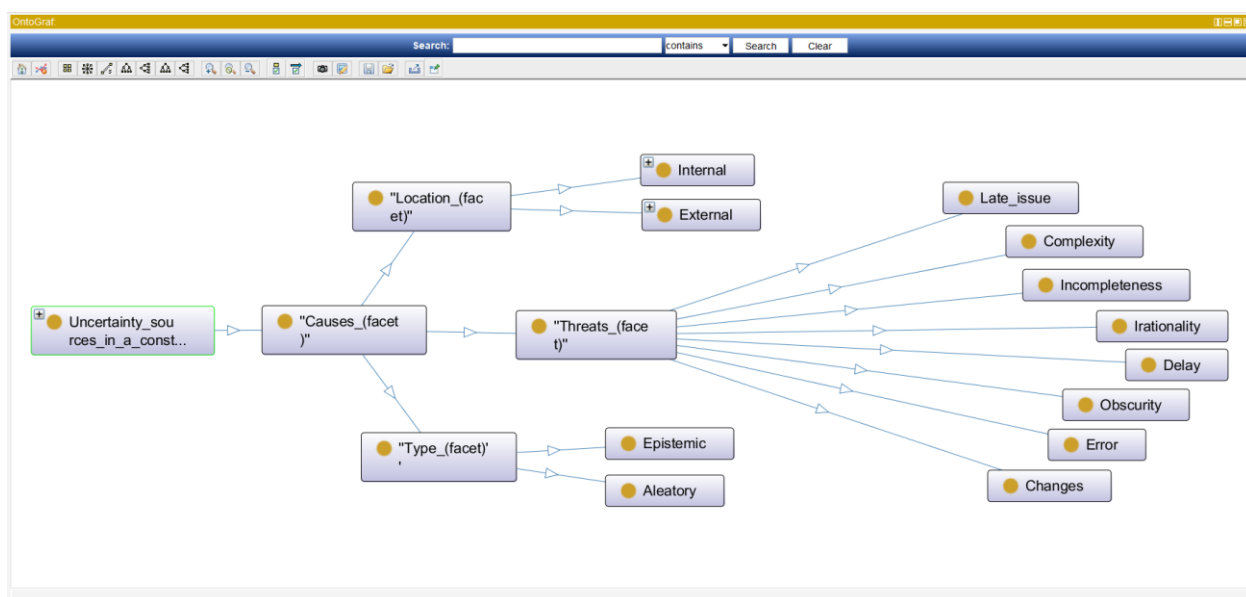
- Nesigurnost povezana sa sudionicima u građevinskom projektu. Aspekt „**sudionici**“ odgovara na pitanje „tko?“.
- Nesigurnost samog projekta. Aspekt „**projekt**“ odgovara na pitanje „što?“.
- Nesigurnost u vezi projektnih ciljeva. Aspekt „**impakt**“ odgovara na pitanje „kako?“.
- Uzrok nesigurnosti u građevinskom projektu. Aspekt „**uzrok**“ odgovara na pitanje „gdje?“.
- Životni ciklus projekta, vremenska faza u kojoj se može manifestirati nesigurno stanje ili događaj. Aspekt „**projektna faza**“ odgovara na pitanje „kada?“.

Navedeni aspekti formirani su kroz proces pregleda literature te je tendencija da se njihovom upotrebom sveobuhvatno objasni ishodišni koncept („izvori nesigurnosti u građevinskom projektu“). Štoviše, navedeni primarni aspekti u velikoj mjeri preklapaju se s ishodištima projektne nesigurnosti prema Chapmanu i Wardu [68], koji postavljaju šest pitanja da bi otkrili izvor



nesigurnosti u projektu: tko? (sudionici), zašto? (motivi), što? (plan), kako? (aktivnosti), s čim? (resursi), kada? (vrijeme).

U ovoj taksonomiji, upotrebom višedimenzionalne klasifikacije koncepti su prikazani na sveobuhvatan način. Osim toga, da bi se spriječila dvosmislenost ili nedorečenost pojmova, svaki koncept u taksonomiji je detaljno definiran. U nastavku teksta su dane definicije pet osnovnih aspekata, a ostatak taksonomskih pojmova može se analizirati korištenjem razvijenog modela u Protégé platformi (dio modela prikazan je na slici 3.3.). Postojeći taksonomski model dostupan je na zahtjev autorice, a trenutna verzija taksonomije sastoji se od preko 300 kategoriziranih aspekata kojima se opisuje osnovni koncept („izvori nesigurnosti u građevinskom projektu“).



Slika 3.3. Prikaz dijela taksonomskog modela u radnom okruženju Protégé platforme

Osnovni aspekti za opis ishodišnog koncepta definirani su kako slijedi:

- Aspekt „**sudionici**“ opisuje sve čimbenike u koje su involvirani ljudi i njihove međusobne veze, a koji mogu negativno utjecati na izvedbu projekta. Sudionici u građevinskom projektu mogu biti pojedinci (fizičke osobe) ili organizacije (pravne osobe).
- Aspekt „**projekt**“ odnosi se na svojstva građevinskog projekta koja mogu predstavljati važnu korelaciju između nesigurnosti i samog projekta.
- Aspekt „**impakt**“ oslikava direktni utjecaj nesigurnosti po pitanju važnih projektnih ciljeva: fokus se proširuje s tradicionalnih funkcija cilja (vrijeme, novac, kvaliteta) na dodatni element projektne održivosti [69].

- Aspekt „**uzrok**“ prikazuje stanja, uvjete i događaje u kojima dolazi do stvaranja nesigurnosti.
- Aspekt „**projektna faza**“ ilustrira fazu u životnom ciklusu projekta kada može doći do pojave neizvjesnosti. Ovaj aspekt predstavlja vremensku dimenziju ishodišnog koncepta taksonomije.

Daljnja klasifikacija koncepata u taksonomiji vođena je osnovnim pravilom da sličnost između bilo koja dva koncepta u jednoj kategoriji mora biti veća od sličnosti između koncepata koji su sadržani u različitim kategorijama (aspektima ili hijerarhijama) [65]. Na primjer, pri klasifikaciji koncepta  $a$  = „kulturološka raznolikost“, odlučeno je da će koncept  $a$  biti grupiran u istoj kategoriji kao koncept  $b$  = „različita projektna gledišta“, pri čemu su  $a, b \in C$ ; gdje je  $C$  = kategorija (aspekt) „**sudionici**“. Na ovaj način postignuta je veća sličnost među konceptima  $a$  i  $b$ , nego što bi bila među konceptima  $a$  i  $d$  = „ekonomska stabilnost“, gdje je  $d \in E$ , a  $E$  predstavlja aspekt „Sociološko-ekonomski izvori nesigurnosti“. Opisano osnovno pravilo klasifikacije koncepata poštivano je tijekom cijelog procesa izrade višedimenzionalne taksonomije. Svaki put kada bi postojala mogućnost raspodjele razmatranog koncepta u više kategorija (aspekata ili hijerarhija), promatrani koncept uspoređivan je s postojećim izrazima u pojedinim kategorijama, tako da se konačnom odlukom postigne što veći stupanj sličnosti među konceptima iste kategorije. Prikaz druge razine klasifikacije dan je u tablici 3.2.

**Tablica 3.2.** Prve dvije razine taksonomskog modela

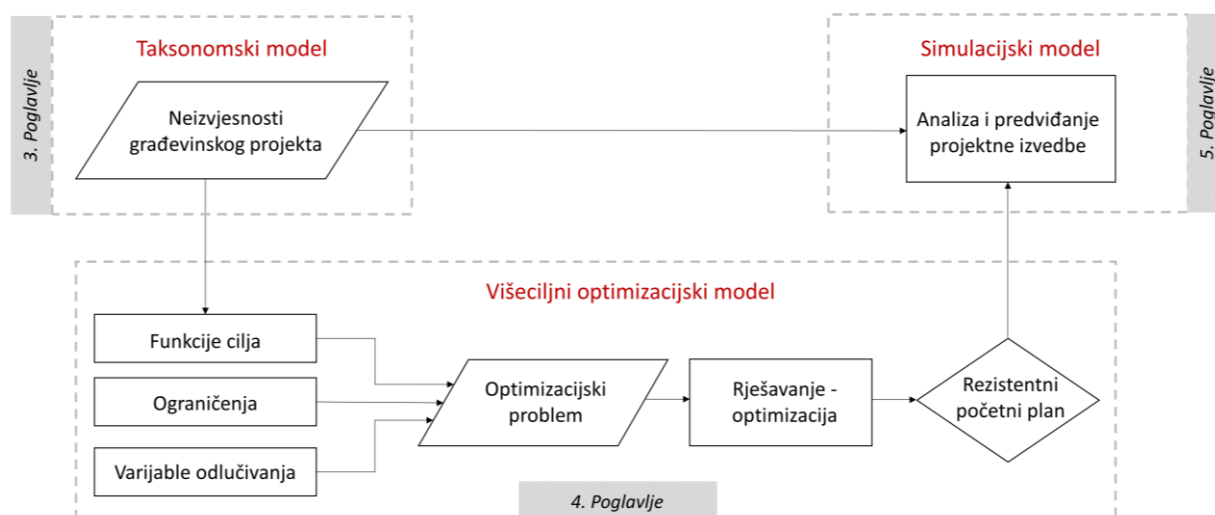
Sudionici	Projekt	Impakt	Uzrok	Projektna faza
Ponašanje	Aktivnosti	Cijena	Lokacija	Konceptualizacija
Kapacitet	Kompleksnost	Kvaliteta	Prijetnja	Planiranje
Donošenje odluka	Novitet	Vrijeme izvedbe	Vrsta	Izvršenje
Interakcija	Tip	Održivost	-	Završetak
Karakteristike	-	-	-	-

U principu, cjelokupni proces izrade taksonomskog modela predstavlja iterativni proces. Noy i McGuinness [70] ukazuju da ne postoji jedan isključivi način za modeliranje taksonomije (ontologije) te da konačno rješenje ovisi o budućoj primjeni razvijenog modela. U ovom istraživanju, osnovni motiv za izradu taksonomskog modela bio je prikaz postojećeg znanja o izvorima nesigurnosti u građevinskom projektu, jer je pregledom literature utvrđeno da ne postoji jednoznačno shvaćanje koncepta nesigurnosti u upravljanju građevinskim projektima, pa tako ni

cjeloviti sustav za prikaz postojećeg znanja na ovu tematiku. Prema tome, u svrhu izrade sveobuhvatnog taksonomskog modela prvo su pregledom literature prikupljene, a zatim analizirane i strukturirane relevantne informacije te je tako omogućena ponovna upotreba postojećeg znanja u daljnjim koracima rezistentnog vremenskog planiranja građevinskih projekata. Razvijeni taksonomski model predstavlja osnovu za daljnju analizu i upravljanje projektnom neizvjesnošću. Upotrebom taksonomije olakšano je razumijevanje i analiza mogućeg utjecaja projektne neizvjesnosti na pouzdanost početnih vremenskih planova. Taksonomija služi kao važan alat u procesu stvaranja rezistentnih vremenskih planova jer se njenom upotrebom olakšava detekcija izvora nesigurnosti i njihovog utjecaja na realizaciju građevinskog projekta. Modularni dizajn razvijenog taksonomskog modela omogućuje daljnju nadogradnju postojećih koncepata u fazi buduće implementacije na većem broju stvarnih projekata.

## 4. OPTIMIZACIJSKI MODEL ZA REZIDENTNO VREMENSKO PLANIRANJE GRAĐEVINSKIH PROJEKATA U UVJETIMA NESIGURNOSTI

Inženjerska optimizacija podrazumijeva sustavno traženje optimalnog rješenja za zadani problem s obzirom na definirane kriterije optimalnosti, a u uvjetima zadovoljavanja postojećih ograničenja. Primjena optimizacijskih postupaka zahtijeva multidisciplinarno znanje i određeno iskustvo kako bi se postavio matematički model te kako bi se prepoznale prednosti i slabosti pojedinih metoda rješavanja [71]. U ovom poglavlju stoga će se istodobno prikazati postojeći pristupi inženjerske optimizacije koji su primijenjeni za provedeno istraživanje te će se obrazložiti prilagodbe i proširenja postojećih metoda koje su bile nužne zbog specifičnih zahtjeva uočenog problema te kao takve predstavljaju važan doprinos ovog istraživanja.



**Slika 4.1.** Opći prikaz razvijene metodologije u kontekstu pojedinih poglavlja doktorske disertacije

Za početak, u potpoglavlju 4.1. predstavljen je metodološki pristup koji je razvijen u okviru ovog istraživanja da bi se omogućilo sveobuhvatno vremensko planiranje građevinskih projekata u uvjetima neizvjesnosti. Navedeni metodološki pristup (Slika 4.1.) ponajprije se odnosi na razvoj višeciljnog optimizacijskog modela pri čemu je važno napomenuti da se u ovom radu pod pojmom optimizacijskog modela podrazumijeva sustav sačinjen od matematičkog iskaza uočenog problema te metode za rješavanje postavljenog problema. Osim toga, ovaj metodološki pristup pobliže definira višesmjernu interakciju pojedinačnih modela razvijenih za problem rezistentnog

vremenskog planiranja, a to su: (i) matematički (optimizacijski) model za iskaz i rješavanje problema, (ii) taksonomski model za bolje razumijevanje projektne neizvjesnosti te (iii) simulacijski model za analizu ponašanja rezistentnih početnih planova dobivenih kao izlazno rješenje matematičkog modela.

Nakon uvodnog predstavljanja metoda i alata koji su upotrebljavani za provedbu ovog istraživanja, u potpoglavlju 4.2. detaljnije se objašnjava pojam tzv. surogatne mjere koja u suštini predstavlja jednu od ciljnih funkcija u predloženom optimizacijskom problemu. Ovaj koncept korišten je u dosadašnjim istraživanjima u području vremenskog planiranja kako bi se unaprijedila pouzdanost početnih planova u uvjetima projektne neizvjesnosti na računalno efikasan način, ali s obzirom na to da trenutačno istraživanje predstavlja nadogradnju postojećih optimizacijskih modela, bilo je potrebno proširiti postojeći iskaz surogatne mjere za procjenu rezistencije uzimajući u obzir bitne značajke predloženog matematičkog modela, a to su: resursna ograničenja i financijski aspekti projekta.

Centralni dio ovog poglavlja (potpoglavlje 4.3.) odnosi se na predstavljanje novog optimizacijskog problema koji je kreiran na temelju standardnog problema vremenskog planiranja projekata s ograničenim resursima (eng. *RCPSP*). Premda je ishodišni *RCPSP* problem od iznimnog značaja za vremensko planiranje projekata, činjenica je da osnovna varijanta matematičkog iskaza svodi stvaran problem na relativno jednostavan model te pri tome uvodi brojna pojednostavljenja. Zahvaljujući razvoju suvremenih metoda za rješavanje složenih optimizacijskih problema, mnogi autori predlažu različita proširenja *RCPSP* problema da bi se što vjernije omogućilo istraživanje složenih sustava. U tom svjetlu, ovo doktorsko istraživanje unaprjeđuje osnovnu varijantu *RCPSP* problema uvođenjem dodatnih funkcija cilja kako bi se omogućila izrada rezistentnih početnih planova za građevinske projekte u uvjetima neizvjesnosti. Korištenjem proširenog logičko-matematičkog modela za sveobuhvatniji opis građevinske izvedbe omogućuje se daljnja analiza i eksperimentiranje s različitim scenarijima projektne realizacije što je od iznimnog značaja za složene građevinske projekte.

Prije negoli se objasni konkretni algoritam rješavanja implementiran u svrhu pronalaska optimalnog početnog plana za kompleksne projektne mreže, potpoglavlje 4.4. donosi sažeti pregled mogućih pristupa (klasični i metaheuristički) za rješavanje višeciljnih optimizacijskih problema. Proces ovog istraživanja obuhvatio je dva različita pristupa za rješavanje predloženog višeciljnog problema (potpoglavlje 4.3.): u početnoj fazi istraživanja korištena je inačica klasičnog pristupa (hijerarhijski ili leksikografski pristup) za rješavanje jednostavnih problema jer je proces implementacije metaheurističkog algoritma složen i dugotrajan zadatak. Razvoj genetskog

algoritma (metaheurističkog procesa) uslijedio je u završnoj fazi istraživanja te je tek nakon programiranja u Python programskom jeziku omogućeno rješavanje postavljenog problema (potpoglavlje 4.3.) na kompleksnim primjerima projektnih mreža. Uz to, u potpoglavlju 4.4. detaljnije je objašnjen postojeći koncept dominacije rješenja koji je važan za razumijevanje dobivenog skupa rješenja primjenom razvijenog genetskog algoritma.

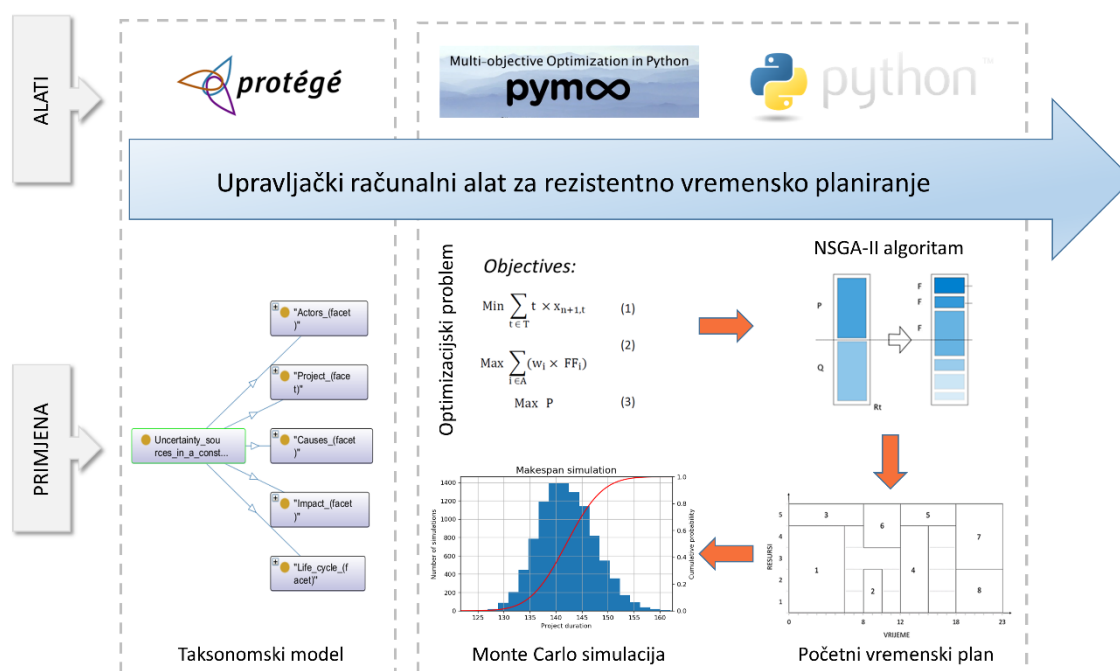
Konačno, poglavlje 4.5. detaljno opisuje standardne procese metaheuristike za rješavanje postavljenog optimizacijskog problema. Iako su u današnjoj praksi razvijeni brojni metaheuristički algoritmi koji služe za rješavanje složenih problema, u ovom doktorskom radu fokus je stavljen na razvoj genetskog algoritma jer je pregledom literature utvrđeno da je upravo ta vrsta evolucijskog algoritma jedna od najčešće primjenjivanih u području vremenskog planiranja projekata. Štoviše, opća metoda izvršenja odabranog algoritma s jedne strane relativno je jednostavna, dok se s druge strane pokazala primjenjivom i efikasnom za slične probleme u planiranju projekata [72–79] te je bilo za očekivati da će se i složenije projektne mreže za kompleksne građevinske projekte moći riješiti u relativno kratkom vremenu izračuna, što olakšava praktičnost implementiranog pristupa. Konkretna integracija matematičkog problema i algoritma za optimizaciju na računalu provedena je u programskom jeziku Python koji je besplatan, pristupačan i svestrano primjenjiv te su u okviru spomenutog programskog jezika javno dostupni brojni moduli pogodni za praktičnu upotrebu i efikasno računalno programiranje. Neki od esencijalnih modula korištenih za implementaciju optimizacijskog modela u okviru Python programskog jezika su npr. *NumPy*, *Matplotlib*, *Statistics*, *Random*, *Math*, *Calendar*, između ostalih. Osim toga, iznimno korisnim pokazao se optimizacijski okvir *pymoo* koji je također javno dostupan za korištenje u Python programskom jeziku, a u sebi sadrži razvijene algoritamske procedure za optimizaciju različitih problema te je primjenom spomenutog okvira eksplicitno omogućena primjena i prilagodba genetskog algoritma za rješavanje postavljenog problema rezistentnog vremenskog planiranja građevinskih projekata u uvjetima neizvjesnosti.

#### **4.1. Metodološki koncept za rezistentno vremensko planiranje građevinskih projekata**

U okviru istraživačkog rada ove doktorske disertacije razvijen je novi metodološki pristup za izradu rezistentnih vremenskih planova u uvjetima neizvjesnosti s primjenom na građevinske projekte (Slika 4.2.). Ovaj metodološki koncept služi kao sredstvo za opisivanje i predviđanje izvedbe projektnih aktivnosti te u konačnici pridonosi pouzdanijem planiranju građevinskih

#### 4. Optimizacijski model za rezistentno vremensko planiranje građevinskih projekata u uvjetima nesigurnosti

projekata u uvjetima neizvjesnosti. Cjelokupni upravljački proces započinje analizom neizvjesnosti u građevinskom projektu kako bi se otkrili postojeći izvori nesigurnosti te da bi se razjasnio njihov utjecaj na ciljne funkcije u modelu građevinskog projekta. Identifikacija i analiza neizvjesnosti omogućena je izradom taksonomskog modela u softveru Protégé te je ovaj dio istraživanja prethodno objašnjen kroz treće poglavlje doktorske disertacije.



Slika 4.2. Shematski prikaz predloženog metodološkog koncepta

Sljedeći korak predloženog pristupa odnosi se na uspostavu sveobuhvatnog optimizacijskog modela (matematičkog problema te metode za njegovo rješavanje) za rezistentno vremensko planiranje građevinskih projekata. Zbog brojnih izvora neizvjesnosti u kompleksnim građevinskim projektima modeliran je novi optimizacijski problem da bi se omogućila izrada rezistentnih vremenskih planova koji će s jedne strane pružiti odgovor na negativan utjecaj projektne neizvjesnosti, ali će istovremeno poštovati vremenska i troškovna ograničenja projekta. Predloženi optimizacijski problem formiran je kroz tri ciljne funkcije i pet pripadajućih ograničenja, pri čemu varijable odlučivanja definiraju početke izvršenja za aktivnosti u projektnoj mreži. Ovaj optimizacijski problem postavljen je s namjerom da se obuhvate svi nužni aspekti vremenskog planiranja projekata u neizvjesnim uvjetima, tj. da se na vjeran, ali i praktičan način preslika stvarni problem. Temeljna zamisao predstavljenog optimizacijskog problema je da se u kompaktnom matematičkom prikazu postave važni projektni ciljevi, ali da se ne zanemaruju važne upravljačke funkcije (upravljanje troškovima i raspodjela resursa) u općem vremenskom planiranju aktivnosti.

Daljnje istraživanje stoga je bilo fokusirano na razmatranje efikasnog načina za rješavanje predloženog optimizacijskog problema. Analizirani su mogući pristupi rješavanju višeciljnog problema te je korištenjem raspoložive tehnologije razvijen konkretan računalni kod za pronalazak rezistentnih početnih planova.

Za rješavanje postavljenog problema rezistentnog vremenskog planiranja građevinskih projekata korišten je kompetitivni genetski algoritam nedominirajućeg sortiranja NSGA-II (eng. *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) [80]. Navedeni algoritam u praktičnoj je upotrebi za rješavanje različitih problema planiranja u građevinarstvu, npr. za planiranje rasporeda radne snage [74], organizaciju radnog prostora [79], nabavu materijala [73,76], financijsko planiranje [75], ali je zastupljen i u širim područjima višeciljne optimizacije [81]. Zbog svoje primjenjivosti i dokazane efikasnosti odabran je kao konkretni način rješavanja predloženog optimizacijskog problema, uz nužnu prilagodbu pojedinih algoritamskih procesa (inicijalizacija, evaluacija, genetski operatori) koji su objašnjeni u potpoglavlju 4.5. ove doktorske disertacije. Za ilustraciju važnosti i primjenjivosti NSGA-II algoritma, slikovit je podatak kako originalni znanstveni rad u kojem se predlaže novi evolucijski pristup [80] ima više od 22,000 citata u *Web of Science* znanstvenoj citatnoj bazi podataka u vrijeme pisanja ove disertacije. Od 2014. godine, NSGA-II je najviše proučavan algoritam u području vremenskog planiranja [82]. Generalno govoreći, najveće prednosti NSGA-II algoritma u odnosu na njegovu prethodnu inačicu (NSGA) su sljedeće: smanjena računaska složenost, nema potrebe za definiranjem dodatnih parametara algoritma te svojstvo elitizma u procesu traženja Pareto optimalnog skupa rješenja [82]. Za potrebe ovog istraživanja bilo je potrebno razviti programsku podršku za implementaciju odabranog algoritma kako bi se postavljeni NP-hard problem mogao riješiti na efektivan i provediv način. Odabrana optimizacijska metoda, tj. algoritam za rješavanje problema implementiran je u Python programskom jeziku uz upotrebu suvremenog optimizacijskog okvira *pymoo* [83] kako bi se omogućio optimizacijski postupak, tj. da bi se pronašao Pareto optimalan skup rješenja koji sadržava raznovrsne kvalitetne kombinacije rješenja za problem rezistentnog vremenskog planiranja kompleksnih projektnih mreža (predložen u potpoglavlju 4.3.).

Nakon pronalaska Pareto skupa rješenja primjenom NSGA-II algoritma, sljedeći korak je odabrati najpogodnije rješenje za konkretni građevinski projekt što se može postići dodatnom simulacijskom analizom. Oni vremenski rasporedi iz Pareto skupa za koje voditelj/ica projekta procijeni da su najprikladniji za konkretan slučaj, simuliraju se upotrebom Monte Carlo metode te se odabire najrezistentniji početni raspored za daljnje izvršenje projekta. Primjena navedenog postupka na konkretnim primjerima projektnih mreža detaljno je opisana u zasebnom poglavlju



ove disertacije. U Monte Carlo simulaciji kroz različite primjere projektnih mreža (potpoglavlje 5.3.) indirektno se verificira postavljeni matematički model i algoritamski postupak rješavanja, a direktno se analizira ponašanje dobivenog rješenja u neizvjesnim uvjetima tako da se prepoznatim izvorima nesigurnosti pridijele funkcije distribucije odgovarajućih slučajnih varijabli. Postupak izvođenja Monte Carlo analize za potrebe ovog doktorskog istraživanja proširen je u odnosu na dostupne alate jer je u simulaciji projektne izvedbe bilo potrebno sagledati sveobuhvatan utjecaj resursnih i financijskih ograničenja prema predloženom optimizacijskom problemu, a detalji nadogradnje postojeće Monte Carlo metode podrobnije su objašnjeni u petom poglavlju ove disertacije. U načelu, standardni komercijalni alati za procjenu projektnog rizika zanemaruju resursna ograničenja (npr. Palisade-ov @Risk [84]) te je zbog tog nedostatka bilo potrebno proširiti uobičajenu simulacijsku proceduru te razviti novi programski kod koji uzima u obzir resursna ograničenja pri izvođenju Monte Carlo simulacije. Na taj način omogućena je analiza ponašanja projektnih mreža u stohastičkim uvjetima na pouzdaniji, realniji i sveobuhvatniji način nego što bi to bilo moguće primjenom postojećih programskih alata. Štoviše, razvijeni programski kod koji je napisan u Python programskom jeziku simulira i financijske tokove građevinskih projekata na temelju simuliranih vremenskih trajanja i troškova pojedinih aktivnosti te je tako omogućena procjena dostizanja planiranog profita, kao i analiza održanja pretpostavljenog kreditnog limita za određeni projekt. Tok novca računa se prema financijskom modulu opisanom u poglavlju 4.3.1. ove disertacije (detaljnije u Dodatku). Primjena proširene Monte Carlo simulacije omogućuje kvantitativnu analizu i pomoć pri odabiru konačnog rasporeda za građevinski projekt.

Kompletiranjem svih opisanih koraka nastaje specijalizirani upravljački alat u vidu programa na računalu koji može rješavati probleme iz kategorije postavljenog modela. Primjenom ovog alata moguće je analitički rješavati specifične probleme za rezistentno vremensko planiranje građevinskih projekata u uvjetima neizvjesnosti te se tako unapređuje pouzdanost početnih planova. Odgovarajućom raspodjelom projektnih aktivnosti i vremenskih rezervi nastoji se poboljšati sposobnost apsorpcije vremenskih perturbacija uzrokovanih projektnom neizvjesnošću. Štoviše, adekvatnim proračunom prihoda i rashoda za vrijeme izvedbe projekta na temelju rezistentnog rasporeda aktivnosti osigurava se financijska likvidnost i unapređuje vjerojatnost održanja novčanog toka u raspoloživim granicama.

## 4.2. Surogatna mjera za evaluaciju rezistencije plana

U potpoglavlju 2.2.1. ove doktorske disertacije objašnjeno je da korištenje surogatnih mjera za ocjenu rezistencije potencijalnih rješenja u velikoj mjeri pridonosi efikasnosti pri traženju optimalnih početnih planova, jer se upotrebom aproksimativne ocjene za rezistenciju određenog plana (SM mjere) značajno olakšava računski postupak, a faza optimizacije jasno se odvaja od procesa naknadne simulacije za analizu dobivenog rješenja. Ovakav pristup prethodno je primjenjivan u više znanstvenih istraživanja [19,30,85–88] te se pokazao kao jednostavno i učinkovito rješenje za aproksimaciju stupnja rezistencije početnih vremenskih planova.

Rezistentno vremensko planiranje projekata zasniva se na ideji unošenja dovoljne količine vremenskih rezervi u početni plan s namjerom apsorpcije vremenskih produljenja pojedinih aktivnosti uslijed neizvjesnih djelovanja kao što su kvarovi građevinske mehanizacije, nepovoljni vremenski uvjeti i sl. Na ovaj način nastoji se unaprijediti stabilnost početnih planova, tako da odstupanja između planiranog i ostvarenog stanja u konačnici budu što manja. Ovdje će se objasniti izračun surogatne mjere u svrhu evaluacije stupnja rezistencije početnog plana za građevinski projekt. Surogatna mjera za potrebe ovog istraživanja nastala je proširenjem postojećeg izraza prema nedavnoj studiji [30] nadograđujući sljedeće aspekte:

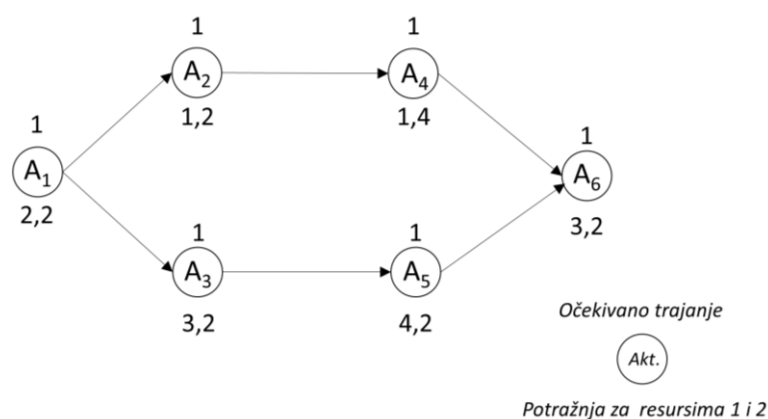
- U ovom doktorskom istraživanju eksplicitno se naglašava važnost izračuna resursno-tehnološke slobodne rezerve  $FF_i$ . Proračun takve vremenske rezerve u obzir uzima i dodatna resursna ograničenja te se razlikuje od uobičajenog proračuna za određivanje slobodne rezerve u metodi kritičnog puta (eng. *Critical Path Method*, kratica *CPM*) kada su resursna obilježja u projektnoj mreži u potpunosti zanemarena. Detaljnije objašnjenje proračuna  $FF_i$  dano je u potpoglavlju 4.2.1.
- S obzirom na to da ovo doktorsko istraživanje uvodi financijski aspekt kao dodatnu funkciju cilja u optimizacijskom problemu, proračun težinskog faktora  $w_i$  surogatne mjere analogno se proširuje implementacijom financijskih odnosa među projektnim aktivnostima. Detaljnije objašnjenje težinskog faktora  $w_i$  dano je u potpoglavlju 4.2.2.

### 4.2.1. Proračun resursno-tehnološke vremenske rezerve

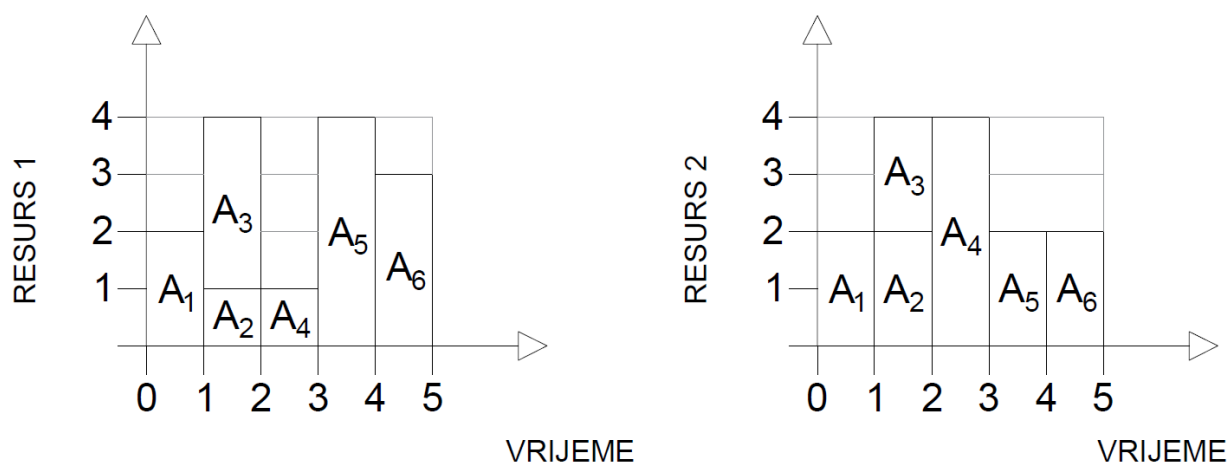
Resursno-tehnološka vremenska rezerva  $FF_i$  odnosi se na količinu vremena za koje se može najviše produžiti trajanje neke aktivnosti ili odgoditi njeno izvršenje, a da pritom sve njene sljedbene aktivnosti zadrže svoje najranije vrijeme početka. Pri tome je važno naglasiti da se u

obzir ne uzimaju samo obilježja projektne mreže i pripadajućih aktivnosti, već i resursna ograničenja u projektu [89]. Zanemarivanje resursnih ograničenja pri izračunu vremenskih rezervi može dovesti do netočnih i varljivih rezultata pri ocjeni rezistencije određenog početnog plana. Konkretnije, ukoliko bi se izračun vremenskih rezervi proveo isključivo na temelju informacija o projektnoj mreži i očekivanom trajanju projektnih aktivnosti, neki početni plan može se okarakterizirati kao iznimno rezistentan unatoč tome što raspodjela resursa na razini projektne mreže još nije provedena. Posljedično, ako resursi nisu raspoloživi prema početnom „visoko rezistentnom“ planu, doći će do zastoja u izvršenju aktivnosti te se može odgoditi završetak trajanja projekta. U izdvojenim dosadašnjim istraživanjima, npr. [90–92] uočen je spomenuti nedostatak u proračunu vremenskih rezervi za resursno ograničene projekte, ali standardni alati za vremensko planiranje (npr. Microsoft-ov Project) još uvijek ne implementiraju koncept resursne ograničenosti u pogledu proračuna vremenskih rezervi. U suvremenim računalnim softverima proračun vremenskih rezervi ograničen je na proračun slobodne i ukupne vremenske rezerve, a raspodjela resursa fundamentalno je razdvojena od proračuna spomenutih vremenskih rezervi.

Da bi se ilustrirala važnost koncepta resursno-tehnološke vremenske rezerve, kao primjer će poslužiti jednostavna projektna mreža sa slike 4.3. Pretpostavka je da trajanje svake aktivnosti u ovom primjeru iznosi jednu vremensku jedinicu, a za izvođenje projektnih aktivnosti raspoložive su dvije vrste resursa, od kojih svaka vrsta ima četiri dostupne resursne jedinice. Resursna potražnja za oba resursa naznačena je za svaku aktivnost na slici 4.3. Za opisani primjer projekta na slici 4.4. prikazan je raspored projektnih aktivnosti u vidu dvaju gantograma s definiranom raspodjelom resursa.



Slika 4.3. Primjer jednostavne projektne mreže



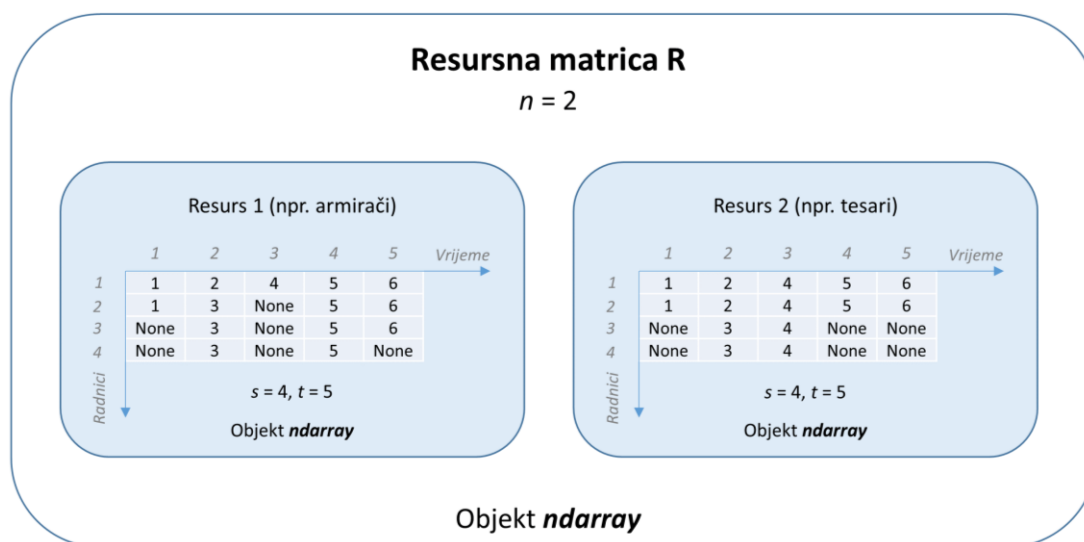
Slika 4.4. Gantogrami aktivnosti s prikazom raspodjele resursa

Kada bi se proračun slobodnih vremenskih rezervi temeljio isključivo na podacima o vremenu početaka aktivnosti, njihovom trajanju i tehnološkim vezama među aktivnostima, tada bi slobodna vremenska rezerva za aktivnosti  $A_3$  i  $A_4$  iznosila po jednu vremensku jedinicu. Promatrajući aktivnost  $A_3$  vidljivo je da je aktivnost  $A_5$  njen jedini direktni sljedbenik koji počinje tek u trenutku 3, odnosno postoji jedna vremenska jedinica između očekivanog završetka aktivnosti  $A_3$  i planiranog početka aktivnosti  $A_5$ . Analogno, postoji jedna vremenska jedinica između očekivanog završetka aktivnosti  $A_4$  i planiranog početka aktivnosti  $A_6$ . Međutim, kao što je evidentno sa slike 4.4., ako se u obzir uzmu i resursna ograničenja, tada se ni trajanje aktivnosti  $A_3$ , ni trajanje aktivnosti  $A_4$ , ne mogu produžiti bez da dođe do promjene u počecima njihovih sljedbenih aktivnosti. U slučaju produljenja aktivnosti  $A_3$  došlo bi do odgode u početku izvršenja aktivnosti  $A_4$  zbog nedostatka resursa 2, a posljedično bi došlo i do promjene u počecima izvršenja sljedbenih aktivnosti, kao i do produljenja cijelog projekta. Prema tome, ovaj početni plan nije rezistentan na negativan utjecaj neizvjesnosti jer ne postoje resursno-tehnološke vremenske rezerve koje bi apsorbirale eventualna produljenja u trajanju pojedinih aktivnosti.

Upravo zbog ovakvih situacija naglasak se stavlja na određivanje resursno-tehnoloških, umjesto isključivo tehnoloških vremenskih rezervi u proračunu surogatne mjere za rezistenciju početnog plana. U nastavku teksta detaljnije će se opisati proračun resursno-tehnološke vremenske rezerve koji je razvijen za potrebe ovog doktorskog istraživanja u programskom jeziku Python upotrebom modula *NumPy* (kratica *Numerical Python*).

*Numpy* je temeljni modul za znanstveno računanje i analizu podataka, pri čemu je osnovni objekt u tom modulu tzv. *ndarray*. Osnovni objekt, *ndarray*, je struktura podataka koja predstavlja višedimenzionalno, homogeno polje (svi objekti u polju su istovrsni, što utječe na bolju efikasnost

implementiranih algoritama) [93]. U ovom istraživanju višedimenzionalni objekt *ndarray* upotrebljen je da bi se omogućio prikaz raspodjele resursa u vremenu po projektnim aktivnostima, tj. da bi se omogućio izračun resursno-tehnološke rezerve za vremenski raspored. Takav objekt (*ndarray*) proglašen je resursnom matricom R te je predstavljen jednodimenzionalnim poljem sastavljenim od  $n$  različitih *ndarray* objekata. Konkretno, objekt R sastoji se od onoliko drugih objekata koliko postoji različitih vrsta resursa u projektu ( $n$ ), pri čemu su sastavni dijelovi R objekta opet *ndarray* objekti (da bi se očuvala homogenost polja), nazovimo ih  $r_n$ . Oblik strukture elementarnog  $r_n$  objekta je dvodimenzionalan. Prva dimenzija predstavlja određeni resurs promatrane vrste, a druga dimenzija predstavlja vrijeme. Konkretno, svaki  $r_n$  može se interpretirati kao zasebna matrica sastavljena od  $s$  redaka i  $t$  stupaca, pri čemu je  $s$  npr. broj radnika određene kategorije (resursa određene vrste), a  $t$  je ukupan broj dana u projektu (kada je promatrana vremenska jedinica jedan dan). Svaki element  $r_n$  objekta može biti ili cijeli broj (eng. *integer*) ili tip podatka koji ne sadržava nikakvu vrijednost (eng. *None*), već s obzirom jeli promatrani resurs u određenom trenutku pridijeljen nekoj aktivnosti (npr. pridijeljen je aktivnosti pod rednim brojem 5) ili je slobodan. Ilustrativni prikaz tzv. resursne matrice R za primjer raspodjele resursa sa slike 4.4. dan je na slici 4.5.

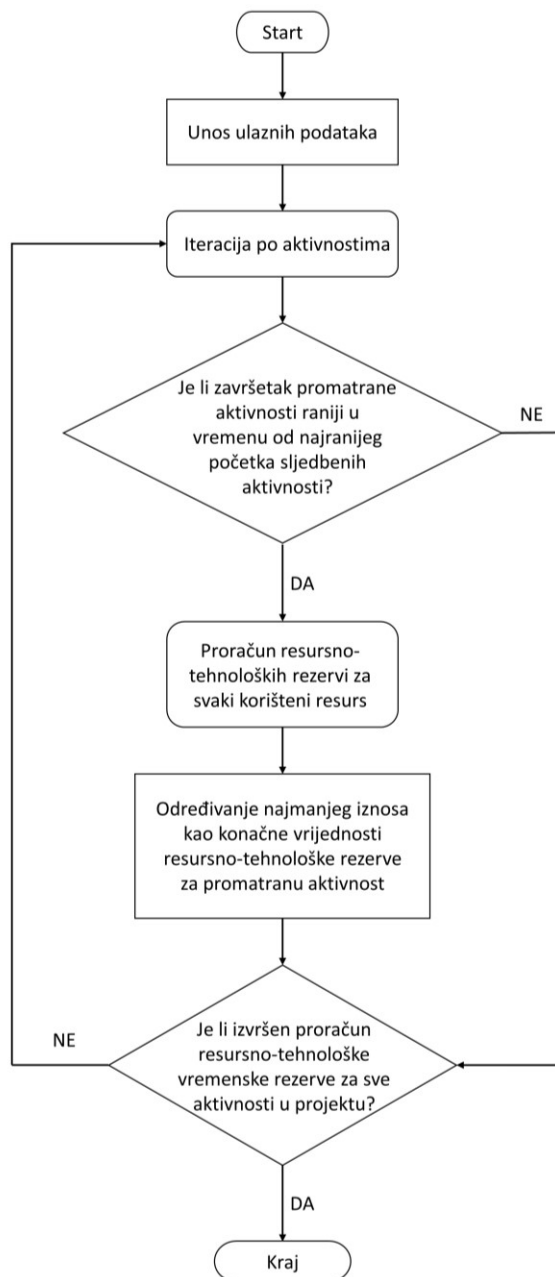


Slika 4.5. Ilustrativni prikaz resursne matrice R

Resursna matrica R za promatrani vremenski raspored aktivnosti služi kao jedan od ulaznih podataka za proračun resursno-tehnološke vremenske rezerve. Osim tog podatka, dio razvijene programske procedure za izračun resursno-tehnološke vremenske rezerve zahtijeva još i sljedeće informacije:

- vremena početaka i završetaka svih aktivnosti
- trajanja svih aktivnosti
- listu sljedbenika po aktivnostima
- resursnu potražnju za sve aktivnosti

Proces izvršenja računalne naredbe za izračun resursno-tehnoloških vremenskih rezervi u konkretnom vremenskom planu sažeto je prikazan dijagramom tijeka na slici 4.6., dok je izvorna programska datoteka za proračun resursno-tehnološke vremenske rezerve priložena u Dodatku ove disertacije.



**Slika 4.6.** Prikaz postupka izračuna resursno-tehnoloških vremenskih rezervi

#### 4.2.2. Proračun težinskih vrijednosti vremenskih rezervi

Surogatna mjera SM računa se kao ponderirana suma resursno-tehnoloških slobodnih rezervi za sve aktivnosti u projektu [94], kao što je prikazano u jednadžbi (4.1). Ponderiranje, tj. izračun težinske vrijednosti  $w_i$  slobodnih rezervi, ovisi o obilježjima projektne mreže, ali i o obilježjima pojedine aktivnosti.

$$SM = \sum_{i \in A} (w_i \times FF_i) \quad (4.1)$$

Ponderiranje, tj. određivanje težinske vrijednosti  $w_i$  za iznose vremenskih rezervi u planu, važno je kako bi se vremenske rezerve ispravno raspodijelile unutar početnog vremenskog plana. Težinska vrijednost  $w_i$  određuje relativnu važnost resursno-tehnološke vremenske rezerve za određenu aktivnost  $i$ . Za one aktivnosti koje imaju veći iznos težinskog faktora  $w_i$ , važnije je osigurati veću količinu resursno-tehnološke vremenske rezerve kako bi se apsorbirao negativan utjecaj u eventualnom produljenju trajanja neizvjesnih aktivnosti. Težinska vrijednost računa se na sljedeći način:

$$w_i = \frac{AS_i + DP_i + AC_i + RU_i}{4} \quad (4.2)$$

Pri tome se obilježja projektne mreže i pripadajućih aktivnosti iskazuju kako slijedi:

$$AS_i = \frac{N_{succ}}{n} \quad (4.3)$$

$$DP_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (4.4)$$

$$AC_i = \frac{c_i}{\sum_{i=1}^n c_i} \quad (4.5)$$

$$RU_i = \frac{\sum_{r=1}^k u_{ir}}{\sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^k u_{ir}} \quad (4.6)$$

Konkretno:

- Jednadžba (4.3) određuje relativan broj sljedbenih aktivnosti za aktivnost,  $AS_i$ . Broj svih direktnih i indirektnih sljedbenih aktivnosti  $N_{succ}$  za aktivnost  $i$  podijeljen je s brojem ukupnih projektnih aktivnosti  $n$ .
- Jednadžba (4.4) definira relativno trajanje aktivnosti  $DP_i$  koje se dobije dijeljenjem trajanja  $d_i$  aktivnosti  $i$  sa sumom trajanja svih aktivnosti u projektu.

- Jednadžba (4.5) označava relativni trošak aktivnosti,  $AC_i$ . Kvocijent  $AC_i$  predstavlja rezultat dijeljenja troška  $c_i$  aktivnosti  $i$  sa sumom troškova svih projektnih aktivnosti.
- Jednadžba (4.6) izračunava relativnu potražnju resursa za aktivnost,  $RU_i$ . Pri tome se oznaka  $u_{ir}$  odnosi na konkretnu potražnju resursa  $r$  za aktivnost  $i$ .

Pretpostavke pri određivanju težinska vrijednosti  $w_i$  su sljedeće: (i) što je veći broj sljedbenih aktivnosti, veća je i vjerojatnost lančane reakcije kojom se prenose vremenski poremećaji kroz početni raspored; (ii) aktivnosti s očekivanim dužim vremenom trajanja imaju veću vjerojatnost perturbacija uslijed negativnog utjecaja neizvjesnosti; (iii) što je veći trošak aktivnosti, to je veći utjecaj konkretne aktivnosti na tijek novca u projektu; te (iv) s većom potražnjom resursa, povećava se vjerojatnost zastoja zbog mogućih kvarova i neusklađenosti resursa pri izvođenju određene aktivnosti. Ovakav proračun težinskih vrijednosti predstavlja unapređenje postojeće metode za računanje surogatne mjere [30] implementacijom financijskog aspekta. Konkretno, u proces izračuna uvodi se dodatna jednadžba (4.5) što je važno za cjelovitu procjenu rezistencije početnog plana prema proširenom optimizacijskom problemu koji se opisuje u sljedećem potpoglavlju ove disertacije.

### 4.3. Optimizacijski problem za rezistentno vremensko planiranje građevinskih projekata

Višeciljni optimizacijski problem za rezistentno vremensko planiranje građevinskih projekata zasniva se na problemu vremenskog planiranja s ograničenim resursima (eng. *RCPS*), pri čemu se nastoji minimizirati trajanje projekta prema zadanim tehnološkim i resursnim ograničenjima. Osnovni optimizacijski problem (RCPS) unaprijeđen je postavljanjem dviju dodatnih funkcija cilja: maksimira se surogatna mjera (SM) te se maksimira profit, tj. minimiziraju se indirektni projektni troškovi [94].

Maksimiranjem SM teži se primjerenoj raspodjeli resursno-tehnoloških vremenskih rezervi kako bi početni vremenski plan imao dovoljno kapaciteta za apsorpciju vremenskih produljenja u trajanjima pojedinih aktivnosti pri izvođenju projekta. Uvođenje ove funkcije cilja predstavlja odgovor na negativan utjecaj projektne neizvjesnosti. Ideja uvođenja SM funkcije cilja je poboljšati rezistenciju početnih planova, tako da početni vremenski plan u fazi izvedbe projekta bude validan što je dulje moguće, što posljedično umanjuje potrebu za reaktivnim procedurama tijekom izvođenja projekta. Implementiranjem SM funkcije cilja nastoji se minimizirati razlika između prvotno planiranog i konačno ostvarenog stanja.



Treća funkcija cilja, tj. maksimiranje konačnog profita predstavlja dodatnu razinu stabilnosti u ovom optimizacijskom modelu za rezistentno vremensko planiranje građevinskih projekata. Pretpostavka je da se maksimiranjem konačnog profita omogućuje financijska kompenzacija za neizvjesne poremećaje koji mogu nastati uslijed neželjenih događaja i stanja tijekom izvedbe projekta. To znači da se uvođenjem ove funkcije cilja jamči adaptabilnost vremenskih planova u uvjetima neizvjesnosti jer se osigurava dovoljna količina sredstava za reaktivne procedure koje pridonose očuvanju planiranih ciljeva projekta. Štoviše, na ovaj način regulira se financijska izvodljivost optimalnih projektnih planova, s obzirom na to da je kreditni limit postavljen kao važno ograničenje optimizacijskog modela. Zadavanjem kreditnog limita osigurava se ograničena raspodjela financijskih sredstava za vrijeme trajanja projekta, tj. tok novca je omeđen u okviru raspoloživih sredstava te je na taj način moguća pouzdanija procjena financijske izvodljivosti projekta.

U tablici 4.1. prikazani su parametri korišteni za postavljanje višeciljnog optimizacijskog problema u vidu rezistentnog vremenskog planiranja građevinskih projekata u uvjetima neizvjesnosti [94]. Optimizacijske varijable, funkcije cilja i ograničenja optimizacijskog problema predstavljeni su matematičkim izrazima od (4.7) do (4.14) te su detaljnije objašnjeni u nastavku teksta.

**Tablica 4.1.** Parametri korišteni za postavljanje vešeciljnog optimizacijskog problema

Kratica	Opis
T	Trajanje projekta ( $t = 1, 2, \dots, m$ )
$x_{it}$	Binarna varijabla odlučivanja (1 ako aktivnost $i$ počinje u trenutku $t$ , inače 0)
A	Skup projektnih aktivnosti ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), uključujući fiktivni početak (eng. <i>dummy start</i> ) 0 te fiktivni završetak (eng. <i>dummy end</i> ) $n+1$
E	Skup tehnoloških relacija među aktivnostima
R	Skup vrsta projektnih resursa ( $r = 1, 2, \dots, k$ )
$w_i$	Težinski faktor za aktivnost $i$
$d_i$	Očekivano trajanje aktivnosti $i$
$c_i$	Deterministički trošak aktivnosti $i$
$u_{ir}$	Potražnja resursa $r$ za izvršenje aktivnosti $i$
$a_r$	Dostupnost resursa $r$ za vrijeme trajanja projekta T

4. Optimizacijski model za rezistentno vremensko planiranje građevinskih projekata u uvjetima nesigurnosti

q	Početak vremenskog intervala u kojem se provjerava resursno ograničenje
FF <sub>i</sub>	Resursno-tehnološka vremenska rezerva za aktivnost i
P	Konačan profit na kraju projekta
EOM	Kraj mjeseca u vremenskom okviru trajanja projekta, tj. vremenski korak za proračun toka novca, (eom = 1, 2, ..., l)
CG <sub>eom</sub>	Kumulativno stanje novčanog toka na kraju mjeseca eom
PT <sub>l</sub>	Isplata od strane investitora na kraju projekta
I <sub>eom</sub>	Ukupne kamate na kraju mjeseca eom
ir	Kamatna stopa
W	Kreditni limit za projekt

U matematičkom iskazu optimizacijskog problema, funkcije cilja definirane su izrazima (4.7) – (4.9), ograničenja optimizacijskog problema postavljena su u formulama (4.10) – (4.13), a binarna varijabla odlučivanja iskazana je u matematičkom zapisu (4.14).

$$\text{Min} \sum_{t \in T} t \times x_{n+1,t} \quad (4.7)$$

$$\text{Max} \sum_{i \in A} (w_i \times FF_i) \quad (4.8)$$

$$\text{Max } f(P) := CG_1 + PT_l + \sum_{eom=1}^l I_{eom} \times (1 + ir)^{l-eom} \quad (4.9)$$

uz ograničenja:

$$\sum_{t \in T} x_{it} = 1, \forall i \in A \quad (4.10)$$

$$\sum_{t \in T} t \times x_{it} \leq \sum_{t \in T} t \times x_{jt} - d_i, \forall (i, j) \in E \quad (4.11)$$

$$CG_{eom} \leq W; \forall eom \in EOM \quad (4.12)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{q=\max\{0,t-d_i+1\}}^t u_{ir} \times x_{iq} \leq a_r, \forall t \in T, \forall r \in R \quad (4.13)$$

$$x_{it} \in \{0, 1\}, \forall i \in A, \forall t \in T \quad (4.14)$$

Prva ciljna funkcija optimizacijskog modela u izrazu (4.7) odnosi se na minimiziranje ukupnog trajanja projekta tako da se minimizira početak završne fiktivne aktivnosti (eng. *dummy end*), pri čemu trajanje te aktivnosti iznosi nula vremenskih jedinica. Sljedeća funkcija cilja u izrazu (4.8) predstavlja maksimiranje surogatne mjere SM, tj. maksimiranje resursno-tehnoloških slobodnih rezervi u projektnoj mreži uz odgovarajuće množenje težinskim faktorom  $w_i$ , čiji je proračun objašnjen u prethodnom poglavlju. Posljednja funkcija cilja u izrazu (4.9) maksimira ukupni profit projekta tako da se kumulativnom iznosu novčanog toka u zadnjem obračunskom periodu pridodaju iznosi završne isplate i pripadajućih kamata.

Što se tiče ograničenja optimizacijskog problema, ona se odnose na sljedeće postavke: jednačba (4.10) uvjetuje da svaka aktivnost, uključujući fiktivni početak (eng. *dummy start*) i fiktivni završetak (eng. *dummy end*) može početi samo jednom. Tehnološke ovisnosti među aktivnostima prikazane su izrazom (4.11), gdje je naglašeno da ni jedna aktivnost ne može početi prije no što sve njene prethodne aktivnosti završe. Financijsko ograničenje projekta naglašeno je u izrazu (4.12), gdje na kraju svakog mjeseca kumulativni novčani iznos mora biti u okviru kreditnog limita za projekt. Sljedeće važno ograničenje optimizacijskog problema odražava potrebu poštivanja resursnih ograničenja, tj. u svakom trenutku izvršenja aktivnosti upotreba resursa ne smije prijeći raspoloživu količinu, kao što je vidljivo iz izraza (4.13). Konačno, varijabla odlučivanja definirana je kao binarna veličina, kao što je navedeno u izrazu (4.14).

#### 4.3.1. Financijski modul za određivanje toka novca u građevinskom projektu

S obzirom na to da izvedba kompleksnih građevinskih projekata zahtijeva značajna financijska sredstva, izvođači radova rijetko se oslanjaju na vlastite izvore financiranja. Shodno tome, većina izvođača ugovara određeni oblik bankovnog kreditiranja prema ugovoru o dopuštenom prekoračenju u ugovorenom vremenu, tj. sklapa specifični vid bankovnog zajma (eng. *bank overdraft*) [95]. Tijekom izvedbe projekta izvođači radova primaju redovite mjesečne uplate na temelju izvedenih radova, stoga povrat zajma te generalni financijski tok ovise upravo o vremenskom rasporedu projektnih aktivnosti. Za vrijeme izvođenja projektnih aktivnosti izvođači moraju podmiriti tekuće troškove, a neto razlika između troškova i prihoda generira visinu

prekoračenja koje se financira iz odgovarajućeg izvora [96]. Projektnim financiranjem osigurava se kreditiranje kapitalno intenzivnih djelatnosti u građevinskim projektima koji su po svojoj naravi dugotrajni, složeni i financijski zahtjevni. Osnovna značajka projektnog financiranja odnosi se na odobravanje kredita od strane zajmodavca kako bi se omogućila izvedba projekta, a povrat investicije direktno ovisi o financijskom toku projekta [97]. Pošto je bankovni zajam (eng. *bank overdraft*) prepoznat kao jedna od najčešćih tehnika financiranja za kompleksne građevinske projekte [95,98], financijski modul za određivanje toka novca u problemu rezistentnog vremenskog planiranja modeliran je prema odgovarajućem okviru koji je detaljno utvrđen u sveobuhvatnom radu autora Au i Hendrickson [99] te su izvršene sljedeće prilagodbe kako bi se omogućila veća preciznost u izračunu financijskog toka:

- uvodi se mogućnost korištenja egzaktnog vremenskog kalendara,
- uvodi se naknada za pozitivno kumulativno stanje računa na kraju promatranog obračunskog razdoblja,
- uvodi se eksplicitan povrat jamstva za uredno izvršenje ugovora na kraju projektne izvedbe.

Financijski modul realiziran je prema postojećim formulama [99], a primjer proračuna na teoretskom prikazu projektne mreže [95] detaljno je prikazan u Dodatku ove disertacije. U ovom doktorskom istraživanju financijski modul razvijen je kao zasebna programska struktura (klasa) u Python programskom jeziku koji podržava objektno-orijentirano programiranje. Prednost objektno-orijentiranog pristupa programiranju koji je korišten tijekom ovog istraživanja je mogućnost daljnje prilagodbe za specifične uvjete financiranja pojedinih građevinskih projekata u budućim aplikacijama, s obzirom na modularnost dizajna razvijenog programskog koda.

Analiza vremenske vrijednosti novca te općenitih troškova financiranja važni su u uvjetima dugotrajne izvedbe kompleksnih građevinskih projekata jer njihovo razmatranje vodi ka preciznijim proračunima financijskih zahtjeva u projektu. Upravljanje financijskim sredstvima na temelju rasporeda aktivnosti važno je kako za izvođača, tako i za investitora, ali i za uspješnu izvedbu projekta u širem smislu. Da bi se unaprijedilo planiranje građevinskih projekata u uvjetima neizvjesnosti, iznimno je važno uključiti financijski aspekt u sveobuhvatnom optimizacijskom modelu za izradu rezistentnih vremenskih planova jer se tako omogućuje pouzdanije donošenje poslovnih odluka te kompletnija procjena financijske izvodljivosti samoga projekta.

#### 4.4. Pristupi rješavanju višeciljnih optimizacijskih problema

U rješavanju višeciljnih optimizacijskih problema razlikuju se tri osnovna pristupa: *a priori*, *a posteriori* te interaktivni pristup [100]. *A priori* pristup odnosi se na proces u kojemu donositelj odluka definira svoje preferencije prije samog postupka optimizacije. *A priori* pristup obuhvaća npr. metodu skalarizacije i hijerarhijsku (leksikografsku) metodu. Skalarizacijom se više funkcija cilja svodi na objedinjeni izraz, a kod hijerarhijske (leksikografske) metode unaprijed se određuje važnost pojedinih funkcija cilja te se zatim rješava optimizacijski problem razmatrajući redom jednu po jednu funkciju cilja. Pri tome se u daljnjim koracima hijerarhijske metode uzimaju u obzir samo ona rješenja koja neće umanjiti vrijednosti važnijih funkcija cilja. S druge strane, *a posteriori* pristup zagovara rješavanje višeciljnog problema u svom prvotnom obliku, prihvaćajući postojanje više suprotstavljenih funkcija cilja. Metode rješavanja višeciljnih optimizacijskih problema prema *a posteriori* pristupu mogu se ugrubo podijeliti na dvije skupine, a to su metode egzaktnog matematičkog rješavanja te metaheurističke metode. Rezultat višeciljne optimizacije prema *a posteriori* pristupu bit će predstavljen u vidu skupa rješenja iz kojeg donositelj odluka na temelju dodatnih preferencija naknadno može odabrati jedno konačno rješenje. Konačno, interaktivni pristup za rješavanje višeciljnih optimizacijskih problema odnosi se na progresivno djelovanje donositelja odluka za vrijeme optimizacijskog procesa.

S obzirom na raznovrsnost praktičnih problema te zbog rastućeg interesa i konstantnog napretka u istraživanju višeciljnih optimizacijskih problema, s vremenom su se razvile brojne metode rješavanja složenih optimizacijskih modela, ali važno je za primijetiti da će jedno pokretanje algoritma skalarizacijskih ili hijerarhijskih metoda dati samo jedno rješenje optimizacijskog problema, dok se primjenom metaheurističkih algoritama dolazi do skupa nedominirajućih rješenja.

*A priori* pristup u kojem se višeciljni problemi pod svaku cijenu svode na jedinstvenu funkciju cilja (skalarizacijska metoda) opravdan je samo u situacijama kada se jasno može definirati težinski odnos među različitim funkcijama cilja, što nije čest slučaj pri optimizaciji stvarnih problema. Definiranje težinskih kriterija je subjektivan i kompleksan postupak koji zahtijeva kvalitativne i iskustvene informacije da bi se definirao kvantitativni faktor. Daljnji nedostatak skalarizacijske metode je već spomenuta činjenica da optimizacija objedinjene funkcije cilja u načelu vodi do samo jednog rješenja pri pokretanju odgovarajućeg algoritma, ali višeciljni problemi u suštini imaju praktičnu korist od postojanja više različitih rješenja. Na primjer, ako je optimizacijski problem sastavljen od dvije suprotstavljene funkcije cilja pri čemu se minimizira

trajanje projekta, a ujedno se maksimira ukupni profit, onda donositelj/ica projektnih odluka ima praktičnu korist od razmatranja većeg skupa rješenja s različitim kombinacijama trajanja projekta i očekivanog profita. Tek onda, primjenom dodatnih informacija mogu se detaljno analizirati dobivena rješenja te se tako dolazi do odluke o konačnom rješenju (*a posteriori* pristup). U *a priori* pristupu jedini način kako doći do većeg skupa rješenja je opetovana primjena algoritma za rješavanje optimizacijskog problema s kompozitnom funkcijom cilja. Prema Debu [101], takav pristup većinom se primjenjuje u nedostatku odgovarajućih optimizacijskih metodologija koje bi na efikasan način dolazile do skupa optimalnih rješenja, a u nekim slučajevima uopće nema garancije da je dobiveno rješenje Pareto optimalno. Štoviše, rješenje višeciljnog optimizacijskog problema dobiveno *a priori* pristupom uvelike ovisi o težinskim faktorima koji su korišteni za integraciju više ciljnih funkcija u jednu ciljnu funkciju, a ako pouzdan i točan način definiranja težinskih faktora nije primjenjiv, tada će i dobiveno rješenje biti iznimno podložno subjektivnoj procjeni. Nedostacima poput subjektivnosti te ograničenosti veličine izlaznog rješenja podložne su i skalarizacijska i hijerarhijska (leksikografska) metoda.

Mnogo praktičnijim načinom rješavanja višeciljnih optimizacijskih problema pokazala se upotreba metaheurističkih metoda koje su u mogućnosti pronaći set Pareto optimalnih rješenja u samo jednom pokretanju algoritma. U skupinu metaheurističkih metoda ubrajaju se i evolucijske metode optimizacije. Evolucijske metode predstavljaju skup optimizacijskih tehnika koje se temelje na oponašanju modela određenih prirodnih procesa da bi se na robustan i fleksibilan način riješili problemi širokog spektra primjene. Kako dalje navodi Vučina [71], evolucijske metode imaju vrlo dobru primjenu na različite probleme u inženjerstvu, čak i onda kada su optimizacijski problemi teško rješivi egzaktnim metodama. Zbog djelomično stohastičkog obrasca pretraživanja prostora mogućih rješenja, evolucijske metode tipično pronalaze globalni ekstrem, što je još jedna prednost evolucijskog pristupa nad klasičnim pristupom za rješavanje višeciljnih optimizacijskih problema.

U višeciljnoj optimizaciji važan je koncept tzv. dominacije rješenja. Ovdje se radi o usporedbi dvaju rješenja da bi se odredilo je li jedno rješenje dominantno nad drugim uzevši u obzir zadane parametre optimizacijskog problema. Pretpostavimo da postoji  $M$  različitih funkcija cilja u optimizacijskom problemu, a operator  $\triangleleft$  ilustrira odnos između dvaju rješenja  $i$  i  $j$ . Ukoliko je  $i \triangleleft j$ , to znači da je rješenje  $i$  bolje od rješenja  $j$  u pogledu određene funkcije cilja, bez obzira radi li se o minimizaciji ili maksimizaciji. Analogno, izraz  $i \triangleright j$  označava da je rješenje  $i$  lošije od rješenja  $j$  za određenu ciljnu funkciju. Ako se funkcija cilja minimizira, tada operator  $\triangleleft$  predstavlja simbol  $<$ , a ako se radi o maksimizaciji, tada se operator  $\triangleleft$  odnosi na simbol  $>$ . Tada

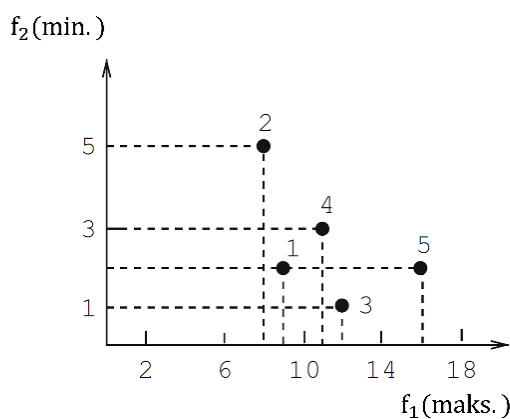
se može definirati da rješenje  $x^{(1)}$  dominira nad rješenjem  $x^{(2)}$  ako su oba uvjeta istinita prema sljedećoj definiciji:

**Definicija 4.1.** Za rješenje  $x^{(1)}$  smatra se da dominira nad rješenjem  $x^{(2)}$  ukoliko su oba sljedeća uvjeta ispunjena:

1. Rješenje  $x^{(1)}$  nije lošije od rješenja  $x^{(2)}$  za sve ciljne funkcije, tj. ukoliko  $f_j(x^{(1)}) \nless f_j(x^{(2)}) \forall j = 1, 2, \dots, M$ .
2. Rješenje  $x^{(1)}$  je bolje od rješenja  $x^{(2)}$  u barem jednoj funkciji cilja, tj.  $f_{j'}(x^{(1)}) \less f_{j'}(x^{(2)}) \exists j' \in \{1, 2, \dots, M\}$ .

Ako je ijedan od navedenih uvjeta prekršen, tada rješenje  $x^{(1)}$  ne dominira nad rješenjem  $x^{(2)}$  [101].

Ilustrativni primjer dominacije rješenja prikazan je na slici 4.7., preuzet iz [101]. Ovdje se radi o bi-optimizacijskom problemu s pet prikazanih rješenja, pri čemu se prva funkcija cilja maksimira, a druga ciljna funkcija se minimizira. S obzirom na to da su obje funkcije cilja podjednako važne u stvarnom problemu, obično je teško pronaći samo jedno rješenje koje bi bilo najbolje u pogledu zadovoljavanja svih funkcija cilja. Ipak, koncept dominacije rješenja omogućuje usporedbu parova rješenja da bi se odlučilo jeli jedno rješenje dominira nad drugim.



**Slika 4.7.** Primjer skupa rješenja za ilustrativni bi-optimizacijski problem, prema [101]

Npr. ukoliko se uspoređuju rješenja 1 i 2, tada je evidentno da je rješenje 1 bolje od rješenja 2 za prvu funkciju cilja (maksimizaciju) te je rješenje 1 također bolje od rješenja 2 u pogledu druge ciljne funkcije (minimizacije). Prema tome, oba uvjeta iz definicije 4.1. su zadovoljena te se rješenje 1 proglašava dominantnim nad rješenjem 2. S druge strane, ako se uspoređuju rješenja 3 i 5, tada je sa slike 4.5 vidljivo da je rješenje 5 bolje od rješenja 3 za prvu funkciju cilja, a rješenje 3 je bolje od rješenja 5 u pogledu druge ciljne funkcije, tj. prvi uvjet definicije 4.1. nije zadovoljen

za oba rješenja (3 i 5). To znači da ne možemo zaključiti koje od ova dva rješenja je bolje u bi-optimizacijskom problemu te ih proglašavamo nedominirajućim rješenjima: niti rješenje 3 dominira nad rješenjem 5, niti rješenje 5 dominira nad rješenjem 3.

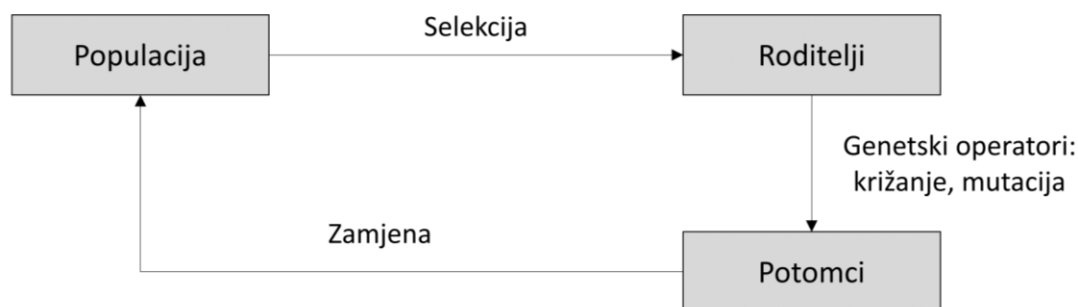
U višeciljnoj optimizaciji, koncept dominacije rješenja je iznimno koristan jer omogućava usporedbu rješenja kada postoji više funkcija cilja te se većina optimizacijskih metoda za rješavanje višeciljnih problema bazira na opisanoj ideji prilikom traženja nedominiranih rješenja [101]. Za određeni konačni skup rješenja u nekom optimizacijskom problemu moguće je međusobno usporediti sve parove rješenja da bi se utvrdila njihova dominacija. U konačnici, nastoji se doći do skupa rješenja u kojemu ne postoji ni jedan par rješenja takav da dominira jedan nad drugim, tj. sva rješenja u ovom skupu su nedominirajuća jedno nad drugim. Takav skup rješenja ima još jedno svojstvo: za bilo koje rješenje izvan definiranog skupa nedominirajućih rješenja moguće je pronaći rješenje u skupu nedominirajućih rješenja tako da potonje rješenje dominira nad rješenjem izvan nedominirajućeg skupa. Dakle, nedominirajući skup rješenja ima svojstvo da dominira nad svim drugim rješenjima koja nisu dio navedenog skupa te se takav skup rješenja naziva Pareto skup rješenja. Jednostavnije rečeno, Pareto rješenja su bolja u odnosu na sva ostala rješenja koja ne spadaju u taj skup [101] te je pronalazak Pareto skupa rješenja osnovni cilj većine metoda za rješavanje višeciljnih optimizacijskih problema.

S obzirom na dokazanu praktičnost evolucijskih pristupa u rješavanju višeciljnih optimizacijskih problema te zbog karakteristika ishodišnog problema u ovom istraživanju, daljnji koraci u općem višeciljnom modelu rezistentnog vremenskog planiranja usmjereni su ponajprije na primjenu genetskog algoritma kako bi se u relativno kratkom vremenu izračuna mogao pronaći Pareto skup optimalnih rješenja za projektne mreže većeg stupnja kompleksnosti. Evolucijske metode iznimno su korisne u rješavanju višeciljnih optimizacijskih metoda te se pokazalo da je samo jednim pokretanjem algoritma moguće pronaći raznovrsna i dobro raspodijeljena rješenja za probleme s nekoliko ciljnih funkcija (četiri ili manje) [101]. U ovom istraživanju, primjena *a priori* metoda (hijerarhijski pristup) za rješavanje postavljenog višeciljnog problema provedena je isključivo u početnoj fazi, prije no što je razvijen evolucijski algoritam za rješavanje kompleksnih projektnih mreža te je sažeto prikazana na jednostavnom primjeru projekta u potpoglavlju 5.3.1.



#### 4.5. Genetski algoritam za rješavanje problema rezistentnog vremenskog planiranja

Genetski algoritmi (eng. *Genetic Algorithms*, kratica GA) su metaheuristike inspirirane tehnikama prirodne selekcije te spadaju u širu kategoriju evolucijskih algoritama. Za ovu vrstu optimizacijskih algoritama karakteristično je pretraživanje prostora mogućih rješenja tako da se oponašaju načela prirodne selekcije na populaciji jedinki, tj. na skupu potencijalnih rješenja. Svaka populacija prolazi niz iterativnih koraka pri čemu se izmjenjuju postupci selekcije i genetskih operatora (križanja i mutacije) tijekom određenog broja generacija te se na ovaj način očituje analogija evolucije kao prirodnog procesa i genetskog algoritma kao metode optimiranja. U evolucijskom procesu živih bića ključ selekcije uvjetuju okolina i uvjeti u prirodi, a u genetskim algoritmima mehanizam odabira odnosi se na funkcije cilja optimizacijskog problema [102]. Kao što je prikazano na slici 4.8., nakon procesa evaluacije jedinki u određenoj generaciji, selektiraju se roditelji na čijem će se genetskom materijalu izvršiti procesi križanja i mutacije, a novostvoreni potomci zamjenjuju genetski materijal svojih roditelja i prenose se u sljedeću generaciju te tako stvaraju novu populaciju. Iterativni proces selekcije i genetskih operatora ponavlja se do zadovoljenja uvjeta zaustavljanja algoritamskog procesa.

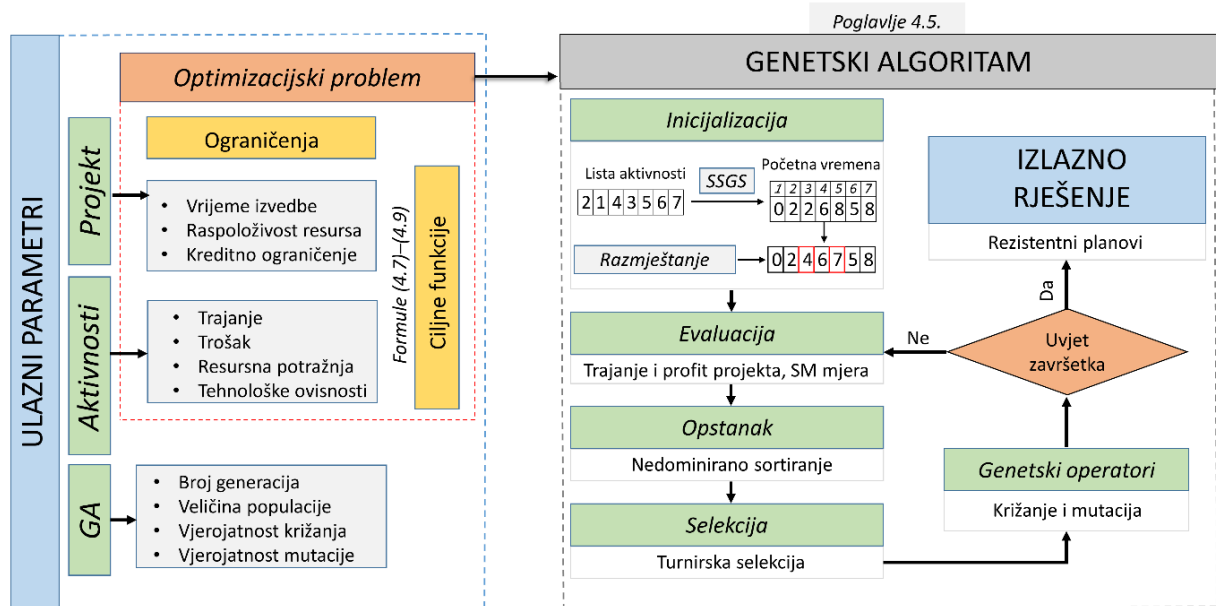


Slika 4.8. Proces stvaranja generacija u genetskom algoritmu, prema [103]

Primjena genetskih algoritama u širokoj je upotrebi za brojne probleme u inženjerskoj optimizaciji, a naročito je pogodna za rješavanje višeciljnih optimizacijskih problema, kod kojih poseban izazov predstavlja traženje rješenja koje bi zadovoljilo sve ciljne funkcije. Višeciljni optimizacijski problemi u načelu zahtijevaju skup rješenja, a ne jedno optimalno rješenje kao izlaz modela [101], a prednost genetskih algoritama očituje se upravo u činjenici da je potrebno samo jedno pokretanje algoritma da bi se dobio traženi skup rješenja. Ovakav pristup rješavanju višeciljnih optimizacijskih problema razlikuje se od tradicionalnih metoda koje zagovaraju

integraciju više funkcija cilja u objedinjenu funkciju cilja. Prema klasičnom pristupu (svođenje više funkcija cilja u jednu ili hijerarhijska metoda), potrebno je opetovano rješavanje istog problema s nadom dobivanja različitih rješenja pri svakom pokretanju algoritma da bi se dobio skup različitih, nedominirajućih rješenja [80], što kod rješavanja višeciljnih optimizacijskih problema genetskim algoritmima nije slučaj.

Pri primjeni genetskih algoritama na specifični optimizacijski problem potrebno je odrediti nekoliko nužnih karakteristika. Za početak, bitno je definirati prikaz rješenja, tj. način kodiranja kromosoma u jedinkama populacije. Ovdje se pod pojmom kromosom podrazumijeva jedno moguće rješenje danog problema, a kromosom je sastavljen od pojedinačnih gena koji označavaju vrijednost varijabli odlučivanja. Također, neophodno je odrediti broj jedinki u populaciji, odnosno utvrditi veličinu generacije. Osim toga, nužno je definirati postupak evaluacije pojedinih rješenja, tj. zadati funkciju ocjene kvalitete jedinke, koja je u suštini ekvivalent funkciji cilja u optimizacijskom problemu. Ako se optimizacijski problem sastoji od više funkcija cilja, tada će i jedinke pri algoritamskom rješavanju biti ocjenjivane na temelju pripadajućih funkcija evaluacije. Osim toga, za primjenu genetskih algoritama važno je još odrediti i način odabira roditeljskih jedinki koje sudjeluju u procesima genetskih operatora, odnosno u procesima križanja i mutacije da bi se polučili potomci i tako pridonijelo stvaranju nove generacije. Naposljetku, potrebno je postaviti kriterij završetka algoritamskog procesa. Svi ovi parametri utječu na performanse genetskog algoritma i njegovu učinkovitost te ovise o optimizacijskom problemu koji se rješava. Na slici 4.9. prikazan je generalni tijek genetskog algoritma za rješavanje optimizacijskog problema rezistentnog vremenskog planiranja građevinskih projekata [104], a u narednim poglavljima detaljnije će se predstaviti pojedini algoritamski procesi primijenjeni na rješavanje sveobuhvatnog optimizacijskog problema za rezistentno vremensko planiranje građevinskih projekata.



Slika 4.9. Tijek genetskog algoritma u širem kontekstu optimizacijskog modela za rezistentno vremensko planiranje

Za potrebe ovog doktorskog istraživanja genetski algoritam prilagođen je i korišten u okruženju programskog paketa *pymoo* za višeciljnu optimizaciju u Python programskom jeziku [83].

#### 4.5.1. Inicijalizacija genetskog algoritma

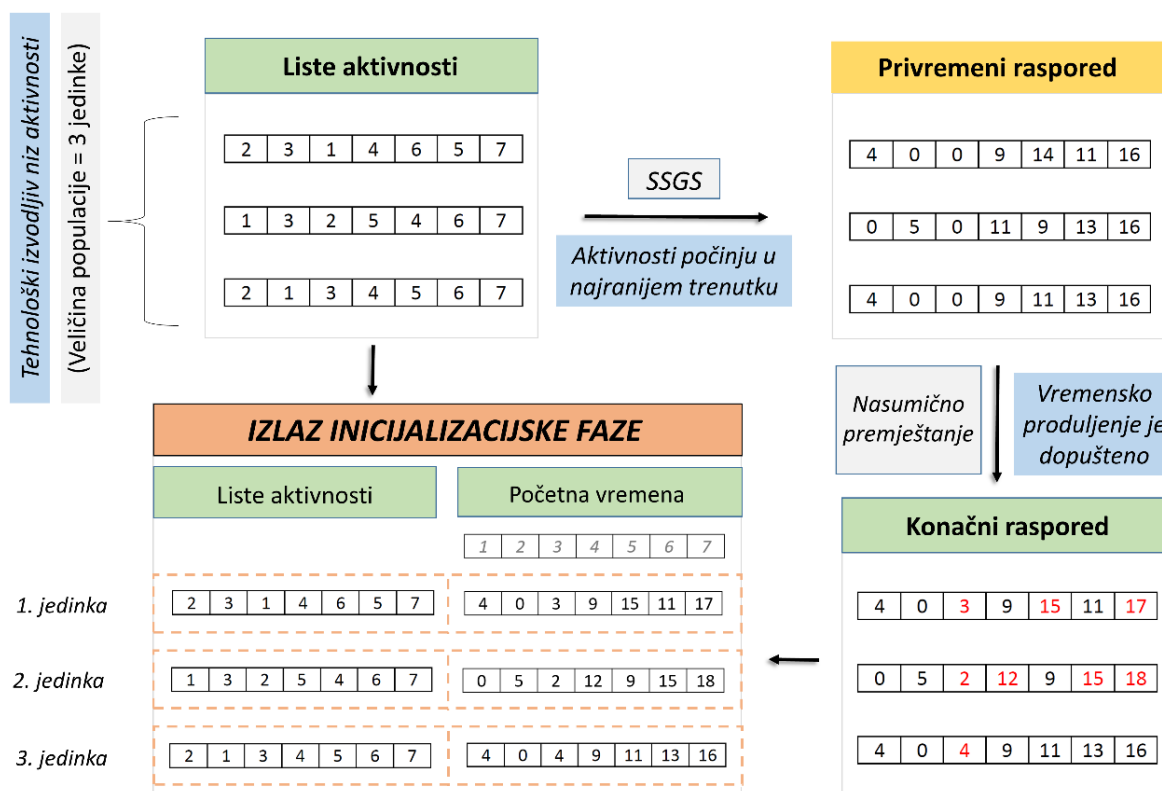
Genetski algoritmi funkcioniraju tako da indirektno uzimaju u obzir varijable odlučivanja, tj. zbog temeljnih algoritamskih načela potrebno je prikazati vrijednosti varijabli odgovarajućim kodom [71]. Što se tiče primjene genetskih algoritama na problem vremenskog planiranja s ograničenim resursima (RCPS), tu postoji nekoliko različitih načina za strukturiranje podataka kako bi se opisala svojstva određene jedinke. Kako navode Kolisch i Hartmann [105], za konkretni slučaj RCPS problema, najčešći prikazi jedinke u metaheurističkim pristupima odnose se na kodiranje kromosoma listom aktivnosti (eng. *activity list*), prikazom slučajnog ključa (eng. *random key representation*), prioritarnim pravilima (eng. *priority rule*), vektorima premještanja (eng. *shift vector*) te shematskim prikazom rasporeda (eng. *schedule scheme representation*).

Bez obzira na odabranu vrstu prikaza genetske jedinke, iznimno je bitno da kodirani kromosom predstavlja moguće rješenje zadanog problema [102]. Pri interakciji kromosoma s genetskim operatorima u nekim shematskim prikazima genetskih jedinke (kao što je zapis kromosoma u vidu egzaktnih početaka aktivnosti) potencijalno može doći do kršenja tehnoloških ovisnosti među

#### 4. Optimizacijski model za rezistentno vremensko planiranje građevinskih projekata u uvjetima nesigurnosti

aktivnostima te je stoga važno definirati prikladan način genetskog zapisa s obzirom na procese križanja i mutacije. Slijedom navedenoga, u ovome doktorskom istraživanju odabran je prikaz kromosoma listom aktivnosti (eng. *activity list*) iz kojega se upotrebom odgovarajućih metoda definira raspored aktivnosti u projektu. Prema Hartmannovom dokazu [106], primjena lista aktivnosti za kodiranje jedinki u RCPSP problemu garantira očuvanje tehnoloških veza među aktivnostima u slučaju jednostavnih genetskih operatora kao što su križanje s jednom ili dvije točke prekida.

Lista aktivnosti  $\lambda = \langle j_1, j_2, \dots, j_n \rangle$  definirana je kao tehnološki izvodljivi niz aktivnosti pri čemu svaka aktivnost  $j_g$  mora imati viši indeks  $g$  nego bilo koji njen prethodnik u skupu direktnih prethodnih aktivnosti  $P_{j_g}$  koje nužno moraju biti završene da bi aktivnost  $j_g$  mogla početi [105]. Npr. kao što je vidljivo sa slike 4.10., jedna genetska jedinka može biti predstavljena listom  $\lambda^E = \langle 2, 3, 1, 4, 6, 5, 7 \rangle$  što će rezultirati odgovarajućim vremenskim rasporedom za ilustrativni primjer projekta sastavljenog od sedam aktivnosti.



Slika 4.10. Primjer inicijalizacijskog procesa za stvaranje početne generacije u GA

Inicijalizacijski proces algoritma započinje nasumičnim generiranjem tehnološki izvodljivih lista aktivnosti. Da bi se od liste aktivnosti konstruirao validni raspored aktivnosti, u kojemu je definiran početak izvršenja svake od aktivnosti, potrebno je primijeniti odgovarajuću

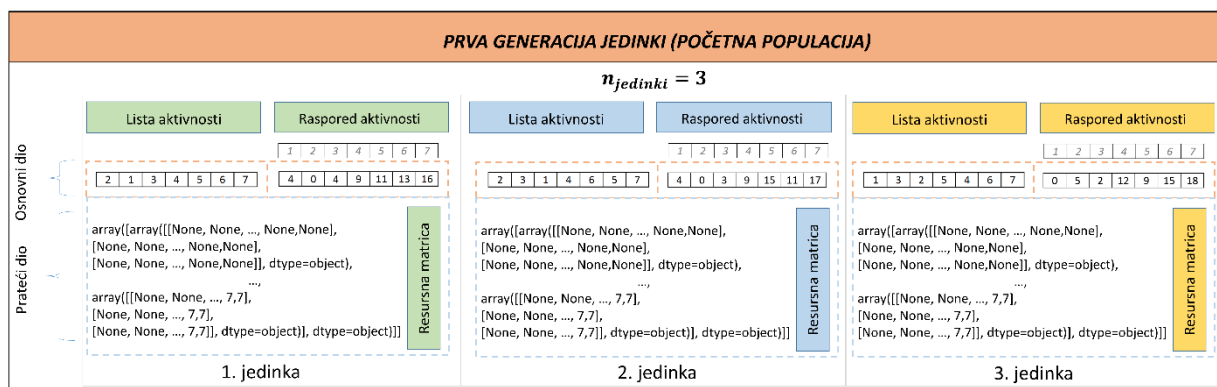
konstruktivnu metodu - u ovom slučaju radi se o primjeni serijske sheme generiranja rasporeda (eng. *Serial Schedule Generation Scheme*, kratica *SSGS*).

SSGS metoda konstruira izvodljive rasporede tako da se aktivnosti raspoređuju serijski, jedna za drugom u najraniji mogući trenutak, ali uzimajući u obzir postojeća ograničenja (resursnu dostupnost i tehnološke veze među aktivnostima). Konkretno, SSGS metoda izvršava se u  $n = 1, \dots, J$  koraka, pri čemu je  $J$  broj svih aktivnosti u projektu. Drugim riječima, u svakom koraku SSGS algoritma, bira se po jedna aktivnost te se smješta u najraniji mogući trenutak u vremenskom rasporedu. U svakom koraku algoritma razlikuju se dva skupa: skup raspoređenih aktivnosti  $S_n$  (eng. *Scheduled set*) te skup mogućih aktivnosti  $D_n$  (eng. *Decision set*). Skup  $S_n$  predstavlja parcijalni raspored aktivnosti, tj. u njemu su sadržane sve aktivnosti čije je vrijeme početka u određenom koraku izvršenja algoritma već definirano, a skup  $D_n$  uključuje sve aktivnosti koje još nisu vremenski raspoređene, ali se njihove prethodne aktivnosti (eng. *predecessors*) nalaze u skupu  $S_n$ . U svakom koraku SSGS algoritma bira se po jedna aktivnost iz skupa mogućih aktivnosti  $D_n$  prema određenom pravilu, tj. u ovom slučaju prema početnoj listi aktivnosti (eng. *activity list*) te se odabrana aktivnost smješta u najraniji mogući trenutak u rasporedu poštujući postojeća ograničenja. Zatim se odabrana aktivnost uklanja iz skupa mogućih aktivnosti  $D_n$  i premješta se u skup raspoređenih aktivnosti  $S_n$  te algoritam SSGS metode nastavlja s izvršavanjem sve dok se ne konstruira potpuni projektni raspored.

Kod generiranja vremenskog rasporeda iz postojeće liste aktivnosti moguće je upotrijebiti i druge pristupe, kao na primjer metodu paralelne sheme generiranja rasporeda (eng. *Parallel Schedule Generation Scheme*, kratica *PSGS*). PSGS se za razliku od SSGS metode izvršava tako da koraci algoritma prolaze kroz vremenske trenutke, a ne iteracijom kroz projektne aktivnosti. Kako Kolisch [107] navodi, obje metode će polučiti izvodljiv vremenski raspored za RCPS problem, ali PSGS pristup može previdjeti optimalno rješenje u slučaju kada se razmatraju tzv. regularne funkcije cilja (npr. minimizacija trajanja projekta) te se stoga u ovoj implementaciji genetskog algoritma koristi SSGS pristup da bi se konstruirao vremenski raspored aktivnosti u projektu s ograničenim resursima.

Kao što se može vidjeti sa slike 4.10., SSGS metodom se generira privremeni raspored aktivnosti, gdje je svaka aktivnost raspoređena u najranijem mogućem trenutku s obzirom na resursna i tehnološka ograničenja projekta. Ovakav raspored predstavljao bi zadovoljavajuće rješenje za inicijalizacijsku fazu algoritma kada bismo tražili minimalni vremenski raspored kao isključivo rješenje optimizacijskog problema, ali s obzirom na to da se ishodišni problem u ovom slučaju sastoji od više (suprotstavljenih) funkcija cilja, dopušta se produljenje trajanja projekta u

određenom postotku da bi se dopustila mogućnost optimiranja i drugih funkcija cilja, a ne samo minimizacije vremenskog trajanja. Zbog toga je razvijena metoda tzv. „nasumičnog premještanja“ koja prolazi kroz sve projektne aktivnosti te ih nasumce premješta u okvirima raspoloživih vremenskih rezervi nakon dopuštenog vremenskog produljenja projekta. Implementacijom metode „nasumičnog premještanja“ znatno se proširuje ispitani prostor mogućih rješenja u procesu optimizacije, jer se različitim početcima aktivnosti ispituju specifične kombinacije potencijalnih rješenja. Tijekom istraživanja pokazalo se da brojna tehnološka ograničenja među projektnim aktivnostima uvjetuju relativno nizak broj različitih listi aktivnosti te je zbog toga važno uzeti u obzir ne samo kodirane jedinice, već i njihova specifična vremena početaka koja se generiraju opisanim postupcima.



Slika 4.11. Primjer genetske populacije u programskom zapisu

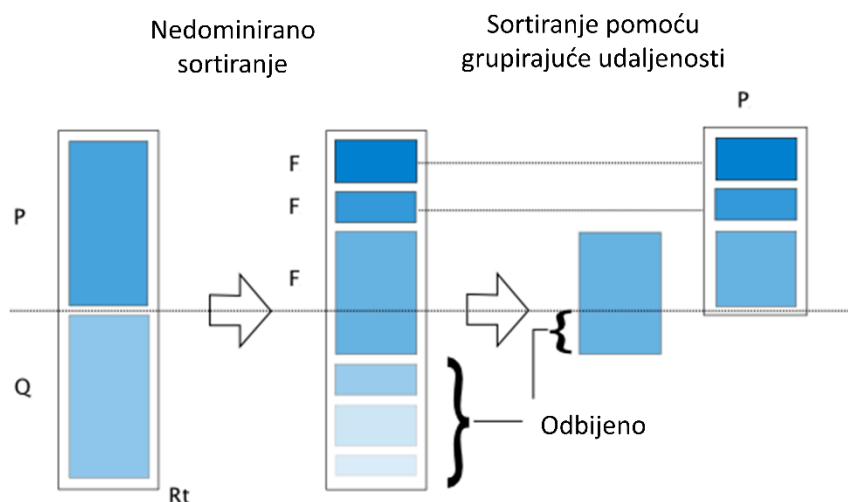
Izlazno rješenje inicijalizacijske faze (Slika 4.11.) sastoji se od prve generacije jedinki, tj. od početne populacije. Svaka jedinka sadrži dva osnovna dijela: listu aktivnosti te konačni raspored konstruiran primjenom metoda SSGS i tzv. nasumičnog premještanja. Osim toga, svaka jedinka sadrži i prateći dio koji se odnosi na resursnu matricu (određena je raspodjela resursa u vremenu za sve aktivnosti). Ovakav izlazni format jedinki važan je zbog kasnijih koraka genetskog algoritma: neke procedure odvijaju se na prvom dijelu jedinice, tj. na kodiranoj listi aktivnosti (npr. genetsko križanje i mutacija), a druge se procedure pak izvršavaju na gotovom rasporedu aktivnosti, kao što je npr. evaluacija trajanja i troškova projekta prema promatranom rasporedu. Prateći dio (resursna matrica) potreban je da bi se izračunala vrijednost SM mjere te se na taj način u potpunosti evaluira jedinka genetskog algoritma za sve tri funkcije cilja u optimizacijskom problemu.

#### 4.5.2. Evaluacija, opstanak i odabir jedinki

Evaluacija jedinki u određenoj generaciji vrši se s ciljem usporedbe jedinki populacije. Ovdje se u odnosu na funkcije vrsnoće (podobnosti, dobrote, eng. *fitness function*) određuje mjera izvrsnosti pojedinih jedinki populacije tijekom izvršavanja genetskog algoritma [71]. Proračun funkcije vrsnoće temelji se na određivanju vrijednosti svih funkcija cilja u fundamentalnom optimizacijskom problemu: određuje se trajanje projekta, vrijednost SM mjere te financijski tok na temelju početnog rasporeda aktivnosti. S obzirom na postojanje više funkcija cilja u osnovnom optimizacijskom problemu, evaluacija jedinki u populaciji nije jednoznačna kao što je to slučaj u optimizacijskim problemima s jednom funkcijom cilja.

Iako klasične metode rješavanja optimizacijskih problema razmatraju postupke integracije višeciljnih problema da bi se dobila jedna kompozitna funkcija cilja, normiranje pojedinih funkcija cilja pri njihovoj integraciji predstavlja složeni problem te ovaj način rješavanja višeciljnih problema često nije pogodan jer može doći do dominacije neke od parcijalnih funkcija cilja [71]. U tom smislu, za rješavanje višeciljnih optimizacijskih problema postoji niz pristupa koji generiraju skup kompromisnih rješenja kako bi se omogućio uvid u skup optimalnih rješenja naspram pronalaženja jednog kompromisnog rješenja za konkretni zadatak.

U implementaciji genetskog algoritma za rezistentno vremensko planiranje građevinskih projekata koriste se postojeće procedure sortiranja i odabira vrsnih jedinki prema kompetitivnom algoritmu nedominirajućeg sortiranja NSGA-II (eng. *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) [80]. Jedno od osnovnih obilježja NSGA-II algoritma je sposobnost čuvanja najboljih rješenja optimizacijskog problema u procesu slijedne selekcije po nedominiranim frontama, tj. prethodno spomenuto svojstvo elitizma u pretrazi mogućeg prostora rješenja. Da bi se omogućilo zadržavanje najboljih jedinki, NSGA-II algoritam kombinira populaciju roditelja s populacijom potomaka te određuje koje će se fronte prenijeti u sljedeću generaciju na temelju nedominirajućeg sortiranja te procedure grupirajuće udaljenosti (eng. *crowding distance*), kao što je prikazano na slici 4.12.



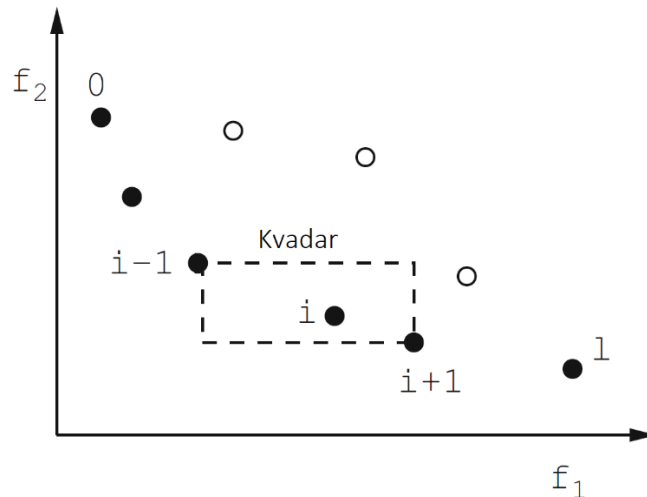
Slika 4.12. Nedominirano sortiranje i sortiranje grupirajućom udaljenosti, prema [80] i [108]

Iz objedinjene populacije  $R_t$ , koja se sastoji od dviju populacija: populacije roditelja i populacije potomaka (P i Q na slici 4.12), postojeća rješenja svrstavaju se u tzv. nedominirane fronte F. Procedura svrstavanja rješenja u fronte koristi se da bi se smanjila računaska kompleksnost algoritma rješavanja. Za početak, svako rješenje ima dva entiteta: (i) dominirajući broj  $n_i$ , tj. broj rješenja koja dominiraju promatrano rješenje  $i$  te (ii)  $S_i$ , skup rješenja nad kojima dominira promatrano rješenje  $i$ . Nakon što su sva rješenja ispitana, za očekivati je da sva rješenja iz prve fronte imaju  $n_i = 0$ , odnosno ne postoji rješenje koje bi dominiralo nad bilo kojim iz rješenja u prvoj fronti. Postupak dalje obuhvaća ispitivanje svakog člana  $j$  iz skupa  $S_i$ , za sva rješenja iz prve fronte za koje vrijedi  $n_i = 0$ . Za svako rješenje  $j$ , smanjujemo njegov dominirajući broj  $n_i$  za jedan stupanj te ako u tom procesu neko rješenje postigne novi dominirajući broj  $n_i = 0$ , onda se to rješenje svrstava u novi skup  $P'$ . Kada su svi članovi promatranog skupa analizirani, proglašavamo sva rješenja iz skupa  $P'$  drugom nedominirajućom frontom. Opisani postupak nastavlja se dok sva rješenja nisu svrstana po frontama odgovarajućeg stupnja (prva, druga, treća, itd. fronta). Ovakav postupak računalno je efikasniji nego da se sva rješenja međusobno uspoređuju (svako rješenje sa svakim).

Nova generacija se zatim sastoji od najboljih rješenja iz objedinjene populacije  $R_t$ , tj. biraju se redom najbolje fronte sve dok se ne dostigne konačan broj jedinki u populaciji (broj jedinki u populaciji roditelja uvijek je jednak broju jedinki u populaciji potomaka). Dakle, veličina objedinjene populacije  $R_t$  mora se prepoloviti. Ako pri stvaranju nove generacije dođe do problema



da samo dio jedinki iz određene fronte može prijeći u sljedeću generaciju, tada se na promatranoj fronti vrši postupak sortiranja pomoću grupirajuće udaljenosti, tj. biraju se ona rješenja koja imaju veću udaljenost u prostoru rješenja na temelju algoritma za pridjeljivanje stupnja grupirajuće udaljenosti [80]. Cilj ove raspodjele je zadržati rješenja sa što širom raspodjelom u prostoru globalnih rješenja tako da se jedinke biraju na osnovu prostorne raspodjele, tj. stupnja izoliranosti.



Slika 4.13. Proračun grupirajuće udaljenosti, prema [80]

Primjena operatora grupirajuće udaljenosti  $>_c$  odnosi se na međusobnu usporedbu parova rješenja u promatranoj fronti. Ovdje je pretpostavka da svako rješenje  $i$  ima dva atributa: nedominacijski rang  $r_i$  te grupirajuću udaljenost  $d_i$  u populaciji. Grupirajuća udaljenost  $d_i$  za rješenje  $i$  odnosi se na mjeru normaliziranog prostora rješenja u okolini promatranog rješenja  $i$  koje nije okupirano ni jednim drugim rješenjem u populaciji. Operator grupirajuće udaljenosti bira bolje od dva rješenja  $i$  i  $j$  koja se međusobno uspoređuju tako da:

**Definicija 4.2.** Rješenje  $i$  je bolje od rješenja  $j$  ako je bilo koji od sljedećih uvjeta istinit:

1. Rješenje  $i$  ima bolji rang, tj.  $r_i < r_j$ .
2. Ako su oba rješenja istog ranga, ali je grupirajuća udaljenost  $d_i$  za rješenje  $i$  bolja nego u slučaju rješenja  $j$ , tj.  $r_i = r_j$  te  $d_i < d_j$ .

Prvi uvjet osigurava da odabrano rješenje pripada boljoj nedominantnoj fronti. Drugi uvjet rješava situacije kada se oba rješenja nalaze u istoj nedominantnoj fronti, uspoređujući njihove međusobne grupirajuće udaljenosti.

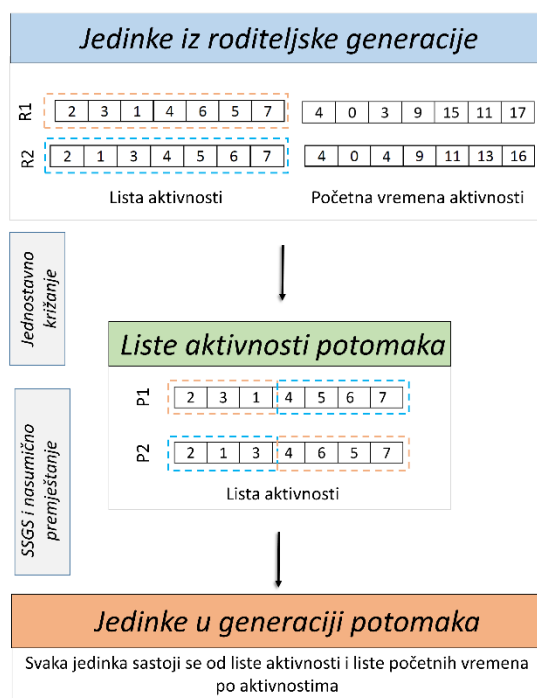
Da bi se dobila procjena gustoće rješenja u okolini promatranog rješenja  $i$ , u obzir se uzima prosječna udaljenost dvaju rješenja sa svake strane u prostoru rješenja  $i$ , za svaku funkciju cilja. Grupirajuća udaljenost  $d_i$  je procjena perimetra kvadra pri čemu najbliža rješenja predstavljaju

vrhove kvadra. Na slici 4.13., grupirajuća udaljenost promatranog rješenja  $i$  u svojoj populaciji (označenoj tamno obojenim krugovima) je prosječna vrijednost bočnih duljina kvadra (predstavljenog iscrtkanim linijama).

Što se tiče odabira jedinki koje sudjeluju u daljnjem procesu genetskih operacija (križanja i mutacije), on se vrši u algoritamskom obliku binarnog turnira selekcije (eng. *binary tournament selection*). Iz željene populacije nasumično se odabiru parovi jedinki koji sudjeluju u binarnom turniru selekcije. Ovdje se parovi rješenja uspoređuju po svojoj funkciji vrsnoće, a ona jedinka koja pokaže bolje osobine bit će jedan od roditelja u daljnjem procesu genetskog križanja.

### 4.5.3. Genetski operatori

Nakon što se putem binarnog turnira selekcije odaberu parovi roditeljskih jedinki, dolazi do uzastopnog odvijanja genetskih operacija kako bi se proizvela nova generacija potomaka u postupcima križanja i mutacije. Ideja upotrebe genetskih operatora leži u unaprjeđenju funkcije vrsnoće za pojedine jedinke kroz izmjenu generacija u općem optimizacijskom algoritmu.



Slika 4.14. Ilustrativni primjer križanja jedinki u optimizacijskom procesu

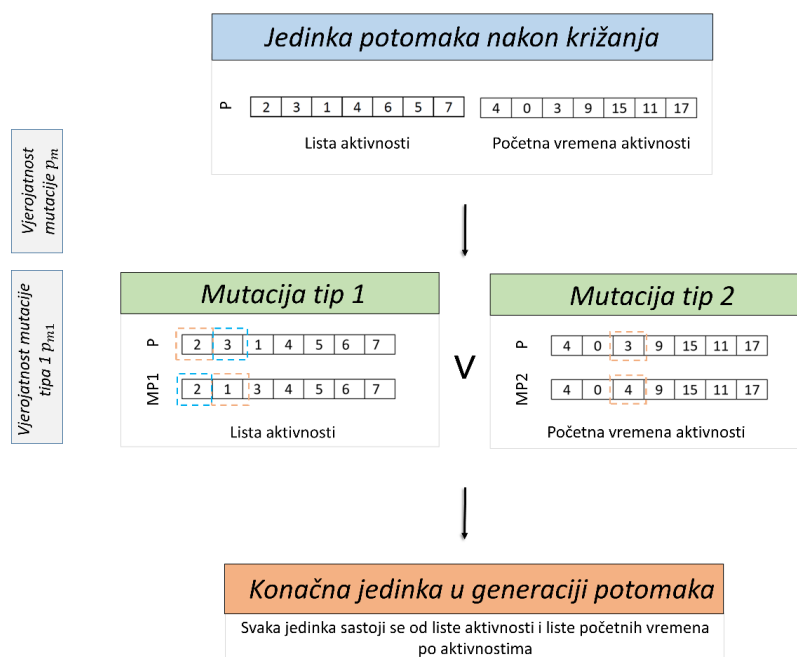
Kao što je vidljivo sa slike 4.14., u procesu križanja sudjeluju dvije roditeljske jedinke R1 i R2 pri čemu je svrha ove genetske operacije stvoriti nove jedinke potomstva P1 i P2 čiji će genetski materijal biti različit od roditeljskog. Na samom početku izvršenja procesa križanja slučajnim

odabirom definira se točka prekida na listama aktivnosti u roditeljskoj generaciji (u primjeru na slici 4.14. radi se o prekidu nakon treće aktivnosti) te od dvije roditeljske jedinke nastaje istovjetan broj potomaka. S obzirom na to da je točka prekida podijelila svaku listu aktivnosti na dva dijela, prvi dio genetskog materijala s prvog roditelja prepisuje se u prvi dio genetskog materijala prvog potomka, a prvi dio genetskog materijala s drugog roditelja prepisuje se u prvi dio genetskog materijala drugog potomka. Drugi dio obaju potomaka prepisuje se s one jedinke roditelja koja još nije sudjelovala u prenošenju svog genetskog materijala, ali tako da se izuzmu aktivnosti koje su već sadržane u prvom dijelu liste aktivnosti potomaka. S obzirom na to da su liste aktivnosti u startu formulirane tako da se poštuju relacijski odnosi među projektnim aktivnostima, to znači da će relacijska ograničenja biti ispoštovana i u jedinkama potomstva kada se na roditelje primijeni genetsko križanje s jednom točkom prekida [106].

Genetsko križanje odvija se isključivo na kodiranim listama aktivnosti u genetskim jedinkama, stoga je nakon razmjene genetskog materijala potrebno primijeniti operatore serijske sheme generiranja rasporeda (SSGS) te nasumičnog premještanja da bi se od liste aktivnosti u svakoj jedinki proizveo pripadajući vremenski raspored s određenim vremenima početaka svake aktivnosti. Nakon toga slijedi primjena genetske mutacije na pojedinim jedinkama u populaciji potomaka.

Završna operacija mutacije provodi se na određenim jedinkama potomstva nasumičnim odabirom s obzirom na vrijednost odabrane vjerojatnosti mutacije  $p_m$ . Prema Vučini [71], iznimno je bitno odrediti prikladnu vjerojatnost mutacije jer s porastom vjerojatnosti mutacije genetski algoritam se sve više pretvara u postupak slučajnog pretraživanja (eng. *Random search*), a ako je vjerojatnost mutacije preniska, tada postoji opasnost da će genetski algoritam stati u nekom lokalnom optimumu, tj. doći će do prerane konvergencije postupka.

S obzirom na složenu prirodu ulaznog optimizacijskog problema, u ovom doktorskom istraživanju proces mutacije implementiran je u dvije inačice: ako pri stvaranju nove generacije potomstva dođe do primjene mutacije s vjerojatnošću  $p_m$ , tada se mutacija može izvršiti u jednome od dva tipa. Kao što je prikazano na slici 4.15, prvi tip mutacije odnosi se na nasumičnu zamjenu dviju aktivnosti na prvom dijelu jedinke, tj. na listi aktivnosti za pojedinku jedinku. Ovaj tip mutacije odvija se s vjerojatnošću  $p_{m1}$ . Pri zamjeni aktivnosti provjerava se tehnološka izvodljivost dobivene liste aktivnosti te se proces nasumične zamjene dviju jedinki nastavlja sve dok se ne postigne izvodljivo rješenje. Ako dođe do drugog tipa mutacije s vjerojatnošću  $1 - p_{m1}$ , tada dolazi do finog podešavanja projektnog rasporeda, tj. nasumično se mijenja početak pojedine aktivnosti u okviru raspoložive resursno-tehnološke vremenske rezerve.



Slika 4.15. Ilustrativni primjer mutacije jedinki u optimizacijskom procesu

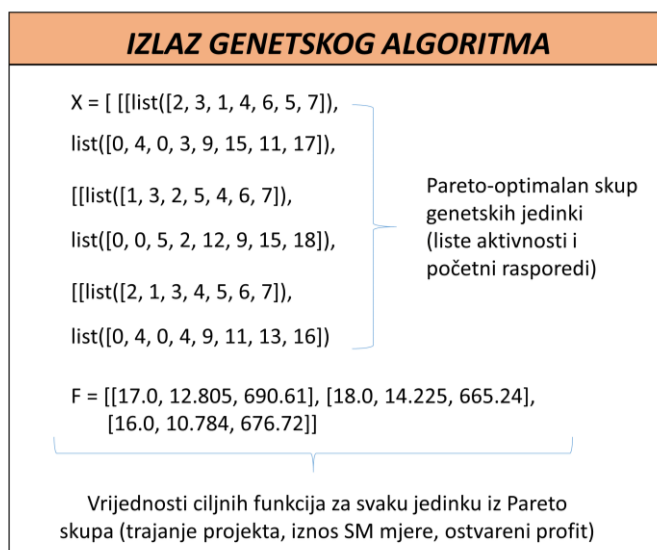
Mutacija se u potonjem slučaju izvršava isključivo na drugom dijelu jedinke, tj. na vremenskom rasporedu aktivnosti. Primjenom genetskih operatora nastoji se poboljšati raznolikost elitnih populacija kako bi se pronašao zadovoljavajući skup konačnih rješenja. Opisani postupci evaluacije, opstanka, selekcije, križanja i mutacije nastavljaju se sve dok algoritam ne dostigne kriterij zaustavljanja, u ovom slučaju radi se o određenom broju generacija koji se zadaje kao ulazna varijabla prije pokretanja optimizacijskog postupka u računalnom programu.

Ukratko, cijeli predstavljani genetski algoritam [104] implementiran je u okruženju postojećeg programskog alata za rješavanje višeciljnih optimizacijskih problema (*pymoo*) u Python programskom jeziku. S obzirom na to da postojeći programski alat ima ugrađene brojne algoritamske procedure (npr. nedominirano sortiranje, sortiranje pomoću grupirajuće udaljenosti, binarni turnir selekcije), proces implementacije genetskog algoritma prilagođenog za potrebe ovog doktorskog istraživanja bio je u znatnoj mjeri olakšan. Najvažniji doprinosi u prilagodbi postojećeg NSGA-II algoritma odnose se na sljedeće:

- prikaz jedinki genetskog algoritma osmišljen je na način da se omogući efikasna primjena genetskih operatora i potpuna evaluacija za sve ciljne funkcije,
- zbog specifičnih karakteristika predloženog optimizacijskog problema uvodi se primjena metode „nasumičnog premještanja“ da bi se evaluirali što raznovrsniji početni planovi. Primjena ove metode unapređuje proces optimizacije jer je u kraćem vremenu algoritamskog izvršavanja moguće ispitati veći broj jedinstvenih rješenja.

- predlaže se izvršenje genetske mutacije u dva tipa s ciljem što veće raznovrsnosti ispitanih rješenja, što posljedično utječe na poboljšanje efikasnosti pri pretraživanju prostora mogućih rješenja.

Konačno rješenje predstavljeno je skupom Pareto-optimalnih rješenja za višeciljni optimizacijski problem rezistentnog vremenskog planiranja, a daljnjom analizom i na temelju dodatnih informacija, od skupa Pareto rješenja može se pronaći samo jedno konačno rješenje koje tada predstavlja početni vremenski plan za građevinski projekt (npr. može se tražiti rješenje s najvećom SM mjerom, ali pod uvjetom da trajanje projekta ne prelazi određenu granicu ili neka druga kombinacija ključnih uvjeta za konačno rješenje). U ovakvom pristupu, jedno konačno rješenje bira se iz skupa najboljih rješenja te je odabir početnog rasporeda mnogo objektivniji nego kada bi se jedno konačno rješenje tražilo klasičnim pristupom za rješavanje problema rezistentnog vremenskog planiranja. Ilustrativni primjer izlaznog Pareto skupa u algoritamskom zapisu prikazan je na slici 4.16.



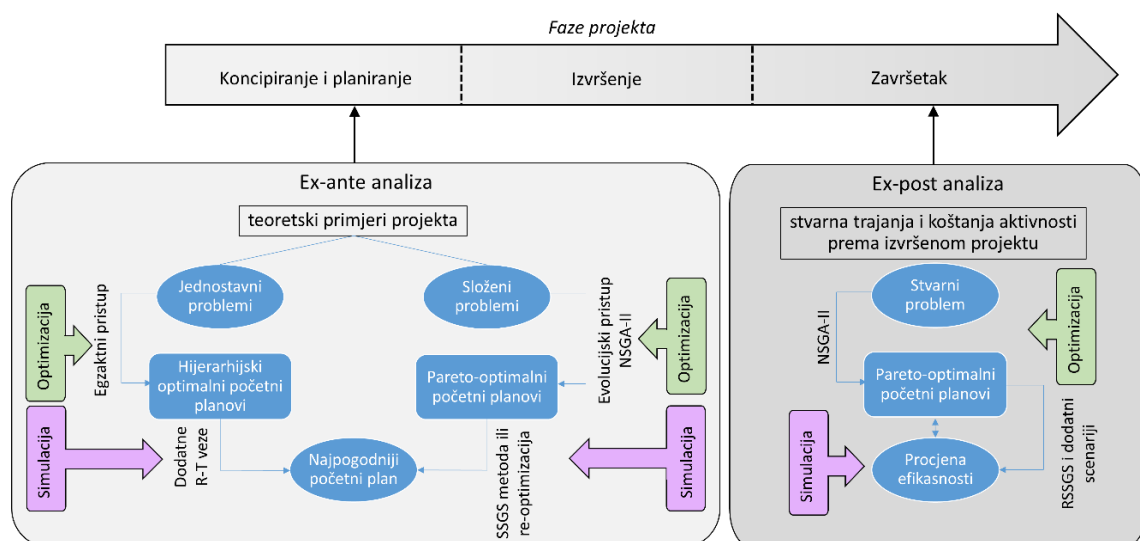
**Slika 4.16.** Ilustrativni primjer izlaznog rješenja algoritamskog procesa

U ovom ilustrativnom primjeru (Slika 4.16.) pronađena su četiri Pareto optimalna rješenja za višeciljni optimizacijski problem rezistentnog vremenskog planiranja. Objektom X predstavljene su Pareto-optimalne jedinke, pri čemu je izostavljen prikaz resursne matrice zbog jednostavnijeg pregleda rješenja. Funkcije cilja za svako rješenje iz Pareto skupa za ilustrativni primjer sadržane su u objektu F te se one redom odnose na vrijednosti trajanja projekta, SM mjere i dobiti projekta, za svaku jedinku izlazne (Pareto-optimalne) populacije.

## 5. ANALIZA PERFORMANSI REZISTENIH VREMENSKIH PLANOVA U UVJETIMA NESIGURNOSTI

U ovom poglavlju validira se predloženi metodološki pristup za izradu rezistentnih vremenskih planova (opisan u potpoglavlju 4.1.) na konkretnim primjerima projektnih mreža kroz *ex-ante* i *ex-post* analizu. Na primjerima projektnih mreža različitog stupnja složenosti prvo je optimizacijom riješen predloženi problem rezistentnog vremenskog planiranja (postavljen u potpoglavlju 4.3.) te je tako dobiven skup optimalnih početnih planova. Zatim je proširenom simulacijom (detaljnije objašnjenje kroz potpoglavlja 5.1. i 5.2.) procijenjena rezistencija optimalnih početnih planova na projektnu neizvjesnost.

Na ovaj način ponajprije se utvrđuje provodivost optimizacijskog i simulacijskog modela za pouzdaniju izradu početnih vremenskih planova za građevinske projekte u neizvjesnim uvjetima. Nadalje, analizira se utemeljenost pretpostavke da je primjenom predložene metodologije moguće generirati alternativne početne planove koji će u okviru prihvatljivih projektnih ograničenja pokazati različit stupanj stabilnosti na neizvjesnosti u projektu. Generiranje rezistentnih početnih planova u početnoj fazi istraživanja bilo je ograničeno na primjenu egzaktna optimizacije za rješavanje jednostavnih projektnih mreža, a u kasnijoj fazi istraživanja razvijen je metaheuristički algoritam kojim je omogućeno rješavanje projektnih mreža većeg stupnja složenosti. Osim toga, primjenom simulacijskih metoda kroz *ex-ante* i *ex-post* analizu, ispituje se korelacija predložene surogatne mjere i rezistencije početnih vremenskih planova u uvjetima neizvjesnosti za analizirane primjere projektnih mreža.



Slika 5.1. Ex-ante i ex-post analiza u kontekstu životnog ciklusa projekta

Standardni pristup za simulaciju početnih planova u uvjetima neizvjesnosti (Monte Carlo metoda) opisan je u potpoglavlju 5.1. te je obrazloženo zašto je u ovom istraživanju potrebno adaptirati postojeći pristup za analizu performansi rezistentnih vremenskih planova koji u obzir uzimaju i resursna ograničenja projekta.

Nakon toga, u potpoglavlju 5.2. slijedi detaljnije objašnjenje provedenog pristupa za simulaciju ponašanja vremenskih planova. Definirani su konkretni koraci izvršenja proširene Monte Carlo metode te se objašnjavaju tri različita pristupa za uključivanje resursnih ograničenja u simulacijskom procesu (uvođenje dodatnih resursno-tehnoloških veza, SSGS algoritam, re-optimizacija).

Predloženi pristupi simulaciji izvršeni su na nekoliko primjera projektnih mreža različitog stupnja složenosti kroz *ex-ante* analizu na teoretskim primjerima u potpoglavlju 5.3. U ovom istraživanju *ex-ante* analiza odnosi se na početnu procjenu ključnih performansi projekta na temelju rezistentnih početnih planova aktivnosti (dobivenih kroz proces optimizacije) te se smatra da *ex-ante* analiza kao takva prethodi projektnoj realizaciji. *Ex-ante* analiza obuhvaća rješavanje optimizacijskog problema te daljnju simulaciju dobivenih rješenja da bi se omogućio jasniji odabir najpogodnijeg početnog plana između alternativnih postojećih rješenja. Osim toga, provedbom *ex-ante* analize ispituje se primjenjivost rezultata dobivenih kao rješenje predloženog optimizacijskog problema koji je postavljen i detaljno objašnjen u potpoglavlju 4.3. ove disertacije.

S ciljem kronološkog prikaza istraživačkog procesa, na početku je u *ex-ante* analizi razmotren jednostavan primjer projektne mreže (potpoglavlje 5.3.1.). U početnoj fazi istraživanja, dok genetski algoritam nije bio u potpunosti implementiran, optimizaciju je bilo moguće izvršiti jedino upotrebom klasičnih metoda čija je primjena ograničena na jednostavne projektne mreže. Prema tome, u početnom primjeru optimizacija je provedena egzaktno, hijerarhijskim postupkom, a daljnji korak simulacije u ovom primjeru odnosi se na uvođenje dodatnih resursno-tehnoloških veza. Ovaj dio istraživanja bio je važan da bi se dobili preliminarni podaci o odnosu surogatne mjere i rezistencije početnih planova na neizvjesne uvjete te da bi se predložena metodologija za rezistentno vremensko planiranje validirala na jednostavnom primjeru prije no što je istraživanje ušlo u svoju završnicu. Nakon što je razvijen genetski algoritam za optimizaciju kompleksnih projektnih mreža (detaljnije objašnjen u potpoglavlju 4.5.), bilo je moguće analizirati složenije primjere projektnih mreža. Prema tome, u ostatku *ex-ante* analize za rješavanje optimizacijskog problema (postavljenog u potpoglavlju 4.3.) korišten je razvijen genetski algoritam, dok se za proces simulacije koriste predložene metode SSGS algoritma (potpoglavlje 5.3.2.) ili ponovne optimizacije (potpoglavlje 5.3.3.) te je na taj način omogućeno izvršenje algoritamskih procesa u prihvatljivom vremenu izračuna.

Povrh toga, u potpoglavlju 5.4. provedena je *ex-post* analiza da bi se procijenila efikasnost predloženog optimizacijskog postupka (upotreba genetskog algoritma za rješavanje problema rezistentnog vremenskog planiranja). Ponašanje različitih početnih planova ovoga puta razmatra se na temelju realiziranih projektnih podataka prema prethodno izvršenom projektu. S obzirom na to da su podaci o trajanjima i troškovima izvršenih aktivnosti poznati, umjesto Monte Carlo metode koristi se robusna serijska shema generiranja rasporeda i dodatni scenariji neizvjesnosti u svrhu rekonstruiranja projektne izvedbe izvršenog građevinskog projekta prema različitim početnim planovima. Ispitujući različita varijantna rješenja, *ex-post* analiza pruža dodatne informacije u svrhu boljeg odabira početnog plana za slične građevinske projekte u budućnosti te stoga doprinosi unaprjeđenju predložene metodologije za rezistentno planiranje građevinskih projekata u uvjetima nesigurnosti.

Primjenom optimizacije i proširene simulacije na različitim primjerima u cijelosti je implementirana predložena metodologija za rezistentno vremensko planiranje u uvjetima nesigurnosti. Optimizacijom se rješava postavljeni višeciljni problem i tako se dolazi do skupa početnih planova od kojih se dalje na temelju dodatnih preferencija donositelja/ice odluke biraju najpogodnija rješenja. Zatim se za odabrane početne planove vrši daljnja analiza primjenom simulacijskog postupka. Kroz proces poboljšane simulacije na cjelovit način se analiziraju performanse pojedinih vremenskih planova dobivenih kao izlazno rješenje optimizacijske procedure. Osim toga, provedba simulacije na različitim početnim planovima kroz *ex-ante* i *ex-post* analizu omogućuje ispitivanje međuovisnosti surogatne mjere i rezistencije početnih vremenskih planova. Objedinjeni zaključak generalne analize performansi koja obuhvaća *ex-ante* i *ex-post* analizu kroz implementaciju razvijenih optimizacijskih i simulacijskih tehnika na različitim primjerima projektnih mreža dan je u vidu završnog komentara dobivenih rezultata u potpoglavlju 5.5.

### 5.1. Monte Carlo metoda u kontekstu resursno ograničenih projekata

S obzirom na neponovljivost i dugotrajnu izvedbu građevinskih projekata, eksperimentiranje na stvarnom sustavu nije moguće, stoga se upotrebljavaju različite metode u svrhu procjene početnih planova prije same izvedbe projekta. Jedna od često korištenih metoda za simulaciju izvedbe građevinskih projekata u uvjetima neizvjesnosti je upravo Monte Carlo metoda [109]. Suštinska ideja Monte Carlo simulacije je da se u postavljeni model unesu zahtijevani podaci o neizvjesnosti pojedinih ulaznih varijabli te se onda primjenom odgovarajućih računskih procesa dolazi do novih spoznaja, odnosno do novih izlaznih podataka o ponašanju promatranog sustava u uvjetima neizvjesnosti (Slika 5.2.).





Slika 5.2. Shematski prikaz simulacije primjenom Monte Carlo analize

Iako postoje brojni izvori nesigurnosti u građevinskim projektima, činjenica je da se ključne performanse projekta računaju kroz funkcije početaka aktivnosti i njihovih trajanja, stoga se utjecaj nezvjesnih događaja najčešće modelira u vidu varijabilnog vremenskog trajanja pojedinih aktivnosti [110]. Da bi se mogao opisati utjecaj projektne nezvjesnosti na ključne pokazatelje projektne uspješnosti, potrebno je definirati slučajne varijable i pripadajuću funkciju gustoće kao ulazni podatak Monte Carlo analize. Odabirom odgovarajuće slučajne varijable i određivanjem svih njenih parametara definira se stohastičko ponašanje nezvjesnih aktivnosti, tj. opisuje se varijabilnost u njihovom mogućem trajanju. Nakon definiranja ulaznih podataka, tj. nakon modeliranja nezvjesnosti za konkretni građevinski projekt, sljedeći korak Monte Carlo simulacije odnosi se na analizu postavljenog modela.

Monte Carlo analiza odvija se za konkretni vremenski raspored aktivnosti te se pri opetovanom pokretanju algoritma definiraju različita trajanja nezvjesnih aktivnosti na temelju zadanog ponašanja slučajne varijable. Nakon zadanog broja iteracija za simulacijsku analizu, izlazno rješenje prikazano je u vidu distribucija vjerojatnosti ključnih pokazatelje projektne uspješnosti (vjerojatnost dostizanja predviđenog vremenskog roka i profita u ovom istraživanju). Na ovaj način moguće je sagledati globalni utjecaj nesigurnosti koja se prenosi s razine aktivnosti na razinu projekta.

Monte Carlo analiza predstavlja standardnu metodu za procjenu projektne nesigurnosti. Iznimno je vrijedan alat jer omogućuje kvantitativnu analizu utjecaja kombiniranih nesigurnosti na važne projektne performanse [111]. No ipak, pri primjeni ove metode analize treba biti oprezan, jer Monte Carlo metoda ipak sadrži određena pojednostavljenja u odnosu na stvarni model projekta. Tako npr. treba obratiti pažnju na sljedeće:

- ulazni podaci su iznimno ovisni o subjektivnoj procjeni [112],
- rezultati analize mogu biti upitne vjerodostojnosti uslijed nepreciznih pretpostavki po pitanju odabira funkcije distribucije i njenih ulaznih parametara [111],

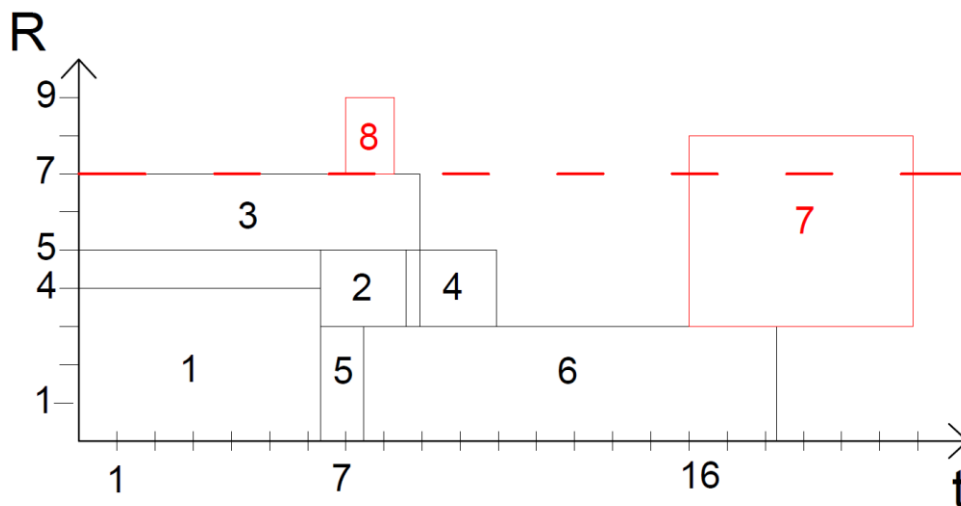
- reaktivne metode projektnih upravitelja u fazi izvedbe projekta u potpunosti su zanemarene u procesu simulacije [111].

Štoviše, Monte Carlo analiza uobičajeno se vrši na projektnom rasporedu koji je modeliran na temelju metode kritičnog puta (eng. *Critical Path Method*, kratica *CPM*), gdje se u obzir uzimaju isključivo podaci o tehnološkim vezama među aktivnostima, ali se resursna potraživanja zanemaruju. Ako se simulacijska analiza izvodi na standardan način, tj. isključivo na temelju relacijskih odnosa među aktivnostima, tada se može dogoditi da raspodjela resursa prema nekoj simulaciji premašuje raspoložive količine. Konkretno, tijekom ovog istraživanja uočen je nedostatak u pojedinim iteracijama Monte Carlo analize gdje je lako moguće da neka realizacija vremenskog rasporeda jednostavno nije izvodljiva jer zahtijevani resursi premašuju raspoloživi broj u pojedinim vremenskim intervalima. Ilustrativni primjer opisanog problema prikazan je na slici 5.3., za projektnu mrežu prema podacima iz tablice 5.1.

**Tablica 5.1.** Podaci za simulaciju projektna mreže na temelju CPM proračuna

Aktivnost	Prethodna aktivnost	Očekivano trajanje	Potražnja resursa	Planirani početak	Ostvareno trajanje
0	-	0	0	0	0
1	0	6	4	0	6,345
2	1	2	2	6	2,239
3	0	7	2	0	8,944
4	2; 3	3	2	8	2,019
5	1	1	3	6	1,134
6	5	9	3	7	10,838
7	4	6	5	16	5,864
8	1	2	2	7	1,271
9	6; 7; 8	0	0	22	0

U tablici 5.1. dani su ulazni podaci za Monte Carlo analizu te ostvarena trajanja aktivnosti u jednoj iteraciji simulacije da bi se ilustrativno objasnio problem izvođenja Monte Carlo analize na temelju CPM proračuna. Projektna mreža definirana je na temelju navedenih aktivnosti i njihovih prethodnika te su određeni zahtijevani resursi po aktivnostima za projekt koji ima na raspolaganju 7 jedinica traženog resursa.



**Slika 5.3.** *Primjer problema u raspodjeli resursa ukoliko se Monte Carlo analiza temelji na CPM proračunu*

Kada bi se Monte Carlo analiza zasnivala isključivo na CPM proračunu, kao što je to slučaj u standardnim Monte Carlo simulacijama, tj. kada bi se za ograničenja problema uzimale samo relacijske ovisnosti među aktivnostima, tada bi rezultirajući raspored aktivnosti bio neizvodljiv, što je evidentno sa slike 5.3. U ovom primjeru, dan je prikaz vremenskog rasporeda na temelju ostvarenih trajanja aktivnosti u jednoj iteraciji Monte Carlo analize (posljednji stupac iz tablice 5.1.). Algoritam izrade vremenskog plana u ovom primjeru funkcionira tako da se određuje početak izvedbe svake aktivnosti stavljajući ju u najraniji mogući položaj, uz poštovanje resursnih ograničenja, no aktivnost ne može početi ranije nego što je to slučaj u prvotno planiranom rasporedu (eng. *Railway scheduling*).

Problemi se javljaju u trenucima početaka izvedbe sedme i osme aktivnosti, odnosno u 7. i 16. vremenskom trenutku prema iterativnom rasporedu. Algoritam je pridijelio početak aktivnosti broj 8 u vremenski trenutak 7 jer je to prvotno planirani početak osme aktivnosti, a njena prethodna aktivnost do tada je već završena (aktivnost br 1 završava u trenutku 6,345). S obzirom na to da CPM proračun zanemaruje resursna potraživanja, računalni program za simulaciju ponašanja projektnih aktivnosti ne raspolaže s informacijama da je došlo do prekršenja raspoloživog broja resursa te kao rezultat trenutnog izvršenja daje u suštini neizvodljiv raspored aktivnosti prema osnovnim ograničenjima problema. Ista situacija dogodila se u 16. vremenskom trenutku, što je planirani početak sedme aktivnosti, jer je do tada završila njena prethodna aktivnost (aktivnost br. 4 završava u trenutku 10,963). Sa slike 5.3. jasno je vidljivo da ovaj pristup u Monte Carlo simulaciji rezultira resursno neizvodljivim rasporedom aktivnosti: ovakva simulacija projektne

izvedbe zahtijevala bi još 2 dodatne jedinice resursa. Prikazani problem dovodi do zaključka da bi pouzdana Monte Carlo simulacija trebala u obzir uzeti i postojanje resursnih ograničenja ako se želi analizirati sveobuhvatan početni plan, kao što je to slučaj u ovom istraživanju.

## 5.2. Proširena Monte Carlo metoda s uključenim resursnim ograničenjima

U svrhu pomnijeg ispitivanja alternativnih rješenja te detekcije najpogodnijeg početnog plana, ovo poglavlje predlaže upotrebu različitih simulacijskih metoda za procjenu projektne izvedbe na temelju određenog početnog plana. Tri predložene simulacijske metode (uvođenje dodatnih resursno-tehnoloških veza, SSGS algoritam i re-optimizacija) predstavljaju proširenje standardnih procedura jer eksplicitno uzimaju u obzir resursna ograničenja prilikom simulacije projektne izvedbe te je na taj način omogućeno potpunije razmatranje projektnog sustava u uvjetima neizvjesnosti. Na ovaj način ispitat će se u kojoj mjeri početna rješenja odstupaju od simulirane izvedbe te će se ujedno validirati primjenjivost predloženog optimizacijskog modela.

Proširena Monte Carlo simulacija s uključenim resursnim ograničenjima zasniva se na standardnoj Monte Carlo simulacijskoj proceduri, a unaprjeđenje predložene simulacije odnosi se na to da se početci izvršenja aktivnosti više ne računaju isključivo na osnovi CPM proračuna, već se izvršenje projekta u svakoj iteraciji računa uzimajući u obzir postojeća resursna ograničenja.

Nakon zadavanja početne projektne mreže i postavljanja konkretnih ograničenja problema, koraci proširene Monte Carlo metode mogu se sažeto prikazati kao:

1. Odabir i modeliranje stohastičkih varijabli (u ovom slučaju radi se o varijabilnim trajanjima neizvjesnih aktivnosti u projektu)
2. Generiranje (pseudo) slučajnih brojeva na intervalu od 0 do 1 za svaku neizvjesnu varijablu
3. Preslikavanje slučajnog broja na odabranu funkciju gustoće za promatranu varijablu
4. Izračun simuliranih vrijednosti za neizvjesne varijable (trajanje i troškovi pojedinih aktivnosti)
5. Izračun projektnog izvršenja na temelju simuliranih podataka, s naglaskom da se resursna ograničenja moraju poštovati
6. Pohrana dobivenih rezultata za daljnju statističku analizu
7. Ponavljanje koraka 2.-6. dok se ne izvrši zadani broj simulacija
8. Provođenje konačne analize rizika na temelju generiranih podataka za zadani broj simulacija (u ovom slučaju računa se raspodjela vjerojatnosti za ključne indikatore projektne uspješnosti, npr. za trajanje projekta i njegov ostvareni profit te se razmatra u kojem je obujmu došlo do prekoračenja zadanog kreditnog limita prema podacima dobivenim na temelju simulacijske procedure).

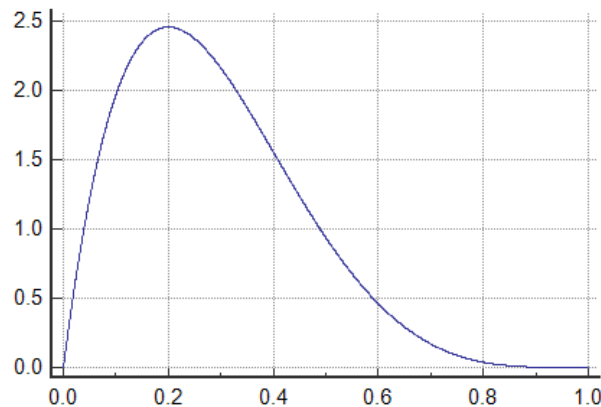
Prije pokretanja simulacijskog procesa, potrebno je odrediti koje aktivnosti su podložne utjecaju projektne neizvjesnosti te odrediti vrstu i parametre slučajne varijable kojom će se opisati stohastičko ponašanje neizvjesnih aktivnosti. Odabir neizvjesnih aktivnosti moguće je izvršiti na temelju postojeće baze podataka, npr. korištenjem razvijene taksonomije kako je objašnjeno u 3. poglavlju ove disertacije. Što se tiče matematičkog modeliranja neizvjesnosti u simulacijama građevinskih procesa, Thompson et al. [113] navode kako je za opisivanje neizvjesnog ponašanja određenih varijabli moguće primijeniti kumulativne funkcije sljedećih distribucija: normalna, log-normalna, beta, triangularna. Pri odabiru odgovarajuće razdiobe potrebno je razmotriti postojeća ograničenja i praktičnost primjene za potrebe simulacije projektne mreže, ali kako tvrde Lee et al. [114], prednost upotrebe simuliranih trajanja aktivnosti u analizi potencijalne projektne izvedbe je činjenica što se tako izbjegava dugotrajan, zahtijevan i komplicirani proces prikupljanja stvarnih podataka u svrhu procjene trajanja neizvjesnih aktivnosti.

Sljedeći korak, generiranje (pseudo) slučajnih brojeva u razvijenoj računalnoj proceduri vrši se u tzv. *random* modulu koji je dio Python programskog jezika. U tom modulu moguće je jednostavnim pozivom funkcija dobiti vrijednosti (pseudo) slučajnih brojeva kao izlaz pozvane funkcije. Štoviše, u *random* modulu već je implementirano i nekoliko funkcija koje opisuju ponašanje često korištenih slučajnih varijabli (npr. uniformne, normalne, triangularne, beta i drugih razdioba), tako da je moguće direktno generirati (pseudo) slučajni broj prema željenoj funkciji distribucije, što ubrzava proces korištenja Monte Carlo analize. Opisani modul koristi Mersenne Twister generator za dohvaćanje slučajnih brojeva, koji je prepoznat kao trenutno najkorišteniji generator (pseudo) slučajnih brojeva [115]. U ovom istraživanju za opisivanje neizvjesnosti u trajanjima varijabilnih projektnih aktivnosti korištena je beta razdioba s parametrima  $\alpha = 2$  i  $\beta = 5$ , a simulirana trajanja neizvjesnih aktivnosti omeđena su donjom granicom  $L = 0.7$  puta pretpostavljeno determinističko trajanje  $D$  te gornjom granicom od  $H = 2.2$  puta pretpostavljeno determinističko trajanje aktivnosti. Funkcija gustoće vjerojatnosti za odabranu raspodjelu prikazana je na slici 5.4. Nakon što je pozivom funkcije *random.betavariate(2,5)* u Python programskom jeziku dobiveno (pseudo) slučajno ostvarenje opisane beta distribucije u rasponu od 0 do 1, nazovimo ga varijablom  $x$ , korištena je sljedeća formula za proračun simuliranog trajanja neizvjesne aktivnosti,  $T$ :

$$T = L \times D + [x \times (H - L) \times D] \quad (5.1)$$

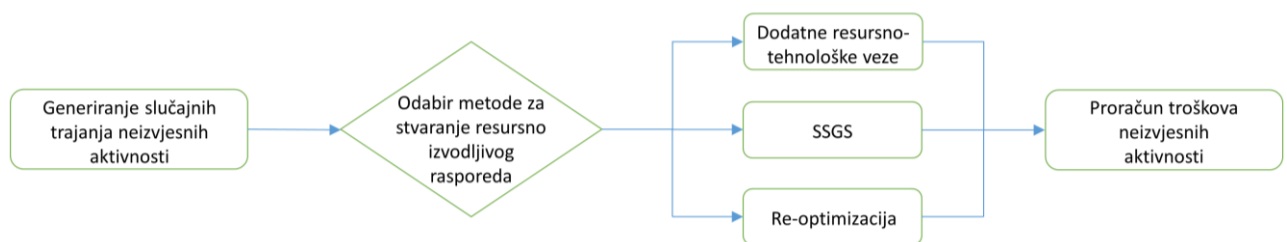
Formula 5.1 korištena je s namjerom da se mod odabrane distribucije preslika na duljinu trajanja simuliranih aktivnosti, tj. da najčešća vrijednost simuliranog trajanja neke aktivnosti bude upravo jednaka njenom očekivanom trajanju prema prvotnom proračunu. Beta razdioba s

navedenim parametrima odabrana je zbog svoje učestale primjenjivosti u modeliranju neizvjesnih trajanja za tipične aktivnosti u građevinskim projektima [116]. Štoviše, odabrana razdioba dobro oslikava poznati Parkinsonov zakon: ako se neka aktivnost treba izvršiti u danom vremenu, tada će izvršenje te aktivnosti težiti potpunom iskorištenju raspoloživog vremena. Izvedba aktivnosti prilagodit će se raspoloživom vremenu, ali malo je vjerojatno da će aktivnost biti izvršena prije roka, što je u potpunoj korelaciji s tradicionalnim pristupom građenju koji stavlja penale na prekoračenje planiranih datuma izvedbe, ali ne nagrađuje raniji završetak radova [117].



**Slika 5.4.** Funkcija gustoće vjerojatnosti za odabranu beta raspodjelu ( $\alpha = 2$  i  $\beta = 5$ )  
preuzeto sa poveznice [118]

Na temelju simuliranih trajanja neizvjesnih aktivnosti, vrši se izračun trajanja cijelog projekta, ali ovdje je bitno naglasiti da je potrebno uzeti u obzir resursna ograničenja promatranog problema. Tijekom ovog istraživanja predloženi su različiti načini stvaranja resursno izvodljivih vremenskih rasporeda (Slika 5. 5.), npr. uvođenje dodatnih resursno-tehnoloških veza među aktivnostima, korištenje prethodno opisane serijske sheme generiranja rasporeda (SSGS) u fazi simulacije (potpoglavlje 4.5.1.), ili re-optimizacija rasporeda koristeći nova, simulirana trajanja svaki puta kada dođe do prekoračenja u korištenju resursa. Daljnjim razmatranjem utvrđeno je da svaka od predloženih metoda ima svoje prednosti i ograničenja.



**Slika 5.5.** Proces izvršenja proširene Monte Carlo metode

Na primjer, uvođenje dodatnih resursno-tehnoloških veza u originalni mrežni plan odnosi se na stvaranje fiksne resursne raspodjele. Konkretno, to znači da ako je promatranom resursu R pridijeljeno da nakon izvedbe aktivnosti A prijeđe na izvršenje aktivnosti B, onda ni jedan drugi resurs ne može pridonijeti izvedbi navedenih aktivnosti (čak ni ako dođe do produljenja neke od aktivnosti, a istovremeno postoje dodatni raspoloživi resursi). Iako će se na ovaj način simulirati resursno izvodljivi vremenski raspored, a resursni tok projekta ostat će sačuvan, u stvarnoj izvedbi projekta nije za očekivati ovako rigidno korištenje resursa, već je realnija opcija da će slobodni resursi pridonijeti radu na aktivnosti kako bi ona bila završena što je prije moguće. Osim toga, zbog potrebe za ručnim unosom dodatnih resursno-tehnoloških veza ovaj pristup je praktičan samo za jednostavnije projektne mreže. Unatoč tomu, prednost ovog pristupa leži u jednostavnom načinu izračuna resursno izvodljivog rasporeda,

Sljedeći prijedlog za stvaranje resursno izvodljivih vremenskih rasporeda je korištenje SSGS algoritma. Ovakav vid izrade simuliranih vremenskih rasporeda zahtijeva dodatne informacije u vidu odluke o redosljedu raspoređivanja aktivnosti u trenutni vremenski plan. Ovdje je korištena lista aktivnosti (AL) dobivena kao dio izlaznog rješenja NSGA-II procedure da bi se generirao simulirani vremenski raspored. To znači da ako u određenom trenutku postoji nekoliko mogućih aktivnosti za raspoređivanje u vremenski plan, onda će prvo biti odabrana ona aktivnost koja ima bolji položaj u razmatranoj listi. Ipak, u stvarnim situacijama, kada je potrebno donijeti odluku o početku izvršenja pojedinih aktivnosti, razmatraju se brojni drugi faktori, a ne isključivo lista aktivnosti nastala kao prateći dio rješenja u algoritamskom rješavanju problema. Prednosti primjene SSGS metode za generiranje simuliranih rasporeda su brza računaska izvodljivost i jednostavnost primjene čak i za velike projektne mreže sastavljene od više desetaka ili stotina projektnih aktivnosti.

Posljednji prijedlog ponovne optimizacije (re-optimizacije) rasporeda unosi stohastički element u proces simulacije, što je svakako realniji pristup simulaciji negoli upotreba determinističkih lista aktivnosti, ali zbog dugotrajnog procesa izračuna ovaj pristup nije pogodan za kompleksne projektne mreže. U suštini, ideja ovog simulacijskog pristupa je da se prvo generira vremenski raspored na temelju CPM proračuna, a ukoliko se provjerom utvrdi da je došlo do prekoračenja dostupnih resursa, tada se pokreće ponovni proces optimizacije. U svakoj iteraciji trajanja neizvjesnih aktivnosti poprimaju slučajne vrijednosti, a cilj optimizacije je pronaći što kraće trajanje projekta uzimajući u obzir slučajne vremenske realizacije. U principu, ako se za ponovnu optimizaciju koriste metaheuristički algoritmi (u pravilu uvijek kod većeg broja projektnih aktivnosti), nema garancije da je svaka aktivnost postavljena u najraniji mogući

trenutak izvedbe, stoga je potrebno naknadno eksplicitno postaviti aktivnosti u što raniji početak izvršenja da bi se što realnije oslikala projektna izvedba. Naravno, u slučaju kompleksnijih projektnih mreža, ovakav pristup može predstavljati vremenski zahtijevan proces izračuna, što je otegotna karakteristika predloženog pristupa. S druge strane, prednost ovakvog pristupa je prije svega to što od predloženih rješenja za simulaciju resursno ograničenog projekta, re-optimizacija u fazi simulacije na najrealniji način oslikava stvarno projektno izvršenje.

Naposljetku, odabir konkretne metode za simulaciju projektnog izvršenja koja poštuje resursna ograničenja ovisi o karakteristikama projektne mreže i dostupnom vremenu izračuna. Za jednostavnije projektne mreže moguće je koristiti metodu opetovane re-optimizacije i uvođenja dodatnih resursno-tehnoloških veza, dok je za projektne mreže većeg stupnja kompleksnosti primjenjivija SSGS metoda koja na temelju postojećih lista aktivnosti generira projektnu izvedbu. Jednom kada je definiran vremenski raspored uzevši u obzir simulirana trajanja neizvjesnih varijabli te vodeći računa o poštovanju resursnih ograničenja, u Monte Carlo simulaciji za potrebe ovog istraživanja računa se i tok novca u konkretnom vremenskom rasporedu.

Za simulaciju varijabilnih troškova neizvjesnih aktivnosti korištena je sljedeća pretpostavka prema istraživanju autora Al-Sadek i Carmichael [119]: direktni troškovi aktivnosti proporcionalni su s njenim trajanjem u odnosu na faktor R. Faktor R je broj s intervala [0,1] kojim se ilustrira struktura direktnih troškova neke aktivnosti u ovisnosti o glavnom izvoru direktnog troška. Ako se direktni troškovi promatrane aktivnosti uglavnom sastoje od troškova materijala potrebnih za njenu izvedbu, tada je  $R=0.1$ , a ukoliko se direktni troškovi promatrane aktivnosti sastoje ponajviše od rada strojeva i radnika, tada je  $R=0.9$ . Ovaj proračun temelji se na činjenici da su cijene materijala relativno stabilne u promatranom vremenskom intervalu, ali cijena rada radnika i građevinske opreme varira u odnosu na njihovo vrijeme rada. Simulirani direktni trošak  $C_a$  za promatranu aktivnost tada se računa prema formuli 5.2, gdje je  $C_m$  deterministička vrijednost direktnog troška,  $T_m$  je determinističko trajanje aktivnosti, a  $T_a$  je simulirano trajanje aktivnosti u pojedinoj iteraciji Monte Carlo simulacije.

$$C_a = C_m + \frac{(T_a - T_m)}{T_m} \times R \times C_m \quad (5.2)$$

Nakon što su izračunati stohastički vremenski rasporedi i novčani tokovi za sve zahtijevane iteracije u Monte Carlo simulaciji, pristupa se statističkoj obradi dobivenih podataka te se određuje vjerojatnost završetka projekta u određenom vremenskom intervalu, kao i vjerojatnost dostizanja planiranog profita. Pri tome se izlazni rezultati Monte Carlo simulacije uobičajeno prikazuju



histogramima i brojčano u vidu izračunate vjerojatnosti dostizanja projektnih ciljeva, pružajući tako važne informacije za projektne rukovoditelje/ice.

U konačnici, dobivene rezultate simulacije potrebno je shvatiti kao okvirne smjernice, a ne kao apsolutno očitovanje buduće izvedbe projekta. Kao i svaki drugi model stvarnosti, Monte Carlo pristup zahtijeva određena pojednostavljenja kako bi se uopće moglo pristupiti analizi prvotnog plana. Npr., dodatna pretpostavka korištene Monte Carlo analize je ta da se broj pretpostavljenih resursa za izvršenje aktivnosti ne mijenja, čak i ako dođe do promjene u njenom trajanju. Ipak, važno je za napomenuti da Monte Carlo metoda uz sva postojeća pojednostavljenja predstavlja opće prihvaćenu tehniku za planiranje kompleksnih sustava jer pridonosi većoj pouzdanosti prvotnih proračuna te unatoč navedenim ograničenjima predstavlja nezamjenjiv alat u upravljanju građevinskih projekata.

### 5.3. *Ex-ante* analiza rezistencije početnih vremenskih planova na teoretskim primjerima projektnih mreža

Kao što je objašnjeno u potpoglavlju 4.4., ukoliko se u svrhu rješavanja predloženog optimizacijskog problema za rezistentno vremensko planiranje kompleksnih građevinskih projekata koristi razvijeni genetski algoritam, tada je izlazno rješenje optimizacijskog procesa predstavljeno skupom Pareto-optimalnih rješenja, a za odabir najpogodnijeg početnog plana potrebno je provesti dodatnu evaluaciju. Prema tome, ovdje će se na konkretnim primjerima projektnih mreža provesti *ex-ante* analiza kroz dva osnovna koraka: rješavanje optimizacijskog problema te simulacija dobivenih rješenja.

Općenito govoreći, *ex-ante* analiza je vid evaluacije čijom primjenom je već u ranoj fazi moguće doći do važnih informacija o konkretnim upravljačkim odabirima. Evaluacija različitih pristupa, rješenja i mogućih alternativa u ranim fazama upravljanja od iznimne je važnosti jer je mogućnost utjecaja na rezultate promatranog pothvata najveća upravo tijekom početnog perioda [120]. U ovom istraživanju, *ex-ante* analiza izvodi se s ciljem procjene rezistencije početnih vremenskih planova na neizvjesne uvjete pri izvedbi projekta. U tu svrhu, ispituju se performanse početnih planova za projektne mreže različitog stupnja složenosti primjenom odgovarajuće inačice proširene Monte Carlo analize te se na taj način predviđa vjerojatnost ostvarenja ključnih projektnih pokazatelja. Ukratko, koraci *ex-ante* analize u ovom istraživanju mogu se prikazati kao:

1. Odabir konkretne projektne mreže
2. Određivanje svih ulaznih podataka potrebnih za izračun financijskog toka u projektu,

3. Rješavanje optimizacijskog problema (istovremena minimizacija trajanja te maksimizacija SM mjere i očekivanog profita),
4. Određivanje neizvjesnih varijabli za daljnju simulaciju odabranih početnih rješenja,
5. Proširena simulacija koja uključuje resursna ograničenja,
6. Analiza performansi u simuliranoj projektnoj izvedbi za odabrane početne planove.

Prema karakteristikama projektne mreže, tj. u ovisnosti o broju projektnih aktivnosti, primjenjuju se prikladne procedure za optimizaciju (egzaktni ili metaheuristički pristup) i simulaciju (primjenjiva varijanta proširene Monte Carlo analize koja uključuje resursna ograničenja). Tako je npr. u slučaju jednostavnijih projektnih mreža moguće primijeniti egzaktnu optimizaciju te simulaciju uvođenjem dodatnih resursno-tehnoloških veza ili dodatnom optimizacijom za svaku iteraciju simulacije u kojoj dolazi do kršenja resursnih ograničenja (tzv. simulacija re-optimizacijom). S druge strane, u slučaju projektnih mreža s većim brojem aktivnosti (u pravilu svi stvarni građevinski projekti) podrazumijeva se korištenje metaheurističkog pristupa (opisanog genetskog algoritma) za optimizaciju, dok je simulaciju pogodnije izvršiti primjenom SSGS algoritma zbog kraćeg vremena izračuna.

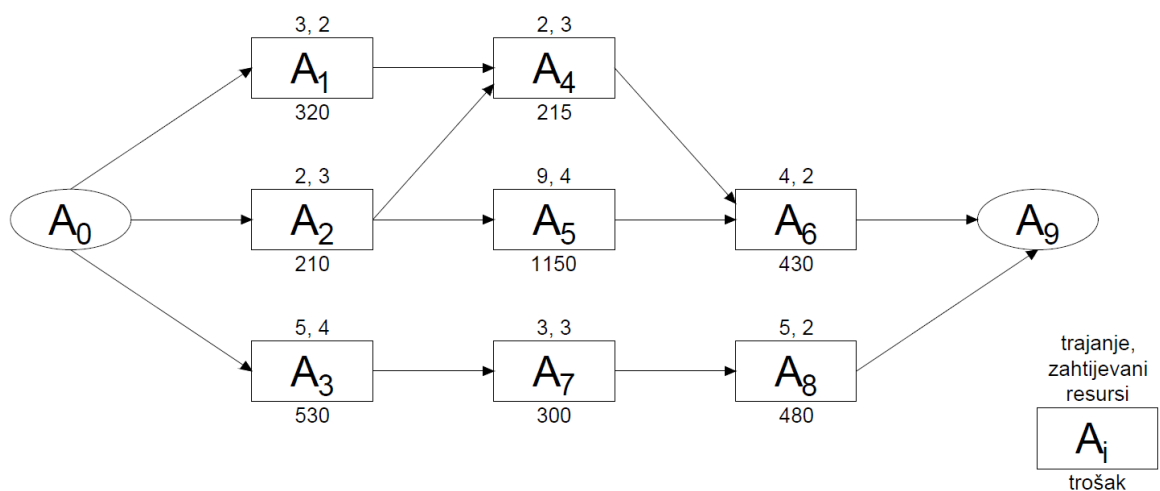
Provedbom *ex-ante* analize ispitat će se primjenjivost predloženih metoda za proširenu simulaciju, ali i upotrebljivost predloženog genetskog algoritma za rješavanje projektnih mreža s većim brojem aktivnosti. Osim toga, primjenom *ex-ante* analize na primjerima projektnih mreža različitih stupnjeva složenosti, ispitat će se izvedba različitih planova iz skupa optimalnih rješenja te će se sagledati odnos surogatne mjere i rezistencije početnih planova. U dosadašnjem tekstu disertacije pojam stabilnosti spominjao se ponajprije u općem smislu, a zatim i u kontekstu što manjih odstupanja između planiranog i ostvarenog stanja. U narednim potpoglavljima ove disertacije, analiza stabilnosti početnih vremenskih planova odnosi se na ispitivanje vjerojatnosti trajanja cijelog projekta i vjerojatnosti dostizanja predviđenog profita kao primarnih pokazatelja rezistencije. Osim toga, analiza stabilnosti može obuhvatiti kvantifikaciju dodatnih pokazatelja, npr. prosječnog kašnjenja projekta, prosječne odgode u počecima aktivnosti te postotka simulacija u kojima dolazi do prekoračenja raspoloživog kreditnog limita.

S obzirom na dugotrajnost izvedbe građevinskih projekata, nije bilo moguće provesti *ex-ante* analizu stabilnosti na stvarnim projektnim podacima, stoga su korišteni teoretski primjeri i referentni podaci iz standardne PSPLIB baze podataka [121]. Prvi teoretski primjer (potpoglavlje 5.3.1.) odnosi se na jednostavnu projektну mrežu, i kronološki je proveden u početnoj fazi istraživanja, dok genetski algoritam još nije bio razvijen, stoga je optimizacijski problem (potpoglavlje 4.3.) riješen egzaktnom metodom uz upotrebu hijerarhijskog pristupa. Simulacija

dobivenih rješenja u prvom primjeru provedena je uvođenjem dodatnih resursno-tehnoloških veza. Sljedeći primjer analiziran je u kasnijoj fazi istraživanja, nakon razvoja metodologije i omogućene upotrebe metaheurističkog pristupa. Na taj način bilo je moguće validirati razvijeni pristup na primjeru kompleksnije teoretske mreže iz PSPLIB baze projekata (potpoglavlje 5.3.2.). Proširena Monte Carlo simulacija na kompleksnoj projektnoj mreži od 120 aktivnosti provedena je primjenom SSGS algoritma na temelju lista aktivnosti koje su dio izlaznog optimizacijskog rješenja. Konačno, da bi se validirao i posljednji predloženi pristup za stvaranje resursno izvodljivih vremenskih rasporeda, tzv. proces re-optimizacije u fazi simulacije, *ex-ante* metoda provodi se na još jednom primjeru projektne mreže iz PSPLIB baze (potpoglavlje 5.3.3.). Ovoga puta, zbog dugotrajnosti simulacije, odabran je primjer srednje razine složenosti od 30 projektnih aktivnosti.

### 5.3.1. Simulacija uvođenjem dodatnih resursno-tehnoloških veza

Projektna mreža u prvom dijelu *ex-ante* analize odnosi se na teoretski primjer građevinskog projekta sastavljenog od 8 aktivnosti te je prikazana na slici 5.6. Na istoj slici označena su i trajanja aktivnosti, njihova potražnja za resursima te direktni troškovi u tisućama novčanih jedinica. U ovome primjeru pretpostavlja se postojanje jedne vrste resursa i ukupne dostupnosti 7 resursnih jedinica na razini cijelog projekta. Dodatni podaci potrebni za izračun financijskog toka prikazani su u tablici 5.2.



Slika 5.6. Ilustrativni primjer projekta za *ex-ante* analizu rezistencije početnog plana

**Tablica 5.2.** Dodatni financijski podaci za ex-ante analizu ilustrativnog građevinskog projekta

Kratica	Podatak	Vrijednost
IT	Postotak indirektnih troškova	15% ukupnih direktnih troškova (UDT)
MOB	Mobilizacija radne snage i opreme	5% (UDT+IT)
PO	Porezi	2% (UDT+IT+MOB)
MP	Marža	20% (UDT+IT+MOB+PO)
O	Obveznice	1% (UDT+IT+MOB+PO+MP)
A	Avans	10% ukupne ponudbene cijene (UPC)
PE	Penali po jedinici vremenskog prekoračenja	2, 000 novčanih jedinica
RET	Jamstvo za uredno izvršenje ugovora	5% po mjesečnoj situaciji
i	Opća kamatna stopa	0,8%
j	Naknada za pozitivno kumulativno stanje računa	0,5%
k	Kamata na neiskorišteni dio sredstava	0,2%
W	Kreditni limit	280,000 novčanih jedinica

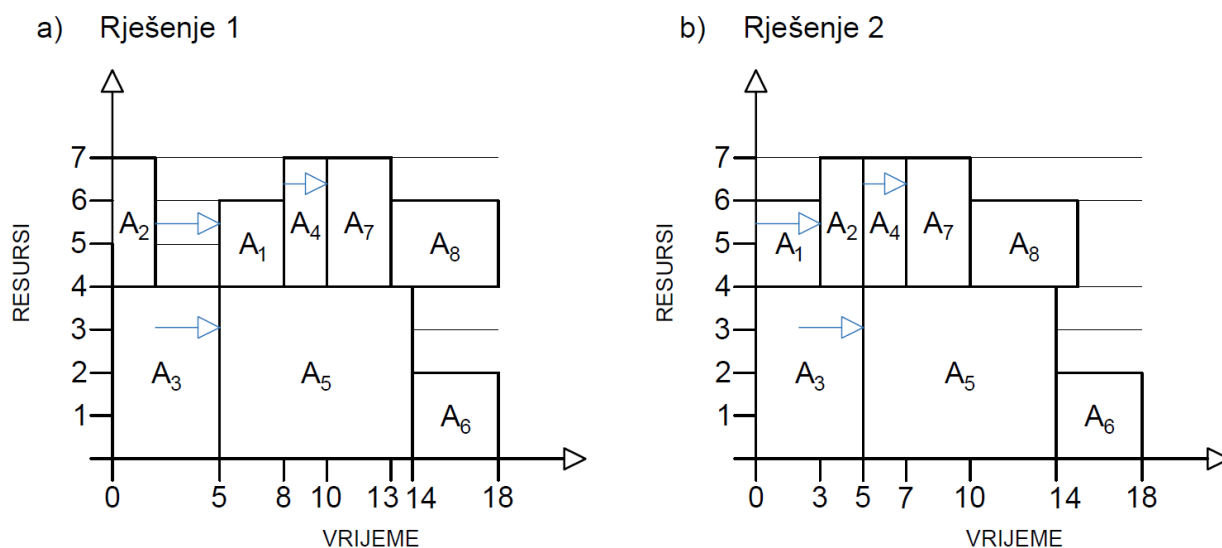
S obzirom na mali broj projektnih aktivnosti u ilustrativnom primjeru građevinskog projekta, optimizacijski problem rješavan je egzaktno. Da bi se riješio višeciljni optimizacijski problem, primijenjen je hijerarhijski pristup jer je pretpostavka da voditelj/ica projekta ima jasno definiranu ljestvicu važnosti pojedinih funkcija cilja kako slijedi: prvo se traže početni planovi s minimalnim trajanjem, zatim sa što većom SM mjerom te se na kraju razmatra što veći početni profit. Ovim postupkom dobiveno je rješenje 1, prikazano u tablici 5.3. Za usporedbu dobivenih rezultata, optimizacijski problem riješen je još jednom, ali ovoga puta su posljednje dvije funkcije cilja zamijenile redosljed važnosti te je tako dobiveno rješenje 2 u tablici 5.3.

**Tablica 5.3.** Razmatrana rješenja u ex-ante analizi ilustrativnog primjera projekta

	Počeci aktivnosti	Trajanje	SM mjera	Profit
Rješenje 1	0, 5, 0, 0, 8, 5, 14, 10, 13, 18	18	0.487	904.12
Rješenje 2	0, 0, 3, 0, 5, 5, 14, 7, 10, 18	18	0.353	911.81

Daljnja analiza pretpostavlja postojanje neizvjesnih događaja u projektu koji mogu uzrokovati varijabilna trajanja u aktivnostima pod rednim brojevima 2, 4 i 6 te je za stohastičko modeliranje ostvarenih trajanja korištena beta razdioba s parametrima  $\alpha = 2$  i  $\beta = 5$ , a faktor R u modeliranju ostvarenih troškova za neizvjesne varijable iznosio je 0,6. Da bi se očuvao predviđeni resursni tok, u Monte Carlo simulaciji uvedene su dodatne resursno-tehnološke veze koje garantiraju očuvanje resursnih uvjeta u opisanom problemu. Ove veze predstavljaju dodatna ograničenja u projektnoj

mreži i prikazane su na slici 5.7. za oba promatrana rasporeda aktivnosti. Monte Carlo simulacija provedena je na 10,000 iteracija za svaki vremenski raspored.



Slika 5.7. Početni vremenski rasporedi s dodatnim resursno-tehnološkim vezama

Osnovni parametri koji su se ispitali proširenom Monte Carlo analizom su:

- vjerojatnost dostizanja planiranog trajanja projekta ( $P_t$ );
- vjerojatnost da će projekt biti završen u vremenu  $1,1 \times$  planiranog trajanja projekta ( $P_{tp}$ );
- vjerojatnost da je ostvareni profit jednak ili veći od planiranog ( $P_p$ ) - uzimajući u obzir samo one simulacije u kojima nije došlo do prekoračenja raspoloživog kreditnog limita.

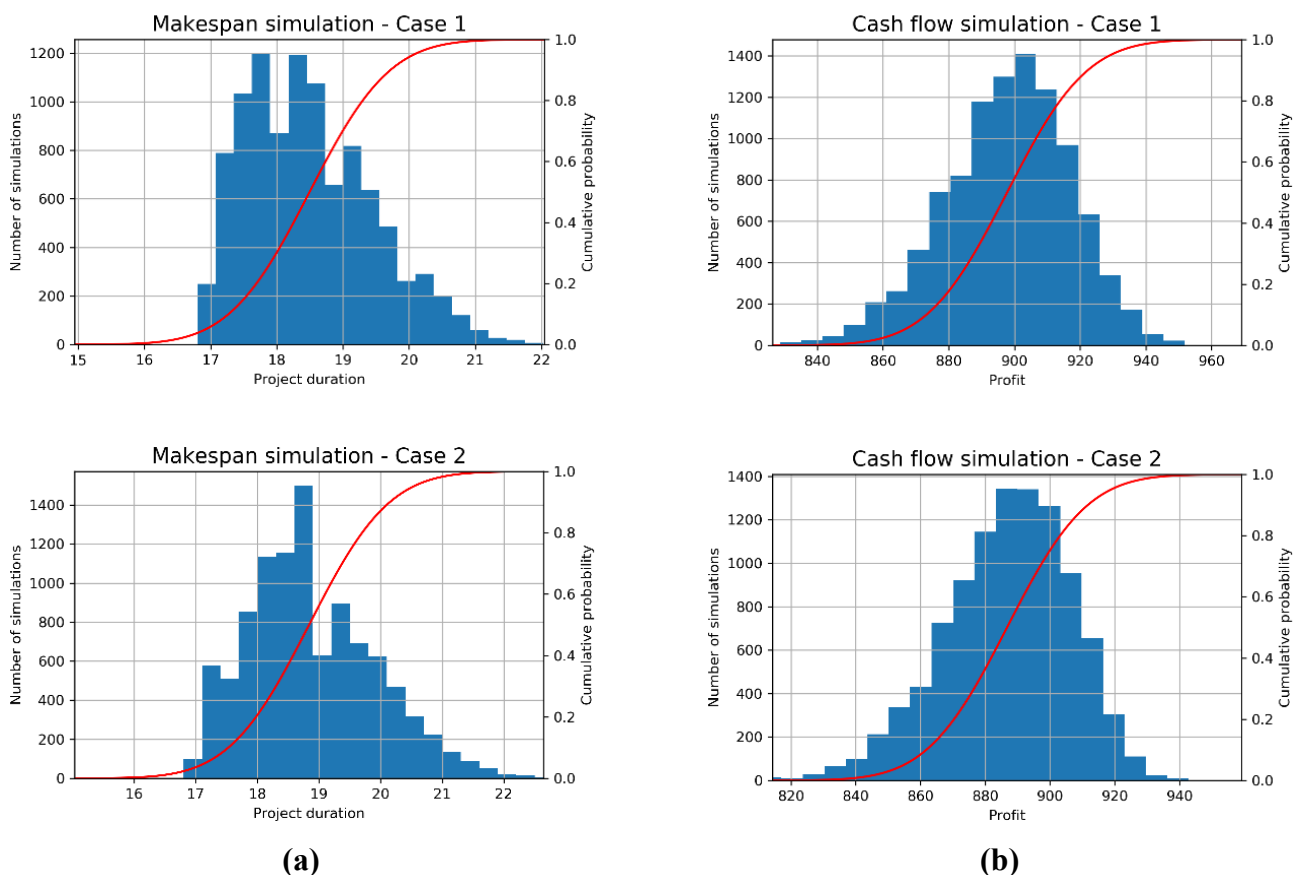
Dodatni parametri odnosili su se na određivanje:

- prosječnog kašnjenja projekta ( $T_p$ );
- prosječnog kašnjenja u počecima aktivnosti ( $T_a$ );
- postotka simulacija u kojima je došlo do prekoračenja raspoloživog kreditnog limita ( $S_p$ ).

Rezultati proširene Monte Carlo analize navedeni su u tablici 5.4., a izlazni histogrami prikazani su na slici 5.8.

Tablica 5.4. Rezultati simulacije u ex-ante analizi ilustrativnog primjera projekta

	$P_t$	$P_{tp}$	$P_p$	$T_p$	$T_a$	$S_p$
Rješenje 1	0.3	0.9135	0.3769	0.66	0.12	1.65%
Rješenje 2	0.2046	0.8249	0.0978	0.93	0.42	1.73%



**Slika 5.8.** Izlazni histogrami u Monte Carlo simulaciji ilustrativnog primjera projekta: **(a)** vjerojatnost ukupnog trajanja projekta; **(b)** vjerojatnost ostvarenog profita

Kao što se može očitati iz rezultata proširene Monte Carlo simulacije, prvotni pristup gdje je maksimiranje SM vrijednosti važnije od maksimiranja profita u optimizacijskom modelu ukazuje na stabilnije rezultate po pitanju svih promatranih parametara, tj. potvrđuje se hipoteza da je unaprjeđenje SM mjere u pozitivnoj korelaciji s boljom rezistencijom početnog plana na uvjete neizvjesnosti. Rezultati *ex-ante* analize na ilustrativnom primjeru građevinskog projekta ukazuju da je u okvirima projektnih ograničenja (prihvatljivo očekivano trajanje i konačni profit) omogućen odabir pouzdanijih početnih planova upotrebom SM mjere kao dodatne funkcije cilja u procesu optimizacije problema vremenskog planiranja projekta s ograničenim resursima. U sljedećem koraku *ex-ante* analize izvršit će se ispitivanje ponašanja kompleksnije projektne mreže u uvjetima neizvjesnosti da bi se validirala implementacija razvijenog genetskog algoritma za rješavanje problema rezistentnog vremenskog planiranja građevinskih projekata.

### 5.3.2. Simulacija korištenjem SSGS algoritma

U drugom dijelu *ex-ante* analize vrši se ispitivanje ponašanja različitih početnih planova za primjer projekta iz standardne PSPLIB baze podataka [121]. *Ex-ante* analiza je ovoga puta izvedena na projektnoj mreži od 120 aktivnosti, na primjeru „j1201\_1“. Tehnološke povezanosti među aktivnostima, deterministička trajanja aktivnosti te potražnja i dostupnost resursa preuzeti su iz PSPLIB baze podataka, dok su direktni troškovi aktivnosti pridijeljeni odabirom slučajnog broja u rasponu od 100 do 1,000 novčanih jedinica. S obzirom na kompleksnost projektne mreže, pretpostavka je da jedna vremenska jedinica predstavlja jedan radni tjedan, a za proračun toka novca izvršeno je dodatno pojednostavljenje u smislu da se svaki mjesec sastoji od 4 radna tjedna, kako bi konačan rezultat analize bio neovisan o potencijalnom datumu početka projekta. Svi dodatni financijski podaci potrebni za proračun toka novca jednaki su kao u prošlom primjeru (tablica 5.2.), osim što se penali računaju po mjesecu vremenskog prekoračenja u iznosu od 2% ukupne ponudbene cijene (UPC), a kreditni limit  $W$  iznosi 5,000 novčanih jedinica.

Nadalje, primjer „j1201\_1“ riješen je primjenom razvijenog genetskog algoritma te se istovremenom optimizacijom triju različitih funkcija cilja došlo do Pareto skupa optimalnih rješenja. Ovim procesom ispitala se jedna od osnovnih hipoteza istraživanja te je utvrđeno da je moguće riješiti postavljeni matematički problem u računalno prihvatljivom vremenu i za projektne mreže većeg stupnja složenosti. Ulazni parametri genetskog algoritma korištenog za traženje potencijalnih vremenskih planova u ovom slučaju bili su: broj generacija = 100; veličina populacije = 20 jedinki, vjerojatnost križanja jedinki postavljena je na 70%, a vjerojatnost mutacije dana je s 20%-nom vjerojatnošću. Dobiveni skup Pareto rješenja sastoji se od 17 različitih početnih planova. Vrijednosti ciljnih funkcija (ukupno trajanje početnog plana, iznos surogatne mjere i očekivani profit prema početnom planu) za svako rješenje u Pareto skupu prikazane su u tablici 5.5. Dobiveni skup rješenja obuhvaća početne planove čije je trajanje u rasponu od 130 do 136 vremenskih jedinica, ali je zamjetan pad očekivanog profita za početne planove koji traju 133 vremenske jedinice ili duže. Prema tome, za daljnju analizu odabrana su sljedeća rješenja iz Pareto optimalnog skupa: početni plan s najvećim iznosom SM mjere, pod uvjetom da je očekivani profit u prihvatljivim granicama (rješenje br. 9 u tablici 5.5.) te dodatni početni plan jednakog trajanja, ali većeg iznosa očekivanog profita (rješenje br. 7. u tablici 5.5.). Dakle, od Pareto optimalnog skupa rješenja odabrana su dva početna rasporeda s jednakim trajanjem projekta, ali s različitim vrijednostima SM mjere i očekivanog profita. Vrijednosti triju ciljnih funkcija za odabrane početne planove naznačene su u tablici 5.5. podebljanim fontom, pri čemu je vidljivo da prvo odabrano

rješenje (rješenje br. 9 u tablici 5.5.) ima veći iznos SM mjere, ali manji profit u usporedbi s drugim odabranim rješenjem (rješenje br 7. u tablici 5.5.).

**Tablica 5.5.** Pareto skup dobivenih rješenja za projektnu mrežu od 120 aktivnosti

Rješenje br.	Trajanje	SM	Profit
1	130.0	3.977	3086.94
2	130.0	5.161	3032.29
3	131.0	4.743	3082.44
4	131.0	4.75	3044.22
5	131.0	5.202	3030.94
6	131.0	5.215	3003.39
<b>7</b>	<b>132.0</b>	<b>3.146</b>	<b>3126.56</b>
8	132.0	3.846	3089.04
<b>9</b>	<b>132.0</b>	<b>5.437</b>	<b>3010.93</b>
10	133.0	5.458	608.77
11	134.0	5.54	626.5
12	134.0	5.832	582.77
13	135.0	5.588	614.87
14	135.0	5.592	596.73
15	135.0	6.244	588.08
16	136.0	6.016	619.94
17	136.0	6.283	613.71

Sljedeći korak *ex-ante* analize odnosi se na određivanje neizvjesnih varijabli za kasniju simulaciju izvedbe projekta. S obzirom na to da se radi o teoretskom primjeru, pretpostavljeno je da će 20% aktivnosti u projektu biti varijabilnog trajanja zbog mogućih utjecaja neizvjesnosti pri izvršenju projekta. Pri tome su odabrane one aktivnosti koje imaju najduže relativno trajanje, relativno najveće direktne troškove te koriste relativno najviše resursa, prema proračunu iz formula 5.3-5.6. Pošto se u oba rješenja razmatraju isti ulazni parametri projektne mreže, to znači da će neizvjesne varijable biti jednake u obje simulacije. Težinska vrijednost  $sw_i$  određuje relativnu neizvjesnost određene aktivnost  $i$ . Određeni postotak aktivnosti (u ovom slučaju 20%) koje imaju najveći iznos težinskog faktora  $sw_i$ , bit će proglašen neizvjesnim varijablama te će se njihova trajanja u daljnjoj Monte Carlo simulaciji modelirati na temelju funkcije gustoće za odabranu slučajnu varijablu. Težinska vrijednost  $sw_i$  računa se na sljedeći način:

$$sw_i = \frac{DP_i + AC_i + RU_i}{3} \quad (5.3)$$

Pri tome se obilježja aktivnosti iskazuju kako slijedi:



$$DP_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (5.4)$$

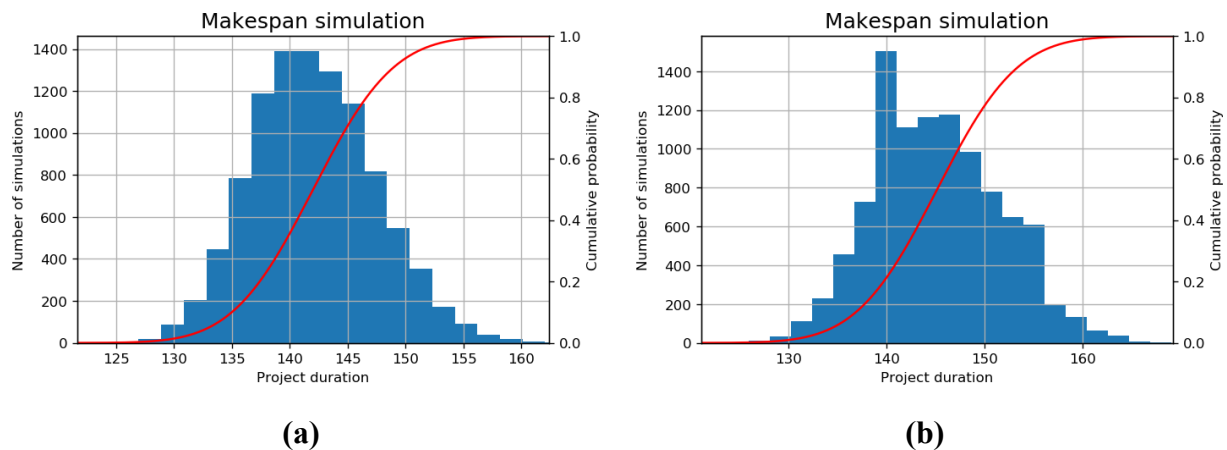
$$AC_i = \frac{c_i}{\sum_{i=1}^n c_i} \quad (5.5)$$

$$RU_i = \frac{\sum_{r=1}^k u_{ir}}{\sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^k u_{ir}} \quad (5.6)$$

Konkretno:

- Jednadžba (5.4) definira relativno trajanje aktivnosti,  $DP_i$ , kao odnos determinističkog trajanja promatrane aktivnosti i sume očekivanih trajanja svih projektnih aktivnosti  $n$ .
- Jednadžba (5.5) označava relativni trošak aktivnosti,  $AC_i$ .
- Jednadžba (5.6) izračunava relativnu potražnju resursa za aktivnost,  $RU_i$ . Pri tome se oznaka  $u_{ir}$  odnosi na konkretnu potražnju resursa  $r$  za aktivnost  $i$ , uzimajući u obzir sve vrste resursa  $k$ .

Za opisivanje projektne neizvjesnosti korištena je beta razdioba s parametrima  $\alpha = 2$  i  $\beta = 5$ , a faktor  $R$  u modeliranju ostvarenih troškova za neizvjesne varijable iznosio je 0,6. Simulirana trajanja aktivnosti proračunata su za sve iteracije kako je objašnjeno u poglavlju 5.1. ove disertacije, s napomenom da su sva trajanja zaokružena na cjelobrojne vrijednosti zbog toga što algoritamski proces za uspostavljanje simuliranih izvršenja aktivnosti uzima u obzir jednu vremensku jedinicu kao najmanji segment vremena u programskom kodu razvijenom za potrebe ovog istraživanja. U svakoj od 10,000 iteracija Monte Carlo simulacije korištena je SSGS metoda (detaljnije opisana u poglavlju 4.5.1. ove disertacije) da bi se konstruirao resursno izvodljivi raspored aktivnosti. Ovoga puta tijekom izvedbe simulacije pretpostavlja se postojanje aktivnosti koje ne mogu početi prije prvotno planiranog trenutka u vremenu (eng. *Railway scheduling*). Praktično značenje takvog modela projektne izvedbe opisuje situacije kada je npr. dogovorena isporuka materijala za točno određeno vrijeme u projektu ili kada npr. ključni resursi postaju dostupni tek u nekom vremenu, ali ne i ranije. Konkretno, u provedenoj simulaciji radi se o aktivnostima pod rednim brojevima 15, 50 i 75, a sve ostale aktivnosti počinju u najranijem mogućem trenutku. SSGS metoda koristila je izlaznu listu aktivnosti iz optimizacijskog procesa za određivanje prvenstva pri raspoređivanju pojedinih aktivnosti u resursno i tehnološko izvodljivi vremenski raspored. Vremenska distribucija završetka projekta prema Monte Carlo simulaciji za oba razmatrana rješenja prikazana je na slici 5.9.



**Slika 5.9.** Vjerojatnost završetka projekta prema Monte Carlo simulaciji za primjer iz PSPLIB baze: (a) Rješenje 1; (b) Rješenje 2

Detaljnija rješenja provedene simulacije prikazana su u tablici 5.6., gdje je za svaki analizirani početni raspored navedena vjerojatnost  $P_t$  da će projekt biti završen u okviru planiranog vremena; vjerojatnost  $P_{tp}$  da će projekt biti završen u vremenu  $1,1 \times$  planiranog trajanja projekta; prosječno kašnjenje projekta  $T_p$ ; prosječno kašnjenje u počecima aktivnosti  $T_a$  te postotak simulacija u kojima je došlo do prekoračenja raspoloživog kreditnog limita  $S_p$ . S obzirom na visoki postotak simulacija u kojima je došlo do probijanja kreditnog limita, nije izvršen proračun vjerojatnosti da je ostvareni profit jednak ili veći od planiranog.

**Tablica 5.6.** Rezultati simulacije u ex-ante analizi ilustrativnog primjera projekta

	$P_t$	$P_{tp}$	$T_p$	$T_a$	$S_p$
Rješenje 1	0.0338	0.7198	10.05	3.69	76.56 %
Rješenje 2	0.0209	0.5035	13.16	6.24	85.34 %

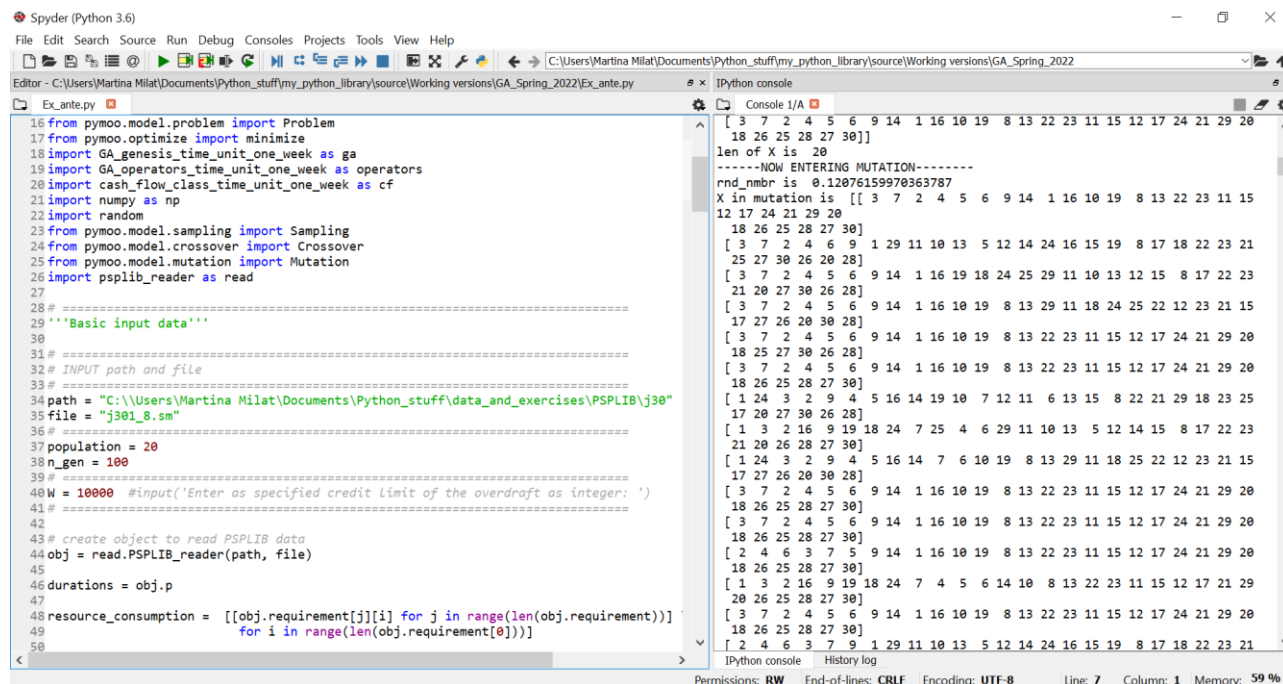
Izlazni rezultati Monte Carlo analize upućuju da je potrebno redefinirati kreditni limit jer postoji velika vjerojatnost da će doći do prekoračenja raspoloživih financijskih sredstava pri izvedbi projekta. Daljnjim razmatranjem može se pretpostaviti da slučajna razdioba direktnih troškova predstavlja jedan od uzroka velike vjerojatnosti prekoračenja kreditnog limita.

S druge strane, ex-ante analiza rezistencije početnih planova ukazuje na ispravnost hipoteze kako rješenja s višom vrijednosti SM mjere imaju stabilnije rezultate u simuliranom izvršenju projekta. U slučaju ispitivanja složene mreže od 120 projektnih aktivnosti, opet se pokazalo da je za raspored s višom SM ujedno i viša vjerojatnost ostvarenja planiranih ciljeva te da su prosječna kašnjenja izvedbe projekta i početaka pojedinih aktivnosti manja u usporedbi s početnim rasporedom koji ima jednako prvotno trajanje, ali nižu SM vrijednost. Štoviše, ex-ante analizom

rezistencije početnih planova na složenom primjeru projektne mreže od 120 aktivnosti potvrđene su i ostale istraživačke hipoteze kako je moguće primijeniti razvijeni optimizacijski model za pouzdanije planiranje građevinskih projekata, a rezultati optimizacije ostvareni su u prihvatljivom vremenu izračuna.

### 5.3.3. Simulacija ponovnom optimizacijom

Posljednji dio *ex-ante* analize odnosi se na ispitivanje projektne mreže od 30 aktivnosti na primjeru „j301\_8“ iz standardne PSPLIB baze podataka [121]. Kao i u prošlom primjeru (potpoglavlje 5.3.2.), direktni troškovi aktivnosti pridijeljeni su odabirom slučajnog broja u rasponu od 100 do 1,000 novčanih jedinica. Navedeni primjer prvo je riješen primjenom razvijenog genetskog algoritma, a zatim su na temelju dodatnih preferencija iz Pareto-skupa odabrana dva rješenja jednakog trajanja, ali različitih vrijednosti SM mjere i očekivanog profita. Na užem skupu rješenja zatim je izvršena simulacija da bi se kvantitativnom analizom pomoglo pri odabiru početnog plana aktivnosti. Proces optimizacije izvršen je kroz 100 generacija, pri čemu je veličina populacije iznosila 20 jedinki. Snimak zaslona pri izvršavanju optimizacijskog postupka prikazan je na slici 5.10.



```
16 from pymoo.model.problem import Problem
17 from pymoo.optimize import minimize
18 import GA_genesis_time_unit_one_week as ga
19 import GA_operators_time_unit_one_week as operators
20 import cash_flow_class_time_unit_one_week as cf
21 import numpy as np
22 import random
23 from pymoo.model.sampling import Sampling
24 from pymoo.model.crossover import Crossover
25 from pymoo.model.mutation import Mutation
26 import psplib_reader as read
27
28 # =====
29 '''Basic input data'''
30
31 # =====
32 # INPUT path and file
33 # =====
34 path = "C:\\Users\\Martina Milat\\Documents\\Python_stuff\\data_and_exercises\\PSPLIB\\j30"
35 file = "j301_8.sm"
36 # =====
37 population = 20
38 n_gen = 100
39 # =====
40 W = 10000 #input('Enter as specified credit limit of the overdraft as integer: ')
41 # =====
42
43 # create object to read PSPLIB data
44 obj = read.PSPLIB_reader(path, file)
45
46 durations = obj.p
47
48 resource_consumption = [[obj.requirement[j][i] for j in range(len(obj.requirement))]
49                         for i in range(len(obj.requirement[0]))]
50
```

```
[ 3 7 2 4 5 6 9 14 1 16 10 19 8 13 22 23 11 15 12 17 24 21 29 20
18 26 25 28 27 30]]
len of X is 20
-----NOW ENTERING MUTATION-----
rnd_nmb'r is 0.12076159970363787
X in mutation is [[ 3 7 2 4 5 6 9 14 1 16 10 19 8 13 22 23 11 15
12 17 24 21 29 20
18 26 25 28 27 30]
[ 3 7 2 4 6 9 1 29 11 10 13 5 12 14 24 16 15 19 8 17 18 22 23 21
25 27 30 26 20 28]
[ 3 7 2 4 5 6 9 14 1 16 19 18 24 25 29 11 10 13 12 15 8 17 22 23
21 20 27 30 26 28]
[ 3 7 2 4 5 6 9 14 1 16 10 19 8 13 29 11 18 24 25 22 12 23 21 15
17 27 26 20 30 28]
[ 3 7 2 4 5 6 9 14 1 16 10 19 8 13 22 23 11 15 12 17 24 21 29 20
18 25 27 30 26 28]
[ 3 7 2 4 5 6 9 14 1 16 10 19 8 13 22 23 11 15 12 17 24 21 29 20
18 26 25 28 27 30]
[ 1 24 3 2 9 4 5 16 14 19 10 7 12 11 6 13 15 8 22 21 29 18 23 25
17 20 27 30 26 28]
[ 1 3 2 16 9 19 18 24 7 25 4 6 29 11 10 13 5 12 14 15 8 17 22 23
21 20 26 28 27 30]
[ 1 24 3 2 9 4 5 16 14 7 6 10 19 8 13 29 11 18 25 22 12 23 21 15
17 27 26 20 30 28]
[ 3 7 2 4 5 6 9 14 1 16 10 19 8 13 22 23 11 15 12 17 24 21 29 20
18 26 25 28 27 30]
[ 3 7 2 4 5 6 9 14 1 16 10 19 8 13 22 23 11 15 12 17 24 21 29 20
18 26 25 28 27 30]
[ 2 4 6 3 7 5 9 14 1 16 10 19 8 13 22 23 11 15 12 17 24 21 29 20
18 26 25 28 27 30]
[ 1 3 2 16 9 19 18 24 7 4 5 6 14 10 8 13 22 23 11 15 12 17 21 29
20 26 25 28 27 30]
[ 3 7 2 4 5 6 9 14 1 16 10 19 8 13 22 23 11 15 12 17 24 21 29 20
18 26 25 28 27 30]
[ 2 4 6 3 7 9 1 29 11 10 13 5 12 14 24 16 15 19 8 17 18 22 23 21
```

Slika 5.10. Izvršenje optimizacijskog postupka (snimak zaslona u Python programskom jeziku)

Dobiveni skup Pareto rješenja obuhvatio je 20 različitih početnih rasporeda aktivnosti. Vrijednosti ciljnih funkcija (početno trajanje projekta, iznos surogatne mjere, očekivani profit) za svako dobiveno rješenje prikazane su u tablici 5.7. Prema dobivenim rješenjima iz Pareto skupa, planirano trajanje projekta kreće se u rasponu od 53 do 73 vremenske jedinice, a maksimalni očekivani profit iznosi 3,716.36 financijskih jedinica. Za daljnju analizu uzeta je u obzir sljedeća pretpostavka: simulirat će se projektno izvršenje prema početnom planu s najvišim iznosom surogatne mjere, ali se prihvaćaju samo oni početni planovi čije je vremensko i financijsko odstupanje maksimalno 20% u odnosu na najbolje rješenje za pojedinu funkciju cilja. Prema dobivenim Pareto rješenjima, to znači da će se uzimati u obzir početni planovi najduljeg trajanja od 63 vremenske jedinice, a vrijednost očekivanog profita mora biti veća od 2,973.09 financijskih jedinica. Na taj način odabrano je rješenje r.br. 10 u tablici 5.7. kao prvo rješenje za daljnju simulacijsku analizu te rješenje r.br. 8 u tablici 5.7. kao drugo rješenje za simulaciju. U simulaciji će se ispitati performanse dvaju početnih planova jednakog trajanja, ali različitih iznosa surogatnih mjera i očekivanih profita.

**Tablica 5.7.** Pareto skup dobivenih rješenja za projektnu mrežu od 30 aktivnosti

Rješenje br.	Trajanje	SM	Profit
1	53.0	1.958	3658.73
2	53.0	2.498	3651.64
3	54.0	2.716	3666.65
4	55.0	3.138	3650.4
5	56.0	2.013	3716.36
6	56.0	3.181	3643.65
7	57.0	3.525	2977.8
<b>8</b>	<b>59.0</b>	<b>3.191</b>	<b>3067.78</b>
9	59.0	3.864	2992.8
<b>10</b>	<b>59.0</b>	<b>4.461</b>	<b>2983.74</b>
11	60.0	3.524	3057.24
12	62.0	4.996	2335.92
13	63.0	4.718	2365.91
14	63.0	5.563	2300.93
15	63.0	6.088	2282.13
16	67.0	6.34	1628.56
17	68.0	7.408	1713.72
18	68.0	7.668	1619.06
19	71.0	8.214	1029.9
20	73.0	8.465	346.49

Da bi se ispoštovala resursna ograničenja projekta, simulacija je izvedena primjenom ponovne optimizacije (re-optimizacije) u fazi izrade rasporeda (detaljnije objašnjeno u

potpoglavlju 5.2.). Direktni troškovi te ostali financijski parametri prikazani su na slici 5.11. u vidu ulaznih parametara računalnog programa za simulaciju odabranih rješenja.

Kao i u prošlom primjeru, za opisivanje projektne neizvjesnosti korištena je beta razdioba s parametrima  $\alpha = 2$  i  $\beta = 5$ , a faktor R u modeliranju ostvarenih troškova za neizvjesne varijable iznosio je 0,6. Pri tome su neizvjesne aktivnosti odabrane jednakim postupkom kao u prošlom primjeru, a neizvjesnim varijablama proglašene su sljedeće aktivnosti: 1, 4, 5, 17, 24, 28. Osim toga, predviđeno je postojanje dviju aktivnosti (8. i 22. aktivnost) koje ne mogu početi prije vremena određenog u početnom planu (eng. *Railway scheduling*). Ovoga puta, Monte Carlo analiza izvršena je kroz 1000 iteracija jer je vrijeme izvršenja simulacije projektne mreže bilo relativno dugo (u prosjeku oko 2.5 sati za svaki slučaj) uslijed opetovane optimizacije u procesu simulacije.

```
1 import MC_reoptimization as MC
2
3
4
5 durations = [0, 8, 3, 6, 9, 8, 6, 4, 5, 4, 5, 7, 1, 10, 1, 5, 4, 10, 3, 5, 10, 1, 1, 3, 10, 1, 1, 7, 8, 9, 2, 0]
6
7 resource_consumption = [[0, 10, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 8, 10, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0],
8 [0, 0, 4, 5, 4, 0, 0, 0, 8, 0, 0, 0, 0, 8, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 2, 0, 2, 0, 8, 0, 1, 0, 10, 0, 6, 0],
9 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 6, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 4, 0, 0, 10, 3, 5, 0, 5, 0, 0, 0, 0, 0, 5, 0, 7, 0, 0],
10 [0, 0, 0, 0, 0, 0, 8, 5, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 3, 9, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]]
11
12 precedence_relations = [[0, 1], [0, 2], [0, 3], [1, 8], [1, 16], [1, 24], [2, 4], [2, 9], [2, 10], [3, 7], [3, 14], [3, 18],
13 [4, 5], [4, 6], [4, 12], [5, 14], [6, 29], [6, 30], [7, 11], [7, 13], [8, 17], [8, 21], [8, 22],
14 [9, 11], [9, 13], [10, 12], [10, 28], [11, 26], [12, 27], [13, 15], [14, 27], [15, 17], [16, 18],
15 [16, 19], [17, 20], [18, 25], [19, 25], [20, 28], [21, 26], [22, 23], [23, 26], [24, 25], [25, 27],
16 [26, 28], [27, 30], [28, 31], [29, 31], [30, 31]]
17
18 maximum_resource = [12, 14, 12, 10]
19
20 baseline = [0, 0, 0, 1, 3, 14, 16, 12, 8, 8, 11, 17, 21, 16, 22, 26, 8, 31, 12, 15, 41, 30, 20, 43, 26, 38, 50, 42, 51, 22,
21 49, 59]
22
23 no_simulations = 1000
24
25 population = 20
26
27 n_gen = 20
28
29 uncertain_activities = [28, 17, 1, 24, 4, 5]
30
31 railroad_activities = [8, 22]
32
33 costs = [363, 803, 266, 749, 647, 414, 969, 665, 626, 186, 207, 699, 232, 890, 670, 711, 426, 849, 597, 668, 535,
34 231, 474, 298, 595, 734, 321, 778, 199, 154]
35
36 W = 10000
37 # =====
38 '''Other input data for cash analysis'''
39
40 overhead_percentage = 0.15 #input('Enter percentage for overhead in decimal form: ')
41 mobilization_percentage = 0.05 #input('Enter percentage for mobilization in decimal form: ')
42 tax_percentage = 0.02 #input('Enter percentage for taxes in decimal form: ')
43 markup_percentage = 0.20 #input('Enter percentage for markup in decimal form: ')
44 bond_percentage = 0.01 #input('Enter percentage for bond in decimal form: ')
45
46 advance = 0.1 #input('Enter percentage of TBP for advance payment in decimal form: ')
47 penalty = 0.02 #input('Enter late completion penalty as percentage of TBP per month of prolongation from the minimal schedule
48 retainage = 0.05 #input('Enter percentage of retainage for payments in decimal form: ')
49
50 interest = 0.008 #input('Enter percentage for interest per period in decimal form: ')
51 surplus = 0.005 #input('Enter percentage for surplus per period in decimal form
52 #, for cases when net cash flow is positive. surplus < interest !!! : ')
53 unused = 0.002 #input('Enter percentage for interest ON UNUSED PORTION OF CREDIT in decimal form: ')
```

Slika 5.11. Ulazni parametri za simulaciju re-optimizacijom (snimak zaslona u Python programskom jeziku)

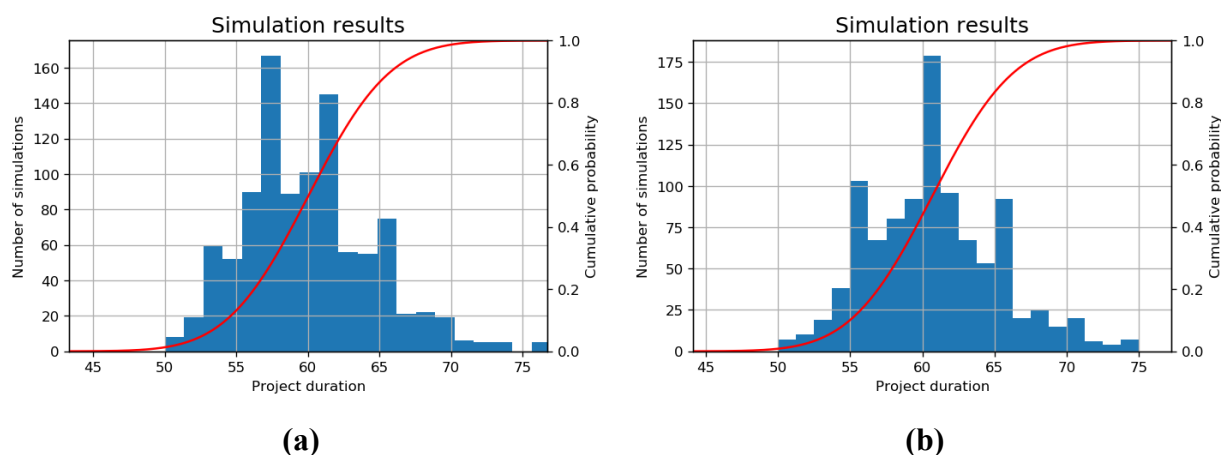
Konkretno, u simulaciji su uspoređene performanse dvaju početnih rješenja čije je trajanje jednako (59 vremenskih jedinica), ali je u prvom rješenju iznos SM mjere veći nego što je to slučaj s drugim rješenjem. Kao što se može očitati iz tablice 5.7., za prvo rješenje iznos SM mjere je 4.461, a očekivani profit iznosi 2,983.74 novčanih jedinica (rješenje r. br. 10 u tablici 5.7.), dok je u drugom rješenju (rješenje r. br. 8 u tablici 5.7.) SM mjera nešto manja (3.191), a očekivani profit  $P$  veći (3,067.68 n.j.) nego u prvom rješenju. Rezultati simulacije prikazani su za svako rješenje u tablici 5.8., pri čemu su ispitani sljedeći parametri:

- vjerojatnost dostizanja planiranog trajanja projekta ( $P_t$ );
- vjerojatnost završetka projekta u roku  $1,1 \times$  planiranog trajanja ( $P_{tp}$ );
- vjerojatnost da je ostvareni profit jednak ili veći od planiranog ( $P_p$ );
- prosječno kašnjenje projekta ( $T_p$ );
- prosječno kašnjenje u počecima aktivnosti ( $T_a$ ).

**Tablica 5.8.** Rezultati simulacije re-optimizacijom za odabrana početna rješenja

	$T$	$SM$	$P$	$P_t$	$P_{tp}$	$P_p$	$T_p$	$T_a$
Rješenje 1	59	4.461	2983.74	0.4082	0.8603	0.393	2.3	2.33
Rješenje 2	59	3.191	3067.68	0.3522	0.8279	0.2918	2.69	2.48

U ovom primjeru, kreditni limit postavljen je s dovoljno visokom rezervom, tako da prilikom simulacije projektne izvedbe nije došlo do prekoračenja raspoloživih sredstava. Vjerojatnosna distribucija trajanja projekta za oba razmatrana rješenja dana je na slici 5.12.



**Slika 5.12.** Vjerojatnost završetka projekta prema Monte Carlo simulaciji za primjer iz PSPLIB baze: **(a)** Rješenje 1; **(b)** Rješenje 2

Rezultati *ex-ante* analize i na ovom primjeru ukazuju da se promatrana alternativna rješenja jednakog trajanja, ali različitih vrijednosti SM mjere razlikuju po svojoj rezistenciji, sudeći po

rezultatima proširene SM analize. Pokazalo se da rješenje s boljim iznosom SM mjere ima rezistentnije rezultate simulacije jer su vjerojatnosti dostizanja očekivanih projektnih performansi veće, a kašnjenja u pojedinim aktivnostima, kao i kašnjenja završetka projekta manja nego što je to slučaj kod početnog plana s nižom vrijednosti SM mjere.

#### **5.4. Ex-post analiza rezistencije početnih vremenskih planova prema podacima o izvedenom stanju stvarnog građevinskog projekta**

Izvođenje *ex-post* analize u ovom slučaju provodi se s ciljem ispitivanja efikasnosti predložene metodologije za rezistentno planiranje građevinskih projekata u uvjetima neizvjesnosti. Konkretno, u *ex-post* (i.e. retrospektivnoj) analizi uspoređuje se odstupanje između početnih vremenskih rasporeda dobivenih kao skup Pareto rješenja primjenom razvijenog genetskog algoritma te vremenskih rasporeda projektne izvedbe koji su rekonstruirani na temelju stvarnih trajanja projektnih aktivnosti. Pri usporedbi planiranog i ostvarenog stanja, smatra se da je rezistencija početnog vremenskog plana tim veća što su vremenska i financijska odstupanja manja.

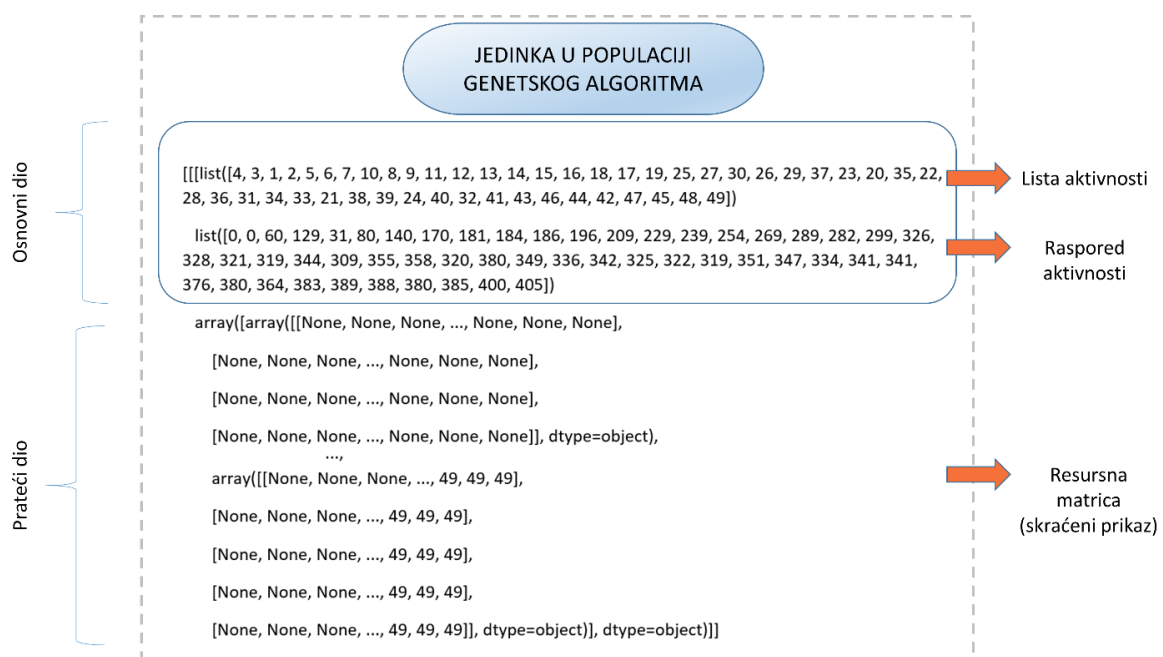
S obzirom na to da je prvi dio validacije predloženog optimizacijskog modela proveden na standardnim teoretskim primjerima projektnih mreža, u *ex-post* analizi korišteni su podaci s konkretnog građevinskog projekta. Svi projektni podaci koji su korišteni za analizu javno su dostupni u bazi izvedenih projekata koju vodi i održava istraživačka grupa za operacijska istraživanja i vremensko planiranje sa Sveučilišta Ghent u Belgiji. Detaljnije informacije o korištenoj bazi podataka dostupne su u radovima autora Vanhoucke et al. [122] te Batselier et al. [123].

Odabrani projekt odnosi se na izgradnju višekatnog poslovnog objekta čiji se vremenski plan sastoji od 49 projektnih aktivnosti, a planirano vrijeme izvedbe je 442 dana, uzevši u obzir standardno osmosatno radno vrijeme. Detaljni podaci o odabranom projektu mogu se naći na sljedećoj poveznici [124] pod identifikacijskom oznakom 12, a ulazni podaci za *ex-post* analizu sumirani su u Dodatku ove disertacije (tablice D.5. – D.7.). Konkretno, ovaj projekt odabran je zato što su za njega bile dostupne detaljne projektne informacije u vidu korištenih resursa, troškova i trajanja svih aktivnosti (tablica D.5.), pregledne analize rizika (tablica D.6.) te usporedbe planiranog i ostvarenog stanja (tablica D.7.). S obzirom na to da predloženi optimizacijski model sadrži i detaljni proračun financijskog toka, sve dodatne financijske informacije koje nisu javno raspoložive, uzete su obzir kao hipotetski podaci prema tablici 5.9. da bi se mogla provesti iscrpna analiza predloženog optimizacijskog modela za rezistentno vremensko planiranje.

**Tablica 5.9.** Hipotetski financijski podaci za ex-post analizu konkretnog građevinskog projekta

Kratica	Podatak	Vrijednost
IT	Postotak indirektnih troškova	15% ukupnih direktnih troškova (UDT)
MOB	Mobilizacija radne snage i opreme	5% (UDT+IT)
PO	Porezi	2% (UDT+IT+MOB)
MP	Marža	20% (UDT+IT+MOB+PO)
O	Obveznice	1% (UDT+IT+MOB+PO+MP)
A	Avans	10% ukupne ponudbene cijene (UPC)
PE	Penali po danu vremenskog prekoračenja	0,01% ukupne ponudbene cijene (UPC)
RET	Jamstvo za uredno izvršenje ugovora	5% po mjesečnoj situaciji
i	Opća kamatna stopa	0,8%
j	Naknada za pozitivno kumulativno stanje računa	0,5%
k	Kamata na neiskorišteni dio sredstava	0,2%
W	Kreditni limit	700,000 financijskih jedinica

Na temelju ulaznih projektnih podataka (projektna mreža, planirana trajanja aktivnosti, financijski podaci), genetski algoritam [104] primijenjen je kako bi se dobio skup Pareto optimalnih rješenja prema optimizacijskom modelu opisanom u 4. poglavlju ovog rada. Primjer genetske jedinice u programskom zapisu za promatrani problem građevinskog projekta dan je na slici 5.13.



**Slika 5.13.** Primjer genetske jedinice u programskom zapisu



Veličina generacije u genetskom algoritmu iznosila je 20 jedinki, a kriterij zaustavljanja algoritma definiran je kao maksimalan broj generacija, u ovom slučaju radi se o 100 generacija. Vjerojatnost križanja jedinki postavljena je na 70%, a vjerojatnost mutacije dana je s 40%-nom vjerojatnošću. Pareto skup optimalnih rješenja prikazan je u tablici 5.10.

**Tablica 5.10.** Pareto skup dobivenih rješenja za projektnu mrežu stvarnog građevinskog projekta

Rješenje br.	Trajanje	SM	Profit
1	404	35.435	734.01
2	404	46.666	734.01
3	404	81.803	728.71
4	405	36.697	737.21
5	405	42.08	734.65
6	405	53.985	731.78
7	406	38.039	736.64
8	408	38.967	736.78
9	409	43.347	736.88
10	410	56.915	735.85
11	411	45.709	736.92
12	411	58.303	734.03
13	412	51.736	736.92
14	414	48.796	736.95
15	414	60.567	732.32
16	418	61.696	736.11
17	419	68.78	736.01
18	422	71.896	736.42
19	514	82.782	609.31
20	525	93.414	611.11

*Ex-post* analiza je u ovom istraživanju provedena kroz dva koraka: prvo se analiziraju performanse rezistentnog vremenskog plana iz dobivenog skupa Pareto rješenja (bira se početni vremenski plan s najvećom SM mjerom, rješenje br. 20 u tablici 5.10.), a zatim se procjenjuje grupno ponašanje Pareto skupa rješenja. Pri tome se u oba slučaja procjenjuju vremenska i financijska odstupanja planiranog i ostvarenog stanja. Štoviše, da bi se detaljnije ispitali mogući projektni ishodi te da bi se bolje razumjelo projektno ponašanje u uvjetima neizvjesnosti, osim stvarnih realizacija u trajanju i troškovima projektnih aktivnosti, dodatno su uključeni alternativni hipotetski scenariji, tj. dodatne kombinacije ostvarenih aktivnosti na temelju postojeće analize rizika za konkretni projekt (tablica D.6.). Ostvarena trajanja i troškovi aktivnosti prema dostupnoj projektnoj dokumentaciji proglašena su scenarijem broj 1, a dodatne, hipotetske kombinacije

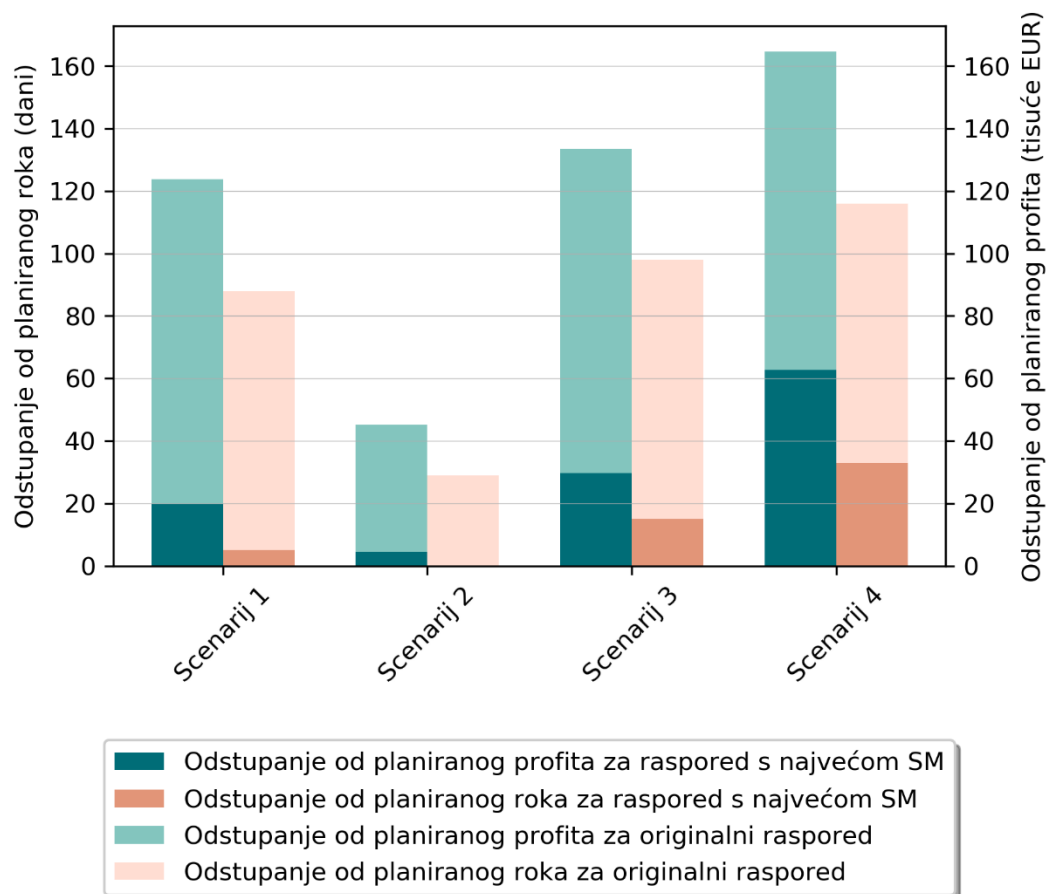
izvedenog stanja označene su kao scenariji 2-4. U svakom od dodatnih scenarija može doći do promjene u tri različite projektne aktivnosti po pitanju ostvarenog trajanja i/ ili troškova aktivnosti, u usporedbi sa stvarno izvedenim stanjem. Na ovaj način ispituje se ponašanje rezistentnih vremenskih planova u neizvjesnim uvjetima, ali u okviru pretpostavljenih vrijednosti prema projektnoj dokumentaciji. Podaci o dodatnim scenarijima neizvjesnosti prikazani su u tablici 5.11. Navedene aktivnosti odabrane su na temelju analize rizika za konkretni građevinski projekt (tablica D.6.), a prema ulaznim podacima projekta, sve aktivnosti koje su odabrane za neizvjesne varijable u dodatnoj analizi mogućih scenarija imaju široku raspodjelu očekivanih trajanja.

**Tablica 5.11.** Hipotetski podaci za analizu dodatnih scenarija neizvjesnosti

	Scenarij br. 2	Scenarij br. 3	Scenarij br. 4
Izmijenjene aktivnosti (r. br.)	6, 25, 26	2, 28, 35	3, 18, 36
Hipotetska trajanja	35, 50, 22	95, 15, 25	40, 40, 40
Hipotetski troškovi	44.258, 420.212,170.815	75, 157.54, 102.06	210, 135.55, 56

Rezultati prvog koraka *ex-post* analize prema različitim scenarijima izvršenja prikazani su na slici 5.14. Ovdje se rekonstruira projektna izvedba da bi se usporedile performanse najrezistentnijeg početnog plana iz dobivenog skupa Pareto rješenja (početni plan s najvišom SM mjerom) s performansama početnog rasporeda prema dostupnim projektnim podacima (tzv. originalni raspored). Pri tome je važno naglasiti da se rekonstrukcija projektne izvedbe izvršila algoritamskim putem s ciljem što objektivnije procjene rezistencije pojedinih početnih rasporeda. Unatoč tome što su podaci o ostvarenom stanju projekta javno dostupni, proces donošenja odluka od strane upravitelja/ice projekta smatra se izvođačevim znanjem o upravljanju projekta, te takva vrsta podataka nije raspoloživa. Prema tome, bez potpunog razumijevanja procesa odlučivanja nije moguća zbiljska procjena ponašanja različitih početnih planova. Kako bi se nadišao uočeni problem, u ovom istraživanju korištena je jednostavna algoritamska procedura za ujednačenu procjenu projektne izvedbe različitih početnih planova.

S obzirom na to da su u *ex-post* analizi korišteni podaci o stvarnim trajanjima projektnih aktivnosti (uz dodatne hipotetske scenarije), za generiranje ostvarenih rezultata ovdje nije bilo potrebno koristiti simulacijske metode, već je u tu svrhu korišten algoritam robusne serijske sheme generiranja rasporeda (eng. *Robust Serial Schedule Generation Scheme*, kratica *RSSGS*) [125]. Navedeni algoritam izvršava se slično kao osnovni SSGS algoritam opisan u poglavlju 4.5.1. ovoga rada, ali s tom razlikom što se početci aktivnosti za realizirani raspored postavljaju u trenutak koji je najbliži prvotno planiranom početku pojedine aktivnosti.



**Slika 5.14.** *Ex-post analiza rezistencije vremenskih planova: usporedba plana s najvećim iznosom SM i originalnog vremenskog plana prema projektnim podacima*

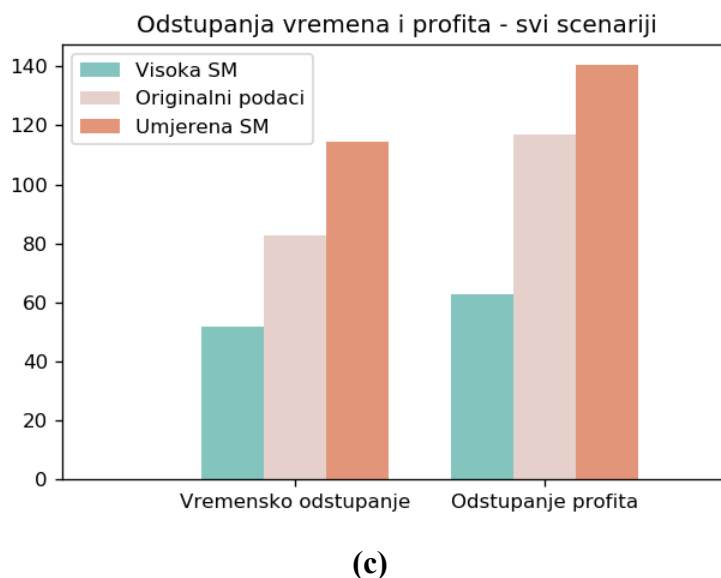
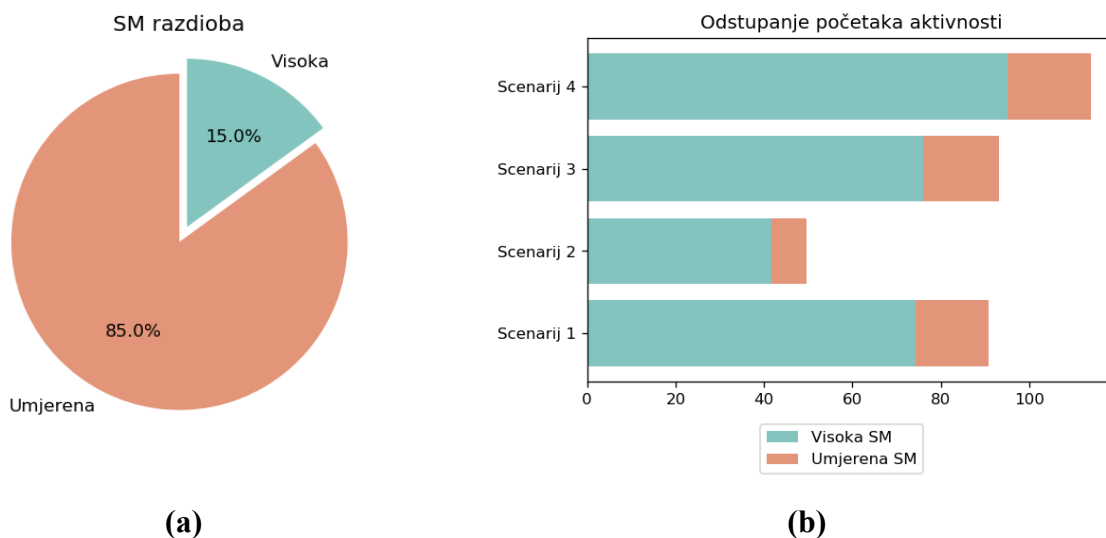
Primjenom RSSGS metode omogućena je usporedba planiranog i izvršenog stanja, ali pri analizi dobivenih rezultata treba imati na umu da se algoritamsko rješenje ostvarenog stanja može razlikovati od uistinu izvršenog stanja, čak i kada se algoritamsko rješenje temelji na stvarnim podacima. Razlog tome je činjenica da je algoritamski izračun izvedenog stanja u suštini pojednostavljena procjena stvarnog izvršenja projektnih aktivnosti. U upravljanju izvedbom projekta, algoritamske procedure služe kao pomoć u planiranju i donošenju odluka, ali je na koncu ipak čovjek (a ne algoritam) odgovoran za donošenje odluka. U stvarnosti, voditelj/ica projekta donosi odluke na temelju dinamičnih projektnih informacija koje postaju dostupne protokom vremena te je takav proces odlučivanja iznimno teško modelirati primjenom algoritamskih procedura. S obzirom na dugotrajnost izvedbe kompleksnih građevinskih projekata i nepostojanje svih raspoloživih informacija o procesu donošenja odluka tijekom izvedbe projekta, u ovom radu korištena je RSSGS metoda za procjenu izvršenog stanja. Ova metoda na temelju stvarnih podataka o vremenima pojedinih aktivnosti (uz dodatne hipotetske scenarije) procjenjuje izvršeno stanje projekta, tj. računaju se početci svih projektnih aktivnosti da bi se na što objektivniji način

prosudila rezistencija početnih planova u uvjetima projektne neizvjesnosti. Nakon što je RSSGS metodom konstruirana izvedba građevinskog projekta (tj. određeni su početci svih aktivnosti), na temelju hipotetskih financijskih podataka (tablica 5.9.) te primjenom razvijenog financijskog modula (potpoglavlje 4.3.1. ove disertacije) proračunat je financijski tok projekta kako bi se mogla ustvrditi odstupanja planiranog i ostvarenog stanja.

Na ovaj način dobiveni su sljedeći rezultati *ex-post* analize koja uspoređuje odstupanja od planiranog roka i profita za najrezistentniji početni plan (tamnije boje u dijagramu sa slike 5.14.) i originalni plan prema dostupnim projektnim podacima (svjetlije boje u dijagramu na slici 5.14.). Kao što je vidljivo s dijagrama na slici 5.14., i vremenska i financijska odstupanja za najrezistentniji vremenski plan znatno su manja u odnosu na originalni vremenski raspored za sve realizacije projektnih scenarija. Ovdje su obje vrste odstupanja po pitanju ključnih pokazatelja projektne uspješnosti prikazana na objedinjenoj skali, tj. vremenska odstupanja su prikazana u vremenskim jedinicama (dani), a financijska odstupanja su prikazana u tisućama financijskih jedinica (EUR). U originalnome scenariju, scenariju br. 1, razlika planiranog i ostvarenog stanja za najrezistentniji vremenski plan je svega 5 dana, a razlika planiranog i ostvarenog profita je 19,680 financijskih jedinica (EUR). Za usporedbu, originalni plan (izvođačev početni plan, tablica D.5.) je polučio znatno lošije rezultate, njegovo vremensko odstupanje dobiveno RSSGS algoritmom iznosi 88 dana, a profitna devijacija je 123,700 financijskih jedinica (EUR). U scenariju br. 2 rezultati su sljedeći: vremenski plan s najvišim iznosom SM mjere ne pokazuje nikakva vremenska odstupanja, a i odstupanje ostvarenog profita je u relativno niskim granicama, tj. radi se o razlici od samo 4,450 financijskih jedinica (EUR). Originalni plan u drugom scenariju pokazuje 29 dana vremenskog odstupanja i 45,130 EUR odstupanja u ostvarenju profita.

Treći scenarij je najbližnji prvome, a tu se radi o vremenskom odstupanju od 15 dana i profitnom odstupanju od 29,660 EUR za najrezistentniji početni plan te o vremenskom odstupanju od 98 dana i profitnom odstupanju od 133,510 EUR za originalni vremenski raspored. Zaključno, scenarij broj 4. pokazuje odstupanje od 33 dana u usporedbi planiranog i ostvarenog roka izvedbe za plan s najvećom vrijednosti SM mjere te devijaciju profita od 62,710 za isti vremenski plan. Usporedno s time, zadnji scenarij demonstrira vremensko kašnjenje od 116 dana te odstupanje od planiranog profita za 164,710 financijskih jedinica (EUR).

Drugi korak *ex-post* analize odnosi se na kumulativnu ocjenu ponašanja Pareto skupa rješenja za različite scenarije projektne neizvjesnosti. Rezultati su prikazani na slici 5.15.



Slika 5.15. Kumulativni rezultati ex-post analize

U drugom koraku *ex-post* analize procjenjuje se kumulativno ponašanje dobivenog Pareto skupa rješenja da bi se dobio detaljniji uvid u odnos dvaju parametara: SM mjere s jedne strane te projektnih odstupanja između planiranog i realiziranog stanja s druge strane. Za početak, dobiveni skup rezultata podijeljen je u dvije kategorije jer je zapažena razlika u iznosima SM za pojedina rješenja. Većina dobivenih rješenja u početnom Pareto skupu (85% planova) svrstana je u skupinu tzv. umjerene vrijednosti SM, a preostali dio dobivenih rješenja odnosi se na rasporede s visokom vrijednošću SM mjere (15% planova), kao što je vidljivo sa slike 5.15. (a). U prvom slučaju radi se o vrijednostima od 35 do 80 jedinica SM, a rasporede koji su ocijenjeni kao visoko rezistentni, imaju SM vrijednost veću od 80.

Nadalje, za ove dvije grupe Pareto rješenja analizirano je vremensko odstupanje početaka aktivnosti po prethodno opisanim scenarijima izvedbe projekta. Na slici 5.15. (b) može se vidjeti da scenariji 1 i 3 opet pokazuju slične rezultate: prosječna kašnjenja u počecima aktivnosti su redom 74,34 i 76,11 dana za planove s visokom SM vrijednosti te 90,86 i 93,1 dana za planove s umjerenom SM vrijednosti. Drugi scenarij pokazuje sljedeće rezultate po pitanju prosječnih kašnjenja aktivnosti: 41,59 dana za grupu rasporeda s visokom SM te 49,55 dana za rasporede s umjerenom SM. Posljednji scenarij otkriva da je prosječno kašnjenje aktivnosti u slučaju visoke SM 95,14 dana te 114 dana za rasporede s umjerenom vrijednosti SM. Prema dodatnom pokazatelju stabilnosti početnih planova, opet se pokazalo da vremenski rasporedi s visokom SM ocjenom pokazuju bolji stupanj rezistencije na neizvjesnosti u projektu.

Konačno, provedena je kumulativna analiza za sve scenarije gdje se uspoređuju odstupanja dviju grupa dobivenih rezultata (grupe s različitim vrijednostima SM) s odstupanjima prema originalnom vremenskom planu (na temelju dostupnih podataka i RSSGS metode izračuna ostvarenog stanja). Prema dobivenim rezultatima proračuna vidljivim sa slike 5.15. (c), početni vremenski planovi s visokom SM imaju prosječno 37% manje vremenskog kašnjenja te otprilike 46% manje financijskih odstupanja nego što je to slučaj u originalnom rješenju, ali su u prosjeku 8,82% dulji od originalnog rješenja. S druge strane, oni vremenski planovi s umjerenom SM vrijednosti pokazuju prosječno 28% više vremenskog kašnjenja projekta te cca 20% više odstupanja u ostvarenom profitu nego li je to slučaj u originalnom rješenju. Vremenski planovi s umjerenom SM vrijednosti u prosjeku su 7,15% kraći od originalnog rješenja.

Važno je za napomenuti da se dobiveni rezultati *ex-post* analize trebaju tumačiti adekvatno u kontekstu raspoloživih podataka. S obzirom na postojeća ograničenja, kao što su nepoznavanje upravljačkih procesa za vrijeme projektne izvedbe te hipotetske pretpostavke o uvjetima financiranja, postoji odstupanje između realizirane izvedbe i algoritamskog izračuna izvršenog stanja prema stvarnim podacima (realizirani raspored primjenom RSSGS algoritma). Odstupanje od planiranog roka izvedbe prema originalnom izvođačevom početnom planu u stvarnosti je manje nego što pokazuju rezultati dobiveni *ex-post* analizom, što je razumljivo jer za rekonstrukciju projektne izvedbe prema stvarnim podacima nisu bile korištene reaktivne procedure. Takve (reaktivne) metode teže minimizaciji vremenskih odstupanja između planiranog i ostvarenog stanja u fazi projektne izvedbe, a u ovom slučaju bile bi korisne za rekonstrukciju stvarne izvedbe koja bi dala manja odstupanja nego što je to bio slučaj kada se rekonstrukcija stvarne izvedbe temeljila na RSSGS algoritmu. No ipak, kao što je prethodno objašnjeno u potpoglavlju 2.2. ove disertacije, istraživanje reaktivnih procedura za vremensko upravljanje građevinskom izvedbom

nalazi se izvan okvira postojećeg istraživanja te ujedno predstavlja jedan od potencijalnih budućih smjerova istraživanja.

Teoretski govoreći, apsolutna validacija predloženog pristupa odnosila bi se na istovremenu projektnu izvedbu nekog građevinskog projekta prema dva različita početna plana, pri čemu bi svi utjecaji projektne nesigurnosti, kao i odgovor na njihovu pojavu (upravljački proces projektne izvedbe) trebali biti u potpunosti jednaki. Razumljivo, takvo nešto nije realno izvedivo, stoga su za validaciju predloženog pristupa za rezistentno vremensko planiranje građevinskih projekata nužna pojednostavljena u svrhu rekonstrukcije stvarno izvedenog stanja.

Naposljetku, kroz *ex-post* analizu koja je provedena na temelju stvarnih podataka s izvršenog građevinskog projekta, utvrđena je provodivost optimizacijskog modela za generiranje alternativnih početnih planova. Početni planovi dobiveni kao rezultat optimizacijskog procesa pokazuju različit stupanj stabilnosti na negativan utjecaj projektne neizvjesnosti, a surogatna mjera pokazala se kao dobar indikator za ocjenu rezistencije početnih planova. Primjenom *ex-post* analize pokazalo se da je predloženi optimizacijski postupak efikasan za upotrebu na stvarnom građevinskom projektu te je uočena potreba za daljnjim istraživanjem metoda koje bi preciznije interpretirale realnu građevinsku izvedbu. Unatoč svim pojednostavljenjima koja su bila nužna za rekonstrukciju stvarne izvedbe u ovoj *ex-post* analizi, evidentno je da su vremenska odstupanja najrezistentnijeg početnog plana prema originalnom scenariju manja nego što je to bilo uistinu ostvareno: završetak promatranog projekta dobiven primjenom RSSGS algoritma odstupa 5 dana (scenarij 1, slika 5.14.), a stvarno kašnjenje pri izgradnji objekta iznosilo je 11 dana (tablica D.7.). Ovakvi rezultati upućuju da je primjenom predloženog pristupa moguće generirati alternativne početne planove koji će pokazati pouzdano ostvarenje očekivanih projektnih ciljeva u nesigurnim uvjetima projektne izvedbe.

### 5.5. Komentar dobivenih rezultata

U kompleksnim građevinskim poduhvatima potrebno je pomno vrednovanje početnih planova kako bi se na vrijeme provjerili rezultati mogućih odluka i na taj način pozitivno utjecalo na pouzdanost u procesu planiranja. S ciljem procjene stabilnosti početnih planova za građevinske projekte, u petom poglavlju ove disertacije implementirane su *ex-ante* i *ex-post* analiza. Na ovaj način se kroz simulaciju (ili rekonstrukciju) projektne izvedbe vrednuje u kojoj su mjeri pojedini početni planovi (dobiveni kao rješenje optimizacijskog postupka) rezistentni na utjecaj neizvjesnosti. *Ex-ante* analiza odnosi se na procjenu stabilnosti određenog vremenskog plana u fazi planiranja projekta, tj. prije same izvedbe, a *ex-post* metoda podrazumijeva analizu stabilnosti početnog plana nakon završetka projektne izvedbe. Prema tomu, predložena *ex-ante* analiza može

poslužiti kao upravljački alat za pouzdanije planiranje građevinskih projekata, dok *ex-post* analiza primarno služi u svrhu validacije predloženog optimizacijskog modela (koji je prethodno detaljnije objašnjen u 4. poglavlju ove disertacije), ali i kao proces stjecanja novih znanja o rezistentnom planiranju građevinskih projekata.

U prvom dijelu analize performansi rezistentnih početnih planova, tj. u *ex-ante* analizi sagledan je jednostavan, teoretski primjer (optimizacija hijerarhijskim pristupom i simulacija uvođenjem dodatnih resursno-tehnoloških veza) te kompleksniji referentni podaci iz standardne PSPLIB baze podataka (optimizacija genetskim algoritmom te simulacija SSGS metodom i re-optimizacijom) [121]. U drugom dijelu (*ex-post* analizi) uzeti su stvarni podaci prethodno izvršenog građevinskog projekta (optimizacija genetskim algoritmom te rekonstrukcija izvedenog stanja RSSGS algoritmom i dodatnim scenarijima neizvjesnosti). Generalno, u analizama performansi početnih planova ispitana je rezistencija različitih planova iz skupa optimalnih rješenja (dobivenih egzaktnim hijerarhijskim ili evolucijskim metaheurističkim postupkom u ovisnosti o složenosti promatrane projektne mreže) te je sagledan odnos surogatne mjere i stabilnosti početnih planova.

*Ex-ante* analiza izvršena je na tri primjera različitog stupnja složenosti: na početku je razmatran teoretski primjer projektne mreže od 8 aktivnosti, a zatim su istraživani kompleksniji primjeri projektnih mreža sastavljeni od 30 i 120 aktivnosti. U svim primjerima ispitivani su ključni projektni pokazatelji primjenom proširene Monte Carlo simulacije koja uzima u obzir ne samo tehnološka, već i resursna ograničenja. Za sve teoretske primjere određeni su histogrami razdiobe vjerojatnosti po pitanju ostvarenja planiranog roka izvedbe te su analizirani financijski aspekti projekta u usporedbi početnih planova jednakog trajanja, ali različitih vrijednosti surogatne mjere i očekivanog profita. Prema svim razmatranim kriterijima za ocjenu stabilnosti početnog plana, rezultati *ex-ante* analize upućuju da početni planovi s boljim iznosom SM vrijednosti imaju veću rezistenciju na negativan utjecaj projektne neizvjesnosti nego što je to slučaj s početnim planovima jednakog trajanja, ali nižim iznosom SM mjere. Konkretno, u odnosu planiranog i simuliranog stanja početni planovi s višom vrijednosti SM mjere pokazuju manja odstupanja i po pitanju vjerojatnosti ostvarenja ključnih projektnih performansi, ali i po pitanju manjih kašnjenja nego što je to slučaj kod početnih planova koji imaju niže vrijednosti SM mjere.

Na početku *ex-post* analize procijenjeno je ponašanje početnog plana s najvećom SM mjerom u usporedbi s originalnim početnim planom prema javno dostupnim podacima za stvarni primjer građevinskog projekta. Rezultati *ex-post* analize upućuju da je primjenom optimizacijskih metoda moguće pronaći početne planove koji će imati prihvatljivo mala odstupanja u pogledu planiranih i ostvarenih rezultata za ključne indikatore projektne uspješnosti (rok i troškovi izvedbe



građevinskog projekta). Međutim, odabir početnih planova s visokom vrijednosti SM mjere sa sobom povlači i duže vrijeme planirane izvedbe projekta. U ovom primjeru, vrijeme izvedbe projekta prema početnom planu s najvišom SM mjerom je za 18,78% duže od planiranog trajanja prema originalnome rasporedu aktivnosti.

```
X = [ [[list([4, 3, 1, 2, 5, 6, 8, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 17, 19, 25, 33, 34, 36, 35, 20, 23, 22, 38, 28, 24, 29, 21, 26, 27, 37, 31, 30, 32, 40, 39, 41, 43, 47, 48, 46, 42, 49, 44, 45]),
list([0, 0, 60, 44, 9, 80, 140, 170, 176, 184, 192, 206, 209, 229, 239, 254, 269, 289, 289, 299, 327, 423, 325, 321, 347, 309, 424, 444, 319, 387, 321, 335, 349, 332, 399, 319, 339, 354, 340, 349, 348, 419, 382, 373, 434, 439, 399, 425, 434, 449, 454]),
[[list([4, 3, 1, 2, 5, 6, 8, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 17, 19, 25, 29, 20, 34, 33, 30, 28, 31, 22, 32, 21, 37, 27, 35, 36, 26, 23, 38, 24, 40, 39, 41, 43, 47, 48, 46, 42, 49, 44, 45]),
list([0, 0, 60, 4, 42, 80, 140, 170, 175, 184, 191, 203, 209, 229, 239, 254, 269, 289, 271, 299, 323, 416, 326, 320, 346, 309, 460, 457, 319, 336, 351, 336, 344, 425, 357, 319, 428, 358, 334, 340, 346, 365, 381, 367, 421, 452, 394, 400, 430, 465, 470]),
[[list([4, 3, 1, 2, 5, 6, 8, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 17, 19, 25, 33, 34, 36, 35, 20, 23, 22, 38, 28, 24, 29, 21, 26, 27, 37, 31, 30, 32, 40, 39, 41, 43, 47, 48, 46, 42, 49, 44, 45]),
list([0, 0, 60, 30, 35, 80, 140, 170, 179, 184, 187, 204, 209, 229, 239, 254, 269, 289, 282, 299, 335, 409, 320, 322, 348, 309, 346, 349, 322, 369, 366, 338, 346, 382, 364, 320, 363, 319, 338, 344, 345, 377, 386, 369, 409, 386, 406, 384, 392, 418, 423]),
[[list([4, 3, 1, 2, 5, 6, 8, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 17, 19, 25, 33, 34, 36, 35, 20, 23, 22, 38, 28, 24, 29, 21, 26, 27, 37, 31, 30, 32, 40, 39, 42, 43, 46, 41, 47, 48, 45, 44, 49]),
list([0, 0, 60, 14, 59, 80, 140, 170, 176, 184, 185, 206, 209, 229, 239, 254, 269, 289, 296, 299, 325, 373, 323, 320, 345, 309, 344, 328, 320, 384, 347, 335, 341, 330, 383, 319, 380, 334, 335, 344, 347, 372, 369, 365, 384, 399, 392, 383, 389, 404, 409))
F = [[454.0, 64.805, 690.61], [470.0, 71.169, 665.24], [423.0, 59.784, 736.18], [409.0, 53.895, 736.72]]
```

**Slika 5.16.** *Ilustrativni primjer programskog zapisa za prikaz Pareto skupa rješenja (izlazno rješenje optimizacijskog postupka)*

Kako bi se detaljnije ispitala opravdanost vremenskih produljenja u početnom planu, drugi korak analize obuhvatio je veći skup konačnih rješenja dobivenih primjenom razvijenog genetskog algoritma. Ilustrativni (skraćeni) prikaz izlaznog rješenja optimizacije za konkretni primjer u *ex-post* analizi dan je na slici 5.16. Iz ovog prikaza vidljivo je da alternativni početni planovi mogu trajati kraće ili duže od originalnog rješenja. U ovom slučaju, Pareto skup početnih rješenja podijeljen je na dvije grupe: vremenski planovi s visokom SM mjerom u prosjeku su 8,82% dulji od originalnog rješenja, a vremenski planovi s umjerenom SM mjerom u prosjeku imaju za 7,15% kraće vremensko trajanje od izvorno korištenog vremenskog rasporeda. Ipak, i ovdje rezultati analize potvrđuju da su početni vremenski planovi s višim vrijednostima SM mjere stabilniji i po pitanju dostizanja ključnih ciljeva projekta (rok izvedbe i planirani troškovi), ali i po pitanju vremenskih odstupanja u počecima pojedinih aktivnosti (bitno za planiranje nabave materijala, kooperantskih usluga i sl.).

Na osnovu prethodno izloženog, unatoč neizbježnim pojednostavljenjima pri proračunu realiziranih stanja projekta koja su korištena u ovom radu, rezultati analize ukazuju da je moguće realizirati početne planove različitog stupnja stabilnosti u okviru prihvatljivog trajanja projekta te da je SM mjera dobar pokazatelj rezistencije početnih planova na negativan utjecaj projektne neizvjesnosti. Također, primjena razvijenog genetskog algoritma moguća je i za razmjerno složene projektne mreže, a vrijeme izvršavanja optimizacijskog algoritma prihvatljivo je za praktičnu upotrebu.

## 6. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

### 6.1. Zaključci doktorskog rada

U okviru ovog doktorskog istraživanja definiran je metodološki pristup za rezistentno vremensko planiranje građevinskih projekata kojim je omogućeno stvaranje pouzdanih početnih planova u nesigurnim uvjetima projektne izvedbe. Doprinos disertacije ostvaren je ponajprije kroz izradu optimizacijskog modela koji se sastoji od višeciljnog problema i adekvatne metaheurističke metode za njegovo rješavanje (genetski algoritam). Pored razvijenog optimizacijskog modela, predložena metodologija obuhvaća dodatne aspekte: izrađen je taksonomski model za utvrđivanje izvora projektne nesigurnosti u građevinskim projektima te simulacijski model za analizu i predviđanje projektne izvedbe na temelju rezistentnog početnog plana dobivenog kao izlazno rješenje optimizacijskog postupka.

Objedinjenom primjenom taksonomskog, optimizacijskog i simulacijskog modela doprinosi se efektivnom planiranju građevinske izvedbe jer se negativan utjecaj nesigurnosti sagledava već u početnoj fazi upravljanja projektom. Opisanim pristupom prvo je u fazi optimizacije omogućena izrada alternativnih početnih planova, a zatim i njihova daljnja analiza u procesu simulacije. Upotrebom predloženih metoda omogućuje se kvantitativna potvrda na taktičko-operativnoj razini u procesu donošenja odluke o odabiru početnog plana iz perspektive izvođača građevinskih radova.

Zbog negativnog utjecaja projektne nesigurnosti (čiji su izvori detektirani uz pomoć razvijenog taksonomskog modela), postojeći matematički problem za vremensko planiranje projekata u ograničenim resursima (eng. *RCPS*) proširen je dodatnim funkcijama cilja. Nadogradnjom osnovnog problema za vremensko planiranje projekata postignuto je modeliranje stvarnog problema gdje dodatne funkcije cilja predstavljaju najvažnije funkcije projektnog upravljanja: istovremeno se traži rješenje (početni plan) koji će skratiti vrijeme izvedbe i smanjiti troškove projekta, ali se pri tome naglašava potreba da dobiveno rješenje bude što stabilnije tijekom neizvjesne izvedbe.

Stabilnost, tj. rezistencija početnog plana kvantificira se kroz stupanj odstupanja između početnog rješenja i simuliranog izvršenja. S obzirom na to da je rješavanje postavljenog problema iznimno kompleksno sa stajališta kombinatorne optimizacije (već je osnovni *RCPS* problem *NP-hard* klase složenosti [14]), stabilnost se u višeciljnom optimizacijskom problemu unapređuje na jednostavan način kroz maksimizaciju tzv. surogatne mjere za ocjenu rezistencije početnog plana.

Predložena surogatna mjera u vidu dodatne funkcije cilja omogućuje rješavanje postavljenog optimizacijskog problema u računalno efikasnom vremenu izvršenja.

Kako bi se omogućila implementacija novog pristupa planiranju za projektne mreže s velikim brojem aktivnosti (koje su karakteristične za kompleksne građevinske projekte), daljnji fokus ovog istraživanja bio je usmjeren na razvoj metode i programske podrške za rješavanje postavljenog optimizacijskog problema upotrebom metaheurističkog algoritma. Izrada metaheurističkog (genetskog) algoritma provedena je u Python programskom jeziku pri čemu su predložene nove metode i procesi za adekvatno rješavanje sveobuhvatnog problema rezistentnog vremenskog planiranja. U fazi prilagodbe postojećeg NSGA-II algoritma bilo je potrebno osmisliti prikaz jedinki genetskog algoritma na način da se obuhvate svi aspekti resursno-ograničenog vremenskog planiranja. Osim toga, dodatna poboljšanja postojećih genetskih operatora omogućuju pretraživanje većeg skupa potencijalnih rješenja, što u konačnici poboljšava efikasnost optimizacijskog postupka.

Konačno, predložena metodologija rezistentnog vremenskog planiranja objedinjena je primjenom simulacije na primjerima projektnih mreža različitog stupnja složenosti. Tijekom ovog istraživanja utvrđeno je da postojeći simulacijski alati zanemaruju resursna ograničenja projekta, stoga su predloženi različiti načini pomoću kojih je moguće uključiti resursne aspekte u fazi simulacije. U petom poglavlju, na teoretskim primjerima istražuju se različiti pristupi za proširenu Monte Carlo simulaciju: uvođenje dodatnih resursno-tehnoloških veza, primjena SSGS algoritma te ponovna optimizacija (re-optimizacija) u fazi simulacije.

U petom poglavlju ove disertacije kronološki je prikazan proces validacije predloženog metodološkog pristupa. Za svaki razmatrani primjer prvo je optimizacijom riješen postavljeni višeciljni problem, a zatim je simulacijom analiziran stupanj rezistencije pojedinog početnog plana. Pri tome je u početnoj fazi istraživanja, kada je naglasak bio na validaciji postavljenog optimizacijskog problema (poglavlje 4.3.), razmatran isključivo egzaktni pristup za optimizaciju problema s malim brojem projektnih aktivnosti (poglavlje 5.3.1.), dok je za simulaciju s uključenim resursima osmišljena metoda uvođenja dodatnih resursno-tehnoloških veza. Ovaj primjer pokazuje da početni planovi koji imaju jednake ili skoro jednake vrijednosti ciljnih funkcija (očekivanog projektnog trajanja i njegove dobiti), ali različite iznose surogatne mjere, ipak mogu ostvariti značajne razlike po pitanju vjerojatnosti ostvarenja očekivanih projektnih performansi, sudeći po rezultatima proširene Monte Carlo simulacije. Pri tome se pokazalo da rješenja s većim iznosom surogatne mjere za ocjenu rezistencije početnog plana pokazuju

stabilnije rezultate u nesigurnim uvjetima projektne izvedbe, tj. da su predložena surogatna mjera i rezistencija u pozitivnoj korelaciji [89].

U završnoj fazi doktorskog istraživanja, nakon što je genetski algoritam razvijen i implementiran za upotrebu, omogućena je primjena optimizacije na projektним mrežama s većim brojem aktivnosti. Na složenim primjerima projekta prethodno nije bilo moguće implementirati predloženu metodologiju, jer egzaktni postupci optimizacije nisu primjenjivi za rješavanje velikih primjera (cca 30 aktivnosti i više) uslijed prevelike kombinatorne složenosti postavljenog problema. Prema tome, validacija predloženog metodološkog pristupa konačno je provedena kroz optimizaciju genetskim algoritmom za projektne mreže većeg stupnja složenosti (30-120 aktivnosti) koji odgovara veličini nekih stvarnih građevinskih projekata (npr. u poglavlju 5.4. razmotreni su podaci prema izvedenom građevinskom projektu koji se sastoji od 49 aktivnosti).

U poglavlju 5.3.2. predložena metodologija rezistentnog vremenskog planiranja validirana je za složeni primjer projektne mreže tako da je optimizacija provedena genetskim algoritmom, a simulacija korištenjem SSGS algoritma. Nakon toga, u poglavlju 5.3.3. također je provedena optimizacija upotrebom razvijenog genetskog algoritma, ali je simulacija ovoga puta izvršena ponovnom optimizacijom. Opisanim razmatranjima ustanovljeno je da se korištenje SSGS algoritma može smatrati najpogodnijim za simulaciju projektних mreža velikog stupnja složenosti, tj. za kompleksne građevinske projekte. Osim toga, temeljem validacije složenijih projektних mreža, potvrđena je pretpostavka da početni rasporedi s većim iznosom surogatne mjere pokazuju stabilnije rezultate u simuliranom izvršenju projekta, gdje su vjerojatnosti dostizanja očekivanih projektних performansi veće, a vremenska kašnjenja u izvedbi manja.

Upotrebom razvijenog pristupa za rezistentno vremensko planiranje omogućen je odabir pouzdanijih početnih planova u upravljačkom procesu. Iz perspektive izvođača radova, postiže se sveobuhvatno planiranje izvedbe građevinskih aktivnosti jer se već u početnoj fazi razmatraju tehnološka, resursna i financijska ograničenja za građevinski projekt čija je izvedba podložna negativnom utjecaju nesigurnosti. Primjena genetskog algoritma omogućuje izradu alternativnih varijantnih rješenja u prihvatljivom vremenu izračuna čak i za složene projektne mreže. Daljnja simulacijska analiza različitih početnih planova pomaže izvođaču da potpunije sagleda vjerojatnost ostvarenja projektnih ciljeva u neizvjesnim uvjetima projektne izvedbe te pridonosi boljoj informiranosti po pitanju financijske izvodljivosti. Pošto kompleksni građevinski projekti zahtijevaju izdašna financijska ulaganja, detaljna analiza novčanog toka u proširenoj Monte Carlo simulaciji može unaprijediti pregovarački proces u fazi određivanja dopuštenog kreditnog limita,

jer se važne projektne odluke (kao što su odabir početnog plana i visina kreditnog limita) donose na temelju kvantitativnih podataka.

### 6.2. Smjernice za buduća istraživanja

U ovom istraživanju, rezistencija se u predloženom pristupu za vremensko planiranje građevinskih projekata očituje kroz tri osnovna elementa: robusnost (eng. *robustness*), prilagodljivost (eng. *adaptability*) i mogućnost oporavka (eng. *recoverability*). Prvi element, robusnost, odnosi se na mogućnost vremenske apsorpcije negativnog utjecaja nesigurnosti jer se resursno-tehnološke vremenske rezerve adekvatno raspoređuju u početnom planu. Nadalje, prilagodljivost je ostvarena kroz mogućnost odabira povoljnog početnog plana iz skupa Pareto-optimalnih rješenja. Primjenom dodatnih informacija kao što su prihvatljiv rok očekivane izvedbe, zadovoljavajuća razina pretpostavljene dobiti te dogovorena razina kreditnog limita, izvođaču je pružena mogućnost prilagodbe za različita ograničenja projektne izvedbe. Osim toga, uvođenjem financijskog modula te postavljanjem dodatne funkcije cilja koja maksimizira očekivanu dobit, apsorbira se ekonomska nesigurnost kroz razmatranje optimalnog novčanog toka za izvođača građevinskih radova. Na opisani način, pozitivno se utječe na mogućnost oporavka jer u početnom planu postoje dovoljne vremenske i financijske rezerve za apsorpciju negativnog utjecaja neizvjesnosti, tj. pružena je mogućnost oporavka ukoliko dođe do ostvarenja nepovoljnih uvjeta tijekom izvedbe građevinskog projekta. Međutim, tijekom ovog istraživanja, ustanovljeni su mogući smjerovi daljnjeg istraživanja u svakom od ključnih područja rezistencije.

Na primjer, robusnost (eng. *robustness*) predloženog pristupa može biti unaprijeđena implementacijom rezervi u resursnim aspektima projekta. Jedno od potencijalnih daljnjih smjerova istraživanja može biti usmjereno na proučavanje optimalnih načina za planiranje raspodjele resursa u kontekstu rezistentnog vremenskog planiranja. Prostor za daljnji razvoj i primjenu postojećeg matematičkog modela postoji u vidu dodatnih funkcija cilja kojima bi se balansirala fluktuacija resursa na što pouzdaniji način.

Nadalje, prilagodljivost (eng. *adaptability*) postojećeg modela može biti unaprijeđena kroz stvaranje različitih financijskih modula za drugačije oblike financiranja građevinskih projekata. Prednost dosadašnjeg pristupa je u modularnom dizajnu programskog koda koji omogućuje integraciju s budućim aplikacijama. Osim toga, prilagodljivost predloženog modela može se dalje razvijati omogućavanjem alternativnih ruta u osnovnoj projektnoj mreži. To bi značilo da se još u ranoj fazi planiranja projekta omogućava sagledavanje različitih varijantnih rješenja za izvedbu pojedinih dijelova projekta, što može pozitivno utjecati na donošenje konačne odluke o odabiru početnog plana.

Štoviše, buduće istraživanje može biti usmjereno na proučavanje reaktivnih procedura za pouzdano upravljanje izvršenjem projekta. Na ovaj način bi se u velikoj mjeri doprinijelo poboljšanju mogućnosti oporavka (eng. *recoverability*) početnog plana što bi proširilo primjenu rezistentnog pristupa od faze planiranja na fazu izvođenja. Ovim smjerom istraživanja moguće je unaprijediti proces upravlja projektom u širem kontekstu i na sveobuhvatniji način.

U svakom slučaju, daljnje istraživanje rezistentnog vremenskog planiranja projekata u građevinarstvu može obuhvatiti općenito unaprjeđenje optimizacijskih i simulacijskih metoda, kao i integraciju postojećeg modela (implementiranog u Python računalnom jeziku za potrebe rješavanja postavljenog problema) s drugim suvremenim alatima za učinkovito upravljanje projektima (npr. BIM, eng. *Building Information Modeling*).

Konkretno, mogu se implementirati dodatni algoritmi za rješavanje optimizacijskog problema (npr. tabu pretraživanje, eng. *Tabu Search*, simulirano prekaljivanje, eng. *Simulated Annealing*, optimizacija kolonijom mrava, eng. *Ant Colony Optimization*, itd.) te će se na taj način omogućiti detaljnija analiza i usporedba performansi u procesu izračuna. Osim toga, daljnje istraživanje i razvoj optimizacijskih metoda može biti usmjeren na primjenu suvremenih paradigmi poput kvantnog računanja (eng. *Quantum computing*), za čiju se primjenu već razmatraju novi modeli algoritama primjenjivi na planiranje projekata (npr. kvantni genetski algoritmi, eng. *Quantum Genetic Algorithm* [126–128]).

S druge strane, opći razvoj simulacijskih metoda i procesa može biti usmjeren na istraživanje inovativnih pristupa za modeliranje utjecaja neizvjesnosti. Osim varijabilnih trajanja pojedinih aktivnosti, može se razmatrati nesigurnost upotrebe i dostupnosti resursa te utjecaj nedeterminističke projektne mreže (pojedine aktivnosti mogu biti izvršene tek s određenom vjerojatnošću ili izvršenje određenog dijela projekta može biti podložno promjenama) na dostizanje očekivanih performansi projekta. Osim toga, prostor za istraživanje postoji i u implementaciji simulacijskih tehnika u procesu optimizacije (traženja rješenja). Prema nedavnom istraživanju [82], manje od 10% objavljenih radova koji primjenjuju NSGA-II za vremensko planiranje projekata uzima u obzir postojanje nesigurnosti.

Konačno, potencijalna integracija predstavljenih tehnika za rezistentno vremensko planiranje projekata (optimizacija, simulacija, analiza nesigurnosti upotrebom taksonomskog modela) s BIM alatom može pridonijeti daljnjoj automatizaciji procesa planiranja, pouzdanijoj upotrebi te jednostavnijem korištenju razvijenih alata u objedinjenoj upravljačkoj platformi.

## 7. LITERATURA

1. Luo, L.; He, Q.; Jaselskis, E.J.; Xie, J. Construction Project Complexity: Research Trends and Implications. *J. Constr. Eng. Manage.* **2017**, *143*, 04017019, doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001306.
2. O'Connor, J.; Koo, H. Proactive Design Quality Assessment Tool for Building Projects. *Journal of Construction Engineering and Management* **2021**, *147*, doi:https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001980.
3. CIOB Research - Managing the Risk of Delayed Completion in the 21st Century.
4. Herroelen, W.; Leus, R. Project Scheduling under Uncertainty: Survey and Research Potentials. *European Journal of Operational Research* **2005**, *165*, 289–306, doi:10.1016/j.ejor.2004.04.002.
5. Elena Bruni, M.; Beraldi, P.; Guerriero, F.; Pinto, E. A Scheduling Methodology for Dealing with Uncertainty in Construction Projects. *Engineering Computations* **2011**, *28*, 1064–1078, doi:10.1108/02644401111179036.
6. Han, F.; Bogus, S.M. Evaluating Construction Work Disruptions Using Resilient Short-Interval Scheduling: A Case Study. In Proceedings of the Construction Research Congress 2018; American Society of Civil Engineers: New Orleans, Louisiana, March 29 **2018**; pp. 533–543.
7. Radujković, M. i suradnici *Planiranje i Kontrola Projekata*; **2012**.
8. Demeulemeester, E., L. *Project Scheduling - A Research Handbook*; Kluwer Academic Publishers: New York, **2002**.
9. *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*; Project Management Institute, **2017**.
10. *Construction Extension to the PMBOK® Guide*; Project Management Institute, **2016**.
11. Zhou, J.; Love, P.E.D.; Wang, X.; Teo, K.L.; Irani, Z. A Review of Methods and Algorithms for Optimizing Construction Scheduling. *Journal of the Operational Research Society* **2013**, *64*, 1091–1105, doi:10.1057/jors.2012.174.



12. Ng, S.T.; Zhang, Y. Optimizing Construction Time and Cost Using Ant Colony Optimization Approach. *J. Constr. Eng. Manage.* **2008**, *134*, 721–728, doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:9(721).
13. Venkrbec, V.; Galić, M.; Klanšek, U. Optimizacija Građevinskih Procesa – Metode, Alati i Primjena. *Građevinar* **2018**, *70*, 539–606, doi:10.14256/JCE.1719.2016.
14. Blazewicz, J.; Lenstra, J.K.; Kan, A.H.G.R. Scheduling Subject to Resource Constraints: Classification and Complexity. *Discrete Applied Mathematics* **1983**, *5*, 11–24, doi:10.1016/0166-218X(83)90012-4.
15. Holling, C.S. Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* **1973**, 1–23.
16. Rahi, K. Project Resilience: A Conceptual Framework. *IJISPM - International Journal of Information Systems and Project Management* **2019**, 69–83, doi:10.12821/ijispm070104.
17. Breque, M.; De Nul, L.; Petridis, A. *Industry 5.0: Towards a Sustainable, Human-Centric and Resilient European Industry*; European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Publications Office, **2021**.
18. Hollnagel, E.; Woods, D.; Leveson, N. *Resilience Engineering*, Ashgate, **2006**.
19. Xiong, J.; Chen, Y.; Zhou, Z. Resilience Analysis for Project Scheduling with Renewable Resource Constraint and Uncertain Activity Durations. *JIMO* **2015**, *12*, 719–737, doi:10.3934/jimo.2016.12.719.
20. Thomé, A.M.T.; Scavarda, L.F.; Scavarda, A.; Thomé, F.E.S. de S. Similarities and Contrasts of Complexity, Uncertainty, Risks, and Resilience in Supply Chains and Temporary Multi-Organization Projects. *International Journal of Project Management* **2016**, *34*, 1328–1346, doi:10.1016/j.ijproman.2015.10.012.
21. Crawford, L.; Langston, C.; Bajracharya, B. Participatory Project Management for Improved Disaster Resilience. *Int J of Dis Res in the Bu Env* **2013**, *4*, 317–333, doi:10.1108/IJDRBE-07-2012-0020.
22. Schatteman, D.; Herroelen, W.; Van de Vonder, S.; Boone, A. Methodology for Integrated Risk Management and Proactive Scheduling of Construction Projects. *J.*

- Constr. Eng. Manage.* **2008**, *134*, 885–893, doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(2008)134:11(885).
23. Schroeder, K.; Hatton, M. Rethinking Risk in Development Projects: From Management to Resilience. *Development in Practice* **2012**, *22*, 409–416, doi:10.1080/09614524.2012.664623.
24. Geambasu, G. Expect the Unexpected: An Exploratory Study on the Conditions and Factors Driving the Resilience of Infrastructure Projects. Ph. D. Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne: Switzerland, **2011**.
25. Giezen, M.; Salet, W.; Bertolini, L. Adding Value to the Decision-Making Process of Mega Projects: Fostering Strategic Ambiguity, Redundancy, and Resilience. *Transport Policy* **2015**, *44*, 169–178, doi:10.1016/j.tranpol.2015.08.006.
26. Han, F.; Bogus, S.M.; Zhang, S. Evaluation of Resilient Practices for Capital Project Planning under Variable Budget Constraints. In Proceedings of the Construction Research Congress 2020; American Society of Civil Engineers: Tempe, Arizona, November 9 **2020**; pp. 105–114.
27. Rahi, K.; Bourgault, M.; Preece, C. Risk and Vulnerability Management, Project Agility and Resilience: A Comparative Analysis. *IJISPM - International Journal of Information Systems and Project Management* **2021**, 5–21, doi:10.12821/ijispm090401.
28. Dahmani, S.; Ben-Ammar, O.; Jebali, A. Resilient Project Scheduling Using Artificial Intelligence: A Conceptual Framework. In *Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems*; Dolgui, A., Bernard, A., Lemoine, D., von Cieminski, G., Romero, D., Eds.; IFIP Advances in Information and Communication Technology; Springer International Publishing: Cham, **2021**; Vol. 630, pp. 311–320 ISBN 978-3-030-85873-5.
29. Li, L.; Liu, W.; Chen, Y.; Yang, S. Reactive Procedure for Robust Project Scheduling under the Activity Disruptions. *KSCE J Civ Eng* **2021**, *25*, 3213–3222, doi:10.1007/s12205-021-1555-y.
30. Torabi Yeganeh, F.; Zegordi, S.H. A Multi-Objective Optimization Approach to Project Scheduling with Resiliency Criteria under Uncertain Activity Duration. *Ann Oper Res* **2020**, *285*, 161–196, doi:10.1007/s10479-019-03375-z.

31. Brucker, P.; Drexler, A.; Mo, R.; Pesch, E. Resource-Constrained Project Scheduling: Notation, Classification, Models, and Methods. *European Journal of Operational Research* **1999**, *39*.
32. Hartmann, S.; Briskorn, D. An Updated Survey of Variants and Extensions of the Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research* **2022**, *297*, 1–14, doi:10.1016/j.ejor.2021.05.004.
33. Pellerin, R.; Perrier, N.; Berthaut, F. A Survey of Hybrid Metaheuristics for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research* **2020**, *280*, 395–416, doi:10.1016/j.ejor.2019.01.063.
34. Franco-Duran, D.M.; Garza, J.M. de la Review of Resource-Constrained Scheduling Algorithms. *J. Constr. Eng. Manage.* **2019**, *145*, 03119006, doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001698.
35. Habibi, F.; Barzinpour, F.; Sadjadi, S.J. Resource-Constrained Project Scheduling Problem: Review of Past and Recent Developments. *Journal of Project Management*, **2018**, 55–88, doi:10.5267/j.jpjpm.2018.1.005.
36. Bruni, M.E.; Di Puglia Pugliese, L.; Beraldi, P.; Guerriero, F. An Adjustable Robust Optimization Model for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem with Uncertain Activity Durations. *Omega* **2017**, *71*, 66–84, doi:10.1016/j.omega.2016.09.009.
37. Hrvatski jezični portal: kolokvijalno značenje pojma neizvjesnosti (nesigurnosti).  
Dostupno online:  
[https://hjp.znanje.hr/index.php?show=search\\_by\\_id&id=eF9uXxE%3D](https://hjp.znanje.hr/index.php?show=search_by_id&id=eF9uXxE%3D)
38. Perminova, O.; Gustafsson, M.; Wikström, K. Defining Uncertainty in Projects – a New Perspective. *International Journal of Project Management* **2008**, *26*, 73–79, doi:10.1016/j.ijproman.2007.08.005.
39. Acebes, F.; Poza, D.; González-Varona, J.M.; Pajares, J.; López-Paredes, A. On the Project Risk Baseline: Integrating Aleatory Uncertainty into Project Scheduling. *Computers & Industrial Engineering* **2021**, *160*, 107537, doi:10.1016/j.cie.2021.107537.
40. Chapman, C.B.; Ward, S. *Project Risk Management: Processes, Techniques, and Insights*; 2nd ed.; Wiley: Hoboken, NJ, **2003**; ISBN 978-0-470-85355-9.

41. Ali, Z.; Zhu, F.; Hussain, S. Identification and Assessment of Uncertainty Factors That Influence the Transaction Cost in Public Sector Construction Projects in Pakistan. *Buildings* **2018**, *8*, 157, doi:10.3390/buildings8110157.
42. Guo, L.; Li, H.; Li, P.; Zhang, C. Transaction Costs in Construction Projects under Uncertainty. *Kybernetes* **2016**, *45*, 866–883, doi:10.1108/K-10-2014-0206.
43. Moret, Y.; Einstein, H.H. Construction Cost and Duration Uncertainty Model: Application to High-Speed Rail Line Project. *J. Constr. Eng. Manage.* **2016**, *142*, 05016010, doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001161.
44. Bakry, I.; Moselhi, O.; Zayed, T. Optimized Scheduling and Buffering of Repetitive Construction Projects under Uncertainty. *Eng. Const and Arch Man* **2016**, *23*, 782–800, doi:10.1108/ECAM-05-2014-0069.
45. Koulinas, G.; Xanthopoulos, A.; Tsilipiras, T.; Koulouriotis, D. Schedule Delay Risk Analysis in Construction Projects with a Simulation-Based Expert System. *Buildings* **2020**, *10*, 134, doi:10.3390/buildings10080134.
46. Zarghami, S.A. Forecasting Project Duration in the Face of Disruptive Events: A Resource-Based Approach. *Journal of Construction Engineering and Management* **2022**, *148*, doi:https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002257.
47. Sobieraj, J.; Metelski, D. Quantifying Critical Success Factors (CSFs) in Management of Investment-Construction Projects: Insights from Bayesian Model Averaging. *Buildings* **2021**, *11*, 360, doi:10.3390/buildings11080360.
48. Nasrazadani, H.; Mahsuli, M.; Talebiyan, H.; Kashani, H. Probabilistic Modeling Framework for Prediction of Seismic Retrofit Cost of Buildings. *J. Constr. Eng. Manage.* **2017**, *143*, 04017055, doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001354.
49. Olsson, R. In Search of Opportunity Management: Is the Risk Management Process Enough? *International Journal of Project Management* **2007**, *25*, 745–752, doi:10.1016/j.ijproman.2007.03.005.
50. Kurth, M.H.; Keenan, J.M.; Sasani, M.; Linkov, I. Defining Resilience for the US Building Industry. *Building Research & Information* **2019**, *47*, 480–492, doi:10.1080/09613218.2018.1452489.

51. Acebes, F.; Pajares, J.; Galán, J.M.; López-Paredes, A. Exploring the Influence of Seasonal Uncertainty in Project Risk Management. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* **2014**, *119*, 329–338, doi:10.1016/j.sbspro.2014.03.038.
52. Vose, D. *Risk Analysis: A Quantitative Guide*; 3rd ed.; Wiley: Chichester, England; Hoboken, NJ, **2008**; ISBN 978-0-470-51284-5.
53. *Resilience and Risk: Methods and Application in Environment, Cyber and Social Domains*; Linkov, I., Palma-Oliveira, J.M., Eds.; NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security; Springer Netherlands: Dordrecht, **2017**; ISBN 978-94-024-1122-5.
54. Maruvanchery, V.; Zhe, S.; Robert, T.L.K. Early Construction Cost and Time Risk Assessment and Evaluation of Large-Scale Underground Cavern Construction Projects in Singapore. *Underground Space* **2020**, *5*, 53–70, doi:10.1016/j.undsp.2018.10.002.
55. Baloi, D.; Price, A.D.F. Modelling Global Risk Factors Affecting Construction Cost Performance. *International Journal of Project Management* **2003**, *21*, 261–269, doi:10.1016/S0263-7863(02)00017-0.
56. Taillandier, F.; Taillandier, P.; Tepeli, E.; Breyse, D.; Mehdizadeh, R.; Khartabil, F. A Multi-Agent Model to Manage Risks in Construction Project (SMACC). *Automation in Construction* **2015**, *58*, 1–18, doi:10.1016/j.autcon.2015.06.005.
57. Petit, Y. Project Portfolios in Dynamic Environments: Organizing for Uncertainty. *International Journal of Project Management* **2012**, *30*, 539–553, doi:10.1016/j.ijproman.2011.11.007.
58. Zhong, Y.; Chen, Z.; Zhou, Z.; Hu, H. Uncertainty Analysis and Resource Allocation in Construction Project Management. *Engineering Management Journal* **2018**, *30*, 293–305, doi:10.1080/10429247.2018.1492269.
59. Malcolm, D.G.; Roseboom, J.H.; Clark, C.E.; Fazar, W. Application of a Technique for Research and Development Program Evaluation. *Operations Research* **1959**, *7*, 646–669, doi:10.1287/opre.7.5.646.
60. Große, C. Sources of Uncertainty in Swedish Emergency Response Planning. *Journal of Risk Research* **2019**, *22*, 758–772, doi:10.1080/13669877.2018.1459796.

61. Hsu, P.-Y.; Angeloudis, P.; Aurisicchio, M. Optimal Logistics Planning for Modular Construction Using Two-Stage Stochastic Programming. *Automation in Construction* **2018**, *94*, 47–61, doi:10.1016/j.autcon.2018.05.029.
62. Gündüz, M.; Nielsen, Y.; Özdemir, M. Quantification of Delay Factors Using the Relative Importance Index Method for Construction Projects in Turkey. *J. Manage. Eng.* **2013**, *29*, 133–139, doi:10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000129.
63. Ustinovičius, L.; Migilinskas, D.; Tamosaitiene, J.; Zavadskas, E. K.; Uncertainty analysis in construction project's appraisal phase. Conference: The 9th International Conference "Modern Building Materials, Structures and Techniques", May 16-18, **2007**, Vilnius, Lithuania.
64. Warmink, J.J.; Janssen, J.A.E.B.; Booij, M.J.; Krol, M.S. Identification and Classification of Uncertainties in the Application of Environmental Models. *Environmental Modelling & Software* **2010**, *25*, 1518–1527, doi:10.1016/j.envsoft.2010.04.011.
65. Sacco, G.M.; Yannis, T. *Dynamic Taxonomies and Faceted Search, Theory, Practice, and Experience.*; **2011**; Vol. 33; ISBN 9783642209451.
66. Wikipedia: Protégé. dostupno online:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Prot%C3%A9g%C3%A9\\_\(software\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Prot%C3%A9g%C3%A9_(software))
67. Ranganathan, S.R. *The Colon Classification*; Rutgers University Press: New Brunswick, **1965**.
68. Chapman, C.; Ward *Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights, 2nd Edition*; **2003**; ISBN 9781424435104.
69. Rafindadi, A.D.; Mikić, M.; Kovačić, I.; Cekić, Z. Global Perception of Sustainable Construction Project Risks. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* **2014**, *119*, 456–465, doi:10.1016/j.sbspro.2014.03.051.
70. Noy, N.F.; McGuinness, D.L. *Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology*. 25. dostupno online:  
[https://protege.stanford.edu/publications/ontology\\_development/ontology101.pdf](https://protege.stanford.edu/publications/ontology_development/ontology101.pdf)
71. Vučina, D. *Metode Inženjerske Numeričke Optimizacije*; Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, **2005**.

72. Zhou, J.; Love, P.E.D.; Wang, X.; Teo, K.L.; Irani, Z. A Review of Methods and Algorithms for Optimizing Construction Scheduling. *Journal of the Operational Research Society* **2013**, *64*, 1091–1105, doi:10.1057/jors.2012.174.
73. Zhang, Y.; Cui, N. Project Scheduling and Material Ordering Problem with Storage Space Constraints. *Automation in Construction* **2021**, *129*, 103796, doi:10.1016/j.autcon.2021.103796.
74. Elkabalawy, M.; Moselhi, O. Optimized Resource-Constrained Method for Project Schedule Compression. *ECAM* **2021**, *ahead-of-print*, doi:10.1108/ECAM-12-2020-1019.
75. El-Abbasy, M.S.; Elazouni, A.; Zayed, T. Finance-Based Scheduling Multi-Objective Optimization: Benchmarking of Evolutionary Algorithms. *Automation in Construction* **2020**, *120*, 103392, doi:10.1016/j.autcon.2020.103392.
76. Kar, S.; Kothari, C.; Jha, K.N. Developing an Optimum Material Procurement Schedule by Integrating Construction Program and Budget Using NSGA-II. *J. Constr. Eng. Manage.* **2021**, *147*, 04021017, doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002028.
77. ElMenshaway, M.; Marzouk, M. Automated BIM Schedule Generation Approach for Solving Time-Cost Trade-off Problems. *Engineering, Construction and Architectural Management ahead-of-print*, doi:https://doi.org/10.1108/ECAM-08-2020-0652.
78. El-Abbasy, M.S.; Elazouni, A.; Zayed, T. Generic Scheduling Optimization Model for Multiple Construction Projects. *J. Comput. Civ. Eng.* **2017**, *31*, 04017003, doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000659.
79. Tao, S.; Wu, C.; Sheng, Z.; Wang, X. Space-Time Repetitive Project Scheduling Considering Location and Congestion. *J. Comput. Civ. Eng.* **2018**, *32*, 04018017, doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000745.
80. Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S.; Meyarivan, T. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Trans. Evol. Computat.* **2002**, *6*, 182–197, doi:10.1109/4235.996017.
81. Verma, S.; Pant, M.; Snasel, V. A Comprehensive Review on NSGA-II for Multi-Objective Combinatorial Optimization Problems. *IEEE Access* **2021**, *9*, 57757–57791, doi:10.1109/ACCESS.2021.3070634.

82. Rahimi, I.; Gandomi, A.H.; Deb, K.; Chen, F.; Nikoo, M.R. Scheduling by NSGA-II: Review and Bibliometric Analysis. *Processes* **2022**, *10*, 98, doi:10.3390/pr10010098.
83. Blank, J.; Deb, K. Pymoo: Multi-Objective Optimization in Python. *IEEE Access* **2020**, *8*, 89497–89509, doi:10.1109/ACCESS.2020.2990567.
84. Isah, M.A.; Kim, B.-S. Integrating Schedule Risk Analysis with Multi-Skilled Resource Scheduling to Improve Resource-Constrained Project Scheduling Problems. *Applied Sciences* **2021**, *11*, 650, doi:10.3390/app11020650.
85. Ma, Z.; Demeulemeester, E.; He, Z.; Wang, N. A Computational Experiment to Explore Better Robustness Measures for Project Scheduling under Two Types of Uncertain Environments. *Computers & Industrial Engineering* **2019**, *131*, 382–390, doi:10.1016/j.cie.2019.04.014.
86. Lambrechts, O.; Demeulemeester, E.; Herroelen, W. Time Slack-Based Techniques for Robust Project Scheduling Subject to Resource Uncertainty. *Ann Oper Res* **2011**, *186*, 443–464, doi:10.1007/s10479-010-0777-z.
87. Zahid, T.; Agha, M.H.; Schmidt, T. Investigation of Surrogate Measures of Robustness for Project Scheduling Problems. *Computers & Industrial Engineering* **2019**, *129*, 220–227, doi:10.1016/j.cie.2019.01.041.
88. Hazır, Ö.; Haouari, M.; Erel, E. Robust Scheduling and Robustness Measures for the Discrete Time/Cost Trade-off Problem. *European Journal of Operational Research* **2010**, *207*, 633–643, doi:10.1016/j.ejor.2010.05.046.
89. Milat, M.; Knezic, S.; Sedlar, J. A New Surrogate Measure for Resilient Approach to Construction Scheduling. *Procedia Computer Science* **2021**, *181*, 468–476, doi:10.1016/j.procs.2021.01.192.
90. Lu, M.; Li, H. Resource-Activity Critical-Path Method for Construction Planning. *J. Constr. Eng. Manage.* **2003**, *129*, 412–420, doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:4(412).
91. Abeyasinghe, M.C.L.; Greenwood, D.J.; Johansen, D.E. An Efficient Method for Scheduling Construction Projects with Resource Constraints. *International Journal of Project Management* **2001**, *17*.



92. Woodworth, B.M.; Shanahan, S. Identifying the Critical Sequence in a Resource Constrained Project. *International Journal of Project Management* **1988**, *6*, 89–96, doi:10.1016/0263-7863(88)90030-0.
93. Marasović, T. Presented at the Predavanja iz kolegija Programiranje u Pythonu, Sveučilište u Splitu; Fakultet strojarstva, elektrotehnike i brodogradnje, **2019**.
94. Milat, M.; Knezić, S.; Sedlar, J. Resilient Scheduling as a Response to Uncertainty in Construction Projects. *Applied Sciences* **2021**, *11*, 6493, doi:10.3390/app11146493.
95. Elazouni, A.M.; Metwally, F.G. Finance-Based Scheduling: Tool to Maximize Project Profit Using Improved Genetic Algorithms. *J. Constr. Eng. Manage.* **2005**, *131*, 400–412, doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:4(400).
96. Son, J.; Mack, M.; Mattila, K.G. Nonlinear Cash Flow Optimization Model. *Can. J. Civ. Eng.* **2006**, *33*, 1450–1454, doi:10.1139/106-086.
97. Aralica, Z.; Račić, D.; Šišinački, J. 2. Projektno financiranje infrastrukture. *Privredna kretanja i ekonomska politika* **2007**. *17(112)*. Dostupno online: <https://hrcak.srce.hr/18223>
98. Al-Shihabi, S.T.; AlDurgam, M.M. A Max-Min Ant System for the Finance-Based Scheduling Problem. *Computers & Industrial Engineering* **2017**, *110*, 264–276, doi:10.1016/j.cie.2017.06.016.
99. Au, T.; Hendrickson, C. Profit Measures for Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management* **1986**, *112*, 273–286, doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(1986)112:2(273).
100. Rao Kurada, R.; Pavan, K.K.; Rao, A.D. A Preliminary Survey on Optimized Multiobjective Metaheuristic Methods for Data Clustering Using Evolutionary Approaches. *IJCSIT* **2013**, *5*, 57–77, doi:10.5121/ijcsit.2013.5504.
101. *Search Methodologies*; Burke, E.K., Kendall, G., Eds.; Springer US: Boston, MA, **2014**; ISBN 978-1-4614-6939-1.
102. Golub, M. Genetski Algoritam. **2010**. Skripta Fakulteta Elektrotehnike i Računarstva u Zagrebu
103. Talbi, E.-G. *Metaheuristics: From Design to Implementation*; Wiley: Hoboken, NJ, **2009**; ISBN 978-0-470-27858-1.

104. Milat, M.; Knezić, S.; Sedlar, J. Application of a Genetic Algorithm for Proactive Resilient Scheduling in Construction Projects. *Designs* **2022**, *6*, 16, doi:10.3390/designs6010016.
105. Kolisch, R.; Hartmann, S. Heuristic Algorithms for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem: Classification and Computational Analysis. In *Project scheduling*; International Series in Operations Research & Management Science; Springer US: Boston, MA, **1999**.
106. Hartmann, S. A Competitive Genetic Algorithm for Resource-Constrained Project Scheduling. *Naval Research Logistics* **1998**, *45*, 733–750, doi:10.1002/(SICI)1520-6750(199810)45:7<733::AID-NAV5>3.0.CO;2-C.
107. Kolisch, R. Serial and Parallel Resource-Constrained Project Scheduling Methods Revisited: Theory and Computation. *European Journal of Operational Research* **1996**, *90*, 320–333, doi:10.1016/0377-2217(95)00357-6.
108. Multi-Objective Optimization in Python: NSGA-II, dostupno online <https://pymoo.org/algorithms/moo/nsga2.html?highlight=visualization>
109. Sadeghi, N.; Fayek, A.R.; Pedrycz, W. Fuzzy Monte Carlo Simulation and Risk Assessment in Construction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* **2010**, *25*, 238–252, doi:10.1111/j.1467-8667.2009.00632.x.
110. Ballestín, F.; Leus, R. Resource-Constrained Project Scheduling for Timely Project Completion with Stochastic Activity Durations. *Production and Operations Management* **2009**, *18*, 459–474, doi:10.1111/j.1937-5956.2009.01023.x.
111. Williams, T. Why Monte Carlo Simulations of Project Networks Can Mislead. *Project Management Journal* **2004**, *35*, 53–61, doi:10.1177/875697280403500307.
112. Mileusni, M. Project Risk Management: Comparative Analysis of Methods for Project Risks Assessment. *Coll. Antropol.* **2014**, *10*.
113. Thompson, R.C.; Lucko, G.; Su, Y. Reconsidering an Appropriate Probability Distribution Function for Construction Simulations. In Proceedings of the Construction Research Congress 2016; American Society of Civil Engineers: San Juan, Puerto Rico, May 24 **2016**; pp. 2522–2531.

114. Lee, D.-E.; Arditi, D.; Son, C.-B. The Probability Distribution of Project Completion Times in Simulation-Based Scheduling. *KSCE J Civ Eng* **2013**, *17*, 638–645, doi:10.1007/s12205-013-0147-x.
115. Malik, K.; Pulikkotil, J.; Sharma, A. Comparison of Pseudorandom Number Generators and Their Application for Uncertainty Estimation Using Monte Carlo Simulation. *MAPAN* **2021**, *36*, 481–496, doi:10.1007/s12647-021-00443-3.
116. Schexnayder, C.; Knutson, K.; Fente, J. Describing a Beta Probability Distribution Function for Construction Simulation. *J. Constr. Eng. Manage.* **2005**, *131*, 221–229, doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(2005)131:2(221).
117. Vanhoucke, M. *Project Management with Dynamic Scheduling*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, **2013**; ISBN 978-3-642-40437-5.
118. MedCalc Software: Beta Distribution Functions, dostupno online: <https://www.medcalc.org/manual/beta-distribution-functions.php>
119. Al-Sadek, O.; Carmichael, D.G. ON SIMULATION IN PLANNING NETWORKS. *Civil Engineering Systems* **1992**, *9*, 59–68, doi:10.1080/02630259208970639.
120. Samset, K.; Christensen, T. Ex Ante Project Evaluation and the Complexity of Early Decision-Making. *Public Organiz Rev* **2017**, *17*, 1–17, doi:10.1007/s11115-015-0326-y.
121. Kolisch, R.; Sprecher, A. PSPLIB - A Project Scheduling Problem Library. *European Journal of Operational Research* **1997**, *96*, 205–216, doi:10.1016/S0377-2217(96)00170-1.
122. Vanhoucke, M.; Coelho, J.; Batselier, J. An Overview of Project Data for Integrated Project Management and Control. *Journal of Modern Project Management* **2016**, *3*, 6–21.
123. Batselier, J.; Vanhoucke, M. Construction and Evaluation Framework for a Real-Life Project Database. *International Journal of Project Management* **2015**, *33*, 697–710, doi:10.1016/j.ijproman.2014.09.004.
124. Operations Research & Scheduling Research Group: Real Project Data, dostupno online: <https://www.projectmanagement.ugent.be/research/data/realdata>

125. Van de Vonder, S.; Ballestín, F.; Demeulemeester, E.; Herroelen, W. Heuristic Procedures for Reactive Project Scheduling. *Computers & Industrial Engineering* **2007**, *52*, 11–28, doi:10.1016/j.cie.2006.10.002.
126. He, W.; Shi, Y. Multiobjective Construction Optimization Model Based on Quantum Genetic Algorithm. *Advances in Civil Engineering* **2019**, *2019*, 1–8, doi:10.1155/2019/5153082.
127. Saad, H.M.H.; Chakraborty, R.K.; Elsayed, S.; Ryan, M.J. Quantum-Inspired Genetic Algorithm for Resource-Constrained Project-Scheduling. *IEEE Access* **2021**, *9*, 38488–38502, doi:10.1109/ACCESS.2021.3062790.
128. He, W.; Li, W.; Wang, W. Developing a Resource Allocation Approach for Resource-Constrained Construction Operation under Multi-Objective Operation. *Sustainability* **2021**, *13*, 7318, doi:10.3390/su13137318.

## DODATAK

### Proračun toka novca u građevinskom projektu

U ovom dodatku prikazan je proračun toka novca u građevinskom projektu na način kako je modeliran za potrebe doktorskog istraživanja. S ciljem zorne ilustracije i detaljnog objašnjenja, ovdje će se prikazati izračun toka novca na ilustrativnom primjeru građevinskog projekta prema studiji autora Elazouni i Metwally [95]. U ovom primjeru, građevinski projekt sastoji se od šest aktivnosti, a vremenska jedinica trajanja aktivnosti odnosi se na jedan mjesec. Direktni troškovi aktivnosti, njihova očekivana trajanja te planirani početak izvršenja prema ugovorenom planu dani su u tablici D.1.

**Tablica D.1.** Podaci o aktivnostima za ilustrativni primjer projekta, prema [95]

Aktivnost	Trajanje	Početak izvršenja	Direktni troškovi	
			Mjesečno	Ukupno
1	1	0	100, 000	100, 000
2	2	0	105, 000	210, 000
3	1	3	110, 000	110, 000
4	1	3	105, 000	105, 000
5	3	5	115, 000	345, 000
6	2	4	105, 000	210, 000

Izračun toka novca za građevinski projekt u ovom slučaju moguće je ostvariti tek nakon početne raspodjele aktivnosti. Na temelju planiranog vremenskog rasporeda aktivnosti, definiraju se direktni troškovi po vremenskim jedinicama za obračun projektnih troškova što su najčešće mjesečni intervali. Pretpostavka je da se isplate vrše kontinuirano za vrijeme izvođenja aktivnosti, a uplate slijede periodično, prema mjesečnim obračunskim situacijama. Uplate imaju odgodu od jednog mjeseca kako bi se omogućilo dovoljno vremena za analizu i obradu podataka između izvršenja aktivnosti i ispostave fakture te se pri svakoj uplati zadržava određeni postotak mjesečne situacije kao jamstvo za uredno izvršenje ugovora. Na kraju projekta vrši se uplata svih zadržanih sredstava. Ako dođe do produljenja trajanja projekta u odnosu ugovorenog i ostvarenog plana, tada se za svaki mjesec vremenskog prekoračenja vrši naplata penala. Osnovni ulazni parametri potrebni za proračun financijskog toka u ovom radu navedeni su u tablici D.2 te su navedene vrijednosti zahtijevanih parametara korištene u ilustrativnom primjeru.

**Tablica D.2.** *Ulazni parametri potrebni za proračun financijskog toka u ilustrativnom primjeru*

Kratica	Opis	Vrijednost
IT	Opći indirektni troškovi	15% ukupnih direktnih troškova (UDT)
MOB	Mobilizacija radne snage i opreme	5% (UDT+IT)
PO	Porezi	2% (UDT+IT+MOB)
MP	Marža	20% (UDT+IT+MOB+PO)
O	Obveznice	1% (UDT+IT+MOB+PO+MP)
UPC	Ukupna ponudbena cijena	(UDT+IT+MOB+PO+MP+O)
F	Obračunski faktor	UPC/UDT
A	Avans	10% ukupne ponudbene cijene (UPC)
PE	Penali po jedinici vremenskog prekoračenja	2,000 financijskih jedinica
RET	Jamstvo za uredno izvršenje ugovora	5% po mjesečnoj situaciji
i	Opća kamatna stopa	0,8%
j	Naknada za pozitivno kumulativno stanje računa	-
k	Kamata na neiskorišteni dio sredstava	0,2%
W	Kreditni limit	310,000 financijskih jedinica
L	Planirano produljenje projekta u odnosu na ugovoreni i ostvareni vremenski plan	2 vremenske jedinice

Osim financijskih parametara prikazanih u tablici D.2., za egzaktan proračun financijskog toka u građevinskom projektu potrebno je još odrediti i datum početka projekta te prilagoditi proračun direktnih troškova prema kalendarskim obilježjima tekućeg mjeseca, ali u ovom ilustrativnom primjeru proračun je pojednostavljen tako da je za najmanju vremensku jedinicu predviđen cijeli mjesec te se zanemaruje razlika u broju dana po kalendarskim mjesecima, tj. za sve mjesece predviđeno je trajanje od 30 dana.

Slijedi izračun direktnih i indirektnih troškova na temelju početnog rasporeda aktivnosti i zadanih ulaznih parametara o financiranju projekta. Nakon toga računaju se mjesečne uplate i isplate iz perspektive izvođača radova na temelju planiranih aktivnosti za tekući mjesec, tj. definira se financijski tok u jednostavnom obliku gdje su još uvijek zanemareni troškovi financiranja. Ovaj dio proračuna prikazan je u tablici D.3.

Posljednji korak predstavlja izračun svih pripadajućih kamata za vrijeme trajanja projekta da bi se odredilo kumulativno financijsko stanje te konačan profit. Formule za proračun financijskog toka iz perspektive izvođača prikazane su jednadžbama (D.1) – (D.9), a detalji

proračuna za ilustrativni primjer s uključenim troškovima financiranja dani su u tablici D.4.

Ukupni direktni troškovi  $y_i$  u jednom danu  $i$  računaju se na sljedeći način:

$$y_i = \sum_{p=1}^{n_i} y_{pi}; i = 1, 2, \dots, T \quad (D.1)$$

pri čemu je  $n_i$  broj aktivnosti koje traju u danu  $i$ , a  $y_{pi}$  je direktni trošak određene aktivnosti u vremenu  $i$ . Ukupno trajanje projekta označeno je slovom  $T$ .

Što se tiče izvođačevih mjesečnih rashoda  $E_t$ , oni se računaju kao suma direktnih troškova te ostalih mjesečnih davanja  $O_t$  (formula D.2). Veličina  $O_t$  predstavlja zbroj općih indirektnih troškova s uključenim davanjima za poreze i obveznice u tipičnom obračunskom periodu od jednog mjeseca ( $m$  je broj dana u mjesecu). Investitorove isplate, tj. izvođačev prihod  $P_t$  slijede na kraju mjesečnog obračunskog razdoblja, pri čemu se postotak RET svake isplate zadržava kao jamstvo za uredno izvršenje ugovora. Da bi se odredila ponudbena cijena izvedenih aktivnosti, direktni troškovi množe se obračunskim faktorom  $F > 1$ .

$$E_t = \sum_{i=1}^m y_i + O_t \quad (D.2)$$

$$P_t = (1 - \text{RET}) \times F \times \sum_{i=1}^m y_i \quad (D.3)$$

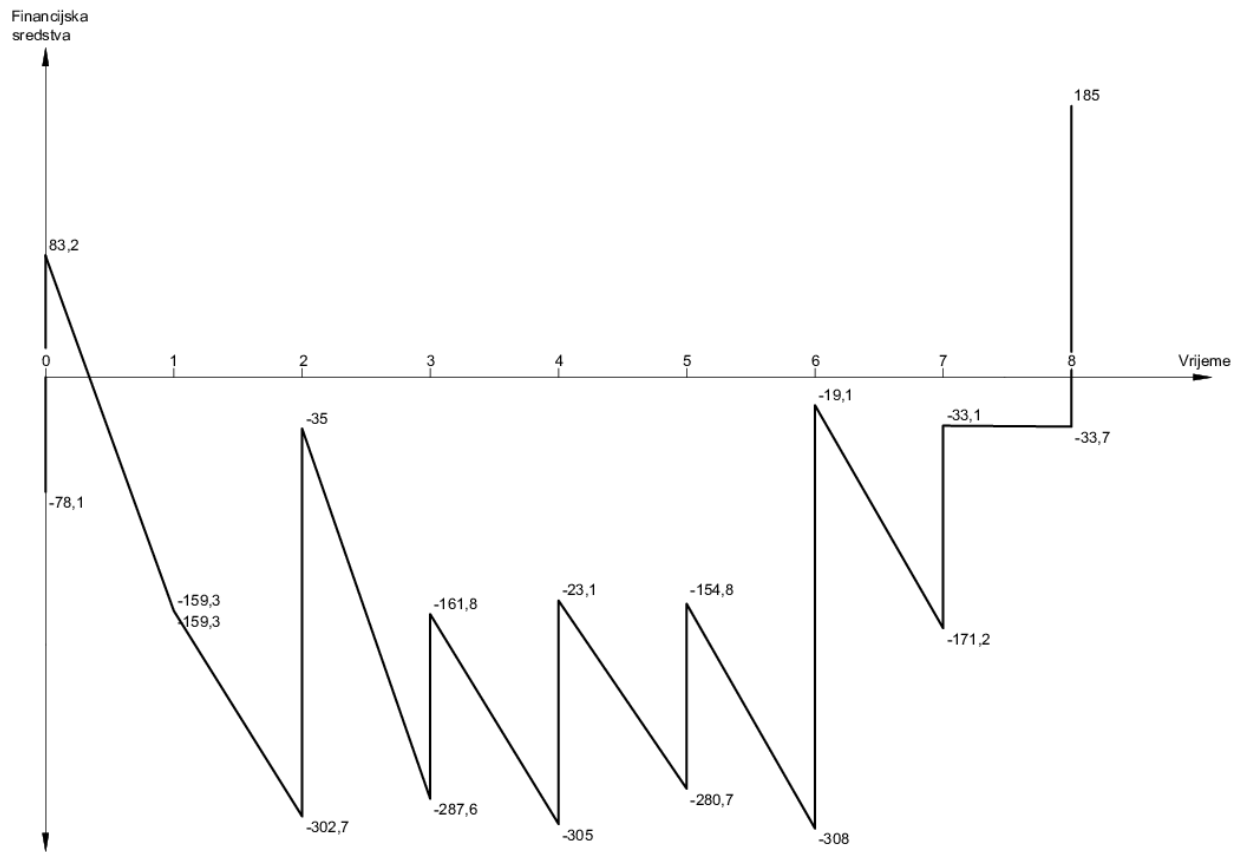
Kumulativno stanje radnog kapitala izvoditelja radova  $F_t$  na kraju mjesečnog perioda  $t$  (za  $t > 1$ ) računa se kao:

$$F_t = N_{t-1} + E_t \quad (D.4)$$

pri čemu je  $N_t$  (formula D.5) neto stanje izvođačevog radnog kapitala na kraju mjeseca  $t$ , nakon što je primljena uplata od strane investitora. Tipični financijski tok u interakciji investitor-izvođač u načelu slijedi dinamiku izvedenih građevinskih radova te je tok financija za ilustrativni primjer prikazan na slici D.1.

$$N_{t-1} = F_{t-1} + P_t \quad (D.5)$$

U ovom primjeru, izračun financijskog toka temelji se na pretpostavci da izvođač ne vrši periodičnu otplatu kamata, već naknadno namiruje akumulirane troškove financiranja na kraju izvedbe projekta. S obzirom na vid bankovnog zajma (eng. *bank overdraft*) kao izvora financiranja projekta u ovom primjeru, ukupne kamatne naknade na kraju perioda  $t$  određuju se sumiranjem pojedinačnih naknada.



Slika D.1. Grafički prikaz financijskog toka za ilustrativni primjer projekta, prema [95]

Tablica D.3. Jednostavni financijski tok ilustrativnog primjera sa zanemarenim troškovima financiranja

EOM	$E_t$	$P_t$	$A_t$	$F_t$	$N_t$
0	- 78,062	161,218	83,156	- 78,062	83,156
1	- 241,311	-	-241,311	-158,155	-158,155
2	-141,311	267,684	126,373	-299,466	-31,782
3	-251,311	125,872	-125,439	-283,093	-157,221
4	-141,311	281,865	140,554	-298,532	-16,667
5	-256,311	125,872	-130,439	-272,978	-147,106
6	-151,311	288,956	137,645	-298,417	-9,461
7	-151,311	138,053	-13,258	-160,772	-22,718
8	-	218,662	218,662	-22,718	195,944



U proračunu iznosa pojedinačnih kamatnih naknada za tekući mjesec,  $I_t$  (formula D.6), prvi dio formule odnosi se na naplatu kamata za neto stanje izvođačevog radnog kapitala na kraju prethodnog perioda ( $t - 1$ ), drugi dio izraza aproksimira kamate tekućih rashoda  $E_t$  u periodu  $t$ , a treći dio aproksimira kamate na neiskorišteni dio kredita.

$$I_t = i \times N_{t-1} + i \times \frac{E_t}{2} + k \times (W - F'_{t-1}) \quad (D.6)$$

S obzirom na navedene uvjete financiranja, kada se u obzir uzmu i akumulirane kamatne naknade, tada računamo korigirano stanje radnog kapitala izvođača radova  $F'_t$  na kraju mjesečnog perioda  $t$  prema formuli:

$$F'_t = F_t + I'_t \quad (D.7)$$

Pri tome je akumulirani iznos kamatnih naknada  $I'_t$  u ovom slučaju predstavljen kao:

$$I'_t = \sum_{l=1}^t I_l \times (1 + i)^{t-l} \quad (D.8)$$

Konačno, ostvareni profit za izvođača radova računa se kao neto iznos radnog kapitala  $N'_t$  na kraju projekta.

$$N'_t = F'_t + P_t \quad (D.9)$$

U tablici D.3. prikazani su detaljni iznosi proračuna za financijski tok prema opisanom primjeru iz literature [95]. Prvo se definira jednostavni financijski tok, sa zanemarenim troškovima financiranja, a naknadno se određuju visine kamatnih izdataka. Proračun je proveden po mjesecima izvedbe projekta, EOM, pri čemu je broj mjeseci produžen za jednu vremensku jedinicu od stvarnog trajanja izvedbe radova uslijed mjesečne odgode naplate radova tipične za obračun građevinskih situacija. Prema ugovorenom planu, UDT troškovi iznose 1,080,000; IT=162,000; MOB=62,100; PO=26,082; MP=266,036; O=15,962; F=1,49276. U izvedenom stanju, produljuje se trajanje projekta za 2 vremenske jedinice te se korigiraju sljedeći iznosi: mjesečnim rashodima za 6. i 7. mjesec izvršenja dodaju se mjesečni IT=162,000/5=32,400 te se posljedično mijenja mjesečni iznos PO=3,911. Svi iznosi prikazani su u pripadajućim financijskim jedinicama. U tablici D.3. stupac  $A_t$  predstavlja razliku između izvođačevih mjesečnih prihoda  $P_t$  i rashoda  $E_t$  prije no što se u obzir uzmu troškovi financiranja.

Na samom početku projekta, investitor izvođaču uplaćuje odgovarajući iznos avansa, a pri proračunu izvođačevih mjesečnih prihoda  $P_t$  uzima se u obzir zadržavanje jamstva za uredno izvršenje ugovora od strane izvođača, koje u ovom primjeru iznosi 5%. Štoviše, uslijed produljenja od dvije vremenske jedinice između ugovorenog i izvedenog stanja, izvođačevi prihodi za 6. i 7.

mjesec izvršenja radova umanjuju se za određeni iznos penala, u ovom slučaju 2,000 novčanih jedinica po mjesecu produljenja radova. Povrat zadržanih sredstava od strane investitora slijedi pri posljednjoj uplati, kada su sve projektne aktivnosti završene. U tablici D.4. prikazan je proračun financijskog toka s uključenim troškovima financiranja. Konačan profit za izvođača u ovom ilustrativnom primjeru iznosi 184,990 financijskih jedinica.

**Tablica D.4.** *Financijski tok ilustrativnog primjera sa uključenim troškovima financiranja*

EOM	$I_t$	$I'_t$	$F'_t$	$N'_t$
0	-	-	- 78,062	83,156
1	-1,094	-1,097	-159,252	-159,252
2	-2,134	-3,239	-302,705	-35,021
3	-1,280	-4,545	-287,638	-161,766
4	-1,877	-6,458	-304,99	-23,125
5	-1,181	-7,691	-280,669	-154,797
6	-1,856	-9,609	-308,026	-19,070
7	-0,704	-10,390	-171,162	-33,109
8	-0,480	10,954	-33,672	184,990

## Algoritam za proračun resursno-tehnološke vremenske rezerve

```

Spyder (Python 3.6)
File Edit Search Source Run Debug Consoles Projects Tools View Help
C:\Users\Martina Milat
Editor - C:\Users\Martina Milat\Documents\RT_float_class.py
RT_float_class.py
1# -*- coding: utf-8 -*-
2"""
3Created on Fri May 27 19:50:07 2022
4
5@author: Martina Milat
6"""
7
8import numpy as np
9
10
11class RT_float:
12
13    '''
14    This class is developed for the calculation of the Resorce-Technology free float
15    as described in: https://doi.org/10.3390/app11146493
16    The resource-technology free float calculates the amount of time for which
17    an activity can be prolonged without postponing start times of succeeding activities,
18    in a way that both precedence and resource relations are considered.
19    '''
20
21
22    def __init__(
23        self,
24        baseline,
25        durations,
26        finish_times,
27        successors,
28        Resource_matrix,
29        requirement
30    ):
31
32        '''
33        Args:
34        baseline: input schedule of activities' start times
35                 R-T float is calculated considering this particular schedule
36                 e.g. [0,0,5,4,12,22,16,25]
37
38        durations: list of activities' duration times
39                 e.g. [0,5,8,4,3,2,9,0]
40
41        finish_times: when each activity ends (to reduce calculation complexity)
42                    e.g. [[0],[5],[13],[8],[15],[24],[25],[25]]
43
44        successors: direct successors per each activity
45                  e.g. [[1,2], [3], [3], [4,5], [6], [7], [7], []]
46
47        Resource_matrix: numpy array type to define resource allocation
48
49        requirement: list of activities' resource consumption requirement
50                   input per resource e.g. [[0,4,2,2,2,3,3,5,2,0]];
51                   NOT [[0], [4], [2],...]
52
53        '''
54
55        self.baseline = baseline
56        self.durations = durations
57        self.finish_times = finish_times
58        self.successors = successors
59        self.Resource_matrix = Resource_matrix
60        self.requirement = requirement
61
62# =====
63''' Methods to calculate Resource-Technology floats for all activities '''
64# =====
65

```

```

66# help method to check if an activity end can be prolonged
67# from current end to other time limit
68# (supposedly min of successors starts)
69# check_floats returns integer number of time for which
70# an activity can be prolonged, for one resource type!!!
71#-----
72 @staticmethod
73 def check_floats(activity, start_time, limit, res_consumption, res_type):
74
75     counter = []
76
77     # Available space can be separated so check each column
78     # if there is enough resources for activity
79     for i in range(start_time, limit):
80
81         # Count NONEs per column
82         free_space = np.sum([not bool(x) for x in res_type[:, i]])
83
84         # If there is enough space for activity
85         if free_space < res_consumption:
86             break
87
88         else:
89             counter.append(1)
90
91     return(len(counter))
92
93#-----
94# help method to calculate R-T Free Floats for all activities
95#-----
96 @staticmethod
97 def calculate_all_floats(baseline, durations, finish_times,
98                         successors, Resource_matrix, requirement ):
99
100 # placeholder for Resource-Technology Free Floats to calculate second objective function
101 floats = [[] for i in range(len(durations)-2)]
102
103 for num,i in enumerate(range(len(floats))):
104
105     # Variable for activity
106     activity = i+1
107
108     succ_start = [] # placeholder
109
110     # find out minimum start time from all the activities' successors
111     for succ in successors[activity]:
112
113         succ_start.append(baseline[succ])
114
115     earliest_succ_start = min(succ_start)
116
117     # if there is time space, calculate the Resource-Technology Free Float amount
118     if finish_times[i+1][0] < earliest_succ_start:
119
120         # counter is placeholder for no of floats per each resource type
121         counter = [[] for i in range(len(Resource_matrix))]
122
123         # find moment of time to start resource check
124         time = baseline[i+1] + durations[activity]
125
126         # For each resource type
127         for res_i,res in enumerate(Resource_matrix):
128
129             # More variables for activity...
130             res_consumpt = requirement[res_i][activity]
131
132             counter[res_i].append(RT_float.check_floats(activity, time,\
133                 earliest_succ_start, res_consumpt, res))
134
135         # float amount is minimal from all resource types
136         helpline = []
137         for i in counter:
138             helpline.append(i[0])
139
140         floats[num] = [min(helpline)]
141
142     return floats

```

## Podaci stvarnog građevinskog projekta korišteni u *ex-post* analizi

Tablica D.5. Početni plan

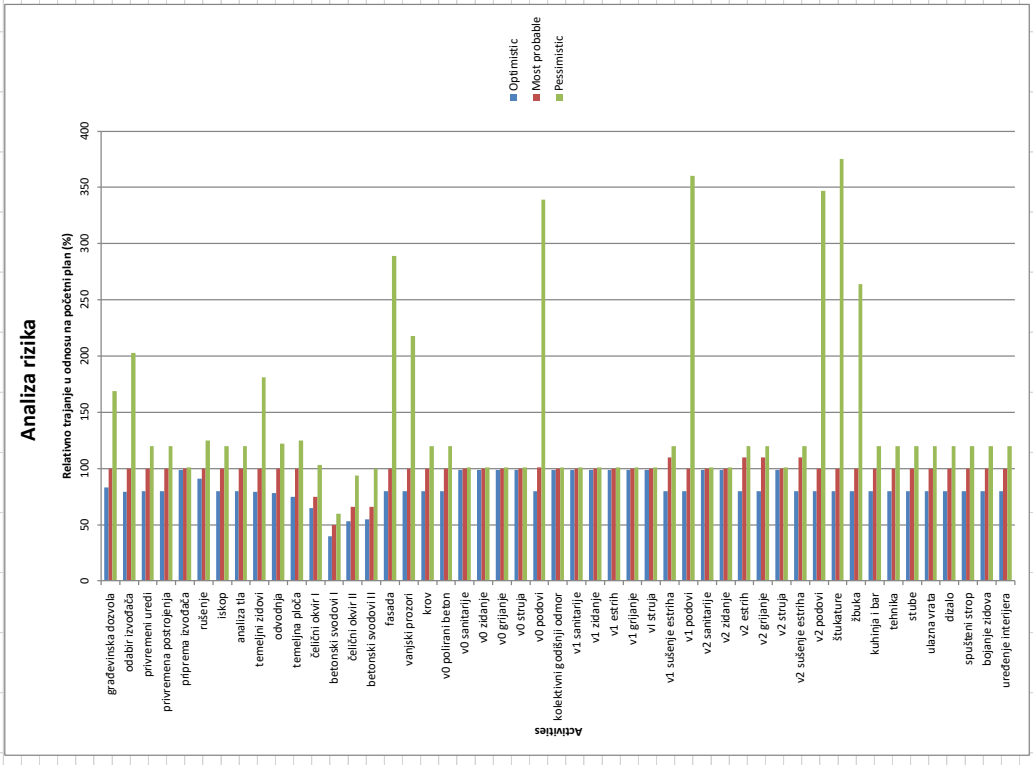
Generalno		Tehnološke ovisnosti				Početni plan				Potrebni resursi				Očekivani troškovi		
R. br.	ID	Aktivnost	WBS	Prethodna aktivnost (ID)	Sjebdrena aktivnost (ID)	Očekivani početak	Očekivani završetak	Trajanje	Potražnja za resursima	Cijena resursa	Fixni troškovi	Trošak po satu	Varijabilni troškovi	Ukupni troškovi		
		0 Clays-Verhelst	1			17.04.2006 8:00	26.12.2007 10:00	442d 2h			2.700.210,31€			3.027.133,19€		
		46 Priprema	1.1			17.04.2006 8:00	08.12.2006 17:00	170d			216.786,97€			253.804,57€		
1		2 Građevinska dozvola	1.1.1		FS3	17.04.2006 8:00	07.07.2006 17:00	60d		0,00€	75,00€	0,00€	0,00€	75,00€		
2		3 odabir izvođača	1.1.2	2FS	FS16	10.07.2006 8:00	04.08.2006 17:00	20d		0,00€	210.000,00€	0,00€	0,00€	210.000,00€		
3		4 privremeni uredi	1.1.3			17.04.2006 8:00	12.05.2006 17:00	20d		0,00€	3.765,31€	0,00€	0,00€	3.765,31€		
4		5 privremena postrojenja	1.1.4			17.04.2006 8:00	07.07.2006 17:00	60d		0,00€	1.876,54€	0,00€	0,00€	1.876,54€		
5		16 priprema izvođača	1.1.5	3FS	FS6	07.08.2006 8:00	27.10.2006 17:00	60d		0,00€	0,01€	0,00€	0,00€	0,01€		
6		6 rušenje	1.1.6	16FS	FS17;FS69	30.10.2006 8:00	08.12.2006 17:00	30d	tim VDM(4,00 #8)	37,017,60€	1.070,11€	0,00€	0,00€	38.087,71€		
		47 Temelji	1.2			11.12.2006 8:00	01.02.2007 17:00	39d			362.567,89€			401.436,37€		
7		17 iskop	1.2.1	6FS	FS18;FS21	11.12.2006 8:00	28.12.2006 17:00	14d	tim VDM	4.318,72€	26.000,00€	0,00€	0,00€	30.318,72€		
8		69 analiza tla	1.2.2	6FS	FS18	11.12.2006 8:00	12.12.2006 17:00	2d	tim VDM	616,96€	2.000,00€	0,00€	0,00€	2.616,96€		
9		18 temeljni zidovi	1.2.3	17FS;69FS	FS19	29.12.2006 8:00	01.02.2007 17:00	25d	tim VDM(3,00 #8)	23.136,00€	98.523,73€	0,00€	0,00€	121.659,73€		
10		21 obvodnja	1.2.4	17FS	FS23	29.12.2006 8:00	11.01.2007 17:00	10d	tim VDM(3,00 #8)	9.254,40€	1.224,73€	0,00€	0,00€	10.479,13€		
11		23 temeljna ploča	1.2.5	21FS	FS19	12.01.2007 8:00	12.01.2007 17:00	1d	tim VDM(5,00 #8)	1.542,40€	234.819,44€	0,00€	0,00€	236.361,84€		
		48 Konstrukcija	1.3			02.02.2007 8:00	26.04.2007 17:00	60d			472.804,45€			542.212,45€		
12		19 čelični okvir I	1.3.1	18FS;23FS	FS20	02.02.2007 8:00	01.03.2007 17:00	20d	tim VDM(4,00 #8)	24.678,40€	118.992,51€	0,00€	0,00€	143.670,91€		
13		20 betonski svodovi I	1.3.2	19FS	FS22	02.03.2007 8:00	15.03.2007 17:00	10d	tim VDM(4,00 #8)	12.339,20€	117.409,72€	0,00€	0,00€	129.748,92€		
14		22 čelični okvir II	1.3.3	20FS	FS24	16.03.2007 8:00	05.04.2007 17:00	15d	tim VDM(3,00 #8)	13.881,60€	118.992,51€	0,00€	0,00€	132.874,11€		
15		24 betonski svodovi II	1.3.4	22FS	FS25;FS49	06.04.2007 8:00	26.04.2007 17:00	15d	tim VDM(4,00 #8)	18.508,80€	117.409,72€	0,00€	0,00€	135.918,52€		
		50 Zaštita od vanjskih uljica	1.4			27.04.2007 8:00	07.06.2007 17:00	30d			560.844,16€			597.047,36€		
16		25 fasada	1.4.1	24FS	FS26	27.04.2007 8:00	24.05.2007 17:00	20d	tim VDM(2,00 #8)	12.339,20€	339.314,00€	0,00€	0,00€	351.653,20€		
17		26 vanjski prozori	1.4.2	25FS	FS28;FS29	25.05.2007 8:00	07.06.2007 17:00	10d	prozori [3,00 #3]	9.120,00€	150.750,59€	0,00€	0,00€	159.870,59€		
18		49 krov	1.4.3	24FS		27.04.2007 8:00	10.05.2007 17:00	10d	krovšte [4,00 #4]	11.520,00€	70.779,57€	40,30€	3.224,00€	85.523,57€		
		62 Skladiste	1.5			08.06.2007 8:00	31.10.2007 10:00	103d 2h			257.044,96€			301.814,56€		
19		28 iV0 polirani beton	1.5.1	26FS	FS30;FS27;FS59;FS52;FS45;FS34;FS60;FS51	08.06.2007 8:00	21.06.2007 17:00	10d	tim VDM(5,00 #8)	15.424,00€	134.400,00€	0,00€	0,00€	149.824,00€		
20		30 iV0 sanitarnije	1.5.2	31FS;28FS	FS35	29.08.2007 10:00	12.09.2007 10:00	10d	vodoinstalater	2.880,00€	4.793,00€	0,00€	0,00€	7.673,00€		
21		27 iV0 zidanje	1.5.3	31FS;28FS		29.08.2007 10:00	12.09.2007 10:00	10d	zidar	3.252,00€	31.200,96€	40,65€	3.252,00€	37.704,96€		
22		59 iV0 grijanje	1.5.4	31FS;28FS	FS35	29.08.2007 10:00	26.09.2007 10:00	20d	grijanje	6.912,00€	11.651,00€	0,00€	0,00€	18.563,00€		
23		29 iV0 struja	1.5.5	26FS;31FS	FS35	29.08.2007 10:00	03.10.2007 10:00	25d	električar	6.400,00€	0,00€	0,00€	0,00€	6.400,00€		
24		35 iV0 podovi	1.5.6	59FS;29FS;30FS	FS41;FS37	03.10.2007 10:00	31.10.2007 10:00	20d	podne obloge	6.649,60€	75.000,00€	0,00€	0,00€	81.649,60€		
		66 Godišnji odmor	1.6			15.08.2007 10:00	29.08.2007 10:00	10d			0,01€			0,01€		
25		31 kolektivni godišnji odmor	1.6.1			15.08.2007 10:00	29.08.2007 10:00	10d		0,00€	0,01€	0,00€	0,00€	0,01€		
		63 Razina 1	1.7			29.08.2007 10:00	24.10.2007 10:00	40d			226.284,97€			262.542,57€		
26		52 iV1 sanitarnije	1.7.1	31FS;28FS		29.08.2007 10:00	12.09.2007 10:00	10d	vodoinstalater	2.880,00€	4.793,00€	0,00€	0,00€	7.673,00€		
27		45 iV1 zidanje	1.7.2	31FS;28FS	FS67	29.08.2007 10:00	12.09.2007 10:00	10d	zidar	3.252,00€	31.200,96€	40,65€	3.252,00€	37.704,96€		
28		34 iV1 estrih	1.7.3	31FS;28FS		29.08.2007 10:00	19.09.2007 10:00	15d	glazura [2,00 #3]	0,00€	106.140,00€	0,00€	0,00€	106.140,00€		
29		60 iV1 grijanje	1.7.4	31FS;28FS		29.08.2007 10:00	26.09.2007 10:00	20d	grijanje	6.912,00€	11.651,00€	0,00€	0,00€	25.475,00€		
30		51 iV1 struja	1.7.5	31FS;28FS		29.08.2007 10:00	03.10.2007 10:00	25d	električar	6.400,00€	0,00€	0,00€	0,00€	6.400,00€		
31		67 iV1 sušenje estriha	1.7.6	34FS	FS57;FS32	19.09.2007 10:00	26.09.2007 10:00	5d	podne obloge	0,00€	0,01€	0,00€	0,00€	0,01€		
32		57 iV1 podovi	1.7.7	67FS	FS41;FS37;FS36	26.09.2007 10:00	24.10.2007 10:00	20d	podne obloge	6.649,60€	72.500,00€	0,00€	0,00€	79.149,60€		

Tablica D.5. (nastavak)

Generalno		Tehnološke ovisnosti		Početni plan		Potrebni resursi		Očekivani troškovi				
R. br.	ID	WBS	Prethodna aktivnost (ID)	Slijedbena aktivnost (ID)	Očekivani početak	Očekivani završetak	Trajanje	Cijena resursa	Fiksni troškovi	Trošak po satu	Varijabilni troškovi	Ukupni troškovi
64	Razina 2	1.8			29.08.2007 10:00	24.10.2007 10:00	40d		125.260,97€			149.562,57€
53	v2 sanitarnje	1.8.1	31FS		29.08.2007 10:00	12.09.2007 10:00	10d		4.793,00€	0,00€	0,00€	7.673,00€
34	v2 zidanje	1.8.2	31FS		29.08.2007 10:00	12.09.2007 10:00	10d		31.200,96€	0,00€	0,00€	34.452,96€
35	v2 estrih	1.8.3	31FS	F568;F536	29.08.2007 10:00	19.09.2007 10:00	15d		46.116,00€	0,00€	0,00€	46.116,00€
36	v2 grijanje	1.8.4	31FS		29.08.2007 10:00	26.09.2007 10:00	20d		11.651,00€	0,00€	0,00€	16.771,00€
37	v2 stolja	1.8.5	31FS		29.08.2007 10:00	03.10.2007 10:00	25d		0,00€	0,00€	0,00€	6.400,00€
38	v2 sušenje estriha	1.8.6	56FS	F558;F532	19.09.2007 10:00	26.09.2007 10:00	5d		0,01€	0,00€	0,00€	0,01€
39	v2 podovi	1.8.7	68FS	F541;F537;F536	26.09.2007 10:00	24.10.2007 10:00	20d		31.500,00€	0,00€	0,00€	38.149,60€
65	Završni radovi	1.9			26.09.2007 10:00	26.12.2007 10:00	65d		478.615,91€			518.712,71€
40	32 štukature	1.9.1	68FS;67FS	F541;F537	26.09.2007 10:00	17.10.2007 10:00	15d		8.642,00€	0,00€	0,00€	23.538,80€
41	36 žbuka	1.9.2	58FS;57FS;56FS		24.10.2007 10:00	28.11.2007 10:00	25d		0,00€	0,00€	0,00€	48.000,00€
42	41 kuhinja i bar	1.9.3	32FS;58FS;57FS;35FS		31.10.2007 10:00	21.11.2007 10:00	15d		0,00€	0,00€	0,00€	87.000,00€
43	37 tehnika	1.9.4	32FS;58FS;57FS;35FS	F538;F542;F543;F544	31.10.2007 10:00	21.11.2007 10:00	15d		2.156,06€	0,00€	0,00€	2.156,06€
44	44 s tube	1.9.5	37FS		21.11.2007 10:00	05.12.2007 10:00	10d		33.000,00€	0,00€	0,00€	33.000,00€
45	42 ulazna vrata	1.9.6	37FS		21.11.2007 10:00	05.12.2007 10:00	10d		16.000,00€	0,00€	0,00€	16.000,00€
46	43 dizalo	1.9.7	37FS		21.11.2007 10:00	28.11.2007 10:00	5d		38.817,85€	0,00€	0,00€	38.817,85€
47	38 spuštani strop	1.9.8	37FS	F539	21.11.2007 10:00	28.11.2007 10:00	5d		32.000,00€	0,00€	0,00€	32.000,00€
48	39 bojanje zidova	1.9.9	38FS	F540	28.11.2007 10:00	19.12.2007 10:00	15d		83.000,00€	0,00€	0,00€	99.800,00€
49	40 uređenje interijera	1.9.10	39FS		19.12.2007 10:00	26.12.2007 10:00	5d		130.000,00€	0,00€	0,00€	138.400,00€

Tablica D.6. Analiza rizika

Generalno ID	Aktivnost	Pocetni plan Trajanje	Distribucija vremenskih trajanja - aktivnosti			Pozitivno
			Opis	Optimizirano	Najvjerojatnije	
0	Clayco-Vrhovnik	5538h				
46	Priprema	1360h				
2	građevinska dozvola	480h	manualno - apsolutno	402	480	812
3	odabir izvođača	160h	manualno - apsolutno	127	160	326
4	privremeni uredi	160h	standardno - simetrično	80	100	120
5	privremena postrojenja	480h	standardno - simetrično	80	100	120
16	priprema izvođača	480h	standardno - nema rizika	99	100	101
6	učenje	240h	manualno - apsolutno	219	240	302
47	Temejni	312h				
17	iskop	112h	standardno - simetrično	80	100	120
66	analiza tla	160h	standardno - simetrično	80	100	120
18	temeljni zidovi	320h	manualno - apsolutno	129	200	362
21	odvodnja	80h	manualno - apsolutno	63	80	96
23	temeljna piča	8h	manualno - apsolutno	6	8	10
48	konstrukcija	480h				
19	čelični okvir I	160h	manualno - apsolutno	104	120	166
20	betonski svodovi I	80h	manualno - apsolutno	37	40	48
22	čelični okvir II	120h	manualno - apsolutno	64	80	113
24	betonski svodovi II	120h	manualno - apsolutno	66	80	121
50	čisti od vanjskih uljeva	240h				
25	fasada	160h	manualno - apsolutno	128	160	463
26	vanjski prozori	80h	manualno - apsolutno	64	80	175
49	krov	80h	standardno - simetrično	80	100	120
67	staklo	826h				
28	polirani beton	80h	standardno - simetrično	80	100	120
30	sanitarje	80h	standardno - nema rizika	99	100	101
27	zidanje	270h	standardno - nema rizika	99	100	101
59	zidanje	160h	standardno - nema rizika	99	100	101
29	u struju	200h	standardno - nema rizika	99	100	101
35	u podovi	160h	manualno - apsolutno	128	163	543
66	Godišnji odmor	80h				
31	konkretni godišnji odmor	80h	standardno - nema rizika	99	100	101
63	razina 1	320h				
52	u sanitarnje	80h	standardno - nema rizika	99	100	101
45	u zidanje	80h	standardno - nema rizika	99	100	101
34	u estih	120h	standardno - nema rizika	99	100	101
69	u grijanje	160h	standardno - nema rizika	99	100	101
51	u struju	200h	standardno - nema rizika	99	100	101
67	u sudaenje estiha	40h	standardno - najgore u lijevo	80	110	126
53	u podovi	160h	manualno - apsolutno	118	160	577
64	razina 2	320h				
53	u sanitarnje	80h	manualno - relativno	99	100	101
55	u zidanje	80h	manualno - relativno	99	100	101
56	u estih	120h	manualno - relativno	80	110	120
61	u grijanje	160h	manualno - relativno	80	110	120
54	u struju	200h	manualno - relativno	99	100	101
68	u sudaenje estiha	40h	manualno - relativno	80	110	126
58	u podovi	160h	manualno - apsolutno	128	160	556
65	Završni radovi	520h				
32	Stukature	120h	manualno - apsolutno	96	120	451
36	Zbuka	200h	manualno - apsolutno	160	200	528
41	kunjaži bar	80h	standardno - simetrično	80	100	120
37	banika	120h	standardno - simetrično	80	100	120
44	stube	80h	standardno - simetrično	80	100	120
42	ulazna vrata	80h	standardno - simetrično	80	100	120
43	dižalo	40h	standardno - simetrično	80	100	120
38	spušteni strop	40h	standardno - simetrično	80	100	120
39	bojanje zidova	120h	standardno - simetrično	80	100	120
40	uređenje interijera	40h	standardno - simetrično	80	100	120



Tablica D.7. Ostvarena trajanja i troškovi

Generalno		Početni plan		Ostvareno stanje	
ID	Aktivnost	Očekivano trajanje	Očekivani troškovi	Ostvareno trajanje	Ostvareni troškovi
0	Claeys-Verhelst	442d 2h	3.027.133,19€	453d	3.102.395,91€
46	Priprema	170d	253.804,57€	214d	283.418,65€
2	građevinska dozvola	60d	75,00€	100d	75,00€
3	odabir izvođača	20d	210.000,00€	30d	210.000,00€
4	privremeni uredi	20d	3.765,31€	20d	3.765,31€
5	privremena postrojenja	60d	1.876,54€	60d	1.876,54€
16	priprema izvođača	60d	0,01€	60d	0,01€
6	rušenje	30d	38.087,71€	54d	67.701,79€
47	Temelji	39d	401.436,37€	36d	402.361,81€
17	iskop	14d	30.318,72€	10d	29.084,80€
69	analiza tla	2d	2.616,96€	12d	5.701,76€
18	temeljni zidovi	25d	121.659,73€	22d	118.883,41€
21	odvodnja	10d	10.479,13€	12d	12.330,01€
23	temeljna ploča	1d	236.361,84€	1d	236.361,84€
48	Konstrukcija	60d	542.212,45€	45d	523.703,65€
19	čelični okvir I	20d	143.670,91€	15d	137.501,31€
20	betonski svodovi I	10d	129.748,92€	5d	123.579,32€
22	čelični okvir II	15d	132.874,11€	15d	132.874,11€
24	betonski svodovi II	15d	135.918,52€	10d	129.748,92€
50	Zaštita od vanjskih utjecaja	30d	597.047,36€	112d	671.831,36€
25	fasada	20d	351.653,20€	20d	351.653,20€
26	vanjski prozori	10d	159.870,59€	92d	234.654,59€
49	krov	10d	85.523,57€	10d	85.523,57€
62	Skladište	103d 2h	301.814,56€	65d	291.542,56€
28	v0 polirani beton	10d	149.824,00€	5d	142.112,00€
30	v0 sanitarije	10d	7.673,00€	10d	7.673,00€
27	v0 zidanje	10d	37.704,96€	10d	37.704,96€
59	v0 grijanje	20d	18.563,00€	20d	18.563,00€
29	v0 struja	25d	6.400,00€	15d	3.840,00€
35	v0 podovi	20d	81.649,60€	20d	81.649,60€
66	Godišnji odmor	10d	0,01€	10d	0,01€
31	kolektivni godišnji odmor	10d	0,01€	10d	0,01€
63	Razina 1	40d	262.542,57€	45d	262.542,57€
52	v1 sanitarije	10d	7.673,00€	10d	7.673,00€
45	v1 zidanje	10d	37.704,96€	10d	37.704,96€
34	v1 estrih	15d	106.140,00€	15d	106.140,00€
60	v1 grijanje	20d	25.475,00€	20d	25.475,00€
51	v1 struja	25d	6.400,00€	25d	6.400,00€
67	v1 sušenje estriha	5d	0,01€	5d	0,01€
57	v1 podovi	20d	79.149,60€	20d	79.149,60€
64	Razina 2	40d	149.562,57€	40d	148.282,57€
53	v2 sanitarije	10d	7.673,00€	10d	7.673,00€
55	v2 zidanje	10d	34.452,96€	10d	34.452,96€
56	v2 estrih	15d	46.116,00€	15d	46.116,00€
61	v2 grijanje	20d	16.771,00€	20d	16.771,00€
54	v2 struja	25d	6.400,00€	20d	5.120,00€
68	v2 sušenje estriha	5d	0,01€	5d	0,01€
58	v2 podovi	20d	38.149,60€	20d	38.149,60€
65	Završni radovi	65d	518.712,71€	48d	518.712,71€
32	štukature	15d	23.538,80€	15d	23.538,80€
36	žbuka	25d	48.000,00€	25d	48.000,00€
41	kuhinja i bar	15d	87.000,00€	20d	87.000,00€
37	tehnika	15d	2.156,06€	15d	2.156,06€
44	stube	10d	33.000,00€	10d	33.000,00€
42	ulazna vrata	10d	16.000,00€	10d	16.000,00€
43	dizalo	5d	38.817,85€	5d	38.817,85€
38	spušteni strop	5d	32.000,00€	5d	32.000,00€
39	bojanje zidova	15d	99.800,00€	15d	99.800,00€
40	uređenje interijera	5d	138.400,00€	5d	138.400,00€



## POPIS SLIKA

*Slika 1.1.* Konceptualni prikaz optimizacijskog modela za vremensko planiranje građevinskih projekata u uvjetima nesigurnosti

*Slika 1.2.* Osnovne istraživačke teme doktorske disertacije

*Slika 2.1.* Smjernice za implementaciju koncepta rezistencije po upravljačkim razinama s primjenom na vremensko planiranje projekata, prilagođeno prema Geambasu [24]

*Slika 2.2.* Proaktivno vremensko planiranje, prilagođeno prema [28]

*Slika 2.3.* Projektna mreža za ilustraciju problema rezistentnog vremenskog planiranja

*Slika 2.4.* Početni vremenski planovi: (a) veći broj vremenskih rezervi; (b) manje vremenskih rezervi

*Slika 3.1.* Proces identifikacije neizvjesnosti, prema [64]

*Slika 3.2.* Primjer: aspekt „uzrok“ prikazan je daljnjim aspektima nesigurnosti

*Slika 3.3.* Prikaz dijela taksonomskog modela u radnom okruženju Protégé platforme

*Slika 4.1.* Opći prikaz razvijene metodologije u kontekstu pojedinih poglavlja doktorske disertacije

*Slika 4.2.* Shematski prikaz predloženog metodološkog koncepta

*Slika 4.3.* Primjer jednostavne projektne mreže

*Slika 4.4.* Gantogrami aktivnosti s prikazom raspodjele resursa

*Slika 4.5.* Ilustrativni prikaz resursne matrice R

*Slika 4.6.* Prikaz postupka izračuna resursno-tehnoloških vremenskih rezervi

*Slika 4.7.* Primjer skupa rješenja za ilustrativni bi-optimizacijski problem, prema [101]

*Slika 4.8.* Proces stvaranja generacija u genetskom algoritmu, prema [103]

*Slika 4.9.* Tijek genetskog algoritma u širem kontekstu optimizacijskog modela za rezistentno vremensko planiranje

*Slika 4.10.* Primjer inicijalizacijskog procesa za stvaranje početne generacije u GA

*Slika 4.11.* Primjer genetske populacije u programskom zapisu

*Slika 4.12.* Nedominirano sortiranje i sortiranje grupirajućom udaljenosti, prema [80] i [108]

*Slika 4.13.* Proračun grupirajuće udaljenosti, prema [80]

*Slika 4.14.* Ilustrativni primjer križanja jedinki u optimizacijskom procesu

*Slika 4.15.* Ilustrativni primjer mutacije jedinki u optimizacijskom procesu

*Slika 4.16.* Ilustrativni primjer izlaznog rješenja algoritamskog procesa

*Slika 5.1.* *Ex-ante* i *ex-post* analiza u kontekstu životnog ciklusa projekta

*Slika 5.2.* Shematski prikaz simulacije primjenom Monte Carlo analize

Slika 5.3. Primjer problema u raspodjeli resursa ukoliko se Monte Carlo analiza temelji na CPM proračunu

Slika 5.4. Funkcija gustoće vjerojatnosti za odabranu beta raspodjelu ( $\alpha=2$  i  $\beta=5$ ) preuzeto sa poveznice [118]

Slika 5.5. Proces izvršenja proširene Monte Carlo metode

Slika 5.6. Ilustrativni primjer projekta za *ex-ante* analizu rezistencije početnog plana

Slika 5.7. Početni vremenski rasporedi s dodatnim resursno-tehnološkim vezama

Slika 5.8. Izlazni histogrami u Monte Carlo simulaciji ilustrativnog primjera projekta: (a) vjerojatnost ukupnog trajanja projekta; (b) vjerojatnost ostvarenog profita

Slika 5.9. Vjerojatnost završetka projekta prema Monte Carlo simulaciji za primjer iz PSPLIB baze: (a) Rješenje 1; (b) Rješenje 2

Slika 5.10. Izvršenje optimizacijskog postupka (snimak zaslona u Python programskom jeziku)

Slika 5.11. Ulazni parametri za simulaciju re-optimizacijom (snimak zaslona u Python programskom jeziku)

Slika 5.12. Vjerojatnost završetka projekta prema Monte Carlo simulaciji za primjer iz PSPLIB baze: (a) Rješenje 1; (b) Rješenje 2

Slika 5.13. Primjer genetske jedinice u programskom zapisu

Slika 5.14. *Ex-post* analiza rezistencije vremenskih planova: usporedba plana s najvećim iznosom SM i originalnog vremenskog plana prema projektnim podacima

Slika 5.15. Kumulativni rezultati *ex-post* analize

Slika 5.16. Ilustrativni primjer programskog zapisa za prikaz Pareto skupa rješenja (izlazno rješenje optimizacijskog postupka)

Slika D.1. Grafički prikaz financijskog toka za ilustrativni primjer projekta, prema [95]

## POPIS TABLICA

*Tablica 2.1.* Prikaz različitih strategija i praksi za implementaciju rezistentnog pristupa u upravljanju projektima, prilagođeno prema [23]

*Tablica 3.1.* Različite interpretacije nesigurnosti u upravljanju projektima

*Tablica 3.2.* Prve dvije razine taksonomskog modela

*Tablica 4.1.* Parametri korišteni za postavljanje vešeciljnog optimizacijskog problema

*Tablica 5.1.* Podaci za simulaciju projektne mreže na temelju CPM proračuna

*Tablica 5.2.* Dodatni financijski podaci za *ex-ante* analizu ilustrativnog građevinskog projekta

*Tablica 5.3.* Razmatrana rješenja u *ex-ante* analizi ilustrativnog primjera projekta

*Tablica 5.4.* Rezultati simulacije u *ex-ante* analizi ilustrativnog primjera projekta

*Tablica 5.5.* Pareto skup dobivenih rješenja za projektnu mrežu od 120 aktivnosti

*Tablica 5.6.* Rezultati simulacije u *ex-ante* analizi ilustrativnog primjera projekta

*Tablica 5.7.* Pareto skup dobivenih rješenja za projektnu mrežu od 30 aktivnosti

*Tablica 5.8.* Rezultati simulacije re-optimizacijom za odabrana početna rješenja

*Tablica 5.9.* Hipotetski financijski podaci za *ex-post* analizu konkretnog građevinskog projekta

*Tablica 5.10.* Pareto skup dobivenih rješenja za projektnu mrežu stvarnog građevinskog projekta

*Tablica 5.11.* Hipotetski podaci za analizu dodatnih scenarija neizvjesnosti

*Tablica D.1.* Podaci o aktivnostima za ilustrativni primjer projekta, prema [95]

*Tablica D.2.* Ulazni parametri potrebni za proračun financijskog toka u ilustrativnom primjeru

*Tablica D.3.* Jednostavni financijski tok ilustrativnog primjera sa zanemarenim troškovima financiranja

*Tablica D.4.* Financijski tok ilustrativnog primjera sa uključenim troškovima financiranja

*Tablica D.5.* Početni plan

*Tablica D.6.* Analiza rizika

*Tablica D.7.* Ostvarena trajanja i troškovi

## ŽIVOTOPIS

Martina Milat, mag. ing. aedif. rođena je 13. kolovoza 1992. u Splitu. Sveučilišni diplomski studij građevinarstva (smjer: organizacija građenja) završila je 2017. godine na Građevinskom fakultetu u Zagrebu. Iste godine zapošljava se na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, u suradničkom zvanju asistentice na Katedri za organizaciju i ekonomiku građenja. U ožujku 2018. godine upisala je doktorski studij „Građevinarstvo“ na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu. Upisana je u registar znanstvenika Ministarstva znanosti i obrazovanja Republike Hrvatske pod brojem 369265. Do sada je kao asistentica na Fakultetu građevinarstva, arhitekture i geodezije bila nastavno angažirana na kolegijima Organizacija građenja 1 i 2, Tehnologija građenja, Proizvodnja u građevinarstvu, Upravljanje projektima te Operacijska istraživanja u građevinarstvu.

### Objavljeni znanstveni radovi iz područja teme doktorskog istraživanja:

Znanstveni radovi u časopisima:

1. **Milat, M.**; Knezić, S.; Sedlar, J. Resilient Scheduling as a Response to Uncertainty in Construction Projects. *Appl. Sci.* **2021**, 11, 6493. <https://doi.org/10.3390/app11146493>
2. **Milat, M.**; Knezić, S.; Sedlar, J. Application of a Genetic Algorithm for Proactive Resilient Scheduling in Construction Projects. *Designs* **2022**, 6, 16. <https://doi.org/10.3390/designs6010016>

Znanstveni radovi u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom:

1. Sedlar, J.; **Milat, M.** Three models for resilient network design and a genetic algorithm to approach them. *Proceedings of the 2nd Croatian Combinatorial Days*, **2019**, pp. 123-141.
2. **Milat, M.**; Knezić, S.; Sedlar, J. A new surrogate measure for resilient approach to construction scheduling. *Procedia Computer Science* **2021**, 181, pp. 468-476.
3. **Milat, M.**; Knezić, S.; Sedlar, J. Multi-Objective Optimization Approach to Develop Resilient Baseline Schedules. *Proceedings of the 15th International Conference Organization, Technology and Management in Construction*, Cavtat (Dubrovnik), **2022**. str. 428-438