

Univerza  
v Ljubljani  
Fakulteta  
*za gradbeništvo  
in geodezijo*

*Janova 2  
1000 Ljubljana, Slovenija  
telefon (01) 47 68 500  
faks (01) 42 50 681  
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Gradbeništvo,  
Konstrukcijska smer

Kandidat:

**Matic Baškovč**

# **Stroškovna optimizacija trajanja projektov z uporabo genetskih algoritmov**

**Diplomska naloga št.: 3095**

**Mentor:**

izr. prof. dr. Jana Šelih

**Somentor:**

viš. pred. dr. Aleksander Srdić

Ljubljana, 23. 12. 2009

*Hvala mentorici Jani Šelih in somentorju Aleksandru Srdiću  
za pomoč in napotke pri pripravi diplomske naloge.*

*Za vzpodbudo in zaupanje se zahvaljujem tudi staršem in Poloni.*

## **IZJAVA O AVTORSTVU**

Podpisani MATIC BAŠKOVČ izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:  
»STRŠKOVNA OPTIMIZACIJA TRAJANJA PROJEKTOV Z UPORABO GENETSKIH  
ALGORITMOV«.

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL,  
Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 16.12.2009

Podpis: \_\_\_\_\_

## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**

**UDK:** 004:65.012.003(043.2)  
**Avtor:** Matic Baškovč  
**Mentor:** doc. dr. Jana Šelih, univ. dipl. inž. grad.  
**Somentor:** asist. dr. Aleksander Srđić, univ. dipl. inž. grad.  
**Naslov:** Stroškovna optimizacija trajanja projektov z uporabo genetskih algoritmov  
**Obseg in oprema:** 60 str., 13 pregl., 11 graf., 15 sl., 4 en.,  
**Ključne besede:** projekt, optimizacija, genetski algoritem, stroški, čas

### **Izveček**

Pri izvedbi gradbenega projekta sledimo trem ključnim ciljem – kakovost, stroški in čas, ki so medsebojno divergentni. Kakovost opredeljuje področje gradbene regulative in izbira tehnologije. Optimalno razmerje med stroški in časom ter njegovo doseganje je odvisno predvsem od znanja planerja, vodje projekta ter od razpoložljive tehnologije in okoliščin izvajanja projekta. Kompleksnost strukture, veliko število deležnikov gradbenih projektov ter stopnjujoče zahteve investitorjev glede vedno krajših rokov izvedbe zahtevajo uporabo učinkovite informacijske podpore in računalniško podprtih optimizacijskih orodij, namenjenih odločanju pri vodenju projektov. Za njihovo učinkovito uporabo pa je potrebno poznavanje problematike odvisnosti stroškov in trajanja, tako na nivoju dejavnosti, kot tudi projekta kot celote. Le tako lahko izdelamo ustrezen matematični model projekta, ki je osnova različnim optimizacijskim metodam. V nalogi so predstavljeni ključni parametri za izdelavo takšnega modela, kot tudi osnove metode optimizacije s pomočjo genetskih algoritmov, ki je zelo učinkovita pri reševanju večciljnih kombinatoričnih problemov optimizacije. Na testnem primeru je prikazana uporaba različnih orodij, ki temeljijo na tej metodi ter analiza dobljenih rezultatov.

## **BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION**

<b>UDC:</b>	<b>004:65.012.003(043.2)</b>
<b>Author:</b>	<b>Matic Baškovč</b>
<b>Supervisor:</b>	<b>Assist. Prof. dr. Jana Šelih, b.s.c.e.</b>
<b>Co-Supervisor:</b>	<b>Assist. dr. Aleksander Srđić, b.s.c.e.</b>
<b>Title:</b>	<b>Optimization of construction time-cost trade-off analysis using genetic algorithms</b>
<b>Notes:</b>	<b>60 p., 13 tab., 11 diag., 15 fig., 4 eq.,</b>
<b>Key Word:</b>	<b>time, optimization, cost, genetic algorithms</b>

### **Abstract**

When we want to carry out a particular building project, three mutually divergent objectives have to be taken into consideration – quality, costs and time. Quality is determined by the building regulation and is vital in the selection of construction technology. The optimum cost-time ratio and the level of attainment of this goal depend mostly on the organizer's knowledge, project manager, available technology and the conditions related to the project implementation. The complexity of the structure, large number of the building project's stakeholders, owner's growing demands regarding the deadlines require the use of efficient information support and computerized optimization tools. Their aim is to support the decision-making process concerning the project management. However, in order to achieve efficiency, we need to be well acquainted with the issue of cost-duration ratio as much so in relation to the activity itself as to the project as a whole. Only this can lead to obtaining an adequate mathematical model of the project, which is the basis for various optimization methods. The dissertation presents the key parameters for designing such a model as well as the foundations of the optimization method. The method is based on genetic algorithms and is proven to be extremely efficient in solving the multiobjective combinatorial problems of optimization. The presented test example shows the use of different tools based on this method and the analysis of obtained results.

## KAZALO VSEBINE

<b>1</b>	<b>UVOD</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Opredelitev problema</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Cilji in namen naloge</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>SPLOŠNO O PROJEKTU</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Izdelava plana gradbenega projekta</b>	<b>3</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Planiranje obsega dela</b>	<b>3</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Planiranje stroškov projekta</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>DEFINICIJA PROBLEMA</b>	<b>12</b>
<b>3.1</b>	<b>Odvisnost med časom in stroški izvedbe dejavnosti</b>	<b>14</b>
<b>3.2</b>	<b>Stroški in čas v okviru projekta</b>	<b>20</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Indirektni stroški</b>	<b>21</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Direktni stroški</b>	<b>21</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Stroški prekoračitve trajanja projekta – penali</b>	<b>22</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Nagrada za predčasno opravljeno delo – linearno omejena premija</b>	<b>23</b>
<b>3.3</b>	<b>Krajšanje dejavnosti pri netipičnih odvisnostih med dejavnostmi</b>	<b>24</b>
<b>3.3.1</b>	<b>SS in FF povezave med dejavnostmi ter njihovo krajšanje</b>	<b>24</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Dvojna povezava (SS+FF)</b>	<b>26</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Zamik dejavnosti izražen v odstotku (%)</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>METODE REŠEVANJA</b>	<b>29</b>
<b>4.1</b>	<b>Dosedanje metode za reševanje tovrstnih problemov</b>	<b>29</b>
<b>4.2</b>	<b>Splošni postopek krajšanja trajanja projekta – iteracijski postopek</b>	<b>29</b>
<b>4.3</b>	<b>Genetski algoritem</b>	<b>30</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Križanje</b>	<b>31</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Mutacija</b>	<b>32</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Poenostavljen primer genetskega algoritma</b>	<b>32</b>

<b>5</b>	<b>GENETSKI ALGORITEM ZA UPORABO ČASOVNO-STROŠKOVNE ANALIZE</b>	<b>34</b>
<b>5.1</b>	<b>Večciljna optimizacija</b>	<b>34</b>
<b>5.1.1</b>	<b>Pareto</b>	<b>34</b>
<b>5.2</b>	<b>Genetski algoritem (GA) za konstruiranje časovno-stroškovne optimizacije</b>	<b>35</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Terminologija</b>	<b>35</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Potek algoritma</b>	<b>36</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Povzetek</b>	<b>37</b>
<b>5.3</b>	<b>Formulacija modela za časovno-stroškovno optimizacijo</b>	<b>38</b>
<b>5.4</b>	<b>Računalniška podpora</b>	<b>40</b>
<b>6</b>	<b>TESTNI PRIMER</b>	<b>41</b>
<b>6.1</b>	<b>Iteracijski postopek – ročno krajšanje</b>	<b>45</b>
<b>6.2</b>	<b>Uporaba Microsoft Office Excel 2007</b>	<b>46</b>
<b>6.2.1</b>	<b>Dodatek Reševalec v Microsoft Office Excel 2007</b>	<b>47</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Dodatek Evolver v Microsoft Office Excel 2007</b>	<b>48</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Paket Risk Solver v Microsoft Office Excel 2007</b>	<b>48</b>
<b>6.3</b>	<b>Uporaba MS Office Project 2007 – makro z genetskim algoritmom</b>	<b>49</b>
<b>7</b>	<b>REZULTATI, KOMENTARJI IN PRIMERJAVE</b>	<b>53</b>
<b>7.1</b>	<b>Rezultati iteracijskega postopka – ročno krajšanje</b>	<b>53</b>
<b>7.2</b>	<b>Rezultati dodatka Reševalec v Microsoft Office Excel 2007</b>	<b>53</b>
<b>7.3</b>	<b>Rezultati dodatka Evolver v Microsoft Office Excel 2007</b>	<b>53</b>
<b>7.4</b>	<b>Rezultati paketa Risk Solver v Microsoft Office Excel 2007</b>	<b>54</b>
<b>7.5</b>	<b>Rezultati makra z genetskim algoritmom v MS Office Project 2007</b>	<b>54</b>
<b>7.6</b>	<b>Primerjava rezultatov vseh uporabljenih metod</b>	<b>56</b>
	<b>ZAKLJUČEK</b>	<b>58</b>
	<b>VIRI</b>	<b>60</b>

## KAZALO PREGLEDNIC

- Preglednica 1: Povezava med parametri gradbene pogodbe in cilji gradbenega projekta
- Preglednica 2: Povezava med cilji projekta, področji vodenja projekta in rezultati planiranja
- Preglednica 3: Značilnosti stroškov gradbenega projekta
- Preglednica 4: Členitev direktnih stroškov
- Preglednica 5: Zveza med stroški, nosilci stroškov in odhodki gradbenega projekta
- Preglednica 6: Definicija tipov stroškov uporabljenih v modelu definiranja problema časovno-stroškovne optimizacije
- Preglednica 7: Grafikoni odvisnosti med časom in stroški izvedbe posamezne dejavnosti
- Preglednica 8: Podatki testnega primera
- Preglednica 9: Uporabniško določene vrednosti testnega primera
- Preglednica 10: Potek iteracijskega krajšanja
- Preglednica 11: Rezultati dodatka Evolver
- Preglednica 12: Rezultati paketa Risk Solver
- Preglednica 13: Rezultati makra z genetskim algoritmom



## KAZALO GRAFIKONOV

- Grafikon 1: Linearna zveza med časom in stroški
- Grafikon 2: Odsekoma linearna zveza med časom in stroški
- Grafikon 3: Diskretna zveza med časom in stroški
- Grafikon 4: Nelinearna zveza med časom in stroški
- Grafikon 5: Prikaz stroškov
- Grafikon 6: Prikaz penalov in premije
- Grafikon 7: Konveksna lupina, optimizacijska krivulja in posamezne rešitve
- Grafikon 8: Določitev ustreznosti rešitve
- Grafikon 9: Izboljšanje konveksne lupine
- Grafikon 10: Primerjava rezultatov genetskega algoritma
- Grafikon 11: Primerjava rezultatov vseh uporabljenih metod

## KAZALO SLIK

- Slika 1: Primer SS in FF povezave med dejavnostima
- Slika 2: Krajšanje dejavnosti pri povezavah SS in FF
- Slika 3: SS/FF povezave med dejavnostmi
- Slika 4: Zamik dejavnosti izražen v odstotkih (%)
- Slika 5: Osnoven proces križanja
- Slika 6: Osnoven proces mutacije
- Slika 7: Formiranje kromosoma
- Slika 8: Testni primer - mrežni diagram (dejavnostna mreža)
- Slika 9: Primer ročnega krajšanja s pomočjo grafičnega vmesnika v Microsoft Office Project 2007
- Slika 10: Grafični vmesnik dodatka Reševalec v Microsoft Office Excel 2007
- Slika 11: Grafični vmesnik dodatka Evolver v Microsoft Office Excel 2007
- Slika 12: Grafični vmesnik paketa Risk Solver v Microsoft Office Excel 2007
- Slika 13: Okna za vnos podatkov
- Slika 14: Del kode makra vgrajenega v Microsoft Office Project 2007
- Slika 15: Primer izpisa rezultatov genetskega algoritma

# 1 UVOD

## 1.1 Opredelitev problema

Ko oblikujemo in ustvarjamo nov projekt, lahko posamezne komponente povezujemo na različne načine tako dolgo, dokler dobljene alternative ne zadostijo namenu projekta. Dejavnostno mrežo lahko oblikujemo z različnimi razporeditvami dejavnosti, tudi če pri tem ostaja običajno trajanje dejavnosti nespremenjeno.

Ko sestavimo več možnih rešitev, ki so med drugim tudi fizično možne, mora projekt skozi rešeto ekonomske izvršljivosti. Njegovi stroški morajo biti minimalizirani. Ker skupni strošek vsebuje tako režijske stroške, ki so odvisni od trajanja projekta, kot tudi direktne stroške, bo zamuda projekta praviloma povečala njegove stroške. Če je trajanje projekta vnaprej določeno s pogodbo, lahko naročnik za predčasno dokončanje projekta obljubi nagrado oziroma zahteva povračilo škode v primeru zamude. Analiza ekonomskih možnosti pomeni več kot le najti rešitev z najnižjimi stroški, ki upraviči investicijo. Dejstvo, da se projekt izvaja, kaže na to, da se investicija izplača tudi za naročnika. Analiza ekonomskih možnosti lahko izboljša višino povračila investicije ali pa poveča privlačnost projekta z nadaljnjim zniževanjem stroškov projekta preko rešitve z najnižjimi stroški. To dosežemo z daljšanjem oziroma krajšanjem trajanja projekta.

Časovno-stroškovna analiza je med najpomembnejšimi pri planiranju projekta in njegove kontrole. Pri tem obstajajo povezave med trajanjem in stroški posameznih dejavnosti in posledično celotnega projekta. V splošnem velja, da daljše kot je trajanje projekta, manjši so stroški njegove izvedbe. Z uporabo metode CPM (Critical Path Method) lahko zmanjšamo stroške projekta pri nespremenjenem trajanju, če za dejavnosti, ki niso na kritični poti, izberemo cenejše alternative izvedbe. Dosedanje metode za takšno optimizacijo projektov so temeljile na hevrističnih ali eksaktno-analitičnih modelih. Projekti pa v zadnjem času postajajo vse preveč obsežni, da bi jih lahko reševali na takšen način (veliko število dejavnosti). Tukaj stopijo v ospredje genetski algoritmi (GA), ki temeljijo na genetskem procesu bioloških organizmov, saj se zgledujejo po evoluciji v naravi, kjer se populacija neke vrste skozi generacije razvija po načelu naravnega izbora in preživetju uspešnejšega.

## **1.2 Cilji in namen naloge**

Diplomska naloga je nastala z namenom, da prikaže alternativno metodo stroškovne optimizacije trajanja projektov. Za njeno uspešno izvajanje pa je najprej potrebno sestaviti uporaben model, ki bo osnova za vse metode, s katerimi bo analiziran testni primer. Pri večciljnih problemih, kot je tudi obsežen gradbenih projekt, je zaradi svoje kompleksnosti odvisnosti med dejavnostmi smiselna uporaba genetskih algoritmov. Ti so prilagojeni reševanju znanstvenih in inženirskih problemov današnjega časa v smislu iskanja optimalnih rešitev pri kompleksnih problemih. Z uporabo makra v komercialnem računalniškem programu Microsoft Office Project bo predstavljena analiza in optimizacija testnega primera. Za potrditev smiselnosti njegove uporabe bo testni primer analiziran tudi z drugimi metodami. Na podlagi rezultatov in primerjav uporabljenih metod bodo predstavljene prednosti in slabosti uporabe genetskih algoritmov pri optimizaciji gradbenih projektov.

## 2 SPLOŠNO O PROJEKTU

### 2.1 Izdelava plana izvedbe gradbenega projekta

#### 2.1.1 Planiranje obsega projekta

Obseg gradbenega projekta je definiran z gradbeno pogodbo, ki jo podpišeta investitor in izvajalec. Gradbena pogodba je dokument, ki podaja glavne karakteristike projekta, kot so proračun projekta in začetek ter konec projekta. Podrobnejši obseg gradbenega projekta je podan v dokumentaciji, ki predstavlja sestavni del pogodbe. V dokumentacijo sodijo razpisni pogoji (splošni, posebni, tehnični) in ponudbena dokumentacija, s katero je izvajalec pridobil projekt v izvajanje. Z gradbeno pogodbo so tako podani parametri za vse tri cilje projekta.

Preglednica 1: Povezava med parametri gradbene pogodbe in cilji gradbenega projekta

<b>parametri gradbene pogodbe</b>	<b>cilji gradbenega projekta</b>
proračun gradbenega projekta	EKONOMIČNOST
začetek in konec izvedbe	PRAVOČASNOST
pogoji izvedbe projekta	KAKOVOST, TVEGANJA

Plan obsega projekta je opredeljen z:

- gradbeno pogodbo s prilogami (pogodbeni predračun, pogodbeni terminski in finančni plan)
- razpisnimi pogoji (splošni, posebni, tehnični)
- ponudbenim elaboratom

#### 2.1.2 Planiranje stroškov projekta

V drugo skupino planiranja gradbenega projekta spada planiranje časa in stroškov. Zaradi medsebojne soodvisnosti trajanja dejavnosti in virov, potrebnih za njihovo izvedbo, je smiselno planiranje časa in planiranje stroškov obravnavati skupaj.

Preglednica 2: Povezava med cilji projekta, področji vodenja projekta in rezultati planiranja

cilj projekta	področje vodenja projekta	vrsta planiranja	rezultat planiranja
EKONOMIČNOST	obvladovanje stroškov	planiranje stroškov	PLAN STROŠKOV

Za uspešno vodenje gradbenega projekta v smislu ekonomičnosti je poleg planiranja s stališča časa pomembno tudi planiranje stroškov projekta.

Stroške gradbenega projekta ustvarjajo viri, potrebni za izvedbo planiranih nalog in viri, ki niso neposredno povezani s temi nalogami in so definirani kot režijski viri stroškov.

Preglednica 3: Značilnosti stroškov gradbenega projekta

<b>viri</b>	<b>stroški</b>	<b>značilnosti stroškov</b>
DELOVNA SILA	strošek najema delovne sile	brezdelje delavcev, ki zaradi vzrokov čakajo na nadaljevanje dela, povečuje stroške delovne sile
MEHANIZACIJA	strošek najema / amortizacije mehanizacije in energije	zastoji pri delu mehanizacije zaradi različnih vzrokov povečujejo stroške najema mehanizacije
MATERIAL	strošek nakupa materiala	strošek je enak ne glede na to, ali je material takoj uporabljen ali pa dolgo čaka na uporabo v skladišču; s čakanjem se povečujejo le stroški skladiščenja
PODIZVAJALCI	strošek angažiranja podizvajalcev	povečanje stroškov podizvajalcev zaradi nepredvidljivih okoliščin je odvisno od pogodbenega odnosa med projektom in podizvajalcem
REŽIJSKI VIRI	strošek režijskih virov	s podaljševanjem izvajanja projekta se povečujejo stroški režijskih virov

Stroške, ki jih ustvarjajo viri, direktno vezani na dejavnosti projekta, se imenujejo direktni stroški. Mednje se uvrščajo:

- stroški delovne sile,
- stroški mehanizacije,
- stroški materiala
- stroški podizvajalcev.

Stroški režijskih virov, ki so potrebni za dokončanje projekta, ni pa jih mogoče povezati z nobeno dejavnostjo projekta, se imenujejo indirektni stroški. Zaradi lažjega evidentiranja in spremljanja tudi te stroške delimo na več skupin, in sicer na:

- stroške pripravljanih in zaključnih del,
- stroške obratne režije gradbišča,
- stroške upravno-prodajne režije.

#### **2.1.2.1 Plan direktnih stroškov**

Osnova za direktne stroške je z gradbeno pogodbo definiran obseg del. Del teh stroškov ustvari izvajalska podjetja sama, del pa podizvajalci, ki jih izvajalska podjetja najamejo za izvedbo tistih del, ki jih sama ne izvajajo. Običajno podjetja z lastnimi kapacitetami izvedejo gradbena dela, za obrtniška in inštalacijska dela pa angažirajo ustrezne podizvajalce. Tako je nosilec stroškov, povezanih z gradbenimi deli, izvajalsko podjetje, podizvajalci pa so nosilci stroškov za obrtniška in inštalacijska dela.

Preglednica 4: Členitev direktnih stroškov

DIREKTNI STROŠKI GRADBENEGA PROJEKTA			
vrsta del po gradbeni pogodbi	vrsta stroškov	nosilci stroškov	DIREKTNI stroški gradbenega projekta
GRADBENA DELA	stroški delovne sile	izvajalsko podjetje	stroški delovne sile
	stroški mehanizacije		stroški mehanizacije
	stroški materiala		stroški materiala
OBRTNIŠKA DELA	stroški delovne sile	podizvajalci obrtniških del	stroški podizvajalcev
	stroški mehanizacije		
	stroški materiala		
INŠTALACIJSKA DELA	stroški delovne sile	podizvajalci inštalacijskih del	
	stroški mehanizacije		
	stroški materiala		

#### 2.1.2.2 Plan indirektnih stroškov

Indirektne stroške gradbenega projekta se planira ločeno za pripravljalna in zaključna dela, obratno režijo ter upravno-prodajno režijo. Prve se planira preko ovrednotenja popisa del, ki se ga izdelava na podlagi lokacijskih danosti, izbrane tehnologije gradnje in roka gradnje, definirane v gradbeni pogodbi. Oba popisa del, tako popis pripravljalnih in zaključnih del kot tudi popis obratne režije, sta sestavna dela PLANA ČASA in STROŠKOV.

Stroške pripravljalnih in zaključnih del je mogoče vsebinsko razdeliti na štiri skupine stroškov, in sicer na stroške, povezane

- z gradbiščnimi provizoriji,
- z gradbeno mehanizacijo,
- z dostopnimi potmi in platoji ter
- s komunalnimi priključki.

Navedene skupine stroškov je mogoče podrobneje razčleniti na stroške

- prevoza, postavitve in odstranitve gradbiščnih provizorijev (pisarna, jedilnica, garderoba, sanitarije, skladišče, tesarska lopa, maltarna ipd.),
- obnove obstoječih objektov za potrebe gradbiščnih provizorijev,



- prevoza, postavitve in odstranitve gradbiščne ograje, vrat, napisnih tabel,
- prevoza, postavitve in odstranitve gradbene mehanizacije in opreme (žerjavi, dvigala, prekladalni silos ipd.),
- ureditve dostopnih poti in platojev (platoji za deponije in provizorije, delovni platoji),
- izvedbe komunalnih priključkov (elektrike, vode, kanalizacije in telefona) brez stroškov priklopa,
- zavarovanja gradbene jame ter
- raznih gradbenih del, ki jih je z razpisnimi pogoji zahteval naročnik in niso vključena v pogodbeni predračun.

Tudi stroški obratne režije gradbišča se vsebinsko delijo na več skupin stroškov, in sicer na stroške povezane

- z osebno režijo,
- z najemninami,
- s prevoznimi sredstvi,
- z obratovanjem gradbišča in
- druge stroške.

Podrobneje se navedeni stroški obratne režije delijo na:

- stroške osebne režije (osebni dohodki, terenski dodatki, dnevnice),
- stroške najemnin (zabojniki, kovinske lope, ograja, vrata, prekladalni silos, napisne table, elektro omarica, reflektor, agregat, sanitarna kabina, obstoječi objekti na gradbišču za potrebe gradbiščnih provizorijev ipd.),
- stroške obratovanja (ogrevanje, elektrika, voda, žični in brezžični telefon),
- stroške prevoznih sredstev (režijski tovornjak, kombi, avtobus, osebni avtomobil),
- druge stroške, kot so:
  - o stroški zaščitnih sredstev,
  - o stroški drobnega inventarja (pisarniški material, toaletni papir, žarnice ipd.),
  - o stroški drobne mehanizacije in opreme (drobni strojčki),
  - o stroški projektiranja
  - o stroški garancij,

- stroški financiranja,
- stroški zavarovanj projekta,
- stroški geodetskih storitev,
- stroški kontrole kakovosti,
- stroški nabav za investitorja,
- stroški varovanja gradbišča,
- drugi stroški režije po glavni pogodbi,
- stroški zapore javne prometne površine s prometno signalizacijo,
- stroški priklopa komunalnih priključkov (elektrike, vode, kanalizacije in telefona).

Najemnino za gradbiščne provizorije in mehanizacijo se obračunava na podlagi količin iz popisa pripravljanih in zaključnih del. Časovni interval za obračun najemnin in osebne režije projekta se določi na podlagi terminskega plana.

Stroški upravno-prodajne režije, ki vključujejo stroške drugih služb izvajalskega podjetja, se planirajo v deležu glede na proračun projekta. Delež sredstev, ki ga mora vsak gradbeni projekt prispevati za upravno-prodajno režijo, se določa letno z gospodarskim planom podjetja. Pri projektih, ki trajajo več let, je tak način planiranja stroškov upravno-prodajne režije zelo negotov, ker se višina teh stroškov iz leta v leto spreminja. V smislu poenostavitve planiranja in vodenja gradbenega projekta je smiselno na ravni podjetja skleniti dogovor, da se ti stroški skozi trajanje projekta ne spreminjajo. Tako bo že v fazi definiranja projekta znana višina teh stroškov za celotno trajanje projekta. V kolikor takega dogovora ni mogoče doseči, predstavljajo stroški upravno-prodajne režije določeno tveganje za gradbeni projekt.

### **2.1.2.3 Finančni rezultat projekta**

Eden izmed treh glavnih ciljev gradbenega projekta je ekonomičnost projekta, kar pomeni izvedbo projekta s čim manjšimi stroški. Osnovo oziroma standard za kasnejše ugotavljanje, ali je projekt ekonomičen ali ne, predstavlja planiranje finančnega rezultata projekta, ki je povezano s planiranjem stroškov (direktnih in indirektnih) gradbenega projekta. Izhodišče za

izračun finančnega rezultata projekta je pogodbeno vrednost projekta, zmanjšana za zakonsko določene dajatve (davek na dodano vrednost).

Predpogoj za zadovoljivo vodenje gradbenega projekta je, da je planirani finančni rezultat projekta večji od nič. To se zgodi takrat, ko je pogodbeno vrednost projekta večja od planiranih stroškov projekta.

S stališča izpolnjevanja strateških ciljev izvajalskega podjetja mora vsak gradbeni projekt prispevati h gospodarski rasti podjetja. To je mogoče le, če planirani finančni rezultat projekta presega vrednost z gospodarskim planom določenega dobička podjetja, ki se računa v deležu pogodbene vrednosti projekta.

#### **2.1.2.4 Finančni plan projekta**

Finančni plan gradbenega projekta podaja časovno razvrstitev stroškov projekta med pogodbeni začetek in konec gradnje.

Časovno planiranje direktnih stroškov je enostavno, saj je njihova časovna umestitev v življenjskem ciklusu gradbenega projekta definirana že s terminskim planom. Časovno planiranje indirektnih stroškov je nekoliko bolj zapleteno. Stroške pripravljanih in zaključnih del se časovno upošteva na začetku in na koncu projekta, pri čemer se razdelitev skupnih ocenjenih stroškov izvede v dogovorjenem razmerju, npr. 70:30 v korist stroškov pripravljanih del. Stroške obratne režije se časovno upošteva skozi ves čas trajanja projekta glede na to, kako bodo nastopili. Tako se v primeru, da se število režijskega kadra na gradbišču spreminja, časovno spreminjajo tudi stroški obratne režije. Ker so stroški upravnoprodatne režije vezani na direktne stroške, je tudi njihovo časovno planiranje odvisno od časovnega planiranja direktnih stroškov. Iz navedenega sledi, da so vsi stroški časovno pogojeni oziroma se s časom spreminjajo :  $S = f(t)$ .

Oblika finančnega plana gradbenega projekta je odvisna od načina prikazovanja stroškov skozi trajanje projekta. Te je možno prikazati zbirno ali pa po časovnih obdobjih, npr.

mesečno. Tako je finančni plan gradbenega projekta v prvem primeru predstavljen s krivuljo v obliki črke »S« v drugem pa s krivuljo v obliki »zvona«.

#### 2.1.2.5 Plan prilivov in odlivov

Planiranje prilivov in odlivov gradbenega projekta predstavlja planiranje finančnih virov projekta in omogoča vpogled v finančno stanje projekta skozi ves njegov življenjski cikel.

Pri planu prilivov in odlivov gre za časovno zasledovanje posebne vrste virov gradbenega projekta, ki so definirani kot finančni viri. Ti so:

- **dolg** oziroma **odhodek**,
- **zaslužek** oziroma **prihodek**,
- **presežek**.

Narava prvih dveh finančnih virov se s časom spreminja, kajti dolg po določenem času postane odhodek, zaslužek pa prihodek.

Odhodki, ki se pojavljajo v okviru gradbenega projekta, so:

- osebni dohodki in druge obveznosti za delavce,
- plačila za najem mehanizacije,
- plačila dobaviteljem materiala,
- plačila podizvajalcem.

Vzrok za pojav odhodkov je angažiranje tipičnih nosilcev stroškov na projektu, ki so hkrati tudi viri termiskega plana in so nosilci direktnih stroškov. K tem virom, ki so lahko pogojeni časovno ali vrednostno, je kot nosilec stroškov dodana tudi režija. Značilnost prvih je odvisnost od trajanja projekta, značilnost drugih pa je odvisnost od količine.

Nosilci stroškov so tako:

- delavci,
- mehanizacija,
- material,
- podizvajalci,
- režija.

Režija je nosilec indirektnih stroškov (stroški pripravljanih in zaključnih del, obratne režije gradbišča ter upravno-prodajne režije).

Preglednica 5: Zveza med stroški, nosilci stroškov in odhodki gradbenega projekta

stroški	nosilci stroškov		odhodki gradbenega projekta
DIREKTNI STROŠKI	DELOVNA SILA		plače in druge obveznosti za delavce
	MEHANIZACIJA		plačila za najem mehanizacije
	MATERIAL		plačila dobaviteljem materiala
	PODIZVAJALCI		plačila podizvajalcem
INDIREKTNI STROŠKI	REŽIJA	pripravljalna in zaključna dela	odhodki za režijo
		obratna režija gradbišča	
		upravno-prodajna režija	

Rezultat planiranja finančnih sredstev je plan prilivov in odlivov – finančni tok (cash flow), ki je lahko periodičen, zbiran ali kombiniran.

### 3 DEFINICIJA PROBLEMA

Planerji se soočajo s problemi, ko je potrebno izbrati vire, vključujoč velikost delovnih ekip, opreme, metod in tehnologij, da bodo lahko izvedli posamezno dejavnost. Od te izbire je odvisno trajanje dejavnosti in posledično projekta ter njegovi stroški. Za primer lahko vzamemo zmogljivejši stroj, ki v krajšem času lahko naredi več, vendar so stroški na enoto dela višji. Grafikoni 1 do 4 prikazujejo tipične odvisnosti med stroški in časom za dokončanje posamezne dejavnosti. Planerji želijo doseči, da je projekt dokončan v najkrajšem času in z njim povezanimi najmanjšimi stroški. Za takšno odločitev je potrebno kar nekaj poskusov in iteracij, da lahko zadostijo vsem finančnim in časovnim omejitvam. Rezultat planerskega dela je krivulja odvisnosti med časom in stroški in izbor metod pri posamezni dejavnosti, ki bodo prinesle optimalni finančni rezultat v okviru časovnih omejitev.

Rezultat prvega časovnega proračuna mreže je lahko ena od naslednjih treh možnosti:

- a) izračunani čas mreže je krajši od predpisanega termina dograditve:  $T_p^{rač} < T_p^{pred}$
- b) oba časa sovpadata:  $T_p^{rač} = T_p^{pred}$
- c) izračunani čas mreže je daljši od predpisanega termina dograditve:  $T_p^{rač} > T_p^{pred}$

V prvih dveh primerih ni potrebno v smislu planiranja ukreniti ničesar, pod predpostavko, da so programirani že optimalni časi za izračun mreže. Če to ni bil primer, potem lahko pri nastopu možnosti a) še enkrat preverimo hitrost izvedbe preveč "napetih" dejavnosti mreže. V kolikor pa nastopi zadnja od omenjenih možnosti c), torej, kolikor je računski čas gradnje večji od predpisanega, se moramo odločiti za eno, ali tudi za več vrst ukrepov. Te ukrepe lahko razvrstimo v pet osnovnih skupin, in sicer:

- skrajšanje potrebnega časa s pomočjo povečanja izvedbenih kapacitet oziroma dolžine delavnika:
  - uvedba dodatne delovne sile,
  - uvedba druge ali tretje delovne izmene,
  - uvedba nadurnega dela,

- večja mehaniziranost dela,
  - uvedba nove, odločilne strojne kapacitete.
- povečanja paralelizacije del v izvedbi:
- dosežemo jo lahko z reduciranjem nekaterih odvisnosti, ki so sicer ugodne za normalni potek dela, ne pa tudi neobhodne. Te odvisnosti niso nujno le tehnološkega značaja, ampak so lahko čisto organizacijsko utemeljene.
- skrajšanje potrebnega časa s pomočjo spremembe tehnologije postopkov gradnje:
- dokaj radikalen ukrep, za katerega se najde le redkokdaj dovolj časa v okviru priprav na gradnjo,
  - pri spremembah tehnoloških postopkov zasledujemo težnjo zmanjšanja časa dela na samem objektu, na račun delovnega povečanja časa dela v obratu ali delavnici,
  - napor v tem smislu so dolgoročnejšega značaja in spadajo bolj v razvojno delo na industrializaciji sistemov gradnje kot tako, kot pa v izolirane organizacijske ukrepe s ciljem skrajšanja planiranega časa gradnje.
- zmanjšanje obsega dela:
- izpustijo se manj potrebne kritične dejavnosti, t.j. take, ki neznatno zvečajo riziko uspešnosti celotnega projekta,
  - v primeru dolgoročne etapne gradnje se lahko del izvedbe iz prve etape prenese v eno od naslednjih etap, pri čemer si moramo seveda že biti načelno na jasnem, kako bomo izravnali kritično stanje, ki se bo s to preložitvijo pojavilo v naslednjih etapah,
  - kot izhod v sili ga lahko predstavlja tudi zmanjšana kakovost objektov ali njihovih naprav, ki pa naj po možnosti bolj prizadene udobje, kot pa funkcionalnost.

➤ podaljšanje predpisanega časa gradnje:

- tako podaljšanje je seveda potrebno ekonomsko utemeljiti in predvideti vse verižne posledice kasnejše dograditve v najbolj kompleksnem smislu,
- podaljšanje predpisanega časa gradnje je prav tako nepopularen ukrep, kot zmanjšanje obsega dela v smislu kvalitete, zato ga je potrebno jemati z veliko rezervo in kot izjemen primer, kadar vsi ukrepi v smislu pospeševanja gradnje ne zaležejo dovolj.

Vsako od teh petih skupin ukrepov lahko realiziramo posamično ali tudi v medsebojnih kombinacijah.

Vsi ti ukrepi neposredno ali posredno vplivajo na stroške in čas izvedbe posamezne dejavnosti kot tudi celotnega projekta.

V mrežnem modelu projekta so njegovi osnovni gradniki dejavnosti. Pri analizi ekonomskih možnosti projekta poskušamo spreminjati trajanje vsake posamezne dejavnosti, ter pri tem opazujemo vpliv spremembe na celotne stroške projekta. Trajanje in stroški vsake dejavnosti se lahko spremenijo tako, da zmanjšajo ali povečajo celotne stroške projekta. V procesu zmanjševanja stroškov projekta preverimo več možnosti izvedbe dejavnosti, pri čemer ima vsaka različen vpliv na trajanje in stroške. Izbrana je najbolj primerna rešitev. Kriterij za izbiro je odvisen od ravnotežja med stroški in trajanjem, ki ga planer oziroma vodja projekta želi doseči.

### **3.1 Odvisnost med stroški in časom izvedbe dejavnosti**

Da bi dosegli cilje, ki so opisani v prejšnjem poglavju, potrebujemo še eno dodatno informacijo. V mrežnem planiranju je določeno običajno trajanje vsake dejavnosti – to je čas, v katerem lahko dokončamo posamezno dejavnost, če so viri normalno razpoložljivi in brez dodatnih vložkov v projekt. Poleg običajnega trajanja so določeni tudi običajni stroški. To so ocenjeni stroški dejavnosti izvedene v običajnem času.



Planiranje je določanje časa trajanja dejavnosti in njihovo razporejanje, tako da dobimo skupno trajanje projekta. Prvotno določen čas trajanja vsake od posameznih dejavnosti je odvisen od izbrane tehnologije izvedbe, prostorskih omejitev, razpoložljivosti virov (material, mehanizacija in oprema, delovna sila) ter odločitev tehnologa in planerja. Možno je namreč dokončati dejavnost v krajšem času kot je predviden. Če na primer zaposlimo dodatne delavce in si tako naredimo dodaten strošek, lahko skrajšamo trajanje dejavnosti. Ta pristop je znan kot krajšanje trajanja.

Seveda pa iz praktičnih razlogov dejavnosti ne moremo krajšati v neskončnost. Najkrajše trajanje dejavnosti je čas, ki je krajši kot običajni čas in je nujen za dokončanje posamezne dejavnosti. To je seveda povezano z dodatnimi stroški. Ti stroški nastanejo, če želimo dejavnost zaključiti v najkrajšem možnem času.

Obstajajo štiri tipi razmerja med stroški in trajanjem dejavnosti. Postopek, ki se ga moramo držati, če želimo določiti razmerje med direktnimi stroški in trajanjem, je sledeč:

- 1) določimo vse možne (smiselne) načine izvedbe posamezne dejavnosti;
- 2) posameznemu načinu izvedbe dejavnosti določimo pripadajoče trajanje in direktne stroške;
- 3) izdelamo graf odvisnosti direktnih stroškov glede na trajanje dejavnosti in narišemo rezultate točke 2 na grafu direktnih stroškov v odvisnosti od časa trajanja;
- 4) povežemo dobljene točke z ravnimi črtami, začenši pri točki z najnižjimi direktnimi stroški in potegnemo črto do naslednje točke. Naklon črte ponazarja povečevanje stroškov zaradi krajšanja dejavnosti za enoto časa med tema dvema točkama. Tako nadaljujemo, dokler ne povežemo vseh točk, vključno s tisto z največjimi direktnimi stroški.

Iz grafa lahko določimo specifične stroške krajšanja izvedbe dejavnosti na enoto časa. Predstavljajo potrebne stroške za skrajšanje dejavnosti za en dan.

$$\Delta c_i = \frac{c_i^c - c_i^{nor}}{d_i^{nor} - d_i^c} \quad (1)$$

$\Delta c_i$  - specifični stroški krajšanja i-te dejavnosti / enoto časa (cost slope)

$c_i^c$  - stroški izvedbe dejavnosti i pri njenem najkrajšem možnem trajanju (crash cost)

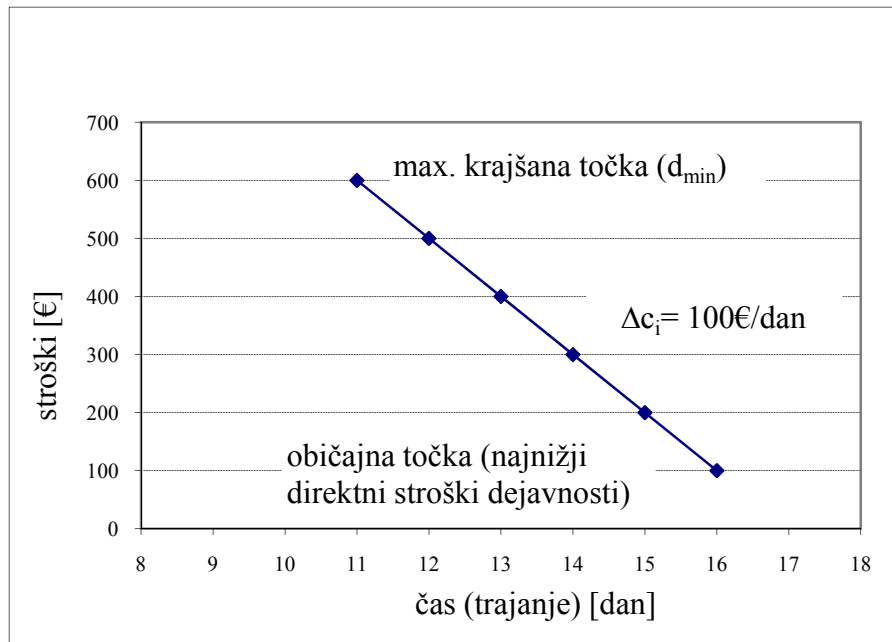
$c_i^{nor}$  - stroški izvedbe dejavnosti i pri njenem običajnem trajanju (normal cost)

$d_i^{nor}$  - običajno trajanje izvedbe dejavnosti i (normal duration)

$d_i^c$  - najkrajše možno trajanje izvedbe dejavnosti i (crash duration)

### 1. možnost: Linearna zveza med trajanjem in stroški

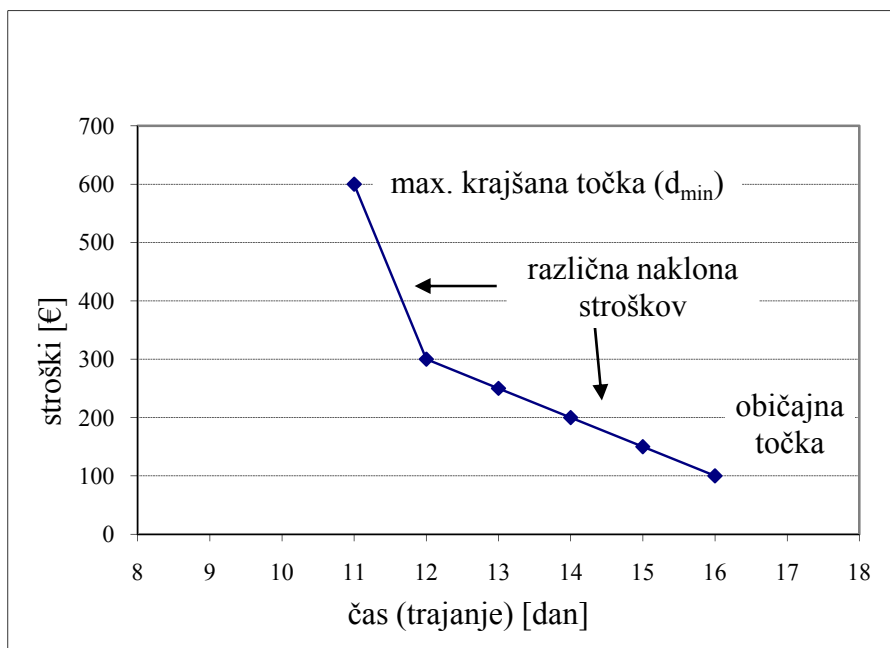
Grafikon 1 prikazuje linearno odvisnost med trajanjem in stroški posamezne dejavnosti.



Grafikon 1: Linearna zveza med časom in stroški

## 2. možnost: Odsekoma linearna zveza

Grafikon 2 je primer linearnega odnosa na različnih časovnih intervalih. Specifični stroški krajšanja niso enaki za celotno obdobje temveč se spreminjajo.

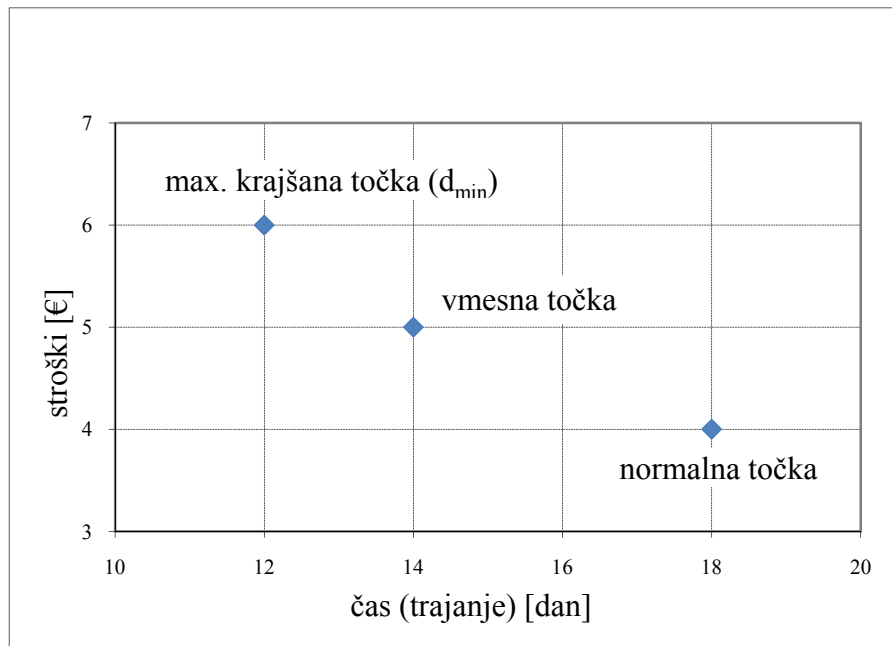


Grafikon 2: Odsekoma linearna zveza med časom in stroški

V praksi je tudi linearna odvisnost predstavljena kot diskretna, saj se uporabljajo le celoštevilčne vrednosti (npr: trajanje je 6 časovnih enot in ne 6,2).

## 3. možnost: Diskretna funkcija

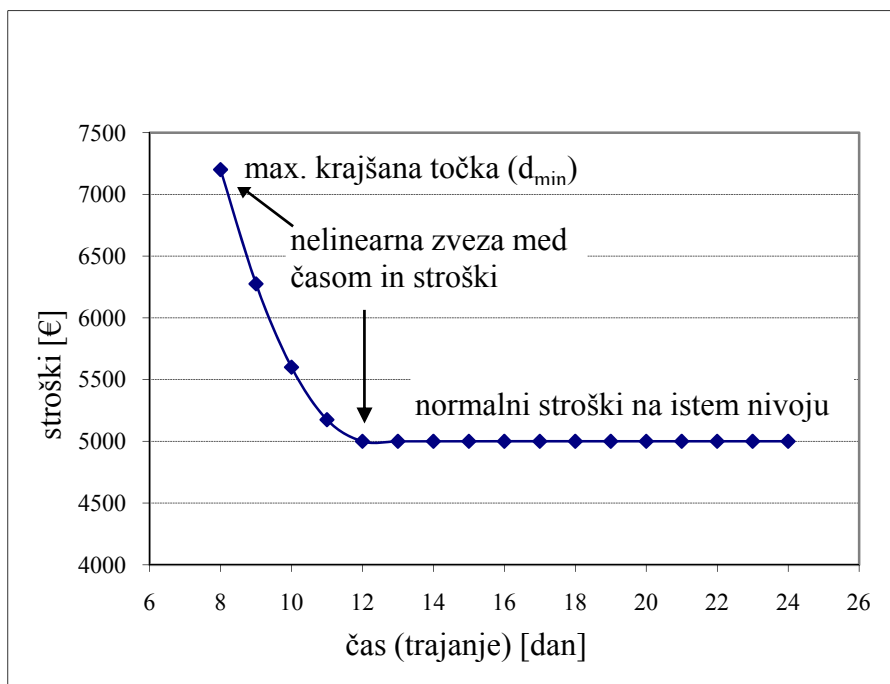
Grafikon 3 prikazuje diskretne vrednosti stroškov pri diskretnem trajanju. Teh je lahko poljubno mnogo (1, 2, 3, ..., N). Dejavnost lahko izvedemo v običajnem času z običajnimi stroški, ali pa v nekem krajšem času s pripadajočimi stroški. V tem primeru vrednosti med posameznimi točkami ne obstajajo. Prav tako ne moremo govoriti o strošku krajšanja dejavnosti na enoto časa. Za krajšanje oziroma daljšanje celotnega projekta mora biti uporabljena ena izmed navedenih kombinacij med časom trajanja dejavnosti in pripadajočimi stroški.



Grafikon 3: Diskretna zveza med časom in stroški

#### 4. možnost: Nelinearna zvezna funkcija

V četrtem primeru, ki je prikazan na grafikonu 4, ne moremo govoriti o linearnem odnosu med običajnim in najkrajšim trajanjem, ampak predstavlja ta odnos določena zvezna krivulja.



Grafikon 4: Nelinearna zveza med časom in stroški

Običajna cena in običajno trajanje dejavnosti sta odvisna od načina, ki ga uporablja podjetje za izvedbo določenega dela. Spremenljivki določa izkušene delavcev, dostopnost in sposobnost opreme ter še veliko drugih stvari, ki se razlikujejo od izvajalca do izvajalca. Zaradi navedenih razlogov ne moremo pričakovati, da bo imel vsak izvajalec enake običajne stroške in trajanje izvedbe dejavnosti. Pomembno je poudariti, da krajšanje dejavnosti ne vključuje spreminjanje gradbenega materiala. To se lahko zgodi samo ob potrditvi in privolitvi projektanta. Krajšanje se nanaša na povečanje delovne sile, kapacitete strojev, dobave materiala, vzporednosti in razporeditve dela in podobno.

Analogno lahko sklepamo za stroške pri najkrajšem trajanju dejavnosti. Ti posredno nakazujejo tudi na sposobnost izvajalskih podjetij prilagajanju spremenjenim pogojem. Nastanejo lahko zaradi nepričakovanih zastojev ali pa soglasno spremenjenih pogodbenih razmerij med investitorjem in izvajalcem. Krajšanje dejavnosti in z njim povezani stroški so

lahko tudi v interesu izvajalca, saj le ta lahko predhodno zaključi projekt in tako prej začne z novim oziroma naslednjim projektom.

Krajšanje trajanja dejavnosti ne zahteva vedno več delovne sile in več ur uporabe opreme. Tudi če potrebujemo več delavcev in več opreme, jih lahko rabimo za krajše obdobje. Tako je lahko na koncu skupna poraba delovnih ur in opreme tudi enaka kot pri običajnem trajanju. Dodatni stroški so lahko posledica mobilizacije dodatne opreme, nadurnega dela ali pa manjše produktivnosti, ki je posledica nočnega dela ali pa preveč zapolnjenega delovnega prostora.

Če imamo veliko dejavnosti, je zanje mogoče narediti več kot en razpored, ki bo izpolnil zadani cilj v okviru omejitev dejavnostne mreže. Vsaka od teh alternativ je povezana z drugo porabo virov, kar seveda spremeni trajanje in stroške projekta od primera do primera.

### 3.2 Stroški in čas v okviru projekta

V predhodnih poglavjih je bilo predstavljeno, kako vse lahko delimo stroške, ki nastanejo pri projektu in kakšne plane lahko z njimi izdelamo. Za modeliranje vpliva izbire različnih načinov izvedbe dejavnosti na potek (časovni in finančni) celotnega projekta moramo definirati posamezne vrste stroškov, ki so prikazani v preglednici 6.

Preglednica 6: Definicija tipov stroškov uporabljenih v modelu definiranja problema časovno-stroškovne optimizacije

$C^{tot}$	celotni stroški projekta
$C^{dir}$	direktni stroški projekta
$C_{režija}^{indir}$	indirektni stroški projekta
$C_d^{dir}$	direktni stroški dela (delovna sila in mehanizacija)
$C_{mat}^{dir}$	direktni stroški nabave materiala
$C_{penali}$	stroški penalov
$C_{premiija}$	prihodki premije
$T_{opt}^p$	optimalni čas za izvedbo projekta
$T_{predpisana}^p$	predpisani čas za izvedbo projekta

### 3.2.1 Indirektni stroški

Če vse indirektno stroške  $C_{režija}^{indir}$  združimo v eno skupino, jih lahko predstavimo na grafikonu 5 z modro črto. Režija in z njo povezani indirektni stroški se pojavljajo skozi celotno trajanje projekta in predstavljajo mesečni strošek, ki je skoraj skozi celoten projekt konstanten. Posledično indirektni stroški linearno naraščajo vse do konca projekta.

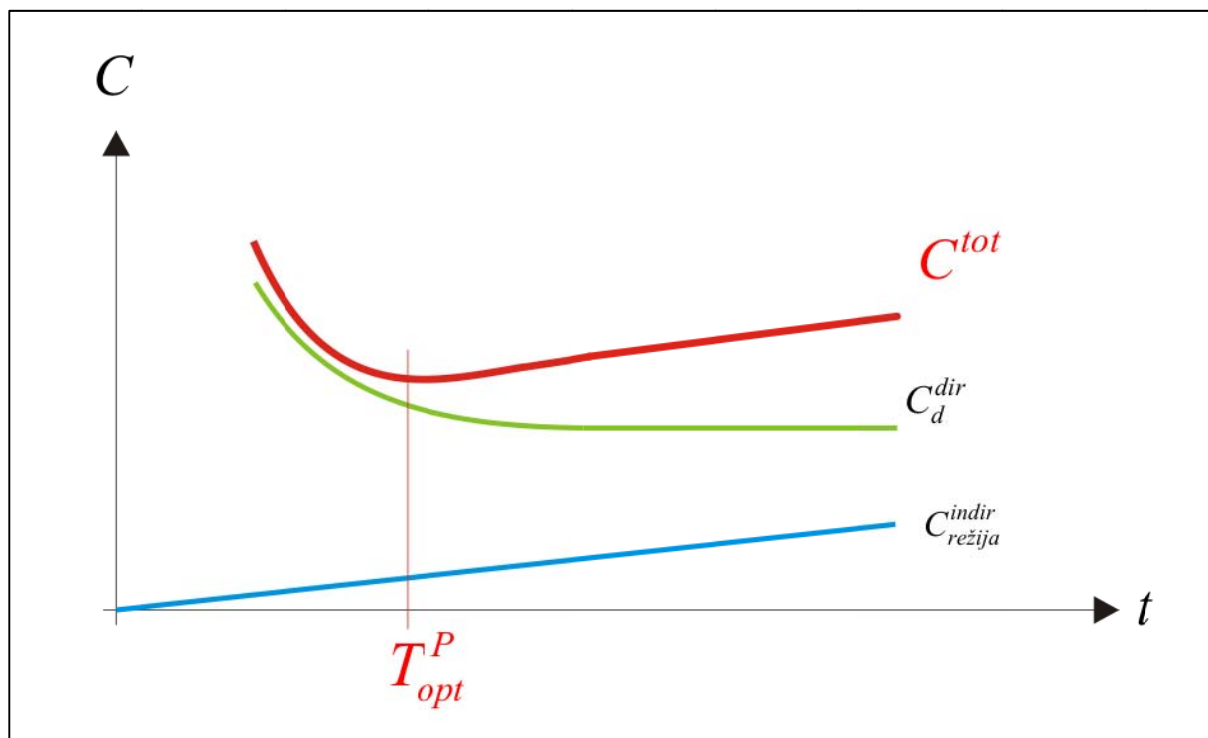
### 3.2.2 Direktni stroški

Direktno stroške nam v grobem predstavljajo delavci na gradbišču, mehanizacija, material in podizvajalci. V predhodnih poglavjih je bilo ugotovljeno, da imajo direktni stroški  $C^{dir}$  pri projektih ponavadi konkavno obliko. V kolikor želimo delo opraviti hitreje, bomo morali zanj plačati več. Nasprotno pa za daljše trajanje izvajanja dejavnosti potrebujemo manj denarja. Ne glede na našete možnosti za medsebojne povezave v poglavju 3.1 lahko le te predstavimo z zeleno črto na grafikonu 5.

S preprosto enačbo

$$\sum C^{dir} + \sum C^{indir} = C^{tot} \quad (2)$$

pridemo do rezultata  $C^{tot}$ , ki nam v obliki rdeče črte predstavlja skupni strošek projekta v odvisnosti od časa njegovega izvajanja. Tako kot večinski direktni stroški imajo tudi skupni stroški projekta konkavno obliko. Cilj planerja je doseči čim nižje skupne stroške projekta pri čim krajšem trajanju, kar nas privede do iskanje minimuma funkcije, ki jo predstavljajo skupni stroški projekta. Rezultat našega problema bo  $T_p^{opt}$  s pripadajočimi stroški, kar bomo poskušali doseči na več različnih načinov.



Grafikon 5: Prikaz stroškov

Na grafikonu 5 je predstavljena osnovna misel, ki jo je za gradbeniško prakso potrebno še malce razširiti. Poleg osnovnih stroškov, ki so bili opisani v dosedanjih poglavjih, se lahko pojavijo tudi motivacijska sredstva v smislu denarnih nagrad in kazni. V naslednjih dveh poglavjih so opisani načini kaznovanja in nagrajevanja izvajalcev, da se ti poskušajo čim bolj držati dogovorjenih rokov. Krivulje stroškov se nekoliko spremenijo, vendar poanta iskanja optimalnega časa in stroškov ostaja nespremenjena.

### 3.2.3 Stroški prekoračitve trajanja projekta – penali

Če projekt traja dlje od predvidenega oziroma določenega časa ( $T_p > T_{predpisan}^p$ ), lahko investitor od izvajalca zahteva povrnitev škode, ki je nastala zaradi kasnejšega zaključka projekta. Te stroške projekta imenujemo tudi penali. Ločimo tri vrste penalov oziroma kazni, ki se pri dejanskem projektu lahko pojavijo.

- *Enkratni penali*

Ko izvajalec prekorači predpisano časovno omejitev  $T_{predpisan}^p$ , je s pogodbo med investitorjem in izvajalcem določeno, da mora izvajalec investitorju plačati točno



določeno že vnaprej dogovorjeno vsoto – odškodnino. Ta se s časom do zaključka projekta ne spreminja oziroma povečuje. Celotni stroški projekta  $C^{tot}$  pri  $T_{predpisan}^p$  naprej poskočijo za vrednost enkratnih penalov in potem naprej linearno naraščajo. Na grafikonu 6 je potek celotnih stroškov in penalov prikazan z oranžno črto.

- *Linearni penali*

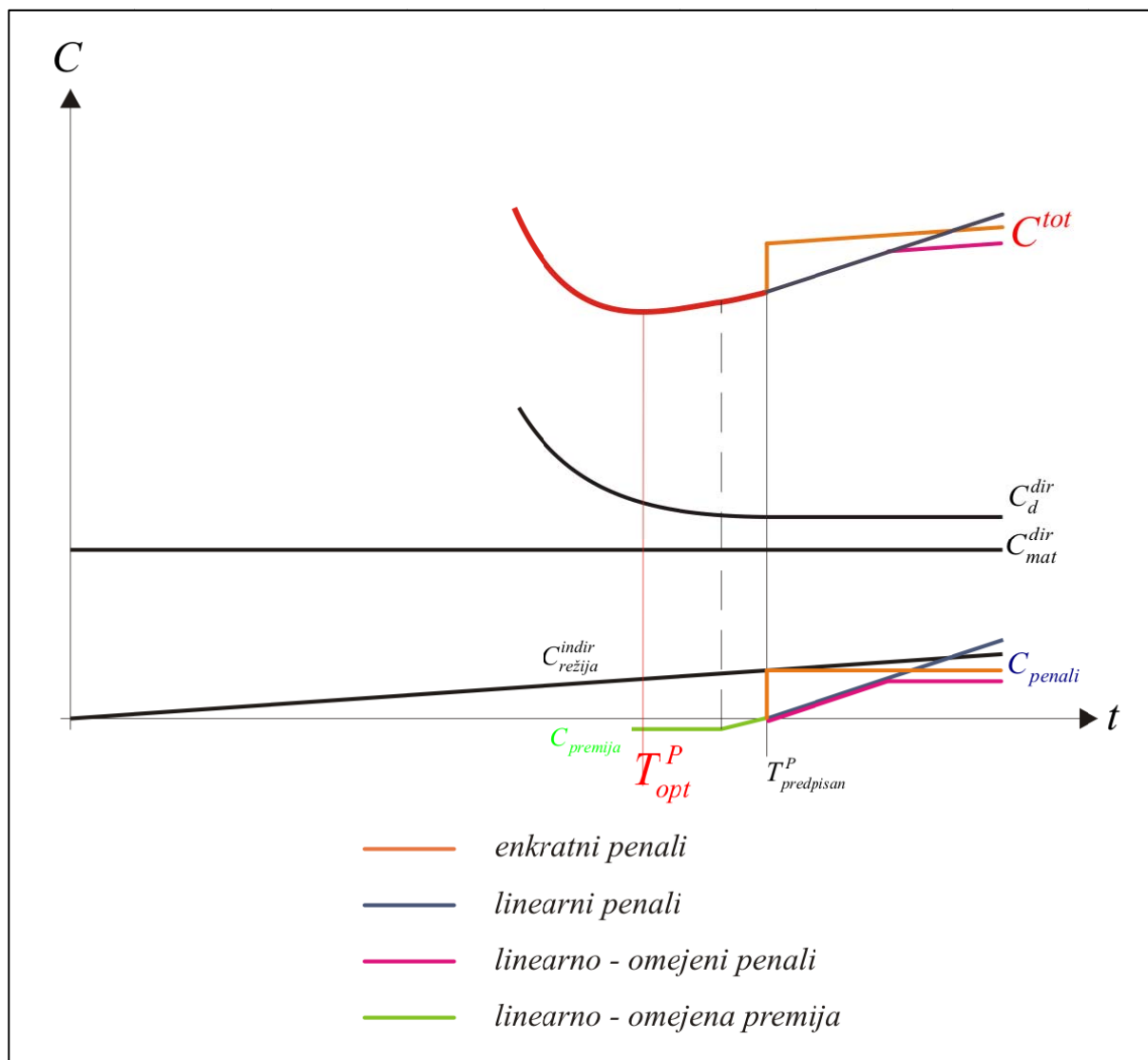
Ko izvajalec prekorači  $T_{predpisan}^p$ , se začnejo šteti dnevi prekoračitve in s tem tudi stroški, ki pri tem nastajajo. Ti se obračunavajo v enoti [€/dan]. Zaradi navedenih razlogov po doseženem  $T_{predpisan}^p$  zelo hitro in strmo naraščajo stroški celotnega projekta  $C^{tot}$ , ki so lahko za izvajalca, ki pričakuje večje zamude, hudo stroškovno breme. Linearni penali so na grafikonu 6 ponazorjeni z modro črto.

- *Linearno – omejeni penali*

Linearno – omejeni penali začno pri  $T_{predpisan}^p$  linearno naraščati. Ponavadi so med investitorjem in izvajalcem dogovorjeni v enoti [€/dan] in se lahko dvignejo do določene vrednosti, preko katere ne morejo seči. V tem obdobju skupni stroški projekta  $C^{tot}$  naraščajo hitreje kot v obdobju, ko je maksimalna vrednost penalov že dosežena. Stroški, ki so na grafikonu 6 ponazorjeni z roza barvo, se po določenem času ustalijo in naraščajo samo še za prirast režijskih stroškov.

### 3.2.4 Nagrada za predčasno opravljeno delo – linearno omejena premija

V pogodbi med investitorjem in izvajalcem je lahko določena tudi denarna nagrada – premija, ki jo izvajalec prejme, v kolikor projekt zaključi pred predvidenim rokom. Premije so najpogosteje linearno omejene (zeleno barvo na grafikonu 6). To pomeni, da poleg predvidenega zaključka del obstaja še ena časovna omejitev (črtkana vertikalna črta na grafikonu 6), ki je postavljena pred predviden zaključek del. V kolikor se izvajanje del zaključi pred tem časom, je izvajalec upravičen do celotnega zneska premije. V vmesnem času do  $T_{predpisan}^p$  pa vrednost premije linearno pada do predvidenega zaključka del, ko doseže nično vrednost. S tem je dosežena dodatna motivacija za izvajalca, da čim prej zaključi naročena dela.



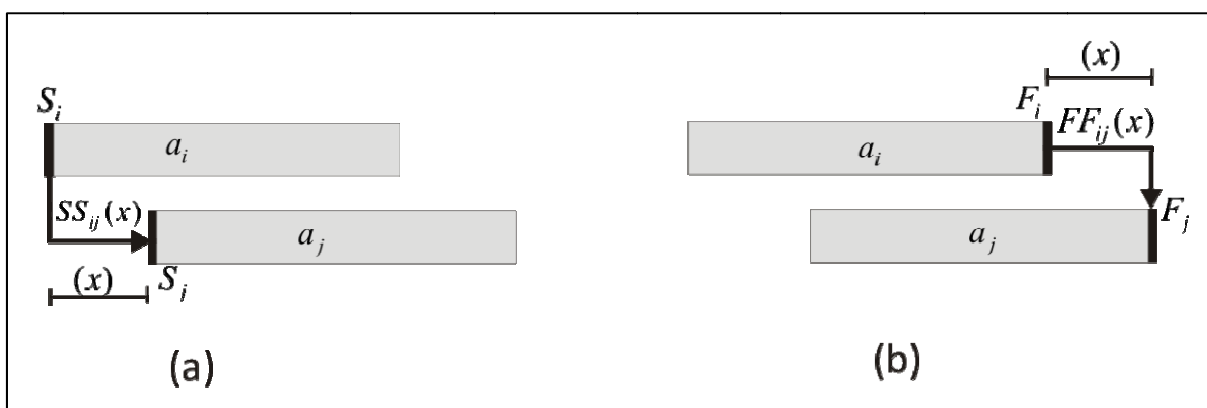
Grafikon 6: Prikaz penalov in premije

### 3.3 Krajsanje dejavnosti pri netipičnih odvisnostih med dejavnostmi

#### 3.3.1 SS in FF povezave med dejavnostmi ter njihovo krajsanje

Najpogostejša povezava med dejavnostmi je tipa FS (Finish-Start) kar pomeni, da se po zaključku ene dejavnost (Finish) lahko začne nova (Start). Krajsanje pri tovrstnih povezavah ni problematično, saj se dejavnosti odvijata ena za drugo, brez medsebojnega časovnega prekrivanja. Za novejša načine gradnje in nekatere dejavnosti pa potrebujemo tudi povezave, ki niso vedno tipične.

Povezavi tipa SS (Start – Start) in FF (Finish – Finish) nam omogočata modeliranje delno sočasnega izvajanja dejavnosti. S tem prispevamo k večji produktivnosti in krajšemu trajanju celotnega projekta. Sočasnost izvajanja dejavnosti pa zahteva več pozornosti, saj moramo vedno paziti tudi na praktičnost izvedbe. Za primer lahko vzamemo sočasno izvajanje dejavnosti  $a_i$  in  $a_j$  z delnim zamikom (npr. opaževanje AB plošče in polaganje armature). Glede na njuno trajanje se odločimo, katero povezavo bomo uporabili.



Slika 1: Primer SS in FF povezave med dejavnostima

V primeru, ko je  $d_i < d_j$ , uporabimo povezavo SS (slika 1 – a), v primeru  $d_i > d_j$  pa povezavo FF (slika 1 – b). V kolikor v postopku krajšanja projekta skrajšamo le eno od dejavnosti ( $a_j$  v primeru a, oziroma  $a_i$  v primeru b) lahko to rezultira v porušitev logike zaporedja izvajanja dejavnosti (armaturo smo položili preden je bil dokončan opaž oziroma armaturo smo pričeli polagati še pred začetkom izdelave opaža).



Slika 2: Krajšanje dejavnosti pri povezavah SS in FF

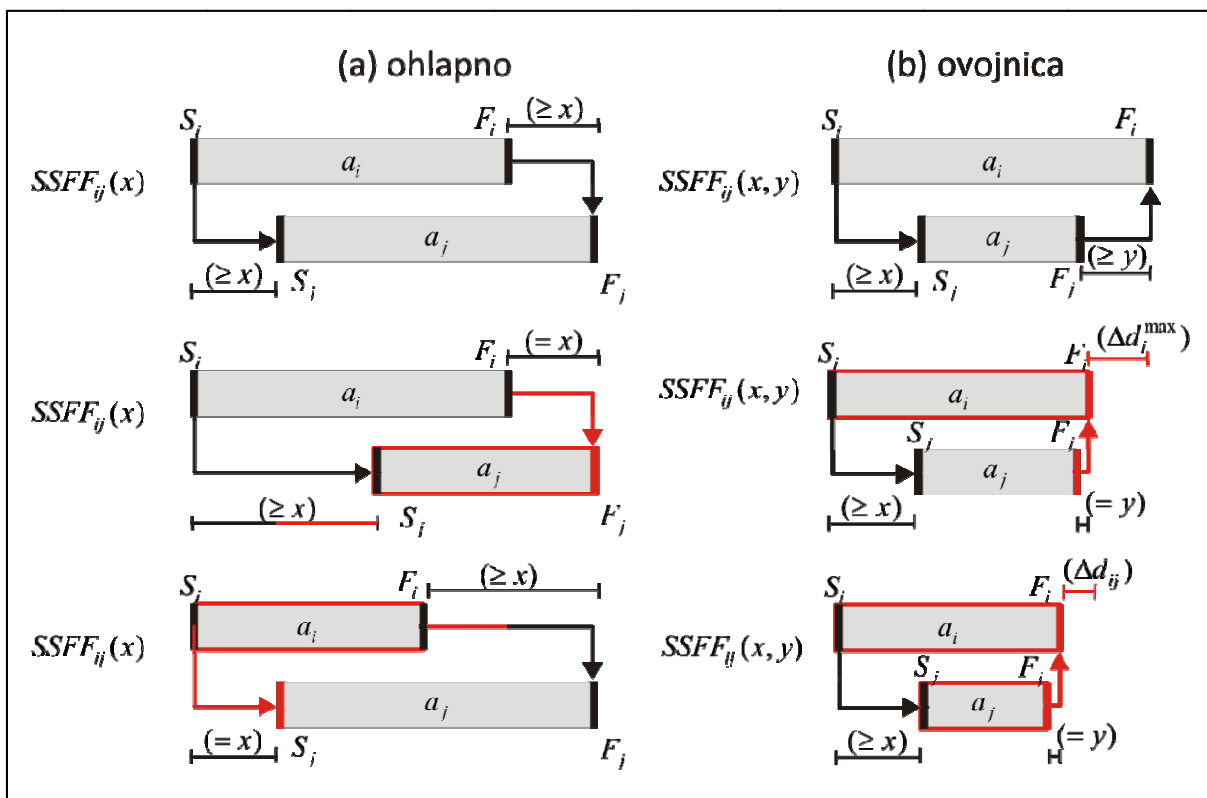
Zaradi tovrstnih omejitev sta povezavi SS in FF potrebovali dopolnitev, ki bi omogočala brezskrbno sočasno izvajanje dejavnosti tudi v teoretičnem smislu.

### 3.3.2 Dvojna povezava (SS+FF)

Dve izmed dopoljenih povezav sta tako imenovani *SS/FF ohlapno* in *SS/FF ovojnica*. Ob tem je potrebno omeniti tudi dejstvo, da nam komercialni računalniški program kot je Primavera, omogoča določitev več povezav med dvema dejavnostima hkrati, medtem ko Microsoft Office Project podpira le eno.

Za opis povezave SS/FF ohlapno (slika 3 – primer a) lahko vzamemo primer izkopavanja in opaževanja betonskih temeljev. Dejavnost  $a_i$  – izkopavanje temeljev, se mora začeti pred dejavnostjo  $a_j$  – opaževanje temeljev. Za to skrbi povezava SS. Povezava FF pa nam narekuje, da se mora dejavnost  $a_i$  (izkopavanje temeljev) zaključiti pred dejavnostjo  $a_j$  (njihovo opaževanje). Povezava SS/FF ohlapno poskrbi, da so začetki in konci dejavnosti še vedno pravilno razporejeni. Logika sočasnega izvajanja dejavnosti ni porušena, vsaj ena od povezav pa je napeta in določa zamik.

Povezavo SS/FF ovojnica (slika 3 – primer b) pa lahko prikažemo na primeru opaževanja in postavitve armature za AB steno (po položeni armaturi zapremo še opaž do konca). Dejavnost  $a_j$ , ki predstavlja postavitev armature, se mora izvesti med izvajanjem dejavnosti opaževanja stene – tako je dejavnost  $a_j$  ujeta med dejavnost  $a_i$ .



Slika 3: SS/FF povezave med dejavnostmi

Pri problematiki krajšanja so v literaturi omenjene le povezave FS, s katerimi pri krajšanju nimamo večjih težav, prav tako pa jih lahko obdelajo tudi računalniški programi. Ko pa imamo v projektu med dejavnostmi tudi SS/FF povezave se lahko zgodi, da sta lahko ena ali obe izmed dejavnosti z SS/FF povezavo tudi na kritični poti in sta potencialni za krajšanje z najnižjimi stroški.

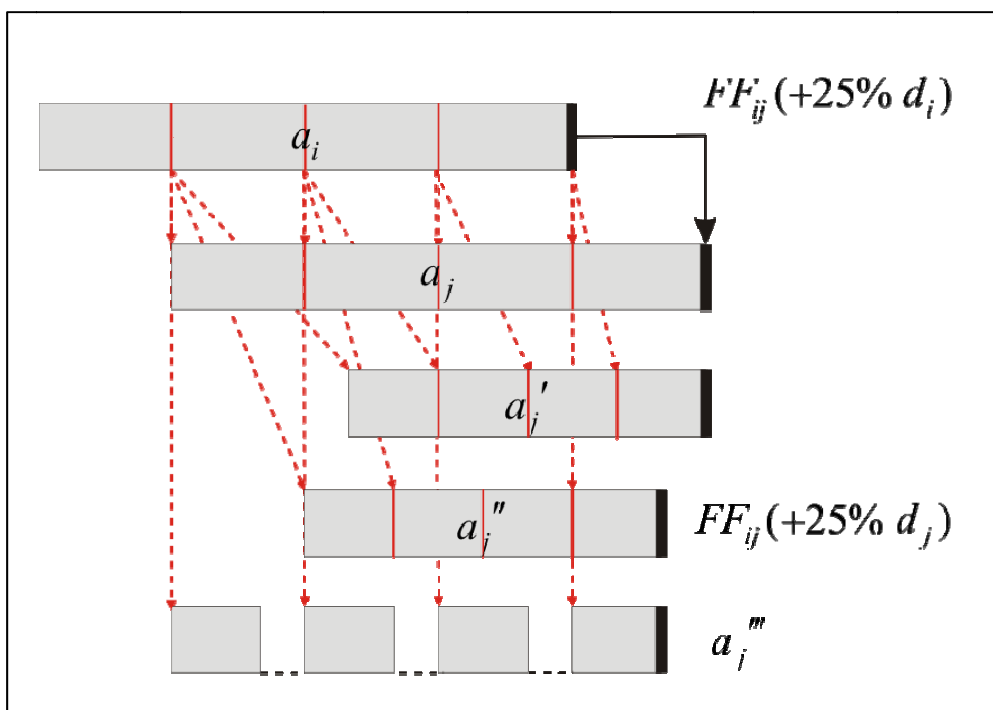
V primeru SS/FF(x) ohlapne povezave, kjer sta obe dejavnosti na kritični poti, se njuno posamično krajšanje ne izplača – povezavi SS in FF namreč preprečujeta, da bi se njuno skupno trajanje zmanjšalo. Smiselno je torej krajšati le obe hkrati. To pa ponavadi pripelje tudi do večjih skupnih stroškov krajšanja dejavnosti.

Podobno se nam zgodi tudi pri povezavi SS/FF(x,y) ovojnica, ko s prevelikim krajšanjem dejavnosti  $a_i$  prehitimo zaključek dejavnosti  $a_j$ . Tako bi se opaževanje AB stene zaključilo pred zaključkom polaganja armature. Zato je njeno samostojno maksimalno krajšanje –  $\Delta d_i^{\max}$  pogojeno z dejavnostjo  $a_j$  in zamikom  $y$ . Vsako nadaljnje krajšanje mora biti skupno. Tako

minimalni možni čas izvedbe A ni določen zgolj z izbiro načina izvedbe temveč je dodatno pogojen tudi za načinom izvedbe B.

### 3.3.3 Zamik dejavnosti izražen v odstotku (%)

Programi namenjeni vodenju projektov (Microsoft Project) omogočajo tudi povezave z zamikom izraženim z deležem trajanja predhodne dejavnosti – (primer: SS(25%)). Ta povezava nam ponazarja, da se pri krajšanju predhodne dejavnosti poleg trajanja dejavnosti spremeni tudi zamik (primer: SS povezava – čas zamika med začetkoma dejavnosti, kar posledično pripelje tudi do zamika med zaključkoma dejavnosti). Takšna povezava se uporablja, ko imamo področje dela razdeljeno na enakomerne sektorje (etape) – (primer: zamik 25% pomeni, da smo dejavnost razdelili na 4 enake etape).



Slika 4: Zamik dejavnosti izražen v odstotkih (%)

Zaradi omejenosti programskih rešitev, ki omogoča izražanje zamika le v deležu trajanja predhodne dejavnosti ( $25\% d_i$ ), ni v teoretičnem smislu pri krajšanju dejavnosti  $a_j$  nobenega učinka na trajanje projekta, čeprav je možno v praksi zamik skrajšati ( $25\% d_j$ ). (slika 4 – primer  $a_j''$ )

## **4 METODE REŠEVANJA**

### **4.1 Dosedanje metode za reševanje tovrstnih problemov**

Do šestdesetih let dvajsetega stoletja so k reševanju optimizacijskih problemov pristopali z dvema matematičnima metodama. Prvo med njima so predstavljale eksaktno-analitične metode. Njihova značilnost je bila velika kompleksnost formuliranja modelov in potreba po zmogljivih računalnikih, ki so znali te modele analizirati ter obdelati. Rešitve so bile točne, čeprav zahtevni algoritmi niso vedno našli globalnih rešitev. Analitiki in programerji so na ta način znali rešiti le enostavne primere, modeliranje zanje pa je zahtevalo veliko časa.

Drugo skupino rešitev so predstavljale hevristične metode. Te so v primerjavi z eksaktno-analitičnimi metodami dajale manjšo zanesljivost za ustreznost rezultata, vendar so bile enostavnejše za razumevanje in kombiniranje z metodo kritične poti. Zanje ni bilo potrebno zahtevno programiranje, ampak so delovale na principu sistematičnega odločanja. Analitik se je skozi postopek odločanja na podlagi enostavnih vprašanj in dejstev poskušal prebiti do optimalne rešitve problema, pri čemer je zahtevne odločitve poskušal razdeliti na več manjših in enostavnejših.

V sedemdesetih (1975 – John Holland) letih dvajsetega stoletja pa se je razvila tudi nova veja iskanja rešitev, ki je temeljila na genetiki in evolucijskih algoritmih. V začetku so bili genetski algoritmi uporabljeni za posnemanje nekaterih procesov razvoja v naravi. Zmogljivi računalniki so omogočali simulacijo naravne evolucije in ponazarjali preživetje najmočnejšega mehanizma pri iskanju optimalne rešitve. S svojo robustnostjo in preprostostjo so znali poiskati tudi globalne rešitve večciljnih optimizacijskih problemov.

### **4.2 Splošni postopek krajšanja trajanja projekta – iteracijski postopek**

Postopek krajšanja sledi naslednjim korakom:

1. Določitev običajnega časa trajanja in stroškov projekta.
2. Določitev kritične poti za običajen čas trajanja.
3. Uporaba teorema o kritični poti in izločitev nekritičnih dejavnosti.

4. Izračun običajnih in skrajšanih časov trajanja dejavnosti in pripadajočih stroškov.
5. Izračun stroškov krajšanja dejavnosti na podlagi linearnega odnosa med časom trajanja in pripadajočih stroških.
6. Krajšanje kritične dejavnosti. Izmed vseh kritičnih dejavnosti krajšamo tisto z najnižjimi stroški krajšanja. Krajšanje posamezne dejavnosti poteka do a) minimalnega časa trajanja dejavnosti ali b) do pojava nove kritične dejavnosti.
7. Krajšanje dejavnosti z najnižjimi stroški krajšanja na novi kritični poti.
8. Daljšanje predhodno skrajšanih dejavnosti z rezervnim časom.
9. Vsakokratno izračun časa trajanja projekta in pripadajočih stroškov. Prikaz rezultatov v tabeli ali grafu.
10. Izris grafa direktnih in indirektnih stroškov v odvisnosti od časa trajanja projekta (obe krivulji se riše na isti graf).
11. Izračun in izris grafa celotnih stroškov v odvisnosti od časa trajanja projekta.
12. Določitev optimalnega časa trajanja na podlagi celotnih stroškov. To je a) čas trajanja projekta ob najnižjih celotnih stroških trajanja ali b) katerikoli želen čas trajanja projekta.

Stroški krajšanja posamezne dejavnosti se izračunajo po formuli (1). Metoda je uporabna za linearno odvisnost med časom in stroški.

### 4.3 Genetski algoritem

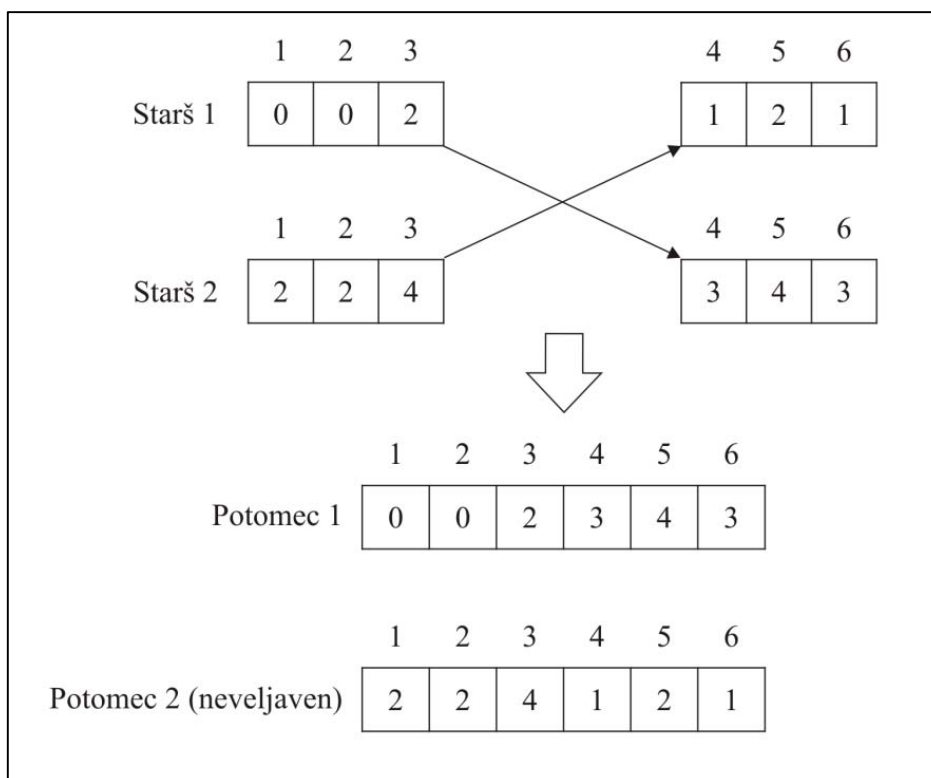
V vrsto iskalnih algoritmov spadajo tudi genetski algoritmi, katerih avtor je John Holland (1975). Temeljijo na mehanizmu naravne selekcije in genetike z iskanjem skozi prostor optimalnih rešitev (Goldberg 1989). Tako bi lahko rekli, da je metafora za genetske algoritme tudi naravna selekcija. Skozi razvoj človeštva je celotna vrsta iskala najboljše pogoje za preživetje in se tako prilagajala spreminjajočemu se okolju. Z drugimi besedami je menjavala in spreminjala svoje kromosome, da je lahko preživela. Pri genetskih algoritmih tako vsak kromosom predstavlja skupek odločitev in s tem potencialno rešitev problema. S testiranjem lahko ugotovimo, ali ustrezajo našim zahtevam in kateri izmed njih nam vrne boljšo rešitev. Tisti, ki nam dajo boljšo rešitev imajo večjo možnost, da bodo preživeli v primerjavi s tistimi, katerih kombinacija nam ne da zadovoljivih rezultatov. Genetske informacije pa se morajo za zagotavljanje boljših rešitev med kromosomi izmenjevati. To poteka s pomočjo dveh



postopkov, ki ju imenujemo križanje in mutacija. Njun rezultat je nova populacija rešitev, ki ima (ponavadi) boljše preživetvene sposobnosti. Ta proces se ponavlja toliko časa, dokler niso vsi geni v novi generaciji identični prejšnjim (starševska generacija) – ni več nobenega izboljšanja rešitve, ali pa so dosežene uporabniško določene omejitve.

#### 4.3.1 Križanje

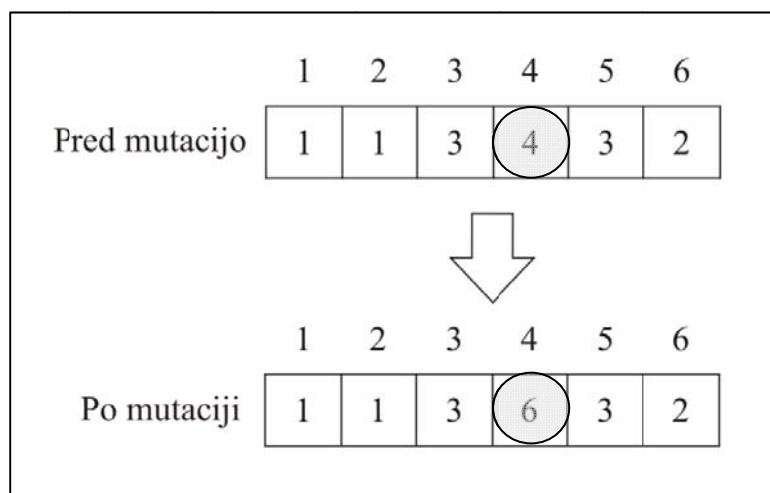
Križanje je bolj običajen in pogost proces v primerjavi z mutacijo. Za križanje potrebujemo dva naključno izbrana kromosoma, ki si med seboj izmenjata informacije – gene. Tako se ustvarita nova potomca – kromosoma, ki imata nekaj genov od prvega in nekaj od drugega starševskega kromosoma (slika 5). Številke v kvadratih ponazarjajo izbrano možnost pri posamezni dejavnosti, številka nad kvadratom pa dejavnost samo.



Slika 5: Osnoven proces križanja

### 4.3.2 Mutacija

Pri mutaciji potrebujemo samo en kromosom, ki poljubno zamenja nekaj svojih genov. Glej sliko 6.



Slika 6: Osnoven proces mutacije

Osnovni problem tako križanja kot mutacije pri osnovnem sistemu genetskega algoritma je ta, da na novo nastali kromosomi vedno ne ustrezajo kriterijem zaporedja našega projekta in tako postanejo neuporabni. V ta namen sta se razvili izboljšani metodi križanja in mutacije.

### 4.3.3 Poenostavljen primer genetskega algoritma

Korak 1: Slučajno generiranje starševske populacije: Starševska populacija P ima N (velikost populacije) kromosomov z m (število dejavnosti) geni. Za vsak kromosom se izračuna vrednost funkcije (čas in stroški projekta).

Korak 2: Reprodukcijska: Rodi se nova generacija kromosomov O, ki je reproducirana iz P. Izberejo se kromosomi, ki imajo najboljšo vrednost funkcije f.

Korak 3: Križanje: Pri poljubnem paru kromosomov iz O se izvede križanje. Tako nastane nov kromosom.

Korak 4: Mutacija: Pri poljubnem paru kromosomov iz O se izvede mutacija. Tako nastane nov kromosom.

Korak 5: Izvrednotenje: izračunajo se vrednosti funkcije f vseh kromosomov iz populacije O.

Korak 6: Zaključek: P se zamenja z O, ponavljajo se koraki 2 – 5 dokler niso vsi kromosomi enaki kromosomom prejšnje populacije (ali pa je dosežena uporabniško določena omejitev).

## 5 GENETSKI ALGORITMI za uporabo časovno-stroškovne analize

V splošnem potrebujemo za časovno-stroškovno analizo zaporedje odločitev, da izberemo pravo metodo, vire in opremo za opravljanje dejavnosti projekta. Vsako od teh zaporedij predstavlja en kromosom v genetskem algoritmu, ki shranjuje vse odločitve o dokončanju projekta. Ker pa planerji iščejo krivuljo, ki povezuje stroške in čas, lahko omenjeni problem definiramo tudi kot 'večciljna optimizacija'. V nadaljevanju bomo spoznali bistvene značilnosti večciljne optimizacije in detajle genetskih algoritmov za časovno-stroškovne analize.

### 5.1 Večciljna optimizacija

V vsakdanjem življenju se pri reševanju problemov pojavi več kriterijev, ki jih moramo sočasno upoštevati, da dobimo optimalno rešitev. Takšnemu odločanju pravimo večciljna optimizacija. Največjo težavo pri tem procesu predstavljajo nasprotujoči si kriteriji kar pomeni, da ne moremo sočasno zadostiti vsem v enaki meri. Starejše metode (Multiobjective weighting) za reševanje večciljne optimizacije uporabljajo sistem uteži, ki jih dodajo posameznemu kriteriju. Problem rešimo na podlagi vsakega posameznega kriterija posebej, nato pa vsem odločitvam dodamo izbrane uteži in rešitve seštejemo skupaj. Problem tovrstnih metod je, da rešitev narekuje kriterij z največjo utežjo, kar pa ni vedno optimalno. V novejšem času se kriteriji ne obravnavajo ločeno, ampak kot celota pri procesu optimizacije posameznega problema. Uteži posameznih kriterijev pa so zamenjala enostavna vprašanja, na katera morajo odgovoriti planerji in tako omogočiti izbor najboljših rešitev. Odgovori na ta vprašanja pa niso vedno konsistentni in posledično so tudi rešitve različne.

#### 5.1.1 Pareto

Potencialne rešitve večciljne optimizacije lahko v matematičnem smislu predstavimo kot dominantne in nedominantne oziroma recesivne. Če je rešitev  $S_1$  boljša od rešitve  $S_2$  potem pravimo, da je rešitev  $S_1$  dominantna nad rešitvijo  $S_2$ . Skupina rešitev, ki nad seboj nima dominantnih rešitev, se imenuje 'pareto'. Te rešitve so najmanj konfliktno glede na postavljene kriterije in predstavljajo eno izmed možnih končnih rešitev.

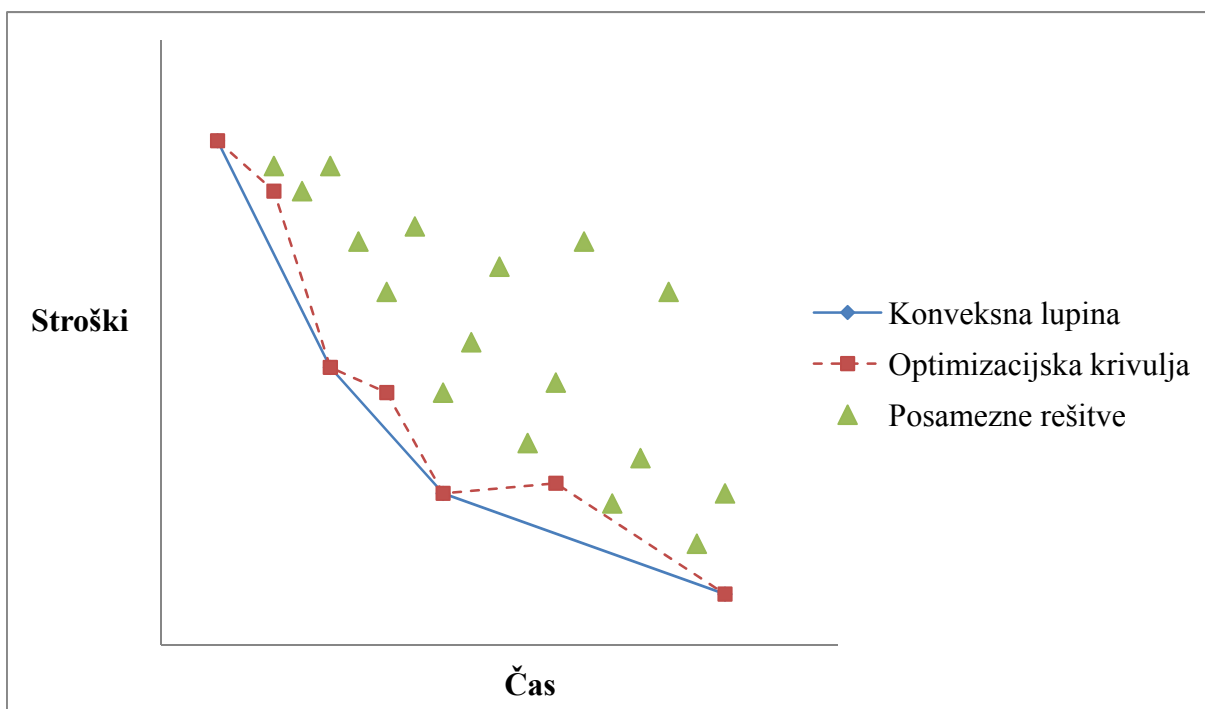
Večciljno optimizacijo lahko razumemo tudi kot proces, ki poskuša zmanjšati tako čas kot tudi stroške posameznega projekta. Vsaka rešitev v skupini pareto ima podatek o času in stroških projekta in nima neposredno dominantne (boljše) rešitve od sebe.

## 5.2 Genetski algoritmi (GA) za konstruiranje časovno-stroškovne optimizacije

Na podlagi koncepta genetskega algoritma bo v nadaljevanju predstavljen potek reševanja časovno-stroškovne optimizacije.

### 5.2.1 Terminologija

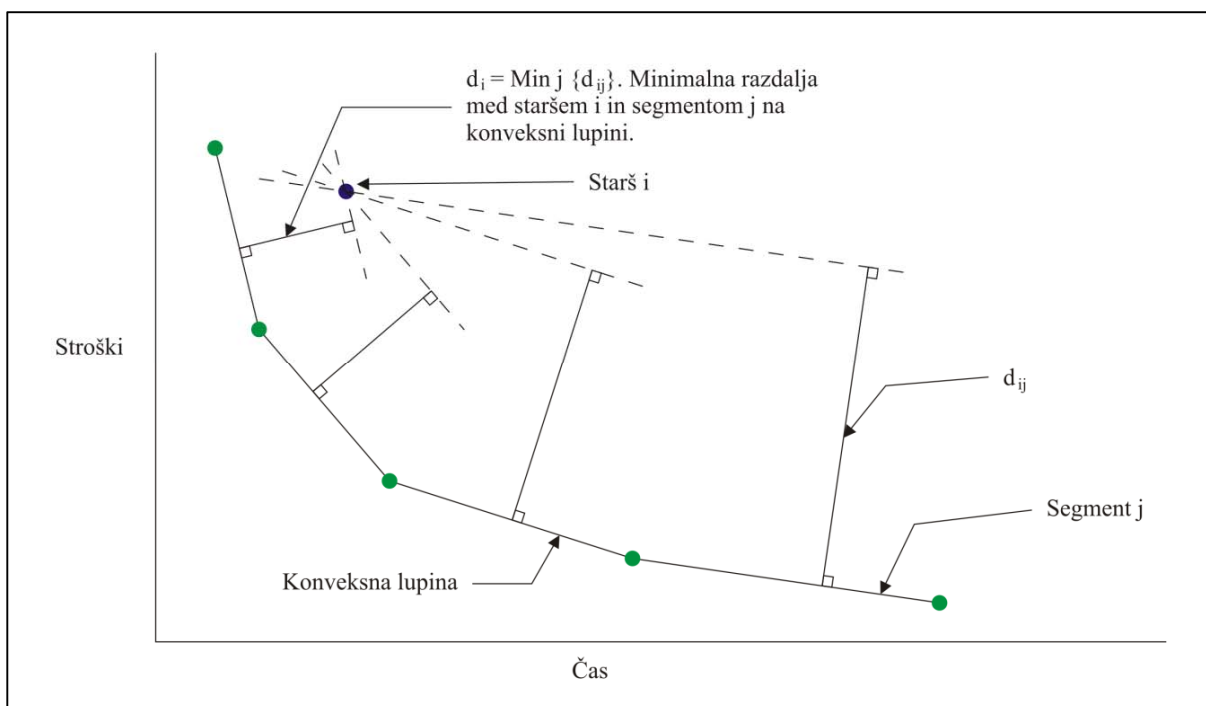
- optimizacijska krivulja: del generacije, ki nima boljših rešitev
- konveksna lupina: konveksna meja, ki povezuje zunanje točke optimizacijske krivulje
- numerična oznaka: število možnosti pri posamezni dejavnosti. Primer: če ima dejavnost štiri možnosti, bi numerična oznaka imela obliko {1, 2, 3, 4}
- struktura kromosoma: pri tem algoritmu predstavlja skupino možnosti pri vsaki dejavnosti



Grafikon 7: Konveksna lupina, optimizacijska krivulja in posamezne rešitve

### 5.2.2 Potek algoritma

1. korak: posamezno izberemo dva kromosoma z najdaljšimi in najkrajšimi časi trajanja dejavnosti. Izberemo tudi  $N-2$  posameznih kromosomov ( $N$  je velikost populacije), od katerih vsak predstavlja zaporedje in izbor dejavnosti ter stroške in čas celotnega projekta.
2. korak: določimo optimizacijsko krivuljo in konveksno lupino obstoječe generacije. Izračunamo minimalno oddaljenost ( $d_i$ ) med starševsko rešitvijo (parent) in vsakim izmed segmentov na konveksni lupini. Glej grafikon 8.



Grafikon 8: Določitev ustreznosti rešitve

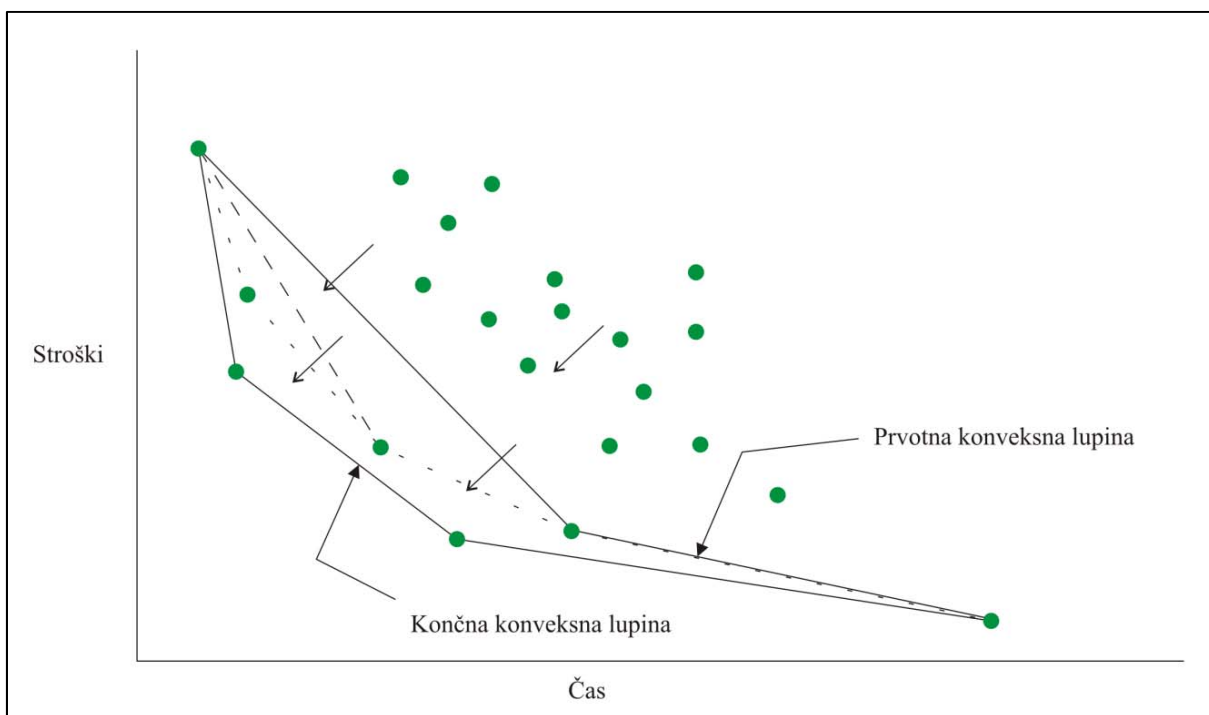
3. korak: določimo najboljšo rešitev ( $f_i$ ) in verjetnost selekcije ( $P_i$ ) za vsako rešitev znotraj starševske populacije,

$$f_i = d_{max} - d_i \quad (3)$$

$$P_i = \frac{f_i}{\sum f_i} \quad (4)$$

kje je  $f_i$  = najboljša rešitev parametra  $i$ ;  $d_i$  = minimalna oddaljenost med starševsko rešitvijo (parent) in vsakim izmed segmentov  $j$  na konveksni lupini,  $d_i = \min(d_{ij}$ , za vsak  $j$ );  $d_{\max}$  = največji  $d_i$  v generaciji,  $d_{\max} = \max(d_i$ , za vsak  $i$ ) in  $P_i$  = verjetnost izbora starševske rešitve  $i$

4. korak: zberemo vse rešitve, ki so na optimizacijski krivulji in z njimi  $N-N_{ro}$  krat reproduciramo novo generacijo ( $N_{ro}$  je število rešitev na optimizacijski krivulji). Na novi reproducirani generaciji uporabimo še križanje in mutacijo.
5. korak: korake 2 – 4 ponavljamo toliko časa, dokler se optimizacijska krivulja po nekaj ciklih ne spreminja več.



Grafikon 9: Izboljšanje konveksne lupine

### 5.2.3 Povzetek

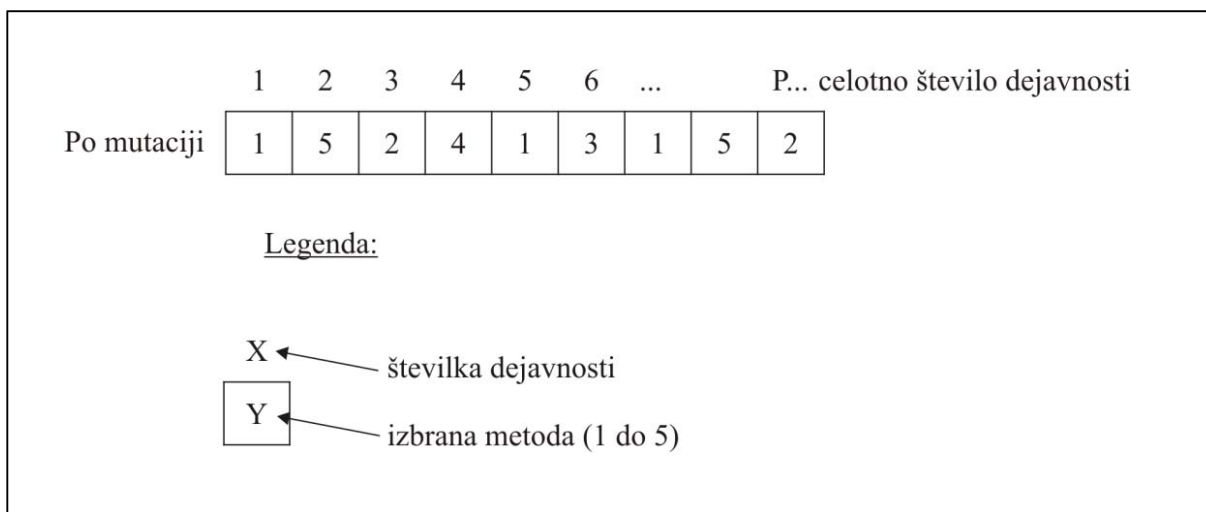
Bistvo zgoraj prikazanega postopka je da so primernejše rešitve za ustvarjanje nove generacije tiste, ki so najbližje konveksni lupini. Z ustvarjanjem novih generacij se tako približujemo optimizacijski krivulji, dokler med konveksno lupino in optimizacijsko krivuljo ni več samostojnih rešitev (grafikon 9). Ko konveksne lupine ne moremo več premakniti proti koordinatnima osema, takrat smo našli rešitev našega problema.

Sedaj ko imamo optimizacijsko krivuljo, lahko na isti graf nanesemo tudi indirektne stroške režije. Zanje vemo, da ponavadi linearno naraščajo s časom. Seštevek vseh stroškov skupaj nam prikaže novo krivuljo, pri kateri lahko določimo najmanjše možne stroške celotnega projekta in njihov pripadajoči čas gradnje.

### 5.3 Formulacija modela za časovno-stroškovno optimizacijo

Pri formuliranju modela moramo upoštevati 5 primarnih pogledov: (i) sestava strukture kromosomov; (ii) določanje vrednotenja (čas in stroški); (iii) generiranje začetne populacije; (iv) proces izdelave potomcev – nove generacije; (v) pisanje algoritma v računalniški program.

Najprej naredimo strukturo kromosoma kot skupek elementov, pri katerem vsak element predstavlja eno dejavnost, na njem pa je napisana izbrana metoda (1-5). Glej sliko 7.



Slika 7: Formiranje kromosoma

Vrednosti v vsakem kromosomu predstavljajo eno izmed možnih rešitev problema. Da lahko iz vrednotimo primernost kromosoma, moramo poznati pripadajoče stroške in čas pri vsaki izmed možnosti posamezne dejavnosti. Tako dobimo za vsak kromosom oziroma rešitev čas in stroške celotnega projekta po naslednjem algoritmu:



$$\begin{aligned} \text{skupni stroški} = & C_{ij} && \text{(direktni stroški)} \\ & +T C_d && \text{(indirektni stroški – režija)} \\ & -(T-T_d)C_c \text{ če } (T_d > T), && \text{(nagrada – premija)} \\ & \text{drugače } 0.0 \\ & +(T-T_d)C_n \text{ če } (T > T_d), && \text{(kazen – penali)} \\ & \text{drugače } 0.0 \end{aligned}$$

kjer je  $i$  posamezna dejavnost (1 od  $p$ ) in ima direktne stroške  $C_{ij}$  povezane z izbrano metodo  $j$ .  $T$  predstavlja celotni čas projekta,  $T_d$  želeni čas trajanja projekta,  $C_d$  dnevne stroške režije,  $C_c$  dnevno nagrado za predčasni zaključek in  $C_n$  dnevno kazen za prepozno dokončanje projekta. Vse te konstante so uporabniško določene.

Ko imamo sestavljeno obliko kromosoma in določeno funkcijo za izračun stroškov ter časa trajanja projekta, pride v ospredje genetski algoritem. Najenostavnejši način za kreiranje starševske populacije je naključni izbor. Velikost populacije oziroma število generiranih kromosomov zelo vpliva na končni rezultat in čas izračuna. Večja kot je populacija, večja je možnost, da bomo dobili globalni minimum, vendar se poveča tudi čas izračuna. Algoritem uporabniku dopušča izbiro velikosti starševske generacije. Nato se za vsak kromosom izračunata čas in stroški projekta.

Proces reprodukcije poteka s pomočjo naključnega križanja in mutacije, ki ponazarjata naraven proces. Izbira kromosomov je naključna v smislu, da imajo kromosomi z boljšim rezultatom iz prejšnje generacije večjo možnost, da bodo izbrani. Večino reprodukcije opravi proces križanja, mutacija s posameznim izmenjevanjem genov poskrbi, da se rešitve ne približujejo lokalnemu minimumu.

Ko je narejena nova generacija, se izvednotijo vrednosti časa in stroškov posameznega kromosoma. Če so rezultati posameznih kromosomov boljši od starševske generacije se le ti obdržijo, drugače pa so izvrženi iz nadaljnega procesa. To poteka toliko časa, dokler ni najdena najboljša rešitev ali pa je dosežna kakšna izmed uporabniško določenih omejitev.

## 5.4 Računalniška podpora

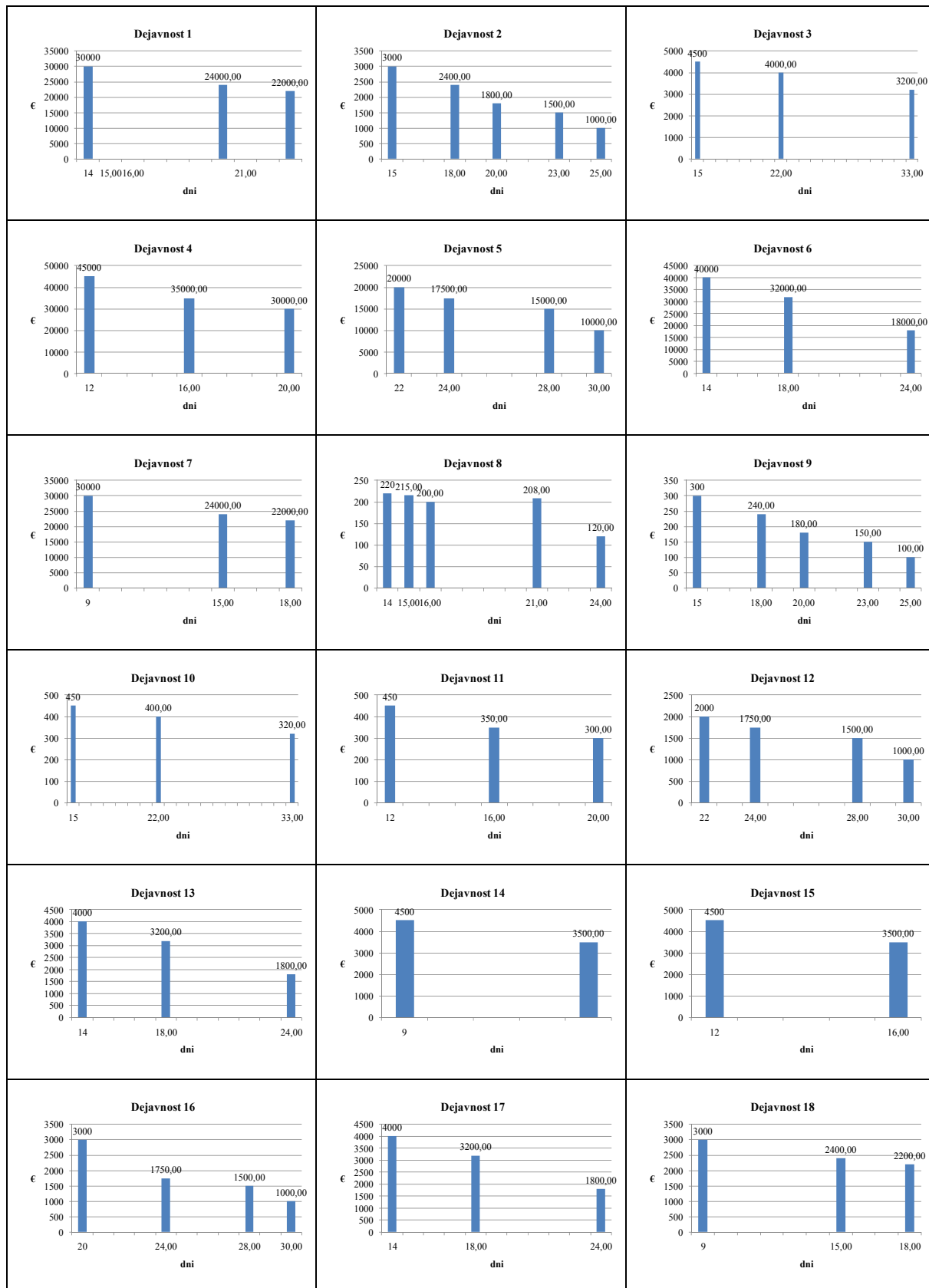
Genetske algoritme lahko avtomatiziramo tudi s pomočjo komercialnih računalniških programov in njihovih dodatkov. Eden izmed takšnih je splošno znani Microsoft Office Excel. Z ročnim vnašanjem vseh možnih povezav in oblikovanjem formul za vsako dejavnost posebej je sicer zamudno orodje, vendar lahko zadosti za občasno obdelavo manjših projektov.

Uporaba genetskih algoritmov je enostavnejša in hitrejša v obliki makrojev vgrajenih v bolj specializirane programe kot je na primer Microsoft Office Project 2007. Celotnemu procesu olajšajo delo že vgrajeni algoritmi za metodo kritične poti in grafični vmesniki, katerih ni potrebno posebej programirati. Opisani model s tem postane enostavno orodje in dodatek za uporabo pri planiranju v planerju znanem delovnem okolju.

## **6 TESTNI PRIMER**

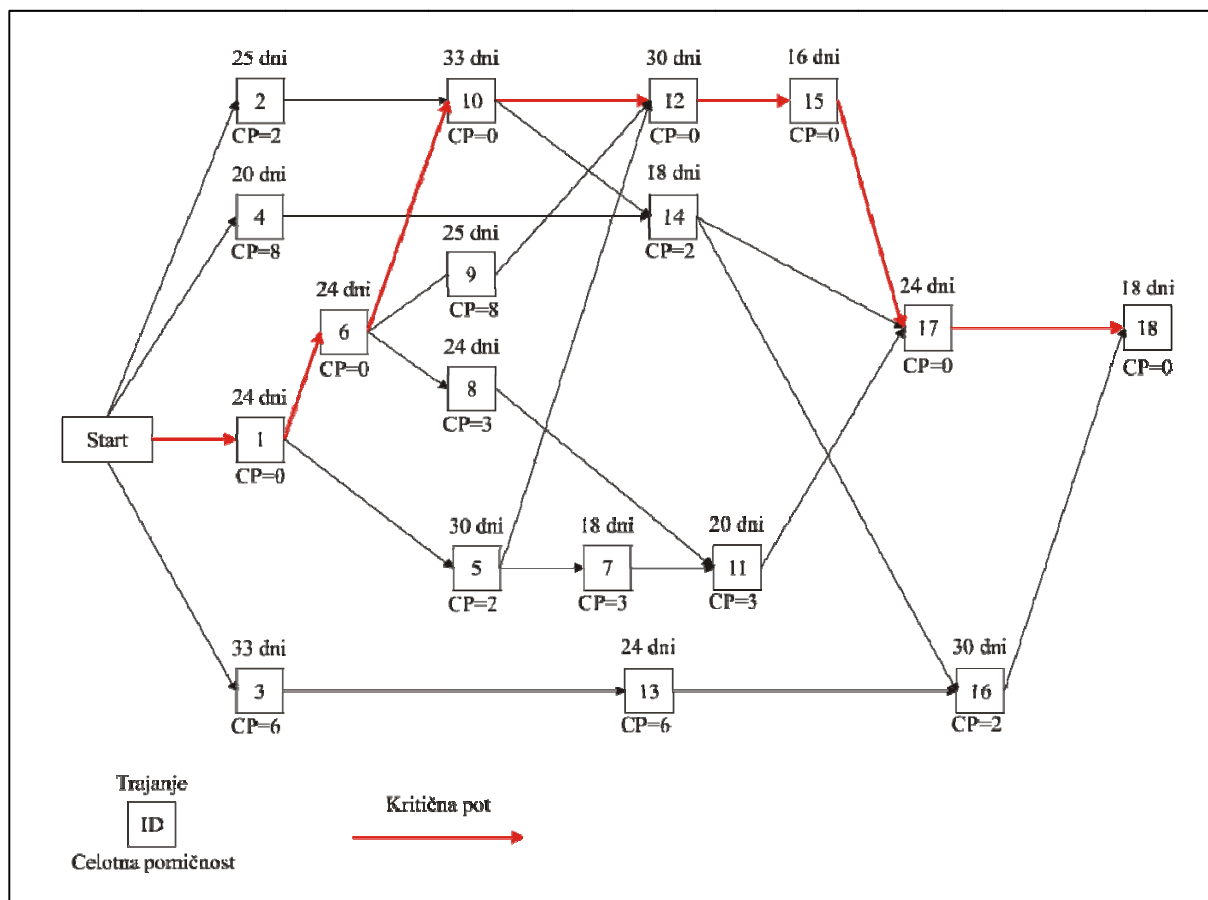
Za prikaz uporabe navedenih metod smo analizirali primer projekta z osemnajstimi dejavnostmi. Vsaka izmed njih je lahko imela minimalno dve oziroma največ pet možnosti za izvedbo. Zanje smo morali poznati čas in pripadajoče stroške izvedbe. Posamezni časi in povezave so prikazani v preglednici 7 in 8 ter sliki 8. Cilj analize testnega primera je bil poiskati optimalno kombinacijo stroškov in časa izvedbe celotnega projekta ob uporabniško določenih robnih pogojih. Pri tem so se upoštevale tudi nagrade za predčasno dokončano delo – premije in kazni za zamujeni rok dokončanja del – penali.

Preglednica 7: Grafikoni odvisnosti med časom in stroški izvedbe posamezne dejavnosti



Preglednica 8: Podatki testnega primera

<i>Dejavnost</i>	<i>Predhodniki</i>	<i>T1</i>	<i>S1</i>	<i>T2</i>	<i>S2</i>	<i>T3</i>	<i>S3</i>	<i>T4</i>	<i>S4</i>	<i>T5</i>	<i>S5</i>
1		14	2400	15	2150	16	1900	21	1500	24	1200
2		15	3000	18	2400	20	1800	23	1500	25	1000
3		15	4500	22	4000	33	3200				
4		12	45000	16	35000	20	30000				
5	1	22	20000	24	17500	28	15000	30	10000		
6	1	14	40000	18	32000	24	18000				
7	5	9	30000	15	24000	18	22000				
8	6	14	220	15	215	16	200	21	208	24	120
9	6	15	300	18	240	20	180	23	150	25	100
10	2, 6	15	450	22	400	33	320				
11	7, 8	12	450	16	350	20	300				
12	5, 9, 10	22	2000	24	1750	28	1500	30	1000		
13	3	14	4000	18	3200	24	1800				
14	4, 10	9	3000	15	2400	18	2200				
15	12	12	4500	16	3500						
16	13, 14	20	3000	22	2000	24	1750	28	1500	30	1000
17	11, 14, 15	14	4000	18	3200	24	1800				
18	16, 17	9	3000	15	2400	18	2200				



Slika 8: Testni primer – mrežni diagram (dejavnostna mreža)

Pri tem je potrebno poznati tudi ostale uporabniško določene vrednosti testnega primera (preglednica 9).

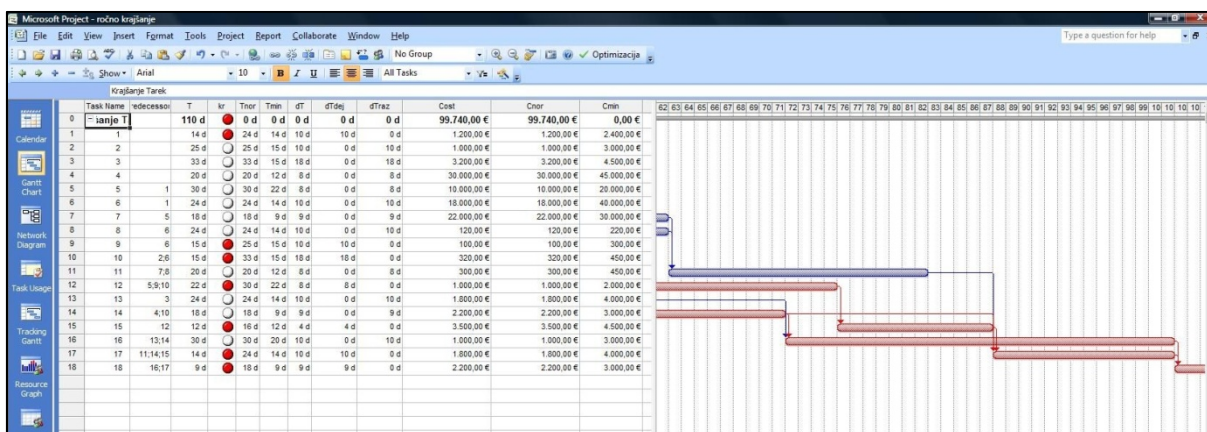
Preglednica 9: Uporabniško določene vrednosti testnega primera

Željeno trajanje projekta	110 dni
Nagrada (premija) za predčasni zaključek	1000 €/dan
Kazen (penali) za prekoračitev roka gradnje	20000 €/dan
Stroški režije	200 €/dan

Stroški projekta znašajo pri izbranih običajnih časih trajanja 1.313.540 €, projekt pa se zaključi po 196 dnevih. To je rezultat, ki ga bomo s pomočjo genetskega algoritma in drugih pristopov poskušali izboljšati.

## 6.1 Iteracijski postopek – ročno krajšanje

Iteracijski postopek temelji na poizkušanju skrajšanja kritičnih dejavnosti mreže s tem, da najprej krajša najcenejšo dejavnost do maksimuma. Ko je meja krajšanja dosežena, preveri potek kritične poti in nato pristopi k maksimalnemu krajšanju najcenejše od preostalih dejavnosti. Izhajamo iz podatkov maksimalno možnih okrajšav posameznih dejavnosti in specifičnih stroškov za te okrajšave.



Slika 9: Primer ročnega krajšanja s pomočjo grafičnega vmesnika v Microsoft Office Project 2007

Prvotni plan trajanja projekta pri našem primeru znaša  $T_p = 169$  dni. Ker je predpisani rok za izvedbo  $T_{\text{predpisan}} = 110$  dni, je potrebno s krajšanjem projekta pridobiti  $\Delta T = 59$  dni.

Prvi korak pri krajšanju je določitev kritične poti. Na kritični poti so vse tiste dejavnosti, pri katerih s krajšanjem lahko vplivamo na celotno trajanje projekta. Z analizo povezav dejavnosti lahko ugotovimo, da kritično pot predstavljajo dejavnosti 1, 6, 9, 10, 12, 15, 17 in 18.

Naslednji korak predstavlja določitev koeficientov  $\Delta c/\Delta t$ , s katerimi določimo vrstni red krajšanja dejavnosti. Začnemo z najmanjšim, saj nam ta predstavlja najmanjše stroške v odvisnosti od časa. Določanje koeficientov pri diskretnih funkcijah porazdelitve stroškov je nekoliko zamudnejše, saj je potrebno koeficient izračunati za vsako izmed možnosti pri

posamezni dejavnosti. Zaradi nelinearnosti in nezveznosti naraščanja stroškov s časom koeficienti pri dejavnostih niso konstante.

V preglednici 10 je prikazan potek krajšanja testnega primera. Začeli smo z dejavnostjo 10, saj ima ta najmanjši koeficient  $\Delta c/\Delta t = 7,22$ . Ob sprotne preračunavanju novega trajanja projekta, privarčevanih dnevih in porabljenem denarju se je krajšanje po devetih iteracijah ustavilo. Takrat smo dosegli cilj  $T_{\text{predpisan}} = 110$  dni. Pri tem smo za krajše dokončanje projekta porabili 6.530 € dodatnih sredstev. Ker smo točno dosegli predpisani rok izvedbe pri tem ni bilo potrebno upoštevati stroškov penalov ali premije, ki bi lahko končno vrednost projekta spremenili.

Preglednica 10: Potek iteracijskega krajšanja

<i>iteracija</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>
dejavnost	10	9	18	1	18	1	12	17	15
$\Delta c/\Delta t$	7,22	20	66,67	87,50	88,89	120	125	220	250
$\Delta C$ [€]	130	200	200	700	600	500	1000	2200	1000
$\Delta t$	18	10	3	8	6	2	8	10	4
$t_{\text{dejavnosti}}$	15	15	15	16	9	14	22	14	12
$\Sigma \Delta C$ [€]	130	330	530	1230	1830	2330	3330	5530	6530
$T_p$ [dni]	161	151	148	140	134	132	124	114	<b>110</b>

## 6.2 Uporaba Microsoft Office Excel 2007

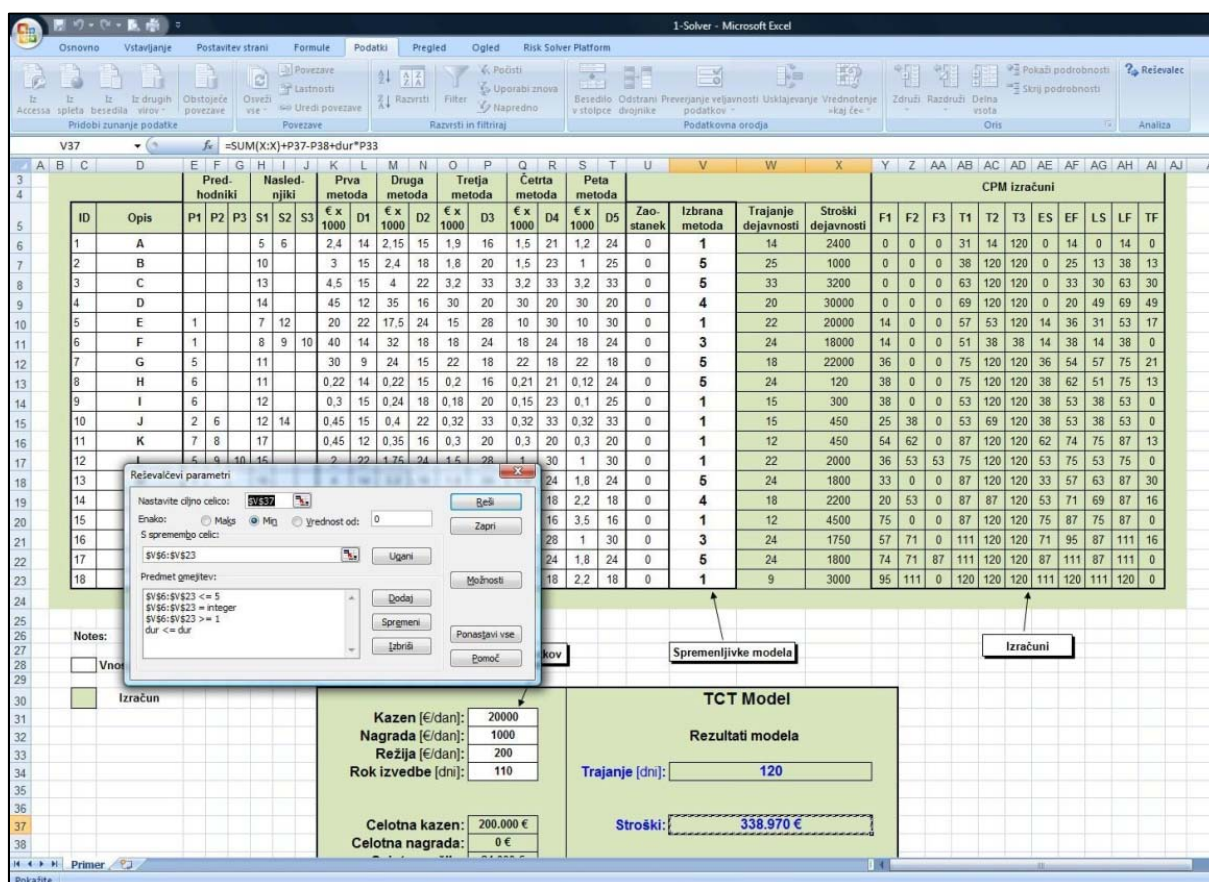
Microsoft Office Excel nam omogoča vnos velikega števila podatkov, ki jih moramo med seboj smiselno povezati in označiti. Ker je namenjen splošni uporabi in nima prednastavljenega grafičnega vmesnika, je bilo potrebno vse podatke o testnem primeru vnesti ročno. Za vsako izmed dejavnosti smo porabili 17 celic, da smo vanje vnesli vse podatke potrebne za nadaljnji izračun. To je bilo potrebno storiti za vseh 18 dejavnosti. Z ročnim vnašanjem formul v celice za vse obstoječe poti pri posamezni dejavnosti smo dosegli, da smo na koncu lahko prišli do potrebnih podatkov ES in EF, ki sta bistvena za optimizacijo projekta. ES predstavlja zgodnji začetek (Early Start), EF (Early Finish) pa zgodnji zaključek dejavnosti. Maksimalna vrednost med vsemi EFji pri vseh dejavnosti predstavlja najkrajši



možni čas, pri katerem je projekt še mogoče zaključiti. Ob časovnih parametrih pa se spreminjajo tudi stroški glede na izbrano možnost. Ti so se zbirali v svojih celicah in se v končnem izračunu seštevali v skupne stroške projekta skupaj s premijami in penali.

### 6.2.1 Dodatek Reševalec v Microsoft Office Excel 2007

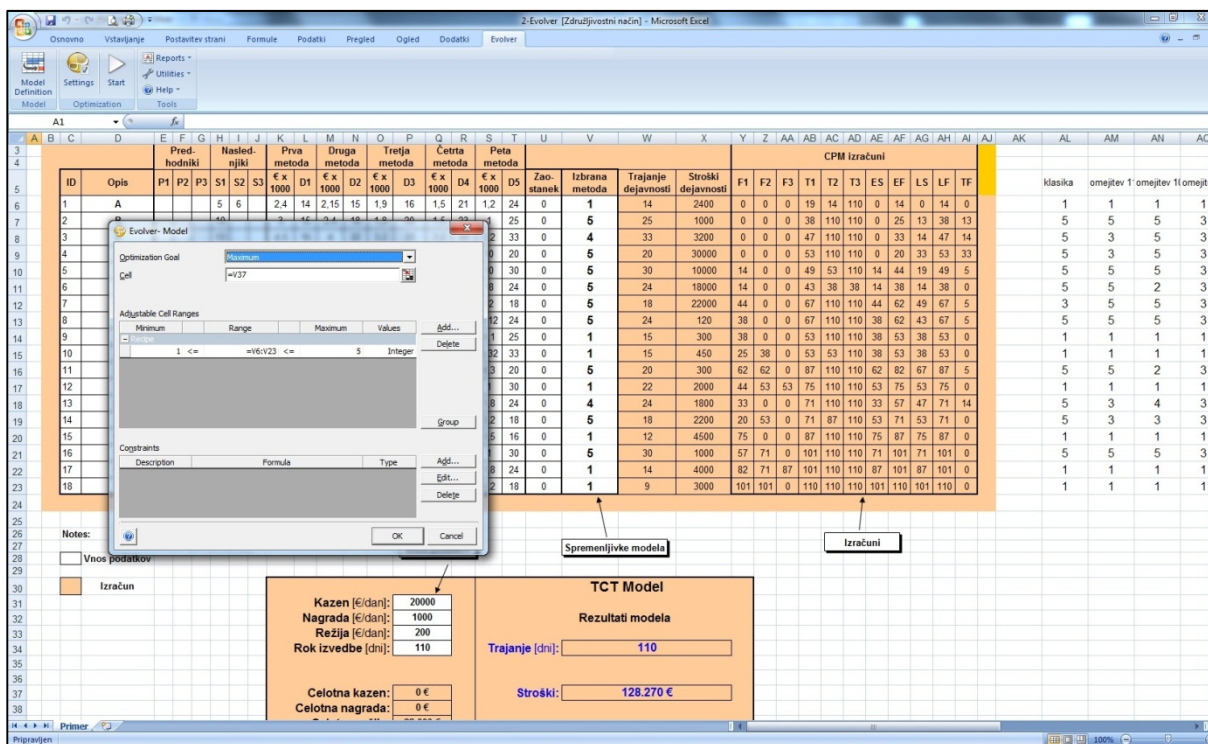
Reševalec je del zbirke ukazov, ki jim včasih pravimo tudi orodja za analizo kaj-če. Z Reševalcem lahko najdemo najboljšo vrednost za formulo v eni celici (imenovani ciljna celica) na delovnem listu. Reševalec dela s skupino celic, ki so neposredno ali posredno povezane s formulo v ciljni celici. Reševalec prilagaja vrednosti v celicah, ki se spreminjajo (so bile uporabniško izbrane) ter poda rezultat, ki je določen iz formule ciljne celice. Pri reševanju se lahko podajo tudi omejitve, ki jih Reševalec upošteva (cela števila, navzgor in navzdol številčno omejene vrednosti celic, ...). Ciljne celice so v konkretnem primeru predstavljale celice, v katerih je bila zapisana izbrana metoda pri posamezni dejavnosti.



Slika 10: Grafični vmesnik dodatka Reševalec v Microsoft Office Excel 2007

## 6.2.2 Dodatek Evolver v Microsoft Office Excel 2007

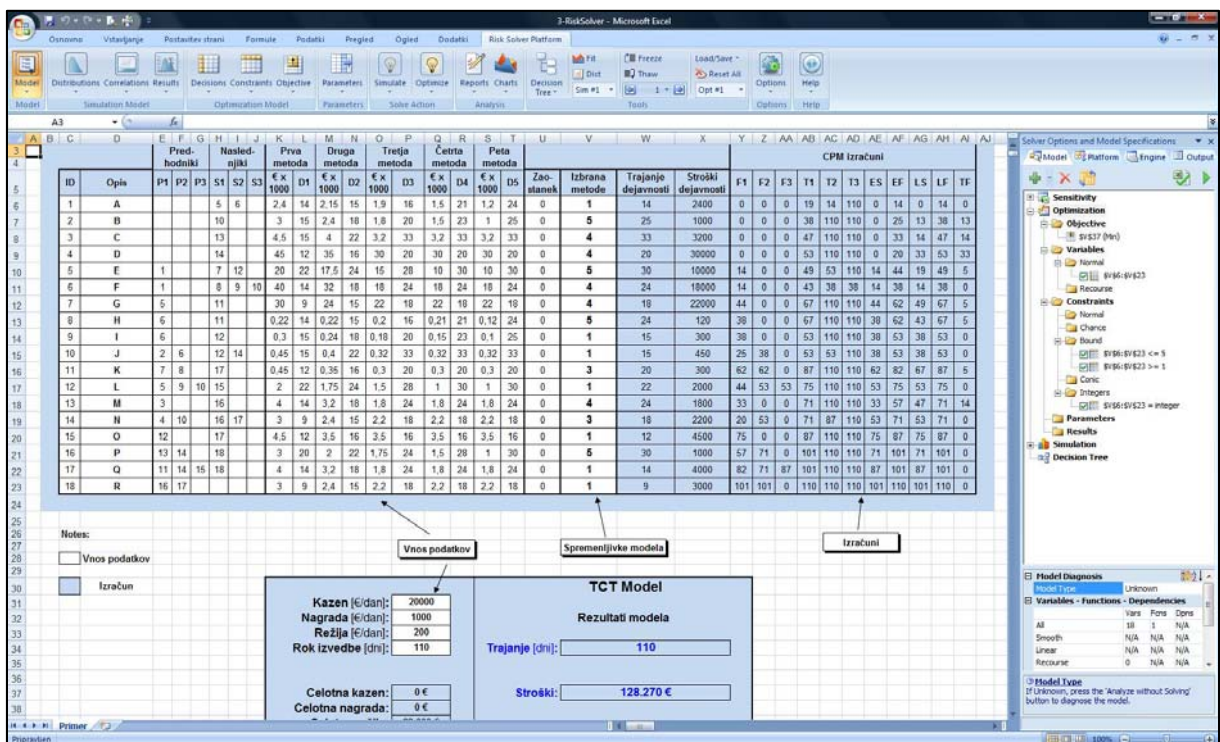
Evolver je dodatek za Microsoft Office Excel, ki temelji na genetskih algoritmih. Reši lahko optimizacijske probleme financ, porazdelitev, urnikov, virov in podobno. Z uporabniku prijaznim vmesnikom išče tudi rešitve kompleksnih in nelinearnih problemov.



Slika 11: Grafični vmesnik dodatka Evolver v Microsoft Office Excel 2007

## 6.2.3 Paket Risk Solver v Microsoft Office Excel 2007

Risk Solver je orodje za analize simulacije in optimizacije v okolju Microsoft Office Excel. V primerjavi s prej omenjenimi ima vgrajenih več različnih metod za iskanje optimalne rešitve kot so Monte Carlo, Standard GRG Nonlinear, Standard Evolutionary Engine in druge. S svojim naborom metod in vgrajenih algoritmov naj bi delo opravil bolje in hitreje kot Evolver.



Slika 12: Grafični vmesnik paketa Risk Solver v Microsoft Office Excel 2007

### 6.3 Uporaba MS Office Project 2007 – makro z genetskim algoritmom

V osnovi je vgrajeni makro delo T. Hegazy (1998), ki je bil za potrebe diplomske naloge dodelan in spremenjen z manjšimi popravki.

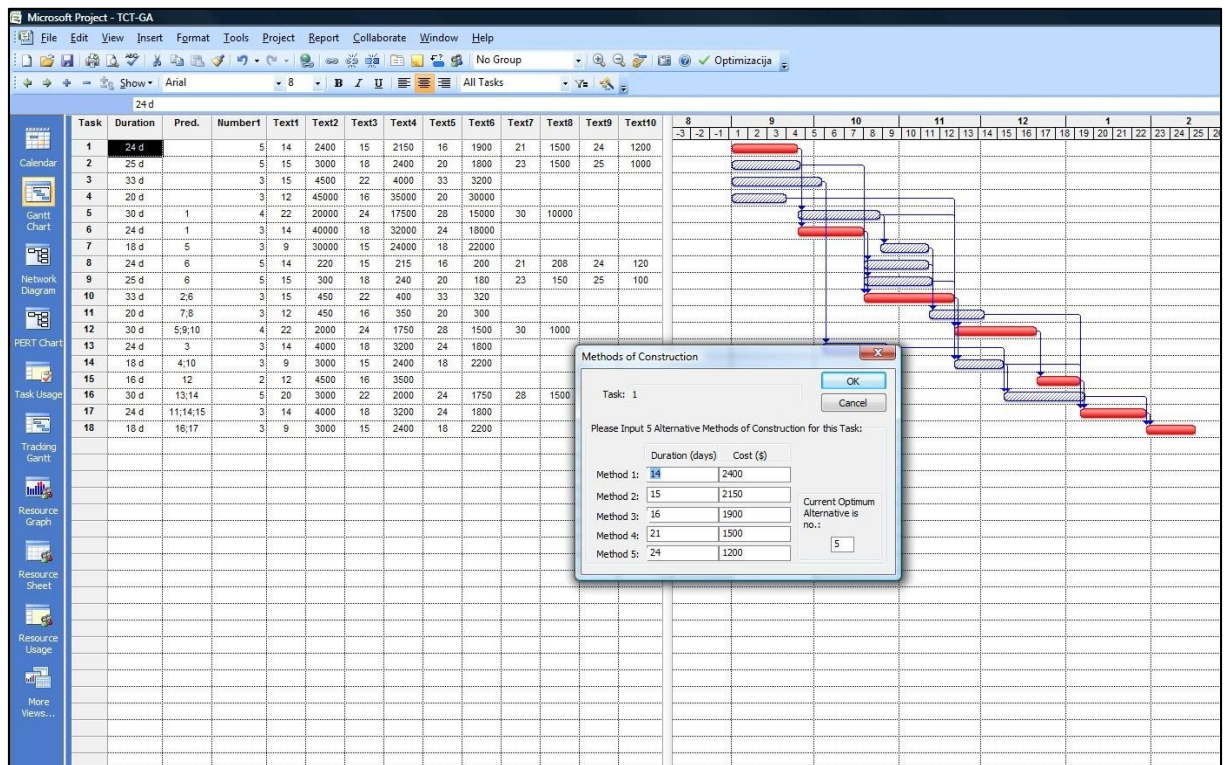
Podatke potrebne za delo z Microsoft Office Project 2007 planer poda preko standardnega uporabniškega vmesnika. Ko želi pognati optimizacijsko analizo, pa mora v prazna polja podati še vse možnosti izvedbe pri posamezni dejavnosti. Model v ta namen uporablja 10 polj (Text 1 do Text10), v katera vpiše do 5 podatkov o trajanju in stroških posamezne možnosti. Ti podatki se lahko vnesejo tudi preko uporabniškega okna za vsako dejavnost posebej po zagonu makra (slika 13).

Ko so podatki o dejavnostih vneseni in shranjeni v odprti dokument, je le ta pripravljen za nadaljnjo optimizacijsko analizo s pomočjo genetskega algoritma vgrajenega v makro. Za pravilnost delovanja makro od uporabnika zahteva, da mu poda začetno vrednost števila kromosomov populacije, koliko generacij naj se ustvari v enem ciklu ter vrednosti penalov in

premije. Števili začetnih kromosomov in generacij se prilagajata glede na predhodne izkušnje in pa predvsem glede na kompleksnost obravnavanega problema.

Kromosom je v splošnem sestavljen iz večjega števila genov. Vsak gen predstavlja eno izmed možnosti izvedbe dejavnosti. V tem pomenu ima vsak kromosom toliko genov, kolikor dejavnosti nastopa v obravnavanem projektu. Makro v začetnem delu izvajanja algoritma ustvari toliko poljubnih kromosomov, kolikor mu jih navede uporabnik ob zagonu. V nadaljevanju na njih izvaja operacije mutacije, križanja in selekcije, ter ob kreiranju novega kromosoma vsakokrat preveri njegovo pravilnost in odnos glede na predhodnika. S tem se ustvari nova generacija. Če je kromosom veljaven, se zanj izračuna vrednost časa in stroškov projekta. V kolikor je rezultat (stroški in čas trajanja projekta) boljši od predhodnika se kromosom obdrži, drugače pa se ga zavrže in uporabi predhodno kreiranega. Algoritem se ponavlja toliko časa, dokler ni doseženo število uporabniško določenih generacij ali pa je že prej dosežena optimalna kombinacijska vrednost.

Po zaključenem izračunavanju se v polju [Number1] izpiše izbrana možnost pri posamezni dejavnosti in v novo odprtem oknu čas in stroški celotnega projekta s povzetkom izračuna (slika 15). V kolikor uporabnik ni zadovoljen s predlaganimi rešitvami, lahko makro ponovno zažene na že obdelanem modelu in tako pridobi boljšo oziroma konkurenčnejšo rešitev.



Slika 13: Okna za vnos podatkov

```

For i = 1 To popul: totmerit = totmerit + 1 / errors(i): Next i
For i = 1 To popul: relmerit(i) = CInt(100 * (1 / (errors(i))) / totmerit): Next i
'Do
summerit = 0: gene1 = 1: gene2 = 1           'Select two genes to Marry
mo = Rnd: a = Int(Rnd * 100 + 0.5)
mo = Rnd: b = Int(Rnd * 100 + 0.5)
For i = 1 To popul
  If a >= summerit And a < summerit + relmerit(i) Then gene1 = i
  If b >= summerit And b < summerit + relmerit(i) Then gene2 = i
  summerit = summerit + relmerit(i)
Next i
identical = True                           'Check if identical genes
For i = 1 To ActiveProject.Tasks.Count
  If gene(gene1, i) <> gene(gene2, i) Then identical = False: Exit For
Next i
If identical = True Then gene1 = gene2
'Loop While gene1 = gene2
Do                                           'Cross-over Operation to Generate an offspring
mo = Rnd: a = Int(Rnd * ActiveProject.Tasks.Count) + 1
mo = Rnd: b = Int(Rnd * ActiveProject.Tasks.Count) + 1
If b < a Then j = a: a = b: b = j
Loop While a = b
For i = 1 To a: gene(popul + 1, i) = gene(gene1, i): Next i
For i = a + 1 To b: gene(popul + 1, i) = gene(gene2, i): Next i
For i = b + 1 To ActiveProject.Tasks.Count: gene(popul + 1, i) = gene(gene1, i): Next i

Call cost_calc(popul + 1): errors(popul + 1) = evcr 'check offspring
worst = 1: best = 1                          'find worst network and best network
For i = 1 To popul
  If errors(i) > errors(worst) Then worst = i
  If errors(i) < errors(best) Then best = i
Next i
msg = ""                                     'check if offspring is better than worst
For i = 1 To popul
  msg = msg + Chr(13) + "Gene" & i & ": "
  For j = 1 To ActiveProject.Tasks.Count: msg = msg & gene(i, j): Next j
  msg = msg + Chr(13) + "Performance= " + Format(errors(i), "###0.0") + "; Merit= " & relmerit(i)
Next i
msg = msg + Chr(13) + Chr(13)
msg = msg + "Offspring No. " & m
msg = msg + Chr(13) + " genes " & gene1 & " and " & gene2 & " are selected"
msg = msg + Chr(13) + " and will cross-over from position " & a & " to " & b
msg = msg + Chr(13) + Chr(13) + "Offspring: "
For j = 1 To ActiveProject.Tasks.Count: msg = msg & gene(popul + 1, j): Next j
msg = msg & " Performance= " + Format(errors(popul + 1), "###0.0")
If errors(popul + 1) < errors(worst) Then
  msg = msg + Chr(13) + " and will replace Gene" & worst
  errors(worst) = errors(popul + 1)
  For i = 1 To ActiveProject.Tasks.Count: gene(worst, i) = gene(popul + 1, i): Next i
Else
  msg = msg + Chr(13) + " and will be discarded"
End If

```

Slika 14: Del kode makra vgrajenega v Microsoft Office Project 2007

## 7 REZULTATI, KOMENTARJI IN PRIMERJAVE

### 7.1 Rezultati iteracijskega postopka – ročno krajšanje

Pri iteracijskem postopku je bilo potrebno paziti, da so bile posamezne dejavnosti krajšane v okviru omejitev, ki jih dovoljuje obravnavani primer (preglednica 9). Ker ima posamezna dejavnost le določeno število možnih trajanj, smo zaradi primerjave z ostalimi metodami uporabili ponujene možnosti in pri tem spremljali kritično pot.

Po končanem postopku se je čas trajanja projekta ustavil pri 110 dnevih. To pomeni, da izvajalcu ne bo potrebno plačati penalov zaradi prekoračitve roka gradnje, prav tako pa tudi ne bo dobil premije zaradi predčasnega zaključka. Vrednost obravnavanega projekta – primera se je tako ustavila pri 128.270 €.

### 7.2 Rezultati dodatka Reševalec v Microsoft Office Excel 2007

S spreminjanjem izbora metod smo iskali minimum med stroški, pri čemer pa je algoritem oviral pogoj, da je čas dokončanja projekta vedno krajši od predhodne rešitve. S temi omejitvami se je algoritem ustavil pri 120 dnevih in 338.970 €.

### 7.3 Rezultati dodatka Evolver v Microsoft Office Excel 2007

Dodatek Evolver je s svojim zmogljivejšim algoritmom in brez omejitve časa pri vsaki naslednji operaciji našel optimalno rešitev pri 110 dnevih in stroških projekta 128.270 €. Za primerjavo smo algoritem pognali tudi z omejitvijo 108 dni, pri čemer je bilo končno izbrano trajanje 104 dnevi in 135.120 € (glej preglednico 11).

Preglednica 11: Rezultati dodatka Evolver

<i>Omejitev</i>	<i>Trajanje projekta</i>	<i>Stroški projekta</i>
brez	110 dni	128.270 €
trajanje krajše od 108 dni	104 dni	135.120 €

## 7.4 Rezultati paketa Risk Solver v Microsoft Office Excel 2007

Risk Solver omogoča uporabo različnih algoritmov in paketov, glede na problematiko primera. V našem primeru smo za analizo izbrali dva. Prvi algoritem z imenom Standard GRG Nonlinear (<http://www.solver.com/suppstdgrgstop.htm>) je našel optimalno rešitev pri 110 dnevih in 136.820 €. 110 dni in 128.270 € pa je bila rešitev algoritma Standard Evolutionary Engine (glej preglednico 12).

Preglednica 12: Rezultati paketa Risk Solver

<i>Algoritem</i>	<i>Trajanje projekta</i>	<i>Stroški projekta</i>
Standard GRG Nonlinear	110 dni	136.820 €
Standard Evolutionary Engine	110 dni	128.270 €

## 7.5 Rezultati makra z genetskim algoritmom v MS Office Project 2007

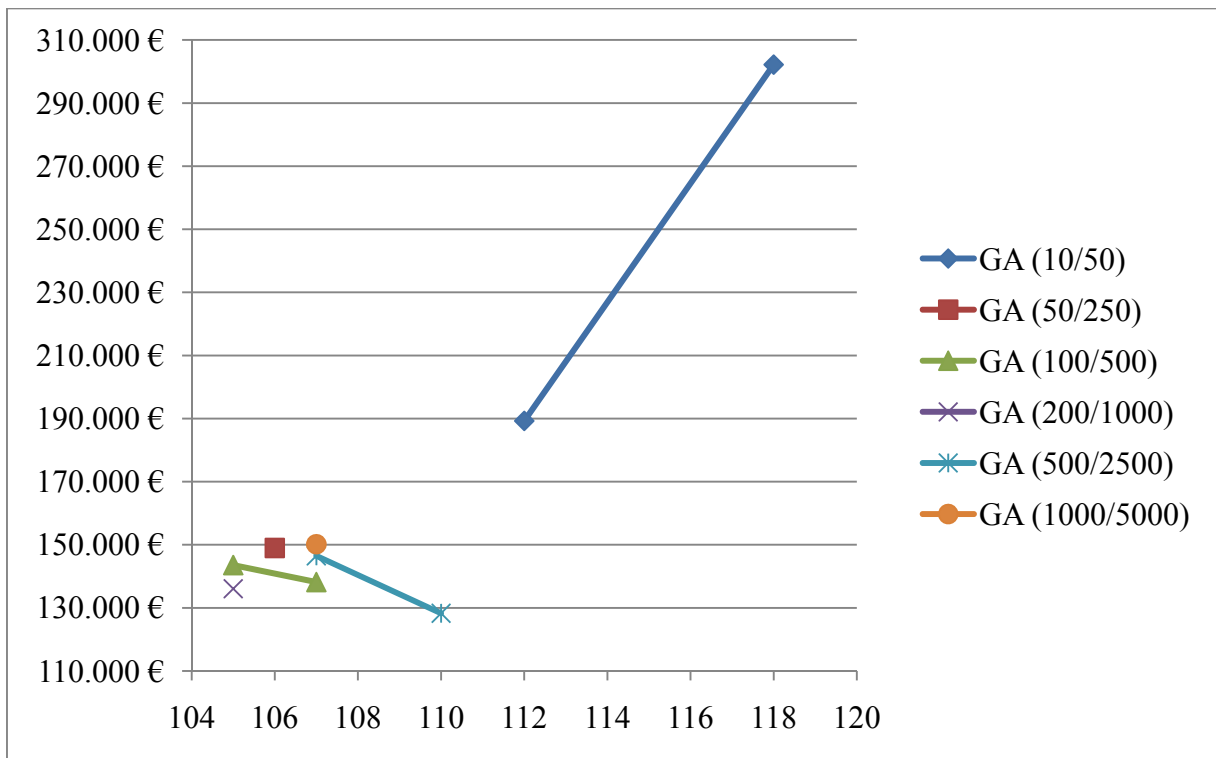
Makro genetskega algoritma nam pri vnosu podatkov ponudi možnost izbire za število začetnih kromosomov in število generacij, ki naj jih generira. Izbira je odvisna od velikosti obravnavanega primera. Zaradi primerjave je bilo izbranih več različnih kombinacij. Makro genetskega algoritma nam omogoča tudi ponovni zagon po že uspešno zaključenem algoritmu. Tako se lahko dobljeni rezultati še izboljšajo. Zaradi večje preglednosti so rezultati predstavljeni v preglednici 13.

Preglednica 13: Rezultati makra z genetskim algoritmom

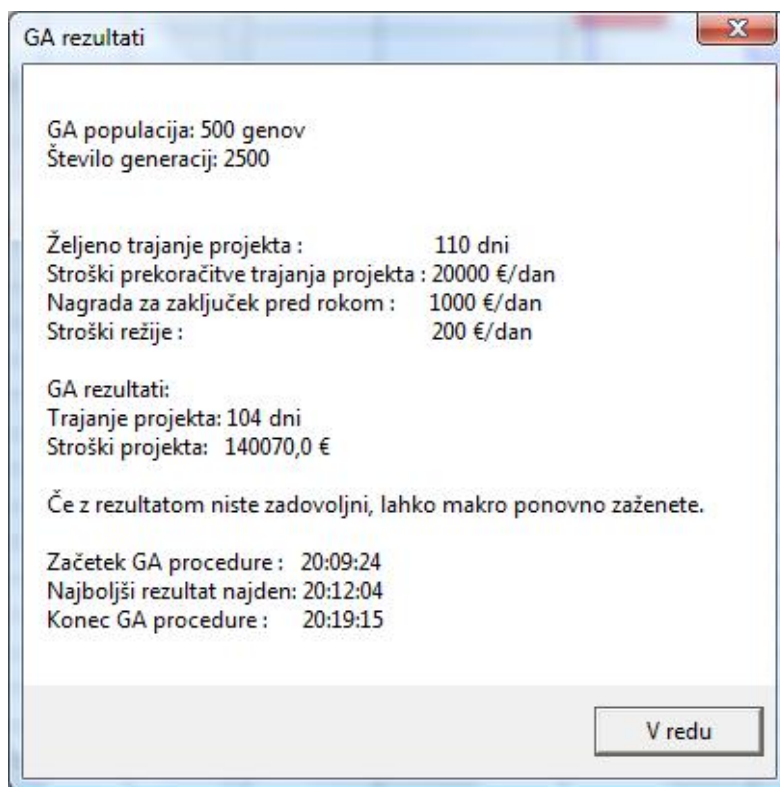
<i>Genov</i>	<i>10</i>	<i>50</i>	<i>100</i>	<i>200</i>	<i>500</i>	<i>1000</i>
<i>Populacij</i>	<i>50</i>	<i>250</i>	<i>500</i>	<i>1000</i>	<i>2500</i>	<i>5000</i>
<i>1. zagon</i>	118	<b>106</b>	105	<b>105</b>	107	<b>107</b>
	302.200	<b>148.970</b>	143.570	<b>136.070</b>	146.500	<b>150.170</b>
<i>2. zagon</i>	<b>112</b>	106	<b>107</b>	105	<b>110</b>	*
	<b>189.250</b>	148.970	<b>138.170</b>	136.070	<b>128.270</b>	
<i>3. zagon</i>	112		107	105		
	189.250		138.170	136.070		



Krepko izpisani rezultati v preglednici 13 prikazujejo najboljšo rešitev pri posamezni kombinaciji števila genov in populacij. V vseh šestih kombinacijah sta bila dovolj največ dva zagona algoritma, saj se rezultati pri tretjem zagonu niso več razlikovali od predhodnih. Pri tem je smiselno opomniti, da je algoritem pri kombinaciji 1000/5000 za prvi izračun potreboval več kot 40 minut, zato algoritem iz praktičnih razlogov uporabe ni bil ponovno zagnan(\*).

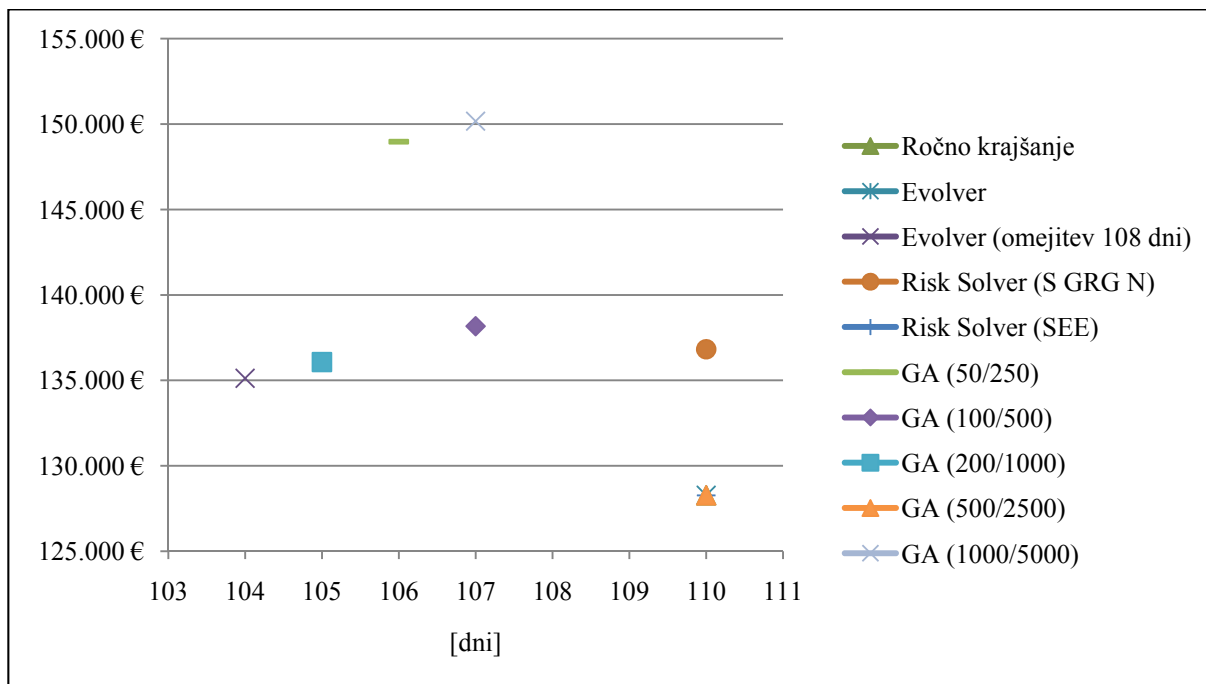


Grafikon 10: Primerjava rezultatov genetskega algoritma



Slika 15: Primer izpisa rezultatov genetskega algoritma

## 7.6 Primerjava rezultatov vseh uporabljenih metod



Grafikon 11: Primerjava rezultatov vseh uporabljenih metod

V grafikonu 11 so vneseni vsi najboljši rezultati posameznih metod, s katerimi smo obravnavali testni primer. Zaradi večje preglednosti smo izpustili rezultate Reševalca v Excelu in makra v MS Project 2007 s kombinacijo (10/50). Najmanjše stroške projekta so prinesli ročno krajšanje, dodatek Evolver, Risk Solver (Standard Evolutionary Engine) in genetski algoritem s kombinacijo 500/2500. Najslabše se je po pričakovanjih odrezal Excelov dodatek Reševalec, saj so možnosti in sposobnost algoritma bistveno manjše v primerjavi z ostalimi metodami. Nekoliko boljši, ampak še vedno s prevelikimi odstopanji je genetski algoritem s kombinacijo 10/50. Iz rezultatov lahko sklepamo, da je za natančnost rezultatov z uporabo genetskega algoritma zelo pomembna začetna izbira števila kromosomov in generacij. S tem algoritmu zagotovimo dovolj veliko število elementov s katerimi lahko operira in tako poišče optimalno rešitev obravnavanega problema. Zadnjo skupino rešitev predstavljajo rezultati, katerih trajanje projekta je pod 110 dnevi. To so rešitve genetskih algoritmov z višjim številom genov in populacij. Ker je predvideno trajanje projekta 110 dni, krajši čas izvedbe pomeni tudi nagrado za predčasno opravljeno delo. Tukaj pride do tehtanja pri možnostih zaradi večjih stroškov krajše izdelave in pridobljene nagrade ob zaključku projekta saj predčasno dokončanje projekta pomeni tudi sprostitev virov za naslednji projekt (kar pa težko finančno ovrednotimo).

## ZAKLJUČEK

Projekti v današnjih dneh so sestavljeni iz velikega števila dejavnosti, zato je ročno izračunavanje optimalnega poteka projekta povsem nemogoče oziroma nesmiselno. V takšnih primerih je primerna uporaba genetskih algoritmov, ki za iskanje rešitve ne uporabijo vseh matematično možnih kombinacij, ampak na podlagi naravne selekcije in boljših možnosti, v krajšem času prinesejo enako dobro rešitev. Njihove rešitve imajo na podlagi virov 95% uspešnost, kar je za gradbeniško stroko več kot zadovoljivo. Genetski algoritmi ne odpovejo, tudi če se vhodni podatki do določene mere spremenijo ali pa če so prisotne določene razumljive motnje. Prav tako pa imajo genetski algoritmi pomembne prednosti pred ostalimi metodami pri kompleksnih problemih, predvsem takšnih, kjer obstaja več lokalnih optimumov, ki odvrtačajo od globalne rešitve.

Smiselnost uporabe genetskih algoritmov se kaže tudi v implementaciji makra v okolje Microsoft Office Project, ki je vsestransko orodje pri planiranju projektov in njihovem spremljanju. Makro ni odvisen od števila dejavnosti, njihovega zaporedja in povezav med dejavnostmi, zato ga lahko uporabimo na skoraj vsakem projektu. Krajšanje dejavnosti se izvaja samodejno, povezave med njimi pa poskrbijo, da makro ne more izvesti nepravilnega krajšanja, za katerega bi bila po končani analizi potrebna kontrola uporabnika. Omejitve vgrajenemu makru postavlja Microsoft Office Project, saj ne zna upoštevati etapnega dela pri zamikih med dejavnostmi, ki so izraženi v odstotkih (%). Vseeno pa so v tem primeru rešitve, ki nam jih ponudi algoritem, na 'varni strani', ker je lahko dejansko trajanje projekta krajše od planiranega. Prav tako so v procesu razvijanja novih generacij izločene kombinacije oziroma kromosomi, pri katerih krajšanje dejavnosti zaradi povezav SS/FF ni prineslo zelenega efekta na krajšanje trajanja celotnega projekta. Uporabljeni algoritem pa ne upošteva uporabe virov, ki lahko bistveno vplivajo na trajanje posameznih dejavnosti in predvsem njihovo izvedbo. Za detajlnejšo analizo je tako še vedno potrebna ročna kontrola planerja pri dejavnostih, za katere je znano, da so močno odvisne od virov. Dobrodošlo posodobitev kode vidimo v možnosti izbire tipa penalov, ki se pri projektu lahko pojavijo. V makru, katerega avtor je T. Hegazy, je ponujena zgolj možnost uporabe linearnih penalov, ki pa pri projektih niso vedno edina možnost.

S komercialnimi dodatki v Microsoft Office Excelu lahko dobimo prav tako dobre rešitve, vendar je potrebno za analiziranje vsakič znova določiti dejavnosti, njihove medsebojne odvisnosti, ki so omejene na povezave tipa FS in prilagajati formule, ki so vezane na določeno število celic. Delo s tem postane zamudno in pri velikem številu dejavnosti nepregledno. Avtorji dodatkov kot sta Palisade Evolver (<http://www.palisade.com/evolver/>) in Risk Solver Platform (<http://www.solver.com/platform/risk-solver-platform.htm>) ponujajo tudi samostojne programske knjižnice z izjemno učinkovitimi genetskimi algoritmi. Te lahko vgradimo v aplikacijo v Visual Basic okolju znotraj programa MS Project. Zato bi bilo bolje razvoj usmerjati v izgradnjo čim bolj realističnega modela stroškov in evaluacije dobljenih rešitev (poleg časa in stroškov tudi analiza enakomernosti uporabe virov v projektu), razvoj genetskih algoritmov pa nadomestiti z uporabo teh programskih knjižnic.

Testni primer nam je pokazal, da z genetskimi algoritmi lahko uspešno poiščemo najmanjšo kombinacijo trajanja in stroškov projekta. Ene same pravilne rešitve ni, ampak jih obstaja vedno več. Te se nahajajo v območju najnižjih stroškov projekta in najkrajšega možnega časa izvedbe. Planer se mora še vedno sam na podlagi izkušenj in razpoložljivosti virov odločiti, katero izmed ponujenih rešitev bo izbral.

## VIRI

Ahuja H.N., Dozzi S.P., Abourizk S.M. 1994. Project Management - Techniques in Planning and Controlling Construction Projects: str. 163-168.

Elazouni, A.M. 2005. Finance-Based Scheduling: Tool to Maximize Project Profit Using Improved Genetic Algorithms. Journal of Construction Engineering and Management, Volume 131: str. 400-412.

E-GRADIVA: Osnove inteligentnih sistemov

<http://lsd3.uni-mb.si/si/studenti/e-gradiva/> (27.11.2009)

Feng, Chung – Wei. 1997. Using Genetic Algorithms to Solve Construction Time-Cost Trade-Off Problems. Journal of Computing in Civil Engineering, Volume 11, Issue 3: str. 184-189.

Hegazy, T. 1998. Optimization of construction time-cost trade-off analysis using genetic algorithms. Canadian Journal of Civil Engineering, Volume 26, Issue 6: str. 685-697.

Hegazy, T. 2002. Computer-Based Construction Project Management. Upper Sadle River: str. 211-235.

Heuristic

<http://en.wikipedia.org/wiki/Heuristic> (27.11.2009)

Innovative Genetic Algorithm Optimization for Microsoft Excel

<http://www.palisade.com/evolver/> (08.09.2009)

Ming Lu, M.ASCE, Hoi-Ching Lam. 2009. Transform Schemes Applied on Non-Finish-to-Start Logical Relationships in Project Network Diagrams, Volume 135, Issue 9: str 863-873.

Rodošek, E. 1985. Operativno planiranje. Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo.