





# Gradbeni vestnik • GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKO ZBORNICE SLOVENIJE

UDK-UDC 05 : 625; tiskana izdaja ISSN 0017-2774;

spletna izdaja ISSN 2536-4332.

Ljubljana, september 2018, letnik 67, str. 177-192

Izdajatelj:

**Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS)**, Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana, telefon 01 52 40 200; faks 01 52 40 199 v sodelovanju z **Matično sekcijo gradbenih inženirjev Inženirske zbornice Slovenije (MSG IZS)**, ob podpori **Javne agencije za raziskovalno dejavnost RS, Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, Fakultete za gradbeništvo, prometno inženirstvo in arhitekturo Univerze v Mariboru in Zavoda za gradbeništvo Slovenije**

Izdajateljski svet:

ZDGITS: **mag. Andrej Kerin**, predsednik  
**Dušan Jukič**  
**prof. dr. Matjaž Mikoš**  
IZS MSG: **Gorazd Humar**  
**Ana Brunčič**  
**dr. Branko Zadnik**  
UL FGG: **izr. prof. dr. Sebastjan Bratina**  
UM FGPA: **doc. dr. Milan Kuhta**

Glavni in odgovorni urednik:

**prof. dr. Janez Duhovnik**

Lektor:

**Jan Grabnar**

Lektorica angleških povzetkov:

**Romana Hudin**

Tajnica:

**Eva Okorn**

Oblikovalska zasnova:

**Mateja Goršič**

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

**Kočevski tisk**

Naklada:

**500 tiskanih izvodov**  
**3000 naročnikov elektronske verzije**

Podatki o objavah v reviji so navedeni v bibliografskih bazah COBISS in ICONDA (The Int. Construction Database) ter na

<http://www.zveza-dgits.si>

Letno izide 12 števil. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 23,16 EUR; za študente in upokojenca 9,27 EUR; za družbe, ustanove in samostojne podjetnike 171,36 EUR za en izvod revije; za naročnike iz tujine 80,00 EUR. V ceni je všteta DDV.

Poslovni račun ZDGITS pri NLB Ljubljana:  
SI56 0201 7001 5398 955

## Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

1. Uredništvo sprejema v objavo znanstvene in strokovne članke s področja gradbeništva in druge prispevke, pomembne in zanimive za gradbeno stroko.
2. Znanstvene in strokovne članke pred objavo pregleda najmanj en anonimen recenzent, ki ga določi glavni in odgovorni urednik.
3. Članki (razen angleških povzetkov) in prispevki morajo biti napisani v slovenščini.
4. Besedilo mora biti zapisano z znaki velikosti 12 točk in z dvojnimi presledki med vrsticami.
5. Prispevki morajo vsebovati naslov, imena in priimke avtorjev z nazivi in naslovi ter besedilo.
6. Članki morajo obvezno vsebovati: naslov članka v slovenščini (velike črke); naslov članka v angleščini (velike črke); znanstveni naziv, imena in priimke avtorjev, strokovni naziv, navadni in elektronski naslov; oznako, ali je članek strokoven ali znanstven; naslov POVZETEK in povzetek v slovenščini; ključne besede v slovenščini; naslov SUMMARY in povzetek v angleščini; ključne besede (key words) v angleščini; naslov UVOD in besedilo uvoda; naslov naslednjega poglavja (velike črke) in besedilo poglavja; naslov razdelka in besedilo razdelka (neobvezno); ... naslov SKLEP in besedilo sklepa; naslov ZAHVALA in besedilo zahvale (neobvezno); naslov LITERATURA in seznam literature; naslov DODATEK in besedilo dodatka (neobvezno). Če je dodatkov več, so ti označeni še z A, B, C itn.
7. Poglavlja in razdelki so lahko oštevilčeni. Poglavlja se oštevilčijo brez končnih pik. Denimo: 1 UVOD; 2 GRADNJA AVTOCESTNEGA ODSEKA; 2.1 Avtocestni odsek ... 3 ...; 3.1 ... itd.
8. Slike (risbe in fotografije s primerno ločljivostjo) in preglednice morajo biti razporejene in omenjene po vrstnem redu v besedilu prispevka, oštevilčene in opremljene s podnapisi, ki pojasnjujejo njihovo vsebino.
9. Enačbe morajo biti na desnem robu označene z zaporedno številko v okroglem oklepaju.
10. Kot decimalno ločilo je treba uporabljati vejico.
11. Uporabljena in citirana dela morajo biti navedena med besedilom prispevka z oznako v obliki oglatih oklepajev: (priimek prvega avtorja ali kratica ustanove, leto objave). V istem letu objavljena dela istega avtorja ali ustanove morajo biti označena še z oznakami a, b, c itn.
12. V poglavju LITERATURA so uporabljena in citirana dela razvrščena po abecednem redu priimkov prvih avtorjev ali kraticah ustanov in opisana z naslednjimi podatki: priimek ali kratica ustanove, začetnica imena prvega avtorja ali naziv ustanove, priimki in začetnice imen drugih avtorjev, naslov dela, način objave, leto objave.
13. Način objave je opisan s podatki: knjige: založba; revije: ime revije, založba, letnik, številka, strani od do; zborniki: naziv sestanka, organizator, kraj in datum sestanka, strani od do; raziskovalna poročila: vrsta poročila, naročnik, oznaka pogodbe; za druge vrste virov: kratek opis, npr. v zasebnem pogovoru.
14. Prispevke je treba poslati v elektronski obliki v formatu MS WORD glavnemu in odgovornemu uredniku na e-naslov: janez.duhovnik@fgg.uni-lj.si. V sporočilu mora avtor napisati, kakšna je po njegovem mnenju vsebina članka (pretežno znanstvena, pretežno strokovna) oziroma za katero rubriko je po njegovem mnenju prispevek primeren.

Uredništvo

# Vsebina • Contents

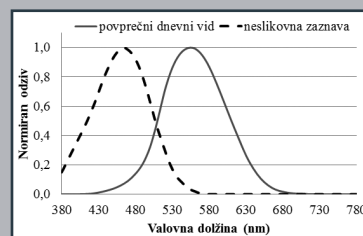
## Članki • Papers

stran **178**

dr. Katja Malovrh Rebec, univ. dipl. inž. arh.

### **MERJENI IN IZRAČUNANI FOTOBIOLOŠKI UČINKI ODBITE SVETLOBE NA LJUDI**

MEASURED AND CALCULATED PHOTOBIOLOGICAL EFFECTS OF LIGHTING ON OBSERVERS



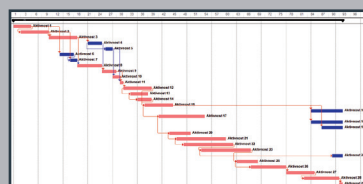
stran **185**

Rok Cajzek, mag. gosp. inž.

izr. prof. dr. Uroš Klanšek, univ. dipl. gosp. inž.

### **STROŠKOVNO OPTIMALNO TERMINSKO PLANIRANJE GRADBENIH PROJEKTOV Z MEŠANIM CELOŠTEVILSKIM NELINEARNIM PROGRAMIRANJEM**

CONSTRUCTION PROJECT OPTIMAL TIME-COST TRADE-OFF SCHEDULING BY MIXED-INTEGER NONLINEAR PROGRAMMING



Objava MSG

Vabilo SDGK

Slika na naslovnici: Septembra 2017 zgrajeno skladišče v Luki Koper, foto: Peter Kleva

# MERJENI IN IZRAČUNANI FOTOBIOLOŠKI UČINKI ODBITE SVETLOBE NA LJUDI

## MEASURED AND CALCULATED PHOTOBIOLOGICAL EFFECTS OF LIGHTING ON OBSERVERS

dr. Katja Malovrh Rebec, univ. dipl. inž. arh.

katja.malovrh@zag.si

Zavod za gradbeništvo Slovenije,

Oddelek za gradbeno fiziko, Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 53.043:628.9.021

**Povzetek** | Pri načrtovanju osvetlitve izračuni le delno napovejo vplive svetlobe na uporabnike prostorov. Svetloba ima namreč poleg dobro poznanih slikovnih učinkov, ki jih možgani interpretirajo na podlagi odzivov čepkov in paličic, tudi neslikovne učinke. Ti ne pripomorejo k orientaciji v prostoru, temveč sporočajo telesu ključne informacije, ki vplivajo na tvorbo hormonov. Vrh te zaznave je v modrem delu spektra vidne svetlobe. Žal delovanja teh fotoreceptorjev še ne opisujemo s parametri, ustaljenimi v praksi projektiranja, zato so vplivi na uporabnike pogosto prezrti. Dodaten izziv pomeni praksa, pri kateri svetlobne učinke preračunavamo v lukse, kar pomeni, da jih množimo s povprečnim človeškim dnevним vidom. Tak pristop ni primeren za vrednotenje neslikovnih učinkov, ker imajo drugo akcijsko krivuljo. Izmerili smo spektralno sestavo odbitih dnevnih svetlob v modelnem prostoru, ker nas je zanimalo, kakšne razlike nastanejo v slikovni in neslikovni zaznavi, če pobarvamo stene z različnimi barvami. Modra in vijoličasta stena neslikovno stimulirata opazovalca bolj kot slikovno v obeh opazovanih smereh pogleda, oranžna v obeh primerih neslikovno vpliva manj, pri zeleni pa je bila neslikovna zaznava bolj stimulirana od slikovne pri pogledu naprej, pri pogledu v mizo pa je bilo obratno.

Ključne besede: fotobiološki učinki, odbita svetloba, spektralna sestava svetlobe, melatonin, dnevna svetloba

**Summary** | When designing light, the calculations only partially predict the effects of light on the users. In addition to the well-known image forming effects based on rod and cone responses, the light elicits non visual effects as well. The latter is not related to the orientation in ambient, but communicates key information related to hormones secretion. The peak of this perception is in the blue part of the spectrum of visible light. Unfortunately, the responses of these photoreceptors cannot be predicted with parameters currently used in the lighting design practice, so the effects on users are often ignored. An additional challenge is the established practice where the light effects are communicated in lux, which means that they are multiplied by the average human daily vision. Such an approach is not suitable for the evaluation of non-visual effects, because they have a different action curve. We have measured the spectral composition of the reflected daylight in the model room, because we were interested in the differences in image and non-visual forming effects of differently painted walls. Blue and violet walls stimulate observers' non-image forming perception more than image forming in both gazing directions. In both gazing directions orange walls stimulate non-image forming effects far less than the image forming ones. Green walls revealed bigger non image forming effects than non-image forming effects in the forward look, and the other way around in the gaze directed on the table.

Key words: photobiological effects, reflected light, spectral composition of light, melatonin, daylight

## 1 • UVOD

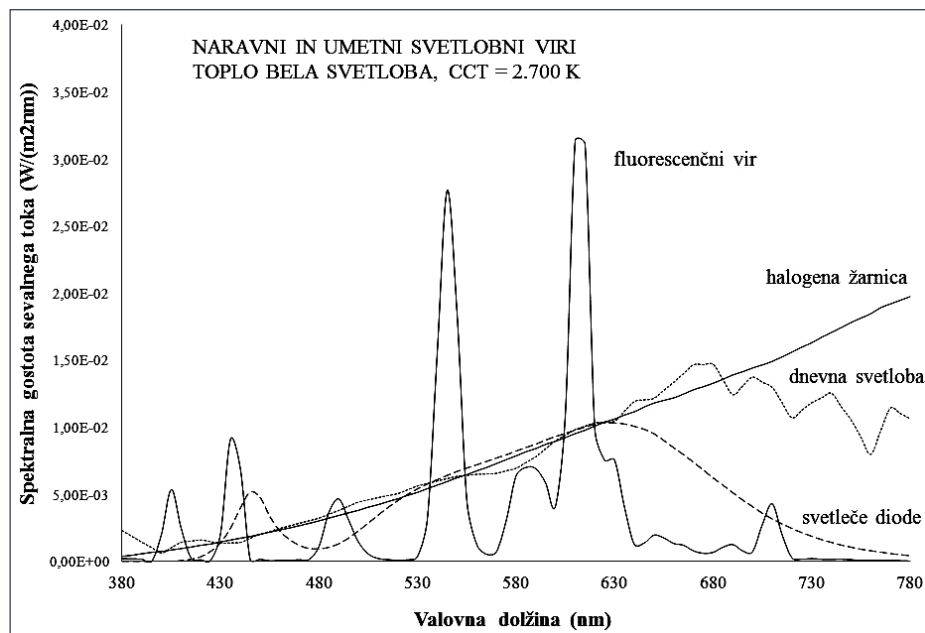
Načrtovanje osvetlitve je lahko v arhitekturi precejšen izziv. Po eni strani vemo, da svetloba bistveno vpliva na raven udobja bivanja v stavbah, po drugi strani je svetloba lahko pomemben faktor pri gradbeni fiziki, zane-mariti pa ne gre tudi umetniške plati svetlobe, s katero lahko spreten načrtovalec pričara v prostoru posebno vzdušje. Poglobljeno poznavanje mehanizmov vplivov svetlobe na ljudi ni ena od pogostih tem med načrtovalci prostorov. Zato je mogoče zdaj pravi trenutek, da pokažemo nekatera prebojna spoznanja na področju zaznavanja svetlobe in vplivov svetlobe na ljudi, ki bodo v prihodnje formirala stroko in usmerjala odločitve pri načrtovanju.

## 1.1 O spektralni sestavi naravnih in umetnih svetlobnih virov

V splošni razsvetljavi je najpogostejša uporaba žarnic na žarilno nitko (klasične se opuščajo, vendar je še vedno pogosta uporaba halogenskih), fluorescenčnih sijalk (klasične fluorescenčne »cevi« – FL – kot tudi varčne sijalke – *Compact Fluorescent Lamps*, CFL), vedno bolj pa je razširjena tudi uporaba sijalk s svetlečimi diodami (*Light Emitting Diodes*, LED). Sicer v razsvetljavi uporabljamo tudi metalhalogenidne sijalke, visoko- ter nizkotlačne natrijeve sijalke (cestna razsvetljava) in obločnice. Naštetih umetnih virov se ločijo po načinu nastanka svetlobe (žarenje, razelektritev, polprevodniški vir svetlobe), po svetlobnem izkoristku, dobi delovanja, spektralni sestavi, vsebnosti elementov, kot sta živo srebro in svinec, ločijo se tudi po času, potrebnem za vžig, po ceni in po tem, ali lahko vsebujejo sevanje v UV-delu spektra (čemur se želimo izogniti). Svetlobni viri LED imajo danes največji potencial za zmanjšanje porabe energije v sektorju razsvetljave ((Steigerwad, 2002), (Lister, 2004), (Schubert, 2005)). Eden od načinov ocenjevanja energijske učinkovitosti virov je svetlobni izkoristek: razmerje med svetlobo, ki jo odda vir, v fotometričnih enotah (lm) in porabljeni električni energiji (W). Virom LED, ki se izjemno hitro razvijajo in izboljšujejo, napovedujejo daleč največje svetlobne izkoristke. V tem prispevku pa bo pozornost posvečena spektralni sestavi svetlobnih virov in tudi v tem smislu so LED-viri novost, saj lahko spektralno sestavo izsevane svetlobe manipuliramo glede na potrebe uporabnika. Predpostavljamo namreč, da je spektralna sestava dnevne svetlobe tista, na

katero smo se ljudje in druga živa bitja prilagodili, in verjetno bi morali najti način, kako se z umetnimi viri čim bolj približati njenim značilnostim.

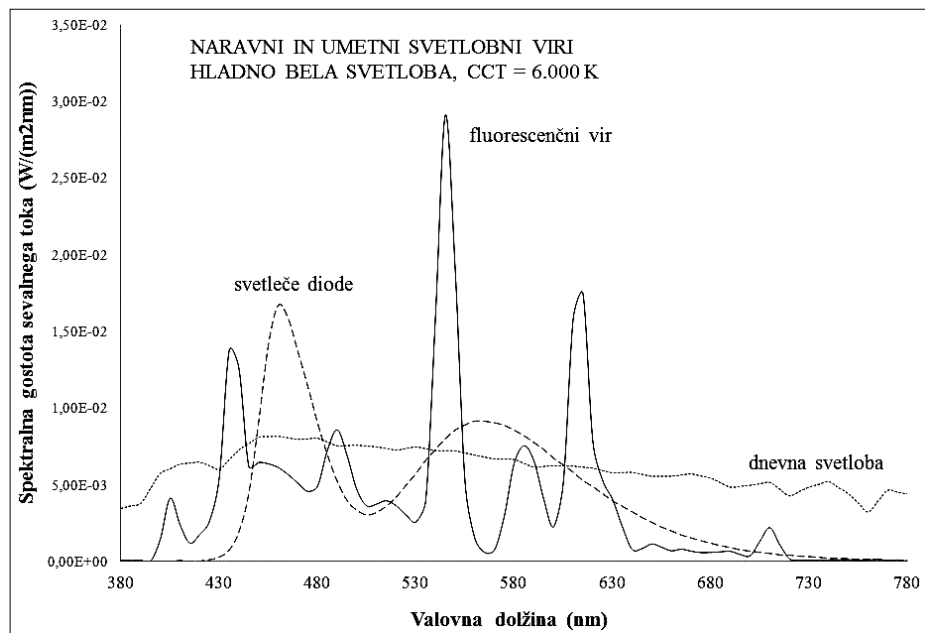
umetnih virov je zelo različna. Niha pa tudi spektralna sestava dnevne svetlobe: zjutraj je dnevna svetloba toplo bela, sredi dneva preide v hladno belo, zvečer pa ponovno postopno preide v toplo belo svetlobo. Človeški organizem se je na spreminjanje spektralne sestave svetlobe prilagodil oziroma ga uporablja kot eno ključnih informacij za uravnavanje



Slika 1 • Na videz podobna toplo bela svetloba in različna spektralna sestava glede na vir svetlobe (primerjava halogene žarnice, fluorescenčnega vira, svetlečih diod in dnevne svetlobe), normirano na 500 lx.

Ljudje zaznavamo svetlobo med valovnimi dolžinami 380 in 780 nm. Spektralna sestava

procesov v telesu. Kljub temu je ta vidik slabo pokrit pri parametrih, ki jih uporabljamo za



Slika 2 • Na videz podobna hladno bela svetloba in različna spektralna sestava glede na vir svetlobe (primerjava fluorescenčnega vira, svetlečih diod in dnevne svetlobe), normirano na 500 lx.

načrtovanje osvetlitve, zato pogosto nastajajo učinki svetlobe, ki jih nismo pričakovali.

Materiali in zasnova površin, ki nas obdajajo, bistveno vplivajo na spektralno sestavo svetlobe, ki doseže oči uporabnika prostorov. Tako lahko načrtujemo intenzivnost kot časovno komponento izpostavljenosti svetlobi in tudi spektralno sestavo svetlobe, ki doseže fotoreceptorje (Andersen, 2013). Pri izračunavanju spektralne sestave in intenzivnosti svetlobe, ki doseže človeško oko, moramo upoštevati razporeditev predmetov v okolici in materiale, iz katerih so sestavljeni (Malovrh Rebec, 2014). Pri predmetih v okolici nas zanimata njihova spektralna odbojnost in vpojnost. Do neke mere se ti učinki upoštevajo pri računalniških simulacijah, s katerimi inženirji načrtujejo razsvetljavo (na primer Relux, Dialux). Vsekakor lahko dobimo vpogled v to, koliko se spusti nivo osvetlitve zaradi absorbirane svetlobe v predmete, stene v okolici. Vendar programska oprema ne omogoča manipuliranja spektralne sestave svetlobnih virov, uporabimo lahko le podatke iz knjižnic, ki jih podajo proizvajalci. Poleg tega je preračun možen le za slikovne učinke, neslikovne zaznave pa ne moremo vrednotiti v takšnih orodjih. Pomembno je vedeti, da je odbita svetloba odvisna od vira, ki obseva material. Če vir ne seva določenih fotonov, potem jih ne moremo zaznati s fotoreceptorji v odbiti svetlobi, kar smo v praksi pogosto srečevali pri fluorescenčnih sijalkah, pri katerih smo slabo razbrali nekatere odtenke barv zaradi diskretnega značaja spektralne sestave izsevane svetlobe fluorescenčnih sijalk.

## 1.2 Fotometrične vrednosti in vrednotenje spektralne sestave

Človeški fotoreceptorji fotonov z različno valovno dolžino ne zaznavajo enako. Vrh občutljivosti našega vida je dogovorno v območju zelenega odtenka oziroma pri 555 nm. Za izračun osnovnega fotobiološkega učinka – slikovne zaznave svetlobe – uporabljamo akcijsko krivuljo povprečnega človeškega dnevnega vida (akcijska krivulja fotopskega vida) oziroma povprečno spektralno občutljivost človeškega vida. Z njo utežimo radiometrično spektralno porazdelitev svetlobe testnega svetlobnega vira. Fotometrične enote so zasnovane glede na povprečno delovanje čepkov. Ker čepki niso enakomerno razporejeni po mrežnici, poleg tega pa imamo tri tipe čepkov z različnimi spektralnimi občutljivostmi, fotometrične enote ne opisujejo dejanske zaznave in lahko dajejo nepravilne rezultate.

Črno telo absorbira vso vpadno energijo in jo v celoti izseva z natančno določeno spektralno gostoto svetlobnega toka – spekter črnega telesa. Ta je določen z enim samim parametrom – absolutno temperaturo telesa, izraženo v kelvinih (K). Podaja ga Planckov zakon. Maksimum zvezno izsevanih fotonov se z višanjem temperature telesa pomika k manjšim valovnim dolžinam (Wienov zakon) (Jeler, 2001). Za spekter črnega telesa v odvisnosti od temperature določimo barvne vrednosti in jih postavimo v barvni prostor CIE 1931. To je podlaga za določanje podobne barvne temperature (CCT) testnega vira, ki ga uporabljamo za vrednotenje različnih odtenkov bele pri svetlobnih virih. CCT je okvirno od malo pod 2.000 K (toplo bela svetloba) prek nevtralne dnevne svetlobe okrog 3.000 K pa vse do 6.500 K in več, kar dojemamo kot hladno belo svetlobo. Spekter izsevane svetlobe testnega svetila ni nujno podoben spektralni sestavi črnega telesa kljub isti vrednosti CCT. CCT nič ne pove o spektralni sestavi svetila (Malovrh Rebec, 2013) – ali je zvezna ali spominja na sevanje črnega telesa oziroma na dnevno svetlobo. To je v praksi prineslo precej razočaranj pri načrtovanju učinkov svetlobe v prostoru.

Poleg CCT smo v preteklosti poskušali opisati spektralno sestavo svetil s parametrom »indeks barvnega videza« ( $R_a$ ). S tem parametrom izrazimo, kako dobro testno svetilo prikaže barve objektov in materialov, ki jih osvetljuje. Sposobnost reprodukcije barv testnega svetlobnega vira podamo primerjalno, in sicer za vire do 5.000 K primerjamo rezultat s sevanjem črnega telesa, vire z višjo CCT pa primerjamo z dnevno svetlobo. Za ocenjevanje se uporablja niz vzorcev z določeno spektralno odbojnostjo (različni barvni odtenki). Z uvajanjem novih svetlobnih virov se je pokazalo, da računski rezultati podajo nerealne rezultate  $R_a$  v primerjavi s stanjem v naravi. Kljub dopolnitvam (dodajanje testnih vzorcev) ostaja ta metoda določanja sposobnosti reproduciranja barv vira pomanjkljiva.

## 1.3 Fotobiološki vplivi svetlobe na človeka: slikovna zaznava

Svetlobo sprejemamo skozi oči in prek kože. Fotoreceptorji, s katerimi zaznavamo svetlobo v očeh, so v zadnjem delu očesa, na mrežnici. To pomeni, da moramo podatke o svetlobi premakniti na mrežnico, če hočemo pridobiti točne izračune, za to pa potrebujemo podatke o spektralni prepustnosti očesa. V človeškem očesu so poznani trije tipi fotoreceptorjev:

paličice in čepki, ki prispevajo k slikovni zaznavi, in svetlobno občutljive ganglijske celice (ipRGC – *intrinsically photosensitive retinal ganglion cells*), ki prispevajo k neslikovni zaznavi. Razumevanje zaznave svetlobe s pomočjo naštetih fotoreceptorjev zajema poznavanje: a) akcijskih krivulj fotoreceptorjev, b) doz, pri katerih se fotoreceptorji aktivirajo, in c) mejne vrednosti, pri kateri določeni vplivi postanejo škodljivi.

Ko svetloba doseže mrežnico, jo fotoreceptorji s pomočjo kisika pretvorijo v impulze, ki jih možgani razberejo kot dražljaje z informacijami o naši okolici. Mrežnica vsebuje veliko število različnih kromoforjev, med katerimi so zelo pomembni vidni pigmenti. Ti absorbirajo energijo po vsem delu vidnega spektra, akcijske krivulje za njihovo vzbujanje pa se med seboj prekrivajo. Paličice omogočajo slikovno zaznavo pri šibki osvetlitvi, tj. skotopsko slikovno zaznavo z vrhom pri 505 nm (Schubert, 2005). Trije tipi čepkov, ki omogočajo dnevni barvni vid, pa se aktivirajo šele pri dovolj visoki ravni osvetlitve. Akcijske krivulje zaznave čepkov se prekrivajo, vrhovi so na območju kratkih, srednjih in dolgih valovnih dolžin vidnega dela spektra. Dolgovalovni čepki imajo vrh v rumeno zelenem območju in ne v rdečem (*Longwave cones* –  $L(\lambda)_{\max} = 570$  nm). Srednjevalovni čepki dosežejo vrh v zelenem območju (*Middlewave cones* –  $M(\lambda)_{\max} = 540$  nm). Kratkovalovni čepki imajo vrh v modrem območju (*Shortwave cones* –  $S(\lambda)_{\max} = 450$  nm). Ker v rumeni pegi mrežnice izrazito prevladujejo fotoreceptorji  $L(\lambda)$  in  $M(\lambda)$ , je inženirska stroka standardizirala akcijsko krivuljo fotopskega, povprečnega dnevnega vida kot »seštevek« zaznave teh dveh fotoreceptorjev ( $V(\lambda)_{\max} = 555$  nm). Pri srednje visoki ravni osvetlitve se hkrati aktivirajo paličice in čepki, takrat govorimo o mezopski zaznavi. Načelno razmerje med tremi tipi čepkov L : M : S je 16 : 8 : 1.

Razporeditev fotoreceptorjev povzroča razlike med dnevnim in nočnim vidom: dnevni vid pretežno temelji na zaznavi v rumeni pegi, nočni pa izrazito na zaznavi s periferijo. Pomembno je tudi, da človeška mrežnica ni simetrična: področje na polovici bliže nosu ima večji vidni kot kakor področje, obrnjeno k ušesu. Signal iz levega optičnega živca potuje v desno polovico možganov. Slika je sestavljena iz dveh signalov, kar nam omogoča globinsko zaznavo.

Fotoreceptorji so pokriti z bipolarnimi in ganglijskimi celicami, zato jih svetloba ne doseže neposredno. Bipolarni in ganglijski sloj, v ka-

terem so tudi za svetlobo občutljive ganglijske celice (ipRGC – *intrinsically photosensitive retinal ganglion cells*) – to so celice za cirtopsko zaznavo – sta prozorna, vendar preprejena z žilno mrežo. Živčne povezave v mrežnici združujejo signale, ki jih prejmejo od fotoreceptorjev, v tri kanale: 1) akromatični kanal oziroma zaznava svetlosti, 2) modro rumeni kanal in 3) rdeče zeleni kanal. Skupina raziskovalcev (Vienot, 2010) je objavila izsledke, in sicer da opazovalec opiše prostor, osvetljen z viri, ki ima veliko izsevane svetlobe v modrem delu spektra (z visokim CCT), kot svetlejšega v primerjavi s prostorom, ki je osvetljen z viri, ki imajo manj fotonov v modrem delu spektra. Na enak rezultat so naleteli tako pri visokih kot pri nizkih ravneh osvetlitve. Pri šibki osvetlitvi meritve svetlosti po definiciji zanemarijo prispevek paličic k zaznavi svetlosti. Pri visokih ravneh osvetlitve, ko večinoma zaznavamo s čepki, pa veljavna metodologija podcenjuje prispevek kratkovalovnih čepkov.

Veliko procesov, ki potekajo pri slikovni zaznavi, je še vedno relativno slabo razumljenih. V praksi si pomagamo z izmerjenimi odzivi opazovalcev in opredelimo parametre, kot so relativna občutljivost za kontraste (RCS – *relative contrast sensitivity*), faktor primerjave kontrastov (Ogrinc, 1996) (CRF – *contrast rendering factor*), faktor motečega bleščanja v fiziološkem smislu (DGF – *disability glare factor*), neugodno bleščanje (*discomfort glare*) v psihološkem smislu in prehodni adaptacijski faktor (TAF – *transient adaptation factor*).

Pigmenti ali kromoforji so kemične spojine, ki svetlobo absorbirajo in reflektirajo v odvisnosti od valovnih dolžin. V mrežnici je veliko kromoforjev, ki vplivajo na slikovno in neslikovno zaznavo ter bistveno prispevajo k fotobiološkemu učinkom. Širokopasovno absorptivna lipofuskin in melanin (albinizem je pomanjkanje melanina) na primer vplivata na fotobiološki učinek nevarne modre svetlobe, saj njuna absorptivnost narašča z manjšanjem valovne dolžine. Hemoglobin in drugi proteini (npr. mitohondrijski encimi) vsebujejo porfin z vrhom absorpcije pri okrog 400 nm. Flavini in flavoproteini absorbirajo modro svetlobo z vrhom pri približno 450 nm. Pigment makule (rumene pege) močno absorbira med 400 in 530 nm (Boulton, 2001). Če upoštevamo naštetu, postane razumljivo, zakaj akcijski spektri posameznih fotoreceptorjev niso uporabni neposredno, temveč še vedno v svetlobni tehniki merimo odzive ljudi.

Za pravilno upoštevanje fotobioloških vplivov je poleg spektralne sestave bistvena tudi

količina svetlobe, ki doseže fotoreceptorje, torej raven osvetljenosti. Ko svetloba doseže oko, moramo upoštevati vpliv ožjenja in širjenja zenice na velikost slike na mrežnici. Količina vpadnih fotonov na mrežnici določa, kateri fotoreceptorji se aktivirajo. Pri nizki ravni osvetlitve se aktivirajo fotobiološki učinki slikovne zaznave s paličicami, skotopski vid. Pri srednji ravni osvetlitve se aktivirajo paličice in čepki, mezopski vid. Pri visoki ravni osvetlitve pa se aktivirajo samo čepki, fopopski vid. Pri izjemno močnih osvetlitvah (na primer, če zremo v sonce, pri obločnem varjenju ali plazemskem rezanju) nastopijo fotobiološki učinki nevarne modre svetlobe. Za cirtopsko zaznavo, ki uravnava tvorjenje hormona melatonina, pa je pomembno, da v pravih časovnih intervalih dobimo popolno temo ter dovolj visoko raven osvetlitve oziroma dovolj fotonov v modrem delu spektra ((Webb, 2006), (Hubalek, 2010)).

Ožjenje in širjenje zenice upravljajo svetlobno občutljive ganglijske celice v mrežnici, ki vsebujejo melanopsin. Ta mehanizem je izjemno kompleksen. Na ožjenje vplivajo: a) povratna informacija, ki prihaja od fotoreceptorjev na mrežnici (tudi ipRGC) (Vienot, 2010), b) čustveni odziv ter c) razdalja med opazovanim predmetom in očesom. Zenica lahko v premeru meri od 2 do 8 mm. To pomeni, da se lahko v praksi svetlobni tok spremeni za razmerje 16 : 1. Ker pa fotopigmenti niso enakomerno razporejeni po mrežnici, se v oftalmologiji uporablja okvirna vrednost.

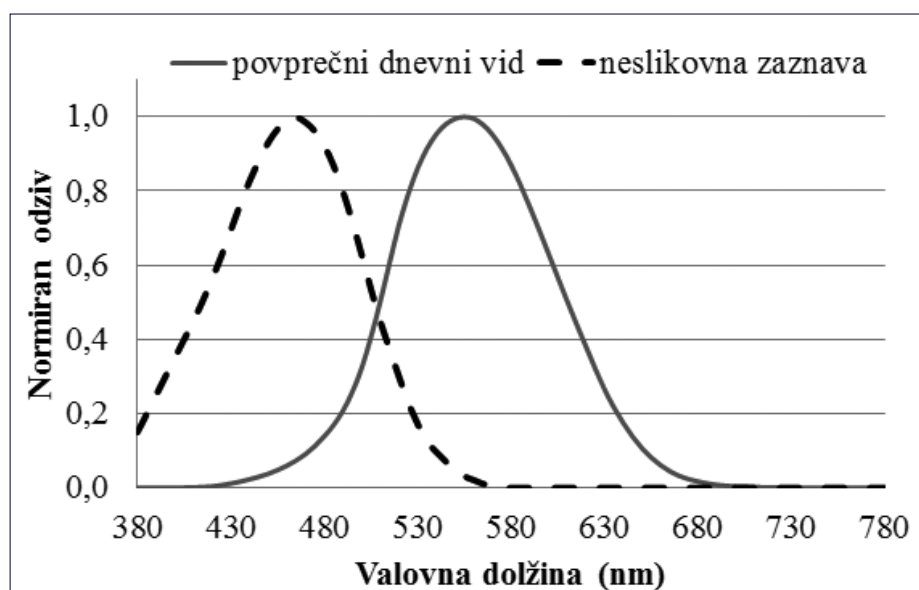
Na zaznavanje svetlobe bistveno vpliva staranje človekovega vidnega organa. Človeški vid s staranjem spremenjeno zaznava predvsem

v modrem delu spektra. Leta 2010 je bila objavljena raziskava (Kessel, 2010), v kateri so izmerili spektralno transmisivnost leč 15 človeških donatorjev. Spektralne transmisije bele svetlobe so merili vzdolž vidne osi v osrednjem delu leče *in vitro* v intaktnih darovanih lečah ljudi različnih starosti (od 18 do 76 let). Rezultati meritev kažejo, da se transmisivnost leč zdravih oseb zmanjša za 72 % v obdobju od 10. leta starosti pa do starosti 80 let. Med obravnavanimi darovalci so imeli tudi primer diabetika, pri katerem se je pokazala izdatno zmanjšana transmisivnost v modrem delu spektra v primerjavi z drugimi darovalci njegovih let.

#### 1.4 Fotobiološki vplivi svetlobe na človeka: neslikovna zaznava

Do nedavnega smo mislili, da vse zaznavanje svetlobe poteka zgolj preko čepkov in paličic. Z odkritjem, da je delež ganglijskih celic svetlobno občutljiv (ipRGC – *intrinsically photosensitive retinal ganglion cells*), pa je postalo jasno, da se cirkadialni ritem uravnava z zaznavanjem svetlobe s temi fotoreceptorji. Tako zaznavanje poimenujemo tudi neslikovna zaznava svetlobe v očeh. Dokazano je, da ipRGC uravnavajo tudi velikost zenic, vrh občutljivosti ipRGC pa je pri 480 nm. Meritve akcijskega spektra sta opravili dve ločeni skupini znanstvenikov ((Brainard, 2001), (Thapan, 2001)), ki sta prišli do podobnih rezultatov.

Pri sesalcih je glavna komponenta biološke ure v dveh gručah nevronov hipotalamusa, imenovanih suprakiazmatično jedro (SCN). Živčni receptorji v očesni mrežnici so preko



Slika 3 • Akcijski krivulji povprečne dnevne slikovne zaznave in povprečne neslikovne zaznave.

mrežnično-hipotalamičnega trakta povezan s SCN, ki je povezan tudi s češeriko. Svetlobni dražljaji se po mrežnično-hipotalamični povezavi prenesejo v češeriko, ki nadzoruje sintezo melatonina. Začetek sprejemanja svetlobnih dražljajev so fotoreceptorji IpRGC. Melatonin s svojim delovanjem uravnava informacije o dolžini dneva in noči (Kores-Plesničar, 2010). Tvori se med spanjem, vendar se lahko začne tvoriti že v mraku. Z izločanjem melatonina so povezane številne funkcije v človeškem telesu, med drugim nihanje telesne temperature (telesna temperatura ponoči pade) in raven kortizola (naraste, preden se zbudimo). Melatonin sodeluje tudi pri obnovi celic in ima antikancerogen učinek ((Pauley, 2004), (Blask, 2005)). Izpostavitve svetlobi, ko tega telo ne pričakuje, na primer kmalu po

začetku spanja v temi, vodi v odlog faze, to pa zmoti izločanje melatonina. V zadnjih letih se je pokazalo, da motnje pri uravnavanju cirkadialnega ritma vplivajo na nastanek in razvoj različnih patofizioloških stanj pri človeku (npr. rak in metabolični sindrom) (Kvaskoff, 2010).

Neslikovna zaznava je odvisna od naslednjih lastnosti svetlobe: raven osvetlitve, spektralna sestava svetlobe, trajanje obsevanja/vzorec prižiganja, zgodovina izpostavljenosti svetlobi in del dneva, ko smo izpostavljeni svetlobi (Amundadottir, 2013). Določanje minimalnih izpostavljenosti za neslikovno zaznavo je izjemno kompleksno. Starejše študije na primer navajajo, da je za »biološko stimulacijo«, to je začetek tvorjenja melatonina, potrebna minimalna osvetljenost okvirno med 200 in 2000 lx, kar pa je velik razpon (Begemann,

1997). Novejše raziskave so pokazale, da sta za cirtopsko zaznavo pomembni popolna tema ponoči in dovolj velika raven osvetljenosti dovolj časa podnevi. Ponoči tvorbo melatonina popolnoma ustavi že tako majhna osvetljenost, kot je 5–17 lx zelene monokromatične barve oziroma 100–300 lx bele svetlobe (Nassau 1998). Druga študija, v kateri avtorji upoštevajo tudi obrnjenost glave, navaja minimalno cirtopsko osvetljenost 190 lx za svetlobni vir D65 (dnevna svetloba pri 6.500 K). Hkrati ista študija navaja, da je za vir CFL s CCT 4.100 K ta vrednost 300 lx (Amundadottir, 2013). Težava teh študij je, da ne navajajo spektralne sestave svetlobe, ki jo je opazovalec prejel, temveč uporabljajo fotometrične vrednosti, ki upoštevajo akcijske spektre za slikovno zaznavo (namesto za neslikovno).

## 2 • Metodologija

Izmerili smo spektralno sestavo odbite svetlobe, ki jo prejme opazovalec. Modelni prostor je velik 3 x 4 metre, visok je 2,4 m, prostor ima vse stene bele. Pri eksperimentu smo menjavali barvo ene od štirih sten. Eksperiment smo opravili za štiri barve stenskih opleskov: oranžna, zelena, vijoličasta in svetlo modra. Okna modelnega prostora so v steni, ki stoji pravokotno na barvno steno. Edina svetloba, ki je vstopala v prostor, je bila dnevna svetloba. Meritve smo opravili na dva načina: simulirali smo pogled opazovalca naprej na višini 120 cm (sedeči položaj) in pogled, usmerjen v mizo, na višini 75 cm, kar je običajen način za predpisovanje ravni osvetlitve v zakonodaji. Predpostavljali smo, da se bo spektralna sestava svetlobe za izbrani dve merilni mesti razlikovala zaradi topografije barv površin v prostoru.

Meritve smo opravili na prostem pri dnevni svetlobi 10. junija 2018 pri 25 °C ± 1 °C. Modelna okna eksperimenta so bila obrnjena proti severu. Merilni instrument pri eksperimentu

je bil spektrometrični merilnik Jeti Specbos 1200. Merilno območje je bilo med 380 in 780 nm s korakom 5 nm.

Izračun slikovne in neslikovne stimulacije smo naredili z množenjem izmerjenih spektrov z akcijskimi krivuljami za povprečni dnevni vid in cirtopsko zaznavo. Dobljene zmnožke smo integrirali in vrednosti primerjali z izhodiščno svetlobo, izmerjeno v prostoru s samimi belimi stenami, ki je pomenila 100-% stimulacijo. Želeli smo torej pokazati, da človeški fotoreceptorji fotonov z različno valovno dolžino ne zaznavajo enako. Vrh občutljivosti našega vida je dogovorno v območju zelenega odtenka oziroma pri 555 nm. Za izračun osnovnega fotobiološkega učinka – slikovne zaznave svetlobe – smo torej uporabili akcijsko krivuljo povprečnega človeškega dnevnega vida (akcijska krivulja fotopskega vida) oziroma povprečno spektralno občutljivost človeškega vida. Z njo smo utežili radiometrično spektralno porazdelitev svetlobe testnega svetlobnega vira. Fotometrične enote so zasnovane tako,

da predstavljajo povprečno delovanje čepkov, kar je približek. Enako smo utežili spektralno sestavo izmerjenih odbitih svetlob tudi z akcijsko krivuljo neslikovne zaznave. Ta predstavlja povprečen odziv svetlobno občutljivih ganglijskih celic. To je poskus, kako opredeliti neslikovne učinke, pri katerem pričakujemo določeno napako, saj vemo, da pigmenti ali kromoforji, kot sta lipofuskin in melanin, vplivajo na spektralno sestavo, ki dejansko doseže svetlobno občutljive ganglijske celice. Vemo, da ravno njuna absorptivnost tudi narašča z manjšanjem valovne dolžine. Zato se zavedamo, da akcijski spektri posameznih fotoreceptorjev niso uporabni neposredno, temveč je v svetlobni tehniki še vedno treba meriti odzive ljudi. Če bi želeli enak poskus predstaviti s parametri, ki so trenutno na razpolago (CCT in  $R_e$ ), bi vsekakor dobili izkrivljene rezultate.

Ker vemo, da dnevna svetloba čez dan spremeni spektralno sestavo (pri naših eksperimentih je imela okvirno CCT 5.500 K), bi bilo zanimivo primerjati enake meritve s takšnimi, ki bi jih opravili pri drugačnih dnevni svetlobah. Na spektralno sestavo vpliva tudi geografska lega, kar bi bila nadaljnja zanimiva poglavitna študija.

## 3 • Rezultati

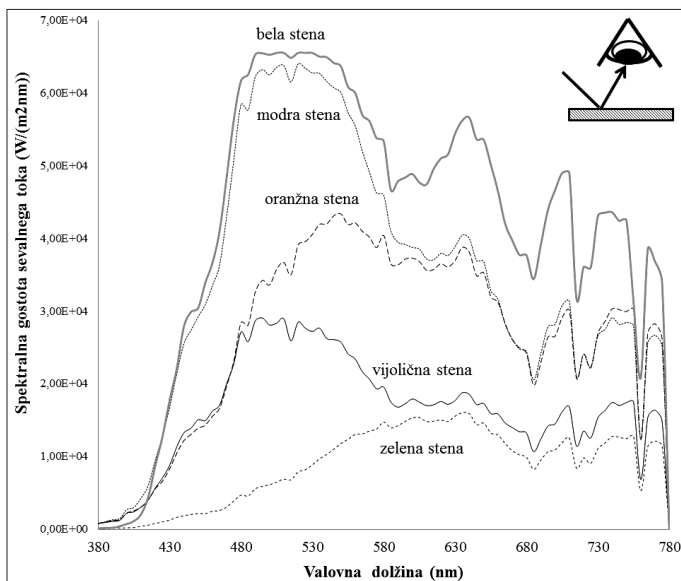
Rezultati eksperimenta kažejo, da je pri enakih svetlobnih pogojih zasnova notranjega bivalnega okolja ključnega pomena za stimulacijo človeške slikovne in neslikovne zaznave. Če primerjamo rezultate, ki smo jih izmerili, kadar

opazovalec gleda predse, na primer pri pogovoru, vidimo, da modra stena pred njim doseže 90 % slikovne stimulacije in 94 % neslikovne glede na izhodiščno 100-% vrednost pri belih stenah. Če je stena oranžna,

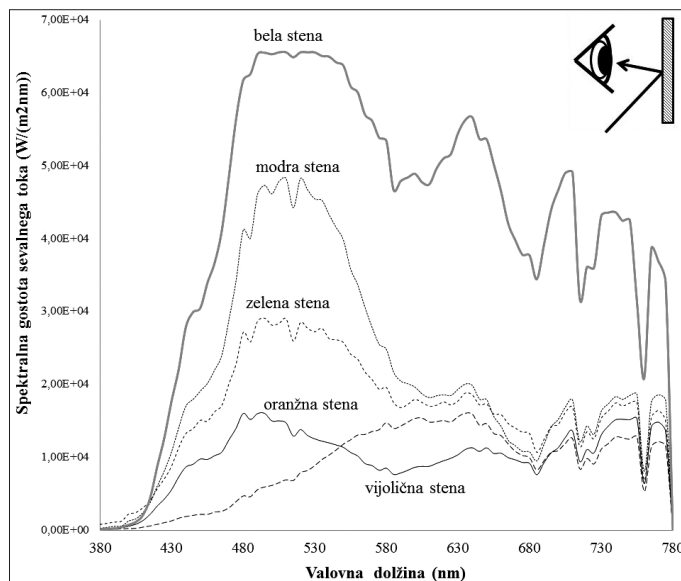
je slikovna stimulacija 67 %, neslikovna pa 49 % odziva pri beli steni. Pri vijoličasti steni je slikovna stimulacija 39 %, neslikovna pa 44 % odziva pri beli steni. Pri zeleni steni je slikovna stimulacija zgolj 20 %, neslikovna pa 8 % odziva pri beli steni.

Če opazovalec zre proti mizi, na primer pri branju, dobimo precej drugačne rezultate. V tem primeru je z modro steno slikovno sti-



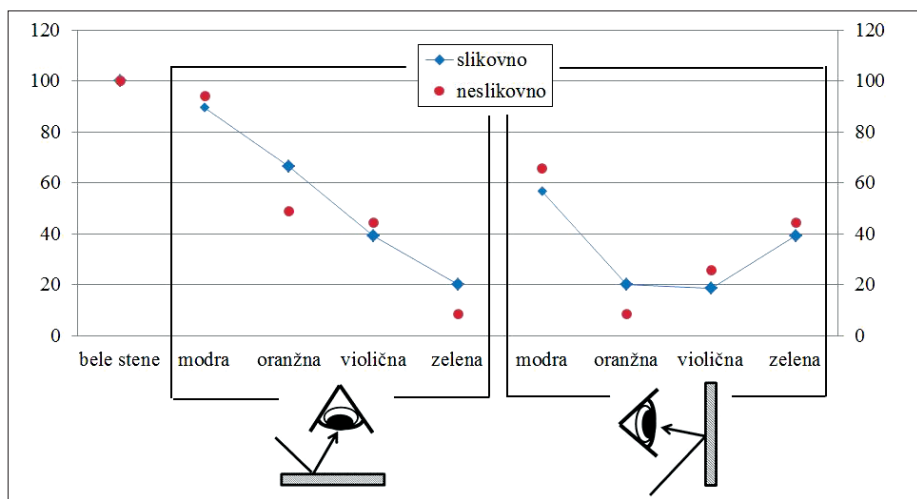


Slika 4 • Spektralna sestava odbitih svetlob, izmerjena horizontalno, za različne barve sten v modelnem prostoru.



Slika 5 • Spektralna sestava odbitih svetlob, izmerjena vertikalno, za različne barve sten v modelnem prostoru.

muliranih le 57 % vrednosti, dobljene z belimi stenami, neslikovno pa 66 %. Pri oranžni steni je slikovno stimuliranih 20 %, neslikovno pa 9 % glede na bele stene. Pri vijoličasti steni je slikovno stimuliranih 19 %, neslikovno pa 26 % glede na bele stene. Pri zeleni steni pa je slikovno stimuliranih 39 %, neslikovno pa 44 % glede na bele stene. To pomeni, da so lahko razlike pri različnih barvah stenskih opleskov za neslikovne odzive samo glede na smer pogleda od 18 do 40 %.



Slika 6 • Izračunana slikovna in neslikovna stimulacija za izmerjene odbite svetlobe.

#### 4 • Razprava in sklep

V notranjem ambientu običajno nastopajo različni materiali in barve površin. Svetloba, ki doseže oko opazovalca, je sestavljena iz različnih deležev svetlobe, odbite od različnih površin ambienta grajene okolice. Obstaja nešteto kombinacij, ki lahko dosežejo oko opazovalca v realnih okoliščinah. Vendar lahko iz prevladujočih površin, njihovih barv in materialov sklepamo na prevladujoče fotobiološke učinke.

Izmerili smo spektralno sestavo odbitih svetlob v modelnem prostoru, ker nas je zanimalo, kakšne razlike nastanejo v slikovni in

neslikovni zaznavi, če pobarvamo stene z različnimi barvami. Uporabili smo moder, zelen, vijoličast in oranžen oplesk. Vir svetlobe, ki smo ga uporabili pri meritvah, je bila dnevna svetloba. Merili smo v dveh smereh pogleda opazovalca, in sicer naravnost predse in s pogledom, usmerjenim v mizo, kot pri branju. Opazili smo tudi padanje intenzivnosti zaradi absorpcije in ne le vpliva spektralne sestave, če normiramo izmerjene rezultate z enako ravno osvetljenosti opazovanih površin. Tak pristop je pri izračunih dnevne svetlobe bolj realen, ko pa preračunavamo osvetlitev z

umetnimi viri, rezultat običajno normaliziramo na tarčno vrednost. V preteklih študijah smo računali posamezne vplive z množenjem spektrov in se ob tem spraševali, kakšna je negotovost glede na delež posameznih prispevkov (Malovrh Rebec 2014). V vsakem primeru so takšni izračuni redki, kar nakazuje veliko potrebo po dogovoru, kako bi lahko neslikovne učinke popisovali, torej po uvedbi novih parametrov za opisovanje spektralne sestave poleg CCT in  $R_a$ .

Naše meritve in izračun so potrdili, da modra in vijoličasta stena neslikovno stimulirata opazovalca bolj kot slikovno v obeh smereh pogleda. Tak izid je pričakovan, pri čemer sta zanimiva delež, ki se absorbira, in posledično padec ravni osvetljenosti površin. Tak pojav

v praksi dobro poznamo iz izkušenj, vendar ga z izračuni trenutno ne potrjujemo sistematično. Oranžna barva je v obeh primerih neslikovno vplivala manj, kar je pričakovano. Pri zeleni barvi sten pa je bila neslikovna zaznava bolj stimulirana od slikovne pri pogledu naprej, pri pogledu v mizo pa obratno. Smer pogleda na stimulacijo fotobioloških učinkov ni vplivala sistematično, kar bi bilo treba preveriti z nadaljnjimi obsežnejšimi meritvami.

Pri predmetih v okolici bi morali pri načrtovanju osvetlitve precej pozornosti usmeriti v spektralne lastnosti odbojnosti in vpojnosti materialov. Tudi pri računalniških simulacijah, s katerimi inženirji načrtujejo razsvetljavo

(Relux, Dialux), bo treba preiti v bolj kompleksne izračune, ki bodo upoštevali tako spektralne značilnosti odbojnosti in vpojnosti materialov kot vire svetlobe. Idealno bi bilo, če bi lahko vključili še specifične spreminjanja prepustnosti človeških leč, ki se z leti bistveno spremeni. Danes lahko v praksi le iz izkušenj in po občutku načrtujemo prostore z zavedanjem, da odtenkov barv ne moremo zaznati s fotoreceptorji v odbiti svetlobi, če vir ne seva določenih fotonov. Enako intuicijo lahko delno prenesemo tudi na vidike neslikovnih učinkov, ki jih imajo prostori na uporabnike.

Sklenemo lahko, da je z znanjem, ki ga imamo trenutno, mogoče okvirno napovedati tudi neslikovne učinke, in ne le slikovnih, čeprav

so raziskave doze še v razvoju. To je pomemben podatek, saj trenutno nimamo sprejetih mednarodno dogovorjenih parametrov, kako bi neslikovno zaznavo opisovali, celo pri slikovni ne moremo preiti nekaterih ovir za nujne posodobitve. Poudariti velja tudi, da je pri razvoju parametrov slikovne zaznave, ki so stari že skoraj sto let, že dolgo znano, da pri izračunih nastajajo precejšnje napake in odstopanja. To ne pomeni, da bi bilo treba parametre kar umakniti, temveč se jih trudimo izboljšati. V tem smislu bi morali verjetno dojemati tudi razvoj neslikovnih parametrov opisa svetlobe in določiti izhodišče za čimprejšnjo uporabo, potem pa z novimi izsledki parametre nadgrajevati in popravljati.

## 5 • Literatura

- Amundadóttir, M. L., St. Hilaire, M. A., Lockley, S. W., Andersen, M., Modelling non-visual Responses to Light: Unifying Spectral and Temporal Characteristics in a Single Model Structure, CIE Centenary Conference: Towards a New Century of Light, Paris, France, 101–110, 2013.
- Andersen, M., Gochenour, S. J., Lockley, S. W., Modelling »non-visual« effects of daylighting in a residential environment. *Building and Environment*, 70, 138–149, 2013.
- Begemann, S. H. A., van den Beld, G. J., Tenner, A. D., Daylight, artificial light and people in an office environment, overview of visual and biological responses, *International journal of industrial ergonomics*, 20, 231–239, 1997.
- Blask, D. E., Brainard, G. C., Dauchy, R. T., Hanifin, J. P., Davidson, L. K., Krause, J. A., Sauer, L. A., Rivera-Bermudez, M. A., Dubocovich, M. L., Jasser, S. A., Lynch, D. T., Rollag, M. D., Zalatan, F., Melatonin-depleted blood from premenopausal women exposed to light at night stimulates growth of human breast cancer xenografts in nude rats. *Cancer Research*, 65, 11174–11184, 2005.
- Boulton, M., Rozanowska, M., Rozanowski, B., Retinal Photodamage, *Journal of Photochemistry and Photobiology*, 64, 144–161, 2001.
- Hubalek, S., Brink, M., Schierz, C., Office workers' daily exposure to light and its influence on sleep quality and mood, *Lighting Research & Technology*, 42, 33–50, 2010.
- Jeler, S., Kumar, M., Interdisciplinarnost barve, 1. del: V znanosti. Društvo koloristov Slovenije, 2001.
- Kessel, L., Lundeman, J. H., Andersen, T. V., Larsen, M., Age-related changes in the transmission properties of the human lens and their relevance to circadian entrainment. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 308–312, 2010.
- Kores-Plesničar, B., Zdravljenje depresije z obnovo cirkadianih ritmov, 12. Fajdigovi dnevi, Kranjska Gora, Slovenija, 11–16, 2010.
- Kvaskoff, M., Weinstein, P., Are some melanomas caused by artificial light, *Medical Hypotheses*, 75, 305–311, 2010.
- Malovrh Rebec, K., Optične lastnosti, fotobiološki in okoljski učinki svetilk s svetlečimi diodami, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, 2014.
- Malovrh Rebec, K., Klanjšek-Gunde, M., Bizjak, G., Parametri za opis spektralne sestave svetlobe – ali sta podobna barvna temperatura in indeks barvnega videza svetlobe primerna za ocenjevanje fotobioloških učinkov? *Razsvetljava in fotometrija*, Bled, Slovenija, 2013.
- Nassau, K., *Color for Science, Art and Technology*, Elsevier, 1998.
- Pauley, S. M., Lighting for the human circadian clock: Recent research indicates that lighting has become a public health issue, *Medical Hypotheses*, 63, 588–596, 2004.
- Schubert, E. F., Kim, J. K., Solid-State Light Sources Getting Smart, *Science* 308, 1274–1278, 2005.
- Vienot, F., Bailacq, S., Le Rohellec, J., The effect of controlled photopigment excitation on pupil aperture, *Ophthalmic and Physiological Optics*, 30, 484–491, 2010.
- Webb, A. R., Considerations for lighting in the built environment: Non-visual effects of light, *Energy and Buildings*, 38, 721–727, 2006.

# STROŠKOVNO OPTIMALNO TERMINSKO PLANIRANJE GRADBENIH PROJEKTOV Z MEŠANIM CELOŠTEVILSKIM NELINEARNIM PROGRAMIRANJEM

## CONSTRUCTION PROJECT OPTIMAL TIME-COST TRADE-OFF SCHEDULING BY MIXED-INTEGER NONLINEAR PROGRAMMING

**Rok Cajzek, mag. gosp. inž.**

GIC GRADNJE, d. o. o.

Sv. Florijan 120, 3250 Rogaška Slatina

**izr. prof. dr. Uroš Klanšek, univ. dipl. gosp. inž.**

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,

prometno inženirstvo in arhitekturo

Smetanova ulica 17, 2000 Maribor

**Znanstveni članek**

UDK 519.853:69

**Povzetek** | V članku je predstavljeno stroškovno optimalno terminsko planiranje gradbenih projektov z mešanim celoštevilskim nelinearnim programiranjem (MINLP). Predlagana tehnika omogoča pridobitev optimalnega terminskega plana za gradbeni projekt pri minimalnih skupnih stroških njegove izvedbe, upoštevajoč posplošene časovne odnose med aktivnostmi, omejitve trajanja projekta in logične pogoje. Pristop MINLP omogoča obravnavanje nelinearnosti v optimizacijskem modelu. Izhodni rezultati MINLP-optimizacije so eksaktni in določajo terminski plan projekta v diskretnih časovnih enotah. Prednosti predlaganega pristopa so predstavljene na primeru uporabe.

Ključne besede: terminsko planiranje, gradbeni projekti, diskretna optimizacija, minimalni skupni stroški, mešano celoštevilsko nelinearno programiranje

**Summary** | This paper presents the construction project optimal time-cost trade-off scheduling by mixed-integer nonlinear programming (MINLP). The proposed technique enables the acquisition of an optimal time schedule for a construction project at a minimum total cost of its execution, taking into account the generalized precedence relationships among activities, project duration constraints and logical conditions. The MINLP approach allows consideration of nonlinearities in the optimization model. Output results of the MINLP optimization are exact and determine the project's time schedule in discrete time units. Advantages of the proposed approach are demonstrated on an application example.

Key words: time scheduling, construction projects, discrete optimization, minimum total cost, mixed-integer nonlinear programming

## 1 • UVOD

Začetki uporabe optimizacijskih metod na področju terminskega planiranja projektov segajo v konec petdesetih let prejšnjega stoletja in približno sovpadajo z obdobjem pionirskih prispevkov na mrežnih tehnikah. Med prvimi na tem področju sta bila raziskovalca Morgan Walker in John Sayer (Walker, 1959), ki sta predstavila metodo kritične poti. Po predstavitvi omenjene metode so problemi stroškovne optimizacije sprožili precejšnje zanimanje med raziskovalci, ki so v preteklosti objavili in še vedno prispevajo številne publikacije. Zgodnje raziskave na področju stroškovne optimizacije so bile predstavljene že leta 1959 (Kelley, 1959), njihov cilj je bil znižati skupne stroške projekta s pospeševanjem in razporejanjem aktivnosti v okviru danega strukturnega mrežnega diagrama. Zatem so se zvrstile še številne raziskave in zelo hitro se je spoznalo, da ko skupni stroški projekta izkazujejo nelinearno časovno odvisnost in ko je potek aktivnosti treba podati v diskretnih časovnih enotah (npr. v delovnih dnevih), stroškovna optimizacija terminskega plana postane nelinearni diskreten problem.

V splošnem za stroškovno optimizacijo velja, da so stroški virov običajno v obratnem

odnosu s trajanjem posamezne aktivnosti (Feng, 1997). Na primer, ob uporabi naprednejše opreme in ob angažiranju večjega števila delavcev za posamezno aktivnost lahko dosežemo zmanjšanje potrebnega časa za njeno dokončanje, vendar po drugi strani povečamo stroške izvedbe. Problemi stroškovne optimizacije terminskih planov veljajo za zahtevne naloge predvsem zaradi kombinatorične narave območja možnih rešitev (Chassiakos, 2005). Literatura na tem področju je bogata, kar nakazuje na interes raziskovalcev pri iskanju rešitev in novosti s področja. Razloge za priljubljenost lahko iščemo v številnih segmentih, med drugim tudi v zahtevnosti razvijanja robustnih algoritmov za iskanje rešitev kompleksnih optimizacijskih problemov, ki se običajno pojavljajo v praksi. Po drugi strani je področje prav tako zanimivo za industrijo, saj lahko napredne tehnike optimiranja prinesejo dodatne prihranke in tako upravičijo strošek razvoja modelov.

Za iskanje optimalnih rešitev nelinearnih diskretnih problemov stroškovne optimizacije terminskih planov je bilo predlaganih več metod, npr. genetski algoritmi ((Feng, 1997), (Li, 1999), (Hegazy, 1999), (Leu, 2001),

(Zheng, 2004), (Eshtehardian, 2009)), simulirano ohlajanje ((Azaron, 2007), (He, 2009)), tabu iskanje ((He, 2009), (Hazir, 2011)), nevronske mreže (Adeli, 1997), kolonija mravelj ((Ng, 2008), (Xiong, 2008), (Afshar, 2009), (Kalhor, 2011)), roji delcev (Yang, 2007), diferenčna evolucija (Nearchou, 2010), harmonijsko iskanje (Geem, 2001), mešano celoštevilsko linearno programiranje ((Achuthan, 2001), (Vanhoucke, 2002), (Sakellariopoulos, 2004), (Akkan, 2005), (Sonmez, 2012), (Zou, 2017)), in hibridne metode, kot so genetski algoritmi in dinamično programiranje (Ezeldin, 2009), rezanje ravnine in simulacija Monte Carlo (Mokhtari, 2010).

V članku je predstavljeno stroškovno optimalno terminsko planiranje gradbenih projektov z mešanim celoštevilskim nelinearnim programiranjem (MINLP). Predlagani pristop omogoča pridobitev optimalnega terminskega plana za gradbeni projekt pri minimalnih skupnih stroških njegove izvedbe, upoštevajoč posplošene časovne odnose med aktivnostmi, omejitve trajanja projekta in logične pogoje. Pristop MINLP omogoča obravnavanje nelinearnosti v optimizacijskem modelu. Izhodni rezultati MINLP-optimizacije so eksaktni in določajo terminski plan v diskretnih časovnih enotah. Prednosti predlaganega pristopa so predstavljene na primeru uporabe.

jektu 0,1 % zneska pogodbe, vendar skupaj ne več kot 5 % njene skupne vrednosti. Takšne posebnosti z vidika optimizacije terminskih planov povzročijo nekonveksno obnašanje skupnih stroškov projekta glede na njegovo trajanje.

## 2 • ODNOSI MED TRAJANJEM IN STROŠKI PRI PROBLEMIH TERMINSKEGA PLANIRANJA

Pogosto izbrani cilj optimizacije terminskega plana je minimizacija skupnih stroškov izvedbe projekta, tj. direktnih (neposrednih) in indirektnih (posrednih) stroškov skupaj. V literaturi zasledimo odnose med trajanjem in direktnimi stroški aktivnosti, ki so formulirani z raznovrstnimi funkcijami, saj imajo avtorji različne poglede na njihov opis. V zgodnjih študijah se največkrat zasledi linearni opis omenjenih odnosov (Kapur, 1973), kar pa se v realnosti le redko odraža. Pozneje so številni avtorji odnose med trajanjem in direktnimi stroški opisovali s konveksnimi funkcijami, npr. ((Kapur, 1973), (Foldes, 1993), (Deckro, 1995), (Deckro, 2003)), s konkavnimi (Falk, 1972) ali s hibridnimi, tj. konkavno-konveksnimi funkcijami (Moder, 1995). V primerih, ko bi se pojavila prevelika razhajanja med dejanskimi podatki in aproksimirano funkcijo, se je izkazalo, da je bolj smotno opraviti

diskretizacijo omenjenih odnosov (Chassiakos, 2005).

Indirektni stroški gradbenega projekta običajno obsegajo začetne stroške, stroške režije, poslovanja, delovanja opreme ipd. Omenjene stroške lahko sicer opredelimo z različnimi izrazi, vendar pa se v večini primerov uporablja linearni odnos med trajanjem projekta in indirektnimi stroški (npr. konstantni strošek na izbrano časovno enoto). Treba je omeniti tudi, da so v gradbene pogodbe pogosto vključene še kazni za nedoseganje pravočasnosti izvedbe projekta in (redkeje) bonusi za predčasen zaključek, ki pa v večini primerov niso zgolj v linearnem odnosu glede na čas (Cajzek, 2016). Na primer, skladno z gradbeno prakso v Sloveniji in veljavnimi predpisi (Posebne gradbene uzance, 1977) pogodbene kazni običajno nastopajo v kosoma linearni obliki, kjer znaša dnevna kazen za zamudo pri pro-

### 3 • SPLOŠNA FORMULACIJA MINLP-PROBLEMA

MINLP predstavlja eksaktno tehniko matematičnega programiranja za reševanje nelinearnih optimizacijskih problemov, ki hkrati vsebujejo zvezne in diskretne spremenljivke. Pri tem za zvezne odločitve uporabljamo zvezne spremenljivke, medtem ko lahko za diskretne odločitve uporabljamo celoštevilске ali pa binarne 0–1 spremenljivke. Zaradi zmožnosti procesiranja nelinearnih odnosov med spremenljivkami in diskretne narave obravnavane naloge smo se za iskanje optimalne rešitve odločili uporabiti pristop MINLP. Optimizacijski problem MINLP lahko na splošno predstavimo v naslednji obliki:

$$\begin{aligned} \text{Min } z &= f(\mathbf{x}) + \mathbf{c}^T \mathbf{y} \\ &\text{p.p.} \\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) &\leq \mathbf{0} \\ \mathbf{B}\mathbf{y} + \mathbf{C}\mathbf{x} &\leq \mathbf{b} \end{aligned} \quad (\text{MINLP-S})$$

$$\mathbf{x} \in X = \{\mathbf{x} \mid \mathbf{x} \in \mathbf{R}^n, \mathbf{x}^{\text{SP}} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{\text{ZG}}\}$$

$$\mathbf{y} \in Y = \{0, 1\}^m,$$

kjer  $z$  predstavlja spremenljivko namenske funkcije;  $\mathbf{x}$  označuje vektor zveznih spremen-

ljivk, ki je določen z definicijskim območjem  $\mathbf{X}$ -prostora realnih števil  $\mathbf{R}^n$ ;  $\mathbf{y}$  označuje vektor binarnih 0–1 odločitvenih spremenljivk in  $\mathbf{c}^T$  predstavlja transponiran vektor konstant namenske funkcije. Zvezne spremenljivke  $\mathbf{x}$  so lahko definirane linearno ali nelinearno v namenski funkciji  $z$  in pri omejitvah  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  ter  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ , medtem ko so binarne 0–1 spremenljivke  $\mathbf{y}$  lahko uporabijo samo v linearnih izrazih. Funkcije  $f(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  in  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  predstavljajo nelinearne funkcije zveznih spremenljivk  $\mathbf{x}$ , ki so zajete v namenski funkciji. Vse funkcije  $f(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  in  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  morajo biti zvezne in zvezno odvedljive. Izraz  $\mathbf{B}\mathbf{y} + \mathbf{C}\mathbf{x} \leq \mathbf{b}$  predstavlja skupino mešanih linearnih (ne)enačb.

### 4 • FORMULACIJA MINLP-MODELA

Predhodno prikazana formulacija (MINLP-S) velja na splošno za probleme MINLP, za obravnavani optimizacijski problem pa je treba določiti bolj specifično formulacijo. Formulacija MINLP-modela za stroškovno optimizacijo terminskih planov tako vsebuje namensko funkcijo skupnih stroškov projekta, ki je podvržena minimizaciji, upoštevajoč posplošene časovne povezave med aktivnostmi, omejitve trajanja projekta in logične pogoje. Lahko jo predstavimo na naslednji način:

$$\text{Min } Ct = \sum_{i \in I} C_i(D_i) + C_i(Dp) + Cp(Pl) - B(Pe) + \varepsilon \sum_{i \in A} S_i - \varepsilon \sum_{i \in Z} S_i \quad (1)$$

$$S_i + D_i + L_{ij} \leq S_j \quad i \in I, j \in J(i), (i,j) \in FS \quad (2)$$

$$S_i + L_{ij} \leq S_j \quad i \in I, j \in J(i), (i,j) \in SS \quad (3)$$

$$S_i + D_i + L_{ij} \leq S_j + D_j \quad i \in I, j \in J(i), (i,j) \in FF \quad (4)$$

$$S_i + L_{ij} \leq S_j + D_j \quad i \in I, j \in J(i), (i,j) \in SF \quad (5)$$

$$S_{i\omega} + D_{i\omega} - S_{i\alpha} \leq Dp \quad i\alpha, i\omega \in I \quad (6)$$

$$Dp - Pl + Pe = Dt \quad (7)$$

$$Pl Pe = 0 \quad (8)$$

$$D_i = \sum_{k \in K(i)} y_{d_{i,k}} d_{i,k} \quad i \in I \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K(i)} y_{d_{i,k}} = 1 \quad i \in I \quad (10)$$

$$S_i^E \leq S_i \leq S_i^L \quad S_i \in \mathbf{R}^+ \quad (11)$$

$$D_i^M \leq D_i \leq D_i^N \quad D_i \in \mathbf{R}^+ \quad (12)$$

$$0 \leq Pe \leq Pe^M \quad Pe \in \mathbf{R}^+ \quad (13)$$

$$0 \leq Pl \leq Pl^N \quad Pl \in \mathbf{R}^+ \quad (14)$$

$$Dp^M \leq Dp \leq Dp^N \quad Dp \in \mathbf{R}^+ \quad (15)$$

$$y_{d_{i,k}} \in \{0, 1\} \quad i \in I, k \in K(i) \quad (16)$$

Kriterij optimizacije je opredeljen z namensko funkcijo, ki je formulirana v enačbi (1), kjer spremenljivka  $Ct$  predstavlja skupne stroške projekta, množica  $I$  zajema projektne aktivnosti  $i$ ,  $i \in I$ ,  $C_i(D)$  določa direktne stroške projektne aktivnosti,  $C_i(Dp)$  vključuje indirektno stroške projekta,  $C_p(Pl)$  definira stroške pogodbene kazni za zamudo (penale) in  $B(Pe)$  predstavlja pogodbeno nagrado za predčasno dokončanje projekta (bonus).

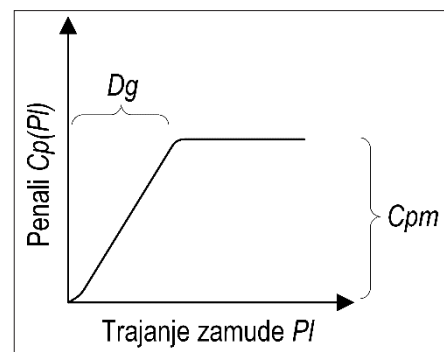
Odnos med direktnim stroškom  $C_i$  aktivnosti in njenim trajanjem  $D_i$  se v gradbeništvu pogosto izkaže za nelinearnega. V nasprotju s tem je višina indirektnih stroškov  $C_i$  pogosto določena v linearni odvisnosti od trajanja projekta  $Dp$ . Vsekakor je na tem mestu treba poudariti, da se nelinearne funkcije  $C_i(Dp)$  prav tako lahko vključijo v predstavljeni MINLP-model, če se izkaže, da je to potrebno.

Stroški pogodbene kazni  $Cp$  so odvisni od trajanja zamude  $Pl$  pri dokončanju projekta, medtem ko je vrednost pogodbene nagrade  $B$  odvisna od dolžine časovnega prihranka  $Pe$  pri predčasnem zaključku projekta. V literaturi so  $Cp(Pl)$  in  $B(Pe)$  najpogosteje določeni kot konstantne vrednosti (enkratna kazen/nagrada) ali pa kot neomejene linearne funkcije.

Za formuliranje navzgor omejenih linearnih pogodbene kazni  $Cp(Pl)$ , ki so najpogosteje določene v gradbenih pogodbah, se lahko uporabi naslednji izraz (Klanšek, 2016):

$$Cp(Pl) = Cpm \left\{ \frac{Pl}{Dg} \left[ \frac{\arctan(Cf Pl)}{\pi} + \frac{1}{2} \right] + \left( 1 - \frac{Pl}{Dg} \right) \left[ \frac{\arctan(Cf (Pl - Dg))}{\pi} + \frac{1}{2} \right] \right\} \quad (17)$$

kjer  $Cpm$  predstavlja najvišjo možno vrednost pogodbene kazni (penala) in  $Dg$  predstavlja obdobje zamude, kjer penali naraščajo linearno pod naklonom  $Pl/Dg$ . Po koncu omenjenega obdobja funkcija  $Cp(Pl)$  doseže maksimalno vrednost  $Cpm$ . Torej, če trajanje zamude preseže obdobje  $Dg$ , potem funkcija  $Cp(Pl)$  pada za  $Pl$ -konstantno vrednost  $Cpm$ , glej sliko 1.



Slika 1 • Navzgor omejeni linearni penali.

Faktor prilaganja aproksimacijske funkcije  $Cf$  se določi kot konstanta velike vrednosti. Prikazana enačba (17) se lahko na podoben način uporabi tudi v primeru omejenih linearnih bonusov.

Strukturalni mrežni diagram je sestavljen iz kritičnih aktivnosti (tistih, ki nimajo časovnih

rezerv) in nekritičnih aktivnosti (tiste, ki imajo časovne rezerve). Nekritične projektne aktivnosti se lahko pričnejo nekoliko pozneje (v okviru časovnih rezerv) tako, da to ne vpliva na trajanje in stroške celotnega projekta. V namensko funkcijo so dodatno vključeni izrazi  $+eS_i$  in  $-eS_b$ , ki so dodeljeni aktivnostim z najzgodnejše planiranimi začetki (to so aktivnosti  $i \in A$ ) in aktivnostim, katerih pričetki se planirajo najpozneje, kot je mogoče (to so aktivnosti  $i \in Z$ ). Omenjeni izrazi vključujejo konstanto majhne vrednosti  $\varepsilon$ , ki nima praktične posledice na vrednost namenske funkcije (Sakellaropoulos in Chassiakos, 2004), po drugi strani pa je tako omogočeno, da pričetki projektne aktivnosti  $S_i$  pri minimizaciji namenske funkcije zavzamejo diskretne vrednosti.

Enačbe (2)–(5) definirajo pogoje posplošenih časovnih povezav, ki nastopajo med obravnavanimi aktivnostmi  $i, i \in I$  in njihovimi neposredno sledečimi aktivnostmi  $j, j \in J(i)$ , to so: konec-začetek (Finish-to-Start: FS), začetek-začetek (Start-to-Start: SS), konec-konec (Finish-to-Finish: FF) in začetek-konec (Start-to-Finish: SF). Omenjene splošne omejitve se uporabljajo pri preračunu po metodi kritične poti, glej Sliko 2.

Časi začetkov aktivnosti  $S_i$  in trajanja aktivnosti  $D_i$  so definirani z zveznimi spremenljivkami, časovni zamiki  $L_{ij}$  (zakasnitve ali prehitvevanja med obravnavanimi aktivnostmi in njihovimi neposredno sledečimi aktivnostmi) pa so določeni s celoštevilskimi konstantnimi parametri.

Pogojne neenačbe (6) zagotavljajo, da bodo vse aktivnosti zaključene med trajanjem celotnega projekta, torej da bodo zaključene med začetkom prve projektne aktivnosti in koncem zadnje projektne aktivnosti. Odlčitveni spremenljivki  $S_{\omega}$  in  $D_{\omega}$  označujeta čase pričetkov in trajanja zaključnih aktivnosti  $i\omega$ ,  $i\omega \in I$ , medtem ko  $S_{i\alpha}$  predstavlja trenutke aktivacije izvajanja začetnih aktivnosti  $i\alpha$ ,  $i\alpha \in I$ . Omenjeni pogoji delujejo pod predpostavko, da se neposredno sledeče aktivnosti ne smejo pričeti pred začetnimi aktivnostmi, medtem ko neposredno predhodnim aktivnostim ni dovoljeno, da se zaključijo po končnih aktivnostih.

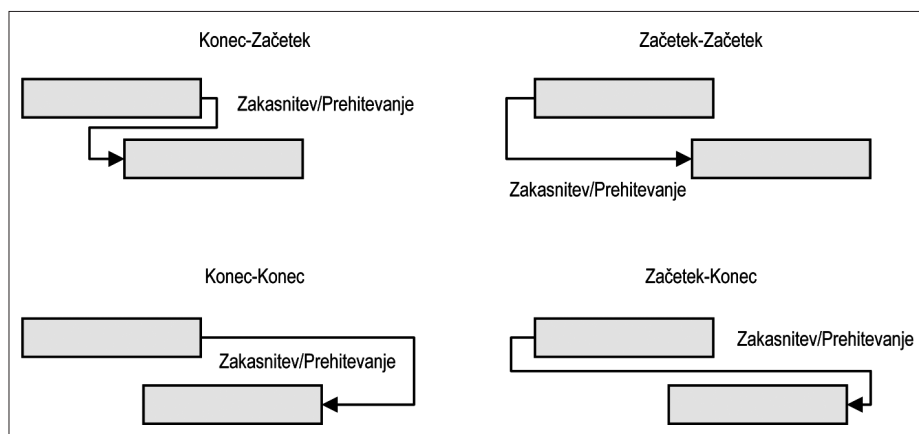
Pogojna enačba (7) definira logični odnos med trajanjem projekta  $D_p$ , trajanjem zamude pri dokončanju projekta  $P_i$ , dolžino časovnega prihranka pri predčasnem zaključku projekta  $P_e$  in rokom za dokončanje projekta  $D_f$ . Sledi enačba (8), ki določa logično dejstvo, da pro-

jekt ne more istočasno zamujati in prehitovati, lahko pa je dokončan pravočasno. Omenjena enačba pri izračunu optimalne rešitve omogoča, da lahko največ ena od spremenljivk  $P_i$  in  $P_e$  doseže vrednost, ki je različna od nič.

Logične omejitve, prikazane v enačbah (9) in (10), morajo biti izpolnjene pri izboru optimalnih diskretnih rešitev za zvezne spremenljivke  $D_i$ , ki so definirane znotraj superstrukture alternativ. Množica  $K(i)$  opredeljuje možne rešitve  $k, k \in K(i)$  v predstavljenem MINLP-modelu. Pri tem nabor celoštevilskih konstant  $dd_{i,k}$  določa superstrukturo alternativ za diskretna trajanja aktivnosti. Vsaka celoštevilaska konstanta  $dd_{i,k}$  tako predstavlja možno diskretno rešitev za pripadajočo zvezno spremenljivko  $D_i$ , pri čemer se izbor optimalne diskretne rešitve opravi s pomočjo binarnih 0–1 spremenljivk  $yd_{i,k}$ .

Binarne spremenljivke  $yd_{i,k}$  so vključene v MINLP-model z namenom, da se vzpostavi optimalna diskretna trajanja za projektne aktivnosti. Vsaka celoštevilaska konstanta, vključena v superstrukturo diskretnih alternativ, se lahko izbere kot diskretna rešitev pripadajoče zvezne spremenljivke, ampak le v primeru, če dodeljena binarna spremenljivka zavzame vrednost 1. Če pa dodeljena binarna spremenljivka zavzame vrednost 0, to pomeni, da diskretna alternativa ni izbrana. Enačba (10) zagotavlja, da se za vsako spremenljivko  $D_i$  mora izbrati natanko ena diskretna vrednost  $dd_{i,k}$  izmed možnih rešitev.

Neenačbe (11)–(12) definirajo, da morajo biti optimalne vrednosti zveznih spremenljivk  $S_i$  in  $D_i$  najdene med njihovimi zgornjimi in spodnjimi mejami (tj. med zgodnjimi in poznimi časi za  $S_i$  oz. med minimalnimi in normalnimi trajanji za  $D_i$ ) kakor tudi določene s pozitivnimi realnimi števili. Neenačbe (13)–(15) prav tako postavljajo meje za optimalne vrednosti zveznih spremenljivk  $P_e$ ,  $P_i$  in  $D_p$  v okviru prostora pozitivnih realnih števil, medtem ko enačba (16) opredeljuje binarnost spremenljivk  $yd_{i,k}$ .



Slika 2 • Posplošene časovne povezave med aktivnostmi.

## 5 • PRIMER

Primer obravnava projekt nadgradnje obstoječe dvopasovne hitre ceste v štiripasovno avtocesto z nadzorovanimi prometnimi priključki iz reference (Sakellaropoulos, 2004). Stroškovna optimizacija terminskega plana z MINLP za omenjeni projekt je bila opravljena z osebnim računalnikom na 64-bitnem operacijskem sistemu s procesorjem Intel Core i7, 2,93 GHz, z 8 GB delovnega pomnilnika

in trdim diskom velikosti 1 TB, rezultati pa so bili pridobljeni prej kot v sekundi. Treba je poudariti, da je kriterij optimizacije tukaj spremenjen glede na izvirno referenco v smislu obravnavanja pogodbenih kazni, zato direktna primerjava rešitev ni možna, lahko pa se rezultati direktnih primerjav najdejo v referenci (Klanšek, 2012). Modeliranje optimizacijskega problema je bilo opravljeno brez dodatnih

rutin s pomočjo naprednega algebrskega jezika General Algebraic Modelling System (GAMS, 2018), za izvedbo MINLP-optimizacije pa je bil uporabljen globalni algoritem BARON (Ryoo, 1996).

### 5.1 Vhodni podatki

Obravnavani projekt obsega 29 aktivnosti. Preglednica 1 prikazuje aktivnosti projekta, časovne povezave in zamike.

Aktivnost/Opis aktivnosti	Naslednja aktivnost	Časovna povezava	Časovni zamik (dan)
<u>Servisna cesta A:</u>			
1. Izkop skal	2.	konec–začetek	-3
	3.	konec–začetek	0
	6.	konec–začetek	0
2. Izgradnja nasipov	3.	konec–začetek	0
	7.	konec–začetek	0
3. Nevezana nosilna plast in povozni plato vozišča	4.	konec–začetek	0
	8.	konec–začetek	0
4. Asfaltna plast	5.	začetek–začetek	1
	9.	konec–začetek	0
5. Začasne označbe, prometni znaki in signalizacija	10.	konec–začetek	0
	11.	konec–začetek	0
<u>Servisna cesta B:</u>			
6. Izkop zemlje in skal v razpadanju	7.	konec–začetek	-1
7. Izgradnja nasipov	8.	konec–začetek	0
8. Nevezana nosilna plast in povozni plato vozišča	9.	konec–začetek	0
9. Asfaltna plast	10.	konec–konec	1
10. Začasne označbe, prometni znaki in signalizacija	11.	konec–začetek	0
<u>Avtocesta:</u>			
11. Preusmeritev prometa	12.	konec–začetek	0
12. Izkop skal	13.	začetek–začetek	2
	15.	konec–začetek	-4
13. Izkop zemlje in skal v razpadanju, odstranitev vozišča	14.	začetek–začetek	2

14. Stabilizacija temeljnih tal, podporni zidovi in prepusti	15.	konec–začetek	-2
15. Izgradnja nasipov	16.	konec–začetek	-6
	17.	začetek–začetek	4
	18.	konec–začetek	4
	19.	konec–začetek	0
16. Sistem drenažnih cevi	-	-	-
17. Drenažne plasti	20.	začetek–začetek	3
18. Zasaditev površin ob cesti	-	-	-
19. Električne inštalacije ob cesti	-	-	-
20. Odvodni jarki	21.	začetek–začetek	2
21. Nevezana nosilna plast vozišča	22.	začetek–začetek	2
22. Povozni plato vozišča	23.	konec–začetek	-9
23. Varovalne ograje (New Jersey)	24.	začetek–začetek	6
24. Električne inštalacije v varovalnih ograjah	25.	konec–začetek	-4
	-	-	-
25. Asfaltna plast #1	26.	začetek–začetek	4
26. Asfaltna plast #2	27.	konec–začetek	0
27. Obrabna plast vozišča	28.	konec–začetek	-3
28. Trajne označbe, prometni znaki in signalizacija	29.	konec–začetek	0
29. Preusmeritev prometa	-	-	-

Opomba: Uporaba negativnih časovnih zamikov izhaja iz primera (v gradbeni praksi sicer ni pogosta, vendar lahko ponekod nastopi).

Preglednica 1 • Aktivnosti projekta, časovne povezave in zamiki

Rok za dokončanje projekta je bil 75 delovnih dni, indirektni stroški in pogodbeni nagrada za predčasno zaključen projekt pa so določeni

s 150 denarnimi enotami na dan. Pogodbena kazen za vsak dan zamude je opredeljena v višini 200 denarnih enot, vendar lahko

znaša največ 1000 denarnih enot. Možnosti izvedbe posameznih aktivnosti so podane v preglednici 2.

Zap. št. aktivnosti	Možnost izvedbe 1		Možnost izvedbe 2		Možnost izvedbe 3	
	Trajanje	Stroški	Trajanje	Stroški	Trajanje	Stroški
1.	5	2.030	4	2.300	-	-
2.	8	1.020	7	1.280	6	1.510
3.	8	1.700	7	1.850	6	2.090

4.	4	590	3	730	-	-
5.	2	90	-	-	-	-
6.	4	910	3	1.100	-	-
7.	2	250	-	-	-	-
8.	7	1.490	6	1.650	5	1.830
9.	4	520	3	750	-	-

10.	2	90	-	-	-	-	20.	6	1.280	5	1.430	-	-
11.	1	50	-	-	-	-	21.	14	1.090	12	1.320	10	1.560
12.	8	3.260	7	3.580	6	3.710	22.	14	900	11	1.140	9	1.400
13.	5	1.140	4	1.400	3	1.720	23.	14	2.220	12	2.510	11	2.690
14.	4	300	3	450	-	-	24.	3	230	-	-	-	-
15.	8	1.020	6	1.300	5	1.430	25.	6	1.590	5	1.790	4	1.990
16.	9	790	8	900	6	1.180	26.	10	2.630	9	2.930	8	3.240
17.	13	3.340	12	3.750	11	4.060	27.	8	2.060	7	2.450	6	2.660
18.	9	470	8	650	7	830	28.	10	320	9	440	8	610
19.	6	460	5	600	4	810	29.	1	50	-	-	-	-

Preglednica 2 • Možnosti izvedbe za posamezne aktivnosti

Predstavljeni vhodni podatki in formulacija MINLP-modela, torej namenska funkcija (1), množica pogojnih neenačb za časovne povezave (2)–(5), omejitve trajanja projekta (6), logične omejitve (7)–(10), meje spremenljivk (11)–(16) in funkcija pogodbene kazni (17), so bili uporabljeni pri iskanju stroškovno optimalne rešitve za terminski plan obravnavanega projekta. Optimizacijski model MINLP je tako vseboval namensko funkcijo (tj. spremenljivka  $Cf$ ), 61 zveznih spremenljivk (tj. 29 spremenljivk  $S_i$ ; 29 spremenljivk  $D_i$ ; spremenljivko  $Dp$ ; spremenljivko  $Pe$  in spremenljivko  $P$ ), 69 diskretnih spremenljivk (tj. binarnih 0–1 spremenljivk  $yd_{i,k}$ ) in 100 omejitev (tj. 35 pogojnih neenačb za časovne povezave, od tega 25 FS + 9 SS + 1 FF; 5 omejitev trajanja projekta; 1 omejitev za

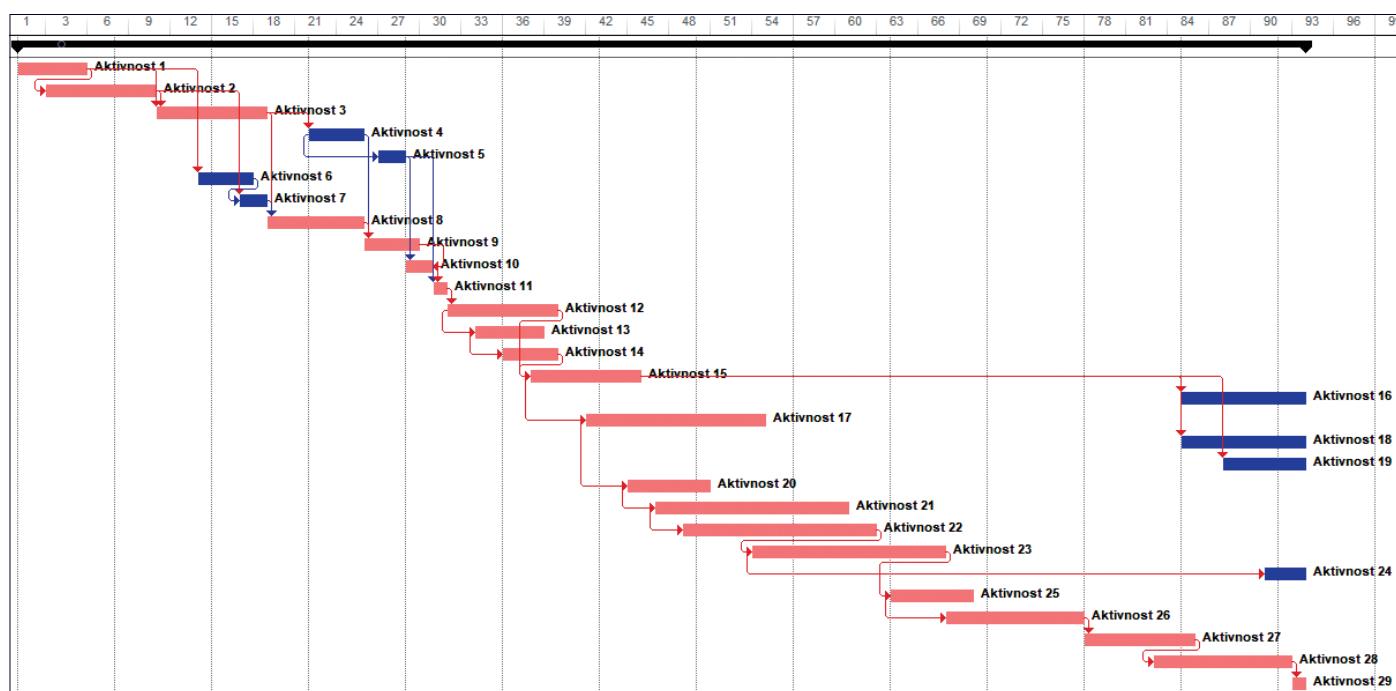
odnos med trajanjem projekta, trajanjem zamude pri dokončanju projekta, dolžine časovnega prihranka pri predčasnem zaključku projekta in rokom za dokončanje projekta; 1 omejitev za dejstvo, da projekt ne more istočasno zamujati in prehitovati, lahko pa je dokončan pravočasno; ter 58 logičnih omejitev).

Zgoraj predstavljeni model tako obsega 29 aktivnosti, od katerih je 6 aktivnosti z 1 možnostjo izvedbe, 6 aktivnosti z 2 možnostma izvedbe in 17 aktivnosti s 3 možnostmi izvedbe, glej preglednico 2. Opređeljene možnosti izvedbe aktivnosti tvorijo skupno število  $1^6 \times 2^6 \times 3^{17} = 8,265 \times 10^9$  izvedljivih diskretnih rešitev za terminski plan obravnavanega projekta, med katerimi je treba najti tisto, ki izkazuje minimalne skupne stroške.

### 5.2 Začetna rešitev za optimizacijo

Začetna rešitev za optimizacijo je določena tako, da se projektne aktivnosti postavijo v normalno trajanje pri minimalnih direktnih stroških ob popolnem izkoristku časovnih rezerv, glej terminski plan na sliki 3.

Skupni stroški izvedbe aktivnosti po začetnem terminskem planu znašajo 46.840 denarnih enot pri trajanju projekta 93 dni. Indirektni stroški projekta znašajo 13.950 denarnih enot, dodatno pa je predvidena tudi najvišja možna kazen 1000 denarnih enot zaradi 18-dnevne zamude. Kritične aktivnosti na sliki 3 so prikazane z rdečo, medtem ko so nekritične aktivnosti modre barve, ki pa zaradi postavitve v najpoznejše položaje ne izkazujejo skupnih časovnih rezerv.



Slika 3 • Gantogram za začetni terminski plan.



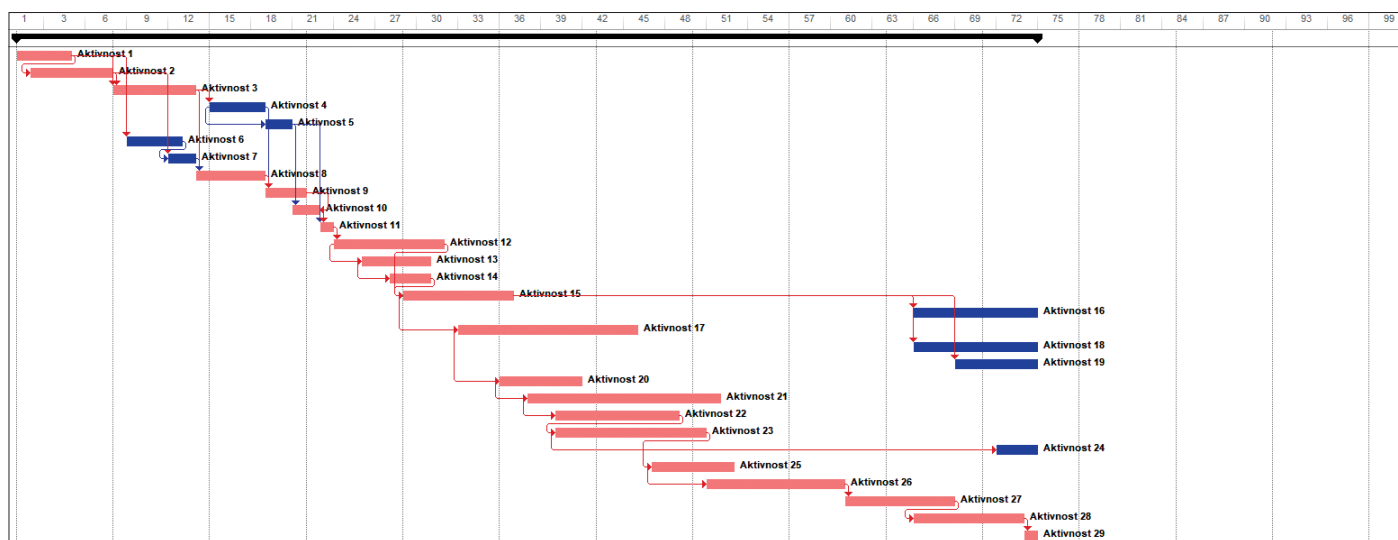
### 5.3 Optimizacija terminskega plana

Prvi primer obravnava stroškovno optimizacijo terminskega plana z najpoznejšimi časi pričetkov aktivnosti in normalnim trajanjem projekta. S tem namenom se je v namenski funkciji odštel zmnožek konstante male vrednosti (epsilon) in vsote časov pričetkov nastopajočih aktivnosti v projektu na način, kot je bilo predstavljeno pri enačbi (1). Po opravljeni optimizaciji je bil pridobljen terminski plan, ki izkazuje trajanje projekta 74 dni ob minimalnih skupnih stroških 45.970 denarnih enot, glej sliko 4.

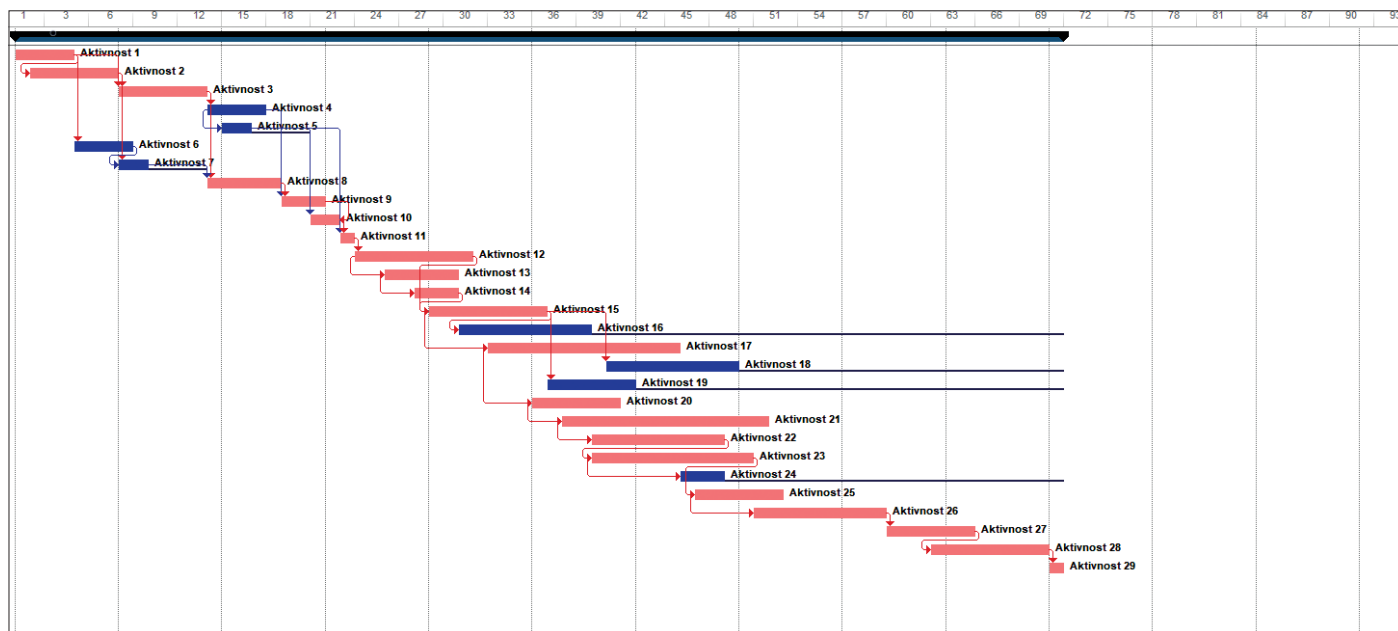
Indirektni stroški pri takšnem terminskem planu znašajo 11.100 denarnih enot, dodatno pa je predviden bonus v višini 150 denarnih

enot za dokončanje projekta 1 dan pred postavljenim rokom. Na sliki 4 je prikazan pridobljen optimalni terminski plan v gantogramski obliki, kjer se lahko opazita drugačna razporeditev poteka aktivnosti ter sprememba kritične poti projekta. Pri optimizaciji so bile pospešene naslednje kritične aktivnosti: aktivnost 1 (-1 dan), aktivnost 2 (-2 dni), aktivnost 3 (-2 dni), aktivnost 8 (-2 dni), aktivnost 9 (-1 dan), aktivnost 14 (-1 dan), aktivnost 22 (-5 dni), aktivnost 23 (-3 dni) in aktivnost 28 (-2 dni). Za preostale aktivnosti je bila planirana optimalna izvedba pri normalnem trajanju. Z modro barvo so označene nekritične aktivnosti, ki pa zaradi postavitve v najpoznejše položaje še vedno ne izkazujejo časovnih rezerv.

V drugem primeru je obravnavana stroškovno optimalna rešitev za terminski plan projekta z upoštevanjem najzgodnejših časov pričetkov aktivnosti. Pri tem je bilo, v skladu z referenco (Sakellariopoulos, 2004), predpostavljeno, da premiki aktivnosti (v obravnavanem primeru: premiki aktivnosti v levo na položaje najzgodnejših pričetkov) v okviru časovnih rezerv ne vplivajo na obseg skupnih stroškov. To je bilo doseženo tako, da se je v namenski funkciji prištel zmnožek konstante male vrednosti (epsilon) z vsoto vseh časov pričetkov aktivnosti. Z optimizacijo sta bili pospešeni aktivnost 26 (-1 dan) in aktivnost 27 (-2 dni), prišlo pa je tudi do premika aktivnosti 27 (-1 dan), aktivnosti 28 (-3 dni) ter aktivnosti 29 (-3 dni), glej sliko 5.



Slika 4 • Gantogram za optimalni terminski plan z najpoznejšimi pričetki izvajanj aktivnosti.



Slika 5 • Gantogram za optimalni terminski plan z najzgodnejšimi pričetki izvajanj aktivnosti.

Pridobljena optimalna rešitev za terminski plan izkazuje enako minimalno vrednost skupnih stroškov v višini 45.970 denarnih enot, vendar s krajšim trajanjem izvedbe projekta, ki sedaj znaša 71 dni. Skrajšano trajanje projekta ob enakih skupnih stroških se je pojavilo zaradi plitkega območja optima, kjer vsota direktnih in indirektnih stroškov ter bonusov daje isti rezultat. V primerjavi s predhodnim primerom so se direktni stroški

povečali pri aktivnosti 26 za 300 denarnih enot in pri aktivnosti 27 za 600 denarnih enot. Nadalje pa so se znižali indirektni stroški zaradi tridnevnega skrajšanja projekta v višini 450 denarnih enot, kar je prispevalo še k upoštevanju bonusa v višini 450 denarnih enot. Skupna bilanca stroškov je 900 denarnih enot povišanja in 900 denarnih enot znižanja, kar pa odraža enake skupne stroške projekta.

Pri omenjeni rešitvi indirektni stroški znašajo 10.650 denarnih enot, dodatno pa je predviden bonus v višini 600 denarnih enot za dokončanje projekta 4 dni pred postavljenim rokom. Kar se tiče nekritičnih aktivnosti, skupna časovna rezerva znaša pri: aktivnosti 4 (1 dan), aktivnosti 5 (4 dni), aktivnosti 6 (4 dni), aktivnosti 7 (4 dni), aktivnosti 16 (32 dni), aktivnosti 18 (22 dni), aktivnosti 19 (29 dni) in aktivnosti 24 (23 dni).

## 6 • SKLEP

Stroškovna optimizacija terminskih planov gradbenih projektov v splošnem predstavlja področje, kjer v praksi lahko zasledimo kombinatorične, nelinearne in težko rešljive probleme. Namen prispevka je bil predstaviti MINLP-model, ki omogoča pridobitev optimalnega terminskega plana za gradbeni projekt pri minimalnih skupnih stroških njegove izvedbe, upoštevajoč medsebojne povezave med aktivnostmi na osnovi tehnoloških odvisnosti oz. pogojev, omejitve trajanja projekta in logične pogoje. MINLP-pristop omogoča obravnavanje nelinearnosti v optimizacijskem

modelu kakor tudi zveznih in celoštevilskih spremenljivk. Prav svoboda pri uporabi nelinearnih izrazov daje možnost razvoja formulacije optimizacijskega modela v kompaktni obliki. Na primer, v MINLP-modelu se lahko obravnava veliko število diskretnih podatkov naenkrat zgolj z enim (nelinearnim) izrazom, kot je to recimo bilo prikazano pri formuliranju omejenih linearnih pogodbenih kazni. Tovrstna uporaba nelinearnih izrazov se tako lahko izkaže kot prednost pri reševanju problemov terminskega planiranja z velikim naborom diskretnih alternativ, saj zahteva manj ročnega

dela in povzroča manj možnosti za napake pri modeliranju.

S primerom je bilo pokazano, da so izhodni rezultati MINLP-optimizacije eksaktni in določajo terminski plan v diskretnih časovnih enotah ter natanko zadostijo vsem podanim omejitvam v modelu (kar je znana prednost eksaktnih tehnik v primerjavi s heurističnimi pristopi). Takšne rezultate optimizacije je možno dalje obravnavati s programsko opremo za planiranje, ki je običajna v gradbeni praksi (na primer s programsko opremo MS Project). Prav tako je mogoče ugotoviti kritično pot projekta kakor tudi obravnavati časovne rezerve pri nekritičnih aktivnostih.

## 7 • ZAHVALA

Raziskovalni program št. P2-0129 je sofinancirala Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna.

## 8 • LITERATURA

- Achuthan, N. R., Hardjawidjaja, A., Project scheduling under time dependent costs – a branch and bound algorithm, *Annals of Operations Research*, 108, 55–74, 2001.
- Adeli, H., Karim, A., Scheduling/cost optimization and neural dynamics model for construction, *Journal of Construction Engineering and Management*, 123(4), 450–458, 1997.
- Afshar, A., Kasaeian Ziaraty, A., Kaveh, A., Sharifi, F., Nondominated archiving multicolony ant algorithm in time-cost trade-off optimization, *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(7), 668–674, 2009.
- Akkan, C., Drexel, A., Kimms, A., Network decomposition-based benchmark results for the discrete time–cost trade-off problem, *European Journal of Operational Research*, 165(2), 339–358, 2005.
- Azaron, A., Sakawa, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Safaei, N., A discrete-time approximation technique for the time-cost trade-off in PERT networks, *RAIRO Operations Research*, 41(1), 61–81, 2007.
- Cajzek, R., Klanšek, U., Mixed-integer nonlinear programming based optimal time scheduling of construction projects under nonconvex costs, *Tehnički Vjesnik*, 23(1), 9–18, 2016.
- Chassiakos, A. P., Sakellariopoulos S. P., Time-Cost Optimization of Construction Projects with Generalized Activity Constraints, *Journal of Construction Engineering and Management* 131(10), 1115–1124, 2005.
- Deckro, R. F., Hebert, J. E., Modeling diminishing returns in project resource planning, *Computers and Industrial Engineering*, 44(1) 19–33, 2003.

- Deckro, R. F., Hebert, J. E., Verdini, W. A., Grimsrud, P. E., Venkateshwar, S., Nonlinear time/cost trade-off models in project management, *Computers and Industrial Engineering*, 28(2), 219–229, 1995.
- Eshtehardian, E., Afshar, A., Abbasnia, R., Fuzzy-based MOGA approach to stochastic time-cost trade-off problem, *Automation in Construction*, 18(5), 692–701, 2009.
- Ezeldin, A. S., Soliman, A., Hybrid time-cost optimization of nonserial repetitive construction projects, *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(1), 42–55, 2009.
- Falk, J., Horowitz, J. L., Critical path problems with concave cost-time curves, *Management Science*, 19(4), 446–455, 1972.
- Feng, C. W., Liu, L., Burns, S. A., Using genetic algorithms to solve construction time-cost trade-off problems, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 11(3), 184–189, 1997.
- Foldes, S., Soumis, F., PERT and crashing revisited: mathematical generalizations, *European Journal of Operational Research*, 64(2) 286–294, 1993.
- GAMS, General Algebraic Modelling System, GAMS Development Corporation, <https://www.gams.com/>, 2018.
- Geem, Z. W., Multiobjective optimization of time-cost trade-off using harmony search, *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(6), 711–716, 2010.
- Hazir, Ö. Erel, E., Günalay, Y., Robust optimization models for the discrete time/cost trade-off problem, *International Journal of Production Economics*, 130(1), 87–95, 2011.
- He, Z., Wang, N., Jia, T., Xu, Y., Simulated annealing and tabu search for multi-mode project payment scheduling, *European Journal of Operational Research*, 198(3), 688–696, 2009.
- Hegazy, T., Optimization of construction time-cost trade-off analysis using genetic algorithms, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 26(6), 685–697, 1999.
- Kalhor, E., Khanzadi, M., Eshtehardian, E., Afshar, A., Stochastic time-cost optimization using non-dominated archiving ant colony approach, *Automation in Construction*, 20(8), 1193–1203, 2011.
- Kapur, K. C., An algorithm for project cost-duration analysis problems with quadratic and convex cost functions, *AIIE Transactions*, 5(4), 314–322, 1973.
- Kelley, J. E., Walker, M. R., Critical-path planning and scheduling, *Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference Boston*, 160–173, 1959.
- Klanšek, U., Mixed-integer nonlinear programming model for nonlinear discrete optimization of project schedules under restricted costs, *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(3), 2016.
- Klanšek, U., Pšunder, M., MINLP optimization model for the nonlinear discrete time-cost trade-off problem, *Advances in engineering software*, 48, 6–16, 2012.
- Leu, S. S., Chen, A. T., Yang, C. H., A GA-based fuzzy optimal model for construction time-cost trade-off, *International Journal of Project Management*, 19(1), 47–58, 2001.
- Li, H., Cao, J. N., Love, P. E. D., Using machine learning and GA to solve time-cost trade-off problems, *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(5), 347–353, 1999.
- Moder, J. J., Phillips, C. R., Davis, E. W., *Project management with CPM, PERT and precedence diagramming*, Middleton, Blitz Publishing Company, 1995.
- Mokhtari, H., Aghaie, A., Rahimi, J., Mozdgir, A., Project time-cost trade-off scheduling: a hybrid optimization approach, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50(5–8), 811–822, 2010.
- Nearchou, A. C., Scheduling with controllable processing times and compression costs using population-based heuristics, *International Journal of Production Research*, 48 (23), 7043–7062, 2010.
- Ng, S.T., Zhang, Y., Optimizing construction time and cost using ant colony optimization approach, *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(9), 721–728, 2008.
- Posebne gradbene uzance, Uradni list SFRJ, št. 18–247, 1977.
- Ryoo, H. S., & Sahinidis, N. V. (1996). Branch-and-reduce approach to global optimization, *Journal of Global Optimization*, 8(2), 107–138.
- Sakellariopoulos, S., Chassiakos, A. P., Project time-cost analysis under generalised precedence relations, *Advances in Engineering Software*, 35(10–11), 715–724, 2004.
- Sonmez, R., Bettemir, Ö. H., A hybrid genetic algorithm for the discrete time-cost trade-off problem, *Expert Systems with Applications*, 39(13), 11428–11434, 2012.
- Vanhoucke, M., Demeulemeester, E., Herroelen, W., Discrete time/cost trade-offs in project scheduling with time-switch constraints, *Journal of the Operational Research Society*, 53(7), 741–751, 2002.
- Walker, M. R., Sayer, J. S., *Project Planning and Scheduling*, Report 6959, E. I. du Pont de Nemours & Co., Inc., 1959.
- Xiong, Y., Kuang, Y., Applying an ant colony optimization algorithm-based multiobjective approach for time-cost trade-off, *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(2), 153–156, 2008.
- Yang, I-T., Using elitist particle swarm optimization to facilitate bicriterion time-cost trade-off analysis, *Journal of Construction Engineering and Management*, 133(7), 498–505, 2007.
- Zheng, D. X. M., Ng, S. T., Kumaraswamy, M. M., Applying a genetic algorithm-based multiobjective approach for time-cost optimization, *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(2), 168–176, 2004.
- Zou, X., Fang, S. C., Huang, Y. S., Zhang, L. H., Mixed-Integer Linear Programming Approach for Scheduling Repetitive Projects with Time-Cost Trade-Off Consideration, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 31(3), 2017.

# OBJAVA

Matična sekcija gradbenih inženirjev IZS za dopolnitev članov komisije za strokovne izpite za **pooblaščen inženirje in vodje del** s področja gradbene stroke vabi k sodelovanju priznane strokovnjake, ki bi bili sposobni in pripravljeni sodelovati v komisijah kot izpraševalci za naslednje predmete:

- za predpise s področja graditve objektov, urejanja prostora, arhitekturne in inženirske dejavnosti, zborničnega sistema ter osnov varstva okolja in splošnega upravnega postopka
- za investicijske procese in vodenje projektov
- za področne predpise in standardizacijo s področja graditve objektov
- za varstvo zdravja in življenja ljudi ter varstvo okolja pri graditvi objektov

Kot izpraševalci za preveritev praktičnih izkušenj za **pooblaščen inženirje** za področje:

- projektiranja konstrukcij (beton, jeklo, les, ostali materiali)
- projektiranja cest
- projektiranja železnic
- projektiranja hidrotehnike (vodovod, kanalizacija, hidrotehnični objekti)
- geomehanike
- tehnologije- gradbeni materiali
- projektiranja ostale komunale in javnih objektov in površin (igrišča, športni objekti, rekreacijske površine, razne trase ipd.)

Kot izpraševalci za preveritev praktičnih izkušenj za **vodje del** za področje:

- visokih gradenj
- nizkih gradenj (ceste, zemeljska dela ipd.)
- železnic
- hidrogradenj (vodovod, kanalizacija, melioracije, poplavne zaščita ipd.)
- splošne komunale
- sanacije objektov ( potresno, toplotno, statično, vlaga, zvok ipd.)
- priprave dela

Pogoji za kandidata za člana komisije za strokovni izpit so:

- **Član komisije za gradbeno stroko mora biti vpisan v imenik IZS pooblaščenih inženirjev iz gradbene stroke**
- **Član komisije mora imeti pridobljeno izobrazbo po študijskih programih druge stopnje (univerzitetno) gradbene smeri**
- **Član komisije mora imeti najmanj deset let delovnih izkušenj na strokovnem področju gradbeništva po pridobitvi poklicnega naziva pooblaščen inženir.**

Izmed vseh prijavljenih kandidatov bo UO Matične sekcije gradbenikov izbral in predlagal za člane komisije kandidate z najboljšimi referencami. Opravljeno delo se plača v skladu s pravili IZS.

Kandidati se s svojimi referencami prijavijo na naslov:

IZS- Matična sekcija gradbenikov, Jarška c. 10b, 1000 Ljubljana ali pošljejo skenirano prijavo na e-naslov [izs@izs.si](mailto:izs@izs.si).



Vabimo vas, da se nam pridružite na jubilejnem 40. zborovanju gradbenih konstruktorjev Slovenije, ki bo **19. in 20. novembra 2018 v Hotelu Rikli Balance (bivši Golf) na Bledu**. Tem za razpravo bo dovolj, saj se ob predstavitvah strokovnih in znanstvenih dosežkov ter dilemah, ki jih prinaša nova gradbena regulativa, verjetno ne bomo mogli izogniti niti pogovoru o tem kaj koristnega se lahko naučimo iz porušitve viadukta Morandi v sosednji Italiji niti o tem, kako navdušiti dijake za študij gradbeništva, saj se nam obeta veliko pomanjkanje inženirjev. Več informacij o dogodku na [www.sdgk.si](http://www.sdgk.si).