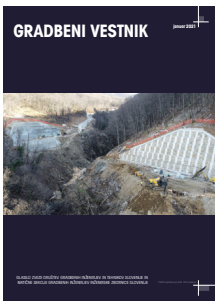
GRADBENI VESTNIK

januar 2021

GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE IN
MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKE ZBORNICE SLOVENIJE

Poštnina plačana pri pošti 1102 Ljubljana



Gradbeni vestnik • **GLASILO ZVEZE DRUŠTEV GRADBENIH INŽENIRJEV IN TEHNIKOV SLOVENIJE in MATIČNE SEKCIJE GRADBENIH INŽENIRJEV INŽENIRSKE ZBORNICE SLOVENIJE**
UDK-UDC 05 : 625; tiskana izdaja ISSN 0017-2774; spletna izdaja ISSN 2536-4332.
Ljubljana, januar 2021, letnik 70, str. 1-20

Izdajatelj:
Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije (ZDGITS), Karlovška cesta 3, 1000 Ljubljana, telefon 01 52 40 200
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 Jukić
prof. dr. Matjaž Mikoš
IZS MSG: **Jernej Mazij**
mag. Jernej Nučič
mag. Mojca Ravnikar Turk
UL FGG: **doc. dr. Matija Gams**
UM FGPA: **doc. dr. Milan Kuhta**
ZAG: **doc. dr. Aleš Žnidarič**

Glavni in odgovorni urednik:
izr. prof. dr. Sebastjan Bratina

Lektor:
Jan Grabnar

Lektorica angleških povzetkov:
Romana Hudin

Tajnica:
Eva Okorn

Oblikovalska zasnova:
Mateja Goršič

Tehnično urejanje, prelom in tisk:
Kočevski tisk

Naklada:
450 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 številk. Letna naročnina za individualne naročnike znaša 23,16 EUR; za študente in upokojence 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 vštet 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 dvojnim presledkom 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. Poglavja in razdelki so lahko oštevilčeni. Poglavja 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: sebastjan.bratina@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.

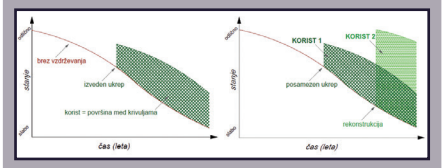
Uredništvo

Vsebina • Contents

Članki • Papers

stran **2**
asist. Luka Gradišar, mag. inž. grad.
doc. dr. Matevž Dolenc, univ. dipl. inž. grad.
asist. dr. Robert Klinc, univ. dipl. inž. grad.
prof. dr. Žiga Turk, univ. dipl. inž. grad
GENERATIVNI PRISTOP K UČINKOVITEMU NAČRTOVANJU OBJEKTOV
GENERATIVE APPROACH TO EFFICIENT BUILDING DESIGN

stran **10**
dr. Matej Kušar, univ. dipl. inž. grad.
NOVI SISTEM ZA UPRAVLJANJE PREMOSTITVENIH OBJEKTOV V UPRAVLJANJU DARS
NEW BRIDGE MANAGEMENT SYSTEM FOR SLOVENIAN HIGHWAYS



Poročilo s strokovnega srečanja

stran **19**
mag. Smiljan Juvan, univ. dipl. inž. grad.
31. MIŠIČEV VODARSKI DAN 2020

Fotoutrinki z gradbišča

stran **20**
2TDK, Družba za razvoj projekta, d.o.o.
GRADBIŠČE OBJEKTOV ZA PREČKANJE DOLINE GLINŠČICE PRI IZGRADNJI DRUGEGA TIRA ŽELEZNIŠKE PROGE DIVAČA KOPER

Novi diplomanti

Eva Okorn

Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Gradbišče objektov za prečkanje doline Glinščice pri izgradnji drugega tira železniške proge Divača – Koper, foto: arhiv 2TDK, Družba za razvoj projekta, d.o.o.

GENERATIVNI PRISTOP K UČINKOVITEMU NAČRTOVANJU OBJEKTOV

GENERATIVE APPROACH TO EFFICIENT BUILDING DESIGN

asist. Luka Gradišar, mag. inž. grad.
luka.gradisar@fgg.uni-lj.si
doc. dr. Matevž Dolenc, univ. dipl. inž. grad.
matevz.dolenc@fgg.uni-lj.si
asist. dr. Robert Klinc, univ. dipl. inž. grad.
robert.klinc@fgg.uni-lj.si
prof. dr. Žiga Turk, univ. dipl. inž. grad.
ziga.turk@fgg.uni-lj.si
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za gradbeno informatiko, Jamova 2, Ljubljana

Znanstveni članek
UDK 004.414.23:69-5

Povzetek | Pri načrtovanju se velikokrat srečamo s problemi, za katere moramo določiti ustrezno rešitev. Takšne probleme običajno rešujemo iterativno (predpostavimo rešitev, jo analiziramo in preverimo ustreznost, dokler rešitev ne zadosti vsem pogojem in ciljem) na podlagi izkušenj in znanja, kar pa ne deluje pri problemih, s katerimi se soočimo prvič. Alternativni pristop je generativno načrtovanje, kjer se osredotočimo na definiranje problema s pripadajočimi cilji v obliki parametričnega računskega modela, ki ga prepustimo v reševanje algoritmom. Ti na podlagi optimizacijskih metod iščejo ustrezne rešitve glede na podane kriterije in omejitve. Rezultat generativnega postopka je množica rešitev, ki nam z ustrezno analizo pomagajo učinkovito rešiti zastavljen problem. Glavna ideja pristopa je sodelovanje projektanta z inteligentnim orodjem, ki ima komplementarne sposobnosti: pregled velikega števila podatkov, generiranje velikega števila alternativ, analiza množice in iterativno izboljšanje rešitev. Pristop je splošen in zato uporaben pri načrtovanju na vseh področjih gradbeništva. V prispevku se vprašamo o zmogljivosti takega pristopa in če ta vodi k nadomestitvi projektanta v procesu načrtovanja. Tako v prvem delu predstavimo ključne dele generativnega načrtovanja in njihovo delovanje, v drugem delu na primeru uporabimo proces generativnega pristopa za načrtovanje elementov za senčenje, v zadnjem delu pa predstavimo rezultate obeh pristopov.

Ključne besede: generativno načrtovanje, optimizacija, evolucijski algoritmi, računski model, Dynamo, BIM

Summary | When designing, we often face problems for which we must find a solution. We solve such problems iteratively by proposing a solution, analysing it and testing its suitability until the solution satisfies all conditions and objectives. Normally we solve such problems based on experience and knowledge, which does not work for the problems we are confronted with for the first time. An alternative approach is generative design, where we focus on defining a problem with its objectives and constraints in terms of a parametric computational model and leave the solution to the algorithms. The result of the generative process is a set of solutions the analysis of which helps us to solve the problem. The main idea of the approach is the collaboration between the designer and the intelligent tool, which has complementary capabilities, such as sorting large amounts of data, generating many alternatives, analysing the solutions, and incrementally improving

them. The approach is general and can also be applied in other areas of civil engineering. In this paper, we question the capacity of such an approach and whether it aims to replace the designer in the design process. Therefore, in the first part we present the key elements of generative design, in the second part we apply the generative design process for the design of shading elements, and in the last part we present the results and compare them with the usual approach.

Key words: Generative design, optimisation, evolutionary algorithms, computational model, Dynamo, BIM

1 • UVOD

V zadnjih letih je opazen vedno hitrejši tehnološki razvoj, ki se v gradbeništvu odraža v vedno večji uporabi digitalnih orodij. Posledično se delo projektantov drastično spreminja, saj se je zaradi menjave svinčnika in papirja s CAD-orodij proces načrtovanja stavb precej poenostavil in pohitril. Prav tako se z menjavo CAD-orodij z informacijskimi modeli spreminja tudi proces načrtovanja. Vedno manjša je potreba po risarjih, načrtovanje se zliva z dokumentiranjem in je bistveno bolj celovito, povezano in koordinirano. Obenem so orodja za numerično analizo računalniško podprta, kar bistveno poenostavi in pospeši preverjanje rešitev. Še vedno pa mora rešitve, ki jih računalniki pomagajo analizirati in dokumentirati, poiskati inženir ali arhitekt.

Trenutno se pri projektiranju večinoma še vedno uporablja »klasični« pristop. Projektant mora razumeti problem, njegove kriterije in omejitve, nakar lahko rešitve ustvari glede na svoje znanje, izkušnje, podobne pretekle primere in domišljijo, seveda v odvisnosti od vhodnih pogojev in ciljev. Omejitve tako določijo, katere rešitve so sploh dopustne, kriteriji pa omogočajo kvalitativne primerjave med njimi. V procesu je projektant tisti, ki (pred)postavi rešitev, računalnik pa pomaga pri njeni predstavitvi in analizi, ne pomaga pa pri ustvarjanju rešitev. Za alternativne pristope nas zanimajo takšni, ki preusmerijo osredotočenost iz direktne sinteze rešitev na definiranje problema z jasnimi zakonitostmi. Zastavljeni problem lahko nato prepustimo v reševanje algoritmom, ki so sposobni generirati in potem analizirati veliko število rešitev. Eden izmed teh pristopov, ki je predstavljen v nadaljevanju, je generativno načrtovanje.

2 • GENERATIVNO NAČRTOVANJE

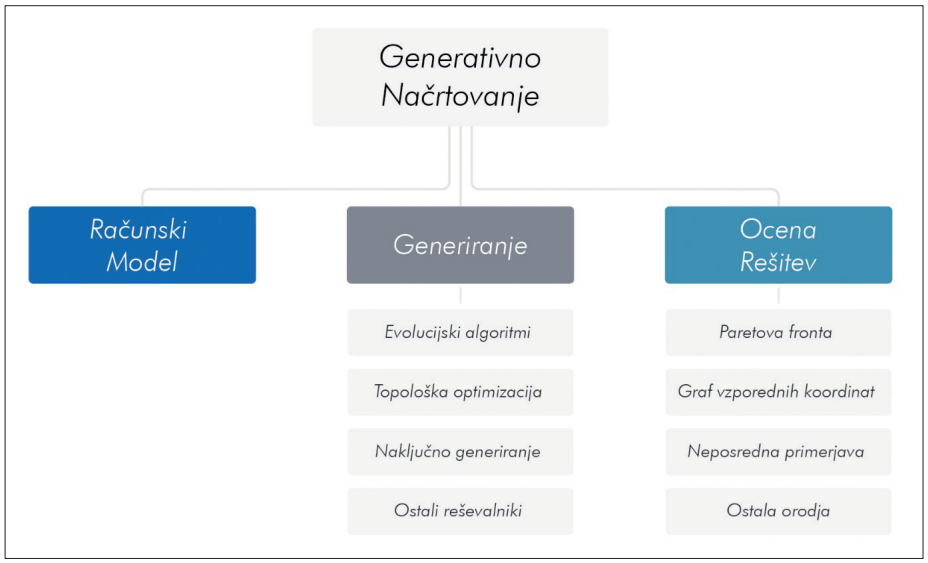
Generativno načrtovanje je iterativni proces, v katerem se projektant osredotoči na definiranje problema in njegovih ciljev, iskanje rešitev pa prepusti algoritmom. Ti s spreminjanjem parametrov problema generirajo množico različnih rešitev, ki jih analiziramo z namenom razumeti obnašanje problema (Krish, 2011). S tako pridobljenim znanjem lahko popravimo in nadgradimo opis problema ali pa izberemo rešitev, ki zadošča vsem zastavljenim ciljem. S takšnim procesom rešujemo probleme, kjer ima projektant premalo izkušenj in znanja, da bi hitro ustvaril rešitev, ki bi zdržala preverbo omejitev in optimalno izpolnila kriterije.

2.1 Sestavni deli generativnega načrtovanja

V procesu generativnega načrtovanja lahko identificiramo tri ključne značilnosti, prikazane na sliki 1: računski model, generiranje in oceno rešitev.

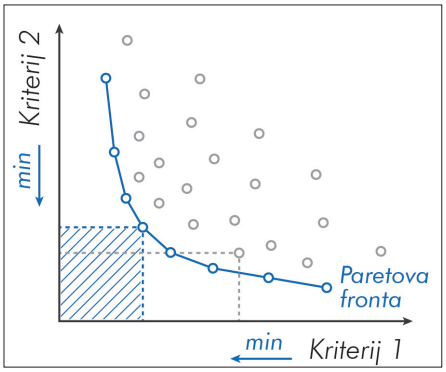
Računski model razumemo kot poenostavitev realnega inženirskega problema na model, ki ga računalnik lahko prebere, analizira in spreminja. Izdelava takšnega modela je zahtevna, saj je treba problem zapisati s skupkom pravil in enačb, ki pravilno opišejo njegovo obnašanje, poleg tega pa mora biti opis parametrični, saj se s parametri spreminjajo zasnova in njene lastnosti (Stasiuk, 2018). Pri vseh parametričnih modelih nas zanimajo tudi njihove lastnosti, na podlagi katerih lahko ocenimo uspešnost zasnove, kot so npr. cena, prostornina, učinkovitost, nosilnost, stabilnost in podobni opisi, primerni za primerjavo generiranih zasnov med seboj (Caldas, 2002). Običajno se računski modeli zaradi enkratnosti problema programira samostojno, obstajajo pa programske rešitve za nekatere ponovljive probleme.

Generiranje namesto projektanta izvaja »računalnik« oziroma algoritem, ki avtomatizira parametrično iskanje ter testiranje možnih



Slika 1 • **Ključne značilnosti generativnega načrtovanja.**

rešitev problema, vendar pa je kvaliteta le-teh pogojena z natančnostjo računskega modela, pripravljenega s strani projektanta. Ti algoritmi



Slika 2 • **Simbolični primer Paretove fronte, kjer želimo minimizirati dva kriterija.**

delujejo tako, da preko računskega modela spreminjajo vhodne spremenljivke in pri tem spremljajo izhodne vrednosti, s pomočjo katerih ocenijo uspešnost rešitve, nato pa preko več iteracij poiščejo najbolj primerne glede na zastavljene cilje. Zaradi velikega števila spremenljivk in posledično velikega prostora rešitev se običajno uporabljajo optimizacijski algoritmi, najpogosteje evolucijski algoritmi (Johan, 2019) ter algoritmi za topološko optimizacijo v kombinaciji z evolucijskimi (Ravi, 2018). Poleg tega se uporabljajo tudi algoritmi, ki generirajo rešitve po določenih pravilih kombiniranja vhodnih spremenljivk, kot je vektorski produkt ali naključna kombinacija.

Pri oceni rešitev je treba pregledati generirane rešitve, saj je, odvisno od zasnove problema in ciljev, lahko teh zelo veliko, med njimi pa je treba izbrati eno končno rešitev. To pomeni, da je treba oceniti množico rešitev, za kar se uporabijo orodja za analizo podatkov, kot so npr. Paretova fronta, graf vzporednih koordinat in neposredna primerjava, z namenom identificiranja optimalnih rešitev in ugotavljanja vpliva vhodnih spremenljivk na obnašanje modela in na njegove rezultate. S tako pridobljenim znanjem lahko nato nadgradimo računski model ali izberemo rešitev zadanega problema.

Ker se v generativnem načrtovanju pogosto srečujemo z več kot enim ciljem oziroma kriterijem, po katerem ovrednotimo rešitev, obstaja več kot ena optimalna rešitev. Take rešitve imenujemo Pareto optimalne rešitve in jih identificiramo s Paretovo fronto (Deb, 2002). Zanje je značilno, da ne obstaja rešitev, ki bi bila boljša po vseh kriterijih hkrati (prikazano na sliki 2 z modrim območjem). Obstajajo pa rešitve, ki so lahko boljše po posameznem kriteriju (označene s sivo barvo na sliki 2), vendar te niso optimalne pri večkriterijski optimizaciji (Allen, 2018).

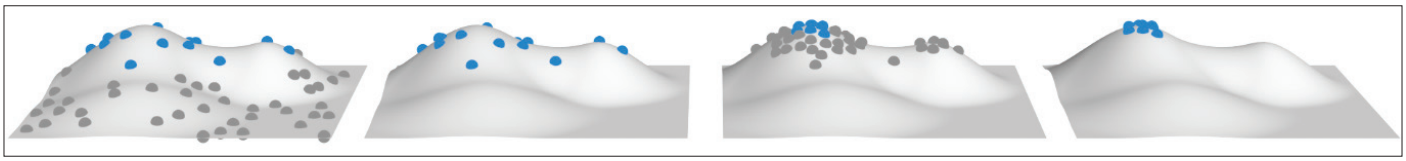
Da ugotovimo, kako vhodne spremenljivke vplivajo na izhodne, nam v pomoč pride graf vzporednih koordinat, ki prikaže medsebojne povezave spremenljivk vsake rešitve. Poleg tega lahko na grafu dodatno omejimo vrednosti spremenljivk in s tem zmanjšamo množico rešitev na manjši vzorec, ki ga je lažje obvladovati. V kombinaciji z neposredno primerjavo se izbrane rešitve prikažejo še grafično druga ob drugi in s tem omogočijo hitro primerjavo ter učinkovito iskanje ustrezne rešitve.

2.2 Evolucijski algoritmi

Pogosto uporabljeni algoritmi za iskanje in generiranje rešitev pri generativnem načrtovanju so evolucijski algoritmi. Ti delujejo po principu evolucije, kjer uspešni člani populacije preživijo in se reproducirajo, pri tem pa se z vsako novo generacijo člani izboljšujejo, dokler ne dosežejo vrha. Eden izmed evolucijskih algoritmov je genetski algoritem, katerega postopek je naslednji (Rutten, 2010):

1. naključno izberi prvo generacijo v prostoru rešitev;
2. vse člane razvrsti po uspešnosti in obdrži delež najbolj uspešnih;
3. ustvari novo generacijo s križanjem in mutacijo;
4. ponavljaj, dokler z novo generacijo ni znatne izboljšave.

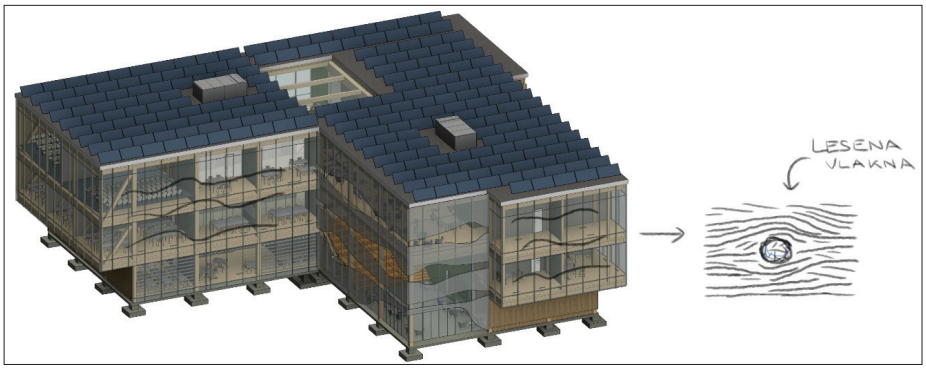
Križanje deluje na podlagi menjave genov oziroma vrednosti parametrov, mutacija pa naključno priredi vrednosti teh parametrov in s tem prepreči zatik populacije v lokalnem optimumu in zagotovi konvergenco h globalnemu (Guid, 2015). Genetski algoritem tako s pomočjo populacije hitro poišče globalni ekstrem (maksimum ali minimum) in lahko privede do zanimivih in manj vidnih rešitev, ki rešijo zastavljen problem (Konak, 2006).



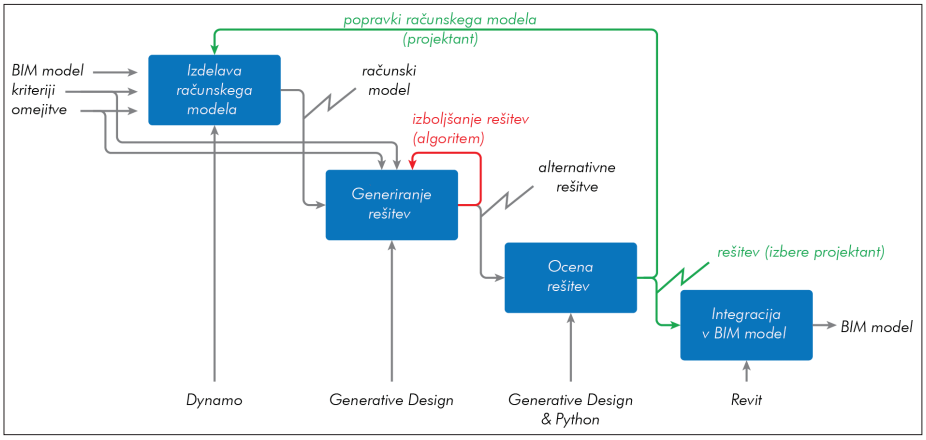
Slika 3 • **Prikaz iskanja globalnega vrha z evolucijskimi algoritmi na preprostem primeru. Iz leve proti desne je viden postopek iterativnega izboljšanja rešitev.**

3 • PRIKAZ UPORABE NA PRIMERU

Primerjavo generativnega načrtovanja z običajnim pristopom smo izvedli na primeru načrtovanja elementov za senčenje stavbe. Zaradi vedno večjega poudarka na energetski učinkovitosti je bila želja poiskati učinkovito zasnovo senčenja velikih steklenih površin z idejo nepremičnih elementov v obliki lesenih vlaken (slika 4), ki bi poudarili leseno konstrukcijo stavbe in pri tem učinkovito senčili v vseh letnih časih. Z uporabo generativnega pristopa je bil cilj poiskati optimalno obliko elementov za senčenje, ki bi pri čim cenejši izgradnji učinkovito senčila in poudarila kompleksen videz fasade.



Slika 4 • **Ideja nepremičnih elementov za senčenje v obliki lesenih vlaken.**



Slika 5 • **IDEF0-diagram generativnega načrtovanja na predstavljenem primeru.**

Za uporabo generativnega pristopa je bilo treba določiti okolje za izgradnjo računskega modela, orodje za generiranje rešitev in za vrednotenje rezultatov. V ta namen smo izbrali orodja Autodesk Revit, Dynamo, programski jezik Python in dodatek Generative Design (v času opravljanja raziskave se je imenoval še Project Refinery), ki je od različice 2021 dalje že privzeto vgrajen v program Revit (Autodesk, 2020). V programu Revit je bil zgrajen informacijski model stavbe, ki je predstavljal izhodišče, na katerem se je zasnovalo in nato dodalo model elementov za senčenje. Zastavljenega kompleksnega modela ni možno modelirati ročno, zato se je za računsko modeliranje uporabil Dynamo, kjer preko vizualnega programiranja z vsakim delčkom kode gradimo model ali pa upravljamo informacije (The Dynamo Primer, 2020). Za generiranje rešitev se je uporabil dodatek Project Refinery, ki vsebuje različne algoritme za generiranje rešitev in vmesnik za pregled rezultatov (Generative Design Primer, 2020). Rezultati so se urejali s pomočjo programskega jezika Python, kjer sta se uporabila Paretova fronta in graf vzporednih koordinat.

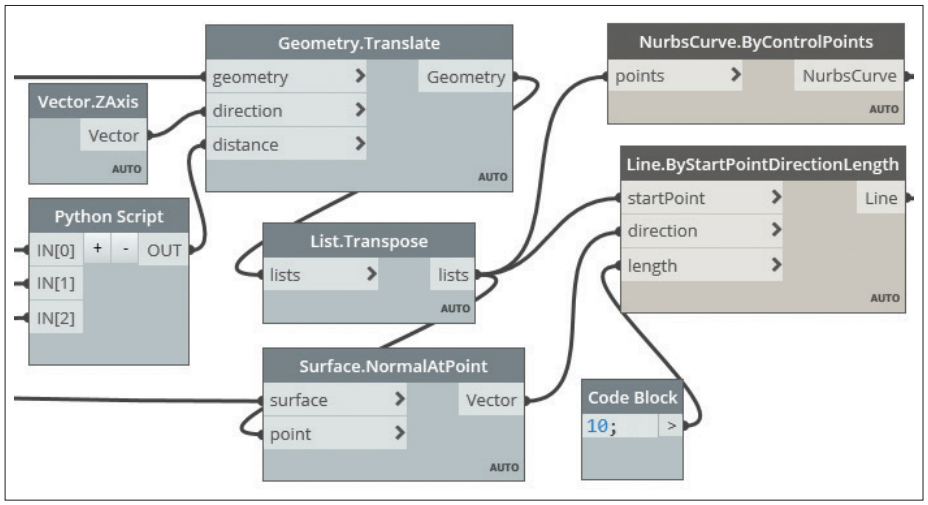
3.1 Računski model

V našem primeru je računski model predstavljala skripta v okolju Dynamo, v katerem se je s povezovanjem blokov kode (slika 6) sestavilo, definiralo obnašanje in analiziralo elemente za senčenje. Kot izhodišče se je iz informacijskega modela preneslo ploskve zastekljenih površin, njihovo lego in orientacijo ter smeri sonca v različnih letnih časih. Površine so se razdelile na horizontalne elemente, ki se jih je nato preko oblikovnih krivulj, trigonometričnih funkcij in z uvedbo manjših odprtin prevedlo v kompleksnejšo obliko, prikazano na sliki 7.

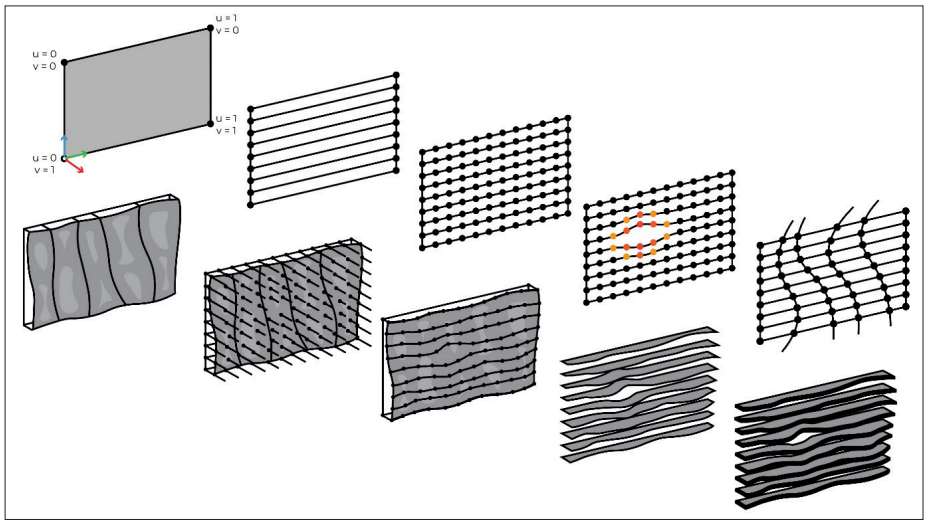
Parametri računskega modela, ki so spreminjali zasnovo elementov za senčenje, so bili: število horizontalnih elementov, največja širina elementov, lega in velikost odprtin ter interpolacijske točke oblikovnih krivulj, ki so definirale valovito geometrijo elementov. Vsi ti parametri so imeli vpliv na obliko elementov in posledično na njihovo učinkovitost senčenja. Za oceno te učinkovitosti smo pripravili analizo senčenja, kjer se je s pomočjo simuliranja sončnih žarkov preverilo, koliko jih preide v notranjost oziroma koliko jih elementi ustavijo (prikazano na sliki 8 z modro in rdečo barvo). Za dodatni deterministični kriterij se je iz modela izvleklo skupno porabo materiala za analizo stroškov.

3.2 Generiranje rešitev

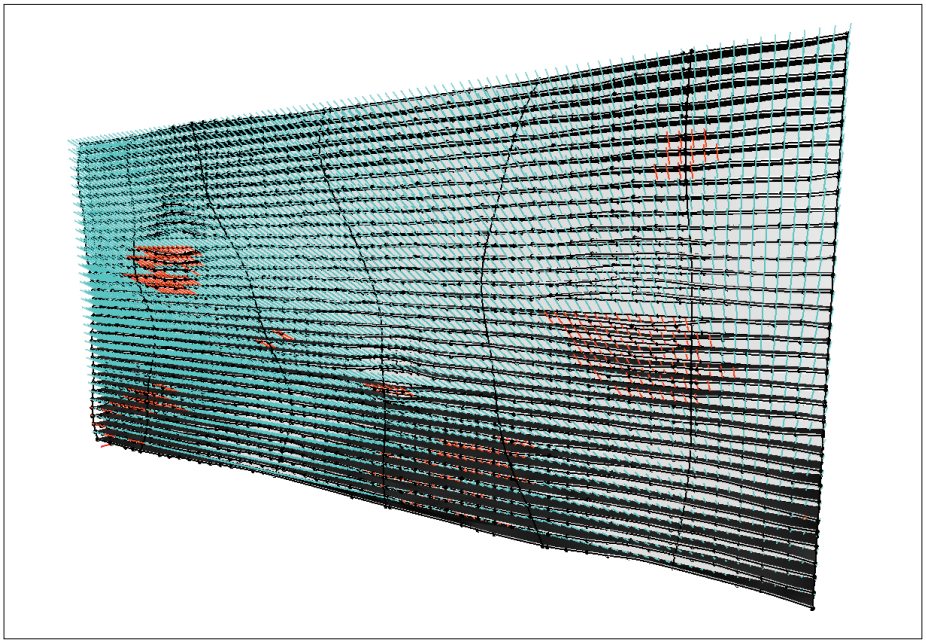
Z zgrajenim računskim modelom je iskalnik rešitev, ki ga vsebuje dodatek Project Refinery, generiral rešitve s spreminjanjem vhodnih spremenljivk na podlagi optimizacije z genetskimi algoritmi. Zaradi želje po hitrejših izračunih sta se za vhodne spremenljivke



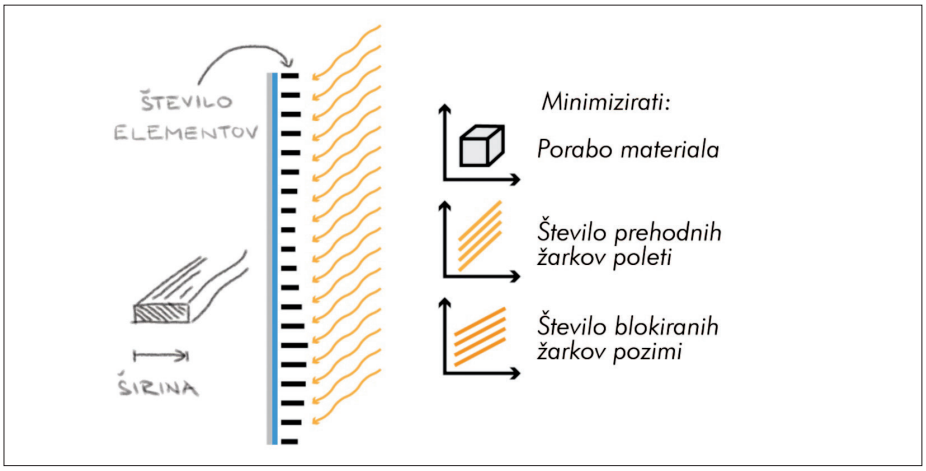
Slika 6 • **Primer blokov kode, s povezovanjem katerih se je zgradil računski model elementov za senčenje.**



Slika 7 • **Ilustracija izgradnje računskega modela v programu Dynamo.**



Slika 8 • **Model v okolju Dynamo s prikazano analizo senčenja.**



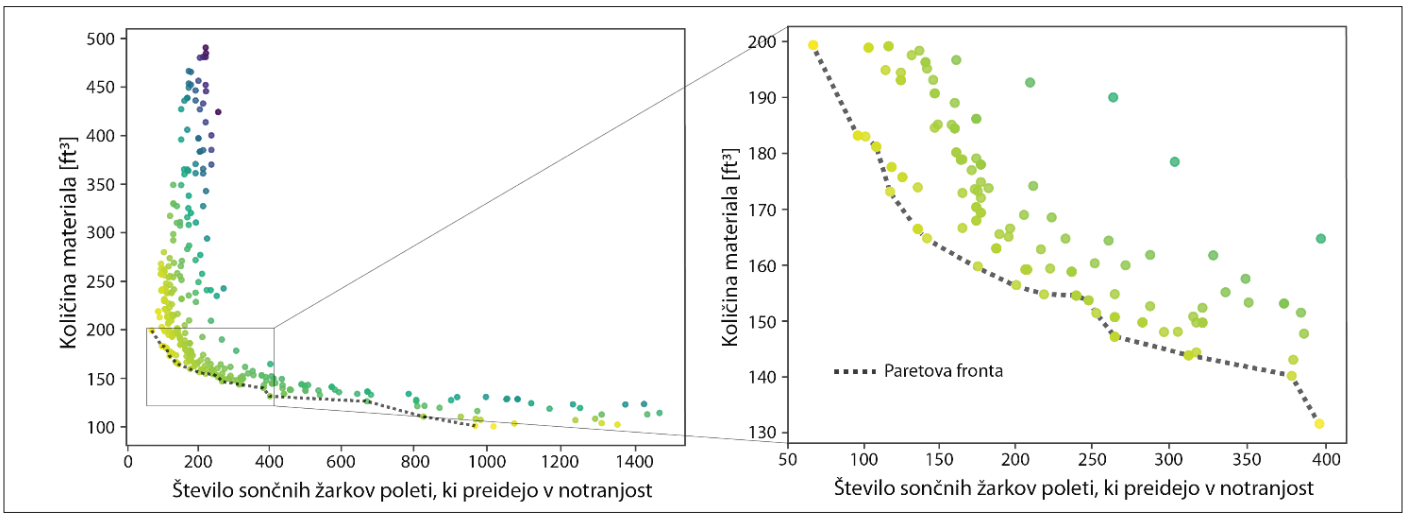
Slika 9 • **Vhodne in izhodne spremenljivke za optimizacijo elementov za senčenje.**

izbrala le število horizontalnih elementov in koeficient širine elementov, saj se je preko iterativnega procesa izdelave računskega modela in rezultatov analiz ugotovilo, da imata ti dve največji vpliv na vrednosti izhodnih spremenljivk. S tem se je število vseh možnih kombinacij zmanjšalo na le 18.200. Za izhodne spremenljivke, na podlagi katerih so se vrednotile rešitve, so bile izbrane poraba materiala, število prehodnih žarkov poleti in število blokiranih žarkov pozimi (slika 9), s čimer se je številčno opredelila učinkovitost senčenja. Iskale so se rešitve, ki so imele čim manjše vrednosti vseh treh izhodnih spremenljivk. Za dodatni kriterij se je spremljalo še videz elementov, vendar takega kriterija ni bilo mogoče numerično opredeliti, zato se je ocenil subjektivno.

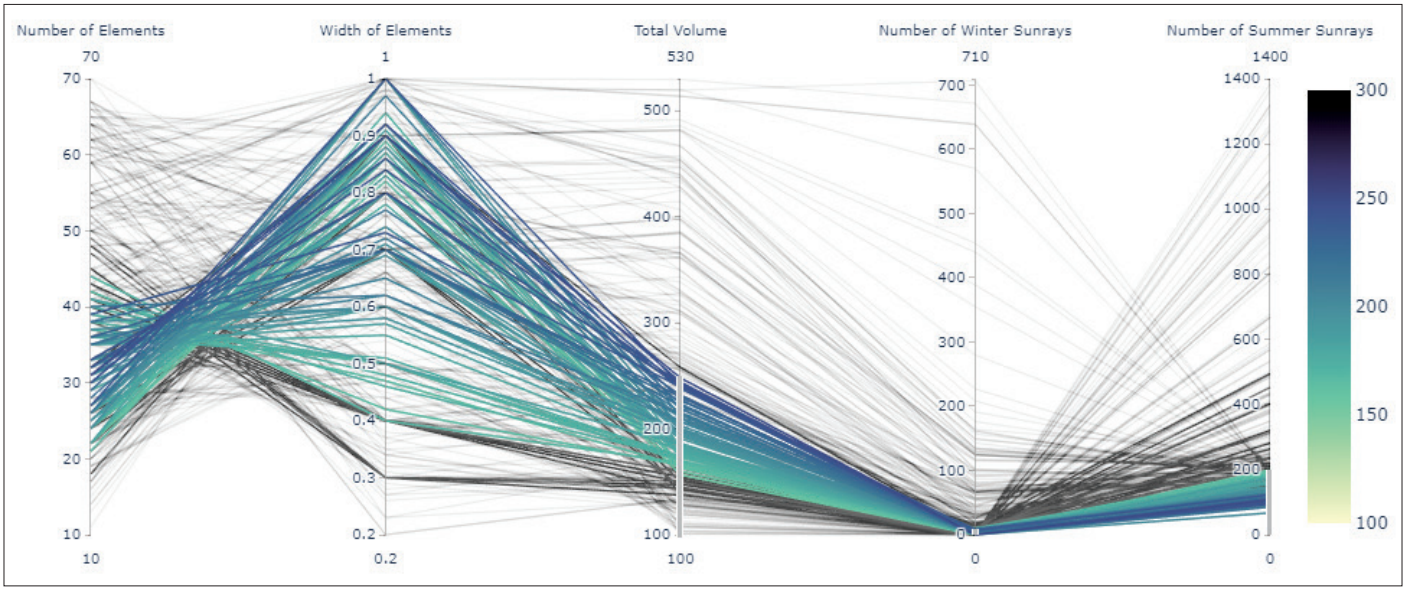
3.3 Ocena rešitev

Množica rešitev je bila dobljena v več korakih z različnimi nastavitvami natančnosti optimizacijskega algoritma, kar nam je vrnilo vzorec 573 raznolikih rešitev. Tako število podatkov težko pregledamo individualno, zato se je z uporabo Paretove fronte, grafom vzporednih koordinat in neposredno primerjavo analizirala množica rešitev in pri tem ugotavljalo delovanje modela.

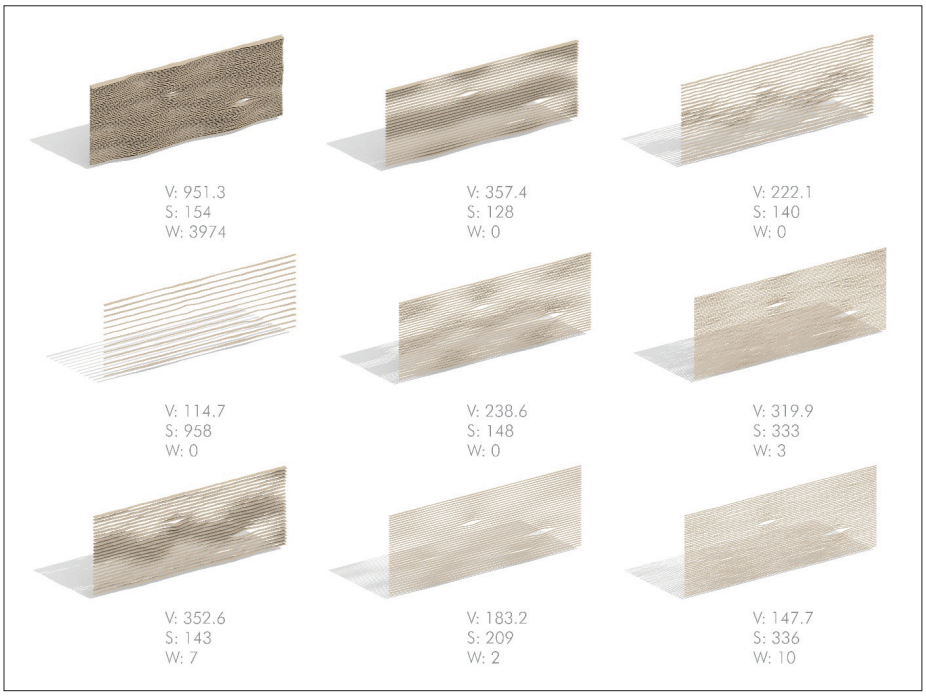
Paretova fronta se je uporabila za identifikacijo optimalnih rešitev (slika 10), saj smo imeli več kriterijev, po katerih smo ocenjevali različne rešitve. Ker nas je poleg obravnavanih kriterijev zanimal tudi videz elementov, ki ga ni bilo možno ovrednotiti v računskem modelu, nas niso zanimale zgolj Pareto optimalne rešitve, temveč tudi takšne z zanimivo obliko. Te rešitve, ležeče na Paretovi fronti, so nam podale referenčne vrednosti kriterijev, s katerimi smo



Slika 10 • **Paretova fronta, zgrajena na rezultatih iz optimizacije.**



Slika 11 • **Omejevanje rešitev z grafom vzporednih koordinat (barve predstavljajo spremembo količine materiala).**



Slika 12 • **Neposredna primerjava alternativnih rešitev.**

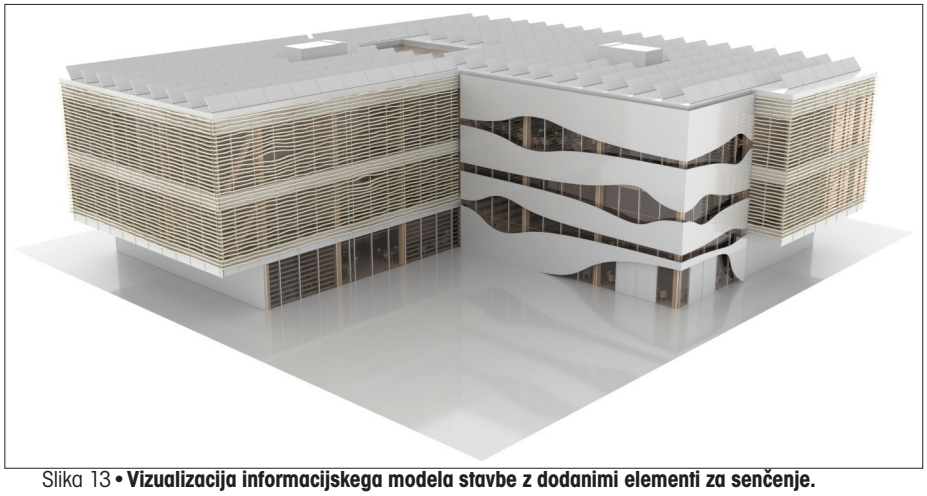
ocenili, koliko daleč od optimalnih se nahajajo ostale rešitve, ki smo jih obravnavali v procesu ocenjevanja.

Množica rešitev se je prikazala še na grafu vzporednih koordinat, kjer so povezave med lastnostmi posameznih rešitev pokazale vpliv števila elementov in koeficienta širine elementov na izhodne spremenljivke. Raztros spremenljivk je pokazal večji vpliv števila elementov na učinkovitost senčenja, saj ima ta manjši raztros kot širina elementov. Poleg tega so se na grafu dodatno omejili vrednosti spremenljivk in s tem število rešitev na manjši vzorec, prikazan na sliki 11. Spreminjanje mej je vrnilo različne vzorce, ki so se z neposredno primerjavo (slika 12) primerjali še po videzu, kar nam je omogočilo hiter pregled več ustreznih alternativnih rešitev.

3.4 Rešitev problema

Med procesom generativnega načrtovanja se je računski model postopoma nadgrajeval, pri tem pa smo spremljali rezultate, dokler se ni našla ustrezna rešitev. Ugotovili smo, pri kakšnih pogojih optimalno rešijo problem, kako parametri vplivajo na obliko in pripadajoče lastnosti, in s tem dobili vpogled v zastavljeni problem. S tako pridobljenim znanjem smo izbrali rešitev, ki je zadostila vsem pogojem in ciljem, in jo dodali informacijskemu modelu, kar je prikazano na sliki 13. Izbira rešitve je bila še vedno odvisna od projektantov, saj je problem zajemal več kriterijev, med njimi tudi subjektivna ocena videza fasade, ki je pametni računalniki še ne znajo ovrednotiti.

Pred uporabo generativnega pristopa smo elemente za senčenje zasnovali z običajnim pristopom, kjer se je oblika spreminjala ročno, nato smo analizirali senčenje in ocenili ustreznost podane rešitve. V tem pristopu je bilo težje oceniti ustreznost rešitve, saj nismo imeli referenčnih vrednosti, in se ni vedelo, ali se lahko rešitev še izboljša. Z uporabo generativnega načrtovanja smo ugotovili, da obstaja več takih rešitev, ki jih je bilo mogoče med seboj primerjati in poiskati najbolj ustrezno. Primerjava obeh pristopov je pokazala, da je rezultat generativnega pristopa imel 307 % manjšo porabo materiala, enako učinkovitost poleti in bil učinkovit tudi pozimi. V primeru ročnega spreminjanja se je učinkovitost pozimi zanemarila, saj je bilo težje spremljati vse cilje.



Slika 13 • **Vizualizacija informacijskega modela stavbe z dodanimi elementi za senčenje.**

Slika 14 • **Vizualizacija končne rešitve elementov za senčenje.**

4 • SKLEP

V prispevku smo predstavili ključne značilnosti generativnega načrtovanja in prikazali njihovo delovanje na primeru. V tem pristopu se namesto iskanja posamične rešitve osredotočimo na definiranje problema z vsemi pogoji in cilji, nakar načrtovanje prepustimo algoritmom. Ker generativno načrtovanje avtomatizira sintetiziranje, analizo in večji del ocene rešitev, predstavlja zmogljiv pristop k načrtovanju.

Na primeru zasnove elementov za senčenje se je iskala rešitev z običajnim pristopom in nato z generativnim načrtovanjem. Generativni pristop je podal rešitev, ki je učinkovito senčila in pri tem imela 307 % manjšo porabo materiala kot rezultat običajnega pristopa. Ko smo se prvič soočili z novim problemom, je bilo težko predpostaviti rešitev, ki bi zadostila vsem ciljem. Potrebno je bilo iterativno iskanje, ki pa je lahko zamudno, saj pot do optimalne rešitve ni enosmerna. Tukaj je generativno načrtovanje v prednosti, saj avtomatizira iskanje optimalnih rešitev in zmanjša število tistih, med katerimi se izbere končna.

Zmogljivost procesa generativnega načrtovanja se kaže predvsem pri reševanju novih problemov, kjer ni pričakovati, da bi projektant ugotovil rešitev, ki bi bila blizu optimalne. Preko definiranega problema se namesto iskanja posamične rešitve ustvari množica rešitev, kar nam poda vpogled v razumevanje problema. Vendarle ta pristop zahteva znanje in čas za izdelavo računskega modela, ki si ga včasih ne moremo privoščiti pri projektih. Prednost pristopa se pojavi šele pri večkratni uporabi računskega modela, saj ga je možno hitro prilagoditi za podobne primere. Pristop je splošen in zato uporaben tudi kot pomoč pri načrtovanju na drugih področjih gradbeništva, kjer lahko problem opišemo z računskim modelom.

Pri uporabi takega procesa smo se tudi vprašali, ali generativni pristop nadomešča projektanta v procesu načrtovanja. Trenutni odgovor je ne, saj je projektant še vedno odgovoren za dva od treh delov procesa, »računalnik« prevzame le pametno iskanje rešitev zastavljenega problema, projektant pa mora še vedno definirati problem in izbrati končno rešitev.

5 • ZAHVALA

Iskrena zahvala Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije, ki je v okviru programa Mladi raziskovalci financirala prikazane raziskave.

6 • LITERATURA

Allen, M., Python for healthcare modelling and data science, pareto front, https://pythonhealthcare.org/tag/pareto-front/, 2018.

Autodesk, Generative Design in Revit now available, https://blogs.autodesk.com/revit/2020/04/08/generative-design-in-revit/, 2020.

Caldas, L. G., Norford, L. K., A design optimization tool based on a genetic algorithm, Automation in Construction 11 (2): 173-184, 2002.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T., A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, IEEE Transactions on Evolutionary Computing 6 (2): 182-197, 2002.

Generative Design Primer, Generative Design for Revit and Dynamo, https://www.generativedesign.org/01-introduction/01-05_gd-for-revit, 2020. Guid, N., Strnad, D., Umetna inteligenca, Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, 2015.

Johan, R., Chernyavsky, M., Fabbri, A., et al., Building intelligence through generative design, Proceedings of the 24th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA), Wellington, New Zealand, 2019.

Konak, A., Coit, D. W., Smith, A., Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial, Reliability Engineering and System Safety 91: 992-1007, 2006.

Krish, S., A practical generative design method, Computer-Aided Design 43 (1): 88-100, 2011.

Ravi, A., What Generative Design Is and Why It's the Future of Manufacturing, https://www.newequipment.com/research-and-development/article/22059780/what-generative-design-is-and-why-its-the-future-of-manufacturing, 2018.

Rutten, D., Evolutionary Principles applied to Problem Solving, Grasshopper blogs, https://www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary--principles, 2010.

Stasiuk, D., Design Modeling Terminology, https://archinate.files.wordpress.com/2018/06/dstasiuk-design-modeling-terminology1.pdf, 2018.

The Dynamo Primer, What is Dynamo, https://primer.dynamobim.org/01_Introduction/1-2_what_is_dynamo.html, 2020.

NOVI SISTEM ZA UPRAVLJANJE PREMOSTITVENIH OBJEKTOV V UPRAVLJANJU DARS

NEW BRIDGE MANAGEMENT SYSTEM FOR SLOVENIAN HIGHWAYS

dr. Matej Kušar, univ. dipl. inž. grad.
matej.kusar@dri.si
DRI upravljanje investicij, d. o. o., Kotnikova 40, 1000 Ljubljana

Strokovni članek
UDK 351.811.112.3:624.21.03(497.4)

Povzetek | V razvitih državah se trend gradbenih del na cestni infrastrukturi preusmerja z novogradenj na redno in investicijsko vzdrževanje. Cestno infrastrukturo tvorijo različne konstrukcije, pri čemer so mostovi eni najpomembnejših. Zagotavljanje njihove prometne in konstrukcijske varnosti ter ustrezne nosilnosti je izjemnega pomena za celotno cestno mrežo. Ocena stanja mostov je v Sloveniji skoraj 30 let temeljila na nespremenjeni metodologiji. V času njenega razvoja je bila primerljiva z metodologijami drugih razvitih držav, vendar je v naslednjih desetletjih nismo bistveno posodabljali in na področju močno zaostali za prakso drugih držav. Po treh letih razvoja bomo v letu 2021 pričeli uporabljati nov Sistem za upravljanje premostitvenih objektov, katerega razvoj je potekal pri DRI, d. o. o., financiral ga je DARS, d. d. Sistem za oceno stanja mostov in sprejemanje odločitev upošteva več tako imenovanih ključnih indikatorjev: prometno varnost, zanesljivost, uporabnost in ekonomiko. Proces optimizacije odločitev temelji na iskanju najboljšega razmerja stroškov in koristi, pri čemer zaradi potrebe po primerjavi izjemno velikega števila strategij uporabljamo hevristično optimizacijo.

Ključne besede: mostovi, upravljanje, investicijsko vzdrževanje

Summary | In developed countries, the trend in road infrastructure is shifting from construction to maintenance management. Road infrastructure consists of various components, with bridges being one of the most critical. It is therefore of great importance to the road network that their safety and serviceability are at least adequate. In Slovenia, bridge performance assessment has been based on the same methodology for almost 30 years. At the time of its development, it was comparable to the methodologies of other developed countries, but in the following decades it has not been significantly updated. After a three-year development, a completely new Bridge management system is put into use. To determine the bridge condition, several Key performance indicators are used: traffic safety, reliability, availability and economic efficiency. The decision optimization process is based on Incremental benefit cost analysis using heuristic optimization method.

Key words: bridges, management, maintenance

1 • UVOD

V Sloveniji termin »premostitveni objekt« uporabljamo kot nadpomenko za mostove, viadukte, nadvoze in podvoze. V mednarodnem prostoru se za vse naštete vrste objektov uporablja termin most (ang. bridge), enako pa velja tudi za domačo strokovno literaturo (Pržulj, 2015). V nadaljevanju članka se termin most nanaša na vse oblike premostitvenih objektov.

Naložbe v cestno infrastrukturo povečujejo potencial rasti nacionalnega gospodarstva, ki ga je mogoče v celoti izkoristiti le z učinkovito uporabo cestne infrastrukture. Poleg izključno gospodarskih koristi cestna infrastruktura udeležencem v prometu omogoča vključevanje v različne dejavnosti, ki prinašajo javne, soci-

alne in zasebne koristi (Frischmann, 2012). Nobena druga vrsta transportne infrastrukture ni tako razvejana in v tako široki uporabi kot ceste. Predstavlja izjemno velik strošek tako v času gradnje kot vzdrževanja, vendar brez nje tako posameznik kot skupnost ne moreta izpolnjevati niti osnovnih potreb. Pri zagotavljanju funkcionalnosti cest imajo posebno mesto predori in mostovi, saj omogočajo hiter prehod preko naravnih ovir in s tem bistveno pospešijo transport.

Mostovi so zasnovani in zgrajeni v skladu z vsakokratnimi veljavnimi standardi. Izpolnjevanje njihovih zahtev mostovom zagotavlja ustrezno konstrukcijsko varnost in prometno pretočnost v trenutku, ko so ti izročeni upravljavcu. Po predaji postane naloga upravljavca, da mostovi dosegajo zahtevano prometno in konstrukcijsko varnost ter na ta način uporabnikom zagotavljajo uporabo mostov brez omejitev. Glede na veliko število mostov v cestnem omrežju razvitih držav je ta naloga vse bolj zahtevna (Hajdin, 2017).

Za obvladovanje te naloge ima večina držav izdelan sistem za upravljanje z mostovi (*ang. Bridge Management System – BMS*), ki kar najbolje ustreza njihovim zmogljivostim zbiranja in analize podatkov. Pregled literature kaže, da so bili ti sistemi na začetku zelo preprosti ((Woodward, 2001), (Rossow, 2006)) ter vsebovali le osnovne podatke o mostovih, izvedenih pregledih in sanacijah. Sčasoma so se razvili in postali bolj izpopolnjeni ((Adey, 2010), (Mirzae, 2012), (Mirzae, 2014), (Gkoumas, 2019)), najnovejši pa vsebujejo tudi modele slabšanja stanja, intervencijske strategije, ocene stroškov in podobno.

Sodobne BMS sestavljata projektni in mrežni nivo. Na projektnem nivoju je predmet analize en sam most oziroma njegovi posamezni konstrukcijski sklopi. Na tem nivoju ocenimo vrednosti izbranih indikatorjev (npr. konstrukcijska varnost, poškodovanost, projektirana nosilnost, torna sposobnost vozišča, skladnost varnostne opreme s standardi in podobno), s katerimi opišemo mehanske in tehnične lastnosti posameznega mostu. Na mrežnem nivoju stanje mostov med seboj primerjamo in prednostno razvrstimo na podlagi izbranih ključnih indikatorjev (Strauss, 2016). Razvrščanje lahko poteka na podlagi cikla življenjskih stroškov, analize stroškov in koristi, modelov multikriterijske optimizacije in podobno (Allah Bukhsh, 2019).

Namen članka je prikazati rezultat združitve raziskovalne dejavnosti in ekspertnega strokovnega znanja na področju upravljanja mostov ter uporabnost novo razvitega sistema v praksi.

2 • PREDSTAVITEV SISTEMA

2.1 Ključni indikatorji

V literaturi obstaja mnogo predlogov uporabe ključnih indikatorjev (KPI – *ang. Key Performance Indicator*) v sklopu ocenjevanja stanja mostov, vendar se v praksi več kot štirje ne uporabljajo (Branco, 2018). V preteklosti je ocena stanja mostov v Sloveniji temeljila na podlagi enega samega indikatorja, poškodovanosti objekta. Za bolj poškodovane mostove večjih razponov je DARS, z namenom pridobitve informacije o nujnosti intervencije in boljšega poznavanja dejanskega stanja, pred odločitvijo za pristop k sanaciji večkrat naročil analizo varnosti objektov (Žnidarič, 1995), kar izvaja še danes (Žnidarič, 2018). Tehnični vidik je bil na ta način ustrezno obravnavan, medtem ko vidik uporabnika na odločitve ni imel vpliva. V zadnjem obdobju je družbeni vidik postal sestavni del postopkov odločanja, koristi uporabnikov pa je po mnenju mnogih treba upoštevati pri vseh vidikih upravljanja, vključno z vzdrževanjem (Stipanović, 2017). Z vidika uporabnikov sta edina relevantna ključna indikatorja prometna varnost in uporabnost tako v času običajne prometne pretočnosti kot tudi v času izvajanja sanacijskih del. Uporabo navedenih ključnih indikatorjev so prvič predlagali že pred leti ((Grischa, 2011), (Brown, 2014)), vendar zgolj njihova uporaba ni dovolj za sprejemanje odločitev, kombinirati jih je treba še z drugimi kazalniki.

V okviru evropskega projekta COST Action 1406 (COST, 2019) je bil izdelan predlog za uporabo ključnih indikatorjev, ki temelji na nizozemskem pristopu RAMSSHE€P (Bakker, 2012), ki zajema zanesljivost (ang. reliability), razpoložljivost (*ang. availability*), vzdrževanje (*ang. maintainability*), prometno varnost (*ang. safety*), zaščito pred zlonamernimi aktivnostmi (*ang. security*), zdravje (*ang. health*), okolje (*ang. environment*), gospodarnost (*ang. economy*) in politiko (*ang. politics*). Gre za teoretična izhodišča, ki se nato po presoji uporabijo pri izdelavi sistemov za upravljanje različnih vrst infrastruktur v praksi.

Možnosti za izbiro ključnih indikatorjev je torej precej, upravljavec posameznega cestnega omrežja pa mora oceniti, kateri so za upravljanje njihove cestne mreže najustreznejši. Za učinkovito upravljanje mostov na slovenskih cestah smo kot najpomembnejše opredelili:

- Prometno varnost
- Zanesljivost
- Uporabnost
- Ekonomiko

Za določitev vrednosti vsakega izmed izbranih ključnih indikatorjev upoštevamo večje število indikatorjev (PI – *ang. Performance Indicator*). Indikatorji so nosilnost, konstrukcijska varnost, razpoložljivost, torna sposobnost in podobno. Vrednost vsakega ključnega indikatorja določimo na podlagi vrednosti več izbranih indikatorjev.

Izbrani ključni indikatorji za oceno stanja mostov so enaki za celotno slovensko cestno omrežje, tako avtoceste kot državne ceste, način izračuna njihove vrednosti pa se za nekatere med njimi razlikuje. Tako lahko nekaterim indikatorjem, s katerimi opisujemo ključne indikatorje, zvišamo ali znižamo pomembnost. Tako na primer morebitna zmanjšana širina prometnih pasov prek mostov na prometno manj obremenjenih cestah ne predstavlja bistveno zmanjšane uporabnosti mostu, na avtocestni trasi pa bi bila nedopustna. Nekaterih indikatorjev pri izračunih vrednosti ključnih indikatorjev sploh ne upoštevamo. Slednjega se sicer poslužujemo le v primerih, ko zanje ne moremo dobiti podatkov, potrebnih za oceno vrednosti, ali če jih trenutno smatramo za manj pomembne za sprejemanje odločitev (na primer torne sposobnosti vozišč tistih avtocestnih nadvozov, ki niso v upravljanju DARS).

2.2 Projektni nivo

Naloga projektnega nivoja sistema je zajem in arhiviranje vseh podatkov, povezanih s posameznim mostom. Osnovni podatki zajemajo leto gradnje, standard projektiranja, nosilnost, gabarite, število polj, uporabljene materiale in podobno. Ti podatki se nato dopolnjujejo z izvedbo obdobnih pregledov (redni, glavni) in drugih pregledov (ob izteku garancijske dobe, detajlni) ter obdobnih meritev (poškodovanost cestišča, torna sposobnost, geodetske meritve). Zajete podatke uporabimo za določitev vrednosti izbranih indikatorjev in na njihovi podlagi nato vrednosti ključnih indikatorjev.

Tri izmed štirih ključnih indikatorjev obravnavamo na projektnem nivoju. Najpomembnejši med njimi je zanesljivost. Ta je definirana kot verjetnost, da bo most ali njegov posamezni konstrukcijski sklop v danih pogojih in v določenem časovnem obdobju lahko opravljal svoje naloge brez omejitev (Strauss, 2016). Vrednost ključnega indikatorja zanesljivosti določamo na podlagi treh vidikov/indikatorjev:

- Poškodovanost
- Konstrukcijska varnost
- Obstojnost

Prve metodologije določanja stanja mostov so temeljile izključno na evidentiranju njihovih poškodb (Woodward, 2001). Kriterij poškodovanosti je tako prisoten že od prvih poskusov sistematičnega spremljanja stanja vseh vrst infrastrukturnih objektov in tudi danes ostaja eden izmed pomembnejših. Ne glede na vpeljavo novih indikatorjev v uporabo moramo pri vsakem pregledu evidentirati poškodbe in beležiti njihovo razširjenost in intenziteto, saj lahko le na ta način spremljamo razvoj poškodb skozi čas. Poškodovanost nam posredno poda oceno preostale življenjske dobe oziroma dobe uporabnosti mostu, natančno evidentiranje poškodb pa omogoča tudi izdelavo boljše ocene stroškov sanacije objektov.

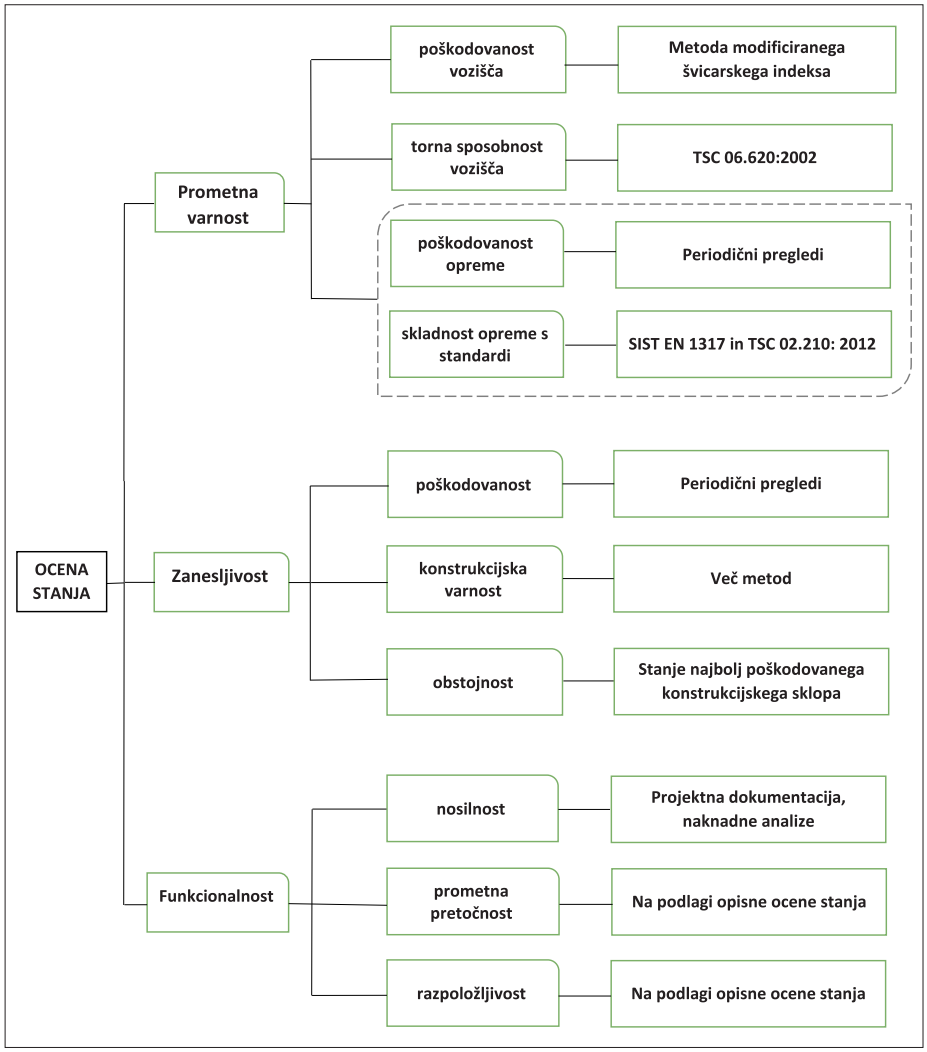
Indikator konstrukcijske varnosti nam poda drugačno informacijo kot indikator poškodovanosti, čeprav oba delno izhajata iz podatkov o napakah in poškodbah, ki jih evidentiramo med pregledom na posameznem mostu. Določitev varnosti je računski postopek, kjer poškodovanost vpliva na njen izračun oziroma oceno nosilnosti. Natančnejši izračuni temeljijo na tehtanju vozil med vožnjo (Žnidarič, 2010). S praktičnim primerom podprt postopek je prikazan v (Žnidarič, 2019). Konstrukcijsko varnost smo opredelili za najpomembnejši kriterij, saj z njo ovrednotimo nevarnost porušitve. Pri vrednotenju konstrukcijske varnosti posameznega mostu moramo upoštevati podatke, ki so že ali bi lahko v prihodnosti privedli do zmanjšane nosilnosti ali stabilnosti. Posledično nas ne zanima vsaka poškodba, napaka materiala ali nepravilnost pri gradnji. Pozornost mora biti usmerjena na nosilne elemente mostu in njihova morebitna težje poškodovana območja, nepravilnosti v geometriji, posledice morebitnih ekstremnih dogodkov in podobno. Predvsem pa moramo že v izhodišču upoštevati njihovo projektirano nosilnost (upoštevano prometno obtežbo) kot tudi konstrukcijsko zasnovo, saj so nekatere zasnove robustnejše od drugih (Hajdin, 2018).

Indikator obstojnosti nam poda informacijo o predvideni hitrosti nadaljnjega propadanja mostu. To je v največji meri odvisno od obstoječega stanja, saj bolj poškodovani mostovi oziroma njihovi posamezni konstrukcijski sklopi propadajo bistveno hitreje od manj poškodovanih. Hitrost razvoja poškodb je odvisna še od prisotnosti vode, vplivov podnebja in konstrukcijskega materiala, iz katerega je sklop grajen (Kušar, 2014). Razviti sistem določa vrednost indikatorja obstojnosti na podlagi stanja najbolj poškodovanega konstrukcijskega sklopa.

Mostovi kot del cestne mreže morajo uporabnikom zagotavljati vsaj enako varnost kot ostali elementi na cestni trasi. Za uporabnike hitrost slabšanja stanja mostov ni pomembna, želijo le varno prečkati most ne glede na vremenske in druge razmere. Vrednost ključnega indikatorja prometne varnosti smo določili na podlagi tistih vidikov/indikatorjev, katerih vrednosti redno zajemamo z izvajanjem pregledov ali meritev:

- Poškodovanost vozišča
- Torna sposobnost vozišča
- Stanje varnostne opreme

Vrednost indikatorja poškodovanosti vozišča ocenjujemo po metodi modificiranega švicarskega indeksa (Jamnik, 2005). Temelji na vizualni oceni vozišč, pri čemer se vrsta poškodbe ocenjuje z njeno jakostjo in površino, ki jo zavzema. Upoštevajo se naslednje vrste poškodb: razpoke, obraba, udarne jame in krpe. Vrednost indikatorja torne sposobnosti vozišča določamo skladno s TSC 06.620:2002, ki temelji na referenčnih evropskih, nemških in britanskih standardih. Namen meritev torne sposobnosti je določiti stanje vozne površine in opredeliti njen vpliv na varnost vožnje, predvsem prečnega vetra prek mostov. Področje varnostnih ograj urejajo standardi SIST EN 1317 in tehnična



Slika 1 • **Ocena stanja mostov na podlagi tehničnih ključnih indikatorjev.**

specifikacija TSC 02.210:2012. Oceno stanja varnostnih ograj podamo na podlagi dveh vidikov, in sicer skladnosti z veljavnimi predpisi s področja varnostnih ograj in vizualne ocene stanja varnostnih ograj.

Eden izmed ključnih podatkov, ki ga moramo poznati pred pristopom k sanaciji mostu, je njegova funkcionalnost. V primeru večjih omejitev za prometni tok popravilo najverjetneje ni smiselno in je bolj smotrno razmisliti o njegovi nadomestitvi z novim mostom, ki bo izpolnjeval vse zahteve uporabnikov. V primeru delnih omejitev moramo oceniti stroške sanacije poškodb in odprave evidentiranih omejitev ter se na tej podlagi odločiti za najprimernejši obseg sanacije. Mostovom brez funkcionalnih omejitev je treba poškodbe le sanirati in s tem zagotoviti njihovo trajnost.

Funkcionalnost je definirana kot zmožnost mostu, da služi svojemu namenu brez omejitev za uporabnike. Vrednost ključnega indikatorja funkcionalnosti določamo na podlagi naslednjih vidikov/indikatorjev:

- Nosilnost
- Prometna pretočnost
- Razpoložljivost

Za določitev vrednosti indikatorja nosilnosti se za potrebe množičnega določanja nosilnosti mostov privzame stanje iz projektne dokumentacije, natančneje, nosilnost določimo na podlagi uporabljene prometne obtežbe v statični analizi (izjema so mostovi, za katere so na razpolago podatki kasnejših analiz). Pri tem se sledi dvema pomembnima predpostavkama: 1. most je izveden v skladu s projektno dokumentacijo, 2. stanje mostu se v času od njegove dograditve ni poslabšalo do mere, ki bi vplivala na zmanjšanje nosilnosti v primerjavi z novogradnjo. Informacijo o morebitni zmanjšani nosilnosti zaradi poškodb ali drugih vplivov upravljavec (DARS) pridobi na osnovi izvedenega obdobnega pregleda mostu in po potrebi s preiskavami. Za dejansko oceno varnosti se lahko izvede dodatna analiza, ki poleg izračunane realne nosilnosti upošteva tudi rezultate meritev obnašanja konstrukcije pod prometno obtežbo (Žnidarič, 2019). V primeru izvedene rekonstrukcije se upošteva nosilnost na podlagi projektne dokumentacije za rekonstrukcijo, če je bil zanjo izveden ustrezen izračun na podlagi veljavnih standardov in pravilnikov.

Vrednosti indikatorjev pretočnosti in razpoložljivosti določamo na podlagi opisnih ocen stanj, kar v teoriji sicer omogoča delno subjektivnost ocenjevanja, vendar je ta dejansko zelo majhna. Odločamo se namreč le med štirimi kvalitativnimi stanji, pri čemer je med vsakim jasno opisana ločnica.

Način določitve vrednosti posameznih vidikov in njihova razvrstitev po posameznih ključnih indikatorjih je shematsko prikazana na sliki 1.

2.2.1 Določitev vrednosti ključnim indikatorjem obnašanja

Za primerjavo stanja posameznih mostov kot tudi medsebojne primerjave ključnih indikatorjev za posamezni most moramo vrednosti indikatorjem določiti kvalitativno. To pomeni, da je končni rezultat izračuna za vsak indikator ocena stanja. Ocene seveda temeljijo na kvantitativnih vrednostih, ki smo jih bodisi zajeli na terenu med obdobnimi ali drugimi ogledi bodisi na podlagi izračunov. To so dejanske vrednosti o dimenzijah poškodb, nosilnostih, širinah voznih pasov in podobno. Pretvorba iz kvantitativnih vrednosti v kvalitativne je jasno definirana, s čimer zmanjšamo možnosti subjektivnega ocenjevanja. Do neke mere ocene stanja sicer ostajajo stvar inženirske presoje.

Vsakega izmed ključnih indikatorjev obnašanja (KPI) opišemo z vrednostjo med 1 in 5:

$$KPI_k = [1 \dots 5] \quad (1)$$

kjer je k izbrani ključni indikator obnašanja. Višja vrednost pomeni boljšo oceno, nižja vrednost pa slabšo. Na podlagi vrednosti KPI prednostno razvrščamo približno 1200 mostov, ki so v upravljanju DARS. Vrednosti ne morejo biti le cela števila, saj bi to vodilo v preveliko število mostov z enakimi vrednostmi, zato vrednosti določamo na dve decimalni mesti.

Indikatorje (PI), s katerimi določamo vrednosti posameznih KPI, prav tako ocenjujemo z vrednostmi med 1 in 5. Indikatorji nimajo enake medsebojne pomembnosti, zato za potrebe izračuna vrednosti vsakega izmed obravnavanih KPI uvajamo uteži (w):

$$KPI_k = w_1 \cdot PI_1 + w_2 \cdot PI_2 + w_3 \cdot PI_3 \quad (2)$$

Vrednosti indikatorjev, ki jih določamo na podlagi numeričnih vrednosti, določamo na več decimalnih mest natančno (npr. poškodovanost). Vrednosti indikatorjev, ki jih določamo opisno, so lahko le cela števila (npr. skladnost varnostne opreme s standardi).

Opisani načini določitve vrednosti indikatorjev so namenjeni določitvi trenutnega stanja mostov. Za dolgoročno načrtovanje strategij vzdrževanja pa moramo oceniti tudi prihodnje stanje vseh mostov v omrežju, ki ga obravnavamo. Za to potrebujemo ustrezen model napovedovanja prihodnjih stanj.

2.2.2 Pričakovani letni prirastki poškodovanosti

Mostovi na slovenskih državnih cestah in avtocestah se med seboj močno razlikujejo po statičnih zasnovah, uporabljenih materialih, kakovosti gradnje, starosti in podobno. Vseh značilnosti pri določitvi (preostale) življenjske dobe in pričakovane hitrosti propadanja posameznega mostu ne moremo upoštevati, zato med njimi izberemo tiste, ki jih: 1. lahko določimo za vse mostove in 2. močneje vplivajo na propadanje vgrajenih materialov.

Pričakovane življenjske dobe[1] in letne prirastke poškodovanosti lahko na podlagi že izvedenih domačih analiz in tuje literature določimo konstrukcijskim sklopom podkonstrukcije, prekladne konstrukcije in cestišča. Za ostale sklope (ležišča, dilatacije, izlivniki in varnostna oprema) smo vrednosti pričakovanih letnih prirastkov poškodovanosti ocenili na podlagi izkušenj in presoje inženirjev podjetja DRI in Zavoda za gradbeništvo Slovenije (ZAG). Določitev življenjskih dob in prirastkov poškodovanosti je namenjena oceni časa, v katerem bo posamezen konstrukcijski sklop mostu glede na njegovo obstoječe stanje potreben sanacijskih ukrepov ali zamenjave.

Na hitrost propadanja posameznih konstrukcijskih sklopov najbolj vplivajo kakovost gradnje, redno vzdrževanje in atmosferski vplivi ter z njimi povezana uporaba posipnih soli. Pri določanju hitrosti propadanj in s tem povezanih življenjskih dob dilatacij, ležišč in izlivnikov pa moramo upoštevati tudi uporabljeno tehnologijo njihove izdelave oziroma njihov tip. Življenjske dobe posameznih konstrukcijskih sklopov mostov se posledično močno razlikujejo, zato moramo povprečne letne prirastke poškodovanosti obravnavati ločeno za vsak konstrukcijski sklop (ks):

$$ks = \{Po, Pr, Cs, Di, Le, Iz, Op\} \quad (3)$$

kjer je: Po podkonstrukcija, Pr prekladna konstrukcija, Cs cestišče, Di dilatacija, Le Ležišče, Iz izlivnik, Op varnostna in druga oprema.

Mostovi na slovenskem cestnem omrežju so prevladujoče grajeni z armiranim betonom. Drugi najpogostejši material mostov je kamen, manjši delež je grajen še iz jekla, lesenih mostov je vse manj (Kušar, 2014). Pri vsakem izmed navedenih materialov potekajo drugačni procesi propadanja, kar moramo upoštevati pri določanju pričakovanih letnih prirastkov

[1] Primernejša je sicer uporaba termina »doba uporabnosti«, ki izhaja iz angleškega strokovnega termina service life, vendar se ta v Sloveniji redko uporablja.

poškodovanosti. Vsak most v slovenskem državnem omrežju opišemo z eno izmed naslednjih materialnih kategorij (M):

$$M = \{AB, Ka, Je\} \quad (4)$$

kjer je AB armirani beton, Ka kamen in Je jeklo. Na slovenskem avtocestnem omrežju so vsi mostovi z izjemo dveh grajeni z armiranim ali prednapetim betonom, kar bistveno zmanjša število potrebnih enačb in podatkov za izračun letnih prirastkov poškodovanosti.

Velik vpliv na intenziteto slabšanja stanja ima tudi podnebje. V sklopu analiziranja dvajsetletnih podatkov stanja mostov na slovenskih državnih cestah smo sklenili, da mostovi na območju celinskega podnebja propadajo vidno hitreje kot na območju primorskega in alpskega podnebja (Kušar, 2014). Analiza stanja mostov na avtocestah pa je pokazala, da je vpliv podnebja zaradi nižje starosti in višje kakovosti gradnje mostov v upravljanju DARS manj izrazit kot na objektih državnih cest. Intenziteta slabšanja na avtocestnih mostovih je najbolj odvisna od kakovosti njihove gradnje. Mostovi, grajeni pred letom 1995, so bili projektirani skladno s takratnimi jugoslovanskimi standardi, ki so predpisovali tanjše zaščitne sloje betona. Posledično so manj odporni proti atmosferskim vplivom in propadajo hitreje od tistih, grajenih po letu 1995. Z navedenim letom se je pričel izvajati Nacionalni program izgradnje avtocest, ki je poleg sprememb v projektiranju izboljšal tudi kakovost vgrajenih materialov in same gradnje. Povprečno letno stopnjo slabšanja stanja za mostove v upravljanju DARS posledično določamo v odvisnosti od leta njihove izgradnje:

$$Lg = \{\text{pred } 1995, 1995 \text{ in kasneje}\} \quad (5)$$

Intenziteta slabšanja stanja posameznega konstrukcijskega sklopa je odvisna od vseh zgoraj navedenih dejavnikov, toda v največji meri od njegove obstoječe poškodovanosti. Za propadanje materiala bi morali v idealiziranem matematičnem zapisu uporabiti zvezno funkcijo, saj hitrost propadanja počasi zvezno narašča. Izjema pri tem so le ekstremni dogodki, ki pa jih ne moremo predvideti, na primer potresi, udarci vozil in podobno. Za predstavljeni sistem uporabljamo poenostavljeno odsekoma linearno funkcijo propadanja. Njene vrednosti temeljijo na dejanskih podatkih slovenskega omrežja mostov, ki so bili zajeti med obdobnimi pregledi v zadnjih 25 letih. Stopnje poškodovanosti posameznih konstrukcijskih sklopov razvrstimo v pet kakovostnih kategorij, določimo jih na podlagi ratinga poškodovanosti posameznega konstrukcijskega sklopa. Stopnjo poškodovanosti (D) smo definirali kot:

$$D = \{\text{zelo nizka, nizka, srednja, visoka, zelo visoka}\} \quad (6)$$

Pričakovan letni prirastek poškodovanosti posameznega konstrukcijskega sklopa mostu ($\Delta R_{i,ks}$) na mostovih v upravljanju DARS določamo v odvisnosti od naslednjih parametrov:

$$\Delta R_{i,ks} = \Delta R_{i,ks}(M, Lg, D) \quad (7)$$

Ocena letnih prirastkov poškodovanosti in s tem prihodnjih stanj mostov bistveno vpliva na rezultate. Od nje neodvisni so le indikatorji, s katerimi opisujemo funkcionalnost objekta, medtem ko na njihovi podlagi računamo prihodnje vrednosti vseh vidikov ključnega indikatorja zanesljivosti in večino vidikov ključnega indikatorja prometne varnosti. Na napovedih letnih prirastkov poškodovanosti temelji celoten sistem za upravljanje, saj z njim izvajamo analize za večdesetletna obdobja.

2.3 Mrežni nivo sistema

Medsebojna primerjava mostov se izvaja izključno na mrežnem nivoju, kjer vse izbrane podatke analiziramo. Na mrežnem nivoju ima sistem dva temeljna cilja, in sicer prednostno razvrstitev mostov potrebnih sanacije ter optimalno porabo razpoložljivih finančnih sredstev. Lahko nam poda tudi oceno letno potrebnih finančnih sredstev za vzdrževanje fonda mostov v obstoječem kakovostnem stanju in druge podobne informacije.

Na mrežnem nivoju uporabimo le tiste podatke o posamezni konstrukciji, ki so pomembni za odločanje na mrežnem nivoju, preostali podatki ostanejo shranjeni na projektnem nivoju. Slednje potrebujemo le v primeru pristopa k sanaciji, kjer je za korektno izdelano projektno dokumentacijo potrebno čim boljše poznavanje stanja posameznih elementov in konstrukcije kot celote.

Načrtovanje kratkoročnega, to je triletnega investicijskega vzdrževanja, temelji skoraj izključno na ugotovitvah obdobnih pregledov mostov. Srednjeročno in dolgoročno načrtovanje (25 let) pa zahteva izvedbo postopka, v katerem analiziramo različne scenarije vzdrževanja. Teoretično imamo možnost izbire med preventivnimi, korektivnimi in operativnimi sanacijskimi ukrepi. Ti posegi niso natančno določeni, zato so tudi stroški lahko ocenjeni le okvirno. Kljub temu nam zgodnje načrtovanje omogoča izbiro optimalnega časa za intervencije na posameznem mostu, s čimer dolgoročno stroške zmanjšamo (Hajdin, 2017).

2.3.1 Katalog ukrepov

Po svoji naravi delimo ukrepe na: 1. redne vzdrževalne in 2. investicijske vzdrževalne ukrepe. Predstavljeni sistem obravnava slednje. Ukrepe obravnavamo v sklopu ključnega indikatorja ekonomike.

Vsak izmed v sistemu predpisanih ukrepov ima definirane sprožilce, spremljevalne ukrepe, pogojne sprožilce spremljevalnih ukrepov, ponastavljanje vrednosti indikatorjev in ratingov (ocen) poškodovanosti v primeru izvedbe ukrepov, ceno ukrepov in minimalno število let, v katerih izvedbe enakega ali drugega ukrepa ne dovolimo. S slednjim se izognemo drobljenju celovitih sanacij na manjša dela, ki bi zahtevala pogoste zapore. V nadaljevanju je posamezna funkcija kratko opisana.

»Sprožilci« ukrepov so definirani z vrednostmi ključnih indikatorjev, indikatorjev in ratingov poškodovanosti. Manjši ukrepi so vezani na en konstrukcijski sklop, zato so njihovi sprožilci definirani z ratingom poškodovanosti obravnavanega konstrukcijskega sklopa. Ukrepi sanacije, rekonstrukcije ali menjave objekta zadevajo izboljšanje stanje celotnega objekta, zato so tudi sprožilci zanje definirani z vrednostmi indikatorjev in ključnih indikatorjev.

»Spremljevalni ukrepi« so definirani za primere, ko moramo na mostu izvesti določen samostojen ukrep na enem konstrukcijskem sklopu. S spremljevalnimi ukrepi preverimo, ali je oziroma bo v kratkem potrebna izvedba še drugih ukrepov na istem ali drugih konstrukcijskih sklopih ter jih izvedemo v času najprej predvidenega ukrepa. Za ukrepa »rekonstrukcija« in »menjava objekta« definiranje spremljevalnih ukrepov ni potrebno, saj ukrepa že sama po sebi obravnavata vse konstrukcijske sklope.

»Pogojni sprožilci« so uvedeni za potrebe izbire spremljevalnih ukrepov. Večinoma niso določeni strogo, saj želimo v času izvajanja glavnih ukrepov (in z njimi povezanih omejitev prometa) odpraviti vse tiste pomanjkljivosti in poškodbe na mostu, ki bi sicer v kratkem izkazale potrebo po izvedbi ukrepov.

»Ponastavitev vrednosti« se določi za vse ključne indikatorje (KPI), indikatorje (PI) in ratinge poškodovanosti posameznih konstrukcijskih sklopov, na katere ima izvedba posameznega ukrepa vpliv. Manjši ukrepi imajo neposreden vpliv le na posamezen konstrukcijski sklop, zato v teh primerih ponastavimo le vrednosti ratingov poškodovanosti, nove vrednosti indikatorjev in ključnih indikatorjev zaradi izvedenih del pa se izračunajo skladno z metodologijo. Izvedbe večjih ukrepov (sanacija, rekonstrukcija) vplivajo na stanje celotne konstrukcije, zato se v teh primerih ponastavijo tudi vrednosti indikatorjev in ključnih indikatorjev.

»Cene ukrepov« so za večje ukrepe definirane v odstotkih vrednosti novogradnje primerljivega mostu, za manjše pa v cenah na enoto. Strošek menjave cestišča je na primer ovrednoten kot 4 % vrednosti novogradnje, medtem ko je menjava dilatacije ovrednotena v tekočih metrih, pri čemer ločimo tri cenovne razrede dilatacij. Izbira posameznega cenovnega razreda je odvisna od dolžine mostu. Vse vrednosti temeljijo na DRI-jevi bazi podatkov že izvedenih projektov na cestah v upravljanju DARS. Razmejitev izračuna na navedena osnovna načina se je izkazal za najprimernejšega, saj je potreben obseg vhodnih podatkov dokaj majhen, natančnost ocene stroškov pa zadovoljiva.

2.3.2 Izbira strategije

Cilj mrežnega nivoja in s tem sistema kot celote je poiskati strategijo vzdrževanja, ki bo za izbrano omrežje mostov optimalna. To se izvede z uporabo postopka optimizacije, kjer sta upoštevana dva elementa:

- Element, ki ga želimo bodisi maksimirati bodisi minimizirati in ga imenujemo ciljna funkcija.
- Element, ki omejuje izbiro ciljne funkcije in ga imenujemo omejenost virov.

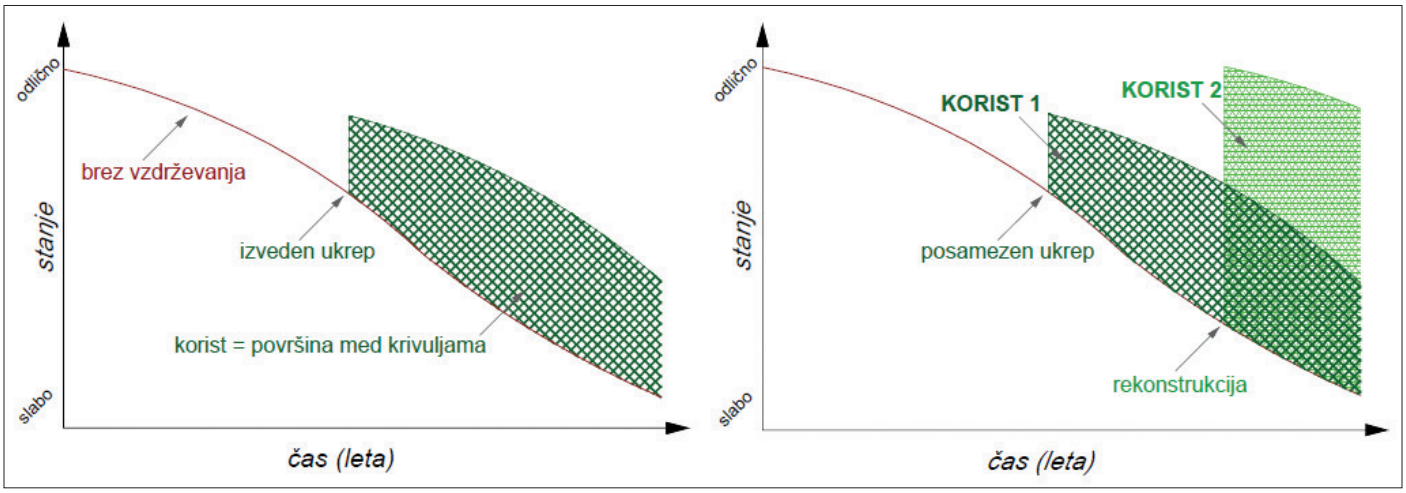
Tako ciljna funkcija kot omejenost virov veljata za celotno omrežje mostov. Ciljna funkcija je v našem primeru vsota vrednosti stanj vseh objektov, kot je predstavljena v poglavju 2.2, omejenost virov pa predstavljajo letno razpoložljiva finančna sredstva, torej proračuni.

Maksimiranje povprečnega stanja mostov zadovoljuje upravljavca, ne pa nujno tudi uporabnikov. Zanje je pomembno, kateri mostovi so v dobrem in kateri v slabšem stanju. Dobro stanje objektov z visokim dnevnim prometom je gotovo vredno več kot enako stanje objektov z nizko prometno obremenitvijo. Z namenom prioritizacije objektov s podobnimi stanji smo v izračun ciljne funkcije uvedli parameter »povprečni letni dnevni promet (PLDP)«. Na ta način pri izračunu koristi in s tem oblikovanju strategije upoštevamo tudi koristi uporabnikov (med podobno poškodovanimi objekti bodo prej na vrsti tisti, ki imajo visok PLDP). Koristi uporabnikov dejansko definiramo kot preprečene stroške na bolj prometnih mostovih zaradi delnih ali popolnih zapor kot posledice njihovega slabega stanja. Izračun ciljne funkcije v splošni obliki zapišemo:

$$f(KPI_{stanje}, PLDP) = \\ = \sum_{i=1}^{N} (KPI_{stanje_i} \cdot \sqrt[p]{PLDP_i} \cdot A_i) \qquad (8)$$

kjer je KPI_{stanje} stanje objekta, $PLDP$ povprečni letni dnevni promet, N število objektov v omrežju, A površina objekta i ter p izbrana potenca, s katero korigiramo velikostni red vpliva $PLDP$ na izbiro objektov za sanacijo. Brez navedene korekture, mostov z manjšo prometno obremenitvijo sistem ne bi izbral, saj bi njihova sanacija izkazovala nekajkrat manjše koristi kot enaka sanacija najbolj obremenjenih mostov.

Eden izmed pomembnejših dejavnikov, ki vplivajo na izbiro strategije vzdrževanja, je obdobje analize. S sistemom ne obravnavamo celotnih življenjskih dob mostov, saj so te predolge, definiramo pa dve obdobji: obdobje programa ukrepov in obdobje koristi. Obdobje programa obsega čas, za katerega pripravljamo strategijo vzdrževanja, na primer 20 let. Obdobje koristi pa obsega čas, ki ga obravnavamo za oceno koristi, ki izhajajo iz izvedenih ukrepov. Koristi so v primeru izvedenih sanacijskih ukrepov na mostovih dolgoročne, saj ima lahko izvedba posameznega ukrepa večdesetletni vpliv na most. Posledično mora biti obdobje izračunavanja koristi vidno daljše od obdobja programa. V nasprotnem primeru sistem v zadnjih letih analize ne bi predpisoval sanacijskih ukrepov, saj ti ne bi izkazovali zadostnih koristi. Za potrebe izvedbe analize definiramo obdobje koristi, najmanj 10 let daljše od obdobja programa ukrepov.



Slika 2 • **Grafični prikaz izračuna koristi.**

Koristi izvedbe posameznega ukrepa določamo s površino med krivuljama ciljne funkcije za primera brez izvedbe in z izvedbo ukrepa (slika 2). Večja ko je površina med krivuljama, večja je korist izvedenega ukrepa. Z maksimiranjem površine določimo tudi optimalni čas izvedbe posameznega ukrepa.

Izračun optimizacije izvajamo z ekspertno programsko opremo dTIMS (Deighton, 2020). Optimizacijo lahko izvajamo z neomejenimi finančnimi sredstvi (in določimo optimalni čas za popravilo vseh poškodb in odpravo vseh pomanjkljivosti) ali z omejenimi letnimi proračuni (in določimo najprimernejše ukrepe v posameznih letih z namenom maksimiziranja vrednosti ciljne funkcije). Optimizacija z omejenimi letnimi proračuni je seveda edina življenjska, hkrati pa tudi bistveno bolj kompleksna za izračun od najprej navedene. Izvedba ukrepa na enem mostu pomeni neizvedbo določenega ukrepa na drugem. Tako mostovi ali celo njihovi posamezni konstrukcijski sklopi

»tekmujejo« z drugimi konstrukcijskimi sklopi za omejena finančna sredstva. Določitev optimalne strategije je zato kompleksna naloga, ki temelji na izjemno velikem številu matematičnih procesov. Primerjamo veliko število konstrukcijskih elementov, od katerih ima vsak več možnih strategij vzdrževanja (vrsto in leto izvedbe ukrepa), vsaka strategija pa na svoj način vpliva na vse ostale elemente mostov v omrežju in njihove strategije vzdrževanja. Pri tem je treba poudariti, da število potrebnih matematičnih operacij z uvedbo vsakega dodatnega ukrepa raste eksponentno. Da je tovrsten izračun na osebnih računalnikih sploh mogoč, uporabljena ekspertna programska oprema uporablja hevristično optimizacijsko metodo (Wang, 2013), ki daje rezultate blizu teoretičnega optimuma.

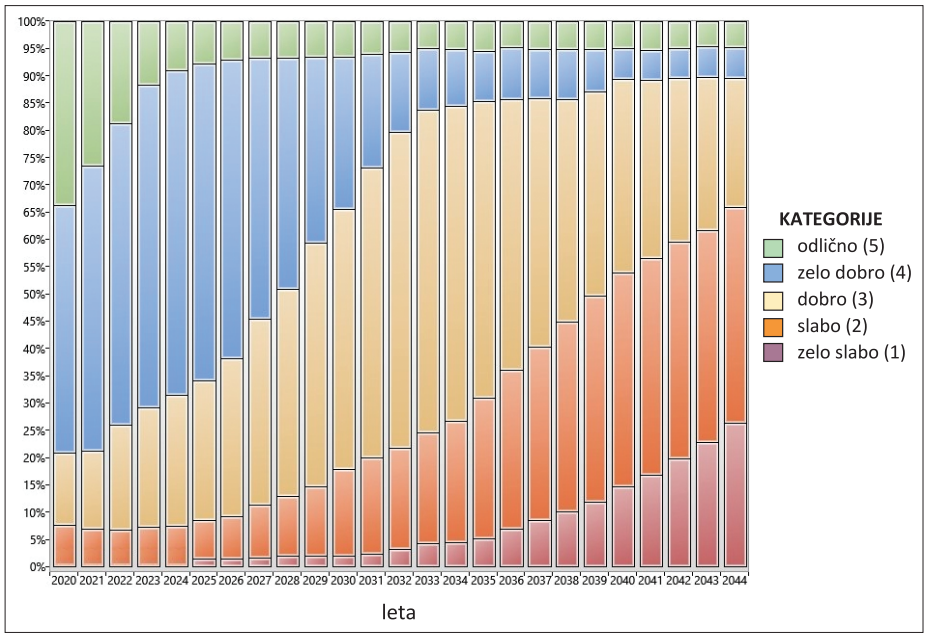
3 • REZULTATI

Razviti Sistem za upravljanje omogoča napovedovanje vrednosti ratingov poškodovanosti, indikatorjev in ključnih indikatorjev skozi čas, primerjavo učinkovitosti posameznih strategij ukrepov, porabo finančnih sredstev in podobno. Z njim dobimo množico dodatnih informacij, na podlagi katerih lahko upravljavec z večjo gotovostjo sprejema odločitve. Rezultati analiz so lahko podani z diagrami, tabelarično ali v sistemu GIS.

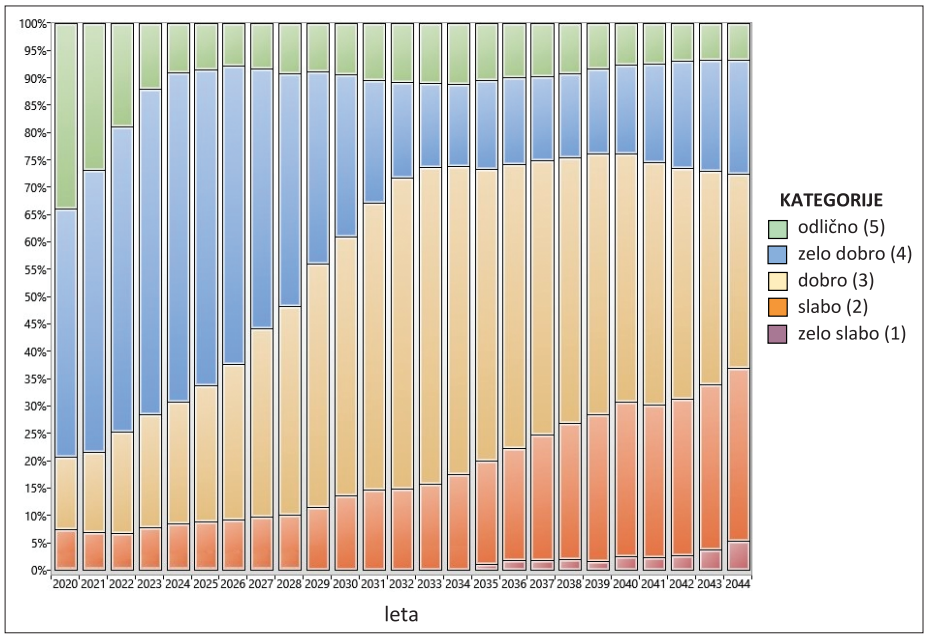
Na slikah 3, 4 in 5 so prikazane pričakovane bodoče vrednosti indikatorjev poškodovanosti za izbrano obdobje 25 let. Na diagramu je prikazan delež mostov s posamezno oceno, mostovi pa so razvrščeni v kategorije odlično (5), zelo dobro (4), dobro (3), slabo (2) in zelo slabo (1) stanje. Diagrami obravnavajo tri zelo različne scenarije letnih proračunov: 10 mil. €, 20 mil. € in 30 mil. € letno. Pri tem definiramo letno diskontno stopnjo in letno stopnjo inflacije z enakimi vrednostmi, s čimer njun učinek na izračun izničimo. Letni proračuni so za celotno analizirano obdobja fiksni, kar s stališča optimizacije porabe sredstev seveda ni najugodneje, vendar za potrebe članka omogoča lažjo primerjavo scenarijev.

Izračuni kažejo, da letni proračuni v višini 10 mil. € dolgoročno vodijo v neustrezno stanje omrežja. Število mostov v zelo slabem stanju bi se zaradi počasnih procesov propadanja pričelo vidno povečevati šele po letu 2030 (slika 3), vendar takrat tudi ob enormnem zvišanju finančnih sredstev trenda ne bi bilo več mogoče ustaviti. Za ohranjanje avtocestne mreže mostov v operativnem stanju potrebuje upravljavec približno 20 mil. € letno (slika 4). S tolikšnimi sredstvi je mogoče vsako leto sanirati najbolj poškodovane mostove in cestno mrežo ohranjati v operativnem stanju. Povprečno stanje mostov se pri tem scenariju med letoma 2023 in 2033 slabša, nato pa se skoraj ustali.

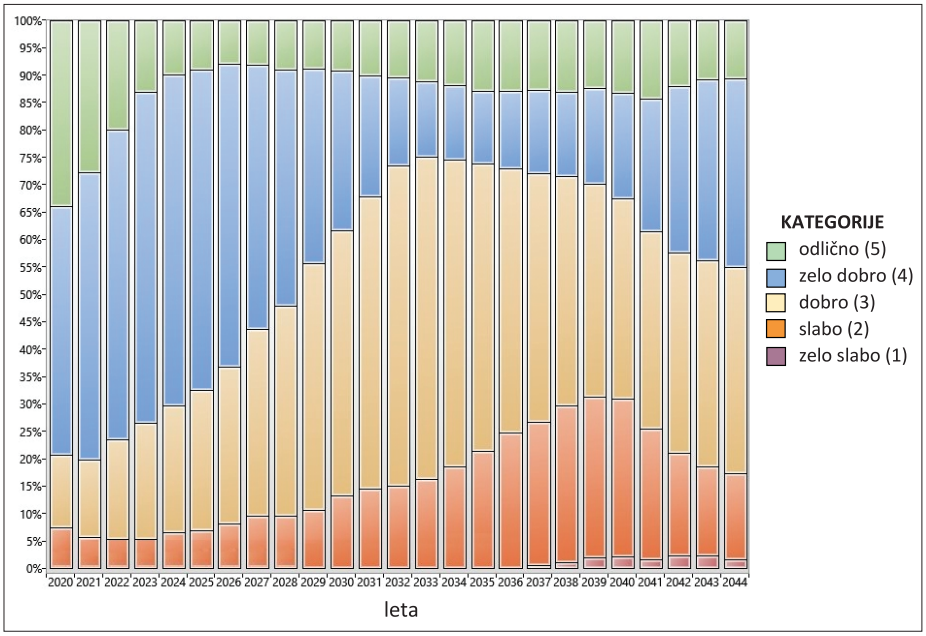
Povprečna poškodovanost mostov se viša tudi v primeru letnih proračunov v višini 30 mil. € (slika 5), vendar nam zgolj pregled stanja poškodovanosti za vse tri scenarije marsikaj prikrije. DARS ima v upravljanju relativno mlado cestno mrežo, zaradi česar je trenutno število objektov v odličnem in zelo dobrem stanju zelo visoko. Teh objektov še ni smiselno sanirati, zato čakamo, da se njihovo stanje poslabša do mere,



Slika 3 • **Spreminjanje indikatorja poškodovanosti s časom ob letnem proračunu 10 mil. €/leto.**



Slika 4 • **Spreminjanje indikatorja poškodovanosti s časom ob letnem proračunu 20 mil. €/leto.**



Slika 5 • **Spreminjanje indikatorja poškodovanosti s časom ob letnem proračunu 30 mil. €/leto.**

ko bo njihova sanacija smiselna. Zaradi navedenega imamo v vseh scenarijih v prvih letih analize izjemno visok prirast deleža objektov v kategoriji 3. Ker pa imamo v scenariju 30 mil. €/letno na razpolago visoka finančna sredstva, mostove ne le popravljamo, temveč jih rekonstruiramo ali menjamo z novimi, ki izpolnjujejo zahteve standarda Evrokod ((SIST, 2004) in (SIST, 2006)). Rekonstrukcijo ali menjavo mostu izvedemo šele, ko ta doseže kategorijo 2. To sicer zahteva dva- do trikrat višja sredstva kot izvedba izključno sanacije, vendar s tem mostovom zagotovimo daljšo življenjsko dobo, višjo potresno varnost in prevzem višjih prometnih obtežb, ki jim bomo v prihodnosti nedvomno priča. Tega iz prikazanih diagramov ni mogoče razbrati. Ukrep rekonstrukcije ali menjave mostu namreč vpliva tudi na vrednosti drugih indikatorjev (konstrukcijska varnost, nosilnost, pretočnost in razpoložljivost) ter s tem na oceno stanja posameznega mostu kot celote.

Navedeno kaže, da pri upravljanju z infrastrukturo na podlagi enega samega (kateregakoli) kriterija ne moremo določiti optimalne strategije investicijskega vzdrževanja. Izbira več primernih indikatorjev za potrebe ocene stanja in sprejemanje pravilnih odločitev je za učinkovito upravljanje infrastrukture torej ključnega pomena.

4 • SKLEP

Predstavljeni sistem je osrednji del celovitega upravljanja premostitvenih objektov na cestah v upravljanju DARS[2]. Z njim imamo v Sloveniji prvič na razpolago orodje, ki nam kot končni rezultat analize poda pričakovana bodoča stanja mostov na celotni cestni mreži v odvisnosti od vloženih finančnih sredstev. Upravljavec lahko z njim med drugim že več let vnaprej dobi informacijo, v katerem obdobju lahko pričakuje povečano potrebo po investicijskem vzdrževanju mostov. Rezultati analiz kažejo, da bo moral DARS finančna sredstva bistveno povečati med letoma 2023 in 2033, čemur bo sledilo obdobje z nižjimi finančnimi potrebami. V navedenem obdobju bo veliko število mostov doseglo starost 30 let in bodo prvič potrebni večjih sanacijskih ukrepov.

Sistem za upravljanje premostitvenih objektov je namenjen strateškemu odločanju na nivoju celotne avtocestne mreže. Omogoča objektivno primerjavo stanja mostov na podlagi izbranih indikatorjev in ključnih indikatorjev, analiziranje različnih strategij vzdrževanja, določitev minimalnih finančnih sredstev za ohranjanje fonda objektov v obstoječem stanju ter predvsem letno in obdobno optimizacijo porabe razpoložljivih finančnih sredstev.

5 • LITERATURA

Adey, B.T., Klatter, L., Kong, J.S., The IABMAS Management Committee Overview of Existing Bridge Management Systems, The Fifth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS, July 11-15, 2010.

Allah Bukhsh, Z., Stipanović, I., Klanker, G., O'Connor, A., Doree, A. G., Network Level Bridges Maintenance Planning Using Multi-Attribute Utility Theory, Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 15, No. 7, 2019.

Bakker, J., Klatter, L., Risk Based Inspection (RBI) at Rijkswaterstaat, Proceedings of the 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Stresa, Italy, 2012.

Branco, F., Predsednik mednarodnega združenja IABSE 2016-2019, osebna komunikacija, 40. Simpozij IABSE, Nantes, 20.9.2018.

Brown, M. C., Gomez, J. P., Hammer M. L., Hooks, J. M., Long-Term Bridge Performance, High Priority Bridge Performance Issues, Report No. FHWA-HRT-14-052, FHWA Long Term Bridge Performance Program, 2014.

COST, Quality Specifications for Roadway Bridges, Standardization at a European Level, https://www.tu1406.eu/, 2019.

Deighton, Deighton Total Infrastructure Management System - DTIMS, https://www.deighton.com/dtims-platform, 2020.

[2] Na zadnji stopnji razvoja je tudi Sistem za mostove v upravljanju DRSI.

Frischmann, B. M., Infrastructure - The Social Value of Shared Resources, Oxford University press, New York, 2012.

Gkoumas, K., Marques Dos Santos, F.L., van Balen, M., Tsakalidis, A., Ortega Hortelano, A., Grosso, M., Haq, G., Pekár, F., Research and Innovation in Bridge Maintenance, Inspection and Monitoring. JRC Science for policy report no. 115319, 2019.

Grischa, D., Sigrist V., Performance Indicators for Concrete Bridges, Proceedings of fib Symposium "Concrete Engineering for Excellence and Efficiency", Prague 2011.

Hajdin, R., Tanasić, N., Kušar, M., Amado, A., A novel Quality Control Framework for the Management of the Existing Bridges. 39th IABSE Symposium – Engineering the Future. Vancouver, Canada, 2017.

Hajdin, R., Kušar, M., Mašović, S., Linneberg, P., Amado, J., Tanasić, N., Establishment of a Quality Control Plan - Technical report, COST Action TU1406, Work Group 3, 2018.

Jamnik, J., Henigman, S., Vpeljava gospodarjenja z vozišči na odseke cest v upravljanju DARS, DDC svetovanje inženiring d.o.o., 2005.

Kušar, M., Razvoj sistema za upravljanje s premostitvenimi objekti na cestah in avtocestah, Doktorsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 2014.

Mirzae, Z., Adey, B.T., Klatter, L., Kong, J.S., The IABMAS Management Committee Overview of Existing Bridge Management Systems. The 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. IABMAS, July 8-12, 2012.

Mirzae, Z., Adey, B.T., Klatter, L., Kong, J.S., The IABMAS Management Committee Overview of Existing Bridge Management Systems. The 7th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS, July 7-11, 2014.

Pržulj, M. Mostovi: zasnova, projektiranje, konstruiranje, zanesljivost, gradnja, gospodarjenje, obnova, priročnik, 2015.

Rossow, P. M., Overview of Bridge Inspection Programs – BIRM, Continuing Education and Developement Inc., New York, 2006.

SIST, SIST EN 1991-2:2004, Evrokod 1: Osnove projektiranja in vplivi na konstrukcije – 2. del: Prometna obtežba mostov, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2004.

SIST, SIST EN 1998-2:2006, Evrokod 8: Projektiranje konstrukcij na potresnih območjih - 2. del: Mostovi, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, 2006.

Stipanović, I., Chatzi, E., Limongelli, M., Gavin, K. Allah Buksh, Z. Skarić Palić, S. Xenidis, Y., Imam B., Anžlin, A. Zanini, M. Klanker, G., Hoj, N, Ademović, N., Performance Goals for Roadway Bridges - Technical report, COST Action TU1406, Work Group 2, 2017.

Strauss, A., Mandić Ivanković, A. 2016, Performance Indicators for Roadway Bridges - Technical report, COST Action TU1406, Work Group 1, 2016.

Wang, F.S., Chen. L.H., Heuristic Optimization, Encyclopedia of Systems Biology, Springer, New York, 2013.

Woodward, R.J., Cullington, D.W., Daly, A.F., Vassie, P.R., Haardt, P., Kashner, R., Astudillo, R., Velando, C., Godart, B., Cremona, C., Mahut, B., Raharinaivo, A., Lau, Markey, I., Bevc, L., Peruš, I., Bridge Management Systems: Extended Review of Existing Systems and Outline framework for a European System, BRIME PL97-2220, 2001.

Žnidarič, J., Žnidarič, A., Ukrainczyk, V., Bjegović, D., Peruš, I., Terčelj, S., Petković, L., Določanje varnosti in preostale življenjske dobe obstoječih mostov: zaključno poročilo, ZAG, 1995.

Žnidarič, A., Lavrič, I., Applications of B-WIM technology to bridge assessment, Bridge Maintenance, Safety, Management and Life-Cycle Optimization, Philadelphia, ZDA, July 11-15, 2010.

Žnidarič, A., Kreslin, M., Analiza varnosti mostov VA0187 in VA0188 čez Pivko na avtocesti A1/0038 Postojna - Razdrto na obremenitve priklopnikov z nihajnimi osmi: končno poročilo, ZAG, 2018.

Žnidarič, A., Kreslin, M., Kalin, J., Anžlin, A. Uporaba sistemov za tehtanje vozil med vožnjo za določitev realne konstrukcijske varnosti mostov, Gradbeni vestnik, december, 2019.

31. MIŠIČEV VODARSKI DAN 2020

Tradicionalni strokovni posvet slovenskih vodarjev – Mišičev dan, ki ga že enaintrideset let organizira VGB Maribor, d. o. o., in VGP Drava Ptuj, d. o. o., v sodelovanju z MOP in DRSV, je zaradi omejitev ob epidemiji covid-19 letos potekal drugače kot prejšnja leta.

Organizator je razpisal naslednje teme posveta, s katerimi smo želeli osvetliti aktualna vprašanja, ki se pojavljajo pri upravljanju voda ter načrtovanju posegov v vodno okolje in vodni režim:

1. Vodarstvo in varstvo okolja – nasprotje ali sinergija

Vodno in obvodno okolje predstavlja pomemben življenjski prostor velikemu številu živalskih in rastlinskih vrst, mnoge od njih so ogrožene. Poplave kot naravnogeografski preoblikovalec pokrajine vplivajo na namembnost prostora in rabo tal. Kakovost in ustrezna količina vode sta velikega pomena za zdravje ljudi, varstvo pred poplavami omogoča prebivanje na ogroženih območjih, izločene poplavne retencije je treba nadomestiti.

Sodobno upravljanje voda in načrtovanje posegov v vodni režim vključuje trajnostne vidike poseganja v vodno okolje.

Kakšni so primeri dobre prakse v slovenskem vodarstvu in kakšni so problemi pri usklajevanju hidrotehničnih in ekoloških vidikov? Kakšne so potrebne poti za izboljšanje učinkovitega in usklajenega načrtovanja posegov v vodno okolje?

2. Aktualnost gradnje hidroelektrarn v Sloveniji – koristi in slabosti

V zaključni fazi je postopek izdaje okoljevarstvenega soglasja za izgradnjo HE Mokrice, zadnje od še ne izvedenih HE na spodnji Savi. Na srednji Savi in Muri je bila podeljena koncesija za energetsko izgradnjo. Vpliv zajezitev HE na vodni režim in vodno okolje je velik. Iz prakse izhaja, da na lokalnem nivoju gradnja HE prinese tudi zmanjšanje poplavne ogroženosti ter ureditev gospodarske javne infrastrukture. Kakšno je stališče vodarstva do gradnje HE v Sloveniji?

3. Izvajanje projektov varstva pred poplavami

V teku je priprava projektov in njihova izvedba na porečju Meže z Mislinjo, ptujske Drave, ki so financirani iz kohezijskih sredstev, na mejnih rekah je zaključen projekt FRISCO, v izvajanju je meddržavni projekt Go-Mura, v zaključni fazi načrtovanja sta projekta zagotavljanja poplavne varnosti Ljubljane in Železnikov. V kakšni fazi so posamezni projekti, kakšne so izkušnje pri njihovem izvajanju?

4. Aktualni projekti s področja upravljanja in urejanja voda

Pregled projektov, izvedbe, raziskav s področja vodarstva so stalnica MVD. Izmenjava informacij o aktivnosti, izkušenj in znanj so bistvo priprave prispevkov v zadnjem sklopu posveta.

Na razpisane teme je prispelo 29 strokovnih prispevkov, ki so bili objavljeni v tiskanem zborniku, ki je dostopen tudi na spletnih straneh organizatorjev posveta.

Po objavi zbornika prispevkov je bila razpisana desetdnevna diskusija, vodena s strani moderatorjev za posamezni sklop. Odziv na diskusijo je bil pod pričakovanji, očitno nam je bližja diskusija v »živo«, ki pa je letos žal ni bilo mogoče realizirati.

Kljub temu lahko z zadovoljstvom ugotovimo, da tudi v omejenih zmožnostih lahko izvedemo strokovni posvet, ki znotraj vodarske stroke pa tudi širši javnosti predstavi stanje in problematiko vodarstva ter aktivnosti in primere v praksi, s katerimi se soočamo pri delu.

Predsednik Organizacijskega odbora MVD
mag. Smiljan Juvan, univ. dipl. inž. grad.

GRADBIŠČE OBJEKTOV ZA PREČKANJE DOLINE GLINŠČICE PRI IZGRADNJI DRUGEGA TIRA ŽELEZNIŠKE PROGE DIVAČA KOPER

Slika 1 • **Zaščita predvkopa predora T1 in gradbene jame opornika premostitvenega objekta.**

Slika 2 • **Oporni zid ob osrednjem delu premostitvenega objekta.**

Slika 3 • **Oporni zid in zaščita predvkopa predora T2.**

Foto: arhiv 2TDK,
Družba za razvoj projekta, d.o.o.

NOVI DIPLOMANTI

UNIVERZA V LJUBLJANI, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

II. STOPNJA - MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM GRADBENIŠTVO (smeri Gradbene konstrukcije, Geotehnika-hidrotehnika, Nizke gradnje)

Marko Stermecki, Globalna analiza in dimenzioniranje montažnih elementov industrijskih prostorov Iskra mehanizmi, mentor doc. dr. Jože Lopatič, somentor Marko Pavlinjek; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=122951

Matej Toporiš, Vihanje pločevin pri obremenitvi z bočnim pritiskom, mentor izr. prof. dr. Primož Može; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=122953

Anže Setnikar, Infrastrukturni ukrepi za višji nivo prometne varnosti na AC, mentor doc. dr. Peter Lipar, somentor viš. pred. dr. Robert Rijavec; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=122934

Matija Mugerli, Analiza daljnovodnih stebrov po EN 50341-1:2012, mentor izr. prof. dr. Primož Može, somentorica Laura Grad; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=124034

Amel Emkić, Razvoj sodobnega zidaka za polnilna zidovja primernega za jadransko regijo, mentor prof. dr. Vlatko Bosiljkov, somentor asist. dr. David Antolinc; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=124091

II. MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM STAVBARSTVO

Manca Hrovat, Potencial uporabe butane zemljine v sodobnem stavbarstvu, mentor prof. dr. Vlatko Bosiljkov, somentorja asist. dr. David Antolinc in asist. dr. Jasna Smolar; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=124092

II. MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Anita Zore, Vpliv prestrezanja padavin na erozijo, mentorica izr. prof. dr. Mojca Šraj, somentor doc. dr. Nejc Bezak; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=123332

Matevž Piry, Analiza projektnih pretokov z upoštevanjem negotovosti, mentor doc. dr. Nejc Bezak, somentorica izr. prof. dr. Mojca Šraj; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=123334

III. DOKTORSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Urška Blumauer, Ocena nosilnosti armiranobetonskih okvirnih konstrukcij po požaru, mentor izr. prof. dr. Tomaž Hozjan, somentor doc. dr. Gregor Trtnik; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=122396

Francesca Celano, Projektni potresni parametri za enote industrijskih objektov z upoštevanjem zahtevanega odziva grajenega okolja, mentor prof. dr. Matjaž Dolšek; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=124068

Mateja Volgemut, Vpliv lokacije storitev splošnega pomena na razvoj odprtega javnega prostora na primeru majhnih mest v Sloveniji, mentorica doc. dr. Alma Zavodnik Lamovšek, somentorica izr. prof. dr. Alenka Fikfak; https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=124051

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO, PROMETNO INŽENIRSTVO IN ARHITEKTURO

I. STOPNJA – VISOKOŠOLSKI STROKOVNI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Matic Diklič, Sodobno komunikacijsko orodje kot podpora pri vodenju gradbenega projekta Nadomestna novogradnja Splošne bolnišnice Celje, mentorica izr. prof. dr. Nataša Šuman, somentor asist. dr. Zoran Pučko; https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=78312&lang=slv

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJ GRADBENIŠTVA

Nastja Belak, Varnost na prehodih za pešce na začetkih naselij, mentor prof. dr. Tomaž Tollazzi, https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=78327&lang=slv

Helena Pavlin, Poenostavljena potisna analiza konstrukcij visokogradnje s spletno verzijo programa NEAVEK, mentor doc. dr. Iztok Peruš, somentorja izr. prof. dr. Matjaž Skrinar in asist. Denis Imamović; https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=78277&lang=slv

UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO, PROMETNO INŽENIRSTVO IN ARHITEKTURO – EKONOMSKO POSLOVNA FAKULTETA

INTERDISCIPLINARNI ŠTUDIJ GOSPODARSKEGA INŽENIRSTVA – SMER GRADBENIŠTVO

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM

Matic Reberčnik, Ocenjevanje vrednosti nepremičnin s posebnim trgovalnim namenom, mentorja prof. dr. Igor Pšunder - FGPA in prof. dr. Tanja Markovič Hribernik - EPF; https://dk.um.si/IzpisGradiva.php?id=78206

Rubriko ureja • Eva Okorn, gradb.zveza@siol.net

KOLEDAR PRIREDITEV

2.-4.3.2021

9th ASCAAD International (Virtual) Conference
Kairo, Egipt
www.ascaad.org/conference/2021/index.htm

12.-15.3.2021

AMSE 2021- International Congress on Advanced Materials Sciences and Engineering 2021
Dunaj, Avstrija
www.istci.org/amse2021/

6.-8.4.2021

BMCT Dubai 2021 - International Conference and Exhibition on Building Materials and Construction Technologies
Dubaj, Združeni arabski Emirati
https://bmctdubai.org/

7.-9.6.2021

Mediterranean Symposium on Landslides
Neapelj, Italija
https://medsymplandslides.wixsite.com/msl2021

9.-11.6.2021

Mednarodna konferenca »Applications of structural fire engineering« - ASFE' 21
Ljubljana, Slovenija
www.fgg.uni-lj.si/mednarodna-konferenca-asfe-21/

19.-20.6.2021

2nd International Conference on Press-in Engineering (ICPE) 2021
Spletna konferenca
Kochi, Japonska
https://icpe-ipa.org/

21.-25.6.2021

ICOSSAR 2021-13th International Conference on Structural Safety & Reliability
Šanghaj, Kitajska
www.icossar2021.org/

4.-7.7.2021

11th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar
Valletta, Malta
www.iwagpr2021.eu/

5.-8.7.2021

DFI Deep Mixing Conference 2021
Gdansk, Poljska
www.dfi.org/dfieventlp.asp?13330

10.-12.7.2021

4th International Conference on Civil Engineering and Architecture
Seul, Južna Koreja
www.iccea.org/index.html

22.-24.9.2021

S.ARCH 2021 - 8th International Conference on Architecture and Built Environment with Architecture AWARDs
Rim, Italija
www.s-arch.net/

2.-6.11.2021

5th World Landslide Forum
Kjoto, Japonska
http://wlf5.iplhq.org/

23.-25.2.2022

DFI-PFSF Piling & Ground Improvement Conference 2021
Sydney, Avstralija
www.dfi.org/dfieventlp.asp?13385

27.-29.6.2022

IS-Cambridge 2022 — 10th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground
Cambridge, Združeno kraljestvo Velike Britanije in Severne Irske
www.is-cambridge2020.eng.cam.ac.uk/

Rubriko ureja • **Eva Okorn,** ki sprejema predloge za objavo na e-naslov: **gradb.zveza@siol.net**