

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 heuristično 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, via-dukte, nadvoze in podvoze. V mednarodnem prostoru se za vse našteje vrste objektov upo-

rablja 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-EP (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 nekatere indikatorje, 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 nadvožov, 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 obdobjnih pregledov (redni, glavni) in drugih pregledov (ob izteku garancijske dobe, detajlni) ter obdobjnih 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 pošodbah, 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).

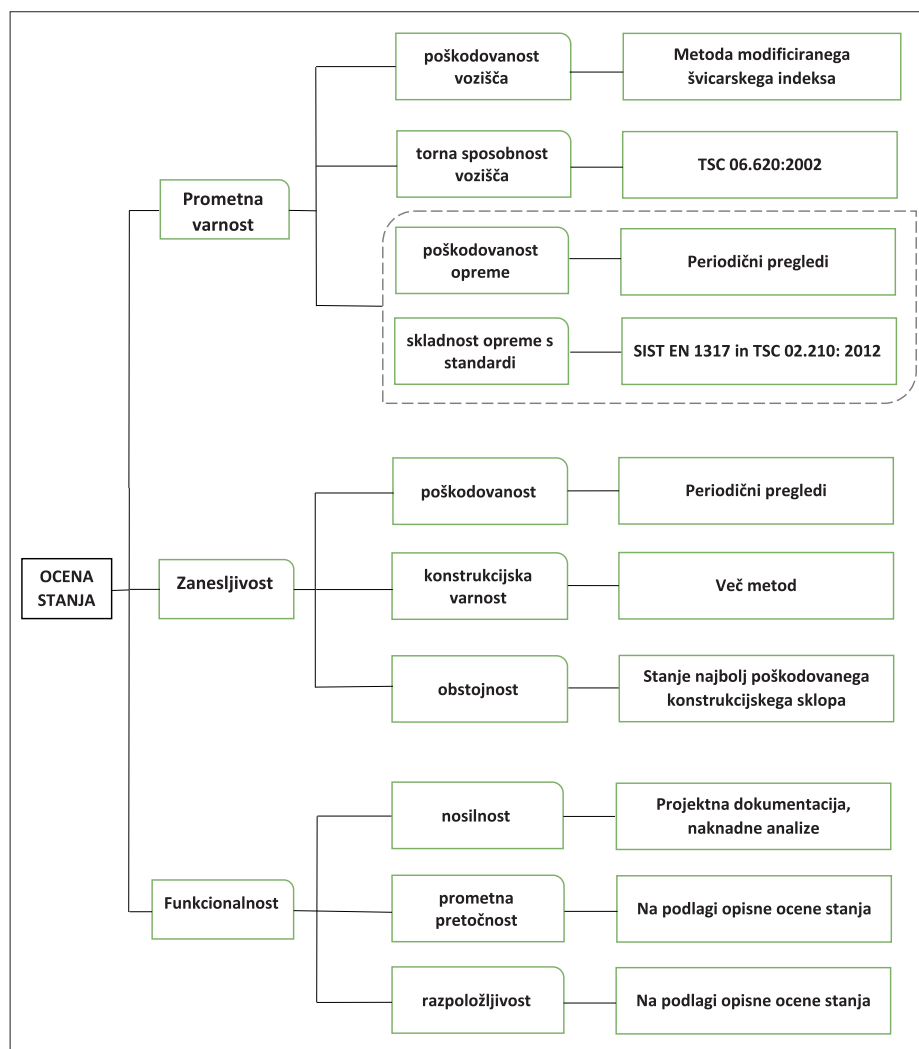
Indikator obstojnosti nam poda informacijo o predvideni hitrosti nadaljnjega propadanja mostu. To je v največji meri odvisno od obstoječega stanja, saj bolj poškodovani mostovi oziroma njihovi posamezni konstrukcijski sklopi propadajo bistveno hitreje od manj poškodovanih. Hitrost razvoja poškodb je 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 vred-

nosti 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 vozišča, 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 veta 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 smotno 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 pomembnim 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 obdobjnega 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 sub-

jektivnost 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 obdobjnimi ali drugimi ogledi bodisi na podlagi izračunov. To so dejanske vrednosti o dimenzijah poškodb, nosilnostih, širinah vozniških 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 obrav-

navamo. 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. močnejše vplivajo na propadanje vgrajenih materialov.

Pričakovane življenjske dobe¹ 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 propadanja 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 dvajset-letnih 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 tanjšje 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:

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

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 idealiziranim 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 obdobjnimi 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 obdobjnih 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, pogoje 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.

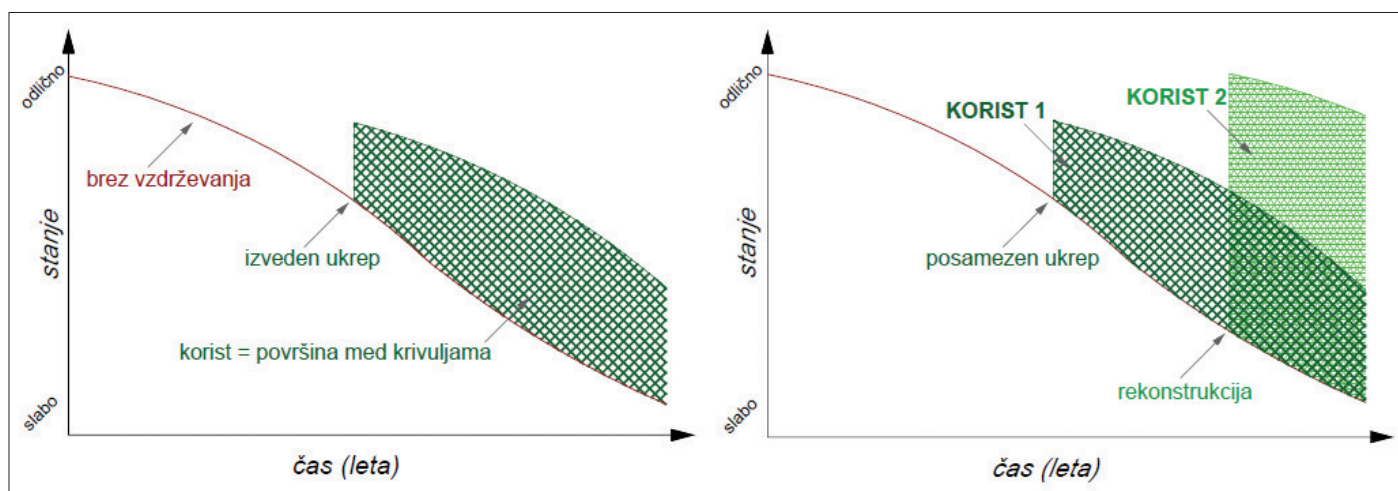
»Pogojni sprožilci« so uvedeni za potrebe izbire spremljevalnih ukrepov. Večinoma niso določeni strogo, saj želimo v času izvajanja glavnih ukrepov (in z njimi povezanih omejitev prometa) odpraviti vse tiste pomanjkljivosti in poškodbe na mostu, ki bi sicer v kratkem izkazale potrebo po izvedbi ukrepov.

»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 najprimernej-

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

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



Slika 2 • Grafični prikaz izračuna koristi.

šega, saj je potreben obseg vhodnih podatkov dokaj majhen, natančnost ocene stroškov pa zadovoljiva.

5.3.2 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

zaradi delnih ali popolnih zapor kot posledice njihovega slabega stanja. Izračun ciljne funkcije v splošni obliki zapišemo:

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

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.

definiramo obdobje koristi, najmanj 10 let daljše od obdobja programa ukrepov.

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 do-

datnega ukrepa raste eksponentno. Da je tovrsten izračun na osebnih računalnikih sploh mogoč, uporabljena ekspertna programska oprema uporablja heuristično 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.

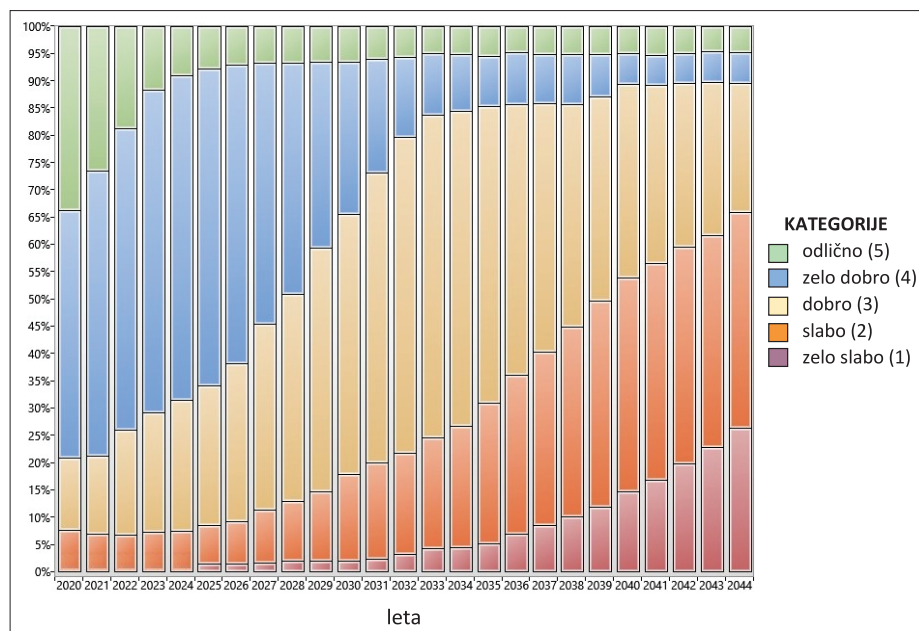
Na slikah 3, 4 in 5 so prikazane pričakovane bodoče vrednosti indikatorjev poškodovanosti za izbrano obdobje 25 let. Na diagramu je prikazan delež mostov s posamezno oceno, mostovi pa so razvrščeni v kategorije odlično (5), zelo dobro (4), dobro (3), slabo (2) in zelo slabo (1) stanje. Diagrami obravnavajo 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 najugodnejše, 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.

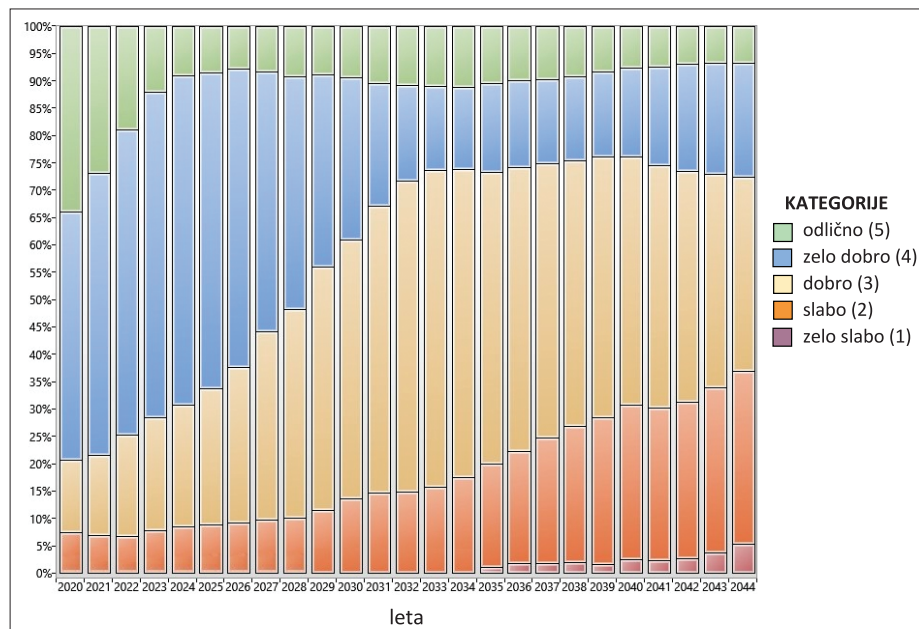
Povprečna poškodovanost mostov se viša tudi v primeru letnih proračunov v višini 30

mil. € (slika 5), vendar nam zgolj pregled stanja poškodovanosti za vse tri scenarije

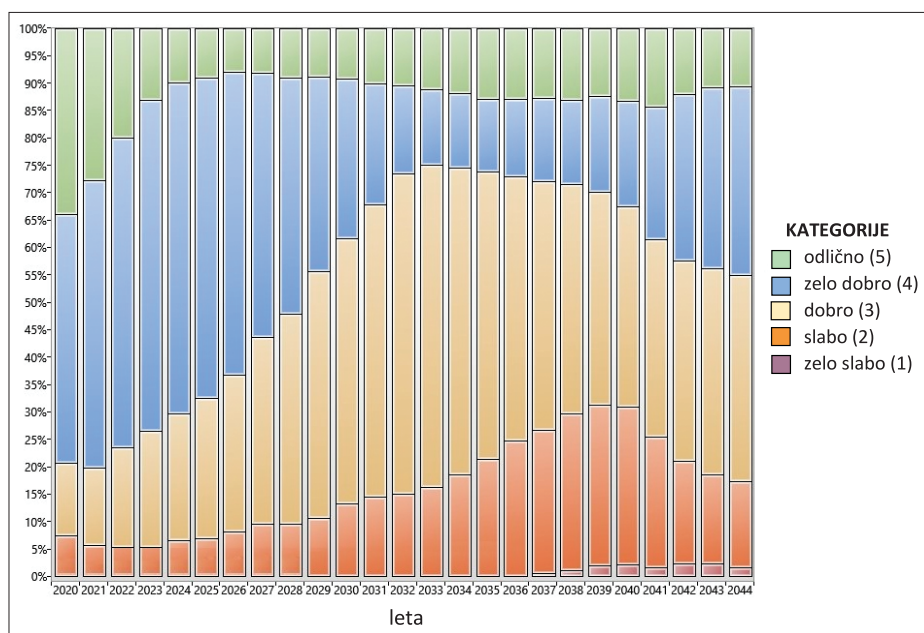
marsikaj prikrije. DARS ima v upravljanju relativno mlado cestno mrežo, zaradi česar je trenutno število objektov v odličnem in zelo dobrem stanju zelo visoko. Teh objektov še ni smiselno sanirati, zato čakamo, da se njihovo stanje poslabša do mere,



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 de-

leža objektov v kategoriji 3. Ker pa imamo v scenariju 30 mil. €/leto 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 pričla. 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 pravih odločitev je za učinkovito upravljanje infrastrukture torej ključnega pomena.

4 • SKLEP

Predstavljeni sistem je osrednji del celovitega upravljanja premostitvenih objektov na cestah v upravljanju DARS². 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. Upravljevalec 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 obdobjno 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 DRSL.

- 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 Development 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., Velandó, 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.