

VPLIV PRISOTNOSTI VODE NA PROPADANJE ARMIRANOBETONSKIH MOSTOV

INFLUENCE OF WATER ON DETERIORATION OF REINFORCED BRIDGES

asist. dr. Matej Kušar, univ. dipl. inž. grad.

matej.kusar@fgg.uni-lj.si

izr. prof. dr. Jana Šelih, univ. dipl. inž. grad.

jana.selih@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 620.193.15:625.745.1(497.4)

Povzetek | Stanje vseh vrst gradbenih objektov se z leti slabša, ob občasni ali stalni prisotnosti vode pa se hitrost njihovega propadanja še poveča. Med vsemi tipi gradbenih konstrukcij spadajo mostovi med vodi najbolj izpostavljene, zaradi česar je treba posvetiti vplivu prisotnosti vode na njihovo propadanje posebno pozornost. V ta namen smo analizirali podatke rednih in glavnih pregledov za preko tisoč armiranobetonskih mostov na državnih cestah v obdobju dvajsetih let. Analiza razpoložljivih historičnih podatkov je pokazala, da ima prisotnost vode pod mostovi vpliv le na propadanje njihovih podpornih konstrukcij, medtem ko na hitrost propadanja elementov prekladnih konstrukcij in cestišča nima vpliva.

Ključne besede: armiranobetonski mostovi, pregledi mostov, vpliv vode, propadanje

Summary | The condition of all types of structures is decreasing with time. If a structure is exposed to the presence of water, either permanently or temporarily, it can be observed that the deterioration rate of the structure increases. Bridges are extremely exposed to the presence of water; therefore special attention needs to be paid to the influence of water presence on the deterioration. With this in mind, the historical data obtained from the regular and main inspections were analysed for the group of more than 1000 structures within the state road network, for the time period of the last 20 years. The analysis showed that the presence of water influences only the deterioration of the substructure, while the superstructure and the bridge deck are not affected by this particular influence.

Keywords: reinforced concrete structures, bridge inspection, water influence, deterioration

1 • UVOD

Cestna infrastruktura predstavlja osnovo mobilnosti v Sloveniji kot tudi svetu. V primerjavi s preostalimi osnovni oblikami prometne infrastrukture (železnica, zračni in vodni promet), ki omogočajo le dostop do vnaprej predvidenih postaj, luk ali pristajališč, omogočajo ceste

neposreden dostop do izbrane lokacije. Cestna infrastruktura je tako nepogrešljiva pri vsakodnevnih uporabi večine prebivalstva, morebitne omejitve hitrosti, nosilnosti ali celo zapore cest, ki jih predpišemo zaradi njihove dotrajanosti, pa povzročajo gospodarsko

škodo in nejevoljo drugih uporabnikov. Na območju Republike Slovenije je v zadnjih letih večina zapor ali omejitev na cestah posledica slabega stanja cestnih mostov.

Podobno kot v večini evropskih držav ((Woodward, 2001), (Tenžera, 2012), (Yanew, 2013)) se tudi pri nas ((Žnidarič, 1990), (Žnidarič, 1992)) za določanje stanja mostov opravljajo periodični vizualni pregledi objektov. V tujini so se načini in obseg analiziranja tako zajetih

podatkov v zadnjih dveh desetletjih bistveno spremenili, medtem ko pri nas osnovo še vedno predstavlja sistem, razvit pred več kot dvajsetimi leti ((Žnidarič, 1990), (Žnidarič, 1992)). V naslednjih letih so se sicer na tem področju izvajali nekateri razvojni projekti ((Žnidarič, 2006a), (Žnidarič, 2006b)), žal pa se prenos pridobljenega znanja ni prenesel v prakso. Tako uporabljamo v Sloveniji od leta 1993 nespremenjeno metodologijo

pregledovanja in določanja stanja mostov. Čeprav je uporaba takšne metodologije neustrezna zaradi njene zastarelosti, pa ima tudi dobro lastnost. Na razpolago imamo namreč podatke o stanju mostov na državnih cestah za dvajsetletno obdobje, ki so se zajemali in obdelovali na enak način in jih lahko torej tudi enotno obdelujemo in analiziramo. Od leta 1993 se spreminjanje stanja mostov na slovenskih državnih cestah ni ni-

koli sistematično analiziralo. Zato je namen raziskovalnega dela, ki ga predstavljamo v tem prispevku, analiza spreminjanja oz. slabšanja stanja omenjene skupine objektov. Pred začetkom analize želimo določiti parametre oz. lastnosti obravnavanih objektov, ki bodo osnova za razvrstitev obravnavanega fonda mostov v skupine oz. kategorije, ter nato primerjati spreminjanje (slabšanje) njihovega stanja s časom.

2 • PREDMET ANALIZE

Na omrežju slovenskih državnih cest stoji nekaj manj kot 1300 mostov z razponom 5 m ali več. Med seboj se razlikujejo po uporabljenem materialu, prometni obtežbi, številu vozniških pasov, funkciji (podvozi, nadvozi, mostovi in viadukti), postavljeni so v različnih podnebnih pasovih. Kombinacije navedenih lastnosti, ki so značilne za posamezni most, določajo hitrost njegovega propadanja (Kušar, 2014). V članku analiziramo le enega od identificiranih vplivov, o katerem menimo, da ima znaten vpliv na hitrost propadanja objektov; to je prisotnost vode pod objekti; oz. ugotoviti želimo, ali nadvozi in podvozi, pod katerimi ni vode, propadajo z enako hitrostjo kot mostovi preko vodotokov, ob upoštevanju, da so vse druge okoliščine enake. Ker so podvozi in nadvozi na slovenskih državnih cestah grajeni skoraj izključno iz armiranega betona, se v analizi omejimo na armiranobetonske objekte.

2.1 Izbrani vplivi

Ob upoštevanju dejstva, da slovenske državne ceste predstavljajo skoraj izključno dvopasovnice, mostovi pa večinoma premoščajo manjše vodotoke, so dimenzije analiziranih objektov podobnih velikostnih razredov, zato jih lahko s stališča njihove velikosti obravnavamo enotno. Med analizo podatkov vseh mostov na državnih cestah smo ugotovili (Kušar, 2014), da prometna obtežba nima vpliva na hitrost propadanja konstrukcije. Zato mostov v nadaljevanju ne ločujemo glede na prometno obtežbo. Pregled in analiza podatkovne zbirke nadalje kaže, da stoji velika večina mostov v Sloveniji na območju celinskega podnebja, zato smo lahko ustrezno obravnavali le to vrsto objektov. Število nadvozov in podvozov v Sloveniji, ki ležijo na območju primorskega (35) in predvsem gorskega podnebja (11), je namreč premajhno za izvedbo ustrezne analize.

Med opravljanjem rednih in glavnih pregledov delimo posamezne mostove na posamezne konstrukcijske sklope; podporno konstrukcijo, prekladno konstrukcijo in cestišče. Ti sklopi so izpostavljeni posameznim vplivom z različno jakostjo. Tako je v primeru mostov preko vodotokov podpora konstrukcija v neposrednem stiku z vodo. Cestišče je neposredno izpostavljeno prometni obtežbi, medtem ko je prekladna konstrukcija navedenima vplivoma izpostavljena le posredno. Posamezni konstrukcijski sklopi obravnavanih objektov lahko posledično propadajo z različno intenziteto, zato jih v analizi obravnavamo ločeno.

Hitrost propadanja je lahko odvisna tudi od obstoječega stanja objekta ali njegovega posameznega konstrukcijskega sklopa. Nepoškodovani in manj poškodovani objekti so za večino zunanjih vplivov (abrazija, erozija, zmrzovanje, različne obtežne kombinacije) manj dovzetni od močnejše poškodovanih. Da bi določili hitrost propadanja objekta ali dela objekta kot funkcijo stanja objekta (ali dela objekta), smo vsak objekt (natančneje vsak konstrukcijski sklop) razvrstili v enega izmed štirih kakovostnih stanj, v odvisnosti od njegovega ratinga poškodovanosti. Izračun ratinga poškodovanosti je prikazan v naslednjem

razdelku, spisek izbranih vplivov in vrednosti, ki jih objekti lahko zavzamejo, pa je prikazan v preglednici 1.

Stanje vsakega izmed v nadaljevanju obravnavanih konstrukcijskih sklopov objektov lahko opišemo s funkcijo:

$$b_i = b_i(M_i, C_i, F_i, Ks_i, R_i) \quad (1)$$

2.2 Metodologija določanja stanja

Rating poškodovanosti se tako za celoten objekt kot njegov posamezni konstrukcijski sklop določi skladno z veljavno metodologijo ((Žnidarič, 1990), (Žnidarič, 1992)). Ta temelji na analizi ugotovljenih poškodb posameznega mostu, ki jih identificiramo med pregledom objekta. Poškodbe se za posamezne elemente objekta določajo ločeno, za skupno oceno stanja objekta ali njegovega konstrukcijskega sklopa pa se ocene posameznih elementov sklopa seštejejo. Tako na primer podpora konstrukcijo navadno sestavljajo vsaj temelji, oporniki in krila, lahko pa vsebuje tudi druge elemente. Vsak izmed elementov je lahko nepoškodovan, ima eno poškodbo ali več poškodb različnih tipov. Rating vsakega tipa poškodbe na vsakem elementu se določi kot mnogokratnik:

$$R_{jk} = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n B_j \cdot K_{1,k} \cdot K_{2,j,k} \cdot K_{3,j,k} \cdot K_{4,j,k} \quad (2)$$

VPLIV	ŠT. VREDNOSTI	VREDNOST
konstr. material, M	1	armirani beton (AB)
podnebje, C	1	celinsko (Ce)
funkcija objekta, F	2	most (M), podvoz/nadvoz (P)
konstr. sklop, Ks	3	podporna konstrukcija (K_{pod}), prekladna k. (K_{pre}), cestišče (K_{ces})
kakovostno stanje, R	4	odlično, dobro, zadovoljivo, zadostno

Preglednica 1 • Izbrani vplivi in njihove vrednosti

kjer je m število možnih vrst poškodb, n število elementov objekta, B_j osnovna vrednost poškodbe ali napake j , ki izraža možne posledice poškodbe materiala na nosilnost, trajnost in uporabnost elementa, $K_{1,k}$ korekcijski faktor pomena elementa k , na katerem je poškodba j , za zanesljivost mostu kot celote, $K_{2,j,k}$ korekcijski faktor jakosti poškodbe j na elementu k , $K_{3,j,k}$ korekcijski faktor razširjenosti poškodbe j na elementu k , $K_{4,j,k}$ korekcijski faktor, ki poudari nujnost intervencije zaradi ogrožene varnosti, uporabnosti ali trajnosti elementa k ali mostu kot celote zaradi poškodbe j .

Rating poškodovanosti posameznega konstrukcijskega sklopa K_{podr} , K_{prev} , K_{ces} se izračuna kot vsota ratingov njihovih posameznih elementov:

$$K = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n R_{j,k} = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n B_j \cdot K_{1,k} \cdot K_{2,j,k} \cdot K_{3,j,k} \cdot K_{4,j,k} \quad (3)$$

Korekcijske faktorje oziroma uteži $K_{2,j,k}$, $K_{3,j,k}$ in $K_{4,j,k}$ določi pregledovalec v sklopu pregleda, medtem ko sta uteži B_j in $K_{1,k}$ odvisni le od tipa poškodbe in elementa, na katerem se je poškodba pojavila. Poškodbe B_j so ocenjene z vrednostmi od 1,0 do 5,0, odvisno od nevarnosti tipa poškodbe na odpoved delovanja ali porušitev posameznega elementa ali konstrukcije kot celote. Z oceno 1,0 so na primer ovrednotene kolesnice na cestišču, s 3,0 korozija jekla za armiranje, z oceno 5,0 pa pretrg kabla za prednapenjanje:

$$B_j \in [1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0] \quad (4)$$

Velikostni razred uteži $K_{1,k}$ je odvisen od pomembnosti elementa za nosilnost konstrukcije. V primeru, da je to primarni nosilni element, ki mora vedno nositi svoj del obtežbe, je utež oz. relativna pomembnost večja kot v primeru sekundarnega nosilnega elementa, pri katerem se obtežba v primeru njegove odpovedi lahko prerazporedi na sosednje elemente. Glede na pomembnost lahko $K_{1,k}$ zavzame vrednost:

$$K_{1,k} \in [0,3; 0,7; 1,0] \quad (5)$$

Faktor jakosti poškodbe $K_{2,j,k}$ opisuje stadij poškodbe, ki je lahko začetni, progresivni, aktivni ali kritični. Faktor ni odvisen od obravnavanega elementa mostu, temveč od vrste poškodbe. Poškodbe so lahko po svoji naravi takšne, da se sčasoma bistveno ne večajo

ter dolgoročno ne zmanjšujejo nosilnosti in trajnosti, lahko pa so velike in s tendenco večanja, ki bi lahko vodila v zmanjšanje nosilnosti prizadetega elementa ali objekta kot celote. Faktor $K_{2,j,k}$ lahko zavzame vrednosti:

$$K_{2,j,k} \in [0,4; 0,6; 0,8; 1,0] \quad (6)$$

S faktorjem razširjenosti poškodbe $K_{3,j,k}$ določamo obseg (ali pogostost) pojavljanja poškodbe na določenem elementu objekta. Kjer tip poškodbe omogoča njeno površinsko vrednotenje z določitvijo razmerja med nepoškodovano in poškodovano površino, je vrednost faktorja določljiva z relativnim deležem površine. V določenih primerih, kot so na primer razpoke na krajnih opornikih, pa je izbira vrednosti faktorja prepuščena presoji pregledovalca, saj si z razmerjem med poškodovano in nepoškodovano površino ne moremo pomagati. Faktor $K_{3,j,k}$ lahko skladno z metodologijo zavzame vrednosti:

$$K_{3,j,k} \in [0,5; 0,8; 1,0] \quad (7)$$

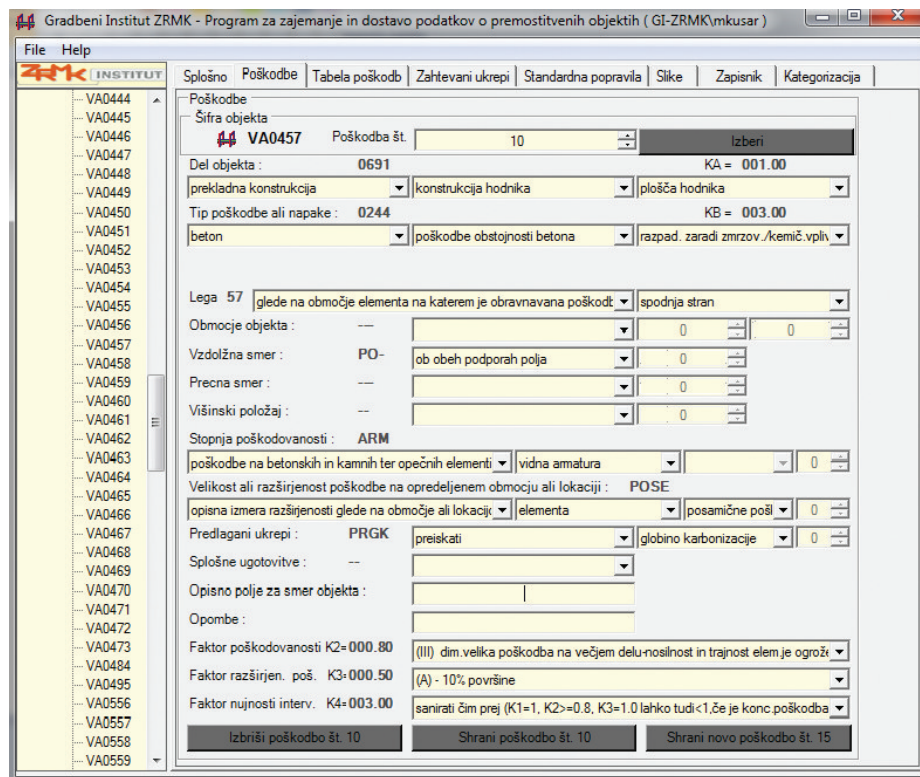
S faktorjem nujnosti intervencije $K_{4,j,k}$ najbolj vplivamo na rating posamezne poškodbe in s tem posledično tudi objekt kot celoto, saj so vrednosti tega faktorja lahko 1,0 (po-

pravilo poškodbe ni nujno, saj zaradi nje ne bo zmanjšana trajnost, uporabnost ali varnost mostu), 3,0 (poškodbo je treba sanirati čim prej, sicer je lahko v prihodnosti ogrožena nosilnost ali uporabnost ali trajnost mostu), 5,0 (poškodbo je treba sanirati takoj, ogrožena je nosilnost in trajnost mostu) in izjemoma tudi 10,0 (kadar zaradi poškodbe grozi nevarnost delne porušitve mostu). Zapis posamezne poškodbe v elektronski obliki je prikazan na sliki 1.

2.3 Pregled in urejanje analiziranih podatkov

Predmet predstavljene raziskave so podatki o stanju objektov (ratingi), zajeti med rednimi in glavnimi pregledi mostov na državnih cestah v Republiki Sloveniji med letoma 1993 in 2012. Podatke o njih smo pridobili pri Direkciji RS za ceste, ki je upravljavec objektov, pri njihovi interpretaciji pa smo si med drugim pomagali tudi z zapisniki terenskih pregledov, ki jih za direkcijo RS za ceste že vrsto let opravlja Gradbeni inštitut ZRMK, d. o. o. Interpretacija nekaterih nizov podatkov je bila potrebna zaradi nekonsistentnih ocen obsega in/ali intenzivnosti poškodb nekaterih pregledovalcev objektov.

V analizirani bazi podatkov smo namreč identificirali primere, ko je pregledovalec med



Slika 1 • Primer zapisa poškodbe v digitalni obliki (Vir: GI ZRMK, d. o. o.)

pregledom v določenem letu ocenjeval stanje elementov izjemno konservativno ter zato več sicer nekritičnih poškodb ocenil za nevarne in potrebne čim prejšnjega popravila. Rating poškodovanosti za takšen objekt je posledično glede na predhodni pregled skokovito narasel. Preglede v naslednjih letih so opravljali drugi, morda bolj izkušeni pregledovalci ter objekt in njegove dele ponovno ocenili z nižjimi vrednostmi ratingov poškodovanosti, ki so bili bolj skladni z vrednostmi predhodnih let. Kljub temu so vrednosti zapisanih ratingov slabše opravljenega oziroma ocenjenega pregleda v bazi podatkov ostale. V tovrstnih primerih so časovni trendi oz. spreminjanje ocene stanja objekta (in/ali njegovih delov) sčasoma ne-realni, kar je treba v analizi upoštevati.

Tudi ob visoki usposobljenosti pregledovalcev za izvedbo pregledov in oceno stanja objektov bodo pri njihovih ocenah vedno obstajale določene razlike. Pregledi so skoraj izključno vizualni, kar pomeni, da je ocena do določene mere subjektivna ((Gattulli, 2005), (Tenžera, 2012)). Vendar ta odstopanja ne smejo biti prevelika, drugače analiziramo nezanesljive podatke. Da bi izločili podatke, ki močno odstopajo od sicer identificiranih trendov, smo v naslednjem koraku opravili sistematični pregled in urejanje podatkov.

Da bi identificirali prej opisane podatkovne nize, smo za posamezne konstrukcijske sklope analiziranih objektov najprej določili hitrost propadanja (oz. naraščanje ratinga poškodovanosti z leti) z metodo linearne regresije (slika 2). Posameznemu objektu smo za vsako leto (x_t) določili vrednost ratinga ($y_{t,lin}$) z izrazom:

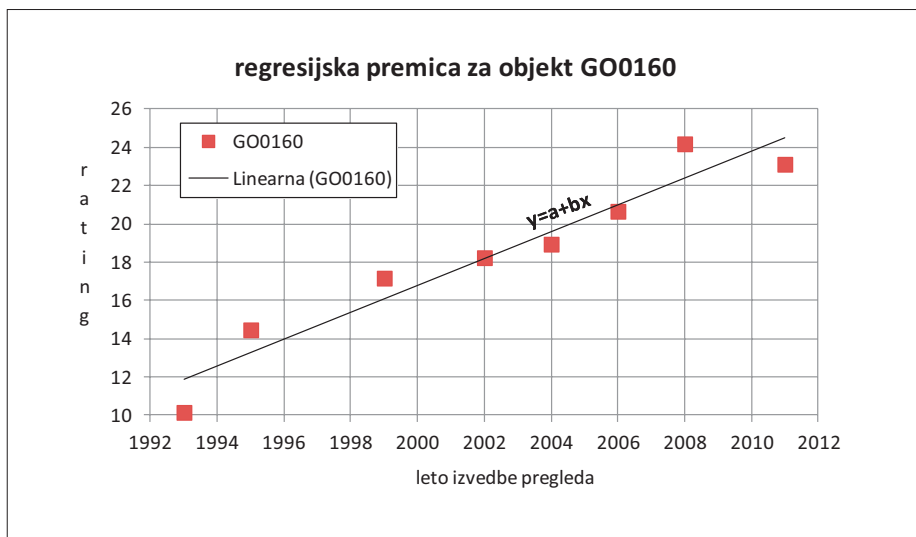
$$y_{t,lin} = a + b \cdot x_t, \quad (8)$$

kjer parametra a in b (hitrost propadanja) določimo z metodo najmanjših kvadratov:

$$b = \frac{\sum_{t=1}^s (x_t - \bar{x}) \cdot (y_t - \bar{y})}{\sum_{t=1}^s (x_t - \bar{x})^2}, \quad (9)$$

$$a = \bar{y} - b \cdot \bar{x}$$

x_t je leto izvedbe pregleda in y_t vrednost ratinga poškodovanosti v letu t , $\bar{x} = \frac{1}{s} \cdot \sum_{t=1}^s x_t$ in $\bar{y} = \frac{1}{s} \cdot \sum_{t=1}^s y_t$ ter s število podatkovnih točk.



Slika 2 • Primer določitve regresijske premice za rating poškodovanosti mostu s šifro G00160

Za vse objekte smo izračunali standardno napako vrednosti dejanskih ratingov glede na vrednosti ratingov, napovedane ob pomoči izrazov (8) in (9). Izračun je bil narejen za konstrukcijske sklope vseh obravnavanih objektov. Enačba za standardno napako (SE) napovedane vrednosti $y_{t,lin}$ je:

$$SE = \sqrt{\frac{1}{(s-2)} \cdot \left[\sum_{t=1}^s (y_t - \bar{y})^2 - \frac{\left[\sum_{t=1}^s (x_t - \bar{x}) \cdot (y_t - \bar{y}) \right]^2}{\sum_{t=1}^s (x_t - \bar{x})^2} \right]} \quad (10)$$

V primerih, ko je vrednost standardne napake nizka, privzamemo, da so podatki zanesljivi, zato jih lahko uporabljamo za nadaljnje analize. V primerih, ko je standardna napaka za posamezni niz podatkov visoka, pa vsebuje niz enega ali več podatkov, ki izrazito odstopajo od splošnega trenda, ki ga niz sicer izkazuje. V tem primeru so nekateri podatki verjetno nepravilni (ne ustrezajo dejanskemu stanju) in zato vidno vplivajo na potek regresijske premice, ki opisuje hitrost propadanja. Posamezni podatkovni niz smo ocenili za zanesljivega, če je bil izpolnjen pogoj:

$$\frac{SE}{y} \leq 0,3 \quad (11)$$

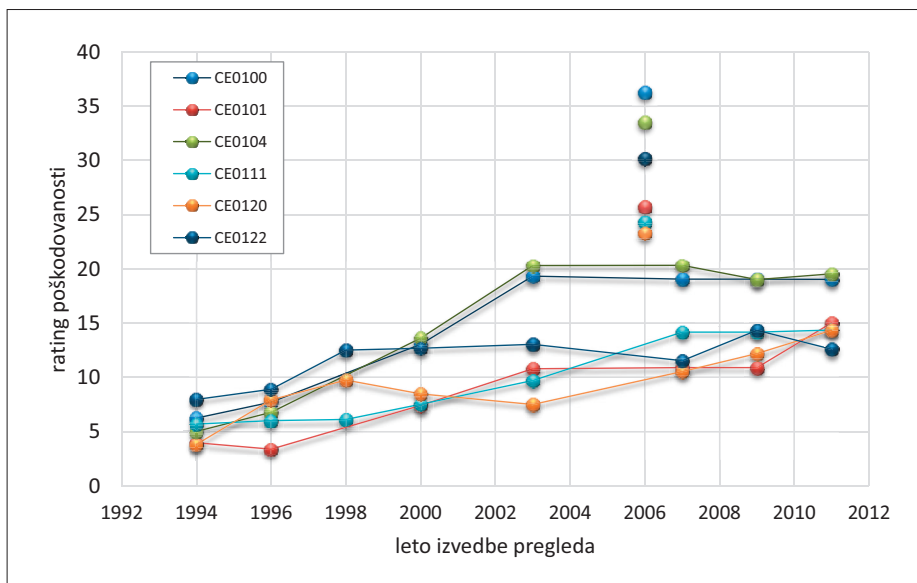
V primerih, ko pogoj ni bil izpolnjen, smo z namenom izboljšanja zanesljivosti rezultatov regresijskih premic iz posameznega niza podatkov odstranili tisto vrednost y_t , ki je najbolj vplivala na velikost standardne napake niza oziroma se je ta po odstranitvi vrednosti y_t

najbolj zmanjšala. Zagotoviti želimo, a) da posamezni niz podatkov nima več kot enega nezanesljivega podatka in b) da odstranitev tega podatka vidno zniža (za vsaj 30%) izhodiščno vrednost standardne napake. Zato smo predpisali pogoj:

$$1,3 \cdot (SE_1 / \bar{y}) \leq (SE_0 / \bar{y}), \quad (12)$$

kjer je SE_t standardna napaka po odstranjenem podatku, ki najbolj izstopa, SE_0 pa izhodiščna vrednost standardne napake pri vseh upoštevanih podatkih v nizu. Če pogoj (12) ni izpolnjen, je nezanesljivih vrednosti v nizu podatkov več. V tovrstnih primerih odstranitev enega samega podatka v nizu ne bi bistveno vplivala na rezultate analize, odstranitev več podatkov pa bi pomenila prevelik poseg v zbirko podatkov in s tem vpliv na končni rezultat. Zato takšnih nizov podatkov v nadaljnjih analizah nismo upoštevali.

Z izvedbo opisanega postopka smo bistveno izboljšali zanesljivost podatkov, ki smo jih uporabili za nadaljnjo analizo. Na sliki 3 so prikazane vrednosti ratingov za šest objektov na celjskem območju, na katerih je bilo med letoma 1994 in 2011 opravljenih devet rednih in glavnih pregledov. Vidimo lahko, da je leta 2006 izvajalec pregledov vsem mostovom določil izjemno visoke vrednosti ratingov poškodovanosti, ki so vidno odstopale od trenda vrednosti tako preteklih kot tudi kasnejših pregledov. Z uporabo zgoraj opisanega postopka in enačb smo vrednosti za leto 2006 iz obravnavanih nizov podatkov izločili, s tem pa vrednosti standardnih napak bistveno znižali (posameznim nizom, glede na njihovo izhodiščno vrednost, tudi do 70 %).



Slika 3 • Primeri naraščanja ratinga poškodovanosti za 6 objektov med letoma 1993 in 2011 po odstranitvi skupine podatkov (v letu 2006), ki najbolj odstopajo od regresijske premice

Kot smo opisali, smo analizirali vse nize podatkov. Primer niza podatkov za vse tri konstrukcijske sklope izbranega mostu z oznako G00016 je prikazan v preglednici 2. Izmed skupno 4956 analiziranih nizov jih je le 52 % izpolnilo pogoj enačbe (11), medtem ko so preostali nizi imeli vsaj en po podatek, ki je izrazilo odstopal od regresijske premice. Po odstranitvi najbolj nezanesljivega podatka je zadostilo pogoju enačbe (12) nadaljnjih 41 % nizov, medtem ko preostalih 7 % bodisi ni izpolnilo nobenega izmed pogojev ali pa je niz podatkov po odstranitvi postal prekratek (manj kot tri podatkovne točke) za nadaljnjo analizo.

2.4 Določitev povprečne letne stopnje propadanja

Izmed 1282 mostov na slovenskih državnih cestah je 899 armiranobetonskih mostov in 150 armiranobetonskih podvozov in nadvozov. Ti večinoma stojijo v celinskem podnebju, medtem ko je manjši del v primorskem ali alpskem podnebju. V zadnje omenjenem podnebju pasu stoji le 11 nadvozov in podvozov, medtem ko jih je na območju primorskega podnebnja 35, kar je premajhno število za izvedbo ustrezne analize podatkov. Zato smo analizirali podatke za 708 mostov ter 100 podvozov in nadvozov z območja celinskega podnebnja.

Za izbrane objekte smo nizom ratingov poškodovanosti določili regresijske premice za posamezne konstrukcijske sklope, pri čemer smo analizirali le nize, ki so zadostili enačbama (11) ali (12). Iskali smo naklon premic b , ki nam dejansko poda povprečno letno stopnjo večanja poškodovanosti posameznega niza podatkov p . Naklon premic b določimo z izrazom:

$$b_p = \frac{\sum_{t=1}^s (x_{p,t} - \bar{x}_p) \cdot (y_{p,t} - \bar{y}_p)}{\sum_{t=1}^s (x_{p,t} - \bar{x}_p)^2}, \quad (13)$$

kjer je $x_{p,t}$ leto izvedbe pregleda in $y_{p,t}$ vrednost ratinga poškodovanosti v letu t za niz p , \bar{x}_p in \bar{y}_p pa sta njuni srednji vrednosti.

Po izračunu povprečne letne stopnje večanja poškodovanosti posameznih nizov podatkov smo nizom z enakimi kombinacijami vplivov določili povprečno hitrost večanja \bar{b} :

$$\bar{b}(M, Cl, F, Ks, R) = \frac{\sum_{i=1}^r b_{p,i}}{r} \quad (14)$$

$$r = r(M, Cl, F, Ks, R), \quad (15)$$

kjer je r število nizov z enako kombinacijo vplivov.

Meje kakovostnih stanj objektov R smo določili s povprečnim ratingom poškodovanosti nizov v analiziranem obdobju. Intervale kakovostnih stanj smo za posamezne konstrukcijske sklope določili različno, kot je razvidno tudi iz preglednice 3. Zgornjo mejo še zadovoljivega

SIFRA OBJEKTA	GRADNJA	REKONSTR.	PREGLED	OCENA	RATING SPODNJE	RATING PREKLADJE	RATING CESTIŠČA	RATING OPREME	RATING SKUPNI
G00016	1946		1994	4	3,89	1,10	0,32	0,25	5,56
G00016	1946		1996	4	4,41	0,20	0,00	0,40	5,01
G00016	1946		2000	4	4,136	0,00	0,00	0,45	4,586
G00016	1946		2003	4	4,246	0,20	1,04	0,45	5,936
G00016	1946		2005	4	5,106	2,98	2,248	0,45	10,784
G00016	1946		2007	3	6,902	3,58	2,108	0,58	13,17
G00016	1946		2009	3	6,902	3,58	2,204	0,58	13,266
G00016	1946		2011	3	10,104	3,58	2,004	0,48	16,168

Preglednica 2 • Primer izpisa ratingov iz baze podatkov za objekt G00016 (vir: DRSI)

kakovostnega stanja smo za posamezni sklop določili pri tisti povprečni vrednosti ratinga poškodovanosti, pri kateri po presoji pregledovalcev s čezmerno hitrostjo propadajo material in s tem vgrajeni elementi. Za cestišče je to vrednost 6, za podporno konstrukcijo in prekladno konstrukcijo 9. Posledično so za sklop cestišča izbrani intervali kakovostnih stanj dolgi dve enoti ratinga poškodovanosti, za spodnjo in zgornjo konstrukcijo pa tri enote. Na opisani način smo za vse kombinacije obravnavanih vplivov dobili vrednosti letnih stopenj slabšanje stanja objekta (preglednica 3).

Za potrebe nadaljnje analize smo dobljene rezultate uporabili za izračun časa, ki ga nov objekt, ki je izpostavljen izbrani kombinaciji vplivov, potrebuje za doseg določene stopnje poškodovanosti. Čas smo določili kot odvisno spremenljivko stopnje poškodovanosti (R) in ga definirali z odsekoma linearno funkcijo:

– za cestišče:

$$t(R) = \left. \begin{cases} \frac{R}{b_{(0,2)}}; R \in [0,2) \\ \frac{2}{b_{(0,2)}} + \frac{R-2}{b_{(2,4)}}; R \in [2,4) \\ \frac{2}{b_{(0,2)}} + \frac{2}{b_{(2,4)}} + \frac{R-4}{b_{(4,6)}}; R \in [4,6) \\ \frac{2}{b_{(0,2)}} + \frac{2}{b_{(2,4)}} + \frac{2}{b_{(4,6)}} + \frac{R-6}{b_{(6,8)}}; R \in [6,8) \end{cases} \right\} \quad (16)$$

– za podporno konstrukcijo in prekladno konstrukcijo:

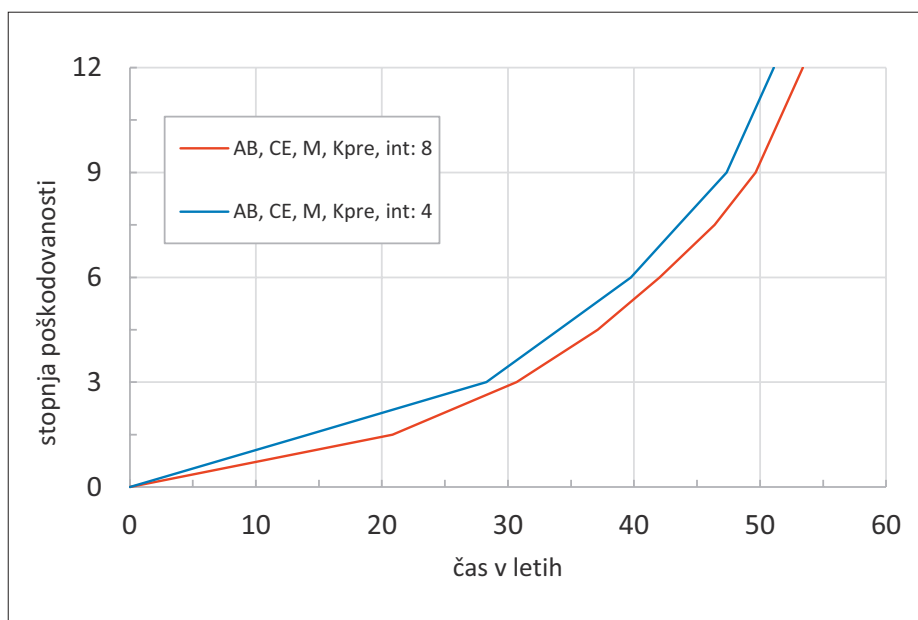
$$t(R) = \left. \begin{cases} \frac{R}{b_{(0,3)}}; R \in [0,3) \\ \frac{3}{b_{(0,3)}} + \frac{R-3}{b_{(3,6)}}; R \in [3,6) \\ \frac{3}{b_{(0,3)}} + \frac{3}{b_{(3,6)}} + \frac{R-6}{b_{(6,9)}}; R \in [6,9) \\ \frac{3}{b_{(0,3)}} + \frac{3}{b_{(3,6)}} + \frac{3}{b_{(6,9)}} + \frac{R-9}{b_{(9,12)}}; R \in [9,12) \end{cases} \right\} \quad (17)$$

Vrednosti $t(R)$, ki jih določimo z enačbama (16) in (17), lahko prikazemo v obliki diagramov. Ti podajajo čas, potreben za povečanje stopnje poškodovanosti od časa, ko je bil zgrajen, do izbrane vnaprej določene vrednosti, v odvisnosti od kombinacije vplivov, ki veljajo za posamezni obravnavani objekt.

Ker so koeficienti b določeni kot povprečne vrednosti hitrosti propadanja na pripadajočih intervalih, vsebuje določitev časov ob pomoči izrazov (16) in (17) določeno negotovost, ki se ji zaradi narave obstoječega načina pridobivanja podatkov o stanju objektov ne moremo izogniti.

podnebje	funkcija	konstrukcijski sklop	povp. rating poškodovanosti	število analiziranih k. sklopov	letni prirastek poškodovanosti
celinsko	podvoz ali nadvoz	podporna konstrukcija	0~3	39	0,14
			3~6	44	0,17
			6~9	11	0,22
			9~12	6	0,77
		prekladna konstr.	0~3	49	0,10
			3~6	25	0,28
			6~9	11	0,50
			9~12	12	0,55
		cestišče	0~2	34	0,11
			2~4	39	0,20
			4~6	20	0,31
			6~8	6	0,76
	most	podporna konstrukcija	0~3	168	0,15
			3~6	258	0,25
			6~9	170	0,40
			9~12	111	0,79
		prekladna konstr.	0~3	289	0,11
			3~6	177	0,26
			6~9	110	0,39
			9~12	106	0,80
		cestišče	0~2	251	0,10
			2~4	282	0,22
			4~6	113	0,31
			6~8	58	0,48

Preglednica 3 • Povprečni letni prirastki poškodovanosti objektov na območjih celinskega podnebja



Slika 4 • Primerjava rezultatov v primeru analize podatkov s 4 in 8 intervali

2.5 Možnost zmanjšanja negotovosti rezultatov

Da bi zmanjšali negotovost rezultatov, smo ugotavljali učinek zgostitve intervalov na končni rezultat. To smo preverili za prekladne konstrukcije mostov, kjer je število analiziranih podatkovnih nizov največje. Število intervalov smo povečali s 4, ki jih obravnava enačba (17), na 8 in s tem dolžino posameznega intervala zmanjšali s 3 na 1,5 enote. Način

izračuna je ostal enak. Izkazalo se je, da so rezultati povsem primerljivi (slika 4), saj doseže prekladna konstrukcija z izbrano kombinacijo vplivov rating poškodovanosti 12: v primeru analize s 4 intervali v 51 letih, v primeru analize podatkov z 8 intervali pa v 53 letih.

Zgostitev intervalov pa ima lahko na kakovost rezultatov tudi negativne učinke. V primeru majhnega števila podatkovnih nizov za katero izmed izbranih kombinacij vplivov lahko že en nekon-

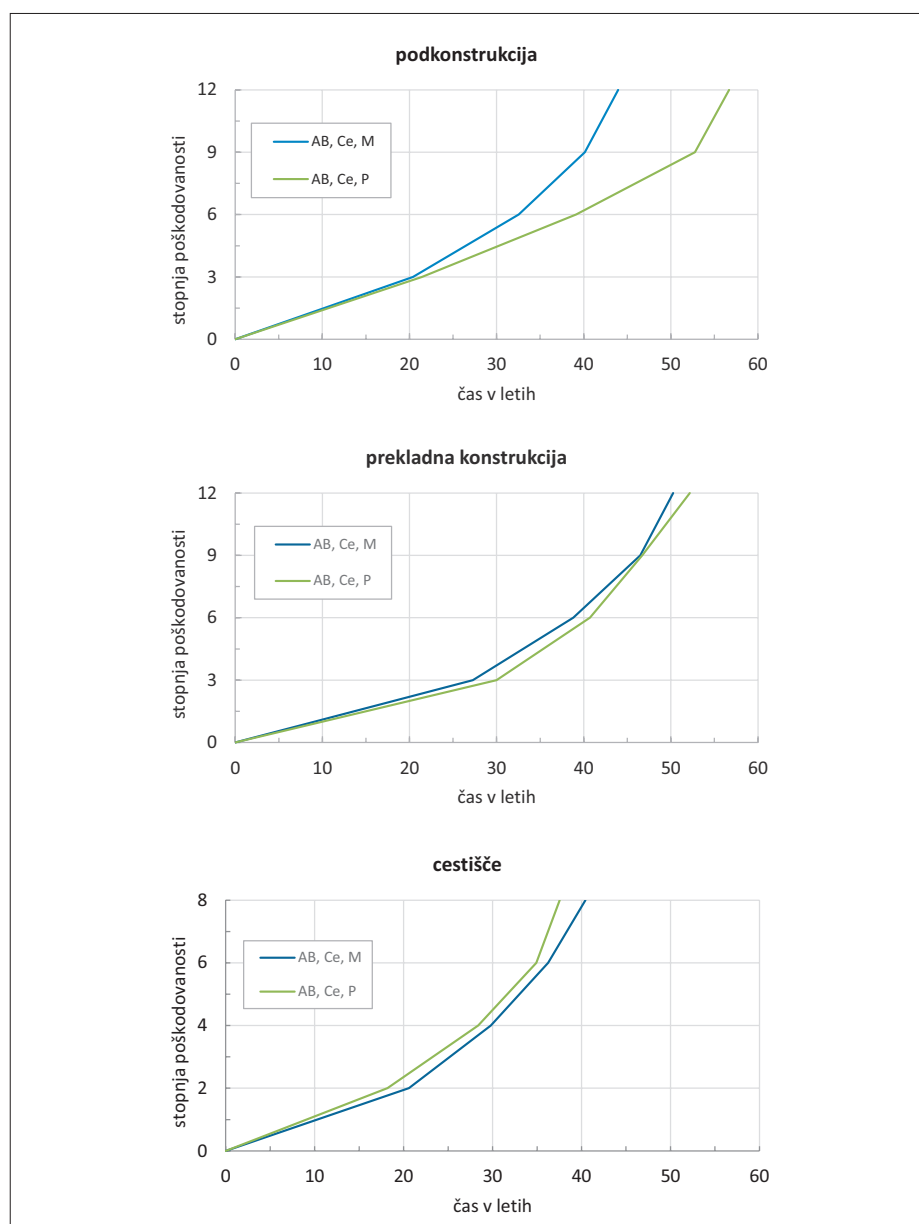
sistenten podatkovni niz bistveno spremeni izračunano hitrost večanja poškodovanosti ter s tem vpliva na končni rezultat. Ker imamo za analiziranje nadvozov in podvozov na razpolago dokaj majhno število podatkov, bi zgostitev intervalov lahko zmanjšala kakovost oziroma zanesljivost rezultatov. Zato smo se odločili, da podatke za vse analizirane objekte razvrstimo zgolj v štiri kakovostna stanja, kot je bilo predstavljeno v poglavju 2.1.

3 • REZULTATI ANALIZE

Na podlagi narejene analize podatkov smo določili pričakovani potek propadanja analiziranih tipov mostov. Rezultati kažejo (slika 5), da prisotnost tekoče vode pod objekti vidno vpliva le na hitrost propadanja sestavnih elementov podporne konstrukcije. Ti pri mostovih zaradi neposrednega stika z vodo in z njo povezane erozije, abrazije in mehanskih udarcev propadajo hitreje kot podporne konstrukcije nadvozov in podvozov, pri katerih naštetih zunanjih vplivov ni. Analiza nadalje kaže, da dosežejo te podporne konstrukcije mejno stopnjo poškodovanosti, ki smo jo določili pri vrednosti ratinga poškodovanosti 12, približno 35 % počasneje kot podkonstrukcije mostov. Iz dobljenih rezultatov ugotavljamo tudi, da propadajo prekladne konstrukcije obeh vrst obravnavanih objektov z enako hitrostjo in ne glede na njihovo kakovostno stanje. Vpliv tekoče vode pod mostovi (ki se lahko odrazi kot povišana stopnja vlažnosti ozračja) torej na hitrost propadanja teh konstrukcij nima vidnega vpliva.

Cestišče je edini od obravnavanih konstrukcijskih sklopov, ki je neposredno izpostavljen prometni obtežbi. Kot smo navedli že uvodoma (Kušar, 2014), pa ta ne vpliva na hitrost propadanja elementov cestišča. Atmosferski vplivi kot prevladujoč dejavnik propadanja delujejo na cestiščne elemente mostov, nadvozov in podvozov enako, zato oboji izkazujejo enak trend propadanja. Trend se začne razlikovati šele, ko stopnja poškodovanosti preseže vrednost 6, vendar lahko to opažanje pripišemo majhnemu številu analiziranih cestišč nadvozov in podvozov. Analizirali smo namreč lahko le 6 objektov s takšno kombinacijo vplivov (preglednica 3), zaradi česar so ti rezultati manj zanesljivi, kar moramo pri njihovi interpretaciji upoštevati.

Iz diagramov na sliki 5 je razvidno, da se z večanjem stopnje poškodovanosti vseh konstrukcijskih sklopov večja tudi hitrost njihovega



Slika 5 • Prikaz pričakovanega večanja stopnje poškodovanosti mostov in podvozov/nadvozov s časom za podporno konstrukcijo, prekladno konstrukcijo in cestišče v odvisnosti od izbranih vplivov (armiranobetonska konstrukcija, celinsko podnebje)

nadaljnega propadanja. To v splošnem velja za vse vrste gradbenih objektov, kar potrjujejo tudi druge raziskave ((Akgul, 2005), (Li,

2005), (Moncmanova, 2007)), za predstavljeno analizo pa pomeni določeno potrditev, da dobljeni rezultati, tudi v primeru manj

zanesljivih vhodnih podatkov, verodostojno odražajo trende propadanja premostitvenih konstrukcij.

4 • SKLEP

Za učinkovito upravljanje mostov jih moramo redno spremljati, analizirati njihovo stanje in ukrepati na osnovi dobljenih rezultatov. Pri tem je v veliko pomoč ustrezno strukturirana zbirka podatkov, s katero lahko ocenimo trende spreminjanja stanja objektov kot celot in njihovih posameznih delov s časom.

Predstavljena analiza obravnava podatke, zajete med rednimi in glavnimi pregledi mostov, podvozov in nadvozov na slovenskih državnih cestah v 20-letnem obdobju.

Kot končni rezultat pada dobo, v kateri posamezni objekt ali njegov konstrukcijski sklop v povprečju doseže določen rating poškodovanosti, v odvisnosti od značilnosti tega objekta in trenutnega ratinga poškodovanosti. S tem lahko dokaj zanesljivo določimo tudi pričakovani proces nadaljnega propadanja za vse obravnavane tipe mostov. Hkrati lahko določimo, s kakšno intenziteto posamezni vplivi učinkujejo na hitrost propadanja.

Prisotnost vode pod mostovi vidno vpliva na hitrost propadanja elementov njihove podporne konstrukcije. Analiza podatkov je pokazala, da dosežemo mejno stopnjo poškodovanosti podporne konstrukcije armiranobetonskih mostov 35 % hitreje kot pri armiranobetonskih podvozih in nadvozih. Hkrati pa elementi prekladne konstrukcije in cestišča propadajo enako hitro pri vseh tipih armiranobetonskih objektov. Ugotovitve opravljene analize bi upravljavci objektov lahko upoštevali pri oblikovanju prednostnih list objektov za sanacijo, kjer bi poleg obstoječega stanja objektov upoštevali tudi trend njihovega pričakovanega nadaljnega propadanja.

5 • ZAHVALA

Zahvaljujemo se Direkciji Republike Slovenije za infrastrukturo za dostop do analiziranih

podatkov in Gradbenemu inštitutu ZRMK, kjer je prvi avtor večinsko zaposlen, za program-

sko opremo in pridobljeno strokovno znanje iz tematike članka.

6 • LITERATURA

- Akgul, F., Frangopol, D. M., Lifetime performance analysis of existing reinforced concrete bridges II: Application. *Journal of infrastructure systems*, Vol. 11, (2), 129–141, 2005.
- Gattulli, V., Chiaramonte, L., Condition Assessment by visual inspection for a Bridge Management System, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 20, 95–107, 2005.
- Kušar, M., Razvoj sistema za upravljanje s premostitvenimi objekti na cestah in avtocestah. Doktorsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 143, 2014.
- Moncmanova, A., Environmental deterioration of materials. WIT Press, Southampton, 312, 2007.
- Li, C. Q., Melchers, R.E., Time-dependent risk assessment of structural deterioration caused by reinforcement corrosion. *ACI structural journal*, Vol. 102, (5), 754–762, 2005.
- Tenžera, D., Puž, G., Radić, J., Visual inspection in evaluation of bridge condition. *Gradevinar*, Vol. 64, 717–726, 2012.
- Woodward, R. J., Cullington, D. W., Daly, A. F., Vassie, P. R., Haardt, P., Kashner, R., Astudillo, R., Velandi, 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, 227, 2001.
- Yanev, B., Richards, G., Designing Bridge Maintenance on the Network and Project Levels. *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 9, 349–363, 2013.
- Žnidarič, J., Terčelj, S., Marolt, J.: Določitev standardov uporabnosti cestnih mostov – številčna ocena stanja mostov – rating. Ljubljana. Zavod za raziskavo materiala in konstrukcij ZRMK, 50, 1990.
- Žnidarič, J., Bevc, L., Capuder, F., Marolt, J., Srpčič, J., Terčelj, S., Žnidarič, A., Vojska, J., Vrednotenje varnosti cestnih mostov (Inženirske osnove za računalniško obdelavo poročil o pregledu mostov), Zavod za raziskavo materiala in konstrukcij ZRMK, 43, 1992.
- Žnidarič, J., Določanje ratinga betonske konstrukcije pri cestnih mostovih in viaduktih. Vzdrževanje, zaščita in popravila betonskih konstrukcij, Zbornik referatov, Lipica, 9.–10. marec 2006, 43–51, 2006a.
- Žnidarič, A., Lavrič, I., Pagon, E., Optimizirano vrednotenje mostnih konstrukcij – zaključki projekta SAMARIS. 8, Slovenski kongres o cestah in prometu, Portorož, 25.–27. oktober 2006, 879–886, 2006b.