

dr. Primož Pavšič, univ. dipl. kem.
primoz.pavsic@gi-zrmk.si
Gradbeni inštitut ZRMK, d. o. o.,
Dimičeva 12, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek
UDK 625.042:691.16

MODELIRANJE IZGUBE UPORABNOSTI IN OCENA NAVIDEZNE STAROSTI ASFALTNIH VOZIŠČ NA OSNOVI VIZUALNE OCENE STANJA

MODELING LOSS OF SERVICEABILITY AND ASSESSMENT OF APPARENT AGE OF ASPHALT PAVEMENTS ON THE BASIS OF VISUAL CONDITION ASSESSMENT

Povzetek

Pod vplivi prometnih obremenitev in okoljskih vplivov se kakovost vozišč stalno slabša. Z uporabo modificiranega švicarskega indeksa MSI lahko ocenimo in spremljajmo staranje vozišča, sposobnost zagotavljanja njegove funkcije pa lahko opredelimo z izgubo uporabnosti vozišča. Prispevek podaja predlog nove modelne funkcije za opredelitev staranja vozišča oziroma njegove izgube uporabnosti na osnovi vizualne ocene stanja vozišča (MSI) in določitev njegove navidezne starosti glede na predlagani model staranja vozišč.

Ključne besede: vozišče, ocena stanja, MSI, model

Summary

Under the influence of traffic load and environmental conditions, pavements continuously deteriorate. Using the modified Swiss index (MSI), we can assess and monitor pavement aging, while its functionality can be defined by the loss of serviceability. The article presents a proposed new model function for describing pavement aging or loss of serviceability with the assessment of the pavement condition using MSI and the determination of the apparent pavement age, based on the proposed model of pavement aging.

Key words: pavement, condition assessment, MSI, model

1 UVOD

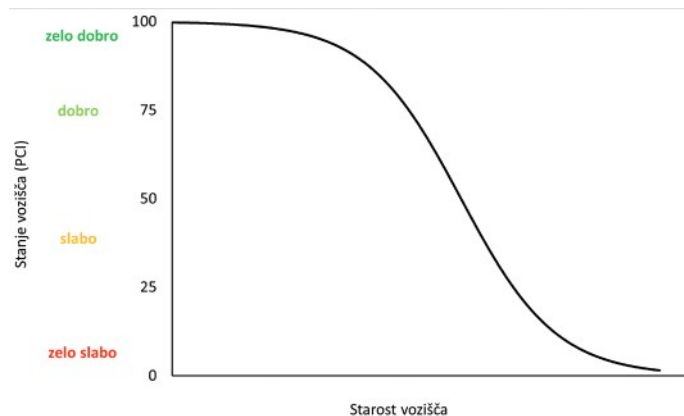
Za zagotavljanje primerne trajnosti vozišč se pri načrtovanju in gradnji le-teh upoštevajo prometne obremenitve in njihova predvidena rast, zunanji dejavniki, kot so podnebne razmere, in geometrija predvidenega vozišča [Žmavc, 2010]. Na osnovi teh podatkov se tako dimenzionira voziščna konstrukcija, pri čemer se običajno upošteva 20-letna planska (življenjska) doba vozišča [Žmavc, 2010]. Pod predvidenimi prometnimi obremenitvami in zunanjimi dejavniki se takšno vozišče seveda stara, pri čemer na vozišču nastajajo različne poškodbe ([AASTHO, 1993], [Joslin, 2019], [Majeed, 2019], [Sidess, 2020]). Poznavanje stanja kot tudi predvidevanje hitrosti propadanja vozišča pa sta ključni za planiranje vzdrževanja, obnov in potrebnih sredstev [Jamnik, 2003]. Ena izmed metod ugotavljanja stanja cest je vizualna ocena stanja voznih površin po metodologiji modificiranega švicarskega indeksa MSI (angl. Modified Swiss Index). Pri tem se ocenjujejo različni tipi poškodb asfaltne vozne površine: razpokanost, obrabljenost, zakrpanost in poškodbe z udarnimi jamami. Na podlagi njihove jakosti in obsežnosti pa se lahko izračuna indeks MSI, ki dosega vrednost 0 do 9, pri čemer vrednost 0 pomeni brez poškodb, 9 pa najslabše možno stanje ([Jamnik, 2003], [Krže, 2020], [Žmavc, 2010]). Glede na vrednost MSI in prometno obremenitev (PLDP - povprečni dnevni letni promet) lahko stanje posameznega vozišča razvrstimo v 5 razredov, in sicer: zelo dobro, dobro, mejno, slabo in zelo slabo (preglednica 1 [Zupan, 2016]). Lahko pa se razredi stanja določijo tudi po drugačni metodologiji, prilagojeni specifičnim zahtevam posameznega cestnega omrežja [Krže, 2020].

Prometna obremenitev (PLDP)	Razredi stanja vozišča na državnih cestah (vrednosti MSI)				
	Zelo slabo	Slabo	Mejno	Dobro	Zelo dobro (pod)
Nad 10.000	Nad 2,4	1,6-2,4	1,0-1,6	0,4-1,0	Pod 0,4
5.000 - 10.000	Nad 2,5	1,7-2,5	1,1-1,7	0,5-1,1	Pod 0,5
3.000 - 5.000	Nad 2,6	1,8-2,6	1,2-1,8	0,6-1,2	Pod 0,6
2.000 - 3.000	Nad 2,7	1,9-2,7	1,3-1,9	0,7-1,3	Pod 0,7
1.000 - 2.000	Nad 2,8	2,0-2,8	1,4-2,0	0,8-1,4	Pod 0,8
500 - 1.000	Nad 3,0	2,2-3,0	1,5-2,2	0,9-1,5	Pod 0,9
200 - 500	Nad 3,2	2,4-3,2	1,6-2,4	1,0-1,6	Pod 1,0
Pod 200	Nad 3,4	2,6-3,4	1,7-2,6	1,1-1,7	Pod 1,1

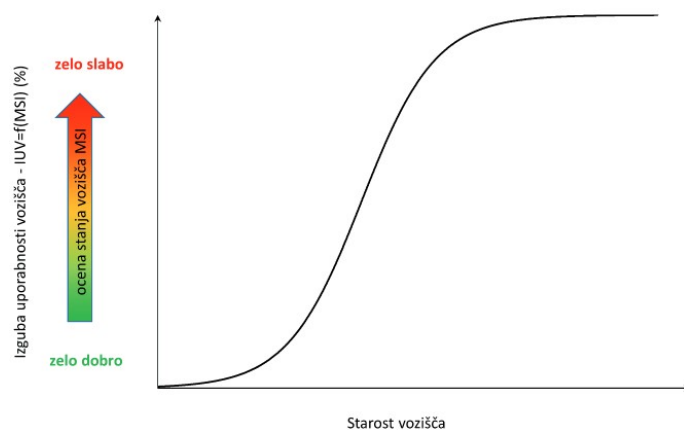
Preglednica 1. Razredi stanja vozišča z mejnimi vrednostmi MSI glede na PLDP [Zupan, 2016].

Staranje oziroma propadanje vozišča ni linearen proces ([AASTHO, 1993], [Joslin, 2019], [Samer, 2016], [Sidess, 2020]). V literaturi najpogosteje prikazan tipičen potek slabšanja stanja vozišča oziroma izgube uporabnosti vozišča podaja slika 1, pri čemer se za osnovo uporablja indeks PCI (angl. pavement condition index) ([AASTHO, 1993], [Hanandeh, 2022], [Joslin, 2019], [Samer, 2016], [Sidess, 2020], [Yu, 2005]). PCI opisuje stanje vozišča na podoben način kot MSI, vendar pa so nje-

gove vrednosti od 0 do 100, pri čemer pomeni 0 najslabšo kakovost oziroma porušitev vozišča, 100 pa najboljšo kakovost. Iz tega razloga poteka krivulja poslabšanja ali izgube uporabnosti vozišča na osnovi PCI navzdol, medtem ko smo pri nas privzeli potek krivulje v nasprotni smeri, kar je v skladu z opredelitvijo vrednosti MSI.



Slika 1. Potek tipične krivulje slabšanja stanja oziroma izgube uporabnosti vozišča na osnovi PCI [Joslin, 2019].



Slika 2. Potek tipične krivulje izgube uporabnosti vozišča na osnovi MSI.

Vsa vozišča se ne starajo enako hitro, temveč na razvoj izgube uporabnosti vpliva vrsta različnih dejavnikov, od kakovosti vgrajenih materialov, podnebnih sprememb, povečane ali zmanjšane prometne obremenitve in drugi ([Mahmood, 2014], [Žmavc, 2010]). Vozišča, ki se starajo hitreje od pričakovanega, tako izkazujejo višjo navidezno starost, tista, ki se starajo počasneje, pa nižjo navidezno starost. Navidezna starost vozišča je lahko pomemben podatek pri nadaljnjem načrtovanju ukrepov vzdrževanja ali sanacij.

Z uporabo ustrezne modelne funkcije in nekaterih osnovnih predpostavk, ki so predstavljene v tem prispevku, lahko povežemo stopnjo izgube uporabnosti vozišča (IUV) z vrednostjo MSI in za posamezne prometne obremenitve opredelimo tipični časovni razvoj poslabšanja vozišča, iz realnih podatkov MSI pa lahko ocenimo tudi navidezno starost vozišča.

2 MODELIRANJE

2.1 Modelne osnove

Za pripravo modela, s katerim bi lahko povezali oceno stanja vozišča MSI z izgubo uporabnosti vozišča (IUV) in njegovim časovnim razvojem, je bilo treba najprej posamezne razrede stanja vozišča opisati tudi s stopnjo poslabšanja oziroma z izgubo uporabnosti vozišča (IUV), ki jo podamo v deležih, izraženih z odstotki (%). Iz literature lahko povzamemo, da je pri tipičnem staranju vozišča po okoli 12 letih doseženo območje mejne vrednosti. Ob prehodu v območje slabega stanja je izguba uporabnosti vozišča okoli 40 %, dosežene pa je 75 % njegove predvidene življenjske dobe. Ob koncu planske dobe je vozišče predvidoma že v zelo slabem stanju, izgubo uporabnosti vozišča pa lahko ocenimo že na 80 % ([Bureau of Highway Maintenance, 2018], [FHWA, 2013], [Joslin, 2019]). Na podlagi teh predpostavk lahko posameznemu stanju vozišča, ovrednotenemu z mejnimi vrednostmi MSI, glede na predvideno prometno obremenitev podano v PLDP (povprečni letni dnevni promet), pripišemo tipično izgubo uporabnosti in tipično starost vozišča (preglednica 2). V prispevku smo se osredotočili na tri skupine prometnih obremenitev.

T_N (leta)	IUV _N (%)	Mejna vrednost MSI		
		PLDP 200-500	PLDP 1.000-2.000	PLDP 3.000-5.000
0	0	0	0	0
8	5	1,0	0,8	0,6
12	20	1,6	1,4	1,2
16	40	2,4	2	1,8
20	80	3,2	2,8	2,6
30	97	7,0	7,0	7,0
40	100	9,0	9,0	9,0

Preglednica 2. Tipična starost vozišča T_N in tipična izguba uporabnosti IUV_N glede na mejne vrednosti MSI pri nekaterih prometnih obremenitvah.

2.2 Metodologija

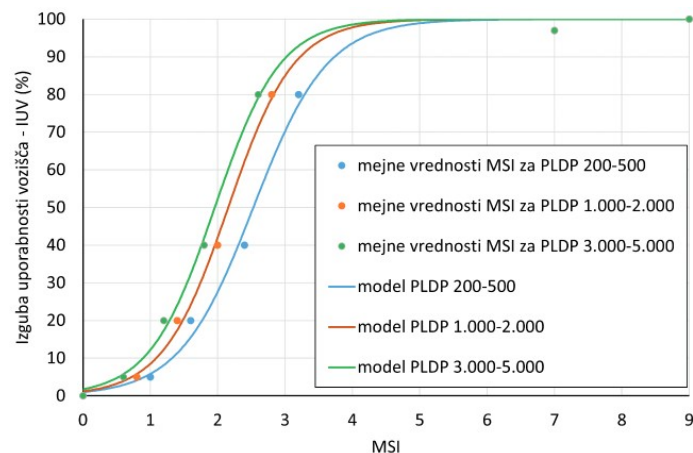
V prvi fazi priprave modela smo povezali izgubo uporabnosti vozišča (IUV) z vrednostmi MSI, ki opredeljujejo posamezno stanje vozišča pri izbrani prometni obremenitvi (preglednica 2).

Modelno funkcijo smo opredelili na osnovi metodologije izbi-re empiričnih obrazcev [Bronštajn, 1963], pri čemer se je izkazalo, da odvisnost IUV od MSI lahko opišemo z enačbo (1). Za določitev parametrov modelov je bila uporabljena programska koda Solver, ki je del Microsoftovega Excela in sloni na nelinearnem programiranju s posplošeno metodo reduciranega gradienta (GRG) [Macuh, 2018] v povezavi z metodo najmanjših kvadratov.

$$IUV = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \times \tanh(K_{M1} \times (K_{M2} \times MSI - K_{M3})) \right) \times 100 \quad (1)$$

V enačbi (1) je IUV (%) funkcija vrednosti MSI, K_{M1} , K_{M2} , K_{M3} pa parametri modela.

Z rešitvijo modela dobimo po tri parametre za vsako obravnavano prometno obremenitev (preglednica 3). Za vsako prometno obremenitev lahko opredelimo odvisnost IUV od vrednosti MSI (slika 3) oziroma iz podanega MSI določimo pripadajočo IUV (enačba (1)).



Slika 3. Odvisnost IUV od MSI za različne prometne obremenitve.

Prometna obremenitev (PLDP)	Parametri modela IUV = f(MSI)		
	K_{M1}	K_{M2}	K_{M3}
200-500	0,093374	9,757281	24,681019
1.000-2.000	0,145154	7,075553	15,2619024
3.000-5.000	0,235195	4,386591	8,585876

Preglednica 3. Parametri modela odvisnosti IUV od MSI za izbrane prometne obremenitve.

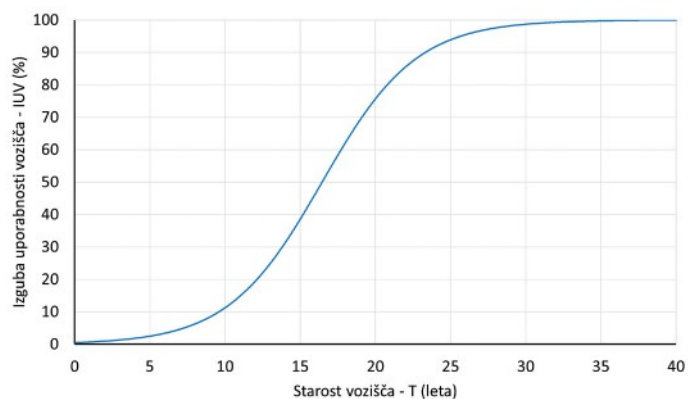
Na podoben način lahko povežemo IUV tudi s starostjo vozišča T v letih. Na ta način lahko definiramo tipično krivuljo izgube uporabnosti vozišča, ki je enake oblike kot odvisnost IUV od MSI in jo lahko opišemo z enačbo (2).

$$IUV = \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \times \tanh(K_{T1} \times (K_{T2} \times T - K_{T3})) \right) \times 100 \quad (2)$$

V enačbi (2) je IUV (%) funkcija starosti vozišča T , K_{T1} , K_{T2} , K_{T3} pa parametri modela, ki so neodvisni od prometne obremenitve.

Ob uporabi vhodnih predpostavk potek krivulje (preglednica 2) ni odvisen od prometne obremenitve in nam podaja tipično oziroma referenčno krivuljo izgube uporabnosti vozišča skozi njegovo življenjsko dobo (slika 4). Parametri referenčne krivulje K_{T1} , K_{T2} , K_{T3} so predstavljeni v preglednici 4.

Ob poznavanju realne vrednosti MSI za neki cestni odsek lahko z uporabo enačbe (1) in parametrov za predvideno prometno obremenitev izračunamo izgubo uporabnosti vozišča (IUV), z uporabo enačbe (3) in parametrov K_{T1} , K_{T2} in K_{T3} pa izračunamo navidezno starost vozišča T_N , torej starost, ki bi bila za izmerjeni MSI pričakovana pri normalnem staranju.



Slika 4. Referenčna krivulja izgube uporabnosti vozišča v odvisnosti od starosti vozišča.

Parametri modela IUUV = f(T)		
K_{T1}	K_{T2}	K_{T3}
0,160856	0,995027	16,374464

Preglednica 4. Parametri modela referenčne krivulje odvisnosti IUUV od starosti vozišča.

$$T_N = \frac{\tanh^{-1}(50 \times IUUV - 1) + K_{T1} \times K_{T3}}{K_{T1} \times K_{T2}} \quad (3)$$

Za vozišče znane starosti lahko po enačbi (2) določimo pričakovano vrednost IUUV (IUV_N), ki bi ga moralo vozišče dosegati ob normalnem staranju. Iz IUV_N lahko po enačbi (4) izračunamo tudi pričakovano vrednost MSI (MSI_N) pri tej starosti vozišča.

$$MSI_N = \frac{\tanh^{-1}(50 \times IUV_N - 1) + K_{M1} \times K_{M3}}{K_{M1} \times K_{M2}} \quad (4)$$

V enačbi (4) je MSI_N referenčni modificirani švicarski indeks, ki bi ga moralo vozišče dosegati v času T , parametri K_{M1} , K_{M2} , K_{M3} pa morajo biti izbrani glede na predvideno prometno obremenitev.

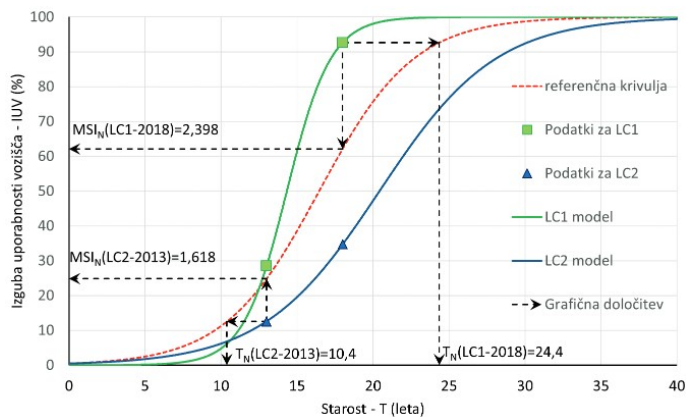
2.3 Praktični primer

Pripravljeni metodologijo smo uporabili na realnem primeru dveh lokalnih cest, pri čemer smo pridobili podatke o

Cesta	Starost vozišča (leta)	Izmerjeni MSI	Parametri modela			T_N	MSI_N
			K_{T1}	K_{T2}	K_{T3}		
LC1	13	1,71	0,132026	2,613297	37,450106	13,6	1,168
	18	3,39				24,4	2,398
LC2	13	1,21	0,161613	0,806229	16,468267	10,4	1,168
	18	1,85				14,5	2,398

Opomba: V izračunih uporabljeni K_{T1} , K_{T2} in K_{T3} za PLDP 1.000–2.000

Preglednica 5. Vhodni podatki in rezultati izračunov za praktični primer.



Slika 5. Potek staranja cestnih odsekov na osnovi realnih MSI ob referenčni krivulji staranja in grafični prikaz določitve navidezne starosti vozišča T_N ter za realno starost pričakovane vrednosti MSI_N .

MSI, določene na osnovi snemanja stanja vozišča za leti 2013 in 2018, okvirni termin izvedbe cest pa je bil ocenjen na leto 2000 [Žiberna 2019]. Za pripravo modela smo privzeli povprečno oceno stanja (MSI) za posamezni odsek in prometno obremenitev PLDP 1.000–2.000. S pomočjo podanih zvez in parametrov smo za vsako stanje (leto) posameznega odseka določili izgubo uporabnosti vozišča (IUUV) na podlagi izmerjenega MSI, določili navidezno starost vozišča (T_N) in opredelili vrednost MSI, ki naj bi ga vozišče izkazovalo ob naravnem staranju (MSI_N). Z rešitvijo enačbe (2), na osnovi realnih vrednosti MSI, smo za vsak cestni odsek opredelili tudi predviden potek staranja (preglednica 5 in slika 5), pri čemer je v okviru izračuna treba za vsak realni odsek določiti specifične parametre modela K_{T1} , K_{T2} in K_{T3} .

Iz zbranih podatkov lahko ob uporabi v prispevku podanih mejnih vrednosti za oceno stanja vidimo, da se odsek LC1 stara bistveno hitreje od pričakovanj. V letu 2018 je odsek LC1 v že zelo slabem stanju in vozišče se je navidezno postaralo za skoraj deset let. Odsek LC2 se očitno stara počasneje, saj je njegova navidezna starost v letu 2013 le 10 let (prava starost 13 let), po petih letih (2018) pa je dosežena navidezna starost 14 let, tako da se je vozišče v tem obdobju postaralo za 4 leta.

3 SKLEP

Staranje vozišča ni linearen proces in ga ob vzpostavitvi nekaterih predpostavk in mejnih vrednosti lahko opišemo z izgubo uporabnosti vozišča (IUV) in povežemo z vrednostmi MSI. Na podlagi postavljenih modelov lahko definiramo referenčno krivuljo staranja vozišča in ob realnih podatkih vrednosti MSI določimo navidezno starost vozišča in referenčno vrednost MSI, ki bi bila za vozišče pri tej starosti pričakovana.

Modelni izračuni so nam lahko v pomoč pri ocenjevanju kakovosti in staranja posameznega realnega odseka vozišča in nam omogočajo boljše planiranje vzdrževalnih in sanacijskih ukrepov.

4 LITERATURA

AASTHO, Guide for Design of Pavement Structures, 1993.

Bronštejn, J.K., Semendjajev, K.A., Matematični priročnik za inženirje in slušatelje tehniških visokih šol, Založba življenje in tehnika v Ljubljani, 1963.

Bureau of Highway Maintenance, Highway Maintenance Manual (HMM) 04-05-01, Pavement Maintenance, 2018.

FHWA, Reformulated Pavement Remaining Service Life Framework, publication No. FHWA-HRT-13-038, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2013.

Hanandeh, S., Introducing mathematical modeling to estimate pavement quality index of flexible pavements based on genetic algorithm and artificial neural networks, Case Studies in Construction Materials, 16, 2022.

Jamnik, J., Vizualna ocena stanja vozniških površin na državnih cestah, Državne ceste: informativni bilten, Ministrstvo za promet, Direkcija Republike Slovenije za ceste, 6, 4, 10-12, 2003.

Joslin, K., Lopet, E., Cheng, D.X., Hicks, G., Literature Review on Performance, Best Practices, and Training Needs for Chip Seals, Slurry Surfacing, and Cape Seals, Mineta Transportation Institute, San Jose State University, 2019.

Krže, A., Ocena poškodovanosti cest in plan dolgoročne obnove in asfaltiranja cest z oceno stroškov v občini Šmartno pri Litiji, končno poročilo, Občina Šmartno pri Litiji, <https://obcina.smartno.si/wp-content/uploads/2020/03/Ocena-po%C5%A1kodovanosti-cest-in-plan-dolgoro%C4%8Dne-obnove-in-asfaltiranja-cest-z-oceno-stro%C5%A1kov-v-ob%C4%8Dini-%C5%A0martno-pri-Litiji.pdf>, 2020.

Macuh, B., Škrabl, S., Kos, S., Mejna analiza nosilnosti temeljnih tal pod plitvimi temelji po teoremu zgornje vrednosti, Gradbeni vestnik, 67, 260-267, 2018.

Mahmood, M., Cross-validation of multi-input deterioration prediction model (MID-PM) for network level pavement management, CADBE Doctoral Student Conference: 2014 proceedings, v: Hoxley, M., Crabbe, A., Nottingham Trent University, 9-10 junij 2014, 44-52, 2014.

Majeed, A.A., Kafi, E.M., The Role of Mathematical Models in Responding To Pavement Failures and Distresses in Texas, Journal of Physics: Conference Series, 1362, 2019.

Samer, W. K., Ercilisi, S., Flintsch, G. W., Bryce, J. M., Development of Enhanced Pavement Deterioration Curves, Virginia Transportation Research Council, 2016.

Sidess, A., Ravina, A., Oged, E., A model for predicting the deterioration of the pavement condition index, International Journal of Pavement Engineering, 22, 13, 1625-1636, 2020.

Yu, J., Pavement Service Life Estimation and Condition Prediction, Theses and Dissertations, University of Toledo, 2005.

Zupan, P., Ocena sistema za spremljanje in nadzor rednega vzdrževanja državnih cest v Republiki Sloveniji s predlogi za izboljšave, magistrsko delo, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana, 2016.

Žiberna, S., Vrednotenje poškodovanosti cest v Mestni občini Nova Gorica, končno poročilo projekta, DFG Consulting d. o. o., 2006543-1-19-SZ z dne 10.01.2019, 2019.

Žmavc, J., Vzdrževanje cest, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, DRC, 2010.