





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

UDK-UDC 05 : 625; tiskana izdaja ISSN 0017-2774;
spletna izdaja ISSN 2536-4332.
Ljubljana, februar 2019, letnik 68, str. 25-52

Izdajatelj:

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

Izdajateljski svet:

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

Glavni in odgovorni urednik:

prof. dr. Janez Duhovnik

Lektor:

Jan Grabnar

Lektorica angleških povzetkov:

Romana Hudin

Tajnica:

Eva Okorn

Oblikovalska zasnova:

Mateja Goršič

Tehnično urejanje, prelom in tisk:

Kočevski tisk

Naklada:

500 tiskanih izvodov
3000 naročnikov elektronske verzije

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

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

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

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

Navodila avtorjem za pripravo člankov in drugih prispevkov

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

Uredništvo

Vsebina • Contents

Članki • Papers

stran **26**

Bogomir Troha, univ. dipl. inž. grad.

DKOM PREPREČUJE DARS, DA BI RAVNAL KOT DOBER GOSPODAR

DKOM PREVENTS DARS, TO ACT WITH DUE DILIGENCE

stran **36**

mag. Vlasta Rodošek, univ. dipl. inž. grad.

**VPLIV STARANJA VOZNIKOV NA OBLIKOVANJE VARNE
INFRASTRUKTURE**

IMPACT OF OLDER ROAD USERS ON SAFE
INFRASTRUCTURE DESIGN

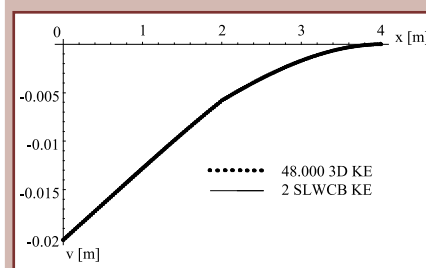


stran **43**

izr. prof. dr. Matjaž Skrinar, univ. dipl. inž. grad.

**ENOSTAVNI LINIJSKI KONČNI ELEMENT ZA ANALIZO
UPOGIBA IN UKLONA RAZPOKANIH NOSILCEV
Z LINEARNO SPREMINJAJOČO SE ŠIRINO**

SIMPLE 1D FINITE ELEMENT FOR BENDING AND
BUCKLING ANALYSIS OF CRACKED BEAMS WITH LINEAR
VARIATION OF WIDTH



Novi diplomanti

Eva Okorn

Koledar prireditev

Eva Okorn

Slika na naslovnici: Prenova železniške proge Pesnica - Šentilj, foto Miro Marolt

DKOM PREPREČUJE DARS, DA BI RAVNAL KOT DOBER GOSPODAR

DKOM PREVENTS DARS, TO ACT WITH DUE DILIGENCE

Bogomir Troha, univ. dipl. inž. grad.

mirko.troha@axis.si
Axis, d. o. o., Tehnološki park 19,
1000 Ljubljana

Strokovni članek

UDK 061:625.711.3:657.6

Povzetek | V članku je predstavljen komentar odločitve DKOM, s katerim je razveljavil odločitev DARS o oddaji javnega naročila za gradnjo vzhodne cevi avtocestnega predora Karavanke z vidika stroškovnega inženirja. Stroškovno inženirstvo je inženirska disciplina, ki združuje znanja prvenstveno s področja gradbeništva pa tudi s področij projektnega vodenja in pogodbenega prava. Predstavljena je vsebina pritožbe in stališč DARS in DKOM. Zaradi lažjega razumevanja so predstavljeni tudi dokumenti, ki so podobni dokumentom, ki so bili v jedru spora med DARS in neizbranimi ponudniki. Predstavljene so tudi navedbe iz zakonov in razpisne dokumentacije, ki je pomembna za razumevanje odločitve DKOM.

Ključne besede: državna revizijska komisija, avtocestni predor Karavanke, popravki ponudbene dokumentacije, stroškovno inženirstvo, analize cen postavk, obrazci virov

Summary | The article presents the commentary to the State Audit Commission DKOM decision that annulled the decision of the Motorway Company of the Republic of Slovenia DARS to award a public contract for the construction of the eastern pipe of the Karavanke highway tunnel from the perspective of a cost engineer. Cost engineering is an engineering discipline that combines knowledge primarily in the field of construction, as well as in areas of project management and contract law. The article presents the content of the complaint and the presentation of DARS and DKOM positions. In order to facilitate understanding, documents similar to those that were at the core of the dispute between DARS and non-selected tenderers are presented.

Key words: state audit commission, Karavanke highway tunnel, correction of tender documents, cost engineering, item price analysis, resources forms

1 • UVOD

V mesecu decembru 2018 je DKOM objavil sklep v zadevi »Izgradnja vzhodne cevi avtocestnega predora Karavanke« z dne 29. 11. 2018 (DKOM, 2018a), ki je izzval precejšnje negotovanje tako med strokovnjaki s področja gradbenih investicij kot tudi med pravniki.

1.1 Bistvo pritožbe treh ponudnikov, ki ga je obravnaval DKOM

V sklepu DKOM (DKOM, 2018a) je navedeno, da so se na sklep naročnika o dodelitvi javnega naročila pritožili trije neuspešni ponudniki.

Vsi skupaj so navedli več domnevnih nepravilnosti, vendar se je DKOM v svojem sklepu omejil le na ugotavljanje ene nepravilnosti. Sporno naj bi bilo to, da je naročnik DARS po poteku roka za oddajo ponudb pozval najbolj ugodnega ponudnika, ki je bil pozneje izbran, k popravku in dopolnitvi obrazcev, ki so bili priloga ponudbene dokumentacije (DARS, 2017c), in sicer:

1) obrazec C »Cenik gradbene mehanizacije in opreme, ki bo uporabljena pri izvedbi del iz ponudbe«

2) obrazec C1 »Seznam transportnih sredstev, ki bodo uporabljena pri izvedbi del iz ponudbe«

3) obrazec D »Struktura delovne sile, ki bo angažirana pri izvedbi del iz ponudbe«

4) obrazec D1 »Podatki o gradbenem materialu«

Ti obrazci so bili vsebinsko podobni Seznamu kalkulativnih virov na sliki 3. Po mnenju pritožnikov je izbrani ponudnik nedovoljeno naknadno spreminjal ponudbeno ceno in tehnične specifikacije.

1.2 Stališče naročnika DARS

V poročilu DKOM (DKOM, 2018a) je navedeno, da je naročnik pisno zavrnil vse navedbe

v revizijskem zahtevku pritožnikov. Pojasnil je, da je namen prilog pridobitev cen za kalkulativne virov. Pravilnost cen virov se lahko ugotavlja tako, da se preveri, ali se ujemajo s cenami virov, ki so navedeni v strukturi cene za posamezne postavke. Cene virov iz priloge bo naročnik uporabil pri določitvi cene na enoto za nove postavke pri spremembah in dodatnih delih. Izbrani izvajalec bo moral za vsako postavko dodatnih del predložiti analizo cene po enoti postavke, pri čemer bo uporabil cene virov iz prilog. Ker najugodnejši ponudnik prilog ni izpolnil pravilno in v celoti, ga je naročnik pozval k popravku in dopolnitvi po roku za oddajo ponudb. Naročnik še pojasnjuje, da gre v tem primeru sprememb podatkov za cene kalkulativnih virov in ne za cene po enoti, ki jih po Zakonu o javnih naročilih (v nadaljevanju: ZJN-3) ni dopustno spreminjati. Po mnenju naročnika cena vira ne daje podatka o ceni postavke, ki jo lahko sestavlja več virov. Po mnenju naročnika ne gre za manjkajoče podatke, ki pred oddajo ponudbe niso obstajali, sicer ponudnik po pozivu naročnika ne bi mogel izkazovati enakih cen po enoti mere iz

ponudbenega predračuna z analizami cen posameznih postavk.

1.3 Kaj je bilo spremenjeno v obrazcih

DKOM je v svojem sklepu (DKOM, 2018a) navedel, da je bilo v obrazcih s strani najugodnejšega ponudnika po pozivu naročnika spremenjeno:

- 1) dodani ali spremenjeni podatki o tipu, letu izdelave, količini in nosilnosti transportnih sredstev
- 2) dodane ali spremenjene cene na uro, cene na m³ in cene na t za transportna sredstva
- 3) cene transportnih sredstev znižane za od 28 % do 74 %
- 4) spremenjeni ali dodani manjkajoči podatki o tipu, letu izdelave, kapaciteti in kalkulativnem učinku mehanizacije
- 5) cene na uro mehanizacije so znižane v »povprečju« za 99,94 %
- 6) spremenjeni ali dodani manjkajoči podatki o izvoru materiala, srednji prevozni oddaljenosti, ceni zunanjšega prevoza in ceni notranjšega prevoza materiala
- 7) cene materialov znižane za od 8 % do 91 %

1.4 Ugotovitev DKOM

DKOM je v svojem sklepu (DKOM, 2018a) podal naslednjo ugotovitev. Na podlagi navedenega gre ugotoviti, da so vlagatelji v okviru zahtevkov za revizijo uspeli izkazati naročnikovo kršitev 89. člena ZJN-3. S tem ko je naročnik pri presoji dopustnosti ponudbe izbranega ponudnika upošteval naknadno predložene priloge C1, D in D1, v katerih je izbrani ponudnik navedel manjkajoče cene in spremenil nekatere cene, je naročnik kršil točko 28.1 Navodil ponudnikom za pripravo ponudbe ter peti odstavek 89. člena ZJN-3. S tem ko je naročnik ponudbo izbranega ponudnika, ki je v ponudbo predložil priloge C1, D in D1, v katerih manjkajo cene, označil za skladno z zahtevami, določenimi v dokumentaciji v zvezi z oddajo javnega naročila, in izbranemu ponudniku oddal predmetno javno naročilo, je naročnik kršil točki 13.1 in 26 Navodil ponudnikom za pripravo ponudbe ter prvi odstavek 89. člena ZJN-3 v povezavi z 29. točko prvega odstavka 2. člena ZJN-3.

skoraj dobesedno povzet peti odstavek 89. člena ZJN-3, zato ga ne navajamo ponovno.

2.4 Točka 13.1 Navodil ponudnikom, Sestavni deli ponudbe

(Dars, 2017a)

...

Točka 3

Izpolnjeno in podpisano Poglavlje 5 (Obrazec ponudbe, Dodatek A k ponudbi), izpolnjene in podpisane priloge C, C1, D, D1, F. Ponudnik kot sestavni del ponudbe predloži tudi izpolnjeno in podpisano prilogo E v tiskani obliki in v elektronski obliki.

...

2.5 Točka 26 Navodil ponudnikom, »Dokazljivost cen iz cenikov virov«

(DARS, 2017a)

...

Naročnik si pridržuje pravico, da v fazi pregleda in ocenjevanja ponudb od ponudnika zahteva analize cen za posamezne postavke. Z analizami enotnih cen mora ponudnik izkazovati enake cene po enoti mere postavk, kot so navedene za te postavke v ponudbenem predračunu.

Prikaz analize mora biti tako pregleden, da so cene po enoti mere virov (material, delo, mehanizacija in transport) iz prilog v obrazcih C, C1, D in D1 Poglavlja 5 – Ponudba, razvidne in enake, kot so navedene v analizi.

2 • BISTVENE TOČKE V ZAKONIH IN PONUDBENI DOKUMENTACIJI, NA KATERE SE SKLICUJE DKOM

2.1 Peti odstavek 89. člena ZJN-3: Dopustne dopolnitve ponudbene dokumentacije

(PIS, 2018a)

Če so ali se zdijo informacije ali dokumentacija, ki jih morajo predložiti gospodarski subjekti, nepopolne ali napačne oziroma če posamezni dokumenti manjkajo, lahko naročnik zahteva, da gospodarski subjekti v ustreznem roku predložijo manjkajoče dokumente ali dopolnijo, popravijo ali pojasnijo ustrezne informacije ali dokumentacijo pod pogojem, da je takšna zahteva popolnoma skladna z načeloma enake obravnave in transparentnosti. Naročnik od gospodarskega subjekta zahteva dopolnitev, popravke, spremembo ali pojasnilo njegove ponudbe le, kadar določenega dejstva ne more preveriti sam. Predložitev manjkajočega dokumenta ali dopolnitev, popravke ali pojasnilo informacije ali dokumentacije se lahko nanaša izključno na takšne elemente ponudbe, katerih obstoj pred iztekom roka, določenega za predložitev prijave ali ponudbe, je mogoče objektivno preveriti. Če gospodarski subjekt ne predloži manjkajočega dokumenta ali ne dopolni, popravi ali pojasni ustrezne informacije ali dokumentacije, mora naročnik gospodarski subjekt izključiti.

2.2 Šesti odstavek 89. člena ZJN-3: Deli ponudbene dokumentacije, ki jih ni dopustno spreminjati

(PIS, 2018a)

Razen kadar gre za popravek ali dopolnitev očitne napake, če zaradi tega popravka ali dopolnitve ni dejansko predlagana nova ponudba, ponudnik ne sme dopolnjevati ali popravljati:

- svoje cene brez DDV na enoto, vrednosti postavke brez DDV, skupne vrednosti ponudbe brez DDV, razen kadar se skupna vrednost spremeni v skladu s sedmim odstavkom tega člena in ponudbe v okviru meril,
- tistega dela ponudbe, ki se veže na tehnične specifikacije predmeta javnega naročila,
- tistih elementov ponudbe, ki vplivajo ali bi lahko vplivali na drugačno razvrstitev njegove ponudbe glede na preostale ponudbe, ki jih je naročnik prejel v postopku javnega naročanja.

2.3 Točka 28.1 Navodil ponudnikom, Dopustne dopolnitve

(DARS, 2017a)

V čl. 28.1 Navodil ponudnikom je smiselno

2.6 Točka 12.3 Splošnih pogojev pogodbe Fidic

(Fidic, 1999)

Za vsako postavko del je primerna tarifa ali cena tista, ki je za to postavko navedena v Pogodbi; če take postavke ni, potem velja postavka, določena za podobno delo. Nova primerna tarifa ali cena za posamezno delo se določi v primeru, da:

- i. se delo opravi v skladu s členom 13 (Spremembe in prilagoditve),

ii. v Pogodbi za to postavko ni navedena nobena tarifa ali cena,

iii. ni ustrezna nobena tarifa ali cena, ker ta postavka dela nima podobnega značaja ali se ne izvede pod podobnimi pogoji kot druge postavke po Pogodbi.

Vsaka nova tarifa ali cena se izračuna na podlagi ustreznih tarif ali cen v Pogodbi z ustreznimi prilagoditvami, da se tako ustrezno upoštevajo zadeve, opisane v pododstavkih (a) in/ali (b). Če nobene tarife ali cene niso

ustrezne za izračun nove tarife ali cene, je te treba izračunati na podlagi ustreznih stroškov izvedbe tega dela skupaj z ustreznim dobičkom in ob tem upoštevati vse ostale pomembne zadeve.

3 • DOKUMENTI, POMEMBNI ZA RAZUMEVANJE ODLOČITVE DKOM

Da bi laik razumel sklep DKOM (DKOM, 2018a), je treba predstaviti tudi strokovne osnove tematike, ki je bila v pritožbi treh ponudnikov obravnavana. V nadaljevanju so predstavljeni bistveni elementi dokumentacije, ki so pomembni pri ponudbi gradbenih del in pri obračunu stroškov. Slike v nadaljevanju so iz izmišljenega projekta z izobraževanja za učitelje srednjih strokovnih šol I. 2018 na temo gradbenih kalkulacij.

3.1 Ponudbeni predračun

Ponudbeni predračun je dokument, ki predstavlja po podpisu pogodbe osnovo za obračun predvidenih opravljenih del pri projektu. Sestavljen je iz poglavij. Vsako poglavje sestavljajo postavke. Vsaka postavka vsebuje šifro, opis izdelka ali delovnega postopka, mersko enoto, količino, ceno po enoti in vrednost postavke. Vrednost postavke je zmnožek količine in cene po enoti. Seštevek vrednosti vseh postavk po

godbenega predračuna je pogodbeni vrednost oz., kot je napisano v Obligacijskem zakoniku, pogodbeni cena. Pri tem velja opozoriti na nedoslednost v poglavju Gradbeni pogodba, saj termin »cena« pomeni tako ceno posamezne postavke kot tudi vsoto vrednosti vseh postavk.

3.2 Kalkulacija postavke – struktura cene

Da bi lahko določili ceno za enoto mere (mersko enoto) postavke, je potreben izračun. Postopek izračuna imenujemo gradbeni kalkulacija. To pomeni, da v postavki opredelimo vse vire, ki so nosilci stroškov za posamezno postavko. Za vsak vir določimo

		Projekt: Demo1 - Demo - Demo projekt Ponudba: - Učitelji - Ponudba za učitelje srednjih šol Valuta izpisa: EUR			
WBS	KrOpis	Postavka	Količina	Cena/EM	Vrednost
1	SGŠ	SREDNJA GRADBENA ŠOLA			266.489,09
1.1	ZEM	ZEMELJSKA DELA			1.591,64
1.1.1	Izkop	Bagerski široki izkop, brez ovir v tleh, I. ktg. plodna zemljina, v suhem terenu, globina h<0.30m, brežine pod kotom 45 stopinj, nalaganje na tovornjak 14t, prevoz na razdaljo 10km, odlaganje na stalni deponiji Opomba: Wiz: opomba	30,00 m3	11,06	331,80
1.1.2	Izkop	Bagerski široki izkop, brez ovir v tleh, I. ktg. plodna zemljina, v suhem terenu, globina h<0.30m, brežine pod kotom 45 stopinj, nalaganje na tovornjak 14t, prevoz na razdaljo 100m, odlaganje na začasni deponiji Opomba: Wiz: opomba	16,80 m3	7,08	118,94
1.1.3	Izkop	Bagerski izkop jarkov, brez ovir v tleh, III. ktg lahka zemljina, v suhem terenu, širina b=1.50m, globina h=1.00m, brežine pod kotom 60 stopinj, odlaganje ob rob izkopa	111,00 m3	1,05	116,55
1.1.4	Izkop	Bagerski izkop jarkov, brez ovir v tleh, III. ktg lahka zemljina, v suhem terenu, širina b=1.50m, globina h=1.00m, brežine pod kotom 60 stopinj, prevoz na razdaljo 10km, odlaganje na stalni deponiji	39,00 m3	11,75	458,25
1.1.5	Planiranje	Planiranje, Strojno planiranje dna jarkov, podlaga zemljina, vodoravna površina, zgoščenost 95% PP	180,00 m2	0,86	154,80
1.1.6	Planiranje	Planiranje, Strojno planiranje dna gradbene jame, podlaga zemljina, vodoravna površina, zgoščenost 98% PP	180,00 m2	0,51	91,80
1.1.7	Dren.kam.pl.	Drenažna kamnita plast, drobljeni kamniti material, granulacije 0-32, debeline 30cm, nabava in dobava material iz kamnoloma	45,00 m2	7,10	319,50

Slika 1 • Izpis predračuna za poglavje zemeljskih del, PIS Xpert.

Na primeru so z rumeno označeni viri, ki so nosilci stroškov: bager, tovornjak prekucnik in strošek deponije.

Primer za stroške izkopa z upoštevanim virom bager kolesnik 15 t, 90 kW:

Normativ je 0,0249 h/m³ izkopanega materiala.

Faktor posrednih stroškov v tej ponudbi na vse stroje je 1,869.

Neposredna cena bagra je 46,73 €/h, kalkulirana cena bagra je

$1,869 \cdot 46,73 \text{ €/h} = 87,34 \text{ €/h}$.

Neposredni strošek vira bager v postavki je 0,0249 h/m³ * 46,73 €/h = 1,16 €/m³.

Posredni strošek vira bager v postavki je 0,0249 h/m³ * 87,34 €/h = 2,17 €/m³.

Neposredna cena postavke na enoto mere je $1,16 + 6,42 + 4,17 = 11,75 \text{ €/m}^3$.

Kalkulirana cena postavke na enoto mere je $2,17 + 8,71 + 4,17 = 15,06 \text{ €/m}^3$.

3.3 Kalkulativni viri

So osnovni gradniki kalkulacije in nosilci stroška v kalkulaciji. Poznamo več vrst virov: materiali, stroji, transporti, delovna sila, osnovna sredstva in drugi. Vsak vir ima naslednje podatke: šifra, opis, merska enota in cena.

4.3 Ali je ponudnik spreminjal tehnične specifikacije predmeta javnega naročila?

Predmet javnega naročila je opredeljen z načrti in drugo projektno dokumentacijo. Sestavni del projektna dokumentacije, ki je namenjen obračunu del, so popisi del. Popisi del vsebujejo postavke. Vsaka postavka vsebuje opis, ki predstavlja predmet javnega naročila.

DKOM popolnoma napačno tolmači, da je šlo pri informativnih podatkih v obrazcih iz prilog ponudbe

- o tipu, letu izdelave, količini in nosilnosti transportnih sredstev,
- o tipu, letu izdelave, kapaciteti in kalkulativnem učinku mehanizacije oz. strojev,
- o izvoru materiala, srednji prevoznosti oddaljenosti, cene zunanjega prevoza in cene notranjega prevoza materiala

za tehnično specifikacijo predmeta javnega naročila.

Tehnična specifikacija se nanaša na končni izdelek, njegove lastnosti, namen, uporabnost, ne pa na to, s koliko stroji in s kakšnimi stroji bo izvajalec izpeljal projekt. V določenih primerih lahko tehnična specifikacija pomeni tudi tehnologijo gradnje, kot je npr. izvedba predora po metodi NATM z bagrskim rezkanjem ali po metodi NATM z miniranjem ali po metodi TMB. Nikakor pa ne moremo za tehnično specifikacijo šteti opredelitev stroja točno določenega proizvajalca, ki je bil zamenjan s strojem drugega proizvajalca, pri čemer se tehnologija delovnih postopkov ni spremenila.

Tudi izvor materiala ni tehnična specifikacija. Tehnične lastnosti materialov so opredeljene v načrtih in popisu del, ki so povzete po standardih in področnih predpisih. Pri betonu je tehnična specifikacija trdnost, največje zrno agregata, konsistenca, odpornosti proti karbonatizaciji, zmrzovanju, solem, kemičnim agresiji, mehanski obrabi, vodotesnosti ...

DKOM pri naštevanju sprememb podatkov v obrazcih ni navedel nič takega, kar bi lahko strokovnjak opredelil za tehnično specifikacijo.

4 • KOMENTAR ODLOČITVE DRŽAVNE REVIZIJSKE KOMISIJE

4.1 Ali je šlo za očitno napako?

Inženirska ekipa naročnika DARS, ki je ocenjevala ponudbe, je to opravila vestno in skrbno ter pravilno ugotovila, da so cene kalkulativnih virov na obrazcih turškega ponudnika, ki je bil s strani naročnika izbran kot najbolj ugoden, zelo visoke. Kot to ugotavlja sam DKOM (DKOM, 2018a), je šlo pri mehanizaciji za več kot 1666-krat previsoke cene (166.000%) (DKOM je zapisal, da so bile prvotne cene znižane za 99,94%), pri transportnih sredstvih za 58 % previsoke cene in pri materialih za 40 % previsoke cene v primerjavi z naknadno popravljenimi cenami.

DKOM se je postavil na stališče, da gre za očitno napako v primeru, ko je to v objektivnem smislu zaznati na prvi pogled, prima facie, vendar je v konkretnem primeru menil, da ni šlo za očitno napako.

Glede na velika odstopanja pri cenah, npr. 166.000 % previsoke cene, je to strokovnjakom jasno na prvi pogled in je nedvomno šlo za očitno napako. Kot navaja tudi DKOM v svojem poročilu (DKOM, 2018a), je ponudnik vpisal vrednost stroja in ne urne postavke. Tudi ostale cene, ki za 40 % in 60 % presegajo običajne kalkulirane cene, bi strokovnjak opazil na prvi pogled.

Dodatni argument je, da je naročnik DARS navedel limitirano vrednost ponudbe. To lahko naredi le na podlagi lastne kalkulacije projekta in lastnih cenikov virov. Zato lahko domnevamo, da je cenike virov iz turške ponudbe DARS primerjal z lastnimi ceniki virov in ugotovil prevelika odstopanja.

Ker je višina cen virov subjektivna ocena, je DARS predvidel še dokaz za potrditev cen virov. Dokaz za potrditev cen virov pa je primerjava med cenami virov na obrazcih in cenami teh istih virov v strukturi analize cene po enoti za vsako postavko, ki bo zahtevana po prejemu ponudbe, kar je bilo zapisano v

točki 26 navodil ponudnikom (DARS, 2017a), in za izbrane postavke pogodbenega predračuna, kar je zapisano v 5. alineji 9. člena osnutka pogodbe (DARS, 2017d) in v točki 8.3 posebnih pogojev pogodbe (DARS, 2017b).

Nerazumljivo pa je, da DARS analize cen izbranih postavk ni zahteval že pri oddaji ponudbe, kot je zapisal tudi DKOM (DKOM, 2018a) pri enem od referenčnih primerov javnega naročila, na katerega se je skliceval DARS, ampak šele 28 dni po podpisu pogodbe (DARS, 2017d). Če je ponudnik kalkuliral cene postavk, je moral imeti pripravljene tudi analize vseh cen postavk, in to zanj ne bi bilo nobeno dodatno breme.

Razlogi za vpis previsokih cen virov so lahko nenamerni, kot je to v primeru nabavnih cen mehanizacije. Ker gre za tujega ponudnika, ki do zdaj ni nastopal na slovenskem trgu, je to mogoče. Lahko pa bi šlo tudi za nameren vpis zelo visokih cen in špekulacijo ponudnika, da naročnik ne bo skrbno pregledal ponudbe in da bodo na ta način dodatna dela, katerih cena se bo posredno določala tudi s ceniki virov, močno precenjena.

4.2 Ali je ponudnik spreminjal predračun za predvidena dela?

Nedvomno je ugotovljeno, da turški ponudnik z naknadnimi popravki ni spreminjal:

1. cene brez DDV na enoto postavke
2. vrednosti katerekoli postavke brez DDV
3. skupne vrednosti ponudbe brez DDV

Dodatno lahko naročnikovo zahtevo, da se cene virov v prilogah ujemajo s cenami virov v analizah cen, beremo kot zahtevo, da so cene virov predvidenih del enake cenam virov nepredvidenih in dodatnih del v aneksih. Zato v nobenem primeru ne moremo trditi, da je ponudnik spreminjal predračun. Velja ravno obratno, ponudnik je po zahtevi naročnika uskladal cene virov v prilogah tako, da se ujemajo s cenami virov v predračunu.

4.4 Ali je ponudnik s spreminjanjem dosegel bolj ugoden položaj med konkurenti?

V točki 13.2 Navodil ponudnikov (DARSA, 2017) »Merilo za ocenitev ponudnikov« je zapisano:

Merilo za izbiro ponudbe je ekonomsko najugodnejša ponudba. Ekonomsko najugodnejša ponudba se izbere na podlagi točkovanja po merilih, kot sledi:

1. Ponudbena cena – največje možno število točk 95
2. Točke za kakovost – največje možno število točk 5

Pri točkovanju kakovosti so bili upoštevani naslednji štiri kriteriji:

- a) Izvedba del v metanskem področju – največje možno število točk 0.5
- b) Število partnerjev skupnega nastopa – največje možno število točk 0.5
- c) Referenčni projekti za ponudnika – največje možno število točk 2.5
- d) Referenčni projekti za odg. vodjo del – največje možno število točk 1.5

Turški ponudnik ni v ničemer spremenil podatkov, ki so bili pomembni za izbiro ponudnika. Ponudnik ni spreminjal ponudbene cene, ki je določena v predračunu, niti ni spreminjal referenčnih podatkov, ki zadevajo točkovanje kakovosti.

4.5 Ali je kršeno načelo enake obravnave in transparentnosti?

Glede na to, da popravki v ponudbeni dokumentaciji niso vplivali na kriterij izbire ponudnikov, in glede na to, da je naročnik je v točki 28.1 Navodil ponudnikom (DARS, 2017a) predvidel možnost popravka podatkov ponudbene dokumentacije, in glede na to, da je v točki 26 Navodil ponudnikom (DARS, 2017a)

zapisal pogoj, ki jih morajo cene virov v prilogah izpolnjevati, in glede na to, da je bila vsa komunikacija, ki se nanaša na popravke v ponudbeni dokumentaciji, pisna in sledljiva, lahko zaključimo, da načelo enake obravnave in preglednosti ni bilo kršeno.

4.6 Ali bi lahko naročnik cene virov v prilogah preveril sam?

Kot ugotavlja sam DKOM v svojem sklepu (DKOM, 2018a), so cene virov stvar volje ponudnika. Cen virov v prilogah naročnik ne bi mogel preveriti sam, saj cene virov niso bile neposredno razvidne iz drugih ponudbenih dokumentov. Zato je naročnik v točki 26 navodil ponudnikov (DARS, 2017a) zapisal, da si pridržuje pravico, da zahteva analize cen za izbrane postavke. Analize cen za postavke predstavljajo ključ, s katerim se lahko preveri, ali se cene virov na obrazcih ujemajo s cenami virov v postavkah predračuna.

Res je, da je naročnik predvidel kriterij za izkaz pravilnosti cen s tem, da je predpisal, da se morajo cene virov iz obrazcev v prilogah ujemati s cenami virov, ki so bile uporabljene v analizah cen posameznih postavk. Res je tudi to, kar je ugotovil DKOM (DKOM, 2018a), da turški ponudnik tega kriterija z dokumentacijo, ki jo je predložil do roka predaje ponudb, ni izpolnil. Res pa je tudi to, da je po popravku podatkov turški ponudnik to zahtevo naročnika izpolnil.

4.7 Ali je neujemanje cen iz obrazcev s cenami v analizah cen postavk zadostni razlog, da se ponudnika izloči?

DKOM meni (DKOM, 2018a), da »po poteku roka za predložitev ponudb naročnik ne more zmanjševati pomena spornih podatkov, ki izhaja iz dokumentacije v zvezi z oddajo javne-

ga naročila, in ne more odstopiti od zahtev v zvezi s spornimi prilogami, saj bi to pomenilo, da je po poteku roka za predložitev ponudb spremenil dokumentacijo v zvezi z oddajo javnega naročila, kar bi bilo v nasprotju z drugim odstavkom 67. člena ZJN-3, načelom transparentnosti javnega naročanja ter načelom enakopravne obravnave ponudnikov.

Brezpredmetne so ugotovitve DKOM (DKOM, 2018a), da je naročnik odstopil od zahtev v zvezi s prilogami. Od teh zahtev naročnik ni odstopil, saj je v skladu z 89. čl. ZJN-3 zahteval od ponudnika, da očitne napake glede cen virov odpravi. Sklepamo, da je naročnik analize cen postavk dobil in ugotovil, da izpolnjuje pogoje, navedene v točki 26 Navodil ponudnikom (DARS, 2017a), in je zato turškemu ponudniku oddal naročilo za gradnjo.

Pri tem velja ponovno poudariti, da kriterij za izbiro ponudnika niso cene virov iz prilog, ampak so cene virov v prilogah zgolj kalkulatorni element, ki je bil uporabljen v izračunu cene postavke v ponudbenem predračunu.

4.8 Ali je bilo cene virov po popravkih mogoče objektivno preveriti z drugimi dokumenti v ponudbi, ki niso bili popravljeni?

DKOM meni (DKOM, 2018a), da »v obravnavanem primeru ni mogoče na objektivni in transparenten način preveriti, da je volja izbranega ponudnika v zvezi z vrednostjo oz. cenami virov, kot izhaja iz naknadno predloženih spornih prilog, obstajala pred potekom roka za predložitev ponudb«.

DKOM nadaljuje: »Zato tudi če iz cen na enoto iz ponudbenega predračuna, naknadno predloženih prilog C1, D in D1 in naknadno

Predračun				Analiza cen postavk					Cenik virov	
Post1	Kol1	CenPost1	Vred1=Kol1*Cen1	Post1	Vir1	Norm11	CenVir1	VredVir11=Norm11*CenVir1	Vir1	CenVir1
					Vir2	Norm12	CenVir2	VredVir12=Norm12*CenVir2		
					Vir3	Norm13	CenVir3	VredVir13=Norm13*CenVir3		
								CenPost1	Vir2	CenVir2
Post2	Kol2	CenPost2	Vred1=Kol1*Cen2	Post2	Vir1	Norm21	CenVir1	VredVir21=Norm21*CenVir1		
					Vir3	Norm23	CenVir3	VredVir23=Norm23*CenVir3	Vir3	CenVir3
					Vir5	Norm25	CenVir5	VredVir25=Norm25*CenVir5		
								CenPost2	Vir4	CenVir4
Post3	Kol3	CenPost3	Vred1=Kol1*Cen3	Post3	Vir2	Norm32	CenVir2	VredVir32=Norm32*CenVir2		
					Vir4	Norm34	CenVir4	VredVir34=Norm34*CenVir4		
					Vir6	Norm36	CenVir6	VredVir36=Norm36*CenVir6	Vir5	CenVir5
								CenPost3	Vir6	CenVir6
Post4	Kol4	CenPost4	Vred1=Kol1*Cen4	Post4	Vir1	Norm41	CenVir1	VredVir41=Norm41*CenVir1		
					Vir3	Norm44	CenVir4	VredVir44=Norm44*CenVir4		
					Vir5	Norm45	CenVir5	VredVir45=Norm45*CenVir5		
								CenPost4		

Slika 4 • Shema predračuna, postavke in virov.

predloženih analiz cen izhaja, da se končna vrednost analize cene ujema s ceno na enoto iz ponudbenega predračuna in da so v analizi cene uporabljeni podatki iz naknadno predloženih prilog, to še ne omogoča objektivno preverljivega zaključka, da je izbrani ponudnik cene na enoto ponudbenega predračuna ob upoštevanju manjkajočih in naknadno spremenjenih cenah, kot to zatrjuje naročnik in izbrani ponudnik, saj takšno sklepanje temelji na podatkih, katerih obstoj, pred potekom roka za predložitev ponudb, ni objektivno preverljiv.«

Odgovor na zgornje vprašanje je ključen za razumevanje odločitve, s katero je DKOM utemeljeval, da se revizijskim zahtevkom ugoditi in s tem razveljavi odločitev naročnika o izboru najugodnejšega ponudnika.

Na sliki 4 je predstavljena shema podatkov iz predračuna, postavk in cenika virov. V postavki se lahko uporabijo več kot le trije viri, ki so prikazani v shemi, lahko pa tudi manj. Z rumeno so označeni podatki iz cenika virov, ki so bili naknadno popravljeni. Z oranžno barvo pa so označene cene postavk iz ponudbenega predračuna, ki niso bile popravljene.

Posredni element, ki združuje oba podatka, so analize cen postavk, ki so označene z zeleno.

Primer:

$$\text{Norm11} * \text{CenVir1} + \text{Norm12} * \text{CenVir2} + \text{Norm13} * \text{CenVir3} = \text{CenPost1}$$

$$\text{Norm21} * \text{CenVir1} + \text{Norm23} * \text{CenVir3} + \text{Norm25} * \text{CenVir5} = \text{CenPost2}$$

$$\text{Norm32} * \text{CenVir2} + \text{Norm34} * \text{CenVir4} + \text{Norm36} * \text{CenVir6} = \text{CenPost3}$$

$$\text{Norm41} * \text{CenVir1} + \text{Norm44} * \text{CenVir4} + \text{Norm45} * \text{CenVir5} = \text{CenPost4}$$

Ugotovimo dejstva:

1. znane so cene vseh postavk iz predračuna (CenPost),
2. znane so vse cene virov, ki nastopajo v postavkah predračuna (CenVir),
3. znanih je nekaj analiz cen postavk, ki vsebujejo znane vire.

Vprašanje s področja logike in verjetnosti: ali so pravilne vse cene virov, če je pogoj, da se cene postavk v predračunu ujemajo s cenami postavk iz analiz cen?

Trditev 1: Cena vira je pravilna, če nastopa v vsaj dveh analizah postavk in se pri obeh postavkah ujemata ceni postavke v predračunu s ceno postavke v analizi cen za isto postavko in sta v vsaki postavki vsaj 2 različna vira.

CenVir1 je uporabljena v Post1 in Post2 je dokazano pravilna.

CenVir2 je uporabljena v Post1 in Post3 je dokazano pravilna.

CenVir3 je uporabljena v Post1 in Post2 je dokazano pravilna.

CenVir4 je uporabljena le v Post3.

CenVir5 je uporabljena le v Post2.

CenVir6 je uporabljena le v Post3.

Trditev 2: Če se cena postavke v predračunu ujema s ceno iste postavke pri analizi cene postavke, potem so pravilne tudi vse cene virov, ki nastopajo v tej analizi cene postavke.

Ker se ujemajo cene postavk v predračunu in cene postavk pri analizi cene za Post1, Post2 in Post3, so pravilne tudi vse cene virov v teh postavkah: CenVir1, CenVir2, CenVir3, CenVir4, CenVir5, CenVir6.

Odgovor na vprašanje ali je bilo cene virov po popravkih mogoče objektivno preveriti z drugimi dokumenti v ponudbi, ki niso bili popravljeni, je odvisen od tega, koliko analiz cen postavk je naročnik zahteval in koliko različnih virov je bilo v postavkah, ki jih je naročnik zahteval, oz. od tega, ali so izpolnjeni pogoji za trditev 1 in trditev 2.

Več ko je virov v eni postavki in večkrat, ko se isti vir pojavi v različnih postavkah ter več ko je postavk, bolj prepleteni so odnosi med kalkulativnimi elementi in več je možnosti, da so cene virov res tiste, ki so bile uporabljene v ponudbi.

Zato je odgovor na vprašanje v naslovu pritrdilen in nasproten stališču DKOM. Cene virov je mogoče objektivno preveriti s cenami postavk v ponudbenem predračunu, ki ni bil popravljen. To se naredi posredno z analizami cen več postavk.

Če zgornja shema ne prepriča DKOM, da so cene virov, pridobljene naknadno, res cene virov, ki so bile uporabljene v kalkulaciji cen postavk v ponudbenem predračunu, potem predlagamo DKOM, naj sam najde drugo kombinacijo cen virov in smiselne analize cen postavk, da bodo cene iz analiz cen postavk ustrezale cenam postavk iz predračuna, in na ta način dokaže pravilnost svojega sklepa.

4.9 Kaj je smisel cenikov virov?

Ceniki virov niso namenjeni pregledu ali kontroli enotnih cen v predračunu, saj je zelo jasno iz 89. čl. ZJN-3 (PIS, 2018b), da naročnik ne more zahtevati spremembe kateregakoli dela ponudbenega predračuna. Tudi v primeru, če bi naročnik ugotovil, da je cena neke

postavke nenormalno nizka ali nenormalno visoka, ne bi mogel od ponudnika zahtevati spremembe. Niti to ne bi bilo merilo za izločitev ponudbe. Edino merilo pri izbiri ponudbe je ponudbena vrednost, ki je seštevek vseh vrednosti vseh postavk ponudbenega predračuna. Zato je »dokazovanje pravilnosti« enotnih cen nesmiselno in nepotrebno.

Ceniki virov so pomembni izključno zaradi obračuna dodatnih in nepredvidenih del. Dodatna dela in nepredvidena dela niso opredeljena v ponudbenem predračunu. Dodatna in nepredvidena dela so stalnica pri gradbenih projektih. Razlogi za ta dela so slabo pripravljene projekti ali nove okoliščine. Izvajalec mora pripraviti zahtevke, ki se po uskladitvi z naročnikom pretvorijo v dodatke k pogodbi (aneksi).

Izvajalec mora vsa dela v zahtevkih opredeliti s predračunom in utemeljiti njihovo upravičenost s pogodbenimi določili. Pri tem pa je največkrat sporna cena na enoto postavke dodatnih del. Za razlago cene naročnik običajno zahteva analizo cene po enoti oz. strukturo cene (prikazana na sliki 2).

DKOM je obravnaval argument naročnika (DKOM, 2018a), da je v poglavju 12 »Merjenje in ocena« v točki 12.3 »Ocena« Splošnih pogojev pogodbe Fidic (Fidic, 1999), ki je del ponudbene dokumentacije, navedeno, na kakšen način se obračunavajo nepredvidena in dodatna dela (spremembe in prilagoditve), ki niso opredeljena v pogodbi.

Zapisano je, da se »nova primerna tarifa ali cena za posamezno delo določi v primeru, da se delo opravi v skladu s členom 13 (Spremembe in prilagoditve). Pri tem se vsaka nova tarifa ali cena izračuna na podlagi ustreznih tarif ali cen v Pogodbi z ustreznimi prilagoditvami.

Res je, da je tudi besedilo Splošnih pogojev Fidic (Fidic, 1999) v tem primeru nejasno, ker uporablja ista termina »tarife in cene« za različne dokumente. Kljub temu lahko strokovnjaki z izkušnjami razberejo, da so s prvim navajanjem pojma »nove tarife ali cene« mišljene cene po enoti novih postavk. V drugi navedbi »ustreznih tarif ali cen v Pogodbi z ustreznimi prilagoditvami« pa je treba brati, da je treba na osnovi predloženih cenikov oblikovati analize cen za nove postavke.

DKOM (DKOM, 2018a) zmotno to določilo tolmači, da SPP Fidic (Fidic, 1999) niso del dokumentacije »v zvezi z oddajo javnega naročila«. To ne drži, saj je v točki 9.1 Navodil ponudnikom (DARS, 2017a) določeno, kaj so

razpisni dokumenti. Pod drugo alinejo piše »Splošni pogoji gradbenih pogodb za gradbena in inženirska dela, ki jih načrtuje naročnik, FIDIC prva izdaja 1999«.

DKOM (DKOM, 2018a) nadaljuje z zmotnim podrednim ugotavljanjem, da bi bili v primeru, da bi zgornje tolmačenje bilo ustrezno, ceniki virov cene na enoto, ki jih v skladu z 89. čl. ZJN-3 (Pravni informacijski sistem b, 2018) ni dovoljeno popravljati. To ne drži, ker sta »cena po enoti postavke« in kalkulativni element »cena vira« popolnoma različna podatka, ki se uporabljata za različne namene, kar je na več mestih v tem prispevku tudi razloženo.

4.10 Ali se je ponudnik s spremembami okoristil?

Kot ugotavlja DKOM (DKOM, 2018a), je ponudnik svoje cene virov občutno znižal, kar pomeni, da je svoj položaj precej poslabšal v primeru dodatnih ali nepredvidenih del. Treba je dodati, da je naročnik s pregledom analiz cen postavk dokazal, da je bil popravek cen virov potreben.

4.11 Ali se ponudnik lahko odpove aneksom?

Turški ponudnik je javno izjavil, »da se zavezuje dela iz ponudbe izvesti po ponudnikovi ceni, brez kakršnihkoli naknadnih aneksov k pogodbi«.

Ali ta izjava turškega ponudnika resnično pomeni, da se odpoveduje vsem aneksom k pogodbi?

Glede na to, kako je izjava napisana, to ne pomeni, da se ponudnik odpoveduje aneksom.

Vsekakor bo potreben vsaj en aneks k pogodbi, v katerem bo treba opredeliti, kako se obračunavajo presežna dela in kako se obračunavajo manjkajoča dela. Prav tako bo treba pojasniti, na kakšen način in do katere višine se obračunavajo nepredvidena dela, ki so v ponudbeni vrednosti že upoštevana v višini 10 % predvidenih del.

Povsem jasno pa je, da je ponudnik uporabil dikcijo »dela iz ponudbe«, kar izključuje dodatna dela, za katerega bi bil vsekakor potreben dodatek (aneks) k pogodbi.

4.12 Kako se izračuna cena postavk pri dodatnih in nepredvidenih delih?

Ceno na enoto postavke določajo:

- izbira virov, ki sestavljajo kalkulacijo
- normativna poraba vira za enoto postavke
- cena vira

Shema izračuna cene po enoti

Vir1 NormativnaPoraba1 * CenaVira1 = VrednostVira1

Vir2 NormativnaPoraba2 * CenaVira2 = VrednostVira2

Vir3 NormativnaPoraba3 * CenaVira3 = VrednostVira3

CenaNaEnotoPostavke = VrednostVira1 + VrednostVira2 + VrednostVira3

Določitev virov pri postavki nepredvidenih del ne more biti sporna, saj je jasno, katere vire je treba uporabiti pri nekem izdelku ali storitvi, ki jo postavka opisuje. Normativna poraba vira se določi s soglasjem naročnika in izvajalca. Cena virov pa se lahko določi vnaprej, tako da se uporabi enake cene virov, ki so bile uporabljene v ponudbenem predračunu.

DKOM ugotavlja (DKOM, 2018a), da naročnik ni nikjer v navodilih ponudnikov ali drugod opredelil postopka za ovrednotenje dodatnih in nepredvidenih del. Vendar iz te ugotovitve izpelje popolnoma napačen sklep, da ceniki niso namenjeni ovrednotenju dodatnih in nepredvidenih del.

Razloga, zakaj naročnik ni napisal, da bodo ceniki virov uporabljeni pri analizi cen za dodatna in nepredvidena dela, ne poznamo.

Predvidevamo, da je razlog v tem, da je to običajen in splošno znan postopek, ki se uporablja že desetletja in povsod po svetu pri gradbenih projektih. Splošni pogoji pogodb Fidic, ki so predpisani tudi za ta projekt, predvidevajo v poglavju 12 »Merjenje in ocena« načine, kako se ovrednotijo cene, v poglavju 13 »Spremembe in prilagoditve« in v poglavju 20 »Zahtevki« pa postopke, ki so predvideni v primeru dodatnih in nepredvidenih del; res pa je, da so to splošna navodila in omenjajo le vrednostno analizo ter cene in tarife, ne pa tudi konkretnih postopkov.

DKOM bi moral vedeti, da za stvari, ki so splošno znane, ni treba pisati zakonov. Edini razlog za tako stališče DKOM, če odmislimo insinuacije, ki so se pojavile, da je šlo za načrtno preprečitev oddaje posla vsem razen enemu od ponudnikov, je ta, da senat DKOM nima niti osnovnega znanja ali kakršnihkoli izkušenj s področja gradbenih projektov oz. stroškovnega inženirstva. Poudariti velja, da so ceniki virov stalnica pri določanju vrednosti dodatnih in nepredvidenih del vseh DARS-ovih projektov.

Ceniki virov so le potrebni, ne pa tudi zadostni pogoj za določanje cen po enoti pri postavkah dodatnih in nepredvidenih del. Cene virov nikakor niso cene po enoti, saj se termin »enota« nanaša na mersko enoto postavke v

(Vir1, Vir2, Vir3)

(NormativnaPoraba1, NormativnaPoraba2 ...)

(CenaVira1, CenaVira2, CenaVira3)

popisu del (oz. predračunu) in ne na mersko enoto vira. S cenami virov ne moremo neposredno določati cen po enoti za postavke nepredvidenih in dodatnih del, ampak lahko z njimi le posredno določamo cene po enoti, pri čemer je neznanka normativna poraba vira za postavko.

Razlog, da želi naročnik cene virov za dodatna in nepredvidena dela imeti enake, kot so bile upoštevane v ponudbenem predračunu, pa je v tem, da se izogne sporom z izvajalcem glede cen virov pri oblikovanju cen na enoto mere postavke pri dodatnih in nepredvidenih delih.

Možno je tudi, da naročnik pri razpisu ni vedel, ali sploh bo uporabil cenike virov pri analizah cen postavk za dodatna dela in nepredvidena dela ali jih ne bo. Zato tega postopka pri določanju cen za nepredvidena in dodatna dela ni napisal. Možno je, da bodo pri analizi cen tako normativni faktorji kot tudi cene virov določeni sporazumno med naročnikom in izvajalcem.

4.13 Če DARS ne bi zahteval popravka cen virov

Poglejmo še hipotetični primer, da naročnik od najugodnejšega ponudnika ne bi zahteval popravka cenikov kalkulativnih virov. V tem primeru ponudnik ne bi popravil cenikov virov. Izbrana bi bila ponudba turškega podjetja in z vidika presoje DKOM bi bilo vse v skladu z zakonom, saj ne bi bilo razlogov za izločitev ponudbe.

Vendar bi bilo to slabo za DARS. Cene virov, ki so podlaga za izračun cen postavk dodatnih in nepredvidenih del, bi bile precej višje. Posledično bi bili stroški dodatnih in nepredvidenih del nerealno visoki. S previsokimi cenami bi bile vrednosti vseh aneksov pri pogodbi zlahka večje od prvotne vrednosti pogodbe. Turški izvajalec bi se gotovo skliceval na to, da je imel DARS v postopku izbire ponudbe možnost od njega zahtevati popravke cenikov, vendar tega ni storil. S tem je pristal na cene virov. Aneksi k pogodbi bi bili astronomski in po tolmačenju DKOM bi bilo vse v redu. V tem primeru bi brali članke z naslovi »Koruptivna uprava DARS omogočila turškemu podjetju trojno ceno predora«.

S tem ko je DARS zahteval od ponudnika, da popravi cenike virov, je ravnal po načelu

dobrega gospodarja in na ta način preprečil veliko gospodarsko škodo.

4.14 Ali DKOM razsoja nepristransko?

Ob koncu je primerno, da razkrijem, da sem sodeloval pri revizijskem zahtevku javnega naročila »Preveritev ocenjene vrednosti projekta 2. tira« (Troha, 2017), s katerim smo naročniku očitali, da ob javnem naročilu ni preveril, ali je šlo pri izbranem izvajalcu za neobičajno nizko ponudbo v skladu s 86. členom ZJN-3. Naročnik bi moral v skladu z drugim odstavkom 86. člena ZJN-3 od ponudnika pisno zahtevati podrobne podatke in utemeljitev o elementih ponudbe. Ponudnik, ki je oddal ponudbo v vrednosti 25 % povprečja vseh ostalih ustreznih ponudb, je poslal le kratko izjavo svojega odvetnika, da bo za ponujeno ceno izpolnil naročilo v celotnem zahtevanem obsegu in kvaliteti. DKOM je v svojem sklepu št. 018-077/2016-8 zavrnil našo pritožbo in zapisal, da se ne spušča v to, ali je ponudnik strokovno primeren ali ne, čeprav smo v pritožbi zapisali, da je sporno to, da naročnik sploh ni preveril ekonomike storitev, ki so bile razpisane v javnem naročilu, ne pa to, da ponudnik ni primeren. Potem se je izkazalo, da ponudnik dela ni opravil tako detajlno, kot je bilo določeno v razpisnih pogojih, prav tako dela ni opravil v pogodbenem roku, ki je bil celo eden od izbirnih kriterijev. Naročnik opravljeni kvaliteti storitve

ni ugovarjal, niti izvajalcu ni obračunal kazni zaradi prekoračenega roka.

Zanimivo je, da je v primeru ocene vrednosti 2. tira DKOM presodil, da so strokovni podatki stvar presoje naročnika, in zaradi tega zavrnil našo pritožbo. Pri razpisu za gradnjo predora Karavanke pa se je DKOM v svojem sklepu (DKOM, 2018a) ukvarjal ravno s tolmačenjem strokovnih podatkov v ponudbi in zaradi tega pritrnil revizijskemu zahtevku. V obeh primerih obravnave pritožb sta bila dva od treh članov senata ista.

4.15 Sistemski problem v DKOM

Kaj storiti, ko je objavljena vsebinsko nepravilna razsodba DKOM? In kaj storiti, ko taka strokovno napačna razsodba postane precedenčni primer? Kot je povedal novinar v oddaji Tarča (RTV SLO, 2018), je nad odločitvami DKOM le modro nebo, pritožba pa je nemogoča. Voditeljica je videla problem v tem, da ima le en član komisije, predsednik DKOM g. Smrdel, pravosodni izpit, še en pravnik, evropski poslanec g. Šoltcs, je predlagal več stopenj (pravniškega?) odločanja.

Lahko se strinjamo z g. Smrdelom, ki je navedel, da se DKOM sooča z očitki, da so njihove razsodbe preveč formalistične in legalistične. Žal pa je bil njegov ukrep proti temu popolnoma napačen. Namesto da bi bil v senatu imenovan strokovnjak z znanji stroškovnega inženirstva, je bil imenovan varnostni inženir!

Varnostni inženir se ukvarja z vprašanji varnosti in zdravja pri delu in ni kompetenten za odločanje o naravi dokumentov, kot so predračun, analiza cene in cene virov.

Sistemski problem DKOM, ki se je razkril, je vprašanje kompetentnosti senata DKOM, da odloča o tolmačenju tematike, ki je ne pozna. DKOM odloča v praksi o pritožbah na vsa javna naročila od vrednosti nekaj evrov do vrednosti več kot 100 mio. €. Ni dovolj, da so člani komisije pravniki in da imajo izkušnje z javnimi naročili. Zakonodajalec bi moral ločiti vsaj primere, ko gre za javna naročila večjih vrednosti, in v tem primeru predpisati več članov senata in ne le tri. Prav tako bi moral v primeru naročil večjih gradbenih projektov predpisati obvezno udeležbo vsaj enega člana senata DKOM, ki ima znanje in izkušnje s področja gradbenih investicij oz. stroškovnega inženirstva.

4.16 Vodja investicije

Kot smo s kolegi že večkrat poudarili, bi morali v gradbeno zakonodajo dodati novo obliko pooblaščenega inženirja oz. udeleženca pri gradnji – to je vodjo investicije, ki bi svoja znanja s področja stroškovnega inženirstva moral izkazati na strokovnem izpitu in čigar glavna odgovornost bi bila, da je naročniku tudi materialno odgovoren za izpeljavo projekta v vnaprej znanih finančnih in terminskih okvirih.

naročanja, ampak bi moral naravo dokumentacije v razpisni dokumentaciji za gradbene projekte tolmačiti stroškovni inženir z znanjem projektnega vodenja.

Odločitev DKOM o razveljavitvi sklenitve naročila za gradnjo predora Karavanke je napačno strokovno utemeljena, saj ne upošteva narave dokumentov v ponudbi. Glede na to, da je DKOM v svoji odločitvi povzel tudi naročnikov odgovor pritožnikom, je težko razložiti, zakaj DKOM ni sledil strokovni utemeljitvi naročnika. Da bi se v prihodnje izognili napačnemu strokovnemu tolmačenju s strani DKOM, je potreben razmislek o spremembi sestave senata DKOM, da bi o naročilih večje vrednosti odločalo večje število članov senata in da bi v primerih gradbenih investicij odločali o tem tudi strokovnjaki stroškovnega inženirstva.

5 • SKLEP

V prispevku je bilo prikazano, da je ponudnik popravil podatke, k čemur ga je v skladu z zakonom in razpisnimi pogoji pisno pozval naročnik. Podatki, ki so bili spremenjeni, v ničemer ne vplivajo na izbiro ponudnika, saj ponudnik ni spreminjal ponudbenega predračuna. Ponudnik prav tako ni spreminjal tehničnih specifikacij niti ni dosegel bolj ugodnega položaja med konkurenti niti se s popravki podatkov ni okoristil, načelo enake obravnave in transparentnosti pa tudi ni bilo kršeno.

Podatki, ki so bili spremenjeni, niso bili namenjeni obrazložitvi vrednosti ponudbe, saj tudi napačne cene postavk v ponudbi ne bi mogle biti razlog za izločitev ponudnika.

Podatki, ki so bili spremenjeni, se lahko samo posredno uporabijo pri oceni stroškov za nepredvidena in dodatna dela, čeprav to v razpisni dokumentaciji ni bilo opredeljeno. Če se podatki, ki so bili spremenjeni, ne bodo uporabili za določitev vrednosti dodatnih in nepredvidenih del, potem sploh nimajo nobenega finančnega učinka na pogodbo.

Cene virov v prilogah, ki so bile spremenjene, je bilo naknadno mogoče preveriti s cenami postavk, ki so bile oddane v ponudbeni dokumentaciji in z analizami cen za tiste postavke, ki jih je naročnik zahteval.

Za tolmačenje projektnih dokumentov ni dovolj pravnik z znanjem s področja javnega

6 • LITERATURA

- DARS, Navodila ponudnikom za izdelavo ponudbe za Izgradnja vzhodne cevi AC predora Karavanke, december, 2017a.
- DARS, Posebni pogoji, Izgradnja vzhodne cevi AC predora Karavanke, december, 2017b.
- DARS, Ponudba, Izgradnja vzhodne cevi AC predora Karavanke, december, 2017c.
- DARS, Osnutek pogodbe, Izgradnja vzhodne cevi AC predora Karavanke, december, 2017d.
- DKOM, Odločitve DKOM, dokument 018-166/2018-23, Družba za avtoceste v Republiki Sloveniji, http://www.dkom.si/odlocitve_DKOM/2018120409174750/, pridobljeno 29. 11. 2018a.
- DKOM, Obvestila DKOM, izjava za javnost, <http://www.dkom.si/aktualno/obvestila/2018122016501478/>, pridobljeno 20. 12. 2018b.
- DKOM, Odločitve DKOM, dokument 018-135/2018-8 Občina Sodražica, http://www.dkom.si/odlocitve_DKOM/2018091308455678/, pridobljeno 10. 9. 2018c.
- Fidic, Posebni pogoji gradbenih pogodb za gradbena in inženirska dela, ki jih načrtuje naročnik, ponatis 2009, 1999.
- PIS, Pravni informacijski sistem, Obligacijski zakonik, <http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO1263#>, pridobljeno 29. 12. 2018a.
- PIS, Pravni informacijski sistem b, Zakon o javnem naročanju 3, <http://pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=ZAKO7086>, pridobljeno 29. 12. 2018b.
- RTV SLO, Tarča, Sto milijonski posel gradnje 2. cevi karavanškega predora, <https://4d.rtvsllo.si/arhiv/tarca/174584037>, pridobljeno 20. 12. 2018.
- Troha, B., Revizija vrednosti 2. tira Koper-Divača, Gradbeni vestnik, letnik 66, marec, 56-73, 2017.

VPLIV STARANJA VOZNIKOV NA OBLIKOVANJE VARNE INFRASTRUKTURE

IMPACT OF OLDER ROAD USERS ON SAFE INFRASTRUCTURE DESIGN

mag. Vlasta Rodošek, univ. dipl. inž. grad.

vlasta.rodosek@um.si

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,

prometno inženirstvo in arhitekturo

Smetanova ulica 17, Maribor

Znanstveni članek

UDK 656.1-053.88

Povzetek | Starejši so vse pogostejši udeleženci v cestnem prometu, prav tako so tudi vse pogostejši udeleženci in povzročitelji prometnih nesreč. Razlog za to lahko pripišemo predvsem večji mobilnosti starejših udeležencev, ki so po 65. letu bolj zdravi in vitalni, kot so bili v preteklosti. Pomembno dejstvo je tudi, da se prebivalstvo stara, in po nekaterih raziskavah bo v letu 2030 (v OECD) že vsak četrty voznik starejši od 65 let. Večina trenutnih projektnih standardov in standardov za načrtovanje prometa temelji na načrtovalskih načelih, značilnostih vozil in človeških psihofizičnih lastnostih, ki izvirajo iz šestdesetih let prejšnjega stoletja. V zadnjih 30 letih so se pojavile pomembne spremembe v značilnostih vozil. Zaradi daljšanja življenjske dobe ljudi so velike spremembe tudi v strukturi populacije voznikov, delež starejših voznikov narašča. Psihofizične značilnosti teh se razlikujejo od tistih, ki so se upoštevale pri določanju projektnih standardov v preteklosti. Po drugi strani študije kažejo, da se starejši vozniki razlikujejo od drugih starostnih skupin po načinu vožnje in potovalnih navadah kot tudi po značilnosti nesreč, v katerih so ti bolj verjetno udeleženi. Pričakovana rast deleža starejših voznikov upravičuje spremembe standardov oblikovanja cestne infrastrukture z namenom doseganja višje ravni prometne varnosti.

Ključne besede: starejši vozniki, lastnosti starejših, prometna varnost, cestna infrastruktura, križišče

Summary | Older people are becoming more frequent road-users due to longer life span. They are also increasingly frequent traffic participants and responsible for traffic accidents. The important fact is that the population is getting older and statistical data and research forecast that by 2030 every fourth driver will be over 65. The majority of current geometric and traffic control design standards are based on design principles, vehicle characteristics and human physiological attributes that originate from the 1960s. During the past 30 years, significant changes have occurred in the vehicle characteristics and fleet composition. Significant changes have also occurred in the composition of the driver population, in order to include an increasingly large proportion of older drivers, whose physical characteristics differ from those of the test populations used to set the design standards in the past. Studies indicate that older drivers differ from middle-aged and younger drivers in terms of the type and amount of driving they do, as well as characteristics of the accidents in which older drivers are more likely to be involved. The expected growth in the proportion of drivers having these characteristics may warrant changes to current road infrastructure design standards in order to achieve a higher level of traffic safety.

Key words: older drivers, characteristics of the elderly, traffic safety, road infrastructure, intersection

1 • UVOD

Trenutni demografski podatki kažejo, da se število starejših oseb, izraženo v deležu celotnega prebivalstva, povečuje in po pričakovanjih se bo trend povečevanja nadaljeval tudi naslednjih 30 let. Statistične analize kažejo, da v ZDA prebivalci, starejši od 60 let, predstavljajo 19 % celotne populacije (NHTSA, 2000), v državah Evropske unije je že kar 23 % ljudi starejših od 60 let, v Sloveniji je ta delež 21,6%. Slovenija je že nekaj let prisotna v razredu držav s izrazitim staranjem prebivalstva. Po osnovni varianti Eurostatovih projekcij prebivalstva naj bi se do leta 2050 število prebivalstva v Sloveniji zmanjšalo za približno 5%. Skoraj tretjina (31,1%)

prebivalstva naj bi bila stara 64 let ali več, medtem ko naj bi bil delež mlajših od 15 let manjši od 13%. Pričakovati je, da bodo starejši ljudje pogosteje in na daljših razdaljah potovali z osebnimi vozili. Projekcije kažejo, da se bodo potovanja voznikov, starih 65 let ali več, do leta 2030 povečala s sedanjih približno 50 % povprečno letno prevoženih kilometrov na 80 %. Statistična analiza je pokazala, da vsaj 38 % prebivalstva, starega 80 let ali več, vsaj enkrat letno vozi motorno vozilo (Chipman, 1998). Če izhajamo iz dejstva, da je stopnja prometnih nesreč v korelaciji z izpostavljenostjo (vključenost v promet), je statistični kazalnik,

da starejši vozniki dosegajo višjo stopnjo prometnih nesreč kot vozniki med 25. in 59. letom (Chipman, 1998). Raziskave so pokazale, da starejši vozniki predstavljajo večje tveganje za udeležbo v nesreči v križiščih kot vozniki srednjih let. Starejši vozniki predstavljajo razmeroma majhen delež smrtnih žrtev (Lyman, 2002); medtem ko je celotno tveganje starejših voznikov pri smrtnih nesrečah majhno, se to tveganje začne povečevati po 75. letu. Brez usmerjenosti k ukrepom za izboljšanje varnosti starejših voznikov se bo prometna varnost letih najverjetneje slabšala.

Pri pripravi članka so bile uporabljene tudi ugotovitve v virih ((Braitman, 2007), (Burns, 1999), (Hu, 1993), (Kline, 1992), (Molnar, 2013) in (Morgan, 1995)).

2 • STAREJŠI IN MLAJŠI VOZNIKI V PROMETU

Za izbiro primernih ukrepov za povečanje prometne varnosti z udeležbo starejših voznikov je pomembno razumeti razlike med starejšimi vozniki in vozniki srednjih let (starimi od 25 do 65 let), ki se štejejo za »najvarnejše« v smislu stopnje prometne varnosti (McGwin, 1999). Poseben pomen imata dva dejavnika: značilnosti nesreč, v katerih so starejši vozniki vključeni, in značilnosti starejših voznikov. Pregled litera-

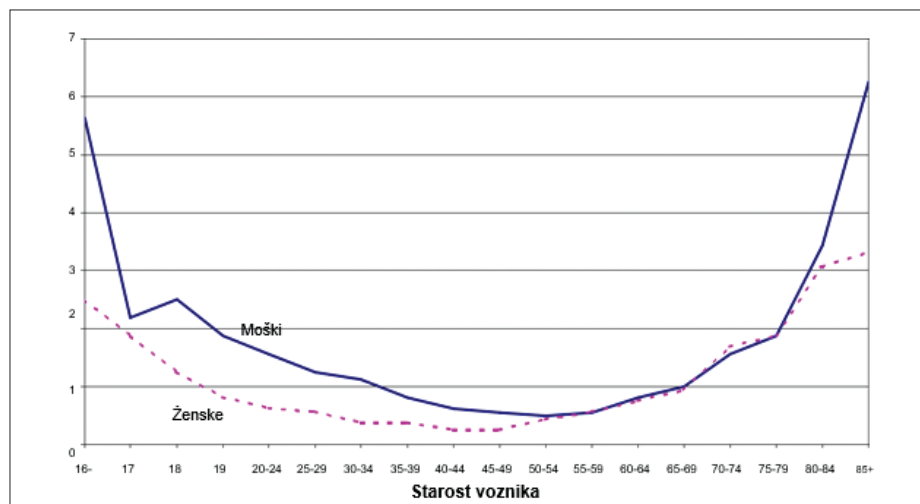
ture kaže podobne trende, ko se starejši vozniki primerjajo z vozniki srednjih let ((Cooper, 1990), (Hakamies-Blomqvist, 1993), (McGwin, 1993)):

- starejši vozniki imajo večjo verjetnost za udeležbo v prometni nesreči v križišču v dnevnih urah in ob dobrih vremenskih razmerah;
- prometne nesreče v križiščih, v katerih so udeleženi starejši vozniki, se najpogosteje zgodijo v situaciji zavijanja, najpogosteje v levo;

- starejši vozniki so v zapisnikih prometnih nesreč pogosto spoznani za povzročitelje – niso videli drugega vozila ali so ga zaznali tako pozno, da ni bilo mogoče preprečiti trčenja (Hakamies-Blomqvist, 1993);
- alkohol in prevelika hitrost sta manj verjetna dejavnika za nastanek prometnih nesreč pri starejših voznikih (McGwin, 1993);
- 80 % prometnih nesreč pri starejših voznikih se zgodi na območju 40 kilometrov od voznikovega prebivališča (McGwin, 1993).

Posledice prometnih nesreč, v katerih so udeleženi starejši vozniki, se razlikujejo v primerjavi z mlajšimi vozniki. Podatki o stopnji smrtnosti voznikov v prometnih nesrečah (slika 1) kažejo, da so najstarejši in najmlajši vozniki pogosteje udeleženi v prometnih nesrečah s smrtnim izidom. Prav tako so raziskave pokazale, da je v prometnih nesrečah v križiščih verjetnost za poškodbo voznika ali smrtni izid v starostni skupini 65 let in več 105 odstotna v primerjavi z mlajšimi vozniki.

Raziskave lokacij prometnih nesreč v povezavi s starostjo voznika (Hauer, 1988) so pokazale višjo stopnjo tveganja v križiščih. Pri trčenju je točka trka najpogosteje na sprednji četrtini vozila, kar posledično bolj verjetno povzroči večje poškodbe starejšemu vozniku ((Viano, 1990), (Evans, 1988)). Vzrok za to, da so starejši vozniki bolj izpostavljeni prometnim nesrečam v križiščih, je pogojen s fizičnimi in psihofizičnimi značilnostmi starejših voznikov.



Slika 1 • Stopnja smrtnosti v odvisnosti od starosti voznika (Burkhardt, 1999).

3 • ZNAČILNOSTI STAREJŠIH VOZNIKOV IN VPLIV NA PROMETNO VARNOST

3.1 Manevri v križišču

Ne glede na geometrijo križišča in način vodenja prometa skozi križišče voznja v

križišču zahteva določene sposobnosti voznikov – voznik mora hitro (in v gibanju) oceniti potek vožnje v križišču. Ta ocena zahte-

va vizualno obdelavo informacij za ugotovitev značilnosti križišča, prometnega okolja ter zaznavo prometnih znakov in označb. Voznik uporabi tudi kognitivno obdelavo informacij za razlago zaznanega in sprejem odločitev o vožnji skozi križišče. Ob upoštevanju vseh drugih prometnih tokov v križišču, pešcev

in kolesarjev mora voznik izbrati primerno časovno praznino v prometnem toku, ki mu omogoča izvedbo manevra v križišču. Na splošno velja, da se vizualne, zaznavne in kognitivne funkcije s starostjo zmanjšujejo in da lahko takšne »okvare« prispevajo k zmanjšanju voznih sposobnosti (Szlyk, 1995). Takšen upad sposobnosti lahko prispeva k prometni nesreči, vendar je nujno ne povzroči. Posebno težavni so manevri zavijanja v levo.

3.2 Vizualna zaznava

Dobro vizualno zaznavanje in pozornost značilnostim prometnega okolja sta pomembna za varno vožnjo skozi križišče. Kognitivni primanjkljaji in primanjkljaji pri zmožnosti obdelave vizualnih informacij starejših voznikov (vidno polje) so povezani z večjim številom prometnih nesreč. V raziskavi (Owsley, 1991) je ugotovljeno, da za starejše voznike s tovrstnimi težavami obstaja 16-krat večja verjetnost, da bodo udeleženi v prometni nesreči v križiščih. Izguba periferne občutljivosti (vida) vpliva na primanjkljaje pri vizualnem zaznavanju (Fisk, 1997). Odgovorna je za zaznavanje gibanja znotraj vidnega polja, zato lahko to vpliva na neustrezno zaznavanje

in interpretacijo približevanja objektov. Če voznik ne zazna pravilno objektov, se zmanjšuje zanesljivost določitve ustrezne praznine v prednostnem prometnem toku.

Voznik pri vožnji skozi križišče preverja možnosti trčenja z drugimi premikajočimi se objekti (vozili, kolesarji, pešci). To spremljanje prometnega okolja zahteva, da mora voznik za ustrezno vizualno zaznavo obrniti glavo. Poleg zmanjšanja ostrine vida in širine vidnega polja imajo starejši vozniki pogosto omejeno sposobnost obračanja zgornjega dela telesa. Z raziskavami (Isler, 1997) je ugotovljeno, da ima večina starejših voznikov v T-križiščih s sprejemanjem odločitev o izvedbi manevra zavijanja v levo težave zaradi zmanjšanih fizičnih sposobnosti. Te omejitve bo v prihodnosti treba upoštevati pri geometrijski zasnovi križišč.

Rezultati raziskav (McGwin, 1999) so pokazali, da v Kanadi kar 30% vseh prometnih nesreč v križiščih povzročijo starejši vozniki, najpogostejši vzrok je neupoštevanje prednosti v križišču, kar je mogoče pripisati zmanjšani sposobnosti vizualne zaznave in kognitivne obdelave.

3.3 Določanje razpoložljive in potrebne praznine v prometnem toku

Za določitev ustrezne praznine za izvedbo prometnega manevra mora biti voznik sposoben ustrezno oceniti hitrost in razdaljo približujočega se objekta. Presoja o hitrosti in razdalji je za starejše voznike posebej problematična, saj čakajo dlje kot mlajši vozniki na ustrezno praznino in pogosto še vedno podcenjujejo potrebno velikost le-te za izvedbo manevra (Hancock, 1991). Opravljene raziskave ((Guerrier, 1999), (Lerner, 1994)) so pokazale, da starejše voznice potrebujejo večjo praznino za izvedbo manevra zavijanja v križiščih. Raziskave so prav tako pokazale, da starejši vozniki v 50% primerov potrebujejo za odločitev o izvedbi manevra zavijanja v levo vsaj 19% večjo praznino v glavnem prometnem toku od mlajših voznikov. Prav tako je pospeševanje v križišču za potrebe izvedbe prometnega manevra pri mlajših voznikih hitreje kot pri starejših (Keskinen, 1998). Starejši vozniki podcenjujejo potreben čas pospeševanja vozila, posledično izbrana praznina ni zadostna za dokončanje prometnega manevra (Hakimes-Blomqvist, 1993).

- nezmožnosti zagotavljanja širokega kota opazovanja prometne infrastrukture in procesa opazovanja v križiščih,

4 • VARNOST STAREJŠIH VOZNIKOV V NIVOJSKIH KRIŽIŠČIH

Proizvajalci motornih vozil, še zlasti osebnih motornih vozil, se že dolgo časa zavedajo, da so uporabniki teh vozil vedno starejši. Temu primerno se v nova osebna vozila že vrsto let vgrajujejo sodobne naprave za asistiranje voznikom pri vožnji.

Na področju projektiranja cestne infrastrukture do sedaj še ni bilo narejenega ničesar oz. je bilo narejeno zelo malo, kar pa pomeni dodaten izziv za stroko in znanost. Glede na to, da bo v cestnem prometu vedno večji delež starejših voznikov, bo treba začeti razmišljati o novih standardih projektiranja, označevanja cest in njene opreme. Predvsem nivojskih križišč, kjer se udeleženci iz različnih smeri križajo, odcep-ljajo, priključujejo in prepletajo v eni ravnini.

Zaradi zmanjšanih psihofizičnih funkcij starejših ljudi se različne pomanjkljivosti prometne infrastrukture ali neprimerno upravljanje prometa odrazi pri:

- nezadostnem zaznavanju vertikalne in horizontalne prometne signalizacije,
- podaljšanju reakcijskega časa, preden se voznik odloči, da naredi prometni manever,
- nezadostni preglednosti pri izvajanju prometnega manevra,



Slika 2 • Primer ločene signalizacije za levo in desno zavijanje v nivojskem križišču (z ločenimi fazami intervala zelene luči).



Slika 3 • Levo – Neprimerno postavljena signalizacija ne zagotavlja zaznavanja; desno – usmerjalni pasovi brez predhodne informacije za voznika o razvrščanju in smereh.

- nezmožnosti spremljanja poteka dogajanja pred križiščem zaradi številnih vrst udeležencev v prometu.

Z ustreznimi ukrepi se je treba osredotočiti na pomoč starejšim voznikom, da jasneje prepoznajo geometrijo križišča in vodenje prometa v njem, kdaj imajo prednost, če je praznina v glavnem prometnem toku primerna.

geometrijsko zasnovo križišča ter zagotovitev jasne, pregledne in nedvoumne infrastrukture (npr. odpravljanje ovir in objektov ob infrastrukturi, nadzemni vodi in drevesa ter preveč označb na vogalih križišča).

Označevanje vodenja prometa že pred območjem križišča bi omogočilo pravočasnost informacij o približevanju območju križišča in starejšim voznikom dalo več

osvetlitve v nočnem času, levo zavijanje, praznine v glavnem prometnem toku, tok pešcev itd.), in tiste, ki vplivajo na spremembe oblikovalskih standardov ali upravljanja (npr. signalizacija, odsevnost, vodenje prometa, geometrija križišča itd.).

Pregled obstoječih modelov (Bernauer, 1997) nakazuje, da zelo malo današnjih modelov za raziskavo vpliva cestne infrastrukture na



Slika 4 • Levo - Nezadostna preglednost v križišču; desno – Neprimerno vodenje levih zavijalcev na glavni prometni smeri.

Večji prometni znaki (predvsem v križiščih z obveznim ustavljanjem) so starejšim voznikom v pomoč pri odločanju. V semaforiziranih križiščih k lažjemu odločanju o izvedbi prometnega manevra prispeva ločena svetlobna signalizacija za levo in desno zavijanje (zmanjšanje števila informacij, ki jih mora starejši voznik predelati pri izvedbi prometnega manevra in določitvi primerne praznine v glavnem prometnem toku za izvedbo le-tega). Pozornost je treba usmeriti v

časa za obdelavo informacij in ustrezno odzivanje.

V okviru preučevanja vpliva infrastrukture na varnost starejših voznikov je treba upoštevati vsaj dva elementa: lastnosti voznika (posebej tistih, v katerih se razlikuje od mlajših voznikov) in okolje/infrastrukturo. Pri tem elementu je treba upoštevati tiste lastnosti, ki pomembno vplivajo na vedenje starejših voznikov (npr. geometrija križišča, stopnja

prometno varnost vključuje potrebne elemente z zadostno stopnjo natančnosti, ki je potrebna za ustrezno vrednotenje vpliva na starejše voznike. Nekateri raziskovalci so sicer razvili statistične modele (Garber, 1991), vendar ti modeli izrecno ne upoštevajo vedenja voznika ali voznikovih značilnosti in jih ni mogoče uporabiti za oceno vpliva morebitnih ukrepov.

Analiziranje prometa in obnašanja voznikov v križiščih je mogoče preučiti na podla-

gi zaporedja dogodkov in odločitev, ki jih morajo vozniki sprejeti pri vožnji v križišču. Za namene modeliranja se lahko postopek razčleni v tri faze: prilagajanje, vodenje in izvedba manevra. Vsaka od teh faz predstavlja drugačne izzive za voznika z upoštevanjem značilnosti voznika, vozila in okolja. Tabela 1 prikazuje podrobno razčlenitev vedenja voznika, povezano z vsako fazo, in je osnova

za model ocenjevanja vpliva infrastrukturnih sprememb in ukrepov v križiščih, zlasti za starejše voznike. Nedvoumno velja, da je ustrezna opredelitev praznine v glavnem prometnem toku pri starejšem vozniku ključnega pomena za varno vožnjo v križišču, posebno pri manevru levega zavijanja, ki je empirično ugotovljeno najbolj otežen zaradi številnih nalog in odločitev voznika.

Identifikacija praznine v glavnem prometnem toku je odvisna predvsem od vidnega polja voznika in ostrine njegovega vida, omejuje zmožnost voznika, da opazuje nasprotni prometni tok v križišču. Starejši vozniki imajo težave pri ocenjevanju trajanja praznine v prometnem toku zaradi slabšega globinskega vida in zmanjšanega zaznavanja gibanja (napaka pri ocenje-

Manever	Aktivnost voznika	Pomembni dejavniki
Prilagajanje	Videnje in zaznavanje križišča in načina vodenja prometa	Ostrina vida in vidno polje, razsvetljava
	Določitev, kdo ima prednost	Izkušnje voznika, kognitivni procesi
	Ocena razdalje do križišča	Globinski vid
	Odločitev o aktivnosti v odvisnosti od vodenja prometa in razumevanja prednosti prometnih tokov v križišču	Izkušnje voznika, kognitivni procesi
Vodenje	Zaznati in prepoznati prometno signalizacijo	Ostrina vida, osvetlitev, umestitev in velikost znakov, poznavanje infrastrukture
	Odločitev o želenem manevru	Kognitivni procesi, poznavanje infrastrukture
	Določitev voznega pasu, s katerega je mogoče izvesti zelen manever	
	Ostrina vida, kognitivni procesi, poznavanje infrastrukture, razumevanje znakov in označb	
	Menjavanje voznega pasu (prerazporeditev)	Razpoložljiv čas za izvedbo manevra, možnost primerne praznine v glavnem prometnem toku, čas, potreben za izvedbo manevra (lahko v funkciji periferne vida, gibalne zmogljivosti zgornjega dela telesa voznika, kognitivnih procesov)
Izvedba	Prepoznavna vodenja prometa v križišču (semaforji, znak stop, znak odvzem prednosti)	Izkušnje voznika, znanje
	Ugotovitev, kdo ima prednost	Ostrina vida, osvetlitev, signalizacija, izkušnje voznika, znanje, kognitivni procesi
	Če voznik nadaljuje z vožnjo s križanjem z drugimi prometnimi tokovi, mora prepoznati praznino v glavnem prometnem toku	Ostrina vida, horizontalna signalizacija
	Ocena trajanja praznine	Globinski vid, zaznavanje gibanja, horizontalna signalizacija
	Ocena potrebne/zadostne praznine	Izkušnje voznika, geometrija križišča
	Zaznavanje »konfliktnega« toka pešcev in prepoznavanje primerne praznine v glavnem prometnem toku	Ostrina vida, vidno polje, gibalne zmogljivosti zgornjega dela telesa voznika, kognitivni procesi, geometrija križišča
	Nadzor/vodenje vozila skozi križišče	Izkušnje voznika, geometrija križišča, talne označbe in signalizacija, osvetlitev

Tabela 1 • Zaporedje dogodkov/aktivnosti voznikov pri vožnji v križišču (manever levega zavijanja)

vanju hitrosti prihajajočega vozila). Izziv je, kako ugotoviti natančnost voznikovih sposobnosti za oceno trajanja praznine v prometnem toku v odvisnosti od npr. vozniskega staža, števila prevoženih kilometrov, pogostosti voženj, voznje v funkciji sovoznika ...

5 • EKSPERIMENT

Eksperiment oz. pilotni projekt je bil narejen v Mariboru in Celju na dvanajstih nivojskih križiščih. Od dvanajstih križišč je bilo šest semaforiziranih in šest nesemaforiziranih. Na območju šestih križišč je omejitve hitrosti na glavni prometni smeri 70 km/h, v šestih križiščih je omejitve hitrosti na glavni prometni smeri 50 km/h.

V vsakem križišču je bilo izvedeno opazovanje obnašanja starejših udeležencev od trenutka zaustavitve vozila (zaradi prometnega znaka ali rdeče luči na semaforju). V nekaterih križiščih je opazovanje izvedeno fizično, v nekaterih pa s kamero.

Vreme v času vseh opazovanj je bilo jasno, vozišče je bilo suho. Opazovanja so izvajana v dopoldanskem času zunaj jutranje prometne konice. Časi so bili mer-

Pomembna pri izvedbi prometnega manevra levega zavijanja v križišču je tudi odločitev voznika, ali je določena praznina v prometnem toku ustrezna oziroma presega želeno minimalno velikost.

Tudi ob podobnih geometrijskih in prometnih razmerah obstajajo pomembne razlike v

jeni s štoparico ali pa razbrani iz videoposnetkov.

V vsakem križišču je bilo analiziranih vsaj 40 starejših voznikov (obeh spolov).

Starost voznika je bila ocenjena subjektivno pri opazovalcu.

Analiza je bila omejena na prometni manever levega zavijanja, iz stranske na glavno prometno smer.

Zavedamo se, da bi bilo treba za resno, znanstveno utemeljeno raziskavo analizo opraviti na večjem vzorcu križišč in na mnogo večjem vzorcu starejših voznikov. Prav tako se zavedamo, da bi bilo analizo treba narediti tudi v različnih vremenskih razmerah (moko, poledenelo, zasneženo vozišče), različnih pogojih vidljivosti (megla, tema) in različnih

najmanjši velikosti praznine v prometnem toku, ki so jo pripravljene sprejeti različni vozniki. Ni znanih raziskav, ki bi se ukvarjale s korelacijo minimalne vrednosti praznine kot funkcije voznikove starosti.

prometnih razmerah (različne jakosti prometnega toka). Prav tako bi bilo smiselno analizo razdeliti na križišča z ločenim pasom za leve zavijalce in brez njih.

Ne glede na prej navedeno v nadaljevanju podajamo izsledke opravljene raziskave:

- Starejši vozniki uporabljajo krajše časovne praznine v semaforiziranih križiščih v primerjavi z nesemaforiziranimi križišči.
- Starejši vozniki uporabljajo krajše časovne praznine v križiščih z ločenimi pasovi za leve zavijalce.
- Na izbiro časovnih praznin starejših voznikov močno vplivajo nivojski prehodi za pešce.
- V križiščih z omejitvijo hitrosti na glavni prometni smeri pri 70 km/h so izbrane časovne praznine za skoraj 50 % daljše kot v križiščih z omejitvijo 50 km/h.
- Starejši vozniki izbirajo krajše časovne praznine v trikakah križiščih (za 30 % krajše) kot v štirikakah.

v standardnih nivojskih križiščih, bo treba veliko pozornost posvetiti prav tem, saj ne moremo pričakovati, da bomo prav vsa standardna križišča lahko nadomestili s krožnimi.

V standardnih križiščih najbolj nevaren prometni manever predstavlja zavijanje v levo.

Z namenom ugotavljanja dejanskega obnašanja starejših voznikov v standardnih križiščih je bila narejena analiza obnašanja voznikov. Pri izbiri časovnih praznin med vozili na glavni prometni smeri s strani voznikov na stranski prometni je bila ugotovljena velika odvisnost od tipa križišča, geometrije, omejitve hitrosti na glavni prometni smeri ter prisotnosti pešcev in kolesarjev v križišču.

6 • SKLEP

Značilnosti populacije voznikov se spreminjajo in podoben trend je pričakovati tudi v prihodnje, kar pomeni, da se bo delež voznikov, starih 65 let in več, v celotni populaciji povečeval. V ta namen je treba za zagotavljanje prometne varnosti zagotoviti infrastrukturne rešitve, ki bodo omogočale vključevanje in varno vožnjo starejših voznikov v prometu ter s tem tudi ustrezne pogoje za druge voznike.

Starejši vozniki imajo fizične in fiziološke značilnosti, ki vplivajo na njihovo vožnjo in so lahko vzrok za večje število prometnih nesreč

starejših voznikov, kar se posebej izraža na območju križišč oziroma pri vožnji skozi križišče.

Za oceno učinkovitosti ukrepov in sprememb infrastrukture je potreben ustrezen pristop, ki mora vključevati dejavnike, ki v največji meri označujejo razliko med starejšimi in mlajšimi vozniki. Ukrepi in spremembe morajo biti zasnovani predvsem kot pomoč starejšim voznikom, ocena učinkovitosti le-teh pa upoštevati njihov vpliv na celotno populacijo voznikov. Glede na dokazano dejstvo, da za starejše voznike največjo nevarnost predstavlja vožnja

7 • LITERATURA

Bernauer, E., Breheret, L., Algers, S., Boero, M., Taranto, C., Dougherty, M., Fox, K., and Gabard, J.F., Review of Micro-Simulation Models. Report prepared by the Institute for Transportation Studies, University of Leeds, Great Britain, 1997.

Braitman, K. A., Kirley, B. B., Ferguson, S., Chaudhary N. K., Factors leading to older drivers' intersection crashes, Traffic Injury Prevention, 8(3), 267–74, 2007.

- Burkhardt, J. E., McGavock, A. T., Tomorrow's Older Drivers: Who? How Many? What Impacts? Presented at the 78th Annual TRB Meeting held in Washington D. C., Jan. 10-14, 1999.
- Burns, P. C., Navigation and the mobility of older drivers, *Journal of Gerontology: Social Sciences*, 54(1), 49–55, 1999.
- Chipman, M. L., Payne J., McDonough, P., To drive or not to drive: the influence of social factors on the decisions of elderly drivers, *Accident Analysis and Prevention*, 30(3), 299–304, 1998.
- Cooper, P. J., Differences in accident characteristics among elderly drivers and between elderly and middle-age drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 22, 499–508.
- Evans, L., Older driver involvement in fatal and severe traffic crashes, *Journal of Gerontology: Social Sciences*, 43(6), 186–193, 1988.
- Fisk, A. D., Rogers, W. A., *The Handbook of Human Factors and the Older Adult*, San Diego, CA: Academic Press, 1997.
- Garber, N., Srinivasan, R., Risk assessment of elderly drivers at intersections: statistical modeling, *Transportation Research Record*, 1325, 17–22, 1991.
- Guerrier, J. H., Manivannan, P., & Nair, S. N., The role of working memory, field dependence, visual search, and reaction time in the left turn performance of older female drivers. *Applied Ergonomics*, 1999
- Hakamies-Blomqvist, L. E., Fatal accidents of older drivers, *Accident Analysis and Prevention*, 25(1), 19–27, 1993.
- Hancock, P. A., Caird, J. K., Shekhar, S., Vercruyssen, M., Factors influencing driver's left turn decision, *Proceedings of the Human Factors Society*, vol 2, 35 Annual Meeting: September 2-6, San Francisco, CA, 1139–1143, 1991.
- Hauer, E., The safety of older persons in intersections. In *Transportation in an Ageing Society: Improving mobility and Safety for Older Persons*, Washington D.C: Transportation Research Board, National Research Council, 1988.
- Hu, P. S., Young, J., 1990 Nationwide Personal Transportation Survey, FHWA-PL-94-010A, Oak Ridge National Laboratory for the Federal Highway Administration, Washington D. C., 1993.
- Isler, R. B., Parsonson, B. S., Hansson, G. J., Age related effects of restricted head movements on the useful field of view of drivers, *Accident Analysis and Prevention*, 29(6), 793–801, 1997.
- Keskinen, E., Ota, H., Katila, A., Older drivers fail in intersections: speed discrepancies between older and younger male drivers, *Accident Analysis and Prevention*, 30(3), 323–330, 1998.
- Kline, D. W., Kline, T. J., Fozard, J. L., Kosnik, W., Schieber, F., Sekuler, R., Vision, aging, and driving: the problems of older drivers, *Journal of Gerontology*, 47(1), 27–34, 1992.
- Lerner, N., Age and driver time requirements at intersections, *Proceedings of the 38th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, Oct 24-28, v2, Nashville, TN, USA, Inc. Santa Monica CA USA, 842–846, 1994.
- Lyman, S., Ferguson, S., Braver, E., Williams, A., Older driver involvements in police reported crashes and fatal crashes: trends and projections" *Injury Prevention*, 2002.
- McGwin, G. Jr., Brown, D. B., Characteristics of traffic crashes among young, middle-aged, and older drivers, *Accident Analysis and Prevention*, 31 (2), 181–198, 1999.
- Molnar, L. J., Eby, D. W., Charlton, J. L., Langford, J., Koppel, S., Marshall, S., Man-Son-Hing, M., Driving avoidance by older adults: Is it always self-regulation? *Accident Analysis and Prevention*, 57, 96–104, 2013.
- Morgan, R., King, D., The Older Driver - Review. *Postgraduate Medical Journal*, 71, 525–528, 1995.Br
- NHTSA, National Highway Traffic Safety Administration, *Traffic Safety facts 1999*, U. S. Department of Transportation, *Transportation Older Persons - Volumes 1 and 2*, Washington, D. C., 2000.
- Owsley, C., Ball, K., Sloane, M.E., Roenker, D.L. & Bruni, J.R., Visual/cognitive correlates of vehicle accidents in older drivers. *Psychology and Aging*, 1991.
- Szlyk, J. P., Seiple, W., Viana, M., Relative effects of age and compromised vision on driving performance, *Human Factors*, 37(2), 430–436, 1995.
- Viano, D. C., Culver, C. C., Evans, L., Frick, M., Involvement of older drivers in multivehicle side-impact crashes. *Accident Analysis and Prevention*, 1990.

ENOSTAVNI LINIJSKI KONČNI ELEMENT ZA ANALIZO UPOGIBA IN UKLONA RAZPOKANIH NOSILCEV Z LINEARNO SPREMINJAJOČO SE ŠIRINO

SIMPLE 1D FINITE ELEMENT FOR BENDING AND BUCKLING ANALYSIS OF CRACKED BEAMS WITH LINEAR VARIATION OF WIDTH

izr. prof. dr. Matjaž Skrinar, univ. dipl. inž. grad.

matjaz.skrinar@um.si

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo,
Smetanova ulica 17, 2000 Maribor

Znanstveni članek

UDK 519.61/.64:624.072.2

Povzetek | Razpoke so tipični predstavniki lokalnih redukcij togosti, ki lahko znatno spremenijo duktilnost, togost in nosilnost nosilcev med obremenitvijo. Članek obravnava računsko modeliranje razpokanih nosilcev z linearno spremenljivimi širinami z že znanim poenostavljenim modelom, kjer so razpoke predstavljene z rotacijskimi vzmetmi, ki upoštevajo preostalo upogibno togost preseka. Za ta model »diskretne vzmeti« se je že izkazalo, da omogoča enostavno in učinkovito analizo upogiba prečno razpokanih vitkih nosilcev, ki so izpostavljeni majhnim prečnim premikom, pri čemer se za vzmeti privzame osnovna linearna zveza med upogibnim momentom in razliko zasukov. Članek razširja uporabo že uveljavljenega modela na nosilce pravokotnih prerezov z linearno spremenljivimi širinami, saj predstavlja izpeljavo ustrezne izvirne togostne matrike že znanega numeričnega modela. Izpeljana togostna matrika tako definira preprost, a vseeno funkcionalen linijski končni element za uporabljeni računski model. Področje njegove uporabe se razširi s predstavitvijo ustreznega obtežnega vektorja zaradi linearno porazdeljene prečne obtežbe. Vsi predstavljeni izrazi za analizo čistega statičnega upogiba nosilcev s prečno razpoko z upoštevanjem upogibnih deformacij v skladu z Euler-Bernoullijevo teorijo so podani v zaključenih oblikah, kar olajša njihovo uporabo. Čeprav obravnavane rešitve temeljijo na približnih rešitvah poenostavljenega modela, predstavljene numerične študije jasno kažejo njihovo uporabnost za enostavne in hkrati računsko učinkovite analize upogiba in uklona. Predstavljene rešitve je mogoče brez težav uporabiti tudi za ocenjevanje odziva elementov nosilcev z več razpokami z uporabo dokaj majhnega modela linijskih končnih elementov.

Ključne besede: prečno razpokani nosilci z linearnim spreminjanjem širine, poenostavljeni računski model prečne razpoke, metoda končnih elementov, togostna matrika in obtežni vektor

Summary | Cracks are typical representatives of local stiffness reductions that can significantly decrease the performance of slender beams under load. The paper considers modelling of cracked beams with linearly varying widths by a simplified computational model, where the cracks are represented by means of internal hinges endowed with rotational springs that take into account the residual stiffness. For these springs, the fundamental linear moment-rotation relation is assumed. This "discrete spring" model

has already been shown to enable effortless and efficient implementation in bending of transversely cracked slender beams subjected to small deflections. This paper expands the utilisation of the already established model to beams of rectangular cross-sections with linearly varying widths. It presents the derivation of the corresponding original stiffness matrix, which defines an easy to implement functional 1D finite element for the already known simplified numerical model. The implementation of the presented element is expanded by presenting the coefficients of the corresponding load vector due to a linearly distributed transverse load. The newly presented expressions for the static flexure of Euler–Bernoulli beam with a transverse crack are given in closed-forms. Although the discussed solutions are based on approximate solutions of the simplified model, the presented numerical studies clearly show their applicability for straightforward as well as computationally efficient analyses. These presented solutions can be effortlessly utilised even for evaluating the response of beam elements with multiple cracks by implementing a rather small number of 1D finite elements.

Key words: transversely cracked beams with a linear variation of width, simplified computational model of a transverse crack, finite element method, stiffness matrix and load vector

1 • UVOD

Pojav degenerativnih učinkov v konstrukcijah med uporabo lahko spremeni njihov mehanski odziv tako, da pomembno reducira togost in potencialno povzroči njihovo odpoved. Zato so bile opravljene številne študije, ki obravnavajo pravočasno odkrivanje in identifikacijo zmanjšanja togosti v konstrukcijah. Pristopi za odkrivanje in karakterizacijo poškodb na konstrukcijah pogosto temeljijo na metodah merjenega odziva, saj pojav poškodbe spremeni odziv konstrukcije. Vendar pa učinkovitost teh pristopov ni odvisna samo od kakovosti izmerjenih informacij, ampak tudi od zanesljivosti računskih modelov, ki se uporabljajo pri modeliranju mehanskega obnašanja.

Čeprav detajlni modeli 2D ali 3D končnih elementov zagotovo ponujajo najboljše možnosti za opis odziva splošne konstrukcije kot tudi natančno analizo napetostnega stanja v bližini razpoke ter posledično morebitne spremembe njene globine, se v tehnikah nadzora varnosti konstrukcij običajno uporabljajo poenostavljeni modeli, ki zahtevajo manj podatkov.

Model »diskretne vzmeti«, ki so ga za nosilce predstavili Okamura in sodelavci (Okamura, 1969), je uporabljen v številnih raziskavah. Ta model privzema osnovne predpostavke inženirske teorije upogiba nosilcev: material je linearno elastičen po Hookovem zakonu, ravnine presekov pa ostanejo ravnine in pravokotne na nevtralno os tudi po deformaciji. Ker razpoka v konstrukcijskem elementu spremeni lokalno enakost zasukov, je razpoka v

tem matematičnem prikazu modelirana kot brezmasna rotacijska linearna vzmet ustrezne togosti, odvisne od globine razpoke. Sosednja nerazpokana dela nosilca na levi in desni od razpoke sta modelirana kot elastična elementa, ki ju povezuje rotacijska vzmet, za katero se privzame osnovni linearni konstitutivni zakon med upogibnim momentom in zasukoma delov ob razpoki. Prvo definicijo rotacijske vzmeti za pravokotni prerez so podali Okamura et al. in ta definicija upošteva tudi Poissonov količnik. Dodatne definicije so nato predstavili še drugi raziskovalci ((Dimarogonas, 1983), (Rajab, 1991), (Ostachowicz, 1990), (Krawczuk, 1993), (Sundermayer, 1993), (Hasan, 1995), (Skrinar, 2004)).

Zaradi svoje enostavnosti (potrebni sta samo informaciji o lokaciji in globini razpoke) je bil ta poenostavljeni računski model intenzivno uporabljan pri analizi vibracij razpokanih nosilcev ((Labib, 2014), (Bakhtiari-Nejad, 2014)), različnih pristopih za inverzno identifikacijo razpok ((Labib, 2015), (Khiem, 2014a), (Khiem, 2014b), (Sung, 2014)) kot tudi pri eksperimentalnih inverzih identifikacijah razpoke ((Cao, 2014), (Gawande, 2016)).

Po pionirskih delih Tharpa (Tharp, 1987) ter Gounarisa in Dimarogonasa (Gounaris, 1988) za element nosilca z eno samo prečno razpoko so se raziskave osredotočile na rešitve z uporabo končnih elementov.

Več prispevkov je bilo namenjenih končnemu elementu Euler–Bernoullievega nosilca s poljub-

nim številom prečnih razpok. Razlikujejo se po pristopih, uporabljenih za pridobivanje zaključnih oblik rešitev pripadajoče diferencialne enačbe prečnih pomikov. Tako so bili statični prečni premiki in različne oblike togostne matrike izpeljani z uporabo Diracove funkcije delta za upogibno togost (Biondi, 2007) ali fleksibilnost (Palmeri, 2011) z zaporednimi rešitvami vezanih diferencialnih enačb (Skrinar, 2009) pa tudi z načelom virtualnega dela (Skrinar, 2012).

Večina raziskav je omejenih na elemente s konstantnimi prečnimi prerezi. Kadar se obravnavajo ravni nerazpokani nosilci s spremenljivim prečnim prerezom, se njihove geometrije navadno diskretizirajo s pomočjo večjega števila linijskih končnih elementov, ki imajo v vsakem elementu konstanten prečni prerez. Taka idealizacija geometrije z odsekovno konstantnimi preseki v pripadajočem matematičnem modelu zahteva ustrezno gosto diskretizacijo, da se doseže konvergenca rezultatov. Ko se obravnavajo razpokani nosilci, pa lahko takšno modeliranje neposredno vpliva tudi na geometrijske lastnosti razpok, kar posledično učinkuje na hitrost in vrsto (enostransko monotona ali oscilirajoča) konvergenca. Skrinar (Skrinar, 2013) je predstavil končni element nosilca za statično analizo upogiba nosilcev s poljubnim številom razpok, kjer so bili izpeljani ločeni izrazi za nosilce z odsekovnim konstantnim prečnim prerezom, ter nosilce z linearno variacijo višine. Čeprav je uporaba načela virtualnega dela omogočala elegantno izpeljavo togostne matrike elementa s poljubnim številom razpokanih odsekovno konstantnih presekov, pristop ni bil uporaben

za izpeljavo geometrijske togostne matrike. Pri tem je bilo opaženo še, da koeficienti za nosilce z linearno variacijo višine niso neposredno uporabni za nosilce enakomerne višine.

V tem članku je področje uporabe poenostavljenega modela razpoke razširjeno na nosilce z linearno spremenljivimi širinami, in sicer z

izpeljavo nove togostne matrike v zaključeni obliki ter koeficientov obtežnega vektorja. To matriko je mogoče nadalje uporabiti v kombinaciji z geometrijsko togostno matriko razpokanega nosilca, s čimer se razširi uporaba predstavljenih rešitev tudi v probleme analize uklona.

Čeprav so interpolacijske funkcije za prečne premike, uporabljene v izpeljavah, le približki rešitev pripadajočih diferencialnih enačb, predstavljene numerične študije potrjujejo, da vodijo do rezultatov, primerljivih s podrobnejšimi modeli končnih elementov.

2 • FORMULACIJA RAČUNSKEGA MODELA KONČNEGA ELEMENTA RAZPOKANE GREDE

Predstavljeni dvovozliščni končni element obravnava razpokane homogene elastične Bernoulli-Eulerjeve nosilce. Za element skupne dolžine L se tako predpostavi, da ima prečno razpoko, ki se nahaja na razdalji L_1 od začetnega vozlišča. Upošteva se spremenljiv pravokotni prerez, pri čemer je višina prereza h konstantna, medtem ko se širina $b(x)$ linearno spreminja vzdolž nosilca.

Pri izpeljavi je bil uporabljen model »diskretne vzmeti«, kjer se zaradi lokaliziranega učinka razpoke celoten nosilec obravnava kot razdeljen na dva elastična odseka, ki se stikujeta ob

razpoki. Ta sosednja nerazpokana odseka sta povezana z rotacijsko vzmetjo, za katero je privzeta osnovna linearna konstitutivna zveza med razliko rotacij in upogibnim momentom. Predpostavljeno je, da je globina d_i enakomerna po širini prereza. Pripadajoča vzmetna konstanta K_r je funkcija širine preseka $b(L_1)$, relativne globine razpoke $\delta_i = d_i/h$, modula elastičnosti E , Poissonovega količnika ν in upogibne togosti $EI(L_1)$ nerazpokanega prereza na mestu razpoke.

Obravnavani končni element ima štiri standardne prostostne stopnje: prečni premik Y_1 in

zasuk Φ_1 na levem koncu (vozlišče 1) kot tudi prečni pomik Y_2 in zasuk Φ_2 na desnem koncu (vozlišče 2). Kot pozitivna sta upoštevana pomika navzgor in profiurna zasuka.

Pri tem je smiselno opozoriti, da čeprav model vodi do informacij o prečnih pomikih, zaradi svojega kinematičnega opisa razpoke ni samostojno uporaben za določitev korektnih razporeditve normalnih napetosti v bližini, predvsem pa v vrhu razpoke, ki je ključna za analizo zgodovine razvoja razpoke po njenem nastanku. V tem primeru bi bilo v analizi treba upoštevati natančnejše konstitucijske zakone materiala (za beton v nategu lahko uporabimo npr. modificirani konstitucijski diagram po Berganu (Bergan, 1979), za obnašanje v tlaku pa nelinearni konstitucijski zakon iz standarda Evrokod 2 (SIST, 2005).

3 • IZPELJAVE

3.1 Izpeljava togostne matrike

V izpeljavi je uporabljena Euler-Bernoullijeva teorija upogiba nosilcev kot poenostavitev linearne teorije elastičnosti, ki omogoča izračun upogibnice nosilcev za znano prečno obtežbo. Ta teorija temelji na dveh glavnih predpostavkah: ravni preseki ostajajo ravni tudi po deformaciji; in presek nosilca, ki je bil pravokoten na nevtralno os pred deformacijo nosilca, ostane pravokoten na nevtralno os tudi po deformaciji nosilca. Diferencialna enačba (DE) upogiba ravnih simetričnih nosilcev ($I_{yz} = 0$), ki je podana v številnih referencah (Reddy, 1994), je za nerazpokane nosilce podana v obliki:

$$\frac{d^2}{dx^2} \left(EI(x) \cdot \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \right) = q(x) \quad 0 < x < L, \quad (1)$$

kjer $v(x)$ predstavlja prečni premik težiščne osi nosilca zaradi zvezne prečne obtežbe $q(x)$ kot funkcijo koordinate x . Ker je diferencialna enačba (1) četrtega reda, so za določitev integracijskih konstant potrebni štiri robni pogoji, ki pa so odvisni od načina podpiranja. Pogoj se lahko nanašajo na informacije o pomikih, njihovih odvodih (t. i. zasukih), prečnih silah in upogibnih momentih.

Pri iskanju rešitve s končnimi elementi se diferencialna enačba pretvori v ustrezno šibko obliko:

$$\int_{x=0}^L \left(EI(x) \cdot \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \cdot \frac{d^2 v(x)}{dx^2} - w(x) \cdot q(x) \right) \cdot dx + \left(w(x) \cdot \frac{d}{dx} \left(EI(x) \cdot \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \right) - \frac{dw(x)}{dx} \cdot EI(x) \cdot \frac{d^2 v(x)}{dx^2} \right) \Big|_0^L = 0, \quad (2)$$

kjer je $w(x)$ utežna funkcija.

Kadar obravnavamo standardni nerazpokani končni element dolžine L s štirimi prostostnimi stopnjami, lahko iščemo numerično rešitev diferencialne enačbe v naslednji splošni obliki popolnega polinoma:

$$v_N(x) = a_1 + a_2 \cdot x + a_3 \cdot x^2 + a_4 \cdot x^3 \quad 0 \leq x \leq L, \quad (3)$$

kjer so neznane konstante a_1, a_2, a_3 in a_4 pridobljene iz kinematičnih robnih pogojev. Za nekonstanten prečni prerez ta polinomska oblika ni enaka matematični obliki točne rešitve diferencialne enačbe, kar pomeni, da bo numerična rešitev, dobljena z enačbo (3), le približek točnih rešitev diferencialne enačbe.

Splošna rešitev se po navadi zapiše v obliki, v kateri je jasno razviden vpliv vsake od štirih prostostnih stopenj (prečnih pomikov Y_1 in Y_2 kot tudi vozliščnih zasukov Φ_1 in Φ_2), enačba (4):

$$v_N(x) = Y_1 \cdot N_1(x) + \Phi_1 \cdot N_2(x) + Y_2 \cdot N_3(x) + \Phi_2 \cdot N_4(x), \quad (4)$$

kjer funkcije $N_i(x)$ ($i = 1, \dots, 4$) predstavljajo interpolacijske funkcije, ki so kubični polinomi, in morajo izpolnjevati ustrezne kinematične robne pogoje pomikov (pri čemer mora veljati $v_N(0) = Y_1$ in $v_N(L) = Y_2$) in njihovih odvodov (pri čemer mora veljati $\frac{dv_N(0)}{dx} = \Phi_1$ in $\frac{dv_N(L)}{dx} = \Phi_2$). Vendar prečni pomiki celotnega nerazpokanega elementa ne morejo biti opisani z enovito funkcijo, saj razpoka razdeli nosilec v dva elastična odseka. Zato so za dela levo in desno od razpoke potrebne različne interpolacijske funkcije:

$$v_{1,N}(x) = Y_1 \cdot N_{1,1}(x) + \Phi_1 \cdot N_{1,2}(x) + Y_2 \cdot N_{1,3}(x) + \Phi_2 \cdot N_{1,4}(x) \quad 0 \leq x \leq L_1 \quad (5)$$

$$v_{2,N}(x) = Y_1 \cdot N_{2,1}(x) + \Phi_1 \cdot N_{2,2}(x) + Y_2 \cdot N_{2,3}(x) + \Phi_2 \cdot N_{2,4}(x) \quad L_1 \leq x \leq L \quad (6)$$

Interpolacijske funkcije morajo izpolnjevati ne standardnih kinematičnih robnih pogojev, temveč tudi kinematične pogoje zveznosti pomikov in njihovih odvodov kot tudi pogoje zveznosti prečnih sil in upogibnih momentov na mestu razpoke. V skladu s predpostavkami, ki so jih predstavili Okamura in sodelavci in so privzete v prikazanih izpeljavah, na mestu razpoke nastopi enakost pomikov ($v_{1,N}(L_1) = v_{2,N}(L_1)$), enakost momen-

to vodi do $v_{1,N}''(L_1) = v_{1,N}''(L_1)$ ter prečnih sil (kar vodi do $v_{1,N}'(L_1) = v_{1,N}'(L_1)$). Pojav odprtja razpoke pa povzroči nezveznost zasukov na mestu razpoke, in odprtje razpoke oz. razlika obeh zasukov na mestu razpoke je povezano z upogibnim momentom v tej točki, kar vodi do pogoja $EI(L_1) \cdot v_{1,N}''(L_1) = K_r \cdot (v_{2,N}'(L_1) - v_{1,N}'(L_1))$.

Ustrezne interpolacijske funkcije so tako:

$$N_{1,1} = \frac{\bar{L} - 3 \cdot a_1 \cdot x^2 + a_2 \cdot x^3}{\bar{L}} \quad (7)$$

$$N_{1,2} = \frac{\bar{L} \cdot x + a_3 \cdot x^2 + a_1 \cdot x^3}{\bar{L}} \quad (8)$$

$$N_{1,3} = \frac{3 \cdot a_1 \cdot x^2 - a_2 \cdot x^3}{\bar{L}} \quad (9)$$

$$N_{1,4} = \frac{a_4 \cdot x^2 + a_5 \cdot x^3}{\bar{L}} \quad (10)$$

$$N_{2,1} = \frac{a_6 + a_7 \cdot x - 3 \cdot a_1 \cdot x^2 + a_2 \cdot x^3}{\bar{L}} \quad (11)$$

$$N_{2,2} = \frac{a_8 + a_9 \cdot x + a_3 \cdot x^2 + a_1 \cdot x^3}{\bar{L}} \quad (12)$$

$$N_{2,3} = \frac{a_7 \cdot L_1 - a_7 \cdot x + 3 \cdot a_1 \cdot x^2 - a_2 \cdot x^3}{\bar{L}} \quad (13)$$

$$N_{2,4} = \frac{-a_{10} \cdot L_1 + a_{10} \cdot x + a_4 \cdot x^2 + a_5 \cdot x^3}{\bar{L}} \quad (14)$$

z naslednjimi okrajšavami:

$$\begin{aligned} a_1 &= L^2 + 2 \cdot L_1 \cdot \Psi \\ a_2 &= 2 \cdot L + 2 \cdot \Psi \\ a_3 &= -2 \cdot L^3 - 6 \cdot L_1^2 \cdot \Psi \\ a_4 &= -L^3 + 6 \cdot (L_1 - L) \cdot L_1 \cdot \Psi \\ a_5 &= L^2 + 2 \cdot (L - L_1) \cdot \Psi \\ a_6 &= L^4 + L^2 \cdot (4 \cdot L - 6 \cdot L_1) \cdot \Psi \\ a_7 &= 6 \cdot L \cdot (-L + 2 \cdot L_1) \cdot \Psi \\ a_8 &= L^2 \cdot L_1 \cdot (4 \cdot L - 6 \cdot L_1) \cdot \Psi \\ a_9 &= L^4 + 6 \cdot L \cdot L_1 \cdot (-L + 2 \cdot L_1) \cdot \Psi \\ a_{10} &= 2 \cdot L^2 \cdot (-L + 3 \cdot L_1) \cdot \Psi \\ \bar{L} &= L \cdot (L^3 + 4 \cdot L^2 \cdot \Psi + 12 \cdot (L_1 - L) \cdot L_1 \cdot \Psi) \end{aligned}$$

$$z \Psi = \frac{EI(L_1)}{K_r}$$

Funkcije zapišemo v vektorski obliki kot:

$$\{N_1(x)\} = \begin{Bmatrix} N_{1,1} \\ N_{1,2} \\ N_{1,3} \\ N_{1,4} \end{Bmatrix} \text{ in } \{N_2(x)\} = \begin{Bmatrix} N_{2,1} \\ N_{2,2} \\ N_{2,3} \\ N_{2,4} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

Togostno matriko končnega elementa SLWCB izpeljemo iz celotne deformacijske energije normalnih specifičnih deformacij ϵ_{xx} shranjene v nosilcu, kot:

$$[K_e] = \int_{x=0}^{L_1} EI(x) \cdot \frac{d^2\{N_1(x)\}}{dx^2} \cdot \frac{d^2\{N_1(x)\}}{dx^2} \cdot dx + \int_{x=L_1}^{L_2} EI(x) \cdot \frac{d^2\{N_2(x)\}}{dx^2} \cdot \frac{d^2\{N_2(x)\}}{dx^2} \cdot dx$$

$$EI(x) \cdot \frac{d^2\{N_2(x)\}}{dx^2} \cdot \frac{d^2\{N_2(x)\}}{dx^2} \cdot dx + K_r \cdot \left(\frac{d\{N_1(x)\}}{dx} \right)_{x=L_1} - \frac{d\{N_2(x)\}}{dx} \Big|_{x=L_1} \cdot \left(\frac{d\{N_1(x)\}}{dx} \Big|_{x=L_1} - \frac{d\{N_2(x)\}}{dx} \Big|_{x=L_1} \right)^T \quad (16)$$

Iz enačbe (16) sta jasno vidna ločena prispevka obeh elastičnih delov nosilca kot tudi rotacijske vzmeti. Integracija tako vodi do:

$$\begin{aligned} [k] &= \frac{E \cdot h^3 \cdot L}{12 \cdot \bar{L}^2} \cdot \begin{bmatrix} 9 \cdot a_1^2 & -3 \cdot a_1 \cdot a_3 & -9 \cdot a_1^2 & -3 \cdot a_1 \cdot a_4 \\ -3 \cdot a_1 \cdot a_3 & a_3^2 & 3 \cdot a_1 \cdot a_3 & a_3 \cdot a_4 \\ -9 \cdot a_1^2 & 3 \cdot a_1 \cdot a_3 & 9 \cdot a_1^2 & 3 \cdot a_1 \cdot a_4 \\ -3 \cdot a_1 \cdot a_4 & a_3 \cdot a_4 & 3 \cdot a_1 \cdot a_4 & a_4^2 \end{bmatrix} \cdot 2 \cdot (b_0 + b_L) \\ &+ \frac{E \cdot h^3 \cdot L}{12 \cdot \bar{L}^2} \cdot \begin{bmatrix} -6 \cdot a_1 \cdot a_2 & -3 \cdot a_1^2 + a_2 \cdot a_3 & 6 \cdot a_1 \cdot a_2 & a_2 \cdot a_4 - 3 \cdot a_1 \cdot a_5 \\ -3 \cdot a_1^2 + a_2 \cdot a_3 & 2 \cdot a_1 \cdot a_3 & 3 \cdot a_1^2 - a_2 \cdot a_3 & a_1 \cdot a_4 + a_3 \cdot a_5 \\ 6 \cdot a_1 \cdot a_2 & 3 \cdot a_1^2 - a_2 \cdot a_3 & -6 \cdot a_1 \cdot a_2 & 3 \cdot a_1 \cdot a_5 - a_2 \cdot a_4 \\ a_2 \cdot a_4 - 3 \cdot a_1 \cdot a_5 & a_1 \cdot a_4 + a_3 \cdot a_5 & 3 \cdot a_1 \cdot a_5 - a_2 \cdot a_4 & 2 \cdot a_4 \cdot a_5 \end{bmatrix} \cdot 2 \cdot L \cdot (b_0 + 2 \cdot b_L) \\ &+ \frac{E \cdot h^3 \cdot L}{12 \cdot \bar{L}^2} \cdot \begin{bmatrix} a_2^2 & a_1 \cdot a_2 & -a_2^2 & a_2 \cdot a_5 \\ a_1 \cdot a_2 & a_1^2 & -a_1 \cdot a_2 & a_2 \cdot a_4 \\ -a_2^2 & -a_1 \cdot a_2 & a_2^2 & -a_2 \cdot a_5 \\ a_2 \cdot a_5 & a_2 \cdot a_4 & -a_2 \cdot a_5 & a_5^2 \end{bmatrix} \cdot 3 \cdot L^2 \cdot (b_0 + 3 \cdot b_L) \\ &+ \frac{K_r}{\bar{L}^2} \cdot \begin{bmatrix} a_7^2 & a_7 \cdot (a_9 - \bar{L}) & -a_7^2 & a_{10} \cdot a_7 \\ a_7 \cdot (a_9 - \bar{L}) & (a_9 - \bar{L})^2 & -a_7 \cdot (a_9 - \bar{L}) & a_{10} \cdot (a_9 - \bar{L}) \\ -a_7^2 & -a_7 \cdot (a_9 - \bar{L}) & a_7^2 & -a_{10} \cdot a_7 \\ a_{10} \cdot a_7 & a_{10} \cdot (a_9 - \bar{L}) & -a_{10} \cdot a_7 & a_{10}^2 \end{bmatrix} \quad (17) \end{aligned}$$

Prepričati se je mogoče, da za enotno širino ($b_0 = b_L$) predstavljena togostna matrika pride v že znano obliko za prečno razpokane nosilce z enotno širino (Skrinar, 1996).

3.2 Izpeljava obtežnega vektorja zaradi linearno porazdeljene prečne zvezne obtežbe

Izpeljan je bil še obtežni vektor zaradi linearne razporejene prečne obtežbe po celotnem končnem elementu. Najprej je bila določena linearna funkcija $q(x)$ porazdelitve zvezne obtežbe (q_2 in q_1 sta vrednosti obtežbe v končnem in začetnem vozlišču), nato pa je bil obtežni vektor izračunan kot:

$$\{F_e\} = \int_{x=0}^{L_1} q(x) \cdot \{N_1(x)\} \cdot dx + \int_{x=L_1}^{L_2} q(x) \cdot \{N_2(x)\} \cdot dx \quad (18)$$

Če sta nadomestna vozliščna sila F_{n2} in upogibni moment M_{n2} v vozlišču 2 definirana kot:

$$F_{n2} = \frac{10 \cdot a_7 \cdot (L - L_1)^2 \cdot (L_1 \cdot (q_1 - q_2) - L \cdot q_{1,2}) + 3 \cdot L^4 \cdot (5 \cdot a_1 \cdot q_{1,3} - a_2 \cdot L \cdot q_{1,4})}{60 \cdot L \cdot \bar{L}} \quad (19)$$

$$M_{n2} = \frac{10 \cdot a_{10} \cdot (L - L_1)^2 \cdot (L_1 \cdot (q_2 - q_1) + L \cdot q_{1,2}) + L^4 \cdot (5 \cdot a_4 \cdot q_{1,3} + 3 \cdot a_5 \cdot L \cdot q_{1,4})}{60 \cdot L \cdot \bar{L}} \quad (20)$$

$$z: q_{i,j} = i \cdot q_1 + j \cdot q_2$$

potem lahko celotni obtežni vektor zaradi linearno porazdeljene obtežbe zapišemo kot:

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} q_{1,1} \cdot L / 2 - F_{n2} \\ q_{1,2} \cdot L^2 / 6 - F_{n2} \cdot L - M_{n2} \\ F_{n2} \\ M_{n2} \end{Bmatrix} \quad (21)$$

Ta vektor je uporaben tudi, kadar je nosilec obremenjen z enakomerno zvezno obtežbo ($q_1 = q_2$).

3.3 Uporaba modela v problemih uklona/stabilnosti

Prikazane interpolacijske funkcije lahko uporabimo tudi za pridobitev pripadajoče geometrijske togostne matrike elementa, kot:

$$\begin{aligned} [k_g] &= \int_{x=0}^{L_1} \frac{d\{N_1(x)\}}{dx} \cdot \frac{d\{N_1(x)\}}{dx} \cdot dx + \int_{x=L_1}^{L_2} \frac{d\{N_2(x)\}}{dx} \cdot \frac{d\{N_2(x)\}}{dx} \cdot dx \quad (22) \end{aligned}$$

Ker interpolacijske funkcije (enačbe (7)–(14)) kot tudi izračun geometrijske togostne matrike ne upoštevajo upogibne togosti, enačba (22) vodi do že znane geometrijske togostne

matrike za nosilec z eno prečno razpoko in konstantno širino (Skrinar, 2007).

4 • NUMERIČNE ŠTUDIJE

Z namenom prikaza uporabe izpeljanih koeficientov togostne matrike, obtežnega vektorja in interpolacijskih funkcij za izračun prečnih premikov kot tudi za demonstracijo kvalitete dobljenih numeričnih rešitev z uporabo poenostavljenega računskega modela so predstavljene tri numerične analize nosilcev z linearno spreminjajočo širino. Razlikujejo se po geometrijskih lastnostih, robnih pogojih, uporabljenih obtežbah ter številu in lokacijah razpok.

Za vsak primer sta bili pripravljene dve različni rešitvi z uporabo dveh modelov linijskih končnih elementov. Prvi računski model je sestavljen iz izpeljanih končnih elementov SLWCB. Najmanjše število uporabljenih končnih elementov pri analizi upogiba je bilo pogojeno s številom razpok vsakega problema. V nekaterih primerih (predvsem pri analizah uklona) pa so bile potrebne dodatne diskretizacije, da bi se izboljšala konvergenca rezultatov. Za ta model, ki je sestavljen izključno iz linijskih končnih elementov, je bila za izračun togosti rotacijske vzmeti med vsemi znanimi definicijami izbrana definicija Okamura. Pri vseh primerih je bila za vse razpoke upoštevana relativna globina razpoke 0,5, da bi se čim bolj zmanjšal njen vpliv na rezultate. Na osnovi vrednosti, ki sta jih predstavila Vestroni in Pau (Vestroni, 2011), je bilo namreč ugotovljeno, da kombinacija izbrane definicije in izbrane relativne globine daje rezultate, ki so izkazali dobro ujemanje z eksperimentalno pridobljenimi vrednostmi. Vzporedno z uporabo končnih elementov SLWCB je bil za vsak primer uporabljen dodaten računski model, kjer so bili uporabljeni linijski končni elementi razpokanih konstantnih prečnih presekov.

Kakovost rezultatov, pridobljenih iz linijskih modelov nosilcev, je bila dodatno preverjena z rezultati iz podrobnih modelov, pridobljenih z uporabo modela 3D končnih elementov, v katerih so bile razpokanosti obravnavanih elementov modelirane z diskretnimi razpokami, torej kot diskontinuitete v geometriji nosilcev.

4.1 Prvi primer – upogib konzole

V prvem primeru je obravnavana konzola z linearno spremenljivo širino dolžine $L = 4$ m. Upoštevana sta bila modul elastičnosti $E = 30$ GPa in Poissonov količnik $\nu = 0.3$. Prečni prerez je bil pravokotnik z višino $h = 0,4$ m, kjer se je širina b linearno povečevala od 0,2 m na levem koncu do 0,4 m na desnem koncu. Konzola je bila vpeta na desni strani

in edina prečna razpoka je bila na razdalji 2 m od levega, prostega konca. Analizirana sta bila dva obtežna primera.

4.1.1 Prvi obtežni primer – enakomerna zvezna obtežba

V prvem obtežnem primeru je bila konzola obtežena prečno navzdol z enakomerno obtežbo $q = 30000$ N/m vzdolž celotne konstrukcije.

Najprej sta bili rešeni vezani diferencialni enačbi upogiba poenostavljenega modela. Da bi izračunali funkciji prečnih pomikov vzdolž konstrukcije, je bilo treba analizirati dve elastični regiji (levo in desno od razpoke). Dobljeni natančni rešitvi modela sta:

$$v_1(x) = 0.1464 + 7.897 \cdot 10^{-2} \cdot x + 3.75 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 3.125 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 - 0.12 \cdot \ln(4 + x) - 0.03 \cdot x \cdot \ln(4 + x) \quad 0 \text{ m} \leq x \leq 2 \text{ m}$$

$$v_2(x) = 0.1495 + 7.738 \cdot 10^{-2} \cdot x + 3.75 \cdot 10^{-3} \cdot x^2 - 3.125 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 - 0.12 \cdot \ln(4 + x) - 0.03 \cdot x \cdot \ln(4 + x) \quad 2 \text{ m} \leq x \leq 4 \text{ m} \quad (23)$$

Prečni premik na prostem koncu je znašal -2.0005 cm navzdol, vrednost profiurnega zasuka pa $7.3858 \cdot 10^{-3}$ rad. Obe vrednosti sta bili potrjeni z virtualnim delom.

Nato so bile opravljene analize s končnimi elementi. V prvem modelu končnih elementov je bila konzola modelirana z enim standardnim razpokanim končnim elementom povprečne enakomerne širine $b = 0,3$ m.

Nato sta bili proučeni dve diskretizaciji s končnimi elementi SLWCB. V prvi diskretizaciji je bil za analizo uporabljen en sam končni element SLWCB. Po upoštevanju robnih pogojev v desnem vozlišču sta bili diskretni vrednosti pomika in zasuka v levem vozlišču izračunani z rešitvijo sistema dveh linearnih enačb:

$$\begin{bmatrix} 9 \cdot 10^6 & 16.48286 \cdot 10^6 \\ 16.48286 \cdot 10^6 & 39.03428 \cdot 10^6 \end{bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} v_1 \\ \Phi_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -60000 \\ -44828.614 \end{Bmatrix}$$

Dobljeni diskretni vrednosti vertikalnega pomika in zasuka prostega konca sta omogočili tudi formalni izračun navpične reakcije in upogibnega momenta v vpetem koncu. Ti vrednosti reakcij sta popolnoma ustrezali točnima vrednostima, ki ju je mogoče preprosto preveriti z elementarnimi ravnotežnimi pogoji. Sledil je izračun porazdelitve prečnih pomikov vzdolž osi konstrukcije z uporabo polinomskih interpolacijskih funkcij, enačbi (5)–(6). Dobljeni sta bili naslednji funkciji prečnih pomikov:

$$v_1(x) = -2.0134 \cdot 10^{-3} + 7.3535 \cdot 10^{-3} \cdot x + 3.2031 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 - 1.6960 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 \quad 0 \text{ m} \leq x \leq 2 \text{ m}$$

$$v_2(x) = -1.6583 \cdot 10^{-2} + 5.5781 \cdot 10^{-3} \cdot x + 3.2031 \cdot 10^{-4} \cdot x^2 - 1.6960 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 \quad 2 \text{ m} \leq x \leq 2 \text{ m}$$

Njuni obliki se jasno in bistveno razlikujeta od rešitev diferencialnih enačb, enačbi (23). Kljub temu je primerjava numeričnih vrednosti pokazala, da so razlike precej majhne. Odstopanja so se spreminjala od -0.129 mm na prostem koncu (napaka 0,645 %) do 0.215 mm (-3.754 % napake) na mestu razpoke.

Da bi se proučila konvergenca modela in hkrati dodatno prikazala uporabnost predstavljenega elementa pri analizi nerazpokanih nosilcev, je bil problem ponovno analiziran z uporabo dveh končnih elementov SLWCB enakih dolžin. Razpoka je bila modelirana na desnem koncu prvega, levega končnega elementa. Čeprav je bil drugi končni element nerazpokan, je bila

ustrezna togostna matrika dobljena s končnim elementom razpokanega nosilca z uporabo ustrezno majhne vrednosti za globino razpoke. Diskretne neznane vrednosti dveh vertikalnih premikov in dveh zasukov so bile izračunane s pomočjo rešitve sistema štirih linearnih enačb.

Na koncu je bila konstrukcija analizirana tudi z uporabo komercialnega programa COSMOS/M. Računalniški model je sestavljalo 48.000 3D »solid« končnih elementov z 74.538 vozlišči. V vsakem vozlišču so bile upoštewane tri prostostne stopnje – vertikalni in dva horizontalna pomika. Vertikalni in horizontalni premiki diskretnih točk modela so bili dobljeni z rešitvijo sistema 223.335 linearnih enačb.

Vrednosti prečnega pomika prostega konca vseh obravnavanih pristopov so podane v preglednici 1, kjer so podani tudi rezultati za prečni premik na mestu razpoke.

Iz preglednice je očitno odlično ujemanje rezultatov med rešitvami DE in modela 3D

Model/pristop	Prosti konec	Mesto razpoke
1 KE z enotno širino	-1,54551 cm	-0,43103 cm
1 SLWCB KE	-2,01341 cm	-0,55026 cm
2 SLWCB KE	-2,00184 cm	-0,57192 cm
DE	-2,00050 cm	-0,57172 cm
COSMOS/M	-2,01951 cm	-0,57833 cm

Preglednica 1 • Primerjava prečnih pomikov iz različnih računskih modelov.

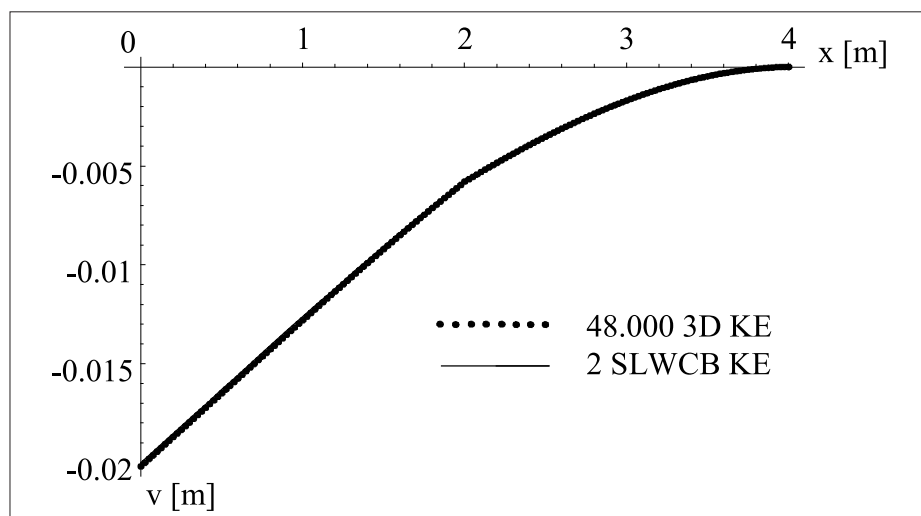
končnih elementov in zato so bile te vrednosti upoštevane kot referenčne vrednosti za modele iz linijskih končnih elementov.

Kot je bilo pričakovano, je model s končnim elementom z enotno povprečno širino vodil do najslabše ocene prečnega premika prostega konca (z napako -23,471 % glede na model 3D KE). Kakovost rezultata je še nekoliko slabša na mestu razpoke, kjer je ta model podcenil vrednost iz 3D-modela za -25,469 %.

Diskretizacija z uporabo enega samega končnega elementa SLWCB je že vodila do opazno boljših rezultatov. Napaki glede na model 3D KE sta za prosti konec in mesto razpoke znašali 0,302 % oziroma -4,853 %, za zasuk prostega konca pa je nastopila napaka v vrednosti -0,437 % glede na rešitev DE (vrednost zasuka v modelu 3D končnih elementov ni bila izračunana).

Iz preglednice pa je očitno, da so najboljši rezultati med modeli z uporabo linijskih končnih elementov dobljeni z modelom, ki ga sestavljata dva končna elementa SLWCB. Ta model je prinesel skoraj idealno ujemanje rezultatov tako z rešitvami DE kot tudi z rezultati modela 3D končnih elementov. Za premik in zasuk prostega konca sta namreč sledili napaki 0.067 % in -0.045 %. Prav tako je bila bistveno boljša vrednost ocenjenega premika na mestu razpoke, saj se je odstopanje zmanjšalo na -1.108 %.

Uporaba izračunanih diskretnih vozliščnih vrednosti v polinomskih interpolacijskih funkcijah je omogočila še dodaten izračun funkcij prečnih pomikov. Zelo dobro ujemanje pomikov je razvidno za vse točke vzdolž konzole, slika 1, kjer zvezne funkcije pomikov iz modela nosilca vizualno popolnoma sovpadata.



Slika 1 • Primerjava prečnih pomikov iz obeh uporabljenih modelov končnih elementov.

L_1	1 SLWCB KE	2 SLWCB KE	DE	COSMOS/M
0*	-1,69231 cm	-1,68308 cm	-1,68223 cm	-1,69106 cm
0.5	-1,70026 cm	-1,68973 cm	-1,68886 cm	-1,69788 cm
1.0	-1,74023 cm	-1,73116 cm	-1,72997 cm	-1,74065 cm
1.5	-1,84071 cm	-1,82957 cm	-1,82871 cm	-1,84271 cm
2	-2,01341 cm	-2,00184 cm	-2,00050 cm	-2,01951 cm
2.5	-2,26779 cm	-2,25689 cm	-2,25604 cm	-2,28127 cm
3.0	-2,61315 cm	-2,60386 cm	-2,60295 cm	-2,63502 cm
3.5	-3,05764 cm	-3,04767 cm	-3,04682 cm	-3,08557 cm

* nerazpokano stanje

Preglednica 2 • Primerjava prečnih pomikov za različne lokacije razpoke.

jo z diskretnimi vozliščnimi vrednostmi iz 3D-modela. Ujemanje rezultatov je odlično tudi pri primerjavi teh prečnih pomikov s točnimi rešitvami diferencialnih enačb.

Razpoka je bila nato modelirana na več mestih vzdolž konstrukcije in prečni pomiki prostega konca so bili primerjani z rezultati modela 3D končnih elementov, preglednica 2. Namen te primerjave je bilo preučevanje vpliva položaja razpoke na deformacijo prostega konca.

Tudi iz preglednice 2 je razvidno odlično ujemanje med rezultati modela 2 SLWCB končnih elementov proti vrednostim iz diferencialnih enačb ter modela 3D končnih elementov (zadnji trije stolpci).

4.1.2 Drugi obtežni primer – linearno porazdeljena obtežba

Nato je bila narejena analiza konzole, obremenjene z linearno porazdeljeno obtežbo $q(x)$, delujočo navpično navzdol, ki se je povečevala od vrednosti 15000 N/m na prostem robu konstrukcije do 30000 N/m ob vpetju.

Za ta primer obtežbe sta bili najprej ponovno rešeni ustrezni diferencialni enačbi; za obstoječa modela linijskih končnih elementov pa so bili ponovno izračunani samo obtežni vektorji. Nadalje je bil tvorjen dodatni model z dvema linijskima končnima elementoma z odsekovno konstantnima širinama. Rezultati za prečna premika prostega konca ter mesta razpoke iz vseh uporabljenih modelov so zbrani v preglednici 3.

Model/pristop	Prosti konec	Mesto razpoke
1 KE z enotno širino	-1,45232 cm	-0,40991 cm
2 KE z enotnima širinama	-1,29587 cm	-0,39107 cm
1 SLWCB KE	-1,25732 cm	-0,34939 cm
2 SLWCB KE	-1,24736 cm	-0,36789 m
DE	-1,24640 cm	-0,36766 cm
COSMOS/M	-1,25891 cm	-0,37277 cm

Preglednica 3 • Primerjava prečnih pomikov za različne računske modele.

Tudi za ta primer obtežbe je iz preglednice 3 razvidno odlično ujemanje rezultatov diferencialnih enačb z modelom 3D končnih elementov.

Model z enim končnim elementom z enakomerno povprečno širino je ponovno vodil do najslabših rezultatov. Napaka proti modelu 3D končnih elementov je na prostem koncu znašala 15.364 % (manjša vrednost kot pri enakomerni zvezni obtežbi), medtem ko je bila razlika nekoliko manjša na mestu razpoke, kjer je bilo odstopanje 9.965 %. Vrednosti napak sta se opazno zmanjšali na

2,936 % (za prosti konec) in 4,911 % (za mesto razpoke), ko je bil model izboljšan z uporabo dveh končnih elementov odsekovno konstantnih širin. Čeprav so se rezultati približali pravilnim vrednostim, je njihova konvergenca očitno počasna. Boljše rezultate na prostem koncu je dosegel celo model z enim končnim elementom SLWCB, saj sta napaki proti modelu 3D končnih elementov znašali -0.126 % in -6.270 %. Najboljše ujemanje rezultatov glede na rešitve diferencialnih enačb ter rezultate iz modela 3D končnih elementov z majhnima napakama -0.917 % in -1.307 % za pomik na prostem koncu oz. na mestu razpoke je prinesel model z dvema končnima elementoma SLWCB. Čeprav sta ti dve vrednosti odstopanj nekoliko višji od primerljivih napak pri obtežnem primeru z enakomerno zvezno obtežbo, predstavljata odlično ujemanje. Funkcije prečnih pomikov so bile nadalje pridobljene z uporabo polinomskih interpolacijskih funkcij in ponovno je bilo opaženo dobro ujemanje premikov za vse točke vzdolž konzole.

4.2 Drugi primer – upogib nosilca

V drugem primeru je bil opazovan nosilec dolžine $L = 6$ m, ki je bil na levem koncu polno vpet, na desnem pa členkasto priključen. Lastnosti materiala sta ponovno bili $E = 30$ GPa in $\nu = 0,3$. Prečni prezek je bil pravokotnik z višino $h = 0,30$ m, kjer se je širina b linearno zmanjševala z $b = 0,4$ m na levem, polnovpetem koncu do $b = 0,2$ m na desnem, členkasto podprtem koncu. Uvedeni sta bili dve razpoki, ki sta bili na razdaljah 1,5 m in 4,5 m od leve strani. Zaradi prisotnosti dveh razpok je bil potreben računski model z najmanj dvema linijskima končnima elementoma.

Obravnavala sta se dva obtežna primera. V prvem primeru je bila konstrukcija obtežena s točkovno prečno silo $F = 100000$ N v sredini razpona, medtem ko je bila v drugem primeru konstrukcija obtežena z navpično navzdol delujočo enakomerno obtežbo $q = 30000$ N/m vzdolž celotne konstrukcije

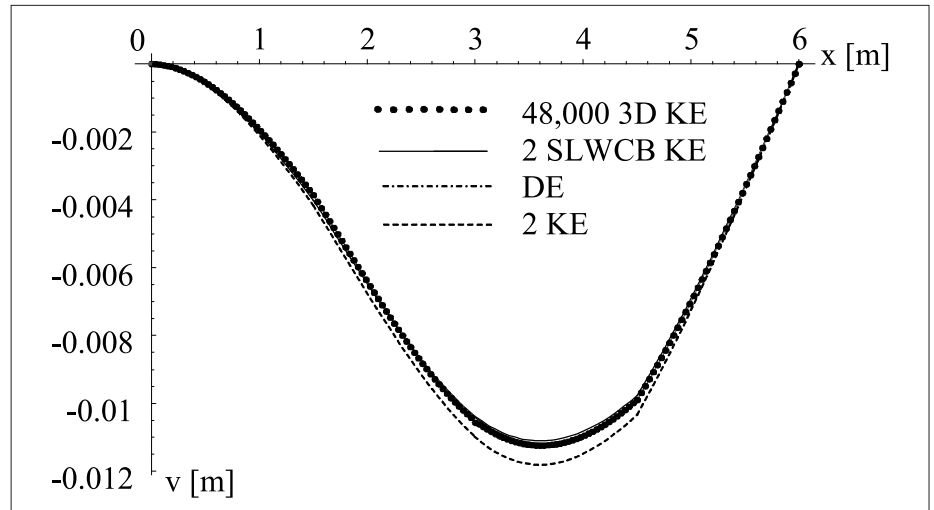
4.2.1 Prvi obtežni primer – točkovna prečna sila

Najprej je bil analiziran model z dvema končnima elementoma SLWCB enakih dolžin. Naknadno je bil pripravljen še dodaten model

z dvema linijskima končnima elementoma konstantnih širin (uporabljeni širini 0,35 m in 0,25 m sta bili dobljeni kot povprečni vrednosti dejanskih širin).

Za vsak linijski model so bile iz pripadajočih sistemov treh linearnih enačb pridobljene

S slike navidezno izhaja, kakor da rezultati iz modela SLWCB (pomiki v obliki zveznih polinomskih funkcij), diferencialnih enačb (pomiki kot kombinacija zveznih polinomov in logaritemskih funkcij) kot tudi model 3D KE (diskretne vozliščne vrednosti) predstavljajo



Slika 2 • Primerjava prečnih pomikov iz različnih računskih modelov.

diskretne vozliščne vrednosti premika pod točkovno silo kot tudi dveh zasukov (pod silo in nad podporo).

Za obravnavano konstrukcijo so bile rešene tudi štiri pripadajoče vezane diferencialne enačbe, s čimer so bile dobljene natančne rešitve poenostavljenega modela.

Četrty sklop rezultatov je bil pridobljen iz detajlnega modela 3D končnih elementov, ki je bil generiran v programu COSMOS/M.

Dobljene vrednosti za prečni premik v pod točkovno silo, vertikalni reakciji ter upogibni moment za levi, vpeti konec so povzete v preglednici 4.

Iz preglednice je razvidno, da model 2 SLWCB končnih elementov očitno daje boljše ujemanje rezultatov kot model, v katerem sta bila uporabljena dva končna elementa konstantnih širin. Učinkovitost novega končnega elementa proti standardnemu razpokanemu končnemu elementu je še bolj očitna pri primerjavi prečnih pomikov vzdolž celotnega nosilca, slika 2.

identično rešitev. Čeprav se bistveno razlikujejo v matematični obliki funkcij, med polinomskimi funkcijami in rešitvami DE ni vidnejših razlik.

Hkrati pa je s slike 2 tudi razvidno, da rešitve iz modela, kjer sta bila uporabljena dva razpokana končna elementa s konstantnima prečnima prevezoma, očitno odstopajo od preostalih rešitev.

4.2.2 Drugi obtežni primer – enakomerna zvezna obtežba

Pri drugem obtežnem primeru, kjer je bila aplicirana vertikalna enakomerna obtežba $q = 1000$ N/m, sta bili pri analizi z modeloma linijskih končnih elementov najprej uporabljeni že znani togostni matriki elementov konstrukcije iz prvega obtežnega primera, ponovno pa sta bila izračunana zgolj pripadajoča obtežna vektorja. Nato so bili pridobljeni štirje nizi vrednosti rešitev. Nekatere reprezentativne vrednosti so podane v preglednici 5.

Čeprav so vozliščne vrednosti modela 2 SLWCB KE izkazale dobro ujemanje z rešitvami diferencialnih enačb (preglednica 5), ujemanje vertikalnih pomikov med vozlišči ni bilo več tako dobro, slika 3.

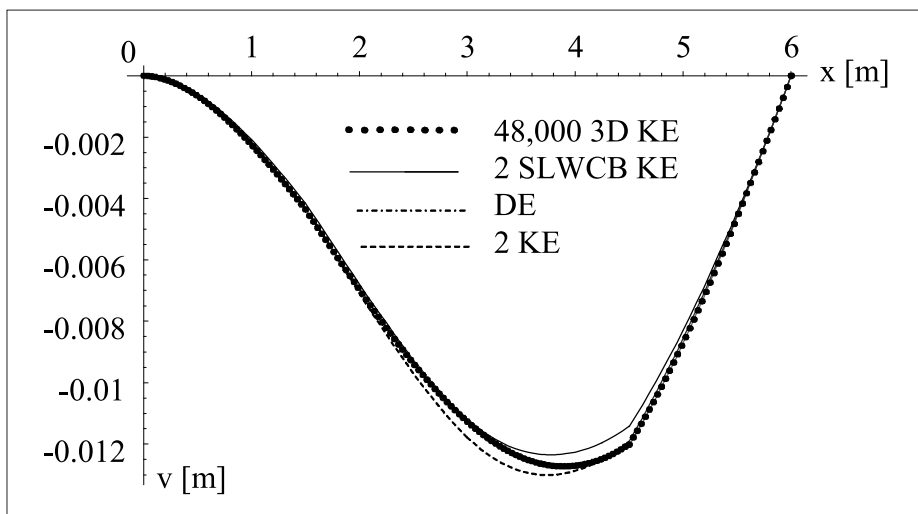
Medtem ko je ujemanje rezultatov za levi končni element SLWCB skoraj popolno (in očitno boljše kot pri modelu, kjer sta bila uporabljena dva KE s konstantnima prečnima prevezoma), rezultati za desni končni element SLWCB kažejo vidno odstopanje.

model	2 SLWCB KE	2 razpokana KE	DE	COSMOS/M
$v(3)$	-1,0372 cm	-1,0981 cm	-1,0415 cm	-1,0566 cm
V_A	70831,507 N	70446,996 N	70833,703 N	70647,860 N
M_A	-124989,04 Nm	-122681,98 Nm	-125002,22 Nm	-123930,20 Nm
V_B	29168,493 N	29553,004 N	29166,297 N	29344,012 N

Preglednica 4 • Nekatere reprezentativne vrednosti prvega obtežnega primera.

model	2 SLWCB KE	2 KE	DE	COSMOS/M
$V(3)$	-1,1182 cm	-1,1784 cm	-1,1196 mm	-1,1239 cm
V_A	115531,16 N	115122,40 N	115587,10 N	115238,66 N
M_A	-153186,98 Nm	-150734,40 Nm	-153522,61 Nm	-151476,94 Nm
V_B	64468,84 N	64877,60 N	64412,90 N	64750,00 N

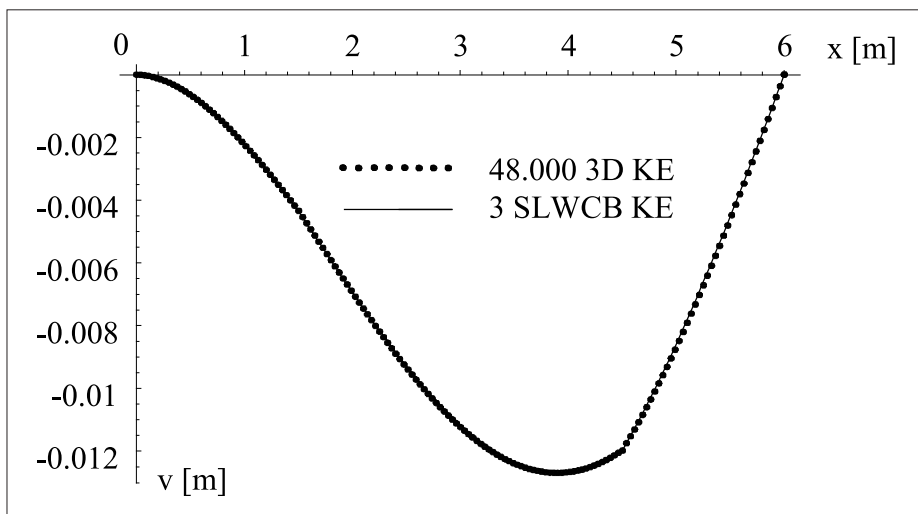
Preglednica 5 • Nekatere reprezentativne vrednosti drugega obtežnega primera.



Slika 3 • Primerjava prečnih premikov iz različnih računskih modelov.

model	3 SLWCB KE (2,2+1,6+2,2)	3 SLWCB KE (2+2+2)	DE	COSMOS/M
V_A	115574,04 N	115577,77 N	115587,10 N	115238,66 N
M_A	-153444,22 Nm	-153466,64 Nm	-153522,61 Nm	-151476,94 Nm
V_B	64425,963 N	64422,226 N	64412,90 N	64750,00 N
v_{max}	-1,2678 cm	-1,2689 cm	-1,2694 cm	-1,2694 cm

Preglednica 6 • Nekatere reprezentativne vrednosti drugega obtežnega primera.



Slika 4 • Primerjava prečnih premikov iz različnih računskih modelov.

Zato so bili proučeni dodatni računski modeli, ponovno sestavljeni zgolj iz dveh končnih elementov SLWCB, a s spremenjeno lokacijo notranjega vozlišča. Ko se je njegov položaj premaknil proti mestu največjega prečnega premika, je to rezultiralo v očitno boljše ujemanje rezultatov, saj je diskretizacija z elementoma dolžin 3,5 m in 2,5 m prinesla opazno boljše ujemanje.

V splošnem primeru pa je eden izmed načinov za izboljšanje rezultatov zgostitev mreže z uvajanjem dodatnih končnih elementov z novimi vozlišči. Zato so bile proučene različne diskretizacije, ki so se izvedle s tremi končnimi elementi SLWCB. Med vsemi analiziranimi diskretizacijami ni bilo opaziti bistvenih razlik, prav tako pa so se vse tudi zelo dobro ujemale z modelom 3D končnih elementov. Nekatere diskretne vrednosti so podane v preglednici 6, kjer so podani rezultati dveh različnih diskretizacij s 3 končnimi elementi SLWCB. V drugem stolpcu so podani rezultati za končne elemente dolžin 2,2 m, 1,6 m in 2,2 m, v tretjem pa za tri končne elemente enakih dolžin. Nadalje so v četrtem in petem stolpcu prikazane vrednosti, dobljene iz analitičnih rešitev diferencialnih enačb ter iz modela 3D končnih elementov (v programu COSMOS/M).

Odlično ujemanje rezultatov sedaj ni bilo opaženo samo v vozliščih, temveč tudi zunaj njih, kot je razvidno s slike 4, ki prikazuje rezultate modela, kjer so bili vsi trije končni elementi enakih dolžin (2,00 m).

4.3 Tretji primer – uklon konzolnega stebra

Za demonstracijo zmožnosti izpeljane togostne matrike končnega elementa SLWCB za analizo uklona je bil analiziran razpokani konzolni stebel, ki je bil na prostem koncu obremenjen s tlačno točkovno silo. Dolžina stebra je bila 5,5 m. Njegov prečni presek je bil pravokotnik s konstantno višino 0,4 m, medtem ko se je širina linearno zmanjševala od 0,4 m na vpetem koncu do 0,3 m na prostem koncu. Modul elastičnosti je bil 30 GPa, Poissonov količnik pa 0,3. Posamezna razpoka je bila ločeno vpeljana na več lokacijah.

Vsak primer je bil najprej analiziran z uporabo dveh različnih modelov linijskih končnih elementov. Prvi model je bil preprost stopničasti nosilec, sestavljen iz končnih elementov enakih dolžin z odsekovno enakomernimi širinami. Ta model je predstavljal osnovni približni model, saj sta bili obe matriki kon-

strukcije (togostna in geometrijska togostna matrika) pridobljeni z uporabo končnih elementov s konstantnimi preseki.

V drugem modelu je bila togostna matrika konstrukcije sestavljena iz togostih matrik končnih elementov SLWCB, geometrijska togostna matrika konstrukcije pa z uporabo končnih elementov s konstantnimi preseki.

Zaradi odsotnosti eksperimentalnih rezultatov je bila ta konstrukcija analizirana tudi z uporabo programa COSMOS/M s končnimi 3D-elementi, da je bil dobljen neodvisen primerljiv niz referenčnih vrednosti. Računski model je bil za vsak analizirani primer sestavljen iz 48.000 končnih 3D-elementov s skoraj 75.000 vozlišči. V vsakem vozlišču smo upoštevali tri prostostne stopnje – navpični in dva horizontalna pomika, rezultati pa so bili pridobljeni v 14 avtomatsko izvedenih iteracijah.

Kot prvi je bil upoštevan primer, ko je bila na razdalji 1 m od vpetega konca vpeljana razpoka globine 0,1 m in širine 0,38 m.

Pri obravnavah razpokanih konstrukcij na uklonsko silo vplivajo ne samo model razpoke, temveč tudi nosilca. V modelu z odsekovno konstantnimi preseki je širina modela nosilca na mestu razpoke tudi neposredno določala pripadajočo širino razpoke, ki je bila tako enaka širini končnega elementa, znotraj katerega je bila razpoka. Zato je sprememba diskretizacije vplivala tudi na spremembo širine razpoke, ki se je zato v večini primerov razlikovala od dejanske širine. Modelirana širina razpoke je tako s povečanjem števila končnih elementov oscilirajoče konvergirala k dejanski širini razpoke. To je posledično vplivalo na konvergenco rezultatov, ki je tako postala odsekovno nemonotono oscilirajoča s končnimi skoki. Rezultati za prvih 10 (od 30 skupno izvedenih za vsak model) diskretizacij z uporabo linijskih končnih elementov so zbrani v drugem stolpcu preglednice 7. Konvergenco rezultatov je postala monotona, ko je pri izračunu togosti razpoke bila upoštevana dejanska širina nosilca na mestu razpoke (tretji stolpec preglednice 7).

Model, ki je uporabljal končne elemente SLWCB, je avtomatično upošteval pravilno geometrijo in zato ni bilo nobenih težav pri modeliranju širine razpoke. Pripadajoči rezultati so predstavljeni v zadnjem stolpcu preglednice 7. Analiza primera je bila zaključena z ovrednotenjem uklonske sile s pomočjo modela 3D

Št. KE	KE nosilca a)	KE nosilca b)	SLWCB KE
1	3,185973	3,271341	3,415439
2	3,343203	3,361482	3,391464
3	3,380163	3,376129	3,388234
4	3,395982	3,380918	3,387521
5	3,404816	3,383191	3,387513
6	3,365899	3,384445	3,387472
7	3,376483	3,385259	3,387510
8	3,384274	3,385803	3,387503
9	3,390214	3,386152	3,387467
10	3,394897	3,386394	3,387461

Preglednica 7 • Konvergenčna študija kritične uklonske sile P_{cr} (MN) za razpokani primer z $L_1=1.0$ m.

končnih elementov, ki je izračunal vrednost 3,361604 MN.

Iz vseh izračunanih diskretizacij je mogoče zaključiti, da vsi modeli nosilca izkazujejo konvergenco proti mejni vrednosti modela 3,387453 MN. Ta vrednost izkazuje odstopanje 0.769% glede na vrednost iz modela 3D KE in predstavlja napako poenostavljene modela.

Očitno je, da je konvergenca modela, kjer se uporablja togostna matrika SLWCB, boljša. Končna vrednost se praktično pridobi z diskretizacijo s 6 končnimi elementi, medtem

ko je pri uporabi enostavnejših končnih elementov potrebna diskretizacija s 100 KE, da bi se dobila enaka raven odstopanja.

Študija uklona je bila zaključena z analizami, v katerih je bila razpoka v razdaljah po 0,5 m ločeno uvedena na nadaljnjih 9 lokacijah znotraj konzole. Za vsak položaj razpoke je bilo proučenih več diskretizacij z uporabo končnih elementov SLWCB. V preglednici 8 so zbrani rezultati za vse situacije (v 2. vrstici so rezultati za nerazpokano konzolo). V drugem stolpcu so predstavljeni rezultati, dobljeni s 5 končnimi elementi SLWCB, medtem ko tretji stolpec prikazuje rezultate iz pripadajočega modela 3D končnih elementov.

Iz preglednice je razvidno, da ni opaznih bistvenih razlik med rezultati. Zato lahko ujemanje rezultatov iz dveh modelov končnih elementov, ki se opazno razlikujeta v predstavitvi mehanskega obašanja in tudi v računskih naporih, opisujemo za zelo dobro. Čeprav se največja razlika med modeloma pojavlja na mestu, kjer ima razpoka največji vpliv na rezultat, je ujemanje rezultatov še vedno izjemno dobro. Ko se lokacija razpoke približuje prostemu koncu, pa konvergenco rezultatov postane hitrejša, saj se odstopanje rezultatov zmanjšuje.

L_1	5 SLWCB KE	COSMOS/M
—	4,814841	4,806246
5,0 m	4,756343	4,747441
4,5 m	4,594346	4,585473
4,0 m	4,372261	4,350744
3,5 m	4,137520	4,130735
3,0 m	3,921001	3,893775
2,5 m	3,736418	3,733602
2,0 m	3,586664	3,559050
1,5 m	3,502499	3,472600
1,0 m	3,387513	3,361604
0,5 m	3,333812	3,339315

Preglednica 8 • Kritične uklonske sile P_{cr} (MN) za razpokani konzolni steber za različne položaje razpoke (L_1 predstavlja razdaljo od vpetega konca).

5 • ZAKLJUČKI

V tem članku smo proučevali analizo statičnih upogibov in uklonskih sil vitkih prečno razpokanih nosilcev z linearnim spreminjanjem širine z uporabo končnega elementa na osnovi modela, v katerem so bile prečne razpoke predstavljene s pomočjo rotacijske vzmeti. Ta poenostavljeni model je bil že večkrat uspešno uporabljen pri številnih izpeljavah končnih elementov razpokanih nosilcev. Njegova uporabnost je sedaj razširjena z izpeljavo togostne matrike in obtežnega vektorja zaradi linearne zvezne obtežbe linijskega končnega elementa z razpoko za analizo nosilcev z linearno spremenljivimi širinami. Ti koeficien-

ti so predstavljeni v preprostih in zaključenih analitičnih oblikah.

V izpeljavah so bile uporabljene polinomske interpolacijske funkcije. Te funkcije ne predstavljajo točne matematične oblike rešitve diferencialne enačbe upogiba za nekonzistenten prečni prerez, kar pomeni, da so numerične vrednosti, dobljene s predstavljenimi rešitvami, zgolj približki točnih rešitev.

Kljub temu so trije numerični primeri, ki sledijo izpeljavam, pokazali, da lahko predstavljene rešitve učinkovito uporabljamo za analizo upogiba in uklona, saj so vodile do rezultatov, ki so jih neodvisno potrdili bolj detajlni modeli 3D končnih elementov.

Tako dobljeni izrazi, čeprav relativno kratki in kompaktni, zagotavljajo zanesljiv in učinkovit inženirski računski model.

Predstavljene rešitve omogočajo učinkovito modeliranje razpokanih linijskih elementov, ki jih na primer za betonske elemente zahteva standard Evrokod EC8 pri potresni analizi konstrukcij. Predstavljeni model KE daje odlično alternativo enostavnim numeričnim rešitvam, ki so predstavljene s predpisom. V primerjavi s precej elementarnim zmanjšanjem upogibne togosti elementa nosilca tako ponuja veliko bolj realistično obnašanje in boljšo natančnost ob hkratnem ohranjanju relativno majhnega računskega modela, medtem ko v nasprotju s podrobnimi 3D-modeli ponuja boljšo računsko učinkovitost brez bistvenega zmanjšanja zanesljivosti rezultatov.

6 • ZAHVALA

Avtor se zahvaljuje za delno finančno podporo Javne agencije za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (šifra programa P2-0129 (A), Razvoj, modeliranje in optimiranje objektov in procesov v gradbeništvu in prometu).

7 • LITERATURA

- Bakhtiari-Nejad, F., Khorram, A., Rezaeian, M., Analytical estimation of natural frequencies and mode shapes of a beam having two cracks, *International Journal of Mechanical Sciences* 78, 193–202, 2014.
- Bergan, P. G., Holand, I., Nonlinear finite element analysis of concrete structures, *Composer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 17/18, 443–467, 1979.
- Biondi, B., Caddemi, S., Euler-Bernoulli beams with multiple singularities in the flexural stiffness, *European Journal of Mechanics - A/Solids* 26(5), 789–809, 2007.
- Cao, M., Radzieński, M., Xu, W., Ostachowicz, W., Identification of multiple damage in beams based on robust curvature mode shapes, *Mechanical Systems and Signal Processing* 46, 468–480, 2014.
- Dimarogonas, A.D., Papadopoulos, C.A., Vibration of cracked shafts in bending, *Journal of Sound and Vibration* 91(4), 583–593, 1983.
- Gawande, S. H., More, R. R., Effect of Notch Depth & Location on Modal Natural Frequency of Cantilever Beams, *Structures* 8, 121–129, 2016.
- Gounaris, G., Dimarogonas, A.D., A finite element of a cracked prismatic beam for structural analysis, *Computers & Structures* 28(3), 301–313, 1988.
- Hasan, W.M., Crack detection from the variation of the eigenfrequencies of a beam on elastic foundation, *Engineering Fracture Mechanics* 52(3), 409–421, 1995.
- Khiem, N. T., Toan, L. K., A novel method for crack detection in beam-like structures by measurements of natural frequencies, *Journal of Sound and Vibration* 333, 4084–4103, 2014a.
- Khiem, N. T., Tran, H. T., A procedure for multiple crack identification in beam-like structures from natural vibration mode, *Journal of Vibration and Control* 20(9), 1417–1427, 2014b.
- Krawczuk, M., Ostachowicz, W.M., Influence of a crack on the dynamic stability of a column, *Journal of Sound and Vibration* 167(3), 541–555, 1993.
- Labib, A., Kennedy, D., Featherston, C., Free vibration analysis of beams and frames with multiple cracks for damage detection, *Journal of Sound and Vibration* 333, 4991–5003, 2014.
- Labib, A., Kennedy, D., Featherston, C. A., Crack localisation in frames using natural frequency degradations, *Computers & Structures* 157, 51–59, 2015.

- Rajab, M.D., Al-Sabeeh, A., Vibrational characteristics of cracked shafts, *Journal of Sound and Vibration* 147(3), 465–473, 1991.
- Okamura, H., Liu, H.W., Chong-Shin, C., A cracked column under compression, *Engineering Fracture Mechanics* 1, 547–564, 1969.
- Ostachowicz, W.M., Krawczuk, M., Vibrational analysis of cracked beam, *Computers & Structures* 36-22, 245–250, 1990.
- Palmeri, A., Cicirello, A., Physically-based Dirac's delta functions in the static analysis of multi-cracked Euler-Bernoulli and Timoshenko beams, *International Journal of Solids and Structures* 48(14-15), 2184–2195, 2011.
- Reddy, J. N., *An Introduction to the Finite Element Method*, 2. izd., McGraw-Hill, 1994.
- SIST, SIST EN 1992–1–1:2005, Evrokod 2, Projektiranje betonskih konstrukcij–Del 1–1, Splošna pravila in pravila za stavbe, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana, str. 227, 2005.
- Skrinar, M., Umek, A., Ravninski linijski končni element nosilca z razpoko, *Gradbeni vestnik*, 45(1/2), 2–7, 1996.
- Skrinar, M., Pliberšek, T., New linear spring stiffness definition for displacement analysis of cracked beam elements, *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics* 4, 654–655, 2004.
- Skrinar, M., On the application of a simple computational model for slender transversely cracked beams in buckling problems. *Computational Materials Science* 39(1), 242–249, 2007.
- Skrinar, M., Elastic beam finite element with an arbitrary number of transverse cracks, *Finite Elements in Analysis and Design* 45(3), 181–189, 2009.
- Skrinar, M., Pliberšek, T., On the derivation of symbolic form of stiffness matrix and load vector of a beam with an arbitrary number of transverse cracks, *Computational Materials Science* 52(1), 253–260, 2012.
- Skrinar, M., Computational analysis of multi-stepped beams and beams with linearly-varying heights implementing closed-form finite element formulation for multi-cracked beam elements, *International Journal of Solids and Structures* 50, 2527–2541, 2013.
- Sundermayer, J.N., Weaver, R.L., On crack identification and characterization in a beam by nonlinear vibration analysis, *Theoretical and applied mechanics*, TAM Report No. 743, 1993.
- Sung, S. H., Koo, K. Y., Jung, H. J., Modal flexibility-based damage detection of cantilever beam-type structures using base line modification, *Journal of Sound and Vibration* 333, 4123–4138, 2014.
- Tharp, T.M., A Finite element for edge-cracked beam columns, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 24, 1941–1950, 1987.
- Vestroni, F., Pau, A., *Dynamic Characterization and Damage Identification*. V: Gladwell, G.M.L., Morassi, A., (ur.), *Dynamical Inverse Problems: Theory and Application*. Springer-Verlag, 151–178, 2011.

NOVI DIPLOMANTI

UNIVERZA V LJUBLJANI,
FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO IN GEODEZIJO

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM STAVBARSTVO

Mateja Uršič, Vpliv strešnih oken na energijsko bilanco in dnevno osvetljevanje mansardnega stanovanja na treh različnih lokacijah, mentor doc. dr. Mitja Košir; <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=106104>

Tadeja Intihar, Ocena arhitekturnih rešitev stavb Savina Severja z gledišča dnevnega osvetljevanja, mentor doc. dr. Mitja Košir; <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=106105>

II. STOPNJA – MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM VODARSTVO IN OKOLJSKO INŽENIRSTVO

Jan Cunja, Časovna in prostorska analiza največjih hidroloških suš v Sloveniji, mentorica izr. prof. dr. Mojca Šraj, somentorica asist. dr. Mira Kobold; <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=106132&lang=slv>

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

KOLENDAR PRIREDITEV

8.-11.4. 2019

Svetovni gradbeni forum 2019 – Odpornost stavb in infrastrukture
Ljubljana, Slovenija
<https://www.wcf2019.org/wcf-intro-slo/>

9.-10.4. 2019

Polymers in Building Insulation
Düsseldorf, Nemčija
www.ami.international/events/event?Code=C0978

10.-11.4. 2019

Composites in Construction
Amsterdam, Nizozemska
<http://compositesinconstruction.com/>

16.-17.4.2019

IICTG 2019 – 2nd International Intelligent Construction Technologies Group Conference
Peking, Kitajska
www.iictg.org/2019-conference/

16.-17.5. 2019

13th International Conference “Modern Building Materials, Structures and Techniques”
Vilna, Litva
www.euro-online.org/websites/orsdce/event/event-1/

9.-14.6. 2019

ICOLD 2019 – 87th Annual Meeting: International Commission on Large Dams
Ottawa, Kanada
www.icold-cigb2019.ca/

17.-20.6. 2019

7 ICEGE 2019 – International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering
Rim, Italija
www.7icege.com/

17.-20.6. 2019

8th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis - Rail Norrköping 2019
Norrköping, Švedska
www.railnorrkoping2019.org/

24.-26.6. 2019

COMPdyn 2019 – 7th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering
Kreta, Grčija
<https://2019.compdyn.org/>

1.-6.7. 2019

16WCSI – 16th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures
Sankt Peterburg, Rusija
www.16wcsi.org/

10.-12.7. 2019

International Conference on Road and Airfield Pavement Technology 2019
Kuala Lumpur, Malezija
<http://conference.upm.edu.my/ICPT?>

10.-12.7. 2019

2019 European Conference on Computing in Construction
Hanija, Kreta, Grčija
<https://ec-3.org/conf2019/>

21.-23.8. 2019

14th International Workshop for Micropiles
Gold Coast, Queensland, Avstralija
www.ismicropiles.org/

10.-13.9. 2019

CGE-2019 – 3rd International Conference “Challenges in Geotechnical Engineering”
Zielona Gora, Poljska
www.cgeconf.com/en/

16.-20.9. 2019

ICCC 2019 – 15th International Congress on the Chemistry of Cement
Praga, Češka
www.iccc2019.org/

29.9.-2.10. 2019

ICITG – 3rd International Conference on Information Technology in Geo-Engineering
Guimaraes, Portugalska
www.3rd-icitg2019.civil.uminho.pt/

11.-14.5.2020

14th Congress INTERPRAEVENT 2020
Bergen, Norveška
www.interpraevent.at/?tpl=termine.php&kategorie=1&id=187

7.-11.9.2020

6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation
Budimpešta, Madžarska
www.isc6-budapest.com/

2.-6.11.2020

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

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