

Određivanje dubine smrzavanja tla ispod kolničke konstrukcije

Mate Sršen, Maja Kovačić, Dražen Kaučić

Ključne riječi

kolnička konstrukcija, temperatura zraka, smrzavanje, indeks smrzavanja zraka, dubina smrzavanja, projektiranje, održavanje

Key words

pavement structure, air temperature, freezing, air freezing index, freezing depth, design, maintenance

Mots clés

chaussée, température d'air, congélation, indice de congélation d'air, profondeur de congélation, études, entretien

Ключевые слова

мостовая, температура воздуха, замерзание, индекс замерзания воздуха, глубина замерзания, проектирование

Schlüsselworte

Fahrbahnkonstruktion, Lufttemperatur, Gefrieren, Luftfrostindex, Gefrierungstiefe, Entwurf, Wartung

M. Sršen, M. Kovačić, D. Kaučić

Izvorni znanstveni rad

Određivanje dubine smrzavanja tla ispod kolničke konstrukcije

Opisuje se istraživanje za određivanje indeksa smrzavanja zraka. Praktični doprinos ovoga rada jest izrađena karta kontura indeksa smrzavanja zraka (ISZ) za područje Hrvatske. Metodologija određivanja dubine smrzavanja ispod ceste na osnovi vrijednosti ISZ, koje su ustanovljene ovim istraživanjem, ima dvostruku inženjersku primjenu: za provjeru osjetljivosti na smrzavanje projektirane konstrukcije i za ocjenjivanje otpornosti na smrzavanje postojećih kolničkih konstrukcija.

M. Sršen, M. Kovačić, D. Kaučić

Original scientific paper

Determining soil freezing depth under the pavement structures

The research carried out to determine the air freezing index is described. The practical output of this research is the contour map with air freezing indices (AFI) for the territory of Croatia. The methodology for determining freezing depth under roadways, based on AFI values defined in this research, has two engineering applications: to check susceptibility to freezing of a designed structure, and to estimate freezing resistance of existing pavement structures.

M. Sršen, M. Kovačić, D. Kaučić

Ouvrage scientifique original

Détermination de la profondeur de congélation de sol au-dessous de la chaussée

Les recherches faites pour déterminer l'indice de congélation d'air sont décrites. Le résultat pratique de ces recherches est une carte aux contours présentant les indices de congélation d'air (ICA) pour le territoire intégral de la Croatie. La méthodologie utilisée pour déterminer la profondeur de congélation sous les routes, basée sur les valeurs ICA définies au cours de ces recherches, permet deux applications techniques: détermination de la susceptibilité à la congélation d'un ouvrage planifié, et estimation de la résistance à la congélation des chaussées existantes.

M. Сршен, М. Ковачич, Д. Каучич

Оригинальная научная работа

Определение глубины замерзания грунта из-под конструкции мостовой

В работе описывается исследование по определению индекса замерзания воздуха. Практический вклад этой работы заключается в создании карты контуров индексов замерзания воздуха (ISZ) для территории Хорватии. Методология определения глубины замерзания из-под проезжей части дороги на основании значений ISZ, определенных этим исследованием, имеет двойное инженерное применение: для проверки чувствительности на замерзание проектированной конструкции и для оценки устойчивости к замерзанию существующих мостовых.

M. Sršen, M. Kovačić, D. Kaučić

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Bestimmung der Gefrierungstiefe des Bodens unterhalb der Fahrbahnkonstruktion

Man beschreibt die Forschung für die Bestimmung des Luftfrostindexes. Der praktische Beitrag dieser Arbeit ist die Karte der Konturen des Luftfrostindexes (ISZ) für das Gebiet von Kroatien. Die Methodologie der Bestimmung der Gefrierungstiefe unterhalb der Strasse auf Grund der ISZ-Werte, die durch diese Forschung ermittelt wurden, hat eine zweifache Anwendung für Ingenieure: für die Überprüfung der Frostempfindlichkeit neu entworfener Konstruktionen und für die Bewertung der Frostwiderstandsfähigkeit bestehender Fahrbahnkonstruktionen.

Autori: Prof. dr. sc. **Mate Sršen**, dipl. ing. građ.; **Maja Kovačić**, dipl. ing. građ., Institut građevinarstva Hrvatske, Zavod za prometnice, Zagreb; mr. sc. **Dražen Kaučić**, dipl. ing. agr., Državni hidrometeorološki zavod, Zagreb

1 Uvod

Podloge s podacima što su se do sada u Hrvatskoj rabile za provjeru osjetljivosti kolničkih konstrukcija na smrzavanje nisu bili dovoljno precizni, a ni pouzdani. U bivšoj državi postojala je zemljopisna karta na kojoj su iscrtane linije istih dubina smrzavanja tla. Određivanje dubine smrzavanja iz takve karte (mjerila 1 : 5 000 000) bilo je posve orijentacijsko, jer karta nije mogla obuhvatiti pojedine mikroklimatske utjecaje koji su ponegdje vrlo izraženi. Spomenuta karta izrađena je na osnovi nedovoljno pouzdanih podataka pa su i rješenja što su se na nju oslanjala bila tehnički nepouzdana, a nerijetko i neekonomična.

To je bio jedan od osnovnih poticaja za istraživanje što je obavljeno u Odjelu za kolničke konstrukcije Zavoda za prometnice IGH, za *Hrvatske ceste d.o.o.* kao naručitelja. Istraživanje je obavljeno u suradnji s *Državnom hidrometeorološkim zavodom* od kojega su dobiveni podaci i analize maksimalnih i minimalnih temperatura zraka što su bilježene na 39 meteoroloških postaja u Hrvatskoj, u razdoblju od 25 godina (1976.-2000).

Osnovni cilj istraživanja bio je određivanje indeksa smrzavanja zraka (ISZ), a zatim i dubine smrzavanja tla ispod kolničke konstrukcije za područje Republike Hrvatske. Utvrđivanje ove tehničke činjenice ima praktičnu primjenu u racionalnom projektiranju i dimenzioniranju kolničkih konstrukcija te u njihovu održavanju. Osim toga, svi međunarodno prihvaćeni modeli za gospodarenje cestama također zahtijevaju pouzdane ulazne podatke o dubini smrzavanja tla ispod kolničke konstrukcije.

2 Općenito o problemu smrzavanja

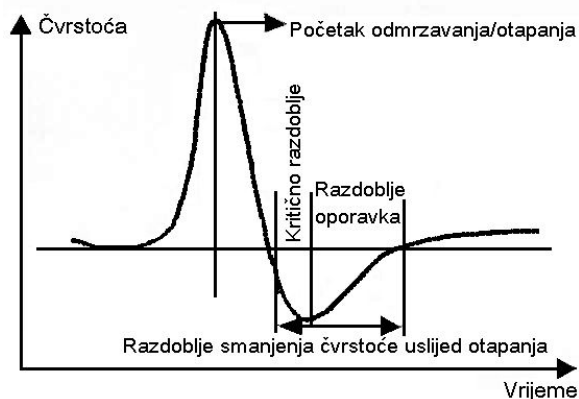
Struktura kolničke konstrukcije prvenstveno se dimenzionira na prometno opterećenje. Ako je, međutim, tlo u posteljici kolničke konstrukcije osjetljivo na smrzavanje i ako su hidrološki uvjeti nepovoljni, prethodno dimenzioniranu kolničku konstrukciju potrebno je provjeriti i na smrzavanje. Ako konstrukcija nije sigurna od smrzavanja, potrebno je predvidjeti određene tehničke mjere u samoj kolničkoj konstrukciji, ili ispod nje, kako bi se opasnost od smrzavanja uklonila ili smanjio njezin učinak.

Štetni učinci djelovanja smrzavanja na kolničku konstrukciju odnose se na dva zasebna, ali međusobno povezana procesa. To su:

- bubrenje i izdizanje tla uzrokovano skupljanjem vode i stvaranjem ledenih leća u tlu tijekom razdoblja smrzavanja (zimi),
- smanjenje nosivosti tla, a time i nastajanje kolotragova i/ili pukotina u pojedinim slojevima kolnika zbog velike vlažnosti tijekom razdoblja otapanja/odmrzavanja (u proljeće).

Da bi u kolničkoj konstrukciji nastali štetni učinci, moraju postojati tri uvjeta:

- niska temperatura koja omogućuje smrzavanje vode u tlu,
- visoka razina podzemne vode ili mogućnost pritjecanja vode u zonu smrzavanja,
- tlo osjetljivo na smrzavanje.



Slika 1. Promjena čvrstoće kolničke konstrukcije tijekom sezonskih utjecaja smrzavanja i odmrzavanja/otapanja

Tipična promjena čvrstoće nosivog sloja i posteljice kolničke konstrukcije koja je podvrgnuta ciklusima smrzavanja i odmrzavanja prikazana je na slici 1. [1]. Razdoblje odmrzavanja, što znači smanjivanje nosivosti kolničke konstrukcije, čine kritično razdoblje i razdoblje oporavka. Kritično je razdoblje vrijeme kada čvrstoća sloja opada od njezine vrijednosti prije smrzavanja na njezinu najmanju vrijednost. Razdoblje oporavka jest vrijeme u kojem čvrstoća raste od njezine najniže vrijednosti do one koju je imala prije stanja smrzavanja.

2.1 Osjetljivost tla na smrzavanje

Prema osjetljivosti na smrzavanje, materijali su raspoređeni prema USCS klasifikaciji (NCHRP Synthesis 26, 1974) u četiri skupine: G1-vrlo malo osjetljivi, G2-slabo do srednje osjetljivi, G3-srednje osjetljivi i G4-vrlo osjetljivi. Ova je klasifikacija prihvaćena kao hrvatska norma (HRN U.E8.010).

2.2 Hidrološke okolnosti

Prema HRN U.C4.016 hidrološke su okolnosti *povoljne* kada je:

- nasip viši od 1,5 m,
- usjek plitak s dobrom odvodnjom,
- razina podzemne vode niža od dubine smrzavanja,
- nema dotoka vode (procjeđivanja ili izvora) s okolnog višeg terena u posteljicu ili trup ceste.

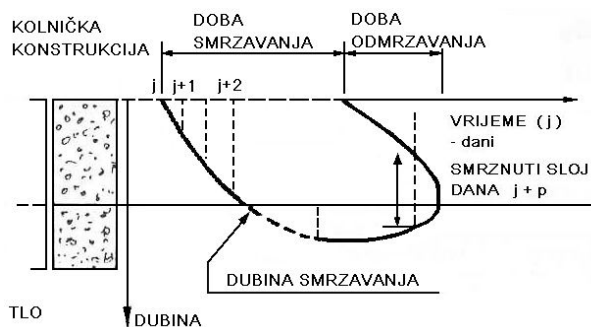
Hidrološke okolnosti su *nepovoljne* kada je:

- nasip niži od 1,5 m,
- usjek dubok,
- usjek plitak s nepovoljnom odvodnjom,
- razina podzemne vode u zoni smrzavanja,
- kapilarno penjanje vode dopire do posteljice.

2.3 Dubina smrzavanja

Važan učinak temperature na ponašanje kolničke konstrukcije u hladnom klimatskom području jest prodiranje smrzavanja (dubina smrzavanja), što ima za posljedicu čvršću posteljicu zimi, ali i mnogo slabiju posteljicu male nosivosti u proljeće. Iako izdizanje (bubrenje) kolnika zbog smrzavanja uzrokuje diferencijalna slijeganja i neravnosti površine kolnika, najštetniji učinak prodiranja smrzavanja događa se tijekom razdoblja proljetnog raspucavanja kolnika kad se led otapa i posteljica se nalazi u stanju zasićenosti vodom. Stoga je poželjno zaštititi posteljicu koristeći se materijalima neosjetljivim na smrzavanje unutar zone (dubine) smrzavanja. Ako to nije moguće učiniti, potrebno je uzeti u obzir smanjenu nosivost posteljice tijekom proljetnog odmrzavanja i preporučiti odgovarajuće mjere zaštite kolničke konstrukcije kroz to razdoblje.

Dubini smrzavanja definira se kao najveća dubina ispod površine kolničke konstrukcije na kojoj se voda u porama tla smrzava (slika 2.).



Slika 2. Mogući tok smrzavanja kolničke konstrukcije i tla

Dubina smrzavanja općenito se može odrediti na tri načina:

- neposrednim mjerenjem,
- s pomoću karata s linijama jednakih dubina smrzavanja,
- proračunom na osnovi indeksa smrzavanja.

Najtočniji način određivanja dubine smrzavanja bio bi neposrednim mjerenjem, ali za to su potrebni podaci mjerenja kroz dugi niz godina (takva se mjerenja u RH nisu provodila, osim za neke pojedinačne slučajeve).

Dosadašnja zemljopisna karta za određivanje dubine smrzavanja za područje Hrvatske nije dovoljno precizna niti pouzdana. U državama gdje karte postoje, obično se rabe samo orijentacijski budući da ne mogu obuhvatiti sve utjecaje elemenata mikroklimе.

Način određivanja dubine smrzavanja na osnovi indeksa smrzavanja čini se najpraktičnijim. S pomoću podataka o minimalnim i maksimalnim temperaturama zraka, može se izračunati indeks smrzavanja zraka za određeno područje. S takvim podacima (za duže vremensko razdoblje) raspolaže *Državni hidrometeorološki zavod Hrvatske*.

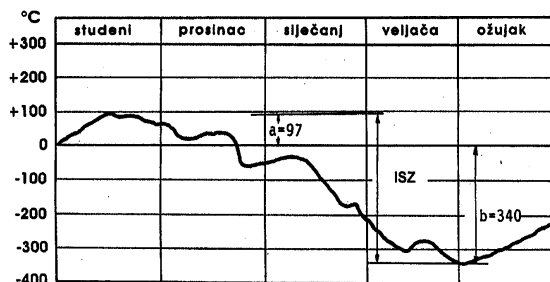
2.4 Indeks smrzavanja zraka

Indeks smrzavanja zraka može se odrediti na dva načina:

- prema švicarskim normama,
- po AASHTO metodi.

1. Određivanje indeksa smrzavanja prema švicarskim normama (SNV)

Razlika između najviše i najniže točke na krivulji srednjih dnevnih temperatura zraka tijekom jedne godine naziva se indeksom smrzavanja za tu godinu, a izražava se u jedinici $^{\circ}\text{C} \times \text{dani}$ (slika 3.). Indeks smrzavanja u suodnosu je s dubinom smrzavanja i primjenjuje se kao relevantan čimbenik za projektiranje/dimenzioniranje i ocjenjivanje kolničkih konstrukcija.



$$\text{ISZ} = 97 + 340 = 437 \text{ } ^{\circ}\text{C} \times \text{dana}$$

Slika 3. Prikaz zbirne krivulje srednjih dnevnih temperatura zraka u razdoblju od studenog do ožujka i određivanje indeksa smrzavanja

2. Određivanje indeksa smrzavanja po metodi AASHTO

Dubina smrzavanja i otapanja dijelom ovisi o veličini i trajanju temperaturene razlike ispod ili iznad smrzavanja ($32 \text{ } ^{\circ}\text{F}$) na površini tla. Indeks smrzavanja se stoga daje kao zbroj stupanj-dana u određenom vremenskom razdoblju tijekom godine kad dolazi do smrzavanja ili otapanja (tablica 1.) [2].

Tablica 1. Primjer proračuna indeksa smrzavanja zraka

Dan	Maksimum (°F)	Minimum (°F)	Prosjeak (°F)	Stupanj-dana po danu (°F)	Zbirno stupanj-dana (°F)
1	29	1	15	-17	-17
2	9	-11	-1	-33	-50
3	10	-8	1	-31	-81
4	15	-1	7	-25	-106
5	30	16	23	-9	-115
6	38	30	34	+2	-113
7	30	18	24	-8	-121

ISZ = 121

Zbroj se određuje prema:

$$ISZ = \Sigma(\bar{T} - 32 \text{ } ^\circ\text{F})$$

gdje je:

 \bar{T} - srednja dnevna temperatura zraka

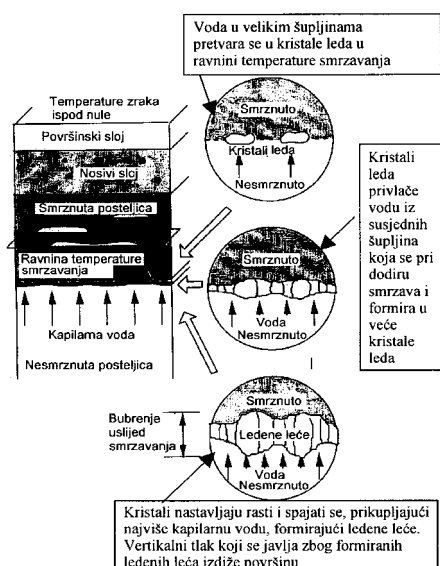
$$\bar{T} = 1/2 (T_1 + T_2)$$

T₁ – maksimalna dnevna temperaturaT₂ – minimalna dnevna temperatura

$$^\circ\text{C} = (^\circ\text{F} - 32) : 1,8$$

2.5 Bubrenje zbog smrzavanja

Tlo bubri poradi kristalizacije leda u većim šupljinama i širenja u ledene leće, slojeve, kanale ili druge ledene mase. Ledena leća raste sve dok se ne iscrpe zalihe vode ili kad uvjeti smrzavanja u ravni smrzavanja (dodirna površina smrznutog i nesmrznutog tla) više nisu pogodni za daljnju kristalizaciju (slika 4.) [2].



Slika 4. Formiranje ledenih leća u strukturi kolničke konstrukcije

Segregacija leda prvenstveno se javlja u tlima koja sadrže sitne (fine) čestice - tla osjetljiva na smrzavanje. Čisti pijesak i šljunak su tla neosjetljiva na smrzavanje.

Osjetljivost na smrzavanje uglavnom je ovisna o postotku sadržaja sitnih čestica. Slika 5. pokazuje koliko važnu ulogu ima kapilarna voda u bubrenju zbog smrzavanja.

2.6 Utjecaj otapanja

Utjecaj otapanja na kolničku konstrukciju može se očitovati na više načina, kao što su:

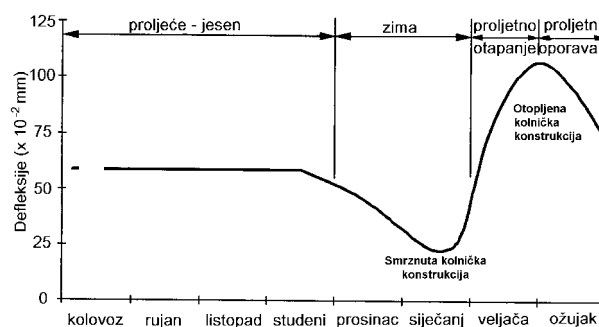
- Pad nosivosti tla tijekom proljetnog otapanja
- Nosivost tla (kao i modul elastičnosti) mijenja se s promjenom godišnjih doba, odnosno mijenja se od normalnih vrijednosti tijekom jeseni, preko najviših u vrijeme smrzavanja (zimi), do najnižih vrijednosti za vrijeme proljetnog otapanja uz oporavak tijekom ljeta (slika 5.) [2].
- Loši uvjeti otjecanja vode
- Najčešće se otapanje odvija od površine prema dolje pa zamrznuto tlo ispod otopljenog sloja zarobljava vodu otoplenu iz ledenih leća. Takva voda može istjecati samo bočno ili na površinu.
- Nejednoliko otapanje – diferencijalno slijeganje
- Ako stupanj otapanja nije jednak na svim dijelovima kolnika, slijeganje izdignutih površina bit će nejednoliko.

Do toga dolazi ako:

- susjedni dijelovi kolnika imaju različita termalna svojstva,
- postoji nejednolika izloženost sunčevim zrakama,
- uvjeti isušivanja nisu jednaki,
- postoje razlike u boji površine kolnika.

► Migracija krupnih čestica

Kao posljedica ciklusa smrzavanja i odmrzavanja tijekom godina, veće kamenje koje se nalazi u sloju tla osjetljivom na smrzavanje postupno se izdiže prema površini (neravna površina i strukturalna oštećenja).



Slika 5. Sezonske promjene čvrstoće kolničke konstrukcije prikazane defleksijama

3 Temperature tla u Hrvatskoj

3.1 Mjerenje temperature tla u Hrvatskoj

Temperature tla mjere se na 2, 5, 10, 20, 30, 50 i 100 cm dubine klasičnim termometrima u 7, 14 i 21 sat na golom tlu, tj. tlu na kojem nema vegetacije.

Iako prvi zapisi o mjerenjima temperatura tla u Hrvatskoj datiraju od 1898., postaje s termometrima u tlu organizirano rade od 1951. U razdoblju od 1951. do 1953. godine temperature tla mjerile su se samo do 20 cm dubine. Tek se poslije uvode mjerenja na dubinama od 30, 50 i 100 cm.

3.2 Spoznaje o temperaturama tla u Hrvatskoj

Prvu analizu temperatura tla na različitim dubinama za meteorološku postaju u Križevcima izradili su Maksić i dr. (1962.), ali se ona odnosi na razmjerno kratko razdoblje (1952.-1957). Autori su ustanovili da su srednje mjesečne vrijednosti pozitivne s maksimalnim vrijednostima u srpnju, a minimalnim u siječnju.

Analize Penzara (1971., 1978.) [3, 4] pokazuju kako temperature s porastom dubine tla u toplom dijelu godine (od ožujka do rujna) opadaju, pa se toplina prenosi s površine tla u dubinu. Tijekom hladnog dijela godine (od listopada do veljače) dublji su slojevi topliji jer se toplina dovodi iz dubine na površinu. To je prenošenje intenzivnije u studenom i prosincu jer u siječnju i veljači snijeg sprječava ohlađivanje tla. Srednje godišnje amplitude opadaju na većim dubinama.

J. Vukov (1971.) [5] također se bavi temperaturama tla u Hrvatskoj, pa između ostalog zaključuje kako su temperature tla na 2 cm dubine u kontinentalnom dijelu Hrvatske više od temperatura zraka samo od svibnja do prosinca, dok su temperature na 5 cm dubine tijekom cijele godine više od temperatura zraka.

Tijekom 1982. i 1983. M. Sršen [6] istraživao je promjene temperature tla na pokusnim dionicama cesta u Slavoniji. Temperature tla zabilježene su termoelementima ugrađenim na dubinama od 25 cm do 40 cm ispod kolničke konstrukcije. Tako izmjerene temperature uspoređene su s temperaturama izračunanim s pomoću modela Barbera. Ustanovljena je korelacija tipa $T_{izm} = 1,139 T_{izr} + 0,412$, uz koeficijent korelacije $r = 0,971$.

Anomalije temperatura tla u Hrvatskoj opisane su u radu D. Kaučića (2000.) [7]. Autor prikazuje odstupanja temperatura tla od ožujka do kolovoza 2000. od višegodišnjeg prosjeka, datume nastupa temperatura tla većih od 5°C i 10°C, te trendove srednjih mjesečnih temperatura tla.

3.3 Promjene temperature tla s porastom dubine

S porastom dubine tla, amplituda temperature se smanjuje. Smanjenje amplitude tla podliježe jednostavnom eksponencijalnom zakonu:

$$a = A e^{-bz}$$

gdje je a amplituda na dubini z , A amplituda na površini, b je veličina koja ovisi o gustoći i koeficijentu toplinske vodljivosti tla, te o periodu funkcije koja prikazuje temperaturni val.

Ustanovljeno je da teorijske vrijednosti promjene temperature u tlu po eksponencijalnom zakonu daju dobre rezultate, ali za prvi sloj uz površinu tla u najtoplijem mjesecu. Za računanje amplituda u pojedinim slojevima, vrijednosti koeficijenta u naprijed navedenom izrazu trebalo bi modificirati.

3.4 Smrzavanje tla

Proces smrzavanja tla može se podijeliti u četiri faze. *Prva faza* počinje padom temperature tla ispod 0°C i traje do početka stvaranja leda. *Druga faza* počinje od trenutka pojave kristalića leda do povećanja obujma tla. *Treća faza* počinje od momenta povećanja obujma tla i završava potpunim zamrzavanjem cjelokupne količine vode u tlu kada tlo ima svoj najveći volumen. *Četvrta faza* nastaje daljnjim padom temperature tla, pri čemu se na površinskom sloju tla pojavljuju pore.

Utvrđeno je da smrzavanje slobodne vode u tlu počinje pri temperaturi tla od -0.1°C. Što je vlažnost tla manja, temperatura smrzavanja tla je niža, odnosno porastom vlažnosti tla raste i temperatura smrzavanja tla.

4 Određivanje indeksa smrzavanja zraka

4.1 Prema švicarskim normama (SNV)

Kumulativna krivulja indeksa smrzavanja dobiva se grafičkim nanošenjem (zbirno) vrijednosti srednjih dnevnih temperatura zraka tijekom najhladnijeg razdoblja.

Prema HRN U.C4.016 mjerodavni se indeks smrzavanja određuje:

- za dvadesetogodišnje razdoblje dimenzioniranja kolničke konstrukcije kao prosječna vrijednost indeksa smrzavanja iz triju najhladnijih zima u prethodnome tridesetogodišnjem razdoblju,
- za desetogodišnje razdoblje dimenzioniranja kolničke konstrukcije kao prosječna vrijednost indeksa smrzavanja iz triju najhladnijih zima u prethodnome petnaestogodišnjem razdoblju.

Vrijednosti indeksa smrzavanja prema švicarskim normama (tablica 2.) određene su prema sljedećem postupku:

Tablica 2. Prikaz vrijednosti indeksa smrzavanja zraka ISZ ($^{\circ}\text{C} \times \text{dani}$) i vrijednosti dubina smrzavanja DS (m), određenih prema švicarskim normama i AASHTO smjernicama, te minimalne potrebne debljine kolničke konstrukcije izračunane prema švicarskoj metodi

Redni broj	Postaja	\bar{T} ($^{\circ}\text{C}$)	Indeks smrzavanja zraka ISZ ($^{\circ}\text{C} \times \text{dani}$)		Trajanje smrzavanja (dani)	Dubina smrzavanja po AASHTO metodi - DS (m)	Dubina smrzavanja po švicarskoj metodi - DS (m)	Debljina kolničke konstrukcije (70% x DS)	Redni broj	Postaja	\bar{T} ($^{\circ}\text{C}$)	Indeks smrzavanja zraka ISZ ($^{\circ}\text{C} \times \text{dani}$)		Trajanje smrzavanja (dani)	Dubina smrzavanja po AASHTO metodi - DS (m)	Dubina smrzavanja po švicarskoj metodi - DS (m)	Debljina kolničke konstrukcije (70% x DS)
			4	5								6	7				
1	2	3							1	2	3						
1	Maksimir	10,6	ISZmaks	272,0	62	0,64	0,81	0,57	21	V. Ličanke	7,1	ISZmaks	316,4	94	0,78	0,92	0,64
		10,6	ISZsred	206,0	48	0,59	0,72	0,50			7,1	ISZsred	305,2	86	0,76	0,91	0,64
2	Pleso	10,6	ISZmaks	318,6	62	0,70	0,86	0,60	22	Bosiljevo	10,2	ISZmaks	146,8	46	0,56	0,70	0,49
		10,6	ISZsred	200,0	59	0,55	0,72	0,50			10,2	ISZsred	123,9	48	0,45	0,69	0,48
3	Jaska	10,2	ISZmaks	296,6	62	0,88	0,84	0,59	23	Ogulin	9,9	ISZmaks	260,7	63	0,69	0,86	0,60
		10,2	ISZsred	199,4	59	0,56	0,72	0,50			9,9	ISZsred	172,1	48	0,59	0,75	0,53
4	Kostel	9,2	ISZmaks	340,0	62	0,74	0,88	0,62	24	Slunj	10,2	ISZmaks	240,7	63	0,64	0,82	0,57
		9,2	ISZsred	298,7	85	0,68	0,84	0,59			10,2	ISZsred	142,6	49	0,53	0,70	0,49
5	Križevci	10,4	ISZmaks	302,1	62	0,68	0,84	0,59	25	L. Lešće	9,0	ISZmaks	308,7	63	0,76	0,91	0,64
		10,4	ISZsred	214,7	72	0,55	0,74	0,52			9,0	ISZsred	216,8	79	0,60	0,80	0,56
6	Bjelovar	10,6	ISZmaks	327,0	65	0,72	0,87	0,61	26	B. Oštarije	7,2	ISZmaks	333,3	101	0,80	0,95	0,67
		10,6	ISZsred	204,6	61	0,56	0,72	0,50			7,2	ISZsred	285,1	81	0,73	0,89	0,62
7	Sisak	11,1	ISZmaks	274,7	62	0,62	0,81	0,57	27	Gospić	8,6	ISZmaks	366,6	94	0,80	0,99	0,69
		11,1	ISZsred	176,9	49	0,52	0,68	0,48			8,6	ISZsred	304,2	82	0,73	0,90	0,63
8	Karlovac	10,9	ISZmaks	217,9	60	0,58	0,74	0,52	28	Daruvar	10,8	ISZmaks	256,4	64	0,62	0,78	0,55
		10,9	ISZsred	150,8	38	0,49	0,64	0,45			10,8	ISZsred	160,7	34	0,50	0,64	0,45
9	Zelina	10,3	ISZmaks	296,6	62	0,69	0,84	0,59	29	Virovitica	10,6	ISZmaks	367,5	74	0,73	0,90	0,63
		10,3	ISZsred	200,4	60	0,56	0,72	0,50			10,6	ISZsred	176,7	37	0,53	0,66	0,46
10	Ludbreg	10,4	ISZmaks	331,5	63	0,73	0,87	0,61	30	Slatina	11,0	ISZmaks	262,4	67	0,61	0,78	0,55
		10,4	ISZsred	242,0	68	0,62	0,78	0,55			11,0	ISZsred	262,4	67	0,61	0,78	0,55
11	Varaždin	10,1	ISZmaks	326,3	62	0,73	0,87	0,61	31	Novska	11,2	ISZmaks	248,4	62	0,60	0,77	0,54
		10,1	ISZsred	232,2	72	0,61	0,77	0,54			11,2	ISZsred	167,4	46	0,48	0,64	0,45
12	Koprivnica	10,4	ISZmaks	288,9	63	0,67	0,83	0,58	32	Gradiška	10,8	ISZmaks	263,2	66	0,62	0,78	0,55
		10,4	ISZsred	199,0	61	0,55	0,72	0,50			10,8	ISZsred	176,2	54	0,48	0,66	0,46
13	Pazin	11,4	ISZmaks	22,9	11	0,20	0,33	0,23	33	Požega	10,5	ISZmaks	88,2	30	0,38	0,53	0,37
		11,4	ISZsred	15,0	6	0,16	0,20	0,14			10,5	ISZsred	72,4	25	0,35	0,51	0,36
14	Učka	5,9	ISZmaks	447,9	101	0,91	1,01	0,71	34	Našice	10,8	ISZmaks	281,7	69	0,59	0,80	0,56
		5,9	ISZsred	378,9	123	0,83	0,91	0,64			10,8	ISZsred	175,0	53	0,49	0,66	0,46
15	Čepić	12,6	ISZmaks	14,4	6	0,16	0,20	0,14	35	Sl. Brod	10,7	ISZmaks	347,4	69	0,71	0,87	0,61
		12,6	ISZsred	9,1	5	0,12	0,15	0,11			10,7	ISZsred	164,8	45	0,48	0,64	0,45
16	Gračac	9,2	ISZmaks	111,9	39	0,49	0,66	0,46	36	Vinkovci	11,4	ISZmaks	238,1	29	0,62	0,76	0,53
		9,2	ISZsred	97,0	30	0,48	0,64	0,45			11,4	ISZsred	145,3	31	0,46	0,60	0,42
17	Knin	12,9	ISZmaks	70,4	15	0,40	0,60	0,42	37	Osijek	11,0	ISZmaks	338,3	69	0,68	0,86	0,60
		12,9	ISZsred	33,3	8	0,27	0,35	0,25			11,0	ISZsred	224,1	70	0,54	0,74	0,52
18	Dmiš	13,1	ISZmaks	66,8	11	0,40	0,60	0,42	38	Brestovac	10,9	ISZmaks	353,8	69	0,75	0,87	0,61
		13,1	ISZsred	30,5	7	0,26	0,34	0,24			10,9	ISZsred	206,5	59	0,52	0,71	0,50
19	Parg	7,1	ISZmaks	356,8	104	0,83	0,98	0,69	39	Miholjac	11,0	ISZmaks	306,5	67	0,64	0,82	0,57
		7,1	ISZsred	300,0	67	0,80	0,90	0,63			11,0	ISZsred	209,5	80	0,50	0,71	0,50
20	Zalesina	7,0	ISZmaks	454,4	101	0,95	1,09	0,76			11,0	ISZmaks	209,5	80	0,50	0,71	0,50
		7,0	ISZsred	410,4	83	0,87	1,03	0,72			11,0	ISZsred	209,5	80	0,50	0,71	0,50

\bar{T} - prosječna godišnja temperatura zraka

obrada podataka o srednjim dnevnim temperaturama zraka zimi u dvadesetpetogodišnjem razdoblju,

- određivanje triju najhladnijih zima iz dvadesetpetogodišnjih podataka,
- izrada kumulativnih krivulja srednjih dnevnih temperatura za tri najhladnije zime,
- određivanje maksimuma i minimuma na kumulativnim krivuljama (primjer na slici 3.),
- računanje indeksa smrzavanja za svaku od triju najhladnijih zima kao razlike maksimuma i minimuma,
- određivanje mjerodavne vrijednosti indeksa smrzavanja kao srednje vrijednosti ovih triju podataka.

4.2 Prema AASHTO smjernicama

Indeks smrzavanja predstavlja zbroj stupanj-dana u određenom razdoblju smrzavanja. Dubina smrzavanja ovisi o intenzitetu i trajanju temperatura smrzavanja na površini tla. Budući da su dijagrami i tablice originalno izrađeni u anglosaksonskom mjernom sustavu, račun je proveden u tim jedinicama.

Postupak određivanja vrijednosti indeksa smrzavanja prema AASHTO metodi:

- obrada podataka o srednjim dnevnim temperaturama zraka zimi u dvadesetpetogodišnjem razdoblju
- određivanje triju najhladnijih zima iz dvadesetpetogodišnjih podataka,
- određivanje razdoblja smrzavanja za svaku od tri najhladnije zime – počinje kada srednja dnevna temperatura padne ispod 32°F (0°C) na nekoliko dana, a završava kada je srednja dnevna temperatura veća od 29°F (-3°C) nekoliko dana,
- računanje indeksa smrzavanja = zbroj stupanj-dana u tom razdoblju smrzavanja za svaku od triju najhladnijih zima (primjer na tablici 2.),
- određivanje mjerodavne vrijednosti indeksa smrzavanja kao srednja vrijednost ovih triju podataka.

Na taj način izračunane vrijednosti indeksa smrzavanja potpuno su jednake vrijednostima ISZ dobivenim prema švicarskim normama (tablica 2.).

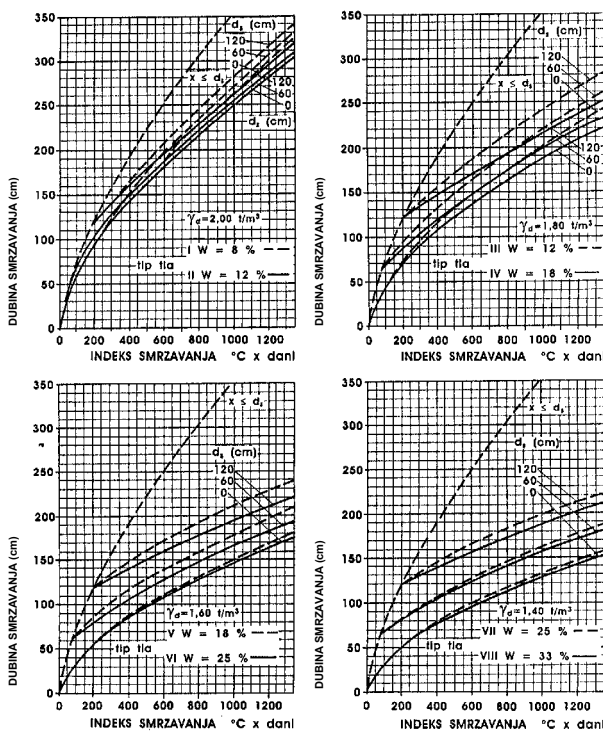
5 Određivanje dubine smrzavanja

5.1 Prema švicarskim normama (SNV)

Određivanje dubine smrzavanja u RH propisano je normom HRN U.B9.012 koja se zasniva na švicarskim normama [8]. S pomoću indeksa smrzavanja te podataka o debljini, prostornoj masi i vlažnosti kolničke konstrukcije, podataka o vrsti tla te njegovoj prostornoj masi i

vlažnosti, iz dijagrama se očitava dubina smrzavanja ispod površine kolnika (slika 6.) [8].

Uzima se da je ukupna debljina kolničke konstrukcije 45 cm za sjeverozapadnu Hrvatsku, 60 cm za područje Like i 40 cm za Slavoniju i Istru.



Slika 6. Dijagrami za određivanje dubine smrzavanja

Razredi tla (za primjenu u dijagramima na slici 6.) prikazani su u tablici 3. [8].

Tablica 3. Razredba tla s obzirom na dubinu smrzavanja

Razred materijala posteljice	Suha prostorna masa [t/m ³]	Sadržaj vode [%]	Vrsta materijala
I.	2,00	8	šljunak i pijesak, čist ili malo prašinst
II.	2,00	12	
III.	1,80	12	prašinst i glinoviti šljunak i pijesak
IV.	1,80	18	
V.	1,60	18	
VI.	1,60	25	prašina, glina eventualno s pijeskom i šljunkom
VII.	1,40	25	
VIII.	1,40	33	
Kolnička konstrukcija	2,15	4	pjeskoviti šljunak

Budući da se uzima da je tlo ispod kolničke konstrukcije glinovito, iz tablice 3. odabire se VIII. razred materijala posteljice. Volumenska masa i vlažnost materijala kolničke konstrukcije uzimaju se također iz tablice 3. S pomoću navedenih podataka i podataka o indeksima smrzavanja iz tablice 2., očitane su dubine smrzavanja (DS) za pojedine lokacije uporabom dijagrama na slici 6.

5.2 Prema AASHTO smjernicama

Dubina smrzavanja računa se prema modificiranoj Berggrenovoj formuli kada postoji više različitih slojeva [2]:

$$DS = \lambda \sqrt{\frac{48nIS}{\left(\frac{L}{k}\right)_{eff}}}$$

$$\left(\frac{L}{k}\right)_{eff} = \frac{2}{DS^2} \left[\frac{z_1}{k_1} \left(\frac{L_1 z_1}{2} + L_2 z_2 + \dots + L_i z_i \right) + \frac{z_2}{k_2} \left(\frac{L_2 z_2}{2} + \dots + L_j z_j \right) + \dots + \frac{z_i}{k_i} \left(\frac{L_i z_i}{2} \right) \right]$$

DS - dubina smrzavanja (ft)

λ - bezdimenzionalni koeficijent koji uzima u obzir utjecaj temperaturnih promjena u masi tla

k - toplinska provodljivost tla, prosjek smrznutog i nesmrznutog (BTU/hr · ft · °F) – određuje se iz odgovarajućih dijagrama

n - faktor konverzije za indeks smrzavanja zraka u indeks smrzavanja površine (iz podataka o dnevnim temperaturama zraka dobiva se indeks smrzavanja zraka, a ne indeks smrzavanja površine). Korekcijski faktor "n" je omjer indeksa smrzavanja površine i indeksa smrzavanja zraka, a prikazan je u tablici 4. [2].

$$n = \frac{IS_{površine}}{IS_{zraka}}$$

Tablica 4. Korekcijski faktor "n"

Tip površine	"n"
Snijeg	1,0
Kolnici bez snijega i leda	0,9
Pijesak i šljunak	0,9
Travnjak	0,5
IS – indeks smrzavanja zraka (°F x dani)	

U formule se ulazi s pretpostavljenom dubinom smrzavanja i ako ona zadovoljava - prihvaća se, ako ne zadovoljava - pretpostavlja se nova dubina.

Tablica 5 Slojevi kolničke konstrukcije

SLOJ	γ_D (lb/ft ³)	w (%)	k (BTU/ hr·ft·°F)	C (BTU/ft ³ ·°F)	L (BTU/ft ³)	Debljina kolničke konstrukcije			
						SZ Hrv.	Lika	Slavonija	Istra
asfaltni zastor	140	0	0,86	23,8	0	0,55 ft = 16,4 cm	0,58 ft = 17,5 cm	0,33 ft = 10,0 cm	0,30 ft = 9,0 cm
nevezani zrnati nosivi sloj	140	2	1,15	25,9	403,2	0,97 ft = 29,1 cm	1,33 ft = 39,8 cm	0,94 ft = 28,2 cm	0,51 ft = 15,4 cm
posteljica: glina	100	15	0,75	28,2	2160				

n - faktor konverzije za indeks smrzavanja zraka u indeks smrzavanja površine ($n = 0,9$); γ_D - gustoća suhog materijala (lb/ft³); w - vlažnost materijala (%); k - toplinska provodljivost tla, prosjek smrznutog i nesmrznutog (BTU/hr · ft · °F) – određeni iz odgovarajućih dijagrama ($\gamma_D = 120 - 140$ (lb/ft³) za pijesak i šljunak, $\gamma_D = 90 - 100$ (lb/ft³) za mulj i glinu i $\gamma_D = 20$ (lb/ft³) za treset; $W = 2 - 10$ % za šljunak, $W = 5 - 15$ % za pijesak, $W = 5 - 40$ % za mulj, $W = 10 - 50$ % za glinu i $W = 50$ % za treset; L - latentna toplina (BTU/ft³); C - prosječni volumni toplinski kapacitet tla (BTU/ft³·°F).

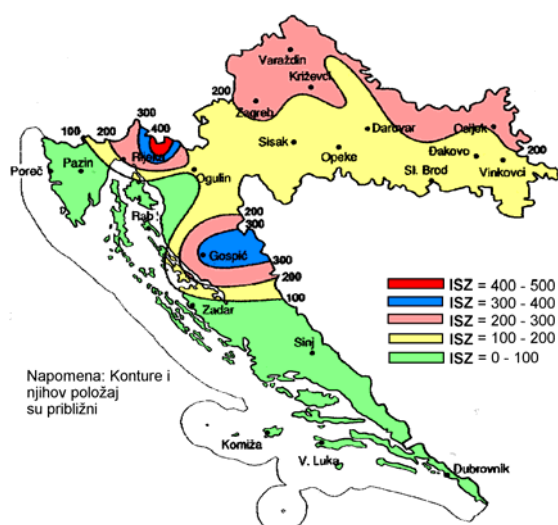
Uz pretpostavljeni troslojni sustav kolničke konstrukcije i njegove fizikalne značajke (prikazane u tablici 5.), uz upotrebu Berggrenove formule te uz poznate vrijednosti indeksa smrzavanja i trajanja razdoblja smrzavanja, izračunane su vrijednosti dubine smrzavanja, što je prikazano u tablici 2.

6 Implikacije ovoga istraživanja za potrebe projektiranja i održavanja kolničkih konstrukcija

Jedna od implikacija obavljenih izračuna, kao i konstruirane karte kontura indeksa smrzavanja, jest da takvi rezultati na izravan način utječu na ukupnu debljinu kolničke konstrukcije. Tako, primjerice, pojedine cestovne uprave u svijetu primjenjuju iskustveno pravilo da struktura kolničke konstrukcije treba biti jednaka barem polovici očekivane dubine smrzavanja (SAD), ili pak 70% od dubine smrzavanja što je dosadašnja praksa u Hrvatskoj.

Praktičan doprinos ovoga istraživanja jest izrada karte kontura indeksa smrzavanja, prikazana na slici 7. Na osnovi ISZ očitano iz karte kontura sa slike 7. (iscrtane prema podacima predočenim u tablici 2.), i uz pomoć podataka o debljini konkretne kolničke konstrukcije (projektirane ili izvedene), njeznoj prostornoj masi i vlažnosti, te istovjetnim podacima o vrsti tla ispod nje, iz dijagrama na slici 6. može se očitati dubina smrzavanja ispod površine kolničke konstrukcije.

Navedena metodologija određivanja dubine smrzavanja ispod kolničke konstrukcije na osnovi vrijednosti indeksa smrzavanja (ISZ), koje su ustanovljene ovim istraživanjem za područje Republike Hrvatske, ima dvostruku praktičnu primjenu: i za provjeru osjetljivosti na smrzavanje projektirane strukture kolnika i za ocjenjivanje otpornosti na smrzavanje postojećih kolničkih konstrukcija sa stajališta potreba njihova održavanja i rehabilitiranja.



Slika 7. Karta pojedinih zona indeksa smrzavanja zraka (ISZ) za područje Republike Hrvatske

7 Zaključak

Provedeno istraživanje omogućilo je donošenje nekoliko komentara i zaključaka:

- Indeksi smrzavanja određeni su za svaku postaju za jedno razdoblje trajanja smrzavanja tijekom najhladnije godine u dvadesetpetogodišnjem razdoblju (ISZ maks.) i kao srednja vrijednost tri razdoblja trajanja smrzavanja od triju najhladnije godine u dvadesetpetogodišnjem razdoblju (ISZ sred.).
- Kao što se vidi iz poglavlja 4., *Određivanje indeksa smrzavanja zraka*, indeksi smrzavanja su jednaki prema švicarskim normama i AASHTO metodi. Iako se metode određivanja razlikuju one se svode na isti princip: određuje se zbroj stupanj-dana unutar najhladnijeg razdoblja godine. Prema švicarskim normama određuje se pad kumulativne krivulje temperatura unutar najhladnijeg razdoblja jedne godine ($^{\circ}\text{C} \times \text{dani}$), jer proces smrzavanja teče dok kumulativna krivulja temperatura pada. Prema AASHTO metodi zbrajaju se stupanj-dani manji od 0°C (32°F) unutar najhladnijeg razdoblja jedne godine. Najhladnija razdoblja neke godine poklapaju se prema objema metodama.

LITERATURA

- [1] Janoo, V.; Cortez, E.: *Pavement Evaluation in Cold Regions*, Proceedings of the Eleventh International Conference, May 20 – 22, 2002, Anchorage, Alaska, USA, ASCE – American Society of Civil Engineers, 360 – 371.
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials, "Guide for Design and Pavement Structures", Volume 2 – Pavement Notes, Section 2.0 – Fundamental Design Parameters, AASHTO, Washington, D.C., July 1998.
- [3] Penzar, I.: *Neke karakteristike temperatura tla u Jugoslaviji*, Dokumentacija za tehnologiju i tehniku u poljoprivredi, 7 (1971), 1.-23.
- [4] Penzar, I.: *Temperatura tla. Prilozi poznavanju vremena i klime SFRJ*, Savezni hidrometeorološki zavod, (1978), 65-95.
- [5] Vukov, J.: *Temperatura tla u Hrvatskoj*, Agronomski glasnik 7-8 (1971), 411.-446.

- Određivanje indeksa smrzavanja puno je jednostavnije, preglednije i brže prema švicarskim normama (grafička metoda).
- Na postajama u Pazinu, Čepiću, Kninu i Drnišu dobivene su vrlo male vrijednosti indeksa smrzavanja (manje od $100^{\circ}\text{C} \times \text{dana}$), kao i vrlo male dubine smrzavanja tla zbog toga što na tim lokacijama temperature ispod nule traju svega nekoliko dana (< 10 dana), pa se uzima da na tim lokacijama, kao i u primorskom dijelu Hrvatske, nema smrzavanja.
- Dubine smrzavanja također su izračunane s pomoću dvije različite metode, ali se rezultati razlikuju. Metoda prema švicarskim normama, za jednake pretpostavljene debljine projektiranih ili izvedenih kolničkih konstrukcija, daje bitno veće dubine smrzavanja (~ 15 cm) od one prema AASHTO metodi (tablica 2.).
- Minimalne debljine kolničkih konstrukcija državnih cesta, koje se smatraju otpornima na smrzavanje, prema švicarskim se normama određuju kao 60-postotne vrijednosti dubine smrzavanja. Za Hrvatsku uzimamo 70% od dubine smrzavanja (DS) kao minimalnu debljinu kolničke konstrukcije što ju smatramo otpornom na smrzavanje. U tablici 2. (u koloni 8.) prikazane su na taj način izračunane minimalne debljine kolničke konstrukcije za lokalitete svih meteoroloških postaja u Hrvatskoj.

Na posljetku autori žele iskazati uvjerenje da će rezultati ovih istraživanja imati pozitivan učinak na više aktivnosti vezanih uz građenje, održavanje i gospodarenje državnim cestama u Hrvatskoj. Prije svega to se odnosi:

- na racionalno projektiranje struktura kolničkih konstrukcija,
- na zaštitu cesta u razdoblju odmrzavanja/otapanja,
- na otklanjanje oštećenja cesta uzrokovanih djelovanjem smrzavanja,
- na mogućnost upotrebe geotekstila u rješavanju problema smanjene nosivosti državnih cesta, itd.

[6] Sršen, M. *Utjecaj faktora okoline na promjene nosivosti kolničkih konstrukcija*, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet građevinskih znanosti, Zagreb 1984, str. 254.

[7] Kaučić, D.: *Anomalije temperatura tla u Hrvatskoj u razdoblju ožujak-kolovoz 2000*, Šumarski list br. 5-6 (2001), 291.-297.

[8] Schweizerische Normenvereinigung (SNV):
SNV 640 315: Dimensionierung – Grundbegriffe, 1971.
SNV 640 328: Dimensionierung – Maßnahmen zur Verhütung von Frostschäden, 1971.
SNV 670 145: Frost – Frostgefährlichkeit von Bodenmaterialien, 1970.
SNV 670 148 : Frost – Frosttiefe, 1970.

ZAHVALA

Ovaj rad zasniva se na rezultatima istraživačkog projekta "Određivanje indeksa smrzavanja za državne ceste i ublažavanje učinka smrzavanja na kolničke konstrukcije" (2715-1-0970/02), koji je financiran od strane Hrvatskih cesta d.o.o. Autori izražavaju zahvalnost stručnjacima Hrvatskih cesta d.o.o. koji su prepoznali složenost problematike smrzavanja tla ispod kolničkih konstrukcija, kao i važnost rješavanja te problematike. Time je omogućeno da se napokon ostvare preduvjeti za racionalno projektiranje kolničkih konstrukcija u kontinentalnom području Hrvatske, kao i njihovo optimalno održavanje i zaštitu u kritičnom razdoblju odmrzavanja.

ISPRAVCI

U članku *Proizvodnja i ugradnja glavnih nosača na objektima cestovnih prometnica*, autorica Snježane Tešović i Božane Ojvan, načinjeno je više grešaka pri uređivanju na koje upozoravamo čitatelje, izostavljajući one greške za koje je očito da su "tipfelari".

Iznosimo sljedeće ispravke:

- Članak je primljen u 2003. godini, a ne u 2004. (Trebalo pisati 26. 9. 2003.).
- Tip navlačne rešetke je ASPEM a ne ASPREM.
- U okviru na prvoj stranici članka (str. 87.) pogrešno je navedeno ime prve autorice Božena umjesto Snježana kao što piše ispod naslova članka.
- Na str. 88. (ispod slike 1. piše: "Osim oplata locira se ...". Autorice su bile napisale: "Pored oplata locira se ..." a riječ "pored" lektorski je ispravljena na "osim" umjesto na "pokraj".
- Slike 2. i 4. su zamijenjene.

Ispričavamo se autoricama i čitateljima zbog načinjenih grešaka.

Uredništvo