

Primljen / Received: 6.10.2014.
 Ispravljen / Corrected: 6.12.2014.
 Prihvaćen / Accepted: 20.1.2015.

Dostupno online / Available online: 10.2.2015.

Teorija i praksa u izvođenju betonskih kolnika u Mađarskoj

Autori:



Prof. emeritus dr.sc. **László Gáspár**, dipl.ing.građ.
 Institut prometnih znanosti (KTI), Budimpešta
 Sveučilište Széchenyi István, Győr
gaspar@kti.hu



Mr.sc. **Zsolt Bencze**, dipl.ing.građ.
 Institut prometnih znanosti (KTI), Budimpešta
 Sveučilište Széchenyi István, Győr
bencze@kti.hu

Stručni rad

László Gáspár, Zsolt Bencze

Teorija i praksa u izvođenju betonskih kolnika u Mađarskoj

U Mađarskoj kasnih 90-ih godina prošlog stoljeća različite varijante asfaltnih kolničkih konstrukcija nisu imale dovoljnu otpornost na deformacije koja bi spriječila ranu pojavu kolotruga na iznimno prometnim autocestama. To je uzrokovalo ponovno vraćanje betonskih kolnika kao tehnološkog izbora. U ovom radu prikazana je povijest mađarskih betonskih kolnika, postupci u njihovu "oživljavanju", tehnološki izazovi kod izrade pokusnih dionica te tijek istraživanja betonskih kolnika s ciljem dugoročnog zadržavanja povoljnih površinskih svojstava.

Ključne riječi:

betonski kolnik, pokusne dionice, površinska svojstva kolnika, mikrotekstura, makrotekstura, ponašanje kolnika

Professional paper

László Gáspár, Zsolt Bencze

Theory and practice of cement concrete pavements in Hungary

In the late 1990's, various asphalt pavement alternatives did not present the level of deformation resistance that would be sufficient to prevent early rutting on the extremely heavily trafficked motorways in Hungary. This resulted in the reinstatement of concrete pavements, which became once again a technological choice in motorway construction. This paper presents the history of Hungarian concrete pavements, steps for their "revival", technological challenges in the preparation of test sections, and an ongoing research aimed at ensuring long-term preservation of favourable surface properties.

Key words:

concrete pavement, test sections, pavement surface properties, microtexture, macrotexture, pavement behaviour

Fachbericht

László Gáspár, Zsolt Bencze

Theorie und Praxis der Ausführung von Betonfahrbahnen in Ungarn

In Ungarn war Ende der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts bei verschiedenen Arten von Asphaltbelägen die Beständigkeit gegen Verformungen, die einer frühen Entwicklung von Spurrinnen auf den belebten ungarischen Autobahnen entgegenwirken könnte, nicht ausreichend. Dies führte zur erneuten Einführung von Betonfahrbahnen in die Technologieauswahl für Autobahnen. In dieser Arbeit werden geschichtliche Aspekte ungarischer Betonfahrbahnen, Schritte ihrer "Wiederbelebung", technologische Herausforderungen bei der Erstellung von Teststrecken sowie der Forschungsablauf bezüglich langfristiger Erhaltung günstiger Oberflächeneigenschaften beschrieben.

Schlüsselwörter:

Betonfahrbahn, Teststrecken, Oberflächeneigenschaften von Fahrbahnen, Mikrotextrur, Makrotextrur, Fahrbahnverhalten

1. Uvod

Odluka o izboru vrste kolničke konstrukcije u cestovnom upravljačkom sustavu neke države iznimno je važna, a donose ju nadležna tijela, obično iz ministarstva vezanog uz promet. Najpovoljnija situacija za projektanta može biti ta da su sve uobičajene (fleksibilna, polukruta, kruta, kompozitna) kolničke konstrukcije na popisu tako da ih on može odabrati u procesu projektiranja nove ceste ili u sanaciji postojeće.

Godine 1976., nakon odluke mađarskog ministarstva, izgradnja betonskih kolnika (krutih kolničkih konstrukcija) – bez obzira na prijašnje značajne tehničke uspjehe u Mađarskoj – prekinuta je na 25 godina, uvelike ograničavajući fleksibilnost u upravljanju cestama. Različite varijante asfaltnih kolničkih konstrukcija nisu imale dovoljnu otpornost na deformacije kako bi spriječile ranu pojavu kolotruga na iznimno prometnim mađarskim autocestama. Zbog toga je došlo do ponovnog vraćanja betonskih kolnika kao tehnološkog izbora za autoceste.

U ovom se radu prikazuje povijest mađarskih betonskih kolnika, opisuju se postupci u njihovom "oživljavanju" kasnih 1990-ih i ranih 2000-ih, navode tehnološki izazovi pri izgradnji pokusnih dionica s betonskim kolnikom i donose prethodna priopćenja u istraživanju otpornosti na klizanje betonskih kolničkih površina koja su u tijeku.

2. Povijest mađarskih betonskih kolnika prije 1976. godine

Betonski kolnici u Mađarskoj se ispituju od 1911., a grade od 1927. godine. Prve dionice imale su kolnik od nearmiranog betona debljine 150 mm, a kasnije izvedene dionice bile su debljine 200 mm u dva sloja. Godine 1927. izgrađena je dionica glavne ceste duljine 600 m i širine 6 m korištenjem Rhoubenit betona. Između 1926. i 1933. godine betonski kolnici izvedeni su uglavnom izravno na posteljici te su ukupno izgrađena 103 kilometra takvih kolnika [1].

Razdoblje od 1933. do 1944. može se smatrati "zlatnim dobom" za gradnju betonskih kolnika u Mađarskoj (ukupno je izvedeno 1088 km). Kolnici su tada projektirani za opterećenje po kotaču od 30 kN. Tipične karakteristike tih kolnika su bile: izravno izvedeni na posteljici, uglavnom u jednom sloju, debljina 130 mm, širina 6 m, izvedeni su uzdužni spojevi, dok su poprečni spojevi bili na svakih 8-12 m. Presvlačenje asfaltnim slojevima izvedeno 50-ih i 60-ih godina prošlog stoljeća.

Nakon Drugog svjetskog rata izgradnja je cesta s betonskim kolnicima odigrala važnu ulogu u modernizaciji mađarskoga glavnog cestovnog sustava. Više od 300 km betonskih kolnika izgrađeno je u širini od 6,50 do 7,00 m i debljini od 180 mm na tamponskom sloju od pjeskovitog šljunka. Prva mađarska autocesta M7 (između Budimpešte i jezera Balaton) sagrađena je 1958. primjenom krute kolničke konstrukcije. Tipična kolnička konstrukcija izgrađena prije 1972. godine bila je debljine 200 mm, nakon toga je debljina kolničke konstrukcije iznosila 240 mm i izvodila se kao nearmirani betonski kolnik na

bitumeniziranim nosivim i stabilizacijskim slojevima različitih debljina.

Širina betonskog kolnika na autocesti M7 bila je uobičajenih 8,5 m s uzdužnim spojem. Poprečni spojevi bili su na razmaku od 5.0 m i to bez ugradnje moždanika u poprečne spojeve. Od 1972. godine do danas primjenjuje se dodatak za aeraciju betona da bi betonski kolnik izdržao štetne učinke sredstava za odleđivanje.

Najveća ukupna duljina betonskih kolnika, od 1250 km, u Mađarskoj postignuta je 1965. godine [1]. Od tada se duljina postupno skraćuje zbog zamjene s asfaltnim kolnicima. Neki dijelovi autoceste M7 pokazali su rano propadanje zbog raznih građevinskih propusta. Bio je to jedan od razloga zašto je Ministarstvo prometa odlučilo nastaviti program autocesta isključivo s asfaltnim kolnicima od 1976. godine nadalje. Uslijed toga izgradnji betonskih kolnika došao je kraj i na drugim cestama. Opskrba materijalom, razvoj strojeva, usavršavanje stručnjaka i istraživačkih aktivnosti također su prestali u ovom području.

3. Priprema za "preporod" nakon 1999. godine

Južna dionica obilaznice Budimpešte (autocesta M0) izgrađena je 80-ih godina izvedbom polukrute kolničke konstrukcije s habajućim slojem od SMA i polimerom modificiranim bitumenom. Zbog izuzetno velikog i teškog prometnog opterećenja te čestog ubrzavanja i usporavanja vozila na toj dionici, došlo je do pojave kolotruga, a česta presvlačenja kolnika uzrokovala su visoke dodatne troškove i značajna kašnjenja korisnika za vrijeme rekonstrukcije. Čak i uz primjenu asfaltnih slojeva s visokim modulom nije ostvarena otpornost kolničke konstrukcije na deformacije u dovoljnoj mjeri. Zato je Ministarstvo prometa nakon više od dva desetljeća odlučilo da ponovo uvede gradnju betonskih kolnika u mađarski cestovni upravljački sustav.

Godine 1998. KTI Budapest (*Institute for Transport Sciences Non-Profit Ltd*) je proveo pripremne aktivnosti za izradu betonske pokusne dionice. Najprije su prikupljena najnovija inozemna iskustva vezana za osnovne materijale, recepture i strojeve, projekte i tehnološke postupke za izradu betonskih kolnika. Odabrano je nekoliko receptura i tehničkih rješenja koja odgovaraju mađarskim klimatskim uvjetima i stanju u prometu. Nakon razmatranja realnih mogućnosti, tri su razrađene:

- klasični betonski kolnik,
- klasični betonski kolnik s ohrapavljenom površinom,
- kontinuirano armiran betonski kolnik (eng. *Continuously Reinforced Concrete Pavement* - CRCP).

PIARC-publikacija o projektiranju i iskustvima izgradnje [2], kao i specifikacije betonskog kolnika iz nekoliko zemalja, primjenjene su pri odabiru najprikladnije mješavine za tri vrste betona. Tablica 1. prikazuje rezultate ispitivanja tlačne čvrstoće instituta KTI i PIARC-preporuke [3].

Tablica 1. KTI-ovi rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće i PIARC-ove preporuke

Izvor	Tlačna čvrstoća (28. dan) [MPa]		
	Klasični betonski kolnik	Klasični betonski kolnik s ohrapvljenom površinom	Kontinuirano armiran betonski kolnik
KTI rezultati ispitivanja	35,3	42,2	37,2
PIARC-preporuka	35,0 - 40,0		min 40,0

Odabrani tipovi betona trebali su biti otporni na očekivano prometno opterećenje i utjecaje okoliša. To je razlog zašto je vodocementni faktor između 0,40 i 0,42 odabran kao funkcija vremenskih uvjeta i stvarne količine vode u finoj frakciji agregata. Plastifikatori su dodani u iznosu od 0,10-0,12 % od količine vode, a dodatak za aeraciju betona u vrijednosti 0,04-0,08 % od količine vode.

Vrlo prometna cesta 7538 izabrana je za pokusnu dionicu. Tri betonske poddionice, svaka duljine 500 m, realizirane su između stacionaže 8+600.00 i 10+100.00, dok je kontrolna dionica s asfaltnim kolnikom izgrađena na cesti 7538 između stacionaže 14+000.00 i 15+000.00.

Zbog iznimno velikog prometnog opterećenja teretnim vozilima (više od 11 10 teških teretnih vozila / dan), uski dvotračni kolnik s relativno slabom konstrukcijom ozbiljno je oštećen. To je razlog zašto je donesena odluka o uklanjanju cijele kolničke konstrukcije prije izgradnje eksperimentalnih kolničkih konstrukcija. Varijante ispitanih kolničkih konstrukcija su (slika 1.).



Slika 1. Sastav kolničke konstrukcije na pokusnim dionicama s betonskim kolnikom (oznaka I, II i III) i kontrolna dionica s asfaltnim kolnikom (cesta 7538)

Savijljiva kolnička konstrukcija na kontrolnoj dionici izvedena je korištenjem asfaltnih slojeva s velikom otpornošću na deformacije i za nju se smatralo da ima gotovo identičnu nosivost kao i betonske varijante. Mješavina za izvođenje

gornjih asfaltnih slojeva je projektirana metodom SUPERPAVE. Širina kolnika pokusnih dionica (i cijele ceste 7538) iznosi 6,0 m. Ta širina je tipična za mađarske državne ceste.

Izgradnja eksperimentalne dionice u osnovi je bila pod utjecajem ekstremnih kiša tog proljeća i ljeta 1999. Samo je jedan od prometnih trakova mogao biti zatvoren tijekom rekonstrukcije. Kao posljedica uzastopnih kiša, projektni koeficijent nosivosti od 50 MPa nije mogao biti zadovoljen na površini sloja od pjeskovitih šljunaka. Stoga je odlučeno da se sloj stabilizira cementom [4]. Betonski kolnik širine 6,0 m izveden je u jednom sloju te se sastojao od dva traka širine 3,0 m. Jedna od poddionica s betonskim kolnikom imala je površinu s "izloženim agregatom" kako bi se smanjila buka i povećala makrohrapavost. Potrebno je svakako navesti da beton s ohrapvljenom površinom zahtijeva posebnu tretman površine. Na površinu svježeg betona nanosi se usporivač vezanja kako bi se spriječila hidratacija cementa. Nakon što beton očvrstne, nehidratizirani mort se uklanja s površine primjerice visokotlačnim mlazom vode kako bi na površini ostao izložen krupni agregat te kako bi se pokazala njegova prisutnost i boja.

Prije pokusne dionice na cesti 7538 u Mađarskoj nije napravljen nijedan kontinuirano armiran betonski kolnik. Kolnik debljine 170 mm i s koeficijentom armiranja 0,67 % napravljen je bez poprečnih spojeva, samo su izvedene radne reške na kraju radnog dana. U projektiranju ispitnih dionica primjenjena je relevantna strana literatura [5-7] (dilatacije, sidra za sprječavanje pomicanja u razdjelnicama kontinuirano armiranog betonskog kolnika (CRCP), postavljanje armature, itd.). Nakon prve zime, povećan broj punch-outa nastao je na površini kod dionice kontinuirano armiranog betonskog kolnika. Pod pojmom "punch-out" na kontinuirano armiranom betonskom kolniku podrazumijeva se područje okruženo s dvije bliske poprečne pukotine, kratkom uzdužnom pukotinom i rubom kolnika ili uzdužnog spoja kada je izložen trošenju, drobljenju ili rasjedanju. Naknadno ispitivanje identificiralo je glavne razloge neočekivanog propadanja kolnika:

- pretanak sloj kolnika, jer se koristilo zastrajelom literaturom koja se temelji na ograničenom iskustvu u primjeni (novija literatura preporučuje debljinu 220-250 mm CRCP-a očekujući beneficije od znatno duljeg uporabnog vijeka kolnika u usporedbi s onim nearmiranim, međusobno povezanim varijantama),
- uski (3,0 m) prometni trakovi uzrokuju preopterećenje u području uzdužnog spoja kada su na njima teška teretna vozila (projektiranjem širih voznih trakova na pokusnoj dionici moglo bi doći do ozbiljnih sigurnosnih rizika zbog širine prometnih trakova od 3,0 m na spoju s cestom 7538),
- nosivost temeljnog pješčano-šljunčanog zaštitnog sloja lokalno ima premali površinski modul (znatno niži od projektne vrijednosti 50 MPa).

Tijekom proteklih desetak godina nove su dionice autocesta izvedene primjenom betonskih kolnika. Betonski kolnik je izveden na novim dijelovima obilaznice grada Budimpešte (cesta M0), najprometnije dionice u Mađarskoj na temelju sadašnjih

Tablica 2. Glavne značajke pokusnih dionica s betonskim kolnikom u Mađarskoj

Oznake ceste	Godina izgradnje	Debljina [mm]	Vrsta površine	Početna dubina teksture [mm]	Dubina teksture u 2013 [mm]
7538/I	1999.	220	Brazdana	1,0	0,4
7538/II	1999.	220	Ohrapavljena	1,8	1,3
7538/III	1999.	170	Brazdana	0,9	0,3
44	2003.	250	†Brazdana	0,6	0,4
4	2004.	250	Brazdana	0,6	0,4
5 (whitetopping)	2008.	120	Brazdana	0,5	0,4
4602 (kružno raskrižje)	2011.	230	Brazdana	0,4	0,2

Whitetopping - tehnologija obnove postojećeg kolnika s betonskim gornjim slojem

i predviđenih podataka. Osim toga, betonski kolnik je izabran i za novoizgrađenu autocestu 31. Tablica 2. prikazuje glavne značajke mađarskih betonskih pokusnih dionica te daje podatke o promjeni prosječne teksture na tim dionicama.

U mađarskom cestovnom specifikacijskom sustavu postoje dvije različite vrste dokumenata: EN norme i tehničke specifikacije za ceste (UME), zapravo National Application Documents za EN norme. Postoje važne razlike između tih dviju vrsta dokumenata. Primjena nekih od njih propisana je zakonom, dok se norme primjenjuju dobrovoljno. Zahvaljujući dobrovoljnom pristupu prema načelima normi, one potiču korisnike da se što više prilagode aktualnim rješenjima koja dolaze iz nedavnih, tehničkih poboljšanja, s ciljem uključivanja takvih rješenja u novu verziju standarda nakon što se o tome dogovorilo široko stručno povjerenstvo. Mjerodavne mađarske norme [8] ne sadrže posebne propise za betonske kolnike. Postoje samo detaljni kriteriji za razred izloženosti (abrazije i otpornost na smrzavanja/odmrzavanje). Samo nekoliko tehničkih specifikacija za ceste [9-11] se zapravo primjenjuje kod betonskih konstrukcija u Mađarskoj.

Kao opći zaključak nakon 15-godišnjeg iskustva stečenog korištenjem betonskih kolnika na mađarskoj javnoj cestovnoj mreži, može se ustvrditi da se ova vrsta kolnika, ako je izvedena vrlo kvalitetno, pokazala izdržljivom i s prihvatljivim površinskim svojstvima.

4. Primjena kod kružnog raskrižja

Zbog ponovne upotrebe betonskih kolnika u mađarskom cestovnom upravljačkom sustavu, potrebno je pronaći nova područja njihove primjene. Jedna od mogućnosti je primjena betonskog kolnika kod kružnih raskrižja. To je ujedno i razlog zašto je pokrenut ciljani istraživački rad u Institutu KTI s ciljem procjene otpornosti površine betonskog kolnika na posebna prometna opterećenja do kojih dolazi zbog malog polumjera kružnog raskrižja.

U posljednjem desetljeću mnogo je kružnih raskrižja izgrađeno u Mađarskoj jednako kao i u većini zemalja diljem

svijeta. Tradicionalno, na njima je izvedena savitljiva kolnička konstrukcija s asfaltnim površinskim slojem. U 2010. godini odlučeno je da se izgradi pokusno kružno raskrižje s betonskim kolnikom kako bi se testirala primjenjivost, performanse i učinkovitost ove vrste kolnika da izdrži posebna opterećenja do kojih dolazi pri prometovanju kružnim raskrižjem. Osim toga, uvedeno je praćenje dionice, koncentrirajući se na njene površinske karakteristike, a također je planirano prikupljanje pouzdanih podataka o ovoj temi.

Dugoročni učinak betonskih slojeva izravno je povezan s otpornošću na habanje. Prema [12], pojam habanje uglavnom se odnosi na suho trenje. U izvješću stoji da čvrsti beton ima veću otpornost na habanje od slabog betona [13]. Između ostalog, vrste agregata, doziranje mješavine, kvaliteta izrade, njega i završna obrada površine utječu na otpornost na habanje. Čvršći agregat je otporniji od mekog agregata. Loše završena obrada može dovesti do relativno niske otpornosti na habanje [14]. Otpornost na habanje betonske površine u osnovi utječe na brzinu opadanja otpornosti na klizanja kao posljedice mehaničkih opterećenja i utjecaja okoliša, kao jednog od glavnih sigurnosnih pokazatelja o stanju prometa.

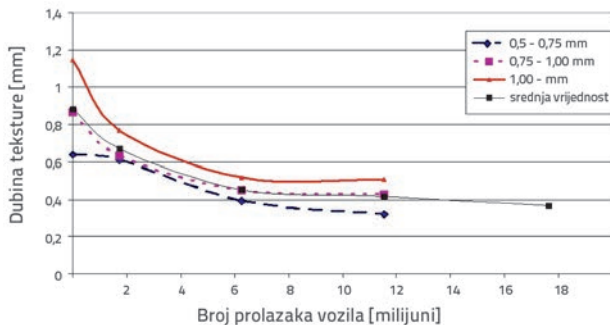
U nedostatku relevantnih mađarskih normi za kružna raskrižja s betonskim kolnikom, mogu se koristiti vrijednosti otpornosti na klizanje specificirane za betonske kolnike. Potrebna dubina teksture je navedena u odgovarajućim tehničkim specifikacijama za ceste [9], a njihove navedene vrijednosti su ovisne o kategorijama ceste. Izmjerene vrijednosti dubine teksture na pokusnoj dionici s betonskim kolnikom ceste 7538 podijeljene su u 4 kategorije:

- ispod 0,5 mm,
- 0,5-0,75 mm,
- 0,75-1,00 mm,
- iznad 1,00 mm.

Prema prvoj kategoriji, dubina "brazdi" betonske kolničke konstrukcije dobivenih tehnikom "češljanja" prilično je plitka [15]. Na takvim kolničkim konstrukcijama očekuje se relativno sporo habanje, dok se kod dubine "brazdi" iznad 1,0 mm može

očekivati mnogo veće trošenje kod betona istih karakteristika. Slika 2. pokazuje tipičnu krivulju smanjenja dubine teksture na temelju vremenske serije podataka prikupljenih na cesti 7538. Osim toga, prikazane su tri krivulje s početnim vrijednostima 0,65 mm, 0,90 mm i 1,15 mm te krivulja prosječnog smanjenja dubine tekstura. Na osnovi slike 2. mogu se izvesti dva zaključka:

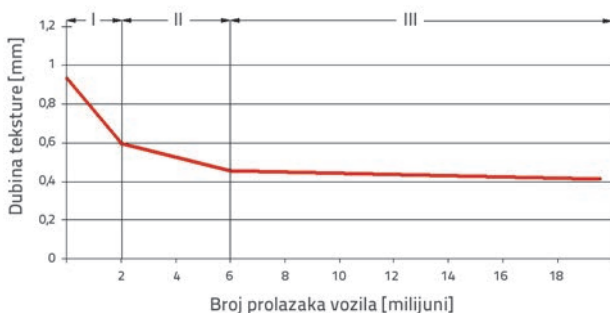
- izmjerene vrijednosti dubine teksture nakon 2 milijuna prolaza vozila bile su gotovo jednake neovisno o njihovim početnim vrijednostima,
- kod više od 10 milijuna prolazaka vozila, smanjenje dubine teksture praktično prestaje.



Slika 2. Krivulja smanjenja dubine teksture na pokusnim dionicama kao funkcija broja prolazaka vozila

Krivulja smanjenja dubine teksture može se aproksimirati poligonom. O smanjenju dubine teksture uslijed kretanja vozila ravnomjernom brzinom u podjednake sekcijama, mogu se odrediti tri različite faze:

- do 2 milijuna prolazaka vozila (I)
- 2 – 6 milijuna prolazaka vozila (II)
- više od 6 milijuna prolazaka vozila (III).



Slika 3. Pojednostavljena krivulja smanjenja dubine teksture

Matematička jednadžba koja opisuje promjenu dubine teksture je:

$$X = D - (e^P)/((Ax^F)M)$$

gdje je:

X - stvarna dubina teksture [mm]

D - početna dubina teksture [mm]

e' - dodatni faktor opterećenja uslijed vožnje u zavoju [mm/ po osovinskoj jedinici]

P - broj prolazaka osovine

A - faktor trošenja prema otpornosti na trenje

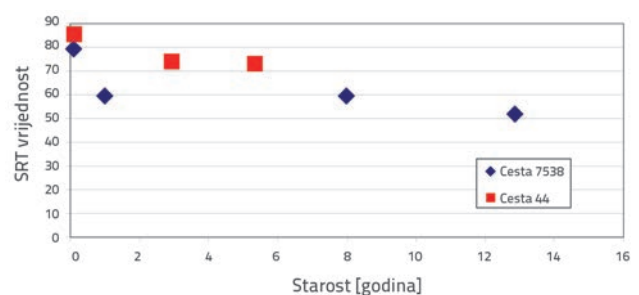
F - faktor trošenja prema otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje

M - faktor trošenja prema karakteristikama mješavine.

Pojedinosti o međusobnoj povezanosti članova jednadžbe opisane su u radu [16].

5. Mikrotekstura

Mikrotekstura površine cestovnog kolnika može se okarakterizirati pomoću nekoliko metoda i srodnih parametara. Uobičajeno primjenjene mjerne metodologije su: laserske tehnike, dinamični postupci za opisivanje utjecaja cestovnih vozila i statički tip uređaja. Najprije je ispitana hvatljivost pomoću SRT uređaja (eng. *Skid Resistance Tester*), koji se najčešće primjenjuje u Mađarskoj. SRT-vrijednost korištena je kao uvjetni parametar za ocjenu novoizgrađenih cestovnih kolničkih površina u Mađarskoj, iako su specificirane vrijednosti dostupne samo za autoceste. Promjena SRT-vrijednosti na površini betonskih kolnika, na dvjema ispitnim dionicama u Mađarskoj, u funkciji vremena prikazana je na slici 4. Tipična dnevna količina teških teretnih vozila na dionici ceste 7538 je 1110 teških teretnih vozila na dan, a na jednoj od glavnih cesta (cesta 44) iznosi 1420 teških teretnih vozila na dan. Razlog naglog pada SRT-vrijednosti za cestu 7538 može se objasniti činjenicom da "kanalizirani" promet teških teretnih vozila koristi previše uski kolnik uzrokujući brzi gubitak početne prilično visoke makroteksture, elementa otpornosti na klizanje.

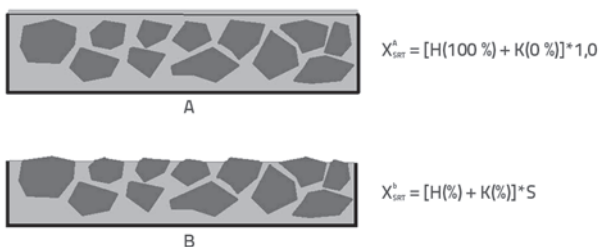


Slika 4. Promjena SRT-vrijednosti na površini betonskih kolnika pokusnih dionica

Promjena mikroteksture cestovne kolničke površine pod utjecajem je nekoliko čimbenika. Primjerice, svojstva pijeska u cementnom mortu imaju ovdje važnu ulogu [18]. Jednostavan matematički model može se razviti za karakterizaciju promjene mikroteksture u funkciji prometnog opterećenja. Njegov mehanizam je vrlo sličan onome kod makroteksture. Testovi su izvedeni tako da se pokažu stvarne promjene i mogućnost izmjene mikrohrapavosti betonske površine. Do ideje se došlo prilikom sanacije istrošenih betonskih kolničkih površina primjenom raznih tehnika glodanja kolnika. Pri

tome se nastojalo osigurati da kolnička površina zadrži određenu razinu otpornosti na klizanje čak i kada je izgubila makrohrapavost uslijed efekta habanja zbog prometnog opterećenja.

Prvi korak istraživanja bio je izmjeriti mikrohrapavost HPC (eng. *High Performance Concrete*) površine prije i poslije glodanja. Zatim su mjerenja provedena na staklenim površinama. Nedvojbeno je otkriveno da mikrohrapavost, karakterizirana SRT - vrijednošću i simulacijom stvarnog otpora klizanja automobila, u osnovi može biti pod utjecajem različitog dizajna površine. Karakterizacija promjene u vrijednosti mikrohrapavosti habajuće površine kolnika zbog mehaničkih opterećenja i utjecaja okoliša može se smatrati prilično složenim zadatkom. Problem je prikazan na slici 5, gdje se može vidjeti da se pneumatik vozila tijekom uporabnog razdoblja kolnika dovodi u kontakt s različitim materijalima (S - pijeska, St - kamen) te zbog toga treba uzeti u obzir da habajuća površina ima promjenjivu otpornost na klizanje.



Slika 5. Promjena habajuće površine uslijed kombiniranog utjecaja prometa i vremenskih prilika

Dakle, mikrotekstura površine je posljedica utjecaja više nezavisnih elemenata. Ti učinci se mogu sažeti u sljedećem pojednostavljenom algoritmu:

$$X_{SRT} = (S + St) * p$$

gdje je:

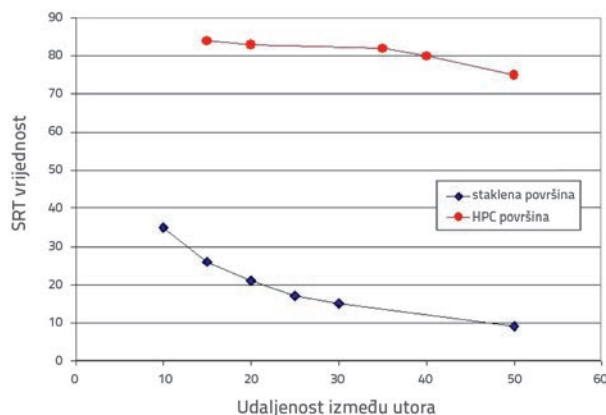
- S - SRT-vrijednost temeljena na omjeru pješčanih površina
- St - SRT-vrijednost temeljena na omjeru kamenih površina
- p - SRT-vrijednost korekcijskog faktora kao funkcije omjera između veličine agregatnih zrna i utora klizne površine.

Promjena mikrostrukture tijekom vremena, jednako kao i makrostrukture, može se poistovjetiti s procesom trošenja i habanja nove kolničke površine s posebnim karakteristikama. Promjena SRT-vrijednosti može se pouzdano odrediti kao stohastički fenomen. Sinergijski učinak prometnog opterećenja i vremenskih utjecaja na površinske promjene dovodi do dodatnih pitanja koja su znanstvenici već istražili [19-20]. Opis tih promjena može se objasniti pojednostavljenim algoritmom prethodno prikazanim, uz pretpostavku da se svojstva mješavine koja dolaze od sastojaka koji se koriste u recepturi za spravljanje betona mijenjaju tijekom vremena na način koji može biti unaprijed određen - zato je mikrotekstura morta koji

se sastoji od pijeska i cementa konstantna, dok se zaglađivanje kamenih čestica može procijeniti.

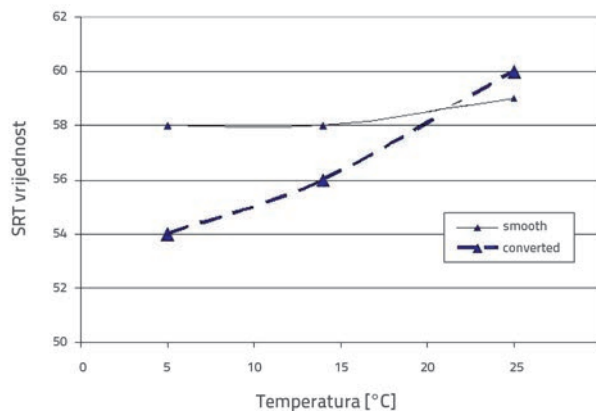
6. Odnos između makrostrukture i mikrostrukture

Nakon što je razvijena matematička pozadina teorije uslijedilo je njeno dokazivanje. Na temelju testova predstavljenih na slici 6., može se nedvojbeno ustvrditi da postoji veza između mikrostrukture i makrostrukture. U isto vrijeme, može se vidjeti da stvarna vrijednost makrostrukture ne ovisi o mikrostrukтури, dok mikrohrapavost uopće ne ovisi o makrohrapavosti. Kao posljedica toga, dva međusobno povezana fenomena propadanja površinskih svojstava kolnika ne mogu se opisati jednostavnim matematičkim algoritmom.

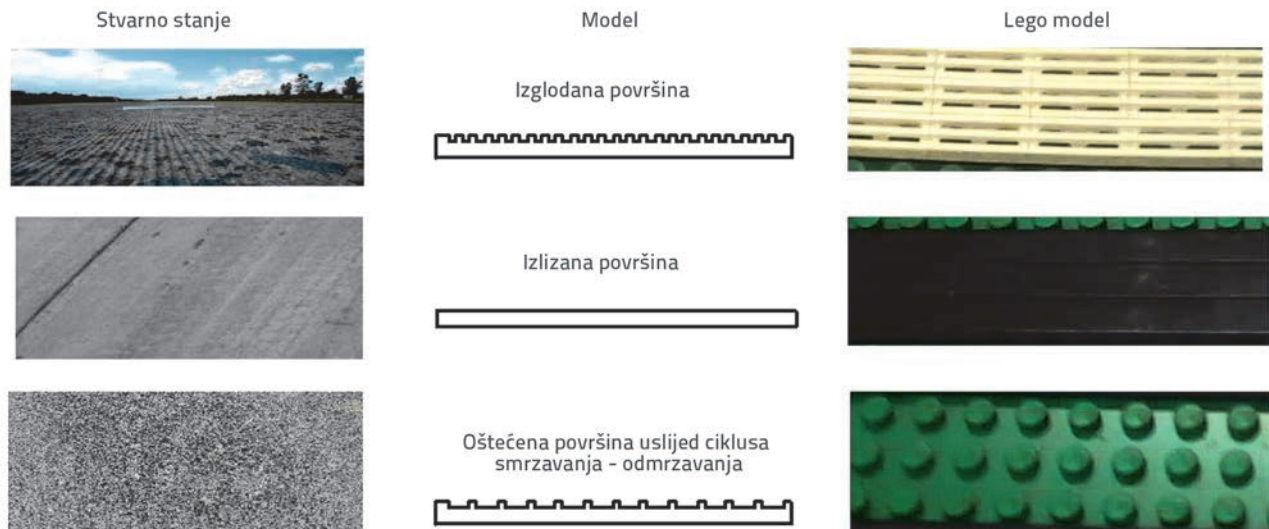


Slika 6. Izmjerene SRT-vrijednosti na izbrazdanoj staklenoj i HPC površini

Nakon završetka prve serije ispitivanja pojavio se sljedeći problem: svaka habajuća površina imala je vlastiti oblik, kao osnovno svojstvo i praktički je nemoguće izraditi isti oblik čak ni u laboratoriju. To je razlog zašto se SRT-vrijednosti obično interpretiraju u rasponima, jer standardna razlika SRT-vrijednosti od 2,4 do 2,6 je dopuštena na istoj površini, neovisno o temperaturi [8]. Promjena SRT - vrijednosti u ovisnosti o temperaturi prikazana je na slici 7.

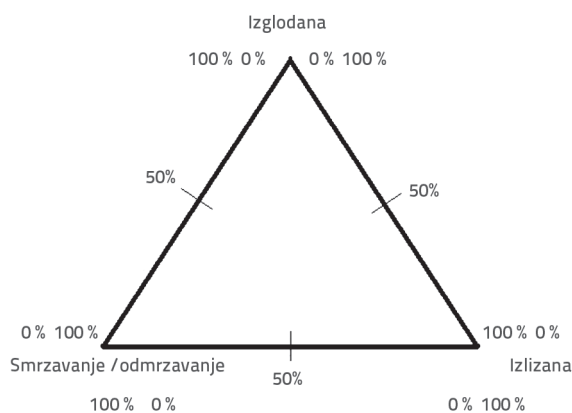


Slika 7. Promjena SRT-vrijednosti u funkciji temperature korigirane sukladno s [8]



Slika 8. Simulacija LEGO® kockama izglodane, izlizane i oštećene površine uslijed ciklusa smrzavanja-odmrzavanja

Simulacija je najprije napravljena na staklenoj ploči zato što dopušta demonstraciju spektakularnog efekta makroteksture. Otkriveno je da ista površina ne može biti stvorena niti na staklenim pločama. Nakon dodatnih neuspjelih pokušaja s čeličnim i drvenim elementima, utvrđeno je da plastične površine mogu dati relativno najbolje rješenje. To je razlog zašto su dobro poznate LEGO® kocke korištene za simulaciju neovisno o njihovim temeljnim razlikama s obzirom na stvarnu površinu cestovnog kolnika. Dostupne na tržištu, stalne kvalitete i otporne na vlagu LEGO® kocke omogućile su lako simuliranje površina betonskog kolnika različitih starosti. Slika 8. prikazuje simulaciju izglodane, "izlizane" i oštećene površine uslijed smrzavanja i odmrzavanja. Cilj simulacije bio je utvrditi utjecaj različitih površinskih uzoraka na SRT-vrijednosti površine (slika 9). Nakon što se dobiju potrebni pokazatelji, simetrični model može se lako transformirati na asimetrične površine koje su mnogo realističnije kolničkoj površini.



Slika 9. SRT - dijagram za različite udjele izglodanih, izlizanih i oštećenih površina uslijed ciklusa smrzavanja/odmrzavanja

Istrošenost betonskih kolničkih površina prirodni je fenomen koji treba uzeti u obzir u fazi projektiranja kolnika. Sanacija habajućeg sloja obično se izvodi zbog njegove loše makroteksture, međutim, ovaj zahvat "automatski" poboljšava i svojstva mikroteksture. Relevantan primjer za to je da brazde izazivaju dodatnu SRT-vrijednost što je prikazano na slici 5.

Predloženo je da bi probni kolnik trebao biti izgrađen na neprometnom mjestu bez ijednog ohrapavljenog uzorka površine. To može pomoći upraviteljima cesta da utvrde "početnu SRT-vrijednost" i stvarnu intervencijsku razinu otpornosti na klizanje. Vrijednosti intervencijskog stupnja makrohrapavosti određene sadašnjim Mađarskim tehničkim smjernicama za ceste [9] općenito se smatraju kao one određene za trenutak kada se cesta pušta u promet. Međutim, one vrijede za cijelo uporabno razdoblje kolnika, jer je upravitelj cesta dužan osigurati kontinuiranu uporabljivost habajućeg sloja. U isto vrijeme, određena vrijednost za mikrotekstuuru vrijedi isključivo za autoceste [9]; na taj način, čak i nulta SRT-vrijednost teoretski je prihvatljiva na glavnim i sporednim cestama u mađarskom nacionalnom sustavu autocesta.

Rezultati mjerenja su pokazali da nehabajući slojevi čak i apsolutno glatkom površinom mogu biti izvedeni s SRT-vrijednosti ispod 20. Široko prihvaćena metoda određivanja makroteksture površine kolnika s pijeskom nije prihvatljiva ispod 0,2 mm dubine teksture. Tada je potrebno primijeniti neke metode odljeva.

Na kraju se može i spomenuti donekle sličan američki model proračuna smanjenja otpornosti na klizanje asfaltne kolničke površine cesta u upotrebi, temeljen na laboratorijskim rezultatima ispitivanja primjenom uređaja za zaglađivanje agregata, karakteristikama granulometrijske krivulje agregata i prosječnog dnevnog prometa [21].

7. Zaključak

Nakon nedavnog "ponovnog uvođenja" betonskih kolnika u mađarski cestovni sustav, nekoliko istraživačkih radova je pokrenuto na tu temu. U jednom od radova ukratko su prikazani glavni rezultati istraživanja vezano za izvedbu betonskih kolnika s dugoročnim zadržavanjem povoljnih površinskih svojstava. Razvijen je algoritam za pojednostavljeni matematički opis promjene površine mikrotekture i makrotekture tijekom uporabnog razdoblja betonskih kolnika. U praktičnoj uporabi, ovaj algoritam

može pomoći upraviteljima cesta da utvrde relevantne intervencijske razine pomoću jednostavne, brze i učinkovite mjerne metode. Primjena algoritma omogućava predviđanje buduće potrebne intervencije poboljšanja stanja kolnika na temelju prometnog opterećenja i utjecaja okoliša. Osim toga, čimbenici koji utječu na promjenu površinskih karakteristika betonskih kolnika identificiraju se kroz ograničenu ulogu projektiranja mješavine i kvalitete izvedbe. Značenje geometrijskih parametara (poput zakrivljenosti) istaknuto je u slučaju ubrzanoga gubitka makrotekture na betonskoj kolničkoj površini kod kružnih raskrižja.

LITERATURA

- [1] Keleti, I., Boromisza, T., Gáspár, L., Karsai-Lukács, K., Kausay, T., Kovács, T., Liptay, A., Tászkai-Gáspár, T. & Vörös, Z.: Betonburkolatok, *Magyar Betonburkolat Egyesület*, 2012, 427 p. (In Hungarian)
- [2] PIARC Technical committee 7: *Cement Concrete Roads*, 1998, 49 p.
- [3] Gáspár, L., Karsai-Lukács, K.: Cement Concrete Pavements in the Hungarian Road Policy, *8th International Conference on Concrete Pavements*, San Francisco, Vol. 1, pp. 39–60, 2005.
- [4] Karsai-Lukács, K., Bors, T.: Betonburkolatú kísérleti útszakaszok építése és állapotmegfigyelése, *Betonújság*, 1 (2008), pp. 3–7. (In Hungarian)
- [5] Verhasselt, A.: Air-Training Agents in Road Concretes and Characterization of the Air Void System in the Fresh Concrete, *7th International Symposium on Concrete Roads*, Vienna, Session 1, 1994.
- [6] Eisenmann, J.: Bemessung und Konstruktion von Betonstrassen. Rückblick und Ausblick., *Strasse und Autobahn*, 12 (1996). (In German)
- [7] Goppel, J.M., Cools, P.M.: Scope of the Activities of the Joint Research Programme on Concrete Roads in the Netherlands, *7th International Symposium on Concrete Roads*, Vienna, Session 1, 1994.
- [8] MSZ 4798-1:2004 Concrete Part 1: Specification, performance, production, conformity, and rules of application of MSZ EN 206-1 (In Hungarian)
- [9] e-UT 06.03.31. (ÚT 2.3-201:2006) Beton pályaburkolatok építése. Építési előírások, követelmények, 49 p. (In Hungarian)
- [10] e-UT 06.03.35. (ÚT 2.3-213:2008) Hézagaiban vasalt, kétrétegű, mosott felületképzésű, betonburkolatú merev útpályaszerkezet építése, 19 p. (In Hungarian)
- [11] e-UT 05.02.54. (ÚT 2.3-210:2006) Pályalemezekből visszanyert beton újrafelhasználása, 10 p. (In Hungarian)
- [12] Ghafoori, N., Tays, M.W.: Abrasion Resistance of Early-Opening-to Traffic Portland Cement Concrete Pavements, *ASCE*, Vol 19, 11 (2007), pp. 925–935.
- [13] Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B., Panarese, W.C.: Design and Control of Concrete Mixtures, 14th Edition, *Portland Cement Association*, USA, 2003.
- [14] Gebler, S.H., Klieger, P.: Effect of Fly Ash on Some of the Physical Properties of Concrete, *Research and Development Bulletin*, Portland Cement Association, 1986. 48 p.
- [15] Bencze, Zs., Karsai-Lukács, K., Gáspár, L.: Hungarian concrete pavements in urban areas using the principles of lifetime engineering. *Central European Congress on Concrete Engineering. Concrete Structures in Urban Areas*, Wroclaw, 2013, pp. 110–113.
- [16] Gáspár, L., Bencze, Zs.: Experimental sections in the Hungarian road management. *3rd Inter-national Conference on Road and Railway Infrastructure*, Split, Croatia, 2014, pp. 183–188.
- [17] MSZ EN 13036-4 Utak és repülőterek felületi jellemzői – Vizsgálati módszerek 4. rész A felület csúszásellenállásának mérési módszere: ingás vizsgálat, 2012. (In Hungarian)
- [18] Wenzl, P.: Dauerhaftigkeit der Oberflächeneigenschaften von texturierten Verkehrsflächen aus Beton, *Technische Universität München*, 2008, 144 p. (In German)
- [19] Fwa, T.F., Choo, Y.S., Liu, Y.R.: Effect of Aggregate Spacing on Skid Resistance of Asphalt Pavement, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 129, 4 (2003), pp. 420–426, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2003\)129:4\(420\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2003)129:4(420))
- [20] Lee, Y.P.K., Fwa, T.F., Choo, Y.S.: Effect of pavement surface texture on British pendulum test, *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 6, 2005, pp. 1247–1257.
- [21] Wang, H., Liang, R.: Predicting Field Performance of Skid Resistance of Asphalt Concrete Pavements. *Pavement Materials, Structures and Performance*, 2014, pp. 296–305, <http://dx.doi.org/10.1061/9780784413418.030>