

Primljen / Received: 4.10.2014.
Ispravljen / Corrected: 29.12.2014.
Prihvaćen / Accepted: 2.1.2015.

Dostupno online / Available online: 10.4.2015.

Ocjena ponašanja trajnih savitljivih kolnika u raznim klimatskim uvjetima

Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Gholam Ali Shafabakhsh**, dipl.ing.građ.
Sveučilište Semnan, Iran
Građevinski fakultet
ghshafabakhsh@semnan.ac.ir



Mehdi Koohmishi, doktorand
Sveučilište u Teheranu, Iran
Građevinski fakultet
m_koohmishi@ut.ac.ir

Izvorni znanstveni rad

Gholam Ali Shafabakhsh, Mehdi Koohmishi

Ocjena ponašanja trajnih savitljivih kolnika u raznim klimatskim uvjetima

U radu je prikazano istraživanje svojstava trajnih savitljivih kolnika na vrlo prometnim izvangradskim cestama koje se nalaze u različitim klimatskim uvjetima. Kako bi se procijenilo ponašanje takvih konstrukcija, uspoređena su njihova ponašanja u nekoliko gradova u Iranu (Rašt, Teheran i Ahvaz). Dobiveno je da je primjena trajnih savitljivih kolnika dobra osobito za ceste s velikim prometnim opterećenjem. Ovi kolnici imaju znatno bolju otpornost na pukotine koje nastaju uslijed zamora u usporedbi s uobičajenim kolnicima.

Ključne riječi:

trajni savitljivi kolnik, asfaltbetonski kolnik, izvangradske ceste, klimatski uvjeti

Original scientific paper

Gholam Ali Shafabakhsh, Mehdi Koohmishi

Structural evaluation of perpetual flexible pavements for various climatic conditions

Properties of perpetual flexible pavements on heavily-trafficked rural roadways in different climatic conditions are analysed in the paper. In order to evaluate performance of such pavements, their behaviour is compared in several towns in Iran (Rasht, Tehran, and Ahvaz). It was established that the use of perpetual pavements is appropriate, especially for high-traffic-volume roadways. Perpetual flexible pavements exhibit much better resistance to fatigue cracking when compared to conventional pavements.

Key words:

perpetual flexible pavement, asphalt concrete pavement, rural roads, climatic conditions

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Gholam Ali Shafabakhsh, Mehdi Koohmishi

Strukturelle Bewertung dauerhafter flexibler Fahrbahnen bei verschiedenen Klimabedingungen

In dieser Arbeit sind Untersuchungen der Eigenschaften dauerhafter flexibler Fahrbahnen auf verkehrsbelasteten Landstraßen unter verschiedenen klimatischen Bedingungen dargestellt. Um die Antwort solcher Konstruktionen einzuschätzen, wird ihr Verhalten in mehreren Städten Irans (Rašt, Teheran und Ahvaz) verglichen. Die Resultate zeigen, dass die Anwendung dauerhafter flexibler Fahrbahnen insbesondere für Straßen mit starker Verkehrsbelastung geeignet ist. Im Vergleich zu herkömmlichen Fahrbahnen sind dauerhafte flexible Fahrbahnen beständiger gegen Risse, die aufgrund von Müdigkeit auftreten.

Schlüsselwörter:

dauerhafte flexible Fahrbahn, Asphaltbetonbelag, Landstraßen, klimatische Bedingungen

1. Uvod

Trajni kolnik (eng. *Perpetual pavement - PP*) jest kolnik dugog projektiranog uporabnog vijeka od 50 i više godina, koji ne zahtijeva veće rekonstrukcije ili obnovu svojih dijelova u tom razdoblju, već samo periodičnu obnovu habajućeg sloja. Trajni kolnik može biti savitljiv ili može biti krut s asfaltbetonskim zastorom. Pojam trajnog savitljivog kolnika (koji se razmatra u ovom istraživanju) nije novost jer se kolničke konstrukcije u slojevima, visoke čvrstoće, grade još od 1960-ih godina [1]. Glavna prednost njegove primjene jest činjenica da je ukupni presjek kolnika tanji od kolnika s debljim nosivim slojevima od zrnatog materijala. Trajni kolnik je također prikladan za vrlo prometne i pristupne ceste u zračnim lukama, gdje nije poželjno djelomično ili u cijelosti zatvoriti prometnicu zbog radova na održavanju [2]. Trajna savitljiva kolnička konstrukcija obično se sastoji od tri sloja asfaltne mješavine proizvedene po vrućem postupku. To su habajući sloj, međusloj i nosivi HMA sloj (eng. *Hot mix asphalt - HMA*).

Obnovljivi habajući sloj mora imati otpornost na kolotražnje, pukotine u površinskom sloju, na hvatljivost pneumatika vozila na mokrom kolniku i buku koju uzrokuju automobilske gume. Stoga je najefikasniji materijal za ovaj sloj split mastiks asfalt (eng. *Stone mastic asphalt - SMA*). Preko toga sloja prikladno je postaviti tankoslojnu asfaltnu prevlaku [3]. Ipak, neka funkcionalna svojstva poput hvatljivosti zahtijevaju ispitivanje površinskog sloja i popravke u određenim vremenskim intervalima. Taj površinski sloj je debljine između 40 i 75 mm i ima projektirani uporabni vijek od 8 do 14 godina [1].

Međusloj mora biti stabilan i trajan kako bi se postigla otpornost na kolotražnje i na zamor. Visoka temperatura asfalta u međusloju trebala bi biti ista kao na habajućem dijelu da bi se spriječila pojava kolotruga. Međutim, vrijednost niske temperature može se smanjiti za jedan stupanj jer temperaturni gradijent u asfaltu ima relativno vertikalnu raspodjelu te niža temperatura u tom sloju neće prouzročiti ozbiljnije probleme, kao što je slučaj za habajući površinski sloj. Debljina ovog sloja je između 100 i 175 mm [3].

U nosivom HMA sloju se mora ispuniti zahtjev otpornosti na zamor te preventivske mjere na pojavu pukotina koje se šire od dna prema vrhu. Za veću čvrstoću ovih slojeva na pojavu pukotina uslijed zamora, udio asfaltne veziva u asfaltnoj mješavini može se povećati za 1 % [3]. Osim toga, povećanje ukupne debljine kolnika ima bitnu ulogu u smanjenju vlačnih naprezanja u donjim asfaltnim slojevima i time se osigurava veći vijek trajanja do zamora asfaltbetona koji se koristi za HMA nosivi sloj [4].

2. Projektiranje trajnih kolnika

Cilj je projektiranja trajnih kolnika smanjiti naprezanja, deformacije ili pomake smanjenjem opterećenja na onu razinu koja ne uzrokuje oštećenje konstrukcije, [5]. Drugim riječima, cilj projektiranja trajnog kolnika jest taj da se oštećenja ograniče

na pukotine koje se šire od površine prema dnu u gornjem asfaltnom sloju, a niži nosivi HMA slojevi su projektirani da budu otporniji na pukotine koje nastaju uslijed zamora i na trajne deformacije prema kriterijima [6, 7].

2.1. Kriterij pojave kolotruga

Prema ovom kriteriju, cilj je ograničiti vertikalne tlačne deformacije na gornjem dijelu posteljice. Maksimalna deformacija iznosi 200 $\mu\epsilon$ [5].

2.2. Kriterij za mrežaste pukotine nastale uslijed zamora

Da bi se povećala čvrstoća kolnika na pukotine koje nastaju uslijed zamora, treba smanjiti vlačne deformacije na dnu asfaltbetonskog sloja, a na taj će se način produžiti uporabljivost savitljivog kolnika. Na temelju Schaperyjevog temeljnog zakona mehanike loma razvijena je hipoteza o kohezivnoj pukotini uslijed zamora od cikličnog opterećenja da bi se odredila stopa širenja pukotina po ciklusu opterećenja. Ovaj odnos može se prikazati jednadžbom (1):

$$\frac{dc}{dN} = A \left[\frac{\partial W_R / \partial N}{\partial csa / \partial N} \right]^n - \frac{dh}{dN} \quad (1)$$

gdje je, prema [8]:

$\frac{dc}{dN}$ - stopa širenja pukotina po ciklusu opterećenja

W_R - stopa energije raspršene uslijed oštećenja

$\frac{dh}{dN}$ - ojačanje pukotina po ciklusu opterećenja

N - ciklus opterećenja

A, n - konstantni koeficijenti

csa - površina pukotine.

U navedenoj jednadžbi, stopa promjene disipirane energije tijekom promjenjivih cikličnih opterećenja novi je parametar koji se primjenjuje za određivanje oštećenja u asfaltbetonu [9]. Razmatra se i utjecaj ojačanja na širenje pukotina u asfaltbetonu. Pri uobičajenim i srednjim razinama deformacije, iznos energije ojačanja je zanemariv u usporedbi s energijom koja se oslobađa pri pojavi pukotina, ali pri manjim deformacijama, energije su iste, stoga se uporabni vijek do zamora materijala, ili broj ponovljenih opterećenja uslijed kojeg se postiže 50 postotna krutost asfaltbetonske mješavine od svoje početne vrijednosti, znatno povećava, [10].

Prema ovom konceptu, definirana je granica izdržljivosti za asfaltbetonske mješavine, a neka su istraživanja pokazala da se, ako se kao granica izdržljivosti uzme vrijednost od 70 $\mu\epsilon$, može značajno produljiti uporabni vijek do pojave zamora

[10]. Međutim, japanski istraživači su predložili da se granična vrijednost vlačnih deformacija na dnu asfaltbetonskog sloja poveća na $150 \mu\epsilon$ [11]. U trajnom kolniku, zbog debljih asfaltbetonskih slojeva, iznos nastalih deformacija na dnu asfaltbetonskog sloja je nizak i zbog toga se značajno povećava uporabni vijek savitljivog kolnika na zamor uslijed kojeg se pojavljuju pukotine.

2.3. Utjecaji pukotina uslijed zamora koje se šire od vrha prema dnu na svojstva trajnog kolnika

Kao što je navedeno, pri projektiranju trajnog kolnika uzeti su u obzir kolotražnje i pukotine uslijed zamora. Oštećenjima poput pojave pukotina zbog zamora sa širenjem pukotina od vrha prema dnu u zadnje se vrijeme pridaje veća pažnja, a posebno u savitljivim kolnicima veće debljine, [12].

Prema modelu viskoelastoplastičnog kontinuiranog oštećenja (eng. *viscoelastoplastic continuum damage - VEPCD*), koji su razvili Kim i Underwood, [13], pokazano je da pukotine nastale u punom presjeku asfaltbetonskog sloja mogu utjecati na svojstva trajnog kolnika. Dakle, pri određivanju uporabnog vijeka do zamora materijala u trajnom kolniku, nije dovoljno uzeti u obzir vrijednosti vlačnih deformacija na dnu asfaltbetonskog sloja. Iz tog se razloga za procjenu svojstava trajnog kolnika uzimaju u obzir pukotine uslijed zamora sa širenjem od vrha prema dolje. Procjena trajnog kolnika i usporedba s konvencionalnim kolnicima napravljena je u prethodnim ispitivanjima. Primjerice, Amini i suradnici, [14], usporedili su troškove tijekom uporabljivosti (eng. *life cycle cost - LCC*) izvangradskih cesta s konvencionalnim i s trajnim kolnicima u različitim prometnim i klimatskim uvjetima u Iranu. Rezultati ispitivanja su pokazali da se trajnom kolničkom konstrukcijom mogu smanjiti troškovi tijekom uporabljivosti kolnika za 4 do 20 %. Također, procjena trajnih kolnika na dijelu autoceste Interstate Highway 287 u New Jerseyu je pokazala da, ako je konstrukcija kolnika u dobrom stanju, postavljanje tankog nadsloja pomoću polimerom modificiranih veziva u nosivom HMA sloju može održati kolnik u izvrsnom uporabnom stanju [15].

Uzimajući u obzir navedena objašnjenja, trajni savitljivi kolnik je dobro rješenje, osobito za vrlo prometne ceste. Dakle, cilj je ovog istraživanja istražiti utjecaj primjene trajnog savitljivog kolnika na produženje uporabljivosti kolničke konstrukcije i smanjenje oštećenja kolnika kod izvangradskih cesta s velikim prometnim opterećenjem, uzimajući u obzir različite klimatske uvjete. Za ovo istraživanje su odabrane vrlo prometne izvangradске ceste kako bi se ispitala konstrukcija trajnih kolnika, jer su osovinska opterećenja na takvim cestama veća nego na drugim prometnicama i nije poželjno djelomično ili potpuno zatvoriti takvu prometnicu zbog radova na održavanju.

3. Metodologija

Za procjenu svojstava trajnog kolnika za vrlo prometne izvangradске ceste uzeti su u obzir klimatski uvjeti u tri

grada u Iranu (Teheran, Ahvaz i Rašt) s različitim godišnjim srednjim temperaturama zraka i količinama padalina. Primijenjen je računalni program MEPDG (eng. *Mechanistic empirical pavement design guide - MEPDG*) koji procjenjuje oštećenja koja nastaju u trajnim i u konvencionalnim kolnicima tijekom njihovog projektiranog vijeka trajanja s obzirom na klimatske i prometne uvjete. Računalni program MEPDG je razvijen u okviru Nacionalnih kooperativnih projekata za istraživanje autoceste 1-37A i 1-40D (eng. *National Cooperative Highway Research Projects*), a koristi slojeviti elastični model i usklađuje ga sa smjernicama za projektiranje kolnika AASHTO (eng. *American Association of State Highway Transportation Officials - AASHTO*) kako bi se predvidjela oštećenja u kolniku [16].

U ovom istraživanju primijenjena je verzija 1.1 tog programa (datum objave: kolovoz 2009.). Glavni kriterij za usporedbu trajnog kolnika s konvencionalnim savitljivim kolnikom su pukotine uslijed zamora, međunarodni indeks ravnosti (IRI) i kolotražnje, a mogu se proračunati u MEPDG programu. Dobiveni rezultati su uspoređeni s rezultatima iz programa KENLAYER, koji je razvio Huang [17]. Računalni program KENLAYER se može primijeniti na slojevite sustave koji su opterećeni vozilima s jednostrukom, dvostrukom ili trostrukom osovino, gdje svaki sloj ima drugačija svojstva, linearno elastična, nelinearno elastična ili viskoelastična.

U navedenom se računalnom programu prvi odgovarajući presjeci trajnih i konvencionalnih kolnika odabiru na temelju proračunanog prometnog opterećenja i uvjeta tla posteljice. U idućem koraku, zadana oštećenja u trajnom kolniku i konvencionalnom savitljivom kolniku promatraju se tijekom projektirane uporabljivosti pod utjecajem prometnog opterećenja modeliranjem svojstava presjeka kolnika. Konačno, program KENLAYER je primijenjen kako bi se dobila bolja procjena svojstava konstrukcije trajnog kolnika.

4. Karakteristike slojeva kolničke konstrukcije

Svojstva asfaltbetonske mješavine koja je primijenjena u srednjem sloju trajnog kolnika te na površinskom sloju konvencionalnog kolnika prikazana su u tablici 1., prema rezultatima koje su dobili Rodezno i Kaloush, [18]. Bitumensko vezivo u promatranoj mješavini je PG 58-22, stupanj penetracije bitumena iznosi 60, a udio šupljina u nosivom HMA sloju 6 %. Svojstva asfaltne mješavine su ista kao u konvencionalnoj asfaltnoj mješavini koja se koristi u Iranu, poput asfaltne mješavine proizvedene po vrućem postupku (eng. *Hot mix asphalt*) koja se promatra u ovom istraživanju. Svojstva mješavine za nosivi HMA sloj su ista kao u tablici 1., osim što je količina optimalnog udjela bitumena povećana za 1 %. Tablica 2. pokazuje svojstva projektirane mješavine za splitmastičsasfalt (SMA) koja je korištena za habajući sloj trajnog kolnika, prema Laneu i suradnicima [19]. Osim toga, u ovom istraživanju se razmatraju dvije vrste tla posteljice: tlo A-2-4 sa CBR 20 i tlo A-6 sa CBR 5, [20].

Tablica 1. Projektirana svojstva dobro graduirane asfaltne mješavine [18]

Karakteristike	Vrijednost
Razina unosa	Razina 1
Vrsta bitumenskog veziva	PG 58-22
Specifična težina bitumenskog veziva	1,04
Penetracija asfalta na temp. 25°C [0,1 mm]	60
Apsolutna viskoznost [Poise (Pa s)]	6000
Optimalni udio bitumenskog veziva [%]	5,1
Efektivni udio bitumenskog veziva [%]	4,6
Udio šupljina u asfaltnoj mješavini [%]	6

Tablica 2. Projektirana svojstva mješavine SMA asfalta [19]

Karakteristike	Vrijednost
Razina unosa	Razina 3
Vrsta bitumenskog veziva	PG 58-22
Efektivni udio bitumenskog veziva [%]	6
Udio šupljina u asfaltnoj mješavini [%]	4
Kumulativni zadržani udio u otvoru sita 9,5 mm [%]	26
Kumulativni zadržani udio u otvoru sita #4 [%]	74
Prolaznost kroz otvor sita #200 [%]	9

Granulometrijski sastav materijala nosivih i veznih slojeva prema propisima ASTM D1241-07 [21] prikazan je u tablici 3., a tip I i granulometrijski sastav B je određen za nosive i vezne slojeve. Vrijednosti CBR nosivog i veznog sloja iznose 80 i 30, a to su minimalne dopuštene vrijednosti [22]. Analiza ADT kriterija klasifikacije za vrlo prometne izvangradske i gradske ceste s velikim prometnim opterećenjem rezultirala je definicijom vrlo prometnih izvangradskih cesta, koja

pokazuje da minimalna količina prosječnog dnevnog prometa na godišnjoj razini, AADT (eng. *Average annual daily traffic - AADT*), iznosi 5000 vozila po danu za izvangradske ceste s velikim prometnim opterećenjem [23]. Budući da se u istraživanju proučavaju ceste s velikim prometnim opterećenjem, vrijednost prosječnog dnevnog prometa na godišnjoj razini je povećana na 10 000 vozila po danu, a prosječni dnevni promet kamiona na godišnjoj razini (eng. *Average annual daily track traffic - AADTT*) u projektiranju je uzet kao 1000 AADTT, pod pretpostavkom da se 10 % vozila odnosi na kamione, a stupanj povećanja prometa iznosi 4 %.

Tablica 3. Granulometrijski sastav nosivih i veznih slojeva od zrnatog materijala [21]

Otvor sita [mm]	Postotak prolazaka kroz sito	
	Nosivi sloj - tip I (granulometrijski sastav B)	Vezni sloj - tip I (granulometrijski sastav B)
50	100	100
37,5	---	---
25	85	85
19	---	---
9,5	57,5	57,5
4,75	45	45
2	32,5	32,5
0,425	22,5	22,5
0,075	5	8,5

Vrste vozila grupe 1 prikazane su u tablici 4., [24]. Ta tablica pokazuje raspodjelu količine prosječnog dnevnog prometa AADTT po vrsti vozila. Klimatski uvjeti gradova Ahvaza, Teherana i Rašta uneseni su u računalni program MEPDG oblikovanjem datoteka klimatskog modela (ICM). Klimatski

Tablica 4. Raspodjela prosječnog godišnjeg dnevnog prometa kamiona po klasifikaciji vozila (grupa 1) [24]

Vrsta vozila	Autobus	dvije osovine SU ₁	tri osovine SU	4 ili više osovina SU	4 ili manje osovina ST ₂	5 osovina ST	6 ili više osovina ST	5 ili manje osovina MT ₃	6 osovina MT	7 ili više osovina MT
Raspodjela AADTT [%]	1,3	8,5	2,8	0,3	7,6	74	1,2	3,4	0,6	0,3

SU - bez prikolice (eng. single unit - SU); ST - s prikolicom (eng. single trailer - ST); MT - s više prikolica (eng. multi trailer - MT)
AADTT - prosječni godišnji dnevni promet kamiona

Tablica 5. Karakteristike klimatskih uvjeta u promatranim gradovima [27]

Klimatska svojstva	Teheran	Ahvaz	Rašt
Promatrani period [godina]	1982.-2005.	1982.-2005.	1982.-2005.
Prosječna godišnja temperatura zraka [°C]	17,9	25,8	16,3
Prosječna godišnja količina oborina [mm]	246,4	241,8	1378,2
Indeks smrzavanja [°C/dan]	10	0	0,5
Prosječni godišnji broj ciklusa smrzavanja i odmrzavanja	2	0	0

satni podaci temperature, količine oborina, brzine vjeta, postotak sunčane svjetlosti i relativna vlažnost ključni su za oblikovanje ICM datoteka [25]. Upotrijebljeni su meteorološki podaci u prethodnom dvadesetogodišnjem periodu (1982. - 2002.) iz Iranske meteorološke organizacije (IMO) [26, 27]. Karakteristike klimatskih uvjeta u promatranim iranskim gradovima prikazane su u tablici 5. Teheran i Ahvaz imaju otprilike iste prosječne godišnje količine oborina. Teheran i Rašt imaju manje razlike u prosječnim godišnjim temperaturama.

5. Rezultati

5.1. Odabir odgovarajućeg poprečnog presjeka trajnog i konvencionalnog kolnika

Prvi korak za usporedbu dvaju modela kolnika (trajnog i konvencionalnog) bilo je određivanje odgovarajućih poprečnih presjeka trajnog i konvencionalnog kolnika na osnovi prometnog opterećenja i uvjeta tla posteljice. Početne debljine za slojeve

trajnog kolnika su određene prema Nunu i Fernu (2001.), a debljine konvencionalnog savitljivog kolnika koje su dobivene analizom u računalnom programu MEPDG pokazuju da nije potrebno postavljati nadstoj u razdoblju od 10 godina nakon izgradnje ceste. Tablica 6. prikazuje konačne debljine dobivene analizom u računalnom programu MEPDG za konvencionalni asfaltbetonski kolnik i trajni kolnik. U ovoj tablici prikazani su tanji presjeci kada je primijenjena posteljica A-2-2-4, a deblji slojevi su primijenjeni za tlo posteljice A-6.

Kako bi se ispitalo ponašaju li se promatrani presjeci kao trajni kolnik, rezultati dobiveni u MEPDG-u uspoređeni su u tablici 7. U tim presjecima, tijekom 50 godina zabilježeno je manje od 1 % pukotina uslijed zamora sa širenjem od dna prema vrhu. Također, trajna deformacija ukupnih nosivih slojeva, bez habajućeg sloja koji je podvrgnut postavljanju nadstoja, iznosi manje od 10 mm. Prema promatranim svojstvima kolničkih slojeva i izlaznim podacima dobivenima iz programa MEPDG, označeni poprečni presjeci za dugotrajne i za konvencionalne kolnike su prikladni za ceste u zadanim klimatskim i prometnim uvjetima.

Tablica 6. Promatrani presjeci konvencionalnog i trajnog savitljivog kolnika

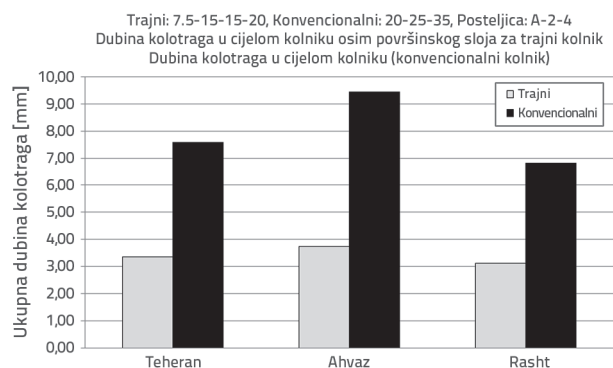
Trajni kolnik						
Br.	Debljina slojeva [mm]				Skraćena oznaka za svaki presjek	Početni AADTT promet u dva smjera
	Obnovljivi habajući sloj	Međusloj	Nosivi HMA sloj	Nosivi sloj		
1	75	150	150	200	PP-7.5-15-15-20	2000
2	75	200	150	300	PP-7.5-20-15-30	2000
Konvencionalni savitljivi kolnik						
Br.	Asfaltbetonski sloj	Nosivi sloj od zrnatog materijala	Vezni sloj od zrnatog materijala	Skraćena oznaka za svaki presjek		Početni AADTT promet u dva smjera
3	200	250	350	CP-20-25-35		2000
4	200	300	400	CP-20-30-40		2000

Tablica 7. Rezultati analize iz računalnog programa MEPDG za trajne kolnike u gradu Teheranu

Karakteristike	Tlo posteljice : A-2-4		Tlo posteljice: A-6	
	PP-7,5-15-15-20		PP-7,5-20-15-30	
	10 godina	50 godina	10 godina	50 godina
Konačni IRI [m/km]	1,45	2,87	1,49	3,14
Pukotine u asfaltbetonu uslijed zamora [%]	0,0135	0,186	0,0055	0,0748
Trajna deformacija (cijeli kolnik) [mm]	5,87	12,57	6,73	14,15
Trajna deformacija (samo asfaltbeton) [mm]	2,72	8,43	2,84	8,79
Trajna deformacija (cijeli kolnik bez površinskog sloja) [mm]	3,35	4,80	4,09	6,06
Trajna deformacija (asfaltbeton bez površinskog sloja) [mm]	0,20	0,66	0,21	0,71

5.2. Usporedba svojstava trajnog i konvencionalnog kolnika

Usporedbu svojstava trajnog i konvencionalnog kolnika moguće je dobiti na osnovi rezultata iz programa MEPDG. Na slici 1. su prikazani rezultati iz programa MEPDG, s usporedbom trajnog i konvencionalnog savitljivog kolnika na kolotražnje u svim kolničkim slojevima za tlo posteljice A-2-4. Prema toj slici, dubina kolotruga u svim kolničkim slojevima u klimatskim uvjetima u Ahvazu je veća nego u Teheranu i Raštu. Zbog veće količine oborina u Raštu, može se očekivati veća trajna deformacija u slojevima od zrnatog materijala, ali zbog veće debljine asfaltnih slojeva, utjecaji srednje godišnje temperature zraka (eng. *mean annual air temperature - MAAT*) veći je nego utjecaj količine oborina. Također, iznos kolotražnja u cijelom trajnom kolniku (osim habajućeg sloja) jednak je približno polovini ukupne dubine kolotruga u konvencionalnom kolniku 10 godina nakon izgradnje konstrukcije.

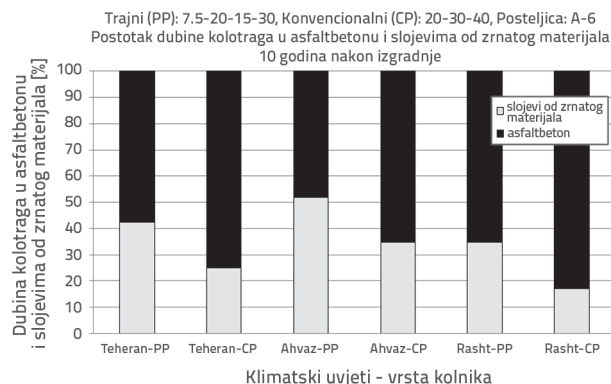


Slika 1. Usporedba dubine kolotruga u čitavom kolniku 10 godina nakon izgradnje na trajnom i na konvencionalnom kolniku (klimatski uvjeti za pojedini grad dani su u tablici 5.)

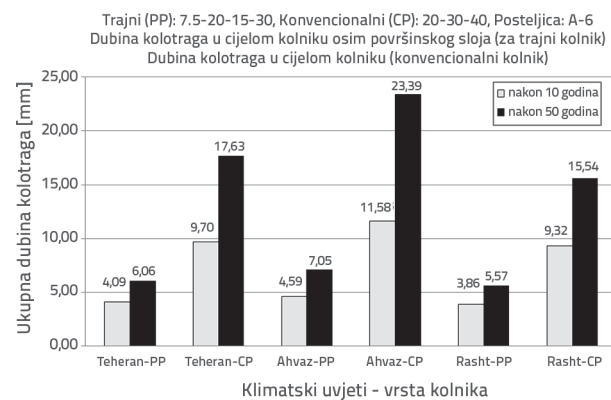
Slika 2. prikazuje postotak ukupnog kolotražnja kolnika u asfaltbetonskim i zrnatim slojevima trajnih i konvencionalnih kolnika za postelnicu A-6. Kao što je prikazano na slici, iznos kolotražnja u asfaltnim slojevima trajnog kolnika je veći nego u konvencionalnom kolniku zbog većih debljina asfaltnih slojeva u trajnom kolniku nego u konvencionalnom. Osim toga, u klimatskim uvjetima u kojima se nalazi Ahvaz, više od 50 % trajnih deformacija se dogodi u asfaltbetonskim slojevima trajnog kolnika. Ipak, primjenom asfaltbetonske mješavine koja je prikladna za toplije klimatske uvjete može se smanjiti kolotražnje u asfaltbetonskim slojevima trajnog kolnika. Slika 2. također prikazuje da je postotak kolotražnja u slojevima od zrnatog materijala na cestama u Raštu veći nego u Teheranu i Ahvazu. Glavni razlozi veće količine dubljih kolotruga u slojevima od zrnatog materijala za klimatske uvjete Rašta jesu ti što se odabrani presjek nalazi na slabijem tlu, kao što je primjerice tlo posteljice A-6, a srednja godišnja količina oborina u Raštu je veća nego u ostalim gradovima.

Kako bi se procijenila svojstva trajnih i konvencionalnih kolnika konstruiranih na tlu slabije nosivosti (A-6) protiv

pojave kolotruga pri projektiranju na dugi i kratki vijek trajanja, napravljen je prikaz na slici 3. Ta slika prikazuje iznos kolotražnja u trajnim kolnicima (osim habajućeg površinskog sloja) te iznos kolotražnja u konvencionalnim kolnicima 10 i 50 godina nakon izgradnje konstrukcije. Prema toj slici, iznos kolotražnja u konvencionalnom kolniku je znatno veći nego u trajnom kolniku nakon 50 godina od izgradnje konstrukcije (približno 3 puta veće). Osim toga, iznos kolotražnja u trajnom kolniku je manji od 10 mm, ali se može vidjeti primjerice za klimatske uvjete grada Ahvaza, dubina kolotruga u konvencionalnom kolniku se povećala sa 11,58 (10 godina nakon izgradnje) na 23,39 mm (nakon 50 godina uporabe kolnika). Na slici 3. su utjecaji klimatskih uvjeta jednaki kao na slici 1.

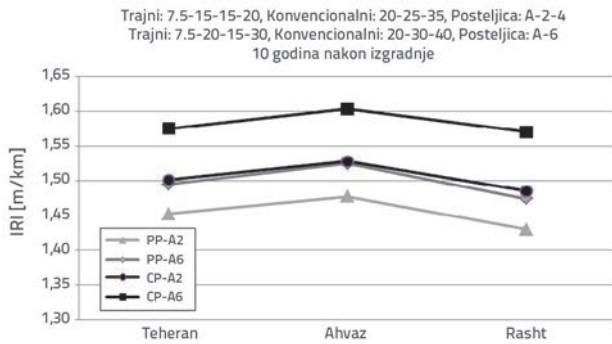


Slika 2. Usporedba postotka dubine kolotruga u asfaltbetonu i slojevima od zrnatog materijala 10 godina nakon izgradnje na trajnom i na konvencionalnom kolniku



Slika 3. Usporedba dubine kolotruga u čitavom kolniku 10 i 50 godina nakon izgradnje za trajne i konvencionalne kolnike

Slika 4. prikazuje usporedbu iznosa međunarodnog indeksa ravnosti (IRI) na površini kolnika 10 godina nakon izgradnje za trajni i konvencionalni kolnik. Uzimajući u obzir iste debljine kolničkih slojeva, pokazalo se da je iznos indeksa IRI nakon 10 godina uporabe veći za konvencionalni kolnik. Također, iznos indeksa IRI je veći u Ahvazu nego u Teheranu zbog veće srednje godišnje temperature zraka u Ahvazu, a zbog klimatskih uvjeta, indeks IRI je veći u Teheranu nego u Raštu iako je srednja količina oborina u Raštu veća.



Slika 4. Usporedba indeksa IRI na kolničkoj površini trajnih i konvencionalnih kolnika 10 godina nakon izgradnje (klimatski uvjeti za pojedini grad dani su u tablici 5.)

Glavni razlog je taj što su debljine dobivene za dugotrajne i konvencionalne kolničke slojeve značajne, stoga je utjecaj velikih oborina na smanjenje modula elastičnosti slojeva od zrnatih materijala beznačajan. Osim toga, debljina nosivih slojeva u presjeku trajnog kolnika iznosi 375 mm, a debljina asfaltbetonskih slojeva u konvencionalnom kolniku iznosi 200 mm. Dakle, obje vrste kolnika imaju debele asfaltbetonske slojeve, pa je utjecaj temperature značajniji od utjecaja oborina. Treba napomenuti da međunarodni indeks ravnosti (IRI) izračunan u programu MEPDG sadrži sve vrste oštećenja, kao što je prikazano u izrazu (2):

$$IRI = IRI_0 + \alpha SF + \beta (FC_{Total}) + \eta (TC) + \gamma (RD) \quad (2)$$

gdje je, prema [28]:

- IRI₀ - početni međunarodni indeks ravnosti IRI 6 mjeseci nakon izgradnje konstrukcije
- SF - faktor terena povezan s uporabnim vijekom kolnika, prosječnom godišnjom količinom oborina i indeksom smrzavanja
- FC_{Total} - ukupna površina pukotina nastalih uslijed zamora, postotak kolotruga, [%]
- TC - ukupna dužina poprečnih pukotina, [m/km]
- RD - prosječna dubina kolotruga, [mm]
- α, β, η, γ - konstantni koeficijenti.

Dakle, međunarodni indeks ravnosti IRI prikladan je parametar za usporedbu svojstava trajnih i konvencionalnih kolnika u različitim klimatskim uvjetima.

U tablici 8. su uspoređene ukupne količine pukotina trajnog i konvencionalnog kolnika uslijed zamora u razdoblju 10 i 50 godina nakon izgradnje, za klimatske uvjete u kojima se nalaze Teheran, Ahvaz i Rašt, kako bi se ocijenila otpornost tih dvaju tipova kolnika na pukotine uslijed zamora materijala. U tablici 8. prikazane su ukupne pukotine uslijed zamora uključujući pukotine od dna prema vrhu (mrežaste) i pukotine koje se šire od vrha prema dnu (uzdužne). Svojstva trajnog kolnika u različitim klimatskim uvjetima bolja su nego svojstva konvencionalnog kolnika s obzirom na pojavu zamornih pukotina. Prema toj tablici, kod konvencionalnog kolnika bit će potrebno ugraditi nadstroj nakon 10 godina jer će količina pukotina uzrokovana zamorom biti veća od 1 %, dok će količina pukotina u trajnom kolniku biti zanemariva. Von Quintus, [29], je zaključio da će do otkazivanja nosivosti kolnika doći kada pukotine uslijed zamora zahvate 20 % površine kolnika. Dakle, ne uzimajući u obzir radove na održavanju i obnovi konvencionalnog kolnika, do otkazivanja nosivosti konstrukcije kolnika doći će pri uporabnom razdoblju manjem od 50 godina.

5.3. Usporedba rezultata dobivenih u računalnim programima MEPDG i KENLAYER

Predviđeno oštećenje trajnog kolnika dobiveno u programu KENLAYER prikazano je u tablici 9. kako bi se moglo usporediti s rezultatima dobivenima u MEPDG. U programu KENLAYER, analiza oštećenja je provedena na osnovi dvaju kriterija: pukotine uslijed zamora na temelju vlačnih deformacija na dnu asfaltnog sloja i trajna deformacija koja nastaje zbog tlačnih deformacija na površini podloge. Stoga je svaka godina podijeljena na četiri perioda i modula koji se izračunavaju u MEPDG-u za svaki period, a svaki sloj trajnog kolnika je ulazni podatak za program KENLAYER za različite periode i slojeve. Za modeliranje utjecaja različitih uvjeta opterećenja, u programu KENLAYER promatrano je 11 vrsta opterećenja kako bi se ocijenio utjecaj vozila s jednostrukim, dvostrukim ili trostrukim osovinama. Kao što se može vidjeti u tablici 9., ova vrsta kolnika ima projektiranu uporabljivost veću od 50 godina tijekom koje nema oštećenja konstrukcije. Rezultati dobiveni u programu KENLAYER isti su kao rezultati dobiveni u programu MEPDG, primjerice: najbolja svojstva trajnog kolnika su pri klimatskim uvjetima u gradu Raštu, a najlošija svojstva su utvrđena u Ahvazu. Međutim, primjena asfaltnog bitumenskog veziva veće konzistencije u toplijim klimatskim uvjetima može poboljšati svojstva trajnog kolnika u takvom klimatskom području.

Tablica 8. Pukotine uslijed zamora (mrežaste i uzdužne) u asfaltnim slojevima konvencionalnih i trajnih kolnika 10 i 50 godina nakon izgradnje

Vrsta kolnika	Teheran		Ahvaz		Rašt	
	Udio pukotina uslijed zamora [%] – tlo posteljice: A-2-4					
	Oznaka za trajni kolnik: 7,5-15-15-20, Oznaka za konvencionalni kolnik: 20-25-35					
	10 godina	50 godina	10 godina	50 godina	10 godina	50 godina
Konvencionalni kolnik	1,66	45,27	3,65	85,98	1,24	30,41
Trajni kolnik	0,014	0,186	0,021	0,293	0,011	0,148

Tablica 9. Predviđena oštećenja u trajnom kolniku dobivena pomoću programa KENLAYER

Vrsta oštećenja	Teheran		Ahvaz		Rašt	
	Stopa oštećenja	Projektirana uporabljivost [god]	Stopa oštećenja	Projektirana uporabljivost [god]	Stopa oštećenja	Projektirana uporabljivost [god]
Vlačne deformacije na dnu posteljice	0,0172	58,1	0,0265	37,6	0,0138	72,1
Tlačne deformacije na gornjem dijelu veznog sloja	0,0056		0,0124		0,0029	

6. Zaključak

Glavni cilj ovog istraživanja bila je procjena i usporedba trajnog i konvencionalnog savitljivog kolnika te procjena primjene trajnih kolnika umjesto konvencionalnih savitljivih kolnika na izvangradskim cestama velikog prometnog opterećenja u različitim klimatskim uvjetima triju gradova u Iranu. U tu svrhu primijenjen je program MEPDG. Rezultati dobiveni proračunom u ovom programu uspoređeni su s rezultatima dobivenima u programu KENLAYER za pojedine slučajeve. Prema ovom istraživanju doneseni su sljedeći zaključci:

- Iznos kolotraženja u slojevima kolnika, osim u površinskom habajućem sloju, i pojava pukotina uslijed zamora u slojevima

trajnog kolnika su zanemarive u odnosu na konvencionalne kolnike veće debljine.

- Zbog veće debljine asfaltnih slojeva u trajnim kolnicima, srednja godišnja temperatura zraka može imati veći utjecaj na njihova svojstva nego srednja godišnja količina oborina za pojedinu regiju.
- Kada je trajni kolnik izgrađen na posteljici slabije nosivosti, na njegova svojstva može imati veći utjecaj srednja godišnja količina oborina.

Ukratko, trajni kolnik u različitim klimatskim uvjetima može dulji period odolijevati utjecaju različitih klimatskih uvjeta bez značajnijih oštećenja konstrukcije.

LITERATURA

- [1] APA 2002. Perpetual pavements: Synthesis, Asphalt Pavement Alliance, *National Asphalt Pavement Association*, APA 101, Lanham, Maryland, 2002.
- [2] Sidess, A., Uzan, J.: A design method of perpetual flexible pavement in Israel, *International Journal of Pavement Engineering*, 10 (2009) 4, pp. 241-249.
- [3] Newcomb, D., Buncher, M., Huddleston, I.: Concepts of perpetual pavements, Transportation Research Board, Circular No. 503, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 4-11, 2001.
- [4] APA 2010. Perpetual asphalt pavements: A synthesis, Asphalt Pavement Alliance, IM-40, <http://www.asphaltroads.org>, 2010.
- [5] Nunn, M., Ferne, B.: Design and assessment of long-life flexible pavements, Transportation Research Board, Circular No. 503, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 32-49, 2001.
- [6] Thompson, M., Carpenter, S.: Considering hot-mix asphalt fatigue endurance limit in full-depth mechanistic-empirical pavement design, *International Conference on Perpetual Pavement (ICPP)*, Columbus, Ohio, 2006.
- [7] Newcomb, D., Hansen, K.: Mix type selection for perpetual pavements, *International Conference on Perpetual Pavements (ICPP)*, Columbus, Ohio, 2006.
- [8] Kim, Y.: *Modeling of Asphalt Concrete*, American Society of Civil Engineers, ASCE Press, Micromechanics Modeling of Performance of Asphalt Concrete Based on Surface Energy, pp. 361-363, 2009.
- [9] Carpenter, S., Shen, S.: Dissipated energy concepts for HMA performance: Fatigue and healing, University of Illinois at Urbana-Champaign, Federal Aviation Administration, COE Report No. 29, 2007.
- [10] Carpenter, S., Ghuzlan, K., Shen, S.: A fatigue endurance limit for highway and airport pavements, *Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 1832 (2003), pp. 131-138., doi: <http://dx.doi.org/10.3141/1832-16>
- [11] Nishizawa, T, Shimeno, S, Sekiguchi, M.: Fatigue analysis of asphalt pavements with thick asphalt mixture layer, *Proceedings of the 8th International Conference on Asphalt Pavements*, University of Washington, Seattle, W.A., 2 (1997), pp. 969-976.
- [12] Myers, L., Roque, R., Birgisson, B.: Propagation mechanisms for surface-initiated longitudinal wheel path cracks, *Transportation Research Record 1778*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., (2001), pp. 113-121.
- [13] Kim, Y.: Underwood S. Perpetual pavement evaluation using the viscoelastic continuum damage finite element program, *International Conference on Perpetual Pavements*, 2006.
- [14] Amini, A., Mashayekhi, M., Ziari, H., Nobakht, Sh.: Life cycle cost comparison of highways with perpetual and conventional pavements, *International Journal of Pavement Engineering*, 13 (2012) 6, pp. 553-568.
- [15] Rowe, G, Sauber, R, Bennert, T, Fee, F., Smith, J.: The Performance of a Long Life Pavement and Rehabilitation of Surface Cracking: I-287 New Jersey, *International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements*, International Society for Asphalt Pavements, Auburn, Alabama, (2004), pp. 895-913.

- [16] NCHRP Part 1 Chapter 1.: Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures: Final Report for Project 1-37A, Part 1, Chapter 1, Washington, D.C., National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, 2004.
- [17] Huang, Y.: *Pavement analysis and design*, Second Edition, Pearson Prentice Hall, 2004.
- [18] Rodezno, M., Kaloush, K.: Comparison of asphalt rubber and conventional mixtures properties and considerations for MEPDG implementation, *Transportation Research Record*, Transportation Research Board, TRB, National Research Council, No. 2726, (2009), pp. 132-141.
- [19] Lane, B., Raymond, C., Kazmierowski, T., Kennepohl, G.: Comparative long term performance of Canada's first SMA freeway project, *87th Transportation Research Board No. 1613*, TRB, (2008).
- [20] AASHTO M-145-91.: Classification of soil and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008.
- [21] ASTM D1241-07.: Standard specification for materials for soil-aggregate subbase, base, and surface courses, American Standard for Testing Materials, 2007.
- [22] Code 234.: Iran highway asphalt paving code, The Ministry of Roads and Urban Development, Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision, 2011.
- [23] SHRP 2.: Preservation approaches for high traffic volume roadways, Rep. No. S2-R26-RR-1, The Second Strategic Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2011.
- [24] NCHRP Part 2 Chapter 4.: Guide for mechanistic-empirical design-Part 2: Design inputs-Chapter 4: Traffic, National Cooperative Highway Research Program and Transportation Research Board, Final Report, 2004.
- [25] NCHRP Part 2 Chapter 3.: Guide for mechanistic-empirical design, Part 2. Design inputs, Chapter 3. Environmental effects, National Cooperative Highway Research Program and Transportation Research Board, Final Report, 2004.
- [26] IMO 2008. Iran Meteorological Organization: Climatic Information, <http://www.irimo.ir/english/index>.
- [27] Nasimifar, M.: Modeling climatic factors on pavement performance in different regions of Iran, Sharif University of Technology, Graduate School of Civil Engineering, M.S. Thesis, Iran, 2008.
- [28] NCHRP Appendix OO-2.: Guide for mechanistic-empirical design: Appendix OO-2: Revised smoothness prediction models for flexible pavement, National Cooperative Highway Research Program and Transportation Research Board, Final Report, 2001.
- [29] Von Quintus, H.: Hot-mix asphalt layer thickness design for longer-life bituminous pavements, Transportation Research Circular No. 503: Perpetual Bituminous Pavements, Transportation Research Board, Washington, D.C., (2001), pp. 66-78.