

Mogućnost uređaja GPR pri snimanju kolničkih konstrukcija

Marko Ožbolt, Tatjana Rukavina, Ivica Stančerić

Ključne riječi

kolnička konstrukcija, sastav, debljina, uređaj GPR (Ground Penetrating Radar), nerazorna metoda

Key words

pavement structure, composition, thickness, GPR (Ground Penetrating Radar) device, non-destructive method

Mots clés

chaussée, composition, épaisseur, dispositif RPS (radar à pénétration de sol), méthode non-destructive

Ключевые слова

мостовая, состав, толщина, устройство GPR (Ground Penetrating Radar), неразоряющий метод

Schlüsselworte

Fahrbahnkonstruktion, Zusammensetzung, Dicke, GPR-Anlage (Ground Penetration Radar), zerstörungsfreie Methode

M. Ožbolt, T. Rukavina, I. Stančerić

Stručni rad

Mogućnosti uređaja GPR pri snimanju kolničkih konstrukcija

Prikazuje se primjena nerazorne metode GPR (Ground Penetrating Radar) pri snimanju kolničkih konstrukcija te neke specifičnosti određivanja njihova sastava i debljine slojeva. Uređajem je moguće uočiti i neke druge karakteristike kao što su pojačanja i proširenja kolničke konstrukcije, provlažene zone u kolničkoj konstrukciji, nehomogene zone slojeva nastale različitim zbijanjem materijala, položaj armature u betonskim kolnicima, kao i otkriti šupljine ispod betonskih ploča.

M. Ožbolt, T. Rukavina, I. Stančerić

Professional paper

Possibilities of using GPR in the analysis of pavement structures

The use of the non-destructive GPR (Ground Penetrating Radar) method in the analysis of pavement structures is presented, and some specific aspects for determining composition and layer thicknesses of such structures are given. The radar can also be used to reveal some other characteristics such as the strengthening and widening of pavement structures, zones of higher moisture in pavement structures, inhomogeneous zones in layers due to difference in material compaction rate, position of reinforcing steel in concrete pavements, and voids beneath the concrete slabs.

M. Ožbolt, T. Rukavina, I. Stančerić

Ouvrage professionnel

Possibilités d'emploi de RPS dans l'analyse des chaussées

L'emploi de la méthode non-destructive RPS (radar à pénétration de sol) dans l'analyse des chaussées est présenté, et quelques aspects spécifiques de la détermination de composition et épaisseur des couches de la chaussée sont fournis. Le radar peut également être utilisé pour définir des autres caractéristiques tels que le renforcement et l'élargissement des chaussées, les zones de humidité plus élevée dans la chaussée, les zones non-homogènes dans les couches à cause de différence dans le taux de compaction des matériaux, position de ferrailage dans la chaussée de béton, et les vide au-dessous des dalles en béton.

M. Ožbolt, T. Rukavina, I. Stančerić

Отраслевая работа

Возможности устройства GPR при съёмке мостовых

В работе показывается применение неразоряющего метода GPR (Ground Penetrating Radar) при съёмке мостовых, а также некоторые специфичности определения их состава и толщины слоёв. Устройством можно увидеть и некоторые другие характеристики, такие как усиления и расширения мостовых, зоны увлажнения мостовых, неомогенные зоны, возникшие вследствие различного уплотнения материалов, положение арматуры в бетонных в мостовых, а также и открыть пустоты из-под бетонных плит.

M. Ožbolt, T. Rukavina, I. Stančerić

Fachbericht

Möglichkeiten der GPR-Anlage beim Aufnehmen von Fahrbahnkonstruktionen

Dargestellt ist die Anwendung der zerstörungsfreien Methode GPR (Ground Penetration Radar) beim Aufnehmen von Fahrbahnkonstruktionen sowie einige Besonderheiten der Bestimmung deren Zusammensetzung und Dicke der Schichten. Mit der Anlage ist es möglich auch einige weitere Kennzeichen wahrzunehmen, so wie Verstärkungen und Erweiterungen der Fahrbahnkonstruktion, durchfeuchtete Zonen in der Fahrbahnkonstruktion, unhomogene Zonen der Schichten entstanden durch verschiedenartige Verdichtung des Materials, Lage der Bewehrung in Betonfahrbahnen, sowie Entdeckung von Hohlräumen unter den Betonplatten.

Autori: **Marko Ožbolt**, dipl. ing. građ.; prof. dr. sc. **Tatjana Rukavina**, dipl. ing. građ.; **Ivica Stančerić**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb, Kačićeva 26

1 Uvod

Poznavanje sastava i debljine slojeva savitljivih i krutih kolničkih konstrukcija važni su podaci pri odlučivanju o aktivnostima koje se odnose na gospodarenje kolničkim konstrukcijama cesta. Tako je, primjerice, debljina slojeva kolničke konstrukcije vrlo važan podatak pri određivanju nosivosti te procjeni preostalog životnog vijeka kolnika, projektiranju pojačanja postojećeg kolnika ili kontroli kvalitete izvedenih radova. Debljina slojeva kolničkih konstrukcija uobičajeno se određuje vađenjem jezgri, čime se na odabranim lokacijama dobivaju točni podaci, međutim na promatranoj dionici točkasti. Debljine slojeva između lokacija gdje su izvađene jezgre dobivaju se interpolacijom. Zbog toga mnoge devijacije, oštećenja ili neke druge posebnosti u kolničkoj konstrukciji mogu ostati neprimijećeni. Metoda vađenja jezgri je osim toga razorna metoda, zahtijeva zatvaranje prometnog traka tijekom uzorkovanja, relativno je opasna za djelatnike koji vade uzorke i ostale sudionike u prometu, a i skupa je.

U radu se razmatra način rada sustava GPR (*Ground Penetrating Radar*), osobito na konkretnim primjerima snimljenim na dionicama cesta u Hrvatskoj. Objašnjava se svrhovitost primjene sustava GPR-a u odnosu na neke druge, kod nas uobičajene metode. Radi se o nerazornoj metodi ispitivanja sustavom koji je ugrađen na mjereno vozilo što se u toku ispitivanja dionicom kreće brzinom 50-80 km/h. Na taj način nije potrebno zatvaranje ispitne dionice, a ometanje prometnog toka gotovo je neznatno. Glavni dio obrade na terenu prikupljenih podataka radi se u uredu, sa snimljenim podacima, video-materijalom, zabilješkama s terena i podacima dobivenim od naručitelja [1].

Takav radarski sustav izvrsna je nadopuna ili podloga za neke druge metode proučavanja kolničke konstrukcije kao što je određivanje nosivosti metodom padajućeg tereta – FWD (*Falling Weight Deflectometer*). Naime, pri interpretaciji mjerenja uređajem s padajućim teretom, poznavanje točnih debljina slojeva ključni je podatak. Oba uređaja moguće je postaviti na isto vozilo te mjerenja obaviti u jednom prelasku po dionici. U SAD-u se takvom radarskom metodom provodi kontrola kvalitete izvedenih radova novih kolničkih konstrukcija te pojačanja ili obnove postojećih. Uređajem GPR moguće je na vrijeme otkriti i neke nedostatke u slojevima kolničke konstrukcije, kao na primjer provlažena područja ili nehomogena područja slojeva različitih zbijenosti (gustoća) koja još nisu dovela do pojave oštećenja vidljivih na površini kolnika. Poznavanjem lokacija takvih potencijalnih mjesta oštećenja, moguće je pravodobno poduzeti odgovarajuće preventivne mjere. Uporabom sustava GPR moguće je otkrivanje instalacija, cijevi ili zatrpanih

propusta, što je važno pri obnovi i prekopavanju cesta, posebno u urbanim područjima.

Kako je ova oprema u Hrvatskoj relativno nova, a njezine mogućnosti nepoznate korisnicima, u okviru ovoga rada na nekim su se karakterističnim primjerima željele pokazati mogućnost primjene u ispitivanju kolničkih konstrukcija.

2 Opis uređaja GPR

U nastavku su opisani sastavni dijelovi sustava GPR, način rada i dane su osnovne postavke metode proračuna debljina snimljenih slojeva. Navedeno je i nekoliko programskih paketa za obradu podataka dobivenih sustavom GPR te način njihova rada.

2.1 Mjerni uređaj

Sustav GPR uređaja bazira se na principu radara kod kojeg antena šalje i prima elektromagnetske (EM) valove usmjerene prema konstrukciji koja je predmet snimanja. Sustavom se upravlja računalnim programom u kojem se prilagođuju parametri snimanja i kojim se upravlja radom centralne jedinice, generatora elektromagnetskih valova koji se šalju do antene. Antene, ovisno o tipu, mogu imati raspon frekvencija od 50 MHz do više od 2 GHz. Antene manje frekvencije imaju manju rezoluciju, ali se zato mogu snimiti dublji slojevi tla. Takve se antene rabe uglavnom za geološka istraživanja, zatim u arheologiji, forenzici, razminiranju, a mogu se primijeniti i za istraživanje tla ispod kolničke konstrukcije. Antenama viših frekvencija povećava se rezolucija snimljenog predmeta, ali je dubina snimanja manja. Za snimanje kolničkih konstrukcija najpovoljniji su tipovi antena kod kojih je frekvencija od 500 MHz do oko 2 GHz. Takvim antenama snimaju se slojevi kolničke konstrukcije približno do razine posteljice, ovisno o tipu kolničke konstrukcije. Antene se mogu razlikovati i po položaju u odnosu na tlo. Prvo su razvijene antene koje su prislonjene na tlo, a snimanje se obavlja tako da operater vuče ili gura antenu. To su tzv. *ground-coupled* antene i rabe se za geološka istraživanja gdje brzina snimanja nije toliko bitna. Sustav za ispitivanja na prometnim površinama, gdje je poželjna veća brzina snimanja, obično se sastoji od antena koje su pričvršćene na ispitno vozilo, pri čemu se donja površina antene treba nalaziti na visini od oko 50 cm od površine kolnika. Odmicanjem antena od tla spriječeno je oštećivanje antene koje bi nastalo njezinim vučenjem po tlu. Takve antene nazivaju se *air-coupled* ili *air-horn* antene.

U fazi razvoja su i sustavi antena viših frekvencija i sustavi s više antena različitih frekvencija.

Osim opisanih tipova antena postoje i ručni uređaji GPR-a, kojima se određuje položaj armature u armiranobetonskim konstrukcijama [1].

2.2 Oprema Građevinskog fakulteta, Zavoda za prometnice

Zavod za prometnice Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu posjeduje dvije antene, frekvencija 2,2 i 1,0 GHz, proizvođača GSSI [2]. Antene ovog raspona frekvencija vrlo su dobar kompromis između moguće dubine i rezolucije snimanja. Naime, manjom frekvencijom moguće je snimanje slojeva na većoj dubini, približno do dubine posteljice, ali s manjom rezolucijom, dok je kod antene veće frekvencije obratno. Slojevi se vide detaljnije, ali je dubina snimanja manja.

Ovim je sustavom osim debljine slojeva moguće odrediti i lokacije pojačanja ili proširenja kolničke konstrukcije, položaj armature u betonskim kolnicima pa čak i ocijeniti stanje određenog sloja konstrukcije. Nadalje, moguće je locirati područja na kojima se na površini posteljice skuplja voda, provlažena područja u kolničkoj konstrukciji, nehomogena područja u slojevima nastala nejednolikim zbijanjem materijala, položaj šupljina ispod betonskih ploča, kao i položaj instalacija ispod kolničke konstrukcije ili u njoj.

Osim antena, sustav se sastoji od uređaja za povezivanje komponenta i generatora impulsa elektromagnetskih



Slika 1. Sustav GPR i ispitno vozilo Zavoda za prometnice, Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

valova, SIR-20, zatim računala za obradu i pohranu podataka te uređaja za mjerenje udaljenosti koji može biti zamijenjen i jedinicom GPS-a [2]. Sustav je prikazan na slici 1.

2.3 Osnove rada sustava

2.3.1 Brzina elektromagnetskih valova i dielektrična konstanta

Sustav emitira impulse elektromagnetskih (EM) valova, koji se dijelom odbijaju, a dijelom prolaze kroz slojeve materijala različitih elektromagnetskih karakteristika na koje nailaze [3]. Dio energije koji se odbija od pojedinih slojeva vraća se u antenu, pri čemu se bilježi njegova energija, odnosno amplituda i vrijeme potrebno da se vrati do antene. Na brzinu prolaska EM vala kroz pojedini medij (sloj zraka ili sloj kolničke konstrukcije) utječe tzv. relativna dielektrična konstanta (ϵ_r) pojedinog medija. Za određivanje debljine pojedinog sloja (h) rabi se sljedeća jednačba:

$$h = v \times \frac{t}{2} \quad (2.1)$$

gdje su,

v – brzina prolaska EM vala kroz medij

t – dvostruko vrijeme potrebno za prolazak EM vala kroz medij (slika 2.).

Brzina prolaska EM vala kroz medij računa se na sljedeći način:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.2)$$

gdje su,

$c = 3 \times 10^8$ m/s – brzina EM vala kroz vakuum

ϵ_r – relativna dielektrična konstanta medija.

Kada je poznata dielektrična konstanta nekog sloja, iz jednačbi (2.1) i (2.2), proračuna se debljina tog sloja kolničke konstrukcije jednačbom:

$$h_i = \frac{c \cdot \Delta t_i}{\sqrt{\epsilon_{ri}}} \quad (2.3)$$

gdje su,

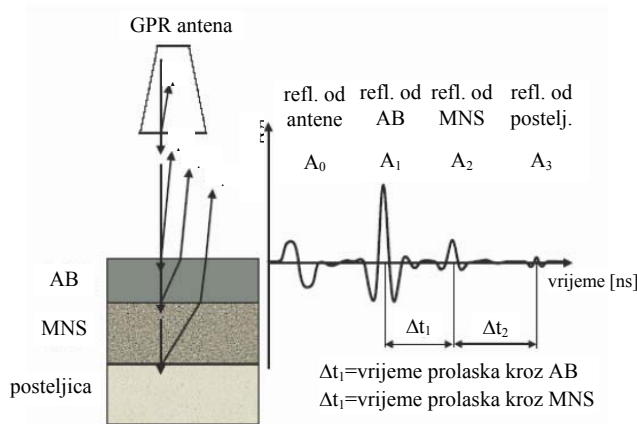
Δt_i – vrijeme između amplituda A_1 i A_2 (slika 2.)

ϵ_{ri} – dielektrična konstanta gornjeg sloja

c – brzina prolaza EM vala kroz zrak.

Proračun dielektrične konstante

Na slici 2. shematski je prikaz jednoga emitiranoga i reflektiranoga snopa elektromagnetskih valova usmjerenih u kolničku konstrukciju. Vidljivo je da na granicama



Slika 2. Shematski prikaz elektromagnetskog vala emitiranog u kolničku konstrukciju

slojeva elektromagnetski val ima veću amplitudu. Na slici je s A_1 označena amplituda reflekcije od površine kolnika, s A_2 amplituda reflekcije od površine podloge drobljenog kamenog materijala (MNS) i s A_3 amplituda reflekcije od površine posteljice. Veličina amplitude između dvaju medija ovisi o relativnim dielektričnim konstantama susjednih slojeva. Opisuje se koeficijentom reflekcije ρ [4] prema jednadžbi

$$\rho = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad (2.4)$$

gdje su,

ϵ_{r1} – relativna dielektrična konstanta gornjeg sloja i

ϵ_{r2} – relativna dielektrična konstanta donjeg sloja.

Što je razlika relativnih dielektričnih konstanti susjednih materijala veća, veća je i amplituda reflektiranog EM vala.

Relativna dielektrična propusnost, ϵ_r , (dielektrična vrijednost ili dielektrična konstanta) nekog materijala jest omjer dielektrične propusnosti pojedinog materijala u odnosu na dielektričnu propusnost vakuumu. Uobičajeno se za tu vrijednost rabi naziv relativna dielektrična konstanta. To je složena vrijednost sastavljena od realne i imaginarne komponente. Raspon vrijednost kreće se od 1 za zrak (vakuum) do 81 za vodu. Dielektrične konstante nekih materijala koji se rabe u kolničkoj konstrukciji navedene su u tablici 1. [5].

Za proračunavanje debljine slojeva kolničke konstrukcije, kod kojih je antena odmaknuta od tla (*air-coupled antenna*), slika 1., za razliku od onih koje se vuku po tlu, primjenjuje se jednadžba (2.4). Za određivanje dielektrične konstante materijala rabi se omjer amplituda reflektiranog signala i dielektrična konstanta susjednih materijala. Kod tzv. *air-coupled* antena, za proračun

dielektrične konstante površinskog sloja kolnika rabi se omjer amplituda reflekcije od metalne ploče postavljene na površinu kolnika i amplitude od površine kolnika mjerene na istom mjestu bez metalne ploče.

Tablica 1. Vrijednosti dielektričnih konstanti nekih materijala koji se rabe u kolničkoj konstrukciji

materijal	dielektrična konst. ϵ
zrak	1
voda (čista)	81
glina	25-40
pijesak	4-6
šljunak	4-8
asfalt	4-8
beton	8-10
bitumenizirani nosivi slojevi	6-7

Metalna se ploča rabi jer ona u potpunosti reflektira EM val pa je amplituda reflekcije maksimalna. Budući da je dielektrična konstanta zraka poznata i iznosi 1, može se proračunati dielektrična konstanta površinskog, odnosno gornjeg sloja kolnika prema:

$$\sqrt{\epsilon_{r1}} = \frac{A_m + A_1}{A_m - A_1} \quad (2.5)$$

gdje su:

ϵ_{r1} – dielektrična konstanta površinskog sloja kolnika

A_m – amplituda reflekcije od metalne ploče

A_1 – amplituda reflekcije od površine kolnika bez metalne ploče.

Analogno tome moguće je proračunati i dielektričnu konstantu sljedećeg sloja kolničke konstrukcije prema jednadžbi

$$\sqrt{\epsilon_2} = \sqrt{\epsilon_1} \left[\frac{1 - \left(\frac{A_1}{A_m}\right)^2 + \left(\frac{A_2}{A_m}\right)^2}{1 - \left(\frac{A_1}{A_m}\right)^2 - \left(\frac{A_2}{A_m}\right)^2} \right] \quad (2.6)$$

gdje su:

ϵ_2 – dielektrična konstanta drugog sloja kolnika

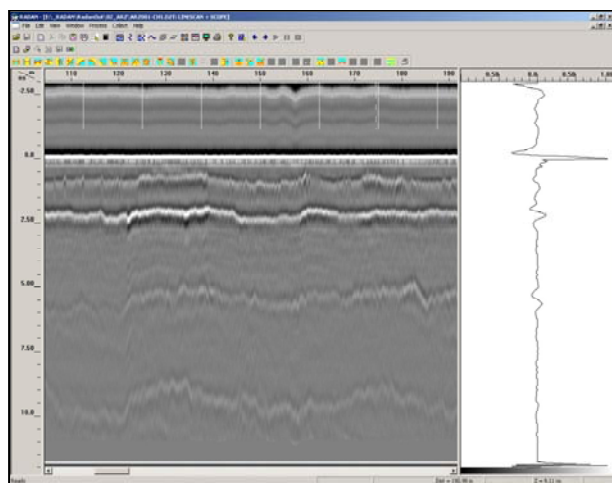
A_2 – amplituda reflekcije od drugog sloja.

U skladu s prethodnom jednadžbom, analogno se računaju dielektrične konstante (ϵ_n) n-slojnog sistema kolničke konstrukcije na temelju prethodno proračunane dielektrične konstante n-1 sloja.

2.3.2 Interpretacija podataka

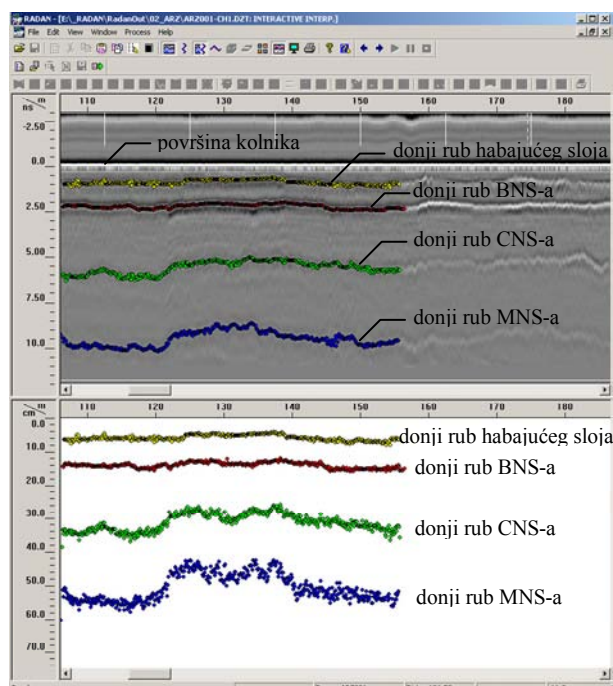
Signal, shematski prikazan na slici 2., moguće je slati i do nekoliko stotina puta u sekundi. Ako se pri tome ispitno vozilo kreće uzduž kolnika, dobiva se kontinuirani

prikaz kao na slici 3. Na desnoj strani slike nalazi se prikaz signala na nekoj lokaciji odabranoj na lijevoj strani.



Slika 3. Kontinuirani prikaz signala snimljenog uređajem GPR

Obradu i interpretaciju podataka moguće je provesti različitim specijaliziranim računalnim programskim paketima kao što je npr. RADAN (*Radar Data Analyzer*). Na slici 4. prikazan je profil snimljen GPR-om na kolniku s asfaltnim zastorom. Na gornjem su dijelu slike prikazani podaci GPR-a s vremenom refleksije od određenog sloja i stacionažom. Naknadnom obradom snimljenih podataka "točkasto" su označeni slojevi kolničke konstrukcije koji su na donjem dijelu prikaza, primjenom proračuna opisanog u poglavlju 2.2.1, pomoću računalnog progra-



Slika 4. Prikaz GPR-a za označavanje slojeva kolničke konstrukcije

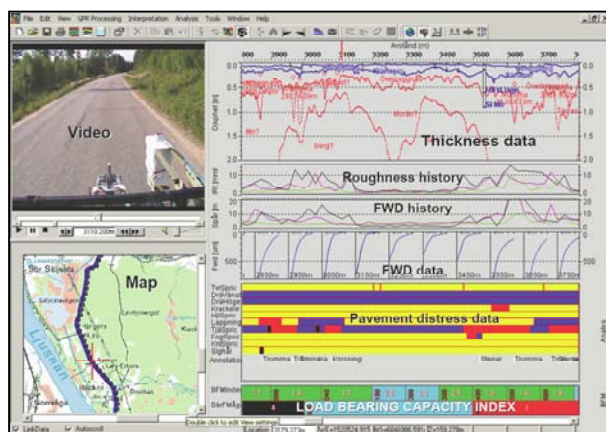
ma, preračunani u debljine slojeva. Desni dio slike namjerno je ostavljen neobrađen, bez "točkica", kako bi se mogle pratiti granice susjednih slojeva kolničke konstrukcije.

Na slici 4. na gornjem su prozoru (stacionaža-vrijeme) označeni slojevi koji su na donjem prozoru (stacionaža-debljina) računalnim programom preračunani u debljine slojeva.

U određenim situacijama, na dobivenoj se snimci slojevi kolničke konstrukcije ne mogu jasno odrediti zbog raznih smetnji koje utječu na kvalitetu i dubinu prodora EM vala u kolničku konstrukciju. Ponekad EM radarski sustav GPR-a može doći u interferenciju s nekim drugim EM valovima koji se nalaze u okolini, a mogu biti iz raznih izvora, kao na primjer snažniji radarski ili radiovalovi. Na taj se način, ponekad, na dobivenoj snimci javlja elektromagnetski "šum" pa je teško razabrati što su granice slojeva kolničke konstrukcije. Također, veći metalni predmet, koji se nalazi u neposrednoj blizini mjesta snimanja, može se vidjeti kao kratkotrajna smetnja. Neki slojevi kolničke konstrukcije ili tla zbog svojih elektromagnetskih svojstava više prigušuju EM valove sustava GPR pa je dubina prodora signala manja, odnosno "ne vide" se dublji slojevi kolničke konstrukcije. Upotrebom filtra pri obradi snimljenog materijala mogu se djelomično smanjiti smetnje, međutim, zbog prevelikih smetnji uređajem se ponekad nije moguće u potpunosti upotrijebiti.

Osim RADAN-a, postoji i nekoliko drugih računalnih programskih paketa za obradu podataka snimljenih uređajem GPR. Neki od njih koncipirani su kao baza podataka u koju je moguće pohraniti mnoge druge podatke vezane uz prometnice. Takvi su programi korisni za praćenje stanja i odlučivanje o postupcima vezanim za održavanje cestovne infrastrukture, odnosno općenito za gospodarenje cestovnom infrastrukturom.

Jedan od takvih programa je Road Doctor [6] koji je zapravo baza podataka u koju se spremaju gotovo svi podaci koji se mogu dobiti vezano uz praćenje stanja cestovne infrastrukture. Na slici 5. samo je jedan od mogućih prikaza podataka snimljenih na nekoj dionici ceste. Na lijevoj je strani videosnimka koja je pozicionirana i na kojoj je za svaki kadar moguće dobiti udaljenost od neke referentne točke, jer se svi podaci mogu povezati u sustav GPS-a ako se on rabi tokom snimanja. "Kretanje" po cesti moguće je pratiti na karti (slika 5. lijevo dolje). Na desnoj se strani slike mogu izmjenjivati prikazi podataka iz baze, ovisno o zahtjevima korisnika, a svi se podaci svode na istu stacionažu. U okviru ovog programskog paketa postoji modul kojim je moguće obradivati snimljene podatke GPR-a slično kao i u RADAN-u.



Slika 5. Jedan od mogućih prikaza podataka u računalnom programu Road Doctor

Uz GSSI postoje i drugi proizvođači sustava GPR. Mnogi od njih imaju i vlastite programske pakete za prikupljanje i obradu snimljenih podataka. Neki od proizvođača su Pulse Radar Inc. USA (*Pulse Radar*), Penetradar Corporation USA (*IRIS*), Road Radar Inc. Canada, Sensor & Software Inc. Canada (*Pulse EKKO*), Auscult' Francuska (*EURADAR*, *Scanroad*) [4], Mala (*Mala*), Švedska [5]. Na Texas Transportation Institute razvili su vlastiti program za obradu snimljenih podataka GPR-a nazvan Colormap [7].

3 Neki karakteristični primjeri kontinuiranog prikaza slojeva kolničke konstrukcije

Snimanjem sustavom GPR-a dobiva se kontinuirani prikaz slojeva kolničke konstrukcije. Na taj je način moguće pratiti promjenu debljine pojedinih slojeva, vidljivi su radni spojevi, odnosno plohe koje imaju različitu zbijenost te razne druge anomalije i različitosti unutar kolničke konstrukcije.

Kontinuirano radarsko snimanje kolničke konstrukcije izvrsna je nadopuna, a u većini slučajeva i uspješna alternativa sustavu vađenja jezgri. Radarskim snimanjem mogu se optimizirati broj i lokacije mjesta na kojima treba izvaditi jezgre nakon što se pregleda i obradi snimka [1]. U nastavku se daje nekoliko primjera s dionica snimljenih sustavom GPR u Hrvatskoj s karakterističnim pojavama u kolničkoj konstrukciji, koje bi unaprijed planiranim i nedovoljno gusto raspoređenim vađenjem jezgri, mogle ostati neprimijećene.

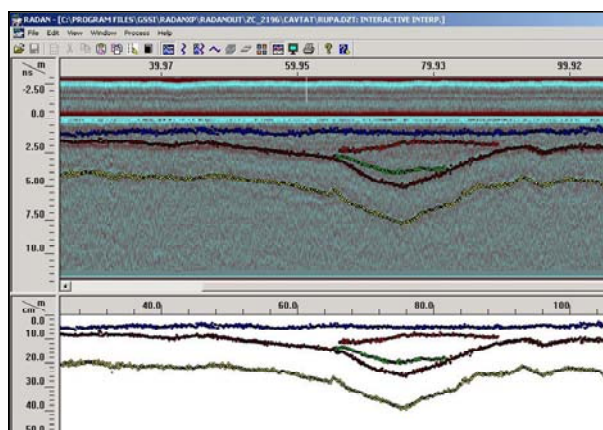
3.1 Popravci depresija na kolniku

Tijekom uporabe na kolniku se mogu pojaviti depresije, ponekad lokalno, a ponekad takve da zahvaćaju cijelu širinu kolnika i znatno se protežu u duljinu. Razlozi pojave takvih oštećenja mogu biti ili u samoj kolničkoj konstrukciji, u kojoj jedan od ugrađenih slojeva ima sla-

biju nosivost kao posljedicu loše zbijenosti ili iz nekih drugih razloga. Pojava depresija može biti posljedica ugradnje nekvalitetnog mehanički zbijenoga nosivog sloja ili materijala posteljice. Pod djelovanjem prometnog opterećenja, na tim mjestima kolnik počinje ubrzano propadati, što se na površini kolnika može vidjeti kao depresija manjih dimenzija. Ako se ispod kolničke konstrukcije nalaze cijevi nekih instalacija ili propusta, one također mogu uzrokovati pojavu depresija koje mogu biti većih dimenzija, s većim oštećenjima kolnika. U slučaju oštećenja kanalizacijske cijevi ili cijevi propusta, materijal temeljnog tla ili nosivih slojeva kolničke konstrukcije iznad cijevi može propadati u cijev i biti iznesen izvan trupa ceste. Nakon nekog vremena može doći do propadanja dijela kolnika koje ponekad može biti i većih dimenzija.

Pravodobnim uočavanjem razloga nastanka depresije na kolniku, u čemu može pomoći uređaj GPR, te pravodobnom odlukom o adekvatnoj sanaciji, mogu se spriječiti fatalne posljedice ako se radi o propadanju veće površine kolnika.

Na sljedećem se primjeru vidi veliko povećanje debljine asfaltnog sloja nastalo vjerojatno zbog smanjene nosivosti posteljice (slika 6.), zbog čega je na voznoj površini kolnika nastalo udubljenje koje je sanirano zatrpavanjem novim slojem asfalta. Popunjavanje udubljenja nije riješilo problem nastanka oštećenja, nego je samo privremeno riješilo problem uporabljivosti, održavajući voznu površinu ravnom. Ubrzo se udubljenje opet pojavilo pa je bilo potrebno ponovno popunjavanje slojem asfalta. Nakon nekoliko popunjavanja udubljenja, kolnik je presvučen novim habajućim slojem tako da se s površine ne vidi "problematična" lokacija. Depresija će se na ovom mjestu vjerojatno opet pojaviti, a područje je zbog velike debljine asfalta pogodno za nastanak kolotruga. Vađenjem jezgri vrlo je teško otkriti ovakvu lokaciju jer



Slika 6. Popunjavanje depresije na kolniku slojevima asfalta i presvlačenje novim habajućim slojem

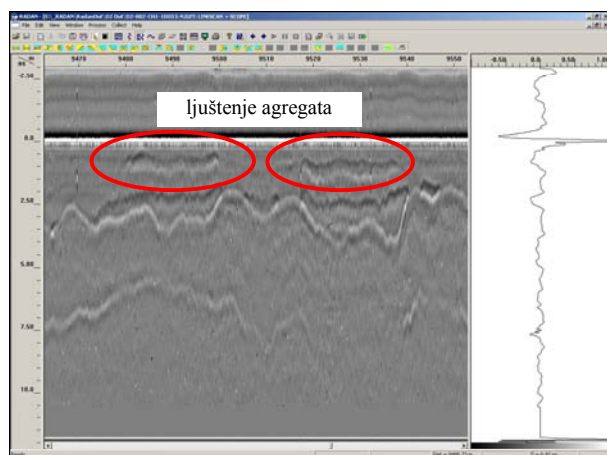
je depresija dugačka svega 20-ak metara, dok slučajno vađenje jezgre baš na tom području može dovesti do pogrešnog zaključka o debljini asfaltnih slojeva kojih ovdje ima ukupno oko 40 cm.

3.2 Ljuštenje veziva

Za ovu vrstu oštećenja (*stripping*) karakteristično je slabljenje ili gubitak veze između agregata i bitumenskog veziva, zbog čega takva područja imaju smanjenu nosivost. U oštećenom dijelu asfaltnog sloja agregat uopće nije ili je samo djelomično obavijen vezivom, tako da je ovisno o stupnju oštećenja ponekad nemoguće izvaditi jezgru a da se ne poremeti uzorak. Ova vrsta oštećenja asfaltnih kolnika vrlo se teško uočava jer pojava ljuštenja veziva počinje na donjem dijelu sloja i širi se prema gore. Pronalaženje mjesta na kojima dolazi do ljuštenja veziva vrlo je teško budući da u početnoj fazi nisu uočljiva na površini kolnika, sve do trenutka kada oštećenje veziva uzrokuje toliko smanjenje nosivosti i propadanje sloja da se na površini počinju javljati pukotine i udarne rupe.

Razlozi pojave ljuštenja veziva uglavnom su vezani uz pojavu vlage u asfaltnom sloju. Pri povećanju temperature ili pod utjecajem prometa, vlaga povećava porni tlak između zrna agregata i bitumena, što razara njihovu vezu. Uzroci ovoj pojavi mogu biti neodgovarajuća odvodnja kolnika, neodgovarajuće zbijanje, upotreba agregata obavijenog prašinom, upotreba habajućeg sloja otvorenoga granulometrijskog sastava, upotreba nedovoljno osušenog agregata ili agregata slabe kvalitete, ugradnja asfaltnih slojeva iznad oštećenih betonskih kolnika i slično [8].

Nerazornom metodom kao što je GPR moguće je otkriti potencijalna područja na kojima dolazi do ljuštenja veziva prije nego što oštećenje napreduje do površine kolnika. Zbog smanjene količine bitumena, na oštećenim je mjestima gustoća sloja manja, što se vidi na radarskom prikazu kao područje inverznog polariteta (slika 7.).



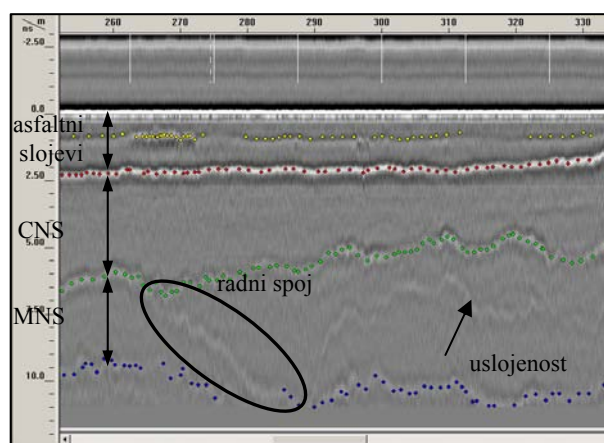
Slika 7. Mjesta na kojima je došlo do ljuštenja agregata

Ovakav prikaz može se dobiti i ako se na označenim mjestima radi o asfaltima različitih dielektričnih svojstava pa bi pretpostavku lokacija na kojima se radi o ljuštenju agregata trebalo potvrditi vađenjem jezgri. U ovom slučaju GPR je alat kojim se mogu otkriti eventualno problematične lokacije te se može optimizirati broj i lokacija vađenja jezgri. Pri izvođenju novih asfaltnih slojeva, uređajem GPR može se kontrolirati kvaliteta izvedenih radova što se tiče oštećenja sloja ljuštenjem veziva.

Asfaltno slojeve oštećene na ovaj način trebalo bi prije postavljanja novog sloja zamijeniti budući da se radi o dijelovima koji ne zadovoljavaju propisanu kvalitetu.

3.3 Uslojenost unutar pojedinog sloja

Tijekom ugradnje slojeva kolničke konstrukcije, bilo vezanih, bilo nevezanih materijala, kod prekida radova izvode se radni spojevi. Nastavljanjem ugradnje istog sloja, na mjestu radnog spoja može doći do razlika u karakteristikama prethodne i nove faze zbog upotrebe različitog materijala ili zbog različite zbijenosti slojeva. Promatranjem radarskog prikaza može se primijetiti područje radnog spoja, kao što je označeno na slici 8., u MNS-u, na stacionaži od približno 270 m. Nastavljanjem ugradnje MNS-a došlo je do "raslojavanja" ili "graniranja" sloja. Granična se ploha između dva sloja, na slici 8., vidi kao horizontalna ploha, vjerojatno nastala izvođenjem sloja u dvije faze zbog velike debljine. Pri tome slojevi nemaju jednaku zbijenost pa se na radarskom prikazu uočavaju kao diskontinuitet. Na ovome mjestu MNS ima debljinu oko 30 cm.

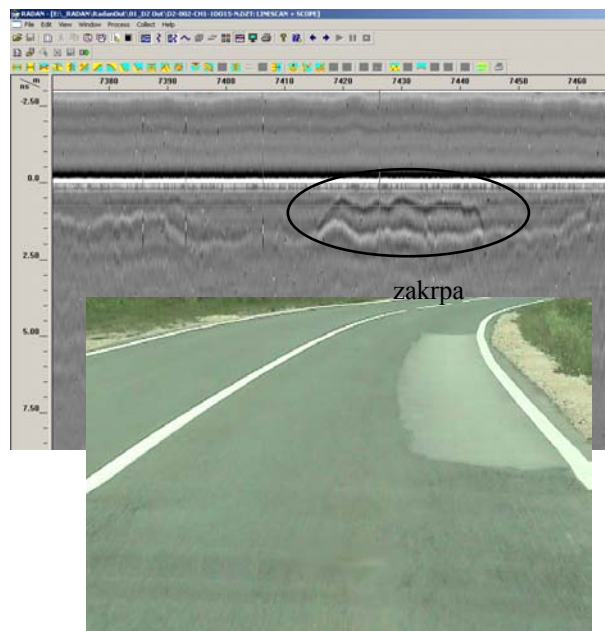


Slika 8. Prikaz radnog spoja i uslojenosti u MNS-a

3.4 Zakrpe i popravci

Radarskim snimanjem postojećeg kolnika, koji je dugo u upotrebi, nailazi se na vrlo česte promjene sastava i slojeva kolničke konstrukcije, nastalih različitim popravcima i intervencijama na kolniku tokom vremena.

Neki su popravci vidljivi na površini kolnika, kao na primjer zakrpe (slika 9.), a neki mogu ostati sakriveni ispod površine zbog presvlačenja novim habajućim slojem (slika 6.).



Slika 9. Prikaz zakrpe na kolniku na GPR-u i videosnimci.

Prmatranjem radarski snimljenog materijala u kombinaciji s videozapisom moguće je otkriti razloge postavljanja zakrpi ako se radi o zakrpama koje su vidljive na površini kolnika, ili je moguće detektirati zakrpe ili popravke koji se ne vide na površini kolnika jer su presvučeni novim habajućim slojem.

3.5 Određivanje debljine slojeva

Osnovni podatak koji se dobiva uređajem GPR jest debljina slojeva. Na prikazu GPR-a vidi se promjena debljine uzduž kolnika te eventualno neke druge karakteristike sloja. Određivanje vrste slojeva kolničke konstrukcije iz podataka dobivenih GPR-om je vrlo teško zbog vrlo sličnih dielektričnih konstanti materijala kolničke konstrukcije (tablica 1.). Vrste slojeva dobivaju se vađenjem jezgri, iz projektne dokumentacije ili na neki drugi način. Sustavom GPR-a kakav posjedujemo na Građevinskom fakultetu može se vidjeti do 80 cm u dubinu asfaltne kolničke konstrukcije, što znači da se vide svi asfaltni slojevi, stabilizirani nosivi slojevi i u većini slučajeva mehanički zbijeni nosivi sloj i posteljica.

Debljina slojeva važan je podatak za određivanje nosivosti kolničke konstrukcije metodom padajućeg tereta (FWD-Falling Weight Deflectometer), kod koje je za točno određivanje nosivosti potrebno poznavati debljinu svih slojeva kolničke konstrukcije na određenom mjes-

tu. Sustavom GPR-a vrlo se lako odredi debljina svih vidljivih slojeva na željenom mjestu, za razliku od metode vađenja jezgri gdje se dobivaju debljine uglavnom samo za slojeve asfalta i potrebno ih je interpolirati između dviju susjednih izvađenih jezgri.

Kod metode obnove kolnika recikliranjem asfalta važno je unaprijed, pri projektiranju obnovljene kolničke konstrukcije, znati debljine, barem asfaltnih slojeva, kako bi se znalo koju se debljinu postojeće konstrukcije može skinuti glodanjem te zamijeniti novim, recikliranim slojem.

3.6 Kontrola kvalitete izvedenih radova

3.6.1 Debljina sloja

Kontinuirani podaci o debljini izvedenih slojeva kolničke konstrukcije, dobiveni uređajem GPR, mogu se primijeniti pri kontroli kvalitete i obračunu izvedenih radova. Kod novih kolničkih konstrukcija, koje još nisu bile pod prometom, granične se plohe slojeva sličnih materijala (asfalti) na prikazu GPR-a bolje vide nego kod kolničkih konstrukcija koje su dugo pod prometom.

Točnost određivanja debljine slojeva potpuno nove, savitljive kolničke konstrukcije uređajem GPR ovisi o vrsti i debljini slojeva, a može se odrediti s greškom od 2,9 do 5 % pri usporedbi debljine slojeva dobivenih na jezgri i iz podataka GPR-a na istoj lokaciji. Veća se točnost postiže za deblje asfaltno slojeve, a nešto manja za tanje [9], [10]. Uobičajeno je da se kontrola kvalitete debljine izvedenih slojeva određuje vađenjem jezgri u novoizvedenom kolniku, čime se na tim lokacijama dobiva točna debljina, ali samo asfaltnih slojeva, dok se uređajem GPR dobiva kontinuiran podatak i između izvađenih jezgri i to svih slojeva kolničke konstrukcije. Uvođenjem uređaja GPR u kontrolu kvalitete izvedenog stanja dobili bi se podaci o debljini slojeva kontinuirano duž dionice i smanjio bi se broj izvađenih jezgri kojima se oštećuje novoizvedeni kolnik. Ostali parametri koji se određuju iz jezgri, mogli bi se određivati na reduciranom broju uzoraka.

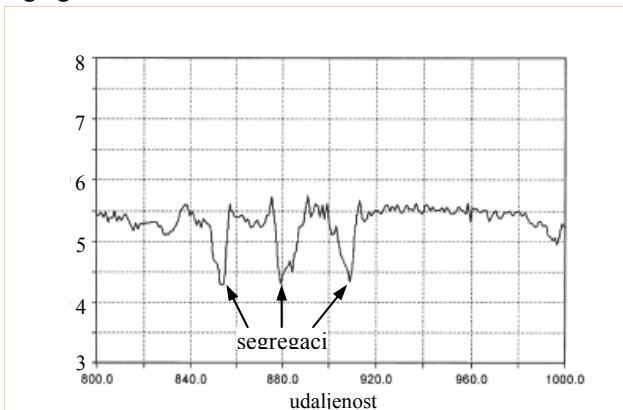
3.6.2 Količina pora ispunjenih zrakom u asfaltnom sloju

Količina pora ispunjenih zrakom u ugrađenom asfaltnom sloju važan je podatak o kojem ovise karakteristike i životni vijek sloja. Uobičajeno je da se taj podatak dobiva iz uzoraka izvađenih jezgri iz novog kolnika. Međutim, moguće ga je odrediti i uređajem GPR budući da dielektrična konstanta materijala ovisi o gustoći materijala sloja. Asfaltni slojevi koji imaju više pora ispunjenih zrakom imaju manju gustoću pa time i manju dielektričnu konstantu, dok materijali veće gustoće imaju manje pora ispunjenih zrakom i veću dielektričnu konstantu. Metoda određivanja količine pora ispunjenih zrakom uređa-

jem GPR temelji se na kontinuiranoj snimci novoizvedenog kolnika te vađenjem nekoliko jezgri iz kolnika u istoj osi u kojoj je kolnik snimljen GPR-om. Broj izvađenih jezgri je manji nego kod uobičajene metode, a one se rabe za laboratorijsko određivanje količine pora ispunjenih zrakom. Na temelju podataka o dielektričnoj konstanti i laboratorijskih podataka o količini pora ispunjenih zrakom, određenih na istim lokacijama, nacrtava se dijagram i odredi regresijska krivulja. S pomoću nje se kasnije, iz podataka o dielektričnoj konstanti, može proračunati (očitati) količina šupljina na bilo kojoj lokaciji ispitane dionice [10], [11].

3.6.3 Segregacija

Segregacija je problem koji može negativno utjecati na asfaltnu mješavinu i na buduće ponašanje kolnika. Pojavljuje se u slučaju kad granulometrijski sastav materijala mješavine pri ugradnji nije isti po čitavom sloju, a najčešći uzrok tomu je razdvajanje krupnog od sitnog agregata.



Slika 10. Dijagram odnosa dielektrične konstante sloja i udaljenosti

Mjesta na kojima se pojavljuje segregacija su hrapava, podložna krunjenju i propusna za vodu te se zbog njih smanjuje životni vijek kolnika [8]. To su mjesta na kojima je gustoća mješavine manja nego na ostalim dijelovima

LITERATURA

- [1] Rukavina i dr.: *Kontinuirano prikupljanje podataka o debljini slojeva kolničkih konstrukcija GPR-om*, 4. hrvatski kongres o cestama, Cavtat, (2007)
- [2] Geophysical Survey Systems, Inc. www.geophysical.com (veljača 2008)
- [3] Yilmaz, O.: *Seismic data processing, Investigation in Geophysics, Vol. No. 2*, Society of Exploration Geophysics, SAD, 1987
- [4] Fontul, S.: *Structural evaluation of flexible pavements using non-destructive tests*, disertacija, LNEC, Lisabon, Portugal, 2004
- [5] Saarenketo, T.: *Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys*, disertacija, Faculty of Science, Department of Geosciences, University of Oulu, Finland, 2006
- [6] Roadscanners Oy, Rovaniemi, Finska, www.roadscanners.com (kolovoz 2008)
- [7] Texas Transportation Institute (TTI) <http://tti.tamu.edu/> (kolovoz 2008)
- [8] Roberts, L.; Freddy i dr.: *Vruće asfaltne mješavine, projektiranje i ugradnja*, 2. izd., prijevod Hrvatski savez građevinskih inženjera, Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb, 2003
- [9] Al-Qadi I.L.; Lahoua, S.: *Measuring layer thicknesses with GPR-Theory to practice*, Construction and Building Materials 19, (2005), p. 763-772
- [10] Saarenketo, T.; Scullion, T.: *Road evaluation with ground penetrating radar*, Journal of Applied Geophysics 43, (2000), p. 119-138
- [11] Amer-Yahia, C. et al.: *Use of Ground Penetrating Radar for Quality Control Measurements on New Asphalt Overlays*, 11th International Conference on GPR, USA, (2006)

pa je manja i dielektrična konstanta, zbog čega ih je moguće detektirati GPR-om. Segregacija u nekim slučajevima postaje vidljiva na površini kolnika tek nekoliko mjeseci nakon što je kolnik u uporabi pa je u tom slučaju GPR koristan alat za preventivno otkrivanje oštećenih mjesta. Snimanjem kolnika uređajem GPR može se dobiti odnos dielektrične konstante i udaljenosti, kao na slici 10. Za razliku od uobičajenog načina snimanja kolnika, pri čemu se dobiva snimka u jednoj uzdužnoj ravnini, za otkrivanje segregacije potrebno je kolnik snimiti u nekoliko poprečno razmaknutih uzdužnih ravnina. Vidi se da je na prikazanom primjeru dielektrična konstanta sloja oko 5,5 s pojedinim lokacijama gdje ona padne do 4,5. Na mjestima s manjom dielektričnom konstantom gustoća sloja je manja zbog više udjela šupljina), što upućuje na pojavu segregacije [10].

4 Zaključak

U ovome su radu, na konkretnim primjerima snimljenim na cestama u Hrvatskoj, pokazane neke mogućnosti i karakteristike uređaja GPR te njegova moguća primjena u praksi. Osnovna karakteristika uređaja da podatke može snimati kontinuirano pri brzinama prometnog toka i nerazorno za kolničku konstrukciju njegova je najveća prednost. Primjena uređaja GPR moguća je i pri kontroli kvalitete ugradnje slojeva kolničke konstrukcije, uvažavajući ograničenja uređaja. Relativno brzo i točno mogu se dobiti debljine ugrađenih slojeva, a na kontinuiranom prikazu vide se varijacije debljine pojedinih slojeva. Budućim snimanjima i usporedbom s nekim drugim metodama ispitivanja kolničkih konstrukcija bit će moguće na ovakav nerazoran i relativno brz način otkriti i druge anomalije koje se pojavljuju u kolničkoj konstrukciji.

Unošenje podataka dobivenih sustavom GPR u bazu podataka cesta u Republici Hrvatskoj bio bi, uz već postojeće podatke u toj bazi, još jedan važan korak prema većoj efikasnosti i kvaliteti gospodarenja kolnicima postojećih cesta.