

Primljen / Received: 17.7.2018.

Ispravljen / Corrected: 31.5.2019.

Prihvaćen / Accepted: 30.9.2019.

Dostupno online / Available online: 10.12.2019.

# Razvoj nove metode za procjenu stanja površinskog sloja šumskih cesta

## Autori:



Prof. dr. sc. **Marijan Šušnjar**  
[msusnjar@sumfak.hr](mailto:msusnjar@sumfak.hr)



Doc. dr. sc. **Zdravko Pandur**  
[zpandur@sumfak.hr](mailto:zpandur@sumfak.hr)



Doc. dr. sc. **Hrvoje Nevečerel**  
[hnevecerel@sumfak.hr](mailto:hnevecerel@sumfak.hr)



Doc. dr. sc. **Kruno Lepoglavec**  
[klepoglavec@sumfak.hr](mailto:klepoglavec@sumfak.hr)



**Marin Bačić**, mag.ing.silv.  
[mbacic@sumfak.hr](mailto:mbacic@sumfak.hr)

Sveučilište u Zagrebu  
Šumarski fakultet  
Zavod za šumarske tehnike i tehnologije

Prethodno priopćenje

**Marijan Šušnjar, Zdravko Pandur, Hrvoje Nevečerel, Kruno Lepoglavec, Marin Bačić**

## Razvoj nove metode za procjenu stanja površinskog sloja šumskih cesta

U radu se analizira nova metoda za procjenu stanja površinskog sloja šumskih cesta mjerenjem vibracija. Istraživanje je provedeno na dijelu šumske ceste tijekom vožnje vozila opremljenog mjernim uređajem kojim se mjere vibracije u sve tri osi, položaj i brzina vozila te vrijeme. Ispitivanja su provedena u oba smjera vožnje na dijelu ceste s različitim frekvencijama mjerenja, tlakovima u gumama i brzinama vožnje. Na temelju rezultata mjerenja stanja površinskog sloja šumske ceste preporučuje se frekvencija snimanja od 10 Hz, brzina vozila od 20 km/h te tlak u gumama od 2 bara.

### Ključne riječi:

površinski sloj šumske ceste, oštećenja šumske ceste, mjerenje vibracija, frekvencija snimanja

Preliminary note

**Marijan Šušnjar, Zdravko Pandur, Hrvoje Nevečerel, Kruno Lepoglavec, Marin Bačić**

## Development of a new method for assessing condition of forest road surface

A new method for assessing condition of forest road surface layers by vibration measurements is analysed in the paper. The research was conducted on a forest road segment while driving a vehicle equipped with a measuring device for determining vibrations in all three axes, vehicle position, vehicle speed, and time. Tests were performed in both driving directions of the forest road segment using different measuring frequencies, tyre inflation pressures, and driving speeds. The recording frequency of 10 Hz, vehicle speed of 20 km/h, and tyre inflation pressure of 2 bars, can be recommended based on the forest road surface measurement results.

### Key words:

forest road surface, forest road damage, vibration measurement, recording frequency

Vorherige Mitteilung

**Marijan Šušnjar, Zdravko Pandur, Hrvoje Nevečerel, Kruno Lepoglavec, Marin Bačić**

## Entwicklung einer neuen Methode zur Beurteilung des Zustands der Oberflächenschicht von Forststraßen

In der Abhandlung wird die neue Methode zur Beurteilung des Zustands der Oberflächenschicht von Forststraßen durch Messung der Vibrationen analysiert. Die Untersuchung wurde auf einem Teil der Forststraße während der Fahrt des mit einem Messgerät ausgerüsteten Fahrzeugs durchgeführt, mit welchem die Vibrationen aller drei Achsen, die Lage und die Geschwindigkeit des Fahrzeugs sowie die Zeit gemessen werden. Die Untersuchungen wurden in beide Fahrtrichtungen auf dem Teil mit unterschiedlichen Messfrequenzen, Reifendrücken und Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt. Aufgrund der Messergebnisse des Zustands der Oberflächenschicht von Forststraßen empfiehlt sich eine Messfrequenz von 10 Hz, eine Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h sowie ein Reifendruck von 2 Bar.

### Schlüsselwörter:

Oberflächenschicht der Forststraße, Beschädigung der Forststraße, Vibrationsmessung, Aufnahme Frequenz

## 1. Uvod

Šumske ceste karakterizira nisko prometno opterećenje [1], ali velike vrijednosti dodirnih tlakova koji se javljaju između kotača i šumske ceste, a koja prelaze 80 kN [2] uzrokuju oštećenja gornjeg i donjeg ustroja šumske ceste [3]. Zbog oštećenja nastalog kao posljedica prevelikog opterećenja osovina šumskih kamionskih skupova i nedostatka adekvatnog održavanja šumske ceste, tijekom određenog vremena može doći do potpune nedostupnosti određenog šumskog područja [4, 5].

Nepravilna ili prekomjerna uporaba šumskih cesta odnosi se na njihovo korištenje u nepovoljnim vremenskim uvjetima, uvjetima narušene stabilnosti tijela ceste, prometovanje nedopuštenim sredstvima te ne uzimanje u obzir zakonskih ograničenja najvećih dopuštenih opterećenja za dopuštena sredstva. Promatrajući interakciju prometa (prometnog opterećenja) i kolničke konstrukcije, Reissinger [6] zaključuje da promet svojim vibracijama negativno utječe na vezivno sredstvo kolničke konstrukcije te ističe da je taj negativni utjecaj proporcionalan težini vozila odnosno pritisku samog vozila na kotače. Dietz i dr. [7] bave se problematikom amortizacije šumskih cesta te zaključuju da uslijed djelovanja kotača vozila (prometno opterećenje) i djelovanja prirodnih čimbenika, nosivost se konstantno smanjuje.

Underhill [8] smatra da su glavni uzročnici oštećenja šumskih cesta: klimatski čimbenici, geometrija ceste, pogreške pri projektiranju ili izgradnji ceste, kvaliteta ugrađenih materijala, norme koje treba zadovoljiti pri izvođenju radova, vrsta i učestalost održavanja, odredbe vezane uz površinsku i podzemnu odvodnju, učestalost i vrsta prometa, starost ceste. Pentek i dr. [9] u postupke koji se smatraju nepravilnom ili prekomjernom uporabom šumskih cesta ubrajaju: prometovanje preopterećenih kamiona prevozeći drveni materijal (robu), građevinske strojeve i kameni materijal; uporabu šumskih cesta nakon jakih i dugotrajnih kiša ili po otopljenom snijegu; vožnju šumskih ili građevinskih strojeva s gusjenicama ili lancima na kotačima, nepropisno obavljanje radova pridobivanja drva i vožnju brzinom većom od dopuštene.

Zbog navedenih uzroka oštećenja, šumske ceste nakon izgradnje treba redovito održavati kako bi tijekom svojega vijeka trajanja mogle ispuniti sve zadaće predviđene šumskogospodarskim planovima. Pravilno i pravodobno održavanje produljuje trajanje šumske ceste, smanjuje troškove održavanja sustava pogona motornih vozila i učestalost njihova popravka, čini šumsku cestu provoznom tijekom čitave godine te povećava sigurnost svih sudionika u prometu [10].

Neodržavane ceste utječu na oštećenja vozila, povećavaju potrošnju goriva i troškove prijevoza [11]. Mnoge studije pokazuju da se održavanjem cesta svakako poboljšava njihovo stanje, ali se ujedno smanjuju troškovi prijevoza drva [12, 13].

Svake se godine u održavanje šumskih cesta ulažu značajna financijska sredstva, a u praksi se često primijenjuju jednokriterijske analize, koje mogu biti subjektivne i uključuju

samo one kriterije koji odgovaraju korisniku. Coulter i dr. [14] ističu potrebu primjene višekriterijskih metoda odlučivanja za obnovu i održavanje šumskih cesta. Papa i dr. [10] ističu potrebu za razvojem nove metodologije kontinuiranoga praćenja stanja šumskih cesta i cestovnih objekata. Na temelju uzorka određene vrste i intenziteta, moglo bi se procijeniti sadašnje stanje šumskog puta, donijeti odgovarajući zaključci i planirati održavanje šumskih cesta na razini upravne jedinice.

U svijetu postoji niz metoda za procjenu stanja kolničke konstrukcije koje se prvenstveno koriste za procjenu stanja javnih prometnica, ali svoju upotrebu nalaze i u šumarstvu. Krishna Rao [15] navodi metode procjene stanja (oštećenja) cesta te ih dijeli na subjektivne i objektivne metode.

Subjektivne metode procjene temelje se na pojedinačnom popunjavanju obrazaca, gdje sudionici u prometu i stručnjaci, na temelju ispitivanja određenog segmenta ceste, procjenjuju njegovo stanje. Krishna Rao [15], Douangphachanh i Oneyama [11], kao i mnogi drugi autori, tvrde da su subjektivne metode izuzetno skupe zbog vremena potrebnog za prikupljanje podataka i stalne prisutnosti istraživača i terenskih stručnjaka tijekom provedbe istraživanja.



Slika 1. Laserski sustav za snimanje stanja ceste (Izvor: Svenson [17])

Objektivne metode procjene stanja kolnika prometnica koriste različite vrste mjernih uređaja, od analognih do digitalnih, pomoću kojih se prikupljaju podaci. Neki od novijih ovdje se navode:

- Upotreba *Dipstick profiler*: daje izrazito precizne podatke o ravnini profila ceste, ali mjerenja su izrazito vremenski zahtjevna, te se stoga koristi uglavnom pri kontroli stanja zrakoplovnih uzletišta, ali i pri kalibraciji drugih kompleksnijih uređaja.
- Uređaji za mjerenje "hrapavosti" ceste (eng. *Response type road roughness meters* – RTRRMs): na indirektni način mjeri se uzdužni profil ceste, tako da uređaj bilježi relativnu udaljenost između šasije vozila i sredine stražnje osovine.
- Uređaji za snimanje profila ceste: izrazito precizno snimaju uzdužne i poprečne profile ceste i oštećenja na cesti, a koriste kontaktne ili beskontaktne sustave senzora.

Beskontaktni sustavi senzora pomoću lasera ili ultrazvučnih uređaja snimaju profile prometnice. Osim upotrebe senzora, takvi sustavi koriste i videokamere, te se snimke dijelova istraživane ceste obrađuju pomoću računalnih programa. Takvi uređaji se nazivaju *Integrated Pavement Analysis Units* ili *Automatic Road Analyser*. Oni su skupi jer zahtijevaju posebno opremanje vozila, razvoj specijaliziranih računalnih programa, pa se stoga često koriste samo za kalibriranje RTRRMs uređaja. Takve uređaje u svojim istraživanjima koriste Dawson i Killer [16] i Svenson [17].

Da bi se pojednostavnile procjene stanja ceste, mnogi su se autori umjesto specijaliziranih mjernih uređaja počeli koristiti akcelerometrima, gdje zabilježene vibracije određuju stanje cestovnih kolničkih konstrukcija. Gonzalez i dr. [18] ugradili su akcelerometar u ispitno vozilo kako bi procijenili stanje ceste te su zaključili da se na temelju snimljenih podataka može procijeniti stanje kolničke konstrukcije ceste. Također je uspješno testirana mogućnost korištenja voznog parka u svrhu usporedne analize stanja kolnika. Takav način je umnogome učinkovitiji u odnosu na korištenje samo jednog vozila i otvara mogućnost upotrebe podataka iz postojećeg voznog parka javnog sektora.

Erikson i dr. [19] razvili su mobilni senzorski sustav za otkrivanje i izvještavanje o udarnim rupama na cestama. Sedam taksija opremljeno je računalom Soekris 4801, vanjskim GPS-om i troosnim akcelerometrima. Taksiji su prešli više od 9.000 kilometara, pri čemu je 174 km cesta prijedeno s deset ili više ponavljanja. Pregledom prijavljenih udarnih rupa pokazala se točnost otkrivanja više od 90 %.

Mohan i dr. [20] koriste pametne telefone s integriranim troosnim akcelerometrom za određivanje izbočina i rupa na površini ceste. Analizom izmjerenih vibracija pri različitim brzinama vozila, empirijski su utvrdili da se pri malim brzinama (<25 km/h) dobije dobar pokazatelj udaraca i rupa.

Strazdins i dr. [21] koriste pametne telefone s Android operativnim sustavom, gdje pametni telefoni s ugrađenim akcelerometrima i jednostavnim algoritmima određuju lokaciju udarnih rupa na cesti. Eksperimenti su provedeni na ispitnoj stazi na dva različita vozila, a svaki eksperiment se sastojao od samo tri prolaska.

Douangphachanh i Oneyama [11] istražuju mogućnost određivanja stanja cesta upotrebom pametnih telefona pomoću kojih mjere vibracije te zaključuju da se pomoću tih telefona znatno pojednostavnjuje metoda procjene stanja ceste. Istraživanje je provedeno u dva Toyotina vozila na ukupnoj duljini ceste od 159 km. Utvrđeno je da iznosi vibracija s pametnih telefona imaju linearnu vezu s neravninama na cesti.

Lanjewar i dr. [22] također su se koristili akcelerometrima pametnih telefona za otkrivanje udarnih rupa na cesti. Utvrđeno je da vibracije s pametnog telefona imaju linearnu vezu s neravninama na cesti. Značajni utjecaj na mjerenje ima brzina vozila, odnosno poželjno je mjerenja izvoditi pri brzini manjoj od 30 km/h.

U radu se prikazuje mogućnost određivanja stanja kolničke konstrukcije šumskih cesta mjerenjem vibracija pomoću tablet

uređaja s ugrađenim akcelerometrom. Utjecaj frekvencije očitavanja, brzine vozila i tlaka u gumama određen je višekratnom vožnjom vozila za ispitivanje na segmentu šumske ceste. Rezultati istraživanja uspoređeni su s prethodno spomenutim istraživanjima provedenim na javnim asfaltnim cestama i utvrđene su moguće razlike koje se javljaju na makadamskim šumskim cestama.

## 2. Metode i mjesto istraživanja

### 2.1. Opis mjesta istraživanja

Stanje gornjeg ustroja šumskih cesta procijenjeno je pomoću mjerenja vibracija na dijelu šumske ceste u duljini od 300 metara na području Nastavno-pokusnog šumskog objekta Zalesina, Šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Odabrani dio šumske ceste nalazio se na ravnom terenu bez uzdužnog nagiba. Na segmentu šumske ceste se nalaze dvije krivine, jedna na početku, a drugi na kraju trase. Na tom dijelu su zabilježena oštećenja kolnika šumske ceste u pravcima kretanja kotača vozila. Evidentirane su dvije udarne rupe: prva nakon 70 metara od početka ispitne trase u duljini od jednog metra i dubine 10 centimetara od površine planuma šumske ceste, te druga nakon 200 metara od početka ispitne trase u duljini od 0,6 metara i dubine 6 centimetara od površine planuma te ceste.



Slika 2. Udarne rupe na dijelu šumske ceste

### 2.2. Metode istraživanja

Vibracije su mjerene pomoću tablet uređaja Huawei MediaPad 7 Lite s ugrađenim troosnim akcelerometrom MMA8452Q (tablica 1.) i za istraživanje posebno razvijene aplikacije za Android platformu. Takav mjerni sustav korišten je zbog niske nabavne cijene, brzine mjerenja i načina prikupljanja podataka. Naime, prilikom mjerenja vibracija trebalo je izmjeriti relativne vrijednosti vibracija, odnosno njihovu promjenu s obzirom na promjenu stanja gornjeg ustroja šumske ceste. Podaci koji se mjere pomoću razvijene aplikacije su:

- vibracije u sve tri osi (x, y, z)

- lokacija vozila (GPS koordinate)
- brzina [km/h]
- broj satelita
- uzdužni nagib ceste između dvije snimljene točke
- prijeđeni put između dvije snimljene točke [m].

**Tablica 1. Tehničke karakteristike korištenog akcelerometra MMA8452Q (Izvor: Anon 2015)**

Raspon mjerenja, [m/s <sup>2</sup> ]	± 39,24
Osjetljivost, [m/s <sup>2</sup> ]	51,19
Odstupanje osjetljivosti, [%]	± 2,64
Promjena osjetljivosti s obzirom na temperaturu, [%/°C]	± 0,008
Točnost, m/s <sup>2</sup>	± 0,2
Promjena točnosti s obzirom na temperaturu, [(m/s <sup>2</sup> )/°C]	± 0,0015
Raspon radne temperature, [°C]	-40 °C – 85 °C
Raspon frekvencija snimanja podataka, [Hz]	1,56 – 800

Prilikom mjerenja tablet je bio postavljen na vjetrobransko staklo terenskog vozila (Lada Niva). Mjerenja su obavljena višekratnim prolascima vozila (12 prolazaka) istim dijelom šumske ceste u oba smjera pri stalnoj brzini od 20 km/h. Tlak punjenja guma zrakom je iznosio 2,5 bara. U trenutku pokretanja aplikacije uređaj se povezuje s lokacijskim satelitima te automatski počinje snimanje bez obzira na kretanje vozila.

Osim toga, istražen je utjecaj različitih brzina kretanja (20, 40 i 60 km/h) te različitih tlakova guma (2, 2,5 i 3 bara) na vrijednosti vibracija.

Vibracije su mjerene u sve tri osi te je na temelju izmjerenih vrijednosti izračunana WAS (Weighted Acceleration Sum) vrijednost. Tijekom svih mjerenja frekvencija snimanja vibracija bila je 10 Hz, a frekvencija snimanja GPS koordinata bila je 1 Hz. Sva mjerenja su provedena u realnom vremenu. Prikupljeni podaci svrstani su u bazu podataka u MS Excel programu, a za grafički prikaz podataka korišten je računalni program ArcGIS 9.3. Podaci s terena uneseni su u tablice radi lakšega kasnijeg oblikovanja u svrhu njihove statističke obrade. Programski

paket korišten za stvaranje baze podataka bio je Microsoft Office Excel 2007, a statistička obrada podataka provedena je u programskom paketu StatSoft STATISTICA 8.

Pri opisu temeljnih značajki skupova promatranih podataka (neovisne varijable) primijenjena je deskriptivna statistika, gdje su izračunane različite mjere središnje tendencije rasipanja mjernih podataka, a kao najpovoljnije odabrane su medijan i aritmetička sredina sa standardnom devijacijom kao mjerom rasipanja te vrijednosti.

### 3. Rezultati istraživanja

Prvi test se odnosi na mjerenje vibracija pri višekratnim prolascima vozila (12 prolazaka) istim dijelom šumske ceste u oba smjera pri stalnoj brzini od 20 km/h, s tlakom punjenja guma zrakom od 2,5 bara.

Vibracije su mjerene pri frekvenciji od 10 Hz. Kod brzine kretanja vozila od 20 km/h s ukupno 12 prolazaka ukupno su prikupljena 6844 podataka mjerenja vibracija po svakoj osi. Iz podataka je izračunana ukupna vrijednost vibracija (eng. *Vibration Total Value* - VTV) za svako očitavanje.

U tablici 2. prikazani su rezultati mjerenja s osnovnim statističkim vrijednostima. Srednja ukupna vrijednost vibracija je iznosila 9,85 m/s<sup>2</sup> sa standardnom devijacijom od 0,5 m/s<sup>2</sup>, tj. ukupne vrijednosti vibracija bile su u rasponu od 6,6 m/s<sup>2</sup> do 13,2 m/s<sup>2</sup>. Nakon toga je provedena usporedba mjerenja vibracija pri različitim frekvencijama.

Mjerenja pri frekvenciji od 5 Hz su dobivena preuzimanjem svakog drugog mjernog podatka iz podataka ukupne vrijednosti vibracija pri frekvenciji od 10 Hz.

Istim postupkom su određene ukupne vrijednosti vibracija pri frekvenciji od 2 Hz, tj. preuzimanjem svakog petog mjernog podatka iz podataka ukupne vrijednosti vibracija pri frekvenciji od 10 Hz. Određivanje ukupne vrijednosti vibracija pri frekvenciji od 1 Hz izvršeno je preuzimanjem svakog desetog mjernog podatka iz baze podataka ukupne vrijednosti vibracija snimljenih pri frekvenciji od 10 Hz.

Usporedbom osnovnih statističkih pokazatelja uočava se da srednja ukupna vrijednost vibracija ostaje jednaka bez obzira na frekvenciju očitavanja. Standardna devijacija, najveće izmjerene ukupne vrijednosti vibracija i raspon podataka se smanjuju sa

**Tablica 2. Statistički podaci izmjerene ukupne vrijednosti vibracija pri različitim frekvencijama očitavanja**

Br. mjerenja		6484	3241	1293	643
Frekvencija	[Hz]	10	5	2	1
VTV srednja	[m/s <sup>2</sup> ]	9,85	9,85	9,85	9,85
VTV medijan		9,81	9,81	9,82	9,80
VTV najveća		13,2	13,2	12,4	11,5
VTV najmanja		6,6	6,6	8,4	8,9
VTV standardna devijacija		0,50	0,45	0,35	0,28
Vrijeme mjerenja	[s]	648,4	648,2	646,5	643,0
Brzina kretanja	[km/h]	19,99	19,99	20,05	20,16



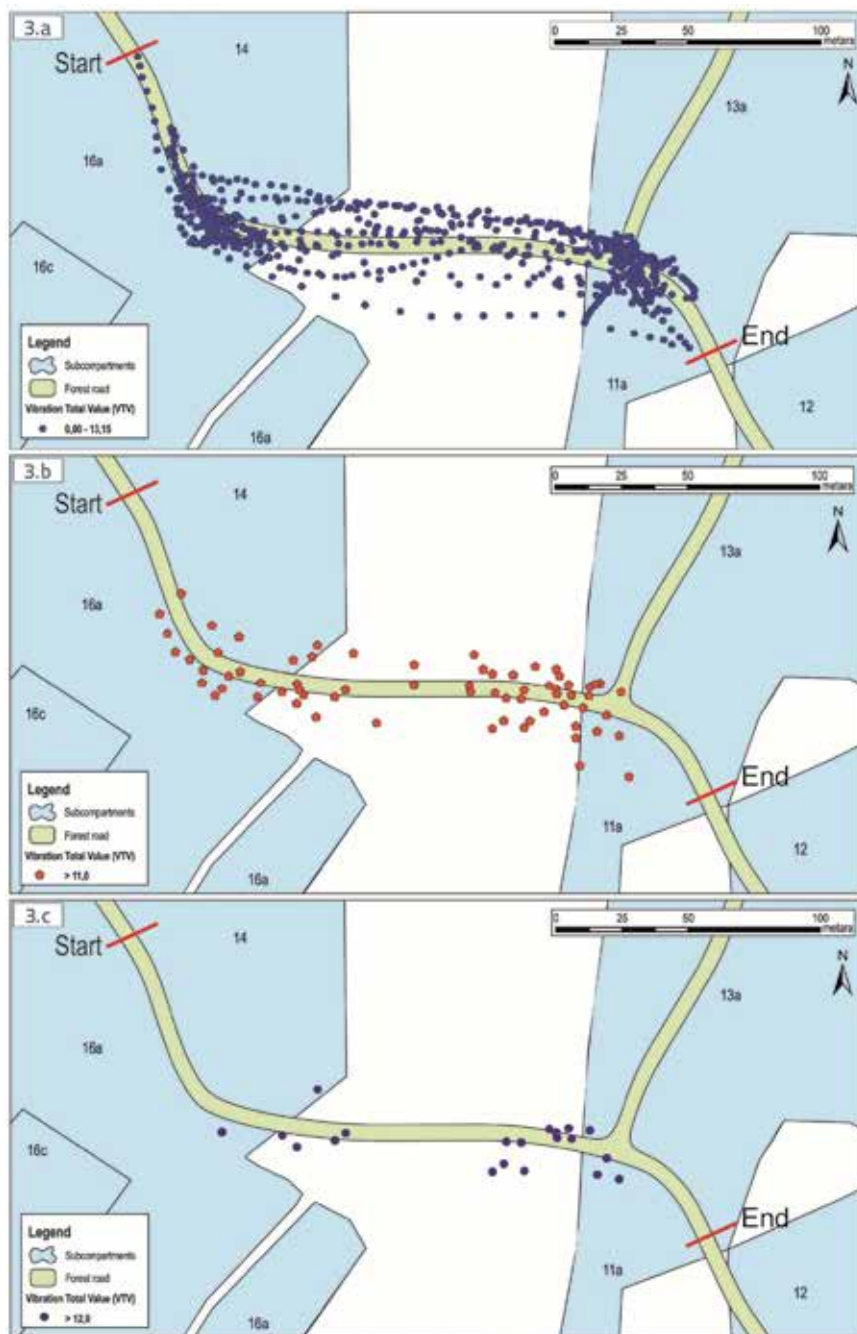
smanjenjem frekvencije očitavanja. Ako pretpostavimo da upravo najveće ukupne vrijednosti vibracija mogu uputiti na oštećenje planuma šumske ceste, tada zaključujemo da se pri frekvenciji očitavanja od 10 Hz mogu najbolje detektirati vršne vrijednosti vibracija.

Strazdins i dr. [21] otkrivaju da postoje značajne razlike u točnosti prikupljenih podataka pri različitim frekvencijama snimanja podataka. Rezultati istraživanja pokazuju da je samo s mjerenjem frekvencije vibracija od 10 Hz moguće povezati vršne vrijednosti s oštećenjima šumske ceste. U tom slučaju, vršne vrijednosti izmjerenih vibracija predstavljaju gornjih 20 % vrijednosti u ukupnom rasponu podataka. Kako je uz svaki mjerni podatak ukupne vrijednosti vibracija povezana GPS koordinata točke mjerenja, podaci su prikazani na karti šumskog područja pomoću računalnog programa ArcGIS 9.3.

Na slici 3.a prikazan je položaj segmenta šumske ceste sa svim mjernim podacima ukupne vrijednosti vibracija pri kretanju vozila s frekvencijom očitavanja od 10 Hz. Vidljivo je veliko rasipanje podataka od trase šumske ceste. Iz grafičkog prikaza na slici 3.a sa svim podacima mjerenja ukupne vrijednosti vibracija je stoga nemoguće odrediti mjesta oštećenja šumske ceste.

Kako je raspon ukupne vrijednosti vibracija pri frekvenciji očitavanja od 10 Hz iznosio od 6,6 m/s<sup>2</sup> do 13,2 m/s<sup>2</sup>, za daljnje razmatranje su prikazane vrijednosti iz gornje trećine raspona podataka, tj. sve ukupne vrijednosti vibracija veće od 12 m/s<sup>2</sup> (slika 3.c). Razlučuje se grupiranje vrijednosti u dva skupa približno oko mjesta na kojima su evidentirane udarne rupe na planumu šumske ceste. Precizno određivanje mjesta oštećenja nije moguće provesti zbog odstupanja GPS koordinata mjernih točaka od trase šumske ceste. Sljedeći korak predstavlja prikaz mjernih podataka ukupne vrijednosti vibracija većih od 12 m/s<sup>2</sup>, tj. vršnih vrijednosti vibracija (slika 3.c). U navedenom ukupnom rasponu mjerna granica ukupne vrijednosti vibracija od 12 m/s<sup>2</sup> do maksimalnih 13,2 m/s<sup>2</sup> predstavlja gornjih 20 % raspona mjernih podataka.

U usporedbi s prijašnjim prikazima sada je mnogo vidljivije grupiranje podataka na mjestima oštećenja planuma šumske ceste. Ujedno na većem oštećenju (udarnoj rupi većih dimenzija)



Slika 3. Prikaz vrijednosti VTV na segmentu šumske ceste

veći je broj vršnih ukupnih vrijednosti vibracija. Sljedećim ispitivanjem se pokušao naći odgovor na utjecaj različitih brzina kretanja (20, 40 i 60 km/h) te različitih tlakova guma (2, 2,5 i 3 bara) na ukupne vrijednosti vibracija pri kretanju vozila istim dijelom šumske ceste. Pri svakom prolasku vozila mijenjala se jedna od varijabli, npr. pri tlaku punjenja guma od 2 bara prvo se vozilo kretalo brzinom od 20 km/h, zatim 40 km/h te 60 km/h. Postupak je ponovljen nakon podizanja tlaka punjenja guma na 2,5 bara, odnosno 3 bara. Frekvencija snimanja je bila 10 Hz.

U tablici 3. su prikazane prosječne ukupne vrijednosti vibracija i standardnih devijacija za različite pokuse s obzirom na tlak punjenja guma i brzinu kretanja vozila. Vidljivo je da se sve vrijednosti povećavaju s povećanjem brzina kretanja i tlaka punjenja guma. Razlozi su u tome pri većim brzinama kretanja dolazi i do većih vrijednosti vibracija strukture vozila koje se također prenose na mjerni uređaj. Pri manjem tlaku punjenja guma od 2 bara, guma je mekša te bolje upija neravnine na šumskoj cesti pa se ne mogu dovoljno precizno odrediti vibracije uzorkovane oštećenjima planuma šumske ceste. Pri krućim gumama s tlakom punjenja od 3 bara ukupne vrijednosti vibracija se povećavaju uslijed gubitka funkcije prijanjanja gume.

**Tablica 3. Statistički podaci izmjerene ukupne vrijednosti vibracija pri različitim brzinama kretanja vozila i tlaka punjenja guma**

Brzina [km/h]	Vrijednosti	Tlak zraka u gumama [bar]		
		2	2,5	3
20	Br. mjerenja	530	514	511
40		271	277	278
60		186	187	184
20	VTV prosječno [m/s <sup>2</sup> ]	9,77	9,85	9,93
40		9,89	9,90	9,96
60		9,91	9,94	10,40
20	VTV standardna devijacija [m/s <sup>2</sup> ]	0,34	0,38	0,43
40		0,65	0,67	0,66
60		0,66	0,67	0,68

#### 4. Rasprava

Na temelju prikazanih rezultata očito je da se može procijeniti stanje šumske ceste pomoću vibracija. Vrijednosti vibracija ovise o brzini kretanja vozila i o tlaku u gumama vozila. To je donekle u skladu s konstatacijama Douangphachanh i Oneyama [11] koji zaključuju da na vrijednosti snimljenih vibracija značajan utjecaj ima brzina kojom se kreće ispitno vozilo, te vrsta vozila i vrsta uređaja kojim se mjere vibracije. Također, Gillespie i dr. [23] te Sayers i dr. [24] navode da točnost mjerenja vibracija izrazito ovisi o vrsti vozila, brzini kretanja vozila, opterećenju vozila (masi), vrsti guma i tlaku u gumama.

Na osnovi provedene analize utjecaja različitih brzina kretanja te različitih tlakova guma na ukupne vrijednosti vibracija pri kretanju vozila radi procjene stanja šumske ceste se stoga preporučuje brzina kretanja vozila od 20 km/h i uz tlak punjenja guma od 2 bara.

Zhao [25] je odredio primjenjive brzine vozila u iznosu od 25 km/h do 90 km/h za mjerenje neravnina na cestama akcelerometrima koji su ugrađeni na osovine vozila prilikom mjerenja na gradskim prometnicama. Jost [26] je napravio mjerenja neravnina na različitim cestama s ispitnim brzinama od 20, 32, 50 i 80 km/h na 49 ispitnih mjesta, pri čemu je koristio najmanju brzinu od 20 km/h na 12 ispitnih mjesta na zemljanim

cestama, kao i na 12 ispitnih mjesta na makadamskim cestama. Mjerenja su provedena na dionicama cesta duljine 320 metara. Na temelju navedenih istraživanja i zabilježenih podataka pri različitim brzinama može se zaključiti da najprikladnija brzina vozila pri mjerenju oštećenja makadamske šumske ceste akcelerometrom iznosi 20 km/h.

Nadalje, mnogi autori prilikom mjerenja profila cesta zaključuju da je potrebno namjestiti tlak zraka u gumama prema preporukama proizvođača bez obzira na tip vozila te smanjiti tlak zraka u gumama tijekom mjerenja na makadamskim cestama. Prema Gillespie i dr. [23], tijekom mjerenja profila kolničke konstrukcije tlak zraka u gumama mora biti podešen na preporučeni tlak koji je definirao proizvođač kako bi se osigurala najbolja točnost mjerenja. Kada tlak zraka u gumi nije blizu optimalne razine koju je odredio proizvođač, rezultati mjerenja pritiska kotača na cestu sve se teže mogu predvidjeti [27]. Utvrđeno je da niži tlak u gumama povećava sposobnost vuče i kočenja na neravnim cestama [28].

Od 1991. godine hrvatsko šumarstvo primjenjuje takozvani revirski sustav upravljanja šumskim područjem, složenu metodu koju provodi samo jedna tvrtka u vlasništvu države, a to su Hrvatske šume d.o.o. Zagreb. Šumski revir je predodređen šumski prostor na kojem šumarski inženjeri provode sve planirane aktivnosti u skladu s planovima gospodarenja šumama, preuzimajući punu odgovornost za njihovo ostvarenje [29]. To podrazumijeva česti, gotovo svakodnevni odlazak inženjera u šumski revir za koji je on odgovoran. U ovom slučaju, terensko vozilo se koristi za kretanje po šumskim cestama. Najčešće vozilo u vlasništvu Hrvatskih šuma je Lada Niva, iako se danas koriste i druga vozila, ali sa sličnim dimenzijama i masama.

Razvoj i primjena metode procjene stanja kolničke konstrukcije šumske ceste s ugrađenim akcelerometrom u vozilu može prikupljati podatke prilikom izvršavanja dnevnih obveza u upravljanju šumama, a mjerenja ne podrazumijevaju dodatne troškove. Istovremeno, mjerenja stanja kolničke konstrukcije šumskih cesta koristit će šumarski stručnjaci kao osnovu za planiranje radova na održavanju šumskih cesta i izračun potrebnih ulaganja.

Prilikom mjerenja vibracija pomoću Android aplikacije te prilikom obrade podataka uočene su pogreške. Najveći problemi se uočavaju oko preciznosti izmjere GPS koordinata. Točnost prikupljanja podataka najviše ovisi o kvaliteti GPS signala. Uz evidentirani zadovoljavajući broj satelita tijekom mjerenja (5 do 6 satelita), javljaju se velika odstupanja koordinata točke mjerenja od trase šumske ceste. Potrebno je napomenuti da su istraživanja provedena tijekom vegetacijskog perioda kada zastor krošanja rubnih stabala uz ispitivani dio šumske ceste može bitno utjecati na točnost izmjere položaja vozila.

Sljedeća pogreška koja je uočena u mjernim podacima jest u vrijednostima prijednog puta i brzine kretanja preko Android aplikacije. Kako se prijedni put i brzina kretanja također obračunavaju pomoću razlike u GPS koordinatama mjernih točaka, također zbog prije navedenog razloga dolazi do

nepouzdanosti izmjere. Zbog toga su prijedeni put i brzina kretanja izmjereni i prikazani na osnovi podataka iz vozila.

Novorazvijena Android aplikacija također mjeri uzdužni nagib šumske ceste između dvije snimljene točke. Kako je istraživanje provedeno na ravnom terenu, nije bilo moguće prosuditi ispravnost zabilježenih podataka u vezi s uzdužnim nagibom šumske ceste. Stoga je potrebno provesti istraživanje i na šumskoj cesti s uzdužnim nagibom. Pretpostavka je da će doći do pogreške mjerenja uslijed računalnog izračuna uzdužnog nagiba na osnovi koordinata mjernih točaka.

Poreške se također očituju kroz zabilježbu krivog načina zapisa podataka. Takav format zapisa nije moguće koristiti prilikom provedbe analize podataka. Količina pogrešnih podataka po pojedinom testu iznosila je ispod 0,5 %. Zbog navedenih pogrešaka, bitno je prije analize napraviti provjeru snimljenih podataka kako bi se izbjeglo dobivanje nerealnih rezultata. Iz tih razloga (uočenih nedostataka), a u svrhu unaprjeđenja aplikacije potrebno je učiniti sljedeće:

- koristiti precizniji GPS uređaj ili izvršiti mjerenja tijekom zimskog perioda kada ne smetaju krošnje rubnih stabala
- ukloniti navedene pogreške krivog zapisa podataka koje se javljaju prilikom snimanja
- omogućiti korisniku aplikacije da samostalno određuje početak i kraj snimanja, a ne da snimanje počinje čim se uređaj spoji s lokacijskim satelitima
- omogućiti korisniku izbor frekvencija snimanja
- iz aplikacije izbaciti snimanje podataka o putu i nagibu, jer se bilježe pogrešni podaci, a samim time se smanjuje i veličina snimljenih datoteka, što pojednostavljuje daljnje analize podataka.

## LITERATURA

- [1] Fertal, D.: Transport intensity in forest hauling road. Zapravy Lesnickeho Vyzkumu. 1994;2, pp. 34-37.
- [2] Šušnjar, M., Horvat, D., Pandur, Z., Zorić, M.: Axle Load Determination of Truck with Trailer and Truck with Semitrailer for Wood Transportation, Croatian Journal of Forest Engineering, 32 (2015) 1, pp. 379-388. Croatian
- [3] Trzcinski, G., Kaczmarski, S.: Estimation of carrying capacity of slag and gravel forest road pavements, Croatian Journal of Forest Engineering, 27 (2006) 1, pp. 27-36. Available from: <http://www.crojfe.com/tr/i/trzcinski.pdf>
- [4] Keller, G., Sherar, J.: Low-Volume Roads Engineering - Best Management Practices Field Guide, US Agency for International Development, 2003.
- [5] Öztürk, T., Şentürk, N.: Analysis of Pavement Construction on a Sample Forest Road - Section in Sariyer Region, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi, Seri A, 59 (2009) 1, pp. 55-70.
- [6] Reissinger, G.: Forest road building over marshy soils. Committee on Forest Working Techniques and Training of Forest Workers, Symposium on Forest Road Construction and Maintenance Techniques, Sess. 9, Sopron (Hungary), 6-8 September 1972, Sopron, Hungary, 1972.
- [7] Dietz, P., Knigge, W., Löffler, H.: Walderschließung, Eine Lehrbuch für Studium und Praxis unter besonderer Berücksichtigung des Waldwegebbaus, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, Deutschland, 1984. German
- [8] Underhill, R.: Life Cycle Maintenance of Low Volume Roads in the Alice Springs Region, PhD thesis, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying, 2004.
- [9] Pentek, T., Nevečerel, H., Ecimović, T., Lepoglavec, K., Papa, I., Tomašić, Ž.: Strategic Planning of Forest Road Network in Croatia - Analysis of Present Situation as Basis of Future Analysis, Nova mehanizacija šumarstva, 35 (2014) 1, pp. 63-78. Croatian, Available from: <http://www.jnms.eu/strategijsko-planiranje-sumskih-prometnica-republici-hrvatskoj-rasclamba-postojecegastanja-podloga-buduce-aktivnosti/>
- [10] Papa, I., Pentek, T., Lepoglavec, K., Nevečerel, H., Poršinsky, T., Tomašić, Ž.: Methodology of development of detailed primary forest traffic infrastructure register as the basis for forest roads maintenance planning and optimization, Šumarski list, (2015) 7-8, pp. 311-328. Croatian, Available from: <http://www.sumari.hr/sumlist/pdf/201503110.pdf>

## 5. Zaključak

Stanje kolničke konstrukcije šumske ceste može se procijeniti pomoću mjerenja vibracija. S obzirom na način gospodarenja šumama u Hrvatskoj i čest prolazak vozilima po šumskim cestama, procjena stanja kolničke konstrukcije na temelju mjerenja vibracija može biti jednostavan i jeftin način prikupljanja podataka.

Na temelju analize utjecaja različitih frekvencija snimanja, brzine vožnje i tlaka zraka u gumama na ukupnu vrijednost vibracija u svrhu procjene stanja kolničke konstrukcije šumske ceste, preporučuje se frekvencija snimanja od 10 Hz i brzina vozila u iznosu od 20 km/h s tlakom zraka u gumama od 2 bara. Međutim, u daljnjem razvoju metode ocjenjivanja pomoću mjerenja vibracija potrebno je istražiti utjecaj različitih tipova vozila na točnost mjerenja. Nadalje, potrebno je istražiti utjecaj različitih pametnih telefona na vrijednosti vibracija i odrediti optimalnu veličinu uzorka (snimanje duljine segmenta šumskih cesta).

Treba istaknuti i neke pogreške i nedostatke koji su uočeni tijekom mjerenja kao što su točnost GPS uređaja te Android aplikacije prilikom snimanja drugih podataka uz vibracije (mjerenje nagiba i udaljenost rute). Prikupljanje podataka uglavnom ovisi o kvaliteti GPS signala. Preporučuje se provedba mjerenja izvan vegetacijskog razdoblja kada krošnje drveća imaju manji utjecaj na kvalitetu primanja GPS signala.

Autori smatraju da će nova metoda osigurati dosljedan i nepristran pristup rangiranju ulaganja u održavanje mreže primarne šumske prometne infrastrukture te da će predstavljati prikladan alat za utvrđivanje održivosti šumskih cesta.

- [11] Douangphachanh, V., Oneyama, H.: A Study on the Use of Smartphones for road Roughness Condition Estimation. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 9, 2013. Available from: <https://pdfs.semanticscholar.org/1458/ee4b0bc04ad62e0173779295d275957138ed.pdf>
- [12] Feng, Z.W., Douglas, R.A.: Logging truck vehicle performance prediction for efficient resource transportation system planning: Computer Modelling Approach. Journal of Forest Engineering, 4 (1993) 2, pp. 7–18.
- [13] Talbot, B., Nitteberg, M.: Using transloading times in determining the effect of reduced road standards on the delivered cost of timber. Proceedings of the FORMEC 2011 Symposium: Pushing the boundaries with research and innovation in forest engineering, Graz, Austria, 2011. p. 7.
- [14] Coulter, E.D., Coakley, J., Sessions, J.: The analytic hierarchy process: a tutorial for use in prioritizing forest road investments to minimize environmental effects. International Journal of Forest Engineering, 17 (2006) 2, pp. 51–69. Available from: <https://journals.lib.unb.ca/index.php/IJFE/article/view/5696/6701>
- [15] Krishna Rao, K.V.: Methods of Measuring Distress. Transportation Systems Engineering, Department of Civil Engineering, IIT Bombay, 2012. pp. 11.
- [16] Dawson, A., Killer, D.: Roads under timber traffic. University of Nottingham & Forestry Civil Engineering, 2009.
- [17] Svenson, G.: The impact of road characteristics on fuel consumption for timber trucks. In Ackerman P, Ham H, Gleasure E (eds) Proceedings of 4<sup>th</sup> Forest Engineering Conference, Innovation in Forest Engineering – Adapting to Structural Change. Stellenbosch University, 2011.
- [18] González, A., O'Brien, E.J., Li, Y.Y., Cashell, K.: The use of vehicle acceleration measurements to estimate road roughness, Vehicle System Dynamics, 46 (2008) 6, pp. 483–499.
- [19] Eriksson, J., Girod, L., Hull, B., Newton, R., Madden, S., Balakrishnan, H.: The pothole patrol: using a mobile sensor network for road surface monitoring, Paper Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies presented at the Sixth International Conference on Mobile System, Applications and Services, Breckenridge, Colorado, United States, 17-20 June 2008.
- [20] Mohan, P., Padmanabhan, N.V., Ramjee, R.: Rich Monitoring of Road and Traffic Condition using Mobile Smartphones, Proceedings of the 6<sup>th</sup> ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems, 2008. pp. 323–336.
- [21] Strazdins, G., Mednis, A., Kanonirs, G., Zviedris, R., Selavo, L.: Towards Vehicular Sensor Networks with Android Smartphones for Road Surface Monitoring, Paper presented at the 2<sup>nd</sup> International Workshop on Networks of Cooperating Objects, Chicago, USA, April 11 2011.
- [22] Lanjewar, B.U., Sagar, R., Pawar, R., Khedkar, J., Gosavi, K.: Road Bump and Intensity Detection using Smartphone Sensors, International Journal of Innovative Research in Computer, 4 (2016) 5, pp. 9185-9192.
- [23] Gillespie, T.D., Sayers, M.W., Segel, L.: Calibration of Response-Type Road Roughness Measuring Systems, I' NCHRP Rept. No. 228, 1980.
- [24] Sayers, M.W., Gillespie, T.D., Paterson, W.D.: Guidelines for the Conduct and Calibration of Road Roughness Measurements, World Bank Technical Paper No. 46, The World Bank, Washington DC, 1986.
- [25] Zhao, Y.: Road condition and road roughness assessment by tire/road interaction using microphone, dynamic tire pressure sensor with an axle axxelerometer. Dissertation, Northeastern University Boston, Massachusetts, pp. 1-159, 2015.
- [26] Jost, B.: IRRE International Road Roughness Experiment (IRRE): Precursor to International Roughness Index (IRI). Presentation at the international workshop Advanced Pavement Analysis and Evaluation, Rowan University, USA, pp. 1-26, 2012.
- [27] Rose, J.G., Guenther, T.E.: Advanced Pavement Analysis and Evaluation, Research report, Kentucky transportation Center, USA, pp.1-54, 2009.
- [28] Woodrooffe, J.H.: Effects of tire inflation pressure and CTI on road life and vehicle stability, Semantic Scholar, pp. 203-221, 2010.
- [29] Šporčić, M., Bartolčić, J., Vondra, V., Bakarić, M., Landekić, M., Martinić, I.: Ocjena revirnog sustava gospodarenja šumama u Hrvatskoj temeljem stavova šumarskih stručnjaka, Nova mehanizacija šumarstva, 34 (2013), pp. 61-71.