

Ocjena indeksa kotača kao pokazatelja okolišne pogodnosti forvardera

Marko Zorić, Zdravko Pandur, Željko Šantek, Marijan Šušnjar

Nacrta – Abstract

U ovom je radu prikazano istraživanje indeksa kotača kao parametra koji opisuje okolišnu prihvatljivost međudjelovanja kotača vozila i tla tijekom privlačenja (izvoženja) drva u sastojini. Istraživanje je provedeno u nizinskoj šumi hrasta lužnjaka.

Poslije naplodboga sijeka i izrade drva te tijekom i nakon njegova izvoženja mjerenjem su određene:

⇒ mase forvardera prijenosnom vagom

⇒ dimenzije guma

⇒ nosivost tla konusnim penetrometrom.

Na temelju ovih mjerenja izračunat je indeks kotača. Okolišna pogodnost kretanja ovoga forvardera po bespuću ocijenjena je na temelju preporuka projekta »EcoWood« pomoću kvocijenta $CI \cdot NGP^{-1}$.

Rezultati pokazuju da je, u ovom slučaju, indeksom kotača dobro procijenjena kretnost vozila, ali da rezultate određivanja penetracijske značajke, pa time i izračuna konusnoga indeksa karakterizira veliko rasipanje podataka. Vjerojatni je uzrok znatna nehomogenost šumskoga tla pa je stoga potrebno naći pogodnije metode mjerenja nosivosti i zbijanja šumskoga tla.

Glavne riječi: privlačenje drva, forvarder, okolišna pogodnost, indeks kotača

1. Uvod – Introduction

Šumska vozila zbog svoga stalnoga dodira s tlom te poglavito zbog kretanja po sastojini mogu oštetiti šume i šumsko tlo pa su velika opasnost za oboje. Ipak je to djelovanje najviše ograničeno na tlo, a tek kod nekih radova ili njihova dijela utječu i na vegetaciju. Pritom se razlikuju dva pojma:

- ⇒ gaženje tla, definirano kao dio površine po kojoj se kreću vozila u odnosu na ukupnu površinu sastojine
- ⇒ zbijanje tla, određeno kao njegova obujamna deformacija.

Dok se na gaženje tla najviše može utjecati pripremnom radom i drugim organizacijskim mjerama, na zbijanje tla odlučujući utjecaj imaju upravo značajke vozila i stanje tla.

Horvat je (1995) istraživao prirodni oporavak, tj. stupanj zbijenosti tla kao jednoga od mnogih pokazatelja oporavka nakon višekratnoga prolaza teškoga forvardera 1984. godine i usporedio s istim takvim mjerenjem nakon 10 godina. Temeljem provedenih

mjerenja i analiza zaključio je da se ispitivano tlo nakon 10 godina prirodnoga oporavka, a bez prometanja vozila, potpuno oporavilo te pokazuje zadovoljavajuću razinu zbijenosti.

Uz nepobitno djelovanje vozila tijekom privlačenja na zbijanje tla, pa i na prirast biljaka, treba iznijeti zaključke Wasterlunda (1989), koji smatra da se dobrom organizacijom, izborom odgovarajućega stroja te dobrom izobrazbom rukovatelja oštećenja mogu svesti na približno 5 % u odnosu na ustanovljenih 10 do 15 % izgažene površine.

U nizinskim šumama Republike Hrvatske, koje karakterizira prekomjerno vlaženje tla, kako to navode Anić (2001) i Poršinsky (2005), za izvoženje drva služe posebna šumska vozila, forvarderi, koji su uglavnom namijenjeni za izvoz drva pri oplodnim sječama, tj. u zimskom razdoblju (od 1. listopada da 30. ožujka). Zbog značajne ukupne mase natovarenih forvardera (za srednje veliki forvarder do 30 tona) i često nepovoljne nosivosti tla u zimskom razdoblju mogu nastati oštećenja šumskoga tla, koja se očituju deformacijom tla – kolotrazima te njegovim zbijanjem.

2. Problem – Scope of research

Učinak šumskih vozila ovisi o prometnosti (prohodnosti) terena (tla) i kretnosti vozila. Prometnost nekoga predjela sastoji se od nekoliko terenskih čimbenika i čimbenika tla. Teren je često opisan nagibom i pojavnošću prepreka. Čimbenici tla služe za opis reakcija tla ispod opterećenoga kotača. Za opis reakcije tla potrebna su dva podatka: deformacija i zbijanje šumskoga tla pod utjecajem vertikalne sile i reakcija čestica tla na utjecaj horizontalne sile (Saarilahti 2002). Prometnost tla nema opći fizikalni pristup ako ne sadrži pokazatelje i tla i vozila (Baker 1960). Horvat (1993) smatra da uobičajeno upotrebljavani izrazi poput prohodnosti vozila, indeks mobilnosti vozila i sl. procjenjuju sposobnost vozila da prođe po nekom terenu bez obzira na posljedice, te stoga nedovoljno opisuju okolišnu sastavnicu sustava vozilo – tlo.

Razvojem empirijske metode proučavanja složenoga sustava kotač – tlo, odnosno vozilo – tlo, u literaturi poznate kao metoda WES (*Waterways Experimentation Station, US Army Engineering Corps*), za povezivanje značajki vozila i deformacije tla s nosivosti tla upotrebljava se indeks kotača.

$$N_k = \frac{CI \times A}{G_k} \quad (1)$$

Indeks je kotača bezdimenzijski parametar (faktor) koji opisuje međudjelovanje opterećenoga kotača i tla. Određen je odnosom dodirnoga tlaka kotača i tla te nosivošću tla procijenjene mjerenjem tvrdoće tla konusnim penetrometrom. U praktičnoj primjeni upotrebljava se normirana vrijednost mjerenja otpora prodiranja konusa (ASAE EP524 1999) na dubini

od 15 cm nazvana konusni indeks (CI). Zbog nehomogenosti strukture tla Ronai (1983), Horvat (1993, 1994), Poršinsky (2005), Pandur i dr. (2010), Horvat i dr. (2011) primjećuju veliko rasipanje podataka između repeticija izmjere prodirnih značajki.

Pogodnost empirijske metode potvrđuje i razredba terena za izvođenje šumskih radova koju donosi projekt *EcoWood* (Owende i dr. 2002, Ward i Owende 2003) prikazan u tablici 1. Ova se razredba terena temelji na mehaničkim svojstvima tla (CI, E, τ), a značajku vozila određuje njegovo pripadajuće dopušteno opterećenje tla (NGP), iskazano nominalnim tlakom na tlo (Mellgren 1980). Horvat i dr. (2010) zbog nedostatka korištenja NGP-a podatke koji su korišteni u razredbi terena *EcoWood* nadopunjavaju s količnikom $CI \cdot NGP^{-1}$.

Poršinsky i Horvat (2005) te Šušnjar i dr. (2006) istražuju mogućnost korištenja indeksa kotača za procjenu okolišne pogodnosti forvardera. Za njegovo izračunavanje koriste teret teorijski, pravilno raspoređen u tovarnom prostoru forvardera, koji odgovara tehničkoj nosivosti forvardera te zaključuju:

⇒ »Indeks kotača definiran kao odnos između konusnoga indeksa tla i tlaka ispod kotača vozila, odnosno definiran kao faktor koji obuhvaća nosivost tla, opterećenja kotača te dimenzije i elastične značajke kotača, dobro je polazište za ocjenu okolišne pogodnosti kotačnih šumskih vozila za privlačenje drva.

⇒ Granična vrijednost indeksa kotača koja definira dobru kretnost vozila pokazala se i 'oštrijim' kriterijem od one koju određuje granična dubina kolotruga.

Tablica 1. Razredba tla prema projektu ECOWOOD

Table 1 EcoWood soil classification

Čvrstoća (nosivost) tla Soil strenght		Parametri čvrstoće tla Soil strength parameters			Dopušteni nominalni tlak vozila na tlo Allowed vehicle nominal ground preassure	Količnik Ratio $\frac{CI}{NGP}$
		Konusni indeks Cone Index	Modul elastičnosti Modul E	Otpor tla na smicanje Shear strenght		
Razredi Classes	Opis tla Soil description	CI, kPa	E, MPa	τ , kPa	NGP, kPa	
1	Čvrsto tlo Strong soil	> 500	> 60	> 60	> 80	> 6,25
2	Osrednje čvrsto tlo Average soil	300 – 500	20 – 60	20 – 60	60 – 80	5 – 6,25
3	Meko tlo Soft soil	< 300	< 20	< 20	40 – 60	< 5
4	Vrlo meko tlo Very soft soil	<< 300	<< 20	<< 20	< 40	<< 5

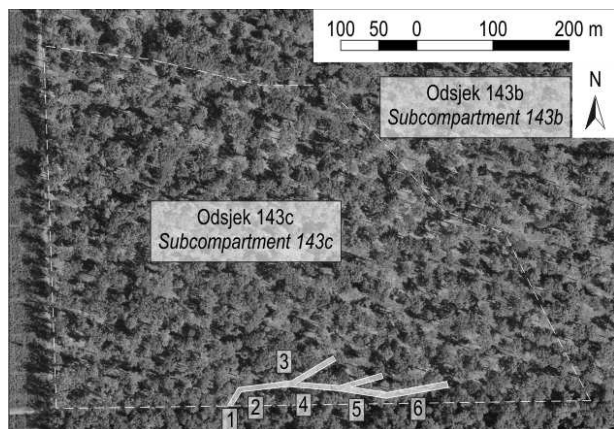
- ⇒ Temeljni mjeriteljski problem pri određivanju indeksa kotača – mjerenje tlaka ispod kotača vozila – može se zadovoljavajuće riješiti primjenom nekoga od poluempirijskih izraza.
- ⇒ Analiza indeksa kotača kao parametra kojim se može procijeniti okolišna pogodnost šumskih vozila za privlačenje drva, treba se dalje nastaviti kvantitativnim povezivanjem istraživanja djelovanja vozila na tlo i sastojinu i indeksa kotača.«

Prema tomu, jednostavnim mjerenjem konusnog indeksa te primjenom neprekidno kompliciranih poluempirijskih izraza, uz poznavanje raspodjele mase po osovinama vozila, može se relativno brzo izračunati indeks kotača te na njegovu temelju ocijeniti okolišna pogodnost nekoga šumskoga kotačnoga vozila.

Ciljevi su ovoga rada da se ustanovi stvarna raspodjela težine (mase) po kotačima (osovinama) forvardera, da se odredi tlak ispod kotača preko poluempirijskih izraza za izračunavanje tlaka ispod kotača, da se mjerenjem konusnog indeksa (CI) odredi promjena penetracijskih svojstava tla zbog povećanja opterećenja te na temelju izračunatoga indeksa kotača procijeni okolišna pogodnost forvardera, i to za slučaj realnoga privlačenja drva forvarderom nakon oplodnoga sijeka.

3. Materijal i metode – *Material and methods*

Istraživanje je obavljeno na području UŠP Vinokovci, šumarija Otok, GJ »Slavir« u 143c odsjeku. To je nisko zemljište, u sjeveroistočnom dijelu malo povišeno. Tlo je u odsjeku močvarni glejni (euglej)-hipoglej. Euglej je pretežito glinovito zemljište, trajno vlažno na kojem biljkama nedostaje kisika pa u prirodnim



Slika 1. Položaj mjernih mjesta u sastojini
Fig. 1 Position of measurement sites in the stand

uvjetima na takvim zemljištima rastu samo one biljke koje podnose nedostatak kisika (npr. poljski jasen, hrast lužnjak).

Prilikom prikupljanja podataka o stanju tla korišten je, prema normi ASAE S313.3 (1999), digitalni oenetroetar Eijkelkamp Penetrologger (slika 2) s konusom površine presjeka baze 2 cm² i vršnim kutom 30°.

Za određivanje stvarnoga opterećenja na kotačima forvardera Valmet 840.2 u ovom istraživanju korišten je prijenosni sustav vaga WLS 101/R2K (»BARK system-und Wiegetechnik GmbH & CO.KG«), čije umjeravanje i razvoj opisuju Bosner i dr. (2008).

Pri mjerenju osovinskih opterećenja vage su bile umetnute u kovinsku platformu, na koju je nailazio forvarder, kako bi se zaštitile od oštećenja te kako bi se forvarder što preciznije postavio na vage da se smanje pogreške pri mjerenju (slika 3).

Objekt je ovoga istraživanja forvarder Valmet 840.2. (slika 4). S gledišta ekonomske upotrebe zahjev je hrvatskoga šumarstva forvarder nosivosti do 14 t i podiznoga momenta hidraulične dizalice od



Slika 2. Penetriranje
Fig. 2 Penetration



Slika 3. Prijenosne vage ugrađene u kovinsko kućište
Fig. 3 Portable scales inside metal case

100 kNm, kojim se osigurava utovar i izvoženje trupaca velikih dimenzija iz sječina glavnoga prihoda (Horvat i Poršinsky 2000). Tijekom povijesti proučavanja forvardera razvijene su mnoge razredbe prema kojima se forvarderi dijele u skupine prema neto masi, nosivosti i bruto masi (Poršinsky 1997). Prema najnovijoj razredbi forvardera, prema nosivosti koju daje Brunberg (2004), forvarder istraživani u ovom radu pripada skupini srednjih forvardera.

Jedna od važnih sastavnica ovoga istraživanja jest određivanje dimenzija guma forvardera, prikazanih u tablici 2.

Tablica 2. Prikaz modela i veličina guma istraživanih vozila
Table 2 Review of used tyres

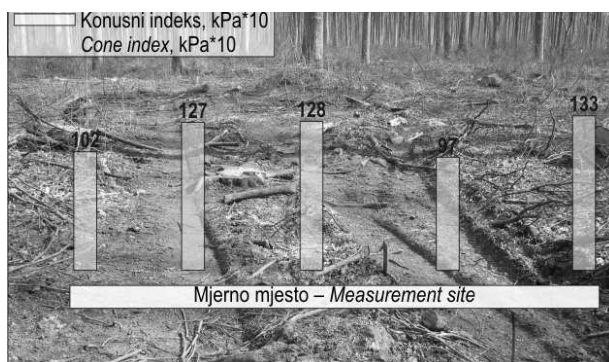
Pozicija kotača <i>Tyre position</i>	Model gume <i>Tyre model</i>	Polumjer, r <i>Radius, r</i>	Širina, b <i>Width, b</i>	Progib, δ <i>Deflection, δ</i>	Dodirna površina <i>Contact area</i> <i>A = r × b</i>
		m	m	m	m ²
Forvarder - Forwarder					
Prednja - Front	NOKIAN TRS L - 2 600/65 - 34	0,78	0,601	0,05	0,469
Bogi - Bogie	NOKIAN TRS LS - 2 600/55 - 26.5	0,66	0,6	0,02	0,396



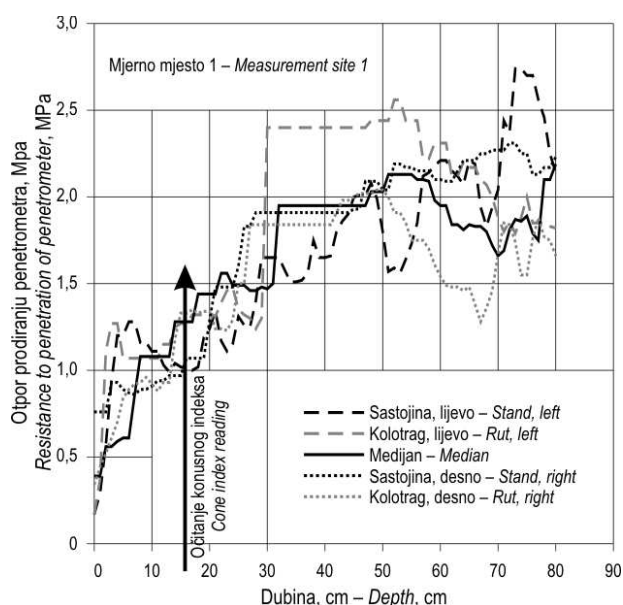
Slika 4. Istraživani forvarder Valmet 840.2 u radu
Fig. 4 Researched forwarder Valmet 840.2

4. Rezultati istraživanja – Research results

Konusni indeks u odsjeku 143c mjeren je na 6 mjernih mjesta (slika 1). Na svakom je mjestu mjereno 5 puta penetrometrom. Mjerenje je obavljeno okomito na kolotrag, a shemu mjerenja na jednom mjernom mjestu s iskazom rezultata za mjerno mjesto 1 (vrata 1) pokazuje slika 5.



Slika 5. Način mjerenja i iskaz rezultata za mjerno mjesto 1
Fig. 5 Principle of measuring and results for measurement site 1



Slika 6. Prodirne krivulje na mjernom mjestu 1
Fig. 6 Penetration curve for measurement site 1

Rezultati tih mjerenja su prodirne krivulje – po 5 za svako mjerno mjesto, a na slici 6 su prikazani rezultati za mjerno mjesto 1. Prema standardu, iz dijagrama na slici 6, očitane su vrijednosti konusnoga indeksa na 15 cm dubine. Konusni indeks za sastojinu u istraživanom odsjeku iznosio je 973 kPa – medijan sveukupnih mjerenja. Prema *EcoWood* klasifikaciji terena tlo se sastojine može svrstati u (jako) čvrsto. To znači da je dopuštena najveća vrijednost nominalnoga tlaka veća od 80 kPa.

Nakon sječe i izrade forvarderom je izvezeno iz odsjeka 6 tura. Ukupni obujam tovara mjeran standardnom šumarskom metodom iznosio je 74,52 m³ obloga drva. Vaganjem forvardera opisanom meto-

dom ustanovljena je ukupna masa prevezenoga drva od 68 020 kg. Prosječna masa opterećenoga forvardera iznosila je 27 340 kg.

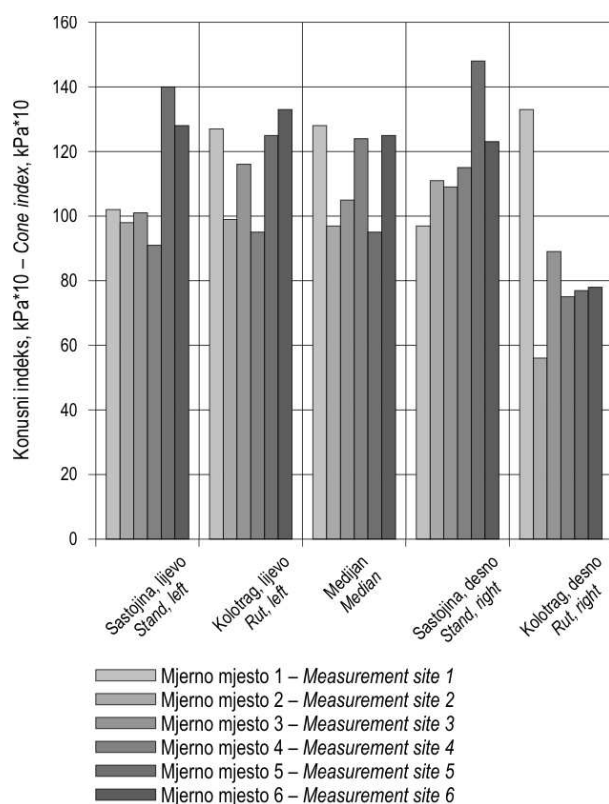
Na temelju izraza za indeks kotača prikazanoga u poglavlju »Materijali i metode« te izmjerene raspodjele masa forvardera i izmjerenoga konusnoga indeksa tla sastojine izračunati indeksi kotača prikazani su u tablici 3. Za prednji kotač izračunata je samo jedna vrijednost jer se masa na prednjoj osovini opterećenoga i praznoga forvardera neznatno razlikuju. Iz tablice 3 razvidno je da za ispitivani forvarder najveći indeks kotača i najbolju kretnost ima njegov neopterećeni bogi sustav 19,82, a najlošiju kretnost opterećeni bogi sustav s indeksom kotača 9,01.

Iz tablice 3 zapaža se da prednji kotači i kotač bogi osovine natovarenoga forvardera imaju nominalni tlak na tlo veći od 80 kPa, i to za približno 10 % prednji kotač (89,57 kPa) te gotovo 40 % kotač bogi osovine (108,01 kPa). Na temelju *EcoWood* razredbe terena može se tvrditi da se na jako čvrstom tlu sastojine (CI = 973 kPa) može očekivati kretanje prednjih kotača bez bitnih negativnih posljedica, dok se za kotače bogi osovine natovarenoga forvardera to ne može tvrditi sa sigurnošću. Ako se izračunaju indeksi kotača, tada se dobiva numerički parametar koji kvantitativno bolje opisuje kriterij kretnosti. Tako se prema izračunatim indeksima kotača (10,86 i 9,01) može s dovoljnom sigurnosti tvrditi da će posljedice kretanja prednjih kotača punoga i praznoga forvardera te kotača bogi osovine natovarenoga forvardera biti u prihvatljivim granicama. Bogi kotači praznoga forvardera s nominalnim tlakom od 49,09 kPa te indeksom kotača od gotovo 20 neće oštećivati tlo sastojine.

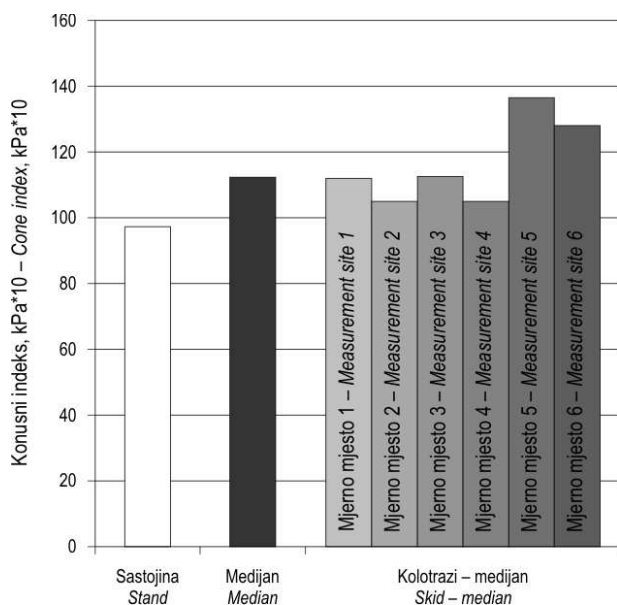
Na slici 7 prikazane su vrijednosti konusnoga indeksa (CI) za sva istraživana mjerna mjesta, dok su

Tablica 3. Vrijednosti indeksa kotača
Table 3 Values of cone index

	Prednji kotač, forvarder prazan/pun <i>The front wheel, Forwarder empty/full</i>	Kotač bogi osovine, forvarder prazan <i>Bogie wheel axle, Forwarder empty</i>	Kotač bogi osovine, forvarder pun <i>Bogie wheel axle, Forwarder full</i>
CI, konusni indeks, kPa <i>CI, Cone index, kPa</i>	973	973	973
G, opterećenje kotača, kN <i>G, Wheel load, kN</i>	42,08	19,44	42,77
A, dodirna površina, m ² <i>A, Contact area, m²</i>	0,469	0,396	0,396
NGP, nominalni tlak na podlogu, kPa <i>NGP, Nominal ground pressure, kPa</i>	89,57	49,09	108,01
N _k , Indeks kotača <i>N_k, Wheel numeric (Mellgren)</i>	10,86	19,82	9,01



Slika 7. Vrijednosti konusnoga indeksa (CI) na dubini od 15 cm
Fig. 7 Values of cone index at the depth of 15 cm



Slika 8. Prikaz prosječnih vrijednosti konusnoga indeksa (CI)
Fig. 8 Average values of cone index

na slici 8 prikazane prosječne vrijednosti konusnoga indeksa (CI) za sastojinu, sredinu između kolotruga te kolotruga na svim mjernim mjestima.



Slika 9. Ilustracija dubine kolotruga
Fig. 9 Illustration of rut depth

Broj prolaza forvardera smanjuje se od mjernoga mjesta 1 do mjernoga mjesta 6. Preko mjernoga mjesta 1 forvarder je prošao 6 puta prevezavši drvo ukupne mase 68 020 kg. Iz slika 7 i 8 zapaža se da, bez obzira na broj prolaza forvardera, ne dolazi do značajnije obujmne deformacije šumskoga tla, tj. njegova zbijanja. Ta je činjenica suprotna očekivanjima, jer bi se konusni indeks kolotruga i sastojine trebao značajnije razlikovati i razlika bi se trebala povećavati s obzirom na broj prolaza forvardera. Tu pretpostavku potvrđuje usporedba vrijednosti konusnih indeksa tla sastojine i tla u kolotrazima na svim mjernim mjestima jer se ne zapaža bitno povećanje konusnih indeksa u kolotrazima, kao i njihove dubine (slika 9).

Tako je potvrđeno očekivanje da će kretanje forvardera po tako čvrstom tlu biti u prihvatljivim granicama doneseno na temelju nominalnih tlakova na tlo te pripadajućih indeksa kotača.

Treba ponovo istaknuti činjenicu da zbog nehomogenosti šumskoga tla i njegove slojevitosti i isprepletenosti korijenjem šumskoga bilja, grmlja i drveća penetracijske krivulje, pa time i konusni indeksi iskazuju veliko rasipanje vrijednosti.

5. Zaključak – Conclusion

Dobivenu visoku vrijednost indeksa kotača ($N_k > 6,25$), znači i ocjena dobre kretnosti forvardera potvrđena je činjenicom da nije ustanovljeno znatno povećanje zbijanja tla ni nakon 6 prolazaka punoga forvardera prosječne mase 27 340 kg i isto toliko praznoga forvardera prosječne mase 16 003 kg. S tim u suglasju je i mala zapažena dubina kolotruga.

Ponovno je ustanovljeno da izmjerene penetracijske krivulje i vrijednosti konusnoga indeksa poka-

zuju znatno rasipanje. Nehomogenost šumskoga tla (slojevitost, mreže korijenja i sl.) znatno ometa procjenu čvrstoće (nosivosti) tla konusnim penetrometrom. Stoga nije preporučljivo koristiti penetrometar s malim brojem ponavljanja mjerenja, tj. prihvatiti činjenicu da penetracijske značajke treba mjeriti »toliko puta koliko je to moguće«, ma što to značilo. Zbog toga je potrebno tražiti pogodnije metode mjerenja nosivosti i zbijanja šumskoga tla.

Iako nije bio predmet istraživanja, zapaža se da je pri izvoženju tehničke oblovine i višemetarskoga drva forvarder bio opterećen ispod nazivne nosivosti zbog nedovoljne iskorištenosti tovarnoga prostora zbog različitih dimenzija (pogotovo duljina) i zakrivljenosti transportiranoga drva.

6. Literatura – References

Anić, I., 2001: Uspijevanje i pomlađivanje sastojina poljskog jasena (*Fraxinus angustifolia* Vahl.) u Posavini. Disertacija, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 1–197.

ASAE, 1999: Soil Cone Penetrometer (ASAE S313.3 FEB99), ASAE Standards 2000, 831–833.

ASAE, 1999: Procedures for Using and Reporting Data Obtained with the Soil Cone Penetrometer (ASAE EP542 FEB99), ASAE Standards 2000, 986–989.

Bekker, M. G., 1960: Off-the-road locomotion, The University of Michigan Press, 1–215.

Bosner, A., S. Nikolić, Z. Pandur, D. Benić, 2009: Razvoj i umjeravanje prijenosnog sustava za mjerenje osovinskih opterećenja vozila – mjerenja na forvarderu. Nova meh. šumar. 28(1):1–15.

Brunberg, T., 2004: Underlag till produktionsnormer för skotare (Productivity-norm data for forwarders). Redogörelse 3: 1–12.

Horvat, D., 1993: Prilog proučavanju prohodnosti vozila na šumskom tlu. Disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 1–234.

Horvat, D. 1995: Natural recovery of damaged forest soil 10 years after wood transportation by forwarder (Measurement with cone penetrometer). Meh. šumar. 20(3): 129–135.

Horvat, D., T. Poršinsky, 2000: Forwarder Performance on Hard and Soft Soil, XXI IUFRO World Congress, Kuala Lumpur, Malaysia. Proceedings of a Symposium organized by IUFRO Group 3.11.00, str. 67–73.

Horvat, D., Z. Pandur, M. Šušnjar, S. Nikolić, M. Zorić, 2011: Okolišna pogodnost dviju metoda mehanizirane uspostave šumskog reda. Croatian Journal of Forest Engineering 32(1): 389–399.

Mellgren, P.G., 1980: Terrain Classification for Canadian Forestry. Canadian Pulp and Paper Association, 1–13.

Owende, P. M. O., J. Lyons, R. Haarlaa, A. Peltola, R. Spinelli, J. Molano, S. M. Ward, 2002: Operations protocol for Eco-efficient Wood Harvesting on Sensitive Sites. Project ECOWOOD, Funded under the EU 5th Framework Project (Quality of Life and Management of Living Resources) Contract No. QLK5-1999-00991 (1999–2002): 1–74.

Pandur, Z., D. Horvat, M. Šušnjar, H. Nevečerel, I. Stankić, 2010: Environmental evaluation of wood residues utilization. 43rd International symposium FORMEC 2010. »Meeting the Needs of the Society and the Environment«, July 11–14, 2010, Padova – Italy, CD.

Poršinsky, T., 1997: Određivanje položaja Kockums 850 i Timberjack 1210 u obitelji forvardera morfološkom rasčlambom. Mehanizacija šumarstva 22(3): 129–139

Poršinsky, T., 2005: Djelotvornost i ekološka pogodnost forvardera Timberjack 1710B pri izvoženju oblovine iz nizinskih šuma Hrvatske. Disertacija, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 1–170.

Poršinsky, T., Horvat, D., 2005: Indeks kotača kao parametar procjene okolišne prihvatljivosti vozila za privlačenje drva. Nova meh. šumar. 26: 25–38.

Poršinsky, T., Stankić, I., Bosner, A., 2011: Djelotvorno i okolišno prihvatljivo izvoženje drva forvarderom temeljem analize nominalnoga tlaka na podlogu. Croat. j. for. eng. 31(1): 345–356.

Ronai, D. M., 1983: Teorija kretanja van tvrdih puteva. Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, 1–324.

Saarilahti, M. 2002a: »Soil interaction model. Project deliverable D2 (Work package No. 1) of the Development of a Protocol for Ecoefficient Wood Harvesting on Sensitive Sites (ECOWOOD)«, EU 5th Framework Project (Quality of Life and Management of Living Resources) Contract No. QLK5-1999-00991 (1999–2002), 1–87.

Šušnjar, M., Poršinsky T., Horvat, D., Pentek, T., Tomašić, Ž., 2006: Estimation of environmental acceptability of forwarder by wheel numeric, 39th International symposium FORMEC 2006, 24–28 September 2006, Sofia, Bulgaria, Proceedings, 207–217.

Ward, S. M., Owende, P. M. O., 2003: Development of a protocol for eco-efficient wood harvesting on sensitive sites. Proceedings of the 2nd International Scientific Conference »Forest and Wood-Processing Technology vs. Environment – Fortechenvi Brno 2003«, May 26–30, Brno, Czech Republic, Mendel University of Agriculture and Forestry Brno & IUFRO WG 3.11.00, 473–482.

Wästerlund, I. 1989: Effect of damage on the newly thinned stand due mechanized forest operations, Proceedings of the ECE/FAO/ILO/IUFRO Seminar on the Impact of mechanization of forest operations to the soil, Louvain-la-Neuve, 165–177.

Abstract

Rating of Wheel Index as an Indicator of Environmental Viability of Forwarders

This paper presents the investigation of wheel index as the parameter describing the environmental acceptability of interaction between the vehicle wheel and soil during timber forwarding (extraction) in the stand. In the Croatian lowland forests, characterized by excessive soil moisture, as stated by Anić (2001) and Poršinsky (2005), special forest vehicles, forwarders, are used for timber extraction, mainly intended for timber extraction in seeding fellings i.e. during winter (from Oct. 1 to March 30). Due to significant total mass of loaded forwarders (a medium large forwarder up to 30 tons) and frequently unfavorable soil strength in winter period, forest soil damage can occur in the form of soil deformation – formation of wheel ruts and soil compaction.

In an empirical method developed for investigating the complex wheel-soil system, or vehicle-soil system, in literature known as WES method (Waterways Experimentation Station, US Army Engineering Corps), the wheel index is used for correlating the characteristics of the vehicle and soil deformation with the soil strength. In practice, a standardized value is used for measuring the resistance of cone penetration (ASAE EP524 1999) at the depth of 15 cm called cone index (CI). Due to non-homogeneity of soil structure, Ronai (1983), Horvat (1993, 1994), Poršinsky (2005), Pandur et al. (2010), Horvat et al. (2011) noticed high data dispersion among repeated measurements of penetration characteristics.

The suitability of empirical method is also confirmed by terrain classification for performing forest operations developed by EcoWood Project (Owende et al. 2002; Ward and Owende 2003) shown in Table 1.

The objectives of this paper are to establish the actual distribution of forwarder weight (mass) by wheels (axles), determine the wheel pressure using semi-empirical expressions for the calculation of wheel pressure, determine the change of soil penetration characteristics caused by the increase of load by measuring the cone index (CI), and on the basis of the calculated wheel index estimate the environmental viability of forwarders in case of the actual timber forwarding after seeding felling.

For collecting data on soil condition, digital penetrometer Eijkelkamp Penetrologger (Fig. 2) was used with the cone base cross-section area of 2 cm² and point angle of 30°, in accordance with ASAE S313.3 (1999) standard.

For determining the actual wheel load of the Valmet 840.2 forwarder, in this research a portable scale system WLS 101/R2K was used (BARK system-und Wiegetechnik GmbH & CO.KG), whose calibration and development were described by Bosner et al. (2008). When measuring the axle loads, the scales were inserted into the metal platform, on which the forwarder was driven, so as to protect them from damage and in order to position the forwarder as precisely as possible on the scales to minimize the measurement error as shown in Fig. 3.

In Subcompartment 143c, the cone index was measured at 6 measurement sites (Fig. 1). At each site, 5 measurements were carried out by penetrometer. The measurement was performed vertically on wheel rut, and the measurement scheme at one measurement site with the display of the result for the measurement site 1 (door 1) is presented in Fig. 5.

The results of these measurements are the penetration curves – 5 for each measurement site, and Fig. 6 shows the results for the measurement site 1. In accordance with the standard, the values of the cone index at the depth of 15 cm were read from the diagram presented in Fig. 6. For the stand in the investigated Subcompartment, the cone index was 973 kPa – the median of all measurements. According to EcoWood terrain classification, the stand soil can be classified as (very) strong. This means that maximum value of nominal pressure exceeding 80 kPa is allowed. After felling and processing, 6 rounds were forwarded from the Subcompartment. The total load volume measured by the standard forestry method was 74.52 m³ of roundwood. By weighing the forwarder with the above described method, the total mass of the transported wood was measured and it was 68 020 kg. The average mass of the loaded forwarder was 27 340 kg.

Table 3 shows the results obtained by the calculation based on expression 1. Fig. 7 presents the values of cone index (CI) for all investigated measurement sites, while Fig. 8 presents the average values of cone index (CI) for a stand, the soil between wheel ruts and wheel ruts at all measurement sites.

The number of forwarder passes gets lower from measurement site 1 to measurement site 6. The forwarder passed 6 times through the measurement site 1 transporting a total of 68 020 kg of wood. Fig. 7 and 8 clearly show

that, regardless of the number of forwarder passes, no significant volume deformation of forest soil occurred, i.e. no soil compaction was observed. This fact is contrary to the expectations, because the cone index of wheel rut and stand should be considerably different and the difference should increase with the number of forwarder passes.

The obtained high value of the wheel index ($N_k > 6.25$) and hence also the assessment of good forwarder mobility has been confirmed by the fact that no considerable soil compaction was observed after 6 passes of the loaded forwarder of an average mass of 27 340 kg and the same number of passes of the unloaded forwarder of an average mass of 16 003 kg. The small depth of the wheel rut is in accordance with the above conclusion.

It has again been established that the measured penetration curves and values of the cone index show considerable dispersion. Non-homogeneity of the forest soil (multi-layers, root network, etc.) considerably impede the assessment of soil strength (bearing capacity) by cone penetrometer. Therefore, it is not recommended to use the penetrometer with a small number of repeated measurements i.e. to accept the fact that the penetration characteristics should be measured »as many times as possible«, whatever it means. For this reason, it is necessary to seek more suitable methods for measuring the bearing strength and compaction of forest soil.

Even though this was not the subject of research, it has been noticed that in forwarding industrial roundwood and long length timber, the forwarder was loaded below its nominal carrying capacity due to inadequate utilization of the load space caused by different dimensions (especially length) and curvature of the wood transported.

Keywords: wood extraction, forwarder, environmental suitability, wheel numeric

Adresa autorâ – Authors' address:

Marko Zorić, mag. ing. silv.
e-pošta: mzoric@sumfak.hr
Zdravko Pandur, dipl. inž. šum.
e-pošta: zpandur@sumfak.hr
Izv. prof. dr. sc. Marijan Šušnjar
e-pošta: susnjar@sumfak.hr
Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Zavod za šumarske tehnike i tehnologije
Svetošimunska 25
HR – 10 000 Zagreb
HRVATSKA

Željko Šantek, mag. ing. silv.
e-pošta: zsantek@sumfak.hr
Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Ured za međunarodnu suradnju
Svetošimunska 25
HR – 10 000 Zagreb
HRVATSKA

Primljeno (Received): 20. 05. 2011.
Prihvaćeno (Accepted): 15. 12. 2011.