

Okolišna pogodnost dviju metoda mehanizirane uspostave šumskoga reda

Dubravko Horvat, Zdravko Pandur, Marijan Šušnjar, Stjepan Nikolić, Marko Zorić

Nacrtač – Abstract

U ovom se radu opisuje ocjena okolišne pogodnosti izvoženja drva s dva vozila – forvarderom i traktorskom ekipažom za jednometarsko drvo za dvije metode mehanizirane uspostave šumskoga reda. U prvoj je inačici forvarderom izvožena prvo tehnička obločina, a zatim sav preostali dio stabala kao energijsko drvo. U drugoj se metodi radilo na uobičajen način, tj. prvo se forvarderom transportirala tehnička obločina i višemetarsko drvo, zatim je od preostalog dijela stabala izrađeno jednometarsko ogrjevno drvo koje je izvoženo traktorskom ekipažom, a u trećoj je fazi pripremljenu (uhrpanu) biomasu izvezio forvarder.

Okolišna pogodnost kretanja tih šumskih vozila po šumskom bespuću ocjenjivana je na temelju prepuruka projekta EcoWood pomoću kvocijenta CI^*NGP^{-1} . Raščlamba je pokazala da je okolišno daleko najnepovoljnija šumska poluprikolica te da njezinu osovinu treba graditi kao bogi.

Okolišni pokazatelji forvardera povoljniji su od poluprikolice traktorske ekipaže, no njegovo kretanje po šumskom bespuću zahtijeva tlo visoke čvrstoće. U uvjetima nizinskih šuma, koje odlikuje česta ograničena nosivost tla, to je teško postići.

Ključne riječi: forvarder, traktorska ekipaža, okolišna pogodnost, šumski red

1. Uvod – Introduction

U nizinskim se šumama hrasta lužnjaka, u istočnom dijelu Hrvatske, gospodari oplodnim sječama nakon kojih se mora uspostaviti šumski red. Šumski se ostatak (grane, krošnje i dijelovi stabala), dakle, mora ukloniti s površine tako da ne leži na pomlatku i da ne ometa njegov pravilan razvoj, a što je uvjetovano i propisima. Izuzetno se na površinama gdje je ostala velika količina šumskoga ostatka on može uhrpati na gomile (obično na panjeve ili u redove), ali tada barem 80 % površine mora ostati slobodno. Osim čišćenja površine za bolji rast pomlatka ovim se postupkom omogućuje i bolja prohodnost terena te se olakšava izrada uzgojnih staza u budućnosti.

Uobičajeno je da to čišćenje šumske površine provodi lokalno ruralno stanovništvo ili poduzetnici koji tako izrađeno ogrjevno drvo kupuju po nižoj cijeni. Time lokalna šumska uprava besplatno dolazi do obvezujuće uspostave šumskoga reda uz relativno mali prihod. Ako tu izradu i transport drva radi lokalno stanovništvo, upitne su tehničke i sigurnosne značajke primijenjene mehanizacije, jednako kao što je upitna i osposobljenost stanovništva za šumski

rad. Angažiranje poduzetnika za te poslove jasno razgraničava pitanje odgovornosti u slučaju nezgoda.

Dugoročno gledano može se očekivati pad interesa lokalnoga stanovništva za izradu prostornoga drva (tzv. »samoizrada«), jer je intenzivna plinifikacija toga dijela Hrvatske smanjila potrebu za ogrjevnim drvom. Isto tako zamjetan je povećan interes tržišta za energijskim drvom, odnosno šumskom biomasom koja se nekim postupkom, primjerice iveranjem, pretvara u sekundarni energent. Ta je tendencija posebno izražena u susjednim zemljama Europske unije, ali je zamjetna i povećana potražnja na domaćem tržištu, pogotovo od proizvođača peleta i briketa.

Iako su posljednjom »Strategijom energetskog razvoja Republike Hrvatske« (NN, 130/09), koju je donio Sabor RH, zanemareni obnovljivi izvori energije, pa tako i šumska biomasa kao jedan od njih, optimistično je, ali i logično očekivanje da će se u Hrvatskoj, a nakon gradnje energijskih kapaciteta, formirati i tržište drva za energiju – energijskoga drva. Ako se ove pretpostavke obistine, valja razmišljati o novim rješenjima i razvijati novu tehniku i tehnologiju. Uobičajenoj metodi uspostave šumskoga reda Horvat i

dr. (2005), kao protutežu motorno-ručnomu radu, na način kako to danas radi lokalno stanovništvo ili poduzetnici, s transportom izrađenoga jednometarskoga ogrjeva šumskom traktorskom ekipažom, suprotstavljaju ideju iveranja šumskoga ostatka i razbacivanja iverja po površini. Naravno da u tom slučaju pridobivanja energijskoga drva gotovo da i nema.

Sukladno navedenoj činjenici da potražnja za energijskim drvom raste te očekivanjima da će se, u ne tako dalekoj budućnosti, tržište energijskoga drva i u Hrvatskoj razviti, a u sklopu znanstvenoistraživačkoga zadatka »Strojne metode uspostave šumskoga reda« obavljen je redefiniranje ciljeva istraživanja tako da pridobivanje energijskoga drva pri mehaniziranoj uspostavi šumskoga reda postane okosnica istraživanja. Pri tome su u nizu pokusa, a posebno u kompleksnom terenskom istraživanju, određivane: tehničko-eksploatacijske, energijske i okolišne značajke primijenjenih sredstava transporta.

Kako se u nizinskim šumama u Hrvatskoj zbog povećane vlažnosti, kako to navode Anić (2001) i Poršinsky (2005), mogu očekivati uvjeti ograničene nosivosti tala, kretanje je šumskih vozila po šumskom bespuću posebno osjetljivo. U ovom je radu opisana ocjena okolišne pogodnosti forvardera i traktorskih ekipaža za prijevoz jednometarskoga ogrjevnoga drva za dvije metode mehanizirane uspostave šumskoga reda s pridobivanjem energijskoga drva.

2. Problem – Scope of research

Pri ocjenjivanju okolišne pogodnosti šumskih vozila, pogotovo onih koja se kreću po šumskom bes-

puću, gaženje i zbijanje tla važni su pokazatelji, a definiranje parametara i veličina koji ih opisuju te pripadajućih graničnih vrijednosti koje su okolišno prihvatljive, važan je znanstvenoistraživački zadatak. To potvrđuje velik broj objava istraživanja vezanih uz ovu temu u izvješću *Soil interaction model* s dodacima u okviru projekta EU-a EcoWood, čiji je opsežan pregled prikazao Saarilahti (2002). Nadopunjujući njegova ishodišta korištenjem i drugih literaturnih izvora, pregled ovakvih istraživanja, najznačajniji na hrvatskom jeziku, dao je Poršinsky (2005). Polazišta složenoga pristupa proučavanju sustava vozilo – tlo utemeljio je Bekker (1960), smatrajući da se prometnost tla ne može odrediti samo na temelju njegove nosivosti i vučnih svojstava, odvojeno od fizikalnih i geometrijskih značajki vozila. Definirajući pojam kretnosti vozila, ovakav pristup, ali s naglaskom na posljedičnost kretanja vozila po šumskom tlu, ima i Horvat (1993a). On smatra da dotad uobičajeni pojmovi (pokazatelji) poput »prohodnost vozila«, »prometanje vozila«, »indeks mobilnosti« i sl. nedovoljno opisuju okolišnu sastavnicu sustava vozilo – tlo.

Zbog složenosti procesa, pa time i nedostatka dovoljno dobrih matematičkih modela, kao i zbog nedostatka dovoljnoga broja istraživanja potrebnih za analitički i numerički pristup u definiranju okolišnih pokazatelja sustava vozilo – tlo, empirijski je pristup danas prevladavajući. Pogodnost empirijske metode potvrđuje i razredba terena za izvođenje šumskih radova koju donosi projekt EcoWood (Owende i dr. 2002, Ward i Owende 2003) i koja je prikazana u tablici 1. Ova se razredba terena temelji na mehaničkim svojstvima tla (CI , E , τ), a značajku vozila određuje

Tablica 1. Razredba tla prema projektu EcoWood
Table 1 EcoWood soil classification

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

njegovo pripadajuće dopušteno opterećenje tla (*NGP*), iskazano nominalnim tlakom na tlo (Mellgren 1980).

Korištenje nominalnoga tlaka vozila kao kriterija okolišne pogodnosti ima svoje prednosti, ali i nedostatke. Prednost je mjeriteljska i računska jednostavnost, a nedostatak je pretpostavljeni model kretanja krutoga kotača po jako deformabilnoj i neelastičnoj podlozi, zbog čega dubina kolotruga šumskih vozila značajno (23 % promjera kotača) premašuje prihvatljivu dubinu od 10 cm, a kojom su se, kao kriterijem okolišne pogodnosti, vodili autori projekta EcoWood. Time se vozilima s gumama većega promjera omogućuje i veća dubina kolotruga. Zbog toga su podaci u razredbi nadopunjeni kolonom u kojoj je iskazan količnik konusnoga indeksa tla – *CI* i dopuštenoga nominalnoga tlaka vozila na tlo – *NGP*.

Na temelju spomenutih Bekkerovih (1960) polazišta da u proučavanju sustava vozilo – tlo treba uključiti i značajke tla i vozila, Poršinsky i Horvat (2005), ocjenjujući okolišnu prihvatljivosti forvardera, analiziraju mogućnost primjene indeksa kotača (*wheel numeric*) kao parametra/kriterija ocjene. Indeks je kotača bezdimenzijski količnik značajki tla (nosivost tla procijenjena tvrdoćom, tj. konusnim indeksom – *CI*) i značajki vozila (djelovanje vozila na tlo, tj. tlak na dodirnoj ploštini kotača i tla – *p*):

$$N_k = \frac{CI[kPa]}{p[kPa]} = \frac{CI \cdot A_k}{G_k} \quad (1)$$

Takva definicija indeksa kotača i njegova primjena za ocjenu okolišne pogodnosti šumskih vozila ima prihvatljivo fizikalno utemeljenje. Poršinsky i Horvat (2005) smatraju da je indeks kotača pogodno ishodište za ocjenu okolišne pogodnosti šumskih vozila, jer se jednostavnim *in situ* mjerenjem može odrediti konusni indeks tla (*CI*), dok je određivanje težine na kotaču vozila (G_k) veći, ali ne i nepremostiv mjeriteljski izazov. Najveći je problem u određivanju kontaktne površine ispod kotača vozila (A_k), za što predlažu primjenu nekoga od poluempirijskih izraza, a u svojim se izračunima koriste Turnageovim modelom (Maclaurin 1990). Do sličnih su zaključaka došli i Šušnjar i dr. (2006) te Pandur i dr. (2010). Opsežan pregled poluempirijskih modela za izračun kontaktne površine iz tridesetak literaturnih izvora daje Saari-lahti (2002). On predlaže da se u slučaju šumskih vozila, koja karakteriziraju velike promjene opterećenja kotača, koriste oni izrazi u kojima je sadržan tlak punjenja guma. Dodirna ploština kotača i tla izračunata tim modelima bliža je stvarnoj površini od Mellgrenove (1980) »nominalne« ploštine, jer ti modeli obuhvaćaju više dimenzijskih parametara kotača među kojima su najčešći progib i visina gume.

U stvarnim uvjetima dodirna će ploština ovisiti o značajkama kotača (dimenzije, tlak punjenja, progib gume, visina gume, morfologija, dizajn), zatim o dubini kolotruga koji pak ovisi o istim značajkama kotača, ali i o njegovu opterećenju, o nosivosti tla te o razini klizanja kotača, što je posebno svojstveno frikcijskim tlima. Da dodirna površina bitno ovisi o dubini kolotruga, ističe Hallonborg (1996), pokazujući da je kontaktna površina kod kolotruga manjega od 9 cm gotovo trostruko veća nego u slučaju kada je on zanemariv, tj. kada se kotač kreće po suhoj i tvrdoj podlozi. Abbels (1994) zapaža da se oblik dodirne površine gume razlikuje od tlocrtne projekcije te da je dodirni tlak pri kretanju po tvrdom tlu znatan, jer guma dodiruje podlogu samo na rebrima. Sharma i Pandey (1996) uvode pojam dinamičke dodirne površine te zaključuju da se najčešće određivana statička dodirna površina pod opterećenim kotačem znatno razlikuje od dinamičke i na čvrstoj i na deformabilnoj podlozi. Mjereći dodirnu površinu kotača skidera na snijegu, Šušnjar (2005) zapaža da se ona razlikuje od površina izračunatih poluempirijskim izrazima. Izračunata »nominalna« površina bila je očekivano najveća s obzirom na to da pretpostavlja duboki kolotrag.

Upravo je kolotrag neposredna i najvidljivija posljedica zbivanja i premještanja tla kotačima vozila i zbog toga se često rabi kao kriterij za ocjenu okolišne prihvatljivosti vozila koja se kreću po bespuću. Razredba terena u projektu EcoWood (tablica 1) utemeljena je na okolišnu prihvatljivoj dubini kolotruga od 10 cm. Wästerlund (2002) prikazuje skandinavski model procjene razine oštećenja sastojice iz kojega je razvidno da je dubina kolotruga od 10 cm prihvatljiva ako je gaženje manje od 20 % površine. Wronski i Humphreys (1994) povezuju dopuštenu dubinu kolotruga od 10 cm s količnikom $CI \cdot NGP^{-1}$ od 7,2 te kretnost vozila dijele u 4 razreda:

1. Jedan prolaz vozila uzrokuje kolotrag manji od 10 cm – $CI \cdot NGP^{-1} = 7,2$
2. Zaustavljanje kretnosti vozila nakon 50 prolazaka – $CI \cdot NGP^{-1} = 5$
3. Jedan prolaz vozila uzrokuje kolotrag manji od 15 cm – $CI \cdot NGP^{-1} = 4,5$
4. Potpuno zaustavljanje vozila – $CI \cdot NGP^{-1} = 3$

Na temelju te razdiobe Saari-lahti (2002) dijeli kretnost vozila u tri razreda: 1. tehnička kretnost: $CI \cdot NGP^{-1} = 3$; 2. ekonomska kretnost $CI \cdot NGP^{-1} = 5$; okolišno ograničenje: $CI \cdot NGP^{-1} = 7,2$.

Ako se te vrijednosti količnika usporede s izračunatima i dodanima u tablici 1, zapaža se da u razredbi terena u projektu EcoWood manji količnik odgovara mekomu tlu, a veći tvrdomu tlu, što bi značilo da se dopušta veći kolotrag ako je tlo slabije nosivo-



Slika 1. Transport i iveranje energijskoga drva
Fig. 1 Transport and chipping of wood for energy



sti. Zbog toga će se kao granični kriteriji za ocjenu okolišne pogodnosti vozila odabrati Saarilahtijeva razredba kretnosti. Ovim je putom naznačen i parametar za ocjenu prihvatljivosti – kvocijent $CI*NGP^{-1}$. Nominalni tlak na tlo nije odabran samo zbog jednostavnosti računanja nego i zbog nedostatka podataka o deformaciji guma na traktorskoj ekipaži za jednometarsko ogrjevno drvo.

3. Materijal i metode – *Material and Methods*

Istraživanje je provedeno na spačvanskom području u sastojini hrasta lužnjaka u dva susjedna odsjeka jednoga odjela za vrijeme napludnoga sijeka. Za sječu i izradu te transport drva iz sastojine do pomoćnoga stovarišta primijenjene su dvije metode strojne uspostave šumskoga reda:

1. metoda: U veljači, nakon rušenja stabala, izrađena je samo tehnička oblovina, a preostali je dio stabala trupljen samo radi što bolje iskoristivosti tovarnoga prostora forvardera. Drvo se transportiralo u dva koraka: prvo je forvarderom vožena sva tehnička oblovina, a zatim preostalo drvo (slika 1). To je drvo bilo namijenjeno za daljnju preradu u neki oblik sekundarnoga energenta, a ovom je prigodom iverano (slika 1). Tlo sastojine u to je vrijeme bilo pod snijegom debljine $15 \div 20$ cm i nije bilo smrznuto.

2. metoda: Krajem ožujka i početkom travnja, nakon rušenja stabala, izrađena je tehnička oblovina i višemetarsko drvo koji su zajedno voženi forvarderom na pomoćno stovarište. U sljedećem je koraku, angažiranjem privatnoga poduzetnika, izrađeno jednometarsko ogrjevno drvo koje je voženo traktorskom ekipažom, kako pokazuje slika 2. U trećem je



Slika 2. Prijevoz jednometarskoga ogrjevnoga drva traktorskom ekipažom

Fig. 2 Transport of 1-m firewood by tractor assembly

koraku preostala šumska biomasa, nakon uhrpavanja, prevežena forvarderom. U to je vrijeme tlo sastojine bilo uglavnom suho.

Osovinska su opterećenja forvardera i traktorske ekipaže određena na pomoćnom stovarištu prijenosnim mjernim sustavom čiji razvoj i umjeravanje opisuju Bosner i dr. (2008), a pokazuje slika 3. Na toj se slici zapaža da se u kotače forvardera skupljalo blato zbog čega je težinu praznoga forvardera trebalo mjeriti u više navrata.

Za mjerenje konusnoga indeksa korišten je, prema standardu ASAE S313.3 (1999), digitalni pentrometar Eijkelkamp Penetrologger s konusom površine presjeka baze 2 cm^2 i vršnim kutom od 30° kako je pokazano na slici 3.



Slika 3. Mjerenje osovinskoga opterećenja vozila i konusnoga indeksa
Fig. 3 Measuring of vehicle axle load and cone index

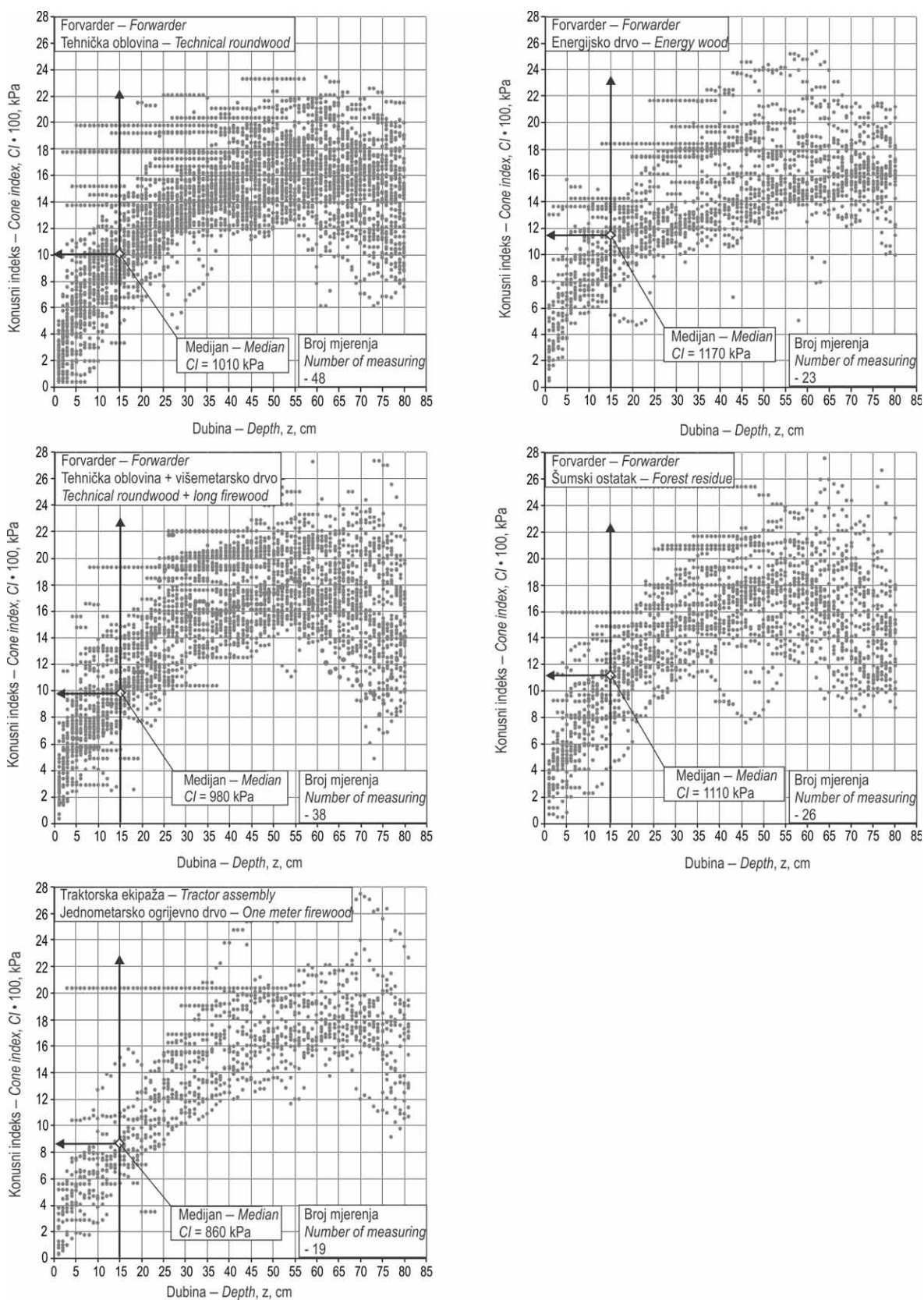
4. Rezultati istraživanja – Research results

Kako je u analizi problema istraživanja navedeno, za kriterij okolišne pogodnosti odabran je količnik između nosivosti tla definirane konusnim in-

deksom (CI) i značajke djelovanja vozila na tlo opisane nominalnim tlakom (NGP). Ako se bogi sustav stražnje osovine forvardera smatra dvostrukom osovinom, tada oba vozila, i forvarder, i traktorska ekipaža, imaju po tri osovine čiji su kotači bili opremljeni gumama koje pokazuje tablica 2.

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

Pozicija kotača Tyre position	Model gume Tyre model	Polumjer Radius r [m]	Širina Width b [m]	Progib Deflection δ [m]	Dodirna površina Contact area $A = r b$ [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
Poljoprivredni traktor – Agricultural tractor					
Prednja – Front	BKT TR 171 11,2 - 20	0,457	0,285		0,13
Stražnja – Rear	CONTRACT AC 51 15,5 R 38	0,75	0,426		0,32
Poluprikolica – Semitrailer					
	SAVA AVANT A3 315/80R 22,5	0,522	0,312		0,163



Slika 4. Rezultati mjerenja konusnoga indeksa na negaženom tlu za 5 inačica transporta
 Fig. 4 Cone index for undisturbed soil for 5 variants of transport

Iz tablice se zapaža da podaci o progibu guma traktorske ekipaže nisu bili dostupni, što je bio jedan od razloga za izbor nominalnoga tlaka kao pokazatelja vozila.

4.1 Konusni indeks tla – Soil Cone Index

Konusni indeksi tla mjereni su na negaženom tlu sastojine barem 70 cm udaljeni od kolotraga. Skupni dijagrami mjerenja za sve inačice transporta drva prikazani su na slici 4. Za iskaz konusnoga indeksa na 15 cm dubine odabran je medijan ukupnih podataka za ovu dubinu, kako su to preporučili Poršinsky (2005) te Pandur i dr. (2010). Iz dijagrama na slici 4 zapaža se da je najmanji konusni indeks od 860 kPa zabilježen pri uporabi traktorske ekipaže. Prema razredbi terena u projektu EcoWood (tablica 1) tlo se za sve inačice transporta može svrstati u razred čvrstoga tla. Iz istoga prikaza razvidno je i veliko rasipanje

mjernih rezultata, što autori koji se bave ovom problematikom rijetko ističu. Veliko rasipanje podataka mjerenja konusnoga indeksa zapazio je i Poršinsky (2005). Na temelju toga može se zaključiti da u izrazu za indeks kotača ni ovaj parametar nije jednoznačno određen. Izlaz može biti ili u velikom broju ponavljanja mjerenja ili u traženju druge mjerne opreme za procjenu nosivosti tla, a koja će više odgovarati za relativno nehomogena šumska tla.

4.2 Mjerenje osovinskoga opterećenja – Wheel load measuring

Rezultati ovih mjerenja skupa s izračunom nominalnoga tlaka na tlo prikazani su u tablici 3 – za forvarder i tablici 4 – za traktorsku ekipažu.

Iz tablice 3 razvidno je da forvarder ima najmanji količnik $CI*NGP^{-1}$ pri prijevozu tehničke oblovine i

Tablica 3. Kvocijent $CI*NGP^{-1}$ za forvarder
Table 3 Forwarder $CI*NGP^{-1}$ ratio

Forvarder – Forwarder												
1. metoda - 1. Method						2. metoda - 2. Method						
Tehnička oblovinna Industrial roundwood			Energijsko drvo Energy wood			Tehnička oblovinna + višemetarsko drvo Industrial roundwood + large firewood			Šumski ostatak Forest residue			
Konusni indeks Cone index CI, kPa	1010		1170		980		1110					
	Težina Weight G	NGP	Kvocijent Ratio CI NGP	Težina Weight G	NGP	Kvocijent Ratio CI NGP	Težina Weight G	NGP	Kvocijent Ratio CI NGP	Težina Weight G	NGP	Kvocijent Ratio CI NGP
	kN	kPa		kN	kPa		kN	kPa		kN	kPa	
$G_1/2$	46,93	100,06	10,09	41,73	88,98	13,15	44,7	95,31	10,28	45,13	96,23	11,54
$G_{B1}/2$	49,01	123,76	8,16	42,19	106,54	10,98	44,51	112,4	8,72	28,52	72,02	15,41
$G_{B2}/2$	42,54	107,42	9,4	39,95	100,88	11,6	42,42	107,12	9,15	29,43	74,32	14,94
G_U	276,96			247,74			263,26			206,16		
G_F	153,72			153,72			153,72			153,72		
G_T	123,24			94,02			109,54			52,44		

Tablica 4. Kvocijent CI^*NGP^{-1} za traktorsku ekipažu
Table 4 Tractor assembly CI^*NGP^{-1} ratio

Traktorska ekipaža - Tractor assembly			
2. metoda - 2. Method			
Jednometarsko ogrjevno drvo 1-m firewood			
Konusni indeks Cone index CI , kPa	860		
	Težina Weight G	NGP	Kvocijent Ratio $\frac{CI}{NGP}$
	kN	kPa	
$G_{TE1}/2$	5,18	39,85	21,56
$G_{TE2}/2$	17,72	55,38	15,53
$G_{TE3}/2$	35,48	217,67	3,95
G_U	116,76		
G_{TE}	53,37		
G_T	63,39		

višemetarskoga drva, i to zbog zabilježenoga najmanjega konusnoga indeksa tla, iako je prosječno prevezio manji teret (109,54 kN) nego pri vožnji obloga drva (123,4 kN). U ovom je slučaju opterećenje forvardera prosječnim tovarom bilo 93 % nazivne nosivosti. Referentni je kotač, kako ga definira Saarilahti (2002), u tom slučaju prvi kotač bogi mosta.

Očekivano najveći kvocijent CI^*NGP^{-1} zabilježen je u 2. metodi pri prijevozu šumske biomase preostale nakon izvoženja trupaca i višemetrice forvarderom te metrice traktorskom ekipažom, jer je njezina prosječna količina bila najmanja i iznosila je samo 54,2 kN, što je manje od 50 % nazivne nosivosti. U ovom slučaju referentni kotač pripada prednjemu mostu forvardera.

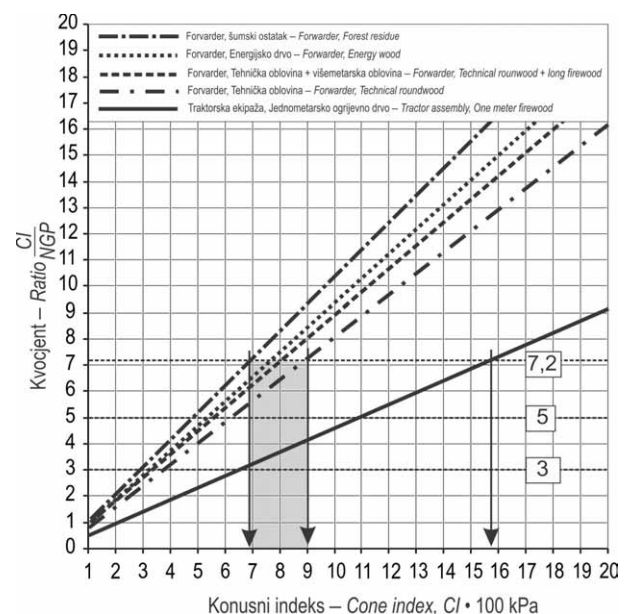
Zanimljivo je zapaziti da je pri transportu energijskoga drva zabilježena relativno značajna prosječna

količina drva od 94,2 kN, što je 80 % nazivne nosivosti forvardera. Zbog velike duljine tovara drva (slika 1) stražnji je kotač bogi osovine postao referentni.

Pri vožnji tehničke oblovine zapažaju se zadovoljavajući količnici CI^*NGP^{-1} te težina transportiranoga drva od 123,24 kN, što nadilazi nazivnu nosivost forvardera. Referentni je kotač prvi kotač bogi pogonskoga mosta.

U slučaju prevoženja znatnoga tereta, kao što je ovdje bilo pri prijevozu tehničke oblovine, energijskoga drva te kombinacije tehničke oblovine i višemetrice, veći se dio težine raspoređuje na bogi pogonski most i tada jedan od njegovih kotača postaje referentni, tj. ima najveći nominalni tlak na tlo. Valja istaknuti da su Sever i Horvat (1990) te Horvat (1993b) ustanovili kako se pri vožnji forvardera, a zbog djelovanja obodnih sila, osovinsko opterećenje s prednjega bogi kotača prebacuje na stražnji, koji tim putem postaje najopterećeniji, pa i referentni.

Iz tablice 4, u kojoj su prikazani rezultati mjerenja težine po mostovima traktorskoga skupa, te izračuna nominalnoga tlaka i kvocijenta CI^*NGP^{-1} zapaža se da kotači poljoprivrednoga traktora imaju mnogo manje nominalne tlakove, pa time i najveće količnike. Pri tome su kotači prednjega mosta beznačajna utjecaja na šumsko tlo, a kotači njegova stražnjega mosta na razini su opterećenja forvardera kada prevozi najmanju količinu drva. Potpuno je suprotan slučaj s poluprikolicom, čiji su kotači unatoč jako dobroj nosivosti tla (860 kPa) obilježeni previsokim nominalnim tlakom, a time i niskim kvocijentom CI^*NGP^{-1} .



Slika 5. Ovisnost količnika CI^*NGP^{-1} o konusnom indeksu tla
Fig. 5 Dependence of CI^*NGP^{-1} ratio on soil cone index

Potpuno je jasno i nedvojbeno da su na temelju kvocijenta CI^*NGP^{-1} okolišno najnepovoljniji kotači poluprikolice te da i za prijevoz jednometarskoga ogrjevnoga drva valja rabiti poluprikolice s bogi kotačima. Na slici 5 prikazan je dijagram ovisnosti konusnoga indeksa i kvocijenta CI^*NGP^{-1} s ucrtanim graničnim vrijednostima količnika za svih pet referentnih kotača. Iz dijagrama se zapaža da za poluprikolicu traktorske ekipaže, ako se želi transportirati drvo na okolišno prihvatljiv način, nema dovoljno čvrstoga tla. U slučaju da je forvarder nazivno natovaren, što je u ovom primjeru izvoženje obloga drva, tada za pogodnu vožnju drva tlo treba imati konusni indeks od 900 kPa, a to je prema razredbi u projektu EcoWood razred 1, odnosno vrlo čvrsto tlo.

5. Zaključak – Conclusion

Okolišna pogodnost forvardera i traktorske ekipaže za jednometarsko ogrjevno drvo analizirana je na temelju količnika CI^*NGP^{-1} , odnosno indeksa koji predstavlja odnos između nosivosti kao značajke tla i nominalnoga tlaka kotača kao značajke vozila, pa ima jasan fizikalni smisao. Taj je faktor izabran jer se sastoji od veličina koje je relativno lako izmjeriti ili izračunati primjenom poluempirijskih modela. Dobile su vrijednosti uspoređene s preporučenim graničnim vrijednostima iz projekta EcoWood koje se temelje na dopuštenoj dubini kolotraga od 10 cm.

Analiza je pokazala da je najnepovoljniji referentni kotač poluprikolice traktorske ekipaže te da se od takva sredstva ne može očekivati okolišno povoljno izvoženje drva, već samo ekonomska mobilnost. Zbog toga se za njih preporučuje primjena nepogonjene bogi osovine.

Kotači poljoprivrednoga traktora imaju najpovoljnije pokazatelje okolišne pogodnosti, pogotovo prednji kotač koji se opterećenjem poluprikolice znatno rasterećuje.

Pokazatelji forvardera znatno su bolji, ali i u tom je slučaju za okolišno pogodnu kretnost potrebno, prema razredbi EcoWood, vrlo čvrsto tlo s konusnim indeksom između 700 kPa za ~ 50 %-tno opterećenje i do 900 kPa za nazivnu veličinu tovara.

Tijekom mjerenja i raščlambe rezultata zapaženo je veliko rasipanje podataka mjerenja konusnoga indeksa tla konusnim penetrometrom, uzrokovanoga relativno nehomogenim šumskim tlom. Traženje prihvatljive procedure mjerenja konusnim penetrometrom ili primjena neke druge mjerne metode za procjenu nosivosti tla važna je znanstvenoistraživačka zadaća.

Još veći izazov bit će ocjena okolišne pogodnosti skidera jer ih karakterizira znatno kompleksnija dinamika vožnje od kretanja na nagnutim terenima,

dinamička preraspodjela opterećenja mostova, ostvarivanje vučne sile i sl. Ovako razmišljaju Horvat i dr. (2007), koji napominju da se kod skidera treba analizirati i utjecaj skupljanja drva šumskim vitlom na tlo te privlačenoga tereta.

6. Literatura – References

- Abeels, P. F. J., 1994: Mechanization of the forest operations and impacts on the environment. Interactive seminar and workshop »Soil, tree, machines interaction«, Feldafing, Germany, str. 1–24.
- Anić, I., 2001: Uspijevanje i pomlađivanje sastojina poljskog jasena (*Fraxinus angustifolia* Vahl.) u Posavini. Disertacija, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 1–197.
- Anon, 2009: Strategija energetskog razvoja Republike Hrvatske, NN, 130/09.
- 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, str. 1–215.
- Bosner, A., S. Nikolić, Z. Pandur, D. Benić, 2008: Razvoj i umjeravanje prijenosnoga sustava za mjerenje osovinskih opterećenja vozila – mjerenja na forvarderu (*Development and Calibration of Mobile Measuring System of Vehicle Axle Mass – Measurements on Forwarder*). Nova mehanizacija šumarstva, 29: 1–15.
- Hallonborg, U., 1996: Super ellipse as tyre-ground contact area. Journal of Terramechanics, 33(3): 125–132.
- Horvat, D., 1993a: Prilog proučavanju prohodnosti vozila na šumskom tlu. Disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, str. 1–234.
- Horvat, D., 1993b: Prilog poznavanju dinamike bogie sustava kotača (*A Contribution to comprehension of the bogie wheel system dynamics*). Mehanizacija šumarstva, 18(3): 107–120.
- Horvat, D., N. Perak, M. Šušnjar, T. Pentek, T. Poršinsky, 2005: Chipping of forest residual after final cut of penduculate oak stand. Proceedings of International scientific conference »Ecological, Ergonomic and Economical Optimization of Forest Utilization in Sustainable Forest Management«, Krakow, Poland, str. 301–310.
- Horvat, D., M. Šušnjar, T. Poršinsky, T. Pentek, H. Nevečrel, Ž. Tomašić, Ž. Zečić, 2007: Rut Depth and Soil Compaction in Timber Extraction by Skidder and Forwarder. International Symposium »Bottlenecks, Solutions, and Priorities in the Context of Functions of Forest Resources«, Istanbul, Turkey, 17–19 October 2007, Zbornik radova (CD), str. 339–346.
- Maclaurin, E. B., 1990: The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance on pneumatic tyres.

Proceedings of the 10th International ISTVS Conference, August 20–24, Kobe, Japan, Volume 1: 177–186.

Mellgren, P. G., 1980: Terrain Classification for Canadian Forestry. Canadian Pulp and Paper Association, str. 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), str. 1–74.

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

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

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

Saarilahti, M., 2002: 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), With all Appendix Reports, str. 1–87.

Sever, S., D. Horvat, 1990: Sabijanje tla pri izvoženju i vuči drva teškim traktorima (*Soil compaction at wood hauling and*

wood skidding with heavy-duty tractors). Glasnik za šumske pokuse, 26: 519–546.

Sharma, A. K., K. P. Pandey, 1996: A review on contact area measurement of pneumatic tyre on rigid and deformable surface. Journal of Terramechanics, 33(5): 253–264.

Šušnjar, M., 2005: Istraživanje međusobne ovisnosti značajki tla traktorske vlake i vučne značajke skidera. Disertacija, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str. 1–146.

Šušnjar, M., T. Poršinsky, D. Horvat, T. Pentek, Ž. Tomašić, 2006: Estimation of environmental acceptability of forwarder by wheel numeric. 39th International symposium FORMEC 2006, 24–28 September 2006, Sofia, Bulgaria, Abstract proceedings, str 44, Proceedings (2007), str. 207–217.

Ward, S. M., P. M. O. Owende, 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 – Fortchenvi Brno 2003«, May 26–30, 2003, Brno, Czech Republic, Mendel University of Agriculture and Forestry Brno & IUFRO WG 3.11.00, str. 473–482.

Wästerlund, I., 2002: Soil disturbance in forestry: Problems and perspectives. Proceedings of the International Seminar on New Roles of Plantation Forestry Requiring Appropriate Tending and Harvesting Operations, September 29 – October 5, 2002, Tokyo, Japan, The Japan Forest Engineering Society & IUFRO WG 3.04/3.06/3.07, str. 312–315.

Wronski, E. B., N. Humphreys, 1994: A method for evaluating the cumulative impact of ground-based logging systems on soils. Journal of Forest Engineering, 5(2): 9–20.

Abstract

Environmental Viability of Two Methods of Mechanized Forest Residues Management

This paper describes the assessment of environmental viability of timber extraction by two vehicles – forwarder and tractor assembly of 1-m wood by two methods of mechanized forest residues management. In the first variant, the forwarder was first used for extracting industrial roundwood, and then for all the remaining parts of the tree as energy wood. The second method was the common practice, i.e. the forwarder was used for transporting industrial roundwood and large logs, and then in the second phase 1-m firewood was processed from the remaining part of the tree, and it was extracted by the tractor assembly. In the third phase, the prepared (bunched) biomass was extracted by the forwarder.

Environmental viability of the forwarder and tractor assembly for 1-m firewood was analyzed based on $CI \cdot NGP^{-1}$ ratio, i.e. index that represents the ratio between soil bearing strength, as the soil characteristics, and nominal wheel load, as the vehicle characteristics, so that it has a clear physical sense. This factor has been chosen because it consists of values that can be measured relatively easily or calculated with the use of semi-empirical models. The obtained values were compared with the recommended limit values from EcoWood project, which were based on the allowed 10-cm depth of the wheel rut.

The analysis showed that the reference wheel of the tractor assembly semitrailer was the most unfavorable and that no environmentally viable wood extraction can be expected from such a vehicle, but only economic mobility. This is why the use of a non-drive bogie axle is recommended for them.

The wheels of the farming tractor have the most favorable indicators of environmental viability, and particularly so the front wheels, whose load gets considerably lower with the increase of the semitrailer load.

The indicators of the forwarder are considerably better, and however in this case, too, for achieving an environmentally acceptable maneuverability, according to EcoWood classification, the soil must be very strong with the cone index between 700 kPa for ~50 % load and up to 900 kPa for the nominal load value.

During measurement and analysis of results, great dispersion was observed of the measuring data of the soil cone index obtained by cone penetrometer, sampled on a relatively non-homogenous forest soil. Searching for an acceptable measurement procedure by cone penetrometer or the application of any other measuring method for the assessment of the soil bearing strength is a significant task of scientific research.

The assessment of the skidder environmental viability will be a still greater challenge, because they are characterized by a considerably more complex travel dynamics than moving on slopes, dynamic redistribution of axle loads, achievement of tractive force, etc. This is also the opinion of Horvat et al. (2007) with the emphasis on the fact that with skidders it is also necessary to analyze the impact of the winched and skidded load on the soil.

Keywords: forwarder, tractor assembly, environmental viability, Forest Residues Management

Adrese autorâ – Authors' address:

Prof. dr. sc. Dubravko Horvat
e-pošta: horvat@sumfak.hr
Zdravko Pandur, dipl. inž. šum.
e-pošta: zpandur@sumfak.hr
Doc. dr. sc. Marijan Šušnjar
e-pošta: susnjar@sumfak.hr
Marko Zorić, mag. inž. šum.
e-pošta: mzoric@sumfak.hr
Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Zavod za šumarske tehnike i tehnologije
Svetošimunska 25
HR-10 000 Zagreb
Hrvatska

Stjepan Nikolić, dipl. inž. šum.
e-pošta: stjepan.nikolic@hrsume.hr
Hrvatske šume d.o.o.
Lj. F. Vukotinovića 2
HR-10 000 Zagreb
Hrvatska

Received (*Primljeno*): 23. 12. 2010.
Accepted (*Prihvaćeno*): 25. 02. 2011.