

PODRUČJE RADA FORWARDERA – MODELIRANJEM DO PODRŠKE OPERATIVNOJ PRIMJENI

FORWARDER'S WORKING RANGE – FROM MODELING TO SUPPORT FOR OPERATIONAL APPLICATION

Tomislav PORŠINSKY¹, Zoran BUMBER², Zdravko PANDUR¹, Andreja ĐUKA^{1*}

SAŽETAK

Na osnovi poznavanja dimenzijskih i masenih značajki forwardera, razvijen je model raspodjele osovinskih opterećenja te procjene kretnosti forwardera pri izvoženju drva uz i niz nagib terena. Model je zasnovan na poznavanju položaja točke težišta forwardera, deklariranoj nosivosti forwardera i duljini utovarene oblovine, graničnom nagibu kretnosti forwardera temeljem vučne značajke vozila pri izvoženju drva uz nagib terena te graničnom nagibu terena pri izvoženju drva niz nagib, kod kojega obodna sila poprima vrijednost nula, uz poštivanje ograničenja proisteklih iz prethodnih istraživanja.

Simulacijsko modeliranje procjene kretnosti pri izvoženju drva uz i niz nagib terena prikazano je na primjeru osmokotačnoga forwardera Komatsu 875, deklarirane nosivosti 16.000 kg, opremljenoga pneumaticima 710/45-26.5 za koji je metodom podizanja osovine određen položaj točke težišta.

Rezultati raspodjele adhezijskog opterećenja prednje i stražnje osovine forwardera ukazali su da pri izvoženju drva tvrdih listača mase 16.000 kg te duljine 4,82 m, uz i niz nagib terena u granicama $\pm 70\%$ ne dolazi do prekoračenja zbroja dopuštenih opterećenja guma kotača po osovinama te dopuštenog opterećenja prednje i stražnje bogi osovine. Pri izvoženju drva uz nagib terena, do rasterećenja prednje bogi osovine dolazi kod nagiba terena $>68\%$. Za navedeni raspon uzdužnih nagiba terena, najmanji konusni indeks od 950 kPa za primjerni forwarder predstavlja mjeru okolišne pogodnosti, a izračunat je na osnovi nominalnog tlaka na podlogu referentnih (opterećenijih) kotača stražnje bogi osovine vozila.

Granični nagib kretnosti nominalno natovarenoga forwardera uz nagib terena značajno ovisi o nosivosti šumskog tla iskazanoga konusnim indeksom, ali i o klizanju kotača vozila. Za iste vrijednosti konusnoga indeksa tla, pri vrijednostima klizanja kotača (10 – 15 %) koje odgovaraju najvećoj vučnoj korisnosti, granični nagib kretnosti forwardera ima niže vrijednosti, u odnosu na klizanje kotača (20 – 25 %) koje odgovara okolišnom ograničenju, odnosno početku erozionih procesa na nagnutim terenima.

Granični nagib terena pri izvoženju drva forwarderom niz nagib terena kod kojeg obodna sila poprima vrijednost nula, značajno ovisi samo o nosivosti šumskog tla te se nije pokazao kao dobar pokazatelj ograničenja izvoženja drva. Određivanje ograničenja kretnosti forwardera pri izvoženju drva niz nagib terena u budućnosti će predstavljati istraživački izazov.

KEY WORDS: forwarder, težište vozila, opterećenje osovina

¹ Fakultet šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za šumarske tehnike i tehnologije, Svetošimunska 25, HR–10002 Zagreb, Hrvatska, prof. dr. sc. Tomislav Poršinsky, e-pošta: tporinsky@sumfak.unizg.hr, doc. dr. sc. Andreja Đuka, e-pošta: aduka@sumfak.unizg.hr, doc. dr. sc. Zdravko Pandur, e-pošta: zpandur@sumfak.unizg.hr;

² Hrvatske šume d.o.o. – UŠP Zagreb, Lazinska 41, HR – 10 000 Zagreb, mr. sc. Zoran Bumber, e-pošta: zoran.bumber@hrsume.hr

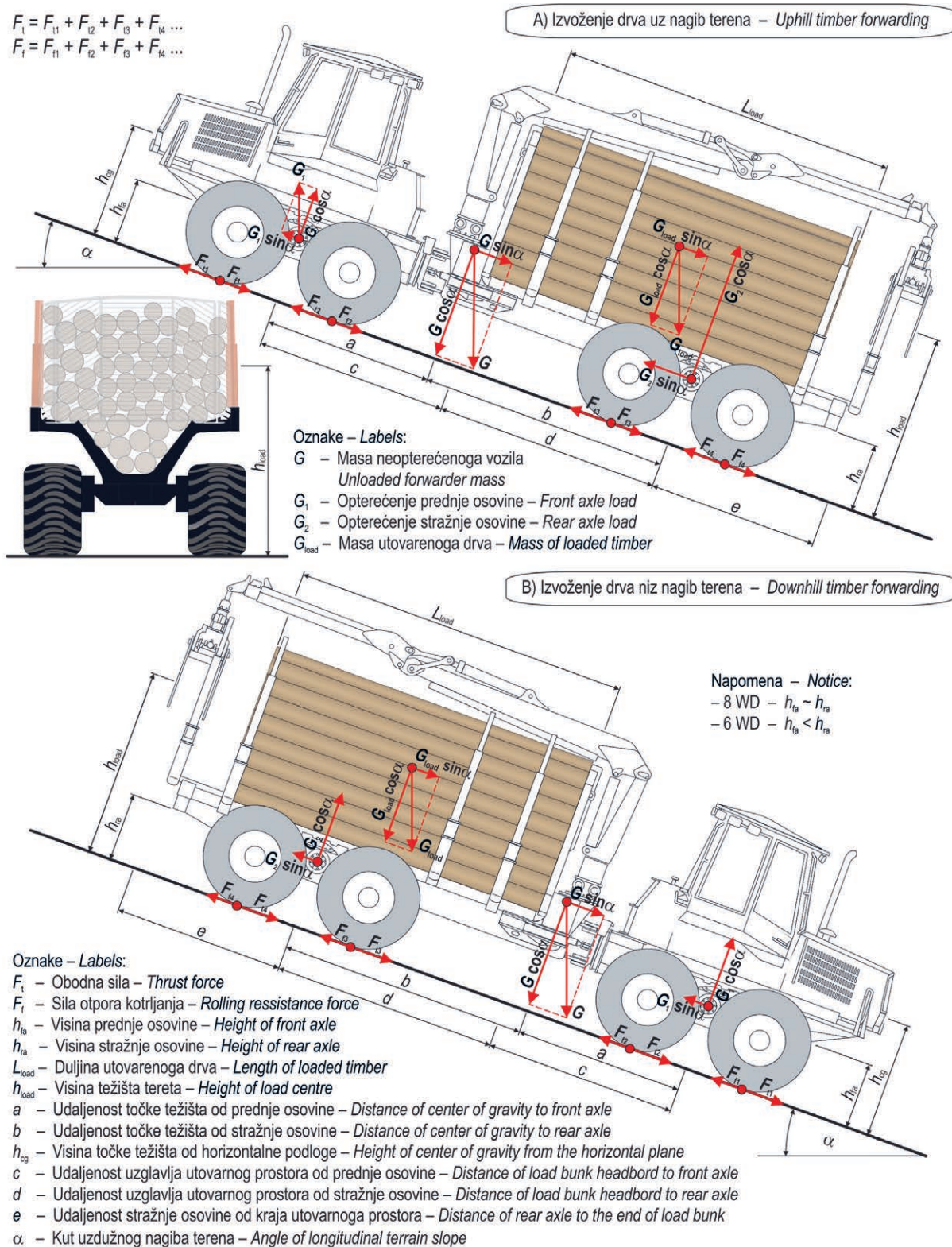
* dopisni autor – corresponding author, doc. dr. sc. Andreja Đuka, e-pošta: aduka@sumfak.unizg.hr

1. UVOD

INTRODUCTION

Privlačenje drva je pomicanje dijelova ili cijelih stabala, od panja ili mjesta sakupljanja drva do pomoćnoga stovarišta

(Poršinsky 2005), a izbor sredstva privlačenja drva (skider, forvarder, žičara) u svjetlu djelovanja terenskih čimbenika (reljefnih područja šuma) te razine primarne i sekundarne otvorenosti šuma je najbitnija odrednica cijeloga sustava pridobivanja drva (Janeš i dr. 2022). Primjena šumskih vo-



Slika 1. Raspodjela sila pri izvoženju drva forvaderom uz i niz nagib terena

Fig. 1 Distribution of forces at uphill and downhill timber forwarding

zila u mehaniziranim procesima proizvodnje drva predstavlja još uvijek najdjelotvorniji način pridobivanja drva, pri čemu se pred šumska vozila postavlja zahtjev za njihovom što većom kretnošću u odnosu na prometnost terena šumskoga bespuća (Poršinsky i dr. 2016). Kretnost je šumskih vozila njihova sposobnost prolaska s jednoga na drugo mjesto u prostoru šumskoga radilišta (sječine) uz zadržavanje mogućnosti izvršavanja svoje primarne zadaće (Đuka i dr. 2018A). S obzirom na složenost međudjelovanja vozila i terena, kretnost se šumskih vozila raščlanjuje na: 1) prohodnost vozila – međudjelovanje geometrije vozila i geometrije površine terena (Poršinsky i dr. 2016), 2) vučnu značajku – ovisnost vučne sile o klizanju kotača i nosivosti podloge (Suvinen i Saarilahti 2006, Hittenbeck 2013) te 3) okolišnu pogodnost – dodirne tlakove vozila s tlom (Poršinsky i dr. 2011, Starke i dr. 2020).

Kretnost forvardera postaje istraživački izazov zbog njihovog sve većeg korištenja na nagnutim terenima (Visser i Berkett 2005, Strandgard i dr. 2017, Borz i dr. 2021), a dodatnim opremanjem forvardera sidreno-trakcijskim vitlom izvoženje drva forvarderima postaje troškovno konkurentnije iznošenju drva šumskim žičarama (Holzfeind i dr. 2018, Holzfeind i dr. 2020). Pored udaljenosti privlačenja drva (Đuka i dr. 2017, Đuka i dr. 2021), najznačajniji utjecajni čimbenik djelotvornosti izvoženja drva forvarderom je obujam (masa) tereta, koji forvarderi transportiraju unutar traktorskog turnusa (Spinelli i dr. 2004, Poršinsky i dr. 2014).

Na poznavanju dimenzijskih i masenih značajki forvardera, Weise (2002, 2003A, 2003B) razvija Plan raspodjele tereta forvardera na horizontalnoj podlozi s ciljem utvrđivanja mase (ali i duljine) utovarene oblovine tvrdih listača i četinjača uz poštivanje četiri ograničenja, pri čemu masa tereta: 1) ne smije biti veća od deklarirane nosivosti vozila od strane proizvođača, 2) ne preopterećuje prednju ili stražnju osovinu vozila (odnosno zbroj nosivosti pneumatika po osovini), ali i 3) ne rasterećuje prednju osovinu vozila. Bitno ograničenje primjene šumskih vozila pri kretanju uz nagib terena predstavlja i granični nagib kretnosti temeljem vučne značajke vozila, a koji povezuje dva istraživačka pristupa: 1) vozilo – teren te 2) kotač – tlo (Đuka i dr. 2018A, Poršinsky i dr. 2021, Bumber i dr. 2023). Sva navedena ograničenja prvenstveno su vezana za kretanje šumskih vozila uz nagib terena, dok za forvarder u literaturi nisu zabilježena ograničenja pri izvoženju drva niz nagib terena.

Ograničenje pri vuči drva skiderima s vitlom niz nagib terena, određeno je kutom nagiba terena kod kojega vučeno drvo počinje udarati u stražnju dasku vozila ili dodatno gurati skider, što se događa kada horizontalna sastavnica sile u užetu poprimi vrijednost nula, odnosno kada su težina tereta i otpor vuče drva skiderom u ravnoteži (Đuka i dr. 2016, Đuka i dr. 2018A). Isti autori, utvrđuju da navedenom

trenutku pri vuči drva skiderom niz nagib terena neposredno prethodi početak kočenja motorom vozila, koji je određen kutem nagiba terena kada obodna sila poprima vrijednost nula.

Nominalni tlak na podlogu (Melgren 1980) općeprihvaćen je način izračuna dodirnih tlakova šumskih vozila i tla (Partington i Ryans 2010, Poršinsky i dr. 2011), a na kojem se temelji i najmanja nosivost šumskog tla (Wronsky i Humphreys 1994), kao smjernica privlačenja drva na okolišno prihvatljiv način. Hittenbeck (2013) istražujući trakciju forvardera, na nagnutim terenima različite vlažnosti i kamenitosti tla, zaključuje da klizanje kotača od 25 % predstavlja okolišno ograničenje primjene forvardera u cilju sprečavanja erozionih procesa.

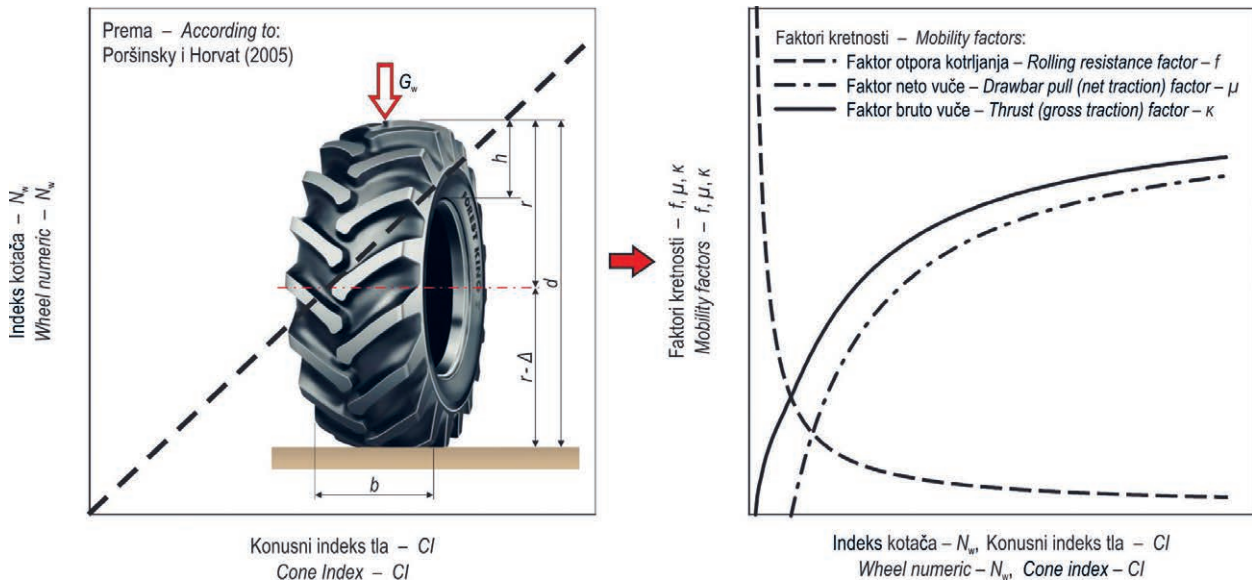
Pri planiranju izvoženja drva forvarderom i/ili pri odabiru forvardera prilikom njihove nabave, pred šumarske stručnjake se postavljaju zahtjevi za poznavanjem nagiba i smjera nagiba terena te nosivosti šumskog tla kod koje forvarderi mogu izvesti teret deklariran od strane proizvođača vozila (Bumber i dr. 2023). Isti autori, navode da odgovor na postavljeno pitanje daje simulacijsko modeliranje koje povezuje dva istraživačka pristupa proučavanju procjene kretnosti forvardera pri izvoženju drva (slike 1 i 2), a kojim je moguće obuhvatiti širi raspon vrijednosti navedenih utjecajnih čimbenika.

Teorijski pristup/okvir raspodjele sila pri izvoženju drva forvarderom uz i niz nagib terena, prikazan je na slici 1, gdje su sile raščlanjene na vertikalne, horizontalne i trakcijske, a koji je u literaturi poznat pod nazivom »sustav vozilo – teren«. Općenito, vozila započinju sa kretanjem kada obodna sila dovedena sustavom transmisije na obod kotača započinje svladavati sile/otvore: 1) vuče tereta, 2) nagiba terena, 3) kotrljanja, 4) zraka te 5) inercije (Suvinen i dr. 2009, Wong 2014). Kod forvardera ne postoji vučna sila iz razloga što oni pri kretanju savladavaju samo otpore kotrljanja, otpor zraka se zanemaruje zbog malih brzina kretanja, a pri konstantnim brzinama ne postoji ni otpor inercije (Saarilahti 2002, Suvinen i Saarilahti 2006), tako da su u praksi pri izvoženju drva forvarderom značajni samo otpor kotrljanja i otpor svladavanja nagiba terena (Hittenbeck 2013).

Navedenim, pri izvoženju drva uz nagib terena početak kretanja forvardera je trenutak kada obodna sila započinje svladavati otpore kotrljanja i nagiba terena (izraz 1).

$$F_t = (G + G_{\text{load}}) \cdot \cos \alpha \cdot f + (G + G_{\text{load}}) \cdot \sin \alpha = \\ = (G + G_{\text{load}}) \cdot (\cos \alpha \cdot f + \sin \alpha) \quad (1)$$

Kod izvoženja drva forvarderom niz nagib terena, obodna sila savladava iste otpore kao i kod izvoženja drva uz nagib, samo što otpor svladavanja nagiba terena sada djeluje u suprotnome smjeru, tj. smjeru kretanja vozila (izraz 2).



Slika 2. Ovisnost faktora kretnosti o indeksu kotača i konusnome indeksu tla
Fig. 2 Dependence of mobility factors on wheel numeric and cone index

$$F_t = (G + G_{load}) \cdot \cos\alpha \cdot f - (G + G_{load}) \cdot \sin\alpha = (G + G_{load}) \cdot (\cos\alpha \cdot f - \sin\alpha) \quad (2)$$

Dijeljem izraza 1 i 2 sa adhezijskom težinom nominalno natovarenoga forvardera, dolazi se do izraza faktora bruto vuče pri izvoženju drva forvarderom uz (izraz 3) i niz nagib terena (izraz 4). Faktor bruto vuče je pokazatelj koji govori koliko se adhezijske težine forvardera pretvara u obodnu silu.

$$\kappa = \frac{(G + G_{load}) \cdot (\cos\alpha \cdot f + \sin\alpha)}{(G + G_{load}) \cdot \cos\alpha} = \frac{\cos\alpha \cdot f + \sin\alpha}{\cos\alpha} = f + tg\alpha \quad (3)$$

$$\kappa = \frac{(G + G_{load}) \cdot (\cos\alpha \cdot f - \sin\alpha)}{(G + G_{load}) \cdot \cos\alpha} = \frac{\cos\alpha \cdot f - \sin\alpha}{\cos\alpha} = f - tg\alpha \quad (4)$$

Kretnost vozila ovisi i o njegovim trakcijskim značajkama tj. ovisnosti obodne/vučne sile o klizanju kotača i nosivosti podloge (Tiwari i dr. 2010, Mason i dr. 2018). Razvojem empirijske metode proučavanja složenoga sustava kotač – tlo (slika 2), za povezivanje vučnih značajki vozila s nosivosti tla (konusnim indeksom) koristi se – indeks kotača (Saarilahti 2002). Indeks kotača predstavlja bezdimenzijski parametar (faktor), koji opisuje međudjelovanje opterećenoga kotača i tla. Ovaj je pokazatelj određen odnosom doirnoga tlaka kotača na tlo i nosivosti tla mjerene penetrometrom (Brixius 1987). Pomoću faktora kretnosti (bruto i neto vuče, otpora kotrljanja) izražavaju se i procjenjuju vučne značajke vozila (obodna i vučna sila, otpor kotrljanja) na osnovi opterećenja kotača vozila (slika 2). Izvoženje

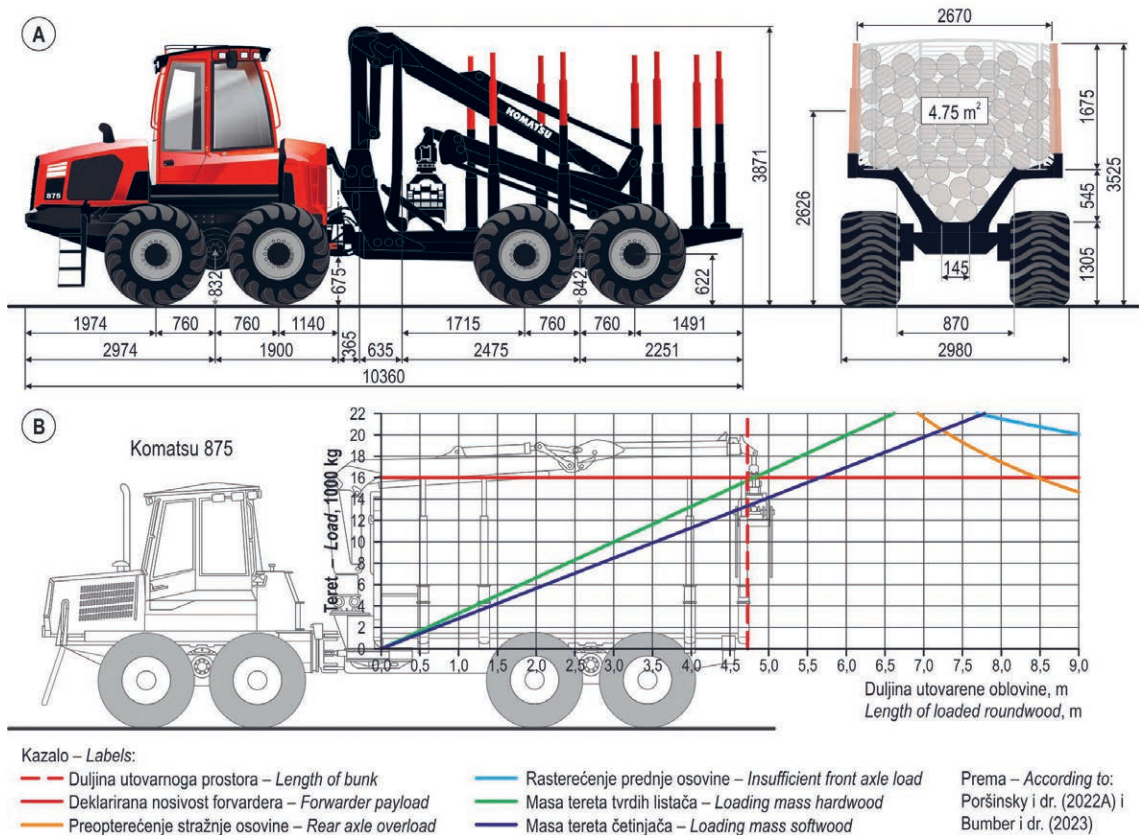
drva forvarderima započinje njihovim kretanjem koje je određeno sjecištem krivulja faktora bruto vuče i otpora kotrljanja, a područje iznad krivulje faktora bruto vuče je područje nemogućega kretanja vozila jer su u tom slučaju sile otpora kretanja vozila veće od obodne sile (Poršinsky i Horvat 2005). U slučaju različitih dimenzija prednjih i stražnjih pneumatika kotača vozila, odnosno nejednake raspodjele opterećenja između prednje i stražnje osovine vozila, za procjenu se kretnosti vozila koristi tzv. referentni kotač – kotač vozila s najnižom vrijednošću indeksa kotača, odnosno najvećim opterećenjem kotača (Saarilahti 2002).

Ciljevi rada su: i) izmjeriti položaj točke težišta primjernoga osmokotačnoga forvardera Komatsu 875, ii) razviti model raspodjele osovinskih opterećenja nominalno natovarenoga forvardera pri izvoženju drva uz i niz nagib terena, iii) utvrditi nominalni tlak na podlogu i minimalni konusni indeks tla, iv) utvrditi granični nagib kretnosti forvardera temeljem vučne značajke vozila pri izvoženju drva uz nagib terena, v) utvrditi granični nagib terena pri izvoženju drva niz nagib terena kod kojega obodna sila poprima vrijednost nula.

2. METODE METHODS

Izrada modela procjene kretnosti forvardera pri izvoženju drva uz i niz nagib terena, zasnovana je na forvarderu Komatsu 875, deklarirane nosivosti 16.000 kg (slika 3A).

Kut loma prednje i stražnje šasijske forvardera iznosi $\pm 42^\circ$, a vertikalnu gibljivost forvardera pri kretanju po nepravilnostima terena osigurava poprečni kut zakretanja od $\pm 16^\circ$, ali i kut osciliranja tandem kotača bogi osovine od $\pm 20^\circ$. Vozilo



Slika 3. Dimenzije (A) i Plan raspodjele tereta (B) forvardera Komatsu 875
Fig. 3 Dimensions (A) and Load distribution plan (B) of Komatsu 875 forwarder

pokreće šest-cilindarski dizelski motor s prednabijanjem, stapajnog obujma 7400 cm³, najveće snage 190 kW pri 1900 min⁻¹ i zakretnog momenta 1130 Nm pri 1500 min⁻¹. Forvarder je opremljen hidrauličkom dizalicom Komatsu 145F, mase 2400 kg i dosega 8,5 m te najvećega podiznog momenta 145 kNm.

Prednja i stražnja bogi osovina forvardera Komatsu 875 su iste – NAF PTA 76 za koje proizvođač navodi najveće dopušteno statičko opterećenje od 360 kN te najveće dopušteno dinamičko opterećenje od 290 kN (NAF 2022). Kotači prednje i stražnje osovine opremljeni su pneumaticima istih dimenzija 710/45-26.5 20 PR (Nokian Forest King TRS 2), čija nosivost pri tlaku punjenja zrakom od 500 kPa i brzini kretanja <10 km/h iznosi 6,9 t/gumi (Nokian 2022).

Poprečni presjek utovarnog prostora iznosi 4,75 m², a duljine je 4,726 m. Poršinsky i dr. (2022A) analizirajući dimenzijske i masene značajke forvardera Komatsu 875 u skladu s normom ISO 13860 (2016), izrađuju i Plan raspodjele tereta ovog forvardera za tvrde listače i četinjače prema metodologiji koju je razvio njemački Kuratorij za šumski rad i šumsku tehniku – KWF (Weise 2002, 2003A, 2003B) te zaključuju da pri ispunjenom poprečnom presjeku utovarnoga prostora oblovinom tvrdih listača duljine od 4,82 m te četinjača od 5,65 m, neće doći do: 1) prekora-

čenja deklarirane nosivosti od strane proizvođača, 2) preopterećenja nosivosti prednje i stražnje osovine, 3) preopterećenja nosivosti pneumatika te 4) rasterećenja prednje osovine (slika 3B).

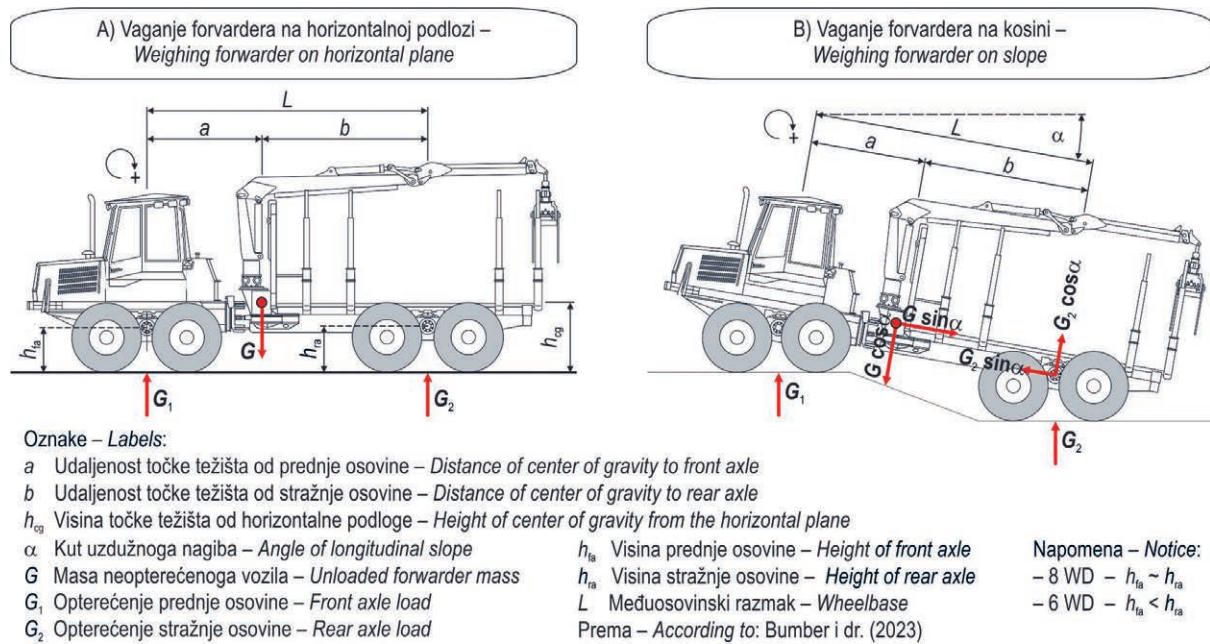
Položaj točke težišta forvardera utvrđen je metodom podizanja osovine (ISO 16231-2 2015). Vaganjem neopterećenog forvardera na ravnoj podlozi utvrditi će se opterećenja pojedinih kotača vozila (prijenosne 10-tonske vage Telub), odnosno njegovih osovinskih opterećenja, potrebnih za određivanje horizontalne udaljenosti točke težišta od prednje i stražnje osovine forvardera (slika 4A). Poznavanjem međuosovinskog razmaka forvardera i poštvajući uvjete prikazane u izrazima 5 i 6 te postavljanjem jednadžbe ravnoteže oko prednje osovine (izraz 7) forvardera (pozitivni momenti su u smjeru kretanja kazaljke na satu), izvedeni su izrazi za izračun horizontalnih udaljenosti točke težišta od prednje (izraz 8) i stražnje osovine (izraz 9).

$$G_1 + G_2 = G \quad (5)$$

$$a + b = L \quad (6)$$

$$G \cdot a - G_2 \cdot L = 0 \quad (7)$$

$$a = \frac{G_2 \cdot L}{G} \quad (8)$$



Slika 4. Utvrđivanje točke težišta forvardera

Fig. 4 Determining the centre of gravity of the forwarder

$$b = L - a \quad (9)$$

Vaganje opterećenja ispod stražnjih kotača nenatovarenog forvardera na kosini (korištena je 25-tonska podizna platforma) provedeno je sa ciljem utvrđivanja promjene opterećenja stražnje osovine forvardera s obzirom na poznati uzdužni nagib vozila (slika 4B). Postavljanjem jednadžbe ravnoteže oko prednje osovine (izraz 10) forvardera (smjer pozitivnih momenata je u smjeru kretanja kazaljke na satu), izveden je izraz za izračun visine težišta nenatovarenoga forvardera (izraz 11). S obzirom da su bogi osovine i pneumatici osam-kotačnih forvardera istih dimenzija te uz zanemarivanje različitih progiba pneumatika kotača prednje i stražnje osovine forvardera proizlazi da su i visine prednje i stražnje osovine forvardera iste ($h_{fa} = h_{ra} = h_a$). Navedenim izraz za izračun visine težišta osam-kotačnog forvardera poprima oblik prikazan u jednadžbi 12.

$$G \cdot \cos \alpha \cdot a + G \cdot \sin \alpha \cdot (h_{cg} - h_{fa}) - G_2 \cdot \cos \alpha \cdot L + G_2 \cdot \sin \alpha \cdot (h_{ra} - h_{fa}) - G_1 \cdot 0 = 0 \quad (10)$$

$$h_{cg} = \frac{G_2 \cdot \cos \alpha \cdot L - G \cdot \cos \alpha \cdot a - G_2 \cdot \sin \alpha \cdot (h_{ra} - h_{fa})}{G \cdot \sin \alpha} + h_{fa} \quad (11)$$

$$h_{cg} = \frac{G_2 \cdot \cos \alpha \cdot L - G \cdot \cos \alpha \cdot a}{G \cdot \sin \alpha} + h_a \quad (12)$$

Model raspodjele osovinskih opterećenja nominalno natovarenoga forvardera pri izvoženju drva uz i niz nagib terena, zasnovan je na poznavanju položaja točke težišta neopterećenoga forvardera te njegovih ostalih dimenzijskih i masenih značajki prikazanih na slici 1, ali i masi utovarenoga drva pri ispunjenom poprečnom presjeku utovarnoga prostora na način koji koristi u svojim izvješćima njemački KWF (izraz 13). Pri izračunima KWF sugerira korištenje vrijednosti 0,7 za popunjenost utovarnoga prostora, odnosno gustoću drva od 1000 kg/m^3 (tvrde listiće) te 700 kg/m^3 (četinjače).

$$G_{load} = A \cdot f \cdot \rho \cdot s \quad (13)$$

gdje su:

- G_{load} masa utovarenoga drva (kg)
- A površina poprečnoga presjeka utovarnoga prostora (m^2)
- f iskoristivost (popunjenost) poprečnoga presjeka utovarnoga prostora (%)
- ρ gustoća utovarenoga drva (kg/m^3)
- s duljina utovarene oblovine (m).

Pri izvoženju drva uz nagib terena (slika 1A), opterećenje prednje osovine forvardera izvedeno je postavljanjem jednadžbe ravnoteže oko stražnje osovine (smjer pozitivnih momenata je suprotan od smjera kazaljke na satu) – izrazi 14 i 15, dok je opterećenje stražnje osovine forvardera izvedeno postavljanjem jednadžbe ravnoteže oko prednje osovine (smjer pozitivnih momenata je u smjeru kazaljke na satu) – izrazi 16 i 17.

$$G \cdot \cos \alpha \cdot b - G \cdot \sin \alpha \cdot (h_{cg} - h_{ra}) + G_{load} \cdot \cos \alpha \cdot \left(d - \frac{L_{load}}{2} \right) - G_{load} \cdot \sin \alpha \cdot (h_{load} - h_{ra}) - G_1 \cdot \cos \alpha \cdot (a + b) - G_1 \cdot \sin \alpha \cdot (h_{fa} - h_{ra}) = 0 \quad (14)$$

$$G_1 = \frac{G \cdot \left[\cos \alpha \cdot b - \sin \alpha \cdot (h_{cg} - h_{ra}) \right] + G_{load} \cdot \left[\cos \alpha \cdot \left(d - \frac{L_{load}}{2} \right) - \sin \alpha \cdot (h_{load} - h_{ra}) \right]}{\cos \alpha \cdot (a + b) + \sin \alpha \cdot (h_{fa} - h_{ra})} \quad (15)$$

$$G \cdot \cos \alpha \cdot a + G \cdot \sin \alpha \cdot (h_{cg} - h_{fa}) + G_{load} \cdot \cos \alpha \cdot \left(\frac{L_{load}}{2} + c \right) + G_{load} \cdot \sin \alpha \cdot (h_{load} - h_{fa}) - G_2 \cdot \cos \alpha \cdot (a + b) - G_2 \cdot \sin \alpha \cdot (h_{ra} - h_{fa}) = 0 \quad (16)$$

$$G_2 = \frac{G \cdot \left[\cos \alpha \cdot a + \sin \alpha \cdot (h_{cg} - h_{fa}) \right] + G_{load} \cdot \left[\cos \alpha \cdot \left(\frac{L_{load}}{2} + c \right) + \sin \alpha \cdot (h_{load} - h_{fa}) \right]}{\cos \alpha \cdot (a + b) + \sin \alpha \cdot (h_{ra} - h_{fa})} \quad (17)$$

Pri izvoženju drva niz nagib terena (slika 1B), opterećenje prednje osovine forvardera izvedeno je postavljanjem jednadžbe ravnoteže oko stražnje osovine (smjer pozitivnih momenata je u smjeru kazaljke na satu) – izrazi 18 i 19, dok je opterećenje stražnje osovine forvardera izvedeno postavljanjem jednadžbe ravnoteže oko prednje osovine (smjer pozitivnih momenata je suprotan od smjera kazaljke na satu) – izrazi 20 i 21.

$$G \cdot \cos \alpha \cdot b + G \cdot \sin \alpha \cdot (h_{cg} - h_{ra}) + G_{load} \cdot \cos \alpha \cdot \left(d - \frac{L_{load}}{2} \right) + G_{load} \cdot \sin \alpha \cdot (h_{load} - h_{ra}) - G_1 \cdot \cos \alpha \cdot (a + b) + G_1 \cdot \sin \alpha \cdot (h_{fa} - h_{ra}) = 0 \quad (18)$$

$$G_1 = \frac{G \cdot \left[\cos \alpha \cdot b + \sin \alpha \cdot (h_{cg} - h_{ra}) \right] + G_{load} \cdot \left[\cos \alpha \cdot \left(d - \frac{L_{load}}{2} \right) + \sin \alpha \cdot (h_{load} - h_{ra}) \right]}{\cos \alpha \cdot (a + b) - \sin \alpha \cdot (h_{fa} - h_{ra})} \quad (19)$$

$$G \cdot \cos \alpha \cdot a - G \cdot \sin \alpha \cdot (h_{cg} - h_{fa}) + G_{load} \cdot \cos \alpha \cdot \left(\frac{L_{load}}{2} + c \right) - G_{load} \cdot \sin \alpha \cdot (h_{load} - h_{fa}) - G_2 \cdot \cos \alpha \cdot (a + b) + G_2 \cdot \sin \alpha \cdot (h_{ra} - h_{fa}) = 0 \quad (20)$$

$$G_2 = \frac{G \cdot \left[\cos \alpha \cdot a - \sin \alpha \cdot (h_{cg} - h_{fa}) \right] + G_{load} \cdot \left[\cos \alpha \cdot \left(\frac{L_{load}}{2} + c \right) - \sin \alpha \cdot (h_{load} - h_{fa}) \right]}{\cos \alpha \cdot (a + b) - \sin \alpha \cdot (h_{ra} - h_{fa})} \quad (21)$$

Visina težišta tereta u izrazima od 14 do 21, izračunana je sukladno odredbama norme ISO 13860 (2016) za koji Poršinsky i dr. (2022B) izvode izraz za izračun, dok su ostale dimenzijske značajke primjernoga forvardera prikazane na slici 3. Opterećenje kotača forvardera (G_w), ovisno o uzdužnom nagibu terena (a) te deklariranoj količini (masi) utovarenoga drva, pretpostavit će podjednaku raspodjelu adhezijskog osovinskog opterećenja. Na osnovi opterećenja kotača forvar-

dera, utvrdit će se referentni kotač vozila (kao onaj s najvećim opterećenjem), ali i izračunati nominalni tlak forvardera na podlogu (Mellgren 1980) prema izrazu 22, odnosno vrijednost najmanje nosivosti šumskog tla (Wronsky i Humpreys 1994) zasnovane na smjernici privlačenja drva na okolišno prihvatljiv način (izraz 23).

$$NGP = \frac{G_w}{r \cdot b} \quad (22)$$

$$CI_{\min} = 7,2 \cdot NGP \quad (23)$$

Procjena vučnih značajki forvardera Komatsu 875 odredit će se temeljem Brixiusovog modela (1987), s obzirom na: 1) opterećenje referentnog kotača vozila, 2) konusni indeks tla, 3) klizanje kotača (δ) 10 – 15 % koje odgovaraju najvećoj vučnoj korisnosti (Brixus 1987) te 20 – 25 % koje odgovara granici okolišne pogodnosti (Hittenbeck 2013). Brixiusov model kretnosti vozila zasnovan je na izrazima: 1) indeksa kotača vozila (izraz 24), 2) faktora otpora kotrljanja (izraz 25) te 3) faktora bruto vuče (izraz 26).

$$N_w = \left(\frac{CI \cdot b \cdot d}{G_w} \right) \left(\frac{1 + 5 \frac{\Delta}{h}}{1 + 3 \frac{b}{d}} \right) \quad (24)$$

$$f = \frac{1,0}{N_w} + 0,04 + \frac{0,5 \cdot \delta}{\sqrt{N_w}} \quad (25)$$

$$\kappa = 0,88 \left(1 - e^{-0,1 N_w} \right) \left(1 - e^{-7,5 \delta} \right) \quad (26)$$

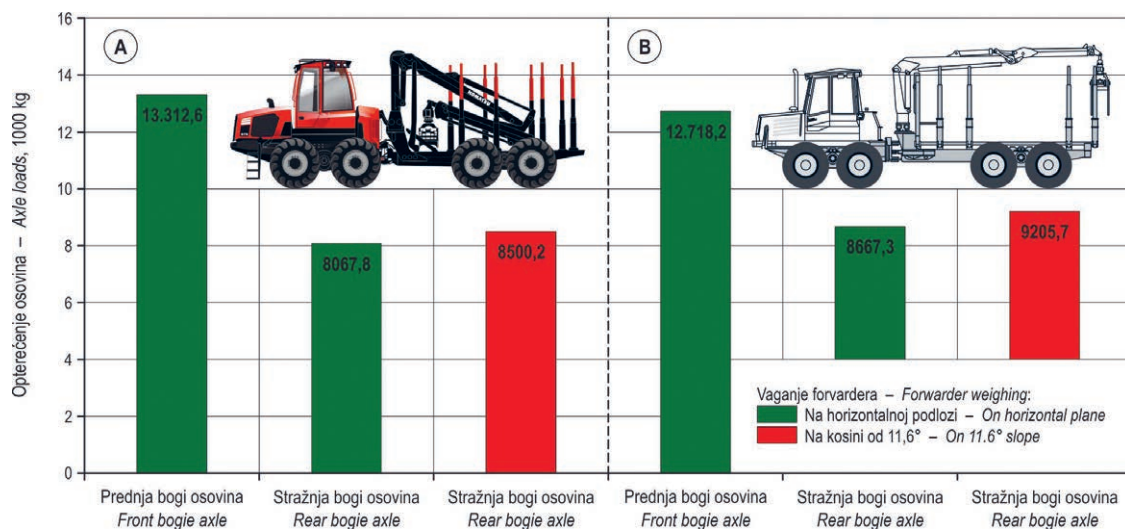
$$\Delta = 0,008 + 0,01 \left[0,365 + \left(\frac{170}{p_i} \right) \right] \cdot G_w \quad (27)$$

Navedeni izrazi koji predviđaju vrijednosti indeksa kotača i faktora kretnosti razvijeni su regresijskom analizom mjernih rezultata 121 pokusa, tj. kombinacije tla i dimenzija pneumatika, odnosno opterećenja kotača. S obzirom na to da je indeks kotača temeljen i na progibu pneumatika kotača, za procjenu ovoga parametra korišten je empirijski izraz (Saarilahti 2002), koji se zasniva na tlaku punjenja pneumatika zrakom (p_i) i opterećenju kotača (izraz 27). Iako je Brixiusov model razvijen za potrebe procjene kretnosti poljoprivrednih traktora po oranicama, mnogi autori (Eichrodt 2003, Elwaleed i dr. 2006, Lubello 2008, Đuka i dr. 2018A, Poršinsky i dr. 2021, Bumber i dr. 2023) ga smatraju najpogodnijim za procjenu kretnosti šumskih vozila, uslijed uklapanja značajki opterećenih kotača šumskih vozila u područje primjenjivosti modela.

Granični nagib terena pri izvoženju drva forvarderom uz nagib temeljem vučne značajke zasnovan je na vrijednostima opterećenja referentnoga kotača nominalno natovarenoga forvardera pri različitim uzdužnim nagibima terena, kod kojih se izjednačavaju vrijednosti $tg\alpha$ s razlikom faktora bruto vuče (izraz 26) i faktora otpora kotrljanja (izraz 25) izračunatog na osnovi raspodjele opterećenja kotača i Brixius-ovog modela, s ciljem utvrđivanja vrijednosti konusnoga indeksa tla (izraz 28). Na taj način, svakoj vrijednosti uzdužnoga nagiba terena pri izvoženju drva nominalno natovarenoga forvardera, pridružena je vrijednost konusnoga indeksa tla.

$$tg\alpha = \left[0,88 \left(1 - e^{-0,1 N_w} \right) \left(1 - e^{-7,5 \delta} \right) \right] -$$

$$\left[\frac{1,0}{N_w} + 0,04 + \frac{0,5 \cdot \delta}{\sqrt{N_w}} \right] \Rightarrow CI \quad (28)$$



Slika 5. Osovinska opterećenja na horizontalnoj podlozi i kosini od 11,6° – neopterećeni Komatsu 875

Fig. 5 Axle loads on horizontal plane and 11.6° slope – empty Komatsu 875

Tablica 1. Položaj točke težišta forvardera Komatsu 875
Table 1 Center of gravity position – Komatsu 875 forwarder

	Dizalica u transportnom položaju Loader in transport position	Dizalica u ispruženome položaju Loader in extended position
Udaljenost točke težišta od prednje osovine – <i>Distance of center of gravity from the front axle</i>	2028 mm	2178 mm
Udaljenost točke težišta od stražnje osovine – <i>Distance of center of gravity from the rear axle</i>	3347 mm	3197 mm
Visina točke težišta od horizontalne podloge – <i>Height of center of gravity from the horizontal plane</i>	1367 mm	1496 mm

Granični nagib terena pri izvoženju drva nominalno natovarenog forvardera niz nagib terena kod kojeg obodna sila poprима vrijednost nula te se postupno javlja sila kočenja, isto je tako, zasnovan na vrijednostima opterećenja referentnoga kotača pri različitim uzdužnim nagibima terena kod kojih vrijednosti faktora otpora kotrljanja izračunatog na osnovi raspodjele opterećenja i Brixsiusovog modela izjednačavaju sa tangensom kuta nagiba terena (izraz 29).

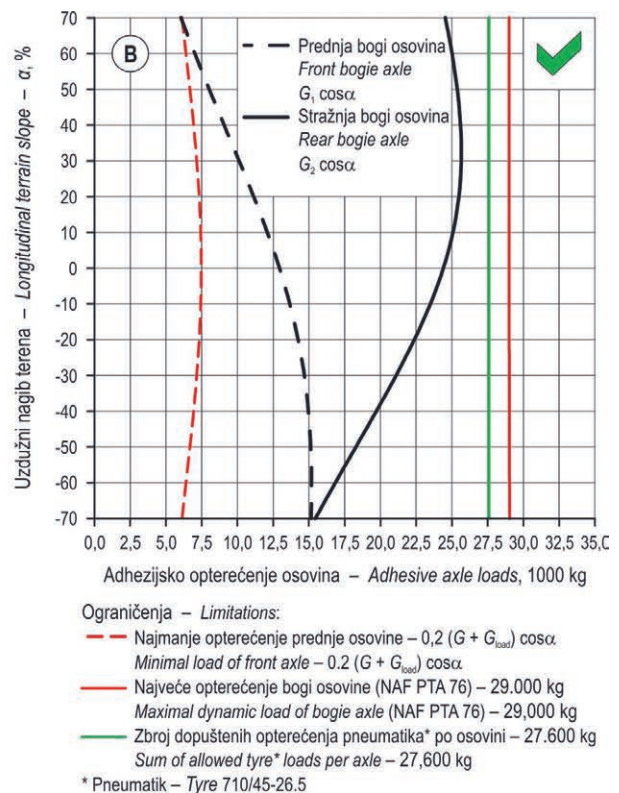
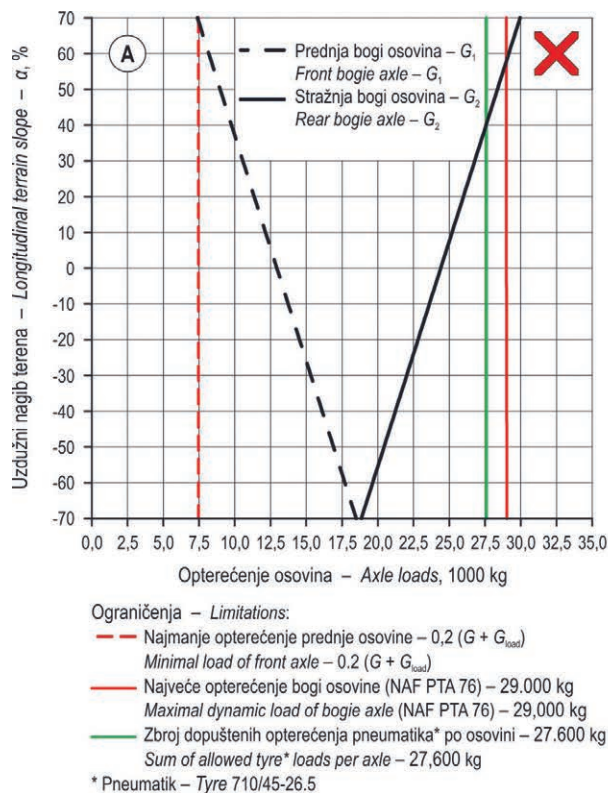
$$tg\alpha = \frac{1,0}{N_w} + 0,04 + \frac{0,5 \cdot \delta}{\sqrt{N_w}} \Rightarrow CI \quad (29)$$

3. REZULTATI RESULTS

Rezultate izmjere osovinskih opterećenja nenatovarenoga forvardera Komatsu 875 na horizontalnoj podlozi i kosini od 11,6° potrebnih za izračun točke težišta vozila prikazuje slika 5.

S obzirom da norma ISO 13860 (2016) ne određuju način iskazivanja osovinskih opterećenja forvardera s obzirom na položaj hidraulične dizalice, mjerenja su provedena u dvije inačice: 1) s dizalicom složenom u transportnom položaju (slika 5A) te 2) s dizalicom u ispruženome položaju (slika 5B).

Opterećenje prednje osovine forvardera sa dizalicom složenom u transportnom položaju iznosi 13.312,6 kg (62,3 % neto mase), a opterećenje stražnje osovine 8067,8 kg, odnosno 37,7 % neto mase (slika 5A). Kod vaganja forvardera sa ispruženom dizalicom (slika 5B), došlo je do promjene raspodjele opterećenja po osovina, gdje je prednja osovina opterećena sa 12.718,2 kg (59,5 %) te stražnja sa 8667,3 kg (40,5 %). Vaganjem forvardera na podiznoj platformi – kosini od 11,6° došlo je do povećanja opterećenja ispod stražnjih kotača u odnosu na mjerenja na horizontalnoj podlozi (slika 5). Vaganjem neopterećenog forvardera na kosini utvrđen je porast opterećenja stražnje osovine forvardera



Slika 6. Ovisnost osovinskih opterećenja i adhezijskih osovinskih opterećenja o smjeru i nagibu terena
Fig. 6 Axle loads and adhesive axle loads vs. terrain slope and slope direction

u odnosu na vaganje na horizontalnoj podlozi sa 8067,8 kg na 8500,2 kg (dizalica složena u transportni položaj), odnosno sa 8667,3 kg na 9205,7 kg (dizalica u ispruženom položaju).

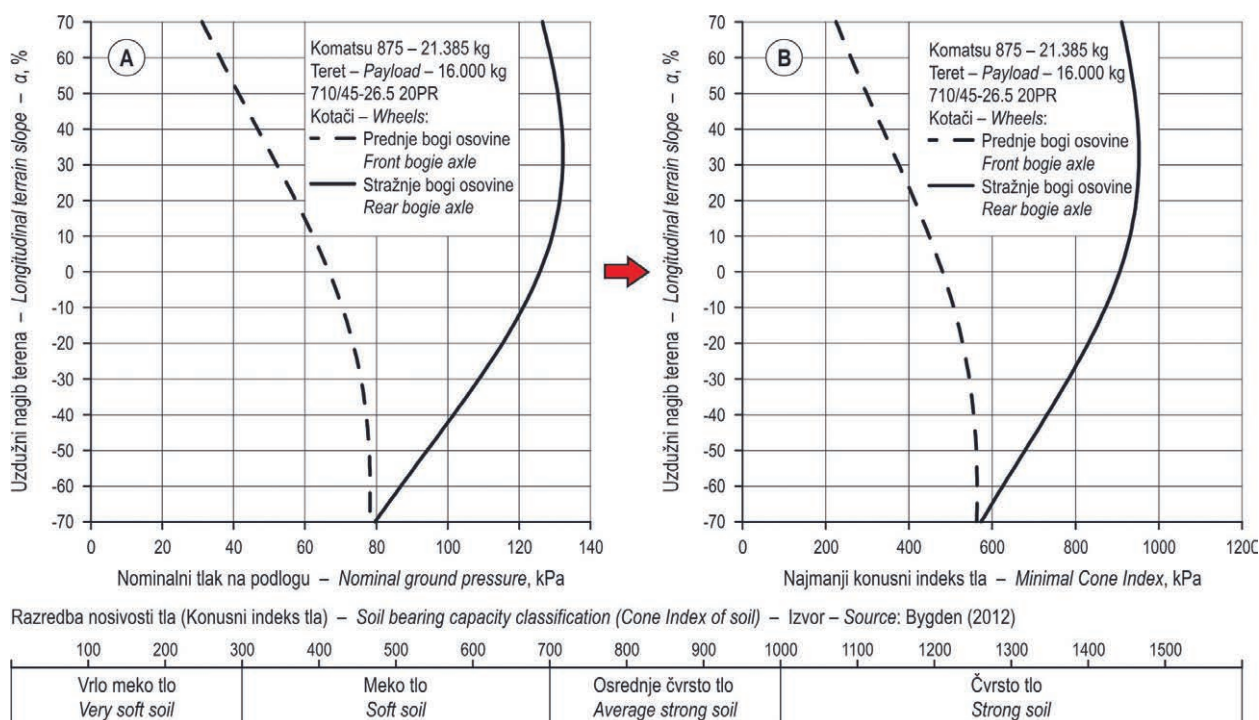
Poznavanjem međuosovinskog razmaka (5375 mm) te primjenom rezultata izmjere osovinskih opterećenja i ukupne mase forvardera Komatsu 875 na horizontalnoj podlozi uz korištenje izraza 8 i 9, izračunata je udaljenost točke težišta forvardera od prednje i stražnje osovine vozila za forvarder sa dizalicom u transportnom položaju i sa ispruženom dizalicom (tablica 1). Na osnovi rezultata izmjere opterećenja stražnje osovine forvardera na kosini od 11,6°, ali i izračunatih vrijednosti horizontalne udaljenosti točke težišta od prednje osovine, primjenom izraza 12 izračunata je visina težišta forvardera Komatsu 875 sa dizalicom u transportnom položaju i sa ispruženom dizalicom (tablica 1).

Rezultati položaja točke težišta forvardera Komatsu 875 utvrđene metodom podizanja osovine vozila (tablica 1), ukazali su na porast udaljenosti točke težišta od prednje osovine kod forvardera sa ispruženom dizalicom u odnosu kada je ona u transportnom položaju (2028 mm → 2178 mm), ali i smanjenje udaljenosti točke težišta forvardera od stražnje osovine (3347 mm → 3197 mm), kao i porasta visine težišta forvardera (1367 mm → 1496 mm). Navedene razlike položaja točke težišta, posljedica su premještanja dijela mase podiznog, produžnog i izvlačnog kraka hidraulične dizalice ka stražnjoj osovini vozila, kao i njenim podizanjem u ravninu držača tereta.

Za izračun opterećenja prednje (izrazi 15 i 19) i stražnje osovine forvardera (izrazi 17 i 21) nominalno natovarenoga forvardera Komatsu 875, ovisno o udužnom nagibu i smjeru nagiba terena svakako je pogodnija primjena položaja točke težišta forvardera sa ispruženom dizalicom jer odgovara izvoženju drva nominalno natovarenoga forvardera. Pri ispunjenom poprečnome presjeku utovarnoga prostora (4,75 m²) oblovinom tvrdih listača (1000 kg/m³) duljine 4,82 m deklarirana nosivost (16 t) forvardera Komatsu 875 neće se prekoračiti (izraz 13).

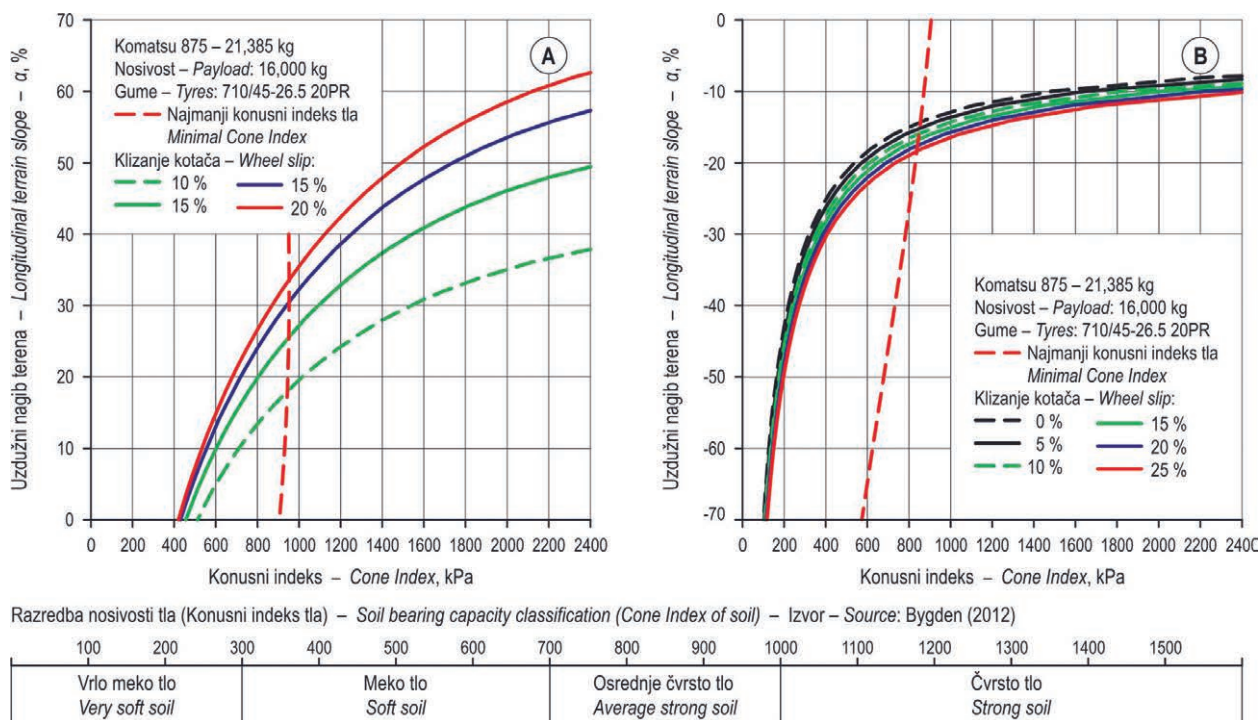
Raspodjelu osovinskih i adhezijskih osovinskih opterećenja nominalno natovarenoga forvardera Komatsu 875, s obzirom na izvoženje drva uz i niz nagib terena u granicama ±70 % prikazuje slika 6.

Pri izvoženju drva uz nagib terena, opterećenje stražnje osovine forvardera raste od 24,4 t do 30 t, dok kod prednje osovine dolazi do rasterećenja od 12,9 t (ravan teren) do 7,4 t (uzdužni nagib od 70 %), dok pri izvoženju drva niz nagib dolazi do rasterećenja stražnje osovine od 24,4 t do 18,9 t, a prednja osovina se dodatno opterećuje u rasponu od 12,9 t do 24,4 t (slika 6A). Uzdužni nagib terena od 41 % kod kojeg opterećenje stražnje osovine doseže zbroj dopuštenih opterećenja pneumatika 710/45-26.5, odnosno 50 % kod kojeg opterećenje stražnje osovine doseže dopušteno dinamičko opterećenje bogi osovine NAF PTA 76, ali i 68 % uzdužnog nagiba nakon kojega je opterećenje prednje osovine <20 % ukupne mase forvardera Komatsu 875 s deklariranim teretom, ne mogu se poimati kao ograničenja



Slika 7. Ovisnost nominalnog tlaka na podlogu i najmanjeg konusnog indeksa o nagibu terena

Fig. 7 Nominal ground pressure and minimal cone index vs. terrain slope



Slika 8. Granični nagib kretnosti forvardera – uz nagib terena (A), niz nagib terena (B)
Fig. 8 Gradeability of forwarder – uphill (A), downhill (B)

primjene forvardera, jer se radi o gravitacijskom opterećenju koje nije okomito na uzdužni nagib terena.

Ograničenja primjene forvardera vezana su ponajprije za adhezijsko opterećenje osovina (slika 6B), koje je okomito na kosinu uzdužnog nagiba terena. Adhezijsko opterećenje stražnje osovine forvardera Komatsu 875 s nominalnim teretom pri izvoženju drva uz nagib terena kreće se od 24,4 t (ravan teren) do 24,5 t (uzdužni nagib od 70 %), s izraženim maksimumom od 26,6 t kod uzdužnih nagiba terena između 30 % i 40 %. Pri izvoženju drva niz nagib terena dolazi do rasterećenja stražnje osovine forvardera od 24,4 t (ravan teren) do 15,4 t (nagib -70 %), a prednja osovina se dodatno adhezijski opterećuje u rasponu od 12,9 t (ravan teren) do 15,1 t (nagib -70 %). Analiza adhezijskih opterećenja prednje i stražnje osovine nominalno natovarenoga forvardera Komatsu 875 pri izvoženju drva uz i niz nagib terena u granicama $\pm 70\%$ ukazala je da u navedenom rasponu ne dolazi do prekoračenja: 1) zbroja dopuštenih opterećenja pneumatika 710/45-26.5 kotača po osovini (27,6 t) i 2) dopuštenog dinamičkog opterećenja bogi osovina NAF PTA 76 (29 t). Rasterećenje prednje osovine sa stajališta upravljivosti forvarderom, a koje ne smije pasti ispod 20 % ukupne mase opterećenoga forvardera nastupa pri uzdužnome nagibu terena od 68 %.

U daljnjim analizama, za potrebe izračuna nominalnog tlaka na podlogu, indeksa kotača te graničnog nagiba terena na temelju vučne značajke vozila, opterećenje kotača po osovinama ovisno o uzdužnome nagibu terena pretpostavit

će podjednaku raspodjelu adhezijskog osovinskog opterećenja nazivno opterećenog forvardera Komatsu 875.

Raspodjelu nominalnog tlaka na podlogu i najmanjega konusnoga indeksa tla nazivno natovarenoga osmokotačnog forvardera Komatsu 875 opremljenog pneumaticima 710/45-26.5 ovisno o uzdužnome nagibu terena $\pm 70\%$ prikazuje slika 7.

Pri izvoženju drva uz nagib terena, nominalni tlak na podlogu kotača prednje bogi osovine kreće se od 67 kPa (ravan teren), a povećanjem uzdužnog nagiba terena se smanjuje uslijed rasterećenja prednje osovine na 31 kPa (nagib od 70 %), dok se nominalni tlak na podlogu kotača stražnje bogi osovine kreće od 126 kPa (ravan teren) s izraženom najvećom vrijednošću od 132 kPa kod uzdužnih nagiba terena između 30 % i 40 % (slika 7A). Kretanjem forvardera niz nagib terena, nominalni tlak na podlogu kotača prednje bogi osovine raste od 67 kPa (0 % nagiba) do 78 kPa (-70 % nagiba), a nominalni tlak na podlogu kotača stražnje bogi osovine se smanjuje od 126 kPa (0 % nagiba) do 80 kPa (-70 % nagiba).

Okolišnu pogodnost izvoženja drva forvarderom Komatsu 875 prikazuje analiza najmanjega konusnoga indeksa tla (slika 7B) i to na osnovi vrijednosti referentnih (opterećenjih) kotača stražnje bogi osovine neovisno o smjeru privlačenja drva. Pri izvoženju drva uz nagib terena, najmanji konusni indeks tla se kreće od 906 kPa (ravan teren) do 950 Pa (uzdužni nagibi terena od 30 % do 40 %), dok pri izvoženju drva niz nagib terena se smanjuje od 906 kPa do

573 kPa. Navedenim, djelotvorno izvoženje drva na okolišno prihvatljiv način nazivno opterećenog forvardera Komatsu 875 opremljenog pneumaticima 710/45-26.5 uz nagib terena vezano je ponajprije za povoljne uvjete nosivosti šumskog tla (čvrsto tlo), dok pri izvoženju drva niz nagib terena zadovoljava uvjete osrednje čvrstoga tla.

Granični nagib kretnosti nominalno natovarenoga forvardera Komatsu 875 <na temelju vučne značajke vozila uz nagib terena ($\kappa = f + \text{tga}$) značajno ovisi o nosivosti šumskog tla iskazanoga konusnim indeksom, ali i klizanju kotača vozila (slika 8A). Pri stalnom konusnom indeksu tla od 1 MPa, granični nagib kretnosti forvardera Komatsu 875 iznosi: 20 % pri klizanju kotača od 10 %, 28 % pri klizanju kotača od 15 %, 32 % pri klizanju kotača od 20 % te 36 % pri klizanju od 25 %.

Područje djelotvornoga rada na okolišno prihvatljiv način nominalno natovarenoga osamkotačnog forvardera Komatsu 875 opremljenoga pneumaticima 710/45-26.5 prikazano je kao sjecište krivulja graničnoga nagiba kretnosti pri klizanju kotača od 25 % i najmanjega konusnog indeksa tla (slika 8A). Uvjeti nosivosti šumskog tla ograničeni su vrijednošću najmanjeg konusnoga indeksa tla od 950 kPa graničnim nagibom kretnosti od 33 %, a daljnjim porastom konusnoga indeksa raste i granični nagib kretnosti forvardera: 1 MPa → 36 %, 1,2 MPa → 42 %, 1,4 MPa → 48 %, 1,6 MPa → 52 %, 1,8 MPa → 56 %, 2,0 MPa → 58 %, 2,2 MPa → 61 %, 2,4 MPa → 63 %, 2,6 MPa → 64 %. Za ovako određeno područje rada forvardera, svakako treba poimati i rezultate permanentnog mjerenja konusnoga indeksa tla tijekom godine dana (na primjeru distričnih smeđih tala gorskih bukovo-jelovih šuma), a koji ukazuju da se tijekom godine konusni indeks tla kretao u rasponu od 800 kPa do 1200 kPa, izuzev mjeseca srpnja kada doseže vrijednosti od 2200 kPa (Đuka i dr. 2018B). Utjecaj smanjenja tereta (utovarenoga drva) forvardera na granični nagib terena pri izvoženju drva uz nagib nije razmatran zbog nepovoljnog utjecaja na proizvodnost izvoženja drva (Spinelli i dr. 2004, Poršinsky i dr. 2014).

Granični nagib terena nominalno natovarenog forvardera pri izvoženju drva niz nagib terena (slika 8B) kod kojeg obodna sila poprima vrijednost nula ($F_t = 0 \rightarrow f = \text{tga}$) ovisi samo o nosivosti šumskog tla, jer su pri stalnome konusnome indeksu tla razlike u graničnim nagibima terena pri klizanjima kotača u rasponu od 0 % do 25 % zanemarive. Polučeni rezultati su logični, jer uslijed smanjivanja nosivosti tla iskazane konusnim indeksom raste propadanje vozila u tlo te samim time i otpor kotrljanja za što je potreban i veći nagib pri izvoženju drva nizbrdo, kod kojega su faktor otpora kotrljanja i tangens kuta nagiba terena u ravnoteži. Međutim, uspoređujući polučene vrijednosti prikazane u dijagramu slike 8B s općeprihvaćenim u literaturi vrijednostima nagiba terena (Visser i Stampfer 2015, Cavalli i

Amishev 2019) koja svladavaju šumska vozila od ± 33 %, može se zaključiti da granični nagib terena pri izvoženju drva nizbrdo kod kojega obodna sila poprima vrijednost nula nije dobar pokazatelj ograničenja kretnosti forvardera.

4. RASPRAVA DISCUSSION

Prikazani model kretnosti forvardera pri izvoženju drva uz nagib terena zasnovan je na poznavanju položaja točke težišta nenatovarenoga forvardera, kojeg norma ISO 13860 (2016) izrijeком ne spominje, niti ju iskazuju proizvođači forvardera. Težište vozila je bitan konstruktivni pokazatelj, koji ima velik utjecaj na vučnu značajku i stabilnost kretanja vozila, a predstavlja točku u kojoj je koncentrirana cjelokupna masa vozila (Khorsandi i dr. 2018). Uslijed manjih brzina kretanja šumskih vozila u odnosu na cestovna, položaj težišta forvardera je statička, u osnovi nepromjenjiva značajka, koja se dinamički ne mijenja pri ubrzanju, kočenju ili kretanju u krivinama (Poršinsky i dr. 2022B). Zbog sve većeg korištenja forvardera na nagnutim terenima (Megerski i dr. 2021, Borz i dr. 2021, Ring i dr. 2021, Sampietro i dr. 2022), ovaj maseni pokazatelj forvardera dobiva na značenju zbog njegove neophodnosti pri modeliranju raspodjele osovinskih opterećenja i dodirnih tlakova te kretnosti šumskih vozila, s obzirom na udužni nagib terena i smjer kretanja (Đuka i dr. 2016, Đuka i dr. 2018A, Poršinsky i dr. 2021) u cilju planiranja privlačenja drva na siguran, djelotvoran i okolišno prihvatljiv način.

Za utvrđivanja položaja točke težišta vozila koriste se razne metode: vješanja (ISO 789-6 2019), njihala (Fabbri i Molari 2004, ISO 10392 2011), podizanja osovine (ISO 16231-2 2015, OECD 2002, Wang et al. 2016) i nagibnog stola (Edlund i dr. 2020). Određivanje položaja točke težišta osamkotačnog forvardera Komatsu 875 metodom podizanja osovine na podiznoj platformi uz mjerenje opterećenja kotača forvardera prijenosnim vagama, ukazala je da je točku težišta moguće utvrditi i bez skupe specijalizirane mjerne opreme (nagibni stol) kojom najčešće raspolažu samo atestne institucije. Primjena podizne platforme osigurala je da svi kotači bogi osovine budu u horizontalnome položaju (slika 4B) te su na taj način prijenosne vage mjerile okomita opterećenja, a ne rezultatne sile. Rezultati su ukazali da položaj točke težišta forvardera ovisi i o položaju hidraulične dizalice (sklopljena u transportnome položaju ili ispružena) tijekom mjerenja opterećenja kotača vozila na horizontalnoj podlozi i kosini, što bi trebalo uključiti u normativne dokumente.

Poznavanjem položaja točke težišta neopterećenog forvardera i duljine oblovine koja odgovara nominalnom teretu (uz pretpostavku ispunjenog poprečnog presjeka utovarnoga prostora) te postavljanjem momentnih jednadžbi oko osovina forvardera otvoren je put izračunu opterećenja

prednje i stražnje osovine forvardera ovisno o uzdužnome nagibu i smjeru nagiba terena. Ograničenja primjene forvardera, primarno razvijena za KWF-ov Plan raspodjele tereta forvardera na horizontalnoj podlozi (Weise 2002, 2003A, 2003B): 1) najveći teret utovarenoga drva ne smije biti veći od deklarirane nosivosti forvardera od strane proizvođača, 2) najveće dopušteno opterećenje prednje i 3) stražnje osovine ne smije se prekoračiti (pri čemu treba uzeti u obzir i zbroj nosivosti pneumatika po osovini) te 4) opterećenje prednje osovine ne smije pasti ispod 20 % mase opterećenoga forvardera; primjenjiva su i na izvoženje drva uz i niz nagib terena s napomenom da se ona odnose na adhezijska osovinska opterećenja koja su okomita na kosinu uzdužnog nagiba terena.

Jednolika raspodjela osovinskih opterećenja u cilju izračuna opterećenja kotača najveće je ograničenje prikazanoga modela, zbog spoznaje da prednji i stražnji kotači unutar bogi osovine nisu apsolutno jednako opterećeni (Poršinsky i dr. 2022A). Međutim, bez ovako izračunatog opterećenja kotača, nije se mogao simulirati granični nagib kretnosti forvardera, niti nominalni tlak na podlogu. Slučaj nejednolikog opterećenja kotača bogi osovine događa se i prilikom kretanja forvardera i uzrokovan je obodnom silom (Horvat 1993).

Najveći nominalni tlakovi na podlogu i najveće vrijednosti najmanjega konusnog indeksa tla forvardera Komatsu 875 pri izvoženju drva uz i niz nagib terena u granicama $\pm 70\%$, utvrđeni su ispod kotača stražnje bogi osovine vozila pogotovo pri izvoženju drva uz nagib terena (slika 7). Pri izvoženju drva uz nagib terena nazivno opterećenoga forvardera Komatsu 875 opremljenog pneumaticima 710/45-26.5 nominalni tlak na podlogu ispod stražnjih kotača iznosi 132 kPa, a najveća vrijednost najmanjeg konusnog indeksa tla od 950 kPa – što ukazuje da je djelotvorno privlačenje drva na okolišno prihvatljiv način moguće samo pri čvrstom tlu. Opremanjem forvardera Komatsu 875 širim pneumaticima 800/40-26.5 (nominalni tlak na podlogu 117 kPa, najmanji konusni indeks 845 kPa) ili balonkama (eng. *High Flotation Tyre*) 54×37-25 (nominalni tlak na podlogu 94 kPa, najmanji konusni indeks 674 kPa) zadovoljeni su svi uvjeti njegove primjene na osrednje čvrstim tlima. Dodatnim opremanjem kotača prednje i stražnje bogi osovine polugusjenicama, nazivno opterećeni forvarder Komatsu 875 postaje okolišno pogodan i u dijelu uvjeta mekog tla (Poršinsky i dr. 2011, Poršinsky i dr. 2020).

Granični nagib kretnosti nominalno natovarenoga forvardera uz nagib terena ukazao je da značajno ovisi o nosivosti šumskog tla iskazanoga konusnim indeksom, ali i o klizanju kotača vozila. Za iste vrijednosti konusnoga indeksa tla, pri vrijednostima klizanja kotača (10 – 15 %) koje odgovaraju najvećoj vučnoj korisnosti (Brixius 1987), granični nagib kretnosti forvardera ima niže vrijednosti, u odnosu

na klizanje kotača (20 – 25 %) koje odgovara okolišnom ograničenju, odnosno početku erozionih procesa na nagnutim terenima (Hittenbeck 2013). Porastom klizanja $>25\%$ ne ograničava se obodna sila na kotaču vozila, već dolazi do smanjenja brzine kretanja, značajnog energijskog gubitka, ali i porasta oštećivanja šumskog tla (Ringdahl i dr. 2012, Schönauer i dr. 2021). U slučajevima smanjene nosivosti šumskog tla od one prikazane na dijagramu slike 8A, kretnost forvardera na nagnutom terenu osigurat će se njegovim opremanjem traksijskim vitlom (Holzfeind i dr. 2020).

Po uzoru na kriterije i ograničenja vuče drva skiderom s vitlom niz nagib terena (Đuka i dr. 2016, Đuka i dr. 2018A) istražen je granični nagib terena nominalno natovarenog forvardera pri izvoženju drva nizbrdo kod kojeg obodna sila (faktor bruto vuče) poprima vrijednost nula – nakon kojega povećanjem nagiba terena vozilo počinje kočiti motorom. Zbog pojave negativnih vrijednosti klizanja kotača pri kretanju šumskih vozila niz nagib terena (Šušnjar i dr. 2010), a koje Brixsius-ov model procjene vučnih značajki vozila (Brixsius 1987) ne obuhvaća, polučene vrijednosti prikazane u dijagramu slike 8B niže su od općeprihvaćenih u literaturi vrijednosti nagiba terena (Visser i Stampfer 2015, Cavalli i Amishev 2019) koja svladavaju šumska vozila od $\pm 33\%$, a što ukazuje da ovako određen kriterij nije dobar pokazatelj ograničenja kretnosti forvardera pri izvoženju drva niz nagib terena. Određivanje ograničenja kretnosti forvardera pri izvoženju drva niz nagib terena u budućnosti će predstavljati istraživački izazov, čija će se polazišna pretpostavka najvjerojatnije vezati na postotak negativnog klizanja kotača, kod kojega je onemogućeno upravljanje forvarderom uslijed klizanja cijeloga vozila.

5. ZAKLJUČCI CONCLUSSIONS

Na primjeru osmokotačnog forvardera, prikazan je simulacijski model procjene kretnosti forvardera pri izvoženju drva uz i niz nagib terena. Predstavljeni model omogućuje poimanje promjena sila pri izvoženju drva nazivno natovarenog forvardera uslijed širokih raspona promjena utjecajnih čimbenika: 1) nagiba terena 2) smjera izvoženja drva te 3) uvjeta nosivosti podloge iskazane konusnim indeksom tla. Ugradnjom kriterija/ograničenja privlačenja drva pristeklih iz prethodnih istraživanja model kretnosti forvardera dobiva na uporabnome značenju, odnosno teorijski pristup približava stvarnosti izvoženja drva.

Prikazani model kretnosti je zasnovan na lako mjerljivim ili dostupnim podacima šumskih vozila, ali i jednom teže mjerljivom, odnosno nedostupnom podatku iz kataloga proizvođača šumskih vozila – položaju točke težišta, koji je prikazanom metodom podizanja osovine uz korištenje prijenosnih vaga relativno lako utvrditi.

Svi poznati kriteriji/ograničenja kretnosti šumskih vozila ponajprije su vezani za njihovo kretanje uz nagib terena. Ograničenje kretnosti skidera pri vuči drva niz nagib je čvrsto određeno, dok u literaturi nisu zabilježena ograničenja izvoženja drva forvarderom niz nagib. Granični nagib terena pri izvoženju drva nominalno natovarenog forvardera nizbrdo, kod kojeg obodna sila poprima vrijednost nula nije se pokazao kao dobar pokazatelj ograničenja izvoženja drva. Određivanje ograničenja kretnosti forvardera pri izvoženju drva niz nagib terena u budućnosti će predstavljati istraživački izazov.

Zahvala – Acknowledgement

Istraživanje je provedeno u sklopu projekta »Očuvanje sastojina poljskog jasena (*Fraxinus angustifolia* Vahl) u Republici Hrvatskoj s naglaskom na biotske štetne čimbenike« koji financira Ministarstvo poljoprivrede Republike Hrvatske iz sredstava naknade za korištenje općekorisnih funkcija šuma (OKFŠ) za financiranje znanstvenog rada iz područja šumarstva.

6. LITERATURA REFERENCES

- Borz, S.A., M.V., Marcu, M.F., Cataldo, 2021: Evaluation of an HSM 208F 14 tone HVT-R2 Forwarder Prototype under Conditions of Steep-Terrain Low-Access Forests. *Croat. j. for. eng.* 42(2): 185–200. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.775>
- Brixius, W.W., 1987: Traction prediction equations for bias ply tires. ASAE Paper No. 87–1622: 1–31.
- Bygden, G., 2012: GIS for Operative Support. In: *Global Perspectives on Sustainable Forest Management* (ed: C.A. Okia), In Tech, 217–222.
- Bumber, Z., A., Đuka, Z., Pandur, T., Poršinsky, 2023: Gradeability of a Forwarder Based on Traction Performance. *Forests* 14(1): 103. <https://doi.org/10.3390/f14010103>
- Cavalli, R., Dž., Amishev, 2019: Steep terrain forest operations – challenges, technology development, current implementation, and future opportunities. *Int. J. For. Eng.* 30(3): 175–181. <https://doi.org/10.1080/14942119.2019.1603030>
- Đuka, A., T., Pentek, D., Horvat, T., Poršinsky, 2016: Modelling of Downhill Timber Skidding: Bigger Load – Bigger Slope. *Croat. j. for. eng.* 37(1): 139–150.
- Đuka, A., S., Grigolato, I., Papa, T., Pentek, T., Poršinsky, 2017: Assessment of timber extraction distance and skid road network in steep karst terrain. *iForest Biogeosci. For.* 10: 886–894. <http://dx.doi.org/10.3832/ifer2471-010>
- Đuka, A., T., Poršinsky, T., Pentek, Z., Pandur, D., Vusić, I., Papa, 2018A: Mobility Range of a Cable Skidder for Timber Extraction on Sloped Terrain. *Forests* 9(9): 526. <https://doi.org/10.3390/f9090526>
- Đuka, A., T., Poršinsky, T., Pentek, Z., Pandur, D., Janeš, I., Papa, 2018B: Soil Measurements in the Context of Planning Harvesting Operations and Variable Climatic Conditions. *South-east Eur. For.* 9(1): 61–71. <https://doi.org/10.15177/seefer.18-04>
- Đuka, A., Z., Bumber, T., Poršinsky, I., Papa, T., Pentek, T., 2021: The Influence of Increased Salvage Felling on Forwarding Distance and the Removal – A Case Study from Croatia. *Forests* 12(1): 7. <https://dx.doi.org/10.3390/f12010007>
- Eichrodt, A.W., 2003: Development of a Spatial Trafficability Evaluation System. PhD Thesis, ETH Zurich, 1–165.
- Edlund, B., O., Lindroos, T., Nordfjell, 2020: The effect of rollover protection systems and trailers on quad bike stability. *Int. J. For. Eng.* 31(2): 95–105. <https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1708067>
- Elwaleed, A.K., A., Yahya, M., Zohadie, D., Ahmad, A.F., Kheiralla, 2006: Net traction ratio prediction for high-lug agricultural tyre. *J. Terramech.* 43(2): 119–139. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.10.002>
- Fabbri, A., G., Molari, 2004: Static measurement of the centre of gravity height on narrow-track agricultural tractors. *Biosyst. Eng.* 87(3): 299–304. <https://doi.org/10.1016/j.biosystem-seng.2003.12.008>
- Hittenbeck, J., 2013: Estimation of Trafficable Grades from Traction Performance of a Forwarder. *Croat. j. for. eng.* 34(1): 71–81.
- Holzfeind, T., K., Stampfer, F., Holzleitner, 2018: Productivity, setup time and costs of a winch-assisted forwarder. *J. For. Res.* 23(4): 196–203. <https://doi.org/10.1080/13416979.2018.1483131>
- Holzfeind, T., R., Visser, W., Chung, F., Holzleitner, G., Erber, 2020: Development and Benefits of Winch-Assist Harvesting. *Curr. For. Rep.* 6: 201–209. <https://doi.org/10.1007/s40725-020-00121-8>
- Horvat, D., 1993: Prilog poznavanju dinamike bogie sustava kotača (A Contribution to comprehension of the bogie wheel system dynamics). *Meh. šumar.* 18(3): 107–120.
- ISO 10392, 2011: Road vehicles Determination of centre of gravity. International Standard Organization, Geneva, Switzerland.
- ISO 13860, 2016: Machinery for forestry – Forwarders – Terms, definitions and commercial specifications. International Standard Organization, Geneva, Switzerland.
- ISO 789-6, 2019: Agricultural tractors – Test procedures – Part 6: Centre of gravity. International Standard Organization, Geneva, Switzerland.
- ISO 16231-2, 2015: Self-propelled agricultural machinery – Assessment of stability – Part 2: Determination of static stability and test procedures. International Standard Organization, Geneva, Switzerland.
- Janeš, D., A., Đuka, I., Papa, T., Pentek, M., Moro, I., Žarković, T., Poršinsky, T., 2022: Pokazatelji primarne otvorenosti četiri reljefna područja šuma (Indicators of Primary Forest Accessibility in Different Terrain Categories). *Šum. list* 146 (3–4): 103–116. <https://doi.org/10.31298/sl.146.3-4.1>
- Khorsandi, F., P.D., Ayers, R.S., Freeland, X., Wang, 2018: Modeling the effect of liquid movement on the center of gravity calculation of agricultural vehicles. *J. Terramech.* 75: 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2017.09.005>
- Kormanek, M., J., Dvořák, 2022: Use of Impact Penetrometer to Determine Changes in Soil Compactness After Entracon Sioux EH30 Timber Harvesting. *Croat. j. for. eng.* 43(2): 325–337. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1054>

- Lubello, D., 2008: A rule based SDSS for integrated forest harvesting planning. PhD Thesis, Università degli studi di Padova, Padova, 1–213.
- Mason, G.L., J.M., Williams, F., Vahedifard, J.D., Priddy, 2018: A unified equation for predicting traction for wheels on sand over a range of braked, towed, and powered operations. *J. Terramech.* 79: 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2018.05.005>
- Mederski, P.S., S.A., Borz, A., Đuka, A., Lazdiņš, 2021: Challenges in Forestry and Forest Engineering – Case Studies from Four Countries in East Europe. *Croat. j. for. eng.* 42(1): 117–134. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.838>
- Mellgren, P.G., 1980: Terrain Classification for Canadian Forestry. Canadian Pulp and Paper Association, 1–13.
- NAF, 2022: Planetary Portal—Bogie Axle. Available online: <https://www.nafaxles.com/wp-content/uploads/2021/09/naf-bogie-pta-87-portal-5-en-2019.pdf>
- Nokian, 2022: Technical Manual – Heavy Tyres. Nokian Tyres, 1–476. Available online: https://nokiantyres.studio.crasman.fi/file/dl/i/C37sJA/zFdkuqML3-WXBXPnrncrUA/NokianHeavy-Tyres_TechnicalTireManual_v7.1_2022-05.pdf
- OECD, 2002: Standard code for the Official Testing of Agricultural and Forestry Tractor Performance. Organization for Economic Co-operation and Development, Paris.
- Partington, M., M., Ryans, 2010: Understanding the nominal ground pressure of forestry equipment. *FPInnovations* 12(5): 1–8.
- Poršinsky, T., 2005: Djelotvornost i ekološka pogodnost forwardera Timberjack 1710 pri izvoženju oblovine iz nizinskih šuma Hrvatske. Disertacija, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 1–170.
- Poršinsky, T., D., Horvat, 2005: Indeks kotača kao parametar procjene okolišne prihvatljivosti vozila za privlačenje drva (Wheel Numeric as Parameter for Assessing Environmental Acceptability of Vehicles for Timber Extraction). *Nova meh. šumar.* 26: 25–38.
- Poršinsky, T., I., Stankić, A., Bosner, 2011: Ecoefficient Timber Forwarding Based on Nominal Ground Pressure Analysis. *Croat. j. for. eng.* 31(1): 345–356.
- Poršinsky, T., A., Đuka, O., Busić, 2014: Utjecaj propisnosti mjerenja oblovine na transport drva (Influence of Prescribed Method of Roundwood Scaling on Timber Transport). *Nova meh. šumar.* 35: 1–9.
- Poršinsky, T., M., Moro, A., Đuka, 2016: Kutovi i polumjeri prohodnosti skidera s vitlom (Maneuverability Characteristics of Cable Skidder). *Šum. list* 140(5–6): 259–272. <https://doi.org/10.31298/sl.140.5-6.5>
- Poršinsky, T., J., Matas, D., Horvat, A., Đuka, 2020: Pneumatici kotača šumskih vozila (Tyres of Forestry Vehicles). *Šum. list* 144(9–10): 509–522. <https://doi.org/10.31298/sl.144.9-10.7>
- Poršinsky, T., V., Kajgana, Ž., Tomašić, A., Đuka, 2021: Granični nagib kretnosti skidera s vitlom temeljem vučne značajke vozila (Gradeability of the Cable Skidder Based on Traction Performance). *Šum. list* 145(5–6): 211–224. <https://dx.doi.org/10.31298/sl.145.5-6.1>
- Poršinsky, T., Z., Pandur, Z., Bumber, M., Lovrinčević, B., Uršić, A., Đuka, 2022A: Dimenzijske i masene značajke forwardera (Dimensional and Mass Characteristics of Forwarders). *Šum. list* 146(9–10): 387–401. <https://doi.org/10.31298/sl.146.9-10.1>
- Poršinsky, T., Z., Bumber, Z., Pandur, M., Moro, M., Lovrinčević, A., Đuka, 2022B: Dimenzijske značajke utovarnog prostora forwardera (Dimensional Characteristics of Forwarder Loading Space). *Nova meh. šumar.* 43: 19–26. <https://doi.org/10.5552/nms.2022.3>
- Ring, E., M., Andersson, L., Hansson, G., Jansson, L., Högbom, 2021: Logging Mats and Logging Residue as Ground Protection during Forwarder Traffic along Till Hillslopes. *Croat. j. for. eng.* 42(3): 445–462. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.875>
- Ringdahl, O., T., Hellström, I., Wästerlund, O., Lindroos, 2012: Estimating wheel slip for a forest machine using RTK-DGPS. *J. Terramech.* 49(5): 271–279. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2012.08.003>
- Saarihahti, 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), 1–87.
- Sampietro, J.A., D.A., de Vargas, F.L., Souza, M.F., Nicoletti, M., Bonazza, L.R., Topanotti, 2022: Comparison of Forwarder Productivity and Optimal Road Density in Thinning and Clearcutting of Pine Plantation in Southern Brazil. *Croat. j. for. eng.* 43(1): 65–77. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1147>
- Schönauer, M., T., Holzfeind, S., Hoffmann, F., Holzleitner, B., Hinte D., Jaeger, 2021: Effect of a traction-assist winch on wheel slippage and machine induced soil disturbance in flat terrain. *Int. J. For. Eng.* 32(1): 1–11. <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1832816>
- Spinelli, R., P., Owende, S., Ward, M., Tornero, 2004: Comparison of short-wood forwarding systems used in Iberia. *Silva Fenn.* 38: 85–94. <https://doi.org/10.14214/sf.437>
- Strandgard, M., R., Mitchell, M., Acuna, 2017: Time consumption and productivity of a forwarder operating on a slope in a cut-to-length harvest system in a *Pinus radiata* D. Don pine plantation. *J. For. Sci.* 63(7): 324–330. <https://doi.org/10.17221/10/2017-JFS>
- Starke, M., C., Derron, F., Heubaum, M., Ziesak, 2020: Rut Depth Evaluation of a Triple-Bogie System for Forwarders – Field Trials with TLS Data Support. *Sustainability* 12(16): 6412. <https://doi.org/10.3390/su12166412>
- Suvinen, A., M., Saarihahti, 2006: Measuring the mobility parameters of forwarders using GPS and CAN bus techniques. *J. Terramech.* 43(2): 237–252. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2005.12.005>
- Suvinen, A., 2006: A GIS-based simulation model for terrain tractability. *J. Terramech.* 43(4): 427–449. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2005.05.002>
- Suvinen, A., T., Tokola, M., Saarihahti, 2009: Terrain Trafficability Prediction with GIS Analysis. *For. Sci.* 55(5): 433–442. <https://doi.org/10.1093/forestscience/55.5.433>
- Šušnjar, M., A., Bosner, T., Poršinsky, 2010: Vučne značajke skidera pri privlačenju drva niz nagib (Skidder Traction Performance in Downhill Timber Extraction). *Nova meh. šumar.* 31: 3–14.
- Tiwari, V.K., K.P., Pandey, P.K., Pranav, 2010: A review on traction prediction equations. *J. Terramech.* 47(3): 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2009.10.002>

- Visser, R., H., Berkett, 2015: Effect of terrain steepness on machine slope when harvesting. *Int. J. For. Eng.* 26(1): 1–9. <https://doi.org/10.1080/14942119.2015.1033211>
- Visser, R., K., Stampfer, 2015: Expanding Ground-based Harvesting onto Steep Terrain: A Review. *Croat. j. for. eng.* 36(2): 321–331.
- Weise, G., 2002: Was kann der Rückezug wirklich? KWF Forsttechnische Informationen 1+2: 4–6.
- Weise, G., 2003A: Load Distribution Plans for Forwarders. *Agrartechnische Forschung* 9(1): 7–10.
- Weise, G., 2003B: Load Distribution Plans for Forwarders. *Landtechnik* 58(1): 30–31.
- Wang, X., L., Gao, P.D., Ayers, S., Su, C., Yuan, 2016: The influence of the lift angle on the center of gravity: measurements for zero turning radius mowers. *Appl. Eng. Agric.* 32(2): 189–199. <https://doi.org/10.13031/aea.32.10548>
- Wong, J.Y., 2014: Mechanics of off-road vehicle – Terrain interaction. In *Road and off-Road Vehicle Systems Dynamics Handbook*, 1st ed.; Mastinu, G., Ploechl, M., Eds.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 697–726, ISBN 978-0-8493-3322-4.
- Wronski, E.B., N., Humphreys, 1994: A method for evaluating the cumulative impact of ground-based logging systems on soils. *J. For. Eng.* 5(2): 9–20. <https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702656>

SUMMARY

In the example of an eight-wheeled forwarder, a simulation model is presented for assessing the mobility of the forwarder when transporting timber uphill and downhill. The presented model shows the changes in forces during timber forwarding by a nominally loaded forwarder due to a wide range of changes in influencing factors: 1) the slope of the terrain, 2) the direction of timber forwarding, and 3) the soil bearing capacity expressed by the cone index. By incorporating the criteria/limitations of timber forwarding derived from previous research, the forwarder mobility model gains practical meaning; that is, the theoretical approach brings the reality of timber forwarding closer. The mobility model shown is based on easily measurable or available data but also on the position of the centre of gravity, which is relatively easy to determine by the shown method of lifting the forwarders' axle with the use of portable scales and is usually unavailable to read in the manufacturers' catalogue. All known criteria/restrictions of mobility of forest vehicles are primarily related to their movement uphill. The limitation of the skidder's mobility when skidding timber downhill has been firmly determined, while there are no limitations in the literature for forwarding timber downhill. Gradeability of a nominally loaded forwarder downhill, where the thrust force takes the value of zero, did not prove to be a good indicator or a limitation of timber forwarding. Determining the mobility limitations of the forwarder during timber forwarding downhill will be a research challenge in the future.

KEY WORDS: forwarder, centre of gravity, axle load