



UDK: 629. 11.073. 23

PRILOG PROBLEMIMA ISPITIVANJA VANPUTNIH VOZILA

Rajko Radonjić, Jasna Glišović

Mašinski fakultet - Kragujevac
rradonjic@kg.ac.yu jaca@kg.ac.yu

Sadržaj: Analizirani su dosadašnji rezultati istraživanja fizičko – mehaničkih osobina tla sa aspekta kretanja vanputnih vozila. Istaknuti su aktuelni problemi ispitivanja u ovoj oblasti. Na ovoj osnovi formiran je program ispitivanja interakcije vozilo – tlo. Prikazan je eksperimentalni sistem na pogonskoj – mernoj platformi. Dati su i komentarisani eksperimentalni podaci interakcije točkova vozila – tla u uslovima savremenih puteva i uslovima terena.

Ključne reči: *osobine tla, vanputna vozila, interakcija, eksperimentalni rezultati.*

UVOD

Vanputna vozila se mogu kretati po terenima različitih fizičko-mehaničkih karakteristika tla, počev od suvog peska, rastresite oranice, blata, leda, snega veće dubine, do zemljanih puteva ravnog i krutog kolovoza za vreme sušnog perioda. Karakteristike tla utiču bitno na performanse vanputnih vozila, posebno, na prohodnost, bezbednost, ekonomičnost pogona i slično. U tom smislu, poznavanje karakteristika tla i interakcije vozila sa tlom, predstavlja značajan polaz pri izboru koncepcije novog vozila, odnosno, optimalnom korišćenju postojećeg vozila.

U formiranju baze za razvoj, proizvodnju i korišćenje vanputnih vozila, različite izvedbe i namene, korišćene su brojne teorijsko – eksperimentalne metode i analize interakcije kretača vozila i tla. Poseban doprinos rešavanju ovih problema predstavlja intenzivan razvoj naučne discipline teramehanike, segmenta koji se odnosi na kretanje vozila i mobilnih sistema van puteva [2].

U ovim domenima, eksperimentalna istraživanja karakteristika tla i interakcije sa pogonskim točkovima vozila, prethodila su teorijskim istraživanjima, a bila su baza za formiranje odgovarajućih empirijskih modela i rešavanje parcijalnih problema [1]. Ispitivanjima na fizičkim modelima postavljao se bazni zahtev – obezbediti analogiju ispitivanih procesa u laboratoriji i uslovima terena, visok stepen korelacije dobijenih rezultata, nezavisno, od parametara korišćenih modela.

OSNOVNI SEGMENTI ISPITIVANJA KARAKTERISTIKA TLA

Problemi ispitivanja interakcije pogonskim točkom vanputnog vozila i tla svode se, saglasno uprošćenom prikazu, na sl. 1, na identifikaciju relacija između opterećenja i deformacija, $F_x - x$, $F_y - y$, $F_z - z$ u tri relevantna, upravna pravca, x , y , z . Međutim, dinamički odnosi deformabilnog kretača vozila i deformabilnog tla, za opšte posmatrani slučaj, dovode do spreznjanja posmatranog sistema, opterećenja – deformacije, u relevantnim pravcima čime se istaknuti problemi usložavaju. Neki od, do sada predloženih parcijalnih modela i njihova ograničenja ukazuju na ove teškoće:

Odnosi normalnih napreznjanja σ_z i deformacija tla, z , pri vertikalnom opterećenju od kretača vozila, [1], [2], [3],

$$\sigma_z = kz \quad (1)$$

$$\sigma_z = (k_c b^{-1} + k_\varphi) z^v \quad (2)$$

$$\sigma_z = \sigma_{z0} \operatorname{th}(k\sigma_{z0}^{-1} z) \quad (3)$$

Prikazana tri modela sabijanja tla pod dejstvom vertikalnog opterećenja pogonskog točka (1), (2), (3), predstavljaju tri različite matematičke relacije napreznjanja od deformacije - linearna, stepena, tangens hiperbolična, respektivno. Pri tome su modeli (1), (2) posebni slučajevi uopštenog modela (3). Ovaj poslednji, definiše monotono rastuću funkciju napreznjanja od deformacije u posmatranom pravcu, sa tri prepoznatljive zone, ravnomerno sabijanje, sabijanje i tragovi smicanja, plastično razvlačenje sa okončanjem sabijanja tla i njegovog potiskivanja u bočnom pravcu.

Analogni pristup je korišćen pri modeliranju ponašanja tla opterećenog pogonskim točkom vozila u tangencijalnom pravcu, $F_x \rightarrow x$, [1], [3],

$$F_x = F_{x0} + F_z \operatorname{tg}\varphi \rightarrow F_{x\max} = f_s F_z \quad (4)$$

$$f_s = \operatorname{tg}\varphi + F_{x0} F_z^{-1} = \operatorname{tg}\varphi + \tau_0 \sigma_z^{-1} \rightarrow f_k = F_{xk} F_z^{-1} \quad (5)$$

$$F_x / A = \tau = \tau(x) \quad (6)$$

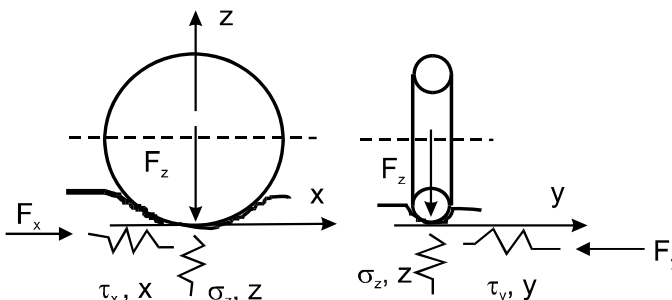
Prema modelu (4), otpor tla smicanju od kretača vozila, ispoljava se dejstvom molekularnih i kapilarnih sila prijanjanja, F_{x0} , i silom unutrašnjeg trenja, $F_z \operatorname{tg}\varphi$. Na osnovu ovog modela, definišu se odnosi između koeficijenta trenja mirovanja, f_s , ugla unutrašnjeg trenja, φ , relativnih molekularno kapilarnih sila prijanjanja, τ_0 , specifičnog normalnog pritiska, σ_z , kao i odnosi trenja klizanja, f_k , model (5). Eksperimentalna istraživanja su pokazala da tangencijalna sila F_x , odnosno, napreznjanje na smicanje, τ_x , se menja u procesu relativnog kretanja dodirnih površina tla i kretača, postaje funkcija relativnog kretanja, $x \rightarrow s$, model (6). Između dva posmatrana stanja interakcije tla i kretača, stanja mirovanja i stanja ustaljenog kretanja, odigra se neustaljeni prelazni proces opisan modelom (6). Određivanje zakonitosti promene ovog procesa, dakle, napreznjanja na smicanje tla u funkciji odgovarajuće deformacije, bilo je predmet brojnih istraživanja i studija u proteklom periodu, ali i sadržaj aktuelnih istraživačkih zadataka i izazov za planiranje daljih aktivnosti u ovom domenu.

U ranijem periodu, karakterističnom po eksperimentalnim ispitivanjima na fizičkim modelima tla i neadekvatnom podrškom matematičkog modeliranja i simuliranja, formirani su najčešće kombinovani modeli za aproksimiranje odvijanja toka pomenutog procesa, oblika, [1], [3]:

$$\tau = (\tau_0 + \sigma_z \operatorname{tg} \varphi) \{ \exp[(k_i \dots)x] \} \quad (7)$$

$$\tau = f_k \sigma_z (1 + f_{ek} \operatorname{ch}(x/k_\tau)) \operatorname{th}(x/k_\tau) \quad (8)$$

$$\tau = f_k \sigma_z \operatorname{th}(x/k_\tau) \quad (9)$$



Sl. 1. Model interakcije pogonskog točka vozila i tla

Model (7), sličan jednačini aperiodičnog oscilatornog procesa, uključuje parametre modela (4), (5) i empirijske koeficijente, k_i . Modeli (8) i (9) po analogiji sa modelom (3), uključuju hiperbolične funkcije tangencijalnih deformacija i karakteristične parametre. Prvi (8), odnosi se na sabijena, tvrđa tla, drugi (9), na vlažna, mekša tla.

U zaključku prethodnih analiza može se istaći: 1) prikazani modeli karakteristika tla su formirani na bazi rezultata ispitivanja uprošćenih fizičkih modela i opitnih uređaja. Uprošćeni su dimenzioni, geometrijski odnosi, kao i odnosi relativnog kretanja i deformisanja tla, posmatrano sa aspekta realnih odnosa interakcije pogonskog točka vozila i tla, 2) nije rešen problem merenja deformacija tla u realnim uslovima kretanja, 3) nisu uspostavljene adekvatne teorijsko-eksperimentalne relacije između deformacija tla, pneumatika kretača i njihovog relativnog klizanja, 4) nisu identifikovane sve komponente rezultujuće tangencijalne reakcije tla – propulzivne sile pogonskih kretača, imajući u vidu efekte trenja, plastičnog oblikovanja, smicanja, razaranja. Na bazi ovih zapažanja formiran je program sopstvenih ispitivanja interakcije vozila i tla, sažeto prikazan u narednom poglavlju.

ISPITIVANJE INTERAKCIJE VOZILA I TLA

Program ispitivanja je zasnovan na teorijskim analizama interakcije pogonskog točka vozila i tla različitih konstruktivnih parametara i fizičko – mehaničkih svojstava. Referentni slučaj, za poredbene analize, je kotrljanje krutog kretača po krutom tlu. Uopšteni slučaj predstavlja kotrljanje točka sa deformabilnim pneumatikom na deformabilnom tlu. Svi ostali slučajevi, kao moguće kombinacije elastično – plastičnih svojstava spregnutog para, mogu se izvesti iz ovog uopštenog modela za uvedene pretpostavke, saglasno datim uslovima i režimima kretanja, [5].

Pri koncipiranju opšteg modela pošlo se od sledećih postavki: 1) pneumatik točka sa profilisanim segmentima po svom obimu, formira trag na plastičnom tlu, dakle, elemente sprege, koje u procesu prenošenja obrtnog momenta dalje deformiše, delimično smiče i razara, prikaz na sl. 2a, 2) generisana propulzivna sila, kao ekvivalent vučnoj sili, je rezultat otpornosti tla na smicanje, plastično oblikovanje, razaranja, kao i frikcionih svojstava spregnutih površina. Udeo ovih komponenta bitno zavisi od odnosa krutosti

spregnutih parova, stepena vlažnosti i plastičnosti tla, 3) deformabilno stanje otiska geometrije pneumatika na kolovozu, sl. 2a, u poređenju sa referentnim otiskom je baza za utvrđivanje odnosa deformacija spregnutih parova i njihovog relativnog kretanja – proklizavanja ili klizanja, 4) proklizavanje ili klizanje se određuje iz odnosa translatorne i obimne brzine točka sa pneumatikom:

$$s = (v_o - v_t) / v_o = 1 - (v_t / r\omega) \quad (10)$$

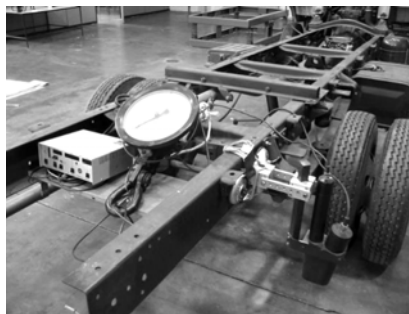
merne veličine su: translatorna brzina točka i vozila, v_t , ugaona brzina točka, ω , poluprečnik kotrljanja točka, r .

Za realizaciju eksperimentalnog dela ovih istraživanja korišćen je eksperimentalni sistem, čije su komponente prikazane na sl. 2b i 3. Slika 2b, prikazuje detalj merne platforme sa sopstvenim pogonom i ugrađenim merno senzorskim jedinicama: 1) dinamometar za merenje podužne sile vuče priključnog uređaja sa opitnim pneumaticima ili sopstvenog poteznog opterećenja same platforme sa ugrađenim opitnim pneumaticima, 2) bezkontaktni korelaciono optički senzor Leitz Correvit L2 digital za merenje translatorne brzine kretanja, pređenog puta i radijusa kotrljanja pneumatika.

Slika 3, prikazuje detalj priključka bezkontaktnih davača ugaone brzine točka, Hottinger Baldwin Messtechnik, MA1 – magnetni, OA1 – optički. Prikazani sistem je svojina Laboratorije za motorna vozila Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, a s obzirom na univerzalnost mernih komponenata koristi se u različitim segmentima ispitivanja vozila.



a)



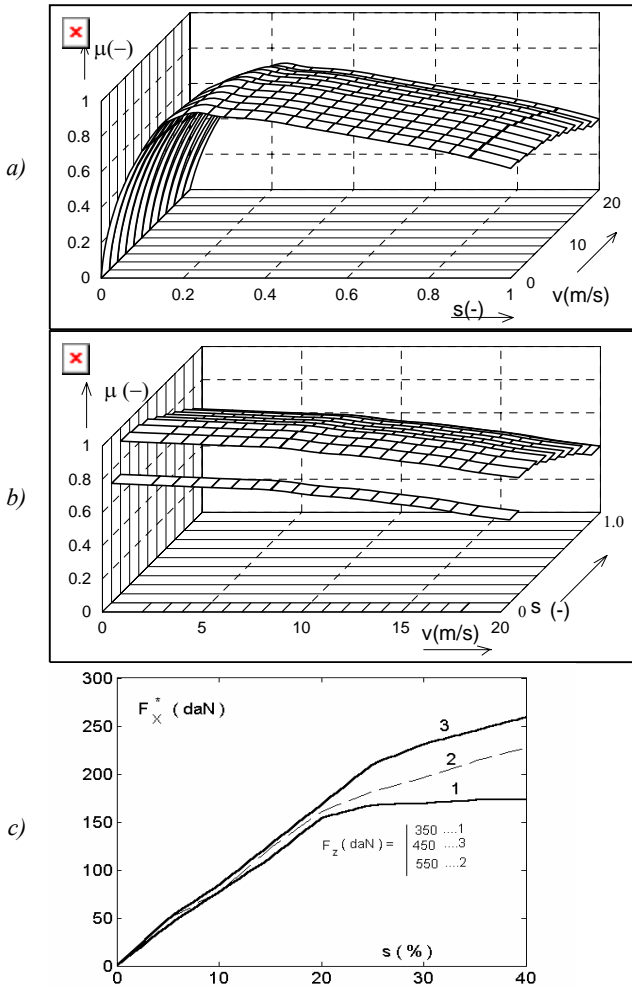
b)

Sl. 2. a) Trag traktorskog pneumatika, b) Merna platforma, merni dinamometar i senzor brzine kretanja



Sl. 3. Detalj davača ugaone brzine točka.

U cilju sprovođenja komparativnih analiza interakcije pogonskog točka i tla različitim svojstva, pri različitim režimima i uslovima kretanja, na sl. 4a, b, c dati, su ilustrativni rezultati, bazirani na korišćenju prikazanog eksperimentalnog sistema. Sl. 4a, b, prikazuje eksperimentalno utvrđene zavisnosti koeficijenta priranja μ , u funkciji proklizavanja, s i brzine kretanja v , za pneumatike putničkog automobila, na suvom asfaltnom kolovozu u dobrom stanju. Slika 4c, prikazuje eksperimentalno utvrđene zavisnosti vučne sile F_x^* u funkciji proklizavanja s , traktorskog pneumatika i vertikalnog opterećenja točka, F_z , na tlu vlažnosti 20%. Analogiju posmatranih procesa, u različitim uslovima kretanja i različitim karakteristikama spregnutih parova, potvrđuju kvalitativni tokovi krivih na sl. 4a i c. Uočavaju se zone intenzivnog porasta vučnih pokazatelja sa porastom proklizavanja, zone postizanja ili približavanja maksimumu, kao i zone uspostavljanja stacionarnih vrednosti pri većim vrednostima proklizavanja. Ova analogija verifikuje prikazani pristup u teorijskim postavkama i univerzalnost korišćenog eksperimentalnog sistema.



Sl. 4. Eksperimentalni rezultati interakcije kretača vozila i tla.

ZAKLJUČAK

Proučavanje interakcije vozila i terena, posebno procesa u kontaktu pogonski točak – tlo, u proteklom periodu, u značajnom stepenu se temeljilo na rezultatima ispitivanja fizičkih modela, sa grubom aproksimacijom realnih uslova kretanja i okruženja. Razvoj savremenih teorijskih i eksperimentalnih metoda, numeričkih metoda proračuna, matematičke simulacije, metoda merenja, sakupljanja i obrade podataka, omogućio je kompleksniji pristup u formulisanju i rešavanju problema iz ovog domena. Analogija procesa interakcije kretača vozila i tla različitih izvedbi i svojstava, u različitim uslovima, omogućava uopštavanje problema i njegovo efikasnije rešavanje uz korišćenje iskustva i raspoloživih resursa u srodnim segmentima istraživanja.

LITERATURA

- [1] Bekker G. (1960): Off - the - road locomotion. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.
- [2] Bekker M. (1969): Introduction to terrain vehicle systems. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.
- [3] Kacigin V. (1964): Voprosi seljskohozjastvenoj mehanik. Minsk.
- [4] Wong J. (2001): Theory of ground vehicles. Third Edition. John Wiley & Sons, inc, Newyork.
- [5] Radonjić R. (2001): Modeliranje karakteristika pneumatika za terenska vozila. Traktori i pogonske mašine, N3.

CONTRIBUTION TO OFF – ROAD VEHICLES TESTING PROBLEMS

Rajko Radonjić, Jasna Glišović
Mechanical Faculty - Kragujevac
rradonjic@kg.ac.yu jaca@kg.ac.yu

Abstract: The past investigation results of soil physical – mechanical properties with respect to off - road vehicles motion are analysed. The actual of the testing problems in this domain are pointed out. On this base, the interaction of the vehicle – ground testing programme is formed. The experimental system on the driving – measurement platform is presented. Ilustrative experimental data of vehicle wheels – ground interaction on the road and terrain condition are given and commented.

Key words: *soil properties, off – road vehicles, interaction, experimental results.*