

Teorijska analiza i određivanje parametara kretanja kod ZIPLINE-a

JOVAN M. VLADIĆ, Univerzitet u Novom Sadu,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
RADOMIR D. ĐOKIĆ, Univerzitet u Novom Sadu,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
TANASIJE A. JOJIĆ, Univerzitet u Novom Sadu,
Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Stručni rad
UDC: 621.85.055
DOI:10.5937/tehnika1903405V

U ovom radu je prikazana analiza uticajnih veličina, postupak modeliranja sistema zipline-a, kao i postupak određivanja parametara kretanja. Sam proračun bazira na teoriji lančanice, sa specifičnostima razvijenim za proračune žičara i kabel-kranova, odnosno transportnih sistema sa tzv. „horizontalnim užetom“. Kao ilustracija sprovedene analize prikazani su rezultati dobijeni na osnovu teorijske postavke merodavnog modela uz primenu računarskih simulacija za konkretne uslove zipline-a, čija je izgradnja bila predviđena na Fruškoj Gori. U simulacijama je vršeno variranje vrednosti značajnih veličina (težina, otpor točkova, otpor vazduha, vetar, zatezanje užeta, položaj tela osobe, ...) za različite slučajeve korišćenja zipline-a. Rezultati i izvedeni zaključci mogu poslužiti kao polazna osnova za projektovanje ovakvih sistema.

Ključne reči: zipline, lančanica, računarske simulacije, otpori kretanju, brzina

1. UVOD

Pod zipline-om se smatra sistem kod koga su tačke vešanja nosećeg užeta na različitim visinama, po kome se kreću kolica sa osobom ili teretom. Prvobitna namena im je bila premošćavanje kanjona ili reka, često samo za spuštanje tereta bez pratioca, dok se danas koriste sve više u svrhu razonode kao tzv. adrenalinski sport.

Kako se radi o relativno novom sistemu čiji se naziv još nije ustalio, osim pomenutog zipline (koji će biti i korišćen u ovom radu), sreće se i pod imenima kao što su: aerial runway, aerial ropeslide, death slide ili flying fox na engleskom, Seilrutsche na nemačkom, Tirolienne na francuskom ili Guerillarutsche na austrijskom govornom području.

Ekspanziju doživljavaju u protekle dve decenije, sa izgradnjom na različitim mestima kao što su brdoviti predeli, parkovi, jezera, pored mostova, u gradskom jezgri itd. [1].

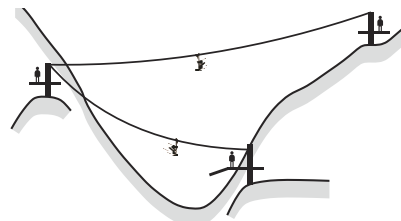
Po pravilu, zipline je predviđen za pojedinačno spu-

štanje osoba, pri čemu se teži što većoj slobodi i uživanju. Zbog atraktivnosti, izvode se konstrukcije za istovremeno spuštanje više osoba, gde se prave tzv. paralelne linije koje predstavljaju više „običnih“ zipline-ova postavljenih jedan do drugog na malom rastojanju.



Slika 1 - Primer gradskog zipline-a

Iznad klanaca i kanjona se sreću tzv. stepenaste deonice zipline-ova (slika 2), koje predstavljaju više standardnih deonica, s tim da kraj prethodne predstavlja početak za narednu, pri čemu prelazak nije automatizovan.



Slika 2 - Stepenasti zipline

Adresa autora: Jovan Vladić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6

e-mail: vladic@uns.ac.rs

Rad primljen: 14.03.2019.

Rad prihvaćen: 19.04.2019.

2. PREGLED POSTOJEĆEG STANJA

Svetski rekord prema veličini raspona trenutno drži Jebel Jais Flight u Ujedinjenim Arapskim Emiratomima sa dužinom od 2.832 m, a evropski Stoderzinken u Austriji, koji se sastoji od dve sekcije i ukupne je dužine 2.500 m. Vredni pomena su i Copper Canyon ZipRider u Meksiku sa dužinom od 2545 m, Volo dell'angelo u Italiji sa dužinom od 2.213 m, The Eye of the Jaguar u Peru sa dužinom od 2.130 m, te Crimean Hawk u Ukrajini sa dužinom od 2.022 m, i The Unreal Zip 2.000 u Južnoafričkoj republici sa dužinom od 2 km, [2].

Zipline sa najvećom visinskom razlikom, između gornje i donje stanice, je ZipFlyer u Nepal kod kojeg se javlja visinska razlika od 610 m [2]. No, iako se radi o imponzantnoj visinskoj razlici, nagib same deonice ($\sim 18,7^\circ$) nije najveći.

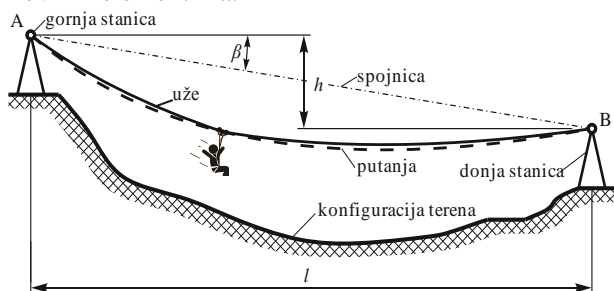
Najveći nagib ima Letalnica bratov Gorišek u sklopu istoimene skijaške skakaonice u Sloveniji koji iznosi 38%, odnosno $20,8^\circ$ [3]. Prema [4] „najbrži“ zipline se smatra Penrhyn Slate Quarry, Bethesda u Velsu (UK), na kojem je i postignut evropski brzinski rekord od oko 200 km/h.

Među najinteresantnije parametre kretanja, koje bi trebalo odrediti, spadaju maksimalno postignuta brzina, dužina trajanja putovanja, pređeni put (domet) i brzina na kraju deonice, odnosno brzina udara o graničnik. Najznačajnija veličina koja utiče na ove parametre je nagib trase koji predstavlja ugao između horizontale i spojnice krajnjih tačaka užeta u gornjoj i donjoj stanici.

U slučaju većih uglova nagiba trase ($\beta > 10^\circ$) postižu se veće maksimalne brzine, ali i velike brzine ulaska osobe u donju stanicu, što predstavlja značajan problem za bezbedno zaustavljanje osobe. U slučajevima malih uglova nagiba ($\beta < 5^\circ$) javlja se problem pristizanja osoba do donje stanice, odnosno rešavanje problema čestog „izvlačenja“ osoba sa linije.

2. TEORIJSKE PODLOGE ZA ANALIZU

Na slici Slika 3 prikazana je šema zipline-a sa osnovnim elementima.



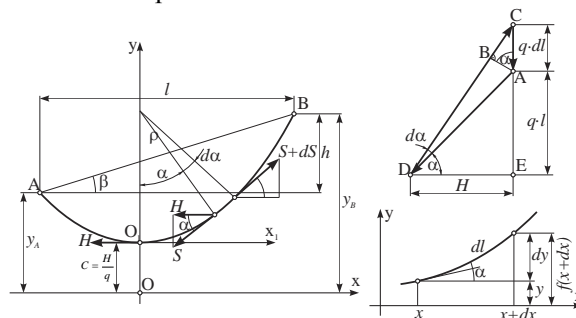
Slika 3 - Parametri trase i zipline-a

Kako je relativno dobro poznata teorija tzv. „horizontalnog užeta“, koja je razvijena za proračune

žičara, kabel-kranova, dalekovoda itd., u nastavku je dat kratak izvod značajnijih relacija, a detaljnije se može videti u [5, 6, 7].

3.1. Opterećenje užeta sopstvenom težinom

Linija koja opisuje položaj elastične gibke niti slobodno obešene između dva oslonca koji se nalaze na horizontalnom (l) i vertikalnom (h) rastojanju i opterećene sopstvenom težinom, naziva se lančanicom. Jednačinu lančanice moguće je izvesti posmatrajući ravnotežu sila prikazanu na slici Slika 4.



Slika 4 - Parametri lančanice [8]

Na osnovu jednačina ravnoteže koje se mogu napisati za elementarni isečak užeta, i njihovim sređivanjem dobija se jednačina lančanice:

$$y = C \cdot \operatorname{ch}\left(\frac{x}{C}\right) \quad (1)$$

pri čemu se parametar lančanice može definisati izrazom:

$$C = \frac{H}{q} \quad (2)$$

gde su:

H - horizontalna komponenta sile u užetu,

q - sopstvena težina užeta.

Razlika sila u užetu između dve tačke lančanice može se odrediti na osnovu izraza:

$$\Delta S = S_B - S_A = q \cdot (y_A - y_B) = q \cdot h \quad (3)$$

Primenom teorije lančanice dobijaju se tačna rešenja, ali kako je korišćenje hiperboličnih funkcija relativno komplikovano, u inženjerskoj praksi se lančanica zamenjuje odgovarajućom parabolom.

Na slici Slika 5 je prikazana mogućnost zamene lančanice parabolom. Greške u veličini ugiba koje se prave ovom aproksimacijom iznose $2 \div 3\%$ (ugibi su manji nego u slučaju lančanice). Tačnost se može povećati uvođenjem popravkog koeficijenta (k).

Metodom parabole se dobija jednačina krive koja glasi:

$$y = \frac{q \cdot x \cdot (l - x)}{2 \cdot H \cdot \cos \beta} \cdot k + x \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (4)$$

odnosno sam ugib:

$$f_x = \frac{q \cdot x \cdot (l-x)}{2 \cdot H \cdot \cos \beta} \cdot k \tag{5}$$

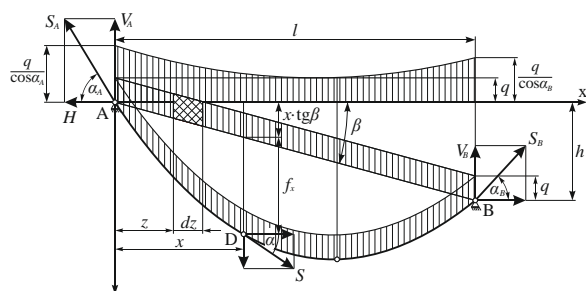
gde su:

$$k = 1 + \frac{\cos^2 \beta}{p} \cdot \left[\frac{1}{p} \cdot \left(x^2 - l \cdot x + \frac{l^2}{2} \right) - 2 \cdot (l-2x) \cdot \operatorname{tg} \beta \right]$$

- popravni koeficijent i

$$p = \frac{H}{q} \cdot \cos \beta$$

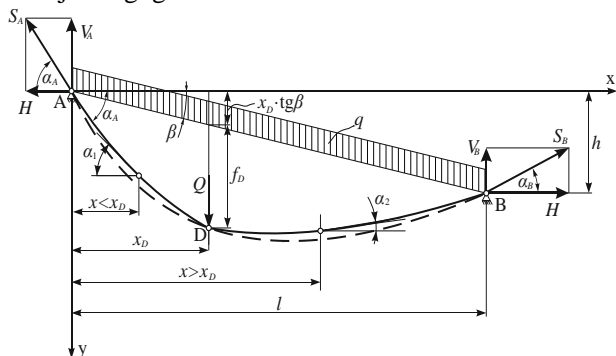
- parametar parabole.



Slika 5 - Metod parabole [5]

3.2. Opterećenje užeta sopstvenom težinom i koncentrisanim opterećenjem

Za razliku od većine metalnih konstrukcija (grede, ramovi, rešetke i sl.) kod kojih se zanemaruje uticaj deformacija na ravnotežno stanje, kod tzv. „horizontalnog užeta“, ovo nije slučaj, pa se mora primeniti teorija drugog reda.



Slika 6 - Parametri užeta opterećenog sopstvenom težinom i koncentrisanim opterećenjem [5, 9]

Posmatranjem užeta, čiji se oslonci nalaze na različitoj visini, a koje je opterećeno sopstvenom težinom i koncentrisanim opterećenjem (Q), slika Slika 6, jednačina trajektorije tereta može se predstaviti kao:

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \beta + f_x \tag{6}$$

pri čemu je ugib na rastojanju x_D na kojem deluje opterećenje:

$$f_D = \frac{x_D}{l \cdot H} \cdot \left[Q \cdot (l-x_D) + \frac{q \cdot (l-x_D)}{\cos \beta} \cdot \frac{l}{2} \right] \tag{7}$$

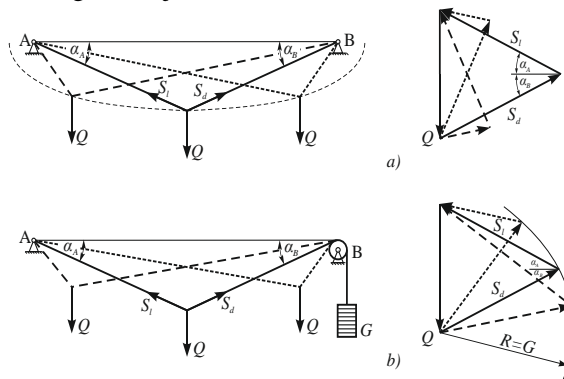
Maksimalni ugib ($x_D = l/2$) je:

$$f_{\max} = \frac{l^2}{8H} \cdot \left(\frac{q}{\cos \beta} + \frac{2Q}{l} \right) \tag{8}$$

3.3. Vezivanje krajeva užeta

Vezivanje krajeva užeta se može postići na dva načina:

- obostranim ankerisanjem, slika Slika 7a, ili
- ankerisanjem na jednom i zatezanjem tegom na drugom kraju, slika Slika 7b.



Slika 7 - Promena sila u užetu za slučaj obostrano ankerisanog užeta (a) i za slučaj zatezanja tegom (b)

Slučaj obostrano ankerisanog užeta predstavlja statički neodređen sistem kod koga se značajno menja opterećenje užeta pri pomeranju tereta i pri promeni temperature. Ovaj slučaj je jednostavan za izvođenje, zbog čega se često primenjuje kod kratkih zipline-a (sa „drвета na drvo“).

Slučaj užeta koje je ankerisano na jednom, a koje se zateže pomoću tega na drugom stubu je znatno povoljnije, zato što se sile u užetu malo menjaju jer dolazi do pomeranja tega, nema značajnijeg uticaja temperature i elastičnosti užeta, ali rešenje zahteva više mesta na stubu i sistem je skuplji. Na slici Slika 7 se može uočiti razlika u promeni sila u užetu za tri karakteristična položaja tereta. U ovom radu će biti prikazana analiza za slučaj sistema sa zateznim tegom.

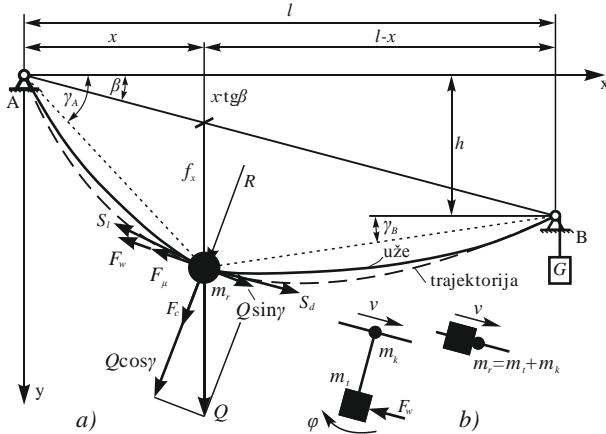
4. FORMIRANJE PRORAČUNSKOG MODELA

Merodavan proračunski model će se formirati uz zanemarivanje malih veličina višeg reda. Izrazima (6) i (7) je određena tzv. statička trajektorija kretanja tereta. Za slučaj zatezanja tegom i pri „plitkim“ lančanicama, prema [5] i [6], oscilovanje užeta u vertikalnoj ravni je relativno malo i može se zanemariti.

Osoba povezana pomoću pojaseva sa kolicima formira matematičko klatno. Ako se osoba pravilno upušta na liniju i ako je dužina pojaseva mala, efekat njihavanja se takođe može zanemariti. Shodno tome proračunski model, slika 8, se može predstaviti kao

kretanje koncentrisane mase po trajektoriji određenoj za statičke uslove, [10].

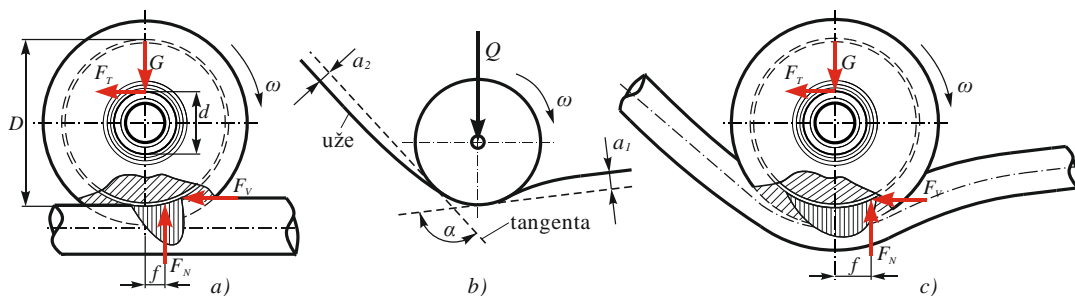
Za vreme kretanja, na koncentrisanu masu deluju sila otpora vazduha i sila otpora kotrljanja, čiji je smer uvek suprotan smeru kretanja, [9, 11].



Slika 8 - Proračunski model

Kako se teret kreće po zakrivljenoj putanji, javlja se i uticaj centrifugalne sile. Ako se uzme da maksimalna brzina kretanja kod zipline-a uglavnom ne prelazi vrednosti od 120 km/h (~33,33 m/s), maksimalno mogući uticaj centrifugalne sile u odnosu na komponentu težine iznosi:

$$\frac{F_{c,max}}{Q \cdot \cos \beta} = \frac{v_{max}^2}{g \cdot R_{min} \cdot \cos \beta} = \frac{33,33^2}{9,81 \cdot 4982} \sim 0,02 \quad (9)$$



Slika 9 - Model kretanja točka po užetu

Otpor kretanju točka po čeličnom užetu se računa prema izrazu:

$$F_{\mu} = \mu \cdot \Sigma G = \left(\mu_0 \cdot \frac{d}{D} + 2 \cdot \frac{f}{D} \right) \cdot \Sigma G \quad (10)$$

gde su:

- μ - ukupni koeficijent otpora kretanju,
- μ_0 - koeficijent otpora trenja u ležaju,
- d - prečnik ležaja,
- D - prečnik točka,
- f - krak otpora kotrljanja,
- ΣG - veličina opterećenja točka.

Na osnovu izraza (10) vidi se da vrednost otpora kretanju zavisi od geometrijskih veličina točka (d, D),

pri čemu je $\cos \beta \approx 1$, a poluprečnik krivine trajektorije za date uslove je:

$$R_{min} \approx \frac{G}{q + \frac{2Q}{l}} = \frac{62500}{10,5 + \frac{2 \cdot 1500}{1467}} = 4982 \text{ m}$$

Kako je maksimalno moguć uticaj centrifugalne sile $\leq 2\%$, on će se zanemariti.

4.1. Određivanje otpora kotrljanju

Pri kretanju točkova javljaju se otpori koji se suprotstavljaju kretanju. Oni se javljaju usled trenja u ležajevima točkova i usled deformacija kontaktnih površina pri kotrljanju točkova po elastičnoj podlozi. Pri kretanju točka po užetu javlja se i otpor usled krutosti i unutrašnjeg trenja užeta. Za razliku od idealno savitljivog užeta, realno uže neće zauzeti položaj tangenti iza i ispred točka (slika Slika 9b), što se može uočiti kao „nabiranje“ užeta ispred točka.

Veličina ovog otpora zavisi, pored krutosti i unutrašnjeg trenja u užetu, od „zategnutosti“ užeta, odnosno prelomnog ugla i brzine kretanja. Ovaj uticaj se može obuhvatiti relacijom (10), pri čemu krak otpora kotrljanja obuhvata uticaj deformacije kontaktnih površina i „nabiranja“ užeta, čija je vrednost veća u odnosu na „standardan“ slučaj prikazan na slici Slika 9a.

kao i koeficijenta otpora kotrljanja u ležaju točka (μ_0) i kraka otpora kotrljanja točka po užetu (f), koji obuhvata kako deformaciju užeta usled normalnog pritiska, tako i uticaj „nabiranja“ užeta usled kotrljanja točka velikom brzinom. Otpor kotrljanja u ležaju točka i krak otpora kotrljanja točka po užetu određuju se eksperimentalno.

4.2. Određivanje otpora vazduha

Kako se kod zipline-a po pravilu javljaju velike brzine, otpor vazduha ima znatan uticaj na sve parametre vožnje. Na otpor vazduha utiče veliki broj veličina kao što su oblik strujanja (laminarno ili turbulentno), slika Slika 10, površina izložena dejstvu vazduha, oblik površine, brzina kretanja itd.

Sila otpora vazduha računa se prema [12]:

$$F_w = c_w \cdot A \cdot \frac{\rho \cdot (v \pm v_v)^n}{2} \quad (11)$$

gde su:

c_w - koeficijent otpora oblika, /-/
 A - površina izložena strujanju, m²

ρ - gustina vazduha, kg/m³

v - brzina kretanja, m/s

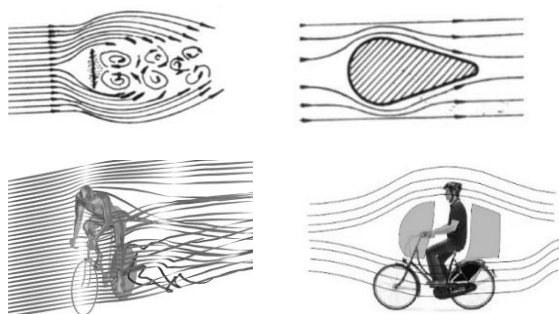
v_v - komponenta brzine vetra u pravcu kretanja,

n - bezdimenzioni eksponent koji zavisi od brzine kretanja [12]:

$n=1$ za brzine manje od 1 m/s,

$n=2$ za brzine između 1 m/s i 300 m/s,

$n=3$ za brzine veće od 300 m/s.



Slika 10 - Različiti slučajeve opstrujavanja

Kako se gustina vazduha relativno malo menja za neke standardne uslove, i kako se brzina kretanja češće izražava u km/h nego u m/s, formula (11) se može napisati u obliku:

$$F_w = 0,0473 \cdot c_w \cdot A \cdot v^2 \quad (12)$$

gde je:

v - brzina kretanja, km/h,

pri čemu je uzeto da je specifična gustina vazduha $\rho=1,225$ kg/m³, srednja vlažnost vazduha $w=60\%$ i prosečna temperatura vazduha $t=15^\circ$ C.

Za slučajeve kada se temperatura i pritisak vazduha razlikuju od normalnih, koristi se korigovani izraz za gustinu:

$$\rho = 1,25 \cdot \frac{B}{1,015} \cdot \frac{293}{T} \quad (13)$$

gde su:

B - pritisak (bar),

T - temperatura (K).

Orijentacione vrednosti koeficijenta otpora oblika (c_w), dobijene eksperimentalno, prema [13] su:

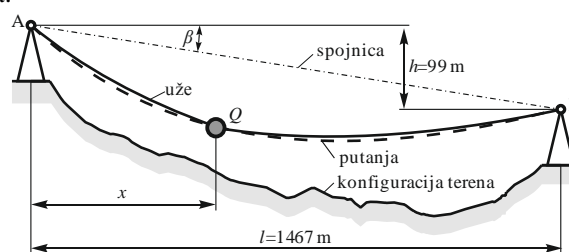
- osoba u stojećem stavu $\sim 0,78$
- biciklista u uspravnom položaju $0,53 \div 0,69$
- biciklista u pognutom položaju $\sim 0,4$

5. SIMULACIJE KRETANJA OSOBE NA ZIPLINE-U

Da bi se ukazalo na potrebu detaljne analize uslova za izgradnju zipline-a, prvenstveno vezano za izbor trase, kao podloga za projektovanje i izgradnju u ovom radu će se prikazati postupak i rezultati analize za konkretan primer zipline-a, čija je izgradnja bila planirana na Fruškoj Gori. Geometrija trase je prikazana na slici Slika 11, sa horizontalnim rastojanjem između stubova 1.467 m, i visinskom razlikom od 99 m, pri čemu je ugao nagiba trase:

$$\beta = \text{atan} \frac{h}{l} = \text{atan} \frac{99}{1467} = 3,86^\circ$$

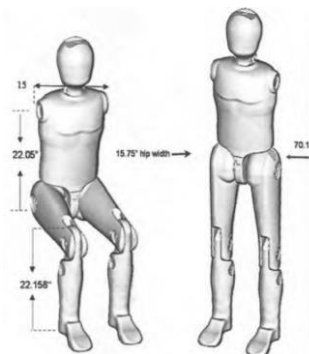
Zbog malog ugla nagiba trase ovo predstavlja granični slučaj pa je interesantan sa stanovišta ukazivanja na deo problematike realizacije sistema zipline-a.



Slika 11 - Primer zipline-a, razmera 1:2.5

Izbor tipa i prečnika nosećeg užeta, kao i predviđena zatezanja detaljno su obrađeni u [14]. Rezultati simulacije će biti prikazani za čelično uže prečnika 16 mm, konstrukcije Vorington 8x19+ČJ.

Određivanje parametara kretanja je izvršeno uz pomoć simulacija u programskom paketu MSC Adams. Kao što je u prethodnoj tački napomenuto, sistem je modeliran kao koncentrisana masa koja se kreće po zadatoj trajektoriji definisanom jednačinom (6). Na koncentrisanu masu, koja se kreće pod dejstvom sopstvene težine, deluju sile otpora vazduha i kolica (smer je uvek suprotan smeru kretanja) i vetar različite brzine i smera.



Slika 12 - Podloge za određivanje površine osobe izložene dejstvu vazduha (vetra), [14]

Simulacije su izvedene variranjem težina osoba, od 50 do 150 kg. Površine izložene dejstvu vazduha

zavise od veličine (težine) osobe i od položaja tela, koji može biti sedeći, polusedeći i ležeći. Za slučaj spuštanja u sedećem položaju, te površine se mogu orijentaciono odrediti prema prosečnim gabaritima osoba, datih na slici Slika 12:

- A=0,25 m² - za mase do 60 kg,
- A=0,3 m² - za mase od 60 kg do 100 kg,
- A=0,4 m² - za mase od 100 kg do 140 kg,
- A=0,5 m² - za mase preko 140 kg.

Površine izložene dejstvu vazduha za slučajeve spuštanja u polusedećem i ležećem položaju su manje i iznose 0,18 m² i 0,1 m² respektivno.

Vrednosti koeficijenta otpora oblika u zavisnosti od položaja spuštanja su:

- c_w=0,6 - za sedeći položaj,
- c_w=0,4 - za polusedeći položaj,
- c_w=0,2 - za ležeći položaj.

Ukupni koeficijent otpora kretanju točka po užetu, na osnovu prečnika ležaja i točka konkretnih kolica d=22 mm i D=100 mm i literaturnih vrednosti za koeficijent trenja u ležaju μ₀=0,01 i kraka otpora kotrljanju f=0,7 mm, je:

$$\mu = \mu_0 \cdot \frac{d}{D} + 2 \cdot \frac{f}{D} = 0,01 \cdot \frac{22}{100} + 2 \cdot \frac{0,7}{100} = 0,016$$

Ovo je prosečna vrednost koeficijenta otpora kretanju za navedene parametre točkova, koja može značajno da odstupa, pre svega u zavisnosti od konkretnog odnosa d₀/D, vrste ležaja, vrste užeta i „zategnutosti“ užeta H/q.

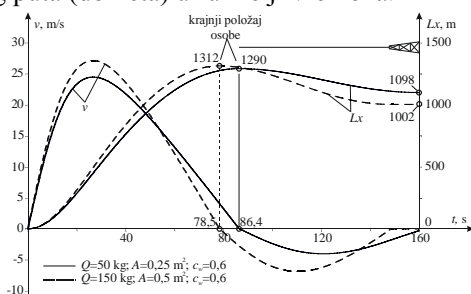
Pri simulacijama varirane su vrednosti napred navedenih parametara, u granicama do 25%, oko vrednosti definisanih prethodnim izrazima.

6. REZULTATI SIMULACIJA

U nastavku sledi prikaz karakterističnih rezultata u funkciji variranih uticajnih parametara.

6.1. Uticaj mase putnika

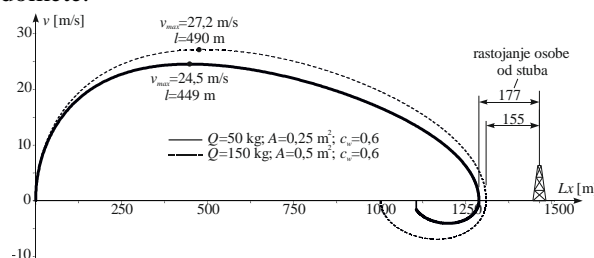
Na osnovu računarske simulacije, urađene na osnovu prosečnih vrednosti parametara za mase od 50 kg i 150 kg, dobija se dijagram zavisnosti brzine i pređenog puta (dometa) u funkciji vremena.



Slika 13 - Dijagram zavisnosti brzine i pređenog puta u funkciji vremena

Sa slike Slika 13 je uočljivo da osobe ne dolaze do donje stanice, tako da se, nakon dostizanja maksimalnog položaja, vraćaju nazad (negativne vrednosti brzine koje se u daljem tekstu neće prikazivati).

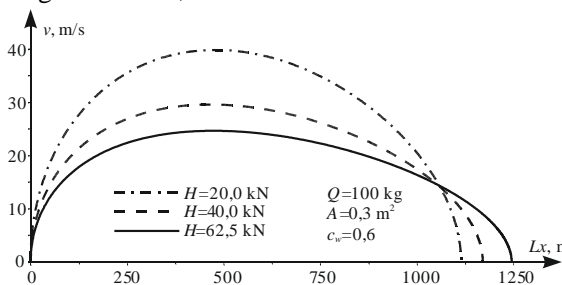
Na slici Slika 14, gde je brzina data u funkciji pređenog puta po horizontali, prikazano je udaljene osobe od donje stanice, pa je potrebno osobu „izvlačiti“ sa linije, što predstavlja značajan problem, posebno ako se često javlja. Na osnovu dijagrama datih na slikama Slika 13 i Slika 14 može se uočiti da putnici veće mase postižu veće maksimalne brzine i veće domete.



Slika 14 - Dijagram zavisnosti brzine u funkciji horizontalnog rastojanja

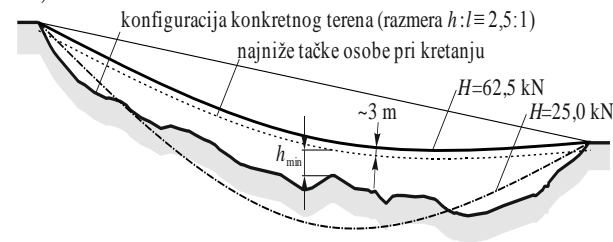
6.2. Uticaj sile zatezanja

Na osnovu prosečnih vrednosti parametara za putnike mase 100 kg, variranjem sile zatezanja užeta, sa dijagrama datog na slici Slika 15 može se uočiti da se povećanjem sile zatezanja povećavaju i maksimalno postignute brzine, kao i dometi.



Slika 15 – Dijagram zavisnosti brzine za različite sile zatezanja

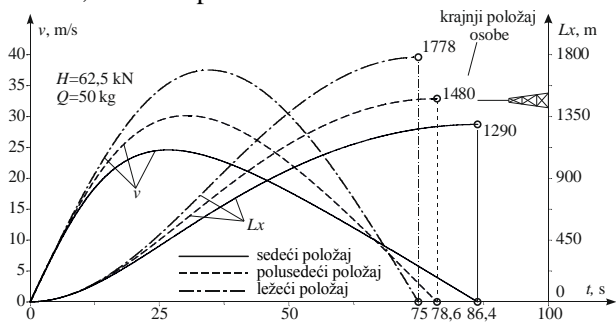
Pri izboru užeta i sile zatezanja mora se, duž cele linije, obezbediti minimalno sigurnosno rastojanje osobe od tla (slika Slika 16), što je kod „plitkih“ terena, kakav je u ovom primeru, zahtevalo zatezanje užeta od 62,5 kN.



Slika 16 - Provera minimalnog sigurnosnog rastojanja osobe od tla

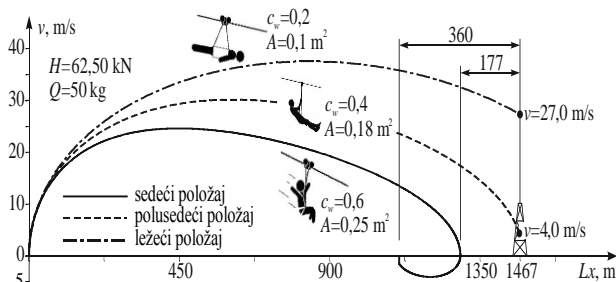
6.3. Uticaj položaja osobe

Kako su osobe manjih masa „ugroženije“ po pitanju pristizanja do kraja trase, prikaz uticaja različitih položaja tokom spuštanja je dat za slučaj osobe od 50 kg. Dijagrami dati na slikama Slika 17 i Slika 18 prikazuju rezultate simulacije za različite položaje spuštanja, gde je uočljivo da se sedeći položaj, za date uslove, ne može primeniti.



Slika 17 - Dijagram zavisnosti brzine i pređenog puta za različite položaje osoba u funkciji vremena

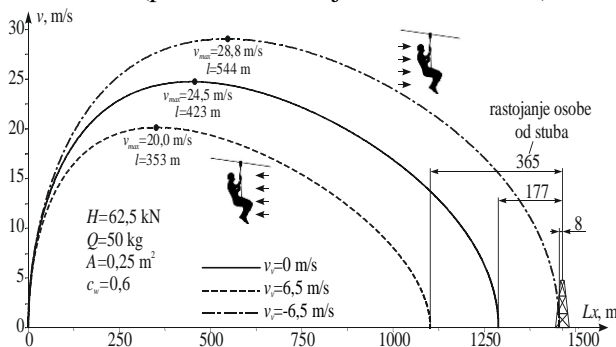
Međutim, i kod „polusedećeg“ i „ležećeg“ položaja treba biti oprezan, jer su ovi položaji znatno „osetljiviji“ na promene pri kretanju, npr. širenje ruku radi „selfija“ (veća površina), što znatno menja uslove dolaska osobe u donju stanicu.



Slika 18 - Dijagram zavisnosti brzine za različite položaje osoba

6.4. Uticaj vetra

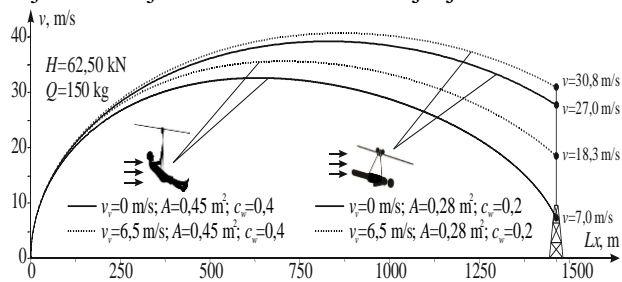
U prethodnim tačkama analizirani su samo slučajevi pri kretanju tela kroz „miran“ vazduh. U narednoj analizi biće prikazan uticaj umerenog vetra brzine od 6,5 m/s, (prema Boforovoj skali 5,5÷7,9 m/s).



Slika 19 - Dijagram zavisnosti brzine za slučaj spuštanja osobe od 50 kg sa i bez vetra

Na dijagramu prikazanom na slici Slika 19 dat je uticaj dejstva vetra suprotnog („vetar u prsa“) i u smeru kretanja („vetar u leđa“), za slučaj osobe mase 50 kg koje, kao što je već prikazano u prethodnim tačkama, postižu manje maksimalne brzine i domete u odnosu na osobe mase 150 kg.

Na dijagramu datom na slici Slika 20 prikazan je uticaj vetra u smeru kretanja, za slučaj osoba mase 150 kg, gde osobe mogu da pristignu velikom brzinom do donjeg stuba, pri čemu je potrebno predvideti odgovarajuće uređaje za bezbedno zaustavljanje.



Slika 20 - Dijagram zavisnosti brzine za slučaj spuštanja osobe od 150 kg sa i bez vetra u funkciji horizontalnog rastojanja

7. ZAKLJUČAK

Za kvalitetno projektovanje, izradu i bezbedno korišćenje zipline-a, neophodno je izvršiti detaljnu analizu zavisnosti kinematskih parametara kretanja osobe od niza uticajnih veličina kao što su težina osobe, sile u užetu, nagib trajektorije, položaj osobe, otpori kretanju kolica i sredine, vetar itd. Ovo se posebno odnosi u slučajevima trasa većih dužina i ekstremnih uglova nagiba.

U radu su prikazani rezultati za slučaj realne trase relativno velike dužine (≈1.500 m) i sa malim uglom nagiba (3,5°), pri čemu su uočeni značajni problemi koji dovode u pitanje opravdanost izgradnje zipline-a. Formiranjem adekvatnog proračunskog modela sa simulacijama i variranjem uticajnih veličina, moguće je izvršiti optimalan izbor elemenata zipline-a (uže, točkovi kolica, zatezanje, položaj osobe pri spuštanju itd.) i odrediti tzv. „vozne“ karakteristike za konkretne uslove.

Kod malih uglova nagiba trase pojavljuje se problem dolaska osobe do donje stanice, posebno pri „dejstvu vetra u prsa“ kod lakših osoba, što zahteva adekvatno rešenje za „izvlačenje“ sa linije.

U ovakvim slučajevima neophodno je maksimalno smanjiti otpore kretanju. Smanjenje otpora kretanju kolica može se ostvariti odgovarajućim izborom točkova, konstrukcije užeta i većim zatezanjem užeta. Otpor sredine, u realnim uslovima, se može smanjiti smanjenjem površine izložene opstrujavanju odnosno pravilnim izborom položaja osobe pri spuštanju. Čak i

kod malih uglova nagiba trase, „polusedeći“ i „ležeći“ položaji mogu da obezbede dolazak osoba do donje stanice, pri čemu je neophodno odrediti brzine pristizanja i izbor odgovarajuće opreme za bezbedno zaustavljanje osobe. Pret navedeno je deo problematike razmatrane u [14].

LITERATURA

- [1] Jojić T, Vladić J, Đokić R, Specifične mašine i uređaji sa horizontalnim užetom kao nosećim elementom – zipline, *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, Novi Sad, God. 33, br. 1, str. 13-16, 2018.
- [2] Rope Adventure Park [Internet]. Dnjipro, Ukrajina; 2019 [citirano 20.02.2019]. Dostupno na: <http://parktrop.com/en/>
- [3] Planica Zipline [Internet]. Planica, Slovenija; 2019 [citirano 20.02.2019]. Dostupno na: <https://www.planica-zipline.si/en>,
- [4] Zip World Wales, turns heritage on its head [internet]. Penrhyn Quarry, at Bethesda in North Wales; 2019 [citirano 20.02.2019.]. Dostupno na: <https://wales.com/visit>
- [5] Vladić J, Računske i eksperimentalne metode za statičku i dinamičku analizu žičara, monografija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1991.
- [6] Vladić J, Razvoj računskih metoda za analizu statičkog i dinamičkog ponašanja žičara, doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1989.
- [7] Czitary E, *Seilschwebbahnen*, Springer-Verlag, Wien, 1962.
- [8] Vladić J, The Parametric of Equation of a Catenary Line and Theoretical Foundations for Static Analysis a Ropeway, in Proc. *XV European Conference of Material Handling Teaching Professors*, Novi Sad, Serbia, pp. 170-178, 22.-26 September 2004
- [9] Alamoreanu M, Vasilescu A, Theoretical Aspects of Zip Line Analysis, in Proc. *VIII Triennial International Conference Heavy Machinery - HM 2014*, Zlatibor, Serbia, pp. 131-136, 25-28 June 2014.
- [10] Kožar I, Torić M. N, Analysis of body sliding along cable, *Coupled Systems Mechanics*, Vol. 3, No. 3, pp. 291-304, 2014.
- [11] Vladić J, Živanić D, Džinčić I, Đokić R, Gajić A, Application of the numerical methods for dynamic analysis of transport systems with rope, in Proc. *VIII Triennial International Conference HEAVY MACHINERY - HM 2014*, Zlatibor, Serbia, pp. A.37-42, 25-28 June 2014.
- [12] Janković A, *Dinamika automobila*, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2008.
- [13] Mun H. K, Abdulkareem S, Mahdi A, in Various Positions, in Proc. *EURECA 2013*, Subang Jaya, Selangor Darul Ehsan, Malaysia, pp. 99-100, 01-02 July 2013.
- [14] Vladić J, Đokić R, Jojić T, *Elaborati I, II i III – Analiza sistema ZIP LINE u Vrdniku*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2017.

SUMMARY

THEORETICAL ANALYSIS AND DETERMINATION OF ZIPLINE MOVEMENT PARAMETERS

This paper provides the analysis of the influence parameters, the procedure for modeling of zipline system, as well as the procedure for determining the motion parameters. The calculation itself is based on the catenary theory, which was specific developed for the calculations of ropeways and cable cranes, or for so-called transport systems with the „horizontal rope”. The results are obtained as an illustration of the conducted analysis based on the theoretical setting for the relevant model that are made with the help of computer simulations concrete conditions of zipline whose installation was planned on Fruška Gora. The size of certain parameters (weight, rolling resistance, air resistance, wind, rope tension, etc.) were varied in the simulations for different cases of zipline usage. The results and conclusions can serve as a starting point for the design of such systems.

Key words: zipline, catenary, computer simulation, motion resistance, velocity