

Vodena raketa

Jerko Roško

Dina Subašić

Mentor : Tea Prohaska, prof.

4. razred, Prva gimnazija, Zagreb

11. travnja 2008.

Sadržaj

1	Uvod	2
2	Fizikalne zakonitosti	3
2.1	Potisna sila	3
2.2	Aerodinamičke sile	4
2.2.1	Što utječe na otpor i uzgon?	5
2.2.2	Centar pritiska	6
2.3	Težina rakete	6
2.4	Gibanje i stabilnost rakete	7
2.4.1	Skretanje u smjeru vjetra	8
2.5	Tlak	8
3	Eksperiment	9
3.1	Eksperimentalni uređaj	9
3.1.1	Vrste projektila	9
3.1.2	Materijali i konstrukcija projektila	11
3.1.3	Računalna simulacija	11
3.2	Mjerenja - nemodificirana boca	12
3.2.1	Inicijalno mjerenje	12
3.2.2	Let nemodificirane boce	12
3.3	Mjerenja - modificirana boca	13
3.3.1	Varijacija tlaka	13
3.3.2	Varijacija volumena vode	15
3.3.3	Uzroci nestabilnosti rakete sa 0.5 L H_2O	17
3.3.4	Lansiranje pod različitim kutevima	17
3.3.5	Raketa "Damir Kršić"	18
4	Zaključak	18

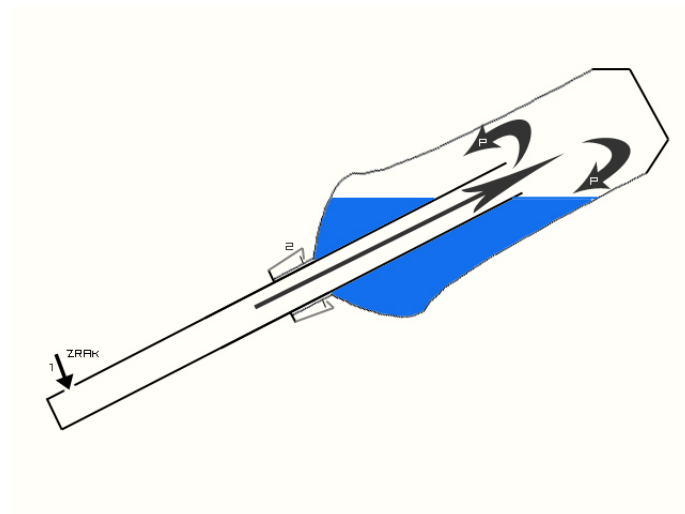
1 Uvod

Vodena raketa je "model-raketa", to je projektil napravljen od plastične boce u kojoj se nalazi određena masa vode iznad koje je zrak povišenog tlaka. Boca je pričvršćena na aluminijsku lansirnu cijev kroz koju se dovodi zrak. (Slika 1)

Cijev, na mjestu gdje se upumpava zrak, ima ugrađen manometar koji može očitavati tlakove od 0 do 18 bara. Na lansirnoj cijevi je opruga koja ima funkciju osigurača koji sprječava nekontrolirano polijetanje. U trenutku lansiranja otpušta se osigurač i voda izlazi velikom brzinom kroz mlaznicu davajući potisak. Kao i kod prave rakete masa se konstantno mijenja tijekom pogonjenog leta. U toj fazi se također smanjuje i iznos potisne sile jer volumen koji se oslobodi zbog izbačene vode popuni zrak što uzrokuje pad tlaka unutar boce. Nakon što se izbacila sva voda, ako je tlak zraka u boci viši od tlaka u atmosferi, izjednačavanje tlakova će dati dodatni potisak koji je, međutim, malog iznosa. Nakon toga projektil će nastaviti let zbog inercije dok ne dostigne maksimalnu visinu nakon čega će se gibati vrlo slično kao u slučaju horizontalnog hica.

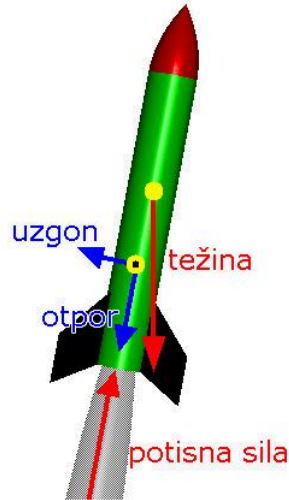
Na vodenu raketu tokom leta utječu 4 sile: potisna sila, sila gravitacije i aerodinamičke sile - uzgon i otpor zraka.

Kod ispitivanja dometa rakete je korištena kosina kojoj je moguće mijenjati kut i na taj način utvrditi ovisnost dometa o kutu lansiranja. Cilj rada je eksperimentalno utvrditi ovisnost dometa rakete o početnim uvjetima.



Slika 1: Pojednostavljena shema eksperimentalnog uređaja

2 Fizikalne zakonitosti



Slika 2: 4 sile na raketu

2.1 Potisna sila

Potisna sila \vec{F}_p obično djeluje duž longitudinalne osi rakete na kojoj se nalazi i težište. Generira ju pogonski sustav u skladu sa III. Newtonovim zakonom mehanike. Sustav vrši rad na fluidu kojeg akcelerira i izbacuje kroz mlaznicu u jednom smjeru, a potisna sila djeluje na projektil u suprotnom smjeru. Potisna sila ovisi o brzini kojom se masa mijenja te o tlaku na mlaznici. Po Newtonovom drugom zakonu prosječna sila je jednaka promjeni količine gibanja Δp u nekom vremenu Δt . Trenutna sila je derivacija količine gibanja po vremenu.

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (1)$$

Na slici 3 je jednostavan pogonski sustav, fluid u njega ulazi sa brzinom \vec{v}_0 a izlazi ubrzan stvarajući potisak. Pri ulasku molekule fluida djeluju na sustav silom \vec{F}_1 , a pri izlazu iz pogonskog sustava u skladu sa 3. zakonom mehanike djeluju na sustav silom \vec{F}_2 .

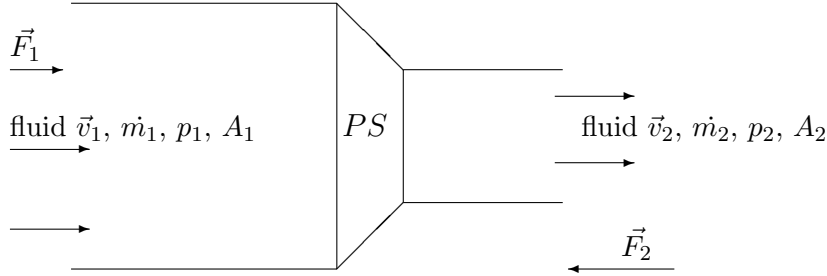
Rezultantna sila $\vec{F}_2 - \vec{F}_1$ je potisna sila \vec{F}_p

$$\vec{F}_p = \frac{d(m\vec{v})_2}{dt} - \frac{d(m\vec{v})_1}{dt} \quad (2)$$

Ako se tlak p_1 izvan pogonskog sustava razlikuje od tlaka p_2 na izlazu iz mlaznice sili \vec{F}_p još treba pridodati izraz $(p_2 - p_1)A_2$, uobičajeno je da je iznos tog izraza mali u odnosu na $\vec{F}_2 - \vec{F}_1$. Tako izraz za \vec{F}_p poprima oblik:

$$\vec{F}_p = \frac{d(m\vec{v})_2}{dt} - \frac{d(m\vec{v})_1}{dt} + (p_2 - p_1)\vec{A}_2 \quad (3)$$

nakon sređivanja dobije se opća jednadžba potisne sile:



Slika 3: Shema pogonskog sustava (PS)

$$\vec{F}_p = \dot{m}_2 \vec{v}_2 - \dot{m}_1 \vec{v}_1 + (p_2 - p_1) \vec{A}_2 \quad (4)$$

gdje je \dot{m} brzina istecanja mase koja se jednaka umnošku gustoće fluida ρ , brzine v i površine A .

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \quad (5)$$

Za raketu vrijedi izraz (4) uz modifikaciju jer u pogonski sustav ne ulazi fluid izvana kao naprimjer kod mlazne turbine, nego je sve potrebno za let unutar sustava pa $\dot{m}_1 \vec{v}_1$ ima iznos 0 i stoga jednadžba raketnog potiska ima oblik:

$$\vec{F}_p = \dot{m}_e \vec{v}_e + (p_e - p_0) \vec{A}_e \quad (6)$$

gdje indeks "e" označava vrijednost na izlazu iz mlaznice, a indeks "0" vrijednost izvan rakete.

2.2 Aerodinamičke sile

Sila je umnožak tlaka i površine na koju tlak djeluje. Tlak je skalarna veličina povezana sa gibanjem molekula fluida, tlak je okomit na površinu, a sila je vektor koji djeluje duž te okomice.

Smjer okomice nije jednak na svakom dijelu rakete pa je potrebno uvesti jedinični vektor površine \vec{n} koji nosi informaciju o smjeru. Sila je jednaka umnošku tlaka p , površine A i jediničnog vektora normale \vec{n} na tu površinu, a ukupna sila jednaka je sumi

$$\vec{F} = \sum p A \vec{n} \quad (7)$$

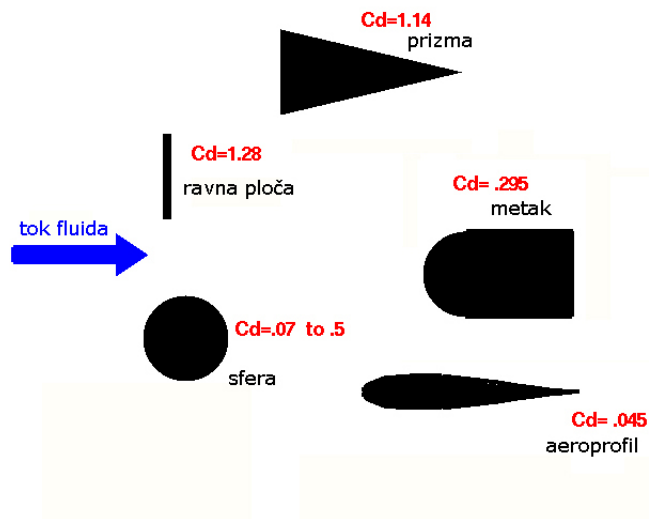


Slika 4: Aerodinamičke sile

Ako je tlak oko rakete konstantan suma (7) ima iznos 0 jer za svaku točku postoji još jedna točka sa istim iznosom i smjerom sile, a suprotnom orijentacijom. Kada je fluid u gibanju u odnosu na raketu silu možemo rastaviti na komponentu okomitu na smjer strujanja fluida i na paralelnu komponentu, dok zapravo postoji samo jedna sila uzrokovana varijacijama u tlaku oko tijela i djeluje kroz centar pritiska.

2.2.1 Što utječe na otpor i uzgon?

Oblik ima vrlo velik utjecaj na količinu otpora. Na slici 5 su prikazani razni oblici jednake referentne površine i za svaki je utvrđen koeficijent otpora zraka. Referentna površina je površina na kojoj se promatra utjecaj tlaka. Koeficijent otpora se utvrđuje eksperimentalno u zračnom tunelu.



Slika 5: Koeficijenti otpora zraka

Otpor je direktno povezan sa dimenzijama objekta koji putuje kroz fluid i pro-

porcionalan je sa referentnom površinom A_{ref} .

$$F_{otpor} = Konstanta \cdot A_{ref} \quad (8)$$

Otpor je proporcionalan sa gustoćom fluida ρ te sa kvadratom brzine v objekta.

$$F_{otpor} = Konstanta \cdot \rho \quad (9)$$

$$F_{otpor} = Konstanta \cdot v^2 \quad (10)$$

Dinamički uzgon je također proporcionalan sa gustoćom fluida ρ te sa kvadratom brzine v objekta.

$$F_{uzgon} = Konstanta \cdot \rho \quad (11)$$

$$F_{uzgon} = Konstanta \cdot v^2 \quad (12)$$

2.2.2 Centar pritiska

Centar pritiska c_p je prosječna lokacija tlaka. U letu tlak varira oko objekta kao funkcija $p=p(x)$ što znači da pritisak u nekoj točki ovisi o udaljenosti x te točke od referentne linije, c_p je važan za određivanje stabilnosti rakete.

Mjenjajući napadni kut koji raketa u gibanju zatvara sa horizontalom mijenja se i tlak na svaki pojedini dio projektila. Povećavanjem kuta c_p se pomiče u smjeru nosa rakete.

Računanje centra pritiska:

Svaka komponenta rakete ima neku površinu a_x udaljenu za d_x od referentne linije. Centar pritiska se računa na sljedeći način:

$$c_p = \frac{d_x a_x + \dots + d_n a_n}{A} \quad (13)$$

gdje je A ukupna površina rakete. Računanje c_p je kompliciran postupak koji zahtjeva uporabu integralnog računa. Za "model" raketu lakše je koristiti pojednostavljenu verziju rješenja ovoga problema. To se može učiniti tako da napravimo 2D projekciju oblika komponente ili rakete na kartonu i izrežemo. Taj oblik objesimo na konac i nađemo mjesto gdje je u ravnoteži. Ova aproksimacija vrijedi za manje kutove lansiranja jer je, pri crtanju projekcije površine, raketa na podlozi sa kojom ne zatvara kut.

2.3 Težina rakete

Težina i sila uzgona djeluju iz težišta. Pri gibanju tijela težište se giba kao materijalna točka u kojoj je sabijena sva masa sustava. težište c_g računa se formulom

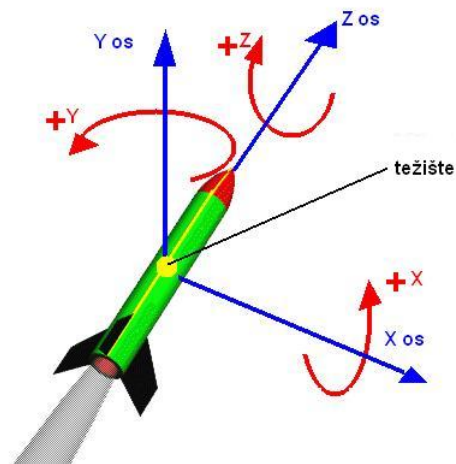
$$c_g = \frac{G_1 d_1 + G_2 d_2 + \dots + G_n d_n}{G_u} \quad (14)$$

gdje je G_n težina n-tog dijela rakete, d_n udaljenost tog dijela od referentne linije, a G_u ukupna težina.

2.4 Gibanje i stabilnost rakete

Gibanja rakete dijele se na rotacije i translacije. Translacija je posljedica vanjske sile, a rotacija posljedica zakretnog momenta. Rotacija utječe na smjer i iznos sile koje uzrokuju translaciju. Raketa rotira oko težišta.

Na slici 6 su prikazane rotacije rakete, one se dijele na rotacije oko x osi, na rotacije oko y osi te na rotacije oko z osi.

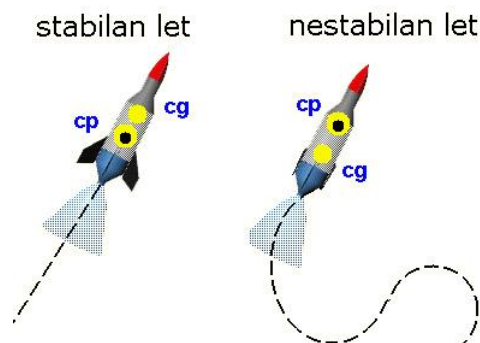


Slika 6: Rotacije rakete

Za stabilan let težište mora biti iznad centra pritiska. Dodavanjem mase na nos rakete ili povećavanjem površine krilca se povećava stabilnost.

Tijekom leta model-rakete zbog nailaska na vjetar ili zbog nestabilnosti potiska raketa može promijeniti smjer.

Ako je težište iznad centra pritiska, nakon skretanja zbog utjecaja aerodinamičnih sila, raketa će se vratiti na početnu putanju. Takav učinak zove se povratna sila. U slučaju da je težište ispod centra pritiska javlja je destabilizirajuća sila koja uzrokuje nestabilan let.

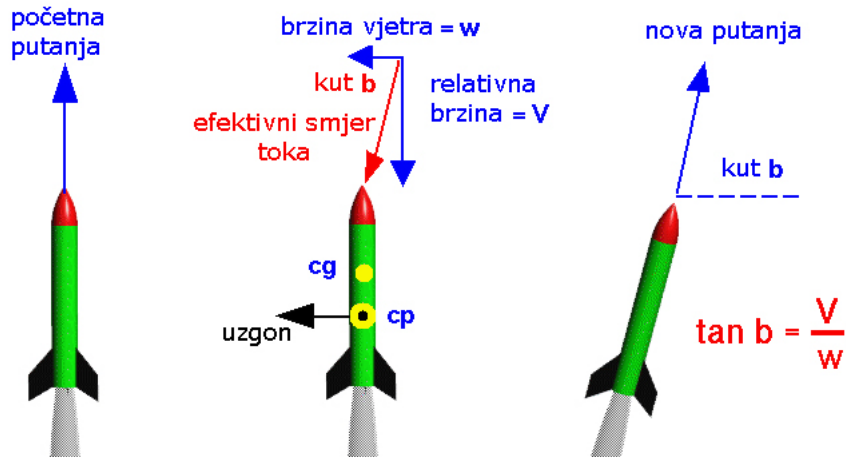


Slika 7: Stabilan i nestabilan let rakete

2.4.1 Skretanje u smjeru vjetra

Nakon polijetanja model-raketa često skreće u smjeru vjetra.

Raketa ubrzava, odmičući se od lansirne rampe, s brzinom se povećavaju i aerodinamičke sile. Naprimjer vjetar koji udara na raketu stvara komponentu brzine w koja zbrojena s relativnom brzinom vjetra v mijenja smjer gibanja rakete.



Slika 8: Skretanje u smjeru vjetra

2.5 Tlak

Bernoullijevom jednadžbom opisuje se konstantnost hidrodinamičkog tlaka fluida u stacionarnom toku. Taj tlak jednak je zbroju hidrauličkog p , hidrostatičkog ρgh i dinamičkog $\frac{\rho v^2}{2}$ tlaka. Općeniti zapis Bernoullijeve jednadžbe je

$$p + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2} = konst. \quad (15)$$

U slučaju vodene rakete promjena stanja fluida je izotermna i stoga se mora uzeti u obzir i Boyle-ov zakon koji glasi $pV = konst.$, gdje je p tlak, a V volumen.

3 Eksperiment

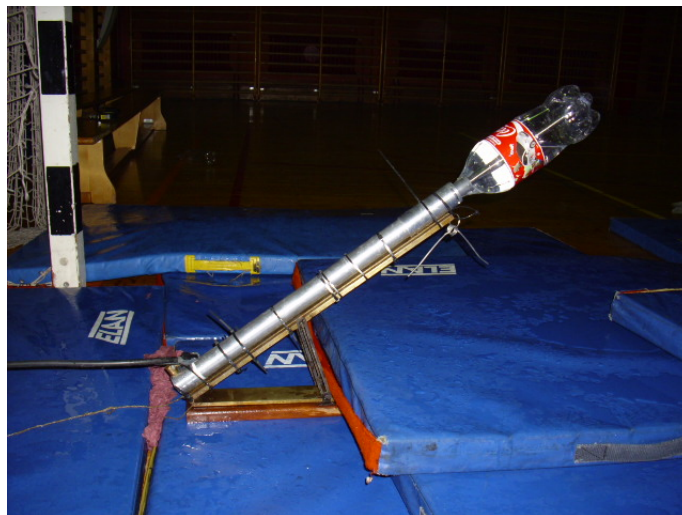
3.1 Eksperimentalni uređaj

Vodena raketa je "model-raketa", to je projektil napravljen od plastične boce u kojoj se nalazi određena masa vode iznad koje je zrak povišenog tlaka. Boca je pričvršćena na aluminijsku lansirnu cijev kroz koju se dovodi zrak. (Slika 1)

Cijev, na mjestu gdje se upumpava zrak, ima ugrađen manometar koji može očitavati tlakove od 0 do 18 bara. Na lansirnoj cijevi je opruga koja ima funkciju osigurača koji sprječava nekontrolirano polijetanje. U trenutku lansiranja otpušta se osigurač i voda izlazi velikom brzinom kroz mlaznicu davajući potisak. Mjeren je domet kosog lansiranja u ovisnosti o početnim uvjetima.

Aluminijska lansirna cijev pričvršćena je na kosinu kojoj se može mijenjati kut. Na kosini se u originalnom stanju može namjestiti maksimalan kut od 37 stupnjeva. Za kuteve više od 37 stupnjeva kosinu modificiramo pomoću drvenih klinova kao što je prikazano na slici 10. Neizbježan faktor nestabilnosti potiska javlja se pri lansiranju pod kutom jer u nekom trenutku t zajedno izlaze i zrak pod tlakom i voda kroz mlaznicu.

Numerički podaci obrađeni su u paketu Scientific Python za Python programski jezik.



Slika 9: Eksperimentalni uređaj

3.1.1 Vrste projektila

Za svaki projektil je izrazom (14) aproksimirana lokacija težišta, a centar pritiska aproksimiran je pojednostavljenom metodom iz dijela 2.2.2. Prvi korišten projektil je nemodificirana boca Coca Cole volumena 2 litre. Duljina projektila iznosi 33.5cm, centar pritiska od mlaznice je udaljen 19 cm u smjeru nosa, a težište 19.4cm.

Modificirana boca "Mahatma Gadni" ima c_g udaljen od mlaznice za 25.6 cm, a c_p za 19.7 cm. Za raketu "Damir Kršić" te su udaljenosti 23.8 cm za c_g i 19 cm za c_p .



Slika 10: Kosina modificirana drvenim klinom



Slika 11: Raketa tipa "Damir Kršić"



Slika 12: Raketa tipa "Mahatma Gadni"

3.1.2 Materijali i konstrukcija projektila

Kao baza konstrukcije korištena je plastična boca volumena 2 litre. Tip “Mahatma Gadni” ima na nosu pričvršćenu masu plastelina u svrsi pomicanja težišta.

Raketa “Damir Kršić” rađena je uzimajući u obzir ne samo težište i centar pritiska nego i otpor zraka zbog čega je odabran novi oblik boce, na njega je pričvršćen dio druge boce u funkciji nosnog čunja. Dodana su i krilca od istog materijala. Kao pričvršćivač korišten je prozirni “Duct tape”.

3.1.3 Računalna simulacija

Za dodatne informacije o raketnom potisku korištena je računalna simulacija vertikalnog gibanja vodene rakete sa interneta [3], u njoj su korištene varijable koje odgovaraju našim projektilima.

3.2 Mjerenja - nemodificirana boca

3.2.1 Inicijalno mjerenje

Inicijalno mjerenje vršeno je na pješčanoj podlozi na prostoru RSC-a Jarun. Kut kosine bio je 60° . Ovim mjerenjem uvidjeli smo značajan utjecaj vjetra na let projektila te smo mjerenje na otvorenom obustavili.

Tlak (Bar)	4 Bar	5 Bar
Domet (m)	19.50	25.20
	21.90	29.70
	20.10	26.80
	25.00	24.30
	23.80	26.10
	18.80	28.00
	20.10	28.00
	25.40	23.86
	22.90	20.00
	19.40	28.50
Srednja vrijednost (m)	21.69	26.05
Standardna devijacija (m)	2.45	2.84

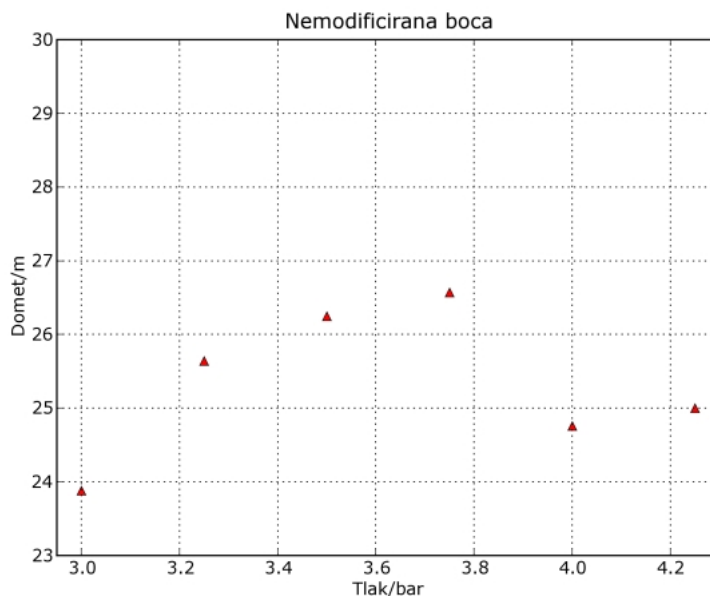
Tablica 1: Inicijalna mjerenja

3.2.2 Let nemodificirane boce

Ispitivanja leta nemodificiranog projektila vršena su u zatvorenom prostoru kako bi se minimalizirao utjecaj gibanja zraka na let. Korišten je kut kosine od 37 stupnjeva, konstantni volumen od 1L vode, a tlak je variran od 3 do 4.25 Bara.

Tlak (Bar)	3 Bar	3.25 Bar	3.5 Bar	3.75 Bar	4 Bar	4.25 Bar
Domet (m)	23.40	26.66	25.59	25.40	24.80	25.70
	23.90	25.95	25.55	27.70	24.90	24.60
	25.30	25.20	27.00	27.00	25.20	22.60
	23.00	25.55	27.00	27.77	23.50	25.50
	23.80	24.85	26.10	25.00	25.40	26.60
Srednja vrijednost (m)	23.88	25.64	26.25	26.57	24.76	25.00
Standardna devijacija (m)	0.87	0.70	0.71	1.30	0.74	1.52

Tablica 2: Iznosi dometa za 1 L vode i kut od 37°



Slika 13: Srednje vrijednosti dometa za 1 L vode i kut od 37°

Iznosi dometa do neke točke rastu linearno, a nakon toga rezultati uvelike odstupaju od pravca. Projektil je često tijekom leta skretao s predviđene putanje. Nestabilno gibanje rakete postajalo je izraženije povećanjem tlaka zraka u boci. Pri izlasku vode iz boce raketa gubi na masi i podložnija je utjecaju aerodinamičkih sila koje rastu sa kvadratom brzine što objašnjava izrazito nestabilan let pri višim tlakovima zraka unutar boce. Nemodificirani projektil ima nepovoljan položaj centra pritiska s obzirom na težište.

Nekoliko puta je probno lansirana boca sa 0.5L vode, međutim let je bio izrazito nestabilan i takvo ispitivanje zahtjeva projektil poboljšanih aerodinamičkih karakteristika i podizanje težišta.

3.3 Mjerenja - modificirana boca

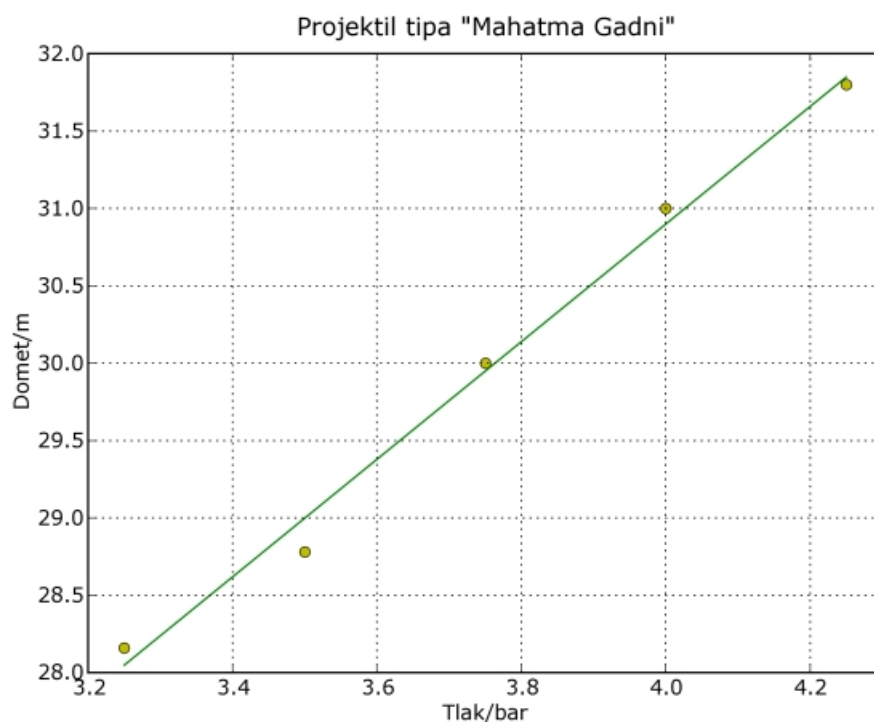
3.3.1 Varijacija tlaka

Mjerenja su se odvijala u realnim uvjetima na otvorenom zbog nemogućnosti pronalaska zatvorenog prostora adekvatnih dimenzija. Učestao vjetar se pokazao otežavajućom okolnošću te smo posebno izbjegavali pojačan vjetar tijekom lansiranja i općenito dane sa jakim vjetrom. Rađeno je sa tlakovima u rasponu od 3.25 do 4.25 bara. Limitirajući faktor bio je manometar na kojem se ne mogu precizno očitati tlakovi između onih navedenih u tablici 3.

Let projektila Mahatma Gadni je značajno stabilniji nego nemodificirane boce. Izostale su karakteristike nestabilnog leta poput nasumičnog skretanja. Jedina poteškoća bio je vjetar promjenjivog smjera tijekom testiranja. Pošto je projektil kada nema više pogonskog sredstva vrlo lagan, vrlo je podložan utjecaju vjetra. Pri nekima od lansiranja vjetar je uzrokovao blaži otklon mjesta pada od pravca u kojemu je boca ispaljena. Ovisnost srednje vrijednosti dometa o početnome tlaku

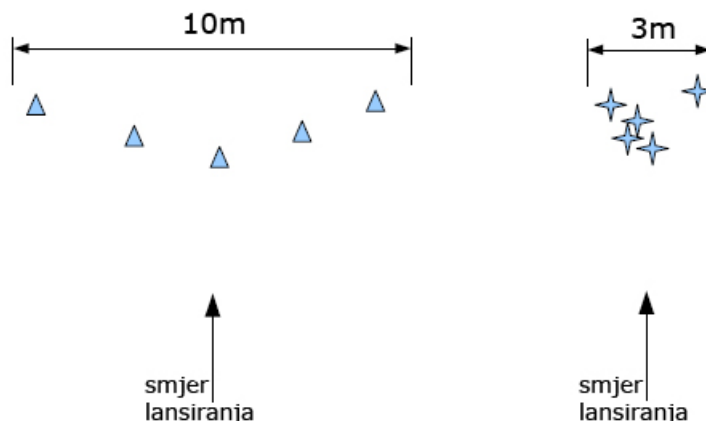
Tlak (Bar)	3.25 Bar	3.5 Bar	3.75 Bar	4 Bar	4.25 Bar
Domet (m)	27.40	28.20	31.00	33.20	33.10
	26.80	28.60	27.70	29.80	30.30
	28.20	26.00	32.30	29.60	30.30
	28.10	30.08	30.00	30.00	33.10
	30.30	31.00	29.00	32.40	32.0
Srednja vrijednost (m)	28.16	28.78	30.00	31.00	31.80
Standardna devijacija (m)	1.32	1.91	1.77	1.67	1.45

Tablica 3: Iznosi dometa za 1 L vode i kut od 37°

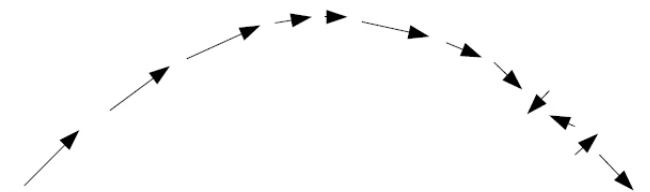


Slika 14: Ovisnost dometa o početnom pritisku

je linearna. Vrijednosti standardne devijacije veće su nego prilikom mjerenja u zatvorenom prostoru zbog povećanih vanjskih utjecaja na projektil.



Slika 15: Raspršenje mjesta padova, trokut označava nemodificiranu bocu, a zvijezda "M.Gadnog"



Slika 16: Skica putanje u 2 dimenzije

Slika 15 je skica u svrhi usporedbe otklona od pravca lansiranja za nemodificiranu raketu i raketu Mahatma Gadni. Slika 16 je skica putanje M.Gadnog od lansiranja do mjesta pada.

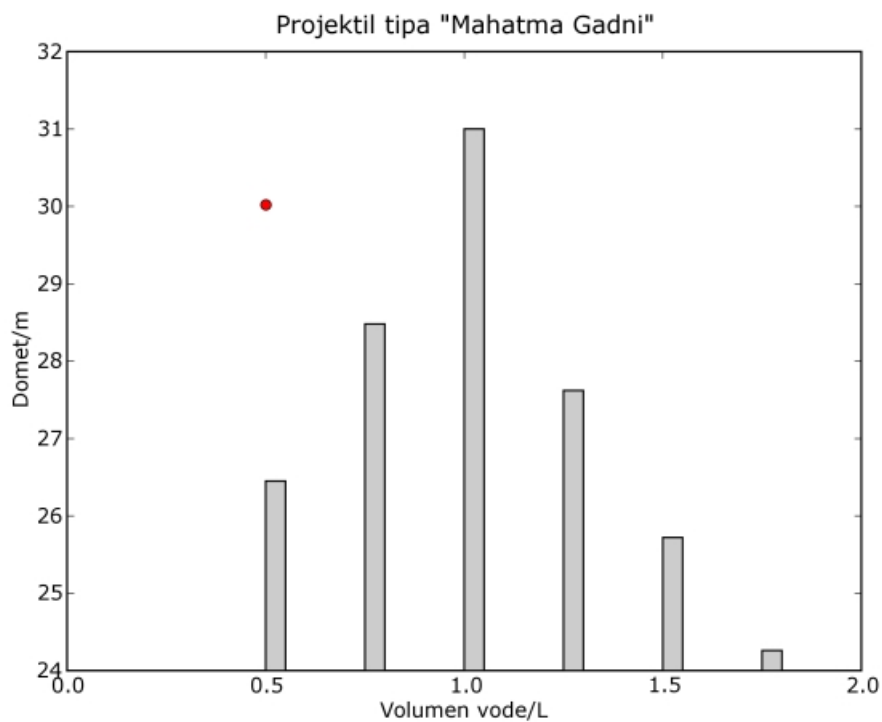
Iako izostaju rotacije oko Y i Z osi, raketa rotira u završnoj fazi leta oko X osi.

3.3.2 Varijacija volumena vode

Stupac za volumen od 0.5 L na slici 17 jedini ne prikazuje srednju vrijednost dometa iz tablice 4. Naime, let projektila za taj volumen karakterizirao je strmi uspon i veća maksimalna visina nego za ostale volumene. Posljedica toga je duže trajanje faze leta od postizanja najviše točke do udara u tlo. U toj fazi raketa je lagana i to je duže u zraku veća je vjerojatnost da će ju vjetar skrenuti sa predviđene putanje. Srednja vrijednost dometa za $V = 0.5L$ iz tablice 4, na slici 17 prikazana je kružićem, a visina stupca odgovara srednjoj vrijednosti prva dva mjerenja za koja nije primjećen veći vanjski utjecaj.

Volumen vode (L)	0.5 L	0.75 L	1 L	1.25 L	1.5 L	1.75 L
Domet (m)	26.40	28.20	33.20	26.00	25.50	26.20
	26.50	29.70	29.80	26.70	25.60	21.80
	31.80	30.30	29.60	29.00	26.60	26.30
	32.70	26.20	30.00	27.70	24.30	23.90
	32.70	28.00	32.40	28.70	26.60	23.10
Srednja vrijednost (m)	30.02	28.48	31.00	27.62	25.72	24.26
Standardna devijacija (m)	3.28	1.60	1.67	1.28	0.95	1.96

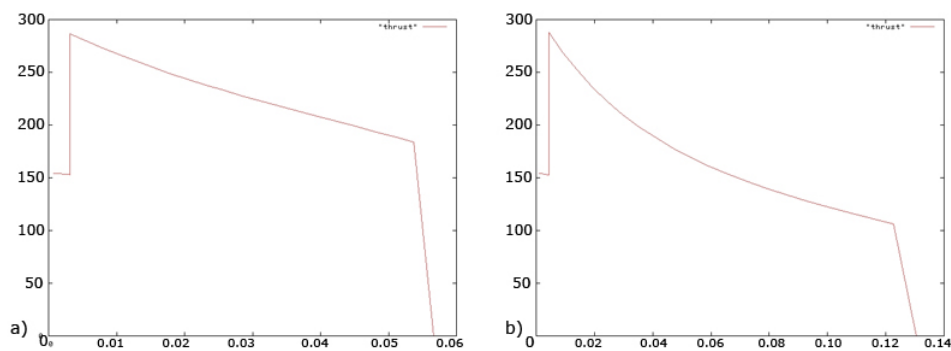
Tablica 4: Iznosi dometa za tlak od 4 bara i kut od 37°



Slika 17: Ovisnost dometa o početnom volumenu

3.3.3 Uzroci nestabilnosti rakete sa 0.5 L H_2O

Promotrimo dva jednaka projektila $B_{0.5}$ i B_1 maksimalnog volumena 2L. U njima su različiti volumeni vode, a isti tlak zraka p iznad vode. Ukupni tlak na mlaznicu u trenutku t_0 u oba slučaja je $p_e = p + \rho gh$. Najveći doprinos ukupnom tlaku dolazi upravo od komponente p , a ρgh ima zanemariv iznos u odnosu na p . Stoga su tlakovi na izlazu iz mlaznica gotovo jednaki. U trenutku lansiranja statički tlakovi padaju, a dinamički rastu. Brzine istjecanja tada su jednake jer su jednaki i dinamički tlakovi. O brzini istjecanja direktno ovisi i sila potiska. Iz toga proizlazi zaključak da su na samom početku lansiranja, u trenutku t_0 sile potiska obiju raketa približno jednake. Ovu tvrdnju potkrepljuju grafovi ovisnosti F_p o vremenu, za projektele sa različitim volumenima vode, dobiveni iz računalne simulacije.



Slika 18: Usporedba sile potiska (F/N) u ovisnosti o vremenu (t/s) iz računalne simulacije za vertikalni hitac. a) raketa sa 0.5L vode, b) raketa sa 1L vode

Mora se uzeti u obzir Boyle-ov zakon koji kaže da je umnožak tlaka i volumena konstantan.

Naprimjer, neka je $V_{H_2O}=0.5$ L u $B_{0.5}$, a 1 L u B_1 i u obje je na početku isti tlak zraka p_1 .

Kada se u obje boce potroši pola volumena vode, tlak p_2 u boci $B_{0.5}$ biti će $0.86p_1$, a u boci B_1 tlak p_2' biti će $0.66p_1$.

U raketi sa manjim volumenom vode tlak zraka je, tijekom pogonjenjog leta, postojaniji. To je razlog jakog i kratkotrajnog potiska.

Raketa sa više vode ima dugotrajniji potisak, ali njegove se vrijednosti tokom vremena brže smanjuju. (Slika 18). Ona je zbog više vode teža ali zato tijekom pogonjenog leta stabilnija.

Stoga, raketa $B_{0.5}$ brže leti, ali je lagana i nestabilna. Ona je zbog svoje velike brzine i male mase podložnija utjecaju otpora zraka nego teži projektil.

3.3.4 Lansiranje pod različitim kutevima

Najveći domet postignut je za kut od 45 stupnjeva. Za kut od 60° samo je manji dio letova pokazivao karakteristike stabilnosti. Neki letovi su bili slični onima nemodificirane boce. Razlog nestabilnog leta je pomicanje centra pritiska prema nosu povećavanjem kuta lansiranja. Aproximacija centra pritiska, prilikom koje model

Kut (stupnjeva)	37	45	60
Domet (m)	33.20	30.00	26.20
	29.80	34.40	30.00
	29.60	35.90	23.40
	30.00	33.80	25.60
	32.40	34.00	
Srednja vrijednost (m)	31.00	33.62	26.3
Standardna devijacija (m)	1.67	2.18	2.74

Tablica 5: Iznosi dometa za volumen od 1L i tlak od 4 bara

raketa sa podlogom ne zatvara kut, nije više pogodna jer vrijedi samo za manje kuteve.

3.3.5 Raketa “Damir Kršić”

Ovaj je projektil korišten za dodatno ispitivanje pri kutu od 60 stupnjeva. Dometi postignuti ovom raketom su: 37.50m, 36.60m, 34.60m, 35.80m, 31.80m. Srednja vrijednost dometa je 35.26m, a standardna devijacija iznosi 2.21m. Početni uvijeti su volumen vode od 1 litre i tlak 4 bara.

U odnosu na raketu “M.Gadni” performanse leta su uvelike poboljšane, pogotovo stabilnost. Jedina mana ovog dizajna je njegoa kompleksnost. Udar projektila u tlo je silovit i projektil nerijetko bude natučen. Stoga je jedna ovakva raketa koja se sastoji od više dijelova nepodobna za višestruka testiranja.

4 Zaključak

Utvrđena je linearna ovisnost dometa projektila o početnom tlaku zraka u boci. Za svaki tlak postoji optimalan volumen vode pri kojem se postiže maksimalan domet. Nije moguće aproksimirati mjesto pada projektila kojeg karakterizira nestabilan let jer su mjesta udara u tlo nasumično raspršena, dok su za stabilan projektil “gušća” i može se reći gdje će vjerojatno pasti.

Za stabilan let težište se mora, u svakom trenutku, nalaziti iznad centra pritiska.

Za postizanje najvećeg dometa potrebno je lansirati pod kutem od 45°.

Unatoč kutu za koji se postiže maksimalan domet i vrlo kratkom trajanju potiska let ovog projektila ne može se promatrati kao kosi hitac u vanjskom polju gravitacijske sile. Ovo gibanje je daleko složenije, projektil se giba velikom brzinom kroz fluid i na njega, osim gravitacijske, značajan utjecaj imaju i aerodinamičke sile.

Utjecaj otpora zraka je vrlo velik i tome je potrebno prilagoditi oblik projektila što potvrđuje razlika u dometu raketa “M.Gadni” i “Damir Kršić” za isti kut, tlak i volumen vode.

Važna je i masa projektila koji se giba zrakom, lakši projektili su vrlo podložni utjecaju otpora zraka i vjetra.

Pri konstrukciji projektila prvo je nužno proračunati lokacije težišta i centra pritiska i u skladu sa tim udaljenostima nastaviti izradu. Nos rakete treba biti oblika koji

ima što manji koeficijent otpora zraka. Gotova konstrukcija mora biti rigidna kako bi izdržala velike brzine.

Literatura

- [1] <http://exploration.grc.nasa.gov/education/rocket/>
- [2] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- [3] <http://polyplex.org/rockets/simulation/>
- [4] <http://www.scipy.org/>