

HARS
HRVATSKI ASTRONAUTIČKI I RAKETNI SAVEZ

Zagreb 10000, Dalmatinska 12

Uvod u raketno modelarstvo

*Krešimir Pavleš
Ivan Bonić dipl.ing.el.
Jozo Ivančić dipl.ing.el.*

Zagreb, 2010.

Raketno modelarstvo

Što je raketno modelarstvo?

Raketno modelarstvo je popularna tehnička disciplina (grana), koja je jedna od osnovnih djelatnosti prvenstveno mladih članova Hrvatskog astronautičkog i raketnog saveza. Djelatnost se provodi kroz organizacije Hrvatske zajednice tehničke kulture, Udruge pedagoga tehničke kulture, klubove mladih tehničara u osnovnim školama, centre tehničke kulture i udruge HARS-a.

Raketno modelarstvo se počelo razvijati u Republici Hrvatskoj početkom 60-tih godina prošlog stoljeća, neposredno nakon što je ova djelatnost rođena (pokrenuta) u SAD-u 50-tih godina kada su izuzetan interes u cijelom svijetu svi posvećivali istraživanjima svemira i svemirskoj utrci između SSSR-a i SAD-a.

Zbog mjera sigurnosti poseban je poticaj dobilo raketno modelarstvo jer se spriječilo da mladi nekontrolirano izrađuju i lansiraju amaterske rakete (a posebno raketne motore i goriva) u neodgovarajućim i opasnim uvjetima. Modeli raketa izrađeni su od nemetala – papir, drvo, plastika i kompozitni materijali (epoksidne smole, poliesterske smole, polimeri itd.), a raketni motori su proizvedeni industrijski te ispitani i odobreni od nadležnih državnih institucija.

Kratka povijest raketne tehnike i početaka astronautike

Rakete su se pojavile u Kini i Indiji još prije 3000 godina. To su bile barutne rakete koje su se koristile na svečanostima. Prvi podatak o stvarnoj raketni potjeći iz 880. godine, čiji je tvorac Lav Filozof. Nekoliko stoljeća kasnije Kinezi su napravili oružje „plamene strijele“, koje su koristili 1232. godine u borbi protiv Tatara. Međutim i tada su ljudi maštali o letu u svemir. Tako kineska legenda iz 1500. godine govori o mandarinu Van Huu koji je pokušao poletjeti uz pomoć 50 raket, te je bio raznešen eksplozijom. Prema legendi Van Huu i danas kruži oko zemlje.

Rakete koje su se u povijesti koristile bile su stabilizirane pomoću dugih štapova. Danas se ovakva rješenja koriste za vatrometne raketu. U prošlom stoljeću nizozemac De Boer prvi predlaže stabilizatore u obliku peraje.

O primjeni raketna kao sredstva za let do drugih planeta razmišljaju i razni pisci. Jules Verne i H.G. Wells napisali su djela koja opisuju razne topove, antigravitacijske uređaje i različite načine na koje bi onda ljudi mogli osvojiti planete sunčevog sustava.

Pionir astronautike, rus iz Kaluge, Konstantin Ciolkovski može se smatrati začetnikom razvoja znanstvene teorije svemirskih letova. Godine 1886. objavljuje se u znanstvenom svijetu svojim djelom „Može li Zemlja stanovnicima drugih planeta pružiti dokaze da na njoj postoje razumna bića“. Ciolkovski je prvi dao sheme raketne velikog dometa i raketne međuplanetarne letove s pomoću reaktivnih motora koji upotrebljavaju tekuće gorivo. Veliki teoretski doprinos napretku i razvoju raketne tehnike imala je i ideja Ciolkovskog da se za postizanje kozmičkih brzina izrade višestupanjske rakete.

Amerikanac Robert H. Goddard prvi je realizirao ideju Ciolkovskog. Godine 1919. objavljuje djelo „Metode za postizanje velikih visina“. Nakon toga počinje eksperimentirati raketama s pogonom na tekuće gorivo.

U svom radu „Raketa u planetarnom prostoru“ postavio je 1923. godine četiri postavke koje su kasnije koristile mnogim konstruktorima.

Tijekom sljedećih nekoliko desetaka godina razvoj raketne tehnike dominantno je bio u vojne svrhe i to uglavnom u Njemačkoj. Razvoj raketa V1 i V2 utjecao je na razvoj raketne tehnike i astronautike u cijelom svijetu, pogotovo nakon završetka 2. Svjetskog rata. Na tehnologiji raketa iz pedesetih godina zasnovala se tehnologija u SAD-u koja je omogućila daljnji razvoj i napredovanje balističkih raketa velikih dometa koje su omogućile i prve letove izvan zemljine atmosfere. Sovjetski Savez je također u to doba razvijao raketnu tehniku i astronautiku vrlo intenzivno, te su njihove rakete postigle niz značajnih dostignuća. Kao početak „svemirskog doba“ obično se uzima 04. listopada 1957. , datum lansiranja prvog umjetnog satelita „Sputnik 1“ , a drugi značajan događaj je prvi čovjek u svemiru 12. travanja 1961. godine. Ovo je pokrenulo lavinu interesa za raketnu tehniku u znanstvenim i civilnim krugovima što je imalo presudan utjecaj i na razvoj raketnog modelarstva.

Raketni model

Raketni model je letjelica izrađena od nemetalnih dijelova koja se kreće zrakom bez pomoći aerodinamičkih uzgonskih sila, a pogonjena je modelarskim raketnim motorom industrijske izrade, a za sigurni povratak na zemlju koristi uređaj za sigurno prizemljenje – padobran, traku, krila ili elise što joj omogućuje ponovno korištenje.

Raketni model mora biti konstruiran tako da može letjeti više puta (više od jednom).

Raketni model ne smije odbaciti raketni motor tijekom cijelog leta modela od pokretanja na startnoj rampi do prizemljenja pomoću sustava za sigurno prizemljenje. Također, tijekom leta ne smije se odbaciti niti smije otpasti bilo koji dio modela osim vate ili čepa (za izbacivanje sredstva za prizemljenje).

Natjecateljske kategorije prema FAI-u

Kratka „FAI“ – Federation Aeronautique Internationale – međunarodna zrakoplovna organizacija

Kategorija	Naziv
S1	Rakete za postizanje visine
S2	Rakete za nošenje tereta
S3	Rakete s padobranom
S4	Raketoplani
S5	Makete za postizanje visine
S6	Rakete s trakom
S7	Makete
S8	Radio upravljeni raketoplani
S9	Žirokopteri
S10	Rogala – rakete s mekanim krilom

S u nazivu kategorija je kratica od engleskog izraza „Space modelling“ (svemirsko modelarstvo).

Raketni model mora zadovoljavati slijedeće zahtjeve prije lansiranja:

Najveća startna masa u svim kategorijama iznosi 1500g uz ograničenje za svaku pojedinu kategoriju.

Ukupna startna masa goriva svih raketnih motora smije iznositi najviše 200g, a ukupni totalni impuls svih raketnih motora smije iznositi najviše 160Ns.

Najveća dopuštena masa goriva pojedinog raketnog motora iznosi 125g, a najveći totalni impuls iznosi 100Ns.

Raketni model može biti izrađen od najviše tri (3) stupnja. Pod stupnjem se smatra dio modela koji sadrži jedan ili više raketnih motora a odvaja se od modela tijekom leta.

Totalni (ukupni) impuls jednog ili svih motora u prvom stupnju mora biti jednak ili veći od totalnog impulsa svih ostalih motora u ostalim stupnjevima.

Raketni modelarski motor ne smije biti sastavni dio modela, tj. ne smije biti zaljepljen (fiksno spojen) u model rakete.

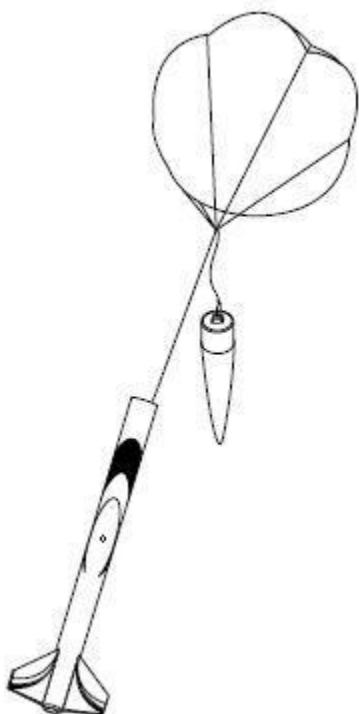
Raketni model mora biti konstruiran tako da može letjeti više od jednom bez oštećenja.

Massa i vrijeme leta modela rakete nacionalne klase :

Kategorija	Maksimalna dozvoljena startna masa [g]	Maksimalno vrijeme leta [s]
S3A	100	300
S6A	100	180

Kategorija S3 - rakete s padobranom

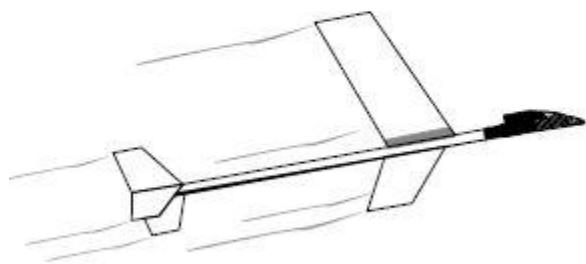
Kategorija rakete s padobranom dopušta jednostupanske modele koji su pogonjeni jednim raketnim motorom totalnog impulsa određene podkategorije, a za prizemljenje smiju koristiti jedan ili više padobrana. Padobran mora imati najmanje tri (3) niti (konca). Natjecatelj bilo kada tijekom natjecanja može mijenjati padobrane prema potrebi. Kod spuštanja modela svaki padobran mora imati djelomično otvoren padobran i barem tri razmaknute niti (konca).



Slika 1. – model rakete s padobranom

Kategorija S4 - raketoplani

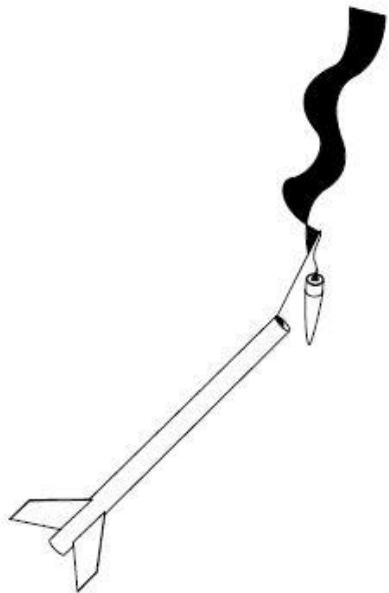
Kategorija raketoplani dopušta modele koji tijekom penjanja ne koriste aerodinamičke uzgonske sile, a koje koriste prilikom spuštanja (slobodni let). Raketoplan prilikom penjanja ne smije izaći iz kuta od maksimalno 30° od vertikale tijekom rada goriva motora. Nakon toga može napraviti petlju u letu ako to nije opasno (za ljude i imovinu). Prilikom spuštanja mora aerodinamički stabilno letjeti i prizemljiti se približno horizontalnim napadnim kutom, ne smije upasti u kovit („usvirati“). Raketoplani se tipično konstruiraju tako da u slobodnom letu rade krugove, čime se postiže bolja stabilnost u letu i smanjuje udaljenost mjesta prizemljenja. Osnovni tipovi raketoplaana su sa čvrstom konstrukcijom krila, te sa sklopivim krilom. Najčešće se izrađuju od balze, te se mogu presvući plastičnom folijom ili lakirati. Masa modela prilikom spuštanja ne smije biti manja od 30% maksimalne dozvoljene startne mase.



Slika 2. – model raketoplana

Kategorija S6 - rakete s trakom

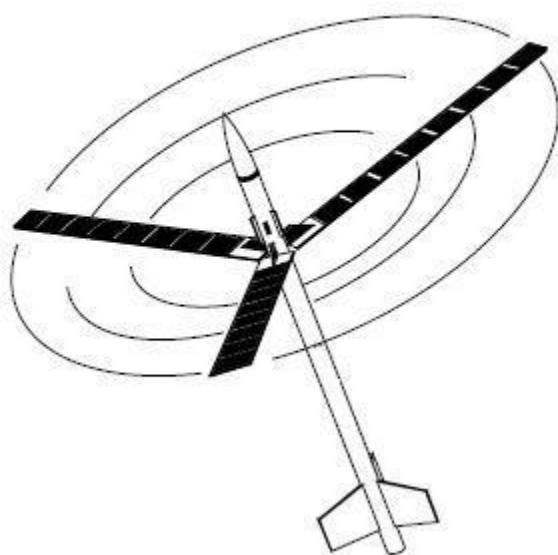
Kategorija rakete s trakom dopušta jednostupanjske modele koji su pogonjeni jednim raketnim motorom totalnog impulsa određene podkategorije, a za prizemljenje smiju koristiti jednu traku. Traka mora imati oblik pravokutnika u omjeru duljine i širine od najmanje 10:1. Smije biti povezana s tijelom raketne jedinice jednom niti (npr. koncem). Traka tijekom leta također mora imati vidljivi omjer duljine i širine od najmanje 10:1. Uži kraj trake mora imati čvrsti završetak maksimalnog presjeka 2×2 mm, te petlju koja je spojena na oba ruba. Ta petlja treba biti jednom niti spojena s modelom. Natjecatelj bilo kada tijekom natjecanja može mijenjati trake prema potrebi. Kod spuštanja modela traka mora biti potpuno razmotana. Traka mora biti izrađena iz jednog komada materijala te ne smije imati nikakve rupice.



Slika 3. – model rakete s trakom

Kategorija S9 - Žirokopteri

Kategorija žirokoptera dopušta jednostupanjske modele koji su pogonjeni jednim raketnim motorom totalnog impulsa određene podkategorije, a za prizemljenje koristite sustav za spuštanje s autorotacijom. Autorotacija mora biti oko osnovne osi modela i mora biti rezultat pravilno rasklopljenog sustava za prizemljenje.



Slika 4. – model žirokoptera

Natjecateljske kategorije raketnih modela nacionalne klase

Nacionalne kategorije namijenjene su za natjecanja mladih natjecatelja u kategoriji osnovnih i srednjih škola.

Kategorije nacionalne klase su :

S3A – rakete s padobranom (totalni impuls raketnog motora do 2,50Ns)

S6A – rakete s trakom (totalni impuls raketnog motora do 2,50Ns)

Duljina modela nije ograničena. Minimalni promjer iznosi 18mm a maksimalni 41mm, te ne mora biti konstantan cijelom duljinom modela. Koriste se modelarski raketni motori promjera 18mm. Sva ostala pravila su jednaka kao i za iste kategorije po FAI pravilniku.



Slika 5. – tipičan model nacionalne klase (promjera 18mm)

Konstrukcija raketnih modela nacionalne klase



Slika 6.

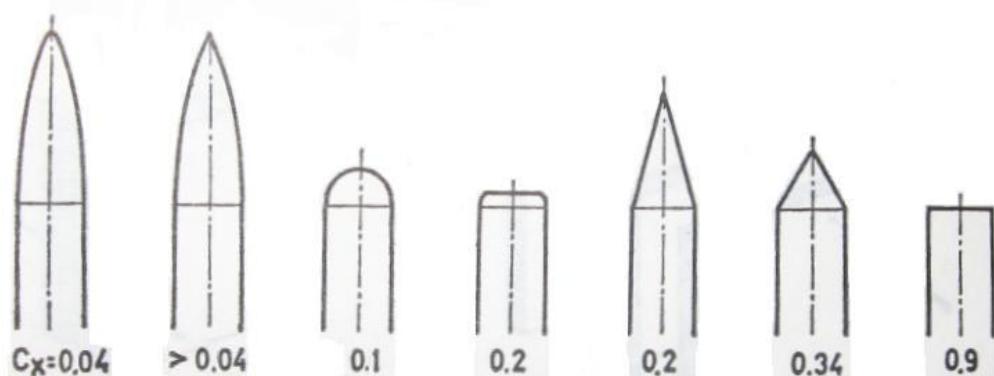
Osnovni dijelovi raketnog modela:

1. Tijelo rakete povezuje sve dijelove modela rakete. Najčešće cilindričnog oblika. Unutar tijela smješten je raketni motor i sustav za meko prizemljenje, a na tijelo su zalijepljeni ili na drugi način pričvršćeni (povezani koncem) svi ostali dijelovi. Najčešće se izrađuje od papira, a može se izrađivati i od drugih materijala.

2. Glava rakete je konusni vrh rakete koji može biti različitih oblika, a služi za smanjenje aerodinamičnog otpora tijekom leta. Najčešće se izrađuje od lakog drveta (balza, lipa) ili različitih polimera (plastične mase).

Oblik glave značajno utječe na visinu leta (domet) rakete. Razni oblici glava rakete imaju razne koeficijente otpora C_d , koji su dobiveni mjeranjima u aerodinamičkom tunelu.

Na slici 7. prikazani su neki od oblika glava i pripadajući koeficijenti otpora.



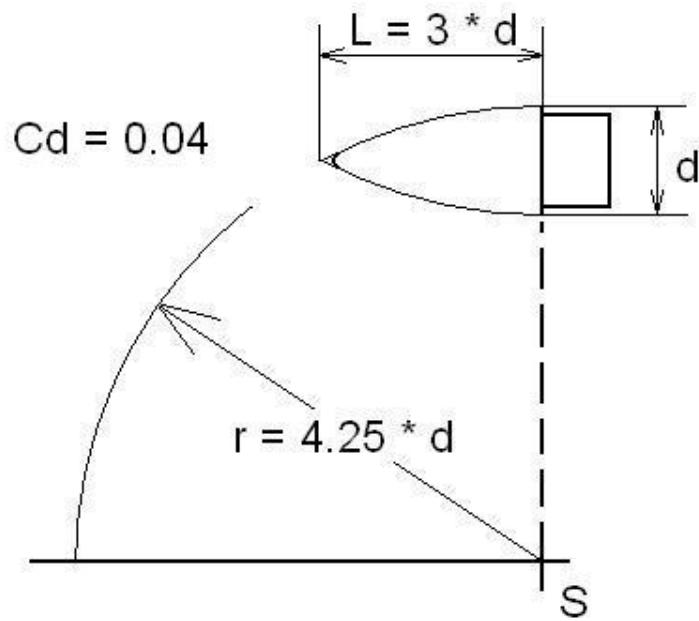
Slika 7. – koeficijenti otpora

Jedan od najpovoljnijih oblika za glavu rakete je tzv. oživalna glava. Koeficijent otpora ove glave iznosi : $C_d = 0.04$.

Konstrukcija oživalne glave

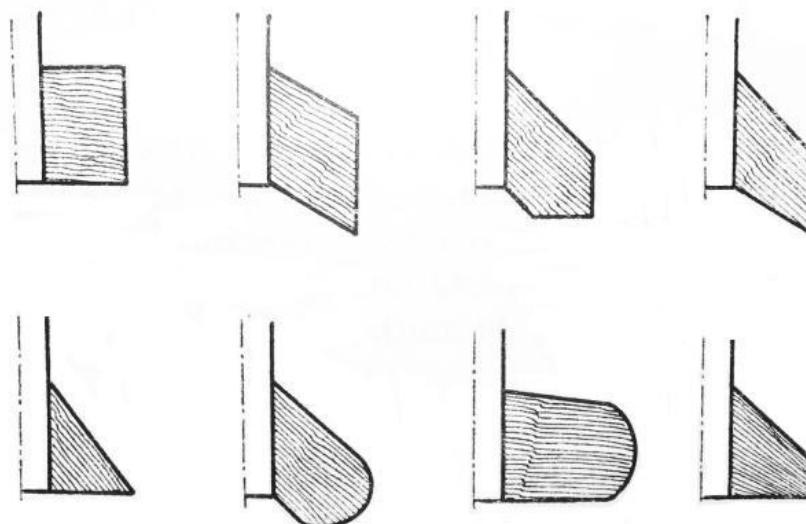
Za zadani promjer glave d , ona se lako može konstruirati tako da se nacrtava kružnica polumjera $r = 4.25 * d$, te se simetrično napravi i za drugu polovicu glave. Za najbolje rezultate potrebno je malo zaobliti vrh oživalne glave (malo zaobliti presjecište dvije kružnice).

Ovako konstruirana glava ima duljinu od približno tri promjera d .

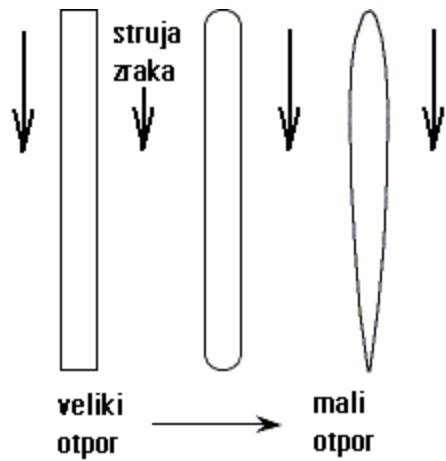


Slika 8. – konstrukcija oživalne glave

3. Stabilizatori služe za aerodinamičku stabilizaciju leta rakete. Najčešće se izrađuju od lakog drveta (balze). Raketa najčešće ima 3 ili 4 stabilizatora, iznimno više. Oblak im je najčešće trapezni ili eliptični.



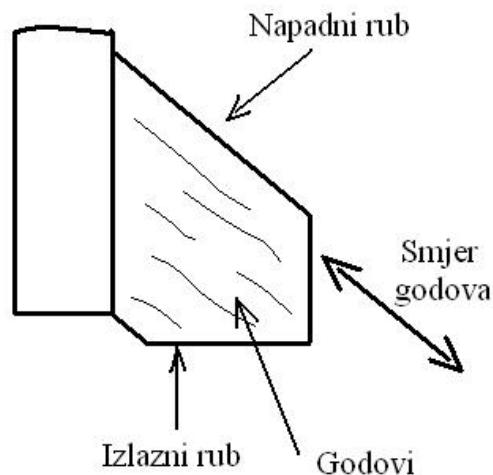
Slika 9. – razni oblici stabilizatora



Slika 10. – profili stabilizatora

Različiti presjeci (profili) stabilizatora imaju različite koeficijente otpora, a najpovoljniji je oblik kapljice sa zaobljenim napadnim rubom i oštrim izlaznim rubom. Ovakav oblik daje najmanji koeficijent otpora za podzvučne brzine.

Godovi drveta (balze) trebaju biti paralelni s napadnim rubom stabilizatora zbog čvrstoće zalijepljenog stabilizatora na modelu rakete.



Slika 11. – pravilno zalipljen stabilizator

4. Vodilice se koriste za usmjeravanje rakete na kliznoj rampi u početnoj fazi leta dok raketa ne postigne dovoljnu brzinu za stabilan let. Najčešće su u obliku cjevčice, a izrađuju se od papira ili plastične mase.

5. Sustav za sigurno prizemljenje :

- a) Padobran se izrađuje od plastičnih folija koje mogu biti metalizirane.
- b) Traka se najčešće izrađuje od metaliziranih plastičnih folija.

6. Čep ili vata služi za zaštitu sustava za prizemljenje od vrućih plinova i plamena prilikom aktiviranja odbojnog punjenja.

7. Konci služe za povezivanje dijelova rakete u cjelinu.

8. Modelarski raketni motor

Cilj i organizacija natjecanja

Cilj natjecanja u kategorijama S3 i S6 je postizanje što duljeg vremena leta. Natjecatelj koristi najviše dva modela. Sudac ovjerava modele prije početka natjecanja. Sudac provjerava model prije svakog starta. Svrha ovjeravanja je da se osigura da natjecatelji koriste najviše dva modela za tri starta. Ovime se postiže da model mora biti konstruiran za više od jednog leta. Također se time potiče sportski duh natjecatelja, te pokazivanje stečenih znanja iz meteorologije i taktiziranja. Natjecanje je organizirano u tri slijedna vremenska razdoblja (turnusa) u kojima se lansira po jedan raketni model. Natjecanje vodi glavni sudac natjecanja, a pomažu mu suci – mjeritelji vremena leta. Oni su nadležni za određeni broj natjecatelja kojima mjere vremena i nakon glavnog suca dalje kontroliraju ispravnost leta te upisuju rezultate. Natjecanja su gotovo uvijek pojedinačna i ekipna pri čemu se svaki natjecatelj plasira pojedinačno. Ekipno natjecanje se provodi tako da se zbrajaju rezultati članova ekipe. Ekipu mogu sačinjavati najmanje jedan, a

najviše tri člana. Trajanje vremena leta mjeri se od trenutka pomaka rakete na lasnirnoj rampi do trenutka doticanja raketnog modela sa čvrstim objektom (zemlja, zgrada, drvo, dalekovod i dr.), nestanka modela iz vidljivosti suca (mjeritelja vremena) ili postizanja maksimuma za određenu kategoriju. Ukoliko se model nakon nestanka iz vidljivosti (zbog fizičke prepreke, oblaka, itd) pojavi unutar 10 sekundi nastavlja se mjerjenje leta. Ako se ne pojavi u tom vremenu zaustavlja se mjerjenje i vrijeme od 10 sekundi se odbija od postignutog vremena u tom trenutku. Jedan natjecatelj smije koristiti najviše dva (2) modela za pojedinu kategoriju tijekom natjecanja (tijekom tri turnusa), a za dopunske letove („fly off“) može koristiti još jedan dodatni model.

U dijelu putanje do trenutka otvaranja sustava za meko prizemljenje raketni model ne smije izaći iz kuta većeg od 30° od vertikale.

U slučaju eksplozije modelarskog raketnog motora ili zakazivanja rada trasera (nema aktiviranja odbojnog punjenja), dozvoljeno je koristiti novi modelarski motor i ovjeriti dodatni raketni model koji se mora lansirati u istom turnusu (ponovljeni start), a sve uz koordinaciju glavnog suca i mjeritelja vremena.

Pravila sigurnosti za raketne modelare

1. Raketni modeli moraju biti izrađeni isključivo od nemetalnih dijelova (osim male količine tanke žice) ili metalizirane folije.
2. Svaki raketni model mora sadržavati ispravan sustav za prizemljenje.
3. Raketni model ne smije se lansirati pod nagibom rampe većim od 30° od vertikale.

4. Upotrebljavaju se isključivo tvorničko izrađeni raketni modelarski motori na kojima se ne smije ništa mijenjati. Modelarski raketni motori moraju biti uvezeni i ispitani od ovlaštenih poduzeća, a imati odobrenje MUP-a Republike Hrvatske za stavljanje u promet. Prilikom uporabe motora potrebno je pridržavati se naputka proizvođača. Iskorištene motore ne smije se puniti nikakvim pirotehničkim smjesama i pokušavati napraviti novi motor. Također se nesmiju upotrebljavati oštećeni motori. Oštećeni modelarski raketni motori moraju se uništiti potapanjem u vodu ili kod ovlaštenog poduzeća.
5. Za lansiranje modela upotrebljava se isključivo električni paljeni uređaj, a najmanja dužina kabela mora biti 5 m (od rampe do startera i ostalih). Prekidač za startanje mora biti isključivo povratni (tipkalo). Upaljač se u motor stavlja neposredno prije lansiranja na startnoj rampi.
6. Ukoliko upaljač ili otporna žica nije upalio motor potrebno je pričekati najmanje jednu minutu a zatim model skinuti sa rampe (pridržavati se pravila nikad tijelo iznad rampe ili ruka ispod motora) i onda promijeniti upaljač.
7. Modeli se mogu lansirati isključivo pod nadzorom punoljetne osobe sa nenastanjene površine, daleko od kuća, naselja, cesta, dalekovoda, drveća, zračnih luka i lako zapaljivih površina.
8. Raketne modele ne smije se lansirati po uvjetima loše vidljivosti (magla, snijeg, kiša, niska naoblaka) i vjetru jačem od 9m/s.
9. Nikad se ne smije prilaziti modelu ili ga pokušati dohvati ukoliko je ostao na žicama pod naponom ili drugom opasnom mjestu.
10. Prije lansiranja modela i odbrojavanja potrebno je provjeriti da nema nikakve letjelice u zraku i da su svi gledatelji dovoljno udaljeni.
11. Zabranjeno je modelom gađati ciljeve na zemlji ili u zraku, a u modele stavljati zapaljive ili eksplozivne tvari.

12. Prilikom lansiranja obavezno je odbrojavanje najmanje 5 sekundi (5-4-3-2-1- START !). Tek nakon riječi „START“ dopušteno je pritisnuti tipku za paljenje. Ukoliko se model lansira ranije start je nevažeći i rezultat je nula!

Modelarski raketni motori

Modelarski raketni motor namijenjen je za pogon modela raketa. To je reaktivni motor sa čvrtim gorivom, koji je izrađen isključivo za jednokratnu uporabu. Zabranjena je bilo kakva preinaka istog iz sigurnosnih razloga. Najveća dopuštena masa goriva iznosi 125 g, a totalni impuls 100 Ns.

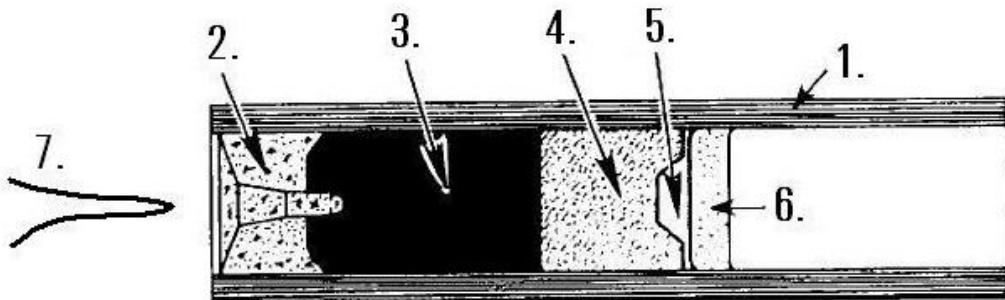
Modelarski raketni motori se pripaljuju isključivo električnim upaljačem (pirotehnički električni upaljač ili otporna žica).

Modelarski raketni motori se skladište i čuvaju na suhom mjestu udaljenom od izvora topline, uvijek bez upaljača. Preporučuje se koristiti silica-gel (zbog vlage) uz motore koji su uskladišteni na duže vrijeme. Neispravni i stari motori uništavaju se potapanjem u vodu ili kod ovlaštenog poduzeća.

Buster raketni motori koriste se za pogon višestupanjskih raketa, te ne sadržavaju traser i odbojno punjenje. (npr. B6-0)

Motori koji se koriste moraju biti nabavljeni i ispitani kod ovlaštenog poduzeća i imati rješenje za stavljanje u promet MUP-a Republike Hrvatske.

Dijelovi modelarskog raketnog motora :



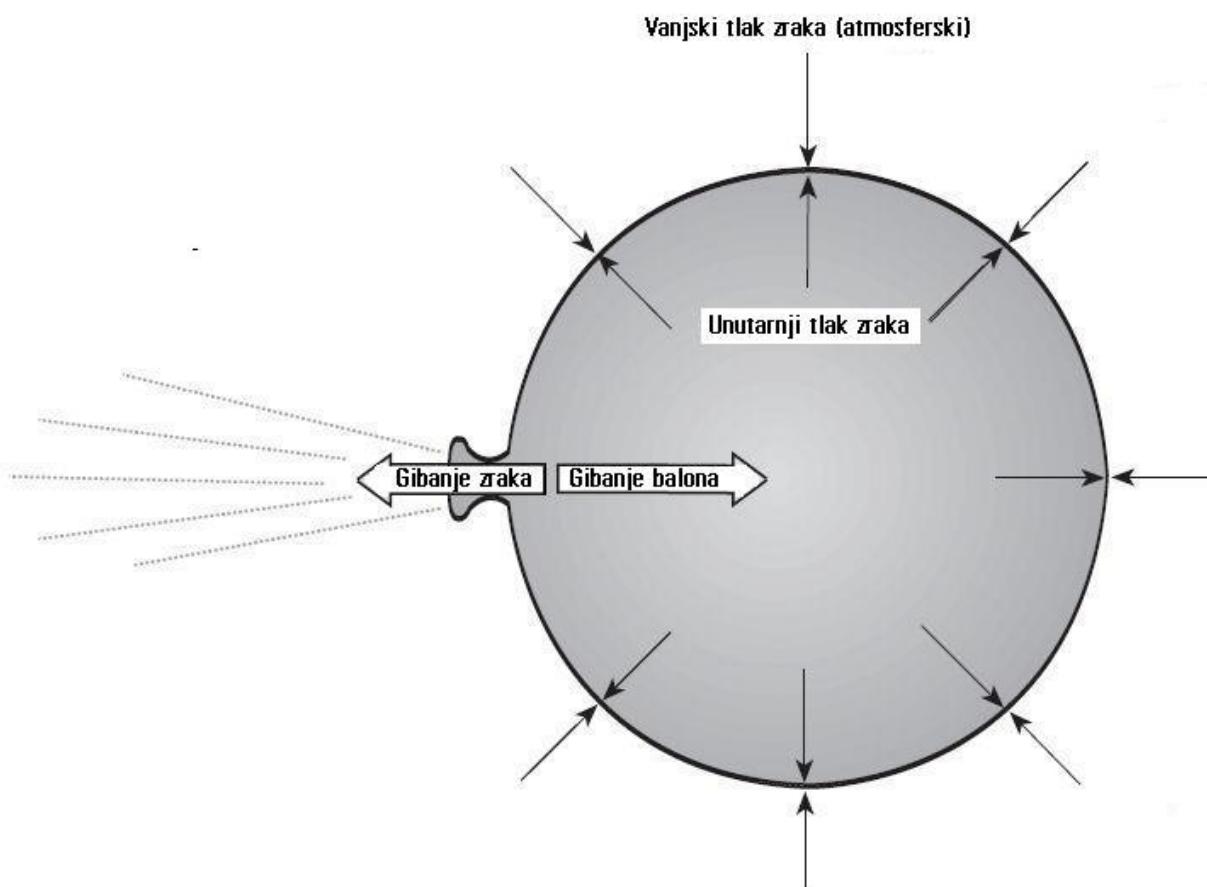
Slika 12. – presjek modelarskog raketnog motora

1. Kućište raketnog motora se izrađuje u pravilu od papira, eventualno od plastike.
2. Mlaznica se izrađuje od temperaturno izdržljivih materijala, a služi za ubrzavanje vrućih plinova zbog povećanja iskoristivosti energije raketnog goriva.
3. Gorivo je pogonski dio raketnog motora koji se izrađuje od baruta ili kompozitnih materijala.
4. Traser (usporivač) je sporogoruća dimna smjesa koja se pali nakon izgaranja raketnog goriva. Namijenjen je ostavljanju vidljivog traga putanje modela i odgađanju vremena aktiviranja odbojnog punjenja do trenutka kada se izbacuje sustav za sigurno prizemljenje.
5. Odbojno punjenje je manja količina baruta ili druge pirotehničke smjese koja se aktivira nakon izgaranja trasera, a izbacuje sustav za prizemljenje.

6. Čep je namijenjen za zaštitu odbojnog punjenja. U nekim izvedbama koristi se zaštitni sloj keramike umjesto papirnatog čepa.

7. Električni upaljač izadjuje se od otporne žice (npr. cekas) debljine od 0,3 do 1 mm, a mogu se koristiti i gotovi tvornički upaljači.

Princip rada raketnog motora



Slika 13. – gibanje balona

Gibanje modela rakete zasniva se na trećem Newtnovom zakonu: „Svakoj sili akcije odgovara jednaka i suprotna sila reakcije.“

Kod raketnog motora plinovi koji su ubrzani kroz mlaznicu djeluju kao sila akcije, dok je sila reakcije ona koja djeluje u suprotnom smjeru, pogoni i ubrzava raketu u letu. Isto se događa i kod ispuhanja balona. Balon silom pritiska izgurava zrak kroz otvor , dok sila reakcije balon pokreće u suprotnom smjeru.

Podjela modelarskih raketnih motora prema totalnom impulsu

Oznaka	Totalni impuls [Ns]
A/2	0 – 1,25
A	0 – 2,50
B	2,51 – 5,00
C	5,01 – 10,00
D	10,01 – 20,00
E	20,01 – 40,00
F	40,01 – 80,00

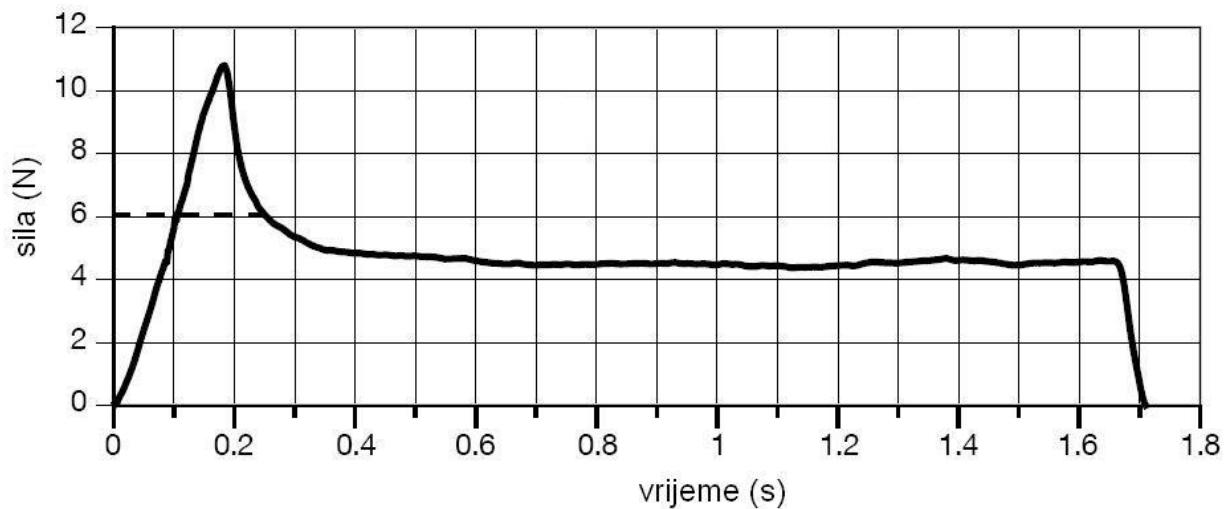
Primjer označavanja motora : **A8–3** maksimalnog totalnog impulsa

A – totalni (ukupni) impuls od 2,50Ns

8 – srednji potisak od 8N

3 – vrijeme rada (gorenja) trasera od 3s

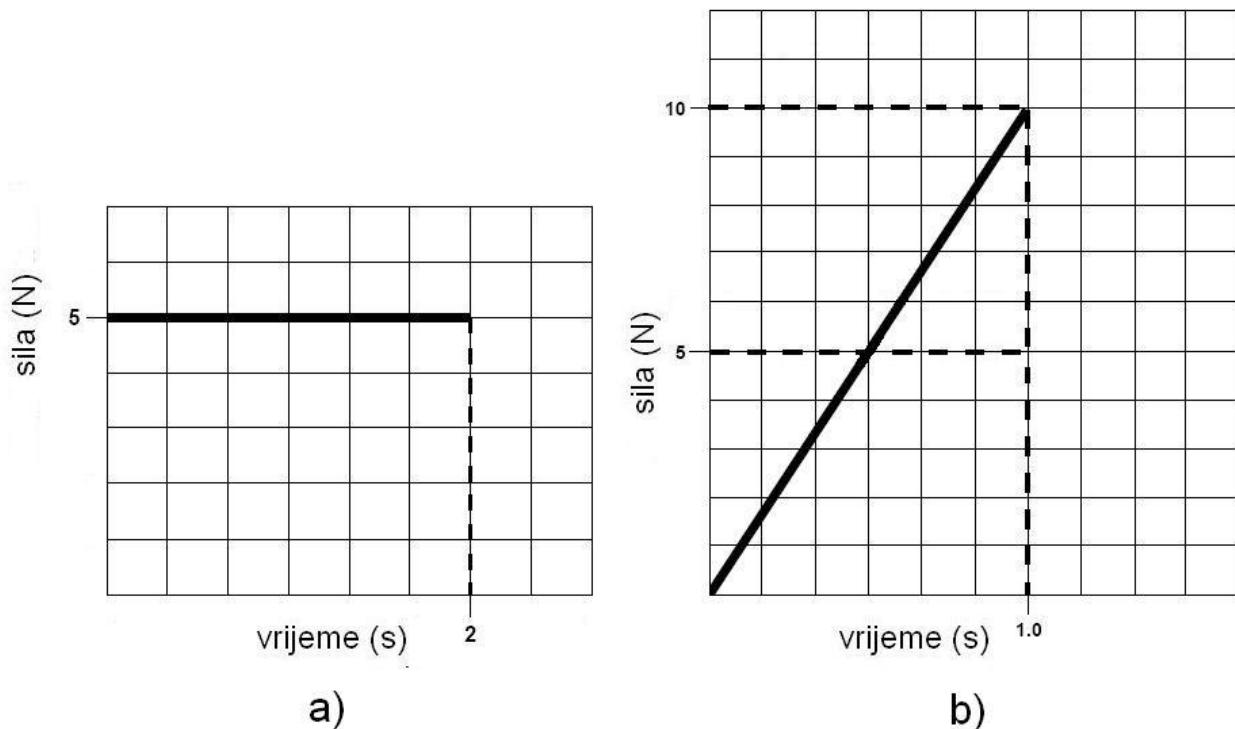
Vremenski dijagram potiska raketnog motora (primjer motora C6–5):



Slika 14. vremenski dijagram

Vremenski dijagram potiska raketnog motora pokazuje promjenu sile potiska u Njutnima (N) u funkciji vremena u sekundama (s) tijekom rada motora. Ovakvo mjerjenje vrši se na posebnim uređajima (test uređajima sa mjeračem sile).

Sljedeće slike prikazuju nekoliko primjera vremenskih dijagrama motora :



Slika 15. – primjeri raketnih motora

Totalni impuls je površina ispod krivulje u F-t dijagramu, to je ukupni impuls sile potiska raketnog motora tijekom rada, a ujedno je jednak umnošku srednjeg potiska $F_{srednje}$ [N] i vremena rada motora t [s].

$$T.I. = \text{Totalni impuls } [Ns] = \int_{t_0}^{t_1} F(t) \cdot dt = F_{srednje} [N] \cdot t [s]$$

Srednji potisak ($F_{srednje}$ [N]) je kvocijent totalnog impulsa motora T.I.[Ns] i vremena rada motora u sekundama.

Npr. na slici 15. a) je prikazan vremenski dijagram raketnog motora koji razvija konstantnih 5 N tijekom 2 sekunde rada pogonskog goriva što daje površinu ispod krivulje od $T.I. = 5N * 2s = 10Ns$ što znači da je to motor C5. U ovom slučaju srednji potisak je 5N. Maksimalni potisak iznosi $F_{maksimalno} = 5N$.

U drugom primjeru – slika 15. b) imamo motor kojem je površina ispod krivulje tj. $T.I. = \text{Totalni impuls} = (10N * 1s) / 2 = 5Ns$. Srednji potisak je u ovom slučaju $F_{srednje} = T.I. / t[s] = 5Ns / 1s = 5N$. Oznaka motora je dakle B5, dok je maksimalni potisak $F_{maksimalno} = 10N$.

Vrijeme rada motora može se odrediti i iz oznake motora.

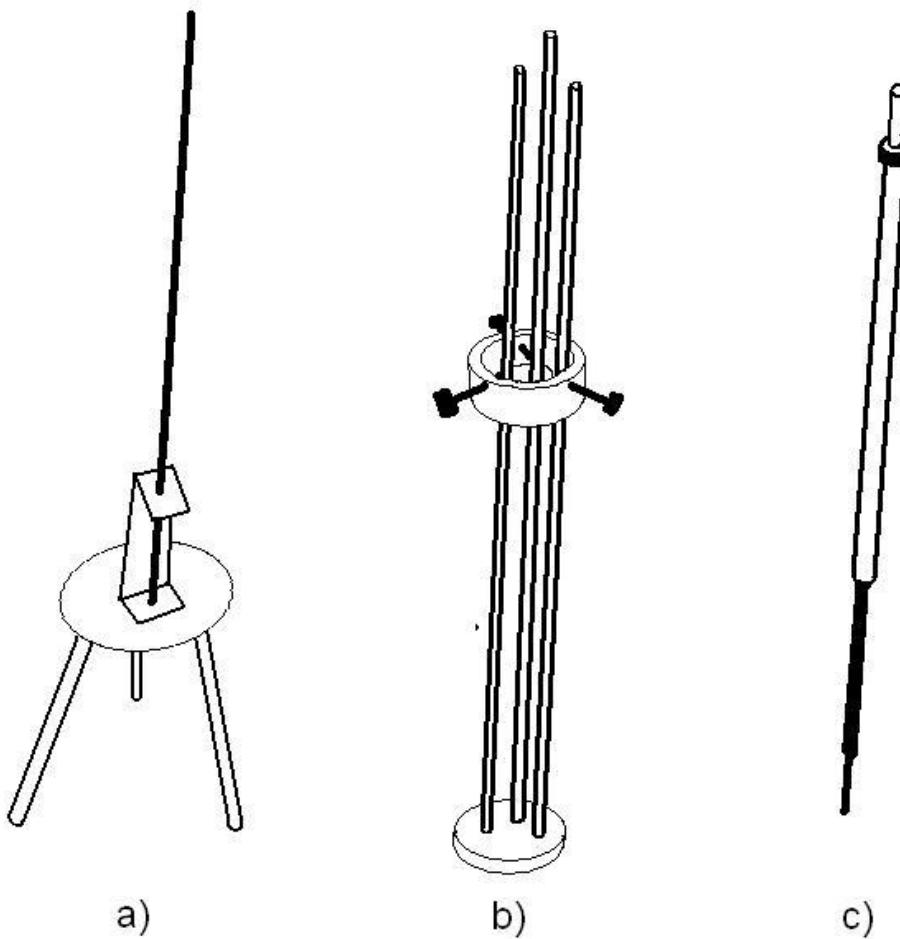
Npr. natjecateljski motor klase A, oznake A8-3 ima totalni impuls od $T.I. = 2,50Ns$, a srednji potisak od $F_{srednje} = 8N$, što znači da je vrijeme rada pogonskog goriva $t[s] = T.I. / F_{srednje} = 2,50Ns / 8N = 0,3125 s$.

Ostala oprema neophodna za lansiranje raketnih modela

Lansirne rampe

Koriste se tri osnovna tipa: klizna rampa (metalna šipka ili profil) - slika 16. a), toranj – slika 16. b) i klipna rampa (piston) – slika 16. c) . Rampa mora biti dovoljno dugačka da se osigura dovoljna brzina modela prije napuštanja rampe kako bi model postigao aerodinamičku stabilnost.

Duljina klizne rampe po kojoj se kreće model iznosi najmanje 800 mm.



Slika 16. – lansirne rampe

Paljbeni uređaj

Namijenjen je za aktiviranje električnog upaljača koji pripaljuje raketni motor. On mora osigurati dovoljnu količinu električne energije za zagrijavanje električnog upaljača. Konstrukcijom se mora osigurati zaštita od slučajnog aktiviranja. Minimalna duljina kabela od paljbenog uređaja do rampe iznosi 5m. Paljbeni uređaji napajaju se obično pomoću automobilskog akumulatora od 12V. Nije dopuštena uporaba izvora napona većeg od 24V, na primjer napona iz utičnice gradske mreže (230V).

Napomene za izradu modela

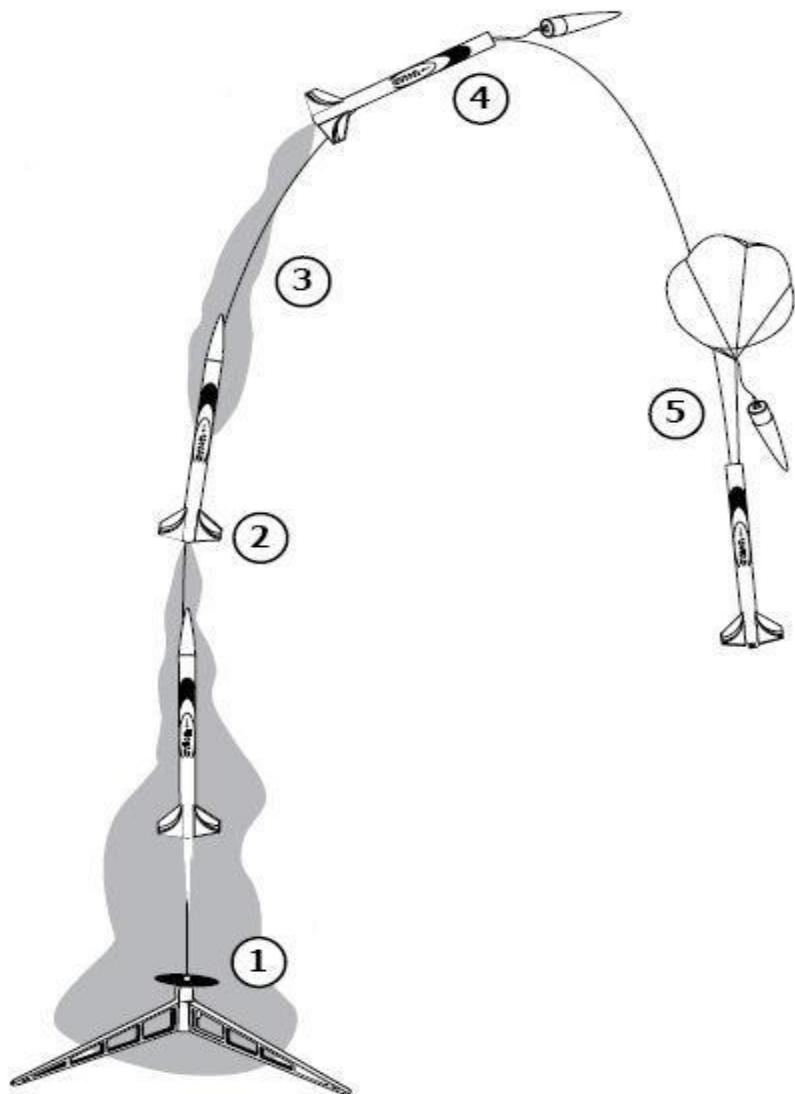
Model mora biti zaštićen od vlage, što se postiže lakiranjem.

Stabilizatori i vodilice moraju biti čvrsto zaljepljeni i to u osi modela.

Završna obrada površine (hrapavost) modela utječe na otpor i time na visinu leta. Glava modela mora precizno dosjedati u tijelo rakete kako prilikom leta ne bi ispala.

Stabilizatori moraju biti zalijepljeni strogo paralelno sa uzdužnom osi modela, a svako odstupanje veće od 1° može dovesti do nestabilnog ili spiralnog leta modela rakete što umanjuje visinu leta. Odstupanje međusobnog kuta između dva stabilizatora manje utječe na let modela i nije strogo bitno da su međusobni kutovi točne vrijednosti ($\alpha=120^\circ$ za modele sa 3 stabilizatora, $\alpha=90^\circ$ stupnjeva za modele sa 4 stabilizatora).

Let rakete



Slika 17.

1. Start rakete i napuštanje rampe
2. Aktivni dio putanje tijekom izgaranja goriva
3. Pasivni dio putanje (zbog inercije) za vrijeme rada trasera
4. Tjeme putanje i izbacivanje sustava za prizemljenje (padobrana)
5. Sigurno spuštanje

Poželjno je da je izbacivanje sustava za prizemljenje točno u tjemu (najvišoj točki) leta što se postiže optimalnom konstrukcijom modela za zadani modelarski raketni motor.

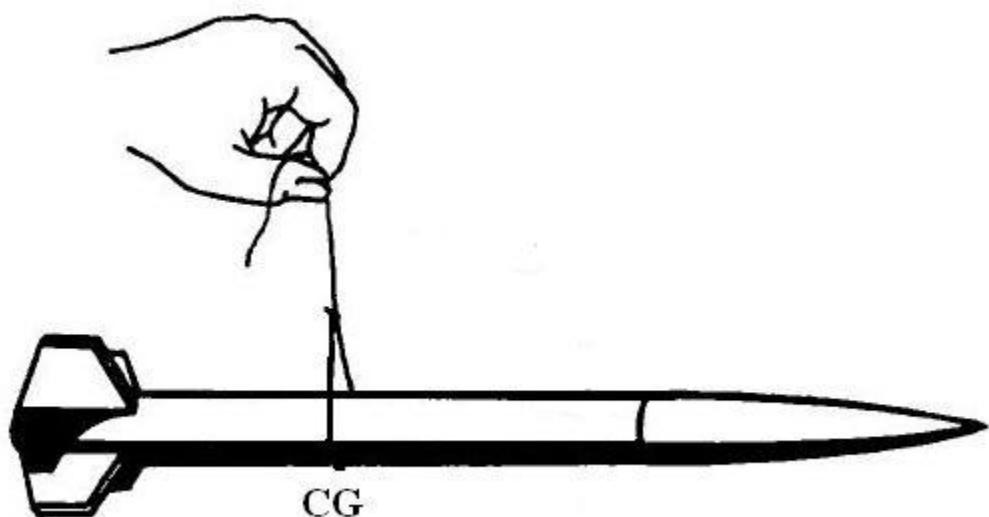
Meteorološke prilike utječu na let rakete (vjetar, vlažnost, temperatura, itd.), trajanje leta i udaljenost na kojoj će se model prizemljiti. Termička strujanja koja nastaju kao posljedica gibanja toplih i hladnih masa zraka također mogu jako utjecati na trajanje leta modela raketa. Ukoliko se stvore uvjeti za nastajanje termike (gibanja velikih masa toplog zraka prema gore zbog zagrijavanja zraka i terena sunčevim zrakama) može se dogoditi da se model podiže i udaljava od zemlje tijekom leta. U ovakvim situacijama, uz jaki vjetar, modeli mogu prizemljiti jako daleko od mjesta lansiranja, te ih je nekada nemoguće pratiti i naći. Jedan vid natjecanja je i praćenje trenutnih meteoroloških uvjeta na terenu tijekom natjecanja te taktiziranje kada lansirati raketne modele i kako pripremiti sustav za prizemljenje (npr. vrsta materijala i dimenzije padobrana itd.).

Stabilnost leta modela rakete

Težište

Težište (CG) nekog tijela je točka hvatišta rezultantne sile težine. Sila teža na tu točku djeluje kao da je u njoj koncentrirana sva težina tijela. Sva se tijela rotiraju oko težišta (npr. štap bačen u zrak).

Praktični način određivanja težišta (CG) modela rakete :



Slika 18. – određivanje CG

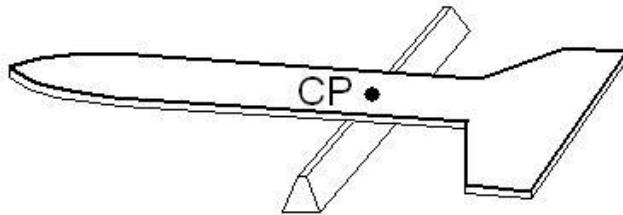
Težište (CG) najjednostavnije određujemo balansiranjem modela na koncu (slika 18.), ili na tankom rubu (npr. ravnalu). Kod određivanja mase modela i

težišta bitno je da je model potpuno pripremljen za let odnosno da je učvršćen raketni motor te složeni svi ostali dijelovi.

Centar pritiska

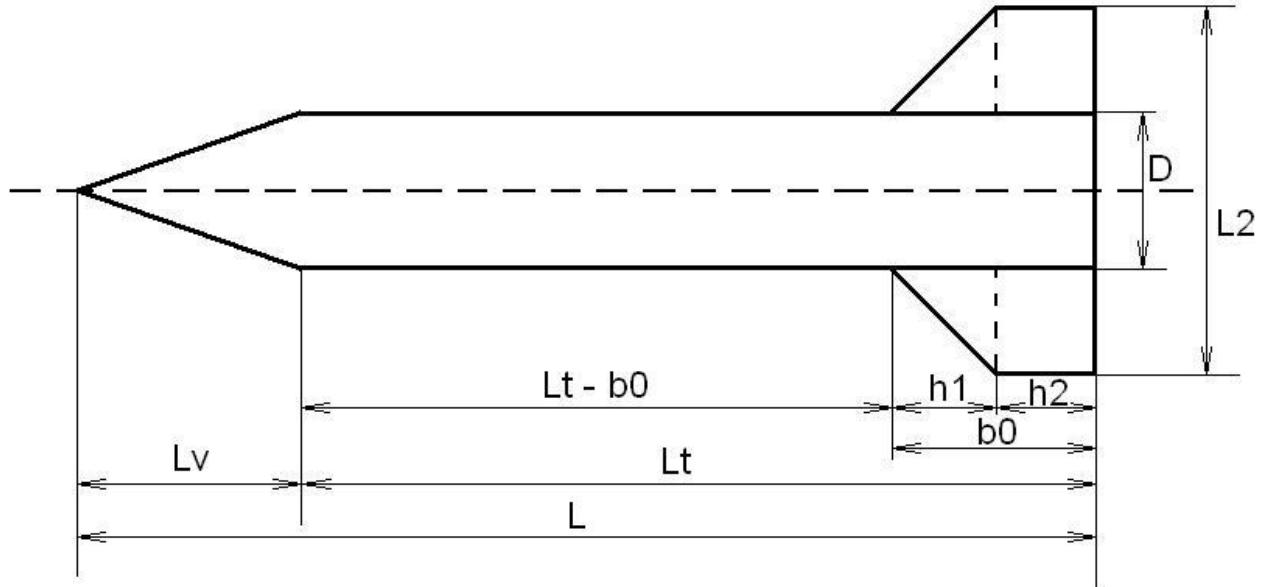
Prilikom gibanja modela rakete kroz zrak na površinu modela djeluju aerodinamičke sile. Centar pritiska (CP) rakete je točka u kojoj djeluju aerodinamičke sile rakete (rezultantna sila). Sile uzgona i otpora pojedinih dijelova rakete mogu se zajedno prikazati jednom silom (ukupnom aerodinamičkom silom) koja djeluje na model rakete u točki koju zovemo centar pritiska (CP). Ta sila djeluje na rotaciju rakete oko njenog težišta te na promjenu putanje.

Centar pritiska (CP) najjednostavnije je odrediti balansiranjem siluete rakete na tankom rubu (npr. ravnalu ili letvici). Ovakvo određivanje CP daje približno mjesto CP, a stvarni CP bi se morao aerodinamički odrediti. Ovime smo odredili težište siluete (projekcije modela rakete) što nam dovoljno točno pokazuje položaj CP. Siluetu možemo izraditi od kartona, balze ili tanke plastike. Centar pritiska određen ovom metodom daje dobre rezultate za male brzine.



Slika 19. – određivanje CP

Centar pritiska može se jednostavno odrediti i računski.



Slika 20. – dimenziije modela rakete

Ovom metodom zapravo određujemo težišta pojedinih dijelova projekcije modela rakete (slika 20.) i pripadne udaljenosti od vrha rakete. Za pojedine dijelove potrebno je odrediti njihove površine i njihova težišta.

1. Glava rakete :

a) konusna glava (oblik glave kao na slici 20.)

$$P_v = \frac{L_v \cdot D}{2}$$

$$X_{cv} = \frac{2}{3} \cdot L_v$$

b) oživalna glava

$$Pv = 0.708 \cdot Lv \cdot D$$

$$Xcv = 0.6 \cdot Lv$$

2. Tijelo rakete :

$$Pt = Lt \cdot D$$

$$Xct = Lv + \frac{1}{2} \cdot Lt$$

3. Prednji dio od oba stabilizatora (duljine h1) :

$$Pst1 = \frac{h1 \cdot (L2 - D)}{2}$$

$$Xst1 = L - b0 + \frac{2}{3} \cdot h1$$

4. Zadnji dio od oba stabilizatora (duljine h2) :

$$Pst2 = h2 \cdot (L2 - D)$$

$$Xst2 = L - \frac{h2}{2}$$

Sada se može izračunati težište siluete, odnosno centar pritiska (CP) prema izrazu :

$$CP = \frac{Pv \cdot Xcv + Pt \cdot Xct + Pst1 \cdot Xst1 + Pst2 \cdot Xst2}{Pv + Pt + Pst1 + Pst2}$$

- ***Primjer izračuna CP***

Dimenzije modela rakete sa 4 stabilizatora :

$$D = 18\text{mm}$$

$$Lv = 35\text{mm}$$

$$Lt = 175\text{mm}$$

$$h1 = 25\text{mm}$$

$$h2 = 30\text{mm}$$

$$L2 = 58\text{mm}$$

$$L = Lv + Lt = 210\text{mm}$$

$$b0 = h1 + h2 = 55\text{mm}$$

1. Glava rakete :

b) oživalna glava

$$Pv = 0.708 \cdot Lv \cdot D = 0.708 \cdot 35\text{mm} \cdot 18\text{mm} = 446\text{mm}^2$$

$$Xcv = 0.6 \cdot Lv = 0.6 \cdot 35\text{mm} = 21\text{mm}$$

2. Tijelo rakete :

$$Pt = Lt \cdot D = 175mm \cdot 18mm = 3150mm^2$$

$$Xct = Lv + \frac{1}{2} \cdot Lt = 35mm + \frac{1}{2} \cdot 175mm = 122.5mm$$

3. Prednji dio stabilizatora (duljine h1) :

$$Pst1 = \frac{h1 \cdot (L2 - D)}{2} = \frac{25mm \cdot (58mm - 18mm)}{2} = 500mm^2$$

$$Xst1 = L - b0 + \frac{2}{3} \cdot h1 = 210mm - 55mm + \frac{2}{3} \cdot 25mm = 172mm$$

4. Zadnji dio stabilizatora (duljine h2) :

$$Pst2 = h2 \cdot (L2 - D) = 30mm \cdot (58mm - 18mm) = 1200mm^2$$

$$Xst2 = L - \frac{h2}{2} = 210mm - \frac{30mm}{2} = 195mm$$

Sada se može izračunati težište siluete, odnosno centar pritiska (CP) prema izrazu :

$$CP = \frac{Pv \cdot Xcv + Pt \cdot Xct + Pst1 \cdot Xst1 + Pst2 \cdot Xst2}{Pv + Pt + Pst1 + Pst2}$$

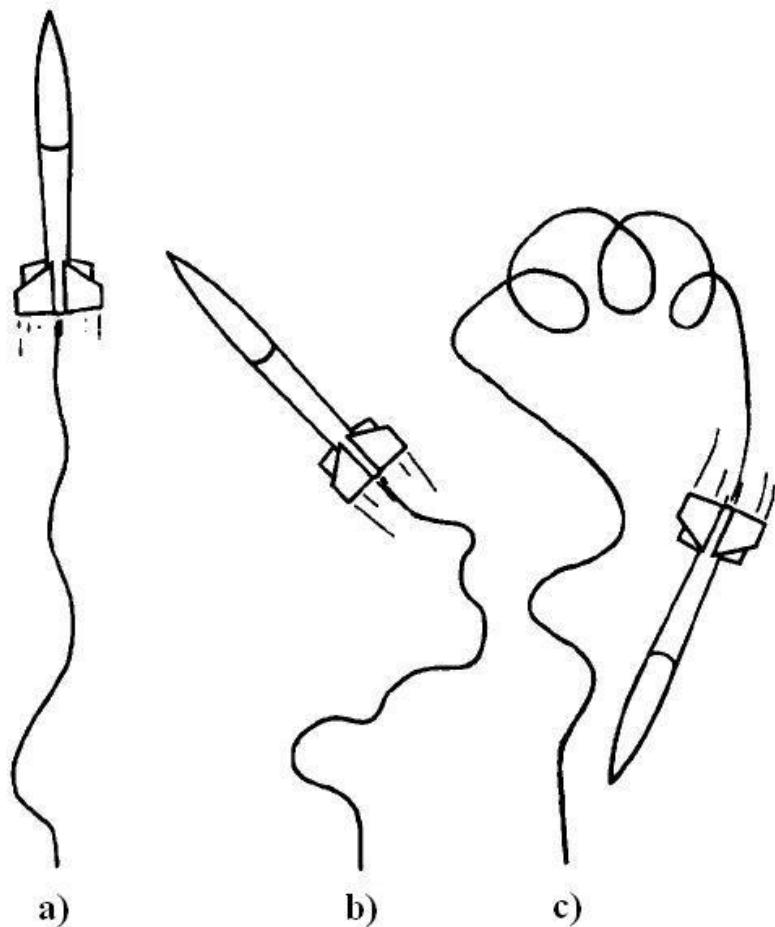
$$CP = \frac{446 \cdot 21 + 3150 \cdot 122.5 + 500 \cdot 172 + 1200 \cdot 195}{446 + 3150 + 500 + 1200}$$

$$CP = \frac{715241}{5296} = 135mm$$

Računski dobiven centar pritiska nalazi se 135mm od vrha modela. Za provjeru ovog rezultata izrađena je i silueta od kartona, te je izmjereno težište siluete i ono se nalazi točno 135mm od vrha. Kod izrade siluete modela rakete korištena je konstrukcija oživalne glave iz dijelova kružnice opisana u ovom priručniku. Iz ovog jednostavnog primjera vidimo da smo odredili vrlo precizno mjesto centra pritiska računski kao i izrađivanjem siluete.

Stabilnost leta modela rakete

Model rakete treba biti konstruiran i izrađen tako da leti stabilno bez nekontroliranog okretanja i skretanja.



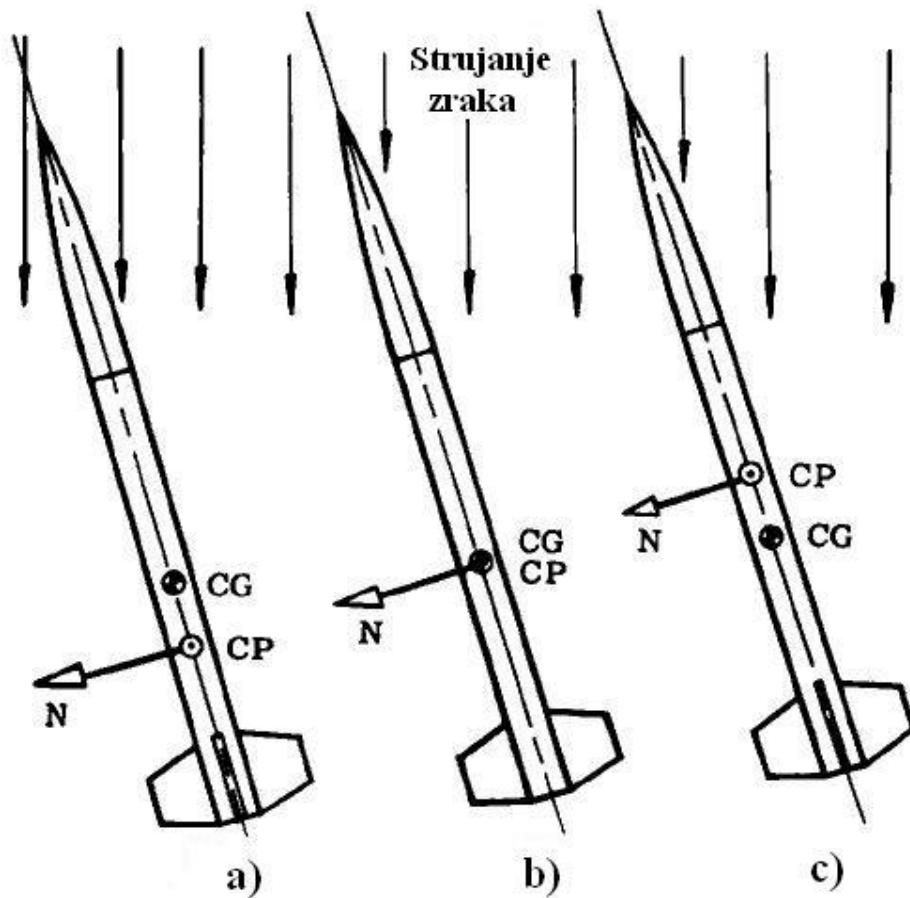
Slika 21.

Prikazana su tri osnovna slučaja :

- a) stabilan let modela rakete
- b) neutralno stabilan let modela rakete – utjecaj vjetra i sl. Može poremetiti putanju modela rakete
- c) nestabilan let – model leti nekontrolirano

Osnovni uvjet dinamičke stabilnosti tijekom leta je određena rezerva statičke stabilnosti, odnosno potrebno je da se centar težišta (CG) nalazi bliže vrhu modela rakete od centra pritiska (CP). Za stabilan let potrebno je osigurati razmak CG i CP od minimalno jednog (1) promjera rakete.

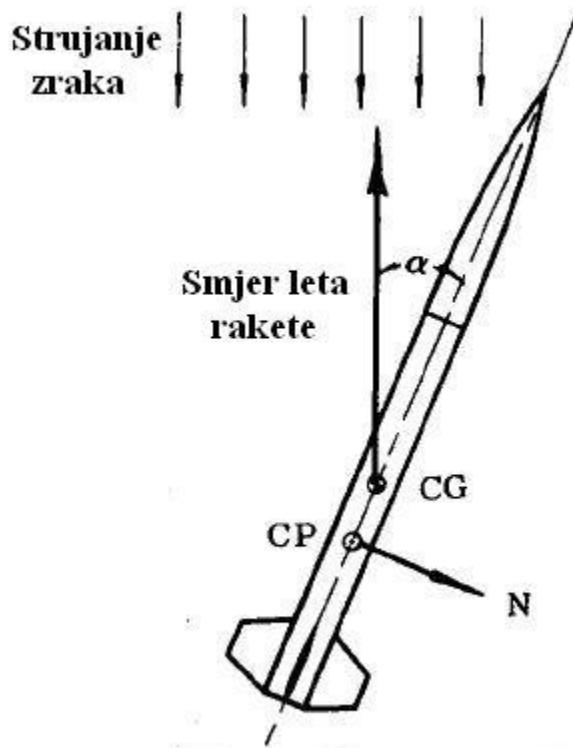
Prikazana su tri slučaja rasporeda CG i CP :



Slika 22.

Samo u slučaju a) na slici 22. raketa će letjeti stabilno jer normalna komponenta F_N rezultantne aerodinamičke sile djeluje tako da se stvara stabilizirajući aerodinamički moment koji korigira smjer rotacije rakete i vraća raketu u početnu putanju.

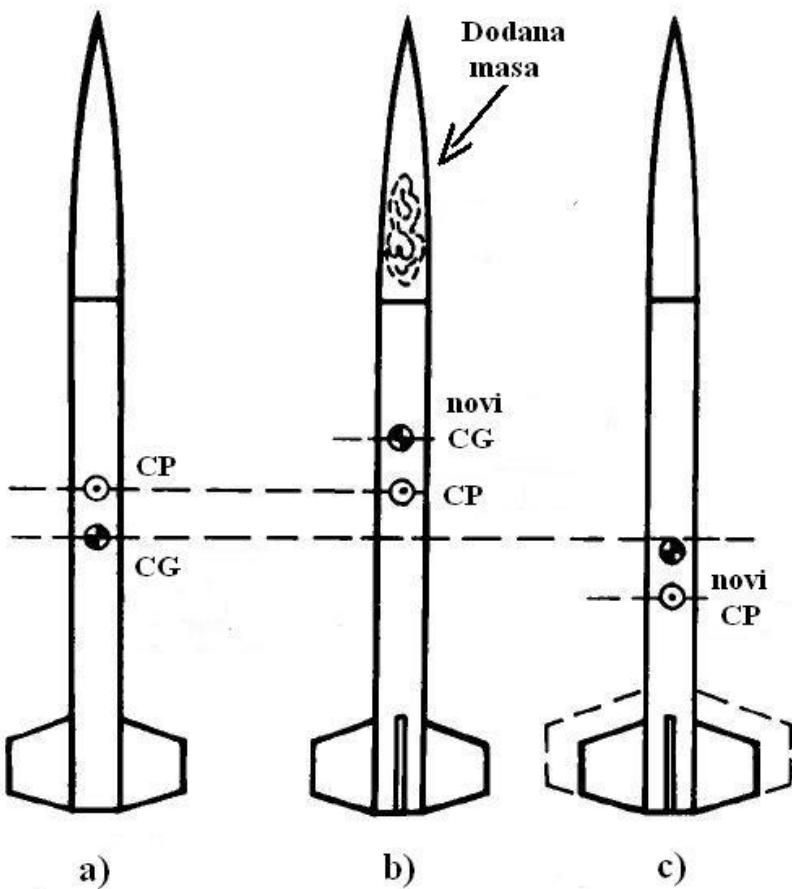
Ako se modelu rakete iz slučaja a) dogodi pomak smjera kretanja, normalna komponenta F_N djelovati će tako da će se raketa vratiti u prvobitni smjer gibanja :



Slika 23.

Metode poboljšanja stabilnosti modela raketa

Ukoliko se utvrdi da je model rakete nestabilan, odnosno da se CG nalazi dalje od vrha rakete nego CP, može se raketa učiniti aerodinamički stabilnom pomicanjem CG prema vrhu modela, ili pomicanjem CP dalje od vrha modela. Slika 24. prikazuje ta dva načina :

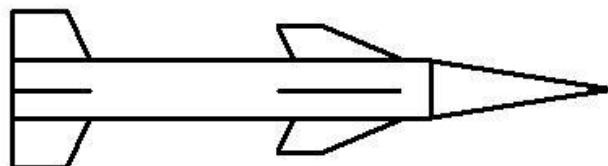


Slika 24.

- a) nestabilan model rakete kojem želimo poboljšati stabilnost
- b) metoda poboljšanja stabilnosti pomicanjem CG prema vrhu modela dodavanjem mase u glavu modela
- c) metoda poboljšanja stabilnosti pomicanjem CP dalje od vrha rakete povećanjem površine stabilizatora

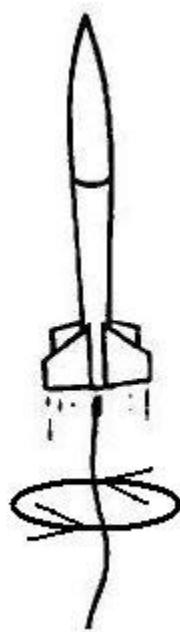
Tijekom rada modelarskog raketnog motora zbog izgaranja goriva i trasera smanjuje se masa raketnog motora te se centar težišta pomiče prema vrhu modela rakete zbog čega raketa postaje stabilnija (povećava se razmak CG i CP). Ukoliko se tijekom leta neki dio u raketni (npr. padobran) pomakne i time se promijeni položaj težišta ona može postati nestabilna te skrenuti.

Ukoliko konstrukcija modela rakete sadrži dodatne stabilizatore koji se nalaze na gornjem dijelu modela rakete (npr. iznad težišta ili blizu glave) tada se centar pritiska pomiče prema vrhu modela što utječe na smanjenje razmaka između CP i CG tako da model rakete postaje manje stabilan.



Slika 25. – dodatni stabilizatori

Rotacija raketnog modela oko uzdužne osi tijekom leta dodatno osigurava (povećava) stabilnost leta ali se ne smije koristiti kao osnovni mehanizam za stabilizaciju putanja. Raketa mora biti aerodinamički stabilna i uz nultu rotaciju.



Slika 26. – rotacija modela rakete tijekom leta

Literatura:

1. Gradimir Rančin, „Uvod u zrakopolovno i raketno modelarstvo“, Zagreb 1987.
2. Jože Čuden, Rasto Snoj, „Raketno modelarstvo“, Tehniška založba – Ljubljana, 1991.
3. S. Mihajlov, Đ. Blagojević, B. Milićević, „Priručnik za obuku raketaša - graditelja, početni kurs“, Beograd 1982.
4. Prof.dr. Davorin Bazjanac, „Svemirski letovi“ , Školska knjiga Zagreb, 1970.
5. The FAI sporting code, „Section 4 - Space models“, www.fai.org , 2010.
6. „Beginner's guide to rockets“, NASA 2010. ,
<http://exploration.grc.nasa.gov/education/rocket/bgmr.html>