



UNIVERZITET U BEOGRADU  
MAŠINSKI FAKULTET  
KATEDRA ZA VAZDUHOPLOVSTVO

---

# Uvod u vazduhoplovstvo

*Mašinsko inženjerstvo u praksi*

BEOGRAD, 2023

---

# Mašinsko inženjerstvo u praksi - Vazduhoplovstvo

Vazduhoplovstvo je multidisciplinarna tehnička oblast koja se bavi problemima realizacije i održavanja transportnih sredstava koja se kreću kroz zemljinu atmosferu. Vazduhoplovno mašinstvo je posebna disciplina mašinskog inženjerstva u kojoj se izučavaju metode i sredstva za projektovanje, proizvodnju i održavanje letelica.

U okviru vazduhoplovstva postoje mnogobrojne oblasti koje se izučavaju. Izdvajaju se 3 velike oblasti:

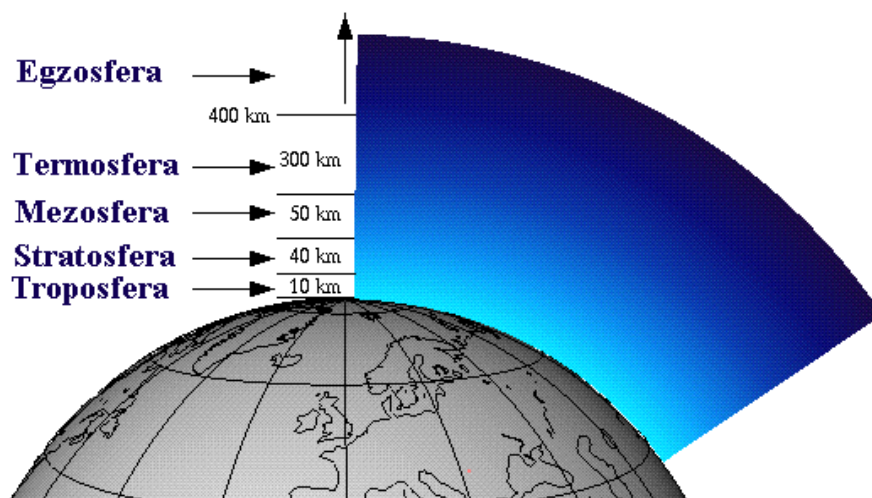
- Aerodinamika
- Struktura i čvrstoća
- Pogon

Svaka od ovih navedenih oblasti ima i svoje manje oblasti koje su podjednako važne. Rezultat interakcije svih navedenih oblasti nas vodi ka gotovom proizvodu a to je u ovom slučaju letelica.

## Atmosfera

Atmosfera je gasoviti sloj (mešavina gasova) koji obavija zemlju i čiji je sastav promenljiv sa visinom. Pretpostavlja se da je debljina ovog sloja preko 800 km. Gasovita smeša je sastavljena iz stalnih i promenljivih čestica gasa hemijskih jedinjenja i raznih čvrstih organskih i neorganskih dodataka. U nižim slojevima ova homogena smeša se naziva vazduh, tačnije čisti suvi vazduh koji je sastavljen od: azota  $N_2$  (78%), kiseonika  $O_2$  (21%), argona  $Ar$  (0.93%), ugljen-dioksida  $CO_2$  (0.03%) i ostalih.

Na zasedanju Međunarodne geodezijske i geofizičke unije 1951. godine usvojena je shema vertikalne podele atmosfere a u zavisnosti od promene temperature i stepena vlažnosti. Po toj shemi atmosfera se deli na pet osnovnih sfera/slojeva: troposfera, stratosfera, mezosfera, termosfera i egzosfera (slika 1).



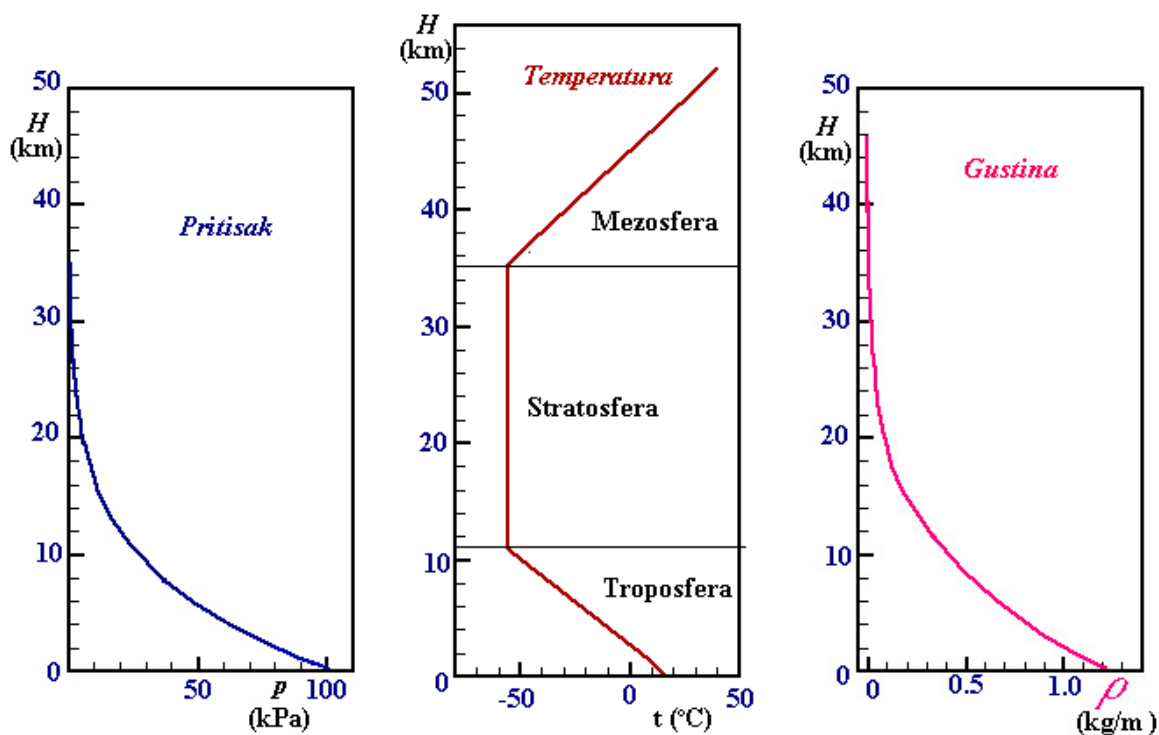
Slika 1 - Podela atmosfere na slojeve

Stanje vazduha na nekoj visini je određeno ako su poznati: pritisak, temperatura i stepen vlažnosti.

Atmosferski pritisak je direktna posledica težine vazduha. To znači da se pritisak vazduha razlikuje sa mestom i vremenom jer se količina (i težina) vazduha iznad Zemlje isto tako razlikuju. Atmosferski pritisak opada sa visinom zbog opadanja dejstva gravitacione sile (smanjuje za 50% na visini od oko 5 km). Atmosferski pritisak se meri visinom živinog stuba ( $mmHg$ ), dok se razlike pritisaka mere obično visinom vodenog stuba ( $mmH_2O$ ). U vazduhoplovstvu, atmosferski pritisak se meri sa barometrima sa živom, a na visinama odnosno u letu barografima koji registruju promenu pritiska u toku vremena.

Dok pritisak sa visinom stalno i pravilno opada promena temperature sa visinom pokazuje znatne neravnomernosti. Do visine od 11000 m odnosno u troposferi temperatura linearno opada sa srednjim gradijentom. Iznad ove visine, u stratosferi, temperatura ostaje konstantna, dok posle raste te na 50 km dostiže vrednost +70 stepeni. Osnovne jedinice za izražavanje temperature su stepeni: Kelvina (K) i Celzijusa (C). Temperatura se takođe može izražavati i u stepenima Fahrenhajta (F) i Reomira (R).

Vazduh sadrži izvesnu količinu vodene pare koja ga čini vlažnim. Količina vodene pare koju vazduh može da primi raste sa temperaturom i za jednu određenu temperaturu dostiže vrednost iznad koje se svaki višak vodene pare kondenzuje. U tom slučaju kaže se da je vazduh za datu temperaturu zasićen vodenom parom. Relativna vlažnost se daje obično u procentima (%) i zove se stepen vlažnosti vazduha. Stepen vlažnosti se određuje psihrometrom, higrometrom ili higrogramom.



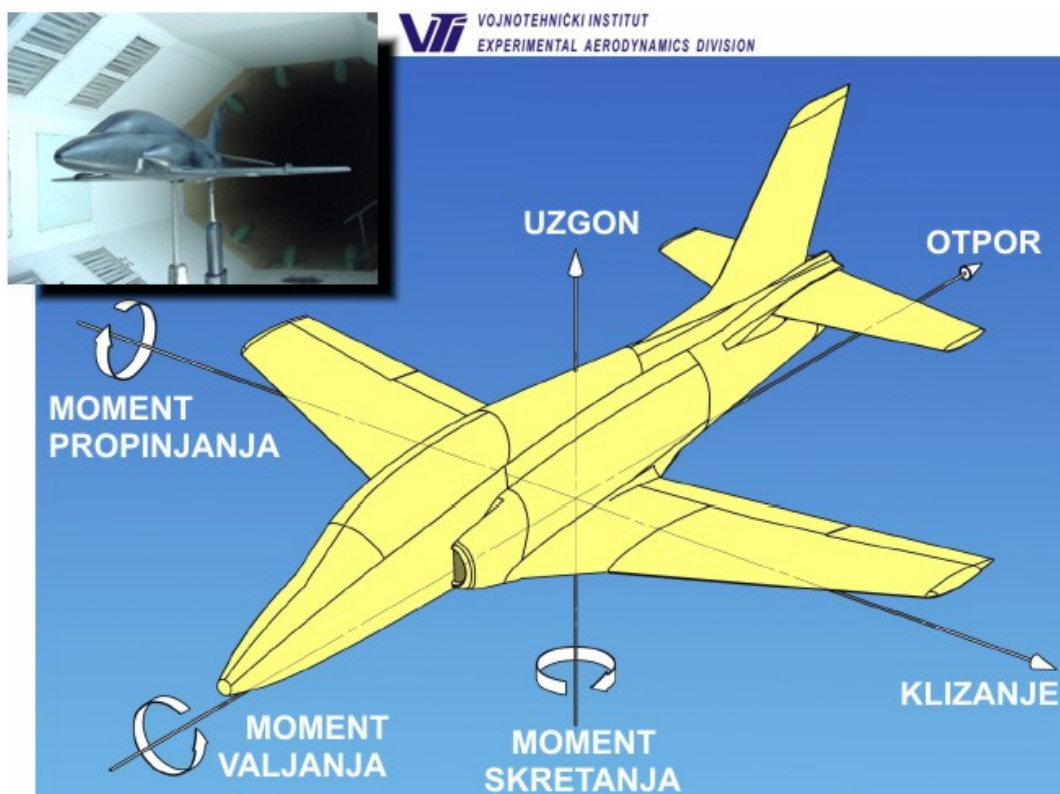
Slika 2 - Promena pritiska (levo), temperature (sredina) i gustine (desno) vazduha sa porastom visine

# Aerodinamika

Aerodinamika je nauka koja se bavi proučavanjem interakcije između atmosfere i tela koje se u njoj kreće. Rezultat interakcije vazduha i opstrujavanog tela jeste pojava aerodinamičke sile  $R$ , kao i aerodinamičkog momenta  $M$  koji ta sila stvara oko neke usvojene referentne tačke, kao što je npr. težište letelice.

Aerodinamička sila  $R$  je prostorni vektor i razlaže se na komponente koje su pogodno izabrane za obavljanje aerodinamičkih proračuna, CFD (computational fluid dynamics, numerički proračun dinamike fluida) modeliranja i eksperimentalnih analiza (aerotunelskih ispitivanja, ispitivanja u letu). Njene komponente su:

- **sila otpora**, ili kratko otpor, koja uvek deluje u pravcu paralelnom sa vektorom pravca neporemećene vazdušne struje ispred opstrujavanog objekta;
- **sila uzgona**, koja je uvek normalna na pravac neporemećene vazdušne struje i deluje u ravni simetrije letelice, ili drugog opstrujavanog tela;
- **sila klizanja**, koja se može javiti u tzv. nesimetričnim režimima leta i deluje u ravni upravnoj na onu koju definišu uzgon i otpor.



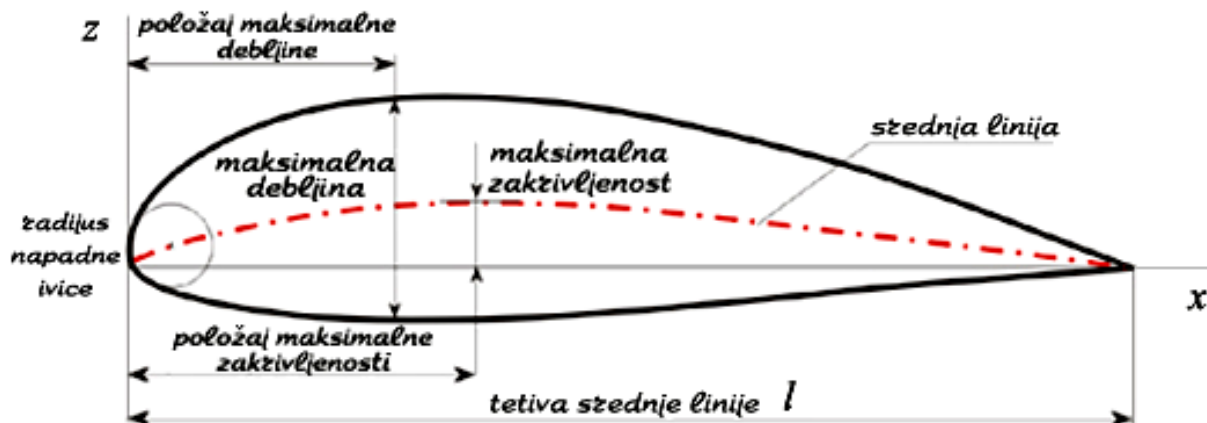
Slika 3 - Komponente aerodinamičke sile i momenta

Odgovarajuće komponente aerodinamičkog momenta  $M$ , koji aerodinamička sila  $R$  stvara oko izabrane referentne tačke su (videti sliku 3): **moment valjanja**, **moment propinjanja** i **moment skretanja**.

Pod aerotelom se podrazumeva kontura čiji je oblik prilagođen za kretanje kroz vazduh. Tipičan primer je uzgonska površina - to je telo čija je jedna dimenzija najčešće bitno veća od u odnosu na druge dve, odnosno telo čija je jedna komponenta aerodinamičke sile koju

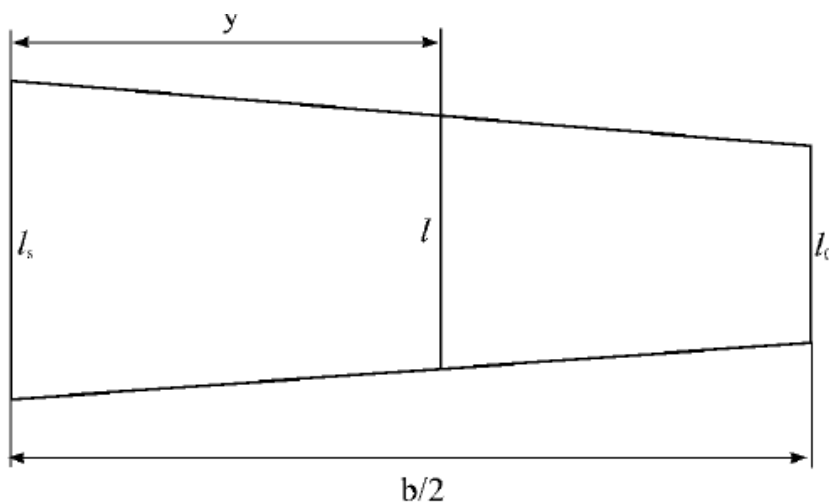
generiše (uzgon) bitno veća od druge dve. To su krilo, repne površine, krakovi elisa, lopatice rotora, vetrogeneratora, itd. Uzdužni presek uzgonske površine zove se aeroprofil.

Aeroprofil je geometrijski definisan oblikom srednje linije (ili skeletne linije) i raspodelom debljine oko nje. Srednja linija aeroprofila je, prema definiciji, geometrijsko mesto tačaka koje polove sve tetive aeroprofila koje stoje normalno na njoj. Skeletna linija aeroprofila je geometrijsko mesto središta upisanih krugova u aeroprofilu. Iako nema nekih specijalnih ograničenja u smislu primene, u konstruisanju savremenih aeroprofila uobičajena je primena srednje linije aeroprofila.



Slika 4 - Osnovne konstruktivne karakteriske aeroprofila

Početak srednje linije naziva se napadna ivica, a kraj srednje linije izlazna ivica aeroprofila. Duž koja spaja napadnu i izlaznu ivicu aeroprofila naziva se tetiva srednje linije ili skraćeno tetiva aeroprofila ( $l$ ). Deo konture aeroprofila iznad tetive srednje linije naziva se gornjaka aeroprofila, a deo konture ispod srednje linije donjaka aeroprofila.



Slika 5 - Osnovne geometrijske karakteristike krila

Krilo se sastoji od niza aeroprofila kao poprečnih preseka koji se menjaju kontinualno od korena do kraja. Ova promena je uslovljena potrebom optimizacije svojstva krila. Pod svojstvom krila podrazumevamo stvaranje sile uzgona prilikom opstrujavanja i dodira vazduha sa krilom. Pri tome je lokalno opstrujavanje oko aeroprofila u korenu različito od opstrujavanja oko aeroprofila na kraju krila. Za razumevanje terminologije važni su sledeći pojmovi:

- $b$  razmah krila - pravolinijsko rastojanje između krajnjih aeroprofila na levom i desnom kraju krila;
- $S$  aerodinamička površina krila (wing area) je površina senke krila koje je osvetljeno svetlošću čiji je izvor iznad krila. Odnosno, to je površina u horizontalnoj projekciji. Površina krila je referentna i konstantna veličina za jedan tip letelice;
- $l$  lokalna tetiva krila;
- $l_s$  tetiva u korenu krila;
- $l_o$  tetiva na kraju razmaha;
- $n$  suženje - odnos između tetiva na kraju i u korenu krila;
- Aerodinamički centar – tačka aeroprofila oko koje je koeficijent momenta približno konstantan bez obzira na napadni ugao. Realno se nalazi na oko 25% tetive, nešto iznad nje;
- Centralna linija krila – linija koja spaja aerodinamičke centre lokalnih aeroprofila. Ako je ova linija prava, tada se naziva aerodinamička osa krila;
- $\varphi$  ugao strele krila – oštar ugao između aerodinamičke ose i y-ose, meren u xOy ravni;
- $\delta$  ugao diedra – ugao između aerodinamičke ose krila i njene projekcije na ravan xOy;
- $l_{sgt}$  srednja geometrijska tetiva – tetiva zamišljenog pravougaonog krila iste površine i razmaha kao posmatrano krilo;
- $l_{sat}$  srednja aerodinamička tetiva - tetiva zamišljenog pravougaonog krila bez strele, iste površine kao i stvarno krilo, na koje deluje isti aerodinamički moment kao i na stvarno krilo;
- $\lambda$  vitkost krila - odnos kvadrata razmaha krila i površine krila.

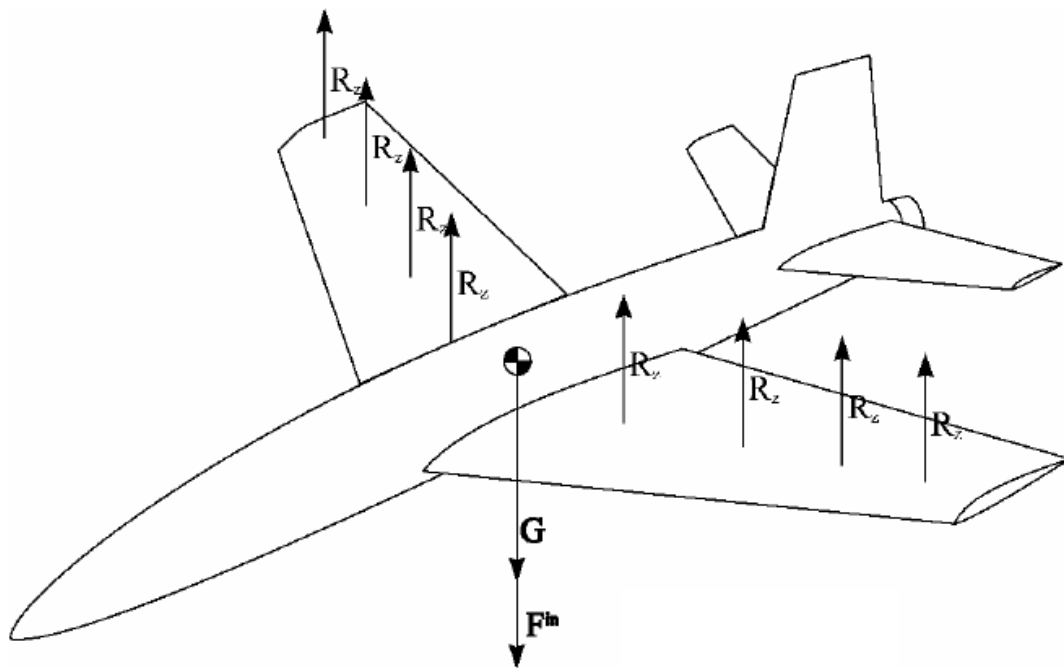
## Struktura i čvrstoća

Struktura i čvrstoća su oblast koja se bavi proučavanjem sila koje deluju na letelicu kao i dimenzionisanjem konstrukcije ili dela strukture letelice koja treba da nosi neko opterećenje.

Sile koje deluju na svaku letelicu u toku leta se mogu svrstati u četiri osnovne grupe:

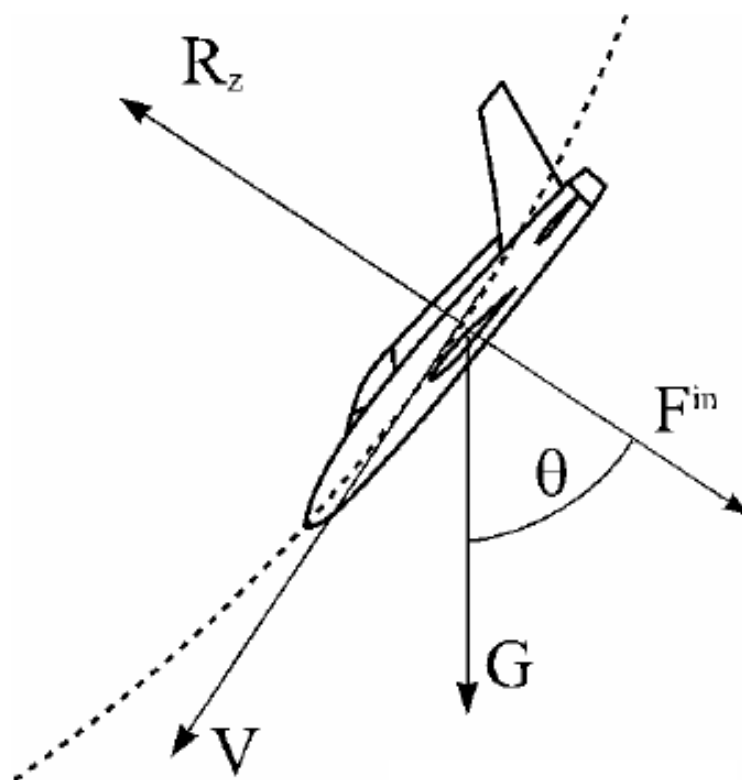
- aerodinamičke sile,
- inercijalne sile,
- udarne sile i
- sile nastale usled rada motora.

O aerodinamičkim silama je bilo reči u prethodnom poglavlju.



Slika 6 - Aerodinamičko opterećenje letelice

Inercijalne sile su sile koje deluju na letelicu u trenutku kada dolazi do promene pravca vektora brzine letelice. Što se tiče udarnih sila, kao što samo ime kaže, nastaju iznenadno i u režimu horizontalnog leta. Sama pojava udarnih sila definiše se kao iznenadno dejstvo udarne sile (sila) u trenucima kada se letelica nalazi u letu u ravnotežnom položaju.



Slika 7 - Inercijalno opterećenje letelice

---

U udarne sile se ubrajaju sile koje se javljaju u trenucima dodirivanja točkova stajnog trapa sa pistom kao i sile koje se javljaju pri komandovanju (iznenadno menjaju ravnotežno kretanje).

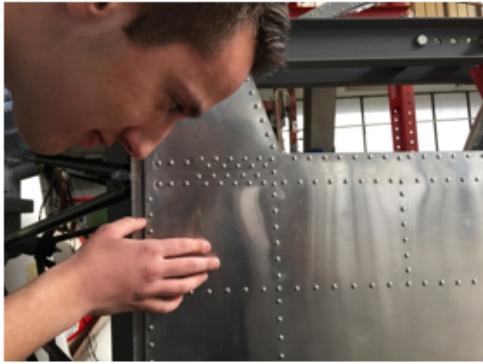
U sile koje nastaju kao posledica rada motora ubrajaju se dve sile i to vučna sila, kod letelica na kojima se koristi elisa, i potisna sila, kod letelica koje koriste mlazne motore. Vučna sila i sila potiska motora se uzimaju u obzir pri proračunu elemenata veze motorskog nosača i trupa za slučaj da je motor vezan za trup letelice.

Pre početka projektovanja letelica potrebno je najpre definisati karakteristike same letelice i propise po kojima će se letelica projektovati. Sami propisi predstavljaju zbir svih zahteva, koji neka letelica mora da ispuni (u zavisnosti od vrste letelice). Sve zemlje, koje imaju vazduhoplovnu industriju imaju svoje ili originalne ili preuzete vazduhoplovne propise po kojima rade. Sami propisi su važni jer definišu tkz. anvelopu leta. Anvelopa leta je skup međusobno spojenih linija koje u takvom obliku predstavljaju obvojnici svih slučajeva leta, tj. svih slučajeva u kojima se letelica može naći u svojoj eksploataciji. Slučajevi leta su faze leta koje su u zavisnosti od tipa vazduhoplova na osnovu propisa dozvoljeni letelici. Sami slučajevi leta predstavljaju sve kvalitete letelice tj. šta sve letelici u toku leta može da se desi. **Koeficijent opterećenja**  $n$  se definiše kao odnos sile uzgon i težine letelice.

Tabela 1 - *Maksimalni koeficijent opterećenja u zavisnosti od tipa letelice*

Tip letelice	Maksimalni koeficijent opterećenja
Poljoprivredni	od 1.5 do 2.5
Putnički	od 2 do 3
Transportni	od 2.5 do 3.5
Turistički	oko 4
Bombarderi	od 4 do 6
Školski	oko 6
Lovci – bombarderi	od 6 do 8
Lovci presretači	od 8 do 10

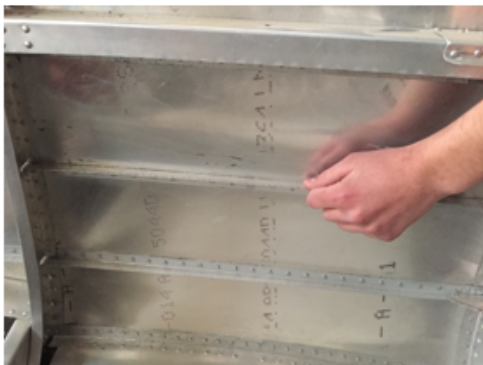
Tokom leta dolazi do savijanja krila na kojima deluje sila uzgona i eventualno do savijanja horizontalnih repnih stabilizatora, na koje deluje takođe sila uzgona, a usled dejstva sile Zemljine teže i inercijalne sile. Međutim, u slučaju prekoračenja dozvoljenih maksimalnih i minimalnih vrednosti koeficijenta opterećenja može doći do loma konstrukcije i samim tim do katastrofe. Upravo iz tih, ali i iz ekonomskih razloga, prilikom projektovanja se u zavisnosti od tipa i namene letelice, definišu maksimalne i minimalne vrednosti koeficijenta opterećenja. Prilikom projektovanja letelice i izbora maksimalne i minimalne dozvoljene vrednosti koeficijenta opterećenja, ograničenja u pogledu koeficijenta opterećenja, tj. maksimalna i minimalna vrednost koeficijenta opterećenja, ne zavise samo od same konstrukcije letelice već se uzima u obzir faktor čoveka, tj. sposobnost pilota i eventualno putnika da izdrže opterećenja u toku pojedinih faza leta.



*Oplata*



*Rebra*



*Uzdužnici*



*Okviri trupa*

*Slika 8 - Primer tankozidnih elemenata strukture*

Za vazduhoplovstvo je zbog potrebe za minimalnom masom karakteristično da se struktura izrađuje od tankozidnih elemenata. Neki tankozidni elementi strukture letelica su:

- **Oplata** - osnovni noseći element krila, ona ujedno formira neophodnu glatku aerodinamičku površinu krila. Oplata je opterećena na istezanje kao membrane, a može biti napregnuta i na savijanje kao ploča.
- **Rebra** - opterećenja nose u svojoj ravni i predaju zidovima ramenjača a deo smičućih opterećenja predaju oplati. Ona obezbeđuju odgovarajući aerodinamički oblik krila.
- **Stringeri** ili **uzdužnici** - mogu se smatrati kontinualnim gredama koje su opterećene poprečnim kontinualnim opterećenjem koje im predaju elementi oplata. Oni svoje opterećenje dalje predaju rebrima.
- **Ramenjače** - predstavljaju gredne nosače koji se sastoje od zidova i pojaseva.

## Propulzori

Propulzori predstavljaju neizostavan deo svakog vazduhoplova. Nastali su kao potreba da se produži vreme trajanja leta tako što bi stvorili silu (pogonska) koja bi održala letelicu u vazduhu, tj. silu koja bi savladala silu otpora. Pošto kretanje pod dejstvom sile znači vršenje rada onda je jasno da je za let neophodna energija.

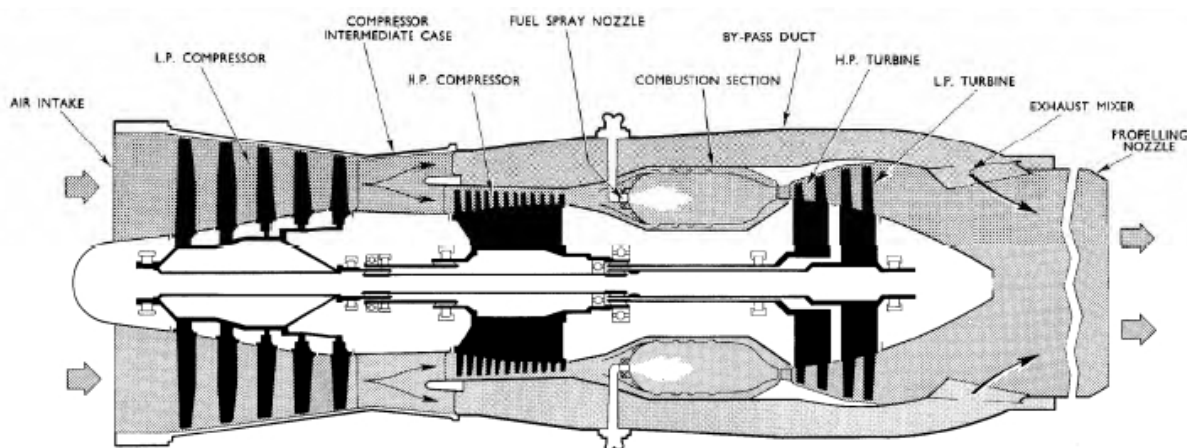
Moraju biti pouzdani (pri čemu imaju 50% udela u ukupnoj pouzdanosti letelice), male mase i malih dimenzija ali i veoma snažni i efikasni, kao i otporni na ekstremne uslove.

Pre svega, treba naglasiti da motor nije isto što i propulzor. Motor je naprava koja najčešće samo prevodi toplotnu ili električnu u mehaničku energiju dok je propulzor pokretač i sastoji se iz motora i pokretačkih elemenata.

Pošto postoje različiti izvori energije samim tim imamo i različite vrste propulzora i motora. Motori se dele na 3 osnovne grupe:

- **Motori SUS** (klipni, vankelov);
- **Reaktivni motori**
  - Mlazni (turboelisni, turbomlazni, dvoprotočni turbomlazni, nabojni, nadzvučni);
  - Motokompresorski
  - Raketni
- **Motori bez sagorevanja** (elektro motor)

Najviše su u upotrebi turbomlazni motori (turbojet). Oni mogu samostalno da rade i pri nultoj brzini leta (za razliku od nabojno-mlaznih i supersoničnih motora kojima je potreban dodatni raketni motor koji služi da dovede motor u radnu oblast).



Slika 9 - Poprečni presek mlaznog propulzora

Svaki turbomlazni motor se sastoji iz:

- Uvodnik – služi da dovede vazduh do kompresora;
- Kompresor – služi da bi se izvršilo sabijanje vazduha;
- Komora sagorevanja – služi da dovodi toplotu radnoj materiji pri čemu se dovođenje toplote vrši sagorevanjem smeše (sabijeni vazduh+kerozin);
- Turbina – služi da oduzme deo energije radne materije, da je pretvori u mehaničku i da njome pogoni kompresor i druge motorske uređaje;
- Mešač – meša „hladan“ vazduh sa vrelin gasom

- 
- Mlaznik – povećava brzinu isticanja radne materije na izlazu iz motora pri čemu se ostvaruje sila potiska.



Slika 10 - *Turbomlazni propulzor*

Raketni motor se sastoji iz komore i mlaznika. Razlikuju se od ostalih motora po tome što nosi pogonsku materiju sa sobom. Njegov rad je potpuno nezavisan te zbog toga može da funkcioniše i van atmosfere.

Elektro motori su predstavljeni kao motori budućnosti vazduhoplovstva. Njihova primena je široka. Mogu se naći na različitim tipovima letelica a najviše su našli primenu kod multikoptera i dronova. Postoje različiti konstruktivni tipovi elektro motora kao što su motori jednosmerne struje sa i bez četkica.

Na sledećoj slici je prikazan multikopter sa četiri električna motora (kvadkopter).



Slika 11 - *Električni multikopter*