

# Utjecaj položaja težišta na performanse zrakoplova Airbus A320

---

Stipaničić, Rok

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:805554>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-02**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -  
Institutional Repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

**Rok Stipaničić**

**UTJECAJ POLOŽAJA TEŽIŠTA NA PERFORMANSE**  
**ZRAKOPLOVA AIRBUS A320**

**ZAVRŠNI RAD**

**Zagreb, 2023.**

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

## **ZAVRŠNI RAD**

### **UTJECAJ POLOŽAJA TEŽIŠTA NA PERFORMANSE ZRAKOPLOVA AIRBUS A320**

### **IMPACT OF CENTER OF GRAVITY POSITION ON PERFORMANCE FOR AIRBUS A320 AIRCRAFT**

Mentor: doc. dr. sc. Karolina Krajček Nikolić

Student: Rok Stipaničić

JMBAG: 0069087004

Zagreb, kolovoz 2023.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**  
ODBOR ZA ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 5. svibnja 2023.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**  
Predmet: **Planiranje letenja i performanse I**

**ZAVRŠNI ZADATAK br. 7227**

Pristupnik: **Rok Stipaničić (0069087004)**  
Studij: **Aeronautika**  
Smjer: **Pilot**  
Usmjerenje: **Civilni pilot**

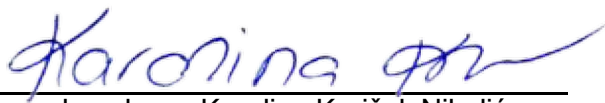
Zadatak: **Utjecaj položaja težišta na performanse zrakoplova Airbus A320**

Opis zadatka:

U radu je potrebno objasniti određivanje težišta te utjecaj različitih položaja na performanse, stabilnost i upravljivost zrakoplova. Na primjeru zrakoplova A320 izračunati utjecaj položaja težišta na performanse u različitim uvjetima i fazama leta. Dobivene rezultate potrebno je komentirati te izvesti zaključke.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



---

doc. dr. sc. Karolina Krajček Nikolić

## SAŽETAK

Položaj težišta zrakoplova Airbus A320 kritičan je faktor za sigurno izvođenje letačkih operacija. Održavanje istog unutar operativnih granica tijekom leta osigurava poželjne karakteristike leta, uravnoteženost te potrebnu upravljivost i stabilnost. Pomicanje težišta previše naprijed ili nazad znatno utječe na performanse zrakoplova, a samim time i na sigurnost putnika u zrakoplovu. Pozicija težišta računa se prije izvršenja samog leta, te pomoću naprednih sustava kontrolira i prilagođava poradi optimizacije performansi. Rad unutar operativnih ograničenja ključan je za sigurno polijetanje, slijetanje te upravljanje zrakoplovom tijekom letačkih operacija.

KLJUČNE RIJEČI: težište, A320, upravljivost, stabilnost, performanse, operativna ograničenja

## SUMMARY

Center of gravity position of the Airbus A320 aircraft is critical factor for safe execution of flight operations. Maintaining the same internal operating framework during flight ensures desirable flight characteristics, balance, and required maneuverability and stability. Moving the center of gravity too far forward or backward significantly affects the performance of the aircraft, and at the same time the safety of the passengers in the aircraft. The position of the center of gravity is calculated before the actual flight, and is controlled and adjusted using advanced systems to optimize performance. Working within operational constraints is key to safe takeoff, landing, and aircraft control during flight operations.

KEYWORDS: center of gravity, A320, maneuverability, stability, performances, operational constraints

## Sadržaj

1	Uvod .....	1
2	Utjecaj težišta i opterećenja na performanse zrakoplova .....	2
2.1	Određivanje pozicije težišta .....	2
2.2	Aerodinamičke sile i momenti koji djeluju na zrakoplov .....	7
2.3	Utjecaj težišta na stabilnost i upravljivost .....	10
3	Tehničko-eksploatacijske karakteristike zrakoplova Airbus A320 .....	14
4	Izračun utjecaja težišta na performanse zrakoplova A320 .....	17
4.1	Indeks mase .....	17
4.2	Operativna ograničenja .....	18
4.3	Izrada liste opterećenja i uravnoteženja .....	20
4.3.1	Izrada liste opterećenja i uravnoteženja unutar operativnih granica .....	21
4.3.2	Izrada liste opterećenja i uravnoteženja izvan operativnih granica .....	27
4.3.3	Ostale metode izrade liste opterećenja i uravnoteženja .....	29
4.4	Promjene u zadnji tren (LMC) .....	31
4.5	Utjecaj težišta na brzinu sloma uzgona .....	32
4.6	Utjecaj težišta na performanse u polijetanju .....	33
4.7	Utjecaj težišta na performanse u letu .....	34
4.8	Utjecaj težišta na performanse u slijetanju .....	35
5	Zaključak .....	37
	Literatura .....	38
	Popis slika .....	40
	Popis tablica .....	41

## 1 Uvod

Airbus A320, jedan od najpopularnijih zrakoplova na svijetu, napravio je revoluciju u zrakoplovnoj industriji svojom vrhunskom tehnologijom i izvanrednim performansama. Zbog navedenog, trenutno spada u najproizvođenije komercijalne zrakoplove i svoje mjesto pronalazi u velikoj većini flota zračnih prijevoznika.

Proračun težišta veže se uz same početke avijacije i čuvenu braću Wright. Kao i kod svakog drugog zrakoplova, položaj težišta igra ključnu ulogu u određivanju njegovih karakteristika leta i ukupnih performansi. Težište se mora nalaziti unutar envelope određene prednjom i zadnjom granicom kako bi let bio sigurno izvediv te kako bi pilot u potpunosti mogao upravljati zrakoplovom u svim fazama leta.

U slučaju Airbusa A320, razumijevanje i optimizacija položaja centra gravitacije također je od najveće važnosti za osiguranje sigurnih i učinkovitih operacija. Ovaj rad ima za cilj istražiti utjecaj položaja težišta na performanse zrakoplova Airbusa A320, ističući njegov utjecaj na različite parametre leta i mjere poduzete za održavanje optimalnog položaja težišta tijekom životnog vijeka zrakoplova. Udubljujući se u ovu temu, možemo dobiti dragocjene uvide u zamršeni odnos između položaja težišta i ukupnih performansi ovog izvanrednog zrakoplova.

Rad je podijeljen u 5 cjelina: uvod, utjecaj težišta i opterećenja na performanse zrakoplova, tehničko-eksploatacijske karakteristike zrakoplova Airbus A320, izračun utjecaja težišta na performanse zrakoplova A320 te zaključak. U drugom poglavlju definirano je težište te aerodinamičke sile i momenti koji djeluju na zrakoplov. Uz navedeno, opisan je postupak određivanja pozicije težišta te faktori koji se trebaju uzeti u obzir kod proračuna istog. Također, opisan je i utjecaj različitih pozicija težišta na performanse zrakoplova, prije svega upravljivost i stabilnost.

U trećem poglavlju opisani su počeci Airbus kompanije te samog A320 zrakoplova, te su navedene glavne tehničko-eksploatacijske karakteristike navedenog zrakoplova.

U četvrtom poglavlju opisan je proces izrade liste opterećenja i uravnoteženja koju je pilot dužan izraditi prije svakog leta na primjeru zrakoplova A320-200. Uz navedeno, za primjer je dana i lista opterećenja i uravnoteženja izvan operativnih granica te potencijalne posljedice koje mogu nastupiti ukoliko dođe do polijetanja u takvom slučaju. Nadalje, navedene su ostale metode izrade liste opterećenja i uravnoteženja te je opisan postupak promjena iste u zadnji tren prije polijetanja. Također je i opisan utjecaj položaja težišta na brzinu sloma uzgona, performanse u polijetanju, krstarenju i slijetanju za različite tipove Airbus zrakoplova.

U petom poglavlju izneseni su zaključci rada te osobni komentar.

## 2 Utjecaj težišta i opterećenja na performanse zrakoplova

Zrakoplovna industrija je čudo modernog inženjerstva i tehnologije, sa zrakoplovima dizajniranim i izgrađenim za rad u širokom rasponu uvjeta. Jedan od ključnih čimbenika koji značajno utječe na performanse i stabilnost zrakoplova je položaj njegova težišta (eng. Center of Gravity – CG).

### 2.1 Određivanje pozicije težišta

Težište zrakoplova odnosi se na točku u kojoj se smatra da je koncentrirana težina zrakoplova i isto igra ključnu ulogu u određivanju ravnoteže, stabilnosti i manevarskih sposobnosti zrakoplova. Teoretski, ukoliko bismo zrakoplov oslonili ili objesili u točki težišta na određeni oslonac na zemlji, zrakoplov bi bio u ravnoteži. Primjer je prikazan na slici 1.



**Slika 1.** Težište zrakoplova  
Izvor [1]

Za razumijevanje određivanja pozicije težišta potrebno je definirati određene mase zrakoplova:

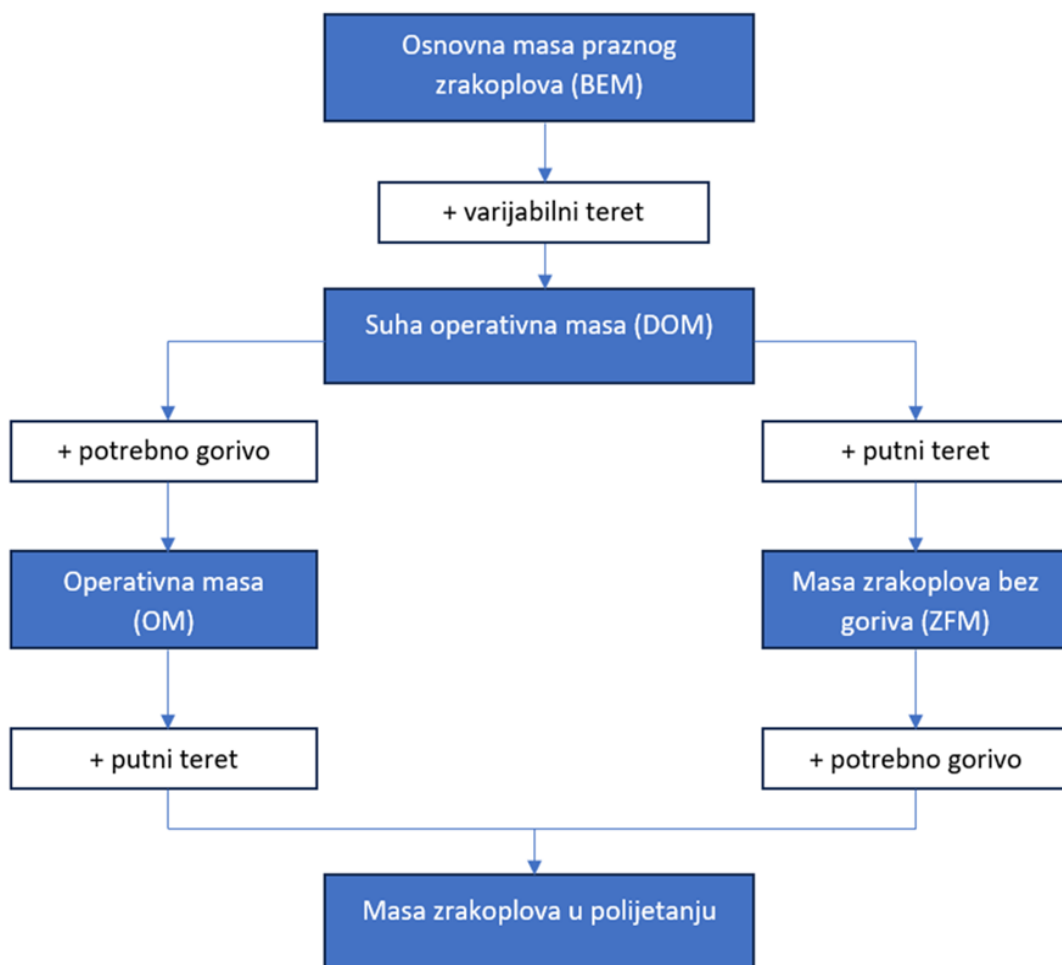
- Osnovna masa praznog zrakoplova (eng. Basic Empty Mass – BEM) je masa praznog zrakoplova izmjerena vaganjem. Ona uključuje i standardne predmete i tekućine koje se nalaze u zrakoplovu kao npr. aparat za gašenje požara, neupotrebljivo gorivo i drugi neupotrebjivi fluidi, ulje za podmazivanje dijelova motora, oprema za opskrbu kisikom u slučaju nužde, itd. Navedeni predmeti moraju biti postavljeni na točno određeno mjesto, fluidi napunjeni do točno određene količine, a zrakoplov mora biti čist.
- Suha operativna masa zrakoplova (eng. Dry Operating Mass – DOM) je masa zrakoplova spremnog za određenu vrstu operacije ne uključujući gorivo i masu putnog tereta. Suhu operativnu masu dobijemo ako na osnovnu masu praznog zrakoplova



nadodamo mase kabinskog osoblja i njihove prtljage, opreme za posluživanje putnika, hrane i pića te mase pitke vode i kemikalija koje se nalaze u toaletima.

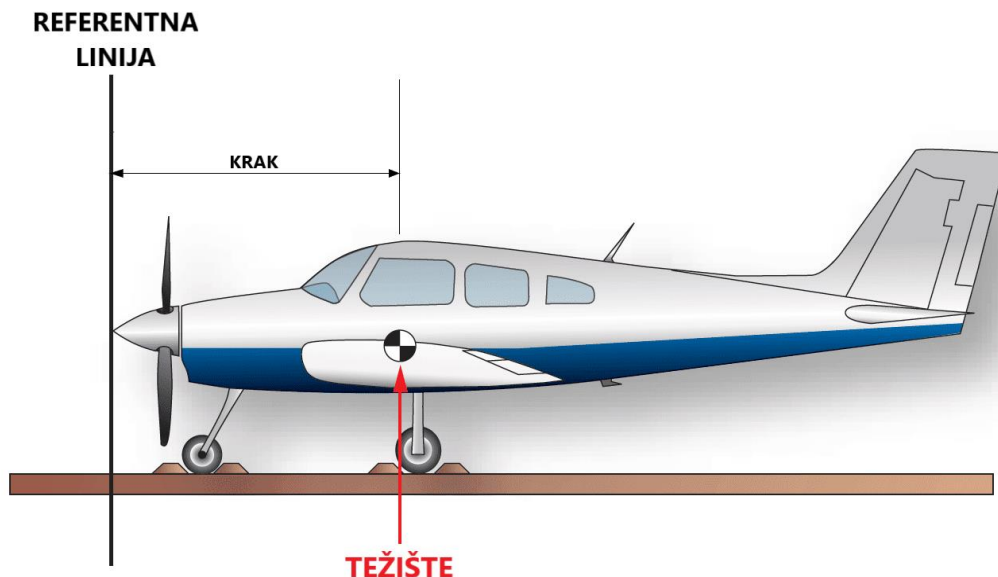
- Operativna masa (eng. Operating Mass – OM) je zbroj suhe operativne mase i potrebnog goriva za let. Ona isključuje masu putnog tereta.
- Masa zrakoplova bez goriva (eng. Zero Fuel Mass – ZFM) je zbroj suhe operativne mase i mase plaćenog tereta (eng. payload). Ona isključuje potrebno gorivo za let [2].

Navedene mase prikazane su na slici 2. Sve mase moraju se nalaziti unutar određenih propisanih ograničenja. Maksimalne dopuštene mase ograničene su dvama faktorima: nosivošću zrakoplovne konstrukcije i performansama zrakoplova. U prvom slučaju, kod prekoračenja maksimalne mase, može doći do strukturalnog oštećenja zrakoplova npr. puknuća krila, dok u potonjem dolazi do degradacije performansi što može dovesti do npr. sloma uzgona.



**Slika 2.** Mase zrakoplova  
Izvor autorovo djelo

Osnovnu masu praznog zrakoplova proizvođač određuje vaganjem. Težište se određuje u odnosu na referentnu liniju (eng. datum), zamišljenu vertikalnu ravninu, koju također određuje proizvođač zrakoplova. Pozicija težišta se definira kao horizontalna udaljenost od referentne linije (krak), dok je pozicija težišta u vertikalnoj ravnini zanemariva. Isto je prikazano na slici 3. Jedinica u kojoj se određuje krak najčešće su inči. Primjer 1. prikazuje određivanje pozicije težišta ukoliko je poznata masa zrakoplova dobivena vaganjem [4].



**Slika 3.** Određivanje pozicije težišta  
Izvor [3]

**Primjer 1.** Referentna linija nalazi se na vrhu propelera jednomotornog lakog zrakoplova. Nosni kotač nalazi se 10 inča iza referentne linije, a glavni kotači nalaze se 120 inča iza referentne linije. Izmjerene mase na svakom kotaču su:

- Lijevi glavni kotač 810 lb,
- Desni glavni kotač 815 lb,
- Nosni kotač 320 lb.

Odredi masu zrakoplova i poziciju težišta u odnosu na referentnu liniju.

Da bismo odredili poziciju težišta ovog zrakoplova moramo izračunati moment kojim svaki kotač djeluje na referentnu liniju. Moment se definira kao umnožak sile i kraka. Udaljenosti lijevo od referentne linije uzimaju se sa negativnim predznakom, tako da će one stvarati negativan moment. U slučaju ovog zadatka, sve sile djeluju desno od referentne linije

tako da će one tvoriti pozitivan moment. Moment nosnog kotača računa se kao umnožak njegove težine i kraka:

$$320 \text{ lb} \times 10 \text{ in} = + 3200 \text{ in lb.}$$

Istom logikom računa se i moment desnog glavnog kotača:

$$815 \text{ lb} \times 120 \text{ in} = + 97\,800 \text{ in lb,}$$

i lijevog glavnog kotača:

$$810 \text{ lb} \times 120 \text{ in} = + 97\,200 \text{ in lb.}$$

Zbrajanjem izmjerenih masa na svim kotačima dobiva se ukupna težina zrakoplova:

$$320 + 815 + 820 = 1945 \text{ lb,}$$

dok se zbrajanjem pojedinih momenata dobiva ukupni:

$$3200 + 97\,800 + 97\,200 = 198\,200 \text{ in lb.}$$

Poziciju težišta možemo dobiti iz omjera ukupnog momenta i težine zrakoplova:

$$198\,200 \text{ in lb} / 1945 \text{ lb} = 101,9 \text{ in.}$$

Dakle ukupna težina zrakoplova je 1945 lb, a težište se nalazi 101,9 inča iza referentne linije.

Inicijalno određivanje osnovne mase praznog zrakoplova proizvođač obavlja na navedeni način. Nadalje, operater zrakoplova dužan je, prema uredbi EASA-e (European Aviation Safety Agency) EU No 965/2012 Subpart C [5] obavljati vaganje zrakoplova svake 4 godine. Iznimno, ukoliko operater posjeduje više od 4 zrakoplova istog modela u svojoj floti, nije dužan vagati svaki zrakoplov u floti već vaganje može izvršavati prema Tablici 1. Dakle, najduži interval između dva vaganja jest 4 godine, a uvijek se važu oni avioni koji najduže nisu vagani.

**Tablica 1.** Broj aviona koje je operater dužan vagati svake 4 godine

Broj aviona u floti (n)	Broj aviona koji se moraju vagati
2-3	n
4-9	$(n+3) / 2$
10 ili više	$(n + 51) / 10$

Izvor [6]

Također, prema EU No 965/2012 uredbi operater je dužan odrediti masu putnog tereta, uključujući i balaste. U putni teret spadaju putnici, njihova prtljaga, te eventualno dodatni teret ukoliko se prevozi. Mora se odrediti utjecaj njihove mase i njihovog smještaja u zrakoplovu na položaj težišta. S obzirom da ne bi bili praktično vagati zrakoplov prije svakog

leta, za isto se koriste standardne mase putnika i prtljage, kao i standardne mase same posade. Navedene mase se mogu upotrebljavati i za druge elemente tereta, ukoliko je operater u mogućnosti dokazati nadležnom tijelu (u Hrvatskoj CCAA – Croatian Civil Aviation Agency) da se njihove mase nalaze unutar dopuštenih ograničenja i odstupanja. Također, operater je dužan odrediti masu goriva na temelju njegove stvarne gustoće, ili ukoliko ona nije poznata, gustoće izračunate metodom propisanom u operativnom priručniku operatora zrakoplova [5]. Tipične vrijednosti gustoće goriva prema [6] su :

- benzin (gorivo za klipne motore) - 0.71,
- JET A1 (Jet fuel JP 1) - 0.79,
- JET B (Jet fuel JP 4)- 0.76,
- ulje - 0.88.

S obzirom da se gorivo troši tijekom leta, masa zrakoplova se smanjuje što također utječe na promjenu položaja težišta.

Masa posade mora biti uračunata u suhu operativnu masu (DOM). Za navedeno prema [5] operater može koristiti:

- stvarnu masu posade,
- standardnu masu od 85 kg za pilote i 75 kg za kabinsko osoblje (bez obzira na spol i građu),
- bilo koju drugu masu odobrenu od zrakoplovnih vlasti.

Za putnike se također mogu koristiti stvarne mase, no s obzirom da je za velike zrakoplove s puno putnika nepraktično vagati svakog pojedinca prije samog leta, koriste se standardne mase prikazane na Tablici 2. i Tablici 3.

**Tablica 2.** Mase putnika za zrakoplove s 20 ili više putničkih sjedala

Putnička sjedala	20 i više		30 i više
	Muškarci	Žene	Svi odrasli
Odrasli	88 kg	70 kg	84 kg
Djeca	35 kg	35 kg	35 kg

Izvor [6]

**Tablica 3.** Mase putnika za zrakoplove s 19 ili manje putničkih sjedala

Putnička sjedala	1-5	6-9	10-19
Muškarci	104 kg	96 kg	92 kg
Žene	86 kg	78 kg	74 kg
Djeca	35 kg	35 kg	35 kg

Izvor [6]

Tablica 4. prikazuje mase standardnih prtljaga za zrakoplove s 20 ili više putničkih sjedala. Za zrakoplove sa 19 ili manje putničkih sjedala stvarna masa prijavljene prtljage se određuje vaganjem ili izračunom na temelju izjave svakog putnika. Ukoliko navedeno nije izvedivo, koristi se minimalna standardna masa koja iznosi 13 kg [6].

**Tablica 4.** Mase prtljaga za zrakoplove s 20 ili više putničkih sjedala

Vrsta leta	Standardna masa prtljage
Domaći	11 kg
Unutar europske regije	13 kg
Međukontinentalni	15 kg
Svi ostali	13 kg

Izvor [6]

## 2.2 Aerodinamičke sile i momenti koji djeluju na zrakoplov

Na zrakoplov u letu djeluju četiri osnovne aerodinamičke sile: uzgon, težina, potisak i otpor. Iste su prikazane na slici 4. Navedene sile igraju ključnu ulogu i sastavni su dio razumijevanja načina na koji zrakoplovi postižu i održavaju kontrolirani i ravnotežni let. U ravnotežnom letu, navedene sile se međusobno poništavaju te je njihov zbroj jednak nuli. Pod istim se smatra da se zrakoplov kreće konstantnom brzinom te da održava i ne mijenja visinu.



**Slika 4.** Četiri osnovne aerodinamičke sile koje djeluju na zrakoplov u letu

Izvor [16]

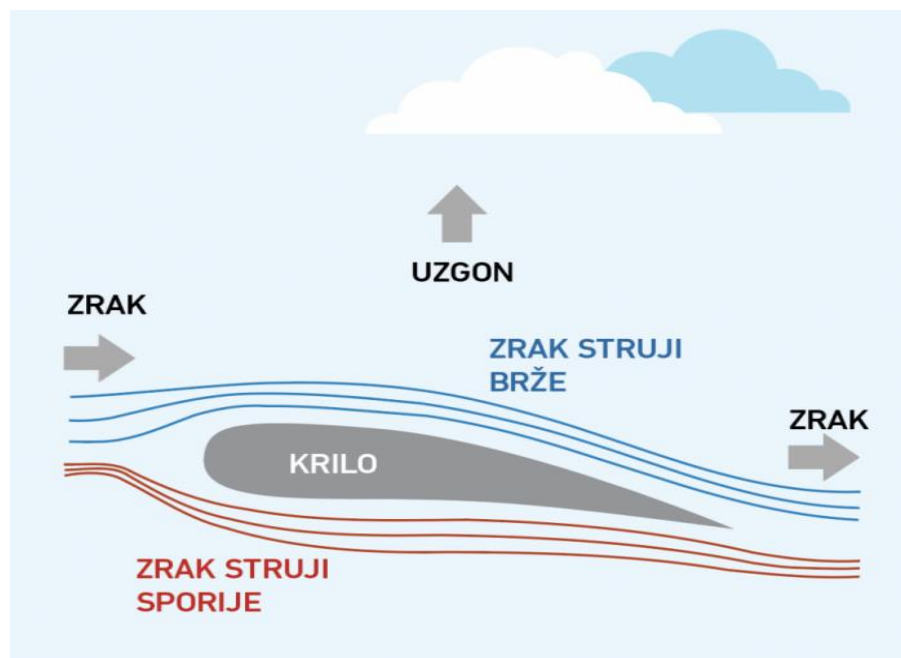
Uzgon je sila koja omogućuje zrakoplovu da svlada gravitaciju i poleti u zrak. Stvaraju ga krila dok zrak struji iznad i ispod njih. Osnovni princip stvaranja uzgona temelji se na pokusima Daniela Bernoullija te njegova jednačbe kojom se opisuje gibanje fluida. Jednostavnim riječima, on je dokazao da fluid koji se kreće manjom brzinom stvara veći tlak, dok onaj koji se kreće većom brzinom stvara manji tlak. Zbog navedenog, krila su dizajnirana u obliku aeroprofila, koji na temelju različite zakrivljenosti gornje i donje površine stvara razliku tlakova. Ova razlika tlakova stvara uzgon, učinkovito podižući zrakoplov u zrak. Princip stvaranja uzgona prikazan je na slici 5. Formula za uzgon jednaka je:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c_L \cdot A$$

gdje je:

- $\rho$  gustoća fluida,
- $v$  brzina nadolazeće struje zraka,
- $c_L$  koeficijent uzgona i
- $A$  površina krila.

Dakle, količina proizvedenog uzgona ovisi o napadnom kutu krila (kut između linije tetive krila i nadolazeće struje zraka), obliku aeroprofila, brzini zrakoplova, njegovoj veličini, te o gustoći okolnog zraka.



**Slika 5.** Princip stvaranja uzgona

Izvor [17]

Težina je sila kojom gravitacija djeluje na zrakoplov. Djeluje okomito prema površini Zemlje kroz težište zrakoplova. Kako bi zrakoplov ostao u zraku mora generirati dovoljno uzgona da nadvlada težinu. U ravnotežnom letu, sila uzgona i težina su jednake, u penjanju je uzgon veći od težine, a u snižavanju obrnuto. Težina je stalna sila, a konstrukcija i mogućnosti performansi zrakoplova moraju biti uravnoteženi kako bi se osigurali uvjeti za siguran let.

Potisak je sila koju stvara pogonski sustav zrakoplova odnosno motori. Ona omogućuje kretanje naprijed kroz zrak. Potrebno je savladati otpor i postići potrebnu brzinu za polijetanje, penjanje, krstarenje i druge faze leta. Motori daju potreban potisak izbacivanjem struje plinova velikom brzinom u suprotnom smjeru od kretanja, prema trećem Newtonovom zakonu gibanja (akcija i reakcija). Količina potrebnog potiska ovisi o težini zrakoplova, brzini i fazi leta te je isti neophodan za održavanje zrakoplova u letu.

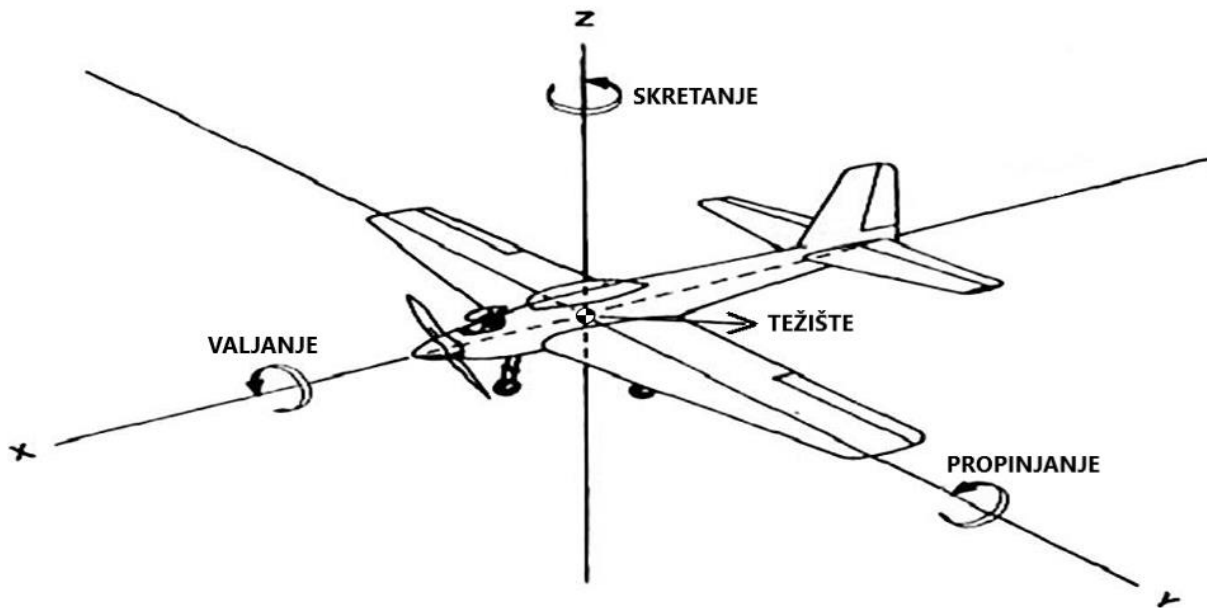
Aerodinamički otpor je sila koja se suprotstavlja kretanju zrakoplova naprijed kroz zrak. Uzrokuje ga trenje zraka i razlika tlakova između površina zrakoplova i okolnog zraka. Otpor utječe na brzinu i učinkovitost zrakoplova. Isti se mora nadvladati dovoljnim potiskom kako bi se održala stalna brzina ili kako bi zrakoplov ubrzao. U ravnotežnom letu, sila potiska i sila otpora jednake su i međusobno se poništavaju. Otpor se u svim fazama leta nastoji svesti na najmanju moguću razinu kroz aerodinamički dizajn, obradu površina i ostale konstrukcijske mjere. Otpor je jedino povoljan u fazi slijetanja, kada zrakoplov već dotakne uzletno sletnu stazu kako bi se što prije zaustavio, s toga se u toj fazi isti povećava uređajima poput zračnih kočnica (eng. spoilers).

Moment je umnožak sile i kraka na kojem ta sila djeluje od neke točke. Kod zrakoplova, razlikujemo momente oko  $x$ ,  $y$  i  $z$  osi.

$X$  os je zamišljena crta koja prolazi uzdužno kroz rep i nos zrakoplova. Zakretanje oko  $x$  osi naziva se valjanje (eng. roll), a navedeno pilot kontrolira krilcima koja se nalaze na zadnjem bridu pri vrhu krila. Za ravnotežni let, teret mora biti raspoređen jednako na lijevoj i desnoj strani zrakoplova kako isti ne bi razvijao moment valjanja.

$Y$  os prolazi poprečno kroz zrakoplov, te izlazi na vrhovima krila. Moment oko navedene osi naziva se propinjanje (eng. pitch), a isto pilot kontrolira kormilom dubine (elevatorom). Određeno je da moment poniranja negativnog predznaka, a moment penjanja pozitivnog. Po uzdužnoj osi na zrakoplov također djeluje raspored tereta, te sukladno tome pomiče težište naprijed ili nazad.

Treća os okomito prolazi kroz težište zrakoplova. Moment oko iste naziva se skretanje (eng. yaw), a navedeno pilot kontrolira kormilom smjera. Raspored tereta ne utječe na potonji moment [18].



**Slika 6.** Osi zrakoplova i momenti oko njih  
Izvor [18]

Međudjelovanje između navedenih sila i momenata ključno je za siguran i učinkovit let. U različitim fazama leta, kao što su polijetanje, penjanje, krstarenje, spuštanje i slijetanje, pilot mora vješto upravljati navedenim pomoću upravljačkih površina (krilca i kormila smjera i dubine) i potiskom motora. Principi aerodinamike i četiri navedene sile čine temelj zrakoplovstva i integrirani su u dizajn i operacije zrakoplova.

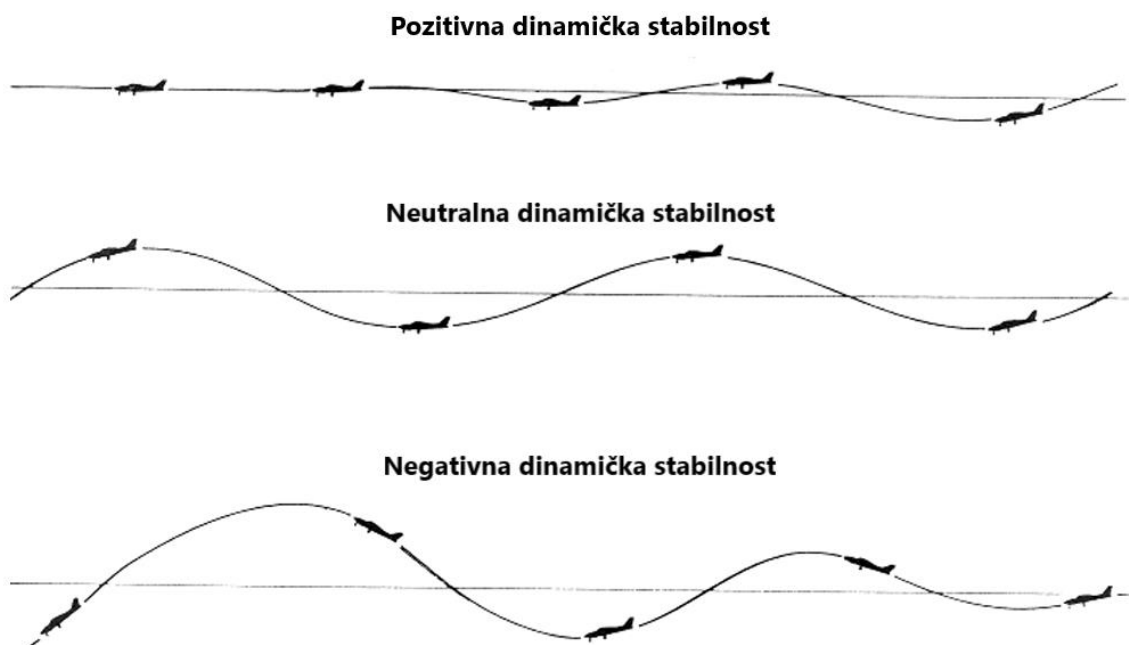
### 2.3 Utjecaj težišta na stabilnost i upravljivost

Položaj težišta zrakoplova kritičan je čimbenik koji značajno utječe na stabilnost zrakoplova, ali i ostale karakteristike leta, te samim time igra ključnu ulogu u osiguravanju sigurnih i učinkovitih letačkih operacija. Inherentna stabilnost zrakoplova uvelike ovisi o pažljivom pozicioniranju njegovog težišta unutar određenog raspona, koji se utvrđuje tijekom faza projektiranja i testiranja.

Ako se položaj težišta nalazi unutar propisanih granica, zrakoplov pokazuje poželjne karakteristike leta. U isto spadaju upravljivost i stabilnost zrakoplova. Pod upravljivošću se misli na sposobnost zrakoplova da brzo i efikasno promijeni svoj položaj uslijed komande pilota, dok se pod stabilnošću misli na sposobnost zrakoplova da se vrati u prvobitni položaj nakon neke vanjske smetnje (npr. turbulencija ili zapuh vjetra). Zrakoplov je u ravnoteži ukoliko je suma svih sila i momenata koji na njega djeluju jednaka nuli.



Razlikujemo dvije vrste stabilnosti: statičku i dinamičku, dok uslijed reakcije na vanjsku smetnju razlikujemo pozitivnu, neutralnu i negativnu stabilnost. Dinamička stabilnost povezana je sa vremenskim odzivom zrakoplova. Pozitivna dinamička stabilnost poželjna je karakteristika zrakoplova. Nakon vanjske smetnje zrakoplov ima tendenciju vraćanja u stanje ravnoteže, smanjujući amplitudu pomaka sve dok ona ne bude jednaka nuli. Kod neutralne dinamičke stabilnosti, zrakoplov nakon vanjske smetnje nema tendenciju vraćanja u stanje ravnoteže niti tendenciju nastavka pomaka u smjeru smetnje te amplituda pomaka ostaje nepromijenjena. Posljednja vrsta je negativna dinamička stabilnost. Ona postoji ukoliko zrakoplov, uslijed vanjske smetnje, ima tendenciju pomaka u smjeru iste smetnje, povećavajući amplitude pomaka sve dok one ne postanu kobne. Sve tri vrste stabilnosti prikazane su na slici 4 [7].



**Slika 7.** Pozitivna, neutralna i negativna dinamička stabilnost  
Izvor [8]

Za razumijevanje stabilnosti potrebno je definirati i sljedeća dva pojma: neutralnu točku i statičku marginu. Ukoliko težište zrakoplova postavimo u neutralnu točku, isti će imati neutralnu stabilnost. Postavimo li težište iza neutralne točke zrakoplov će imati negativnu stabilnost, dok će težište ispred neutralne točke tvoriti pozitivnu stabilnost. S obzirom da je pozitivna stabilnost poželjna, težište se mora nalaziti ispred neutralne točke. Udaljenost između težišta i neutralne točke direktna je mjera stabilnosti i ona se naziva statička margina. Što je ista veća, stabilnost će biti veća [7].

Upravlјivost i stabilnost zrakoplova kontradiktorni su zahtjevi. Što je zrakoplov više upravljiv, biti će manje stabilan, dok će manje upravljiv zrakoplov imati veću stabilnost. Primjer

tomu je razlika vojnih borbenih zrakoplova i putničkih zrakoplova. Borbeni zrakoplovi zahtijevaju iznimnu upravljivost i brze promjene položaja. Iz toga razloga imati će manju stabilnost, a uslijed vanjskih smetnji zrakoplov će se teško vratiti u prvobitan položaj. S druge strane, veliki putnički zrakoplovi zahtijevaju veliku stabilnost. Zato će isti uslijed vanjskih smetnji u određenom periodu relativno lako vratiti prvobitan položaj, dok će zbog manje upravljivost i inercije promjene položaja trajati znatno duže no kod borbenih zrakoplova.

Pozicija težišta ograničena je prednjom i zadnjom granicom. Prednja granica određena je djelotvornošću horizontalnog stabilizatora i elevatora. Ukoliko bi se težište nalazilo na prednjoj granici, zrakoplov bi imao maksimalnu stabilnost. No, navedeni položaj sa sobom nosi više mana, nego prednosti. Zbog velike stabilnosti, zrakoplov bi bio teško upravljiv. Uz to, pri polijetanju, zbog teškog nosa aviona potreban je veći otklon elevatora, što zahtijeva veću udaljenost potrebnu za zatrčavanje i uzlijetanje. Nakon uzlijetanja, zbog navedenog bi zrakoplov također ostvarivao slabiji gradijent penjanja. Nadalje, potrebna je veća sila prema dolje na elevatoru (eng. downforce) što stvara veći inducirani otpor što za posljedicu ima veću potrošnju goriva, manji dolet i istrajnost. Također, u navedenom položaju veće su brzina sloma uzgona i brzina prilaza [9].



**Slika 8.** Težište pomaknuto prema prednjoj granici  
Izvor [9]

S druge strane, pozicija težišta pomaknuta više prema zadnjoj granici sa sobom nosi više prednosti. Kako su upravljivost i stabilnost kontradiktorni zahtjevi, navedeni položaj omogućuje manju stabilnost, no nešto veću upravljivost. U polijetanju, nos zrakoplova je lakši, što za rezultat ima manju udaljenost potrebnu za polijetanje, te nakon polijetanja ostvarivanje boljih performansi. No, zbog lakšeg nosa, postoji opasnost da zrakoplov prerano odlijepi od piste. Da bi zrakoplov bio u ravnoteži, potrebna je manja sila horizontalnog stabilizatora prema dolje, što za posljedicu ima manji inducirani otpor, manju potrošnju goriva, veći dolet i veću istrajnost. Uz navedeno, brzina sloma uzgona je manja, no ukoliko dođe do njega, zrakoplov je teže dovesti natrag u stabilan položaj [9].



**Slika 9.** Težište pomaknuto prema zadnjoj granici  
Izvor [9]

Položaj težišta kontinuirano se prati i prilagođava tijekom leta kako bi se uzele u obzir promjene u potrošnji goriva, raspodjeli tereta te eventualno utjecaj vanjskih uvjeta atmosfere. Osim navedenog, na pomak pozicije težišta utječe i izvlačenje/uvlačenje zakrilaca i izvlačenje/uvlačenje podvozja. Letačka posada pažljivo izračunava ove varijable kako bi održala siguran i uravnotežen zrakoplov u svim fazama leta. Razumijevanje i upravljanje utjecajem položaja centra gravitacije od temeljne je važnosti za pilote i dizajnere zrakoplova kako bi osigurali ukupnu sigurnost i stabilnost zrakoplova tijekom njegovog operativnog vijeka.

### 3 Tehničko-eksploatacijske karakteristike zrakoplova Airbus A320

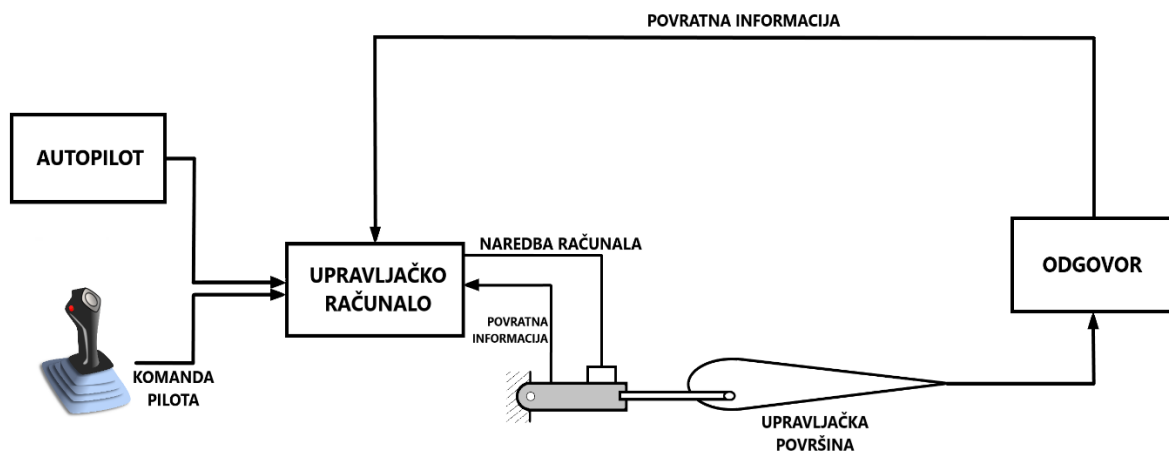
Kompanija Airbus osnovana je 1970. kako bi popunila tadašnju tržišnu nišu za mlaznim zrakoplovima kratkog i srednjeg doleta. Sjedišta se nalaze u Francuskom Toulouseu i Njemačkom Hamburgu, dok im se tvornice uz navedeno nalaze i u Španjolskoj, Velikoj Britaniji i Kini. Trenutno zapošljava više od 50 000 ljudi, a uz zrakoplovnu proizvode i svemirsku opremu. Uz Američku kompaniju Boeing, lideri su u proizvodnji komercijalnih putničkih zrakoplova s kojom konstantno dominiraju tržištem u broju narudžbi, proizvoda te ukupnih prihoda [10].

Airbus A320 pripada porodici zrakoplova A320 koja se sastoji od tipova zrakoplova: A318, A319, A320 i A321 od kojih svi imaju gotovo identične tehnološke karakteristike, dok se razlikuju tek po konfiguraciji sjedala i dimenzijama. Na osnovu navedenog operateri navedenih tipova zrakoplova ostvaruju znatne uštede u vidu održavanja, dostupnosti dijelova, ali i školovanja letačkog i kabinskog osoblja pa ne čudi da su zrakoplovi porodice A320 često zastupljeni u floti zrakoplovnih kompanija. Airbus A320 sa proizvodnjom je počeo 1984. godine, a iste godine već su zaprimili 96 narudžba za A320 od Francuske kompanije Air France. Prvi let odvio se 17. veljače 1987. godine. Za Airbus, navedeni zrakoplov predstavlja najveći uspjeh u povijesti kompanije, sa ukupno preko 10 000 narudžbi ovog tipa zrakoplova u svim varijantama [11].



**Slika 10.** Zrakoplov Airbus A320-214 zrakoplovne kompanije Croatia Airlines  
Izvor [12]

Airbus A320 također je predstavio revolucionarnu inovaciju u zrakoplovstvu sa svojim sustavom Fly by wire (FBW). Fly by wire je napredni kontrolni sustav koji zamjenjuje tradicionalne mehaničke veze elektroničkim impulsima za upravljanje kontrolnih površina zrakoplova. Pilotovo pomicanje upravljačkih komandi u kokpitu sustav FBW pretvara u elektroničke impulse koji se prenose do upravljačkog računala koje određuje i daje komandu određenoj upravljačkoj površini. Ovaj sustav znatno poboljšava preciznost leta, stabilnost i učinkovitost istodobno smanjujući radno opterećenje pilota. Korištenjem tehnologije Fly by wire, A320 postiže nekoliko značajnih prednosti. Sustav osigurava glatku reakciju kontrolnih površina, smanjujući nagle manevre te istodobno povećavajući udobnost putnika. Također onemogućuje izlazak iz sigurnosne envelope leta, sprječavajući zrakoplov da uđe u opasne i neželjene položaje. Uz to, nudi funkciju automatskog trimanja zrakoplova, što smanjuje potrebu za stalnim ručnim podešavanjem [13].



**Slika 11.** Shema sustava Fly by wire  
Izvor [14]

Airbus A320 je uskotrupni, dvomotorni zrakoplov srednjeg doleta. Niskokrilac je, sa sweepback oblikom krila pod kutom od 25 stupnjeva. Pokreću ga dva CFM International CFM56-5s ili IAE V2500s motora koja razvijaju potisak od 110.3 kN. Tablice 5 i 6 prikazuju ostale tehničke i letne karakteristike A320 [15].

**Tablica 5.** Tehničke karakteristike zrakoplova A320

<b>Dužina (m)</b>	<b>37.6</b>
<b>Visina (m)</b>	<b>11.8</b>
<b>Raspon krila (m)</b>	<b>34.1</b>
<b>Površina krila (m<sup>2</sup>)</b>	<b>122.4</b>
<b>Kapacitet putnika</b>	<b>150-180</b>
<b>Širina trupa (m)</b>	<b>3.95</b>
<b>Masa praznog zrakoplova (kg)</b>	<b>37 230</b>
<b>Maksimalna masa pri polijetanju (kg)</b>	<b>77 000</b>
<b>Maksimalna masa pri slijetanju (kg)</b>	<b>64 500</b>
<b>Kapacitet spremnika za gorivo (l)</b>	<b>27 200</b>
<b>Maksimalni korisni teret (kg)</b>	<b>16 600</b>

Izvor [15]

**Tablica 6.** Letne karakteristike zrakoplova A320

<b>Brzina krstarenja (km/h)</b>	<b>840</b>
<b>Maksimalna brzina (km/h)</b>	<b>890</b>
<b>Maksimalna operativna visina (m)</b>	<b>11 900</b>
<b>Dolet uz maksimalni korisni teret (km)</b>	<b>6 100</b>
<b>Potrebna duljina USS pri polijetanju (m)</b>	<b>2 090</b>
<b>Potrebna duljina USS pri slijetanju (m)</b>	<b>1 530</b>
<b>Pogon</b>	<b>2 x CFM56</b>
<b>Snaga motora (kN)</b>	<b>110. 3 svaki</b>

Izvor [15]

## 4 Izračun utjecaja težišta na performanse zrakoplova A320

Airbus A320, jedan od najpopularnijih i najuspješnijih zrakoplova na svijetu, poznat je po svojoj pouzdanosti, učinkovitosti i svestranosti. Razumijevanje utjecaja položaja težišta na njegovu izvedbu od iznimne je važnosti za pilote, dizajnere zrakoplova i profesionalce u zrakoplovstvu. U ovom poglavlju bit će objašnjen izračun položaja težišta te njegovi učinci na performanse Airbusa A320.

### 4.1 Indeks mase

Indeks mase uveden je kao bezdimenzionalni broj kako bi se smanjile brojke kojima korisnik manipulira. S obzirom da bi bilo nepraktično računati s brojevima koji imaju desetke, čak i stotine decimalnih mjesta, isti je uveden te predstavlja težinu i mjesto utovara svakog predmeta. Indeks mase određenog tereta računa se prema formuli:

$$I_{tereta} = \frac{M_{tereta}}{C} + K = \frac{W \cdot (H - krak_{tereta} - H')}{C} + K$$

gdje je:

- $M_{tereta}$  moment kojim određeni teret djeluje na težište
- $C$  konstanta koja omogućuje lakše operativne brojke (jedinica je kg.m ili lb.in)
- $K$  konstanta koja je određena kako finalna vrijednost indeksa za masu zrakoplova bez goriva i masu zrakoplova u polijetanju nikad ne bi bila negativna

Iz formule je vidljivo kako se za računanje indeksa koriste dvije konstante. One ovise o tipu zrakoplova i politici zračnog prijevoznika. Vrijednosti konstanti za različite Airbus zrakoplove dane su u tablici 7.

**Tablica 7.** Vrijednosti konstanti za različite Airbus tipove zrakoplova

		A300-600 / A310	A318	A319 / A320 / A321	A330 / A340	A340-500 / A340-600
<b>C</b>	(kg.m)	100	500	1 000	2 500	5 000
	(lb.in)	100 000	40 000	100 000	200 000	500 000
<b>K</b>		40	50	50	100	100

Izvor [22]

Osim navedene za izračun se može koristiti i formula:

$$I_{tereta} = W \cdot (\%MAC_{tereta} - 25) \cdot C' + K$$

gdje  $\%MAC_{tereta}$  označuje poziciju na kojoj se teret nalazi u obliku postotka srednje aerodinamičke tetive.

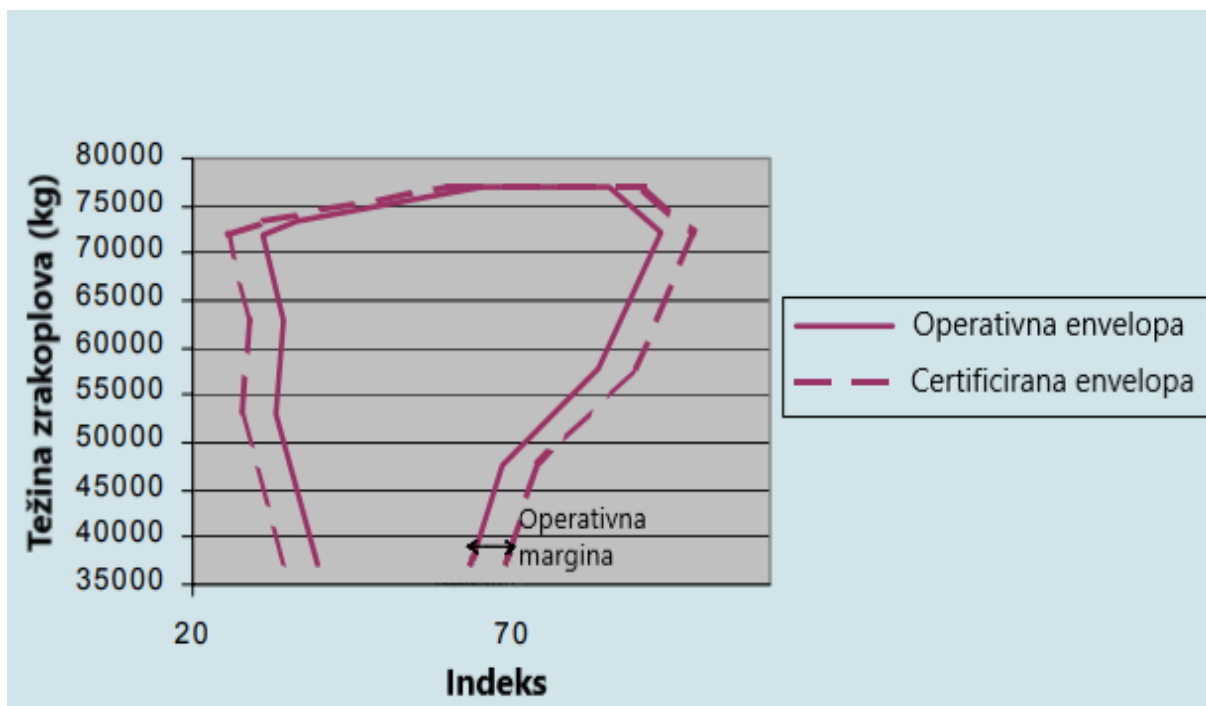
Indekse mase potrebno je izračunati za svaki pojedini teret koji se ukrcava na zrakoplov. U isto spadaju putnici, prtljaga, teret, te gorivo na zrakoplovu. Također, indeks se mora izračunati i za dodatne članove posade, pojedinačne predmete i balaste. Indeks mase za zrakoplov bez goriva dobije se tako da se na isti dodaju indeksi za putnike na zrakoplovu i ukrcani teret, dok se indeks zrakoplova u polijetanju dobije tako da se uz navedeno doda i indeks za gorivo. Tada je moguće odrediti moment određene mase koji odgovara dobivenom indeksu i naknadno odgovarajuću poziciju težišta [22].

## 4.2 Operativna ograničenja

Prije leta pozicija težišta mora se mora nalaziti unutar tri određene envelope: za zrakoplov bez goriva, zrakoplov u polijetanju te zrakoplov u slijetanju. S obzirom da se težište zrakoplova u letu pomiče zbog izvlačenja/uvlačenja zakrilaca, uvlačenja/izvlačenja podvozja, potrošnje goriva, pomicanja fluida u zrakoplovu te pomicanja samog kabinskog osoblja, potrebno je odrediti operativne margine unutar kojih se sa sigurnošću može reći da se težište nalazi, a koje su nešto strože od certificiranih ograničenja danih od samog proizvođača. Operativne margine, prikazane na slici 12, su suma maksimalne netočnosti određivanja pozicije težišta te maksimalnih pomaka pozicije težišta uslijed već navedenih razloga.

Cilj jest odrediti utjecaj koji će svaki nedostatak preciznosti ili svaki pomak težišta zrakoplova imati na finalnu poziciju težišta. Taj utjecaj se može klasificirati kao razlika između stvarnog momenta koji zrakoplov razvija i pretpostavljenog (izračunatog) momenta. Na taj način se sa sigurnošću može reći da pozicija težišta neće izaći iz operativne envelope [22].





Slika 12. Operativna ograničenja pozicije težišta

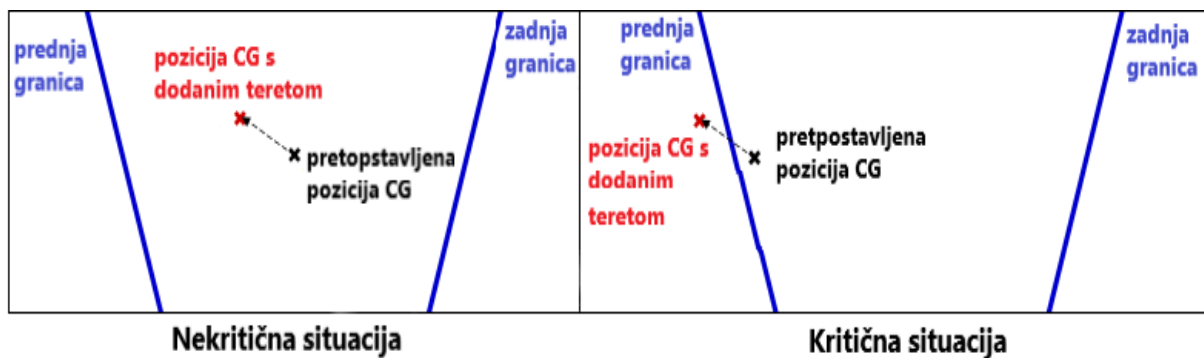
Izvor [22]

Tereti utovareni iza pretpostavljene pozicije težišta pomiču isto prema iza stvarajući pozitivan moment (slika 13), dok tereti utovareni ispred pozicije težišta stvaraju negativan moment i pomiču težište naprijed (slika 14). Bitno je da nakon utovarenog/istovarenog tereta težište ne prijeđe maksimalnu dozvoljenu prednju ili zadnju granicu. Slika 13 i slika 14 prikazuju nekritične i kritične situacije nakon utovarenog tereta iza ili ispred pretpostavljene pozicije težišta [22].



Slika 13. Nova pozicija težišta uslijed pozitivnog momenta

Izvor [22]



**Slika 14.** Nova pozicija težišta uslijed negativnog momenta

Izvor [22]

### 4.3 Izrada liste opterećenja i uravnoteženja

U ovom poglavlju bit će objašnjen primjer grafičkog ispunjavanja liste opterećenja i uravnoteženja (eng. load & trim sheet). Slika 12. prikazuje praznu listu opterećenja i uravnoteženja za zrakoplov A320-200 turske zrakoplovne kompanije Freebird Airlines. Piloti su istu dužni izraditi prije svakog leta kako bi se uvjerali da se mase posade, putnika, tereta i goriva nalaze unutar dopuštenih ograničenja te da se samo težište nalazi unutar dozvoljene envelope. Za navedeno su im potrebni podaci koje prikupljaju za to namijenjene službe.

A320-200 LOAD & TRIMSHEET <sup>®</sup>										ALL WEIGHTS IN KILOGRAM										F - FO - 003 \ Rev. 6 \ 28.02.2013									
Approved by Turkish DGCA ( Reference : 3189319-401.01.15/5320850 )																													
Flight Number		From		To		A/C Type		A/C Reg.		Version		Crew		Date		Time		Index = (H-Arm - 18.8499) x W + 50		H-Arm in Meters, W in Kilograms		Index Units							
Dry Operating Weight		=		Maximum Weights for		=		Zero Fuel		=		Take-off		=		Landing		=		=		=							
Take-off Fuel		+		=		=		=		=		=		=		=		=		=		=							
Operating Weight		=		=		=		=		=		=		=		=		=		=		=							
Remarks :				Operating Weight		-		-		-		-		-		-		-		-		-							
Total Pax (before LMC) =		+		=		=		=		=		=		=		=		=		=		=							
Pax or Load Requiring Special Attention :																													
Destination		Number of Pax		Total		Weight Distribution (see table on overleaf)																							
		Adult Child Infant				1 3 4 5																							
Pax Weight (see table overleaf)		+		=		=		=		=		=		=		=		=		=		=							
Total Traffic Load		=		=		=		=		=		=		=		=		=		=		=							
Dry Operating Weight (DOW)		+		=		=		=		=		=		=		=		=		=		=							
Zero Fuel Weight (ZFW)		=		=		=		=		=		=		=		=		=		=		=							
Take-off Fuel		+		=		=		=		=		=		=		=		=		=		=							
Take-off Weight (TOW)		=		=		=		=		=		=		=		=		=		=		=							
Trip Fuel		-		=		=		=		=		=		=		=		=		=		=							
Landing Weight (LW)		=		=		=		=		=		=		=		=		=		=		=							
Prepared by :		Signature		Approved by :		Signature																							

Dry Operating Index		Index Units	
Cargo	Weight (kg)	→	←
1	500 kg	20	105
3	500 kg	20	105
4	500 kg	20	105
5	250 kg	20	105
Cabin Number Pax Use Index Scale below for Holiday Charter Flights (see table on overleaf)			
OA	05 Pax	20	105
OB	20 Pax	20	105
OC	05 Pax	20	105
Cabin Number Pax Use Index Scale below for Non-Holiday Charter Flights (see table on overleaf)			
OA	05 Pax	20	105
OB	20 Pax	20	105
OC	05 Pax	20	105
Fuel Index		Pitch Trim	
Fuel (kg)	Index	Nose Up	Nose Down
3500	+1	2.5	-2.5
4000	+1	2.0	-2.0
4500	0	1.5	-1.5
5000	0	1.0	-1.0
5500	-1	0.5	-0.5
6000	-2	0.0	0.0
6500	-2	-0.5	0.5
7000	-3	-1.0	1.0
7500	-3	-1.5	1.5
8000	-4	-2.0	2.0
8500	-4	-2.5	2.5
9000	-5	-3.0	3.0
9500	-5	-3.5	3.5
10000	-6	-4.0	4.0
10500	-6	-4.5	4.5
11000	-7	-5.0	5.0
11500	-7	-5.5	5.5
12000	-8	-6.0	6.0
12500	-8	-6.5	6.5
13000	-9	-7.0	7.0
13500	-9	-7.5	7.5
14000	-10	-8.0	8.0
14500	-10	-8.5	8.5
15000	-11	-9.0	9.0
15500	-11	-9.5	9.5
16000	-12	-10.0	10.0
16500	-12	-10.5	10.5
17000	-13	-11.0	11.0
17500	-13	-11.5	11.5
18000	-14	-12.0	12.0
18500	-14	-12.5	12.5
19000	-15	-13.0	13.0
19500	-15	-13.5	13.5
20000	-16	-14.0	14.0

Operational Limits:  
- ZFW (Zero Fuel Weight)  
- Take-Off

Note: Landing Weight is full protected!

Caution: When the Take-off CG is lower than 25% MAC, the Basic Take-off Performance must be corrected (see FCOM PER-TOF-10-20). Decrease the MALTYW by 1000 kg, and increase V1, VR and V2 by 1 kts.

Slika 15. Prazna lista opterećenja i uravnoteženja za zrakoplov A320-200 kompanije Freebird Airlines  
Izvor [19]

### 4.3.1 Izrada liste opterećenja i uravnoteženja unutar operativnih granica

Za izradu liste opterećenja i uravnoteženja potrebni su podaci navedeni u tablici 7. Konkretno za ovaj primjer uzeti su proizvoljni podaci.

**Tablica 8.** Podaci potrebni za ispunjavanje liste opterećenja i uravnoteženja

<b>DOM</b>	<b>43 616 kg</b>
<b>MZFM</b>	<b>61 300 kg</b>
<b>MTOM</b>	<b>73 500 kg</b>
<b>MLM</b>	<b>64 500 kg</b>
<b>TO FUEL</b>	<b>10 300 kg</b>
<b>TRIP FUEL</b>	<b>5 886 kg</b>
<b>DOI</b>	<b>44,3</b>
<b>PUTNICI</b>	<b>Muškarci (M): 126</b> <b>Žene (F): 25</b> <b>Djeca (CH): 1</b> <b>Dojenčad (INF): 0</b>
<b>PRTLJAGA</b>	<b>C3: 803 kg</b> <b>C4: 1007 kg</b>
<b>PUTNIČKA KABINA</b>	<b>OA: 42</b> <b>OB: 52</b> <b>OC: 58</b>

Na slici 13 prikazan je ispunjeni prvi dio liste opterećenja i ograničenja za ovaj primjer. U gornjem djelu nalaze se osnovni podaci vezani konkretno uz let: broj leta, polazišni i odredišni aerodrom, tip zrakoplova, registracija zrakoplova, verzija, broj članova posade, te datum i vrijeme leta. Isti nisu bitni konkretno za izračun pozicije težišta. Nadalje, prvi korak je izračunati operativnu masu zrakoplova. Prema definiciji iz poglavlja 2.1. operativna masa je masa zrakoplova spremnog za određenu vrstu operacije (suha operativna masa) uključujući gorivo potrebno za let. Dakle, nju dobijemo zbrajajući suhu operativnu masu (43 616 kg) i potrebno gorivo za let (10 300 kg), čime dobijemo iznos od 53 916 kg. Maksimalne mase koje zrakoplov konstrukcijski može podnijeti dane su u tri slučaja: maksimalna masa zrakoplova bez goriva (ZFM – Zero Fuel Mass), maksimalna masa zrakoplova u polijetanju (MTOM – Maximum Take-off Mass) i maksimalna masa zrakoplova u slijetanju (MLM – Maximum Landing Mass). Također, za navedena tri slučaja se mora izračunati pozicija težišta (bez goriva, u polijetanju i u slijetanju). Ukoliko na masu zrakoplova bez goriva (61 300 kg) dodamo potrebno gorivo za let (10 300 kg), dobiti ćemo masu zrakoplova u polijetanju od 71 600 kg (stupac Zero Fuel). Maksimalna dozvoljena masa u polijetanju je 73 500 kg (stupac Take-off), a zbroj maksimalne mase u slijetanju od 64 500 kg i goriva potrošenog u letu (Trip Fuel) daju masu u polijetanju od 70 386 kg (stupac Landing). Dakle, dobili smo mase zrakoplova u polijetanju za već

navedena tri slučaja. U daljnje proračune se nastavlja s najmanjom masom, s obzirom da je ona najviše ograničujuća i predstavlja najkonzervativniju i najsigurniju vrijednost. Dakle, maksimalna masa zrakoplova s kojom isti može poletjeti konkretno za ovaj let jest 70 386 kg. Dopusćeni putni teret dobijemo ukoliko od navedene vrijednosti oduzmemo operativnu masu zrakoplova (53 916 kg), što daje 16 470 kg. Dakle, masa svih putnika i tereta zajedno ne smije biti veća od 16 470 kg. Broj putnika, spol i starost navedeni su u tablici 7, a njihovu ukupnu masu određujemo prema podacima navedenim u tablici 2. Ukupna masa putnika je 126 x 84 kg (muškarci) + 25 x 84 kg (žene) + 1 x 35 kg (djeca), što daje 12 719 kg. Prema tablici 7 ukupna masa prtljage jest 803 kg (C3) + 1007 kg (C4) što daje 1810 kg. Zbroj ukupne mase putnika i ukupne mase prtljage daje ukupni putni teret 14 529 kg. Iz navedenog je vidljivo da isti ne premašuje dozvoljeni maksimalni iznos od 16 470 kg. Oduzimanjem prve vrijednosti od potonje, dobivamo iznos pod opterećenja (eng. Under Load) koje iznosi 1 941 kg.

FREEBIRD		<b>A320-200 LOAD &amp; TRIMSHEET®</b> <small>Approved by Turkish DGCA ( Reference : 51859319-401.01.15/552/2850 )</small>						ALL WEIGHTS IN KILOGRAM		
Flight Number	From	To	A/C Type	A/C Reg.	Version	Crew	Date	Time		
<b>OU665</b>	<b>LDDU</b>	<b>LDZA</b>	<b>A320 - 200</b>	<b>TC - FIL</b>	<b>180 - Y</b>	<b>2 / 5</b>	<b>31 / 07 / 14</b>	<b>10 : 00</b>		
Dry Operating Weight	=	<b>4 3 6 1 6</b>	Maximum Weights for	=	Zero Fuel		Take-off	=	Landing	
					<b>6 1 3 0 0</b>				<b>6 4 5 0 0</b>	
Take-off Fuel	+	<b>1 0 3 0 0</b>	Take-off Fuel	+	<b>1 0 3 0 0</b>		Trip Fuel	+	<b>5 8 8 6</b>	
Operating Weight	=	<b>5 3 9 1 6</b>	Allowed Weight for Take-off (Lowest of a, b or c)	a)	<b>7 1 6 0 0</b>	b)	<b>7 3 5 0 0</b>	c)	<b>7 0 3 8 6</b>	
Remarks : <b>none</b>			Operating Weight	-				-	<b>5 3 9 1 6</b>	
			Allowed Traffic load	=				=	<b>1 6 4 7 0</b>	
			Total Traffic Load	-				-	<b>1 4 5 2 9</b>	
Total Pax (before LMC) = <b>152</b>			Under Load (before LMC)	=				=	<b>1 9 4 1</b>	
Pax or Load Requiring Special Attention : /										

Slika 16. Prvi dio liste opterećenja i uravnoteženja

Izvor [19]

Na slici 14 prikazan je ispunjeni drugi dio liste opterećenja i uravnoteženja. U tom je djelu bitno provjeriti da stvarne mase zrakoplova u konkretno ovom letu ne premašuju maksimalne konstrukcijski dozvoljene mase i to u već navedena tri slučaja: bez goriva, u polijetanju i u slijetanju. Također je bitno izračunati ukupnu masu putnika, te ukupnu masu tereta i njihov raspored po odjeljcima. Ukupni putni teret već je izračunat i iznosi 14 529 kg. Ukoliko na taj iznos dodamo suhu operativnu masu, dobit ćemo masu zrakoplova konkretno za ovaj let od 58 145 kg. Maksimalna dozvoljena masa ovog zrakoplova bez goriva jest 61 000 kg, što potvrđuje da se nalazimo unutar dozvoljenih granica. Zbroj mase zrakoplova bez goriva i ukupnog goriva na zrakoplovu (10 300 kg) daje masu zrakoplova u polijetanju od 68 445 kg, što pokazuje i da taj segment ne premašuje maksimalni dozvoljeni iznos od 73 500 kg.

Razlikom mase zrakoplova u polijetanju i putnog goriva od 5 886 kg dobivamo masu zrakoplova u slijetanju od 62 559 kg. Maksimalna strukturalna masa zrakoplova A320-200 u slijetanju ne smije biti veća od 64 500 kg, što također pokazuje da se nalazimo unutar dozvoljenih vrijednosti.

Destination	Number of Pax			Total	Weight Distribution (see table on overleaf)			
	Adult	Child	Infant		1	3	4	5
	151	1	0	Tr				
				B	1	8	1	0
				C				
				M				
				T	1	8	1	0
				Tr				
				B				
				C				
				M				
				T				
				Tr				
				B				
				C				
				M				
				T				
<b>Total</b>	<b>151</b>	<b>1</b>	<b>0</b>		<b>1</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
<b>Pax Weight</b> (see table overleaf)	+				<b>1</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>1</b>
<b>Total Traffic Load</b>	=				<b>1</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>2</b>
<b>Dry Operating Weight (DOW)</b>	+				<b>4</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>1</b>
<b>Zero Fuel Weight (ZFW)</b>	=				<b>5</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>4</b>
<b>Maximum</b> <input type="text" value="61000"/>	LMC (+/-)				=			
	LMC ZFW				=			
<b>Take-off Fuel</b>	+				<b>1</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>0</b>
<b>Take-off Weight (TOW)</b>	=				<b>6</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>4</b>
<b>Maximum</b> <input type="text" value="73500"/>	LMC (+/-)				=			
	LMC TOW				=			
<b>Trip Fuel</b>	-				<b>5</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>6</b>
<b>Landing Weight (LW)</b>	=				<b>6</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>Maximum</b> <input type="text" value="64500"/>	LMC (+/-)				=			
	LMC LW				=			
<b>Prepared by :</b>					<b>Approved by :</b>			
- Signature -					- Signature -			

Slika 17. Drugi dio liste opterećenja i uravnoteženja  
Izvor [19]

Nakon što smo provjerili da se navedene mase nalaze unutar dozvoljenih ograničenja, sljedeći korak je odrediti poziciju težišta. Navedeno je prikazano na ispunjenoj listi opterećenja i uravnoteženja na slici 15.

Prvi korak je, u lijevom stupcu, upisati težine tereta po odjeljcima, te težine putnika po odjeljcima. Iz tablice 7 uzimamo podatke o teretu od 803 kg u odjeljku C3, te o teretu od 1007 kg u odjeljku C4. Iz iste tablice upisujemo podatke o razmještanju putnika: 42 putnika u odjeljku OA, 52 putnika u odjeljku OB te 58 putnika u odjeljku OC.

Također, bitno je primijetiti da postoje dva retka vezana uz razmještaj putnika. Prvi se odnosi na charter letove za odmor, a drugi se ne odnosi na iste. S obzirom da se za navedene letove ne koriste jednake mase putnika, bitno je odabrati onaj pravi. Krivi odabir dovodi do

određivanja pogrešne pozicije težišta koja latentno može izići iz sigurnosne envelope te ugroziti sigurnost zrakoplova i putnika. U slučaju ovog primjera, let nije charter let za odmor, tako da koristimo drugi redak vezano uz razmještaj putnika.

U dijagram ulazimo sa zadanom vrijednošću suhog operativnog indeksa (eng. Dry Operating Indeks – DOI) od 44,3. Suhi operativni indeks prikazuje poziciju težišta zrakoplova sa suhom operativnom masom, u pojednostavljenom obliku. No, suha operativna masa isključuje mase goriva i mase putnog tereta, tako da se navedeni indeks treba korigirati. Vrijednost od 44,3 spuštamo okomito do dijela C3 u kojem se nalazi 803 kg tereta. Redak se sastoji od kosih crta, a na desnom dijelu je prikazana jedinična vrijednost korekcije tereta. Dakle, u ovom slučaju, za svakih 500 kg tereta moramo se pomaknuti jednu kosu crtu u desno. S obzirom da se u odjeljku C3 nalazi 803 kg tereta, pomičemo se u desno za 1,6 kosih crta. Isti princip vrijedi i za redak niže, odjeljak C4. Bitno je primijetiti da razmak kosih crta nije jednak za sve retke. To je iz razloga što se neki odjeljci nalaze dalje od središta zrakoplova, te samim time djeluju na većem kraku i više utječu na pomak pozicije težišta, ukoliko se teret natovari u njih. Također, jedinične vrijednosti sa desne strane nisu jednake za sve odjeljke.

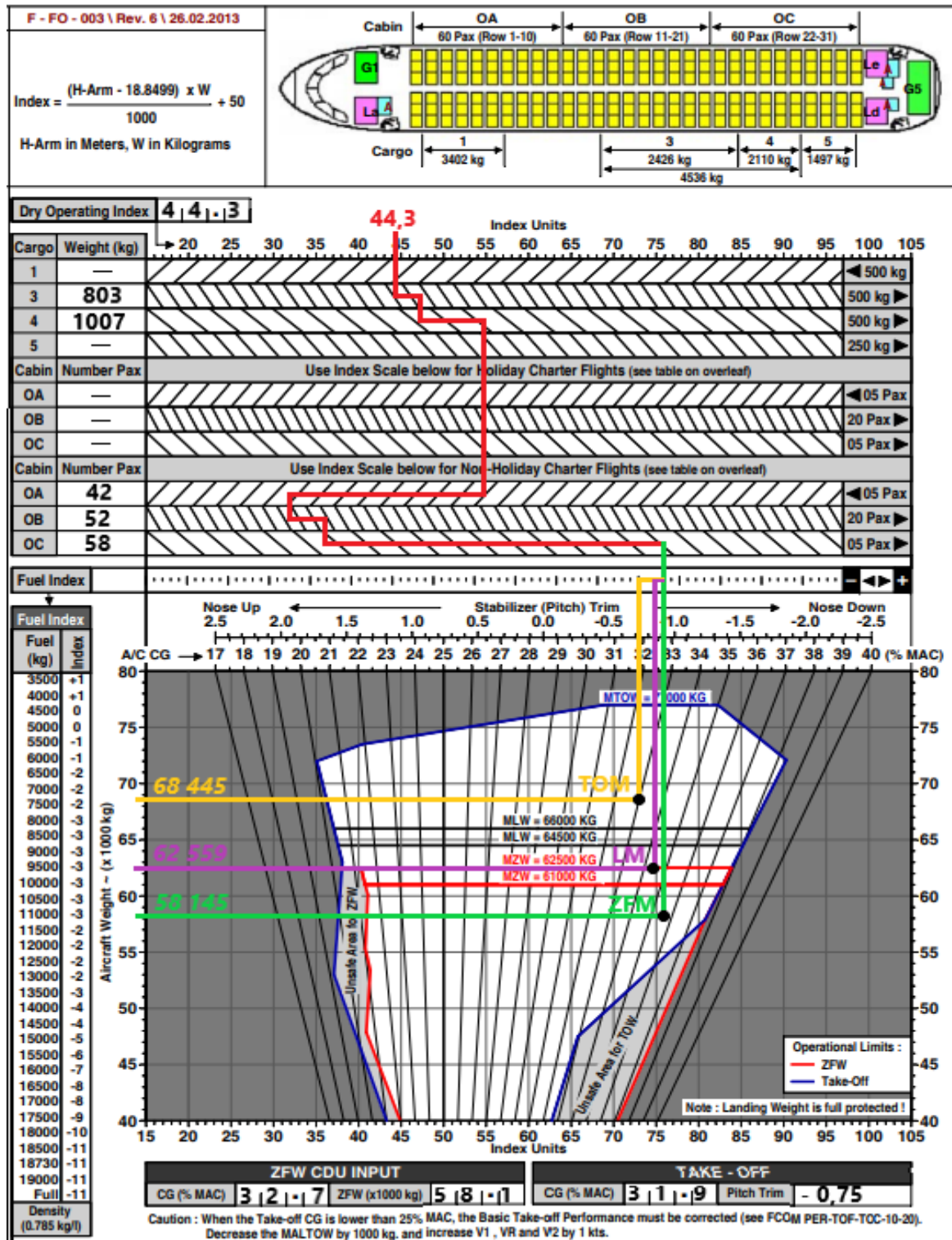
Zatim je potrebno odrediti korekciju suhog operativnog indeksa za razmještaj putnika. Koristi se isti jednostavni princip korekcije kao i za teret. Iz dijagrama na slici 15 se da primijetiti da odjeljak OB gotovo neznatno utječe na poziciju težišta s obzirom da se nalazi u središtu zrakoplova, dok odjeljci OA i OC utječu znatno više.

Sljedeći korak jest spustiti okomicu iz zadnje poznate vrijednosti prema dolje, te naći presjecište sa već izračunatom masom zrakoplova bez goriva od, u našem slučaju, 58 145 kg. Možemo uočiti da se težište za navedenu masu nalazi unutar odobrenih ograničenja. Presjecište navedene okomite linije i vodoravne linije A/C CG pokazuje točnu poziciju težišta u vidu postotka srednje aerodinamičke tetive (eng. Mean Aerodynamic Chord – MAC) na kojem se nalazi. U ovom slučaju, težište se nalazi na 32,7 % MAC.

Korekcije pozicije težišta za gorivo prikazane su u donjem lijevom kutu slike 15. Masu zrakoplova u polijetanju dobijemo ukoliko na masu zrakoplova bez goriva (ZFM) dodamo gorivo u polijetanju (Take-off Fuel). Gorivo u polijetanju iznosi 10 300 kg, što daje indeks korekcije od -3. Dakle u retku Fuel Index se pomičemo za tri crte u lijevo od zelene okomice (ZFM). Spuštamo okomicu iz nove pozicije te nađemo presjecište sa masom zrakoplova u polijetanju (TOM) da dobijemo poziciju težišta u polijetanju. Iščitavamo da se nalazimo unutar operativnih ograničenja, a pozicija težišta nalazi se na 31,9 % MAC. Također možemo iščitati da je u polijetanju natrimati nos zrakoplova -0,75 stupnjeva.

Zadnji korak jest odrediti poziciju težišta u slijetanju. Za navedeno također koristimo indeks korekcije za gorivo, tako da od mase zrakoplova u polijetanju oduzmemo potrošeno putno gorivo ( 5 886 kg). Indeks korekcije iznosi +1, dakle u retku Fuel Index od žute okomice pomičemo se za jednu crtu u desno. Spuštamo okomicu te nađemo presjecište sa već izračunatom masom zrakoplova u slijetanju (LM), te iščitavamo da se težište nalazi unutar dozvoljenih ograničenja, a pozicija mu je na 32,4 % MAC.

Time smo odredili pozicije težišta za zrakoplov bez goriva, zrakoplov u polijetanju te zrakoplov u slijetanju te utvrdili da se isto nalazi unutar odobrenih ograničenja te da je zrakoplov siguran za izvršiti let.



Slika 18. Treći dio liste opterećenja i uravnoteženja

Izvor [19]



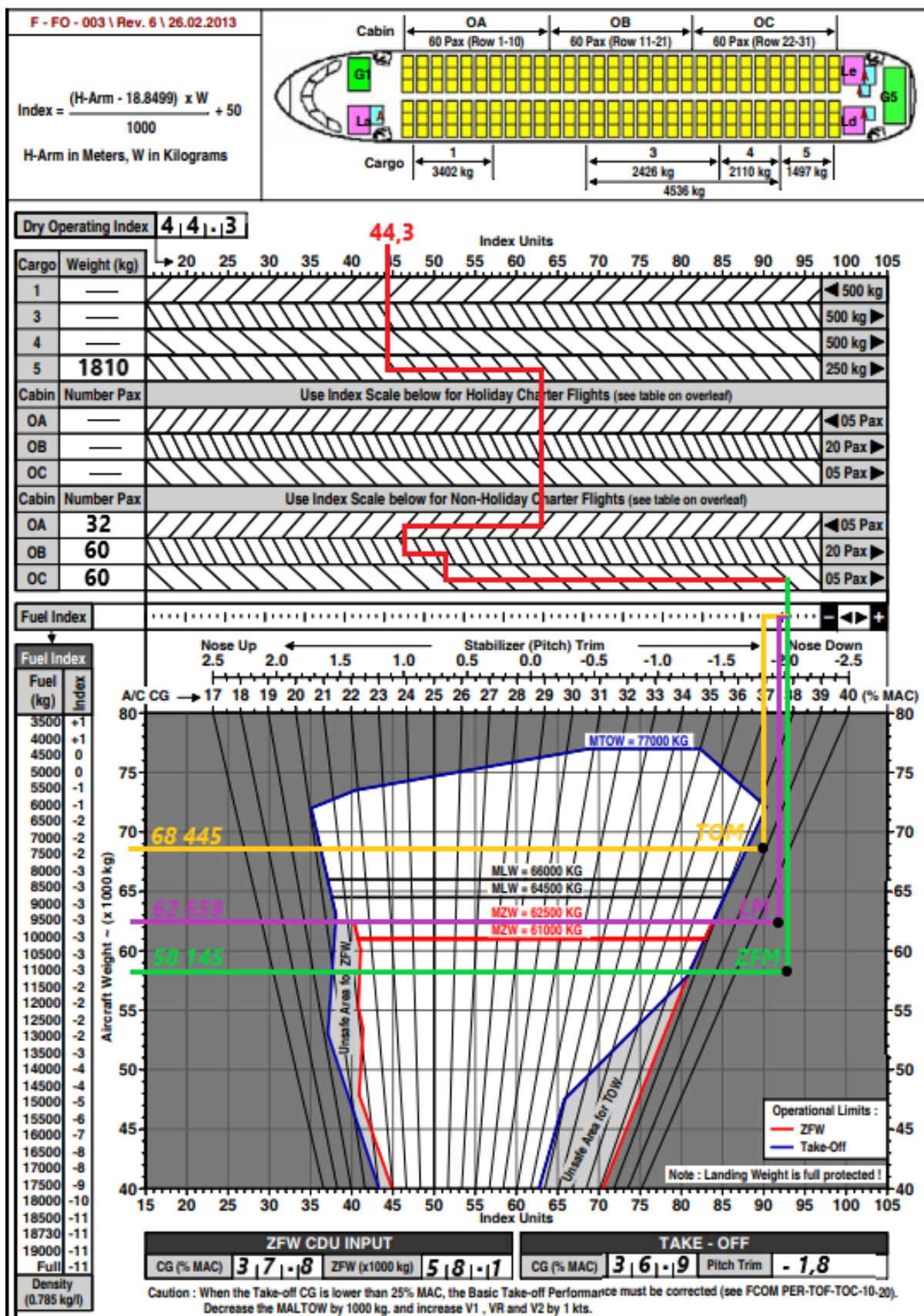
#### 4.3.2 Izrada liste opterećenja i uravnoteženja izvan operativnih granica

U ovom poglavlju bit će prikazan primjer izrade liste opterećenja i uravnoteženja izvan operativnih granica. Isti je prikazan na slici 16. Za navedeno bit će korišten drugačiji razmještaj prtljage i putnika, dok će njihov broj i težina ostati isti. U ovom slučaju sva prtljaga težine 1 810 kg smještena je u odjeljak C5 koji se nalazi na kraju zrakoplova. U odjeljku OA sada se nalazi 32 putnika, dok su odjeljci OB i OC popunjeni do zadnjeg mjesta, u svakom se nalazi po 60 putnika.

S obzirom da je masa prtljage i putnika ostala nepromijenjena, iz prethodnog primjera možemo zaključiti da stvarne mase zrakoplova bez goriva, u polijetanju i u slijetanju neće prekoračiti maksimalne strukturalne dozvoljene mase u navedenim slučajevima.

Također, vrijednost suhog operativnog indeksa (DOI) ostala je nepromijenjena i iznosi 44,3. Isti nam je i ulazna vrijednost u dijagramu prikazanom na slici 16. Spuštamo okomicu do retka C5 gdje se nalazi 1 810 kg prtljage, te se pomičemo 7 jedinica u desno. Isti način korekcije indeksa, objašnjen u poglavlju 4.1, vrijedi i za razmještaj putnika. Nakon što nađemo presjecište okomice i mase zrakoplova bez goriva (ZFM), možemo uočiti da se isti nalazi van operativnih ograničenja. Korekcijom indeksa za gorivo isto možemo ustvrditi i za masu zrakoplova u polijetanju (TOM) i masu zrakoplova u slijetanju (LM). Kod mase zrakoplova bez goriva, težište se nalazi na 37,8 % MAC, u polijetanju na 36,9 % MAC (potrebno je natrimati nos zrakoplova -1,8 stupnjeva) te u slijetanju na 37,5 % MAC. Uspoređujući pozicije težišta dobivene u prethodnom primjeru, možemo ustvrditi da su iste pomaknute znatno prema iza, što je i očekivano s obzirom da su i teret i putnici pomaknuti u stražnje odjeljke.

S obzirom da se pozicije težišta nalaze van operativnih granica, zrakoplov nije u mogućnosti poletjeti. Ukoliko dođe do polijetanja, može doći do strukturalnog oštećenja zrakoplova te posljedno i do samog pada zrakoplova. Nadležne službe morale bi uočiti ovaj problem te sukladno njemu napraviti drugačiji razmještaj putnika i prtljage, kako bi isti bio u mogućnosti poletjeti.



Slika 19. Lista opterećenja i uravnoteženja izvan operativnih ograničenja

Izvor [19]

### 4.3.3 Ostale metode izrade liste opterećenja i uravnoteženja

Postoje tri metode izrade liste opterećenja i uravnoteženja:

- analitičko-matematička metoda,
- indeksna metoda i
- grafička metoda.

Kod analitičko-grafičke metode, pozicija težišta se određuje pomoću koordinatnog sustava. U istom se mjeri utjecaj svih težinski mjerljivih sustava koji djeluju na težište na određenom kraku. Najprije je potrebno je odrediti težinu svakog sustava koji djeluje na određenom kraku. Pod istim se smatra težina svake pojedine sastavnice praznog zrakoplova, a zatim i svakog ukrcanog tereta i putnika. Pozicija težišta dobije se u vidu horizontalne udaljenosti od određene referentne linije zbrajanjem, odnosno oduzimanjem svih momenata koji djeluju na nekom kraku. Momenti lijevo od referentne linije daju negativan predznak, dok oni desno od iste daju pozitivan predznak. Navedena metoda ne koristi se u svakodnevnom proračunavanju s obzirom da stvara bespotrebno veliko radno opterećenje i zahtijeva puno vremena, već se koristi kod određivanja inicijalne pozicije težišta praznog zrakoplova.

Indeksna metoda određivanja pozicije težišta otklanja mogućnost pogreške u proračunavanju. Indeks se uvodi kao bezdimenzionalni cijeli broj koji u preobraženom smislu predstavlja moment kojim neka masa djeluje na određenom kraku. Svaki zračni prijevoznik dužan je odrediti početni indeks za sve zrakoplove u svojoj floti, a isti se naknadno iščitavaju iz tablica.

Posljednja metoda određivanja pozicije težišta zrakoplova je grafička metoda, čiji je postupak izrade objašnjen u poglavlju 4.1. Za grafičku metodu, zrakoplov je potrebno podijeliti u posebne odjeljke. U navedeno spadaju putnička kabina, spremnici prtljage i tereta te spremnici goriva. Potrebno je odrediti utjecaj svakog zasebnog odjeljka na poziciju težišta. Odjeljci bliže nosu zrakoplova stvaraju negativni moment, dok oni bliže repu zrakoplova stvaraju pozitivni moment. Grafička metoda određivanja pozicije težišta zastupljenija je od indeksne metode, također i isključuje potencijalne pogreške u računanju, a negativna strana joj je nepreciznost s obzirom da se na relativno malom dijagramu, crtajući kemijskom olovkom, moraju očitati određene vrijednosti. No, isto se može izraditi i u elektroničkom obliku (prikazano na slici 16), što nosi prednosti poput lake pohrane podataka, preciznosti izračuna te brže i jednostavnije izrade liste opterećenja i uravnoteženja [20].



#### 4.4 Promjene u zadnji tren (LMC)

Sve promjene masa tereta, putnika, kao i masa goriva u spremnicima, koje se pojavljuju nakon izrađivanja liste opterećenja i uravnoteženja, smatraju se promjenama u zadnji tren (eng. Last Minute Change – LMC)

Pri unošenju LMC-a treba voditi računa o tome da maksimalne dopuštene strukturalne mase zrakoplova ne budu prekoračene, da maksimalne dopuštene mase po pojedinim odjeljcima također ne budu prekoračene, te da pozicija težišta uvijek ostane unutar dozvoljenih vrijednosti. Dužnost svake zrakoplovne kompanije jest propisati maksimalnu dozvoljenu težinu LMC-a.

U praksi, promjene u zadnji tren prije polijetanja vrlo su česte pa su uvedena odgovarajuća ograničenja u vidu težine tereta iznad kojih je potrebno izvršiti korekciju ili izraditi novu listu opterećenja i uravnoteženja. Isto je prikazano u tablici 8 za zrakoplov A320. Također, kod LMC-a, dopuštena je promjena isključivo plaćenog tereta (putnici i prtljaga), dok promjena mase goriva nije dopuštena [20].

**Tablica 9.** Korekcija balansa zrakoplova Airbus A320

LMC (kg)	Korekcija balansa zrakoplova
< 300	Nije potrebna korekcija
300 – 900	Težinu i položaj težišta korigirati na postojećem dokumentu (Load Sheet)
> 900	Potrebno izraditi novi dokument (Load Sheet)

Izvor [20]

Na slici 18. prikazan je primjer popunjavanja LMC-a. Nakon izrade liste opterećenja i uravnoteženja dobivena je informacija o još tri dodatna muška putnika i prtljazi. Zbroj njihovih masa prema standardima zrakoplovne kompanije iznosi 297 kg. Navedena masa dodana na prije izračunatu masu zrakoplova u polijetanju daje 68 757 kg što je i dalje ispod maksimalne dopuštene mase u polijetanju od 73 500 kg. Također, na slici 18. vidljivo je da masa LMC-a ne smije premašiti 500 kg ili više od 6 putnika. S obzirom da je u ovom primjeru LMC 297 kg i 3 putnika, možemo zaključiti da se nalazimo unutar operativnih ograničenja. Ukupni broj putnika sa 152 se popeo na 155.

Last Minute Change (LMC)				
Destination	Specification	CL / CPT	Weight (kg)	
			Plus (+)	Minus (-)
LDZA	3 PAX		264	
LDZA	BAGG		33	
Total LMC Weight ( + / - )			+ 297	
Total Pax After LMC			155	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maximum LMC is limited to 6 Pax or 500 kg!</li> <li>- Apply LMC Weight corrections on the ZFW, TOW and LW.</li> <li>- See notes on overleaf for detailed LMC limitations and remarks.</li> </ul>				
Approved by :				- Signature -

Slika 21. Primjer popunjavanja LMC-a  
Izvor [20]

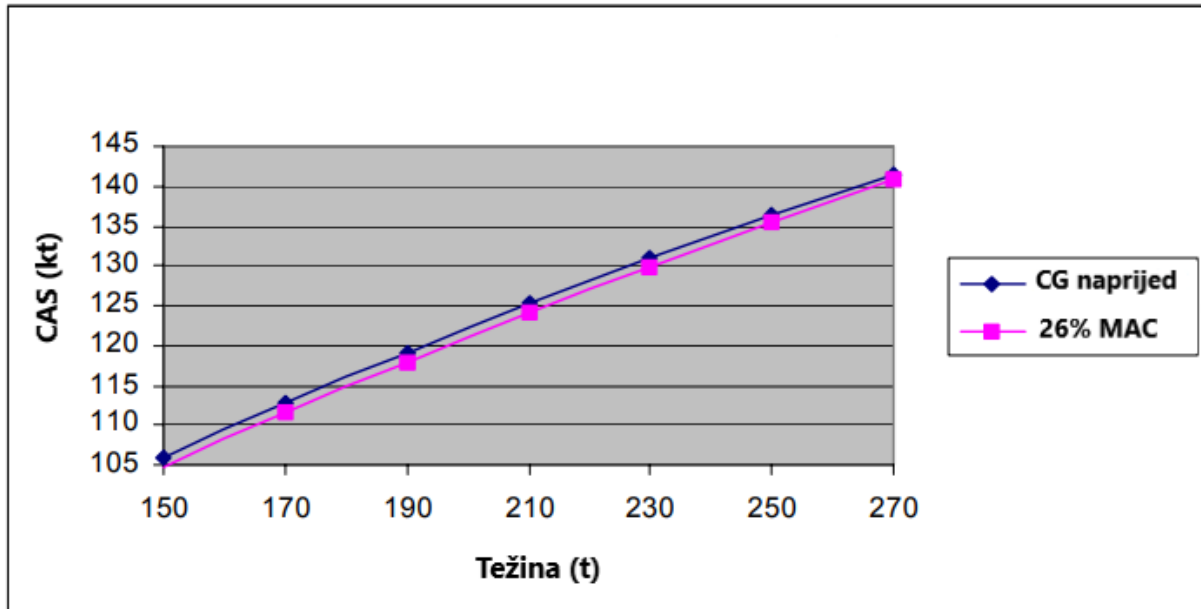
Također, prema tablici 8 vidljivo je da za ovaj LMC nije potrebno izvršiti korekciju pozicije težišta s obzirom da je ukupna masa istog 297 kg, a korekcija se izvršava za ukupne mase LMC-a iznad 300 kg.

#### 4.5 Utjecaj težišta na brzinu sloma uzgona

Brzina sloma uzgona (eng. stall speed –  $V_S$ ) je brzina pri kojoj dolazi do odvajanja strujnica zraka sa gornjake aeroprofila pri kojoj sila uzgona drastično pada. Do sloma uzgona dolazi zbog prevelikog napadnog kuta ili zbog premale brzine. Uzgona je direktno povezan sa brzinom zrakoplova; veća brzina rezultira i većim uzgonom. U poglavlju 2.3 objašnjen je utjecaj pozicije težišta na brzinu sloma uzgona. Zbog težišta pomaknutog više prema prednjoj granici zrakoplov zahtjeva više uzgona, samim time će i brzina sloma uzgona biti veća. To naravno nije povoljno, poželjno je da brzina sloma uzgona bude što manja. To se postiže pozicioniranjem težišta prema zadnjoj granici.

Za zrakoplove sa sustavom Fly by wire (A319, A320, A321, A330 i A340) nadležna tijela su prema [22] definirali brzinu sloma uzgona baziranu na faktoru opterećenja od 1g. Zrakoplovi sa Fly by wire sustavom imaju zaštićenu envelopu leta pri malim brzinama koju piloti jednostavno ne mogu probiti. Dogovoreno je da je za navedene zrakoplove minimalna brzina sloma uzgona  $V_{Smin}$  jednaka 0,94 % brzine sloma uzgona pri 1g, to jest  $V_{S1g}$  [22].

Slika 22. prikazuje razliku brzine sloma uzgona za dvije pozicije težišta; pomaknuto prema prednjoj granici te na optimalnoj poziciji od 26% MAC. Na istoj je vidljivo da je brzina sloma uzgona za težište pomaknuto prema prednjoj granici i do 1,5 čvorova veća od brzine sloma uzgona na 26% MAC. Za primjer je uzet zrakoplov A340-313. Konfiguracija zrakoplova je sa zakrilcima spuštenim 10° te uvučenim podvozjem.



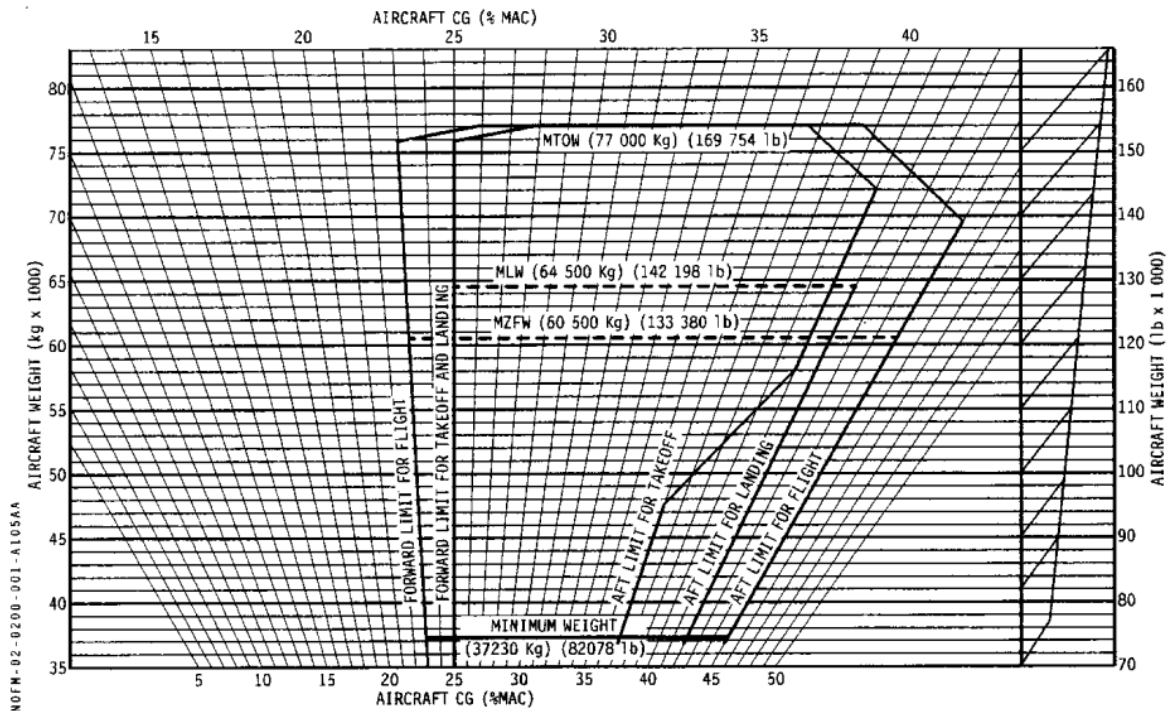
**Slika 22.** Brzine sloma uzgona za različite pozicije težišta  
Izvor [22]

#### 4.6 Utjecaj težišta na performanse u polijetanju

Operativne brzine zrakoplova referiraju se i polaze od brzine sloma uzgona. Sigurnosna brzina zrakoplova u polijetanju (eng. take-off safety speed)  $V_2$  mora biti veća od  $1.2V_S$  odnosno  $1.13V_{S1g}$ , što pokazuje da vrijednost  $V_2$  direktno utječe na duljinu potrebnu za uzlijetanje. Dakle, što je težište pomaknuto više prema zadnjoj granici, manja je potrebna duljina za uzlijetanje. To pokazuje i primjer za zrakoplov A340-313 pri težini u uzlijetanju od 250 000 kg kojemu je pri poziciji težišta naprijed potrebno 3241,5 m za uzlijetanje, a pri poziciji težišta na 26% MAC potrebno 3164,8 m. Nadalje, težište pomaknuto prema zadnjoj granici rezultira lakšim nosom zrakoplova, tako da zrakoplov ostvaruje bolje performanse u fazi odljepljivanja. Isto vrijedi i za performanse u penjanju. Za primjer je opet uzet zrakoplov A340-313 koji pri težištu pomaknutom naprijed ostvaruje gradijent penjanja od 5,569%, a pri težištu na 26% MAC ostvaruje gradijent penjanja od 5,689% [22].

Za određivanje performansi u uzlijetanju uvijek se koristi pozicija težišta pomaknuta prema prednjoj granici. Za Airbus A320, pozicija težišta pri suhoj operativnoj masi nalazi se na oko 30% MAC, dok se prednja granica nalazi na 17% MAC. Performanse za uzlijetanje u

operativnom priručniku A320 dane su za poziciju težišta na 25% MAC. Na taj način zrakoplov zapravo ostvaruje bolje performanse u stvarnom životu od onih navedenih u operativnom priručniku zrakoplova, s obzirom da se težište uvijek nalazi iza navedene pozicije. Slika 23. prikazuje limite pozicije težišta za zrakoplov A320. Iz nje je vidljivo da je prednja pozicija za polijetanje i slijetanje ograničena na već navedenih 25% MAC, dok je ista za zrakoplov u letu nešto niža, na 23% MAC [22].



**Slika 23.** Limiti pozicije težišta za zrakoplov A320

Izvor [22]

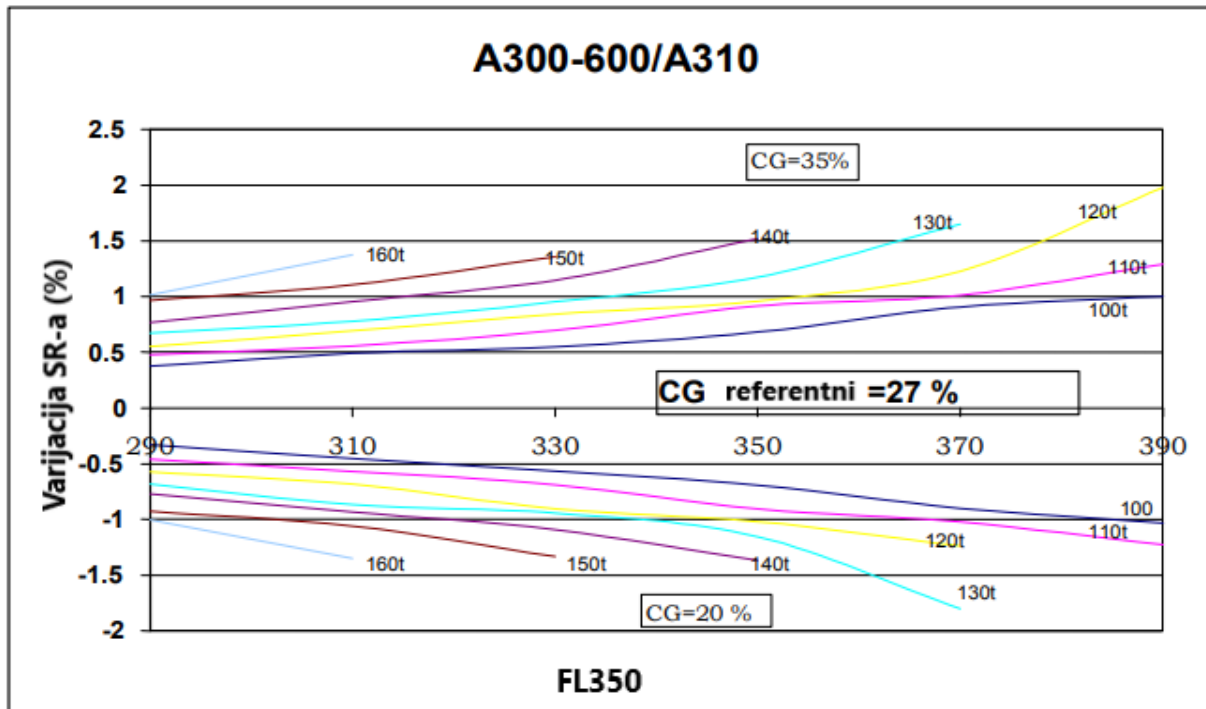
#### 4.7 Utjecaj težišta na performanse u letu

Kako bi zrakoplov bio u ravnotežnom stanju, potrebna je sila prema dolje na horizontalnom stabilizatoru. Težište pomaknuto prema prednjoj granici djeluje na većem kraku te samim time zahtjeva veću silu na horizontalnom stabilizatoru. Veća sila na horizontalnom stabilizatoru stvara veći inducirani otpor, samim time i veću potrošnju goriva. Dakle, što se težište nalazi više iza, manja je potrošnja goriva.

Tijekom krstarenja, na svim širokotrupnim Airbus zrakoplovima napredni sustavi kontroliraju poziciju težišta tako što premještaju gorivo iz pojedinih odjeljka. No, otkaz sustava može spriječiti transfer goriva i kontrolu pozicije težišta. Slika 24. prikazuje utjecaj pozicije težišta na specifični dolet (eng. Specific Range) zrakoplova ovisno o njegovoj težini. Za referentnu poziciju uzeta je CG 27% MAC, dok su prednja i zadnja granica na 20, odnosno 35%



MAC. Za primjer uzeti su zrakoplovi A300-600/A310. Iz slike 24 je vidljivo pozicija težišta pomaknuta više prema zadnjoj granici rezultira značajnijim uštedama goriva. Također, pri krstarenju na visinama većim od FL350 (35 000 ft) i pri velikim težinama smanjenje ili povećanje potrošnje goriva značajnije utječe na specifični dolet. Iz slike 24 vidljivo je da specifični dolet, u navedenim uvjetima, može varirati i do 2%. Zbog toga, pravilno ukrcavanje tereta pri velikim težinama za zrakoplove koji nemaju automatsku kontrolu pozicije težišta vrlo je bitno [22].




Slika 24. Varijacija specifičnog doleta ovisno o poziciji težišta i masi zrakoplova  
Izvor [22]

#### 4.8 Utjecaj težišta na performanse u slijetanju

Operativne brzine zrakoplova u slijetanju također su vezane i referiraju se na brzinu sloma uzgona. Brzina zrakoplova u prilazu  $V_{app}$  mora biti veća od  $1.3V_S$ , odnosno  $1.23V_{S1g}$ . Dakle, manja brzina sloma uzgona rezultira manjom brzinom zrakoplova u prilazu što rezultira manjom potrebnom udaljenošću za zaustavljanje. Odnosno, za danu duljinu slijetanja, manja brzina sloma uzgona rezultira većom dozvoljenom masom u slijetanju. Možemo finalno zaključiti da pozicija težišta pomaknuta prema iza daje manju potrebnu udaljenost zrakoplova u slijetanju. Za Airbus zrakoplove performanse u slijetanju računaju se prema poziciji težišta na prednjoj granici. Konzervativniji pristup rezultira ostvarivanjem boljih performansi u stvarnim situacijama od proračunatih, što daje određenu sigurnosnu marginu. Dakle, pozicija težišta ne utječe na performanse u slijetanju dok god se nalazi unutar dozvoljenih granica.

Isto ne vrijedi za zrakoplov A320. Na slici 25, iz operativnog priručnika zrakoplova, vidljivo je da se korekcija od 2% mora primijeniti za potrebnu udaljenost u slijetanju kod težišta pomaknutog prema prednjoj granici [22].

 <b>A319/320/321</b> FLIGHT CREW OPERATING MANUAL	<b>LANDING PERFORMANCE</b>  LANDING	2.03.10	P 5
		SEQ 122	REV 21

**REQUIRED LANDING DISTANCE**

**MANUAL LANDING**

REQUIRED LANDING DISTANCE (FEET)								
WEIGHT (1000 LB)	100	110	120	130	140	150	160	170
CONF 3	3680	3940	4280	4680	5140	5660	6220	6810
CONF FULL	3470	3700	3990	4340	4730	5170	5660	6180

**Corrections on landing distances**

- Wind : per 10 kt tailwind add 14 %
- no correction for headwind due to wind correction on approach speed.
- Airport elevation : per 1000 ft above sea level add 4 %.
- Forward CG : add 2 %**

**Slika 25.** Korekcija potrebne udaljenosti za slijetanje za zrakoplov A320  
Izvor [22]

## 5 Zaključak

U zamršenom i poprilično zahtjevnom području zrakoplovstva, gdje se preciznost i sigurnost isprepliću, položaj težišta pojavljuje se kao najvažnija odrednica performansi zrakoplova Airbus A320. Ovaj ključni čimbenik ima mogućnost ili podići ili potkopati stabilnost, upravljivost i ukupnu učinkovitost zrakoplova.

Kroz sve faze leta, od taksiranja do polijetanja, krstarenja do slijetanja, položaj centra gravitacije upravlja sinergijom aerodinamičkih sila. Pravilno pozicionirano težište daje zrakoplovu ravnotežu, omogućujući pilotima neometano upravljanje kontrolama i navigaciju kroz različite vremenske uvjete. Naprotiv, neusklađeno pozicionirano težište može dovesti do domino efekta štetnih posljedica. Položaj težišta pomaknut pretjerano naprijed sa sobom nosi niz negativnih strana objašnjenih u radu poput male upravljivosti, veće potrebne duljine za uzlijetanje, slabijeg gradijenta penjanja, većeg otpora te manjeg doleta i istrajnosti. S druge strane, težište pomaknuto prema zadnjoj granici rezultira manjom stabilnošću, većom upravljivosti, kraćom duljinom potrebnom za uzlijetanje, boljim gradijentom penjanja, manjim otporom, potrošnjom goriva te većim doletom i istrajnošću. No pretjerano pomicanje težišta prema zadnjoj granici može rezultirati premalom stabilnošću, zbog čega je teže dovesti zrakoplov u ravnotežni položaj nakon utjecaja vanjske sile. Iz tog razloga je bitno pozicionirati težište na najoptimalniju poziciju, u kojoj zrakoplov razvija potrebnu upravljivost i stabilnost, ne narušavajući sigurnost zrakoplova i putnika u njemu.

Mnogi faktori utječu na promjenu pozicije težišta tokom leta, poput potrošnje goriva, izvlačenja i uvlačenja zakrilaca te izvlačenja i uvlačenja podvozja. Optimalno pozicionirano težište također utječe i na otpor te samu potrošnju goriva. Usklađivanje dovodi do poboljšanje učinkovitosti goriva, što je bitno gospodarsko i ekološko razmatranje. Neučinkovito upravljanje pozicijom težišta, s druge strane, može dovesti do povećane potrošnje goriva, utjecati na operativne troškove i pridonijeti emisiji ugljika.

Napredne tehnologije integrirane u dizajn Airbusa A320 kontinuirano prate i reguliraju položaj težišta tijekom utovara i leta. Ova dinamička ravnoteža zahtijeva zajednički napor između pilota, zemaljskih posada i inženjera kako bi se osiguralo da se teret, putnici i gorivo razumno raspoređuju. Usklađenost s propisanim ograničenjima sprječava opasne scenarije tijekom polijetanja i slijetanja, a oba ovisе o održavanju ispravne ravnoteže.

Sveobuhvatno razumijevanje implikacija pozicije težišta prožima se kroz obuku zrakoplovnih stručnjaka i pedantno poslovanje zrakoplovnih kompanija. U konačnici, utjecaj položaja težišta odjekuje izvan granica inženjerstva, utkajući se u strukturu sigurnosti letenja, operativne učinkovitosti i odgovornosti prema okolišu.

Dok zrakoplovstvo kroči prema budućnosti, inovacije će vjerojatno poboljšati upravljanje pozicijom težišta, poboljšavajući performanse Airbusa A320, i drugih zrakoplova, uz postavljanje novih mjerila za učinkovitost. Stoga će prihvaćanje lekcija naučenih iz utjecaja pozicije težišta i dalje biti kamen temeljac aeronautičkog napretka.

## Literatura

- [1] Gravity (Weight), *Aviation Online Magazine*. Preuzeto s: <http://avstop.com/ac/gravity.html> [Pristupljeno : 30. srpanj 2023.]
- [2] Civil Aviation Authority, *CAP 696, CAA JAR-FCL Examinations, Mass and Balance Manual (Aeroplanes)*, 3 izdanje, 2006. Preuzeto s: <https://publicapps.caa.co.uk/docs/33/CAP696> [Pristupljeno: 30 srpanj 2023.]
- [3] Aircraft Weight and Balance Terminology, *Aeronautics Guide*. Preuzeto s: <https://www.aircraftsystemstech.com/2017/05/weight-and-balance-terminology.html> [Pristupljeno: 2. kolovoz 2023.]
- [4] Joint Aviation Authority, *031 Aircraft Mass & Balance*. Preuzeto s: <https://www.pilot18.com/wp-content/uploads/2020/11/Massbalance> [Pristupljeno 3. kolovoz 2023.]
- [5] European Parliament and the Council, *(EU) No 965/2012*, Official Journal of the European Union, 2012. Preuzeto s: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/regulations/commission-regulation-eu-no-9652012> [Pristupljeno 3. kolovoz 2023.]
- [6] European Aviation Safety Agency, *Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Annex IV – Part-CAT*, 2. izdanje, EASA, 2015. Preuzeto s: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/acceptable-means-of-compliance-and-guidance-materials/amc-and-gm-annex-iv-part-cat> [Pristupljeno: 3. kolovoz 2023.]
- [7] Joint Aviation Authorities Airline Transport Pilot's Licence, *080 Principles of Flight*, 2. izdanje, Frankfurt, Jeppesen GmbH, 2001. [Pristupljeno: 5. kolovoz 2023.]
- [8] Montlaur A, Arias S, *Stability and Control*, Universitat Politecnica de Catalunya, 2019. Preuzeto s: [chromeextension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/temarios/T5StabilityControl\\_2018\\_2.pdf](chromeextension://efaidnbnmnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/temarios/T5StabilityControl_2018_2.pdf) [Pristupljeno: 5. kolovoz 2023.]
- [9] Forward vs aft CG Explained, *Pilot Institute*, 2023. Preuzeto s: <https://pilotinstitute.com/forward-vs-aft-cg-explained/> [Pristupljeno: 5. kolovoz 2023.]
- [10] Weiss SI, Amir AR, Airbus Industrie, *Britannica*, 2023. Preuzeto s: <https://www.britannica.com/topic/Airbus-Industrie> [Pristupljeno: 5. kolovoz 2023.]
- [11] Chesworth L, The History of the A320 Family Program, *Aviation Source*, 2023. Preuzeto s: <https://aviationsourcenews.com/history/the-history-of-the-a320-family-program/> [Pristupljeno: 5. kolovoz 2023.]
- [12] Prechtl S, 9A-CTJ Croatia Airlines Airbus A320-214, *Plane spotters*, 2017. Preuzeto s: <https://www.planespotters.net/photo/762232/9a-ctj-croatia-airlines-airbus-a320-214> [Pristupljeno: 5. kolovoz 2023.]

- [13] Fly-by-Wire (1980-1987), Airbus, preuzeto s: <https://www.airbus.com/en/who-we-are/our-history/commercial-aircraft-history/fly-by-wire-1980-1987> [Pristupljeno: 6. kolovoz 2023.]
- [14] Fly-by-Wire (FBW) Technology, Aviators Guide, 2020. Preuzeto s: <https://aviatorsguide.wordpress.com/2020/07/20/fly-by-wire-fbw-technology/> [Pristupljeno 9. kolovoz 2023.]
- [15] Aircraft Characteristics - Airport and Maintenance Planning, Airbus, 2005.
- [16] Airbus A320-200, Croatia Airlines. Preuzeto s: <https://www.croatiaairlines.com/fleet> [Pristupljeno 9. kolovoz 2023.]
- [17] Opći principi leta, Hrvatska agencija za civilno zrakoplovstvo. Preuzeto s: <https://www.ccaa.hr/13> [Pristupljeno 10. kolovoz 2023.]
- [18] Horvat N, *Proces uravnoteženja i opterećenja zrakoplova A320 prijevoznika Croatia Airlines*. Završni rad. Sveučilište u Zagrebu. Fakultet prometnih znanosti; 2017. Preuzeto s: <https://zir.nsk.hr/islandora/object/fpz%3A1144> [Pristupljeno 15. kolovoz 2023.]
- [19] *A320 Load & Trimsheet*, Freebird Airlines. Preuzeto s: <https://dokumen.tips/documents/ahm-560-freebird-560-present-a320-200-fleet-all-180-y-registration-model-tc.html?page=30> [Pristupljeno: 15. kolovoz 2023.]
- [20] Steiner S, Vidović A, Bajor I, Pita O, Štimac I, *Zrakoplovna prijevozna sredstva 1*, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2008.
- [21] Međunarodna zračna luka Zagreb, Zagreb, 2014.
- [22] *Getting to Grips with Weight and Balance*, Airbus. Preuzeto s: <https://pdf4pro.com/view/getting-to-grips-with-weight-and-balance-35d15.html> [Pristupljeno: 27. kolovoz 2023.]

## Popis slika

<b>Slika 1.</b> Težište zrakoplova .....	2
<b>Slika 2.</b> Mase zrakoplova .....	3
<b>Slika 3.</b> Određivanje pozicije težišta.....	4
<b>Slika 4.</b> Četiri osnovne aerodinamičke sile koje djeluju na zrakoplov u letu .....	7
<b>Slika 5.</b> Princip stvaranja uzgona.....	8
<b>Slika 6.</b> Osi zrakoplova i momenti oko njih.....	10
<b>Slika 7.</b> Pozitivna, neutralna i negativna dinamička stabilnost.....	11
<b>Slika 8.</b> Težište pomaknuto prema prednjoj granici .....	12
<b>Slika 9.</b> Težište pomaknuto prema zadnjoj granici .....	13
<b>Slika 10.</b> Zrakoplov Airbus A320-214 zrakoplovne kompanije Croatia Airlines.....	14
<b>Slika 11.</b> Shema sustava Fly by wire .....	15
<b>Slika 12.</b> Operativna ograničenja pozicije težišta .....	19
<b>Slika 13.</b> Nova pozicija težišta uslijed pozitivnog momenta .....	19
<b>Slika 14.</b> Nova pozicija težišta uslijed negativnog momenta.....	20
<b>Slika 15.</b> Prazna lista opterećenja i uravnoteženja za zrakoplov A320-200 kompanije Freebird Airlines.....	21
<b>Slika 16.</b> Prvi dio liste opterećenja i uravnoteženja .....	23
<b>Slika 17.</b> Drugi dio liste opterećenja i uravnoteženja .....	24
<b>Slika 18.</b> Treći dio liste opterećenja i uravnoteženja .....	26
<b>Slika 19.</b> Lista opterećenja i uravnoteženja izvan operativnih ograničenja .....	28
<b>Slika 20.</b> Elektronski izrađena lista opterećenja i uravnoteženja .....	30
<b>Slika 21.</b> Primjer popunjavanja LMC-a .....	32
<b>Slika 22.</b> Brzine sloma uzgona za različite pozicije težišta.....	33
<b>Slika 23.</b> Limiti pozicije težišta za zrakoplov A320 .....	34
<b>Slika 24.</b> Varijacija specifičnog doleta ovisno o poziciji težišta i masi zrakoplova.....	35
<b>Slika 25.</b> Korekcija potrebne udaljenosti za slijetanje za zrakoplov A320 .....	36

## Popis tablica

<b>Tablica 1.</b> Broj aviona koje je operater dužan vagati svake 4 godine .....	5
<b>Tablica 2.</b> Mase putnika za zrakoplove s 20 ili više putničkih sjedala .....	6
<b>Tablica 3.</b> Mase putnika za zrakoplove s 19 ili manje putničkih sjedala .....	6
<b>Tablica 4.</b> Mase prtljaga za zrakoplove s 20 ili više putničkih sjedala.....	7
<b>Tablica 5.</b> Tehničke karakteristike zrakoplova A320 .....	16
<b>Tablica 6.</b> Letne karakteristike zrakoplova A320 .....	16
<b>Tablica 7.</b> Vrijednosti konstanti za različite Airbus tipove zrakoplova.....	17
<b>Tablica 8.</b> Podaci potrebni za ispunjavanje liste opterećenja i uravnoteženja .....	22
<b>Tablica 9.</b> Korekcija balansa zrakoplova Airbus A320 .....	31

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je \_\_\_\_\_ završni rad  
(vrsta rada)

isključivo rezultat mogega vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju upotrijebljene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedopušten način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem, također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom Utjecaj položaja težišta na performanse zrakoplova Airbus A320, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, 29.8.2023.

Rok Stipaničić

(ime i prezime, potpis)

