

Upravljačke površine i sustavi upravljanja zrakoplovima

Kos, Andrija

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

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:119:456927>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**

Andrija Kos

**UPRAVLJAČKE POVRŠINE I SUSTAVI
UPRAVLJANJA ZRAKOPLOVIMA**

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, 2021.

Zagreb, 11. svibnja 2021.

Zavod: **Zavod za zračni promet**
Predmet: **Osnove tehnike zračnog prometa**

ZAVRŠNI ZADATAK br. 6237

Pristupnik: **Andrija Kos (0135251908)**
Studij: **Promet**
Smjer: **Zračni promet**

Zadatak: **Upravljačke površine i sustavi upravljanja zrakoplovima**

Opis zadatka:

U uvodnim postavkama potrebno je definirati predmet istraživanja, objasniti svrhu i cilj istraživanja, dati osvrt na dosadašnja istraživanja te ukratko prikazati kompoziciju rada. Objasniti sile i momente koje se javljaju oko glavnih osi zrakoplova. Opisati ulogu upravljačkih sustava na zrakoplovima i prikazati podjelu na primarne i sekundarne upravljačke površine. Navesti i ostale vrste upravljačkih površina koji se koriste na zrakoplovima. Uz upravljačke površine, u radu je potrebno navesti i objasniti ulogu i vrste sustava za upravljanje zrakoplovom. Izvesti konkretne zaključke o analiziranoj temi i interpretirati rezultate istraživanja.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za
završni ispit


izv. prof. dr. sc. Andrija Vidović

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti

ZAVRŠNI RAD

**UPRAVLJAČKE POVRŠINE I SUSTAVI
UPRAVLJANJA ZRAKOPLOVIMA**

**AIRCRAFT CONTROL SURFACES AND CONTROL
SYSTEMS**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Andrija Vidović

Student: Andrija Kos

JMBAG:0135251908

Zagreb, rujan 2021.

SAŽETAK

Osnovne kretnje zrakoplova zasnovane su na temelju tri glavne osi zrakoplova, a to su vertikalna, longitudinalna i lateralna os zrakoplova. Vertikalna os zrakoplova omogućava skretanje nosa zrakoplova, longitudinalna os zrakoplova omogućava kotrljanje zrakoplova, a lateralna os omogućava podizanje ili spuštanje nosa zrakoplova. Upravljačke površine su jedan od važnijih elemenata zrakoplova koje omogućavaju gore navedene kretnje. Upravljačke površine dijele se na primarne i sekundarne. Upravljanje upravljačkim površinama omogućava se putem upravljačkih sustava, a to su mehanički sustav upravljanja zrakoplovom, hidraulični sustav upravljanja zrakoplovom te „Fly by wire“ sustav upravljanja zrakoplovom.

KLJUČNE RIJEČI: osi zrakoplova; upravljačke površine; sustavi upravljanja; krila; otpor; uzgon

SUMMARY

The basic movements of the aircraft are based on the three main axes of the aircraft and these are the vertical, longitudinal and lateral axes of the aircraft. The vertical axis of the aircraft allows the nose of the aircraft to turn, the longitudinal axis of the aircraft allows the aircraft to roll, and the lateral axis allows the nose of the aircraft to be raised or lowered. The control surfaces are one of the more important elements of the aircraft that allow the above movements. Control surfaces are divided into primary and secondary. Control of the control surfaces is enabled through the control systems, which are the mechanical control system of the aircraft, the hydraulic control system of the aircraft and the "Fly by wire" control system of the aircraft.

KEY WORDS: aircraft axes; control surfaces; control systems; wings; drag; lift

Sadržaj

1. UVOD	1
2. GLAVNE OSI ZRAKOPLOVA	3
2.1. Vertikalna os zrakoplova	3
2.2. Longitudinalna os zrakoplova.....	4
2.3. Lateralna os zrakoplova.....	5
3. PRIMARNE UPRAVLJAČKE POVRŠINE.....	7
3.1. Krilca.....	7
3.2. Kormilo pravca.....	10
3.3. Kormilo visine	11
4. SEKUNDARNE UPRAVLJAČKE POVRŠINE	13
4.1. Pretkrilca.....	13
4.2. Zakrilca.....	17
4.3. Trimeri	23
4.4. Aerodinamičke kočnice i spojleri.....	24
5. OSTALE UPRAVLJAČKE POVRŠINE	26
5.1. Canard	26
5.2. V – rep.....	27
5.3. Elevon.....	28
6. SUSTAVI UPRAVLJANJA ZRAKOPLOVOM.....	30
6.1. Mehanički sustav upravljanja zrakoplovom	30
6.2. Hidraulički sustav upravljanja zrakoplovom.....	33
6.3. Sustav upravljanja zrakoplovom <i>FLY BY WIRE</i>	35
7. ZAKLJUČAK.....	38
LITERATURA	39
POPIS SLIKA.....	41

1. UVOD

Problem upravljanja zrakoplovom datira još iz doba prvog leta braće Wright koji su shvatili da upravljačke površine igraju veliku ulogu što se tiče upravljanja zrakoplovom. Razvojem zrakoplovstva i samih zrakoplova koji su postali veći, teži i brži nagnalo je proizvođače na proizvodnju novih i efikasnijih upravljačkih površina koje se koriste i danas. Predmet istraživanja ovog rada su upravljačke površine i sustavi upravljanja zrakoplovima. Svrha istraživanja je predočiti te površine i sustave i način njihova funkcioniranja, dok je cilj rada detaljnije pojasniti principe rade pojedinih upravljačkih površina te sustava upravljanja.

Da bi se upravljalo upravljačkim površinama zrakoplova bilo je potrebno dizajnirati određene sustave upravljanja. Sve to i više objašnjeno je i analizirano u radu kroz 7 poglavlja, a to su:

1. Uvod
2. Glavne osi zrakoplova
3. Primarne upravljačke površine
4. Sekundarne upravljačke površine
5. Ostale upravljačke površine
6. Sustavi upravljanja zrakoplovom
7. Zaključak

U prvom, uvodnom dijelu, definirani su predmet, svrha i cilj istraživanja te je predočena struktura rada prema poglavljima.

U drugom poglavlju rada opisane su glavne osi zrakoplova oko kojih zrakoplov izvodi svoje manevre.

U trećem poglavlju navedene su i objašnjene primarne upravljačke površine te kako one utječu na sami let zrakoplova.

U četvrtom poglavlju navedene su i objašnjene sekundarne upravljačke površine te kako one utječu na sami let zrakoplova.

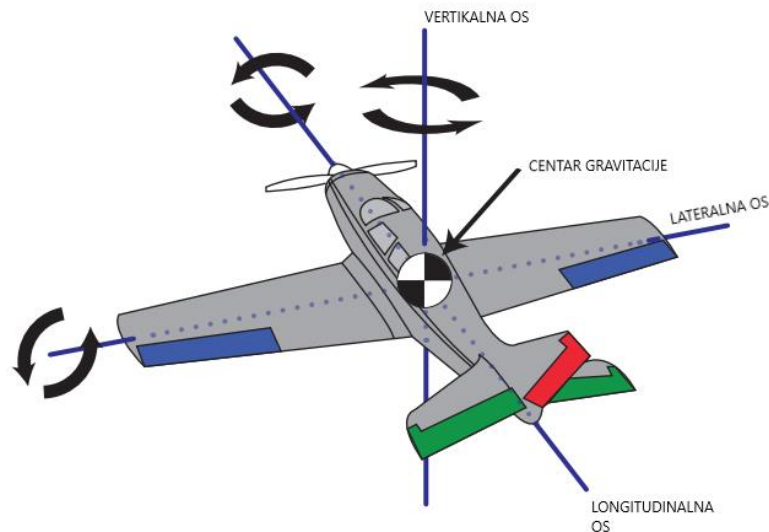
U petom poglavlju navedene su i objašnjene ostale upravljačke površine koje nisu toliko zastupljene kod suvremenih zrakoplova.

U šestom poglavlju rada navedeni su i objašnjeni sustavi upravljanja zrakoplovom, te kako oni upravljaju upravljačkim površinama u prethodno navedenim poglavljima.

U sedmom, zaključnom dijelu rada, predočena su zaključna razmišljanja o analiziranoj tematici završnog rada.

2. GLAVNE OSI ZRAKOPLOVA

Osi zrakoplova su zamišljene linije koje prolaze kroz centar gravitacije (CG) zrakoplova. Tri su glavne osi zrakoplova: vertikalna os, longitudinalna os i lateralna os (slika 1).



Slika 1. Centar gravitacije i glavne osi zrakoplova

IZVOR: https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/axes_control_surfaces_k-4.pdf
(Pristupljeno: svibanj 2021.)

Centar gravitacije (u daljnjem tekstu CG) predstavlja točku za koju se pretpostavlja da je u njoj koncentrirana ukupna težina zrakoplova. Položaj CG utječe na stabilnost i upravljivost zrakoplova. CG nije nužno fiksna točka, odnosno položaj CG ovisi o raspodjeli težina u zrakoplovu. Stoga kretanje položaja CG mora biti unutar određenih graničnih vrijednosti koje utvrđuje proizvođač zrakoplova.¹

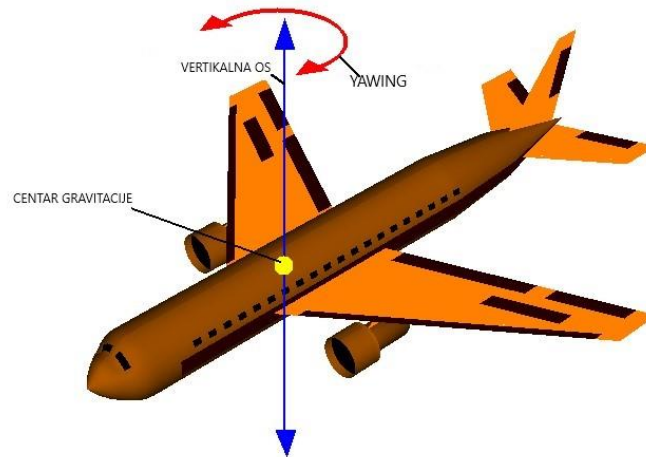
2.1. Vertikalna os zrakoplova

Vertikalna os zrakoplova prolazi od vrha do dna kroz CG zrakoplova. Kretanjem zrakoplova oko vertikalne osi izvodi se pokret koji se naziva *yawing*, odnosno

¹ Kesić P. Osnove aerodinamike Zagreb Fakultet strojarstva i brodogradnje 2003.

zakretanje nosa zrakoplova u lijevo ili desno uz pomoć kormila koje se nalazi na vertikalnom stabilizatoru zrakoplova (slika 2).

Kod zakretanja kormila pravca zrakoplova ulijevo nos zrakoplova skreće lijevo, a kod zakretanja kormila pravca udesno nos zrakoplova skreće desno.

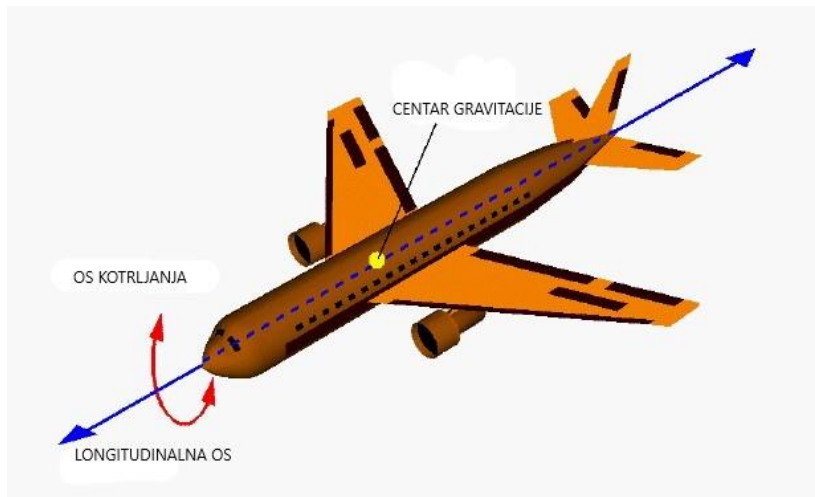


Slika 2. Prikaz kretanja zrakoplova oko vertikalne osi

IZVOR: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/yaw.html> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

2.2. Longitudinalna os zrakoplova

Longitudinalna os zrakoplova je os koja se prostire od vrha nosa zrakoplova pa do kraja repa zrakoplova te pritom prolazi kroz CG zrakoplova. Zakretanjem oko longitudinalne osi zrakoplov se „kotrlja“ odnosno naginje u lijevu ili desnu stranu (slika 3).



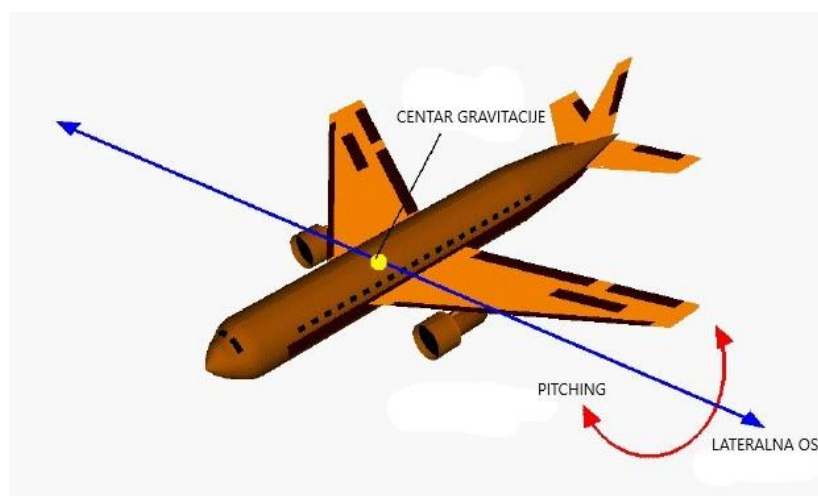
Slika 3. Prikaz kretanja zrakoplova oko longitudinalne osi

IZVOR: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/roll.html> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

„Kotrljanje“ se izvodi uz pomoć krilca koja se nalaze na stražnjem dijelu krila zrakoplova. Krilca se pomiču u suprotnim smjerovima. Kada je lijevo krilce spuštено desno je dignuto, a kada je desno spuštено lijevo je dignuto.

2.3. Lateralna os zrakoplova

Lateralna os zrakoplova prostire se od vrha lijevog krila do vrha desnog krila te pritom prolazi kroz CG zrakoplova. Zakretanjem zrakoplova oko lateralne osi nos zrakoplova se podiže ili ponire (slika 4).



Slika 4. Prikaz kretanja zrakoplova oko lateralne osi

IZVOR: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/pitch.html> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

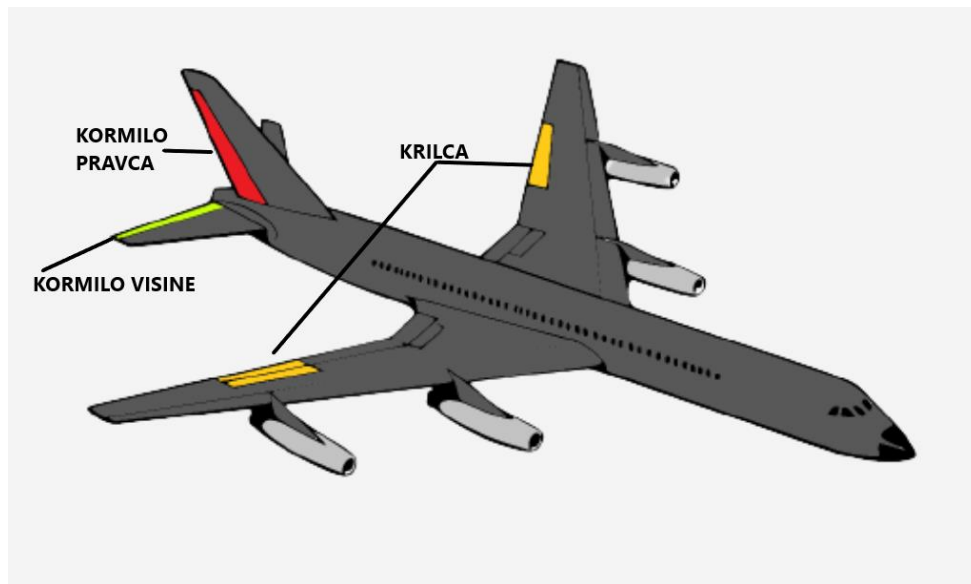
Kretanje zrakoplova oko lateralne osi (engl. *pitching*) izvodi se pomoću krilca odnosno elevatora koji se nalaze na horizontalnom stabilizatoru. Elevatori rade u paru i to na način da kada su spušteni nos zrakoplova ponire, a kada su dignuti nos zrakoplova se podiže.

3. PRIMARNE UPRAVLJAČKE POVRŠINE

Primarne upravljačke površine zrakoplova su posebno osmišljene površine koje služe za obavljanje osnovnih manevarskih radnji kao što su skretanje, poniranje i propinjanje.

Primarne upravljačke površine zrakoplova (slika 5) su:

- krilca,
- kormilo pravca i
- kormilo visine.



Slika 5. Primarne upravljačke površine

IZVOR: <https://crave2learn.com/primary-control-surfaces-of-an-aircraft/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

3.1. Krilca

Krilca su jedna od tri osnovnih upravljačkih površina na zrakoplovu. Krilca su upravljačke površine zglobno ugrađene, koje se nalaze na stražnjem djelu oba krila, a služe za upravljanje i okretanje zrakoplova oko njegove longitudinalne odnosno uzdužne osi. Krilca se pomiču u suprotnim smjerovima u odnosu jedno na drugo te se njima upravlja ručno ili pomoću autopilota. Kod velikih zrakoplova montiraju se dva para krilca na svako pojedino krilo.

Pri malim brzinama oba krilca su aktivna, te se s povećanjem brzine zrakoplova koristi samo unutarnje krilce dok je vanjsko krilce zaključano. Zbog toga što su krilca postavljena na vanjskim vrhovima krila dovoljan je vrlo mali kut zakretanja da zrakoplov izvede željeni manevar.

Krilca se aktiviraju na način da pilot pomiče upravljačku palicu lijevo ili desno ovisno u koju stranu želi zaokrenuti zrakoplov (slika 6). Kod pomicanja upravljačke palice ulijevo odnosno udesno na jednom kraju krila povećati će se uzgon te će se krilce spustiti dok će se na drugom kraju krila uzgon smanjiti te će se krilce podignuti. Oba krilca se otklanjaju za isti kut.

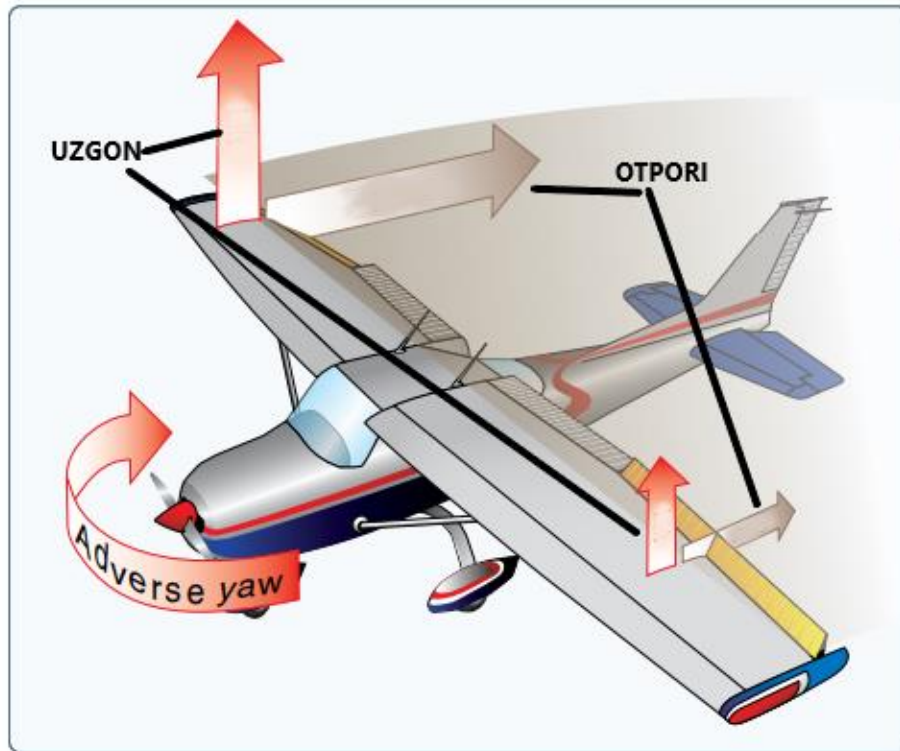


Slika 6. Položaj krilca kod pomicanja upravljačke palice

IZVOR: <https://www.aircraftsystemstech.com/p/flight-control-surfaces-directional.html>
(Pristupljeno: svibanj 2021.)

Kod uporabe krilca odnosno rotacije zrakoplova oko longitudinalne osi zbog povećanja napadnog kuta uvijek se javlja i nepoželjna rotacija oko normalne osi tj. *adverse yaw*. Napadni kut uvijek se povećava samo na vrhu krila koje ide prema gore. *Adverse yaw* javlja se zbog povećanja inducirano otpora na krilcu koje je spušteno prema dolje, dok se na krilcu podignutom prema gore pojavljuje otpor profila. Zbog povećanja navedenih otpora dolazi do istovremene rotacije zrakoplova oko normalne osi tako da pozitivnom valjanju odgovara negativno skretanje i obratno (slika 7). Zbog te sile nos zrakoplova skrenut će u suprotnom smjeru od smjera prema kojem je pilot želio preusmjeriti zrakoplov. *Adverse yaw* javlja se kod svih krilaca na svim

zrakoplovima samo što se kod nekih zrakoplova ne primjećuje. Dizajneri zrakoplova smislili su način za smanjenje pojavljivanja *Adverse yaw* efekta na način da se i na podignutom krilcu pojavljuje povećani otpor što za rezultat daje podjednake otpore na oba krilca te nema zakretanja nosa u niti jednu stranu.²



Slika 7. Nepoželjno skretanje ili *adverse yaw*

IZVOR: <https://studyflying.com/adverse-yaw/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

Utjecaj nepoželjnog skretanja može se riješiti na više načina, a dva najčešća načina su:

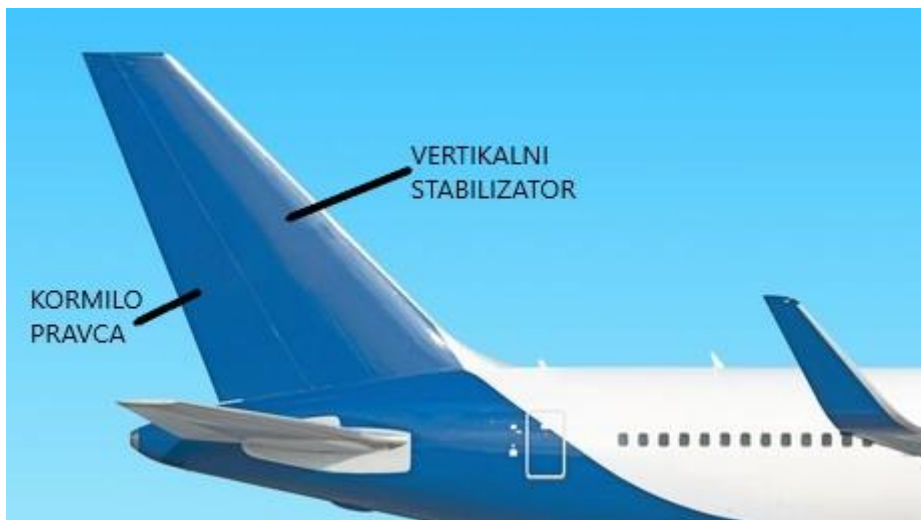
- Spajanje krilca i kormila pravca – krilca i kormilo međusobno se povezuju oprugama koje omogućavaju korekciju otpora krilca na način da se kormilo pravca otklanja automatski kada se otkloni i krilce.
- Diferencijalna krilca – izvedeno je na način da se krilce koje se zakreće prema gore otkloni za dva do tri puta veći kut u odnosu na krilce koje se zakreće prema dolje.

²Aerocorner; How ailerons work; preuzeto sa: <https://aerocorner.com/blog/how-aileron-work/> (Pristupljeno: srpanj 2021.)

Načini koji utječu na smanjenje utjecaja nepoželjnog skretanja, a nisu toliko česti su: kormilo pravca, *flaperoni* i „zamrznuta“ krilca.

3.2. Kormilo pravca

Vertikalna repna površina ili kormilo pravca služi za stabilizaciju zrakoplova oko vertikalne osi te omogućava skretanja nosa zrakoplova ulijevo ili udesno, te je ujedno i jedna od tri osnovne upravljačke površine. Kormilo pravca postavljeno je na vertikalni stabilizator na stražnjem dijelu, odnosno repu zrakoplova. Vertikalna površina zrakoplova sastoji se od dva dijela: nepomičnog dijela odnosno vertikalnog stabilizatora te pomičnog dijela odnosno kormila pravca (slika 8).³ Kormilo pravca koristi se za kontrolu položaja nosa zrakoplova, ali kormilo pravca nije namijenjeno za skretanje zrakoplova.



Slika 8. Vertikalne repne površine

IZVOR: <https://www.shutterstock.com/image-photo/modern-airplane-tail-side-view-isolated-1672265842> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

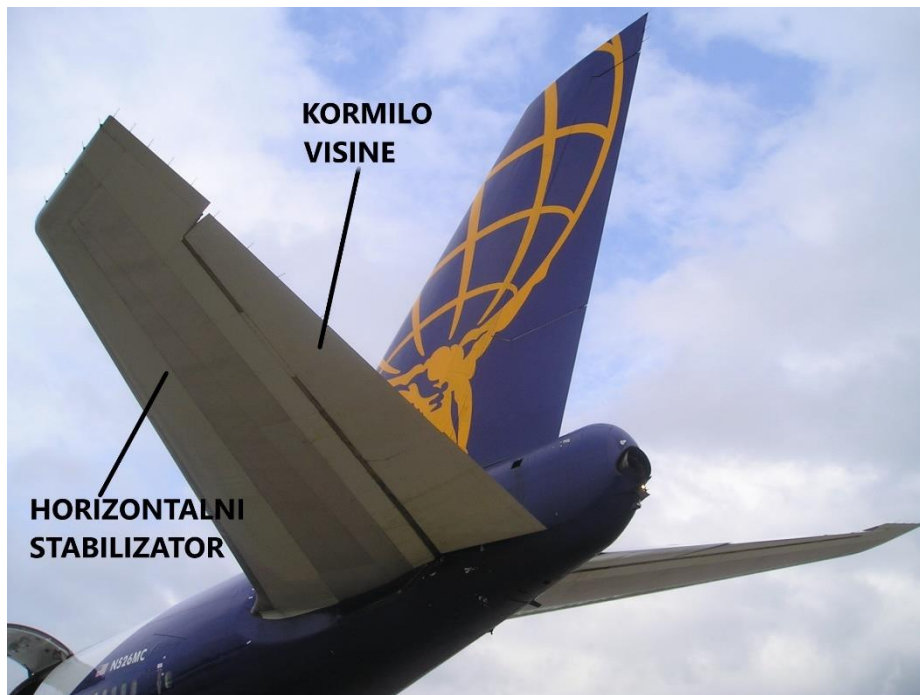
Kormilom pravca upravlja pilot pritiskanjem nogom papučica koje su mehanički povezane s kormilom pravca. Pritiskanjem lijeve papučice kormilo se otklanja u lijevu stranu i obratno. Učinkovitost kormila pravca očituje se pri velikim brzinama jer je potreban mali otklon da bi zrakoplov promijenio smjer dok kod malih brzina je potreban puni otklon za promjenu smjera zrakoplova.

³ Aerocorner; How airplane rudder works; preuzeto sa: <https://aerocorner.com/blog/how-airplane-rudder-works/> (Pristupljeno: srpanj 2021.)

U praksi za skretanje zrakoplova koriste se i krilca i kormilo pravca. Zato što nepravilno zakretanje krilca može dovesti do nekontroliranog kotrljanja zrakoplova. Stoga se krilca i kormilo pravca koriste sinkronizirano.⁴

3.3. Kormilo visine

Horizontalna repna površina ili kormilo visine služi za kontrolu kretanja zrakoplova oko lateralne osi te omogućava podizanje i spuštanje zrakoplova na željene visine. Smještena je na stražnjem dijelu zrakoplova, odnosno repu. Horizontalna repna površina sastoji se od: pomičnog dijela odnosno kormila visine te nepomičnog dijela odnosno horizontalnog stabilizatora (slika 9). Osnovni zadatak kormila visine jest osigurati stabilnost zrakoplova kako bi mogao letjeti ravno. Kormilo pravca važno je kod polijetanja zrakoplova, jer se podizanjem krilaca na horizontalnom stabilizatoru podiže i nos zrakoplova što olakšava odvajanje zrakoplova od zemaljske površine, odnosno uzlijetanje.⁵



Slika 9. Horizontalne repne površine

IZVOR: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Aircraft_tail.JPG (Pristupljeno: svibanj 2021.)

⁴ Cfinotebook; Flight Control Systems; preuzeto sa: <https://www.cfinotebook.net/notebook/operation-of-aircraft-systems/flight-controls> (Pristupljeno: srpanj 2021.)

⁵ National Aeronautics and Space Administration (NASA); Horizontal stabilizer- elevator; preuzeto sa: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/elv.html> (Pristupljeno: srpanj 2021.)

Kormilom visine upravlja pilot pomoću upravljačke palice. Pomicanjem upravljačke palice prema naprijed kormilo visine spušta se prema dolje te se stvara aerodinamička sila koja djeluje prema gore te se nos spušta prema dolje, a povlačenjem palice prema pilotu kormilo visine se podiže te se uz pomoć aerodinamičke sile koja djeluje prema dolje nos zrakoplova podiže prema gore.

4. SEKUNDARNE UPRAVLJAČKE POVRŠINE

Sekundarne upravljačke površine zrakoplova su dodatne površine postavljene na napadnoj ivici krila te na stražnjem dijelu krila. Sekundarne upravljačke površine služe za povećanje ukupne površine krila, a samim time i povećanje uzgona, otpora te povećanje i smanjenje brzine zrakoplova.

Osnovne sekundarne upravljačke površine su:

- pretkrilca,
- zakrilca,
- trimeri i
- aerodinamičke kočnice i spojleri.

4.1. Pretkrilca

Pretkrilca (slika 10) su dodatne površine postavljene na napadnoj ivici krila. Njihovim pomicanjem prema naprijed i prema dolje povećava se ukupna površina krila, odnosno povećava se zakrivljenost gornjake. Osnovna uloga pretkrilaca je poboljšanje opstrujavanja krila pri velikim napadnim kutovima. Pretkrilca predstavljaju odsječak glavnog aeroprofila krila. Neaktivirana pretkrilca sljubljena su s osnovnim aeroprofilom krila, dok se aktivirana pretkrilca odvajaju od osnovnog aeroprofila te stvaraju procjep.⁶

Pretkrilca mogu biti:

- Fiksna – pretkrilca koja ne mogu mijenjati svoj položaj u odnosu na krilo.
- Automatska – pretkrilca koja se sama pri velikim brzinama i napadnim kutovima aktiviraju.
- Upravljiva – pretkrilca koje pilot mehaničkim putem uvlači odnosno izvlači ovisno o potrebi.

⁶ Aerocorner; How Do Leading Edge Slats Work? ; preuzeto sa: <https://aerocorner.com/blog/how-do-leading-edge-slats-work/> (Pristupljeno: srpanj 2021.)

Osnovne vrste pretkrilaca su:

- Fiksno pretkrilce s procijepom
- Upravljivo pretkrilce s procijepom
- Zakretni nos pretkrilca
- Krugerovo pretkrilce



Slika 10. Pretkrilca zrakoplova

IZVOR: <https://forum.il2sturmovik.com/topic/25496-leading-edge-wing-slats/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

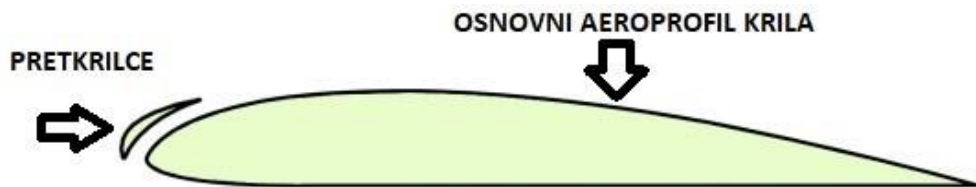
Fiksno pretkrilce s procijepom

Najjednostavniji oblik pretkrilca s velikim stupnjem zakrivljenosti aeroprofila. Pretkrilce s procijepom postavlja se na napadni brid krila. Kod malih napadnih kutova odnosno pri velikim brzinama zrakoplova fiksno pretkrilce s procijepom (slika 11) je priljubljeno uz osnovni aeroprofil krila, a kod velikih napadnih kutova odnosno malih brzina zrakoplova pretkrilce se odvaja od osnovnog aeroprofila krila te se otvara procijep između pretkrilca i krila. Kada je pretkrilce aktivirano dio strujnica sa donje strane krila prolaziti će kroz procijep te će opstrujavati gornju stranu krila. To se događa zbog porasta tlaka ispod donjake pretkrilca i samog krila dok se na gornjaci stvara podtlak. Ova pojava ima za rezultat smanjenje brzine strujanja na donjaci, odnosno povećanje brzine strujanja na gornjaci. Kod malih napadnih kutova pretkrilce nema

utjecaja na sami koeficijent uzgona jer ne dolazi do nikakvih promjena u strujanju, prisutno je neznatno povećanje koeficijenta otpora. Uporabom ovog pretkrilca zrakoplov je stabilniji i pokretljiviji pri većim napadnim kutovima te se vrijednost kritičnog napadnog kuta može povećati i za preko 60%, a vrijednost koeficijenta uzgona i za do 50%.⁷

Nedostatci ovog pretkrilca su:

- povećanje ukupnog otpora krila,
- povećanje ukupne težine zrakoplova,
- njihovom uporabom povećava se napadni kut slijetanja odnosno polijetanja, a samim time se povećava i dužina stajnog trapa.



Slika 11. Fiksno pretkrilce s procijepom

IZVOR: <https://ultralightdesign.wordpress.com/2017/10/23/all-in-a-flap/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

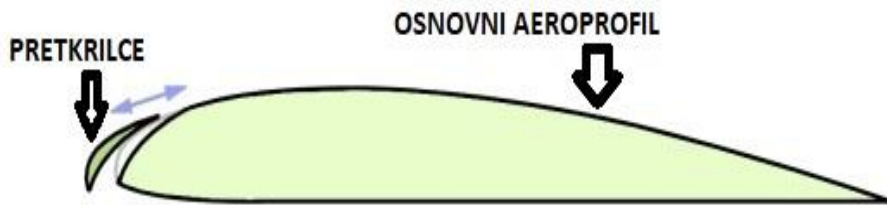
Ova vrsta pretkrilaca upotrebljava se kod manjih, sporih zrakoplova koji koriste kraće staze za polijetanje odnosno slijetanje.

Upravljivo pretkrilce s procijepom

Upravljivo ili automatsko pretkrilce s procijepom (slika 12) kod malih je napadnih kutova priljubljeno uz osnovni aeroprofil čime se gotovo smanjuje porast koeficijenta otpora u odnosu na fiksno pretkrilce. Samo aktiviranje ovog pretkrilca događa se na velikim napadnim kutovima. Tijekom leta zrakoplova, pri većim napadnim kutovima na donjaci se stvara nizstrujno od prednjeg brida povećani tlak koji otvara procijep između pretkrilca i osnovnog krila te omogućuje strujanje zraka i upravljanje graničnim slojem te se odgađa prerano odvajanje strujnica. Pilot odlučuje o položaju i veličini procijepa.

⁷ Kesić P. Osnove aerodinamike Zagreb Fakultet strojarstva i brodogradnje 2003.

Upravljivo pretkrilce s procijepom u nekim slučajevima koristi se u kombinaciji s zakrilcem. Kombinacija pretkrilca i zakrilca rezultira maksimalnim povećanjem koeficijenta uzgona.⁸

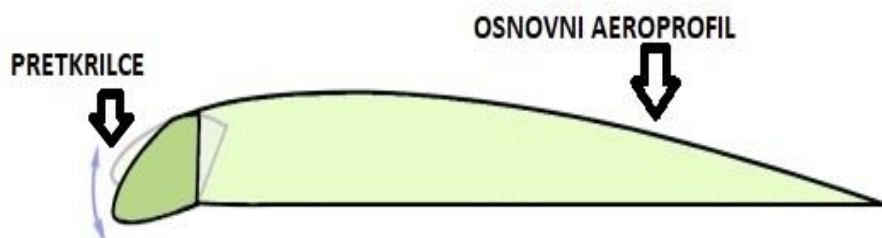


Slika 12. Upravljivo pretkrilce s procijepom

IZVOR: <https://ultralightdesign.wordpress.com/2017/10/23/all-in-a-flap/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

Zakretni nos pretkrilca

Kod velikih brzina upotrebljavaju se tanki aeroprofil s malim polumjerom zakrivljenosti prednjeg djela (nosa) aeroprofila. Zbog male zakrivljenosti prednjeg kraja fluidna struja se ne može prilagoditi te se već kod umjerenih napadnih kutova na gornjaci u blizini prednjeg brida formira mjehurasta zona odvajanja koja se i kod nezatnog povećanja napadnog kuta može proširiti do izlaznog brida te smanjiti koeficijent uzgona. Zbog toga se nos aeroprofila radi zakretnim oko zgloba u jednoj točki kako bi se već kod nezatnih napadnih kutova izbjeglo odvajanje graničnog sloja, odnosno kako bi se kontura gornjake mogla lakše prilagoditi većim napadnim kutovima. (slika 13).⁹



Slika 13. Zakretni nos pretkrilca

IZVOR: <https://ultralightdesign.wordpress.com/2017/10/23/all-in-a-flap/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

⁸ Kesić P. Osnove aerodinamike Zagreb Fakultet strojarstva i brodogradnje 2003.

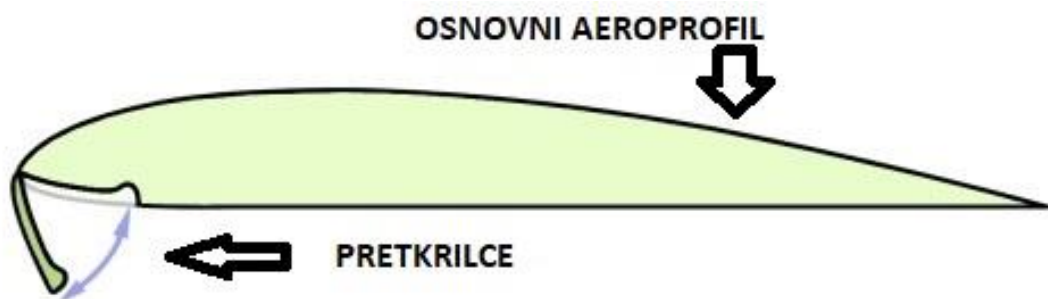
⁹ Kesić P. Osnove aerodinamike Zagreb Fakultet strojarstva i brodogradnje 2003.

Posljedice djelovanja ovog pretkrilca su:

- povećanje zakrivljenosti aeroprofila,
- smanjenje prividnog napadnog kuta,
- upravljanje graničnim slojem.

Krugerovo pretkrilce

Postoje dvije vrste ovog pretkrilca, a to su fiksna pretkrilca i pretkrilca s promjenjivom zakrivljenošću. Promjenjivo pretkrilce savija se za određeni broj stupnjeva ovisno o potrebi. Neaktivno pretkrilce uklopljeno je u površinu donjake neposredno iza prednjeg brida te je okretno oko zgloba. Krugerovo pretkrilce je jedino koje nema procijep. Aktivirano pretkrilce izvlači se ispod donje površine krila te povećava ukupnu površinu aeroprofila te uzgon (slika 14). Djelovanje ovog pretkrilca temelji se na kutu zakretanja, a najveći kut zakretanja je 140° , te na dužini tetive krilca. Kutovi zakretanja koji su manji od 100° imaju negativan učinak na porast koeficijenta uzgona.¹⁰



Slika 14. Krugerovo pretkrilce

IZVOR: <https://ultralightdesign.wordpress.com/2017/10/23/all-in-a-flap/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

4.2. Zakrilca

Zakrilca (slika 15) su pokretne aerodinamičke površine koje služe za povećanje uzgona na način da povećavaju zakrivljenosti krila. Osim povećanja uzgona povećavaju i aerodinamički otpor. Zakrilca su smještena sa stražnje strane krila

¹⁰ Kesić P. Osnove aerodinamike Zagreb Fakultet strojarstva i brodogradnje 2003.

odnosno na izlaznoj ivici krila prema trupu. Povećanje uzgona pomoću zakrilca pogoduje kod polijetanja zbog male brzine zrakoplova te olakšava polijetanje, također se njihovom uporabom i smanjuje potrebna dužina uzletno-sletne staze kod polijetanja odnosno slijetanja. ¹¹

Osnovne vrste zakrilaca su:

- obično zakrilce,
- podijeljeno zakrilce,
- podijeljeno zakrilce s translacijom,
- zakrilce s procijepom,
- Fowlerovo zakrilce,
- zakrilce s dva procijepa.



Slika 15. Zakrilca zrakoplova

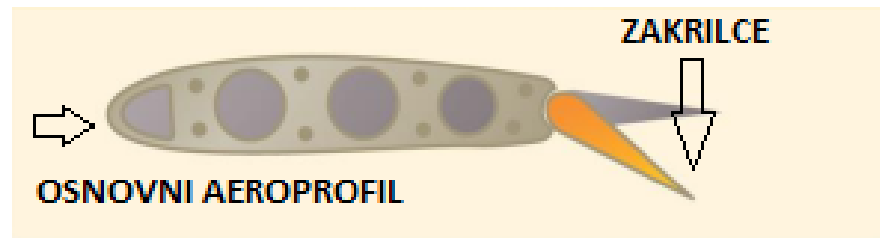
IZVOR: <https://avioradar.hr/index.php/hr/opcenito/882-edukacija-koje-su-upravljacke-povrsine-i-kako-se-njima-upravlja> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

Obično zakrilce

Obično zakrilce (slika 16) jedno je od najjednostavnijih zakrilaca. Ovo zakrilce radi na principu da pilot zrakoplova otklanja zakrilce za željeni kut što ima za posljedicu povećanje strujanja zraka, a samim time i povećanje uzgona. Optimalni kut zakretanja ovog zakrilca je nalazi se u rasponu od 50° do 60°. Zakrilce s manjim kutom

¹¹ Kesić P. Osnove aerodinamike Zagreb Fakultet strojarstva i brodogradnje 2003.

zakretanja koristi se kod polijetanja, dok se veći kut odklona zakrilca koristi kod slijetanja jer veći kut odklona ima za posljedicu i veće otpore. Ova zakrilca su na neki način ograničena u stvaranju uzgona jer zrak koji opstrujava krilo može izgubiti energiju što rezultira odvajanjem strujnica od same površine krila.¹²



Slika 16. Obično zakrilce

IZVOR: <http://learntoflyblog.com/2015/10/19/aircraft-systems-flaps/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

Povećanjem koeficijenta otpora reducira se potrebna dužina uzletno-sletne staze kod slijetanja. Ova vrsta zakrilca koristi se kod većine manjih zrakoplova.

Podijeljeno zakrilce

Podijeljeno zakrilce (slika 17) izvedeno je kao ravna pločasta površina koja je zglobno ugrađena iznad donjake neposredno blizu stražnjeg brida, te donjaka ostaje nepokretna dok se zakrilce zakreće za željeni kut prema dolje. Zbog prostora koji nastaje između spuštenog zakrilca i krila dolazi do odbijanja strujnica s donje strane krila što rezultira stvaranjem povećanog uzgona, ali kao i kod običnih zakrilaca stvara se i dodatni otpor.¹³

Ovo zakrilce aktivira se na način da ga pilot odkloni za željeni kut prema dolje. Kod postupka polijetanja zakrilce se otklanja za mali kut u rasponu od 10° do 20° dok se kod postupka slijetanja zakrilca otklanjaju za veći kut u rasponu od 50° do 60°.

¹²Aerocorner; 7 Different Types of Aircraft Flaps; preuzeto sa: <https://aerocorner.com/blog/types-of-aircraft-flaps/> (Pristupljeno: srpanj 2021.)

¹³Aerocorner; 7 Different Types of Aircraft Flaps; preuzeto sa: <https://aerocorner.com/blog/types-of-aircraft-flaps/> (Pristupljeno: srpanj 2021.)



Slika 17. Podijeljeno zakrilce

IZVOR: <http://learntoflyblog.com/2015/10/19/aircraft-systems-flaps/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

Otklanjanjem zakrilca povećava se zakrivljenost aeroprofila, a samim time povećava se i koeficijent uzgona. Povećanjem zakrivljenosti aeroprofila omogućava se upravljanje graničnim slojem odnosno povećava se razlika među tlakovima na donjaci i gornjaci. Strujanjem zračne struje duž donje strane donjake, a zatim i duž donje strane zakrilca stvara podtlak u zoni između krila i spuštenog zakrilca. Nastali podtlak ubrzava strujanje zračne struje u graničnom sloju na gornjaci. Posljedica ubrzanja strujanja zračne struje je snižavanje tlaka te odgađanje odvajanja graničnog sloja kod velikih napadnih kutova.

U odnosu na obično zakrilce podijeljeno zakrilce za isti kut zakretanja omogućava veće povećanje koeficijenta uzgona, daje veći kritični kut, veći kut nultog uzgona te povećanje porasta koeficijenta otpora zbog šireg vrtložnog traga iza aeroprofila.

Ovo zakrilce koristi se kod zrakoplova male ukupne težine, koji postižu male brzine te imaju mali dolet.¹⁴

Podijeljeno zakrilce s translacijom

Podijeljeno zakrilce s translacijom ili Zap zakrilce (slika 18) je zakrilce izvedeno kao ravna pločasta površina ugrađena ispod donje strane donjake. Zap zakrilce se osim zakretanja može i translirati za čitavu svoju duljinu do stražnjeg dijela brida krila.

¹⁴ Kesić P. Osnove aerodinamike Zagreb Fakultet strojarstva i brodogradnje 2003



Slika 18. Podijeljeno zakrilce s translacijom

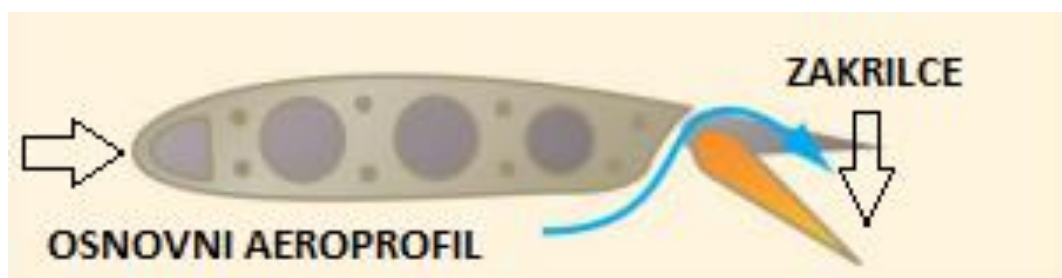
IZVOR: <http://learntoflyblog.com/2015/10/19/aircraft-systems-flaps/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

Pogodnost ovog zakrilca očituje se u povećanju ukupne površine aeroprofila što ima za posljedicu povećanje koeficijenta uzgona te omogućavanje upravljanja graničnim slojem.¹⁵

Zakrilce s procijepom

Jedno od najčešćih zakrilaca koja se koriste kod većine današnjih komercijalnih zrakoplova. Zakrilce s procijepom izgledom je slično običnom zakrilcu, osim što je ovdje prisutan procijep između krila i zakrilca.¹⁶

Zakrilce s procijepom (slika 19) izvedeno je na način da je u neaktiviranom stanju sastavni dio krila koji uključuje stražnji brid. Kada je zakrilce aktivirano ono se zakreće za željeni kut te se istovremeno između krila i zakrilca stvara profilirani procijep. Najpogodniji kut zakretanja zakrilca je 50° .



Slika 19. Zakrilce s procijepom

IZVOR: <http://learntoflyblog.com/2015/10/19/aircraft-systems-flaps/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

¹⁵ Kesić P. Osnove aerodinamike Zagreb Fakultet strojarstva i brodogradnje 2003

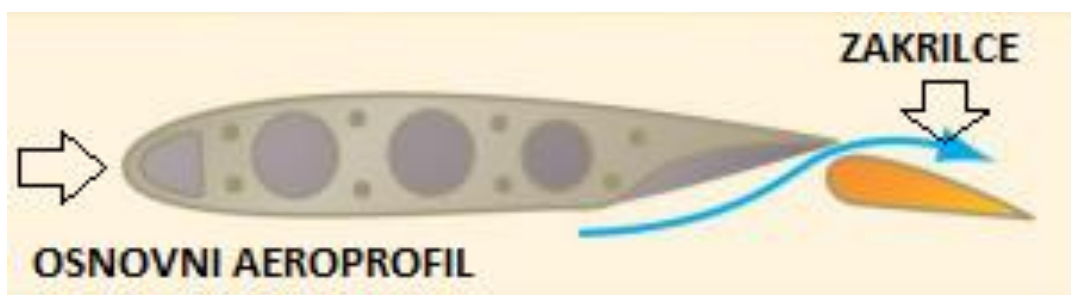
¹⁶ Aerocorner; 7 Different Types of Aircraft Flaps; preuzeto sa: <https://aerocorner.com/blog/types-of-aircraft-flaps/> (Pristupljeno: srpanj 2021.)

Djelovanje ovog zakrilca temelji se na povećanju zakrivljenosti aeroprofila i na upravljanju graničnim slojem. Kada su zakrilca aktivirana s donje strane krila i zakrilca stvara se nadtlak u odnosu na tlak iznad procijepa. Nakon toga se formira strujanje koje se kroz procijep upuhuje iznad gornjake zakrilca čime se sprječava odvajanje graničnog sloja. S takvim načinom upravljanja graničnim slojem uz povećanu zakrivljenost aeroprofila povećava se maksimalni koeficijent uzgona više nego kod običnog i podijeljenog zakrilca. Kod ovog zakrilca koeficijent otpora raste slabije u odnosu na druga zakrilca. ¹⁷

Fowlerovo zakrilce

Fowlerovo zakrilce (slika 20) izvedeno je na sličan način kao i zakrilce s procijepom s razlikom da Fowlerovo zakrilce ima mogućnost translacije iz svog ležišta za cijelu duljinu zakrilca, a istovremeno se zakreće za željeni kut.

Fowlerovo zakrilce zastupljeno je kod velikog broja mlaznih zrakoplova koji trebaju puno uzgona za podizanje te ograničene količine otpora. Također imaju niz utora na zakrilcima koju dodaju energiju strujanju što rezultira još većim uzgonom. ¹⁸



Slika 20. Fowlerovo zakrilce

IZVOR: <http://learntoflyblog.com/2015/10/19/aircraft-systems-flaps/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

Djelovanje ovog zakrilca bazira se na povećanju zakrivljenosti i upravljanju graničnim slojem te znatno povećanje aerodinamičke površine. Fowlerovo zakrilce daje najveće povećanje maksimalne vrijednosti koeficijenta uzgona nego ostala zakrilca, ima vrlo mali koeficijent otpora. Zbog male relativne debljine kritični napadni

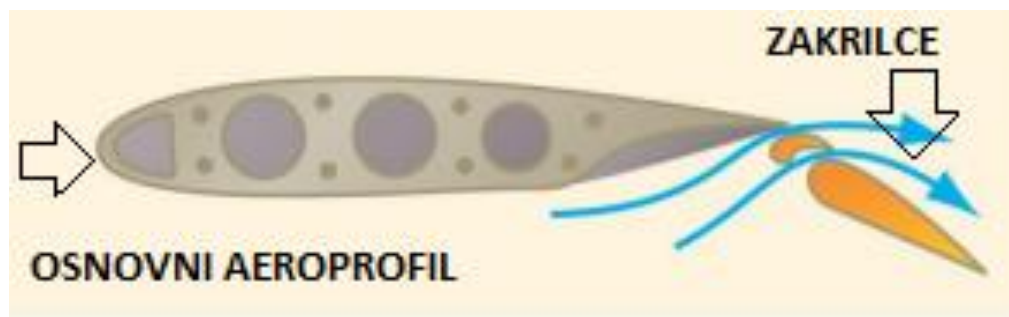
¹⁷ Kesić P. Osnove aerodinamike Zagreb Fakultet strojarstva i brodogradnje 2003

¹⁸ Aerocorner; 7 Different Types of Aircraft Flaps; preuzeto sa: <https://aerocorner.com/blog/types-of-aircraft-flaps/> (Pristupljeno: srpanj 2021.)

kut se znatno smanjuje. Ovo zakrilce koristi se u kombinaciji s dva ili tri procijepa te ga koristi većina velikih zrakoplova.

Zakrilce s dva procijepa

Zakrilce s dva procijepa (slika 21) po izvedbi i funkciji slično običnom zakrilcu s procijepom. Razlika je u tome što zakrilce s dva procijepa ima ugrađen deflektor koji je postavljen između osnovnog aeroprofila i zakrilca. Deflektor usmjerava zračnu struju kroz dva procijepa. Neaktivirano zakrilce uvučeno je u unutrašnjost osnovnog krila te postaje dio krila.



Slika 21. Zakrilce s dva procijepa

IZVOR: <http://learntoflyblog.com/2015/10/19/aircraft-systems-flaps/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

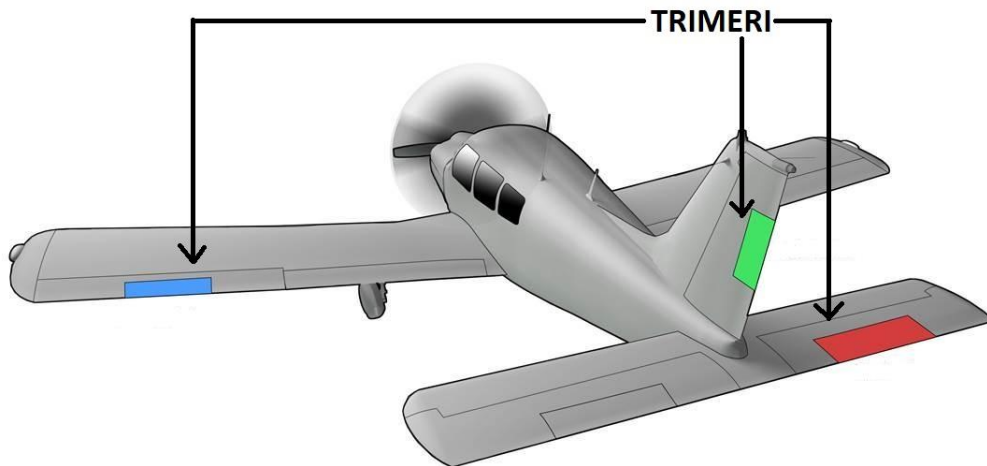
Djelovanje ovog zakrilce isto je kao i kod ostalih zakrilaca, a to je povećavanje zakrivljenosti aeroprofila, povećavanje ukupne aerodinamičke površine te upravljanje graničnim slojem.¹⁹

4.3. Trimeri

Trimeri (slika 22) su male upravljačke pokretne površine smještene na izlaznoj ivici neke druge veće sekundarne površine. Uloga trimera je da smanji potrebnu količinu sile koju pilot treba primijeniti pri upravljanju upravljačkom palicom s namjerom da izvede željeni manevar. Bez trimera piloti moraju koristiti jaku veliku silu kako bi zrakoplov držali u stabilnosti, odnosno kako bi mogli upravljati samim zrakoplovom. Na

¹⁹ Kesić P. Osnove aerodinamike Zagreb Fakultet strojarstva i brodogradnje 2003

velikim visina leta zrakoplova vjetrovi su puno jači te su zbog toga i otpori jači. U takvim uvjetima svrha trimera je najizraženija. Nadalje trimeri služe i za ublažavanje zamora materijala jer bez trimera određeni dijelovi zrakoplova bili bi konstantno izloženi povećanim otporima te bi s vremenom došlo do oštećenja tih dijelova, a uz njih i oštećenja samih zrakoplova. Kada su trimeri aktivirani otklanjaju se u suprotnu stranu u odnosu na komande leta.²⁰



Slika 22. Trimeri zrakoplova

IZVOR: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2017/december/flight-training-magazine/what-am-i-trim-tab> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

4.4. Aerodinamičke kočnice i spojleri

Aerodinamičke kočnice su dodatne površine smještene na krilima, trupu ili repu zrakoplova. U većini slučajeva nalaze se na krilima, dok rjeđe na trupu, jer na krilima dolazi do povećanja otpora i kod neznatnih poremećaja zračne struje što je pogodno kod slijetanja. Sastoje se od panela koji svojim oblikom odgovaraju ostalim zrakoplovnim površinama. Osnovna uloga aerodinamičkih kočnica jest povećanje koeficijenta otpora, smanjivanje brzine zrakoplova te povećanje prilaznog kuta čime se

²⁰ Monroe Aerospace; What Are Trim Tabs on Airplanes?; preuzeto sa: <https://monroe aerospace.com/blog/what-are-trim-tabs-on-airplanes/> (Pristupljeno: srpanj 2021.)

smanjuje potrebna duljina staze za slijetanje. Aerodinamičke kočnice se većinom koriste kod slijetanja, a u nekim slučajevima i pri vuči zrakoplova.

Spojleri (slika 23) su dodatne površine izvedene u obliku panela koje su montirane na gornju površinu krila. Djelovanje aktiviranih spojlera temelji se na povećanju koeficijenta otpora odnosno smanjenju koeficijenta uzgona. Aktivirani spojleri imaju istu ulogu kao i aerodinamičke kočnice, odnosno kada su potpuno otklonjeni kao i aerodinamičke kočnice, koče zrakoplov na način da remete zračnu struju, zbog čega se smanjuje uzgon, a povećava otpor. Spojleri doprinose i poboljšanju kočenja guma jer povećavaju tlačnu silu između kotača i samog tla, te mogu pomoći u zaštiti guma kotača i samih kočnica od prekomjerenog trošenja. Spojleri također imaju značajnu funkciju u smanjivanju efekta *Adverse Yaw*.²¹



Slika 23. Spojleri zrakoplova

IZVOR: <https://www.airlinerratings.com/did-you-know/what-are-spoilers-and-what-are-they-used-for/>
(Pristupljeno: svibanj 2021.)

²¹ Wikipedia; Aerobraking; preuzeto sa: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aerobraking> (Pristupljeno: srpanj 2021.)

5. OSTALE UPRAVLJAČKE POVRŠINE

5.1. Canard

Canard (slika 24) je horizontalna upravljačka površina montirana na trup i koja se nalazi ispred glavnog krila radi postizanja bolje upravljivosti samog zrakoplova te radi pružanja uzdužne stabilnosti. Canard krilce može biti fiksno, upravljivo ili promjenjivo. Sama aktivacija ovog krilca ne razlikuje se mnogo od kormila visine, a aktivira se povlačenjem ili odguravanjem upravljačke palice. Takva krilca karakteristična su za zrakoplove s delta krilima.



Slika 24. *Canard* krilca

IZVOR: <https://www.flightglobal.com/saab-reveals-full-gripen-e-design-cost-savings/112646.article>
(Pristupljeno: svibanj 2021.)

Kod zrakoplova koji koriste *Canard* krilce težina zrakoplova podijeljena je između krilca i glavnog krila. Takva raspodjela težine ima za posljedicu lakše opterećenje krila te uporabu lakše strukture krila. Ovakva konfiguracija krila zrakoplov čini otpornim na slom uzgona zato što se centar gravitacije nalazi ispred glavnog krila. Nadalje sami kut ugradnje krilca veći je nego kut ugradnje glavnog krila te zbog takve konfiguracije dolazi do sloma uzgona na *Canardu* prije nego na glavnom krilu. Zbog gubitka uzgona nos zrakoplova počinje ponirati. Za vrijeme poniranja nosa zrakoplova na površini

krilca strujanje zraka vratiti će se u normalu što će rezultirati ponovnim povećanjem uzgona te će se zrakoplov ponovno longitudinalno stabilizirati.²²

Nedostatkom ovog zakrilca može se smatrati gubitak uzgona na glavnom krilu prije nego na *Canardu* što stvara problem jer će se nos zrakoplova podizati što će dodatno povećavati slom uzgona umjesto da se vraća u stabilno stanje. Zbog toga klasičan rep zrakoplova ima prednost nad *Canardom*.

5.2. V – rep

V-rep (Slika 25) je nekonvencionalna repna površina koja se sastoji od dvije površine koje su ugrađene pod određenim kutom u obliku slova V. V-rep sastoji se od stabilizatora i kormila. V-rep dizajniran je s ciljem postizanja manje repne površine u odnosu na konvencionalne repove, a osim smanjenja broja repnih površina također se smanjuju i otpor i težina, a samim time i troškovi njegove izrade.

Kada se kontrolne površine na V-repu pomiču u istom smjeru djeluju kao kormilo visine, a kada se pomiču u suprotnom smjeru djeluju kao kormilo pravca. Pilot upravlja stabilizatorom i kormilom putem upravljačke palice na način da ako želi da se zrakoplov podiže upravljačku palicu privući prema sebi, a ukoliko želi spustiti zrakoplov gurat će upravljačku palicu od sebe. Ako pilot želi da zrakoplov skrene pritiskati će nožne pedale te će se oba kormila podići ili spustiti ovisno o željenom smjeru.²³

Nedostatci ovakve izvedbe repne površine su povećanje dimenzija repnih površina zbog smanjenja broja repnih površina u suprotnom će zrakoplov imati problema sa stabilnošću. V-rep u odnosu na uobičajeni rep stvara veće otpore na repu i trupu tijekom nagiba i *yawinga*. Ovakva izvedba repa zahtijeva i kompliciraniju upravljačku palicu.²⁴

²² Skybrary; Canard; preuzeto sa: <https://www.skybrary.aero/index.php/Canard> (Pristupljeno: kolovoz 2021.)

²³ Skybrary; V-tail; preuzeto sa: <https://www.skybrary.aero/index.php/V-Tail> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

²⁴ Hoover K.; Fowler T.W.; Stearman R.O.: Studies in Ethics, Safety, and Liability for Engineers; The University of Texas at Austin; preuzeto sa: <http://www.tsgc.utexas.edu/archive/general/ethics/vtail.html> (Pristupljeno: kolovoz 2021.)

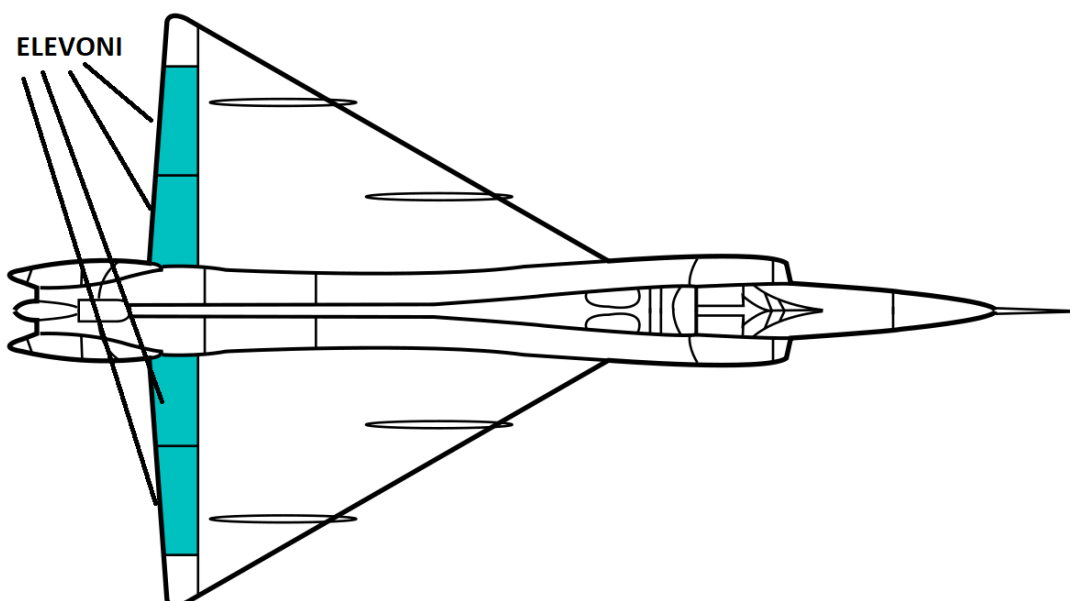


Slika 25. V-rep zrakoplova

IZVOR: <https://www.aviationconsumer.com/industry-news/editorial/model-35-bonanza-2/>
(Pristupljeno: svibanj 2021.)

5.3. Elevon

Zrakoplovi s nekonvencionalnim repom i oblikom krila kao što su jako strelasta krila ili delta krila koriste elevone kao stabilizator i kormilo (slika 26). Ugrađeni su na izlaznoj ivici krila što je ujedno i kraj zrakoplova. Kada se elevoni pomiču istovremeno odnosno prema gore ili prema dolje tada su elevoni u funkciji kormila, a kada se elevoni kreću u suprotnim smjerovima tada rade kao krilca. Računalnim putem elevoni se mogu programirati tako da istovremeno imaju dvije funkcije odnosno valjanje i propinjanje/poniranje.



Slika 26. Elevoni zrakoplova

IZVOR: <https://en.wikipedia.org/wiki/Elevon> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

6. SUSTAVI UPRAVLJANJA ZRAKOPLOVOM

6.1. Mehanički sustav upravljanja zrakoplovom

Mehanički odnosno ručni sustav upravljanja zrakoplovom (slika 27) je prvi i primarni način upravljanja zrakoplovom. Ovaj sustav upravljanja zrakoplovom koristi se još iz doba proizvodnje prvih zrakoplova te je prisutan i danas, ali uglavnom kod zrakoplova generalne avijacije. Ovakav sustav upravljanja zrakoplovom primjeren je za manje zrakoplove koji lete malim brzinama te ne postoje velike aerodinamičke sile koje pilot ne može svladati.

Mehanički sustav upravljanja zrakoplovom sastoji se od sljedećih dijelova:

- žica, sajli, kablova i cijevi,
- kolotura,
- upravljačke palice,
- opruge,
- zatezači i kabelski konektori,
- vodilice kroz koje se usmjerava kabel,
- protu-utega koji služe za održavanje stabilnosti i ravnoteže.

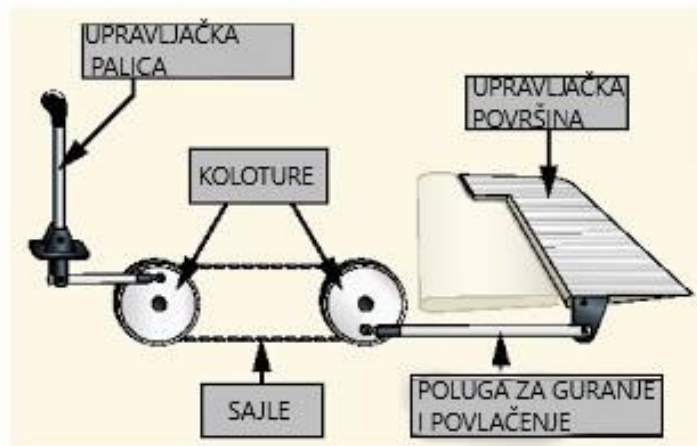


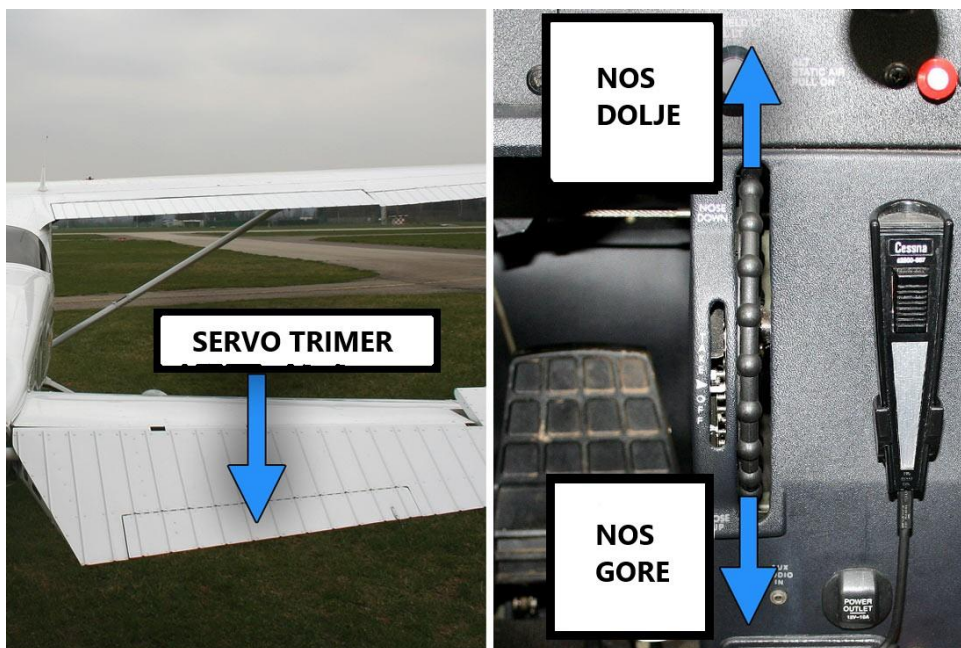
Figure 5-1. Mechanical flight control system.

Slika 27. Prikaz mehaničkog sustava upravljanja zrakoplovom

IZVOR: <http://design-plane.blogspot.com/2009/11/introduction-to-flight-controls.html>
(Pristupljeno: svibanj 2021.)

Kada pilot želi izvesti manevar sa zrakoplovom on povlači upravljačku palicu u smjeru u kojem želi da se zrakoplov kreće. Pilot djeluje silom na upravljačku palicu što za posljedicu ima stvaranje zakretnog momenta koji se preko poluga prenosi na koloture. Nadalje, novonastalim momentom pokreću se koloture koje zatim pokreću polugu za guranje i povlačenje upravljačke površine. Koloture su međusobno povezane kablovima. Poluga za guranje i povlačenje zadnja je komponenta u sustavu između kolotura i upravljačke površine te ona prenosi zakretni moment s koloture na upravljačku površinu i zakreće je u željenom smjeru.²⁵

Za svladavanje sila neki mehanički sustavi upravljanja zrakoplovom koriste servo-trimere (slika 28). Servo-trimeri su male dodatne površine postavljene na druge upravljačke površine te su zgloбно ugrađeni. Upravljačke površine koje koriste servo-trimere su kormilo visine te kormilo smjera. Servo-trimeri česti su kod malih zrakoplova s jednim motorom, a njima se upravlja pomoću malog kotačića iz pilotske kabine.



Slika 28. Servo-trimeri zrakoplova

IZVOR: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/systems/4-types-of-trim-tabs/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

²⁵ Design plane; Introduction to Flight Controls; preuzeto sa: [Introduction to Flight Controls | Design Plane \(design-plane.blogspot.com\)](http://design-plane.blogspot.com) (Pristupljeno: svibanj 2021.)

Osim servo-trimera postoje i fiksni trimeri koji se podešavaju na tlu, odnosno podešavaju ih tehničari prema zahtjevima pilota. Fiksni trimeri smješteni su na krilcima zrakoplova na strani krilca koja je bliža korijenu krila. Fiksni trimer radi na način da se otklanja suprotno od krilca, te na taj način asistira pilotu da otkloni krilce.²⁶

Što se tiče drugih mogućnosti smanjenja potrebne sile upravljanje postoji još i aerodinamička kompenzacija opterećenja upravljačkih površina. Vrste aerodinamičkih kompenzacija su:

- osna kompenzacija,
- rogasta kompenzacija,
- unutrašnja kompenzacija i
- kompenzacija s pomoću prednjeg brida.

Oсна kompenzacija je kompenzacija kod koje se smanjuje moment zgloba, odnosno krak na koji djeluje rezultantna aerodinamička sila na upravljačku površinu. To se događa zato što se os rotacije zgloba pomiče nizstrujno, što za posljedicu ima uravnoteženje sile tlaka prije ili poslije zgloba. Ovakva pojava može imati efekt na ukupnu silu, odnosno upravljački moment.

Rogasta kompenzacija je kompenzacija kod koje se dodaje dodatna površina na koju će djelovati kompenzacijska sila umjesto da se pomiče os rotacije. Dodatna površina izvedena je u obliku roga. Nedostatak rogaste kompenzacije je taj što znatno remeti strujanje zraka i neravnomjernost opterećenja duž raspona.

Unutrašnja kompenzacija je kompenzacija koja hermetički razdvaja prostor iznad ploče od prostora ispod ploče. Ova pojava događa se zbog ugrađene ploče na prednji rub upravljačke površine duž cijelog raspona površine, a na ploču je vezana membrana koja omogućava razdvajanje prostora iznad i ispod ploče. Kada je upravljačka površina aktivirana nadtlak ispod upravljačke površine prenosi se ispod membrane, a nadtlak iznad upravljačke površine prenosi se iznad membrane.

Kompenzacija s pomoću prednjeg brida je kompenzacija koja je projektirana tako da kada se upravljačka površina zakrene oko osi rotacije prema gore, s donje strane prodire prednji brid površine u zračnu struju. Strujanje prednjeg brida ispod

²⁶ Boldmethod; How The 4 Types of Trim Tabs Work; preuzeto sa: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/systems/4-types-of-trim-tabs/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

konture aeroprofila stvara dodatni otpor strujanju. Ova kompenzacija koristi se na krilcima jer uravnotežuje otpora na oba krila i na taj način sprječava stvaranje *Adverse yaw* efekta.

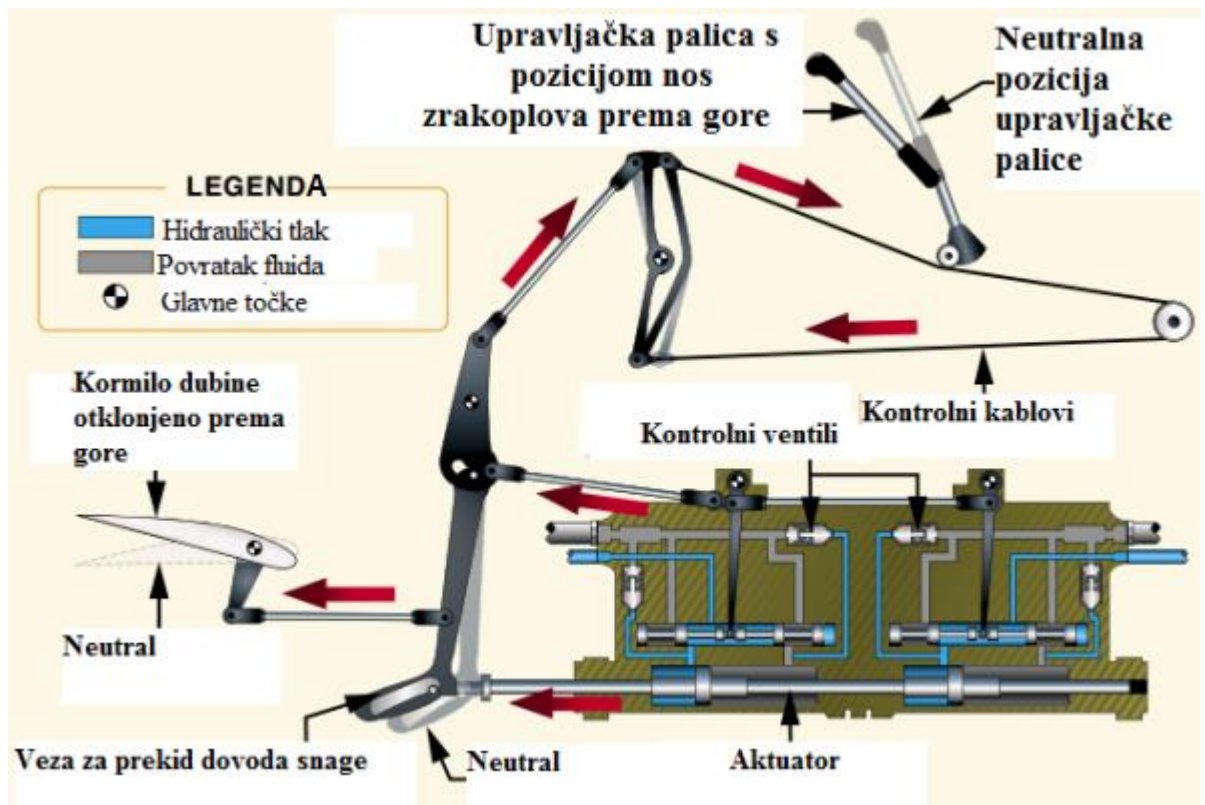
6.2. Hidraulički sustav upravljanja zrakoplovom

Hidraulički sustav upravljanja zrakoplovom prisutan je kod svih zrakoplova bez obzira bili oni novije generacije ili starije, ali sama upotreba kod zrakoplova generalne avijacije ograničava se na sustav kočnica. Kod većih modernih zrakoplova hidraulički sustavi zastupljeni su u puno većoj mjeri i to za upravljanje:

- kočnicama na kotačima,
- uvlačenja i produživanja stajnog trapa,
- pretkrilcima i zakrilcima,
- aerodinamičkih kočnica i spojlera,
- teretna vrata zrakoplova i teretne rampe, itd.

Hidraulički sustav (slika 29) sastoji se od:

- hidraulične tekućine,
- hidraulične pumpe,
- hidrauličnog pogona (motora),
- sustava vodova,
- aktuatora,
- spremnika,
- filtera za održavanje fluida čistim.



Slika 29. Hidraulički sustav zrakoplova

IZVOR:

https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak/media/08_phak_ch6.pdf (Pristupljeno: svibanj 2021.)

Hidraulična pumpa crpi tekućinu iz spremnika te ju kroz aktuator distribuira u sustav vodova koji tekućinu raspoređuju po cijelom zrakoplovu. Hidraulične pumpe mogu biti fiksne i varijabilne. Fiksne hidraulične pumpe rade konstantno, a višak tekućine koji im nije potreban vraćaju u spremnik, a varijabilne hidraulične pumpe rade po potrebi te uzimaju tekućine koliko im je potrebno. Da bi se stvorila potrebna energija za pomicanje zrakoplovnih sustava potrebno je pretvoriti snagu tekućine odnosno fluida u rad i to pomoću klipa koji se nalazi unutar servo-cilindra. Servo-cilindar može biti jednostruki i dvostruki. Jednostruki cilindar osigurava snagu fluida u samo jednom smjeru, dok dvostruki cilindar osigurava snagu fluida i povratno što je karakteristično kod izvlačenja i uvlačenja stajnog trapa. Da bi se tekućina skladištila ugrađeni su posebni akumulatori koji skladište tekućinu pod velikim pritiskom kako bi se mogla koristiti za glavne operacije zrakoplova. Neiskorištena tekućina vraća se putem vodova nazad u spremnik.

Hidraulični sustav upravljanja zrakoplovom sustav se sastoji od mehaničkog i hidrauličnog dijela te pilot i dalje osjeća aerodinamičke sile. Hidraulični dio sustava odnosno aktuator apsorbira dio tih aerodinamičkih sila te ih koristi za pomicanje upravljačkih površina. Hidraulični sustav prima signale od mehaničkog dijela koje regulira pilot putem upravljačke palice.

Hidraulični sustav mora biti dizajniran tako da je sila kojom djeluje pilot na upravljačku palicu proporcionalna sili kojom će aktuator djelovati na upravljačke površine. Na ovaj način smanjuje se sila koju bi pilot morao upotrijebiti na pomicanje upravljačke palice.

Prednost hidrauličnog sustava u odnosu na mehanički sustav je smanjenje otpora te povećanje efektivnosti upravljačkih površina zbog izostanka servo-trimera.

Nedostatak hidrauličnog sustava je u njegovoj kompleksnoj konstrukciji te težini.²⁷

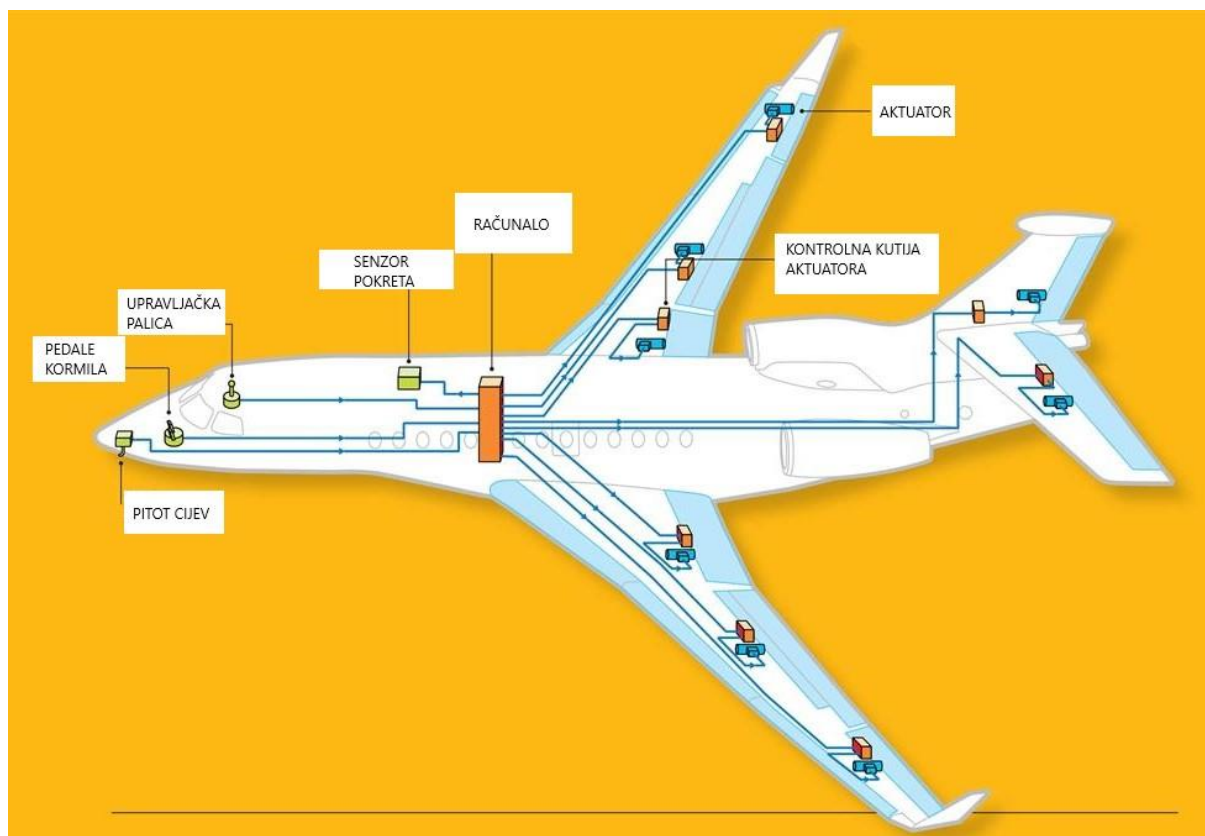
6.3. Sustav upravljanja zrakoplovom *FLY BY WIRE*

Fly by wire sustav (slika 30) upravljanja zrakoplovom je sustav koji za upravljanje upravljačkim površinama zrakoplova koristi računalo. Računalo emitira signale aktuatorima koji zatim upravljaju upravljačkim površinama zrakoplova.

Ovakav sustav upravljanja zrakoplovom vrlo je koristan jer se smanjuje ukupna težina zrakoplova, poboljšava se pouzdanost, povećava se tolerancija na oštećenja te se upravljanje samim zrakoplovom pojednostavnjuje.

U slučajevima kada zrakoplov ispadne iz balansa *Fly by wire* sustav skretanjem upravljačkih površina u suprotnu stranu vraća zrakoplov u položaj stabilnosti.

²⁷ Flight literacy; Aircraft hydraulic systems; preuzeto sa: <https://www.flightliteracy.com/aircraft-hydraulic-systems> (Pristupljeno: svibanj 2021.)



Slika 30. *Fly by wire* sustav upravljanja zrakoplovom

IZVOR: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2017/july/flight-training-magazine/fly-by-wire> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

Fly by wire sustav radi na način da pilot pomakne upravljačku palicu u željenom smjeru te se sila upotrijebljena za pomak palice šalje u obliku električnih impulsa u računalo. Računalo zatim analizira dobiveni signal i analizira trenutni položaj upravljačkih površina. Električni impulsi se nadalje šalju iz računala u električno-hidraulični ventil koji vrši pretvorbu električnih impulsa u protok hidraulične tekućine. Nakon uspješne analize i pretvorbe električnih impulsa šalje se signal naredbe aktuatorima koji postavljaju upravljačke površine u željeni položaj. Sustav šalje povratne informacije o izvršenoj naredbi putem sonde koja bilježi pomak aktuatora.²⁸

Fly by wire sustav ima određene zaštite koje ne dopuštaju upravljačke naredbe koje bi mogle degradirati stabilnost zrakoplova, odnosno preopterećenja elemenata sustava ili konstrukcije samog zrakoplova. Kod pojave problema u sustavu *Fly by wire*

²⁸ Skybrary; Fly by wire; preuzeto sa: <https://www.skybrary.aero/index.php/Fly-By-Wire> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

sustav će smanjiti učinkovitost navedenih zaštita, a u slučaju velikog kvara potpuno će ukloniti zaštite.

Prvi komercijalni zrakoplov s *Fly by wire* sustav je Airbus A320, a s godinama pouzdanog rada sustav se primjenjuje na svim Airbusov-im zrakoplovima od najmanjeg pa do najvećeg. Zbog sigurnosti i pouzdanosti samog sustava zastupljen je kod većine zrakoplova te se i dalje nastoji unaprijediti.

S godinama unaprjeđenja postojećeg sustava stvoren je noviji sustav naziva *Fly by light*. *Fly by light* sustav radi na sličnom principu kao i *Fly by wire* sustav s razlikom što računalo nakon obrade električnih impulsa ih pretvara u svjetlo koje se fiber-optičkim provodnicima šalje do pretvarača svjetlosnog impulsa u električni.

Prednost ovog sustava je taj što fiber-optički provodnici nisu osjetljivi na elektromagnetske utjecaje, dodatno se smanjuje težina sustava te se omogućava veća sposobnost rukovanja podacima.²⁹

²⁹ Air force magazine. Preuzeto sa: <https://www.airforcemag.com/article/0388light/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)

7. ZAKLJUČAK

Da bi se dizajnirale upravljačke površine potrebno je poznavati glavne osi zrakoplova, koje su vertikalna os, longitudinalna os te lateralna os, jer na temelju njih se određuje položaj upravljačkih površina za izvršavanje manevara oko njih.

Upravljačke površine jedan su od najvažnijih elemenata zrakoplova uz osnovne površine zrakoplova, a to su krila, horizontalni i vertikalni stabilizator. Upravljačke površine moraju biti dizajnirane besprijekorno jer su one zaslužne za stabilizaciju zrakoplova te bez njih nije moguće upravljati zrakoplovom. Također dizajn i vrsta upravljačkih površina ovisi i o zrakoplovu za koji su namijenjene, stoga je potrebno poznavati aerodinamičke karakteristike upravljačkih površina.

Sustavi upravljanja zrakoplovom su zaslužni za upravljanje upravljačkim površinama. Njihova primjena ovisi o vrsti zrakoplova za koji se primjenjuju, a dizajnirani su da pilotu olakšaju svladavanje velikih sila i otpora tijekom leta, radi upravljanja upravljačkim površinama, a koje pilot ne može samostalno svladati. Stoga su danas proizvedeni poboljšani sustavi upravljanja, a čija uporaba iziskuje minimalni napor pilota pri upravljanju upravljačkom palicom, odnosno upravljačkim površinama.

LITERATURA

1. Air force magazine. Preuzeto sa: <https://www.airforcemag.com/article/0388light/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)
2. Federal Aviation Administration; Flight controls; chapter 6; preuzeto sa: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak/media/08_phak_ch6.pdf (Pristupljeno: svibanj 2021.)
3. Flight literacy; Aircraft hydraulic systems; preuzeto sa: <https://www.flightliteracy.com/aircraft-hydraulic-systems/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)
4. Flight literacy; Flight control systems; Primary control systems; preuzeto sa: <https://www.flightliteracy.com/flight-control-systems-primary-flight-controls-part-one/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)
5. Skybrary; Ailerons; preuzeto sa: <https://www.skybrary.aero/index.php/Ailerons> (Pristupljeno: svibanj 2021.)
6. Skybrary; Elevator; preuzeto sa: <https://www.skybrary.aero/index.php/Elevator> (Pristupljeno: svibanj 2021.)
7. Skybrary; Flaps; preuzeto sa: <https://www.skybrary.aero/index.php/Flaps> (Pristupljeno: svibanj 2021.)
8. Skybrary; Flight controls; preuzeto sa: https://www.skybrary.aero/index.php/Flight_Controls (Pristupljeno: svibanj 2021.)
9. Skybrary; Fly by wire; preuzeto sa: <https://www.skybrary.aero/index.php/Fly-By-Wire> (Pristupljeno: svibanj 2021.)
10. Skybrary; Rudder; preuzeto sa: <https://www.skybrary.aero/index.php/Rudder> (Pristupljeno: svibanj 2021.)
11. Skybrary; V-tail; preuzeto sa: <https://www.skybrary.aero/index.php/V-Tail> (Pristupljeno: svibanj 2021.)
12. Skybrary; Canard; preuzeto sa: <https://www.skybrary.aero/index.php/Canard> (Pristupljeno: kolovoz 2021.)
13. Design plane; Introduction to Flight Controls; preuzeto sa: [Introduction to Flight Controls | Design Plane \(design-plane.blogspot.com\)](https://design-plane.blogspot.com) (Pristupljeno: svibanj 2021.)
14. Boldmethod; How The 4 Types of Trim Tabs Work; preuzeto sa: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/systems/4-types-of-trim-tabs/> (Pristupljeno: svibanj 2021.)
15. Kardum, M.: Upravljačke površine aviona Pilatus PC-9, diplomski rad, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2006.
16. Kesić P. Osnove aerodinamike Zagreb Fakultet strojarstva i brodogradnje 2003.
17. Steiner, S., Vidović, A., Bajor, I., Pita, O., Štimac, I.: Zrakoplovna prijevozna sredstva 1, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2008.
18. Hoover K.; Fowler T.W.; Stearman R.O.: Studies in Ethics, Safety, and Liability for Engineers; The University of Texas at Austin; preuzeto sa:

- <http://www.tsgc.utexas.edu/archive/general/ethics/vtail.html> (Pristupljeno: kolovoz 2021.)
19. Wikipedia; Aerobraking; preuzeto sa: <https://en.wikipedia.org/wiki/Aerobraking> (Pristupljeno: srpanj 2021.)
 20. Monroe Aerospace; What Are Trim Tabs on Airplanes? ; preuzeto sa: <https://monroeaerospace.com/blog/what-are-trim-tabs-on-airplanes/> (Pristupljeno: srpanj 2021.)
 21. Aerocorner; 7 Different Types of Aircraft Flaps; preuzeto sa: <https://aerocorner.com/blog/types-of-aircraft-flaps/> (Pristupljeno: srpanj 2021.)
 22. Aerocorner; How Do Leading Edge Slats Work? ; preuzeto sa: <https://aerocorner.com/blog/how-do-leading-edge-slats-work/> (Pristupljeno: srpanj 2021.)
 23. Cfinotebook; Flight Control Systems; preuzeto sa: <https://www.cfinotebook.net/notebook/operation-of-aircraft-systems/flight-controls> (Pristupljeno: srpanj 2021.)
 24. National Aeronautics and Space Administration (NASA); Horizontal stabilizer-elevator; preuzeto sa: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/elv.html> (Pristupljeno: srpanj 2021.)
 25. Aerocorner; How airplane rudder works; preuzeto sa: <https://aerocorner.com/blog/how-airplane-rudder-works/> (Pristupljeno: srpanj 2021.)
 26. Aerocorner; How ailerons work; preuzeto sa: <https://aerocorner.com/blog/how-aileron-work/> (Pristupljeno: srpanj 2021.)

POPIS SLIKA

Slika 1. Centar gravitacije i glavne osi zrakoplova.....	3
Slika 2. Prikaz kretanja zrakoplova oko vertikalne osi	4
Slika 3. Prikaz kretanja zrakoplova oko longitudinalne osi.....	5
Slika 4. Prikaz kretanja zrakoplova oko lateralne osi.....	5
Slika 5. Primarne upravljačke površine.....	7
Slika 6. Položaj krilca kod pomicanja upravljačke palice	8
Slika 7. Nepoželjno skretanje ili adverse yaw	9
Slika 8. Vertikalne repne površine	10
Slika 9. Horizontalne repne površine	11
Slika 10. Pretkrilca zrakoplova.....	14
Slika 11. Fiksno pretkrilce s procijepom	15
Slika 12. Upravljivo pretkrilce s procijepom	16
Slika 13. Zakretni nos pretkrilca.....	16
Slika 14. Krugerovo pretkrilce.....	17
Slika 15. Zakrilca zrakoplova	18
Slika 16. Obično zakrilce	19
Slika 17. Podijeljeno zakrilce	20
Slika 18. Podijeljeno zakrilce s translacijom	21
Slika 19. Zakrilce s procijepom	21
Slika 20. Fowlerovo zakrilce	22
Slika 21. Zakrilce s dva procijepa	23
Slika 22. Trimeri zrakoplova	24
Slika 23. Spojleri zrakoplova.....	25
Slika 24. Canard krilca.....	26
Slika 25. V-rep zrakoplova.....	28
Slika 26. Elevoni zrakoplova.....	29
Slika 27. Prikaz mehaničkog sustava upravljanja zrakoplovom.....	30
Slika 28. Servo-trimeri zrakoplova	31
Slika 29. Hidraulički sustav zrakoplova.....	34
Slika 30. <i>Fly by wire</i> sustav upravljanja zrakoplovom.....	36



Sveučilište u Zagrebu
Fakultet prometnih znanosti
10000 Zagreb
Vukelićeva 4

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem kako je ovaj _____ završni rad
isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na
objavljenu literaturu što pokazuju korištene bilješke i bibliografija.

Izjavljujem kako nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, niti je prepisan iz
necitiranog rada, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem također, kako 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 rada
pod naslovom **Upravljačke površine i sustavi upravljanja zrakoplovima**

na internetskim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom
repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 2.9.2021 _____

Student/ica:

los

(potpis)