

# Normativa o prevenciji turbulencije traga zrakoplova

---

**Novaković, Mirjana**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2017**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:119:866683>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-03**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Mirjana Novaković

**NORMATIVA O PREVENCIJI TURBULENCIJE TRAGA  
ZRAKOPLOVA**

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2017.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI**  
**POVJERENSTVO ZA DIPLOMSKI ISPIT**

Zagreb, 24. travnja 2017.

Zavod: **Zavod za zračni promet**  
Predmet: **Sigurnost zračnog prometa**

**DIPLOMSKI ZADATAK br. 4098**

Pristupnik: **Mirjana Novaković (0135228626)**

Studij: **Promet**

Smjer: **Zračni promet**

Zadatak: **Normativa o prevenciji turbulencije traga zrakoplova**

• Opis zadatka:

- *uvodno opisivanje predmeta istraživanja, postavljanje svrhe i cilja istraživanja i pregled strukture diplomskog rada*
- *pretraživanje i obrada bibliografskih izvora u tematici rada i opisivanje i tumačenje nastanka vrtložnog traga zrakoplova*
- *analiza parametara vrtložnog traga zrakoplova*
- *elaboracija utjecaja turbulencije traga na sigurnost letenja u referentnim fazama letne operacije*
- *pregled međunarodne regulative i prakse u prevenciji turbulencije traga zrakoplova i analiza statusa prevencije turbulencije traga zrakoplova u Europi*
- *sintetiziranje rezultata istraživanja i zaključno rezimiranje diplomskog rada*
- *specifikacija korištene literature i izvora*

Zadatak uručen pristupniku: 28. travnja 2017.

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

Mentor:

---

prof. dr. sc. Sanja Steiner

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

DIPLOMSKI RAD

**NORMATIVA O PREVENCIJI TURBULENCIJE TRAGA  
ZRAKOPLOVA**

**WAKE VORTEX PREVENTION STANDARDS**

Mentor: prof. dr. sc. Sanja Steiner

Student: Mirjana Novaković

JMBAG: 0135228626

Zagreb, rujan 2017.

## **SAŽETAK:**

Ovim diplomskim radom ukazuje se na opasnost vrtložnih tragova generiranih od strane zrakoplova u svim fazama leta. Kategorizacija zrakoplova propisana od strane Međunarodne organizacije civilnog zrakoplovstva dobiva novi način primjene, a podjela zrakoplova na lake, srednje i teške dobiva nove potkategorije u novoj „RECAT - EU“. Ulijetanje zrakoplova u vrtložni trag prethodnika može biti opasno za sigurnost leta. Opisane su važeće regulative u Europi (Velika Britanija i Republika Hrvatska) i u svijetu (Sjedinjene Američke Države i Novi Zeland).

**KLJUČNE RIJEČI:** vrtložne turbulencije; sigurnost leta zrakoplova; parametri vrtložnog traga; razdvajanje zrakoplova; RECAT – EU; Velika Britanija; Sjedinjene Američke Države; Novi Zeland; Republika Hrvatska

## **SUMMARY:**

The master thesis describes the danger of aircraft wake vortex during all flight phases. Aircraft categorization prescribed by the International Civil Aviation Organization gets a new way of application, and the division of light, medium and heavy aircraft gets new sub categories in the new "RECAT - EU". Flying into a wake vortex of another aircraft can be dangerous for the flight safety. Applicable regulations in Europe (Great Britain and the Republic of Croatia) and the world (The United States of America and New Zealand) are described.

**KEYWORDS:** wake vortex; flight safety; parameters of wake vortex; separation of aircraft; RECAT – EU; United Kingdom; New Zealand; Republic of Croatia

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. PREGLED IZVORA U TEMATICI ISTRAŽIVANJA .....	3
3. GENERIRANJE VRTLOŽNOG TRAGA ZRAKOPLOVA .....	5
3.1. Nastanak aerodinamičkog turbulentnoga traga iza zrakoplova .....	6
3.2. Utjecaj vrtložnih tragova na zrakoplov .....	7
3.3. Karakteristike vrtložnih tragova zrakoplova .....	8
3.4. Izbjegavanje vrtložnih turbulencija .....	9
3.4.1. Polijetanje .....	9
3.4.2. Penjanje .....	10
3.4.3. Prilaz .....	10
3.4.4. Slijetanje .....	11
3.5. Propadanje vrtložnih tragova .....	13
3.6. Helikopteri .....	14
3.6.1. Vrtložni tragovi helikoptera .....	15
3.6.2. Prevencija negativnih utjecaja .....	16
3.7. Daljinski upravljani zrakoplovni sustavi .....	16
3.7.1. Usporedba daljinski upravljanih zrakoplovnih sustava i zrakoplova .....	17
3.7.2. Model bočnih dimenzija .....	17
3.7.3. Model vertikalnih dimenzija .....	18
3.7.4. Jačina vrtložnih tragova .....	19
3.7.5. Vertikalno razdvajanje .....	20
3.7.6. Uzdužno razdvajanje .....	21
4. PARAMETRI VRTLOŽNOG TRAGA ZRAKOPLOVA .....	22
5. UTJECAJ TURBULENCIJE TRAGA ZRAKOPLOVA NA SIGURNOST LETENJA .....	27
5.1. Prilaz i slijetanje .....	28
5.2. Vjerojatnost ulijetanja u turbulentni trag zrakoplova .....	29

5.2.1.	Proračun vjerojatnosti ulijetanja bez prisutnosti vjetra .....	30
5.2.2.	Proračun vjerojatnosti ulijetanja uz prisutnost vjetra .....	31
5.3.	Djelovanje destabilizirajućih sila i momenata na zrakoplov .....	32
5.4.	Mjerenje vrtložnih tragova kohertnim impulsnim doplerom .....	33
5.4.1.	Način promatranja .....	34
5.4.2.	Očitavanje rezultata .....	35
6.	MEĐUNARODNA REGULATIVA I PRAKSA TURBULENCIJE TRAGA .....	36
6.1.	Novi Zeland .....	36
6.1.1.	Izbjegavanje vrtložnih turbulencija .....	38
6.1.2.	Intenzitet i postojanost vrtložnih tragova .....	38
6.2.	Sjedinjene Američke Države .....	38
6.2.1.	Faza I .....	39
6.2.2.	Faza II .....	40
7.	STATUS PREVENCIJE TURBULENCIJE TRAGA ZRAKOPLOVA U EUROPI.....	42
7.1.	Normativa RECAT-EU .....	42
7.1.1.	Pozadina projekta .....	42
7.1.2.	Implementacija normative RECAT-EU .....	43
7.1.3.	Kategorizacija zrakoplova .....	46
7.1.4.	Prednosti RECAT - EU .....	49
7.2.	Velika Britanija .....	50
7.2.1.	Minimumi razdvajanja za završni prilaz .....	51
7.2.2.	Minimum razdvajanja pri promjeni mjesta praga na USS – i .....	52
7.2.3.	Minimumi razdvajanja u odlasku .....	53
7.2.4.	Minimum razdvajanja za suprotan smjer .....	54
7.2.5.	Minimum razdvajanja za križajuće ili usporedne USS - e .....	54
7.2.6.	Minimum razdvajanja za srednji prilaz .....	55
7.3.	Republika Hrvatska .....	56

8. ZAKLJUČAK .....	58
LITERATURA.....	60
POPIS SLIKA .....	62
POPIS TABLICA.....	63
POPIS GRAFIČKIH PRIKAZA.....	64



## 1. UVOD

S povećanjem zračnog prometa došlo je do potrebe novog načina kategorizacije zrakoplova i propisanih pravila razdvajanja vezanih za vrtložne turbulencije, s ciljem povećanja kapaciteta uzletno sletne staze (*Uzletno sletna staza* – USS) i veće učinkovitosti zračnih luka. Ulijetanje u vrtložni trag zrakoplova, praćeno je neugodnim pojavama koje u određenim situacijama mogu utjecati na sigurnost letenja. Podjela zrakoplova na lake, srednje i teške dobiva novi način primjene, uzimajući u obzir fizičke parametre zrakoplova kao i mješovitost zračnog prometa. Svrha istraživanja ovog diplomskog rada je elaboracija mehanizma nastanka turbulentnog traga i njegove prirode, analiza čimbenika koji utječu na njegovu postojanost i intenzitet te opis modela izračuna vjerojatnosti ulijetanja zrakoplova u turbulentni trag. Istraživanje u radu ima cilj argumentirati zahtjeve normiranja sigurnosne separacije zrakoplova, radi prevencije ulijetanja zrakoplova u turbulentni trag. Rad je podijeljen na osam poglavlja.

- 1) Uvod
- 2) Pregled izvora u tematici istraživanja
- 3) Generiranje vrtložnog traga zrakoplova
- 4) Parametri vrtložnog traga zrakoplova
- 5) Utjecaj turbulencije traga zrakoplova na sigurnost letenja
- 6) Međunarodna regulativa i praksa u prevenciji turbulencije traga
- 7) Status prevencije turbulencije traga zrakoplova u Europi
- 8) Zaključak.

Nakon uvodne elaboracije predmeta i ciljeva istraživanja, te obrade bibliografskih izvora korištenih u izradi rada, u trećem dijelu rada opisano je generiranje vrtložnih tragova, odnosno nastanak iza zrakoplova kao i sam utjecaj vrtložne turbulencije na zrakoplov.

U četvrtom dijelu rada opisani su parametri vrtložnog traga iza zrakoplova te matematički algoritmi za njihov izračun.

Peto poglavlje obrađuje tjecaj vrtložnih tragova na sigurnost letenja, odnosno opasnosti koje se mogu pojaviti u fazi prilaza, slijetanja ili pri ulijetanju u vrtložni trag drugog zrakoplova. Poglavlje sadrži način mjerenja i otkrivanja vrtložnih tragova pomoću kohertnog impulsnog doplera, te djelovanje destabilizirajućih sila i momenata na zrakoplov.

U šestom poglavlju analizira se važeća međunarodna regulativa o turbulenciji traga zrakoplova, te prezentiraju primjeri nacionalne regulative i prakse u Novom Zelandu i u Sjedinjenim Američkim Državama.

Sedmo poglavlje obrađuje status prevencije turbulencije traga u Europi, te se analizira nova normativa o kategorizaciji zrakoplova, kao i primjeri nacionalnih regulativa o razdvajanju zrakoplova u Velikoj Britaniji i Republici Hrvatskoj.

## 2. PREGLED IZVORA U TEMATICI ISTRAŽIVANJA

Rad se temelji na devet glavnih izvora. Prvi izvor je znanstveni rad pod nazivom „Utjecaj aerodinamičkog vrtložnog traga na sigurnost leta zrakoplova“, napisan 1997. godine na Fakultetu prometnih znanosti, a čiji autori su Galović, B., Grozdanić, B. i Steiner, S. objavljen 1997. u časopisu *Promet* u autorstvu prof. Borivoja Galovića, Berislava Grozdanića i Sanja Steiner. Taj je rad ušao u referalnu bazu američkog programa za *wake-vortex* prevenciju.

Drugi izvor je važeća regulativa i praksa vrtložnih tragova na Novom Zelandu, propisana od strane Uprave civilnog zrakoplovstva (*Civil Aviation Authority – CAA*) Novog Zelanda 2016. godine.

Treći izvor je regulativa donesena od strane Europske organizacije za sigurnost zračne plovidbe (*European Organisation for the Safety of Air Navigation - EUROCONTROL*) koja opisuje novi način kategorizacije zrakoplova odnosno, dijeli postojeće kategorije zrakoplova u potkategorije. Regulativa je odobrena u Briselu 2015. godine.

Četvrti izvor je dokument koji opisuje kategorizaciju zrakoplova u Sjedinjenim Američkim Država, donesen od strane Savezne uprave za civilno zrakoplovstvo (*Federal Aviation Administration – FAA*) 2016. godine, a temelji se na novoj kategorizaciji zrakoplova s određenim razlikama.

Peti izvor je cirkular zrakoplovnih informacija donesen u Velikoj Britaniji 2015. godine, a opisuje pravila razdvajanja zrakoplova koja se tamo primjenjuju.

Šesti izvor je članak sa Sveučilišta u Kini u kojem je opisan način mjerenja i otkrivanja vrtložnih turbulencija kohertnim impulsnim doplerom.

Sedmi izvor odnosi se na utjecaj vrtložnih tragova zrakoplova na daljinski upravljane letjelice, izdan na Tehničkom sveučilištu u Barceloni 2016. godine.

Osmi izvor je članak napisan od autora H. Proctor, F., Nash'at N, A. i odnosi se na tri faze propadanja vrtložnih turbulencija zrakoplova, a napisan je 2010. godine u Virginiji pod vodstvom Nacionalne zrakoplovne i svemirske administracije (*National Aeronautics and Space Administration - NASA*).

Deveti izvor je Pravilnik o letenju zrakoplova, donesen od strane Ministarstva pomorstva, prometa i infrastrukture 2014. godine, a sadrži pravila razdvajanja vrtložnih turbulencija u Republici Hrvatskoj.

### 3. GENERIRANJE VRTLOŽNOG TRAGA ZRAKOPLOVA

Vrtlog je aerodinamička vrtložna struja zraka koja se stvara iza zrakoplova i zadržava se određeno vrijeme u atmosferi, a koju generira svaki zrakoplov u letu. Intenzitet vrtložne turbulencije ovisi o težini zrakoplova, brzini leta, obliku i razmahu krila. Prema novoj kategorizaciji EUROCONTROL - a zrakoplovi se dijele s obzirom na maksimalnu dopuštenu težinu u polijetanju (*Maximum Take off Weight* - MTOW) uzimajući u obzir i fizičke parametre zrakoplova kao i mješovitost zračnog prometa[1]. Osnovna podjela zrakoplova prema MTOW je na:

- 1) teške (*Heavy* - H) zrakoplove s MTOW većom od 136 tona, a dijele se na super teške, gornje i donje teške (*Super Heavy, Upper Heavy and Lower Heavy*)
- 2) srednje (*Medium* - M) zrakoplove s MTOW manjom od 136 tona, a većom od 7 tona, te se dijele na gornje i donje srednje (*Upper Medium and Lower Medium*)
- 3) lake (*Light* - L) zrakoplove s MTOW do 7 tona uključujući i 7 tona[3].

Teški zrakoplovi s uvučenom mehanizacijom krila i kotačima generiraju najintenzivnije vrtložne tragove. Ulijetanje u vrtložni trag zrakoplova, praćeno je neugodnim pojavama koje u određenim situacijama mogu utjecati na sigurnost letenja. Opasnosti ulijetanja u vrtložni trag zrakoplova dovelo je do potrebe određivanja minimalnog razdvajanja između zrakoplova, kao i određivanja minimalnog sigurnosnog intervala između uzastopnog polijetanja i slijetanja[1]. Zrakoplovi proizvode vrtložne tragove prilikom formiranja sile uzgona. Uzgon nastaje kao posljedica razlike tlakova na gornjaci i donjaci krila. Na gornjaci krila formira se niži tlak, dok se na donjaci formira viši tlak. Zrak se kreće prema području nižeg tlaka, odnosno prema van, ispod donjake krila te prema rubovima krila, gdje se zaokreće preko gornjake krila i formiraju se vrtložni tragovi. Vrtlog koji je nastao s lijeve strane zrakoplova kreće se u smjeru kazaljke na satu, dok se vrtlog koji je nastao na desnoj strani kreće obrnuto od kazaljke na satu. Razlika između tlakova uzrokuje kretanje zraka prema unutrašnjim dijelovima krila. Mali vrtložni tragovi nastali na rubovima krila, formirani zbog kretanja struje zraka prema vanjskim i unutrašnjim dijelovima krila, kreću se prema van u odnosu na rubove krila i pridružuju se velikom vrtložnom tragu. Vrtložne zračne mase zaostaju nizvodno u odnosu na rubove krila. Vrtložni tragovi nastaju kao kružno kretanje struje zraka oko rubova krila zrakoplova, te dosežu veličinu od nekoliko centimetara do nekoliko metara ili više,

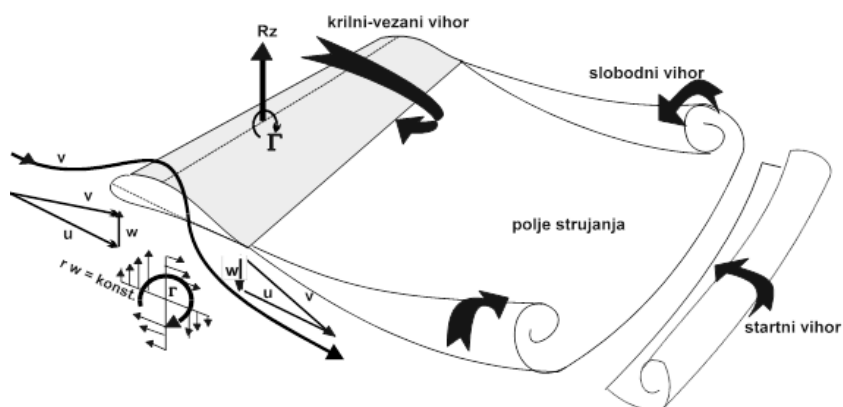
ovisno o tipu zrakoplova. Vrtložni trag velikih zrakoplova može se kretati brzinom do 100 km/h te doseći duljinu od 30 m. Udaljavanjem od ruba krila brzina vrtloga se smanjuje, dok vrijeme zadržavanja vrtloga može potrajati i do tri minute. Vrtložni tragovi šire se bočno iza zrakoplova, padaju od 500 do 900 ft duljinom od 5 NM. Vrtlozi gube na visini u prosjeku od 300 do 500 ft/min tijekom prvih 30 sekundi[2].

### 3.1. Nastanak aerodinamičkog turbulentnog traga iza zrakoplova

Formiranju turbulentnog traga doprinose:

- 1) aerodinamički vihori stvoreni cirkulacijom, koji nastaju opstrujavanjem nosećih površina zrakoplova kada na njima postoji uzgon
- 2) ispušni mlaz zraka iza reaktivnog motora
- 3) turbulentno polje zraka koje se pojavljuje kao rezultat opstrujavanja viskoznog zraka u graničnom sloju na površini zrakoplova
- 4) sekundarna turbulencija koja nastaje zbog lokalnoga neravnomjernog opstrujavanja elemenata zrakoplova (otpor interferencije), što dovodi do odvajanja strujnica na pojedinim dijelovima konstrukcije.

Bez cirkulacije ( $\Gamma$ ) nema uzgona na aerodinamičkom tijelu u realnom fluidu. Prandt'l je početkom dvadesetog stoljeća pokazao da je uzgon po jedinici raspona izravno proporcionalan cirkulaciji i da se krilo može zamijeniti hipotetskim sustavom vihora oko krila i slobodnim viyorima na krajevima krila (slika 1.).



Slika 1. Prandt'l – ov sustav vihora, [1]

Nispono strujanje koje proizvode slobodni vihori na krajevima krila i vezani vikor uz krilo, omogućuju fleksibilan model, pomoću kojeg je matematički moguće izračunati bilo koju željenu distribuciju nisponog strujanja ili uzgona na krilu. Prilikom kretanja zrakoplova velika masa zraka opstrujava noseće površine. Kružno gibanje zraka je stabilno te određuje trajanje vrtložnog traga iza zrakoplova u letu, a nestaje s vremenom (viskoznost zraka). Kod svakog vrtloga stvara se ravnomjerno kretanje zraka, čije se čestice premještaju oko graničnog sloja vrtloga bez rotacije. Čestice se kreću po kružnici i u isto vrijeme se rotiraju oko svoje osi, unutar područja kod jezgre vrtloga. Zrak koji je prošao kroz granični sloj stvara donji turbulentni trag nakon silaska s opstrujanih površina zrakoplova. Po svojoj strukturi zrak podsjeća na reaktivnu struju motora s obratnim predznakom brzine. Donja turbulentna struja nestaje u neposrednoj blizini zrakoplova zbog manje kinetičke energije u odnosu na reaktivnu struju. Turbulencije i vrtloženja koja nastaju interferencijom opstrujavanja, odnosno na spojevima pojedinih elemenata zrakoplova, zbog manje mase zraka i intenziteta vrtloženja nisu presudan čimbenik turbulentnog traga iza zrakoplova[1].

### **3.2. Utjecaj vrtložnih tragova na zrakoplov**

Vrtložni tragovi utječu na održavanje ravnoteže zrakoplova. Ravnoteža zrakoplova održava se oko poprečne, uzdužne i vertikalne osi. Najveća opasnost nastaje prilikom održavanja ravnoteže oko uzdužne i vertikalne osi, te prilikom polijetanja i slijetanja zrakoplova gdje ne postoji dovoljni raspon visine za vraćanje u ravnotežni položaj. Utjecaj vrtložnih tragova na zrakoplov ovisi o težini zrakoplova, rasponu krila (veći utjecaj kod zrakoplova s manjim rasponom krila) te položaju zrakoplova u odnosu na vrtložne tragove drugog zrakoplova. Vrtložni tragovi u najblažem obliku utječu na zrakoplov slično kao i turbulencije, dok u najgorem obliku dovode do gubitka kontrole nad zrakoplovom. Za slučaj kada je manji zrakoplov u funkciji pratećeg, dolazi do odstupanja oko uzdužne osi za više od 30 stupnjeva. Najopasnija situacija za male zrakoplove je ulijetanje u vrtložni trag većeg zrakoplova, a do čega može doći prilikom leta ispod putanje velikog zrakoplova. Vraćanje zrakoplova u ravnotežni položaj ovisi o:

- 1) visini leta zrakoplova
- 2) manevarskim sposobnostima zrakoplova
- 3) snazi zrakoplova[2].

### 3.3. Karakteristike vrtložnih tragova zrakoplova

Vrtložni tragovi prisutni su iza svakog zrakoplova. Najopasniji su za zrakoplove s malim razmakom krila prilikom polijetanja, početnog penjanja, završnog prilaza i slijetanja. Karakteristike vrtložnih tragova iza zrakoplova ovise o veličini zrakoplova, težini, razmaku krila, konfiguraciji i atmosferskim uvjetima. S praktičnog gledišta, vrtložni tragovi mogu se promatrati kao sustav dvaju cilindričnih zračnih masa iza zrakoplova, razdvojenih za tri četvrtine razmaka krila koje se rotiraju. U uvjetima mirnog zraka spuštaju se polako prema dolje, obično ne više od 300 m ispod letne putanje zrakoplova te se pri približavanju zemljinoj površini pomiču u stranu u odnosu na putanju leta, za duljinu jednaku polovici razmaka krila. Početak generiranja vrtložnih tragova počinje kada se nosni kotači zrakoplova odvoje od USS – e i nastavljaju se dok nosni kotači ne dotaknu USS – u pri slijetanju. Jačina vrtložnih tragova raste s težinom generirajućeg zrakoplova, pada s povećanje brzine zrakoplova, a za danu težinu i brzinu, jačina je veća za zrakoplov u čistoj konfiguraciji.

Dokazano je da helikopter za datu težinu i brzinu generira jače vrtložne tragove nego zrakoplov s fiksnim krilima. Vjetar uzrokuje spuštanje dvaju vrtloga različitim brzinama u blizini zemljine površine, pri čemu može doći do porasta jednog od vrtloga. Turbulencije u atmosferi i jaki vjetrovi u blizini zemljine površine ubrzavaju propadanje vrtloga i njihovo raspadanje (slika 2.). Posebna pažnja obraća se na uvjete laganog vjetra, pri čemu se vrtlozi mogu zadržavati u prilazu i dodirnim područjima ili utjecati na putanje polijetanja i slijetanja zrakoplova[5].



**Slika 2.** Utjecaj zemljine površine pri uvjetima bočnog vjetra, [14]

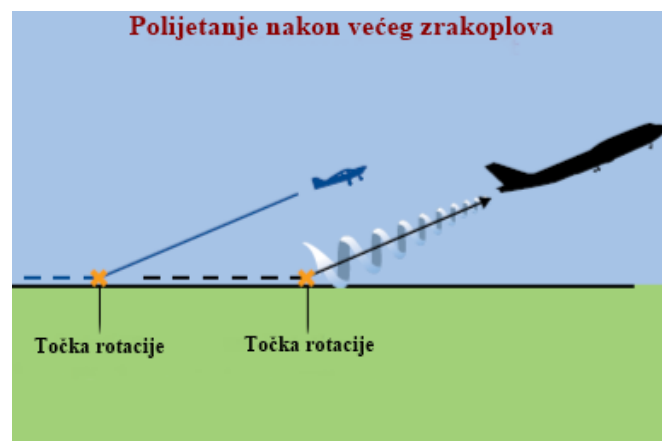


### 3.4. Izbjegavanje vrtložnih turbulencija

Vrtložni tragovi velikih zrakoplova zaslužuju pažnju svih pilota, a područje od 300 m ispod i iza drugog zrakoplova treba se izbjegavati, pogotovo na malim visinama. Pri brzini krstarenja zrakoplova, vrtlozi opstaju na znatnim udaljenostima iza zrakoplova. Vrtložni tragovi najčešće se pojavljuju u fazi prilaza. Piloti moraju poštivati minimume razdvajanja prilikom samostalnog odvajanja od većih zrakoplova u prilazu, te za slučaj da je potrebno povećanje minimuma razdvajanja, trebaju obavijestiti nadležnu kontrolu zračne plovidbe prije početka završnog prilaza[2].

#### 3.4.1. Polijetanje

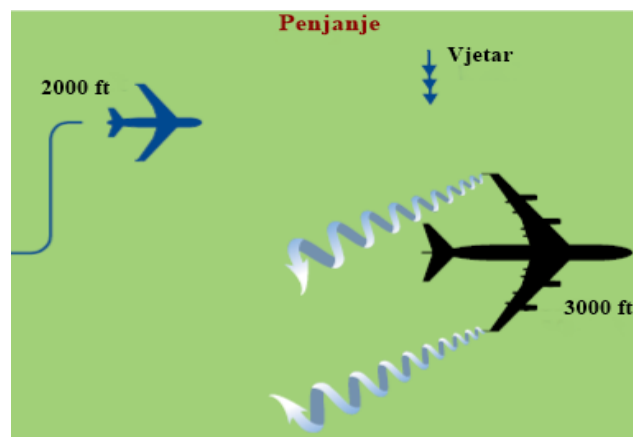
Kada laki zrakoplov polijeće nakon težeg, do snažne pojave vrtložne turbulencije dolazi kada se vodeći zrakoplov penje malom brzinom pri velikim napadnim kutovima (slika 3.). Turbulencija je prisutna sve do točke dodira zrakoplova u slijetanju. Polijetanje poslije težeg zrakoplova obavlja se prije njegove točke rotacije u smjeru vjetara. U slučaju kada se ova pravila ne mogu primjenjivati, primjenjuju se pravila razdvajanja zrakoplova prema težinskim kategorijama[2]. Pri polijetanju većeg zrakoplova s druge USS – e, potrebno je uočiti njegovu točku rotacije. Ako se točka rotacije većeg zrakoplova nalazi prije mjesta križanja putanja leta, potrebno je osigurati dovoljno vremena kako bi vrtlog nestao, prije početka slijetanja. Potrebno je izbjegavati kursove koji se križaju iza i ispod putanje vodećeg zrakoplova nakon polijetanja[5].



Slika 3. Polijetanje nakon većeg zrakoplova, [2]

### 3.4.2. Penjanje

Zrakoplovi nakon polijetanja trebaju izbjegavati putanju penjanja prethodnog zrakoplova. Ako zrakoplov ne može značajno odstupiti od putanje penjanja prethodnog zrakoplova, leti usporedno njegovoj putanji uz vjetar. Dvama zrakoplovima se putanje leta ne smiju sjeći iza ili ispod vodećeg zrakoplova. U slučaju da se putanje leta sijeku iza zrakoplova, trebaju se sjeći iznad putanje vodećeg zrakoplova, a ako teren i uvjeti to ne dopuštaju, sijeku se 1000 ft ispod. Prateći zrakoplov treba letjeti na ili iznad putanje leta vodećeg zrakoplova ili letjeti na usporednoj putanji uz vjetar, međutim ako uvjeti i teren to dopuštaju, potrebno je ostati barem 1000 ft ispod ili na dovoljnoj udaljenosti iza vodećeg zrakoplova. U slučaju izravnog približavanja težem zrakoplovu koji se nalazi na udaljenosti manjoj od 1000 ft iznad, smjer zrakoplova usmjerava se uz vjetar za izbjegavanje vrtložnih turbulencija (slika 4.)[2].



Slika 4. Penjanje zrakoplova, [2]

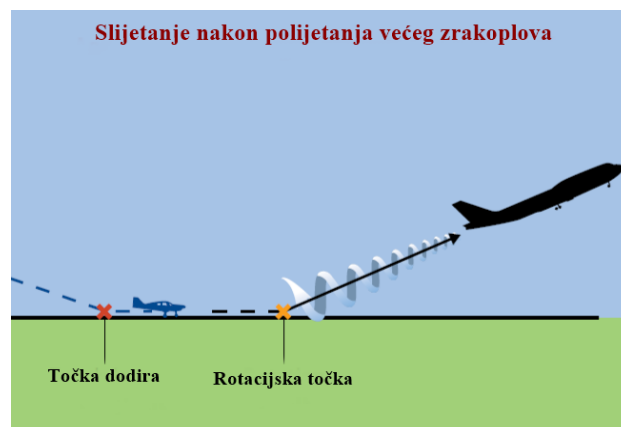
### 3.4.3. Prilaz

Većina nesreća povezanih s vrtložnim turbulencijama događa se pri vizualnim meteorološkim uvjetima leta u kojima su piloti samostalno odgovorni za razdvajanje zrakoplova. U slučaju leta iza većeg zrakoplova, leti se što je dalje moguće od njegove centralne linije uzimajući u obzir mogućnost promjene položaja koju uzrokuje vjetar. U vizualnim uvjetima leta, piloti manjih zrakoplova pri slijetanju trebaju biti svjesni vrtložnih turbulencija nastalih od strane velikih zrakoplova u prilazu. Zrakoplov koji slijeće nakon većeg zrakoplova, treba sletjeti prije njegove točke rotacije. Slijetanje se obavlja iznad putanje leta i točke slijetanja prethodnog zrakoplova. Za slučaj USS – a koje se križaju, točka dodira

zrakoplova u slijetanju treba se nalaziti prije dijela USS – e koji je pod vrtložnim strujama zrakoplova koji je prethodno sletio[2].

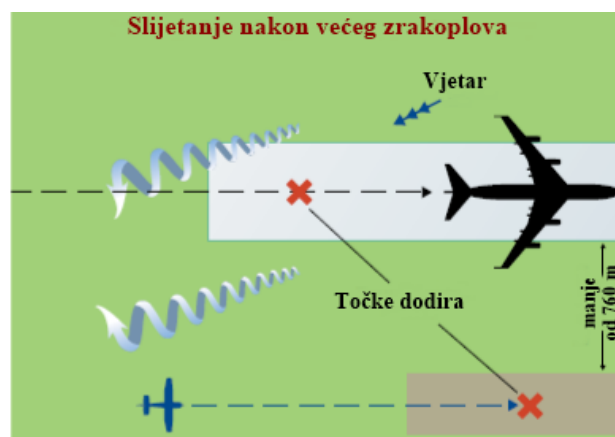
#### 3.4.4. Slijetanje

Kod slijetanja iza većeg zrakoplova na istu USS – u, potrebno je sletjeti prije njegove točke rotacije (slika 5.), a prateći zrakoplov bi trebao ostati na ili iznad putanje završnog prilaza vodećeg zrakoplova. Slijetanje se obavlja iza točke dodira vodećeg zrakoplova.



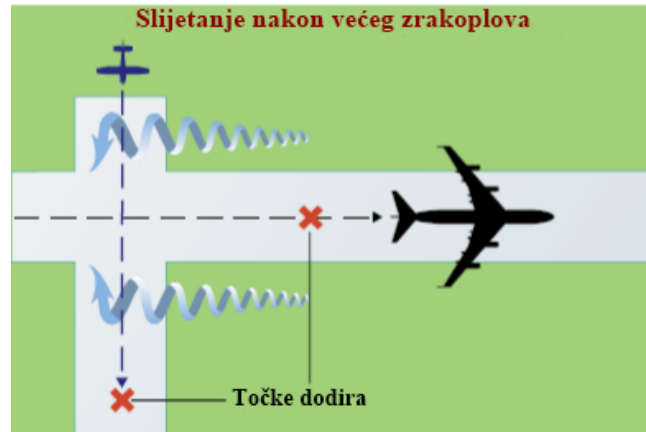
Slika 5. Slijetanje nakon većeg zrakoplova, [2]

Slijetanje nakon većeg zrakoplova, u uvjetima usporednih USS – a razmaknutih manje od 760 m (slika 6.), obavlja se tako da se ostane na ili iznad putanje završnog prilaza vodećeg zrakoplova prateći njegovu točku dodira, ako postoji vizualni kontakt. Za slučaj kada se točka rotacije nalazi nakon mjesta križanja dvaju USS – a, prateći zrakoplov može nastaviti prilaz i sletjeti, a za slučaj kada se točka rotacije nalazi prije mjesta križanja dvaju USS – a, prateći treba zaobići let ispod putanje vodećeg zrakoplova te izbjeći slijetanje.



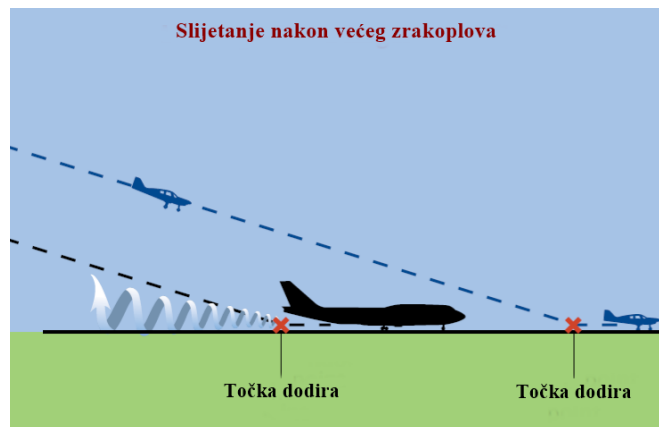
Slika 6. Slijetanje nakon većeg zrakoplova pri usporednim USS – ama, [2]

Pri polijetanju ili slijetanju nakon velikog zrakoplova koji izvršava ponovni prilaz ili dodiruje USS – u i slijeće, opasnost vrtložnih tragova može postojati oko dvije minute uzduž USS – e, nakon što je veliki zrakoplov ponovio prilaz ili dodiruje USS – u i slijeće, pogotovo u uvjetima slabog vjetra. Pri vizualnim uvjetima leta zrakoplova, potrebno je izbjegavati let ispod ili iza velikog zrakoplova[5].



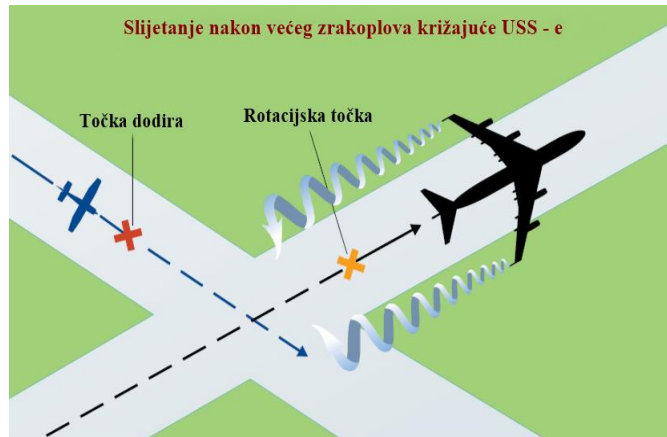
**Slika 7.** Slijetanje nakon većeg zrakoplova kod križajućih USS – a, [2]

Kod slijetanja iza većeg zrakoplova kod križajućih USS - a, preporučuje se prijeći preko putanje leta većeg zrakoplova (slika 7.).



**Slika 8.** Slijetanje iza većeg zrakoplova na istu USS – u, [2]

Kod slijetanja iza većeg zrakoplova na istu USS - u, potrebno je zamijetiti točku dodira većeg zrakoplova, te sletjeti ispred te točke (slika 8.). Pri slijetanju nakon većeg zrakoplova koji polijeće i presijeca USS – u, potrebno je uočiti njegovu točku rotacije, ako je prošla križanje, onda nastaviti prilaz i sletjeti prije križanja (slika 9.).



**Slika 9.** Slijetanje nakon većeg zrakoplova kod križajućih USS – a, [2]

Pri slijetanju nakon težeg zrakoplova, lakši zrakoplov slijeće uz vjetar prije točke dodira težeg zrakoplova. U uvjetima slabog vjetra, u slučaju kada lakši zrakoplov u svojstvu pratećeg, preporučuje se primjena pravila razdvajanja za lakši zrakoplov i srednji zrakoplov, a u slučaju potrebe može se zatražiti i duže razdoblje razdvajanja od kontrole zračne plovidbe. Zrakoplov u slijetanju mora sletjeti prije točke rotacije zrakoplova u polijetanju. Zrakoplov koji slijeće nakon drugog zrakoplova treba sletjeti iznad njegove putanje i izvan točke dodira. Vrtložni tragovi u blizini zemljine površine se ne moraju kretati uvijek bočno u odnosu na USS – u, već se mogu odbiti od zemljine površine do visine dvostruko veće od raspona krila zrakoplova. Bočni vjetar utječe na vrtložne tragovi i može dovesti do opasnih situacija, pogotovo u slučaju usporednih USS – a. U takvim uvjetima je potrebno prilagoditi točke dodira[2].

### 3.5. Propadanje vrtložnih tragova

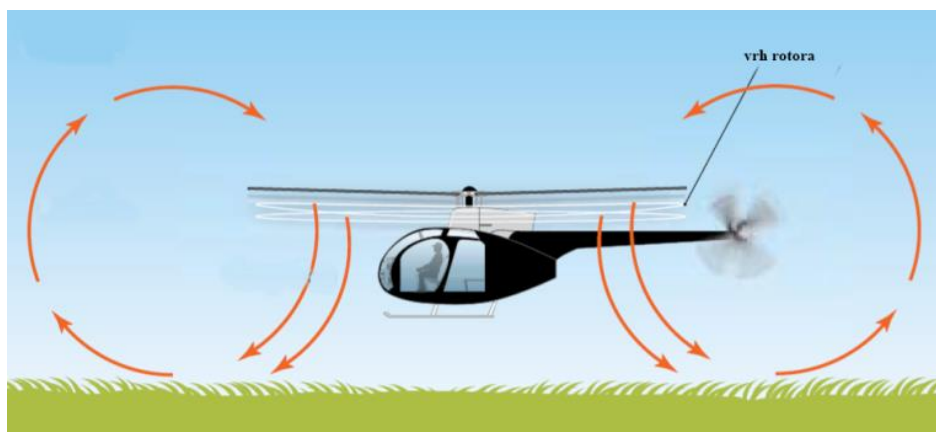
Propadanje vrtložnih tragova odvija se u tri faze (slika 10.). Prva faza propadanja je relativno spora. Druga faza je okarakterizirana brzim stupnjem propadanja. Treća faza okarakterizirana je stupnjem sporijeg propadanja, pri čemu se na kraju javljaju vrtložni prstenovi. Zadnja faza odvija se brzo i vrtložni tragovi naglo nestaju u vremenu. Susret zrakoplova s vrtložnim prstenovima manje je opasan nego susret s dvodimenzionalnim vrtložnim parom[12].



**Slika 10.** Raspadanje vrtložnih tragova pri slijetanju, [13]

### 3.6. Helikopteri

Glavni rotor helikoptera generira vrtložne tragove slične onima koje generira zrakoplov s fiksnim krilima. S bruto težinom helikoptera povećava se intenzitet vrtložnih tragova u odnosu na zrakoplove s fiksnim krilima. Pri početnom manevru ubrzavanja, slijetanju i taksiranju generiraju se veći vrtlozi nego pri lebdenju. Pri lebdenju ili taksiranju, helikopteri proizvode velike količine zraka koje se kreću prema dolje i raspršuju u svim smjerovima. Raspršivanje zraka u svim smjerovima može dovesti do problema na stajanci, parkirališnom prostoru i utjecati na kretanje zrakoplova po voznim stazama i USS – i. Zbog jačine intenziteta i raspršivanja zraka dolazi do prisilnog pomicanja kontrolnih površina zrakoplova s fiksnim krilima, te postoji mogućnost oštećenja istih[5].



**Slika 11.** Vrtložni tragovi helikoptera pri stacionarnom lebdenju, [2]

### 3.6.1. Vrtložni tragovi helikoptera

Vrtložni tragovi helikoptera pojavljuju se ovisno o načinu leta u različitim oblicima tijekom:

- 1) stacionarnog lebdenja ili taksiranja, kada helikopteri generiraju značajne vrtloge prema dolje, koji dosežu duljinu tri puta veću od promjera rotora (slika 11.). Vrtlozi kruže prema van, oko i dalje od glavnog rotora u svim smjerovima. Preporučuje se da manji zrakoplovi ne prometuju u području trostruke duljine rotora helikoptera prilikom njegova lebdenja
- 2) leta prema naprijed helikopter generira spiralne vrtložne tragovi (slika 12.). Vrtložni tragovi pojavljuju se pri rotaciji zraka ispod helikoptera, te su slične jačine kao i kod velikih zrakoplova s fiksnim krilima.

FAA ispitivanje pokazalo je da se vrtložni tragovi razlikuju prema operacijama helikoptera (penjanje ili spuštanje). Jezgre vrtložnih tragova bliže su jedna drugoj tijekom uspona i dalje jedna od druge tijekom spuštanja. Vrtložni tragovi se ne raspadaju na predvidljiv način, te u nekim slučajevima ostaju na visini na kojoj su generirani. Područje u kojem se nalaze vrtložni tragovi helikoptera veće je nego ono koje generiraju zrakoplovi slične veličine i težine, pogotovo ispod brzine od 70 čvorova[2].



**Slika 12.** Spiralni vrtložni tragovi helikoptera u letu prema naprijed, [2]

### 3.6.2. Prevenirija negativnih utjecaja

Za slučaj kada veći broj helikoptera različitih veličina lebdi u blizini, pozornost se treba obratiti na osiguranje da snaga i kontrolna ograničenja ne prelaze kritične vrijednosti. Rizici negativnog djelovanja mogu se izbjeći tako da se:

- 1) taksiranje obavi na zemlji, a ne u zraku
- 2) pri taksiranju u zraku, osigura dovoljan razmak od ostalih vozila i opreme, te izbjegava let iznad parkiranih zrakoplova i vozila.

Kontrolori zračne plovidbe i piloti se trebaju pridržavati propisanih minimuma razdvajanja, pogotovo kada zrakoplov manje težine slijeće odmah nakon helikoptera veće težine. Nispono strujanje zraka i vrtložne turbulencije lebdećeg helikoptera mogu utjecati i na susjedne USS – e. U fazi krstarenja, zrakoplovi trebaju osigurati znatnu horizontalnu udaljenost prilikom prolaska iza i ispod velikog helikoptera[5].

### 3.7. Daljinski upravljani zrakoplovni sustavi

Raspon krila uvelike utječe na analizu utjecaja vrtložnih tragova na daljinski upravljane zrakoplovne sustave (*Remotely Piloted Aircraft System - RPAS*), koji imaju znatno manju masu, ali i veći raspon krila u odnosu na zrakoplove sličnih MTOW. Postoji nekoliko modela vrtložnih tragova, prvi model opisuje vrtložne tragove i faktore koji utječu na intenzitet i trajanje te navode da se vrtložni tragovi kreću i do 1000 ft ispod zrakoplova te se zadržavaju na visini od 10 NM do 40 NM. Drugi model temelji se na rutama i u obzir se uzima područje u kojem bi se mogli pojaviti vrtložni tragovi, te se u obzir osim dimenzija zrakoplova uzima i točnost pozicije.

Treći model računa početak nastanka vrtložnih tragova uzimajući u obzir koeficijent okretanja zrakoplova oko uzdužne osi (*Rolling Moment Coefficient - RMC*), koji ne ovisi samo o ukupnoj cirkulaciji vrtloga nego i o nekoliko strukturalnih parametara pratećeg zrakoplova. Četvrtim modelom se predlažu tri različita načina za kvantifikaciju intenziteta vrtloga. Navedeni modeli uspoređuju se sa stvarnom cirkulacijom vrtloga u različitim atmosferskim uvjetima. Opisani su model bočnih i vertikalnih dimenzija[10].



### 3.7.1. Usporedba daljinski upravljanih zrakoplovnih sustava i zrakoplova

Usporedba se obavlja između zrakoplova porodice Airbus i dvije različite daljinski upravljane letjelice, odnosno Northrop Grumman RQ-4A Global Hawk (*HALE*) i General Atomics MQ-9 Ikhana (*MALE*) pod vodstvom NASA – e. Ikhana je manja i lakša od Global Hawk - a. Zrakoplovi porodice Airbus krstare na FL 390, RQ-4A krstari na FL 640 te je veća i brža od MQ-9, koja krstari na FL 500 i generira manje vrtložne tragove[10]. Kategorije daljinsko upravljanih letjelica:

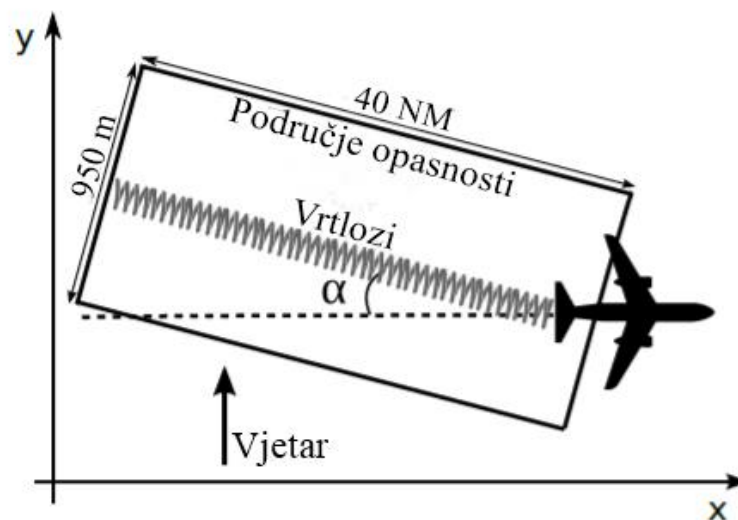
- 1) mikro i nano letjelice koje lete do 300 m visine (*Micro - UAV/ Nano - UAS - MAV/ NAV*)
- 2) letjelice koje vertikalno polijeću i slijeću te zahtijevaju USS – u (*Vertical Take-Off and Landing - VTOL*)
- 3) letjelice koje lete na maloj visini, kratke su izdržljivosti, a mogu letjeti od 45 minuta do 2 sata vizualnim načinom leta na visini do 450 m (*Low Altitude, Short Endurance - LASE*)
- 4) letjelice koje lete na maloj visini, duge su izdržljivosti te mogu nositi teret od nekoliko kilograma do visine od 5000 m, preko 20 sati (*Low Altitude, Long Endurance - LALE*)
- 5) letjelice koje lete na srednjim visinama, duge su izdržljivosti te lete preko 9000 m, od 20 do 40 sati i imaju napredni aerodinamički dizajn (*Medium Altitude Long Endurance - MALE*)
- 6) letjelice koje lete na velikim visinama, duge su izdržljivosti i lete do visine od 14 km te mogu danima, tjednima i mjesecima boraviti na jednom mjestu (*High Altitude Long Endurance - HALE*),[11].

Uzevši u obzir podatke o MTOW, razmaku krila, brzini krstarenja i visini krstarenja zrakoplova može se izračunati jačina vrtložnih tragova kao i utjecaj na daljinski upravljane letjelice[10].

### 3.7.2. Model bočnih dimenzija

Model bočnih dimenzija za izračun područja aktivnosti vrtložnih tragova u obzir uzima podskup dinamičkih bočnih karakteristika zrakoplova s učincima horizontalne brzine vjetra. Početna točka za model bočnih dimenzija ravna je linija iza putanje zrakoplova, koja mijenja smjer s obzirom na brzinu vjetra. Brzina vjetra utječe na smjer kretanja vrtložnih tragova.

U bočnom modelu vrtlozi se nalaze iza zrakoplova. Uzrok nastanka vrtložnih tragova iza zrakoplova je formacija aerodinamičkih pletenica, koje nastaju kao posljedica cirkulacije zraka oko nosećih površina zrakoplova. Vrtložni tragovi predstavljaju dvije usporedne spirale promjera do 35 ft, koje se brzo rotiraju. Vrtložni tragovi ostaju aktivni od 10 NM do 40 NM iza zrakoplova. Zrakoplovi u krstarenju prelete 40 NM za pet minuta, zato model u obzir uzima vrijeme postojanosti vrtložnih tragova. Vrijeme od pet minuta se za ovaj model odnosi na ukupno vrijeme koje je potrebno da bi vrtložni tragovi nestali s obzirom na viskoznost atmosfere. Prateći zrakoplov u obzir mora uzeti snagu i strukturalne karakteristike vrtložnih tragova. Slika 13. prikazuje bočno širenje vrtložnih tragova uključujući područje opasnosti[10].

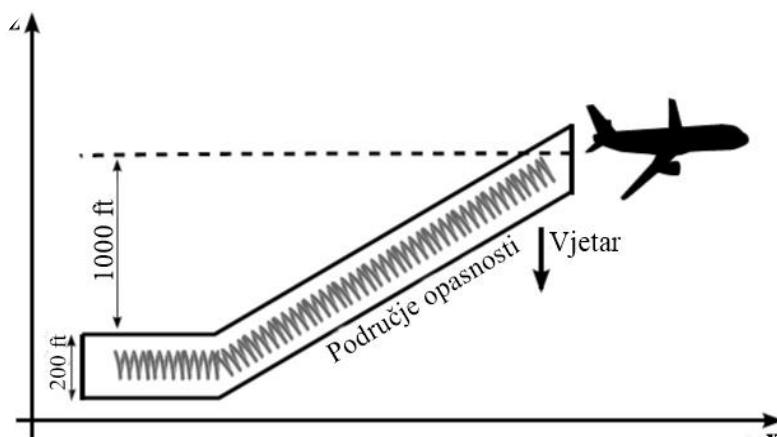


Slika 13. Bočno širenje vrtložnih tragova, [10]

### 3.7.3. Model vertikalnih dimenzija

Za definiranje putanje kretanja vrtložnih tragova, model se izvodi u vertikalnoj ravnini sa sljedećim pretpostavkama:

- 1) vrtložni tragovi se s obzirom na putanju leta zrakoplova prosječno spuštaju od 400 do 500 ft/min
- 2) na visini krstarenja zrakoplova, vrtložni tragovi nestaju na oko 1000 ft ispod zrakoplova.



**Slika 14.** Vertikalni prikaz područja opasnosti vrtložnih tragova, [10]

Razmak između osi vrtložnih tragova određuje se s obzirom na raspored strujanja zraka duž krila te ovisi o obliku krila i napadnom kutu krila. Stopa spuštanja vrtloga ovisi o strukturalnim i dinamičkim karakteristikama zrakoplova, a prikazana je na slici 14[10].

#### **3.7.4. Jačina vrtložnih tragova**

Nakon što se odredi duljina vrtložnih tragova, jačina s obzirom na područje opasnosti može biti određena izračunom koji u obzir uzima RMC. Većina varijabli potrebnih za izračun RMC – a ovisi o brzini i karakteristikama zrakoplova koje se smatraju konstantnim. Cirkulacija vrtložnih tragova smanjuje se s vremenom što znači da se i RMC smanjuje. Nakon izračuna RMC – a, može se odrediti utjecaj na prateće zrakoplove. Računanjem RMC – a koji generira prateći zrakoplov, određuje se sposobnost zrakoplova vezana za nadoknadu RMC – a uzrokovanog bočnim vrtložnim tragovima.

Na kraju se faktor „r“ definira kao odnos RMC - a i RMC - a uzrokovanog vrtložnim tragovima, odnosno kao moment vrtloga podijeljen s koeficijentom okretanja zrakoplova, kojeg prateći zrakoplov mora nadoknaditi. Ako je  $r > 1$ , prateći zrakoplov neće moći savladati moment vrtloga što dovodi do opasnosti, a ako je  $r < 1$  moment vrtloga moći će se savladati i neće doći opasnosti[10].

### 3.7.5. Vertikalno razdvajanje

Minimum vertikalnog razdvajanja za certificirane zrakoplove i opremu koji imaju dopuštenje za prometovanje u prostoru smanjenog vertikalnog razdvajanja (*Reduced Vertical Separation Minimum – RVSM*) iznosi 1000 ft. Vrtložni tragovi raspadaju se duljinom od 1000 ft sve dok se ne stabiliziraju i dok im se gustoća ne ustabilisi s okolnim zrakom. Kod dva vertikalno razdvojena zrakoplova, postoji mogućnost da onaj koji leti ispod, uleti u vrtložne tragovi zrakoplova koji leti iznad.

**Tablica 1.** Brzina i vrijeme stabilizacije

Model	A320	A333	A343	A388
brzina (ft/min)	586	737	880	1303
vrijeme stabilizacije (s)	102,4	81,4	68,2	46
granično vrijeme susreta MQ-9A (s)	80 – 100 ✓	120 – 170 X	130 – 180 X	160 – 220 X
granično vrijeme susreta RQ-4A (s)	60 – 80 ✓	120 – 160 X	130 – 170 X	160 -220 X

Izvor: [10]

Tablica 1. prikazuje brzinu i vrijeme stabilizacije za navedene zrakoplove porodice Airbus i daljinski upravljane letjelice. U tablici 1. prikazane su brzine zrakoplova, potrebno vrijeme stabilizacije kao i granično vrijeme za susret daljinski upravljanih letjelica i vrtloga zrakoplova. Za A320 vrijeme stabilizacije vrtloga je veće nego granično vrijeme susreta za obje daljinski upravljane letjelice, što znači da se vrtlozi neće ustabiliti na vrijeme te može doći do opasnih situacija. Za ostale slučajeve, brzina zrakoplova je prevelika i granično vrijeme susreta s vrtlogom je dovoljno da se oni stabiliziraju prije dolaska opasnosti. Oba tipa daljinsko upravljanih letjelica mogu prevladati opasnosti vrtložnih tragova generiranih od A320[10].

### 3.7.6. Uzdužno razdvajanje

Minimum uzdužnog razdvajanja pri radarskoj kontroli ovisi o točnosti radarskog sustava. Razdvajanje iznosi:

- 1) 3 NM u terminalnoj zoni
- 2) 5 NM na ruti do limitiranog dometa od 160 do 200 NM
- 3) 10 NM ispod.

Tablica 2. prikazuje vrijeme potrebno svakom zrakoplovu da savlada udaljenost od 3 NM, 5 NM i 10 NM na visini krstarenja. A320 ima najmanju brzinu leta stoga je i vrijeme potrebno za savladavanje tih udaljenosti najduže. Brzine krstarenja su relativno slične pa ne postoje značajne razlike u vremenu. Zadnja dva reda u tablici 2. prikazuju granično vrijeme susreta s vrtlogom zrakoplova za oba tipa daljinski upravljanih letjelica.

**Tablica 2.** Pragovi vremena susreta s vrtložnim tragovima

Minimum	A320	A333	A343	A388
3 NM	24 s	23 s	23 s	22 s
5 NM	39 s	39 s	38 s	37 s
10 NM	79 s	77 s	77 s	74 s
granično vrijeme susreta MQ-9A (s)	80 – 100	120 - 170	130 - 180	160 - 220
granično vrijeme susreta RQ-4A (s)	60 - 80	120 - 160	130 - 170	160 - 220

Izvor: [10]

Jačina vrtložnih tragova je i dalje dovoljno velika da se daljinski upravljana letjelica nađe u opasnoj situaciji ne uzimajući u obzir utjecaje vjetra, koji mogu značajno pogoršati cjelokupnu situaciju. Postoji iznimka za slučaj susreta RQ-4A i vrtložnih tragova A320 kod uzdužnog razdvajanja od 10 NM gdje je granično vrijeme susreta manje nego vrijeme potrebno za savladavanje udaljenosti. Vertikalno i uzdužno razdvajanje pokazalo se učinkovito za sve slučajeve osim za A320[10].

#### 4. PARAMETRI VRTLOŽNOG TRAGA ZRAKOPLOVA

Osnovni dio aerodinamičkog traga čine vrtložne pletenice sređene strukture i gotovo usporednih osi. Promjena parametara uzduž traga određena je procesima dinamike plina. Brzina kružnog toka oko svake vrtložne pletenice djeluje na slobodne pletenice i snižava trag brzinom:

$$w = \frac{\Gamma_0}{2 \cdot \pi \cdot L_v}$$

gdje je:  $\Gamma_0$  = radijalna brzina pletenice

$L_v$  = razmak krila

Kada bi brzina vrtložne pletenice bila stalna, snižavanje traga izgledalo bi kao ravna crta u vremenskoj dimenziji. Brzina snižavanja traga smanjuje se s vremenom, a kasnije lebdi. Lebdenje se objašnjava kompleksnošću traga, nastalo zbog snižavanja vrtložnog traga pri čemu se stvara izolirano područje u kojem je zrak odvojen od okolne sredine zatvorenom crtom toka "atmosfera aerodinamičkog turbulentnog traga". Presjek ima oblik elipse te se uzima kao granica traga. Ovisno o brzini snižavanja traga, atmosferski tlak se povećava što dovodi do veće gustoće traga. Kao posljedica navedenog, dolazi do povećanja temperature koja postaje veća od temperature okolne sredine. Razlika temperature pri jednakim tlakovima uzrokuje razlike u gustoći ( $\rho_v - \rho_H < 0$ ) te nastaje centrifugalna sila ( $F_c$ ) koja usporava snižavanje.

Tlakovi unutar vrtložnog traga i u atmosferi su jednaki, ali zbog razlike u gustoćama zraka, na granici traga nastaje sekundarno vrtloženje usmjereno na smanjenje cirkulacije vrtložnih pletenica i brzina u vanjskoj zoni toka. Snižavanje traga ovisi o:

- 1) početnoj brzini
- 2) vremenu snižavanja
- 3) zagrijavanju ispušnih plinova reaktivnog motora što povećava razliku gustoće, zbog čega je usporeno snižavanje traga i pojačano sekundarno vrtloženje koje smanjuje cirkulaciju vrtložnih pletenica.

Do neravnomjernog snižavanja traga dovodi:

- 1) promjena parametara u odnosu na uvjete Međunarodne standardne atmosfere (*International Standard Atmosphere – ISA*), odnosno zbog promjene temperaturnog gradijenta
- 2) postojanje slučajne vertikalne komponente vjetra uzduž traga
- 3) promjena cirkulacije izazvane kolebanjima napadnog kuta zrakoplova u odnosu na neku srednju vrijednost.

Što se trag manje snižava, to se dulje održava cirkulacija pletenice. Neovisno od tipa zrakoplova veličina snižavanja traga ne prelazi od 250 do 300 m. Turbulentni trag se uvijek premješta u suprotnu stranu od djelovanja sile uzgona. Turbulentni trag se pri manevru zrakoplova, nakon izlaska iz vertikalne ravnine snižava i premješta u horizontalnu ravninu. Intenzitet turbulentnog traga raste proporcionalno faktoru opterećenja kod manevra s preopterećenjem. Do smanjenja maksimalnih radijalnih brzina i povećanja polumjera jezgre vrtloga utječe postupno gašenje vrtložnih pletenica zbog viskoziteta zraka. Nestabilnost vrtložnog para utječe na gašenje turbulentnog traga kod zrakoplova koji manevriraju tako da povećavaju početne male deformacije osi vrtložnih pletenica gdje se njihovi pojedini dijelovi međusobno spajaju te se pravilno formiranje tragova gasi. Početne deformacije nastaju zbog turbulentne fluktuacije brzine unutar pletenica i zbog turbulentnosti u atmosferi. Povećanje deformacija i razlika u brzinama dovode do pojave valovitog oblika osi vrtložnih pletenica s promjenjivom duljinom vala. Brzina povećanja deformacija ovisi o relativnoj duljini vala i relativnom polumjeru jezgre. Pravilna simetrična struktura aerodinamičkih tragova počinje se narušavati pri povećanju deformacija osi sve do njihova spajanja. To se zbiva u vremenu:

$$t = t' \cdot \frac{L_v}{\Gamma}$$

gdje je:  $t'$  = trajanje simetrične strukture traga

$$L_v^2/\Gamma = \text{vrijeme spajanja}$$

Veličina deformacije jednaka je  $L_v/2$ , brzina deformacije vrtložnih tragova pletenica razmjerna je cirkulaciji i obrnuto proporcionalna razmaku. Vrijeme spajanja jednako je odnosu puta i brzine, a proporcionalno  $L_v^2/\Gamma$ . Koeficijent proporcionalnosti određuje se veličinom deformacije vrtložnih pletenica. Veći polumjer jezgre vrtložne pletenice znači veće područje turbulentnosti, veće početne deformacije osi pletenica i manje relativno vrijeme

trajanja simetrične strukture traga. Početne deformacije vrtložnih pletenica zbog vjetra povećavaju turbulentnost okolišne atmosfere na malim visinama. Uz iste ostale uvjete, povećanje ovisi o relativnom polumjeru ( $r^*$ ). Kod zrakoplova s ravnim krilima veće vitkosti, vjetar jače utiče na vrijeme narušavanja simetrične strukture traga nego kod zrakoplova s krilima manje vitkosti, kod kojih je relativni polumjer veći. Kompaktniju turbulentnu pletenicu vjetar lakše skreće i zanosi.

Cirkulacija vihora može se odrediti pomoću izraza:

$$\Gamma_0 = \frac{F_z}{\rho \cdot v \cdot L_v}$$

gdje je:  $F_z$  = sila uzgona

$\rho$  = gustoća zraka

$v$  = brzina leta

$L_v$  = razmak između osi vrtložnih pletenica

Prandt'l je zaključio da je poprečna površina mase zraka okruglog oblika i da joj je promjer razmjerni rasponu krila:

$$A = \frac{\pi \cdot b^2}{4}$$

gdje je:  $A$  = poprečna površina mase zraka

$b$  = razmah krila

Inducirani kut nisonog strujanja je u funkciji uzgona:

$$\alpha_I = \frac{c_z \cdot S}{\pi \cdot b^2}$$

gdje je:  $c_z$  = koeficijent uzgona

$S$  = površina krila

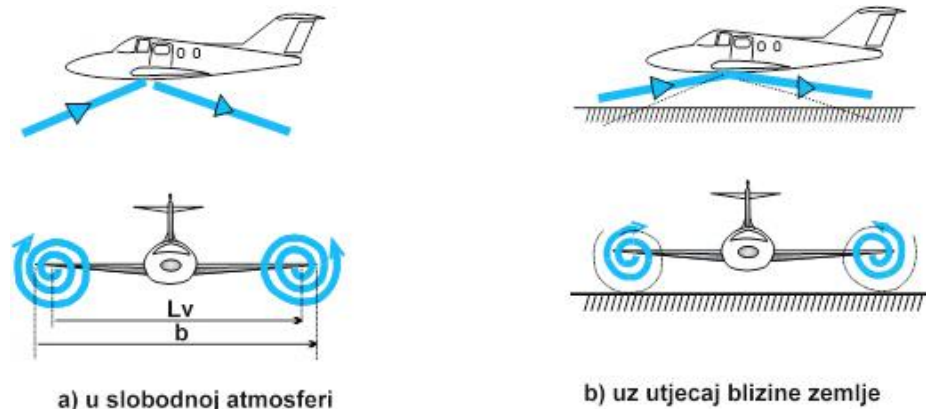
$b$  = razmah krila



Razmak osi vrtložnih pletenica određen je rasporedom opstrujavanja uzduž razmaha krila, a ovisi o tlocrtnom obliku krila i napadnom kutu. Relativni razmak osi vrtložnih pletenica omjer je stvarnog razmaka i razmaha krila (slika 15.):

$$L_{v_r} = \frac{L_v}{b}$$

gdje je:  $L_v$  = razmak krila  
 $b$  = razmah krila



**Slika 15.** Kruženje i refleksija aerodinamičkog vrtloga, [1]

Relativni razmak kod većine krila koja nemaju prijelom u napadnom rubu iznosi 0.8. Trup je relativno rasterećen kod zrakoplova sa strelastim krilima, te se obično stvara još jedan unutarnji vrtložni par. Unutarnji vrtložni par ima relativno malu cirkulaciju suprotnog smjera u odnosu na vanjski par. Povećanjem opstrujavanja oko središnjeg dijela krila, smanjuje se razmak između osi pletenica od 0.72 do 0.75. To je izraženo kod:

- 1) strelastih i delta krila pri velikim napadnim kutovima
- 2) krila s promjenjivom geometrijom na malim i srednjim kutovima zakošenja
- 3) izvlačenja uređaja za promjenu opstrujavanja krila (zakrilca, spojleri itd.), ako su smješteni unutar razmaha i ne mijenjaju platformni oblik krila.

U mlaznoj struji iza motora masa zraka je relativno mala te brzo nestaje u odnosu na kružno kretanje u aerodinamičkoj struji zraka slobodnih vrtloga, te se kod toga njen poprečni presjek uvećava, a osne brzine smanjuju.

Zrak koji je prošao granični sloj nakon silaska s opstrujanih površina zrakoplova, stvara donji turbulentni trag koji po svojoj strukturi podsjeća na reaktivnu struju motora s obratnim predznakom brzine.

Donja turbulentna struja ima manju kinetičku energiju od reaktivne struje te nestaje u neposrednoj blizini zrakoplova. Turbulencije i vrtloženja nastala interferencijom opstrujavanja, nastoje se eliminirati pri samoj konstrukciji zrakoplova, ako nisu eliminirana, radi se o manjoj masi zraka i manjem intenzitetu vrtloženja, koji nisu presudni čimbenik turbulentnog traga iza zrakoplova.

Područje neravnomjernih brzina unutar i blizu jezgre, popraćeno je promjenom tlaka. Povećanjem brzine unutar jezgre tlak pada da bi u osi vrtloga dosegao najmanju vrijednost. Jezgru pletenice predstavlja područje uz os vrtložne pletenice gdje se brzina povećava od nula do maksimalne radijalne brzine ( $w_{\max}$ ). Polumjer jezgre ( $r^*$ ) iza ravnih krila iznosi od 0.01 do 0.02 razmaha krila i praktično ne ovisi o napadnom kutu. Kod zrakoplova sa strelastim krilima pri malim napadnim kutovima, relativni polumjer ( $r'$ ) iznosi od 0.015 do 0.025 te se pri većim napadnim kutovima povećava od 0.04 do 0.06. Relativni polumjer jezgre pletenice omjer je stvarnog polumjera i razmaha krila zrakoplova:

$$r' = r^*/b$$

gdje je:  $r^* =$  polumjer jezgre

$b =$  razmah krila

Glavni uzrok nastanka turbulentnog traga iza zrakoplova formiranje je aerodinamičkih slobodnih vihora zbog cirkulacije nosećih površina. Slobodni vihori uzajamnim djelovanjem oblikuju vrtložne pletenice koje nastaju kao posljedica opstrujavanja krila. Iza krila zrakoplova stvara se par vrtložnih pletenica koje po veličini imaju jednaku, a po predznaku suprotnu cirkulaciju[1].

## **5. UTJECAJ TURBULENCIJE TRAGA ZRAKOPLOVA NA SIGURNOST LETENJA**

Najveći utjecaj na sigurnost leta zrakoplova predstavlja turbulentni aerodinamički trag prethodnog zrakoplova u fazi polijetanja i slijetanja, te prilikom malih vremenskih intervala leta između zrakoplova. Opasnost proizlazi iz preklapanja putanja leta zrakoplova u svim fazama leta. Opasnost leta na malim visinama i pri malim brzinama očituje se u smanjenju djelotvornosti komandi leta, te ponekad nema dovoljno rezerve otklona komandi za pariranje s nastalim silama i momentima.

Zbog dodatnog skretanja vrtložnih tragova može doći do sloma uzgona i svaljivanja zrakoplova. Kako bi se izbjegle opasnosti i povećala sigurnost u fazi polijetanja i slijetanja tijekom intenzivnog letenja, potrebno je znati vrijeme raspadanja vrtloga i pravac premještanja u zraku. Na turbulentne vihore u fazi polijetanja i slijetanja najveći utjecaj na premještanje i trajanje aerodinamičkog turbulentnog traga ima blizina zemljine površine. Blizina zemljine površine utječe tako da narušava simetričnost toka oko vrtložnih tragova i sprečava nispono kretanje zraka. Ako je pletenica nepokretna, smanjuje se razilaženje zraka te se pri povećanju tlaka stvara višak zraka s jedne strane pletenice, a s druge obrnuto. Priroda tih procesa dopušta pletenici da ostane nepokretna i počinje se kretati po površini zemlje s lijeve na desnu stranu. Na obje strane refleksne površine nedostajat će komponenta brzine slobodnog vihora, zbog čega će se vrtložna pletenica nad površinom premještati kao i dvije slobodne u atmosferi. Premještanje vrtložnih pletenica promatra se kroz niz vertikalnih presjeka kontrolnih površina. Premještanje vrtložnih pletenica pri polijetanju odnosno slijetanju najbolje je promatrati kroz niz vertikalnih presjeka, odnosno kontrolnih površina.

Vrtložne pletenice premještaju se horizontalno za vrijeme zaleta i nakon uzleta pa sve do postizanja visine razmjerne polovini raspona krila, te se razmak između njih povećava. Kod daljnjeg penjanja zrakoplova i udaljavanjem od zemljine površine, vrtložne pletenice se spuštaju i još više udaljavaju, što slabi zajedničko djelovanje i usporava snižavanje. Horizontalna komponenta brzine raste približavanjem zemlji, a pletenice se počinju kretati na visini jednakoj polovini raspona krila. Vrtložni tragovi mogu se primijetiti i bočno kod teških zrakoplova, što predstavlja ponovljeno vrtloženje izazvano zbog premještanja u blizini zemlje.

Neophodno je da intervali polijetanja budu veći od trajanja aerodinamičkog vrtložnog traga, bez obzira na to što se vrtložne pletenice razilaze, postoji velika vjerojatnost ulijetanja zrakoplova u vrtložni trag, zbog jednakih putanja pri polijetanju i slijetanju. Uzroci nestabilnosti zrakoplova u aerodinamičkom tragu pri polijetanju, odnosno slijetanju jednaki su kao i u drugim fazama leta, jedina razlika je u tome što ulogu drugoga vezanog vrtloga ima njegov odraz. Na kraju zaleta i neposredno po uzletu razvija se nestabilnost vrtloženja. S penjanjem, utjecaj zemlje slabi na račun drugog vrtloga. Ubrzavanjem i udaljavanjem od zemlje smanjuje se cirkulacija vrtložnih pletenica, usporava se razvoj nestabilnosti i povećava se vrijeme trajanja pravilne strukture aerodinamičkog traga. Vjetar ubrzava razvoj nestabilnosti, ali skraćuje ukupno trajanje vrtloga. Bočni vjetar neravnomjerno zanosi vrtlog izvan putanje leta zrakoplova. Bez obzira na postojanu brzinu bočnog vjetra vrtlog se zanosi neravnomjerno. Bočni vjetar brzine od 2 do 2,5 m/s usporava brzinu zanošenja vrtložne pletenice. U takvim uvjetima smanjuje se interval polijetanja na vrijednost određenu ubrzanjem raspadanja pravilne strukture traga zbog turbulentnosti atmosfere. Pri brzini vjetra većoj od 3 do 5 m/s, zanos je veći trag i ne ograničuje minimalne intervale polijetanja[1].

### **5.1. Prilaz i slijetanje**

Turbulentni tragovi zraka stvaraju značajne nagibne momente i vibracije iza svakog zrakoplova. Mala rezerva visina i brzine leta te veliki napadni kutovi smanjuju djelotvornost komandi leta, koje su dodatno opterećene vremenom za korekciju proračuna za slijetanje. Pri tome se mijenja profil snižavanja, konfiguracija zrakoplova, režim rada motora, povećava se intenzitet radio-komunikacije i psihofizičko naprezanje posade. Najkritičniju fazu leta predstavlja slijetanje zrakoplova, koje se može ublažiti većim intervalom slijetanja, ali u nekim zračnim lukama to nije moguće zbog velikog intenziteta prometa. Poznavanje karakteristika vrtloga bitno je radi procjene vjerojatnosti ulijetanja u aerodinamički turbulentni trag.

Najvažnije karakteristike su trajanje i brzina snižavanja traga. Vrijeme zadržavanja traga iza manjih i lakših zrakoplova iznosi od 30 do 60 sekundi, dok iza teških zrakoplova od dvije do pet minuta. Vertikalna brzina snižavanja vrtloga može biti u granicama od 1 do 5 m/s. Potrebno je poznavanje mogućih putanja u tijeku prilaznja na slijetanje, a koje se

konstruiraju za svaku zračnu luku. Za uvjete sigurnog slijetanja potrebno je utvrditi vjerojatnost ulijetanja u turbulentni trag prethodnika[1].

## 5.2. Vjerojatnost ulijetanja u turbulentni trag zrakoplova

Za izračun vjerojatnosti ulijetanja u turbulentni trag zrakoplova, prvo se određuje matematički očekivano vrijeme trajanja aerodinamičkog vrtloga u području mogućih putanja uz pretpostavku da su pogreške pilota slučajne i zanemarive. Trajanje turbulentnog traga slučajna je veličina koja se izračunava po formuli:

$$t = \frac{(H_s - H_{min})}{V_{sit}} = \frac{\Delta H}{w}$$

gdje je:  $H_s$  = stvarna visina leta zrakoplova

$H_{min}$  = visina donje granice promatranog presjeka u odnosu na zemlju u zadanom kontrolnom presjeku

$w$  = vertikalna brzina silaženja traga

U formuli  $\Delta H$  je slučajna veličina, dok je brzina vertikalna brzina silaženja traga zadana za tip zrakoplova i konfiguraciju u slijetanju. Vertikalna brzina silaženja traga smanjuje se s vremenom pa se koristi srednja vrijednost ( $w_{sr}$ ). Ako su poznate vjerojatne karakteristične visine kontrolnog presjeka, može se odrediti vrijeme zadržavanja aerodinamičkog vrtloga u zadanom kontrolnom presjeku. Matematičko očekivanje tog vremena određuje se po formuli:

$$m_t = \frac{(m_{sr} - H_{min})}{w_{sr}}$$

gdje je:  $m_t^*$  = matematičko očekivanje vremena zadržavanja turbulentnog vrtloga u zadanom kontrolnom presjeku

$m_{ts}$  = matematičko očekivanje trajektorije slijetanja u zadanom kontrolnom presjeku

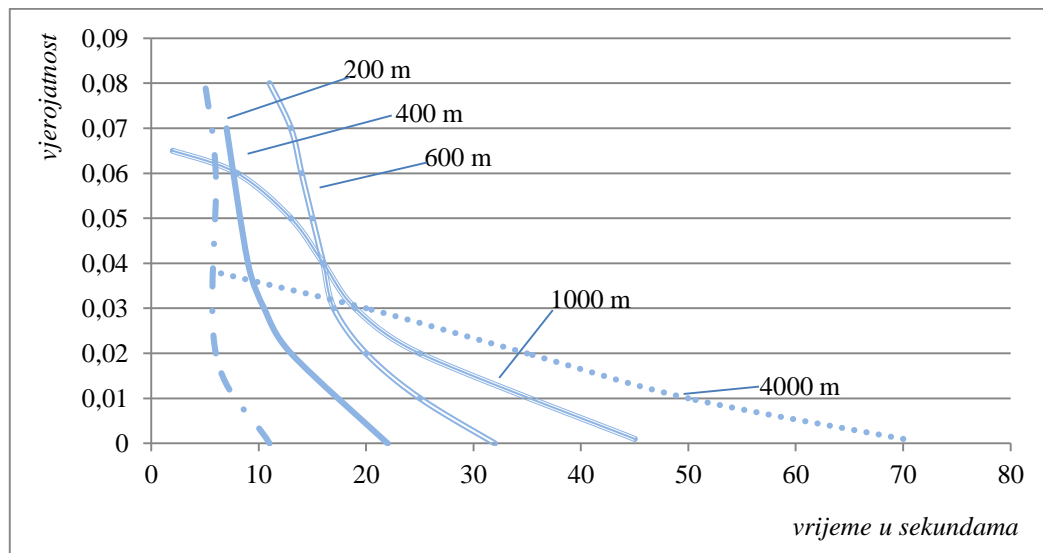
$w_{sr}$  = srednja vertikalna brzina silaženja turbulentnog vrtloga.

Proračuni pokazuju da se tijekom zauzimanja pozicije za slijetanje, matematički očekivano trajanje traga u području očekivanih trajektorija se mijenja, od 26 sekundi u točki ravnanja do 46 sekundi u točki završnog prilaznja, a za 96 % trajektorija završnog prilaza nakon vađenja iz zaokreta. Približavanjem zrakoplova USS – i, matematičko očekivanje trajektorije slijetanja u zadanom kontrolnom presjeku se povećava od 40 % u točki početka ravnanja pa do 70 % poslije zaokreta. Pretpostavke za procjenu vjerojatnosti ulijetanja zrakoplova u turbulentni trag prethodnog zrakoplova:

- 1) zrakoplov se promatra kao točka, odnosno težište, pa je trajektorij putanja težišta
- 2) pogreške završnog prilaza spadaju u normalni zakon pogrešaka
- 3) pilot leti bez procjene položaja traga prethodnika.

U prilazu se mijenja konfiguracija zrakoplova i napadni kut, pa su veća odstupanja po ravnini poniranja, dok su pogreške po kursu manje. Dimenzije zrakoplova puno su manje na većim udaljenostima u odnosu na dimenzije elipse očekivanog razmimoilaženja, čija je poluos na udaljenosti od 4 km veća od 120 m. Dimenzije elipse na udaljenosti manjoj od 1 km gotovo su identične dimenzijama zrakoplova koji ulijeće u turbulentni trag[1].

### 5.2.1. Proračun vjerojatnosti ulijetanja bez prisutnosti vjetra



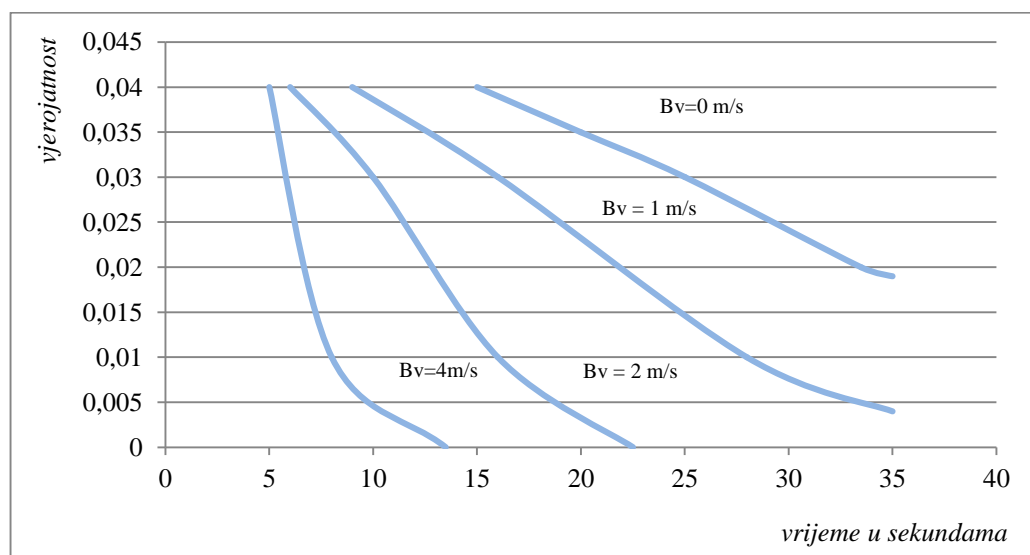
Izvor: [1]

**Grafički prikaz 1.** Vjerojatnosti ulijetanja u turbulentni trag iza prethodnika na udaljenosti do 1 km bez djelovanja vjetra

Grafički prikaz 1. prikazuje vjerojatnost ulijetanja u aerodinamički turbulentni vrtlog, uzimajući u obzir interval uzastopnog slijetanja ( $t_s$ ), udaljenost od USS – e i uvjete bez vjetra. Vjerojatnost ulijetanja u turbulentni trag prethodnika pri intervalu od 10 s pri udaljenosti od 4 km od praga USS – e iznosi 0,035, dok na udaljenosti od 600 m iznosi 0,1. Deset zrakoplova od 100 će pri navedenim uvjetima uletjeti u turbulentni trag prethodnika. Vjerojatnost ulijetanja u turbulentni trag prethodnika povećava se smanjenjem vremenskog intervala uzastopnog slijetanja. Pri uvjetima bez vjetra, vjerojatnost ulijetanja u turbulentni trag na udaljenosti 1000 m pri intervalu slijetanja od 40 s iznosi nula, dok za manji interval od 20 s iznosi 0,03, što znači da od 100 zrakoplova u završnom prilaženju tri mogu uletjeti u turbulentni trag prethodnika. Smanjenje intervala slijetanja na 5 s, vjerojatnost ulijetanja u turbulentni trag raste na 0,062, što znači da šest zrakoplova može uletjeti u aerodinamički turbulentni trag prethodnika[1].

### 5.2.2. Proračun vjerojatnosti ulijetanja uz prisutnost vjetra

Vjetar predstavlja najveći utjecaj na vjerojatnost ulijetanja u turbulentni trag prethodnika. Vjetar neutralizirajući vrtloge, smanjuje intenzivnost djelovanja vrtloga na zrakoplov odnoseći ga izvan područja vjerojatnih trajektorija.



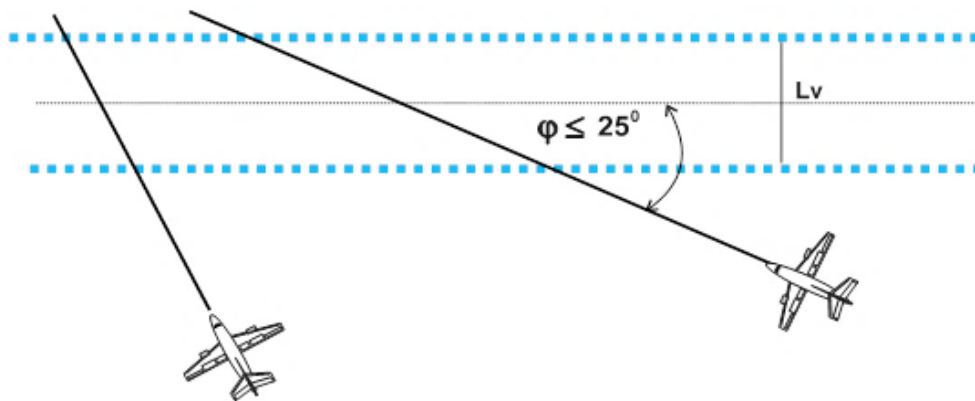
Izvor: [1]

**Grafički prikaz 2.** Vjerojatnosti ulijetanja u turbulentni trag iza prethodnika na udaljenosti do 1 km bez djelovanja vjetra

Grafički prikaz 2. prikazuje da pri brzini vjetra ( $B_v$ ) od 4 m/s, na udaljenosti od 1000 m i pri intervalu slijetanja ( $t_s$ ) od 12 s, vjerojatnost ulijetanja u turbulentni trag prethodnika je nula. Interval uzastopnog slijetanja pri kojemu je moguće uletjeti u turbulentni trag smanjit će se 3,33 puta u odnosu na istu udaljenost u uvjetima bez vjetra. Rezultati pokazuju kako vjerojatnost ulijetanja u turbulentni trag prethodnika, pri vremenskom intervalu od 20 s, na udaljenosti 1000 m pada od 0,036 u uvjetima bez vjetra, te pri brzini bočnog vjetra od 2 m/s pada na nulu. Proračun vjerojatnosti uz dane pretpostavke vrijedi i za vizualni (*Visual Flight Rules* - VFR) i za instrumentalni (*Instrument Flight Rules* - IFR) prilaz[1].

### 5.3. Djelovanje destabilizirajućih sila i momenata na zrakoplov

Pri ulijetanju zrakoplova u aerodinamički turbulentni trag prethodnika, mijenja se slika njegova opstrujavanja, napadni kutovi nekih dijelova i kutovi klizanja. Zbog preraspodjele pritisaka na površinama zrakoplova, neuravnotežene aerodinamičke sile i momenti izazivaju njegovo nepravilno kretanje. Destabilizirajuće kretanje određeno je intenzitetom i smjerom turbulentnih tragova, vremenom djelovanja na zrakoplov i djelovanjem pilota putem upravljačke palice. Intenzitet je mnogostruko veći kod težih zrakoplova. Opasnost ulijetanja u vrtložni trag prethodnika opasna je ponajviše zbog toga što je struja nevidljiva i jakog je intenziteta turbulentnog strujanja. Prilikom presijecanja turbulentnog aerodinamičkog traga pod velikim kutom, zrakoplov u njemu provede manje od desetinke sekunde, a djelovanje turbulentnog aerodinamičkog traga očituje se u obliku nenadanog udarnog opterećenja koje praktično ne mijenja osnovne parametre leta (slika 16.).



Slika 16. Kut presijecanja turbulentnog traga, [1]



Aerodinamički turbulentni trag narušene strukture, očituje se kao bacanje u turbulentnom zraku, neovisno o kutu ulijetanja u struju i ne ugrožava sigurnost letenja. Najopasnije presijecanje aerodinamičkog turbulentnog traga je pri malim kutovima ( $\varphi < 25^0$ ) do kojih može doći prilikom polijetanja ili slijetanja, te pri letovima vojnih formacija u zbijenom poretku na istoj ruti s manjim vremenskim intervalima. Pri izvođenju oštih zaokreta, zrakoplov može uletjeti u vlastitu vrtložnu struju[1].

#### 5.4. Mjerenje vrtložnih tragova kohernim impulsnim doplerom

Koherni impulsni dopler služi za otkrivanje i rangiranje vrtložnih tragova (*Coherent Doppler Lidar Detection and Ranging – CDL*) te je nužan je alat za njihov prikaz, koji radi tako da odašilje lasersku zraku i otkriva zračenje kroz raspršene čestice atmosferskog aerosola[7]. Uređaj za lasersko skeniranje (*Light Detection and Ranging – LIDAR*) nalazi se u blizini USS – e, a može biti instaliran i u zrakoplov, te koristi blisko-infracrveni dio elektromagnetskog spektra za aktivno prikupljanje podataka, danju ili noću, u sjeni, ali i u uvjetima slabije vidljivosti. Koristi automatske i polu-automatske tehnike filtriranja podataka. Način rada LIDAR – a:

- 1) odašilje impuls laserske svjetlosti uz precizno bilježenje vremena
- 2) detektira refleksiju tog impulsa od objekta uz precizno bilježenje vremena
- 3) koristeći konstantnu brzinu svjetlosti vremenska razlika između odašiljanja i reflektiranja koristi se za računanje izravne udaljenosti između senzora i objekta
- 4) uz pomoć vrlo točnog položaja senzora dobivenog iz satelitske navigacije (*Global Positional System - GPS*) i orijentacije senzora dobivene iz inercijalne jedinice (*Inertial Measurement Unit - IMU*) izračunavaju se pravokutne XYZ koordinate točaka reflektirajuće površine[9].

Osim što mjeri vrtložne turbulencije, CDL sustav može mjeriti vjetar i turbulencije. Preko brzine LOS komponente (*Line of Sight - LOS*) može se dobiti gibanje zraka analizom pomaka doplera u frekvenciji povratnog signala. Uz LOS i povratne procese širenja spektra dobiju se karakteristike vrtložnih tragova. CDL sustav zasniva se na tehnologiji svjetlovoda i brze digitalne obrade signala te je opremljen laserom od 1,5  $\mu\text{m}$  koji ima podesivu impulsnu

duljinu (od 100 ns do 800 ns) i frekvenciju ponavljanja od 0,1 m/s. Raspon skeniranja i detekcija vrtložnih tragova iznosi 3000 m. Sklop je napravljen od optičkih vlakana te radi stabilno pri promjeni temperature i vibracijama. Brze spektralne procjene (*Fast Fourier Transform* - FFT) obrađuju se programirajućim poljem u stvarnom vremenu (*Field Programmable Gate Array* - FPGA). Navedene stavke čine ovaj sustav pouzdanim, stabilnim i visoko integriranim[7].

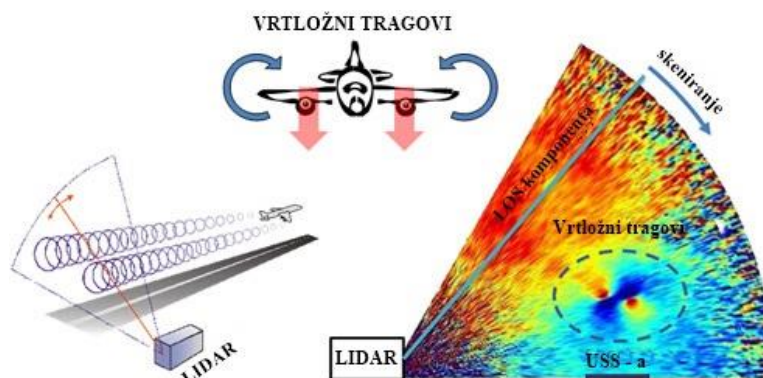
#### 5.4.1. Način promatranja

Za praćenje vrtložnih tragova u modu raspona brzine (*Range Height Indicator* - RHI) zrakoplova koji slijeće, laserska zraka skenira u ravnini koja je okomita na putanju leta zrakoplova.



Slika 17. Prikaz LIDAR - a, [6]

Na slici 17. prikazan je izgled LIDAR – a, čija je prostorna preciznost ograničena zbog trajanja impulsa i uzorkovanja podataka. Pri osnovnoj detekciji LIDAR je postavljen ispod putanje polijetanja ili slijetanja zrakoplova (slika 18.). Zrakoplovi tako lete prema zrakama te prolaze kroz detekcijski prostor. U početku sustav skenira nekoliko mjerenja radi formacije područja mjerenja koje pokriva vrtložne koridore[7].



Slika 18. Način promatranja LIDAR – a, [16]

#### 5.4.2. Očitavanje rezultata

Tijekom pokusa na polje ispitivanja primijenjen je jednostavni doplerski spektar radi potvrde širenja doplera s vrtložnim tragovima i određivanja početne arhitekture. Za svaki kut podizanja u skeniranom mjerenju, LIDAR dobiva prostorni signal s rezolucijom od 30 m, a za svaku prostornu točku uzrokovanja detektira se povratni signal te se spektar izračunava Fourierovom transformacijom. Crvenom i plavnom bojom na slici 16. označeno je kretanje zračne mase s obzirom na lasersku zraku. Boja pozadine ukazuje na brzinu detektirane zračne mase. Crvena boja ukazuje na kretanje zračnih masa prema LIDAR – u, a plava boja daleko od LIDAR – a. Za slučaj kada nema detekcije zračne mase, boja pokazuje projekciju brzine vjetra s obzirom na smjer laserske zrake. Kada postoji zračna masa boja ukazuje na težinski zbroj vrtložnih tragova i pozadinskog vjetra, što znači da se boja pomiče s vrtložnom strujom tako da se vrtložni tragovi mogu izvući iz pozadine. Kako bi se istražile karakteristike vrtložnih tragova, pozitivne i negativne brzine moraju se izdvojiti za dobivanje skupa, koji predstavlja zbroj tangencijalnih brzina vrtložnih tragova i radijalne brzine vjetra.

Može se prikazati i vremenska ovisnost cirkulacije vrtložnih tragova. Vrtložni tragovi kreću se prema dolje, pa laserske zrake skeniraju većom brzinom preko parova vrtloga (sabijeni su). Detektirani radijusi vrtložnih tragova manji su nego stvarne vrijednosti pa su vrijednosti vrtložne cirkulacije podcijenjene. Kada LIDAR skenira silazno prema dolje, proširuju se karakteristike vrtloga, te je cirkulacija vrtložnih tragova precijenjena. Sve dok kretanje oko središnje pozicije može biti dobiveno serijom penjućih i spuštajućih skeniranja, putanja i brzina vrtložnih tragova može biti procijenjena, a te informacije mogu biti upotrijebljene za ispravljanje podataka vezanih za vrtložne tragove, odnosno za dobivanje točnih dimenzija i cirkulacije vrtloga. Vremenski niz cirkulacije može se izračunati iz korigirane distribucije brzine. Za svaki zrakoplov koji leti može se dobiti vremenska serija LOS brzine i raspršenje brzine u prostoru uz pomoć LIDAR sustava. Analiza raspršenja brzine predstavlja neophodan pristup proučavanju vrtložnih tragova zrakoplova.

Mjerenje vrtložnih tragova može se jedino dobiti uz pomoć LIDAR – a koji detektira vrtložne tragove zrakoplova kao posljedicu uzgona s različitim modovima promatranja. CDL je praktični alat za istraživanje vrtložnih tragova koji može otkriti jačinu koja utječe na postavljanje učinkovitog intervala i osiguranja uzgona zrakoplova[7].

## 6. MEĐUNARODNA REGULATIVA I PRAKSA TURBULENCIJE TRAGA

Međunarodne regulative temelje se na težinskom razdvajanju zrakoplova, osim regulative Sjedinjenih Američkih Država koja propisuje šest kategorija zrakoplova od A do F, a koje se temelje na parametrima vrtložnih tragova. Za primjer međunarodne regulative usporedit će se važeća regulativa na Novom Zelandu i u Sjedinjenim Američkim Državama.

### 6.1. Novi Zeland

Razdvajanje zrakoplova temelji se na podjeli zrakoplova prema maksimalnoj težini u polijetanju, a dijele se u tri grupe:

- 1) laki – MTOW je manja od 7000 kg
- 2) srednji – MTOW je između 7000 kg i 136 000 kg
- 3) teški – MTOW je veća od 136 000 kg.

**Tablica 3.** Zrakoplovi u fazi krstarenja

Vodeći zrakoplov	Prateći zrakoplovi ili im se putanje leta sijeku	Minimalna udaljenost razdvajanja
A380	A380	4 NM
	A380 teški	6 NM
	Srednji	7 NM
	Laki	8 NM
Teški zrakoplovi	Teški	4 NM
	Srednji	5 NM
	Laki	6 NM
Srednji zrakoplovi	Laki	5 NM

Izvor: [2]

Tablica 3. prikazuje razdvajanje koje se primjenjuje u svim fazama leta zrakoplova pod nadzorom kontrole zračne plovitbe. Minimalne udaljenosti razdvajanja primjenjuju se za prateće zrakoplove i za slučaj križanja putanja leta, ako lete na istoj razini leta ili 1000 ft jedan ispod drugoga. Za istu situaciju kada je razdvajanje manje od dvije minute, kontrolori zračne plovitbe trebaju izdati upozorenje o vrtložnim turbulencijama.

**Tablica 4.** Zrakoplovi u dolasku

Vodeći zrakoplov	Prateći zrakoplovi	Minimalno vrijeme razdvajanja
<b>A380</b>	A380	2 minute
	A380 teški	2 minute
	Srednji	3 minute
	Laki	4 minute
<b>Teški zrakoplovi</b>	Teški	2 minute
	Srednji	2 minute
	Laki	3 minute
<b>Srednji zrakoplovi</b>	Laki	3 minute

Izvor: [2]

Tablica 4. prikazuje razdvajanje zrakoplova kada nisu pod nadzorom kontrole zračne plovodbe. Razdvajanje se odnosi na zrakoplove koji u dolasku koriste istu ili usporednu USS – u (razmaknute manje od 760 m) te za slučaj križanja putanja leta, ako lete na istoj razini leta ili 1000 ft jedan ispod drugoga.

**Tablica 5.** Zrakoplovi u odlasku

Vodeći zrakoplov	Prateći zrakoplovi	Minimalno razdvajanje zrakoplova u zraku	
		Polijeću s iste pozicije	Polijeću s različite pozicije
<b>A380</b>	A380	2 minute	3 minute
	A380 teški	2 minute	3 minute
	Srednji	3 minute	4 minute
	Laki	4 minute	4 minute
<b>Teški zrakoplovi</b>	Teški		
	Srednji	2 minute	3 minute
	Laki		
<b>Srednji zrakoplovi</b>	Laki	2 minute	3 minute

Izvor: [2]

Tablica 5. prikazuje razdvajanje zrakoplova kada nisu pod nadzorom kontrole zračne plovodbe.

Razdvajanje se odnosi na zrakoplove u odlasku koji koriste istu ili usporednu USS – u (razmaknute manje od 760 m) te za slučaj križanja putanja leta na istoj visini ili manje od 1000 ft ispod. Standardi za razdvajanje zrakoplova minimalna su prevencija protiv vrtložnih tragova čiji se utjecaju mogu pojaviti usprkos primjeni navedenih standarda. Na Novom Zelandu ne postoje minimumi razdvajanja za dva srednja zrakoplova ili dva laka zrakoplova, te je za navedene slučajeve odluka o minimumu razdvajanju na pilotima[2].

### **6.1.1. Izbjegavanje vrtložnih turbulencija**

Za izbjegavanje vrtložnih turbulencija:

- 1) prateći zrakoplov ne smije letjeti preblizu vodećeg zrakoplova
- 2) prateći zrakoplov ne smije letjeti ispod putanje vodećeg
- 3) treba se obratiti posebna opreznost u uvjetima slabog vjetra[2].

### **6.1.2. Intenzitet i postojanost vrtložnih tragova**

Početni intenzitet vrtložnih tragova određen je težinom, brzinom, konfiguracijom, rasponom krila i napadnim kutom. Najvažnije varijable za određivanje intenziteta vrtložnih tragova su atmosferska stabilnost, jačina i smjer vjetra, učinak tla i mehaničke turbulencije. Najjače vrtložne tragove proizvode teški zrakoplovi pri malim brzinama i pri velikim napadnim kutovima. Zrakoplovi s malim rasponom krila generiraju intenzivnije vrtložne tragove u odnosu na zrakoplove s većim rasponom. Kontinuitet zadržavanja vrtložnih tragova najveći je u blizini zemljine površine u uvjetima slabog vjetra i stabilnim atmosferskim uvjetima. Vjetar jačine tri do pet čvorova uzrokuje zadržavanje vrtložnih tragova u području USS – e, te može uzrokovati njihovo širenje prema drugoj USS - i. Turbulencije u atmosferi uzrokuju brži nastanak vrtložnih tragova[2].

## **6.2. Sjedinjene Američke Države**

Regulativa na snazi u Sjedinjenim Američkim Državama pruža ažurirane podatke RECAT – EU, a donesene je od strane FAA programa za vrtložne turbulencije. Umjesto težinskog razdvajanja zrakoplova, kategorizacija se obavlja na temelju parametara vrtložnih tragova. Rast potražnje za većim kapacitetom i učinkovitosti na zračnim lukama raste svake godine. Glavno ograničenje predstavlja USS – a, zbog ograničenog broja polijetanja i

slijetanja zrakoplova u određenom vremenu. Za razliku od vizualnih letova, propusnost USS - e ovisna je o propisanom radarskom razdvajanju ili vrtložnom razdvajanju zrakoplova u dolasku. Postoje dva minimuma razdvajanja zrakoplova:

- 1) minimumi za izbjegavanje sudara i zahtjevi komunikacijskih, navigacijskih i nadzornih sustava (*Communications Navigation and Surveillance – CNS*)
- 2) minimumi razdvajanja zrakoplova zbog vrtložnih turbulencija.

Primjenjujući pravila razdvajanja propisana od strane FAA dolazi do smanjenja minimuma razdvajanja zrakoplova, odnosno postizanja cilja za većim kapacitetom, pogotovo u inicijativi FAA NextGen, koja se temelji na smanjenju minimuma razdvajanja zrakoplova sa stajališta izbjegavanja sudara i poboljšanja nadzora. Pravila razdvajanja temeljena težini zrakoplova nisu dovela do nesreća, no problem je bio preveliki razmak razdvajanja između zrakoplova, što uvelike utječe na propusnost i kapacitet USS – e, stoga je bilo potrebno razdvajanje temeljiti na drugom setu parametara. Kategorizacija se sastoji od tri faze čiji je cilj dinamičnije razdvajanja zrakoplova u pogledu vrtložnih turbulencija:

- 1) faza I – statička kategorizacija razdvajanja vrtloga zrakoplova
- 2) faza II - statičko razdvajanje vrtložnih parova zrakoplova
- 3) faza III - dinamičko razdvajanje vrtložnih parova zrakoplova koje uzima u obzir atmosferske uvjete i podatke o zrakoplovu.

Treća faza je još u razvitku i početnom stadiju, a sve tri faze su pod FAA NextGen ciljevima za povećanje učinkovitosti i kapaciteta nacionalnog zračnog prostora (*National Airspace System - NAS*) ispunjavajući obvezu prema Međunarodnoj organizaciji za civilno zrakoplovstvo (*International Civil Aviation Organisation – ICAO*) i blokovima (*Aviation System Block Upgrades – ASBU*)[4].

### **6.2.1. Faza I**

Prva faza dijeli zrakoplove u šest kategorija:

- 1) kategorija A – super teški zrakoplovi (A388)
- 2) kategorija B – teški zrakoplovi (B744)
- 3) kategorija C – srednje teški zrakoplovi (B763)
- 4) kategorija D – veliki zrakoplovi (B738)
- 5) kategorija E – srednji zrakoplovi (E145)
- 6) kategorija F – mali zrakoplovi (FA50).

MTOW i maksimalna težina zrakoplova u slijetanju (*Maximum Landing Weight – MLW*) povezane su brzinom prilaženja i razmakom između krila zrakoplova, što preciznije predstavlja buđenje vrtložnih turbulencija kao i ranjivost pratećeg zrakoplova. Faza I implementirana je na 17 zračnih luka od travnja 2016. godine. Prva faza donosi još jednu složenu kategoriju zrakoplova, u odnosu na prethodnih pet kategorija s dostupnosti alata za podršku kontrolorima zračnog prometa (*Decision Support Tool - DST*), kao i alata za upozorenje kontrolora vezanog za razdvajanje zrakoplova (*Automated Terminal Proximity Alert – ATPA*), te zahtjeva prikazivanje kategorija zrakoplova na stripove. ATPA služi za upozorenje brzine između zrakoplova, dok DST upozorava na smanjenje minimuma razdvajanja[4].

### **6.2.2. Faza II**

Prijelaz s prve na drugu fazu uključuje prijelaz sa šest propisanih kategorija na matrične parove razdvajanja. S praktične strane, sve dok Nacionalni zrakoplovni prostor (*National Aeronautics Space – NAS*) ne podupre razdvajanje po parovima, implementacija druge faze temelji se na tome da se veća učinkovitosti i korist mogu ostvariti smanjenjem minimuma razdvajanja, odnosno prilagodbom kategorizacije mješovitom zračnom prometu.

Matrični način razdvajanja parova zrakoplova temelji se na parametrima vrtložnih tragova, te je razdvajanje manje od razdvajanja vezanog za rizične sudare zrakoplova. Druga faza temelji se na najčešćim vrstama zrakoplova u zračnom prostoru, odnosno obuhvaća 99 % zrakoplova koji prometuju na području SAD – a na 32 zračne luke te zrakoplove čiji će se broj povećavati, a koji nisu uključeni u tih 99 %. Baza podataka o fizičkim karakteristikama zrakoplova i razmacima krila nadopunjena je novim podacima, u odnosu na prvu fazu. Mjerenja su napravljena za zrakoplove u dolasku i u odlasku. Podaci za dolaske mjereni su na Međunarodnoj zračnoj luci u San Franciscu i na Međunarodnoj zračnoj luci John F. Kennedy, dok su podaci za odlaske mjereni na Međunarodnoj zračnoj luci Frankfurt am Main i Međunarodnoj zračnoj luci u San Franciscu. Mjerenja su obavljena za 230 000 slučajeva dolazaka i odlazaka zrakoplova.

Profili brzina osnova su za razvoj mjernih podataka. Profili brzina za dolaske i odlaske uzimaju u obzir 123 ICAO tipa zrakoplova u mješovitom prometu. Podaci su dobiveni iz pet milijuna letova koji su povezani s vremenskim uvjetima i parametrima vezanim uz kontrolu zračnog prometa, kako bi se formulirale brzine i vrijeme leta u funkciji udaljenosti do 14 NM



u odnosu na USS – u. Smanjenje razdvajanja zrakoplova u parovima postiže se definiranjem referentnih vrijednosti kao i graničnih vrijednosti. Primjena cirkulacija iza zrakoplova veće kategorije izračunava dopuštenu referentnu cirkulaciju za prateći zrakoplov, koja se koristi za sve vodeće zrakoplove za slučaj istog pratećeg. Matrično razdvajanje parova odobreno je od strane FAA u 2015. godini. Cilj druge faze je povećanje kapaciteta i propusnosti, kao i praktičnije upravljanje za kontrolore zračne plovidbe.

Budući razvoj temelji se na dodavanju zrakoplova u matričnu bazu podataka, kao i na procjeni primjene mjera za manje zrakoplove. Očekuje se da će sljedeća RECAT faza 2,5 uključivati dodatnu procjenu za odlaske koji se sijeku kao i razmake usporednih USS – a. Treća faza predviđa dinamičko razdvajanje parova u stvarnom vremenu s podacima iz okoline ili dobivenim iz zrakoplova, te se očekuje da će stupiti na snagu 2020. godine[4].

## **7. STATUS PREVENCIJE TURBULENCIJE TRAGA ZRAKOPLOVA U EUROPI**

Europska organizacija za sigurnost zračne plovidbe objavila je novu kategorizaciju vezanu za vrtložne turbulencije, koja se odnosi na razdvajanje zrakoplova u prilazu i odlasku. Kategorizacija se temelji na skupu načela, uspoređujući nastanak vrtložnih tragova i otpor između tipova zrakoplova gdje su oni svrstani prema težinskim karakteristikama. Podjela smanjuje norme razdvajanja određenih zrakoplova, što povećava propusnost USS – e uz prihvatljivu razinu sigurnosti. Najosjetljiviji su mali zrakoplovi, a donesena normativa RECAT – EU propisuje još veće norme razdvajanja vezane za ove zrakoplove, što još više povećava njihovu sigurnost. Tehnički pregled proveden je od strane Europske organizacije za zrakoplovnu sigurnost (*The European Aviation Safety Agency - EASA*).

### **7.1. Normativa RECAT-EU**

Cilj RECAT – EU bilo je povećanje kapaciteta u vršnim prometnim razdobljima, smanjenje vremena potrebnog za slijetanje ili polijetanje zrakoplova, smanjenje kašnjenja i smanjenje vremena razdvajanja zrakoplova u odlasku, kroz fleksibilnost upravljanja protokom zračnog prometa (*Air Traffic Flow Management - ATFM*). Potražnja za dodatnim kapacitetom i učinkovitosti na zračnim lukama diljem Europe je velika, kao i potreba za većom propusnosti USS – a. Kapacitet propusnosti USS – e usko je povezan s minimalnim razdvajanjem između zrakoplova, koje ovisi o sposobnostima pružatelja usluga u zračnoj plovidbi (*Air Traffic Services - ATS*) i vrtložnim turbulencijama. Tijekom prethodnih godina povećalo se znanje o ponašanju vrtložnih tragova, kao i bolje razumijevanje fizičkih procesa njihova nastanka. Znanje o vrtložnim turbulencijama omogućilo je novu kategorizaciju i reviziju minimuma razdvajanja zrakoplova, što dovodi do optimizacije kapaciteta zračnih luka i veće učinkovitosti s prihvatljivom razinom sigurnosti[3].

#### **7.1.1. Pozadina projekta**

Glavna prekretnica u upravljanju zračnim prometom (*Air Traffic Management – ATM*) bila je izgradnja jednog od najvećih zrakoplova na svijetu, Airbus – a 380. Izgradnja A380 je dovela do potrebe novog pristupa vezanog za razdvajanje zrakoplova, budući da zrakoplov stvara veće vrtložne turbulencije nego zrakoplovi teške kategorije. Pod vodstvom Europske komisije, uspostavljena je ICAO radna grupa predstavnicima iz EUROCONTROL – a, EASA

– e, AIRBUS – a i FAA s ciljem procjene vrtložnih turbulencija zrakoplova A380 i uspostave minimuma razdvajanja. Nakon smjernica minimumima razdvajanja zrakoplova koji leti iza A380, donesenih od strane ICAO, normativa je proširena s ciljem utvrđivanja mogućnosti revizije globalne regulative. Nakon prvog prijedloga RECAT – 1, daljnje poboljšanje zahtijevano je od europskih pružatelja usluga u zračnoj plovidbi s ciljem povećanja kapaciteta. AIRBUS je u suradnji s EUROCONTROL - om i EASA - om obavio dodatno ispitivanje leta za reviziju razdvajanja A380[3].

### 7.1.2. Implementacija normative RECAT-EU

Sigurno razdvajanje zrakoplova u obzir uzima vrtložne tragove generirane od strane zrakoplova, kao i one koji utječu na druge zrakoplove, bilo u letu iza drugog zrakoplova, u odlasku ili u završnom prilazu. Tada postojeća ICAO pravila vezana za vrtložne tragove odnosila su se na kategorizaciju zrakoplova na lake, srednje i teške te su uvedena prije 40 godina i samim time postala „zastarjela“. Tablica 6. prikazuje ICAO kategorizaciju zrakoplova koja u obzir uzima A380 zrakoplov.

**Tablica 6.** ICAO kategorizacija i minimumi razdvajanja

Vodeći/Prateći	A380-800	Teški	Srednji	Laki
A380-800		6 NM	7 NM	8 NM
Teški MTOW ≥ 136 tona		4 NM	5 NM	6 NM
Srednji 7 tona ≤ MTOW < 136 tona				5 NM
Laki MTOW < 7 tona				

Izvor: [3]

Airbus A380 – 800 s MTOW koja iznosi 560 000 kilograma, predstavlja najveći putnički zrakoplov, spada u kategoriju teških zrakoplova za koji nije definirana gornja

granica. U slučaju kada nema potrebe razdvajanja zrakoplova zbog vrtložnih tragova, razdvajanje se obavlja putem radara (*Minimum Radar Separation* - MRS) te iznosi:

- 1) 3 NM, odnosno 2,5 NM pod posebnim okolnostima
- 2) onoliko koliko propiše nadležni pružatelj usluga u zračnoj plovidbi.

Svaka kategorija pokriva širok raspon veličina zrakoplova, što dovodi do konzervativnog načina razdvajanja zrakoplova u većini slučajeva, odnosno gubitka propusnosti USS – a[3].

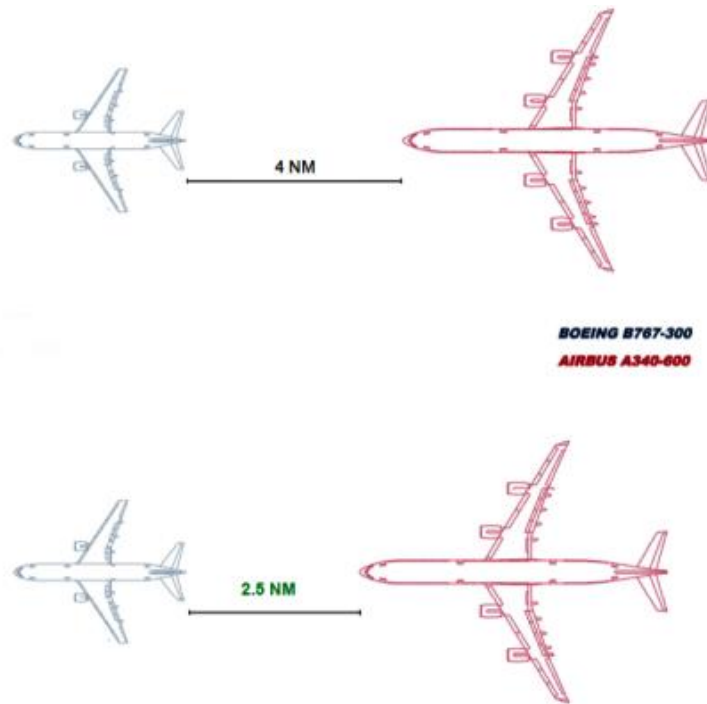
### 7.1.2.1. Teški zrakoplovi

Slika 19. prikazuje usporedbu veličine dvaju zrakoplova, A340 - 600 i B767 – 300 koji spadaju u kategoriju teških zrakoplova, s razlikom raspona krila više od 15 m što dovodi do prevelikog minimuma razdvajanja za slučaj kada lete kao vodeći.



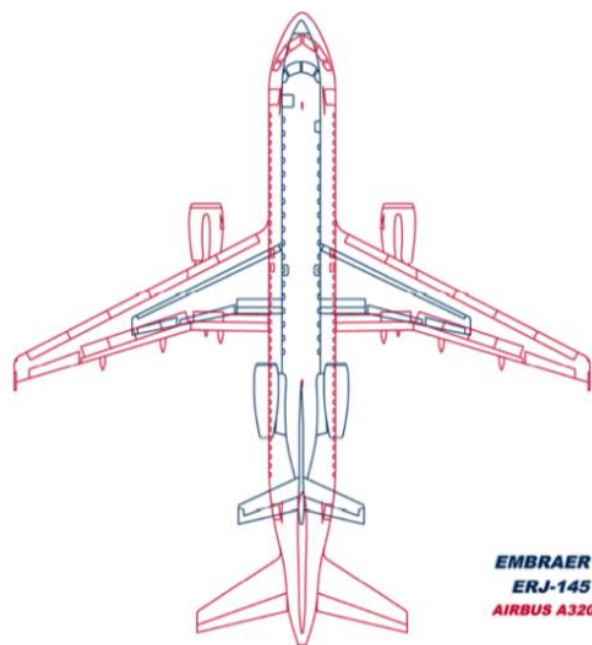
**Slika 19.** Usporedba veličine zrakoplova A340 - 600 i B767 – 300, [3]

Slika 20. prikazuje razdvajanje zrakoplova A340 – 600 i B767 – 300, koje je doneseno od strane ICAO – a i novu RECAT – EU normu razdvajanja koja je puno učinkovitija, a odnosi se na teške zrakoplove. Razlika razdvajanja između ICAO i RECAT - EU iznosi 1,5 NM manje.



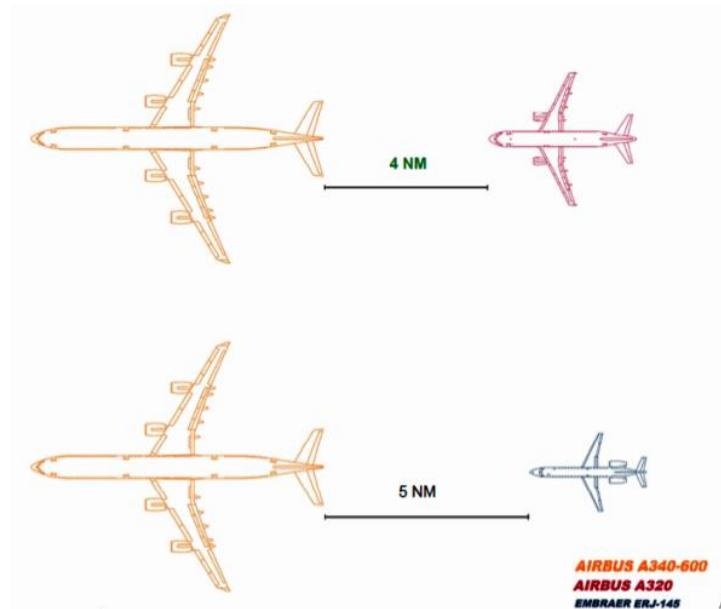
Slika 20. ICAO i RECAT - EU minimumi razdvajanja, [3]

### 7.1.2.2. Srednji zrakoplovi



Slika 21. Usporedba veličine A320 i ERJ – 145, [3]

Na slici 21. prikazani su A320 i ERJ – 145 koji spadaju u kategoriju srednjih zrakoplova, s razlikom raspona krila više od 12 m, što dovodi do prevelikog minimuma razdvajanja za slučaj kada A320 leti kao prateći.

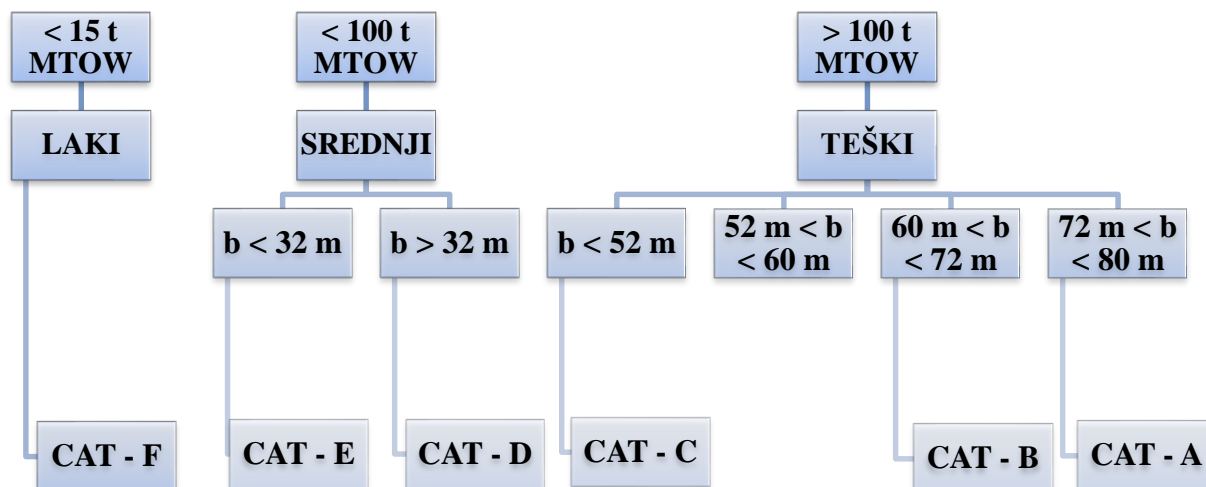


**Slika 22.** RECAT - EU primjenjivi minimum razdvajanja A320 i ERJ - 145 kada prate A340 – 600, [3]

Slika 22. prikazuje minimum razdvajanja A320 i ERJ - 145 za slučaj kada prate A340 – 600, u odnosu na prethodni ICAO minimum, razdvajanje je s 5 NM smanjeno na 4 NM. Rješavanje ovog problema dovelo je do pojave preciznije kategorizacije u Europi, koja dijeli postojeće teške i srednje kategorije zrakoplova u dvije potkategorije, te tako nastaje nova kategorija super teških zrakoplova u koju spada A380.

### 7.1.3. Kategorizacija zrakoplova

Kategorizacija zrakoplova obavlja se prema težinskim karakteristikama zrakoplova, koji se dijele na lake, srednje i teške. Laki zrakoplovi su oni koji imaju MTOW manju od 15 t. Srednji zrakoplovi su oni čija MTOW iznosi manje od 100 t, a kategoriziraju se s obzirom na razmah krila (b). Teški zrakoplovi su oni čija MTOW iznosi više od 100 t te se kategoriziraju prema razmahu krila, a podijeljeni su u tri grupe. Prva grupa obuhvaća zrakoplove s razmahom krila manjim od 52 m, druga grupa su oni čiji se razmah krila nalazi između 52 m i 60 m, ovisno o specifičnoj analizi (slika 23.).



Slika 23. Kriterij kategorizacije zrakoplova prema RECAT – EU, [3]

Tablice 7. i 8. prikazuju minimume razdvajanja RECAT – EU i ICAO, koji se razlikuju u tome što je ICAO razdvajanje za super teške zrakoplove veće za 0,5 NM, za gornje teške zrakoplove je veće za 1 NM i za lake zrakoplove je veće za 0,5 NM.

Tablica 7. RECAT – EU minimum razdvajanja zrakoplova u prilazu i odlasku

RECAT – EU SHEMA Vodeći/prateći		Super teški	Gornje teški	Donje teški	Gornje srednji	Donje srednji	Laki
		„A“	„B“	„C“	„D“	„E“	„F“
Super teški	„A“	3 NM	4 NM	5 NM	5 NM	6 NM	8 NM
Gornje teški	„B“		3 NM	4 NM	4 NM	5 NM	7 NM
Donje teški	„C“		(*)	3 NM	3 NM	4 NM	6 NM
Gornje srednji	„D“						5 NM
Donje srednji	„E“						4 NM
Laki	„F“						3 NM

(\*) označava minimalno MRS razdvajanje koje iznosi 2,5 NM.

Izvor: [3]

**Tablica 8.** Razlika između RECAT - EU i ICAO

RECAT – EU SHEMA		Super teški	Gornje teški	Donje teški	Gornje srednji	Donje srednji	Laki
Vodeći/prateći		„A“	„B“	„C“	„D“	„E“	„F“
Super teški	„A“	+ 0,5 NM	- 2 NM	-1 NM	-2 NM	-1 NM	
Gornje teški	„B“		-1 NM		-1 NM		+ 1 NM
Donje teški	„C“		- 1(-1,5) NM	- 1 NM	-2 NM	-1 NM	
Gornje srednji	„D“						
Donje srednji	„E“						-1 NM
Laki	„F“						+0,5 NM

Izvor: [3]

**Tablica 9.** RECAT – EU vremenski minimum razdvajanje zrakoplova u odlasku

RECAT – EU SHEMA		Super teški	Gornje teški	Donje teški	Gornje srednji	Donje srednji	Laki
Vodeći/prateći		„A“	„B“	„C“	„D“	„E“	„F“
Super teški	„A“		100 s	120 s	140 s	160 s	180 s
Gornje teški	„B“				100 s	120 s	140 s
Donje teški	„C“				80 s	100 s	120 s
Gornje srednji	„D“						120 s
Donje srednji	„E“						100 s
Laki	„F“						80 s

Izvor: [3]



**Tablica 10.** Razlika između RECAT - EU i ICAO razdvajanja za odlaske

RECAT – EU SHEMA		Super teški	Gornje teški	Donje teški	Gornje srednji	Donje srednji	Laki
Vodeći/prateći		„A“	„B“	„C“	„D“	„E“	„F“
Super teški	„A“		- 20 s		- 40 s	- 20 s	
Gornje teški	„B“				- 20 s		+ 20 s
Donje teški	„C“				- 40 s	- 20 s	
Gornje srednji	„D“						
Donje srednji	„E“						- 20 s
Laki	„F“						+ 20 s

Izvor: [3]

Tablice 9. i 10. prikazuju razliku RECAT – EU i ICAO za vremensko razdvajanje, gdje je ICAO kategorija za gornje teške zrakoplove i lake veća za 20 s[3].

#### 7.1.4. Prednosti RECAT - EU

Najveće prednosti RECAT – EU odnose se na pružatelje usluga u zračnoj plovidbi u smislu kapaciteta USS – e, odnosno većeg protoka i operativne učinkovitosti. Prednosti su:

- 1) veća propusnost USS – e za 5 % ili više, tijekom vršnih prometnih sati, ovisno o mješovitosti prometa na zračnim lukama
- 2) smanjenje ukupnog vremena trajanja leta zrakoplova, odnosno smanjenje vremena potrebnog za prilazni i odlazni slijed prometa, odnosno veća fleksibilnost za kontrolore zračne plovidbe
- 3) brži oporavak iz nepovoljnih uvjeta, smanjujući kašnjenja i omogućavajući unapređenja ATFM slotova kroz fleksibilnost smanjenja razdvajanja zrakoplova u odlasku.

Potreba za većim kapacitetima će se sve više povećavati do 2020. godine zbog rasta mješovitosti zračnog prometa te se očekuje se rast broja većih zrakoplova[3].

## 7.2. Velika Britanija

Regulativa Velike Britanije (*United Kingdom - UK*) temelji se na ICAO standardima težinskog razdvajanja zrakoplova prilagođenog za zračni prostor iznad Velike Britanije. Razlika između ICAO i UK kriterija počinje iz 1982. godine, a razlikuje se za srednje i lake zrakoplove, odnosno teške i srednje zrakoplove premještene iz teške u srednju kategoriju. Sljedeća veća modifikacija odnosila se na razdvajanje zrakoplova u prilazu na glavne zračne luke u Velikoj Britaniji, pri čemu se srednji zrakoplovi dijele se na gornje i donje srednje (tablica 11.).

**Tablica 11.** UK podjela zrakoplova prema MTOW

Kategorija	ICAO i plan leta UK	UK odlasci	UK dolasci
<b>Teški</b>	$\geq 136000$	$\geq 136000$	$\geq 136000$
<b>Srednji</b>	$> 7000$ i $< 136000$	$> 4000$ i $< 136000$	-
<b>Gornje srednji</b>	-	-	$> 104000$ i $< 136000$
<b>Donje srednji</b>	-	-	$> 40000$ i $\leq 104000$
<b>Mali</b>	-	$> 17000$ i $\leq 40000$	$> 17000$ i $\leq 40000$
<b>Laki</b>	$\leq 7000$	$\leq 17000$	$\leq 17000$

Izvor: [5]

Zrakoplovi s MTOW od 136 000 kg ili većom svrstani su u kategoriju super teških ili teških za slučaj A 380. Pojedini zrakoplovi iz teške kategorije svrstani su u srednju kategoriju. Kategorija zrakoplova vezana za vrtložne turbulencije treba se nalaziti na planu leta s dodijeljenom slovnim oznakom pojedine kategorije:

- 1) J kategorija za A380 - 800
- 2) teški (*Heavy - H*),
- 3) srednji (*Medium - M*)
- 4) laki (*Light - L*).

Zrakoplovi težine 40000 kg ili manje i oni veće težine od 17000 kg spadaju u kategoriju malih zrakoplova. Laki zrakoplovi su oni čija težina je manja od 17000 kg. Za A380 – 800 primjenjuje se posebna kategorija, a inače se svrstava u kategoriju teških zrakoplova[5].

## 7.2.1. Minimumi razdvajanja za završni prilaz

Tablica 12. Minimumi razdvajanja u završnom prilazu

Vodeći	Prateći	ICAO	UK
<b>A380-800</b>	A380 - 800	#	#
<b>A380-800</b>	Teški	6	6
<b>A380-800</b>	Gornje i donje srednji	7*	7*
<b>A380-800</b>	Mali	-	7
<b>A380-800</b>	Laki	8	8
<b>Teški</b>	A380-800	#	#
<b>Teški</b>	Teški	4	4
<b>Teški</b>	Gornje srednji i donje srednji	5*	5
<b>Teški</b>	Mali	-	6
<b>Teški</b>	Laki	6	7
<b>Gornje srednji</b>	A380-800 i teški	#	#
<b>Gornje srednji</b>	Gornje srednji	-	3
<b>Gornje srednji</b>	Donje srednji	#	4
<b>Gornje srednji</b>	Mali	-	4
<b>Gornje srednji</b>	Laki	5	6
<b>Donje srednji</b>	A380-800 i teški	#	#
<b>Donje srednji</b>	Gornje srednji	-	#
<b>Donje srednji</b>	Donje srednji	#	#
<b>Donje srednji</b>	Mali	-	3
<b>Donje srednji</b>	Laki	5	5
<b>Mali</b>	A380-800, teški,	-	#
<b>Mali</b>	gornje i donje srednji	-	3
<b>Mali</b>	Mali	-	4
<b>Laki</b>	Laki	-	
<b>Laki</b>	A380-800, teški, gornje i donje srednji, mali i laki	#	#

\*ICAO ne dijeli srednju kategoriju

# nije potrebno razdvajanje

Izvor: [5]

Tablica 12. prikazuje minimume razdvajanja za zračni prostor Velike Britanije koja se primjenjuje za:

- 1) zrakoplove koji lete jedan iza drugoga na istoj visini ili manje od 1000 ft ispod
- 2) zrakoplovi s unakrsnim putanjama leta, koji lete na istoj visini ili manje od 1000 ft ispod
- 3) slučaj kada oba zrakoplova koriste istu USS – u ili paralelne USS – e (razmaknute manje od 760 m)[5].

### **7.2.2. Minimum razdvajanja pri promjeni mjesta praga na USS – i**

Minimum od tri minute propisan prilikom promjene mjesta praga slijetanja zrakoplova, vrijedi za razdvajanje lakih, srednjih, teških zrakoplova i A380:

- 1) kada nakon odlaska lakih, malih i srednjih (gornji i donji) zrakoplova dolazi A380 - 800
- 2) kada nakon dolaska lakih, malih i srednjih zrakoplova odlazi A380 – 800.

Ako se očekuje da će se putanje leta zrakoplova sjeći, razdvajanje od dvije minute mora se primjenjivati između teških zrakoplova i A380 – 800 kada prometuju na USS – i s pomaknutim pragom:

- 1) kada teški zrakoplov u odlasku prati A380 – 800 u dolasku
- 2) kada teški zrakoplov u dolasku prati A380 – 800 u odlasku.

Ako se očekuje da će se putanje leta zrakoplova sjeći, razdvajanje od dvije minute mora se primjenjivati između srednjih (gornji i donji), malih ili lakih zrakoplova koji prate teški zrakoplov i između lakih zrakoplova koji prate srednji ili mali kada prometuju na USS – i s pomaknutim pragom:

- 1) kada je srednji (gornji ili donji) zrakoplov u odlasku, mali ili laki prati dolazak teškog ili ako laki zrakoplov u odlasku prati dolazak srednjeg ili malog
- 2) kada je srednji (gornji ili donji) zrakoplov u dolasku, mali ili laki prati odlazak teškog ili ako laki zrakoplov u dolasku prati odlazak srednjeg ili malog[5].

### 7.2.3. Minimumi razdvajanja u odlasku

Tablica 13. Minimumi razdvajanja u odlasku

Vodeći zrakoplov	Prateći zrakoplov	Minimalno vrijeme razdvajanja	Vodeći zrakoplov
<b>A380-800</b>	A380-800	Odlazak s iste pozicije ili s usporednih USS – a (razmak manji od 760 m)	-
<b>A380-800</b>	Teški		2 minute
	Srednji (gornje i donje) Mali Laki		3 minute
	<b>Teški</b>		4 nm ili vremenski
<b>Teški</b>	Srednji (gornje i donje) Mali Laki		2 minute
	<b>Srednji (gornje i donje) ili mali</b>		2 minute
<b>A380-800</b>	<b>A380-800</b>		Odlazak sa srednje točke na istoj USS – i ili srednje točke dviju usporednih USS – a (razmak manji od 760 m)
<b>A380-800</b>	Teški	3 minute	
	Srednji (gornje i donje) Mali Laki	4 minute	
	<b>Teški (puna dužina polijetanja)</b>	3 minute	
<b>Srednji ili mali (puna dužina polijetanja)</b>	Laki	3 minute	

Izvor: [5]

Tablica 13. Minimumi razdvajanja u odlasku koji se koriste za:

- 1) iste USS – e
- 2) usporedne USS – e razmaknute manje od 760 m
- 3) unakrsne USS – e, ako će se putanje leta zrakoplova sjeći na određenoj točki na istoj visini ili manje od 300 m ispod
- 4) pri usporednim USS – ama razmaknutim za 760 m ili više, ako će se putanje leta zrakoplova sjeći na određenoj točki na istoj visini ili manje od 300 m ispod[5].

#### **7.2.4. Minimum razdvajanja za suprotan smjer**

Minimum razdvajanja od tri minute primjenjuje se između lakih, malih ili srednjih (gornji i donji) zrakoplova i A380 – 800, za slučaj niskog ili promašenog prilaza A380 – 800 pri čemu laki, mali ili srednji zrakoplovi:

- 1) koriste USS – u suprotnom smjeru za polijetanje
- 2) slijeću na istu ili usporednu (razmaknute manje od 760 m) USS – u u suprotnom smjeru.

Minimum razdvajanja od dvije minute se treba primjenjivati između srednjih (gornji i donji), malih, lakih i teških zrakoplova, te između srednjih (gornji i donji), malih i lakih za slučaj kada teži zrakoplov ponavlja prilaz, a laki zrakoplov:

- 1) polijeće s iste USS – e u suprotnom smjeru
- 2) slijeće na istu USS – u suprotnom smjeru
- 3) slijeće na usporednu USS – u (razmaknute manje od 760 m) u suprotnom smjeru[5].

#### **7.2.5. Minimum razdvajanja za križajuće ili usporedne USS - e**

Usporedne USS – e razdvojene manje od 760 m smatraju se kao jedna USS – a, prilikom primjene minimuma razdvajanja navedenih u tablici 12. i 13. za polijetanje i slijetanje zrakoplova bez iznimaka. Minimum razdvajanja završnog prilaza prikazan u tablici 12. primjenjuje se za:

- 1) odlaske s unakrsnih ili divergirajućih USS – a, ako će im se putanje leta sjeći

- 2) odlaske s usporednih USS – a razdvojenih više od 760 m, ako će im se putanje leta sjeći[5].

#### **7.2.6. Minimum razdvajanja za srednji prilaz**

Srednji prilaz razlikuje se i ovisi o instrumentalnoj prilaznoj proceduri i zračnoj luci, te svaka zračna luka treba odrediti područje primjene srednjeg prilaza na kojem se primjenjuje minimum razdvajanja vrtložnih tragova. Minimumi razdvajanja za srednji prilaz:

- 1) minimum razdvajanja od pet nautičkih milja mora se primjenjivati između teških zrakoplova (osim za A380 - 800) i srednjih zrakoplova (gornje i donje) ili malih zrakoplova, koji prate ili prelaze iza na istoj razini leta ili 1000 ft ispod
- 2) minimum razdvajanja od šest nautičkih milja mora se primjenjivati između teških zrakoplova (osim za A380 - 800) i lakih zrakoplova koji prate ili prelaze iza na istoj razini leta ili 1000 ft ispod
- 3) minimum razdvajanja za zrakoplov koji prati A380 – 800 na istoj razini leta ili manje od 1000 ft ispod, mora biti kao i za završni prilaz prikazan u tablici 12.

Ako je minimum razdvajanja za IFR letove veći od preporučenih minimuma razdvajanja, onda se primjenjuje IFR minimum razdvajanja. Propisani minimumi mogu se povećati na zahtjev kontrole zračne plovidbe ili pilota, pri čemu pilot treba poslati zahtjev prije dolaska na USS – u ili prije početka završnog prilaza, svako traženje dopuštenja za veći minimum koje se obavlja kasnije, rezultira kašnjenjem ili neuspjelim prilazom. Navedena regulativa ne dovodi do uklanjanja vjerojatnosti susreta s vrtložnim turbulencijama, svrha je svođenje vjerojatnosti susreta na minimalnu i prihvatljivu razinu. Posebna pozornost treba se obratiti prilikom praćenja težeg zrakoplova u uvjetima slabog vjetera. Kontrolori zračne plovidbe i piloti trebaju biti svjesni opasnosti područja od 1000 ft ispod i iza A380 – 800 ili teškog zrakoplova, posebno na manjim visinama pri čemu i trenutačni vrtlog može biti opasan. Posebna pažnja treba se posvetiti mjestu gdje vodeći zrakoplov prati put klizanja završnog prilaza većeg zrakoplova zbog značajnih vrtložnih turbulencija[5].

### 7.3. Republika Hrvatska

Prema pravilniku o letenju zrakoplova u članku 77. opisana je vrtložna turbulencija. Zrakoplovi se dijele na teške, srednje i lake. S obzirom na to da se opasnost i postojanje vrtložne turbulencije ne može točno predvidjeti, nadležna kontrola zračne plovidbe nije odgovorna za pružanje informacije o opasnosti i postojanju vrtložne turbulencije u svakom trenutku i ne može jamčiti za točnost takve informacije. Smatra se da nadležna kontrola zračne plovidbe primjenjuje propisane minimume za razdvajanje zbog vrtložne turbulencije za zrakoplove u odlasku, ako uz odobrenje za uzlijetanje proslijedi pilotu zrakoplova sljedeće podatke:

- 1) tip zrakoplova koji je prethodno uzletio
- 2) proteklo vrijeme od uzlijetanja prethodnog zrakoplova ili udaljenost od zrakoplova koji je prethodno uzletio
- 3) smjer i brzinu vjetra pri tlu
- 4) upozorenje o mogućem postojanju vrtložne turbulencije korištenjem propisane fraze.

Pilot zrakoplova odgovoran je za izbjegavanje vrtložne turbulencije, te se od njega ne zahtijeva pridržavanje propisanih minimuma razdvajanja zbog vrtložne turbulencije za zrakoplove u odlasku. Kad pilot zrakoplova ispred sebe vidi zrakoplov teže kategorije i u stanju je sam održavati sigurni razmak ili pri pogodnom vjetru, povećani razmak nije potreban.

Tijekom vožnje iza zrakoplova teže kategorije pilot zrakoplova treba, ako je moguće, održavati razmak od najmanje 200 m. Povećane norme razdvajanja u uvjetima vrtložne turbulencije opisane su u članku 78 (tablica 14.), a moraju se primjenjivati ako:

- 1) zrakoplov leti neposredno iza prethodnog zrakoplova na istoj razini ili na razini koja se nalazi na manje od 1000 stopa ispod njega
- 2) ako oba zrakoplova koriste istu uzletno-sletnu stazu
- 3) ako zrakoplov prolazi iza prethodnog zrakoplova na istoj razini ili na razini koja se nalazi na manje od 1000 stopa ispod njega[15].



**Tablica 14. Povećane norme razdvajanja**

<b>Vodeći zrakoplov</b>	<b>Prateći zrakoplov</b>	<b>NM</b>
Teški	Teški	4
Teški	Srednji	5
Teški	Laki	6
Srednji	Laki	5

Izvor: [15]

## 8. ZAKLJUČAK

Aerodinamičke vrtložne turbulencije opasne su za let zrakoplova, pogotovo za zrakoplove s malim razmahom krila i to prilikom polijetanja, početnog penjanja, završnog prilaza i slijetanja. Nesreće povezane s vrtložnim tragovima uključuju sve kategorije zrakoplova. Najveća opasnost vrtložnih turbulencija je pri vizualnim uvjetima leta kada piloti sami održavaju minimume razdvajanja između zrakoplova. Karakteristike vrtložnih tragova iza zrakoplova ovise o veličini zrakoplova, težini, razmahu krila, konfiguraciji i atmosferskim uvjetima. Veći i teži zrakoplovi, te oni s većim razmahom krila generiraju veće vrtložne tragove. Najjači atmosferski utjecaj predstavlja bočni vjetar koji zanosi vrtložne tragove. Jedini uređaj koje ima mogućnost otkrivanja vrtložnih tragova je LIDAR koji se postavlja u blizini USS-e. Postoje posebna pravila koja se odnose na izbjegavanje vrtložnih turbulencija pri polijetanju, penjanju, prilazu i slijetanju. Vrtložni tragovi helikoptera pogađaju prostor duljine tri puta veće od promjera rotora, te pri lebdenju u blizini zemljine površine utječu na zrakoplove parkirane u blizini, tako da generiranim vrtlozima prisilno pomiču njihove letne površine.

Uvođenjem A380 zrakoplova u promet, koji prema svojim karakteristikama nije spadao niti u jednu ICAO kategoriju došlo je to potrebe određivanja minimuma razdvajanja samo za taj tip zrakoplova. Zbog povećanja mješovitosti zračnog promatra, RECAT – EU dijeli postojeće kategorije u nove potkategorije, s čime A380 pripada kategoriji super teških zrakoplova. Normativa RECAT - EU povećava kapacitete i propusnost USS-a u vršnim satima za 5 %, smanjuje kašnjenja i gubitak slotova. Smanjenje minimuma vremenskog razdvajanja omogućuje veću fleksibilnost kontroli zračne plovidbe. Za razliku od europske regulative, regulativa koja vrijedi u Sjedinjenim Američkim Državama dijeli zrakoplove u šest kategorija, prema parametrima vrtložnih tragova zrakoplova, odnosno minimumi razdvajanja su smanjeni, a s time je povećan kapacitet USS – e.

Regulativa na snazi u Republici Hrvatskoj propisuje da je pilot zrakoplova odgovoran za održavanje minimuma razdvajanja između zrakoplova, te propisuje povećane norme razdvajanja u uvjetima vrtložne turbulencije koje se moraju primjenjivati za zrakoplove koji lete jedan iza drugog na istoj razini leta ili na razini koja se nalazi na manje od 1000 stopa ispod njega, za one koji koriste istu USS-u te ako zrakoplov prolazi iza prethodnog zrakoplova na istoj razini ili na razini koja se nalazi na manje od 1000 stopa ispod njega.

Provedeno istraživanje utjecaja vrtložnih tragova zrakoplova na daljinski upravljane letjelice potvrđuje složenost integracije UAV - operative i s aspekta rizika ulijetanja u vrtložne tragove zrakoplova, kao i s aspekta njihove senzitivnosti na meteo utjecaje, što može dodatno narušiti status sigurnosti zračnog prometa. U bližoj budućnosti bit će potrebno pronaći rješenje za njihovo sigurno razdvajanje od ostalih kategorija operative u strukturi zračnog prometa jer uvođenje daljinski upravljanih letjelica u promet predstavlja dodatni sigurnosni rizik, zbog njihove veličine i težine u odnosu na konvencionalne tipove zrakoplova.

Svrha istraživanja u diplomskom radu bila je cjelovita analiza mehanizama generiranja vrtložne turbulencije, pregled međunarodne regulative i prakse u prevenciji rizika ulijetanja zrakoplova u turbulentni trag prethodnog zrakoplova, a sve s ciljem ukazivanja na opasnost vrtložnih turbulencija zrakoplova. Ta je tematika dodatno usložnjena slijedom uvođenja kategorije super velikih zrakoplova, kao i dinamikom kontinuiranog rasta prometa zrakoplova i letnih operacija, koja u uvjetima nedostatka kapaciteta USS - a diktira reduciranje minimuma separacije, derogirajući sigurnosne zahtjeve. Normativa rekategorizacije donesena u Europi smanjuje minimume separacije zrakoplova, što predstavlja sigurnosni rizik. U SAD - u je veličina zračnog prometa daleko veća, kao i strukturiranost zrakoplovne operative, stoga je i regulativa razdvajanja zrakoplova u uvjetima vrtložnih turbulencija detaljnije razrađena u odnosu na europsku regulativu. Važeća regulativa u Republici Hrvatskoj predstavlja minimalne zahtjeve propisane za tri kategorije razdvajanja zrakoplova u uvjetima vrtložnih turbulencija. Kontinuirano povećanje zračnog prometa kao i mješovitosti operatera u strukturi prometa u budućnosti će biti potrebno parirati novim operativnim rješenjima za povećanje kapaciteta i propusnosti USS - e bez narušavanja razine sigurnosti.

## LITERATURA

- [1] Grozdanić, B., Steiner, S.: Influence of Wake-Vortex Turbulence on the Flight Safety PROMET - Traffic&Transportation, Scientific Journal on Traffic and Transportation Research, Vol 9, No 1-2, 1997.
- [2] Civil Aviation Authority of New Zealand, Good Aviation Practice, New Zealand Government: Wake Turbulence, 2016., [https://www.caa.govt.nz/safety\\_info/GAPs/Wake\\_Turbulence.pdf](https://www.caa.govt.nz/safety_info/GAPs/Wake_Turbulence.pdf)
- [3] European Organisation for the Safety of Air Navigation, European Wake Turbulence Categorisation and Separation Minima on Approach and Departure: RECAT – EU, Brussels, 2015., <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/sesar/recat-eu-released-september-2015.pdf>
- [4] Cheng, J., Tittsworth, J., Gallo, W., Awwad, A.: The Development of Wake Turbulence Recategorization in the United States, Federal Aviation Administration, Engility Corporation, Washington, 2016., [https://ntl.bts.gov/lib/59000/59300/59389/AIAA\\_2016\\_3434.pdf](https://ntl.bts.gov/lib/59000/59300/59389/AIAA_2016_3434.pdf)
- [5] NATS: Aeronautical Information Circular, UK, 2015., <http://www.nats.aero/wp-content/uploads/2014/12/TBS-Aeronautical-Info-Circular.pdf>
- [6] <http://www.hko.gov.hk/aviat/lidar/index.htm> , 20.07.17.
- [7] Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Aircraft Wake Vortex Measurement With Coherent Doppler LIDAR, China, 2016., [https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2016/14/epjconf\\_ilrc2016\\_14008.pdf](https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2016/14/epjconf_ilrc2016_14008.pdf)
- [8] <http://airfactsjournal.com/2016/05/helicopter-techniques-not-dummies/> , 20.07.17.
- [9] <http://www.geofoto.hr/index.php/hr/lidar.html> , 22.07.17.
- [10] Perez-Battle,M., Marcos, M., Pastor, E.: Effects of En-route Wake Vortex on RPAS Operations, ICARUS Research Group, Technical University of Catalonia, Barcelona 2016., [https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/sid/2016/SIDs\\_2016\\_paper\\_50.pdf](https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/sid/2016/SIDs_2016_paper_50.pdf)
- [11] Homainejad, N., Rizos, C.: Application of Multiple Categories of Unmanned Aircraft Systems (UAS) in Different Airspaces for Bushfire Monitoring and Response, The University of New South Wales, School of Civil and Environmental Engineering, Sydney, 2015., <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W4/55/2015/isprsarchives-XL-1-W4-55-2015.pdf>

- [12] H. Proctor, F., Nash'at N, A.: Three-Phased Wake Vortex Decay, NASA Langley Research Center, Virginia, 2010.,  
<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20100030583.pdf>
- [13] [https://www.youtube.com/watch?v=NyOBVfmea\\_0](https://www.youtube.com/watch?v=NyOBVfmea_0), 24.07.17.
- [14] <http://studentpilotnews.com/2016/04/21/quiz-wake-turbulence/>, 24.07.17.
- [15] Pravilnik o letenju zrakoplova, Ministarstvo pomorstva, prometa i infrastrukture,  
[http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014\\_10\\_128\\_2433.html](http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014_10_128_2433.html)
- [16] <http://www.onera.fr/en/zoominthelab/lasers-combined>, 29.07.17.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Prandt'l – ov sustav vihora .....	6
Slika 2. Utjecaj zemljine površine pri uvjetima bočnog vjetra .....	8
Slika 3. Polijetanje nakon većeg zrakoplova.....	9
Slika 4. Penjanje zrakoplova .....	10
Slika 5. Slijetanje nakon većeg zrakoplova.....	11
Slika 6. Slijetanje nakon većeg zrakoplova pri usporednim USS – ama .....	11
Slika 7. Slijetanje nakon većeg zrakoplova kod križajućih USS – a.....	12
Slika 8. Slijetanje iza većeg zrakoplova na istu USS – u.....	12
Slika 9. Slijetanje nakon većeg zrakoplova kod križajućih USS – a.....	13
Slika 10. Raspadanje vrtložnih tragova pri slijetanju.....	14
Slika 11. Vrtložni tragovi helikoptera pri stacionarnom lebdenju .....	14
Slika 12. Spiralni vrtložni tragovi helikoptera u letu prema naprijed .....	15
Slika 13. Bočno širenje vrtložnih tragova .....	18
Slika 14. Vertikalni prikaz područja opasnosti vrtložnih tragova.....	19
Slika 15. Kruženje i refleksija aerodinamičkog vrtloga.....	25
Slika 16. Kut presijecanja turbulentnog traga .....	32
Slika 17. Prikaz LIDAR - a .....	34
Slika 18. Način promatranja LIDAR – a.....	34
Slika 19. Usporedba veličine zrakoplova A340 - 600 i B767 – 300.....	44
Slika 20. ICAO i RECAT - EU minimumi razdvajanja.....	45
Slika 21. Usporedba veličine A320 i ERJ – 145 .....	45
Slika 22. RECAT - EU primjenjivi minimum razdvajanja A320 i ERJ - 145 kada prate A340 – 600.....	46
Slika 23. Kriterij kategorizacije zrakoplova prema RECAT – EU .....	47

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Brzina i vrijeme stabilizacije.....	20
Tablica 2. Pragovi vremena susreta s vrtložnim tragovima .....	21
Tablica 3. Zrakoplovi u fazi krstarenja .....	36
Tablica 4. Zrakoplovi u dolasku.....	37
Tablica 5. Zrakoplovi u odlasku.....	37
Tablica 6. ICAO kategorizacija i minimumi razdvajanja .....	43
Tablica 7. RECAT – EU minimum razdvajanja zrakoplova u prilazu i odlasku .....	47
Tablica 8. Razlika između RECAT - EU i ICAO .....	48
Tablica 9. RECAT – EU vremenski minimum razdvajanje zrakoplova u odlasku.....	48
Tablica 10. Razlika između RECAT - EU i ICAO razdvajanja za odlaske .....	49
Tablica 11. UK podjela zrakoplova prema MTOW .....	50
Tablica 12. Minimumi razdvajanja u završnom prilazu.....	51
Tablica 13. Minimumi razdvajanja u odlasku .....	53
Tablica 14. Povećane norme razdvajanja .....	57

## POPIS GRAFIČKIH PRIKAZA

Grafički prikaz 1. Vjerojatnosti ulijetanja u turbulentni trag iza prethodnika na udaljenosti do 1 km bez djelovanja vjetra .....	30
Grafički prikaz 2. Vjerojatnosti ulijetanja u turbulentni trag iza prethodnika na udaljenosti do 1 km bez djelovanja vjetra .....	31



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOST

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad isključivo rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na mojim istraživanjima i oslanja se na objavljenu literaturu, a što pokazuju korištene bilješke i bibliografija. Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen 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 Normativa o prevenciji turbulencije traga zrakoplova, na mrežnim stranicama i repozitoriju Fakulteta prometnih znanosti, Digitalnom akademskom repozitoriju (DAR) pri Nacionalnoj i sveučilišnoj knjižnici u Zagrebu.

U Zagrebu, 18.09.2017.

Studentica:

---

(potpis)