

# Određivanje utjecaja pojave vrtložnog prstena na let helikoptera Bell 206 B

---

Žabić, Dijana

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:545527>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-03**



*Repository / Repozitorij:*

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



Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti

**DIPLOMSKI RAD**

**ODREĐIVANJE UTJECAJA POJAVE VRTLOŽNOG PRSTENA NA LET  
HELIKOPTERA BELL 206B**

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF A DEVELOPED VORTEX RING STATE ON THE  
BELL 206B**

Mentor: prof. dr. sc. Doris Novak

Studentica: Dijana Žabić  
JMBAG: 0135256689

Zagreb, svibanj 2024.

Zagreb, 22. veljače 2024.

Zavod: **Zavod za aeronautiku**  
Predmet: **Teorija leta helikoptera**

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 7403

Pristupnik: **Dijana Žabić (0135256689)**  
Studij: **Aeronautika**

Zadatak: **Određivanje utjecaja pojave vrtložnog prstena na let helikoptera Bell 206 B**

### Opis zadatka:

Opisati potrebu za istraživanje vrtložnog prstena na temelju dosadašnjih nesreća. Definirati i prikazati strujanje kroz rotor pri različitim režimima leta. Definirati i objasniti pojam vrtložnog prstena. Usporediti strujanje kroz rotor u režimu horizontalnog leta i u režimu vrtložnog prstena. Definirati metode vađenja iz uvjeta vrtložnog prstena. Opisati značajke helikoptera Bell 206B na kojem se vrši istraživanje. Opisati zabilježene parametre i zapažanja pri formiranju vrtložnog prstena na probnim letovima te iste analizirati. Opisati parametre leta i zapažanja tijekom probnih letova pri korištenju metodi vađenja iz stanja vrtložnog prstena te iste usporediti. Analitički usporediti zabilježene vrijednosti dobivene testiranjem s proračunatim parametrima.

Mentor:

Predsjednik povjerenstva za  
diplomski ispit:

---

prof. dr. sc. Doris Novak

# ODREĐIVANJE UTJECAJA POJAVE VRTLOŽNOG PRSTENA NA LET HELIKOPTERA BELL 206B

## SAŽETAK

Ovaj rad govori o važnosti obuke pilota helikoptera pri osposobljavanju za vršenje manevra vrtložnog prstena. Navedeni su detaljni opisi što se zapravo događa sa samom letjelicom pri formiranju iste i kako uspostaviti ponovnu kontrolu. Izvršeno je testiranje metoda vađenja iz preduvjeta pri različitim brzinama uvođenja koje su zabilježene GoPro kamerom tijekom testnog leta, koje je detaljno opisano u radu. Također su spomenute i nesreće koje su nastale posljednjih godina upravo zbog nedovoljno poznavanja ovog fenomena te kako će i u kojim situacijama utjecati na helikopter.

**KLJUČNE RIJEČI:** vrtložni prsten, metode vađenja iz vrtložnog prstena, obuka pilota, helikopter Bell 206B

## SUMMARY

This thesis describes the importance of helicopter vortex ring state formation and recovery training. There are detailed descriptions of what actually happens to the aircraft during formation of the state and how to re-establish control. Testing of recovery methods from prerequisites was performed at different initial speeds, this was recorded using a GoPro camera. This test flight is described in detail in the thesis. Accidents that have occurred in recent years due to insufficient knowledge of this phenomenon, how and in which situations it will affect the helicopter were also analyzed.

**KEYWORDS:** Vortex ring state, recovery methods, pilot training, helicopter Bell 206B

# Sadržaj

1. Uvod .....	1
2. Performanse helikoptera .....	3
2.1 Strujanje zraka kroz disk rotora tijekom motornog režima rada .....	4
2.2. Strujanje zraka kroz disk rotora tijekom režima autorotacije .....	7
2.3. Strujanje zraka kroz disk rotora tijekom formiranja vrtložnog prstena .....	7
2.4. Strujanje zraka kroz disk rotora u režimu vjetrenjače .....	7
3. Vrtložni prsten .....	8
3.1. Formiranje vrtložnog prstena .....	8
3.2. Utjecaj vrtložnog prstena na strujanje zraka duž lopatice rotora .....	9
3.3. Utjecaj vjetra na formiranje vrtložnog prstena .....	11
3.4. Metode vađenja iz uvjeta vrtložnog prstena .....	12
3.4.1. Metoda vađenja u naprijed .....	12
3.4.2. Metoda vađenja u stranu .....	12
4. Opis helikoptera Bell 206B JetRanger III .....	14
4.1 Performanse helikoptera .....	16
4.2. Procedura za uvođenje u vrtložni prsten za helikopter Bell 206B .....	17
4.3. Metode vađenja iz preduvjeta vrtložnog prstena na helikopteru Bell 206B .....	17
4.3.1. Vađenje u stranu .....	17
4.3.2. Vađenje u naprijed .....	18
5. Određivanje performansi helikoptera Bell 206B prilikom uvođenja i vađenja iz vrtložnog prstena .....	19
5.1. Analiza testiranja pri uvođenju do predznaka vrtložnog prstena pri 50 KIAS .....	19
5.2. Uvođenje u stanje vrtložnog prstena pri 40 KIAS .....	21
5.3. Uvođenje u stanje vrtložnog prstena pri 30 KIAS .....	22
5.4. Uvođenje u stanje vrtložnog prstena pri minimalnoj brzini uvođenja .....	23
5.5. Uvođenje u stanje vrtložnog prstena s komponentom leđnog vjetra .....	24

6. Određivanje utjecaja pojave vrtložnog prstena na helikopter Bell 206B zabilježenih na probnim letovima .....	27
7. Zabilježene nesreće uzrokovane formiranjem vrtložnog prstena.....	29
7.1. Pad helikoptera Bell 407.....	29
7.2. Pad helikoptera Eurocopter EC130 .....	29
7.3. Pad helikoptera Bell 429.....	30
8. Zaključak.....	32
Literatura .....	34
Popis slika .....	35
Popis grafikona.....	36

# 1. Uvod

Glavna opasnost stanja vrtložnog prstena je brzo povećanje brzine silaženja, što zahtijeva značajnu visinu za siguran oporavak. Ako helikopter uđe u stanje vrtložnog prstena preblizu tla, pilot možda neće imati dovoljnu visinu da ispravi spuštanje, riskirajući sudar s tlom. Nepredvidivi pokreti u nagibu, okretanju i skretanju mogu dovesti do potpunog gubitka kontrole, dodatno pogoršavajući opasnu situaciju.

Dok je trenutna obuka pilota na helikopteru Bell 206B usredotočena na izvlačenje helikoptera iz preduvjeta vrtložnog prstena, testiranje je ograničeno na idealne uvjete vjetra i progresivnu brzinu od 50 čvorova prije uvođenja u manevar. Ovo istraživanje nastoji proširiti opseg ispitivanjem odgovora helikoptera na uvjete vrtložnog prstena pri različitim brzinama, uključujući scenarije kao što je lebdenje pri nultoj progresivnoj brzini. Radeći to, rad ima za cilj pružiti pilotima uvid u ponašanje helikoptera u različitim uvjetima, omogućujući im donošenje odluka o oporavku prilagođenih specifičnoj situaciji i osiguravajući njihovu sigurnost. Naime, značaj ovog istraživanja postaje očit kada se razmatra potencijalna pojava vrtložnog prstena na malim visinama tijekom leta, što zahtijeva brzo donošenje odluka na temelju prevladavajućih parametara brzine i visine. Očekivani ishod istraživanja uključuje utvrđivanje definiranih parametara, točnije korelacije između brzine i promjene visine leta tijekom potpunog formiranja vrtložnog prstena na helikopteru Bell 206B. Osim toga, istraživanje će procijeniti učinkovitost metoda vađenja pri različitim brzinama uvođenja.

U drugom poglavlju ovoga rada objašnjene su performanse helikoptera. Navedeni su različiti režimi strujanja zraka kroz rotor čije je razumijevanje ključno za razumijevanje problematike ovog rada.

Treće poglavlje govori o glavnoj stavci ovoga rada, a to je vrtložni prsten. Objašnjeno je njegovo formiranje i uzrok nastajanja te kakav utjecaj ima na samo strujanje zraka kroz disk rotora. Naveden je i kakav utjecaj vjetar ima na njegovo formiranje te koji su načini izvlačenja helikoptera iz stanja vrtložnog prstena.

U četvrtom poglavlju nalazi se opis performansi helikoptera koji se koristio za testiranja u svrhu izrade ovoga rada. Navedene su njegove karakteristike i performanse. Također navedeni su i postupci koji se koriste pri uvježbavanju ovog manevra te su isti detaljno opisani.

Peto poglavlje sadrži podatke i dijagrame zabilježene prilikom testnog leta. Izvršeno je nekoliko testiranja uvođenja u vrtložni prsten te je za svako uvođenje izvršena različita metoda vađenja kako bi podaci mogli biti uspoređeni.

Šesto poglavlje analizira i opisuje zapažanja i zabilježene parametre prilikom testnih letova. Analizirano je kakav utjecaj napredujuća brzina ima prilikom uvođenja do preduvjeta vrtložnog prstena te su uspoređene metode vađenja iz istog.

U sedmom poglavlju su navedene nesreće koje su se dogodile unutar zadnjih nekoliko godina čiji je uzrok bio formiranje vrtložnog prstena na helikopteru.

Posljednje poglavlje čini zaključak unutar kojeg je obuhvaćena problematika rada s analiziranim podacima.

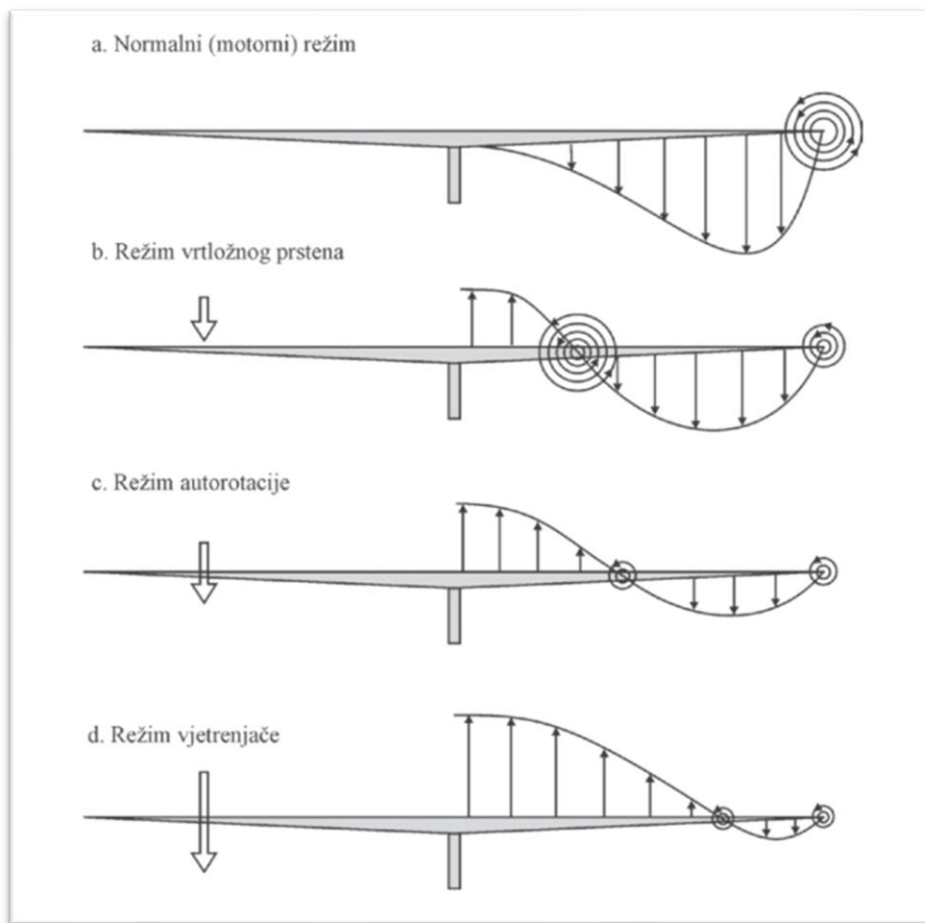


## 2. Performanse helikoptera

Upravljanje helikopterom zahtjeva opsežno znanje o aerodinamičnosti same letjelice kako bi pilot u svakom trenutku znao kako će atmosferski uvjeti utjecati na njegov performans. Osim atmosferskih utjecaja važno je razmotriti same performanse helikoptera tijekom pojedinih režima leta koji mogu biti ugrožavajući faktor za posadu i za sve koji se nalaze u neposrednoj blizini.

Tijekom napredujućeg leta helikopter poput zrakoplova ima određenu stabilnost, no za razliku od zrakoplova, s pomoću svoje konstrukcije i samog dizajna može lebdjeti iliti „zaustaviti“ se u zraku. Režim lebdenja je režim tijekom kojega postoji najveća opasnost od nesreće. Tijekom progresivnog leta, zbog određene brzine, zrak koji opstrujava održava helikopter stabilnim zbog njegovih aerodinamičkih površina. Njegov vertikalni i horizontalni stabilizator tijekom progresivnog leta stabiliziraju letjelicu, dok tijekom režima lebdenja pilot mora sam iskontrolirati nestabilnost helikoptera o čemu će se reći više u daljnjem nastavku rada.

Kako bi proučili performanse helikoptera, važno je razlikovati režime leta helikoptera u ovisnosti o strujanju zraka kroz rotor. Razlikujemo standardni motorni režim, režim vjetrenjače, režim autorotacije te režim vrtložnog prstena, a njihov prikaz se može vidjeti na slici 1. [1]



**Slika 1.** Strujanje zraka kroz disk rotora pri različitim režimima leta

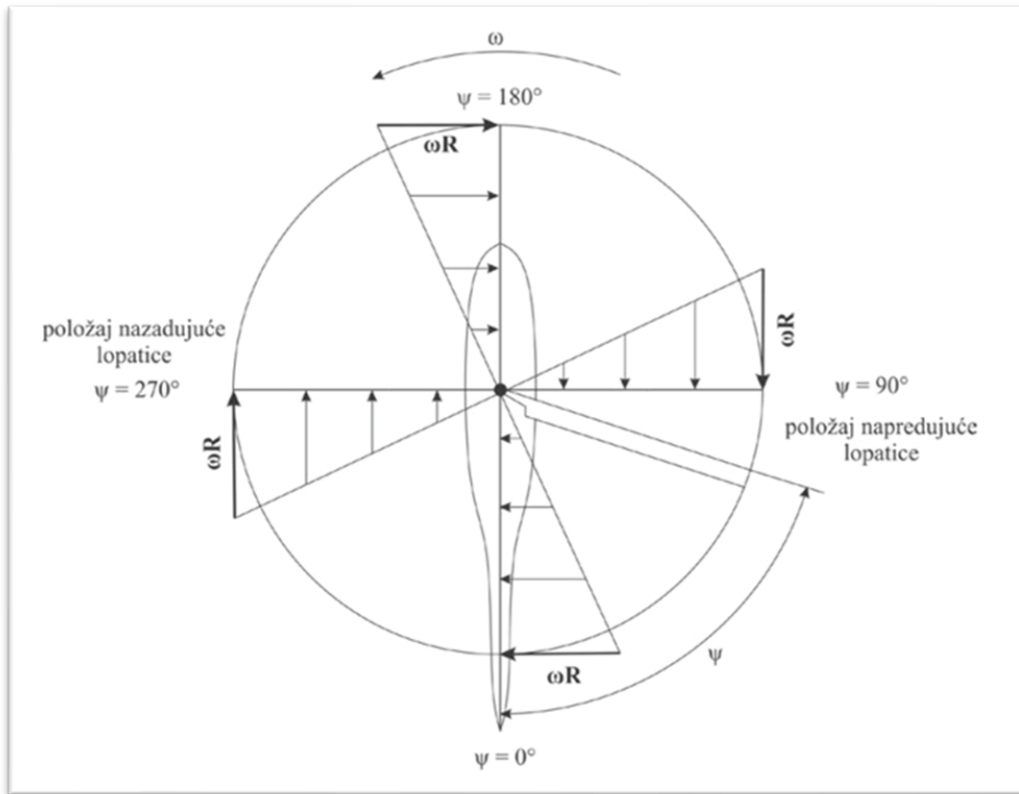
Izvor: [2]

## 2.1 Strujanje zraka kroz disk rotora tijekom motornog režima rada

Tijekom pogonskog leta, bilo u lebdenju, okomitom, naprijed, bočno ili unatrag, sile uzgona i potiska koje stvara rotor okomite su na ravninu diska rotora. Strujanje zraka kroz disk rotora tijekom leta prema naprijed razlikuje se od onog tijekom lebdenja. U napredujućem letu strujanje zraka suprotno je smjeru putanje leta zrakoplova, a njegova brzina odgovara brzini kretanja helikoptera prema naprijed. Kako lopatice rotora slijede kružnu putanju, brzina protoka zraka preko svake lopatice varira ovisno o položaju u ravnini rotacije, brzini rotacije i brzini helikoptera.

Najveća brzina protoka zraka događa se iznad desne strane (na poziciji  $\psi=90^\circ$ ) helikoptera, gdje se nalazi napredujuća lopatica (u disku rotora koji se okreće suprotno od kazaljke na satu). Ova se brzina postupno smanjuje kako bi odgovarala rotacijskoj brzini iznad nosa, dosežući najnižu točku iznad lijeve strane (na poziciji  $\psi=270^\circ$ ) gdje se nalazi lopatica

koja se kreće suprotno smjeru leta. Kako se lopatice rotora dalje okreće, brzina protoka zraka se vraća na brzinu rotacije preko repa, ponovno dostižući svoj maksimum kada se lopatica vrati u položaj na  $\psi=90^\circ$ . Prikaz smjera rotacije i položaj napredujuće lopatice vidljivo je na slici 2. [3]



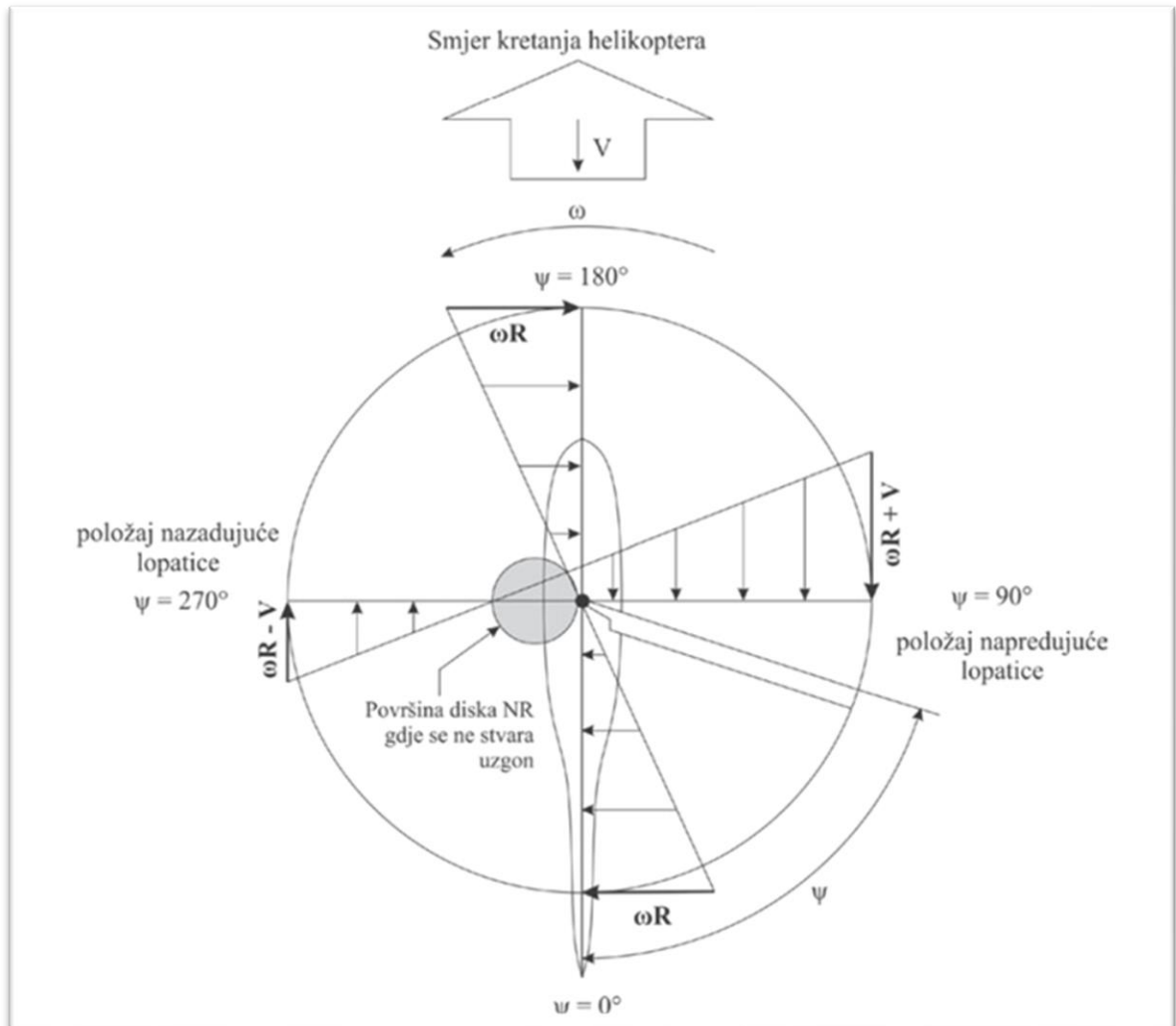
**Slika 2.** Raspored tangencijalne brzine struje zraka

Izvor: [2]

S pomoću prikaza na slici 2, može se uočiti lopatica koja napreduje (položaj  $\psi=90^\circ$ ) kreće se u istom smjeru kao i helikopter. Brzina strujanja zraka u susretu s ovom lopaticom sastoji se od rotacijske brzine lopatice koja se dodaje brzini vjetra koja proizlazi iz brzine kretanja helikoptera prema naprijed. Obrnuto, lopatica koja se povlači (položaj  $\psi=270^\circ$ ) nailazi na protok zraka koji se kreće suprotno od smjera helikoptera, što rezultira brzinom protoka zraka jednakom rotacijskoj brzini lopatice umanjenoj za brzinu vjetra zbog brzine zraka prema naprijed. Lopatice postavljene iznad nosa i repa (pozicije  $\psi=180^\circ$  i  $\psi=0^\circ$ ) pomiču se gotovo okomito na strujanje zraka koje stvara brzina zraka prema naprijed, pri čemu je brzina strujanja zraka u susretu s tim lopaticama jednaka samo rotacijskoj brzini. Ove varijacije u brzini protoka zraka kroz disk rotora uzrokuju promjene uzgona diska rotora. [1] [3]

Tijekom napredujućeg leta strujanje zraka kroz disk rotora helikoptera znatno je složenije nego u lebdenju. Disk rotora doživljava asimetrično strujanje zraka jer se strana diska s

lopaticom koja napreduje susreće s većom relativnom brzinom vjetra od strane koja se povlači što se može vidjeti na slici 3. Ova asimetrija utječe na uzgon koji generiraju različiti dijelovi diska rotora, što dovodi do fenomena kao što je mahanje lopatica rotora i potrebe za cikličkom kontrolom nagiba radi održavanja samog leta.



**Slika 3.** Razlike u brzinama optjecanja nosećeg rotora

Izvor: [2]

Lopatice glavnog rotora generiraju uzgon ne samo svojom rotacijom već i napadnim kutom koji varira po disku rotora zbog gibanja helikoptera prema naprijed. Lopatica koja napreduje ima povećan uzgon zbog veće relativne brzine vjetra, dok lopatica koja se povlači mora kompenzirati niže relativne brzine vjetra. To zahtijeva preciznu kontrolu postavnog kuta i može ograničiti maksimalnu brzinu helikoptera prema naprijed. [1] [3]

## 2.2. Strujanje zraka kroz disk rotora tijekom režima autorotacije

Autorotacija predstavlja stanje leta tijekom kojeg se disk glavnog rotora helikoptera pokreće kretanjem zraka kroz rotor prema gore, a ne snagom motora. U redovnom motornom letu, zrak struji kroz disk glavnog rotora s gornje strane i prolazi kroz njega. Međutim, tijekom autorotacije, zrak se uspinje u disk rotora s donje strane dok se helikopter spušta. [1]

## 2.3. Strujanje zraka kroz disk rotora tijekom formiranja vrtložnog prstena

Stanje vrtložnog prstena (engl. *Vortex ring state* - VRS) opasno je stanje koje se može pojaviti tijekom spuštanja helikoptera, a formira se kada noseći rotor zahvaća već istisnuti zrak ispod diska nosećeg rotora. Tako jedna te ista količina zraka prolazi kroz disk nosećeg rotora nekoliko puta, stvarajući pritom vrtložnja u obliku prstena koji zahvaća određenu površinu nosećeg rotora. Ovo se stanje obično događa kada je veća brzina silaženja i mala napredujuća brzina.

Protok zraka tijekom VRS-a ometa normalni (motorni) režim rada rotora, što dovodi do gubitka uzgona i brzog smanjenja visine. Oporavak od VRS-a uključuje promjenu putanje leta kako bi se ponovno uspostavio normalan protok zraka kroz disk rotora, često zahtijevajući kombinaciju povećanja brzine prema naprijed i povećanja visine kako bi se izbjegao samoinducirano turbulentno strujanje zraka

Pri tome protok zraka koji ulazi u disk rotora počinje recirkulirati. To znači da se zrak kreće prema gore duž vanjskih rubova diska rotora, a zatim natrag prema dolje kroz rotor, tvoreći prstenasti uzorak. Ovaj recirkulirajući protok zraka remeti normalno aerodinamičko funkcioniranje lopatica rotora. Kako lopatice rotora prolaze kroz vlastito strujanje, strujanje zraka više ne slijedi uobičajenu glatku putanju, već umjesto toga oblikuje niz turbulentnih vrtložnih prstena. Ovi prstenovi smanjuju efektivnu brzinu zraka preko lopatica rotora, smanjujući uzgon i povećavajući nestabilnost. [3]

## 2.4. Strujanje zraka kroz disk rotora u režimu vjetrenjače

Režim vjetrenjače nastaje tijekom brzog spuštanja, posebno kada brzina spuštanja prelazi 2000 stopa u minuti. U tom stanju zrak teče prema gore kroz disk rotora dok se helikopter spušta. Lopatice rotora tada usporavaju ovaj uzlazni tok zraka, slično kao što vjetrenjača usporava vjetar da bi proizvela energiju. Rezultirajuća aerodinamička sila koju stvaraju lopatice rotora učinkovito usporava spuštanje helikoptera. [2] [4]

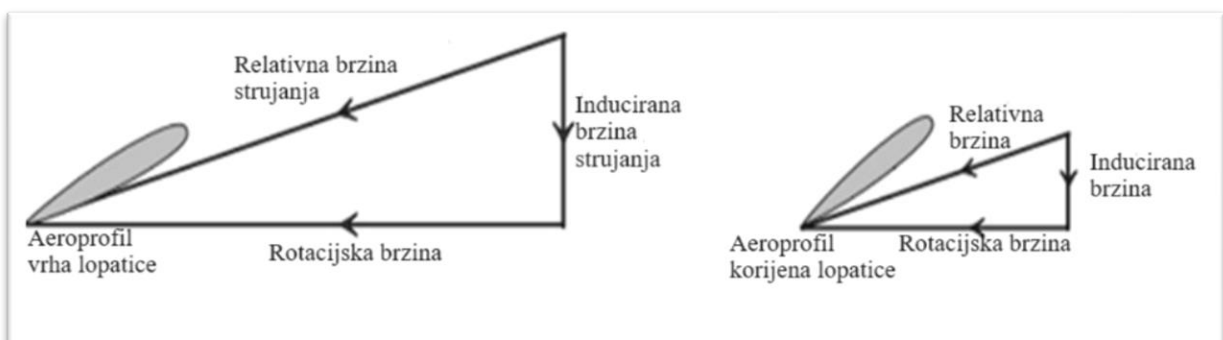
### 3. Vrtložni prsten

Vrtložni prsten je opasno aerodinamičko stanje koje se formira na rotoru helikoptera i uzrokuje snižavanje helikoptera čak i uz povećanje snage pri kojem se susreću helikopteri i drugi zrakoplovi s vertikalnim uzgonom kada se prebrzo spuštaju. Ovaj fenomen značajno utječe na sposobnost lopatica rotora da generira uzgon i može dovesti do nekontroliranog spuštanja ako se ne iskontrolira pravilno. Temeljni aspekt vrtložnog prstena je interakcija protoka zraka kroz disk rotora, što je ključno za razumijevanje i sprječavanje ovog stanja. Tijekom visokih lebdenja, planinskog letenja te u prilazima za slijetanje, formiranje vrtložnog prstena može rezultirati nesrećom, stoga pilot helikoptera mora biti upoznat kako se formira vrtložni prsten, kako ga prepoznati na vrijeme te kako reagirati na formiranje istog.

Stanje vrtložnog prstena predstavlja značajnu opasnost jer izaziva brzo spuštanje helikoptera. Ono što pogoršava ovu opasnost je to što pokušaj oporavka od stanja vrtložnog prstena može rezultirati daljnjim gubitkom visine. Piloti moraju biti krajnje oprezni kada lete na malim visinama ako su prisutni uvjeti pogodni za stanje vrtložnog prstena.

#### 3.1. Formiranje vrtložnog prstena

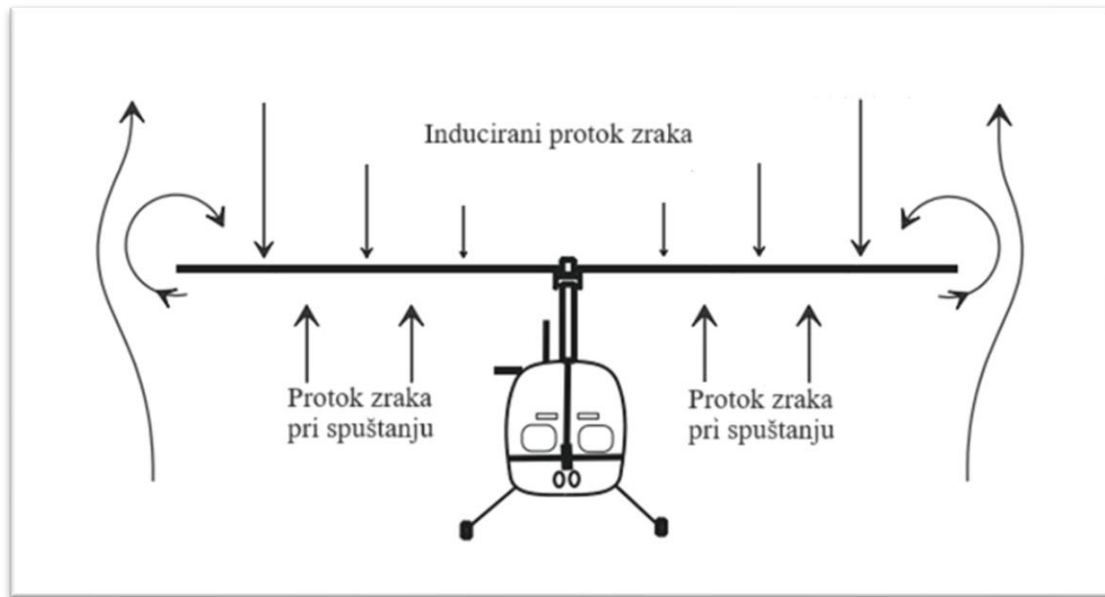
Na protok zraka na svakom dijelu lopatice utječu i inducirana ( $V_i$ ) i lokalna rotacijska brzina ( $V_r$ ), pri čemu se najveće vrijednosti pojavljuju u blizini vrha lopatice. Uz pretpostavku relativno konstantnog omjera rotacijske i inducirane brzine preko lopatice, smjer relativnog protoka zraka ostaje dosljedan duž lopatice rotora. Međutim, zbog većeg kuta oštrice na korijenu, uzrokovanog ispiranjem struje zraka, napadni kut na korijenu premašuje onaj na vrhu što je vidljivo na slici 4.



**Slika 4.** Prikaz relativne brzine duž lopatice rotora

Izvor: [3]

Ako se kolektivna palica malo spusti, mijenjajući postavni kut lopatice, helikopter počinje smanjivati visinu, što uzrokuje manju brzinu strujanja toka zraka gore prema disku. Jednom uspostavljen u spuštanju, ovaj uzlazni tok suprotstavlja se induciranom toku iznad (koji je manji u korijenu, a veći na vrhu) pri čemu brzina strujanja zraka kroz disk (odozgora prema dolje) prestaje biti jednaka na cijelom disku što se može uočiti na slici 5. [3]



**Slika 5.** Prikaz strujanja zraka kroz disk rotora prije formiranja vrtložnog prstena

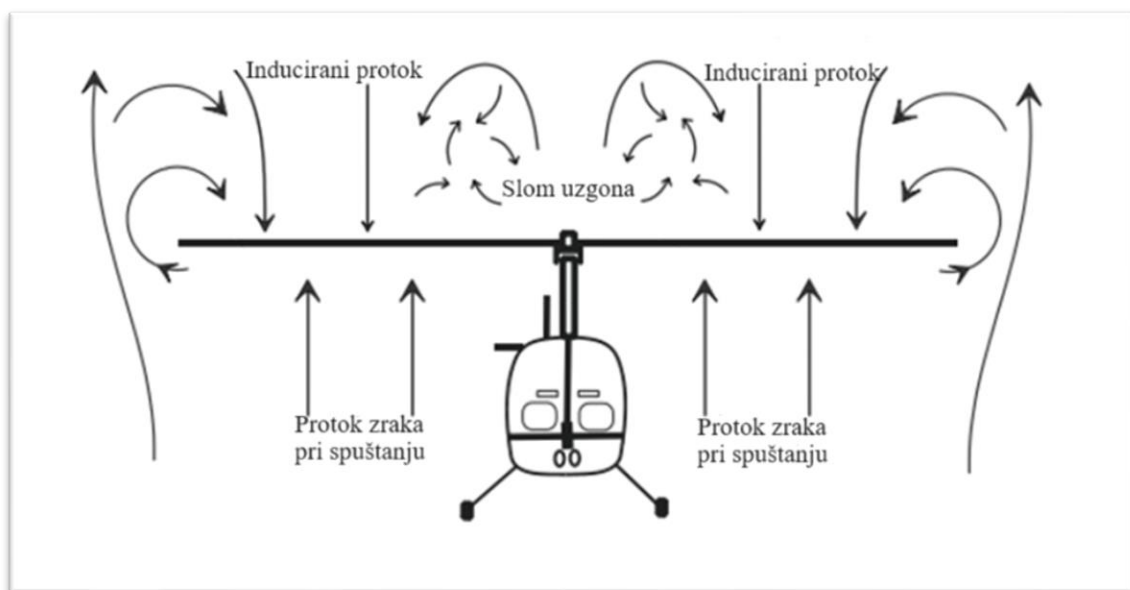
Izvor: [3]

Kako bi se formirao vrtložni prsten slijedeći uvjeti moraju biti ispunjeni:

- Mala napredujuća brzina,  $< 30$  kt
- Postavka snage motora  $> 20\%$  TQ
- Umjerena do veća brzina silaženja  $> 300$  f/min

### 3.2. Utjecaj vrtložnog prstena na strujanje zraka duž lopatice rotora

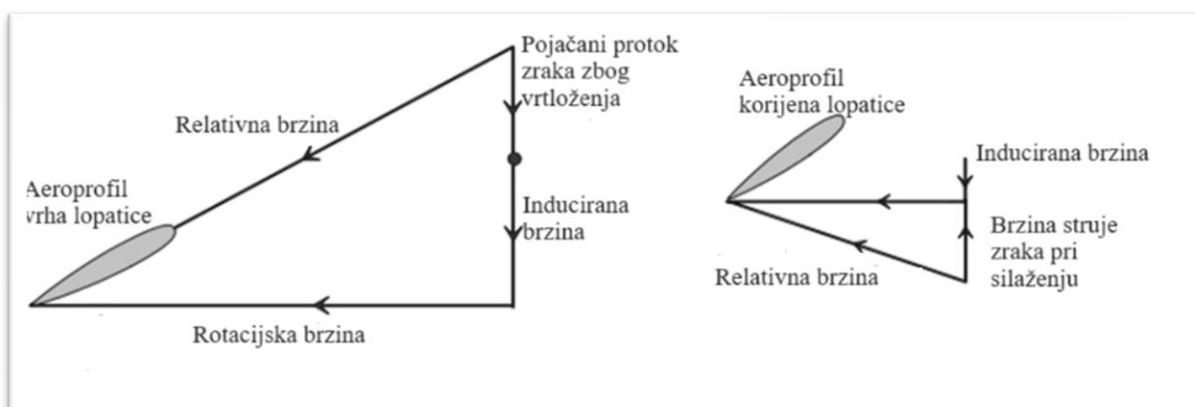
Kako se helikopter spušta, struja zraka se kreće prema gore kroz disk rotora. Ovaj protok zraka sve više utječe na korijenski dio lopatica rotora. U određenoj točki, ovaj protok zraka prema gore se uravnotežuje i postaje jednak, ali suprotan manjem, induciranom protoku prema dolje koji prirodno postoji u blizini korijena lopatice zbog rotacije lopatica kao što je vidljivo na slici 6. Kada se ovi suprotni tokovi zraka uravnoteže, relativni protok zraka poravnat će se paralelno s ravninom u kojoj se okreću lopatice rotora.



**Slika 6.** Prikaz formiranog vrtložnog prstena

Izvor [3]

Ovo poravnanje pomiče napadni kut lopatice (kut između tetive lopatice i nadolazećeg zraka) povećavajući njegovu vrijednost. Kako se helikopter nastavlja spuštati, ovaj kut u korijenu lopatice povećava se iznad sposobnosti lopatice da proizvede uzgon (prekoračuje svoj maksimalni koeficijent uzgona,  $C_{Lmax}$ ). Posljedično, dio lopatica u blizini korijena više ne stvara učinkovito uzgon, što dovodi do gubitka učinkovitosti rotora.



**Slika 7.** Aeroprofil lopatice rotora na vrhu i korijenu

Izvor: [3]

Istovremeno, vrtložna struja zraka na vrhovima lopatica se pojačava. Ovo pojačano djelovanje vrtloga povećava inducirani protok duž vanjskih dijelova lopatica, smanjujući napadni kut što je vidljivo na slici 8. Unatoč tome, sveukupni uzgon kojeg stvaraju i unutarnji



(korijen) i vanjski (vrh) dijelovi lopatice rotora se smanjuju. Smanjenje efektivnog uzgona preko diska rotora dovodi do još veće brzine silaženja.

Kako pilot reagira spuštanjem kolektivne palice (što smanjuje postavni kut lopatica rotora kako bi se smanjio uzgon i snaga), povećava se brzina silaženja, pri čemu dolazi do gubitka uzgona u korijenu lopatice i smanjenje koeficijenta uzgona na vrhovima lopatica. Na kraju, samo je uski središnji dio lopatice rotora između korijena i vrha učinkovit u stvaranju uzgona. Međutim, ovo je područje premalo da izdrži težinu helikoptera, uzrokujući da brzina spuštanja potencijalno poraste do alarmantnih brzina poput 5000 stopa u minuti dok helikopter potpuno ulazi u stanje vrtložnog prstena. [3]

Protok zraka prema gore dalje mogu stvoriti sekundarne vrtloge koji odilazi od središta diska rotora. Testiranja unutar aerodinamičkog tunela otkrivaju sekundarne vrtložne prstenove koji su izuzetno nestabilni i nepredvidivi. Nepravilno strujanje zraka dovodi do drastičnih i iznenadnih varijacija u napadnom kutu lopatica, uzrokujući asimetrično podizanje preko diska rotora. Ova asimetrija u uzgonu prisiljava helikopter na nekontrolirano propinjanje, skretanje i rotiranje oko uzdužne osi. [3]

### 3.3. Utjecaj vjetra na formiranje vrtložnog prstena

Kada se helikopter spušta, osobito ako ima veliku brzinu spuštanja, rotor istiskuje zrak prema dolje. U mirnim uvjetima, ovaj zrak jednoliko struji oko diska rotora. Međutim, vjetar može poremetiti to strujanje, uzrokujući nepravilne i turbulentne obrasce strujanja zraka. Na primjer, ako vjetar dolazi iza helikoptera, on može gurnuti istisnuti zrak rotora naprijed ispod trupa, uzrokujući spuštanje helikoptera u vlastiti turbulentni zrak, što je slično ulasku u VRS. Ovaj scenarij je posebno riskantan jer može dovesti do gubitka uzgona i brzog povećanja brzine spuštanja. [5]

Nadalje, vjetar može pogoršati uvjete koji dovode do VRS-a promjenom relativnog smjera vjetra na koji nailaze lopatice rotora. Ova promjena može povećati napadni kut na određenim dijelovima lopatice rotora više nego na drugima, potencijalno dovodeći do lokalnog gubitka uzgona korijena lopatice uz povećanje uzgona na vrhovima, ili obrnuto, ovisno o smjeru i jačini vjetra. [5]

U situacijama kada helikopter leti u uvjetima leđnog vjetra, pilot bi mogao iskusiti fenomen poznat kao "stabilnost vjetra", gdje se helikopter prirodno želi okrenuti prema vjetru. Taj učinak može otežati pilotu da zadrži kontrolu, osobito kada male vrijednosti napredujuće brzine i velike snage kombiniraju kako bi stvorile savršenu kombinaciju za ulazak u VRS. Također leđni vjetar je jedan od čimbenika koji pospješuju formiranje vrtložnog prstena

povećavajući njegovo formiranje na sredini lopatice vršeci recirkulaciju već istisnutog zraka. [5] [6]

### 3.4. Metode vađenja iz uvjeta vrtložnog prstena

Nakon uočavanja predznaka pojave vrtložnog prstena, u komercijalnom zrakoplovstvu koriste se dvije metode vađenja iz preduvjeta, a to su vađenje u naprijed i vađenje u stranu. [6]

#### 3.4.1. Metoda vađenja u naprijed

Tehnika promjene nagiba za izlazak iz VRS-a uključuje manipulaciju kolektivne kontrole helikoptera, koja mijenja postavni kut svih lopatica rotora istovremeno. Ova metoda ima za cilj smanjiti napadni kut lopatica, privremeno smanjujući uzgon kako bi se omogućilo helikopteru da pobjegne vlastitom strujanju zraka prema dolje. [6]

Procedura:

1. Spuštanje kolektivne palice- u početku, pilot mora spustiti kolektivnu palicu kako bi smanjio postavni kut lopatica rotora. Ovo smanjenje smanjuje uzgon i otpor koji stvara rotor, s namjerom da se smanji uzlazni protok zraka koji pridonosi održavanju VRS-a.
2. Potiskivanje ciklične palice u naprijed- Istovremeno sa spuštanjem kolektivne palice, pilot treba potisnuti cikličnu palicu naprijed kako bi povećao uzdužni položaj helikoptera na dolje s ciljem ubrzanja napredujuće brzine. Pomicanje ciklične palice naginje disk rotora prema naprijed, gurajući helikopter iz poremećenog strujanja zraka.
3. Uspostaviti režim horizontalnog leta- Kako se helikopter kreće naprijed, on povećava napredujuću brzinu, što pomaže ponovnom uspostavljanju učinkovitog protoka zraka preko lopatica rotora. Pilot tada može postupno povećavati snagu za penjanje ili održavanje visine u standardnom motornom režimu strujanja zraka kroz disk rotora. [7]

#### 3.4.2. Metoda vađenja u stranu

Ova tehnika nudi učinkovitiju metodu s potencijalno manjim gubitkom visine u usporedbi s tradicionalnom metodom vađenja iz preduvjeta prema naprijed. Razvio ju je Claude Vuichard testirajući utjecaje vrtložnog prstena na helikopteru. Ova metoda koristi aerodinamičke prednosti izbjegavanjem vrtložnog prstena bočnim kretanjem helikoptera, iskorištavanjem energije repnog rotora.

Procedura:

1. Podizanje kolektivne palice: Za razliku od tradicionalne metode, Vuichard predlaže lagano podizanje kolektiva kako bi se dobila snaga uz zadržavanje visine.

2. Potiskivanje ciklične palice u stranu uz održavanje pravca leta nožnim komandama: Pilot postavlja nagib u smjeru potiska repnog rotora (suprotno okretnom momentu glavnog rotora) i koristi nožne komande za održavanje pravca. Ova kombinacija stvara bočno gibanje koje pomiče helikopter bočno izvan strujanja zraka prema dolje.
3. Povećanje visine: Kako se helikopter pomiče bočno, brže izlazi iz stanja vrtložnog prstena uz minimalni gubitak visine. Bočno gibanje u kombinaciji s povećanjem snage pomaže u učinkovitijoj stabilizaciji protoka zraka oko lopatica rotora. [7]

#### 4. Opis helikoptera Bell 206B JetRanger III

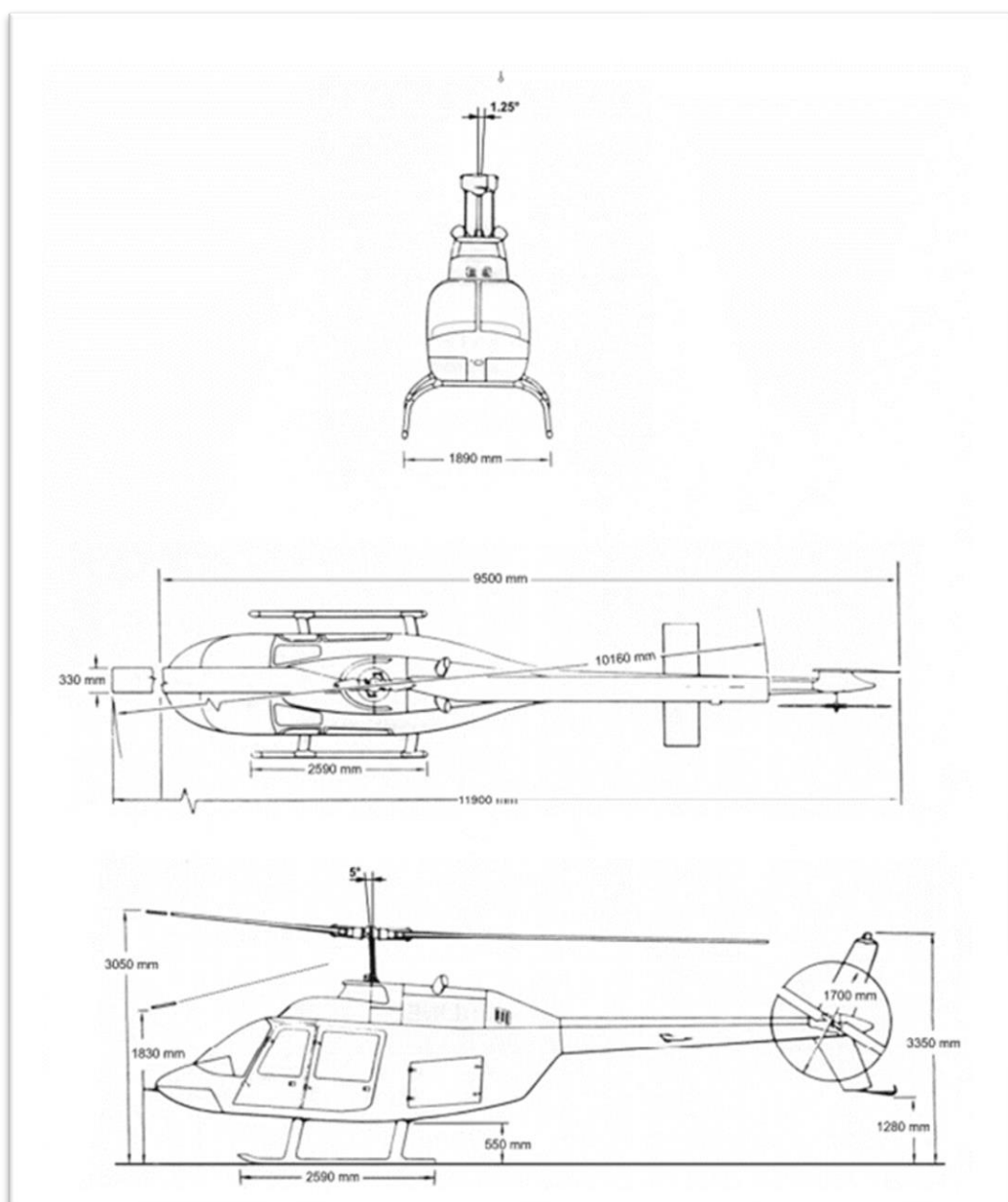
Bell 206B JetRanger III je laki višenamjenski helikopter poznat po svojoj pouzdanosti i svestranosti u raznim ulogama, a njegov prikaz vidljiv je na slici 8. Ovaj model pokreće jedan turbovrtilni motor Allison 250-C20B, koji može proizvesti 313 kW konjskih snaga na osovini, no reduciranih na 236 kW zbog ograničenja pogonskog sklopa. [8]



**Slika 8.** Helikopter Bell 206B

**Napomena:** *Autor se ne poziva na izvor jer slika nije preuzeta niti napravljena u skladu s nekim izvorom (autor je sam izradio sliku).*

Model 206B-III je primarno konstruiran za provođenje kopnenih operacija s bilo kojeg razmjerno ravnog terena. Koristi se za trenažu i školovanje pilota, za razne vrste nadziranja, za pomoć pri spašavanju, te za prijevoz putnika i tereta. Dimenzije ovog helikoptera prikazane su na slici 9.



**Slika 9.** Dimenzije helikoptera

Izvor: [8]

Ovu inačicu helikoptera koristi Hrvatsko ratno zrakoplovstvo (HRZ) od 1997. godine pri čemu se koristi za:

- Prijevoz ljudi i tereta
- Izviđanje iz zraka
- Snimanje iz zraka
- Nošenje podvjesnog tereta
- Traganje i spašavanje [8]

#### 4.1 Performanse helikoptera

Bell 206B-3 JetRanger opremljen je motorom Rolls Royce 250-C20J, koji nudi značajnu snagu, do 420 konjskih snaga na vratilu. Ova snaga je ključna u određivanju performansi helikoptera na različitim visinama. Na performanse motora utječe gustoća zraka, koja opada s visinom, utječući na sposobnost helikoptera da generira uzgon i održava brzinu.

Sposobnost brzine helikoptera značajno varira s visinom, što je uvjetovano čimbenicima aerodinamike i performansama motora. Na razini mora, gdje je zrak gušći, JetRanger može učinkovitije postići veće brzine. Kako se visina povećava, maksimalna dopuštena brzina (engl. *Velocity Never to Exceed* - VNE) se smanjuje kako bi se kompenzirala smanjena gustoća zraka i povezano smanjenje učinkovitosti rotora. Na primjer, priručnik navodi da je pri težinama manjim od 3000 lbs, VNE 130 KIAS (indicirana zračna brzina u čvorovima) do 3000 stopa prema visini mjereno po gustoći, smanjujući se za 3,5 KIAS za svakih dodatnih 1000 stopa visine. [8]

Pri težinama preko 3000 lbs, VNE počinje od 122 KIAS i više se smanjuje s visinom, odražavajući dodatno opterećenje helikoptera zbog veće težine. Ove prilagodbe osiguravaju sigurnost i strukturni integritet zrakoplova u različitim radnim uvjetima.

Maksimalna visina na kojoj može izdržati kontrolirani let je 20000 stopa za manje težine (ispod 3000 lbs). Za veće težine, ograničenja performansi su reducirana, s najvećom dozvoljenom visinom leta od 13500 stopa zbog smanjene učinkovitosti rotora i snage motora.

U operacijama gdje je nadmorska visina promjenjiva, kao što su spašavanje u planinama ili istraživanja na velikim visinama, razumijevanje ovih ograničenja je ključno. Piloti moraju upravljati težinom i brzinom zrakoplova kako bi optimizirali uzgon i održali učinkovitu kontrolu. [8]

Podaci o helikopteru korišteni tijekom testiranja vrtložnog prstena

Unutar dokumenta „Program letačke izobrazbe učenika letača na helikopteru Bell 206B“ navedena je procedura uvođenja i vađenja iz preduvjeta vrtložnog prstena koju koristi HRZ tijekom obuke pilota helikoptera. Svrha obuke pilota je kako bi se podigla svijest o opasnostima koje uzrokuje formiranje vrtložnog prstena na upravljivost i stabilnost helikoptera.

Za praćenje parametara pri izradi ovog rada korišteni su sljedeći instrumenti:

- a) Mjerač zakretnog momenta rotora
- b) Brzinomjer
- c) Visinomjer

#### d) Pokazivač vertikalne brzine

#### 4.2. Procedura za uvođenje u vrtložni prsten za helikopter Bell 206B

Procedura za uvođenje u manevar zahtijeva izvođenje manevra pri sljedećim uvjetima:

- Visina uvođenja 4000 stopa
- Brzina uvođenja 50 KIAS
- Koordinirani let
- Snaga za uvođenje umanjena za 10% po TQ od potrebne snage za održavanje horizontalnog leta pri 50 KIAS

Procedura tijekom uvođenja uvjetuje minimalnu visinu izvođenja manevra na 4000 stopa zbog gubitka visine uslijed izvođenja istog. Nakon što se ustabili režim horizontalnog leta pri brzini 50 KIAS, očitava se potrebna snaga motora na mjeraču zakretnog momenta rotora te kako bi se uveo helikopter u vrtložni prsten, snaga se smanjuje za 10% od očitane. Nakon smanjenja snage, potrebno je zadržati visinu leta, a to se vrši promjenom nagiba diska rotora djelujući cikličnom palicom u natrag što će rezultirati smanjenjem brzine. Smanjenje progresivne brzine odgodit će trenutak smanjenja visine, do kojeg će doći kada rotor s postavljenom snagom više neće moći proizvoditi dovoljnu silu uzgona što će u konačnici uzrokovati pojavljivanja prvih predznaka formiranja vrtložnog prstena:

- Pojava vibracija niske frekvencije
- Vertikalna brzina spuštanja 200-300 ft/min
- Helikopter reagira s kašnjenjem na pomak ciklične palice. [9]

#### 4.3. Metode vađenja iz preduvjeta vrtložnog prstena na helikopteru Bell 206B

Pri uočavanju predznaka formiranja vrtložnog prstena potrebno je započeti s metodama vađenja iz istog.

##### 4.3.1. Vađenje u stranu

Prilikom vađenja u stranu postavlja se nagib 10-20° u desno uz održavanje pravca koristeći snagu repnog rotora. Nakon postavljanja nagiba podiže se snaga iznad 65 % do 85 % po TQ i smanjuje se nagib kako bi se helikopter postavio u horizontalni položaj. Zbog male brzine kretanja u naprijed, helikopter može nakratko ostati u stabilnom režimu lebdenja izvan utjecaja zračnog jastuka pri čemu nakon uspostavljanja horizontalnog položaja pilot mora povećati uzdužni položaj helikoptera na dolje kako bi helikopter povećao brzinu kretanja u naprijed. [10]

#### 4.3.2. Vađenje u naprijed

Ova metoda koristi promjenu uzdužnog položaja kako bi se povećala brzina kretanja unaprijed te na taj način obnavlja ponovno strujanje zraka kroz rotor u motornom režimu rada. Tijekom vađenja iz preduvjeta, pomicanjem ciklične palice u naprijed se povećava uzdužni kut 10-20° na dolje. Nakon što se brzina ubrza iznad 30 KIAS, započinje se s povećanjem snage i uspostavlja režim horizontalnog leta. [10]



## 5. Određivanje performansi helikoptera Bell 206B prilikom uvođenja i vađenja iz vrtložnog prstena

Tijekom probnih letova odrađenih na helikopteru Bell 206B izvršena su uvođenja helikoptera u stanje vrtložnog prstena s različitim brzinama kako bi se zabilježilo kakav utjecaj brzina leta ima na formiranje vrtložnog prstena.

Pri vršenju letova visina leta je bila 4000 stopa prije uvođenja, s čeonom komponentom vjetra jačine 6 čvora određenog s pomoću korištenja GPS-a unutar helikoptera.

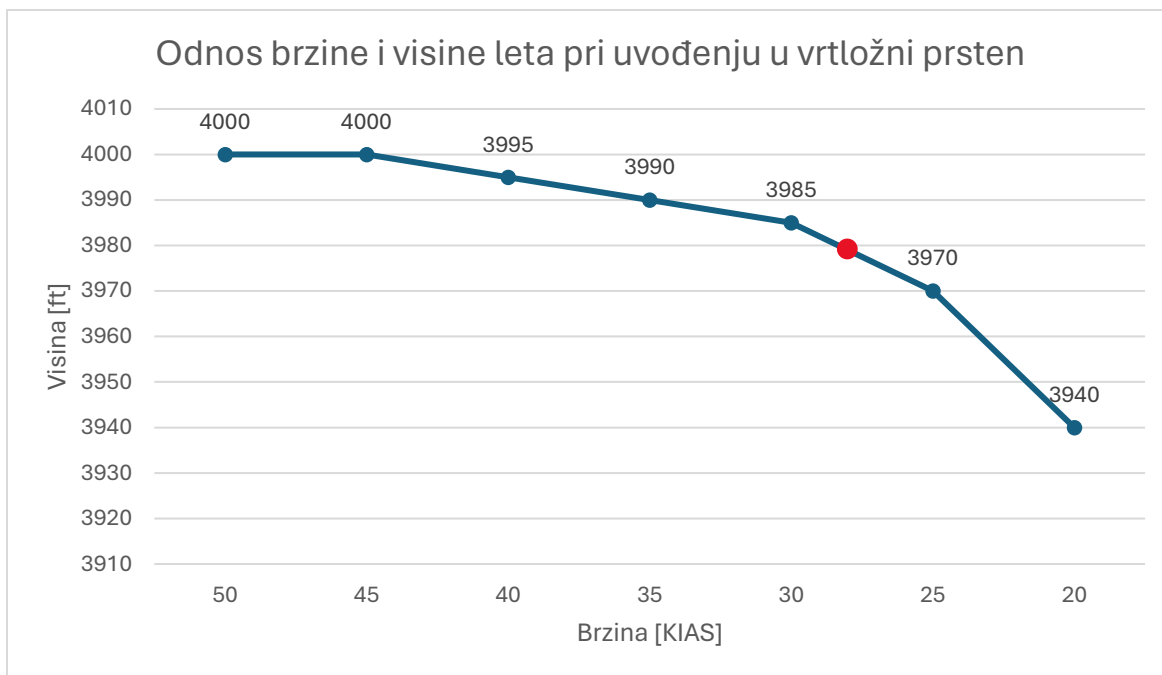
Nakon uočavanja predznaka izvršene su metode vađenja u naprijed i metode vađenja u stranu kako bi se mogli iste usporediti.

### 5.1. Analiza testiranja pri uvođenju do predznaka vrtložnog prstena pri 50 KIAS

Pri izvođenju manevra zabilježene su sljedeće vrijednosti:

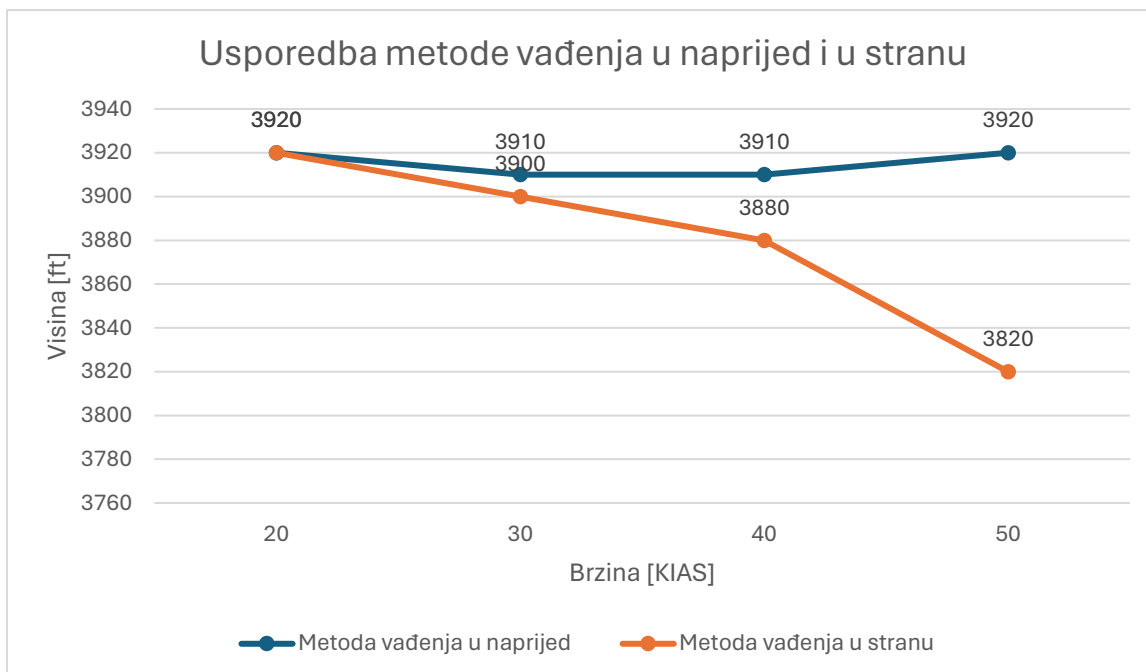
- Visina uvođenja: 4000 stopa
- Brzina uvođenja: 50 KIAS
- Visina pri pojavi prvih predznaka 3980 stopa
- Brzina pri uočavanju prvih predznaka 28 KIAS
- Brzina silaženja prije početka vađenja iz manevra 200-300 ft/min
- Gubitak visine tijekom manevra koristeći metodu vađenja u stranu: 90 stopa
- Gubitak visine tijekom manevra koristeći metodu vađenja u naprijed: 180 stopa

Grafički prikaz uvođenja do preduvjeta vrtložnog prstena prikazan je na grafu 1 na kojem je crvenom točkom označen početak uočavanja predznaka, a na grafu 2 može se vidjeti usporedba gubitka visine prilikom korištenja metode vađenja u stranu i metode vađenja u naprijed.



**Graf 1.** Odnos brzine i visine leta pri uvođenju u vrtložni prsten

Na grafu 1 prikazan je odnos visine i brzine leta prilikom uvođenja helikoptera do predznaka vrtložnog prstena. Može se uočiti da je pri usporencu brzine s 50 KIAS sve do brzine 28 KIAS, helikopter imao lagano snižavanje visine s 4000 stopa do 3980 stopa. Po usporencu ispod 28 KIAS uočava se pojava većih vibracija i veće brzine silaženja.



**Graf 2.** Usporedba metode vađenja u naprijed i u stranu

Na grafu 2 prikazane su metode vađenja u naprijed (plava linija) i metoda vađenja u stranu (narančasta linija). Njihov prikaz napravljen je u ovisnosti visine i napredujuće brzine

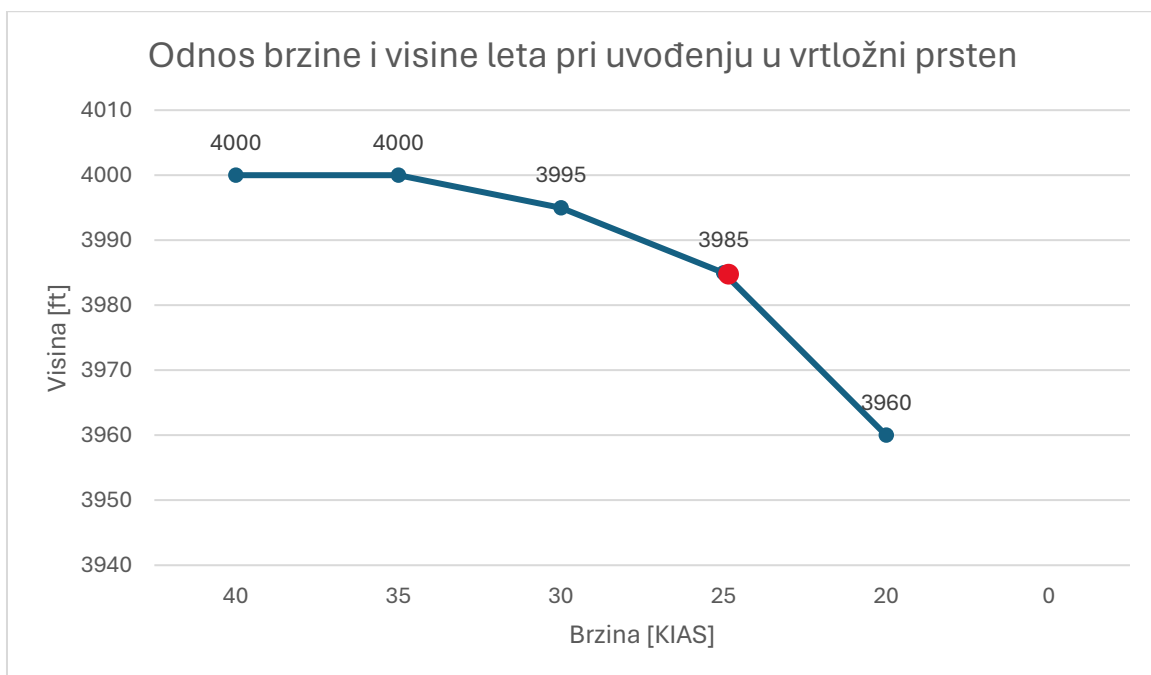
prilikom vađenja iz preduvjeta navedenih ranije. Iz grafa se može uočiti da pri korištenju metode u naprijed, helikopter izgubi više visine kako povećava napredujuću brzinu, a pri korištenju metode vađenja u stranu, gubitak visine je minimalan. Gubitak visine samo prilikom vađenja je 20 stopa pri korištenju metode vađenja u stranu, a 100 stopa pri korištenju metode vađenja u naprijed.

## 5.2. Uvođenje u stanje vrtložnog prstena pri 40 KIAS

Pri izvođenju manevra zabilježene su sljedeće vrijednosti:

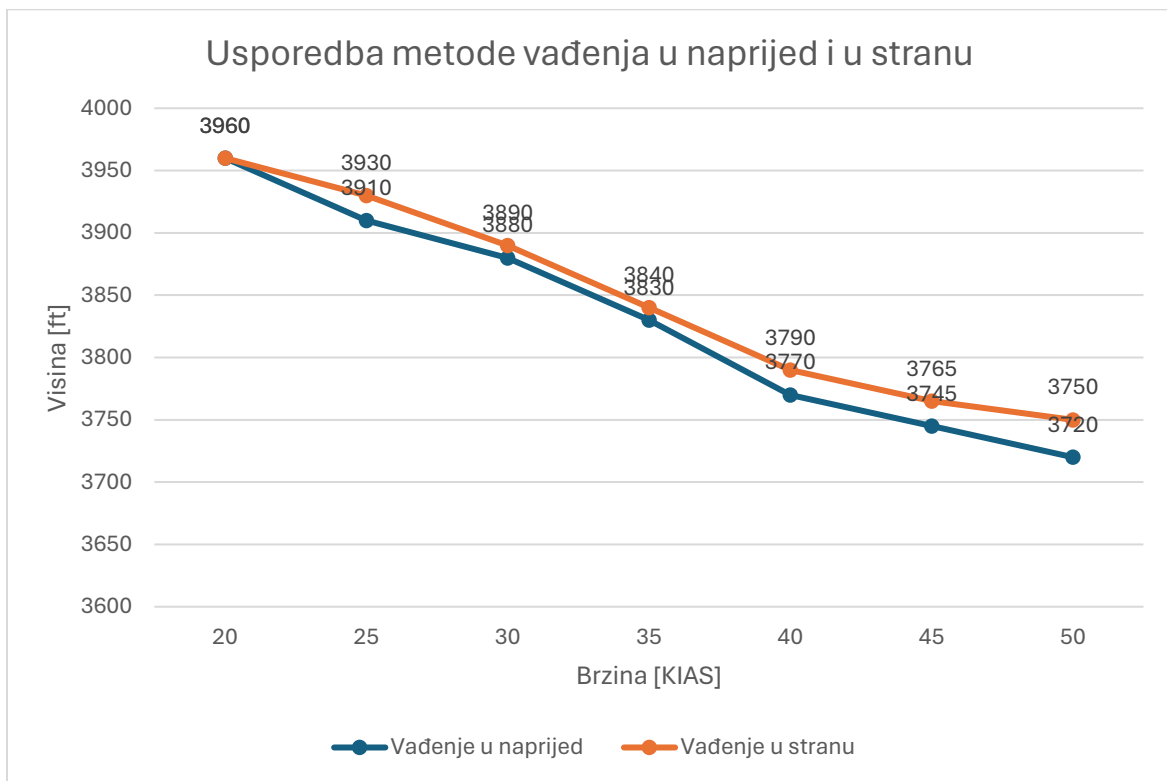
- Visina uvođenja: 4000 stopa
- Brzina uvođenja: 40 KIAS
- Visina pri pojavi prvih predznaka 3985 stopa
- Brzina pri uočavanju prvih predznaka 25 KIAS
- Brzina silaženja prije početka vađenja iz manevra 200-300 ft/min
- Gubitak visine tijekom manevra koristeći metodu vađenja u stranu: 250 stopa
- Gubitak visine tijekom manevra koristeći metodu vađenja u naprijed: 280 stopa

Grafički prikaz uvođenja do preduvjeta vrtložnog prstena prikazan je na grafu 3, a na grafu 4 može se vidjeti usporedba gubitka visine prilikom korištenja metode vađenja u stranu i metode vađenja u naprijed. S pomoću crvene točke na grafu 3 označen je početak pojave prvih predznaka.



**Graf 3.** Odnos brzine i visine leta pri uvođenju u vrtložni prsten

Na grafu 3 prikazan je odnos visine i brzine leta prilikom uvođenja helikoptera do predznaka vrtložnog prstena. Može se uočiti da je pri usporenju brzine s 40 KIAS sve do brzine 25 KIAS, helikopter imao lagano snižavanje visine s 4000 stopa do 3985 stopa. Po usporenju ispod 25 KIAS uočava se pojava većih vibracija i veće brzine silaženja, odnosno do pojave prvih predznaka koji je na grafu označen crvenom točkom.



**Graf 4.** Usporedba metode vađenja u naprijed i u stranu

Na grafu 4 prikazane su metode vađenja u naprijed (plava linija) i metoda vađenja u stranu (narančasta linija). Njihov prikaz napravljen je u ovisnosti visine i napredujuće brzine prilikom vađenja iz preduvjeta vrtložnog prstena. Iz grafa se može uočiti da pri korištenju metode u naprijed, helikopter izgubi više visine kako povećava napredujuću brzinu, a pri korištenju metode vađenja u stranu, gubitak visine je manji. Gubitak visine samo prilikom vađenja je 210 stopa pri korištenju metode vađenja u stranu, a 240 stopa pri korištenju metode vađenja u naprijed.

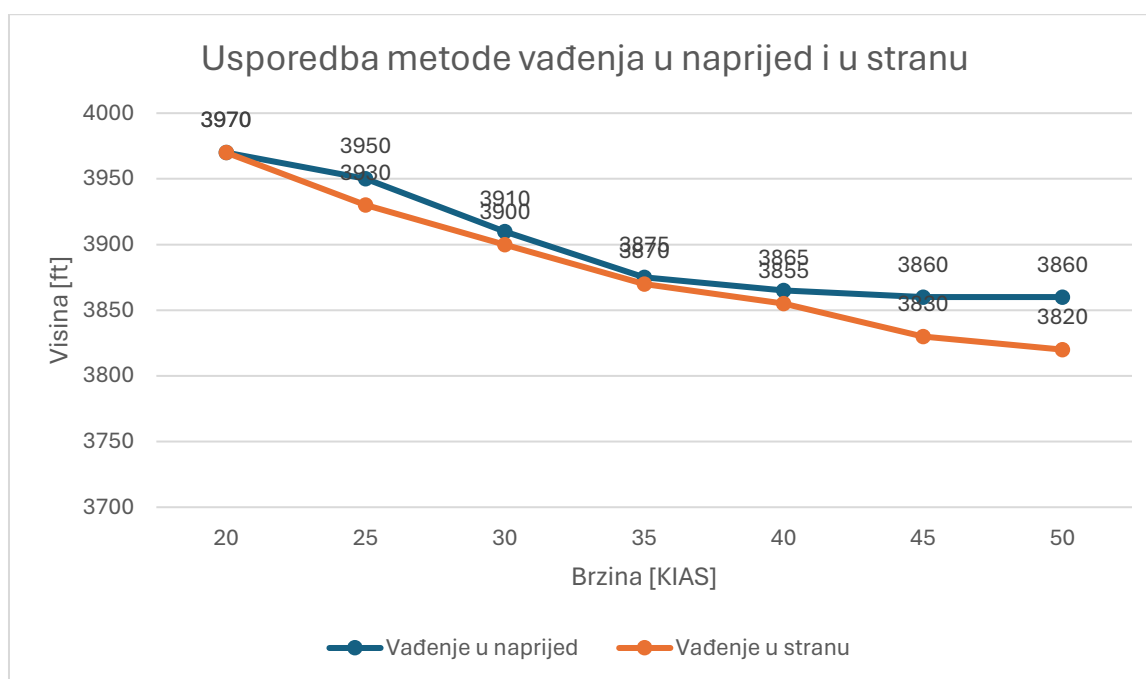
### 5.3. Uvođenje u stanje vrtložnog prstena pri 30 KIAS

Pri izvođenju manevra zabilježene su sljedeće vrijednosti:

- Visina uvođenja: 4000 stopa
- Brzina uvođenja: 30 KIAS

- Visina pri pojavi prvih predznaka 3970 stopa
- Brzina pri uočavanju prvih predznaka 20 KIAS
- Brzina silaženja prije početka vađenja iz manevra 200-300 ft/min
- Gubitak visine tijekom manevra koristeći metodu vađenja u stranu: 140 stopa
- Gubitak visine tijekom manevra koristeći metodu vađenja u naprijed: 180 stopa

S pomoću grafa 5 može se vidjeti usporedba gubitka visine prilikom korištenja metode vađenja u stranu i metode vađenja u naprijed.



**Graf 5.** Usporedba metode vađenja u naprijed i u stranu

Na grafu 5 prikazane su metode vađenja u naprijed (plava linija) i metoda vađenja u stranu (narančasta linija). Njihov prikaz napravljen je u ovisnosti visine i napredujuće brzine prilikom vađenja iz preduvjeta vrtložnog prstena. Iz grafa se može uočiti da pri korištenju metode u naprijed, helikopter izgubi više visine kako povećava napredujuću brzinu, a pri korištenju metode vađenja u stranu, gubitak visine je manji. Gubitak visine samo prilikom vađenja je 110 stopa pri korištenju metode vađenja u stranu, a 150 stopa pri korištenju metode vađenja u naprijed.

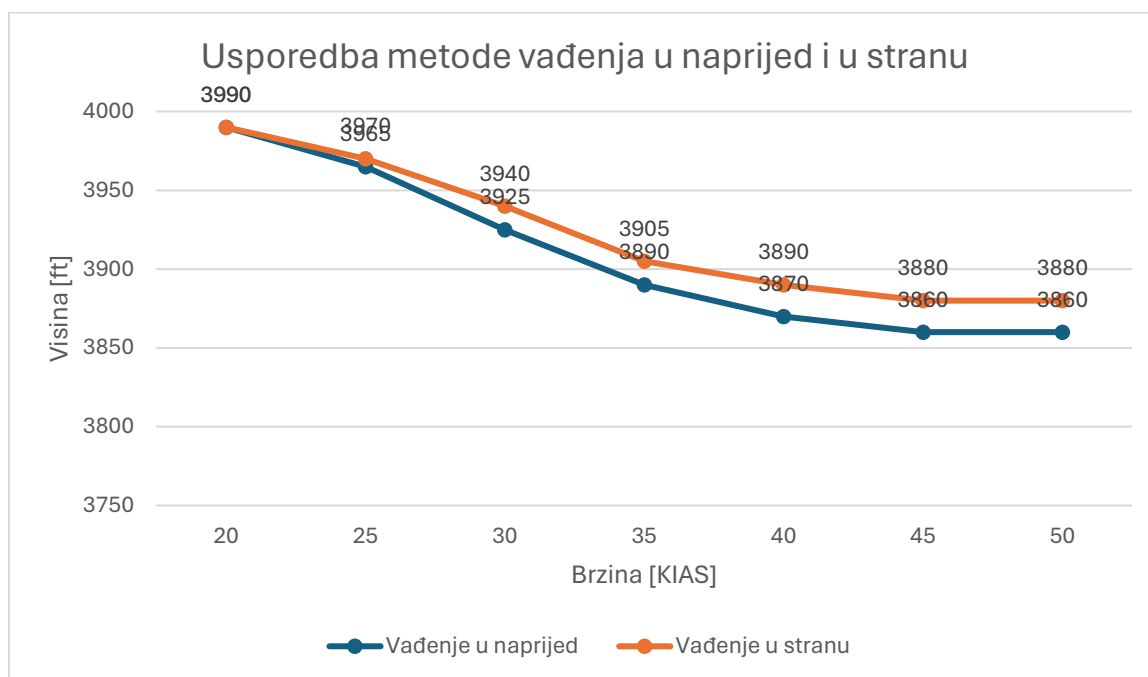
#### 5.4. Uvođenje u stanje vrtložnog prstena pri minimalnoj brzini uvođenja

Pri izvođenju manevra zabilježene su sljedeće vrijednosti:

- Visina uvođenja: 4000 stopa

- Brzina uvođenja: 20 KIAS
- Visina pri pojavi prvih predznaka 3990 stopa
- Brzina pri uočavanju prvih predznaka 15-20 KIAS
- Brzina silaženja prije početka vađenja iz manevra 200-300 ft/min
- Gubitak visine tijekom manevra koristeći metodu vađenja u stranu: 120 stopa
- Gubitak visine tijekom manevra koristeći metodu vađenja u naprijed: 140 stopa

Uz pomoć grafa 6 može se vidjeti usporedba gubitka visine prilikom korištenja metode vađenja u stranu i metode vađenja u naprijed.



**Graf 6.** Usporedba metode vađenja u naprijed i u stranu

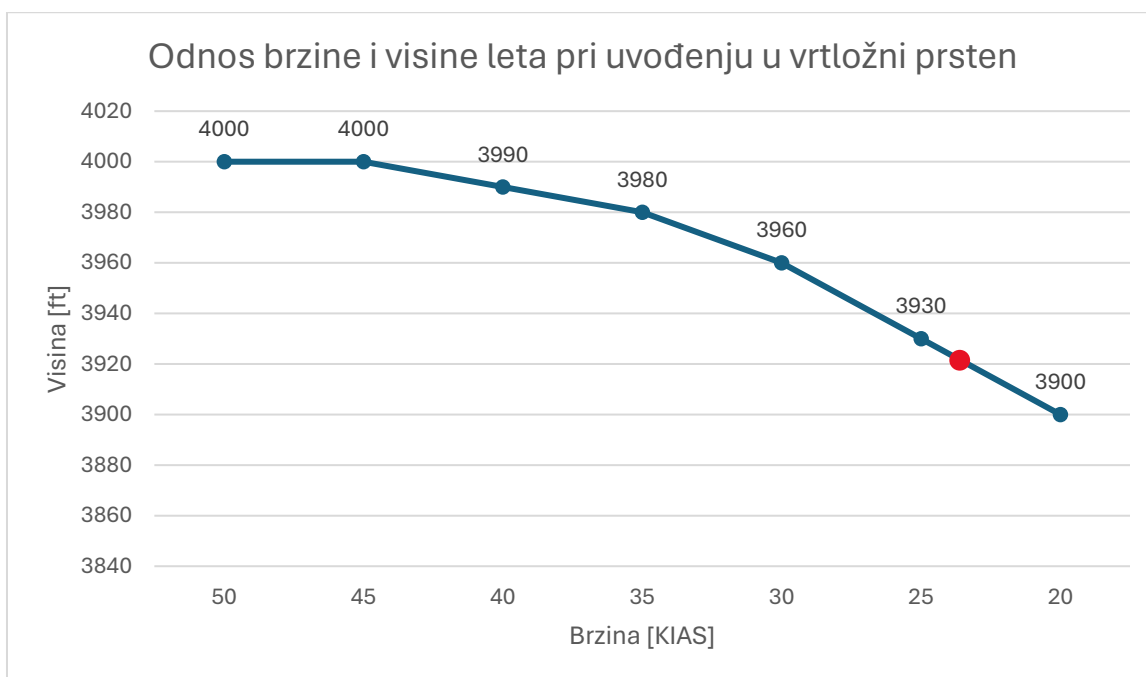
Na grafu 6 prikazane su metode vađenja u naprijed (plava linija) i metoda vađenja u stranu (narančasta linija) korištenih nakon uvođenja helikoptera do predznaka pri minimalnoj napredujućoj brzini. Njihov prikaz napravljen je u ovisnosti visine i napredujuće brzine prilikom vađenja iz preduvjeta vrtložnog prstena. Iz grafa se može uočiti da pri korištenju metode u naprijed, helikopter izgubi više visine kako povećava napredujuću brzinu, a pri korištenju metode vađenja u stranu, gubitak visine je manji. Gubitak visine samo prilikom vađenja je 110 stopa pri korištenju metode vađenja u stranu, a 130 stopa pri korištenju metode vađenja u naprijed.

#### 5.5. Uvođenje u stanje vrtložnog prstena s komponentom leđnog vjetra

Pri izvođenju manevra zabilježene su sljedeće vrijednosti:

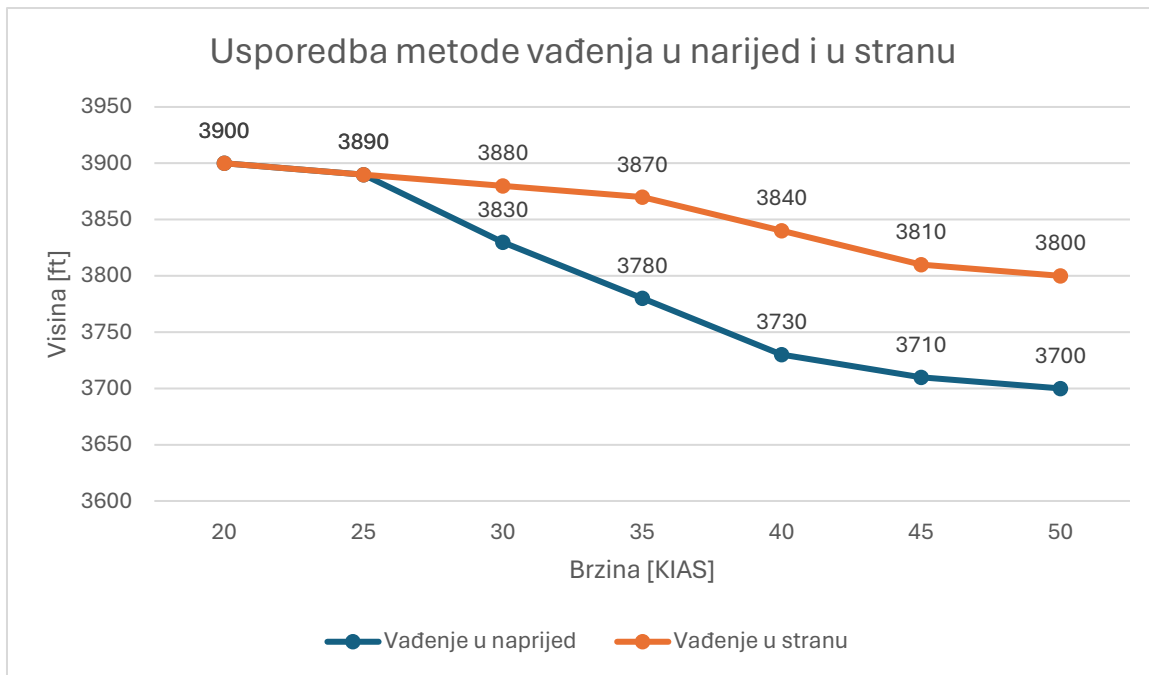
- Visina uvođenja: 4000 stopa
- Brzina uvođenja: 50 KIAS
- Jačina leđne komponente vjetra 7 KIAS
- Visina pri pojavi prvih predznaka 3930 stopa
- Brzina pri uočavanju prvih predznaka 20-25 KIAS
- Brzina silaženja prije početka vađenja iz manevra 200-300 ft/min
- Gubitak visine tijekom manevra koristeći metodu vađenja u stranu: 200 stopa
- Gubitak visine tijekom manevra koristeći metodu vađenja u naprijed: 300 stopa

Grafički prikaz uvođenja do preduvjeta vrtložnog prstena prikazan je na grafu 7 te crvenom točkom označen je trenutak uočavanja prvih predznaka, a na grafu 8 može se vidjeti usporedba gubitka visine prilikom korištenja metode vađenja u stranu i metode vađenja u naprijed.



**Graf 7.** Odnos brzine i visine leta pri uvođenju u vrtložni prsten

Na grafu 7 prikazan je odnos visine i brzine leta prilikom uvođenja helikoptera do predznaka vrtložnog prstena s leđnom komponentom vjetra, odnosno pojave vibracija te uočavanja veće brzine silaženja. Može se uočiti da je pri uspoređivanju brzine s 50 KIAS sve do < 25 KIAS s leđnom komponentom vjetra, bilo lagano snižavanje visine s 4000 stopa do 3900 stopa. Po uspoređivanju ispod 25 KIAS uočava se pojava većih vibracija i veće brzine silaženja.



**Graf 8.** Usporedba metode vađenja u naprijed i u stranu

Na grafu 8 prikazane su metode vađenja u naprijed (plava linija) i metoda vađenja u stranu (narančasta linija). Nihov prikaz napravljen je u ovisnosti visine i napredujuće brzine prilikom vađenja iz preduvjeta vrtložnog prstena, no s komponentom leđnog vjetra pri uvođenju. Iz grafa se može uočiti da pri korištenju metode u naprijed, helikopter izgubi više visine kako povećava napredujuću brzinu, a pri korištenju metode vađenja u stranu, gubitak visine je manji. Gubitak visine samo prilikom vađenja je 100 stopa pri korištenju metode vađenja u stranu, a 200 stopa pri korištenju metode vađenja u naprijed.



## 6. Određivanje utjecaja pojave vrtložnog prstena na helikopter Bell 206B zabilježenih na probnim letovima

Tijekom izvršenja uvođenja helikoptera do prvih predznaka vrtložnog prstena uočeno je da tijekom usporenja napredujuće brzine sa svrhom zadržavanja visine dolazi do manjka potrebne snage za održavanje režima horizontalnog leta te dolazi do povećanja brzine silaženja. Po dostizanju brzine silaženja 200 - 300 ft/min uočeni su prvi predznaci. S većom brzinom uvođenja predznaci bi se pojavili do 5 KIAS ranije. Uočene su pojave vibracija koji su najviše izraženi na cikličnoj palici te pri vođenju helikoptera kroz manevar dolazi do kašnjenja odziva helikoptera na otklon ciklične palice.

Analiziranjem dijagrama uvođenja do preduvjeta vrtložnog prstena može se uočiti da s većom brzinom uvođenja pilot ima više vremena reagirati na pojavu predznaka te po pojavi povećanja brzine silaženja i po pojavi vibracija zamijećen je manji gubitak visine pri vađenju. Također prilikom usporenja, prvi predznaci pri uvođenju s većom brzinom su se pojavljivali već na 28 KIAS, dok je pri manjim brzinama uvođenja, napredujuća brzina pri pojavljivanju bila manja.

Uputa za uvježbavanje uvođenja helikoptera do prvih predznaka govori da je potrebno čekati pojavu vibracija, brzinu silaženja 500 ft/min, ali tijekom testiranja čekanjem veće brzine silaženja dovelo je do neposrednog formiranja vrtložnog prstena prilikom kojeg metode vađenja nisu bile učinkovite. U tom slučaju je bilo potrebno spustiti kolektivnu palicu kako bi smanjili snagu i uveli helikopter u režim autorotacije. Time se sprječava nastanak potpuno formiranog vrtložnog prstena te je moguće brzo uspostavljanje ponovnom motornog režima strujanja zraka kroz disk rotora. Čekanje vertikalne brzine 500 ft/min uzrokuje naglo smanjenje visine prilikom kojega helikopter postaje teško upravljiv te je mali vremenski raspon između tog stanja i potpuno formiranog vrtložnog prstena.

Pri letu s minimalnom napredujućom brzinom uočeno je da helikopter već pri brzinama < 25 KIAS pokazuje predznake vrtložnog prstena. Dolazi do težeg održavanja helikoptera na visini te do bržeg povećanja brzine silaženja na 200-300 ft/min. Održavanje helikoptera u potrebnom pravcu također je otežano te je potrebno neposredno po uvođenju izvršiti oporavak kako ne bi došlo do potpunog formiranja stanja vrtložnog prstena. Helikopter je od trenutka uvođenja sve do trenutka vađenja iz preduvjeta vrtložnog prstena bio nestabilan i teže upravljiv.

Prilikom izvođenja manevra vrtložnog prstena s leđnim vjetrom uočena je nestabilnost helikoptera pri malom napredujućom brzinom. Prilikom vađenja iz preduvjeta helikopter ima smanjeni odziv na pomake komandi leta u odnosu na vađenje s čeonom komponentom vjetra,

također uočen je veći gubitak visine. Za iste uvjete uvođenja, no s čeonom komponentom vjetra, ukupni gubitak visine pomoću Vuichard metode je bio 90 stopa dok s leđnom komponentom vjetra, gubitak visine je bio čak 200 stopa. Provođenjem metode vađenja u naprijed, s čeonom komponentom vjetra zabilježen je gubitak visine od 180 stopa, dok s komponentom leđnog vjetra ta vrijednost raste do čak 300 stopa.

Tijekom razgovora s iskusnim pilotom zabilježeno je da pri potpunom formiranju vrtložnog prstena s leđnom komponentom vjetra dolazi do velike nestabilnosti letjelice oko sve tri osi, jakih vibracija i trešnje, helikopter postaje potpuno neupravljiv, brzine silaženja  $> 2000$  ft/min te dolazi do rotacije helikoptera oko vertikalne osi za  $180^\circ$ . Upravo je to razlog zašto je zabranjeno na ovom tipu letjelice potpuno uvođenje u režim vrtložnog prstena te nije bilo moguće izvršiti testiranje ovog slučaja za rad.

## 7. Zabilježene nesreće uzrokovane formiranjem vrtložnog prstena

Istraživanja pokazuju da je stanje vrtložnog prstena (VRS) faktor koji je doprinio brojnim helikopterskim nesrećama. Te su se nesreće često događale tijekom manevara koji su uključivali strma spuštanja blizu tla, gdje su se piloti suočavali s izazovima u pravovremenom identificiranju i oporavku od VRS-a.

### 7.1. Pad helikoptera Bell 407

U ovoj nesreći sudjelovao je helikopter Bell 407 državne policije Virginije koji se srušio tijekom nadzora skupa u Charlottesvilleu u Virginiji 12. kolovoza 2017. godine. Državni odbor za cestovnu sigurnost Sjedinjenih Američkih Država (engl. *National Transportation Safety Board - NTSB*) je utvrdio da je VRS doprinio nesreći, napominjući da helikopter nije uspio smanjiti brzinu spuštanja unatoč tome što je pilot povećavao snagu. Nažalost taj postupak je rezultirao fatalnim padom, a njegovi ostaci prikazani su na slici 10. Pilotov nedostatak obuke VRS-a naveden je kao faktor koji je doprinio nesreći. [11]



**Slika 10.** Ostaci helikoptera Bell 407

Izvor: [11]

### 7.2. Pad helikoptera Eurocopter EC130

Tijekom ove nesreće, pilot je pokušao strmo spuštanje s minimalnom brzinom, što je dovelo do gubitka uzgona i kontrole helikoptera. NTSB izvještava da se namjeravao spustiti na 75 stopa iznad vode strmom putanjom. Spuštajući se pod procijenjenim kutom od 25 stupnjeva i vertikalnom brzinom od 300 stopa u minuti, otkrio je da helikopter nastavlja snižavati visinu unatoč pokušajima pilota da stabilizira letjelicu povećavajući snagu. Povećanje kolektiva nije

zaustavilo pad, helikopter nije reagirao na pokušaje pilota da zaustavi spuštanje i nastavio je padati, udarivši u vodu. Nakon što je lopatica rotora udarila u vodu, izazvala je naglo skretanje u lijevo, što je dovelo do toga da je letjelica počela tonuti. Pilot i dva putnika su uspjeli izaći, ali četvrti nije preživio.

Istrage su pokazale da je helikopter bio ispod svoje maksimalne težine i da nije pokazao nikakve mehaničke kvarove motora i sustava prema podacima digitalne jedinice za upravljanje motorom i pregledima kontrolnog sustava. Unatoč optimalnim uvjetima i dovoljnoj snazi motora, nemogućnost helikoptera da generira uzgon dovela je do nastavka spuštanja, što ukazuje na stanje vrtložnog prstena kao vjerojatni uzrok nekontroliranog spuštanja. [12]

### 7.3. Pad helikoptera Bell 429

NTSB je pripisao kobni pad helikoptera Bell 429 pogreškama koje su napravili učenik i instruktor dok su uvježbavali manevar oporavka od stanja vrtložnog prstena (VRS). Agencija je utvrdila da je nesreću, koja se dogodila 26. travnja 2022. u Elbi, New York, uzrokovalo neprikladno rukovanje kontrolama leta tijekom VRS-a. Ovo loše upravljanje dovelo je do toga da lopatice glavnog rotora helikoptera udare u repnu granu, uzrokujući da se letjelica raspadne u zraku, a ostaci helikoptera su prikazani na slici 11. Instruktor letenja također je kritiziran jer nije adekvatno nadgledao manevar, posebno zbog prethodne vježbe gdje je isti učenik doživio pretjeranu brzinu silaženja koju nije ispravljao.

Podaci iz leta pokazuju da je helikopter bio unutar operativnih parametara VRS-a, spuštajući se brzinom od 800 do 1300 stopa u minuti. Kritični trenuci prije nesreće bili su obilježeni nepredvidivim kontrolama, uključujući niz grubih i velikih otklona ciklične i kolektivne palice u kombinaciji sa značajnim otklonom nožnih komandi što je dovelo do stradanja nastavnika i učenika letača. [13]



**Slika 11.** Pad helikoptera Bell 429

Izvor: [13]

## 8. Zaključak

Razumijevanje protoka zraka kroz disk rotora ključno je za prepoznavanje, sprječavanje i oporavak od stanja vrtložnog prstena. Piloti moraju biti svjesni interakcije zraka s diskom rotora pod različitim uvjetima, posebno u operacijama koje uključuju brza spuštanja. Učinkovita obuka i svijest mogu značajno ublažiti rizike povezane s ovim složenim aerodinamičkim fenomenom. Proučavanjem stanja vrtložnog prstena i njegovih utjecaja na aerodinamiku protoka zraka kroz disk rotora, piloti helikoptera mogu se bolje pripremiti za rješavanje ove izazovne situacije, čime se povećava sigurnost leta i operativna učinkovitost

Izbor između metoda može ovisiti o pilotovoj obuci, iskustvu i specifičnim uvjetima leta. Unatoč tome što korištenje metode vađenja u naprijed, tj. Vuichard metode omogućuje najmanji gubitak visine tijekom oporavka, ako dođe do potpune formacije vrtložnog prstena ova metoda može biti pogubna za posadu. Tijekom potpunog formiranja dolazi do naglog smanjenja visine, rotor više ne može proizvesti dovoljan uzgon, a korištenje metode u stranu zahtjeva pomak ciklične palice u stranu uz podizanje snage što bi moglo samo pojačati strujanje zraka kroz rotor u režimu vrtložnog prstena. Stoga posada mora razlikovati kontrolu nad helikopteru prije razvitka vrtložnog prstena i nakon.

Pri uočavanju predznaka vrtložnog prstena, pilot može uz minimalan gubitak visine spriječiti nastanak istog. U ovom istraživanju dokazano je da unatoč tome što je metoda vađenja u naprijed najpoznatija u svijetu zrakoplovstva, metoda vađenja u stranu se pokazala najučinkovitijom što se tiče manjeg gubitka visine. No ako posada zakasni sa zamjećivanjem predznaka, vađenje u stranu uz povećanje snage može u tom trenutku biti ugrožavajući faktor. Stoga se u slučajevima kada se helikopter nalazi neposredno pred potpunim formiranim vrtložnim prstenom pri manjoj visini korištenje opcije vađenja u naprijed čini poput jedine opcije. Jednostavno potiskivanje ciklične palice u naprijed kako bi se povećala brzina kretanja helikoptera naprijed i time uspostavilo normalno strujanje zraka kroz lopatice rotora.

Ako dođe do potpunog razvitka vrtložnog prstena, najbrže i najsigurnije rješenje bilo bi uvođenje u režim autorotacije. Tijekom toga strujanje zraka kroz rotor u režimu vrtložnog prstena ne pogoni motor, nego povučen gravitacijom dolazi do spuštanja helikoptera pri čemu nadolazeća struja zraka odozdol pogoni rotor i učinkovito uspostavlja drugi režim strujanja zraka. Po uočavanju da je uspostavljen režim autorotacije, pilot može započeti s povećanjem snage i uspostaviti penjanje ili režim horizontalnog leta.

Upravo uvježbavanje ovog manevra omogućuje pilotima uvid u odziv njihove letjelice tijekom formiranja ovog fenomena. Važno je isprobavati različite slučajeve tijekom uvođenja u

manevar kako bi povećali svjesnost i smanjili mogućnost nenamjernog ulaska u vrtložni prsten. Iako je protiv instinkta, spuštanje kolektivne palice tijekom nekontroliranog spuštanja pri potpuno formiranom režimu vrtložnog prstena učinkovito uspostavlja kontrolu nad upravljanjem helikopterom.

## Literatura

- [1] J. G. Leishman, *Principles of Helicopter Aerodynamics*, 2 ur., New York: Cambridge University Press, 2006.
- [2] T. R. Doris Novak, *Teorija leta helikoptera*, Zagreb, 2012.
- [3] W. Wagtendonk, *Principles of helicopter flight*, 2. ur., Aviation Supplies & Academics.
- [4] T. Tucker, *Rotor & Wing*, 2015.
- [5] »Pilot teacher,« [Mrežno]. Available: <https://pilotteacher.com/how-does-wind-effect-a-helicopter-pilot-tells-all/>. [Pokušaj pristupa 16 travanj 2024].
- [6] »skybrary,« [Mrežno]. Available: <https://skybrary.aero/articles/vortex-ring>. [Pokušaj pristupa 15 travanj 2024].
- [7] I. J. Twombly, »AOPA,« 2018. [Mrežno]. Available: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2018/february/flight-training-magazine/advanced-pilot-helicopter>. [Pokušaj pristupa 21 ožujak 2024].
- [8] M. Mikić, *Priručnik za uporabu helikoptera Bell 206B 3*, Zadar, 2018.
- [9] K. Kraljić, *Tehnika pilotiranja i raspored pažnje*, Zadar, 2008.
- [10] HRZ, *Program letačke izobrazbe učenika-letača na helikopteru BELL-206B*, Zadar, 2021.
- [11] »Aerossurance,« 2020. [Mrežno]. Available: <https://aerossurance.com/helicopters/vrs-virginia-state-police-b407/>. [Pokušaj pristupa 20 4 2024].
- [12] R. McSpadden, »AOPA,« 2023. [Mrežno]. Available: <https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2023/september/pilot/what-went-wrong-in-the-vortex>. [Pokušaj pristupa 20 4 2024].
- [13] M. Huber, »Ainonline,« 2023. [Mrežno]. Available: <https://www.ainonline.com/aviation-news/business-aviation/2023-12-20/vortex-ring-drill-triggered-bell-429-flight-break>. [Pokušaj pristupa 20 4 2024].



## Popis slika

<b>Slika 1.</b> Strujanje zraka kroz disk rotora pri različitim režimima leta .....	4
<b>Slika 2.</b> Raspored tangencijalne brzine struje zraka .....	5
<b>Slika 3.</b> Razlike u brzinama optjecanja nosećeg rotora .....	6
<b>Slika 4.</b> Prikaz relativne brzine duž lopatice rotora .....	8
<b>Slika 5.</b> Prikaz strujanja zraka kroz disk rotora prije formiranja vrtložnog prstena .....	9
<b>Slika 6.</b> Prikaz formiranog vrtložnog prstena .....	10
<b>Slika 7.</b> Aeroprofil lopatice rotora na vrhu i korijenu .....	10
<b>Slika 8.</b> Helikopter Bell 206B .....	14
<b>Slika 9.</b> Dimenzije helikoptera .....	15
<b>Slika 10.</b> Ostaci helikoptera Bell 407 .....	29
<b>Slika 11.</b> Pad helikoptera Bell 429 .....	31

## Popis grafikona

<b>Graf 1.</b> Odnos brzine i visine leta pri uvođenju u vrtložni prsten .....	20
<b>Graf 2.</b> Usporedba metode vađenja u naprijed i u stranu .....	20
<b>Graf 3.</b> Odnos brzine i visine leta pri uvođenju u vrtložni prsten .....	21
<b>Graf 4.</b> Usporedba metode vađenja u naprijed i u stranu .....	22
<b>Graf 5.</b> Usporedba metode vađenja u naprijed i u stranu .....	23
<b>Graf 6.</b> Usporedba metode vađenja u naprijed i u stranu .....	24
<b>Graf 7.</b> Odnos brzine i visine leta pri uvođenju u vrtložni prsten .....	25
<b>Graf 8.</b> Usporedba metode vađenja u naprijed i u stranu .....	26

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet prometnih znanosti  
Vukelićeva 4, 10000 Zagreb

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI I SUGLASNOSTI

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

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

Svojim potpisom potvrđujem i dajem suglasnost za javnu objavu završnog/diplomskog rada pod naslovom \_\_\_\_\_ "Određivanje utjecaja pojave vrtložnog prstena na let helikoptera Bell 206B" \_\_\_\_\_, u Nacionalni repozitorij završnih i diplomskih radova ZIR.

Student/ica:

U Zagrebu, \_\_ 6.5.2024. \_\_

*Dabic'*

(ime i prezime, potpis)