

# Analiza opterećenja pilota modernog borbenog zrakoplova temeljem eksperimenta na simulatoru leta

---

**Kurtak, Matej**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:100048>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-04**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

## DIPLOMSKI RAD

Matej Kurtak

ZAGREB, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

## DIPLOMSKI RAD

ANALIZA OPTEREĆENJA PILOTA MODERNOG BORBENOG ZRAKOPLOVA  
TEMELJEM EKSPERIMENTA NA SIMULATORU LETA

Mentor:  
prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

Student:  
Matej Kurtak

ZAGREB, 2023.

*Zahvaljujem svom mentoru, prof. dr. sc. Milanu Vrdoljaku na pomoći, savjetima i podršci tijekom studiranja i pisanja diplomskog rada.*

*Zahvaljujem asistentu Marijanu Andriću na pomoći u pripremi eksperimenta.*

*Zahvaljujem prof. dr. sc. Krešimiru Čosiću i prof. dr. sc. Siniši Popoviću na ustupanju mjerne opreme i savjetovanju tijekom pisanja rada.*

*Zahvaljujem Mati Gambiraži i Ivani Starčević Ratković na pomoći pri provedbi eksperimenta i analizi podataka.*

*Zahvaljujem svim kandidatima na sudjelovanju u eksperimentu.*

*Zahvaljujem svojoj obitelji na podršci i motivaciji tijekom cijelog školovanja.*

## **Izjava**

Izjavljujem da sam ovaj rad radio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zagreb, srpanj 2023.

Matej Kurtak



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Matej Kurtak**

JMBAG: 0035220293

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza opterećenja pilota modernog borbenog zrakoplova temeljem eksperimenta na simulatoru leta**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Pilot workload analysis for modern fighter aircraft from the flight simulator experiment**

Opis zadatka:

Moderni borbeni zrakoplovi četvrte i novije generacije imaju tendenciju rasterećenja pilota direktnog upravljanja, ali istovremeno dodavanja zadaća vezanih za relevantni tip misije, što može uključiti elemente poput adaptivne pripreme leta i borbenog djelovanja, izviđanja, elektroničkog ratovanja te upravljanja timom letjelica s ljudskim posadama, kao i letjelicama bez ljudske posade. Slijedom navedenog borbeni zrakoplovi budućnosti bit će opremljeni sustavom za praćenje stanja posade (engl. *Crew Monitoring System*, CMS) koji će povećati sigurnost leta, poboljšati situacijsku svjesnost i pružiti posadi uvid u kognitivne resurse u stvarnom vremenu.

Analiza opterećenja pilota uobičajeno se provodi u zadaćama direktnog upravljanja i to subjektivnom i objektivnom analizom. Subjektivne analize temelje se na anketama pilota nakon eksperimenta. Objektivna analiza na simulatoru omogućena je snimkom relevantnih veličina za odabranu metriku poput npr. odstupanja promatrane varijable leta od zadane vrijednosti ili evaluacije upravljačkih signala pilota. Dodatne analize predstavljale bi uključivanje mjerenje psiho-fizioloških značajki tijekom eksperimenta, poput otkucaja srca, znojenja, praćenja očiju te aktivnosti mozga. Sve navedene analize mogu se koristiti pri evaluaciji pilota za potrebe selekcije, ali i za potrebe kontinuiranog praćenja performansi pilota.

Diplomski rad treba obuhvatiti pripremu i provedbu eksperimenta na postojećoj simulacijskoj platformi za analizu opterećenja pilota modernog borbenog zrakoplova. Konkretno u diplomskom radu potrebno je:

- prilagoditi sve značajke letjelice i pripremiti model leta modernog borbenog zrakoplova za simulaciju u stvarnom vremenu s pilotom u petlji;
- za potrebu provedbe eksperimenta na simulatoru s pilotom u petlji prilagoditi simulacijsku platformu uključujući relevantan prikaz instrumenata;
- osmisliti scenarije s kombinacijom pilotskih zadaća direktnog upravljanja i kognitivnih zadaća relevantne misije modernog borbenog zrakoplova za eksperimente na simulatoru;
- pripremiti i provesti analizu objektivnih parametara tijekom eksperimenta, kao i subjektivnu analizu opterećenja pilota;
- usporedbom rezultata eksperimenta provesti evaluaciju pilota.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

4. svibnja 2023.

6. srpnja 2023.

17. – 21. srpnja 2023.

Zadatak zadan:

Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Milan Vrdoljak

# Sadržaj

Sadržaj	v
Popis slika	vii
Popis tablica	ix
Popis oznaka	x
Sažetak	xi
Summary	xii
<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2. Opterećenje pilota u modernim borbenim zrakoplovima</b>	<b>3</b>
2.1. Razvoj modernih borbenih zrakoplova . . . . .	6
2.2. Sustav za praćenje stanja posade (CMS) . . . . .	8
<b>3. Simulator leta</b>	<b>10</b>
3.1. Vizualizacija leta . . . . .	11
3.2. Modelirani poremećaji . . . . .	13
3.3. Prikaz instrumenata . . . . .	15
3.4. Model zrakoplova . . . . .	16

<b>4. Opis eksperimenta</b>	<b>18</b>
4.1. Opis zadataka . . . . .	18
4.2. Pregled kandidata . . . . .	21
4.3. Mjerna oprema . . . . .	23
4.4. Subjektivna analiza opterećenja . . . . .	25
4.5. Objektivna analiza opterećenja . . . . .	27
<b>5. Rezultati</b>	<b>30</b>
5.1. Objektivna analiza rezultata . . . . .	30
5.1.1. Analiza zadatka s iznenadnim poremećajem . . . . .	36
5.1.2. Analiza zadatka bez iznenadnog poremećaja . . . . .	44
5.2. Subjektivna analiza rezultata . . . . .	51
5.3. Analiza fizioloških podataka . . . . .	59
<b>6. Zaključak</b>	<b>63</b>
<b>A. Prilog 1</b>	<b>67</b>
<b>B. Prilog 2</b>	<b>70</b>
<b>C. Prilog 3</b>	<b>72</b>
<b>Literatura</b>	<b>74</b>



# Popis slika

2.1	Prototipni CMS razvijen u sklopu projekta PEGGASUS, slika preuzeta s: <a href="https://www.geogaze.org/peggasus/">https://www.geogaze.org/peggasus/</a> . . . . .	9
3.1	Simulator . . . . .	11
3.2	Blok za slanje podataka za vizualizaciju leta . . . . .	12
3.3	Blokovi za slanje kutova stava zrakoplova . . . . .	13
3.4	Blok za definiranje brzine vjetra . . . . .	14
3.5	Funkcija brzine vjetra . . . . .	14
3.6	Instrumenti korišteni u eksperimentu . . . . .	16
3.7	Dassault Rafale, slika preuzeta s: <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Dassault_Rafale">https://en.wikipedia.org/wiki/Dassault_Rafale</a> . . . . .	17
4.1	Prisilni signal . . . . .	20
4.2	Uređaj za prikupljanje fizioloških podataka Biopac MP150 . . . . .	24
4.3	Kamera i zaslon tijekom n-back zadatka . . . . .	25
4.4	Cooper-Harper ljestvica za ocjenu upravljivosti [1] . . . . .	27
4.5	Prisilni $\Theta_p$ (crvena linija) i ostvareni signal kuta propinjanja $\Theta$ (plava linija) i njihova razlika $e$ . . . . .	28
5.1	Ostvarene varijance pogreške po zadatku za sve kandidate . . . . .	31
5.2	Varijance pogreške kandidata po svakom zadatku . . . . .	32
5.3	Broj ekstrema u signalu otklona palice za pojedini zadatak po kandidatu . . . . .	33
5.4	Varijanca broja ekstrema u signalu otklona palice po zadatku . . . . .	34

5.5	Raspon ostvarenih kutova propinjanja za drugi zadatak . . . . .	35
5.6	Raspon ostvarenih kutova propinjanja za treći zadatak . . . . .	36
5.7	Prisilni (crvena linija) i ostvareni signal kuta propinjanja (plava linija), brzina i promjena visine za drugi zadatak K9 . . . . .	37
5.8	Kutna brzina propinjanja i napadni kut za drugi zadatak K9 . . . . .	38
5.9	Otklon upravljačke palice za drugi zadatak K9 . . . . .	39
5.10	Brzina otklona upravljačke palice za drugi zadatak K9 . . . . .	40
5.11	Prisilni (crvena linija) i ostvareni signal kuta propinjanja (plava linija), brzina i promjena visine za drugi zadatak K14 . . . . .	41
5.12	Kutna brzina propinjanja i napadni kut za drugi zadatak K14 . . . . .	42
5.13	Otklon upravljačke palice za drugi zadatak K14 . . . . .	43
5.14	Brzina otklona upravljačke palice za drugi zadatak K14 . . . . .	44
5.15	Kut propinjanja, brzina i promjena visine za treći zadatak K9 . . . . .	45
5.16	Otklon upravljačke palice za treći zadatak K9 . . . . .	46
5.17	Brzina otklona upravljačke palice za treći zadatak K9 . . . . .	47
5.18	Kut propinjanja, brzina i promjena visine za treći zadatak K14 . . . . .	48
5.19	Otklon upravljačke palice za treći zadatak K14 . . . . .	49
5.20	Brzina otklona upravljačke palice za treći zadatak K14 . . . . .	50
5.21	Odgovori na NASA-TLX upitnik za prvi zadatak . . . . .	52
5.22	Odgovori na NASA-TLX upitnik za drugi zadatak . . . . .	53
5.23	Odgovori na NASA-TLX upitnik za treći zadatak . . . . .	54
5.24	Ocjene upravljivosti po ljestvici Cooper-Harper za svaki zadatak . . . . .	55
5.25	Usporedba ocjena upravljivosti po ljestvici Cooper-Harper i relativne va- rijance pogreške za svakog kandidata . . . . .	56
5.26	Usporedba iskustva na zrakoplovu i relativne varijance pogreške . . . . .	57
5.27	Usporedba ocjene ostvarenih performansi i relativne varijance pogreške . . . . .	58
5.28	Usporedba brzine otkucaja srca (BPM) za drugi zadatak K1, K9 i K14 . . . . .	59
5.29	Usporedba brzine otkucaja srca (BPM) za treći zadatak K1, K9 i K14 . . . . .	60
5.30	Usporedba intenziteta disanja K1 za sva tri zadatka . . . . .	61
5.31	Usporedba električne vodljivosti kože K1 za sva tri zadatka . . . . .	62

# Popis tablica

4.1 Podaci o kandidatima . . . . .	22
------------------------------------	----

# Popis oznaka

$A_k$	amplitude prisilnog signala, [deg] . . . . .	19
$e$	razlika prisilnog i ostvarenog signala kuta propinjanja, [deg] . . . . .	27
$N$	broj uzoraka u signalu pogreške, [-] . . . . .	27
$V_e$	varijanca razlike prisilnog i ostvarenog signala kuta propinjanja, [deg <sup>2</sup> ] . . . . .	27
$\phi_k$	fazni pomaci prisilnog signala, [deg] . . . . .	19
$\mu$	srednja vrijednost pogreške, [deg] . . . . .	27
$\omega_k$	frekvencije prisilnog signala, [deg/s] . . . . .	19
$\Theta$	ostvoreni kut propinjanja, [deg] . . . . .	28
$\Theta_i$	prisilni signal kuta propinjanja bez trima, [deg] . . . . .	19
$\Theta_p$	prisilni signal kuta propinjanja, [deg] . . . . .	19
$\Theta_{trim}$	kut trima prisilnog signala kuta propinjanja, [deg] . . . . .	19

# Sažetak

U ovom diplomskom radu proveden je eksperiment za analizu opterećenja pilota na simulatoru leta. Za simulaciju u stvarnom vremenu s pilotom u petlji korišten je model leta borbenog zrakoplova, nalik na Dassault Rafale. Postojeća simulacijska platforma nadograđena je novim programskim paketima za vizualizaciju i prikaz instrumenata. Za provedbu eksperimenta osmišljena su tri zadatka praćenja prisilnog signala kuta propinjanja. U prvom i trećem zadatku zadaća kandidata bila je praćenje kuta propinjanja bez poremećaja, dok su u drugom zadatku uvedeni poremećaji u obliku leđnog i čeonog vjetra. Nakon zadataka na simulatoru proveden je generički n-back zadatak za procjenu radne memorije kandidata. Tijekom eksperimenta snimani su fiziološki parametri kandidata koji uključuju brzinu otkucaja srca, vodljivost kože i intenzitet disanja. Praćena je i usmjerenost pogleda svakog kandidata. Prikupljeni su podaci o letovima svih kandidata i njihovi odgovori na NASA-TLX upitnik i Cooper-Harper ljestvicu za ocjenu upravljivosti. Na temelju tih podataka provedena je objektivna i subjektivna procjena opterećenja i učinka pilota. Na kraju je prikazan dio prikupljenih fizioloških podataka.

**Ključne riječi:** opterećenje pilota, simulator leta, moderni borbeni zrakoplov, zadaća praćenja kuta propinjanja, brzina otkucaja srca, vodljivost kože, intenzitet disanja

# Summary

In this master's thesis an experiment was conducted to analyze the pilot's workload in a flight simulator environment. A model of a fighter aircraft, similar to the Dassault Rafale, was used for real-time simulation with the pilot in the loop. The existing simulation platform was upgraded with new software packages for visualization and instrument display. Three tasks were designed to track the imposed pitch angle signal during the experiment. In the first and third task, the candidates were required to track the pitch angle without disturbances, while the second task introduced disturbances in the form of tail and headwinds. After the simulator tasks, a generic n-back task was performed to assess the candidates' working memory. Physiological parameters, including heart rate, skin conductance and respiration rate were recorded during the experiment. Gaze direction of each participant was also tracked. Flight data of all participants, along with their responses to the NASA-TLX questionnaire and the Cooper-Harper rating scale for maneuverability assessment, were collected. Based on these data, an objective and subjective evaluation of pilot workload and performance was conducted. Finally, part of the collected physiological data is shown.

**Keywords:** pilot workload, flight simulator, modern fighter aircraft, pitch tracking task, heart rate, skin conductance, respiration rate

# 1 | Uvod

Moderni borbeni zrakoplovi složeni su sustavi koji zahtijevaju visoko obučene pilote za izvršavanje različitih misija u zahtjevnim okruženjima. Suvremeni borbeni zrakoplovi četvrte i novije generacije rasterećuju pilota zadaće direktnog upravljanja, ali istovremeno uvode nove zadatke koji su povezani s relevantnim tipom misije. Ti zadaci uključuju elemente poput borbenog djelovanja, izviđanja, elektroničkog ratovanja te upravljanja timom letjelica s ljudskim posadama, kao i letjelicama bez ljudske posade. S tim novim izazovima pojavljuje se potreba za analizom opterećenja pilota kako bi se osigurala sigurnost leta, poboljšala situacijska svjesnost i posadi pružio uvid u kognitivne resurse u stvarnom vremenu. Jedan od načina za provođenje takve analize je kroz sustav praćenja stanja posade (engl. Crew Monitoring System, CMS), koji omogućuje kontinuirano praćenje stanja i performansi pilota tijekom leta.

Cilj ovog diplomskog rada provedba je analize opterećenja pilota modernog borbenog zrakoplova temeljem eksperimenta na simulatoru leta. Kroz subjektivne i objektivne analize, kao i mjerenje psiho-fizioloških značajki tijekom eksperimenta, bit će istraženi različiti aspekti opterećenja pilota te procijenjene njihove performanse i reakcije u specifičnim scenarijima. U drugom poglavlju opisan je razvoj modernih borbenih zrakoplova, opterećenje pilota u tim letjelicama i uloga CMS-a u analizi opterećenja pilota. U trećem poglavlju detaljno je opisana priprema eksperimentalnog simulatora leta, a u četvrtom definiranje zadataka te metode subjektivne, objektivne i fiziološke analize. Kombinacija subjektivnih anketa pilota, objektivne analize na simulatoru leta i mjerenje fizioloških značajki tijekom eksperimenta omogućit će sveobuhvatan uvid u opterećenje

pilota i njihove reakcije. Analiza objektivnih i subjektivnih rezultata, zajedno s prikazom fizioloških podataka, provedena je u petom poglavlju. U okviru ovog rada neće biti provedena detaljna analiza svih prikupljenih fizioloških podataka. Na kraju je iznesen zaključak sa smjericama za budući rad.

Kroz ovaj diplomski rad cilj je pružiti korisne uvide u opterećenje pilota modernih borbenih zrakoplova te identificirati ključne čimbenike koji utječu na njihove performanse. Ovi rezultati mogu imati važne implikacije za dizajn budućih borbenih zrakoplova, obuku pilota i kontinuirano praćenje njihovih performansi.



## 2 Opterećenje pilota u modernim borbenim zrakoplovima

Borbeni zrakoplovi četvrte i novije generacije u odnosu na svoje prethodnike donose brojne tehničke i operativne inovacije. Jedna od glavnih značajki modernih borbenih zrakoplova je rasterećenje pilota direktnog upravljanja. Zrakoplovi prethodnih generacija zahtijevali su veći fizički i kognitivni napor pri upravljanju, dok su moderni zrakoplovi opremljeni sustavima koji pilotu znatno olakšavaju upravljanje. Razvoj takvih sustava omogućuje pilotu da se usredotoči na druge složene zadatke, kao što su upravljanje s više sustava i višenamjenskih zaslona, analiza velike količine podataka u stvarnom vremenu, upravljanje timom letjelica s ljudskom posadom ili bez posade.

Fizičko opterećenje pilota primarno podrazumijeva opterećenje pri manevriranju i opterećenje pri upravljanju zrakoplova. Dok je u modernim borbenim zrakoplovima fizičko opterećenje pri upravljanju svedeno na minimum, određeni manevri poput oštrog zaokreta, naglog penjanja ili spuštanja mogu za pilota biti vrlo zahtjevni. Vertikalno ubrzanje kod takvog gibanja utječe na promjenu krvnog tlaka duž tijela koja ograničava maksimalno ubrzanje koje pilot može izdržati. Približavanjem toj granici pilot postepeno gubi vid (*blackout*) i gubi svijest (G-LOC). Iako su moderni borbeni zrakoplovi opremljeni odijelima koja pomažu pilotu da u takvim situacijama ostvari prokrvljenost u ključnim organima i postoje obuke koje pripremaju pilota za takve situacije, fizičko opterećenje još uvijek je ključan čimbenik u ukupnom opterećenju pilota u modernim borbenim zrakoplovima. [2]

Kognitivno opterećenje odnosi se na pilotovu mogućnost obrade informacija, brzog donošenja odluka, situacijske svjesnosti i upravljanja radnim opterećenjem. Razvojem borbenih zrakoplova količina informacija koje pilot tijekom leta ima na raspolaganju značajno se povećala. Te informacije uključuju podatke sa senzora, planove misija, komunikaciju sa zemaljskom stanicom ili drugom posadom, upozorenja i slično. Sve te informacije pilot mora brzo i točno obraditi kako bi mogao donijeti odluke o daljnjem izvršavanju misije. Pri donošenju odluke pilot mora u obzir uzeti trenutnu situaciju u kojoj se nalazi i rizike koje odluka donosi pa je ključna komponenta u tom procesu i situacijska svjesnost. Po definiciji situacijska svjesnost je „opažanje elemenata u okolini, shvaćanje njihovih značenja i njihova projekcija u bliskoj budućnosti“. U kontekstu pilota borbenog zrakoplova ona podrazumijeva poznavanje položaja zrakoplova, njegove okoline i potencijalnih opasnosti u svakom trenutku. Održavanje situacijske svjesnosti na visokoj razini tijekom misije jedna je od najzahtjevnijih pilotovih zadaća. Većina nesreća u vojnom zrakoplovstvu 20. stoljeća uzrokovana je smanjenom situacijskom svjesnošću. Naposljetku, efikasno upravljanje radnim opterećenjem predstavlja bitnu stavku u cjelokupnom kognitivnom opterećenju jer sprječava kognitivno preopterećenje pilota. Do preopterećenja dolazi kada je pilot odjednom izložen prevelikoj količini informacija, zahtjevnim zadaćama ili vremenskom pritisku. Moguće posljedice su smanjena situacijska svjesnost, smanjena sposobnost donošenja odluka i povećana opasnost od pogrešaka.

Postoji nekoliko pristupa u smanjenju kognitivnog opterećenja pilota. Intuitivnim dizajnom sučelja kojim pilot i računalo komuniciraju moguće je smanjiti opterećenje i osigurati veći protok informacija na način koji je pilotu lakše razumljiv. [3] Računalni sustavi u modernim zrakoplovima imaju mogućnost sinteze informacija i selektivnog prikazivanja samo onih podataka za koje računalo u određenom trenutku smatra da su posadi nužne. [4] Na taj se način pilota ne opterećuje informacijama koje ne pridonose obavljanju njegove trenutne zadaće, za razliku od zrakoplova prethodnih generacija u kojima je pilot prvo sam morao odlučiti koje su mu informacije potrebne te ih očitati s više odgovarajućih instrumenata. Sve naprednija automatizacija također ima ključnu ulogu u smanjenju kognitivnog opterećenja, od jednostavnih zadaća poput održavanja pravca ili visine leta do donošenja određenih odluka tijekom leta. Obuka pilota također je jedan od načina na koji pilot može razviti svoje fizičke i kognitivne sposobnosti, pri-

marno situacijsku svjesnost na osobnoj razini ili u slučaju timske obuke, na razini cijele posade. [5]

Ubrzanim razvojem proteklih desetljeća, računalni simulatori leta stekli su veliku ulogu u obuci i ispitivanju pilota. Obuka na simulatoru značajno je jeftinija od obuke na pravim zrakoplovima jer ne postoje troškovi goriva i održavanja. Simulatori pružaju sigurno okruženje u kojem piloti mogu vježbati zahtjevne manevri i odrađivati misije bez rizika koji dolaze s letom u pravom zrakoplovu. Dodatna prednost je laka izrada i ponovljivost scenarija stvarnih misija pomoću brojnih softverskih paketa za planiranje misija i vizualizaciju leta. U takvom okruženju pilot se može bezopasnije upoznati s instrumentima, sustavima i upravljanjem zrakoplova, a moguća je i obuka usredotočena na pojedini sustav ili instrument koja bi u stvarnom letu bila teško izvediva. Obukom na simulatoru pilot dobiva iskustvo leta slično onom na pravom zrakoplovu, ali ono je još uvijek samo dopuna obuci na stvarnom zrakoplovu. Let u zrakoplovu pruža određena iskustva koja je nemoguće prenijeti u simulatorsko okruženje, poput stvarne dinamike, opterećenja na osjetila i osjećaja leta u stvarnom zrakoplovu. Iako današnji dinamički modeli vrlo dobro opisuju dinamiku letjelice i postoje simulatori koji mogu replicirati gibanje zrakoplova, stvarna dinamika pruža nepredvidljivost koja je značajka stvarnog leta, poput turbulencije. Na simulatoru također nije moguće točno replicirati vibracije i ubrzanje do kojeg dolazi pri manevrima u stvarnom letu. Naposljetku, obuka na simulatoru pilotu ne pruža osjećaj leta u stvarnom zrakoplovu koji, zbog svoje zahtjevnosti i opasnosti, izaziva veće kognitivno opterećenje. Iako obuka na simulatoru i obuka na stvarnom zrakoplovu ima svoje prednosti i nedostatke, bitno je naglasiti da su oba pristupa neophodna u kvalitetnoj obuci pilota modernih borbenih zrakoplova.

## 2.1. Razvoj modernih borbenih zrakoplova

Završetkom Drugog svjetskog rata počinje ubrzani razvoj mlaznih borbenih zrakoplova i dolazi do pojave nadzvučnih lovaca. Razvojem tehnologije mijenjaju se sposobnosti zrakoplova i vrste misija za koje se koriste, pa tako i radno opterećenje na pilota. Tijekom II. svjetskog rata borbeni zrakoplovi primarno su bili korišteni za zračnu borbu i uništavanje zemaljskih meta. Zrakoplovi iz tog razdoblja imali su analognu instrumentaciju i bili su mehanički upravljani, što je od pilota u određenim situacijama zahtijevalo značajan napor i općenito veliku vještinu letenja. Radno opterećenje bilo je vrlo visoko jer su piloti morali ručno upravljati sustavima i instrumentima za vrijeme zračnih borbi. Neke od zadaća bile su upravljanje radom motora i odabir smjese zraka i goriva, zahtjevna navigacija i raspored goriva u odgovarajuće spremnike. Razvojem mlaznog motora u narednim godinama pojavljuju se brži lovci, primjerice North American F-86 i MiG-15, s većom manevarskom sposobnošću. Novi zrakoplovi došli su s većim brojem kompleksnijih sustava, avionikom i naoružanjem, a kokpiti su imali veći broj instrumenata i došlo je do pojave prvih zaslona. Dok je količina informacija koje je pilot morao obraditi rasla u odnosu na prethodnu generaciju zrakoplova, automatizacija u ovom periodu još nije uzela maha pa je i radno opterećenje pilota bilo još veće. Sljedeća generacija zrakoplova, iz 1980.-ih i 1990.-ih, revolucionizirala je dizajn borbenih zrakoplova uvođenjem *fly-by-wire* sustava koji je zamijenio mehaničko upravljanje elektroničkim, donoseći brojne prednosti kao što su poboljšana sposobnost manevriranja, veća stabilnost i viši stupanj automatizacije. Zrakoplovi iz ovog perioda uključuju Dassault Mirage 2000 i Eurofighter Typhoon. Kokpiti su značajno preuređeni uvođenjem elektroničkih višefunkcionalnih zaslona i rasporedom elemenata po ergonomskim načelima. Povećana je količina informacija i prikazana je na intuitivniji način, a istovremeno smanjena pretrpanost analognim instrumentima. Ova su unaprjeđenja konačno smanjila radno opterećenje koje je pilot imao u smislu samog leta i upravljanja letjelice, poboljšala situacijsku svjesnost posade i otvorila mogućnost da se posada usredotoči na kompleksnije zadatke tijekom leta kao što su daljnje planiranje misije ili upravljanje navođenim naoružanjem. Najnovija generacija borbenih zrakoplova, čiji je razvoj započeo početkom ovog stoljeća, primarno se odlikuje stealth tehnologijom i umreženim ratovanjem. Predstavnici ove generacije su Lockheed Martin F-22 i F-35. Stalna umreženost zrakoplova s drugim letjelicama i zemaljskim stanicama pruža pilotu

veliki protok informacija koji nastoji još više poboljšati situacijsku svjesnost posade i olakšati donošenje presudnih odluka. Takvi napredni sustavi komunikacije omogućuju bolju raspodjelu dužnosti i lakšu suradnju na bojištu. Pokazuje se da se tehnološkim razvojem uloga posade u zrakoplovu bitno mijenja. U početcima je najzahtjevnija zadaća bila samo upravljanje zrakoplovom, dok je danas automatizacija dovela do toga da posada može takvim jednostavnijim zadaćama posvetiti minimalnu pažnju i usredotočiti se na planiranje i donošenje odluka, što je nova vrsta radnog opterećenja. Buduća generacija borbenih zrakoplova opširnijom automatizacijom otvorit će mogućnost korištenja zrakoplova s ljudskom posadom ili bez nje. Zrakoplove će biti moguće upravljati konvencionalno s posadom ili sa zemlje ili iz druge letjelice u konfiguraciji bez posade. Maksimalno opterećenje koje letjelica može izdržati primarno je ograničeno ljudskim faktorom, stoga će bespilotne letjelice imati bitnu ulogu u modernom ratovanju. Novi sustavi olakšat će ljudskoj posadi upravljanje višestrukim bespilotnim letjelicama na bojištu (engl. *manned-unmanned teaming*). [6]

## 2.2. Sustav za praćenje stanja posade (CMS)

U kontekstu razvoja borbenog zrakoplova nove generacije, pojavljuje se koncept praćenja i upravljanja radnim opterećenjem posade. CMS (engl. *Crew Monitoring System*) sustav je za nadgledanje fiziološkog i kognitivnog stanja posade u stvarnom vremenu. Takav sustav može pomoći pri procjeni radnog opterećenja, analizi raspoloživih kognitivnih resursa, pa čak i procjeni trenutne situacijske svjesnosti posade i naknadnoj analizi performansi. Praćenjem fizioloških parametara kao što su brzina otkucaja srca, disanje, praćenje oka i aktivnost mozga sustav može procijeniti radno opterećenje posade u određenom trenutku. Promatranjem aktivnosti mozga moguće je procijeniti kognitivno stanje određenog člana posade, koja mogu uključivati umor, stres ili kognitivno preopterećenje. Na temelju podataka o praćenju oka i usmjerenosti vizualne pozornosti posade CMS može dati procjenu trenutne razine situacijske svjesnosti i izdati upozorenja ukoliko je ona bitno narušena. Snimanjem podataka prikupljenih tijekom leta i podaci s CMS-a mogu se dovesti u korelaciju s objektivnim i subjektivnim mjerenjima performansi na simulatoru ili u pravom zrakoplovu. Usporedbom mjerenja moguće je uspostaviti vezu između opterećenja i ostvarenih performansi pilota. S tim saznanjima dalje je moguće optimirati program obuke koji će pilote bolje pripremiti za situacije u kojima su pokazali lošije performanse, čak ga i individualno prilagoditi potrebama pojedinog pilota.

Uz CMS za zrakoplove buduće generacije razvija se i kognitivni asistent, napredni sustav koji glasovnom interakcijom pomaže posadi u izvršavanju zadaća tijekom leta. Cilj takvog sustava je poboljšati performanse posade, smanjiti pogreške i povećati sigurnost. Kognitivni asistent prikuplja podatke iz velikog broja izvora i posadi može pružiti razumljivu procjenu situacije u stvarnom vremenu, pomoći u donošenju odluka i automatizirati izvršavanje određenih zadaća prema naredbama posade. Razvojem umjetne inteligencije, analize velike količine podataka i naprednih algoritama kognitivni asistent dobiva i prediktivnu funkciju te time dodatno unaprjeđuje situacijsku svjesnost posade. Jedan od izvora iz kojih kognitivni asistent preuzima podatke je i CMS. Analizom tih podataka može posadi predložiti načine kako da smanje radno opterećenje, izdati upozorenja ukoliko dođe do fizioloških problema i stvoriti individualizirani program obuke.

Iako CMS i kognitivni asistenti još nisu doživjeli komercijalnu upotrebu, trenutno su u razvoju za upotrebu u borbenim zrakoplovima buduće generacije. Provedena su značajna istraživanja na simulatorima leta, dok su istraživanja na stvarnim zrakoplovima gotovo nepostojeća. Europska komisija sufinancirala je dva projekta: *Pilot Eye Gaze and Gesture tracking for Avionics Systems using Unobtrusive Solutions* (PEGGASUS) i *Advanced Cockpit for Reduction Of Stresses and workload* (ACROSS). [7] [8] U sklopu projekta PEGGASUS izrađen je CMS baziran na praćenju pogleda i gesta ruku. Na Slici 2.1 prikazan je prototipni sustav ugrađen u kokpit simulatora. Sustav za praćenje pilota sastoji se od pet kamera i četiri infracrvene svjetiljke. Ostvarena je niska latencija, velika točnost praćenja ljudskog pogleda i dobra sposobnost klasifikacije stanja pilota. Zadaća projekta ACROSS bila je osmisлити rješenja za izvršavanje pilotskih zadataka sa smanjenom posadom. Osmišljen je CMS koji posadi pruža podršku u donošenju odluka, prioritizira informacije, automatizira jednostavnije zadatke i nudi mogućnost donošenja odluke u dogovoru sa zemaljskom posadom. U izvanrednim situacijama kada nijedan pilot nije pri svijesti, sustav može preuzeti upravljanje nad zrakoplovom i prizemljiti ga ili preusmjeriti upravljanje zemaljskoj posadi.



Slika 2.1: Prototipni CMS razvijen u sklopu projekta PEGGASUS, slika preuzeta s: <https://www.geogaze.org/peggasus/>

## 3 Simulator leta

Istraživački simulator leta Zavoda za zrakoplovno inženjerstvo [9] započeo je s radom 2019. godine i od tada je korišten za razvoj modela leta, zrakoplovnih sustava i ocjenu kvalitete upravljanja. Na simulatoru je ispitivano nekoliko modela zrakoplova - od bespilotnih letjelica [10], jedrilica [11] i generalne avijacije [12] do mlaznih lovaca treće [13] i četvrte generacije [14]. Vizualni sustav simulatora čine tri projektora XGA razlučivosti i cilindrično platno radijusa 2.5 m. Vidno polje vizualnog sustava pokriva horizontalni kut od  $180^\circ$  i vertikalni kut od  $50^\circ$ . Na drvenoj konstrukciji nalazi se sjedalo, upravljačka palica, gas, pedale i monitor na kojem su prikazani instrumenti. Simulator se sastoji od dva povezana računala, od kojih jedno izvršava simulaciju modela leta u Simulinka, a drugo služi za vizualizaciju leta u programskom paketu X-Plane. Na Slici 3.1 prikazan je kandidat na simulatoru u slobodnom letu.



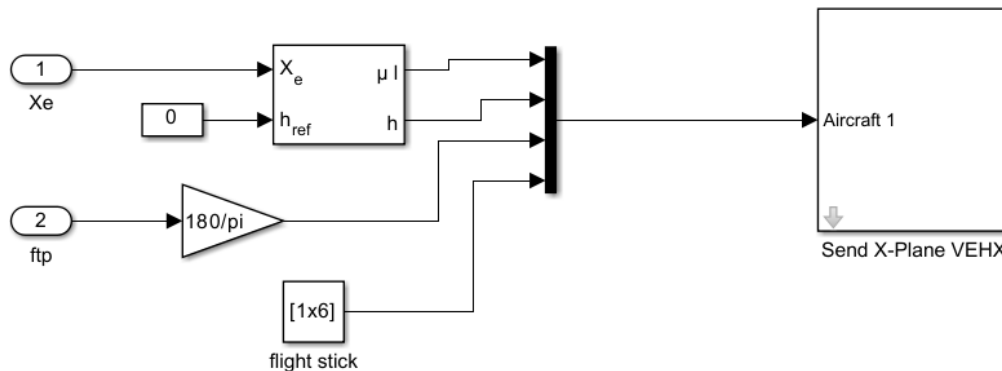


Slika 3.1: Simulator

### 3.1. Vizualizacija leta

U ovom diplomskom radu korišten je Simulink model razvijen i opisan u [14]. Za vizualizaciju je korišten programski paket X-Plane 11 [15], za razliku od dosadašnjeg FlightGeara. U odnosu na FlightGear, X-Plane 11 donosi realističniju grafiku i bolji model okoline i atmosferskih uvjeta. Za jednosmjernu komunikaciju između simulacije u Simulinku i vizualizacijskog softvera putem lokalne mreže korišten je User Datagram Protocol (UDP). Slanje podataka ostvareno je posebno izrađenim skupom Simulink blokova javno dostupnih s internetskih stranica MathWorksa. Korištena su dva bloka: „Send X-Plane VEHX“ i „Send X-Plane Dataref“. Oba bloka primaju jedan ulaz i izravno iz simulacije šalju UDP signal na definiranu IP adresu, u ovom slučaju adresu računala na kojem je pokrenut vizualizacijski softver. Blok „Send X-Plane VEHX“ za ulaz prima vektor s varijablama koje su redom: zemljopisna širina, zemljopisna duljina, nadmorska visina, kut valjanja, kut propinjanja, kut zanosa, tri varijable koje definiraju ulaze upravljačkih elemenata, položaj zakrilaca, zračne kočnice i kotača. S obzirom da je sva dinamika zrakoplova definirana u simulaciji, programski paket X-Plane korišten

je isključivo za vizualizaciju pa je u ovom eksperimentu potrebno definirati samo prvih šest varijabli, dok ostale mogu biti jednake nuli jer njihova promjena iz kokpita nije vidljiva. Blok s ulaznim podacima prikazan je na Slici 3.2.

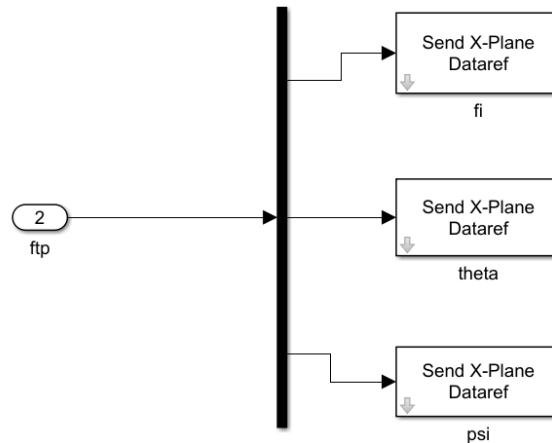


Slika 3.2: Blok za slanje podataka za vizualizaciju leta

Potrebno je uskladiti IP adrese na lokalnoj mreži unutar programskog paketa X-Plane i blokova u Simulinku pomoću kojih će simulacija komunicirati s vizualizacijskim softverom. Prilikom podešavanja UDP veze u programskom paketu X-Plane odabrana je brzina komunikacije od 40 paketa po sekundi. Vizualizacija je s tom vrijednošću pokazivala zadovoljavajuću brzinu osvježavanja.

Drugi korišten blok naziva je „Send X-Plane Dataref“ i korišten je za slanje varijabli koje pokreću instrumente unutar vizualizacijskog softvera. Varijable poslane u svrhu vizualizacije nisu dovoljne vizualizacijskom softveru za pokazivanje točnih podataka na instrumentima u kokpitu zrakoplova, što je ključno u svrhu provođenja eksperimenta, pa mu ih je potrebno dodatno dostaviti. Programski paket X-Plane sve vrijednosti varijabla kojima raspolaže u određenom trenutku drži zapisanima u jednoj bazi podataka. Vrijednost svake varijable iz baze moguće je očitati odgovarajućom naredbom, a u slučaju određenih varijabli moguće je poslati naredbu koja mijenja njenu vrijednost u internoj bazi podataka programskog paketa X-Plane. Korištenjem navedenog bloka u Simulinku određene varijable potrebne za prikazivanje podataka na instrumentima pojedinačno su poslane vizualizacijskom softveru i promijenjene u bazi. Te varijable čine kutevi i kutne brzine valjanja, propinjanja i zakreta, aerodinamička brzina, vertikalna brzina, nadmorska visina i brzine i ubrzanja zrakoplova po sve tri osi u lokalnom koordinatnom sustavu

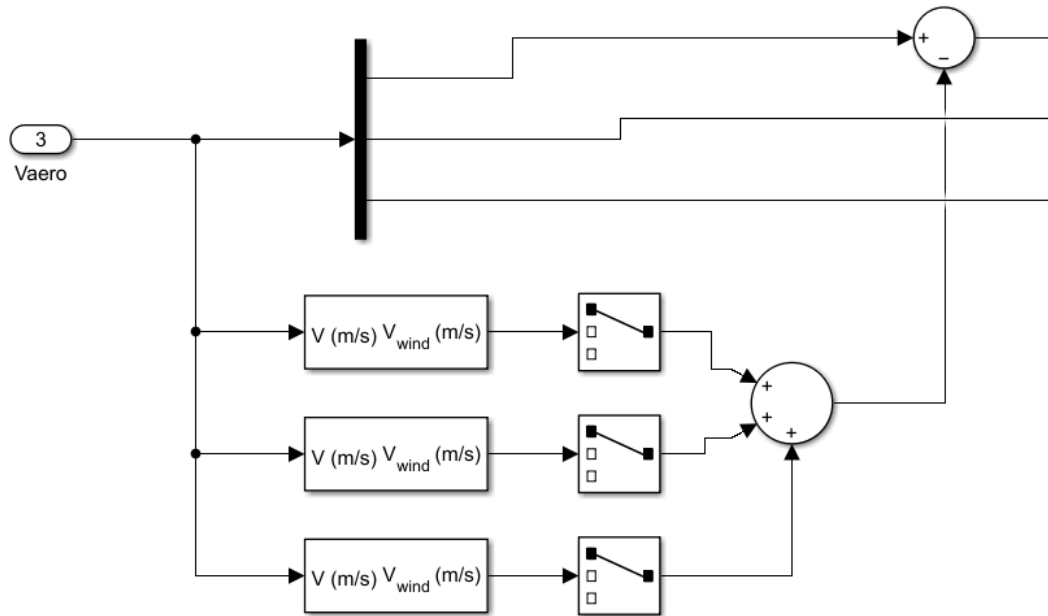
vizualizacijskog softvera. Na Slici 3.3 prikazana su tri bloka kojima se šalje podatak o trenutnim kutovima stava zrakoplova.



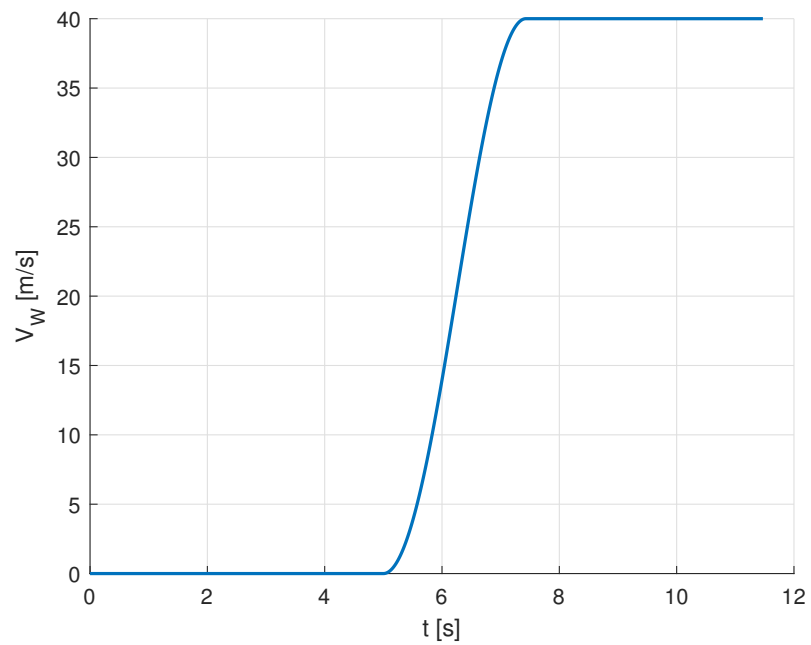
Slika 3.3: Blokovi za slanje kutova stava zrakoplova

## 3.2. Modelirani poremećaji

U jednom od zadataka u eksperimentu tijekom leta dolazi do poremećaja u obliku čeonog ili leđnog vjetra. U postojeći model u Simulinku dodan je i vjetar koji puše paralelno s uzdužnom osi zrakoplova. Korišteni blok za simulaciju vjetra za ulaz uzima trenutnu aerodinamičku brzinu zrakoplova i za izlaz daje brzinu vjetra. S obzirom na to da postoji samo jedna komponenta brzine vjetra, duž zrakoplova, brzina vjetra oduzima se ili pridodaje, ovisno o smjeru puhanja vjetra, samo  $u$  komponenti aerodinamičke brzine. U postavkama bloka može se definirati vremenski početak naleta vjetra, duljina i brzina naleta. Budući da se blok aktivira u određenom vremenskom trenutku simulacije, broj naleta vjetra određen je brojem ponavljanja bloka u modelu s drugim trenutkom aktivacije. Na Slici 3.4 prikazani su blokovi za slučaj zadatka s tri naleta vjetra. Oblik funkcije po kojoj se mijenja brzina vjetra, u slučaju čeonog vjetra prikazan je na Slici 3.5. Zajedno s naletom vjetra, isti signal s manjim pojačanjem pridodan je signalu otklona palice tako da u trenutku naleta dođe i do blage promjene kuta propinjanja.



Slika 3.4: Blok za definiranje brzine vjetra

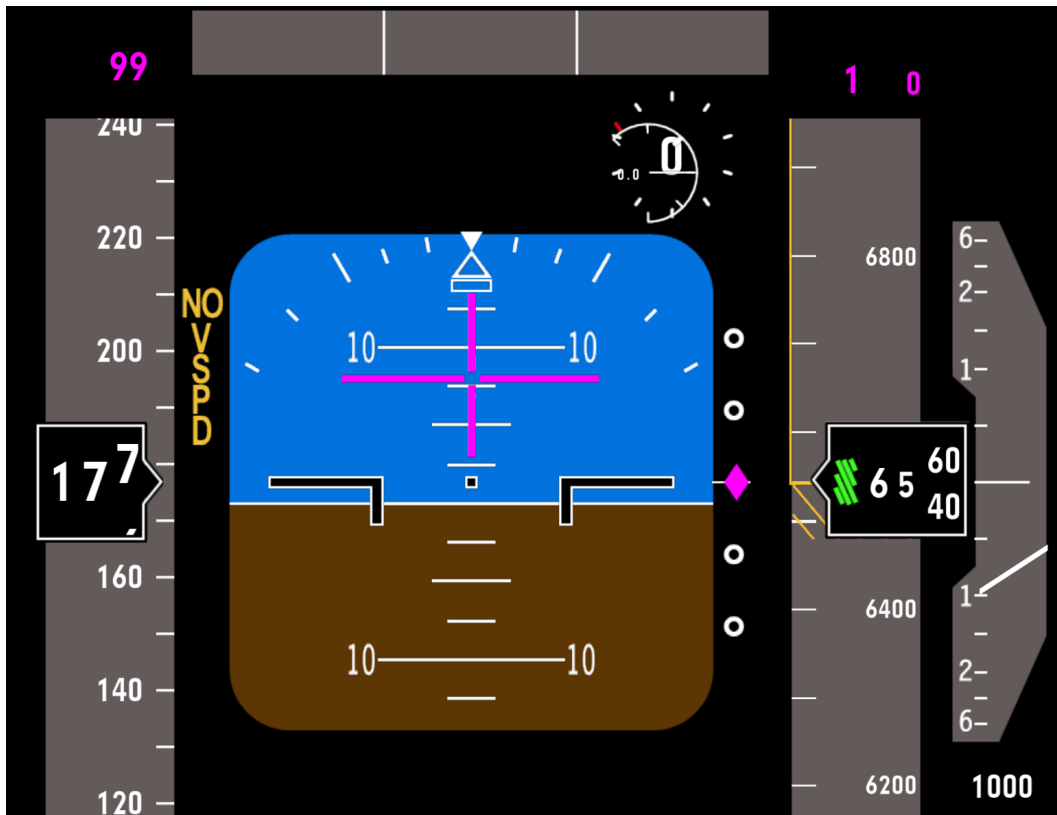


Slika 3.5: Funkcija brzine vjetra

### 3.3. Prikaz instrumenata

Za vizualizaciju instrumenata nije korištena ugrađena vizualizacija programskog paketa X-Plane, već zasebni programski paket Air Manager [16] zbog značajno boljeg prikaza, velike baze gotovih analognih i digitalnih instrumenata koje je moguće uređivati i jednostavnosti korištenja. Također postoji mogućnost izrade vlastitih instrumenata i programiranja njihovog ponašanja. Air Manager varijable leta koje se koriste za prikaz podataka na instrumentima preuzima izravno iz programskog paketa X-Plane, dok ih X-Plane od Simulinka dobiva na već opisani način. Ovakvo slanje varijabli preko posrednika nužno je jer Air Manager nije moguće izravno povezati sa Simulinkom, dok za povezivanje sa svim modernim programskim paketima za simulaciju leta, uključujući X-Plane, nudi tvorničku podršku.

Air Manager nudi mogućnost izrade instrumenata i programiranja njihovog ponašanja od nule ili uređivanje postojećih instrumenata iz baze. Za provedbu eksperimenta odabrani su postojeći instrumenti koji su zatim preuređeni. Najveća preinaka bila je dodavanje pokazatelja za traženi kut propinjanja na umjetnom horizontu i njegovo povezivanje s prisilnim signalom iz Simulinka. U vizualizacijskom softveru X-Plane 11 odabran je u ovoj simulaciji nekorisćeni dataref i na njega je slana vrijednost prisilnog signala kuta propinjanja u svakom trenutku. Instrument je u Air Manageru isprogramiran tako da preuzima vrijednost iz tog datarefa i koristi ju za pomicanje pokazatelja traženog kuta propinjanja na umjetnom horizontu. Na Slici 3.6 prikazani su instrumenti korišćeni u zadacima u eksperimentu. S lijeve strane nalazi se traka s aerodinamičkom brzinom izraženom u čvorovima. Na sredini je umjetni horizont s ružičastim pokazateljem kuta propinjanja. S desne strane nalazi se traka s trenutnom visinom leta izraženom u stopama i pokazatelj vertikalne brzine izražene u stopama po minuti. Ostali podaci na instrumentu nisu bili korišćeni u eksperimentu i njihove vrijednosti nisu se mijenjale.



Slika 3.6: Instrumenti korišteni u eksperimentu

### 3.4. Model zrakoplova

Model zrakoplova korišten u provedbi eksperimenta nalik je francuskom višenamjenskom borbenom zrakoplovu četvrte generacije Dassault Rafale prikazanom na Slici 3.7. Odlikuje ga delta krilo s kanardima i pogon s dva motora. Iako ovaj zrakoplov može ostvariti visoke nadzvučne brzine, model je u trenutku provedbe istraživanja bio ograničen na podzvučne brzine. To nije predstavljalo problem jer su brzine leta u zadacima relativno male, s početnom brzinom od 90 m/s, radi većeg utjecaja vjetrova na stav i brzinu zrakoplova. Masa zrakoplova korištena u eksperimentu iznosi 10979 kg, što je jednako masi praznog zrakoplova uvećanoj za jednu tonu goriva. Najveća razlika u odnosu na zrakoplove na kojima su kandidati letjeli je način upravljanja modeliranim zrakoplovom. Za razliku od zrakoplova generalne avijacije na kojima otklon palice izravno utječe na otklon određene upravljačke površine, otklonom palice na modeliranom zrakoplovu upravlja se

kutnim brzinama zrakoplova. Zbog te razlike upravljanje na simulatoru znatno je osjetljivije te su se kandidati na to trebali brzo priviknuti.



Slika 3.7: Dassault Rafale, slika preuzeta s: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dassault\\_Rafale](https://en.wikipedia.org/wiki/Dassault_Rafale)

## 4 | Opis eksperimenta

### 4.1. Opis zadataka

Za provedbu eksperimenta osmišljena su tri zadatka. Prvi je zadatak praćenje komande propinjanja, dok drugi još dodatno uključuje iznenadne poremećaje u smislu jakog naleta vjetra u određenim trenucima. Modelirani poremećaji korišteni su u svrhu povećanja kognitivnog opterećenja kandidata, detaljno opisanog u drugom poglavlju. U trećem zadatku ponovljen je prvi zadatak bez poremećaja, ali kandidatima nije bilo rečeno hoće li se poremećaj pojaviti. Vrijeme trajanja svakog zadatka iznosi 144 sekunde. U nekoliko radova u kojima je razmatran učinak iznenadnog poremećaja na pilote poremećaj je predstavljao otkaz pogona, kontrolne površine ili iznenadna jaka turbulencija koja utječe na stav zrakoplova. [17] [18] [19] Nakon provedbe zadataka na simulatoru leta, proveden je i generički n-back zadatak za procjenu radne memorije kandidata, često korišten u ispitivanjima kognitivnog opterećenja pilota. [20]

Prije provedbe eksperimenta svaki kandidat saslušao je upute o simulatoru i zadacima. Kandidatima je rečeno da tijekom zadataka pokušavaju držati brzinu leta konstantnom, bez prevelikih promjena od početne vrijednosti te da se za procjenu njihove uspješnosti mjeri samo odstupanje od prisilnog signala praćenja kuta propinjanja. Napomenuto je i da osim korištenja ručice gasa i upravljačke palice mogu koristiti i pedale, ali je preporuka da to ne čine radi lakšeg odrađivanja zadataka. Kandidati nisu morali obraćati pažnju na visinu jer je prisilni signal definiran tako da njegova prosječna vrijednost drži zrakoplov na konstantnoj visini. Zatim je svaki kandidat imao priliku samostalno letjeti nekoliko minuta u slobodnom letu u svrhu upoznavanja s komandama i upravljanjem zrakoplova. U slobodnom letu nisu postajala nikakva ograničenja na br-



zinu i visinu leta. Nakon upoznavanja sa simulatorom, kandidati su započeli s prvim zadatkom.

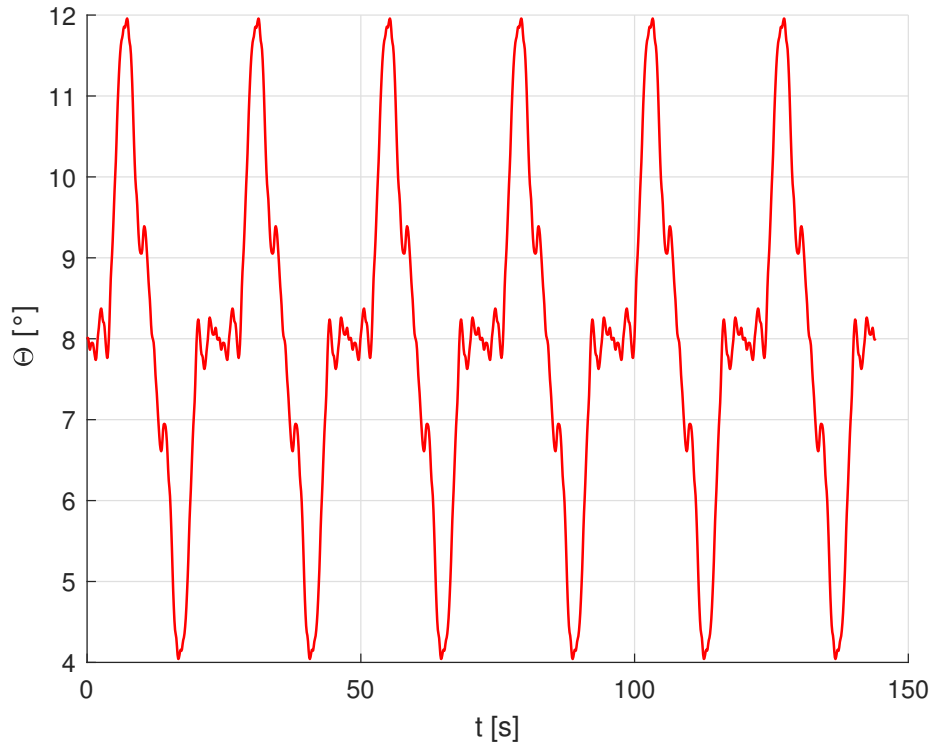
U zadatku praćenja komande propinjanja zadaća pilota je dovesti zrakoplov u stav zadan prisilnim signalom koji definira traženi kut propinjanja. Traženi stav prikazan je na umjetnom horizontu pokazateljem kojeg pilot mora pratiti. Pokazatelja pokreće prisilni signal koji je definiran kao zbroj sinusnih signala oblika [21] [22]:

$$\Theta_i = \sum_{k=1}^n A_k \sin(\omega_k \cdot t + \phi_k) \quad (4.1)$$

Prisilni signal ima različite amplitude  $A_k$ , frekvencije  $\omega_k$  i fazne pomake  $\phi_k$ . Konačna vrijednost signala kuta propinjanja dobivena je dodavanjem konstantne vrijednosti  $\Theta_{trim}$ :

$$\Theta_p = \Theta_i + \Theta_{trim} \quad (4.2)$$

Početna vrijednost signala jednaka je konstantnom iznosu  $\Theta_{trim}$  i iznosi  $8^\circ$ . Početna vrijednost određena je ravnotežnim napadnim kutem modeliranog zrakoplova, a tijekom zadatka vrijednost se kreće u rasponu između  $4^\circ$  i  $12^\circ$ . Njegove vrijednosti tijekom 144 sekunde trajanja zadatka prikazane su na Slici 4.1.



Slika 4.1: Prisilni signal

Kada kandidat dovede zrakoplov u ravnotežni položaj i spreman je za zadatak, aktivacijom prekidača aktivira se prisilni signal kuta propinjanja koji započinje pet sekundi nakon aktivacije. Drugi zadatak sastoji se od praćenja komande propinjanja uz iznenadni nalet leđnog ili čeonog vjetra. U određenim trenucima od početka simulacije pušten je snažni vjetar brzine 40 m/s koji se poklapa s uzdužnom osi zrakoplova. Tijekom drugog zadatka nalet vjetra događa se tri puta, od čega su dva naleta leđnog vjetra i jedan čeonog. U trenutku naleta dolazi do brze promjene aerodinamičke brzine uslijed brzine vjetra i male promjene kuta propinjanja u iznosu od  $2^\circ$  zbog dodane vrijednosti na signal upravljačke palice. Navedeni poremećaj aerodinamičke brzine i kuta propinjanja povećava se od nule do konačne vrijednosti u periodu od dvije sekunde. Promjena može biti pozitivna ili negativna, ovisno o smjeru naleta vjetra. Navedene promjene otežat će praćenje komande propinjanja i izazvati iznenađenje kod pilota u trenutku naleta. Treći zadatak ponovljeni je prvi zadatak bez poremećaja, ali ovaj put kandidatu nije rečeno koju će vrstu zadatka od dva viđena odrađivati, odnosno nije mu pružena

informacija hoće li doći do navedenih poremećaja. Svrha trećeg zadatka je analiza performansi pilota tijekom očekivanja stresnog događaja koji se može, ali i ne mora dogoditi.

Time je završilo ispitivanje na simulatora i nakon kraćeg odmora za kandidate, uslijedio je generički n-back zadatak. Zadatak ima dvije varijante - 1-back i 3-back, koje se nasumičnim redosljedom izmjenjuju sve dok kandidatu nije prikazano ukupno šest blokova jedne ili druge varijante. U obje varijante na zaslonu se brzo izmjenjuju slova, svako u trajanju od oko sekunde, 15 puta po bloku. Zadatak kandidata je strelicama na tipkovnici odgovoriti je li trenutno prikazano slovo jednako prethodnom, u slučaju 1-back varijante, ili trećem prethodnom, u slučaju 3-back varijante.

Nakon provedenih zadataka, kandidati su ocijenili upravljivost zrakoplova u sva tri zadatka po Cooper-Harper ljestvici i ispunili pet NASA-TLX upitnika za subjektivno ocjenjivanje. Tri upitnika odnosila su se na svaki od zadataka letenja na simulatoru, a dva su se odnosila na n-back zadatak, po jedan za svaku varijantu.

## 4.2. Pregled kandidata

Istraživanje opterećenja pilota provedeno je u četiri dana. Kandidati su bili studenti studija Aeronautike Fakulteta prometnih znanosti. Od 23 kandidata, dvoje studira po programu za civilne pilote, dok ostalih 21 studira po programu za vojne pilote. Uz studente ispitana su i dva starija kandidata koja nemaju nikakvo pilotsko iskustvo. Prije provedbe eksperimenta kandidati su ispunili upitnik o kvaliteti sna i konzumaciji hrane i pića u proteklom danu, prikazan u Prilogu 1, i upitnik o anksioznoj osjetljivosti, na kojem su ocjenom od 1 do 5 morali procijeniti koliko se određena tvrdnja odnosi na njih, prikazan u Prilogu 2. Kandidati su također naveli njihov broj sati leta na zrakoplovu i broj sati leta na simulatoru radi procjene iskustva pojedinog kandidata. Većina kandidata imala je do deset sati leta, dok je svega nekoliko starijih studenata imalo više desetaka sati leta. Dosadašnje iskustvo na simulatoru većine kandidata bilo je vrlo malo ili nepostojeće. Dva su kandidata prijavila značajno iskustvo na neprofesionalnom kućnom simulatoru i njihov broj sati na simulatoru u tablici označen je sa zvjezdicom. Srednja dob kandidata ne uključujući posljednja dva starija iznosi 20.7 godina, a broj

sati leta na zrakoplovu ne uključujući ista dva kandidata iznosi 15.1 sati. U Tablici 4.1 prikazani su podaci o kandidatima.

Tablica 4.1: Podaci o kandidatima

Broj kandidata	Godine	Smjer	God. studija	Zrakoplov [h]	Simulator [h]
Kandidat 1	22	vojni	3.	25	0
Kandidat 2	21	vojni	1.	10	0
Kandidat 3	21	vojni	2.	10	0
Kandidat 4	20	vojni	1.	10	0
Kandidat 5	19	vojni	1.	12	0
Kandidat 6	22	vojni	4.	55	0
Kandidat 7	21	vojni	3.	7	0
Kandidat 8	20	vojni	1.	7	3
Kandidat 9	19	vojni	1.	10	0
Kandidat 10	20	vojni	2.	10	0
Kandidat 11	22	vojni	2.	10	40*
Kandidat 12	19	vojni	1.	10	40*
Kandidat 13	19	vojni	1.	10	0
Kandidat 14	22	vojni	2.	9	0
Kandidat 15	23	vojni	3.	40	0
Kandidat 16	21	vojni	2.	7.5	0
Kandidat 17	20	vojni	2.	6.5	0
Kandidat 18	20	vojni	1.	10	0
Kandidat 19	24	vojni	3.	30	0
Kandidat 20	20	civilni	2.	32	3
Kandidat 21	20	civilni	2.	13	1.5
Kandidat 22	20	vojni	2.	7.5	1
Kandidat 23	20	vojni	1.	6	0
Kandidat 24	53	-	-	0	25
Kandidat 25	37	-	-	0	5

### 4.3. Mjerna oprema

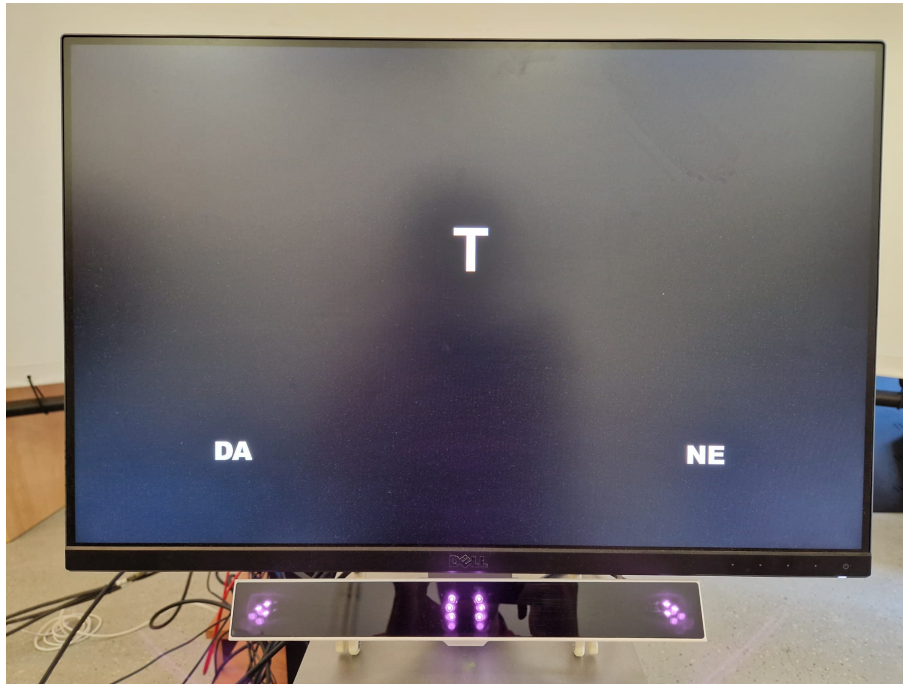
Za vrijeme provedbe zadataka na simulatoru i generičkog n-back zadatka korištena je mjerna oprema Laboratorija za interaktivne simulacijske sustave Fakulteta elektrotehnike i računarstva. [23] Fiziološki parametri kandidata mjereni su uređajem Biopac MP150 prikazanim na Slici 4.2. Oni uključuju aktivnost srca, intenzitet disanja i električnu vodljivost kože, odnosno znojenje. Elektrode za mjerenje aktivnosti srca postavljane su kandidatima na podlaktice, po jedna na svaku ruku. Elektrode se mogu postaviti i na zapešće, ali radi lakšeg upravljanja gasom i palicom odabrana je podlaktica. Druge dvije elektrode korištene su za mjerenje vodljivosti kože, koja je proporcionalna sa znojenjem kandidata. One su postavljane na kažiprst i prstenjak lijeve ruke. Odabir ruke za ove elektrode nije od značaja, ali u eksperimentu su postavljane na prste lijeve ruke jer je komanda gasa s lijeve strane, a nju je potrebno znatno manje pomicati u odnosu na palicu. Radi boljeg kontakta s kožom i manjeg otpora na elektrode za mjerenje aktivnosti srca postavljana je posebna pasta, a na elektrode za mjerenje vodljivosti kože gel za povećanje vodljivosti. Intenzitet disanja mjereno je pojasem postavljenim oko prsnog koša kandidata. Pojas za disanje napravljen je od elastičnog materijala i potrebno ga je jako stegnuti kako bi precizno mjerio širenje prsnog koša tijekom disanja. Oprema za mjerenje fizioloških parametara postavljena je na kandidata na početku eksperimenta nakon čega su u softveru za snimanje provjerene vrijednosti signala. Oprema je korištena za mjerenje tijekom cijelog eksperimenta, na zadacima na simulatoru i na n-back zadatku.



Slika 4.2: Uređaj za prikupljanje fizioloških podataka Biopac MP150

Tijekom eksperimenta infracrvenom kamerom praćen je pogled kandidata. Kamera se nalazi ispod zaslona na kojem su tijekom leta prikazani instrumenti. Za vrijeme provođenja n-back zadatka isti monitor korišten je za prikaz slova. Kamerom je moguće precizno pratiti usmjerenost pogleda kandidata na zaslonu. U trenutku kada kandidat pogleda na platno, kamera više nije u mogućnosti pratiti njegov pogled i daje informaciju da je pogled usmjeren van ekrana. Analizom je moguće utvrditi koje je instrumente kandidat pratio i kada je i koliko često prebacivao pogled sa zaslona s instrumentima na platno na kojem je vizualiziran let. Za svakog kandidata bilo je potrebno kalibrirati kameru dvaput tijekom eksperimenta, jednom prije leta na simulatoru i prije n-back zadatka, radi osiguravanja što preciznijeg praćenja pogleda. Proces kalibracije izveden je tako da kandidat pogledom prati točku koja mijenja položaj na ekranu, nakon čega se na ekranu pojavi zelena točka koja označava trenutno mjesto na koje je usmjeren pogled. Na ekranu su nacrtane i mete kojima kandidat može provjeriti točnost kalibracije. Dok je mjerenje fizioloških parametara davalo gotovo besprijekorne rezultate, praćenje pogleda kamerom često je stvaralo poteškoće. Pojavljivali su se problemi s kalibracijom uzrokovani individualnim razlikama u veličini i obliku zjenica kandidata i udaljenošću od kamere. Praćenje pogleda točnije je što se kandidat nalazi bliže kameri. S obzirom na to da udaljenost od zaslona i kamere ovisi o položaju sjedala koji je pilotu najudobniji,

viši piloti su češće imali problema s kalibracijom. Na Slici 4.3 prikazana je kamera ispod zaslona na kojem se izvodi n-back zadatak.



Slika 4.3: Kamera i zaslon tijekom n-back zadatka

#### 4.4. Subjektivna analiza opterećenja

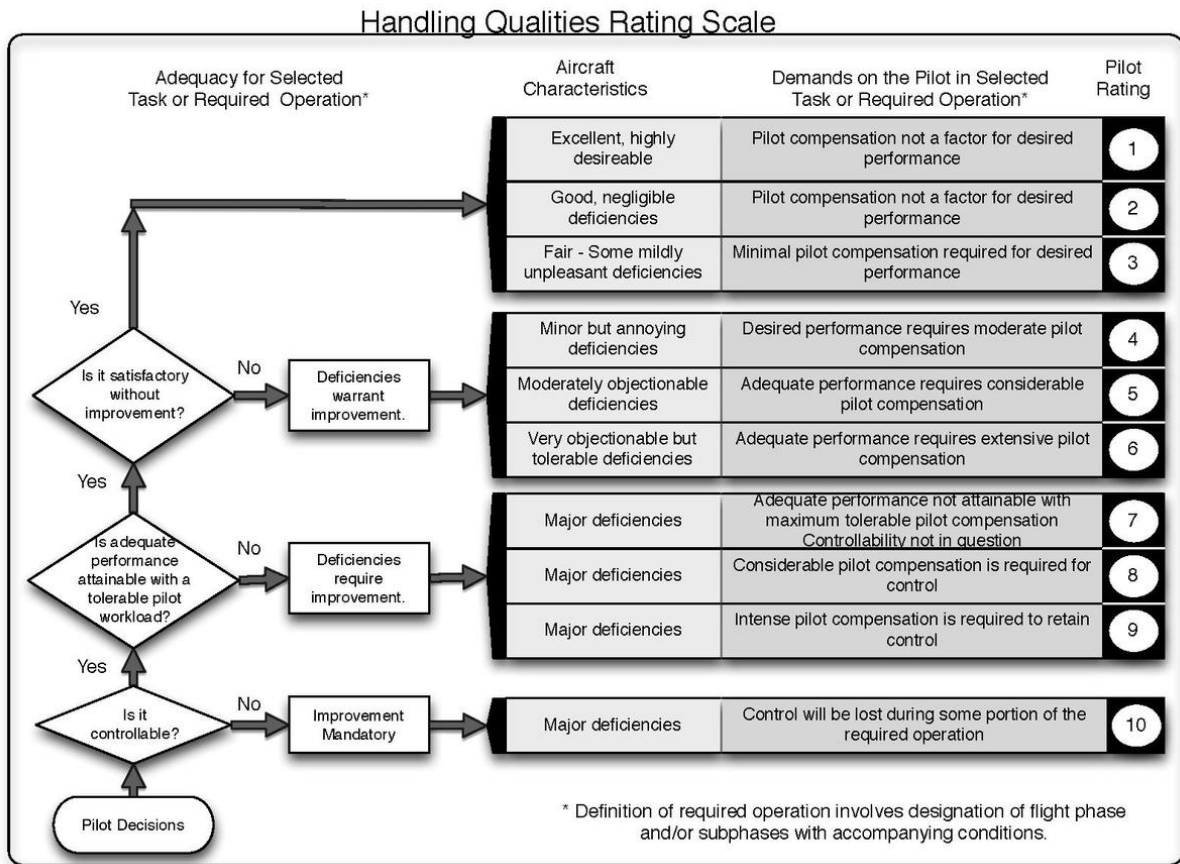
Subjektivna analiza opterećenja podrazumijeva kandidatovo ocjenjivanje vlastitih performansi na temelju subjektivnog dojma. Nakon provedbe eksperimenta potrebno je prikupiti i pilotovo mišljenje jer subjektivna analiza obuhvaća kvalitativne aspekte performansi pilota koje nije jednostavno opisati objektivnim mjerenjima i time je bitan dodatak objektivnoj analizi.

U eksperimentu su korištene dvije metode subjektivnog ocjenjivanja: standardizirani NASA-TLX upitnik za ocjenjivanje radnog opterećenja i Cooper-Harper ljestvica za ocjenjivanje upravljivosti zrakoplova. NASA-TLX upitnik razvijen je 1980-ih godina za subjektivnu procjenu zahtjevnosti određenog zadatka. [24] Upitnik se sastoji od šest pitanja na koja kandidat odgovara brojem od 1 do 20. Najmanji broj označava vrlo nisko opterećenje, a najveći vrlo visoko. Prva tri pitanja od kandidata redom traže pro-

ocjenu mentalnog, fizičkog i vremenskog opterećenja za provedeni zadatak. Zatim slijede pitanja procjene vlastitog uspjeha u zadatku, napora i frustracije prilikom izvršavanja zadatka. Za svaki od tri zadatka kandidat je ispunio po jedan NASA-TLX upitnik. Korišteni NASA-TLX upitnik prikazan je u Prilogu 3.

Jedan od najčešće korištenih alata za subjektivno ocjenjivanje upravljivosti zrakoplova je ljestvica Cooper-Harper. [1] Razvili su je Ralph Cooper i Robert Harper 1960-ih godina za procjenjivanje kvalitete upravljanja i performansi pilota u zrakoplovima. Ljestvica ima oblik stabla s četiri dijela. Ako letjelica u nekom trenutku leta gubi stabilnost pilot daje ocjenu 10, najlošiju moguću ocjenu. Ako je letjelica bila upravljiva tijekom cijelog leta, ali pilot nije uspio ostvariti adekvatne performanse, ocjenom 7 označava da je upravljivost kompenzira s manjim naporom, a ocjenom 9 kompenzaciju s velikim naporom. Ukoliko je moguće ostvariti adekvatne performanse, ali je potrebna kompenzacija pilota, ocjene su u rasponu od 4 do 6 gdje 4 označava mogućnost postizanja željenih performansi. Ako na letjelici nije potrebno napraviti nikakva poboljšanja, pilot ocjenjuje upravljivost ocjenama od 1 do 3. Ocjena 1 označava izvrsnu upravljivost, a ocjena 3 potrebu za minimalnim kompenzacijama za postizanje željenih performansi. Ljestvica je prikazana na Slici 4.4.





Slika 4.4: Cooper-Harper ljestvica za ocjenu upravljivosti [1]

### 4.5. Objektivna analiza opterećenja

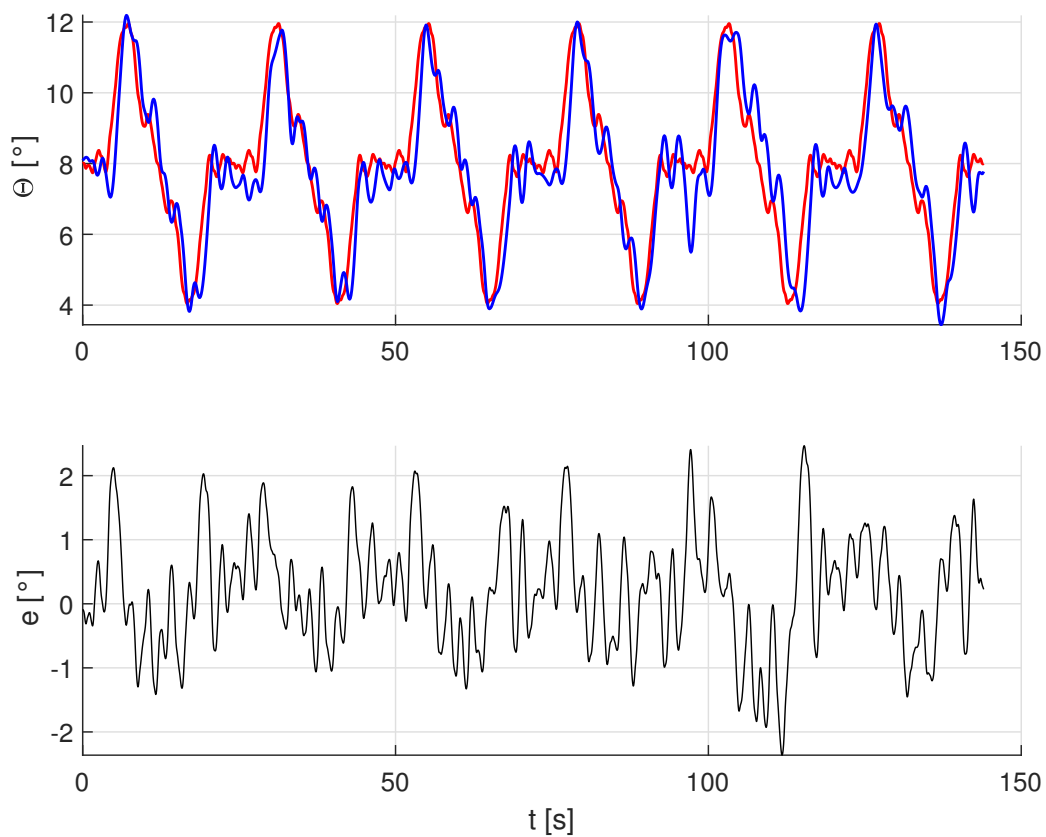
U objektivnoj analizi opterećenja kandidata učinak je procijenjen na dva načina. Prvi je način usporedba varijanci pogreške između zadanog signala kuta propinjanja i ostvarenog kuta propinjanja u svakom trenutku simulacije. Ovaj pristup omogućava jednostavnu usporedbu točnosti odrađivanja zadataka svih kandidata. Varijanca pogreške računata je prema jednadžbi:

$$V_e = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |e - \mu|^2 \tag{4.3}$$

Razlika  $e$  prisilnog signala kuta propinjanja  $\Theta_p$  i ostvarenog signala kuta propinjanja  $\Theta$ , odnosno pogreška, definirana je izrazom:

$$e = \Theta_p - \Theta \quad (4.4)$$

U jednadžbi (4.3)  $N$  označava broj uzoraka,  $e$  razliku prisilnog i ostvarenog signala kuta propinjanja, a  $\mu$  srednju vrijednost opisane razlike. Na Slici 4.5 prikazan je prisilni i ostvareni signal kuta propinjanja i razlika ta dva signala koja predstavlja pogrešku čija varijanca je analizirana.



Slika 4.5: Prisilni  $\Theta_p$  (crvena linija) i ostvareni signal kuta propinjanja  $\Theta$  (plava linija) i njihova razlika  $e$

Drugi način procjene opterećenja je određivanje broja lokalnih maksimuma i minimuma na signalu pomaka upravljačke palice. [13] Iako taj broj ne mora biti u izravnoj korelaciji s ostvarenom točnošću, on daje informaciju o fizičkom naporu koji je kandidat iskusio tijekom odrađivanja zadatka. Ista analiza provedena je nad signalom brzine pomaka upravljačke palice, koji je dobiven deriviranjem signala pomaka po vremenu.

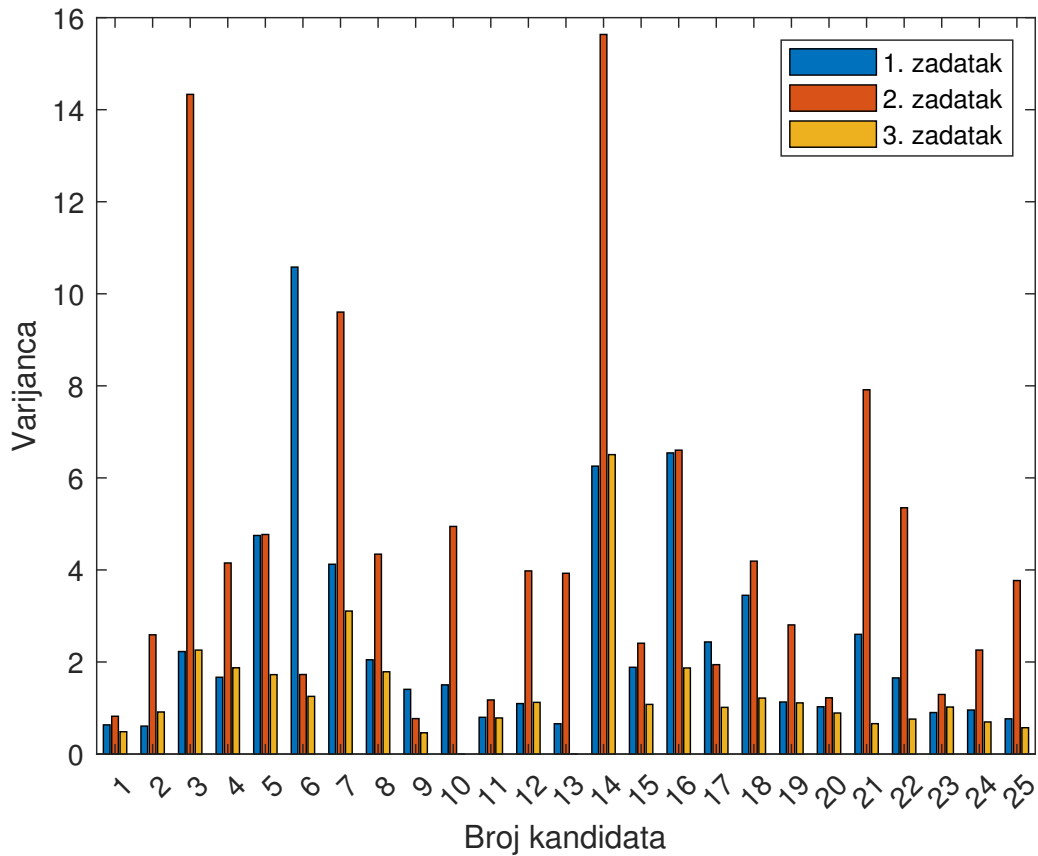
Na dijagramima će biti prikazane i ostale varijable leta, uključujući brzinu leta, promjenu visine, kutnu brzinu propinjanja i napadni kut tijekom pojedinog zadatka. Iako je kandidatima prije ispitivanja naglašeno da je jedina varijabla po kojoj se ocjenjuje njihov učinak točnost praćenja kuta propinjanja, promjene ova dva parametra daju uvid u sposobnost kandidata da održava više varijabli pod kontrolom, što se također može iskoristiti za procjenu učinka.

# 5 | Rezultati

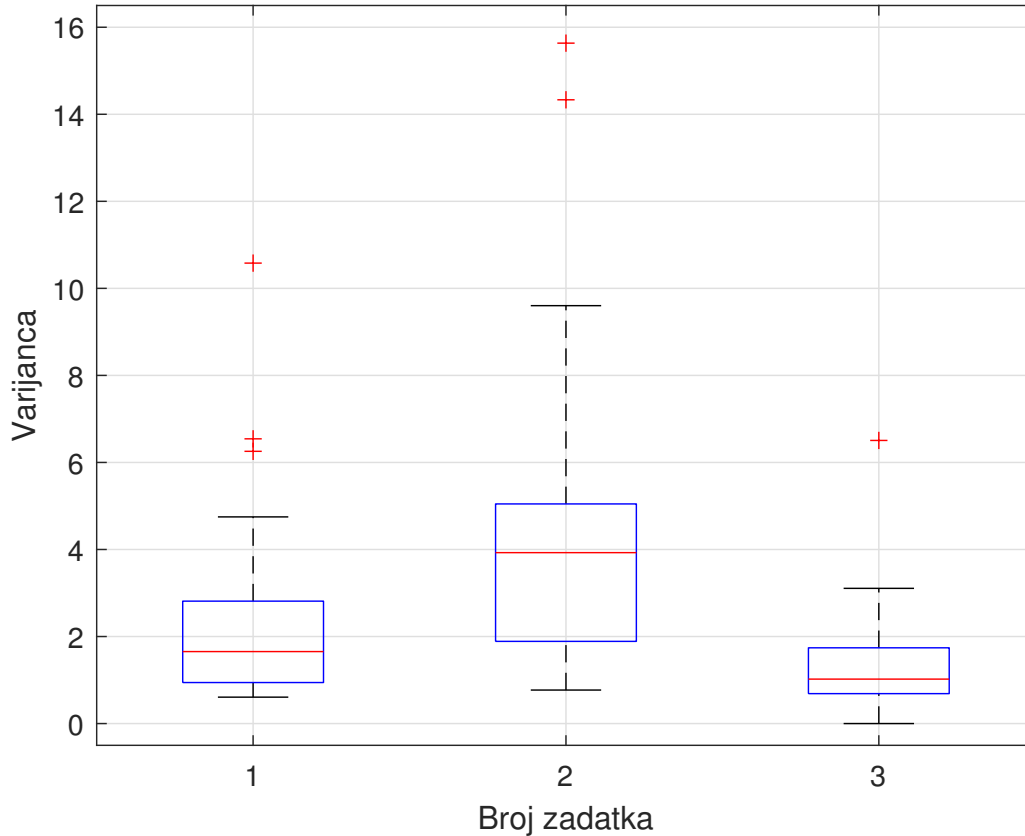
## 5.1. Objektivna analiza rezultata

Na Slici 5.1 prikazane su ostvarene varijance razlike prisilnog i ostvarenog signala kuta propinjanja, prema jednadžbi 4.1. Zbog tehničkih poteškoća za određene zadatke kod pojedinih kandidata nije bilo dovoljno podataka za izračun varijance pogreške. U trećem zadatku desetog kandidata učinjena je pogreška pri spremanju rezultata pa su podaci od tog leta nažalost izgubljeni. Druga pogreška dogodila se tijekom trećeg zadatka trinaestog kandidata kada greškom nije pokrenut prisilni signal pa je kandidat pratio nepomičan indikator kuta propinjanja stoga taj rezultat nije uzet u obzir. Iz grafa je jasno da su najveće varijance pogreške ostvarene u drugom zadatku. Kod nekih kandidata iznos varijance pogreške u tom zadatku nekoliko je puta veći u usporedbi s preostala dva zadatka. Vrlo visoke iznose kod određenih kandidata moguće je objasniti time da su u nekom trenutku izgubili kontrolu i znatno odstupili od prisilnog signala i greška se u tom periodu brzo povećavala. Najbolji rezultat općenito je najčešće ostvaren u trećem zadatku, što je očekivano s obzirom na to da su kandidati u prethodna dva zadatka imali priliku dvaput izvježbati traženu zadaću. Budući da je u drugom zadatku uveden poremećaj, a u trećem su kandidati općenito najtočniji te je taj zadatak identičan prvom, naglasak u analizi će biti na ta dva zadatka. Uz to, prvi zadatak kod većine pilota ima visoku varijancu pogreške jer se radi o prvom pokušaju praćenja prisilnog signala i upoznavanja s njegovom promjenom. Prikazan je i *box plot* dijagram varijance pogreške za svaki od tri zadatka svih kandidata na Slici 5.2. Na temelju njega moguće je zaključiti da je najveći raspon varijanci pogreške, a isto tako i srednja vrijednost svih varijanci pogreške, ostvaren u drugom zadatku. Raspon i srednja vrijednost

varijanci pogreške u trećem zadatku manji su od onih u prvom zadatku. Ovaj rezultat potvrđuje odabir drugog i trećeg zadatka za detaljniju analizu. Radi lakšeg označavanja kandidata, u daljnjoj analizi kandidati će biti označeni šifrom od K1 do K25.



Slika 5.1: Ostvarene varijance pogreške po zadatku za sve kandidate

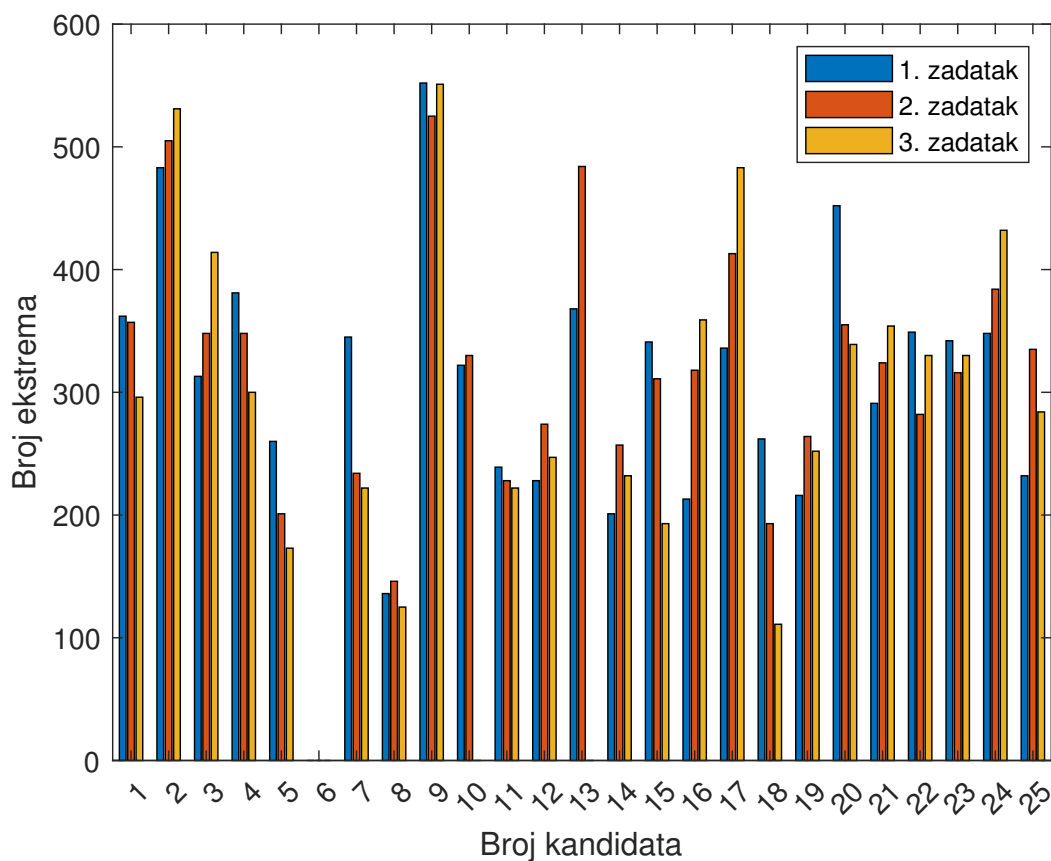


Slika 5.2: Varijance pogreške kandidata po svakom zadatku

Zbrajanjem varijance pogreške u sva tri zadatka izračunato je da je općenito najtočniji u eksperimentu upravo K1. Na grafu je vidljivo da je u sva tri zadatka varijanca pogreške konzistentna, s malim povećanjem u drugom zadatku. Najbolje pojedinačne letove odradio je K9 u drugom zadatku s varijancom pogreške od  $V_e = 0.77$  i u trećem zadatku s varijancom pogreške od  $V_e = 0.462$ . K14 ima najlošiju ukupnu varijancu pogreške, ujedno s najlošijim pojedinačnim drugim i trećim letovima. Najnetočniji je bio u drugom zadatku u kojem je ostvario varijancu pogreške od  $V_e = 15.6$  i u trećem s varijancom pogreške od  $V_e = 6.51$ .

Broj lokalnih ekstrema u signalu pomaka palice pruža informaciju o fizičkom naporu kandidata da upravlja zrakoplovom. Veći broj ekstrema znači da je kandidat palicu češće

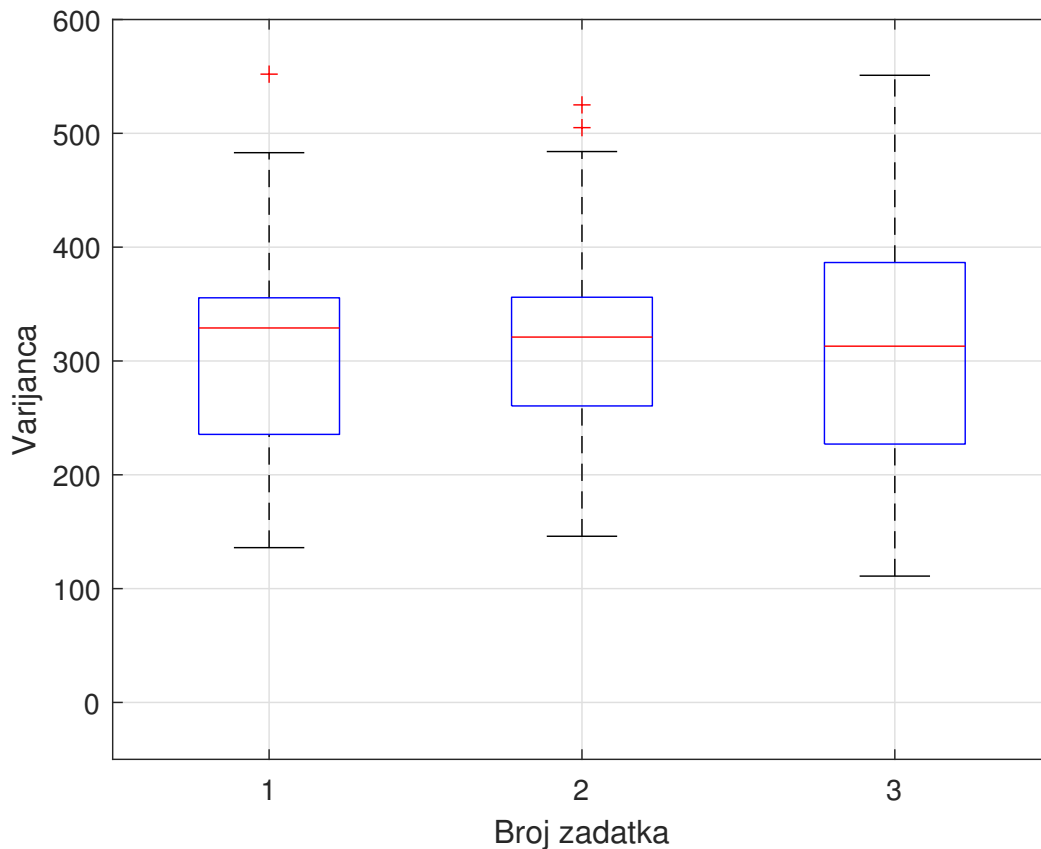
pomicao u suprotnim smjerovima za što je potreban veći fizički napor. Broj ostvarenih ekstrema kroz sva tri zadatka za svakog kandidata prikazan je na Slici 5.3. Prilikom analize ekstrema otkriveno je da prilikom snimanja podataka zbog nepoznate greške nisu zabilježeni otkloni upravljačke palice za K6 pa je broj ekstrema za tog kandidata jednak nuli. Zbog već navedenih tehničkih problema treći zadatak K10 i K13 nije razmatran. Iz dijagrama je vidljivo da je najbolji kandidat ostvario najviše ekstrema u signalu pomaka palice, dok je kandidat s najlošijim rezultatom među kandidatima s najmanjim brojem ekstrema.



Slika 5.3: Broj ekstrema u signalu otklona palice za pojedini zadatak po kandidatu

*Box plot* dijagram na Slici 5.4 pokazuje da ne postoji veliko odstupanje srednje vrijednosti broja ekstrema svih kandidata kroz sva tri zadatka. Raspon ostvarenih vrijednosti najveći je u trećem zadatku, dok je u prva dva vrlo sličan. Iz toga je moguće zaključiti

da su kandidati nakon vježbe u prethodna dva zadatka pronašli tehniku upravljanja koja im najviše odgovara.

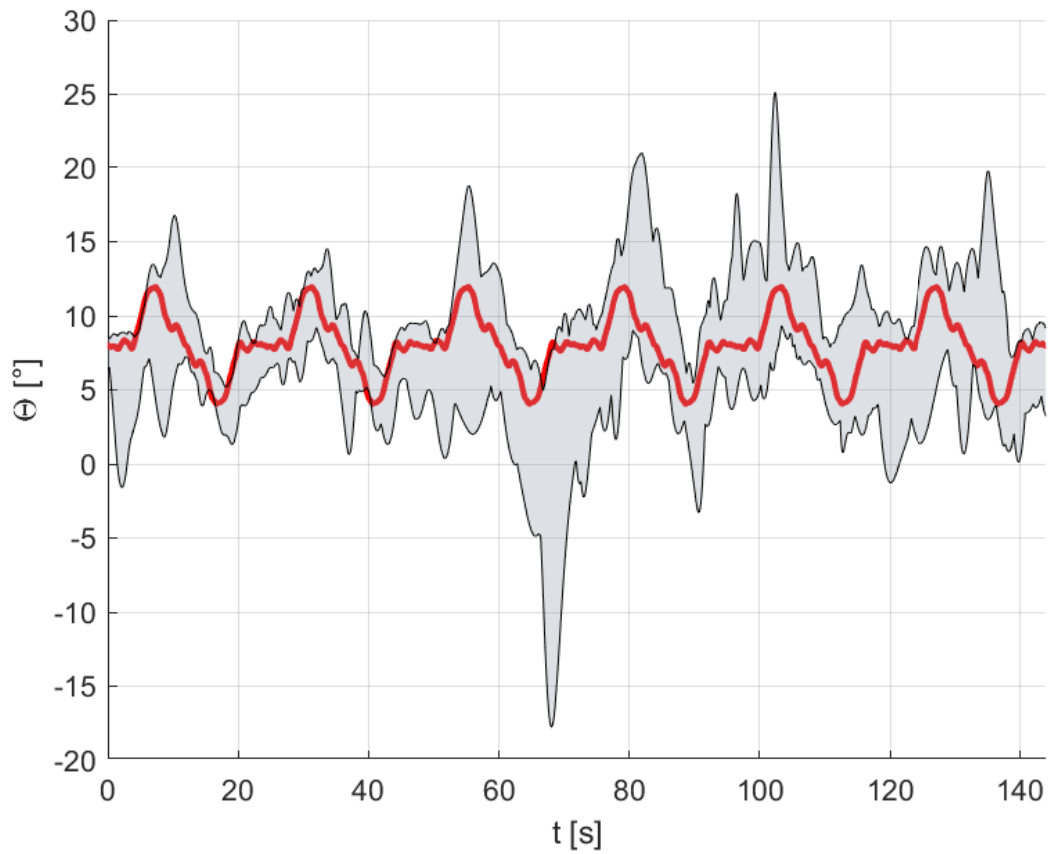


Slika 5.4: Varijanca broja ekstrema u signalu otklona palice po zadatku

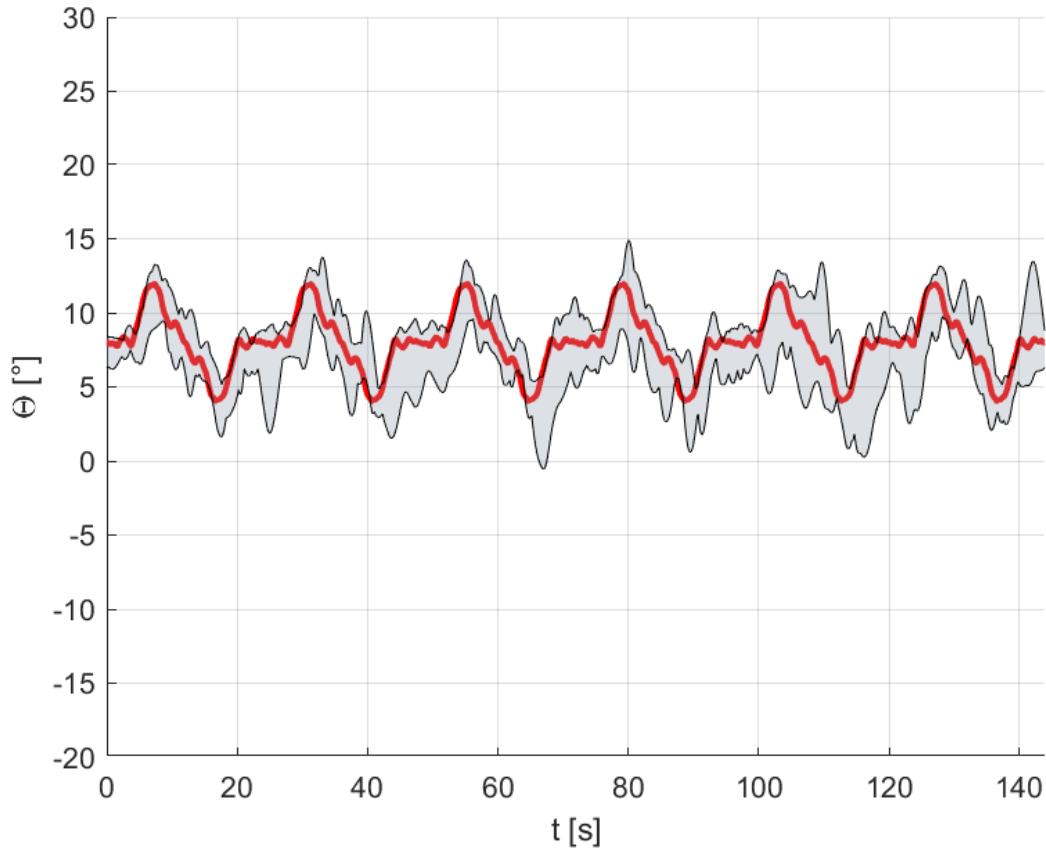
Jedan od pokazatelja točnosti izvođenja zadataka je i raspon ostvarenih kutova propinjanja. Na Slikama 5.5 i 5.6 redom su prikazani rasponi ostvarenih kutova propinjanja za drugi i treći zadatak. Crvenom linijom označen je prisilni signal, isti za sve kandidate. Za svaki trenutak simulacije, uzevši u obzir sve kandidate, izračunat je maksimalni i minimalni kut propinjanja. Vrijednosti su ucrtane na dijagramu i područje između te dvije linije označen je sivom bojom. Raspon u drugom zadatku značajno je širi od raspona u trećem, s nekoliko velikih ekstrema u vremenskom periodu djelovanja poremećaja. Razlika od prisilnog signala na nekoliko mjesta iznosi i preko  $10^\circ$ . Raspon u trećem zadatku dobro prati prisilni signal, najveće odstupanje iznosi oko  $5^\circ$ . Na oba dijagrama jasno



je vidljivo kašnjenje ekstrema signala kuta propinjanja u odnosu na ekstreme prisilnog signala.



Slika 5.5: Raspon ostvarenih kutova propinjanja za drugi zadatak

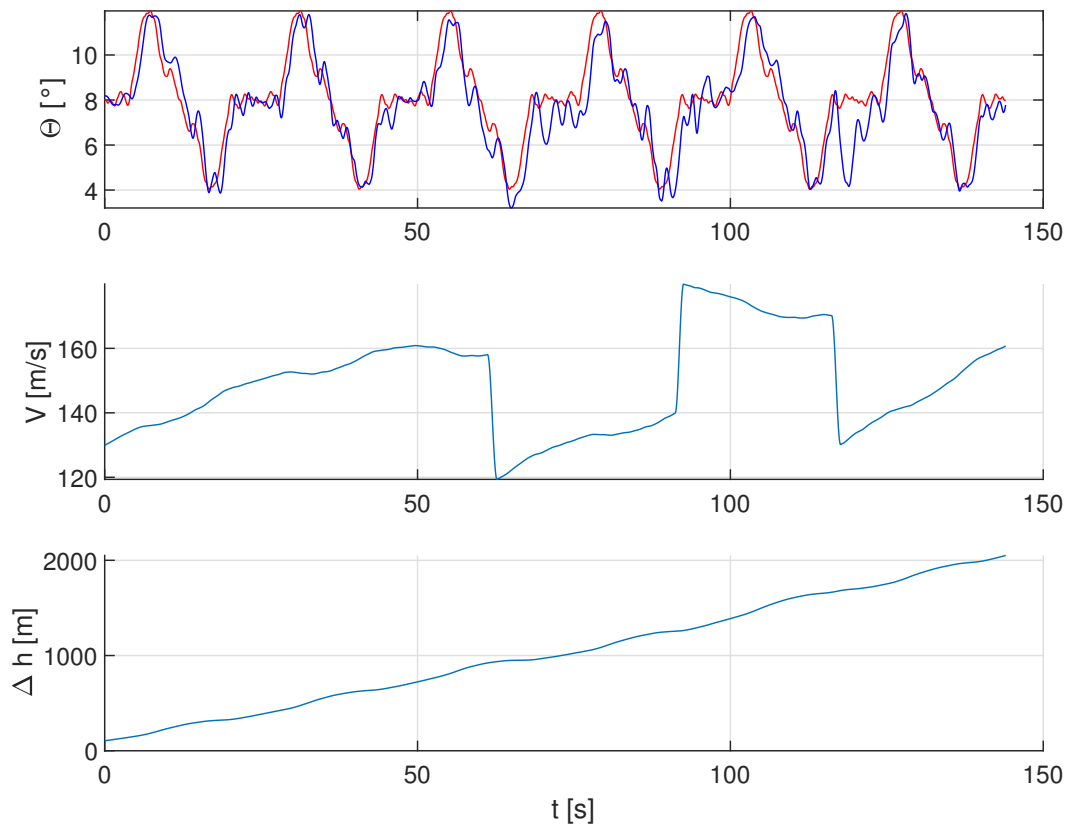


Slika 5.6: Raspon ostvarenih kutova propinjanja za treći zadatak

### 5.1.1. Analiza zadatka s iznenadnim poremećajem

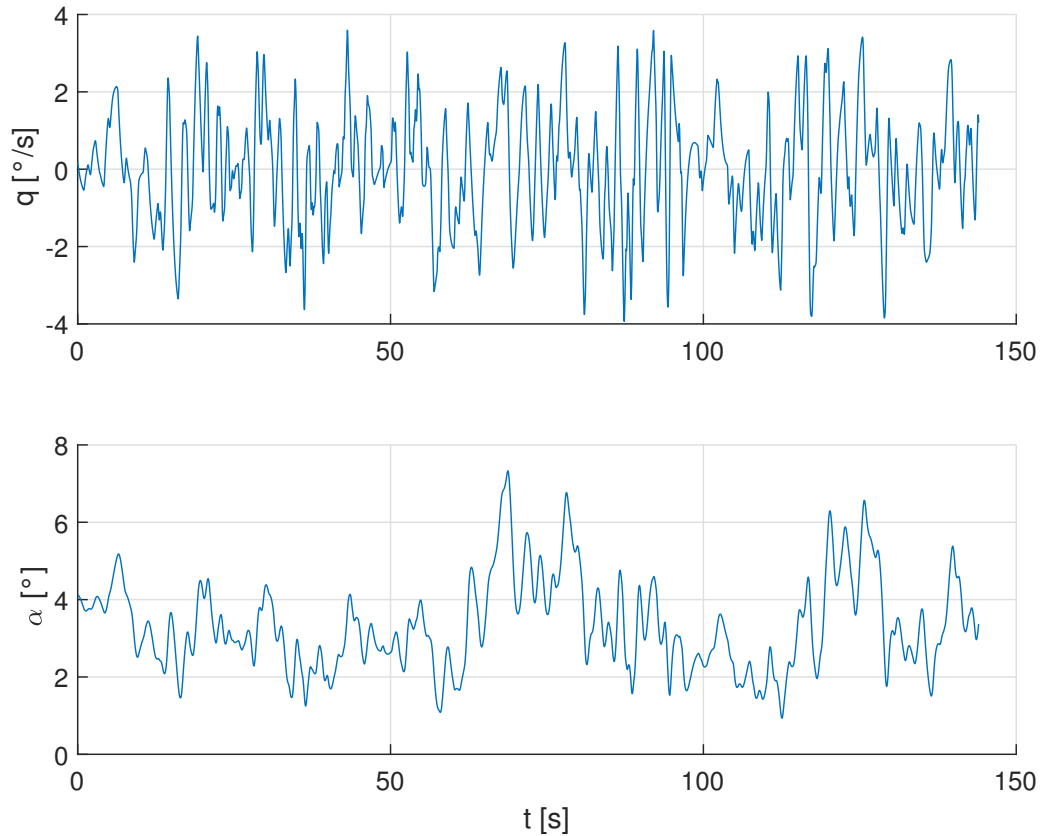
U nastavku će biti prikazane varijable leta za najtočnijeg i najmanje točnog kandidata po pojedinačnim letovima na kojima će biti pomnije analiziran njihov učinak. Na Slici 5.7 prikazan je prisilni signal i ostvareni kut propinjanja, aerodinamička brzina i promjena visine leta za drugi zadatak K9, najtočniji let s poremećajem u eksperimentu. Na dijagramu kuta propinjanja crveno je označen prisilni signal, a plavo ostvareni kut propinjanja. Kandidat je pratio prisilni signal s vrlo malim odstupanjem, osim oko 120. sekunde kada je na nekoliko sekundi došlo do značajnijeg smanjenja kuta propinjanja. Usporedbom s dijagramom aerodinamičke brzine jasno je da je upravo u tom trenutku došlo do naleta leđnog vjetra koji je smanjio aerodinamičku brzinu i uzrokovao odstu-

panje. Brzina vjetra ostaje konstantna do sljedećeg, čeonog naleta koji ukupnu brzinu vjetra u tom trenutku svodi na nulu. Trećim naletom vjetra brzina vjetra ponovno raste i zatim poprima konstantnu vrijednost do kraja zadatka. Kandidat je aerodinamičku brzinu dobro kontrolirao, s vidljivim mjestima naleta vjetra i pokušajima kompenzacije. S druge strane, promjena visina bila je značajna, s gotovo linearnom promjenom tijekom cijelog zadatka. Kandidat je zadatak završio s više nego udvostručenom početnom visinom.



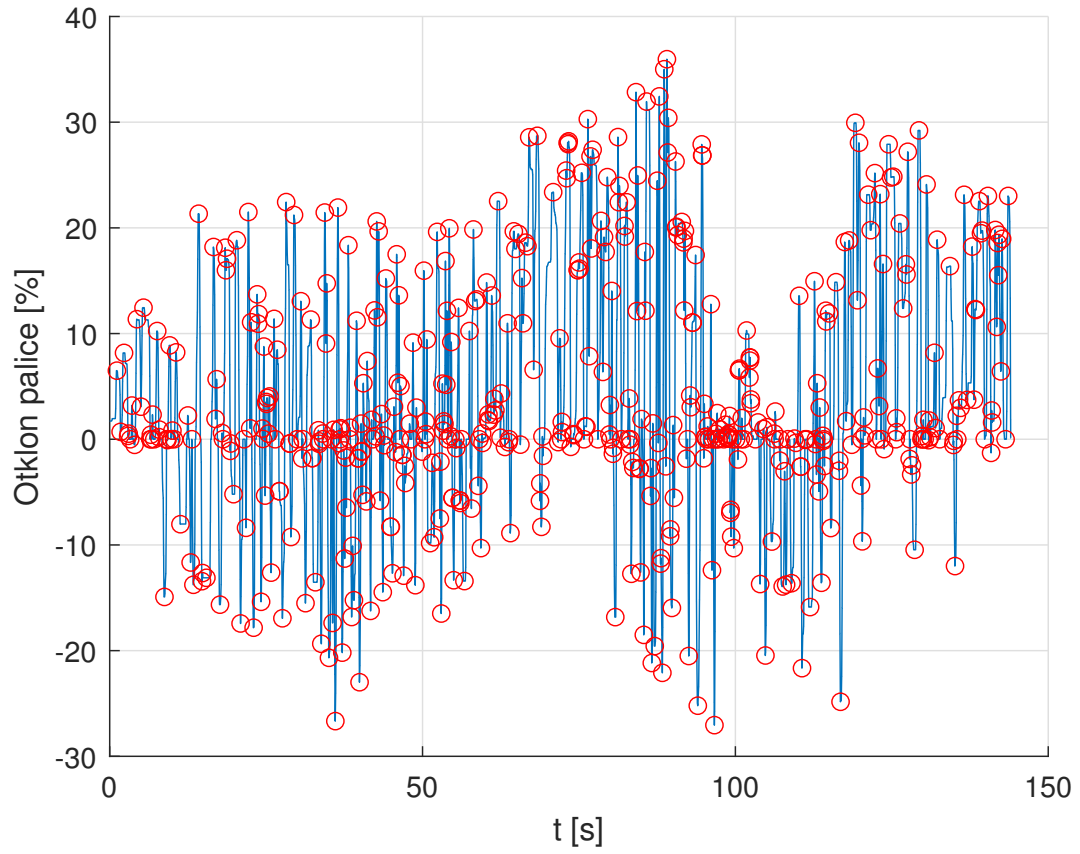
Slika 5.7: Prisilni (crvena linija) i ostvareni signal kuta propinjanja (plava linija), brzina i promjena visine za drugi zadatak K9

Na grafu kutne brzine propinjanja na Slici 5.8 vidljive su kratkotrajne česte promjene s maksimalnim vrijednostima od približno  $4^\circ$ . Napadni kut također pokazuje brze promjene, s jasnim većim ostvarenim vrijednostima netom nakon puhanja vjetra.

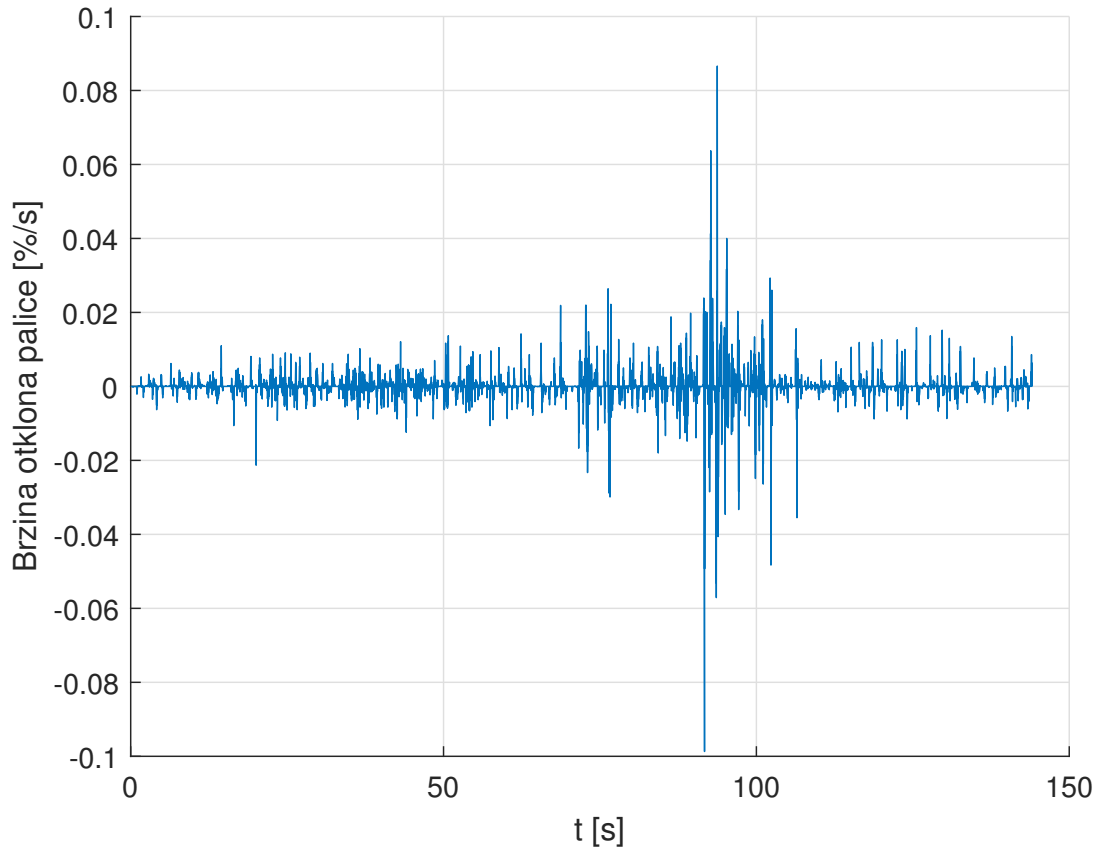


Slika 5.8: Kutna brzina propinjanja i napadni kut za drugi zadatak K9

Graf otklona upravljačke palice po longitudinalnoj osi s crveno označenim točkama lokalnih ekstrema prikazan je na Slici 5.9. Prikazani signal predočava iznimno brze i nagle pomake upravljačkom palicom. Puno ekstrema nalazi se točno na sredini hoda palice kada nema otklona, što može upućivati na drugačiju tehniku upravljanja u odnosu na K14. Ostvareni pomak palice u krajnjim slučajevima iznosi oko 30% maksimalnog hoda u oba smjera. Broj ekstrema koje je ostvario K9 iznosi 525. Deriviranjem signala otklona upravljačke palice po vremena dobivena je brzina otklona upravljačke palice, prikazana na Slici 5.10. Jasno je vidljiv ekstrem u trenutku poremećaja oko 90. sekunde.



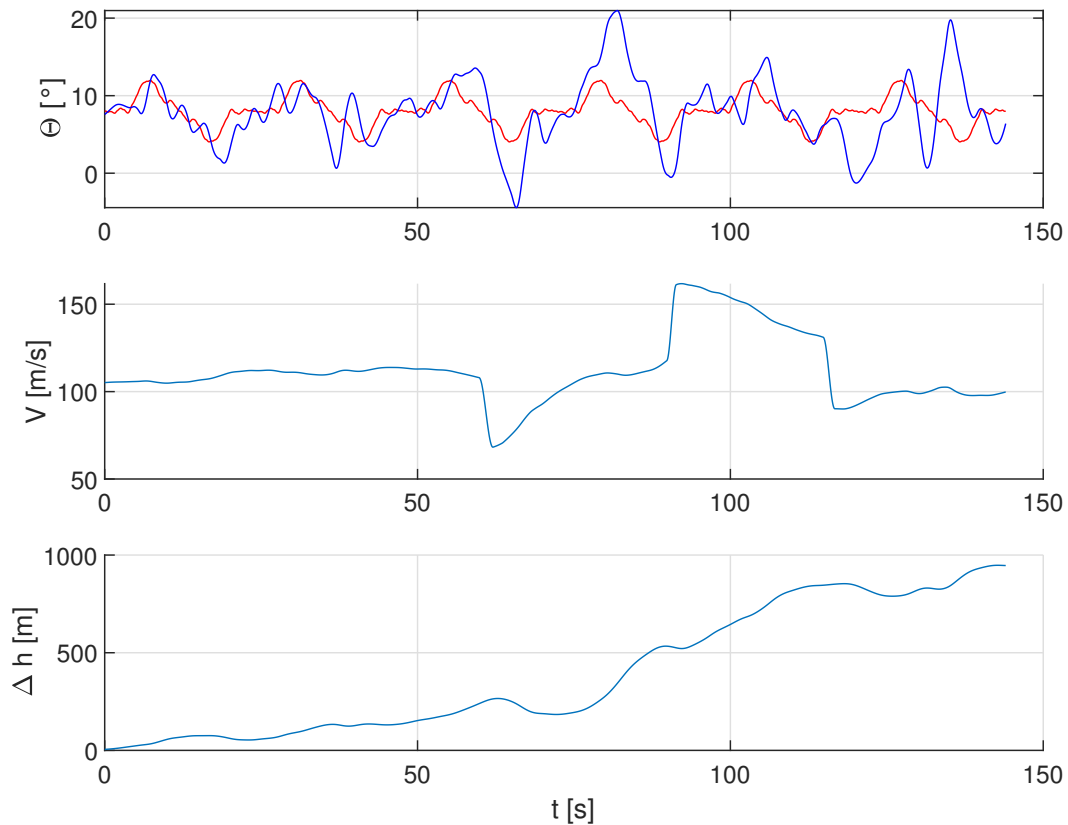
Slika 5.9: Otklon upravljačke palice za drugi zadatak K9



Slika 5.10: Brzina otklona upravljačke palice za drugi zadatak K9

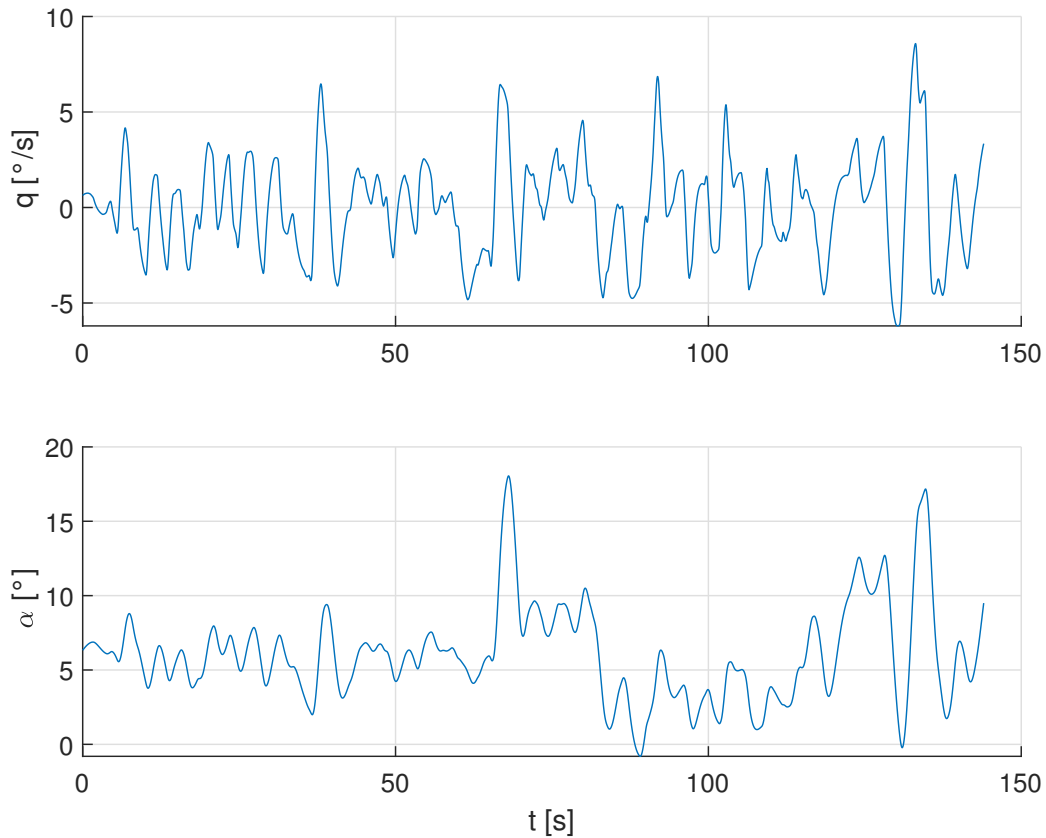
Za usporedbu s najboljim drugim zadatkom bit će analiziran i najmanje točan kojeg je odradio K14. Na Slici 5.11 ponovno su prikazani prisilni i ostvareni kut propinjanja, aerodinamička brzina i promjena visine leta. Iz prvog grafa jasno je da plava linija ostvarenog kuta propinjanja prati prisilni signal sa značajnim odstupanjem. Ostvareni kut propinjanja u drugoj polovici leta nalazi se unutar puno šireg raspona od prisilnog signala, po čemu je jasno da je kandidat zadavao prevelike pomake na upravljačku palicu. Usporedbom s vremenima poremećaja tijekom leta, moguće je zaključiti da kandidatu nije toliko problema stvarao vjetar koliko samo upravljanje zrakoplovom čak dok i nema pojave poremećaja. S druge strane, kandidat je pokazao sposobnost održavanja aerodinamičke brzine gotovo konstantnom, s brzim korekcijama uslijed promjene zbog leđnog ili čeonog vjetra. Kao i kod najboljeg kandidata promjena visine leta raste ti-

jekom cijelog zadatka, ali manjom brzinom kod K14. Konačna visina veća je za nešto manje od jednog kilometra u odnosu na početnu.



Slika 5.11: Prisilni (crvena linija) i ostvareni signal kuta propinjanja (plava linija), brzina i promjena visine za drugi zadatak K14

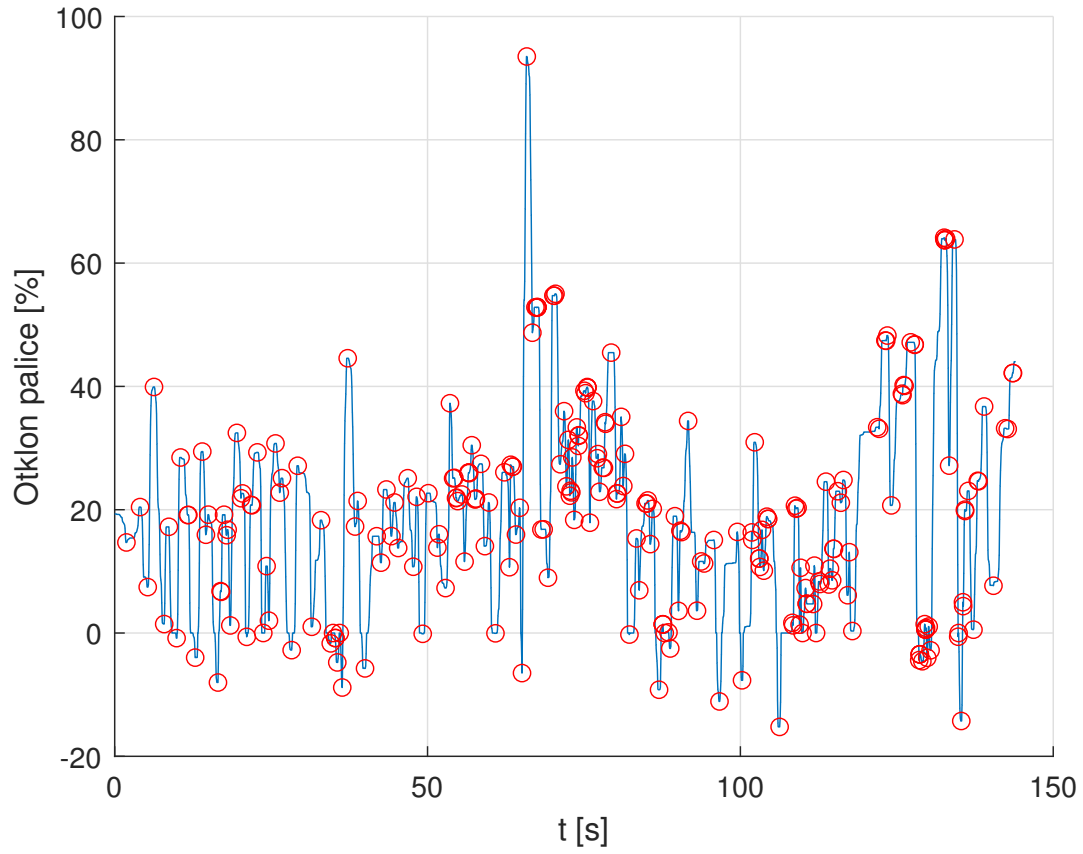
Zanimljiva je i usporedba kutne brzine propinjanja i napadnog kuta s najboljim kandidatom. U ovom slučaju kutna brzina propinjanja pokazuje sličan raspon, ali znatno manje učestale promjene što je vidljivo po manjem broju ekstrema signala. Sličan uzorak ponavlja se i na signalu ostvarenog napadnog kuta na Slici 5.12.



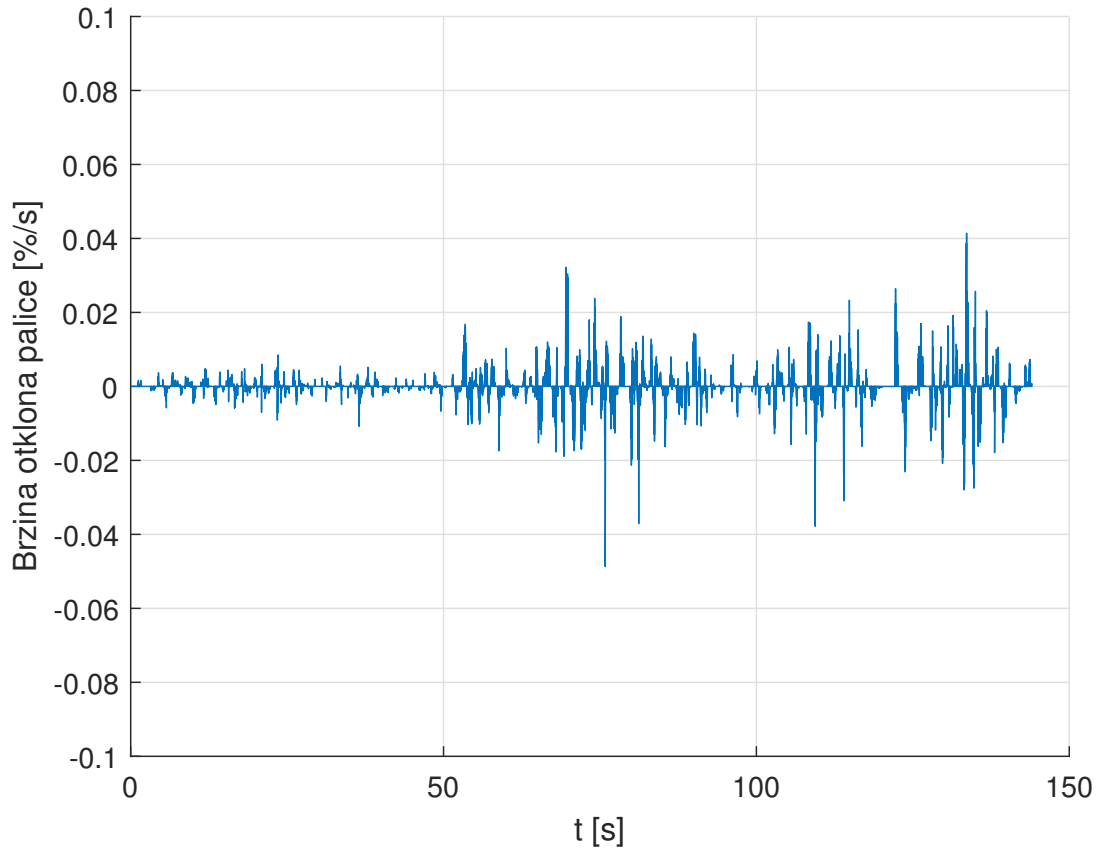
Slika 5.12: Kutna brzina propinjanja i napadni kut za drugi zadatak K14

Velika razlika u odnosu na najtočniji let primjetna je i na grafu otklona palice po longitudinalnoj osi prikazanom na Slici 5.13. Dok su promjene u letu K9 česte i relativno malog intenziteta, pomaci palice ovdje su rjeđi i veći. Rjeđi pomaci direktno odgovaraju broju lokalnih ekstrema signala pomaka palice koji u ovom slučaju iznose 257 za cijeli zadatak, manje od pola u odnosu na K9. Pomaci su mnogo intenzivniji u stranu smanjenja kuta propinjanja. U trenutku naleta prvog vjetra ostvaren je globalni ekstrem od preko 90% maksimalnog pomaka palice. Za drugi zadatak na Slici 5.14 prikazana je i brzina otklona palice. U usporedbi s K9, u prvoj polovici zadatka ekstremi poprimaju manje iznose. Usporedbom s trenucima djelovanja poremećaja moguće je zaključiti da se najveće vrijednosti ekstrema ne postižu u tim trenucima.





Slika 5.13: Otklon upravljačke palice za drugi zadatak K14

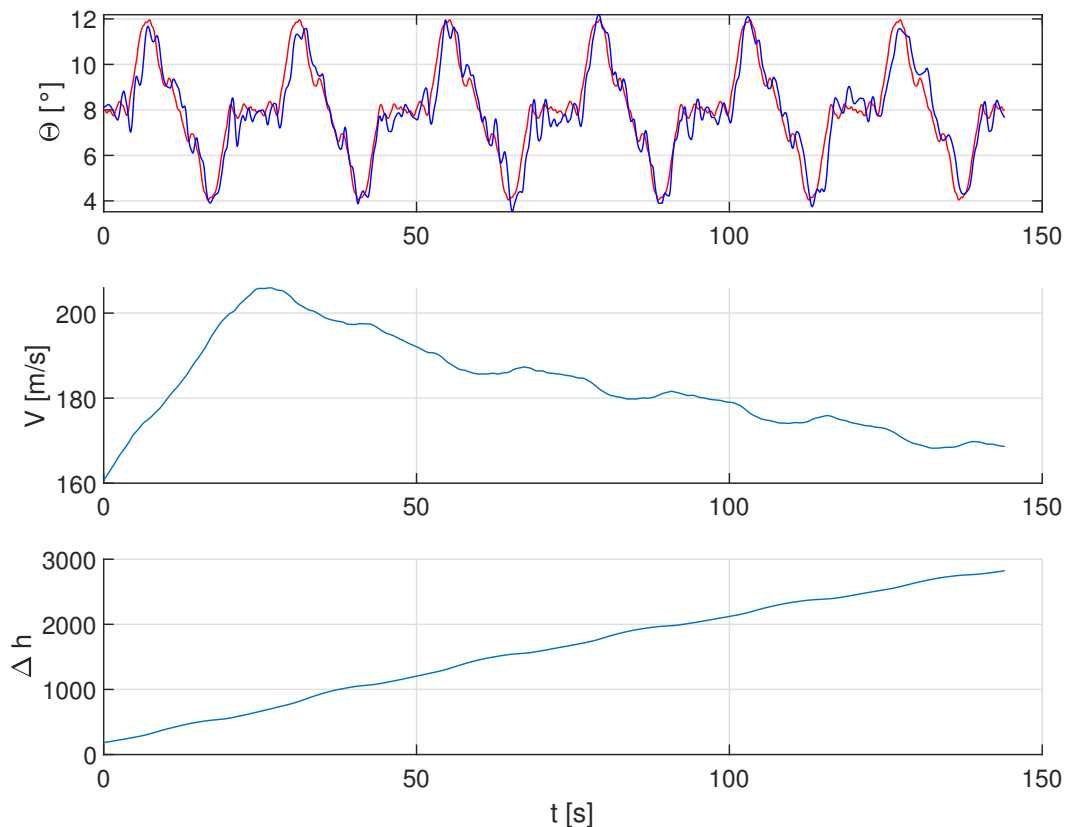


Slika 5.14: Brzina otklona upravljačke palice za drugi zadatak K14

### 5.1.2. Analiza zadatka bez iznenadnog poremećaja

Slijedi usporedba najtočnije i najmanje točno odrađenog trećeg zadatka. Prikazom nekih od već spomenutih varijabli bit će analiziran učinak kandidata u zadatku u kojem nije bilo poremećaja, ali kandidati nisu bili upoznati informacijom hoće li doći do pojave vjetra. Najtočniji i najnetočniji u trećem zadatku također su bili K9 i K14. U ovoj analizi od interesa su ostvareni kut propinjanja, aerodinamička brzina, promjena visine i otklon upravljačke palice. Ostale varijable bitno se ne razlikuju od već prikazanih. Na Slici 5.15 prikazane su navedene varijable za K9 u trećem zadatku. U općenito najtočnije odrađenom zadatku cijelog eksperimenta, vidljivo je vrlo točno poklapanje ostvarenog kuta propinjanja s prisilnim signalom tijekom cijelog leta. Aerodinamička

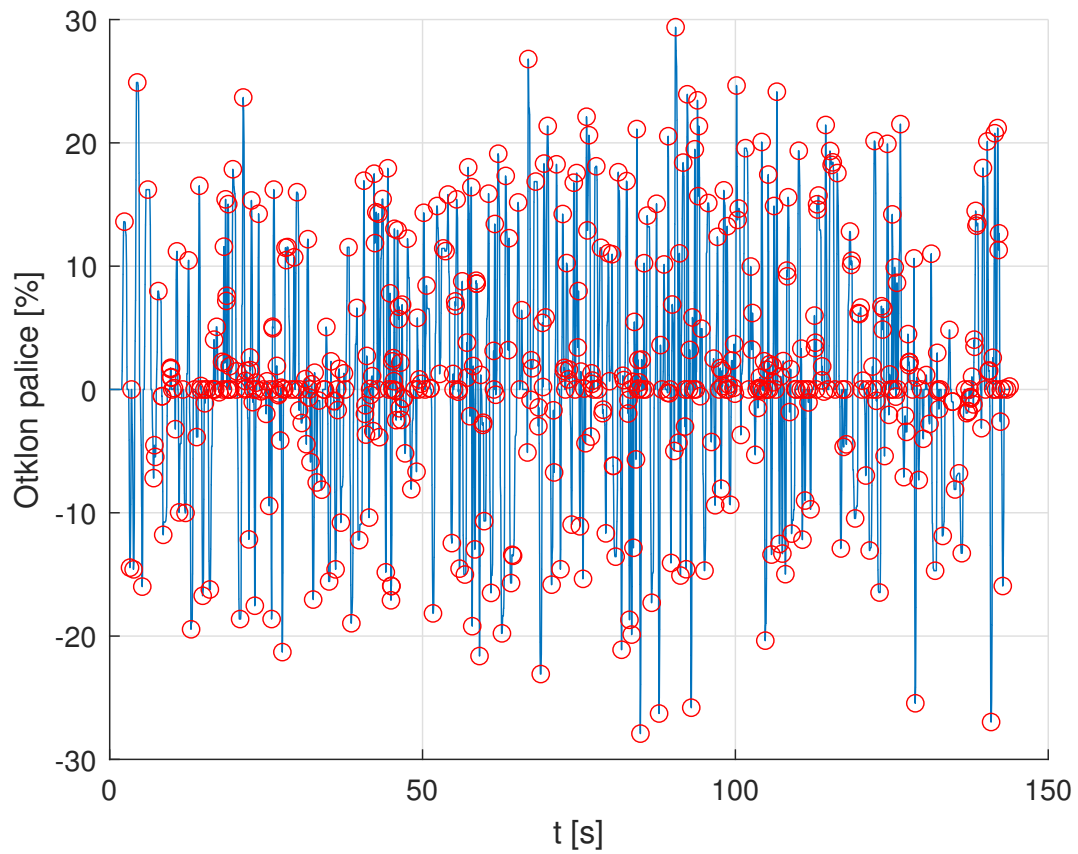
brzina pokazuje veliki rast do 26. sekunde kada počinje približno linearno opadati s manjim oscilacijama. Do kraja zadatka iznos brzine spustio se na vrijednost približnu početnoj. Kao i u drugom zadatku, kandidat približno konstantnim iznosom vertikalne brzine povećava visinu tijekom cijelog leta. U ovom zadatku promjena visine još je veća i iznosi oko tri kilometra.



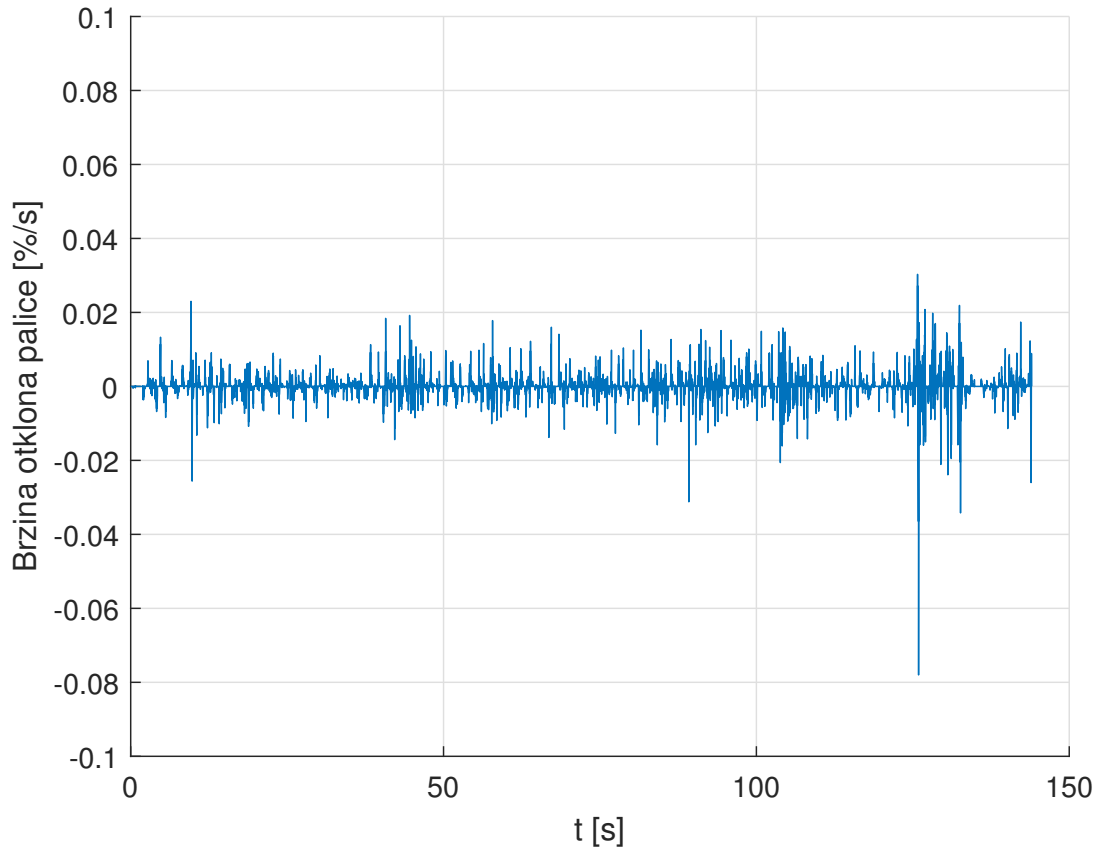
Slika 5.15: Kut propinjanja, brzina i promjena visine za treći zadatak K9

Signal pomaka palice i ostvareni broj ekstrema sličan je kao i u drugom zadatku. Pomaci kod K9 česti su i nalaze se u užem rasponu u odnosu na drugi zadatak. Kandidat je u trećem zadatku ostvario 551 ekstrem, 26 više nego u drugom zadatku. ekstremi su kao i u drugom zadatku česti u području gdje je otklon mali ili ga nema. Signal s označenim ekstremima prikazan je na Slici 5.16. Kao i u analizi prethodnog zadatka, prikazana je brzina otklona upravljačke palice. U odnosu na drugi zadatak, vrijednosti ekstrema sig-

nala ovdje su konzistentnije tijekom cijelog zadatka, što upućuje na upravljanje palicom pomacima ujednačene brzine.

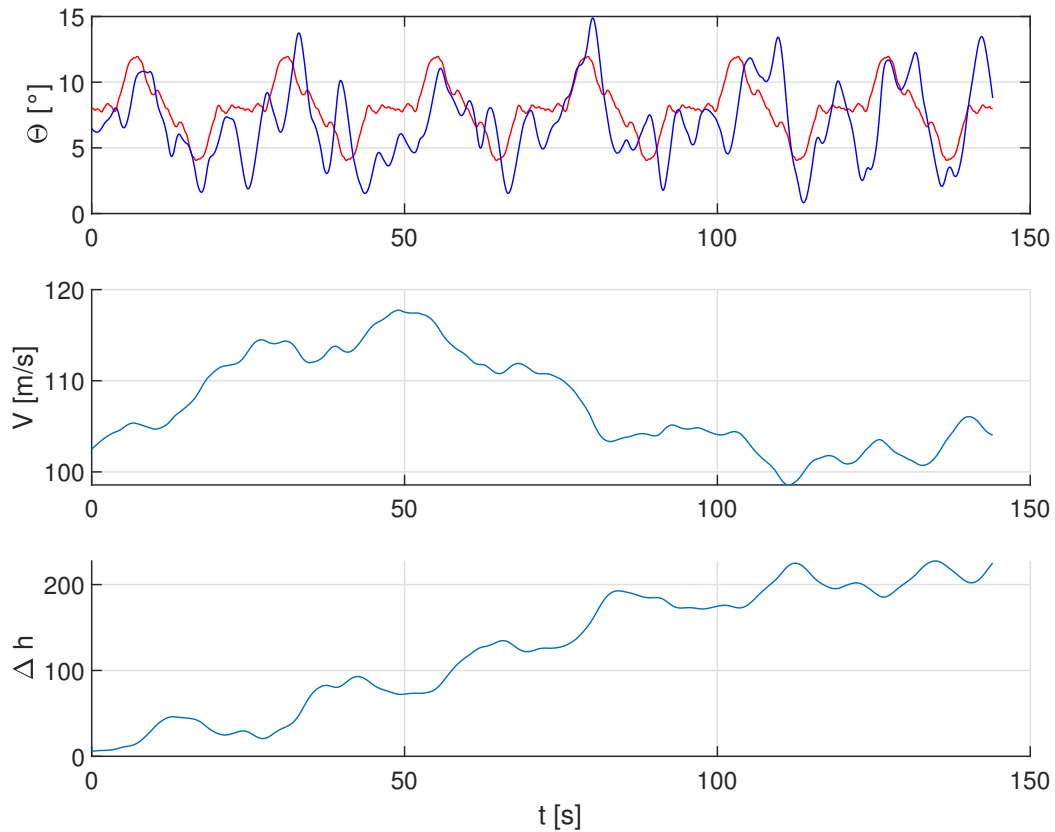


Slika 5.16: Otklon upravljačke palice za treći zadatak K9



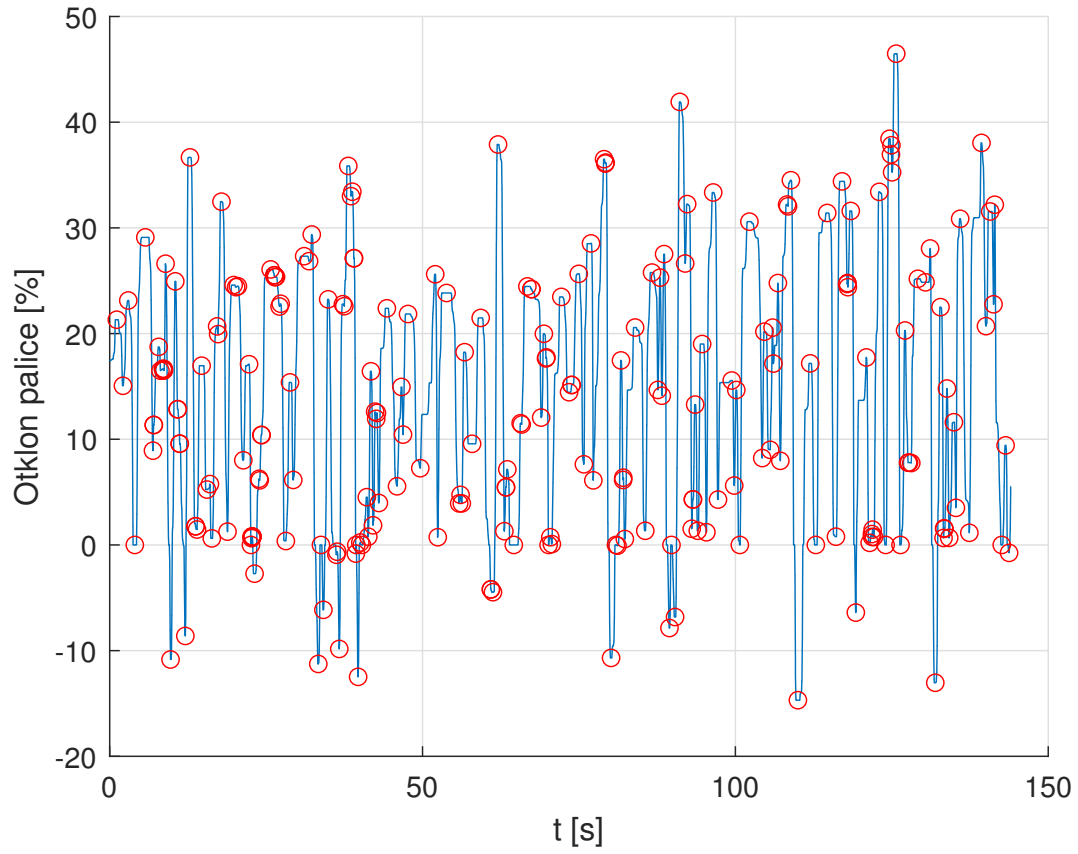
Slika 5.17: Brzina otklona upravljačke palice za treći zadatak K9

Na Slici 5.18 prikazane su varijable iz trećeg zadatka K14. Ostvareni signal prikazan plavom bojom pokazuje velika odstupanja tijekom cijelog vremenskog raspona, s već opisanim prevelikim kompenzacijama. Graf brzine pokazuje manje promjene, ali stalne oscilacije pa se može zaključiti da je kandidat bolje održavao brzinu u drugom zadatku. Promjena visine raste s vremenom, ali su vrijednosti vrlo male. U usporedbi s K9, K14 puno bolje održava konstantnu visinu.

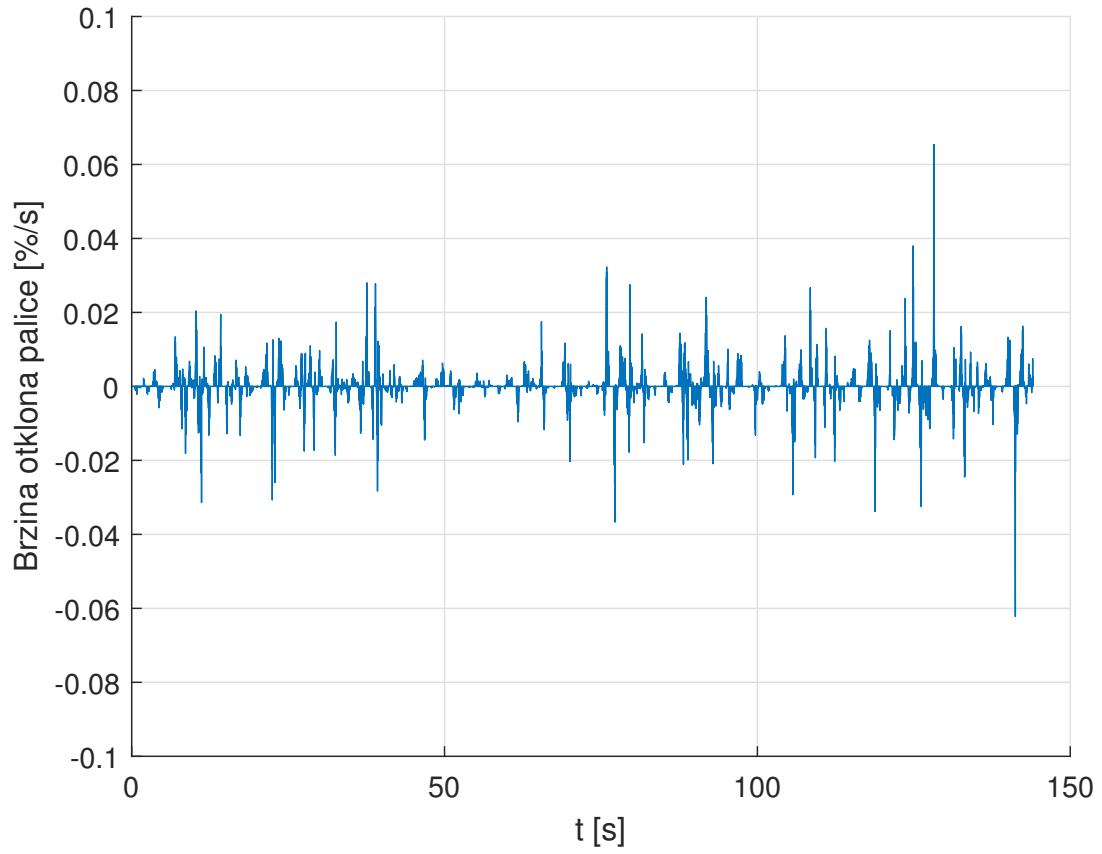


Slika 5.18: Kut propinjanja, brzina i promjena visine za treći zadatak K14

K14 ponovno pokazuje rjeđe otklone palice, većeg intenziteta u odnosu na K9. Tijekom trećeg zadatka ostvario je 232 ekstrema, za 25 manje nego u drugom zadatku. Ponovno su otkloni bili veći u pozitivnu stranu, ovog puta s tek 15 ekstrema u negativnom području. Signal s ucrtanim ekstremima prikazan je na Slici 5.19. Brzina otklona upravljačke palice za K14 prikazana je na Slici 5.20. Usporedbom brzina otklona palice K9 i K14 jasno je da K14 postiže znatno veće ekstreme uz rjeđe promjene brzine, na dijagramu predočene većim razmakom između ekstrema.



Slika 5.19: Otklon upravljačke palice za treći zadatak K14

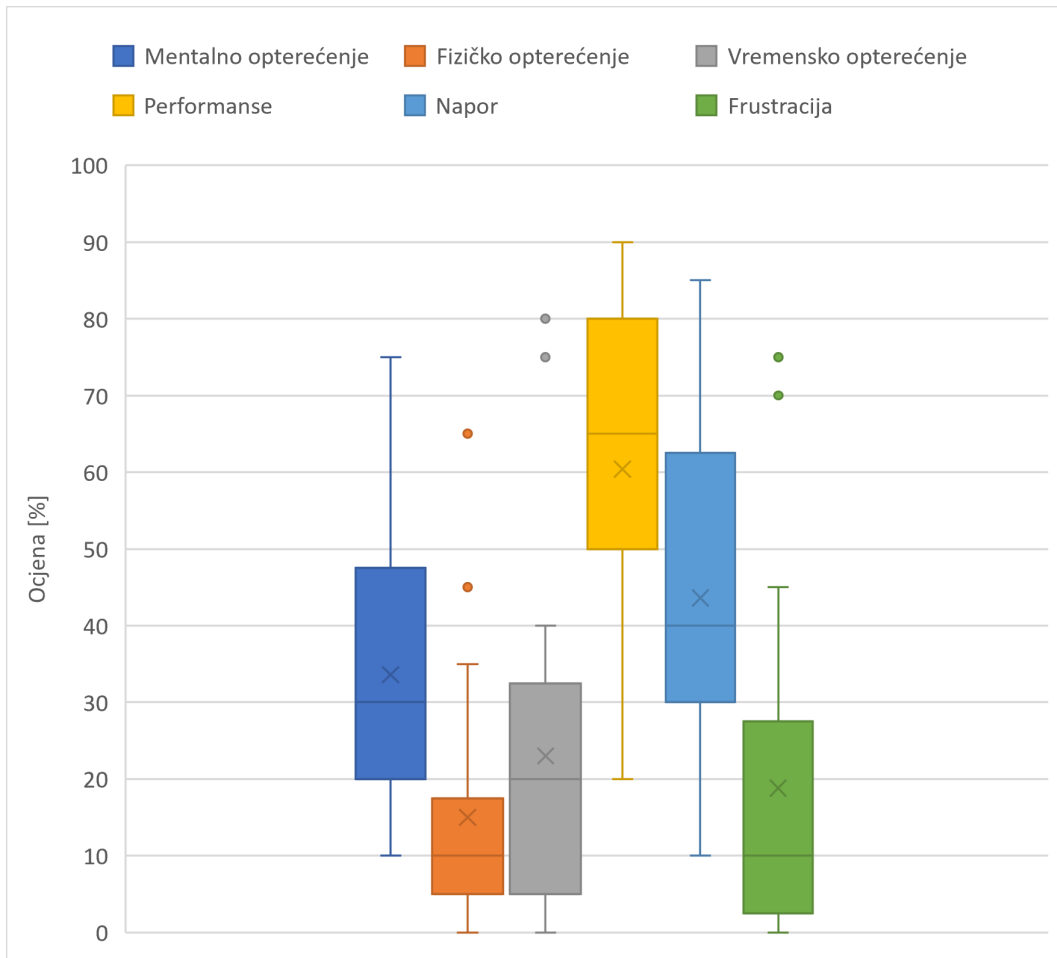


Slika 5.20: Brzina odklona upravljačke palice za treći zadatak K14



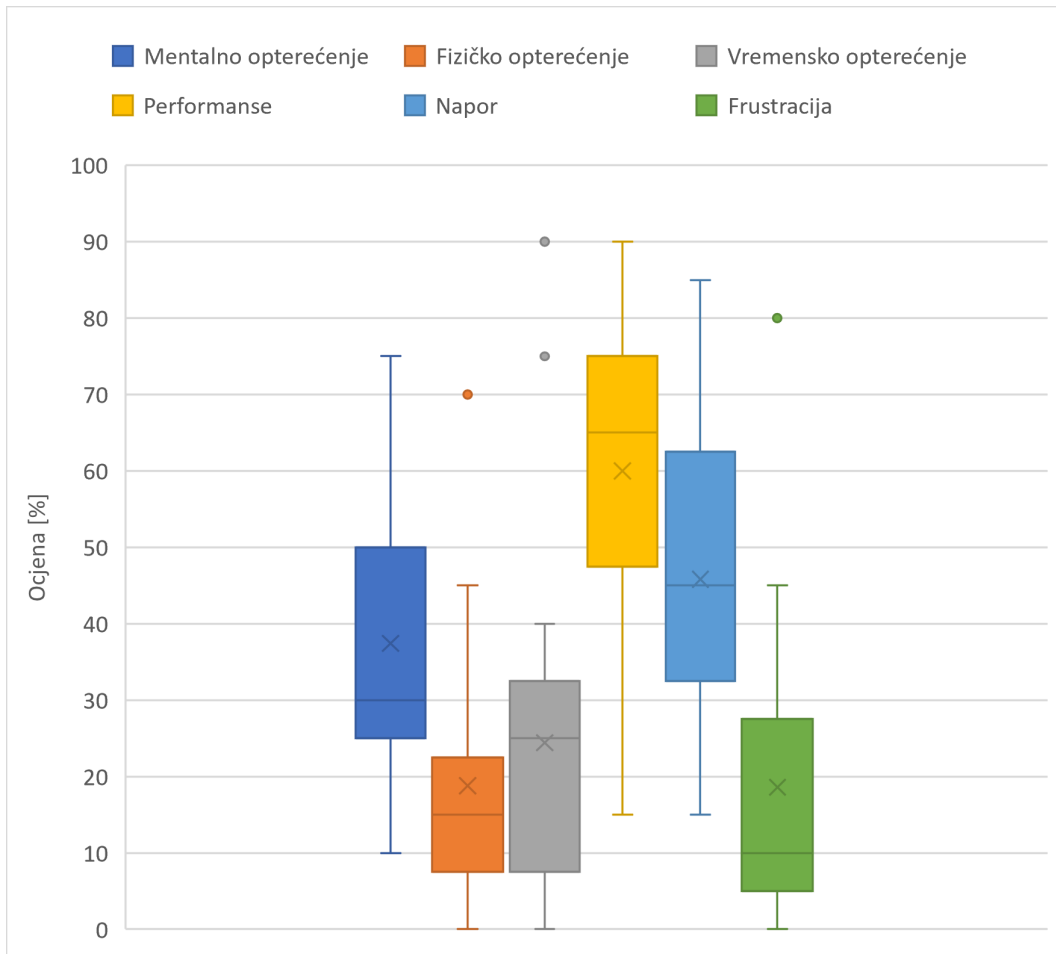
## 5.2. Subjektivna analiza rezultata

Nakon provedene objektivne analize, u ovom će poglavlju biti analizirani odgovori kandidata na NASA-TLX upitnike i njihove ocjene upravljivosti zrakoplova po ljestvici Cooper-Harper. Kandidati su na pitanja u NASA-TLX upitniku odgovarali ocjenama od 1 do 20, ali su one za analizu upeterostručene tako da budu svedene na ljestvicu od 1% do 100%. Za svaki zadatak prikazan je *box plot* s ocjenama na pitanja o mentalnom, fizičkom i vremenskom opterećenju te ostvarenim performansama, naporu i doživljenoj frustraciji. Na Slici 5.21 prikazani su odgovori na NASA-TLX upitnik za pravi zadatak. Ocjene mentalnog opterećenja poprimaju širok raspon, ali se većina odgovora nalazi u donjoj polovici ljestvice, između 20% i 48%. Fizičko opterećenje kod kandidata bilo je slabije izraženo, s većinom ocjena ispod 20%. Sličan raspon postižu i ocjene za vremensko opterećenje. Najbolje su ocijenjene ostvarene performanse, s većinom ocjena u gornjoj polovici ljestvice. Najširi raspon ocjena postignut je za pitanje o doživljenom naporu. Frustracija je većinom ocijenjena kao jako niska.



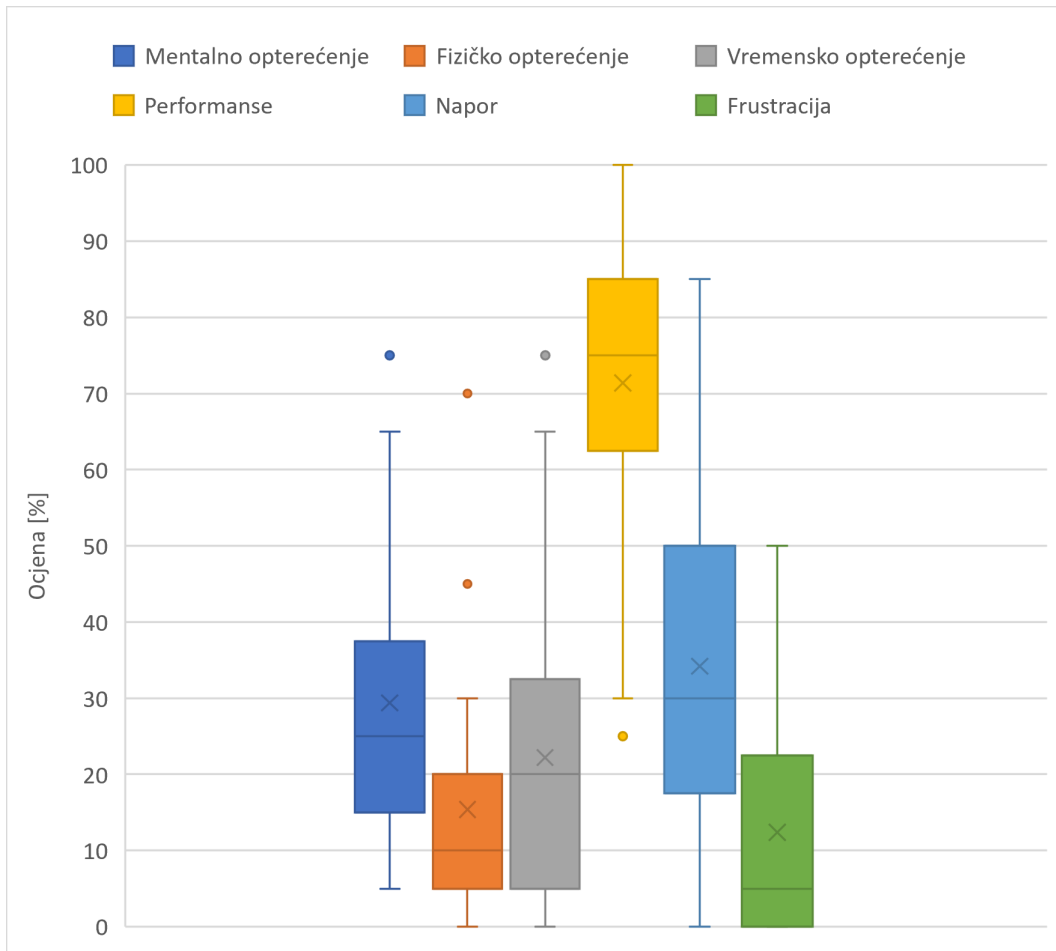
Slika 5.21: Odgovori na NASA-TLX upitnik za prvi zadatak

Ocjene u drugom zadatku vrlo su slične već prikazanim iz prvog zadatka, uz dvije bitne razlike. Mentalno opterećenje u zadatku s poremećajima ocijenjeno je kao veće u odnosu na prvi zadatak, što je prikazano pomakom plavog pravokutnika prema gore. Suprotna stvar vrijedi za ocjenu vlastitih performansi. Žuti pravokutnik koji predstavlja raspon polovice ocjena pomaknut je prema dolje.



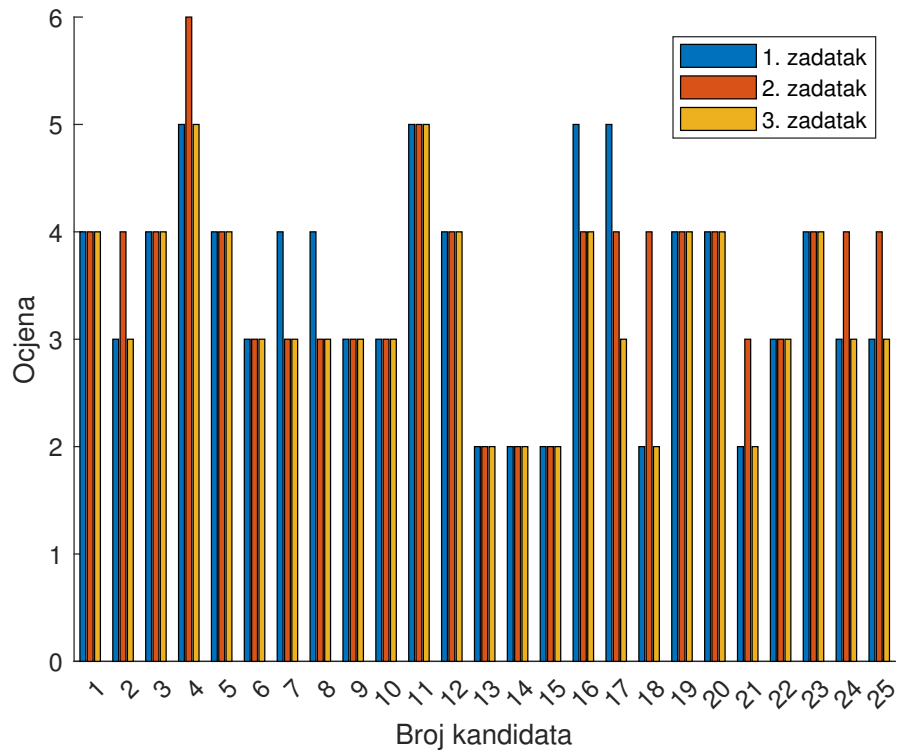
Slika 5.22: Odgovori na NASA-TLX upitnik za drugi zadatak

Treći zadatak ocijenjen je znatno drugačije od prva dva. Ocjene mentalnog opterećenja poprimaju najniže vrijednosti i poprimaju najuži raspon od sva tri zadatka. Vlastite performanse ocijenjene su bolje u odnosu na prvi zadatak, zajedno s nižim naporom i frustracijama. Ovi rezultati podržavaju već navedeni zaključak da su kandidati tijekom dva prethodna zadatka izvježbali traženu zadaću i svoj učinak u trećem pokušaju smatrali najboljim, uz manji mentalno opterećenje, napor i frustracije.

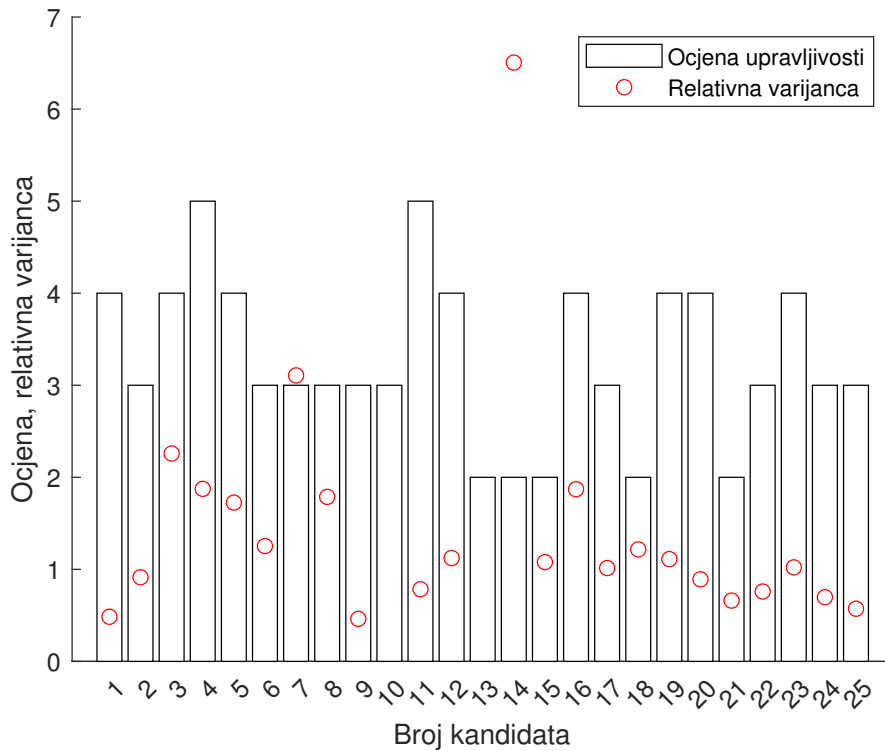


Slika 5.23: Odgovori na NASA-TLX upitnik za treći zadatak

Druga subjektivna procjena korištena u eksperimentu je ocjena kvalitete upravljanja modeliranog zrakoplova po Cooper-Harper ljestvici za svaki zadatak. Ocjene svakog kandidata po zadatku prikazane su na Slici 5.24. Najbolja ostvarena ocjena je 2, koju je dalo petero kandidata. Najlošija ocjena je 6 kojom je samo jedan kandidat ocijenio svoj drugi let. Srednja ocjena svih kandidata iznosi 3.45, koja se po ljestvici nalazi između ocjena za minimalnu i srednju potrebnu kompenzaciju za ostvarivanje željenih performansi s malim nedostacima u modelu zrakoplova. Moguće je uspostaviti izravnu korelaciju subjektivne ocjene kvalitete upravljanja po ljestvici Cooper-Harper i varijance pogreške [25] za što je potrebna provedba detaljnih analiza i opširnijih testova.

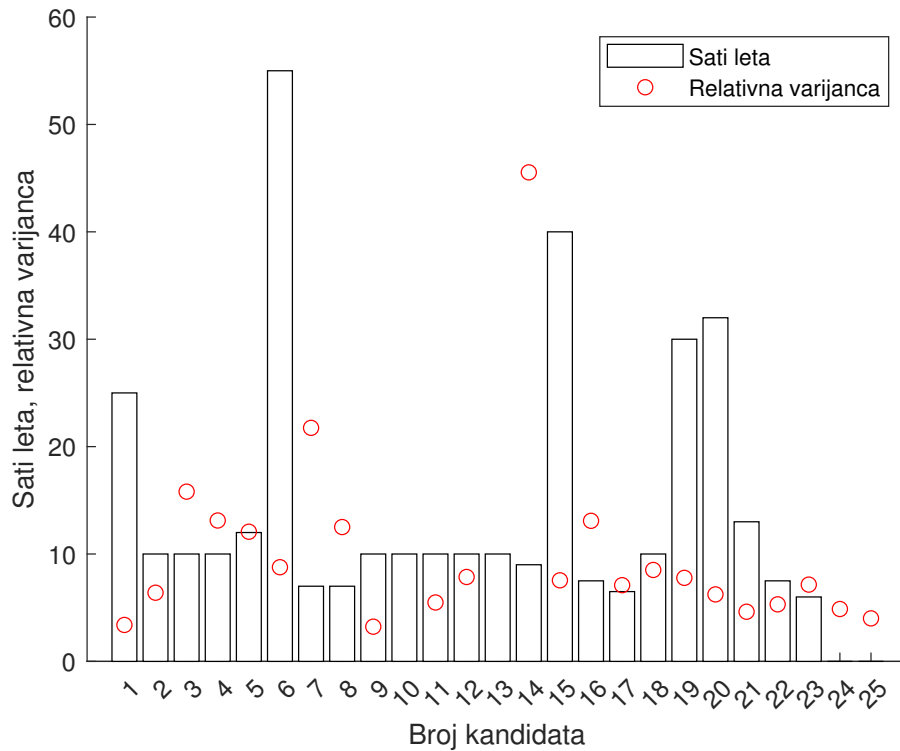


Slika 5.24: Ocjene upravljivosti po ljestvici Cooper-Harper za svaki zadatak



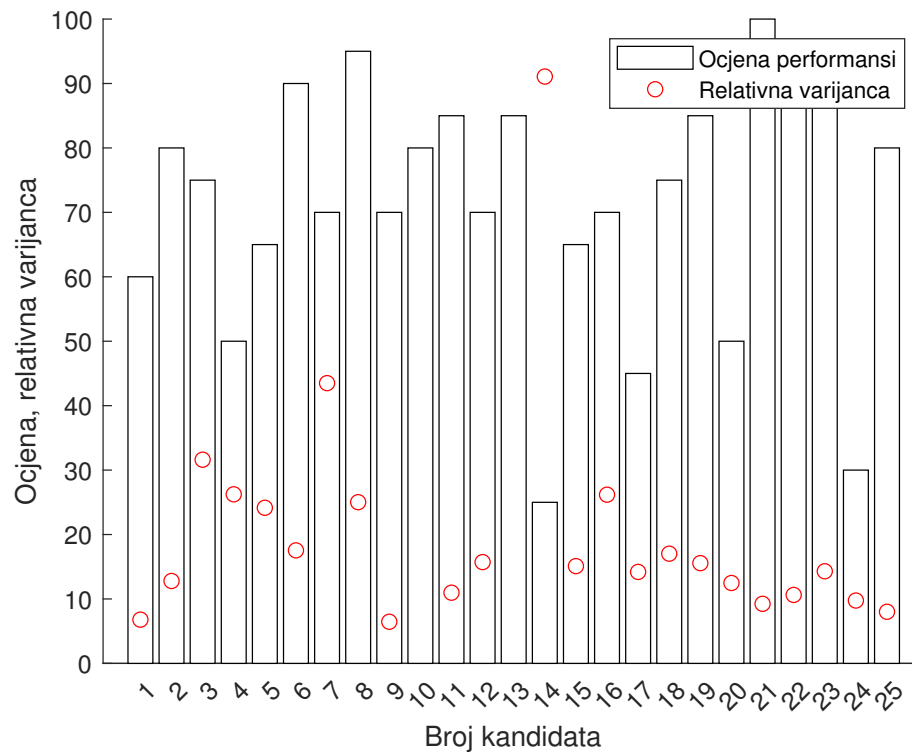
Slika 5.25: Usporedba ocjena upravljivosti po ljestvici Cooper-Harper i relativne varijance pogreške za svakog kandidata

Uspoređeno je iskustvo u letu na pravom zrakoplovu s ostvarenom varijancom pogreške u trećem zadatku. Na Slici 5.26 prikazana je usporedba prijavljenog broja sati leta na zrakoplovu i ostvarene varijance pogreške za svakog kandidata. Veće iskustvo na pravom zrakoplovu ne nije uvijek pokazalo bolji učinak u zadatku. K1, najbolji po ukupno ostvarenoj varijanci pogreške u sva tri zadatka nalazi se u vrhu po iskustvu, ali K9, najtočniji zasebno u drugom i trećem zadatku, među kandidatima je s najmanje iskustva. Iz toga je moguće zaključiti da u postizanju što veće točnosti nije zaslužna samo iskustvo, već i talent pojedinog kandidata.



Slika 5.26: Usporedba iskustva na zrakoplovu i relativne varijance pogreške

Za procjenu samokritičnosti kandidata za treći zadatak napravljena je usporedba ostvarene varijance pogreške i ocjene performansi za taj zadatak u NASA-TLX upitniku. Na Slici 5.27 prikazana je usporedba ocjena i varijanci pogreške po kandidatu. Visoka ocjena i niska relativna varijanca pogreške ili obratno označavaju dobru samokritičnost kandidata. Samo u slučaju ranije analiziranog K14 relativna varijanca viša je od ocjene performansi. Njegova varijanca pogreške bila je iznimno velika, a svoj uspjeh procijenio je ocjenom od 25%, najmanje od svih kandidata što znači da je bio svjestan ostvarene točnosti.

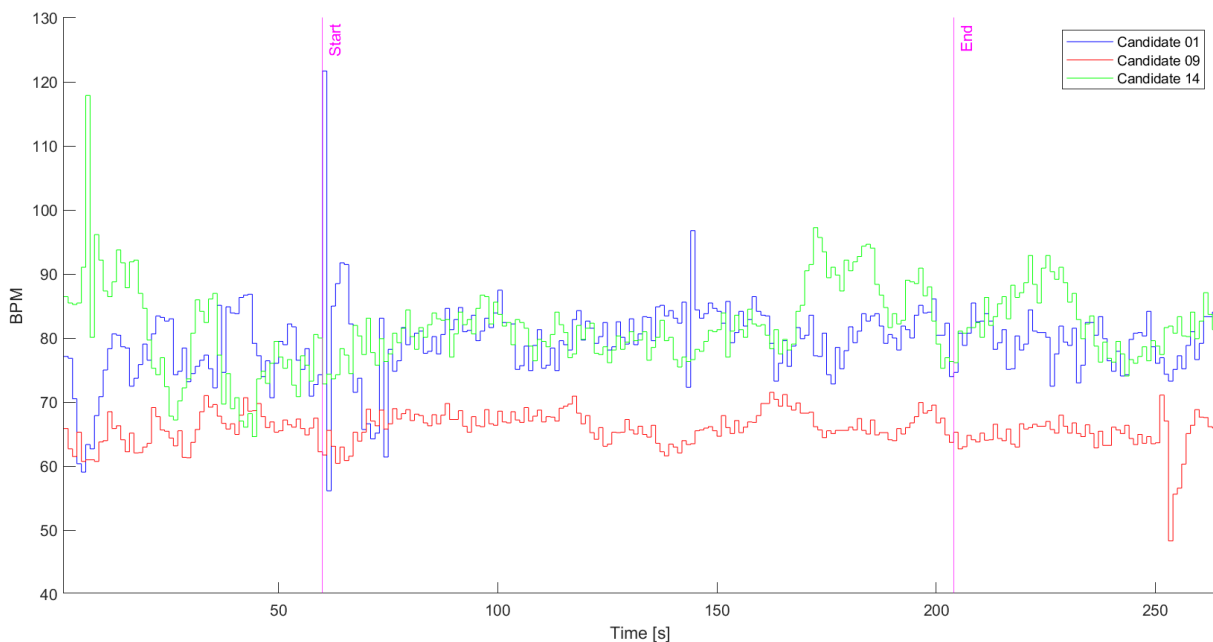


Slika 5.27: Usporedba ocjene ostvarenih performansi i relativne varijance pogreške



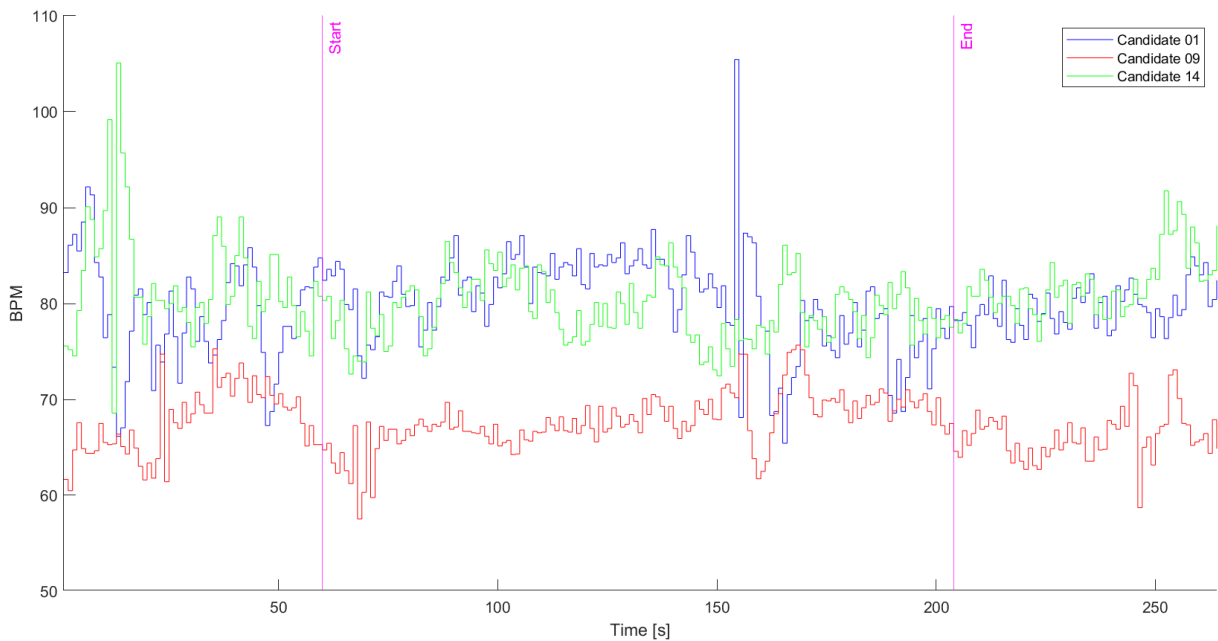
### 5.3. Analiza fizioloških podataka

Na Slici 5.28 prikazane su brzine otkucaja srca za K1, K9 i K14 tijekom drugog zadatka. K1 i K9 kandidati su s vrlo niskom ostvarenom varijancom pogreške, dok je K14 ostvario vrlo visoku varijancu pogreške u zadaći praćenja kuta propinjanja. Vertikalne ljubičaste linije označavaju vremena početka i kraja zadatka. K1 i K14 tijekom izvođenja zadatka imaju sličan broj otkucaja srca te srednja vrijednost za njih iznosi oko 80 otkucaja po minuti. K9 tijekom zadatka imao je znatno niži broj otkucaja, srednja vrijednost njegovih otkucaja iznosi oko 65 otkucaja po minuti. Nisu utvrđene značajne promjene broja otkucaja u trenucima poremećaja.



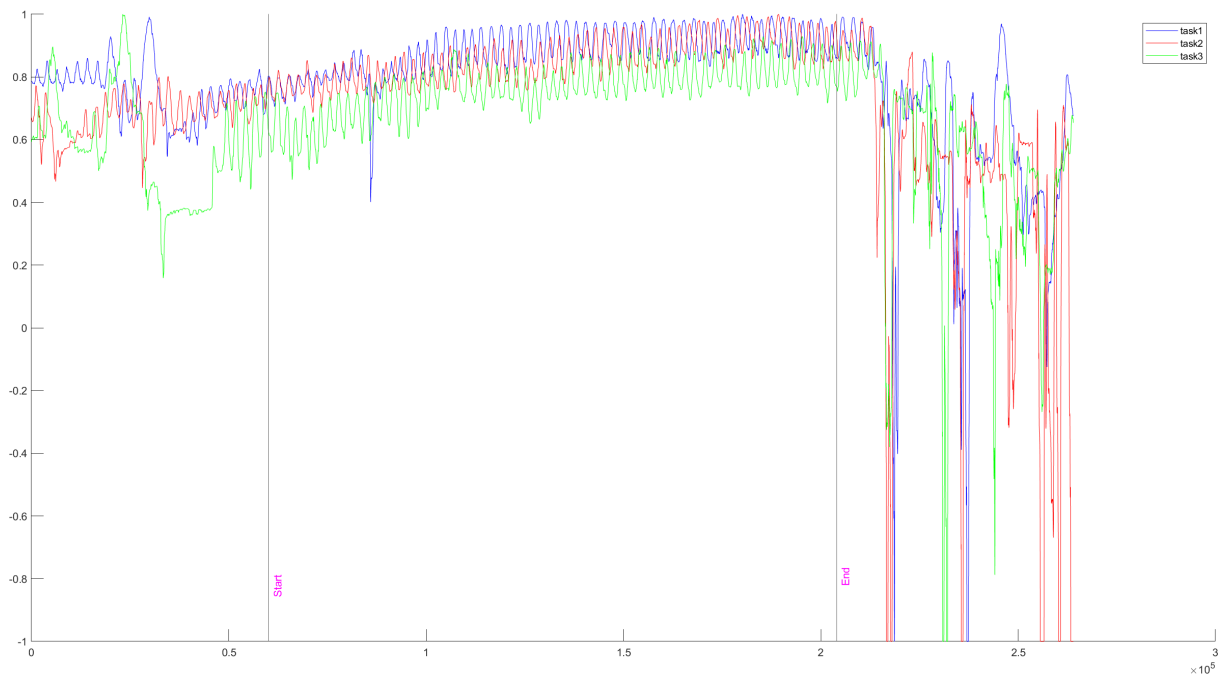
Slika 5.28: Usporedba brzine otkucaja srca (BPM) za drugi zadatak K1, K9 i K14

Brzina otkucaja srca za iste kandidate u trećem zadatku prikazana je na Slici 5.29. U usporedbi s prethodnim zadatkom, brzina otkucaja za sva tri kandidata poprima veći raspon tijekom izvođenja zadatka. K9 ponovno ima znatno niži srednji broj otkucaja. Bitno je naglasiti da iznenadne velike promjene na dijagramu zbog osjetljivosti mjerne opreme mogu biti posljedica naglih pokreta pri kojima je došlo do pomicanja elektrode ili drugih greški u signalu.



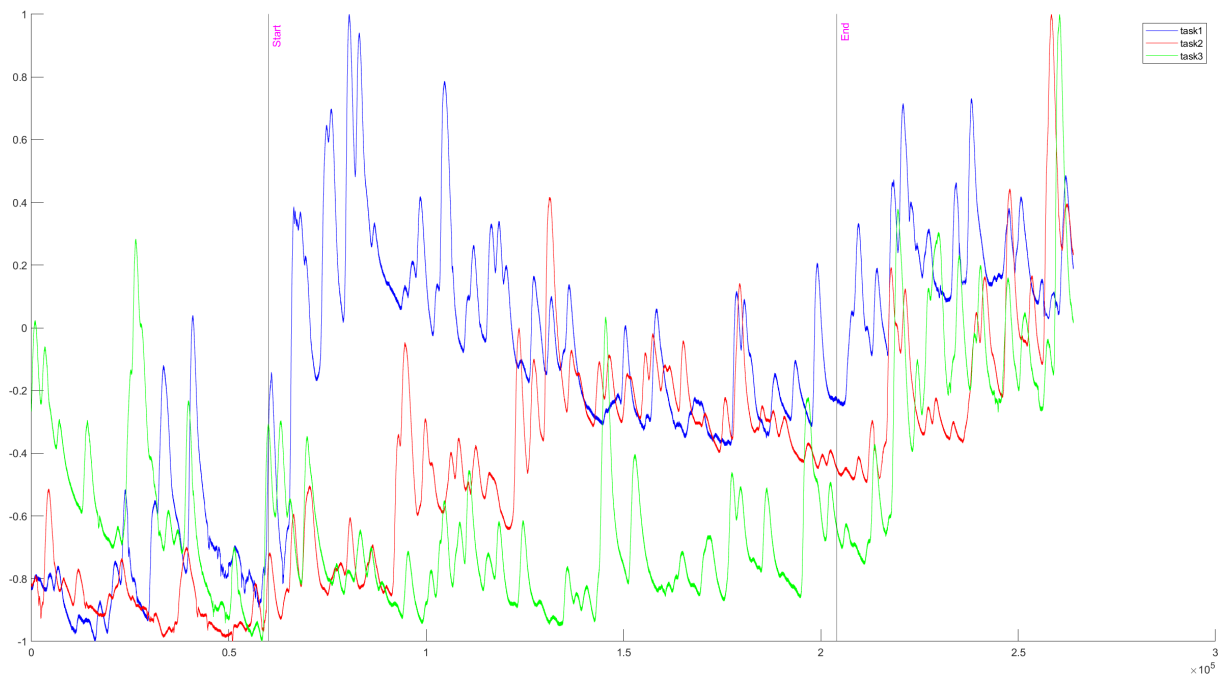
Slika 5.29: Usporedba brzine otkucaja srca (BPM) za treći zadatak K1, K9 i K14

Za K1, kandidata s ukupno najmanjom varijancom u sva tri zadatka, prikazan je intenzitet disanja za svaki zadatak na Slici 5.30. Na apscisi se nalazi vrijeme simulacije u milisekundama, dok je na ordinati mjera intenziteta disanja. Vertikalne linije označavaju vremena početka i kraja zadatka. U periodu trajanja zadatka intenzitet disanja poprima najuži raspon, što upućuje na to da je kandidat bio koncentriran tijekom izvođenja zadataka. Najveće srednje vrijednosti intenziteta disanja postignute su u prvom zadatku. Slične vrijednosti ostvarene su i u drugom zadatku, dok je srednja vrijednost u trećem niža. Ista pojava zapažena je na dijagramima intenziteta disanja za preostala dva navedena kandidata. Takav rezultat slaže se s iznesenom tvrdnjom da je srednja subjektivna ocjena napora bila najmanja u trećem zadatku.



Slika 5.30: Usporedba intenziteta disanja K1 za sva tri zadatka

Zadnji razmatrani fiziološki parametar je električna vodljivost kože kojom se mjeri intenzitet znojenja kandidata. Dijagram vodljivosti kože za K1 za sva tri zadatka prikazan je na Slici 5.31. Na apscisi se ponovno nalazi vrijeme u milisekundama, dok je na ordinati mjera električne vodljivosti kože. Na početku prvog zadatka jasno je vidljivo povećanje vodljivosti i ono ukratko nakon početka zadatka poprima općenito najveće vrijednosti i zatim se s vremenom smanjuje. Znojenje je najmanjeg intenziteta u trećem zadatku, što pokazuje da se uvježbavanjem zadatka kandidatu razina znojenja smanjila.



Slika 5.31: Usporedba električne vodljivosti kože K1 za sva tri zadatka

## 6 | Zaključak

U radu je proveden eksperiment za analizu opterećenja pilota na simulatoru leta. Na početku je dan pregled opterećenja pilota u modernim borbenim zrakoplovima i promjena opterećenja razvojem zrakoplovstva. Opisan je sustav za praćenje stanja posade i njegovo trenutno stanje razvoja. Zatim je detaljno opisan sustav vizualizacije i prikaza instrumenata na istraživačkom simulatoru leta, zajedno s korištenim modelom zrakoplova. Za provedbu eksperimenta definirana su tri zadatka praćenja kuta propinjanja. U prvom zadatku nije bilo poremećaja, dok je u drugom uveden poremećaj u obliku leđnog ili čeonog vjetra. Treći zadatak bio je identičan prvom, uz naznaku da kandidati nisu bili upućeni hoće li doći do pojave poremećaja. Od ukupno 25 kandidata, 23 su studenti smjera Aeronautika Fakulteta prometnih znanosti, a dvoje su stariji kandidati bez pilotskog iskustva. Opisana je korištena oprema i postupak mjerenja fizioloških parametara i praćenje pogleda kandidata. Uz zadatke na simulatoru leta, kandidati su rješavali i generički n-back zadatak za procjenu radne memorije, no rezultati tog ispitivanja nisu prikazani u ovom radu. Na temelju prikupljenih podataka o letu i odgovora na NASA-TLX upitnik i ocjenu upravljivosti po Cooper-Harper ljestvici svakog kandidata, provedena je objektivna i subjektivna analiza opterećenja i učinka. U objektivnoj analizi izračunata je varijanca pogreške razlike prisilnog i ostvarenog kuta propinjanja. Budući da je treći zadatak isti kao prvi i bio je općenito najtočnije odrađen, a drugi je uključivao poremećaj, nije provedena detaljna analiza prvog zadatka. Temeljem tog rezultata određen su kandidati s najmanjom i najvećom varijancom pogreške za drugi i treći zadatak. Za dva kandidata prikazano je odstupanje od prisilnog signala kuta propinjanja, aerodinamička brzina i promjena visine. Određen je broj ekstrema u pomaku

i analizirana je brzina pomaka upravljačke palice. U subjektivnoj analizi prikazani su odgovori na NASA-TLX upitnik i ocjene upravljivosti za sve kandidate. Varijanca pogreške uspoređena je s ocjenama upravljivosti i brojem sati leta za treći zadatak svakog kandidata. Uspoređena je i ocjena vlastitih performansi po NASA-TLX upitniku i varijanca pogreške u trećem zadatku svakog kandidata. Pojedini prikupljeni podaci nisu razmatrani, uključujući subjektivne i objektivne ocjene performansi kandidata za generički n-back zadatak i podatke o usmjerenosti pogleda jer analiza tih podataka izlazi iz okvira ovog diplomskog rada.

Nakon provedenog eksperimenta i analiziranih subjektivnih i objektivnih rezultata izvedeni su sljedeći zaključci i zapažanja.

- Eksperiment je proveden na velikom uzorku kandidata i unatoč manjim tehničkim poteškoćama, prikupljeni su kvalitetni podaci.
- Unaprijeđeni sustav vizualizacije realno prikazuje okolinu te je pohvaljen od strane brojnih kandidata.
- Programski paket za prikaz instrumenata Air Manager pokazao se kao izrazito koristan i jednostavan alat za kreiranje i prikaz raznih instrumenata.
- Zbog različite razine osvjetljenja i buke koju nije bilo moguće kontrolirati, pojedini kandidati imali su nepovoljnije uvjete u odnosu na ostale.
- Na temelju objektivnih i subjektivnih rezultata te komentara kandidata, odabir poremećaja izazvao je željenu reakciju kod kandidata.
- Na temelju subjektivnih rezultata i komentara kandidata, prvi i treći zadatak nisu izazvali veliko mentalno i fizičko opterećenje.
- Razlika u ostvarenim varijancama pogreške između pojedinih kandidata može ovisiti o predispozicijama kandidata, iskustvu leta na zrakoplovu, ali i individualnom pristupu prema odrađivanju zadataka u eksperimentu.
- Korišteni pokazatelj traženog kuta propinjanja nije optimalno prikazan, što je ograničilo preciznost upravljanja i mogućnost postizanja najviše razine kvalitete upravljanja za danu zadaću.

- Srednja ocjena kvalitete upravljanja po ljestvici Cooper-Harper najmanja je za treći zadatak. Iako kandidati nisu imali iskustva s ocjenjivanjem po navedenoj ljestvici, ovaj rezultat pokazuje da su najzadovoljniji upravljivošću bili u trećem zadatku nakon što su zadatak dvaput izvježbali. Subjektivna ocjena kandidata za kvalitetu upravljanja u skladu je s objektivnom ocjenom varijance pogreške i broja maksimalnih i minimalnih otklona palice.
- Kandidati su u NASA-TLX upitniku za treći zadatak ocijenili najbolje performanse i najmanji napor, što je u skladu sa subjektivnim ocjenama kvalitete upravljanja i objektivnim rezultatima.
- Kandidati su pokazali samouvjerenost u točno odrađivanje zadataka. Nekoliko kandidata s velikom relativnom varijancom visoko je procijenilo svoje performanse.

Tijekom provedbe eksperimenta uočeni su određeni nedostaci koje će u narednim istraživanjima trebati ispraviti. Potrebno je unaprijediti prikaz pokazatelja traženog i trenutnog kuta propinjanja. U eksperimentu je traženi kut propinjanja bio označen ružičastim pokazateljem u čije je središte trebalo dovesti pokazatelj trenutnog kuta propinjanja. Zadaća se može olakšati intuitivnijim pokazateljima ili promjenom boje pokazatelja u trenutku poklapanja. Uz to, moguće je mijenjati boju pokazatelja ovisno o trenutnoj pogrešci, s nekoliko područja koja bi označavala različite razine točnosti. Drugo poboljšanje odnosi se na izvedbu modela leta u Simulinku korištenog u eksperimentu. S obzirom na to da je početak poremećaja u drugom zadatku definiran vremenom od početka simulacije, a vrijeme dovođenja zrakoplova u ravnotežni let prije odrađivanja zadatka razlikovalo se od kandidata do kandidata. Prisilni signal nakon dovođenja zrakoplova u ravnotežni let aktiviran je prekidačem pa se poremećaji nisu dogodili na istom traženom kutu propinjanja za sve kandidate. To znači da se pojedinim kandidatima poremećaj mogao dogoditi u trenutku kada im je to pomoglo pri praćenju pokazatelja, dok je drugima poremećaj praćenje otežao. U budućem radu moguće je napraviti detaljniju analizu prikupljenih podataka, uključujući regresijske analize za provjeru korelacije između pojedinih varijabli. Otvara se mogućnost promatranja psihofizioloških značajki kandidata neinvazivnom metodom poput fNIRS-a (engl. *functional near-infrared spectroscopy*) koja prati promjenu u koncentraciji hemoglobina u mozgu. Za daljnja istraživanja na simulatoru leta potrebno je i osmisлити nove scenarije

leta i zadatke za buduće kandidate. Iskustvo stečeno u provedenom eksperimentu bit će korisno u osmišljavanju i provedbi budućih istraživanja.



# A | Prilog 1

ID \_\_\_\_\_

## ISPUNJAVA EKSPERIMENTATOR

## Podatci o eksperimentatoru

<sup>00.01</sup> Ime: \_\_\_\_\_<sup>00.02</sup> Prezime: \_\_\_\_\_<sup>01.01</sup> Datum: \_\_\_\_\_<sup>01.02</sup> Dan u tjednu: \_\_\_\_\_PROSTORIJA <sup>02.01</sup> Temperatura: \_\_\_\_\_ °C<sup>02.02</sup> Vlaga: \_\_\_\_\_ %Početak mjerenja: <sup>03.01</sup> \_\_\_\_\_ h <sup>.02</sup> \_\_\_\_\_ min    Završetak mjerenja: <sup>03.03</sup> \_\_\_\_\_ h <sup>.04</sup> \_\_\_\_\_ min

## ISPUNJAVA SUDIONIKA

## Podatci o sudioniku

<sup>04.01</sup> Ime: \_\_\_\_\_

Studij/godina: \_\_\_\_\_

<sup>4.02</sup> Prezime: \_\_\_\_\_

Sati naleta na zrakoplovu: \_\_\_\_\_

<sup>04.03</sup> Dob: \_\_\_\_\_

Sati naleta na simulatoru: \_\_\_\_\_

U koliko ste sati zadnji put jeli (cjeloviti obrok): <sup>06.01</sup> \_\_\_\_\_ h <sup>.02</sup> \_\_\_\_\_ min <sup>.03</sup> **Zaokružiti:** doručak | ručak | među-obrok

## Konzumacija pića

	zadnja kontumacija (danas)						ukupno (danas)	
	vrijeme			količina			količina	
<sup>08</sup> Voda	<sup>.01</sup> _____	h	<sup>.02</sup> _____	min	<sup>.03</sup> _____	dl	<sup>.04</sup> _____	dl
<sup>09</sup> Kava	<sup>.01</sup> _____	h	<sup>.02</sup> _____	min	<sup>.03</sup> _____	dl	<sup>.04</sup> _____	dl
<sup>10</sup> Coca-Cola	<sup>.01</sup> _____	h	<sup>.02</sup> _____	min	<sup>.03</sup> _____	dl	<sup>.04</sup> _____	dl
<sup>11</sup> Red Bull	<sup>.01</sup> _____	h	<sup>.02</sup> _____	min	<sup>.03</sup> _____	dl	<sup>.04</sup> _____	dl
<sup>12</sup> Indijski (crni) čaj	<sup>.01</sup> _____	h	<sup>.02</sup> _____	min	<sup>.03</sup> _____	dl	<sup>.04</sup> _____	dl
<sup>13</sup> Zeleni čaj	<sup>.01</sup> _____	h	<sup>.02</sup> _____	min	<sup>.03</sup> _____	dl	<sup>.04</sup> _____	dl
<sup>14</sup> Neko drugo piće koje sadrži kofein	<sup>.01</sup> _____	h	<sup>.02</sup> _____	min	<sup>.03</sup> _____	dl	<sup>.04</sup> _____	dl
<sup>15</sup> Alkoholno piće, koje: _____	<sup>.01</sup> _____	h	<sup>.02</sup> _____	min	<sup>.03</sup> _____	dl	<sup>.04</sup> _____	dl

## Pušenje (duhan, e-cigarete, itd.)

U koliko ste sati zapalili zadnju cigaretu: <sup>16.01</sup> \_\_\_\_\_ h <sup>.02</sup> \_\_\_\_\_ minUkupan broj cigareta koje ste danas popušili: <sup>16.03</sup> \_\_\_\_\_ .

## ZADNJI odlazak na spavanje

	vrijeme:	odlaska na spavanje			potrebno za usnivanje		trajanje spavanja			
spavanje tijekom noći	22.01	h	.02	min	.03	min.	.04	h	.05	min
spavanje tijekom dana	23.01	h	.02	min	.03	min.	.04	h	.05	min

## Koliko ste zadovoljni

		1 – jako nezadovoljan 5 – jako zadovoljan				
24.01	... trajanjem spavanja (općenito).	1	2	3	4	5
24.02	... trajanjem spavanja (zadnji odlazak na spavanje).	1	2	3	4	5
24.03	... kvalitetom spavanja (općenito).	1	2	3	4	5
24.04	... kvalitetom spavanja (zadnji odlazak na spavanje).	1	2	3	4	5

## Bavite li se sportom?

	Kojim?	trajanje 1 treninga		broj treninga tjedno	
		h	min		
25	... profesionalno	.01	.02	.03	.04
26	... amaterski (rekreativno)	.01	.02	.03	.04

## Jeste li imali/doživjeli... ?

		unutar zadnja 2 tjedna		unutar zadnja 3 mjeseca			
		Ne	Da	Ne	Da		
27	... problema s apetitom?	.01	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	.02	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
28	... nagli gubitak kilograma?	.01	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	.02	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
29	... naglo dobivanje kilograma?	.01	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	.02	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
30	... problemi sa spavanjem?	.01	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	.02	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
31	... pretjeran umor tijekom dana?	.01	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	.02	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
32	... teškoće s kontroliranjem emocija?	.01	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	.02	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
33	... psihološke teškoće?	.01	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	.02	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
34	... jako stresan događaj?	.01	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	.02	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Mnogi lijekovi (čak i kada su propisani radi nekog drugog stanja) izravno i/ili posredno utječu na rad autonomnog živčanog sustava te na taj način mogu moderirati vaše fiziološke reakcije (utjecati na brzinu otkucaja srca, dubinu disanja, krvni tlak, znojenje, itd.). Vrlo nam je važno u obzir uzeti mogućnost da su neki od rezultata mjerenja dijelom povezani i sa uzimanjem lijekova te vas stoga molimo da **označite** jeste li uzimali lijekove koji mogu utjecati na:

			količina	Vrijeme uzimanja	
35	<input type="checkbox"/> brzina otkucaja srca	.01		.02	.03
36	<input type="checkbox"/> dubina disanja	.01		h	min.
37	<input type="checkbox"/> krvni tlak	.01		h	min.
38	<input type="checkbox"/> nisam siguran, ime lijeka (opcionalno):	.01		h	min.

# **B** | **Prilog 2**

ŠIFRA: \_\_\_\_\_

## UPITNIK AO

### UPUTA:

Molim vas da za svaku tvrdnju odaberete jedan od pet ponuđenih odgovora. Odaberite onaj odgovor za koji smatrate da se najbolje **odnosi na vas**.

	1 - vrlo malo	2 – malo	3 – donekle	4 – jako	5 - vrlo jako
1. Ne želim da drugi ljudi vide kad se osjećam uplašeno.	1	2	3	4	5
2. Kad se ne mogu koncentrirati na zadatak, brinem se da bih mogao poludjeti.	1	2	3	4	5
3. Plaši me kad se osjećam uznemireno.	1	2	3	4	5
4. Plaši me kad se osjećam kao da ću se onesvijestiti	1	2	3	4	5
5. Važno mi je da zadržim kontrolu nad svojim osjećajima.	1	2	3	4	5
6. Plaši me kad mi srce brzo kuca.	1	2	3	4	5
7. Neugodno mi je kad mi želudac kruli (proizvodi zvukove).	1	2	3	4	5
8. Plaši me kad mi je mučno.	1	2	3	4	5
9. Kad primijetim da mi srce brzo lupa, brinem se da bih mogao imati srčani napad.	1	2	3	4	5
10. Plaši me kad mi ponestane daha.	1	2	3	4	5
11. Kad me boli želudac, brinem da bih mogao biti bolestan.	1	2	3	4	5
12. Plaši me kad ne mogu zadržati pažnju na zadatku.	1	2	3	4	5
13. Drugi ljudi primjećuju kad se osjećam uznemireno.	1	2	3	4	5
14. Neuobičajeni osjećaji u mom tijelu me plaše.	1	2	3	4	5
15. Kad sam nervozan, brinem da bih mogao biti mentalno bolestan.	1	2	3	4	5
16. Plaši me kad sam nervozan.	1	2	3	4	5

# C | Prilog 3

# NASA Task Load Index

ŠIFRA ISPITANIKA: \_\_\_\_\_

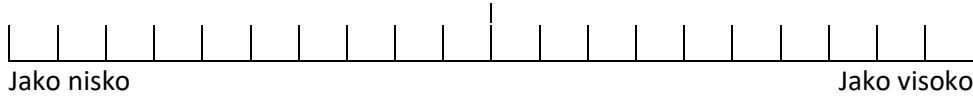
ZADATAK: \_\_\_\_\_

Datum: \_\_\_\_\_

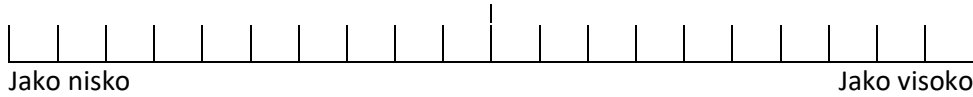
Pravilno označavanje:



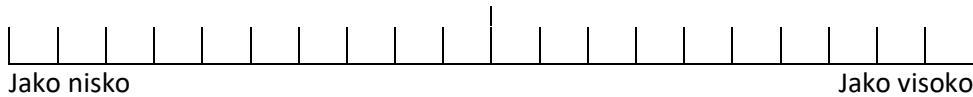
**Mentalno opterećenje – Koliko je mentalno zahtjevan bio ovaj zadatak?**



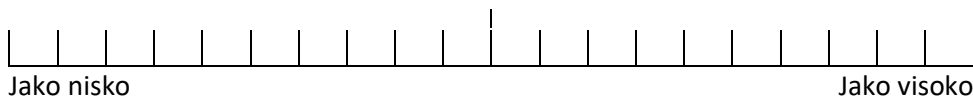
**Fizičko opterećenje – Koliko je fizički zahtjevan bio ovaj zadatak?**



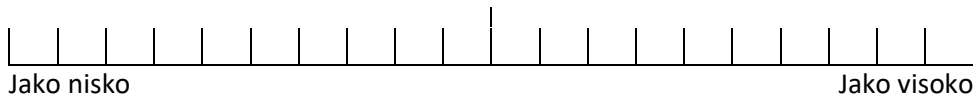
**Vremensko opterećenje – Koliko je vremenski bio zahtjevan ovaj zadatak?**



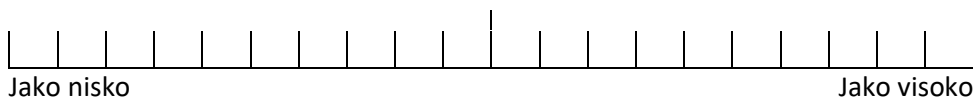
**Performanse – Koliko ste bili uspješni u ovom zadatku?**



**Napor – Koliko ste naporno morali raditi kako biste dosegli svoju razinu performansi?**



**Frustracija – Koliko ste bili nesigurni, obeshrabreni, iritirani, stresirani i iznervirani tijekom izvršavanja ovog zadatka?**



# Literatura

- [1] Robert P Harper Jr and George E Cooper. Handling qualities and pilot evaluation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 9(5):515–529, 1986.
- [2] Xin-Sheng Cao, Yong-Chun Wang, Li Xu, Chang-Bing Yang, Bing Wang, Jie Geng, Yuan Gao, Yan-Hong Wu, Xiao-Ying Wang, Shu Zhang, et al. Visual symptoms and g-induced loss of consciousness in 594 chinese air force aircrew—a questionnaire survey. *Military medicine*, 177(2):163–168, 2012.
- [3] Jing Liu, Alessandro Gardi, Subramanian Ramasamy, Yixiang Lim, and Roberto Sabatini. Cognitive pilot-aircraft interface for single-pilot operations. *Knowledge-based systems*, 112:37–53, 2016.
- [4] Ales Svoboda, Jan Boril, Miloslav Bauer, Paulo CG Costa, and Erik Blasch. Information overload in tactical aircraft. In *2019 IEEE/AIAA 38th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, pages 1–5. IEEE, 2019.
- [5] Thanh Nguyen, Chee Peng Lim, Ngoc Duy Nguyen, Lee Gordon-Brown, and Saeid Nahavandi. A review of situation awareness assessment approaches in aviation environments. *IEEE Systems Journal*, 13(3):3590–3603, 2019.
- [6] Airbus. Manned-unmanned teaming – MUM-T. <https://www.airbus.com/en/products-services/defence/uas/uas-solutions/manned-unmanned-teaming-mum-t>. Pristupljeno u srpnju 2023.



- [7] Pilot eye gaze and gesture tracking for avionics systems using unobtrusive solutions. <https://cordis.europa.eu/project/id/821461/reporting>, 2021. Pristupljeno u srpnju 2023.
- [8] Advanced cockpit for reduction of stress and workload. <https://cordis.europa.eu/project/id/314501>, 2016. Pristupljeno u srpnju 2023.
- [9] Milan Vrdoljak, Pero Prebeg, Mirna Inge Barač, and Marijan Andrić. Design and human-in-the-loop simulation of radio controlled fixed wing aircraft. In *2020 5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, pages 1–6, 2020.
- [10] M. I. Barač. Simulacija leta radio-upravljanje letjelice. Master's thesis, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2019.
- [11] C. G. Grlj. Simulacija leta jedrilice s pilotom u petlji. Master's thesis, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2019.
- [12] M. Ivanković. Izrada modela leta aviona opće avijacije i njegova primjena za simulaciju leta. Master's thesis, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2021.
- [13] I. Vidović. Ocjena radnog opterećenja i razine kvalitete direktnog upravljanja borbenog zrakoplova. Master's thesis, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2022.
- [14] M. Kos. Simulacija dozvučnog leta modernog lovačkog zrakoplova. Master's thesis, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2022.
- [15] Laminar Research. X-Plane 11. <https://www.x-plane.com/>. Pristupljeno u srpnju 2023.
- [16] Sim Innovations. Air Manager 4.x User Manual. [https://siminnovations.com/wiki/index.php?title=Main\\_Page](https://siminnovations.com/wiki/index.php?title=Main_Page), 2020. Pristupljeno u srpnju 2023.
- [17] Annemarie Landman, Sophie H van Middelaar, Eric L Groen, MM van Paassen, Adelbert W Bronkhorst, and Max Mulder. The effectiveness of a mnemonic-type

- startle and surprise management procedure for pilots. *The International Journal of Aerospace Psychology*, 30(3-4):104–118, 2020.
- [18] Abiodun Brimmo Yusuf, Ah-Lian Kor, and Hissam Tawfik. A simulation environment for investigating in-flight startle in general aviation. In *2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, pages 180–185. IEEE, 2019.
- [19] Annemarie Landman, Eric L Groen, MM Van Paassen, Adelbert W Bronkhorst, and Max Mulder. The influence of surprise on upset recovery performance in airline pilots. *The International Journal of Aerospace Psychology*, 27(1-2):2–14, 2017.
- [20] MD Babu, DV JeevithaShree, G Prabhakar, and P Biswas. Using eye gaze tracker to automatically estimate pilots’ cognitive load. In *50th International Symposium of the Society for Flight Test Engineers (SFTE)*, 2019.
- [21] Milan Vrdoljak, Omkar Halbe, Tim Mehling, and Manfred Hajek. Flight guidance concepts to mitigate flight control system degradation in urban air mobility scenarios. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 38(5):18–33, 2023.
- [22] A. V. Efremov, V. V. Rodchenko, A. V. Ogloblin, and A. N. Predtechensky. *Pilot as a dynamic system*. Mashinostroenie, Russia, 1992. (in Russian).
- [23] Krešimir Čosić, Siniša Popović, Marko Šarlija, Igor Mijić, Mirko Kokot, Ivan Kesedžić, Gary Strangman, Vladimir Ivković, and Quan Zhang. New tools and methods in selection of air traffic controllers based on multimodal psychophysiological measurements. *IEEE Access*, 7:174873–174888, 2019.
- [24] Sandra G. Hart and Lowell E. Staveland. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In Peter A. Hancock and Najmedin Meshkati, editors, *Human Mental Workload*, volume 52 of *Advances in Psychology*, pages 139–183. North-Holland, 1988.
- [25] A. V. Efremov and A. V. Ogloblin. Progress in pilot-in-the loop investigations for flying qualities prediction and evaluation. In *25th International Congress of the Aeronautical Sciences - ICAS2006*, 2006.