



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní
Katedra letecké dopravy

**CORIOLISOVA ILUZE A JEJÍ VLIV NA PILOTY V RŮZNÝCH FÁZÍCH VÝCVIKU
THE CORIOLIS ILLUSION AND ITS EFFECT ON PILOTS AT DIFFERENT STAGES OF
TRAINING**

Diplomová práce

Studijní program: Provoz a řízení letecké dopravy

Studijní obor: Magisterský navazující na bakalářský

Vedoucí práce: doc. Ing. Bc. Vladimír Socha, Ph.D.

Ing. Lenka Hanáková, Ph.D.

Bc. Adam Výboštok

Praha 2024



K621.....Ústav letecké dopravy

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Adam Výbošťok

Studijní program (obor/specializace) studenta:

navazující magisterský – PL – Provoz a řízení letecké dopravy

Název tématu (česky): **Coriolisova iluze a její vliv na piloty v různých fázích výcviku**

Název tématu (anglicky): The Coriolis Illusion and its Effect on Pilots at Different Stages of Training

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je určit, jaký má Coriolisova iluze vliv na provedení letu u různých skupin pilotů charakterizovaných jejich zkušenostmi, resp. fází výcviku, v níž se nacházejí.
- Vypracujte analýzu současného stavu se zaměřím na Coriolisovu iluzi, způsob jejího navození a jejího vlivu na provedení letu.
- Navrhněte metodiku hodnocení pilotáže a to tak, aby bylo možné kvantifikovat kvalitu exekuce letového úseku zatíženého Coriolisovou iluzí, resp. úseku referenčního.
- Na základě navržené metodiky zpracování letových dat porovnejte pilotáž u skupin pilotů začínajících IFR výcvik, pilotů s ukončeným IFR výcvikem, pilotů s IR kvalifikací a zkušených pilotů (cca 250 a více letových hodin za IFR). Pro hodnocení využijte vhodné statistické metody, přičemž respektujte nastavení experimentu, který zahrnuje referenční měření a měření s navozením Coriolisovy iluze.
- Objektivní výsledky založené na datech porovnejte se subjektivním hodnocením pilotů.
- Výsledky diskutujte, stanovte závěry, limitace a přínosy, doporučení pro další výzkum.



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: DEMIR, A. E. a E. AYDIN. Vestibular Illusions and Alterations in Aerospace Environment. Turkish Archives of Otorhinolaryngology. 2021, 59(2), 139-149.
KARAPETJAN, L., et al. Implementation of a vestibular illusion simulator into IR training. Transportation Research Procedia. 2022, 65, 222-229.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Bc. Vladimír Socha, Ph.D.**
Ing. Lenka Hanáková, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: **15. července 2023**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **15. května 2024**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



prof. Ing. Ondřej Příbyl, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Adam Výboštok
jméno a podpis studenta

V Praze dne.....15. července 2023



Abstrakt

Coriolisova iluze je nebezpečnou vestibulární iluzí, která může mít fatální důsledky na letecký provoz. Práce zkoumá, jak tato iluze ovlivňuje rozdílné piloty s odlišnými leteckými zkušenostmi. Výzkumu se zúčastnilo celkem 114 subjektů rozdělených do 4 skupin. Každý z nich absolvoval dva lety na simulátoru prostorové dezorientace, kde byla implementována Coriolisova iluze s maximálně týdenní přestávkou mezi těmito lety.

Výsledná letová data byla zkoumána metodami Dynamic Time Warping, analýzy hlavních komponent a Wardovým hierarchickým shlukováním. Na letových parametrech kursu a příčného náklonu letadla na prvním měření jasně vidět přítomnost Coriolisovy iluze a její ovlivnění letových parametrů. V letových datech jako nadmořská výška a vertikální rychlost nebyly zjištěny významné rozdíly mezi letem s iluzí a bez iluze na prvním měření. Druhé měření a analýza letových dat neprokázala žádné rozdíly mezi letem bez iluze a s iluzí. Z letových dat dále bylo zjištěno, že všechny letecké skupiny jsou ovlivněny přibližně stejně negativními účinky Coriolisovy iluze a mezi skupinami se nevyskytují významné rozdíly.

Výsledky subjektivního hodnocení ukazují, že každá skupina vnímala Coriolisovu iluzi velmi intenzivně jak po prvním, tak i po druhém měření. Z tohoto všeho plyne jasné nebezpečí Coriolisovy iluze pro všechny piloty bez ohledu na jejich předchozí letecké zkušenosti.

Klíčová slova: Coriolisova iluze, letectví, prostorová dezorientace, vestibulární iluze



Abstract

The Coriolis illusion is a dangerous vestibular illusion that can have fatal consequences for aviation operations. The study examines whether this illusion affects differently pilots with varying levels of flight experience. A total of 114 subjects were involved in the research, divided into 4 groups. Each of them completed two flights on a spatial disorientation simulator, where the Coriolis illusion was implemented with a maximum week-long break between these flights.

The resulting flight data were analyzed using methods such as Dynamic Time Warping, principal component analysis, and Ward's hierarchical clustering. In the flight parameters of heading and aircraft bank angle, the presence of the Coriolis illusion and its influence on flight parameters were clearly visible in the first measurement. In the flight data such as altitude and vertical speed, no significant differences were found between flights with and without the illusion after the first measurement. The second measurement and analysis of flight data did not show any differences between flights without the illusion and with the illusion. Furthermore, it was found from the flight data that all flight groups are affected by approximately the same negative effects of the Coriolis illusion, and there are no significant differences between groups.

The results of subjective evaluation indicate that each group perceived the Coriolis illusion very intensely after both the first and second measurements. From these results, it is clear that the Coriolis illusion poses a clear danger to all pilots regardless of their previous flight experience.

Keywords: aviation, Coriolis illusion, spatial disorientation, vestibular illusion



Poděkování

Rád by som vyjadril svoju úprimnú vďaku všetkým, ktorí mi pomohli pri tvorbe tejto diplomovej práce. Najprv by som chcel poďakovať mojim vedúcim práce, doc. Vladimírovi Sochovi a Ing. Lenke Hanákovéj, za ich cenné rady, odbornú pomoc, trpezlivosť a ochotu kedykoľvek reagovať na moje otázky počas celého procesu tvorby práce. Ich podpora a povzbudenie mi boli neoceniteľné.

Chcel by som tiež poďakovať svojej rodine a priateľom za ich neustálu podporu a pochopenie. Ich povzbudenie ma vždy nabíjalo novou energiou a pomáhalo mi prekonať všetky prekážky. Napokon by som rád poďakoval všetkým ďalším osobám, ktoré mi svojím spôsobom pomohli a podporovali ma v priebehu celého štúdia.

Vaša pomoc a podpora znamenajú pre mňa veľa a som Vám za to veľmi vďačný.



Čestné prohlášení

„Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).“

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací a Rámcovými pravidly používání umělé inteligence na ČVUT pro studijní a pedagogické účely v Bc. a NM studiu.“

V Praze dne 15. května 2024

.....

Podpis



Obsah

Úvod	15
1 Ilúzie a priestorová dezorientácia v letectve	17
1.1 Vestibulárne ústrojenstvo človeka a sily na neho pôsobiace	18
1.2 Dopady Coriolisovej ilúzie na priebeh letu a spôsoby jej navodenia	21
1.3 Predchádzajúci výskum v kontexte tejto práce a jeho limitácie	25
2 Metódy	34
2.1 Subjekty	34
2.2 Meracie vybavenie	36
2.3 Priebeh meraní	38
2.4 Zber dát	42
2.5 Analýza a spracovanie dát	44
3 Prezentácia výsledkov	54
4 Diskusia výsledkov	68
4.1 Letový parameter - Kurz	68
4.2 Letový parameter - Pričný náklon	70
4.3 Parameter - poloha riadiacej páky pre pričný sklon	71
4.4 Ostatné letové parametre	72
4.5 Výsledky subjektívneho hodnotenia, zhrnutie, prínosy a limitácie	73
5 Záver	77
Zoznam použitej literatúry	79
Prílohy	83
A Mapa rozloženia grafov	84
B Grafy nenormovaných priebehov jednotlivých parametrov	85
B.1 Profil 1	85



B.2	Profil 1 - Skupina 1	86
B.3	Profil 1 - Skupina 2	87
B.4	Profil 1 - Skupina 3	88
B.5	Profil 1 - Skupina 4	89
B.6	Profil 2	90
B.7	Profil 2 - Skupina 1	91
B.8	Profil 2 - Skupina 2	92
B.9	Profil 2 - Skupina 3	93
B.10	Profil 2 - Skupina 4	94
C	Grafy normovaných priebehov jednotlivých parametrov	95
C.1	Profil 1	95
C.2	Profil 1 - Skupina 1	96
C.3	Profil 1 - Skupina 2	97
C.4	Profil 1 - Skupina 3	98
C.5	Profil 1 - Skupina 4	99
C.6	Profil 2	100
C.7	Profil 2 - Skupina 1	101
C.8	Profil 2 - Skupina 2	102
C.9	Profil 2 - Skupina 3	103
C.10	Profil 2 - Skupina 4	104
D	Grafy s výsledkami PCA	105
D.1	Profil 1	105
D.2	Profil 1 - Skupina 1	106
D.3	Profil 1 - Skupina 2	107
D.4	Profil 1 - Skupina 3	108
D.5	Profil 1 - Skupina 4	109
D.6	Profil 2	110
D.7	Profil 2 - Skupina 1	111
D.8	Profil 2 - Skupina 2	112



D.9	Profil 2 - Skupina 3	113
D.10	Profil 2 - Skupina 4	114
E	Výsledky ústneho dotazníku	115
E.1	Hodnotenie intenzity Coriolisovej ilúzie v jednotlivých skupinách	115
E.2	Teplotné mapy hodnotenia intenzity Coriolisovej ilúzie v jednotlivých skupinách . . .	116



Zoznam obrázkov

1.1	Súradnicový systém pre určenie síl pôsobiacich na pilota	19
1.2	Umiestnenie vnútorného ucha a jeho detail	20
1.3	Princíp vnímania rotácie hlavy	21
1.4	Optokinetický bubon	23
1.5	Postup analýzy výskumov	26
1.6	Počty predchádzajúcich výskumov o Coriolisovej ilúzií	27
1.7	Spôsoby navodenia Coriolisovej ilúzie vo výskumoch	28
1.8	Oblasti predchádzajúcich výskumov Coriolisovej ilúzie	29
2.1	Vizualizácia informácií o skupinách	35
2.2	Simulátor a riadiace stanovisko	36
2.3	Harmonogram a priebeh meraní	39
2.4	Mapka a prvý letový profil	41
2.5	Mapka a druhý letový profil	41
2.6	Vizualizácia DTW na tratiach od dvoch subjektov	48
2.7	Vzdialenostná matica z metódy DTW a WHC dendrogram	48
2.8	Spracovanie letových parametrov	51
3.1	Spracované letové výsledky kurzu lietadla pre profil 1	54
3.2	Spracované letové výsledky kurzu lietadla pre profil 2	55
3.3	Výsledky štatistického spracovania kurzu lietadla	56
3.4	Spracované výsledky náklonu lietadla profil 1	57
3.5	Spracované výsledky náklonu lietadla profil 2	58
3.6	Výsledky štatistického spracovania náklonu lietadla	59
3.7	Spracované výsledky z pohybu riadiacou pákou v priečnom sklone pre profil 1	60
3.8	Spracované výsledky z pohybu riadiacou pákou v priečnom sklone pre profil 2	61
3.9	Výsledky štatistického spracovania pohybu riadiacej páky v priečnom sklone lietadla	62
3.10	Spracované výsledky vertikálnej rýchlosti pre profil 1	63
3.11	Výsledky štatistického spracovania vertikálnej rýchlosti lietadla	64
3.12	Výsledky štatistického spracovania pohybu riadiacej páky v pozdĺžnom sklone lietadla	65
3.13	Výsledky štatistického spracovania nadmorskej výšky lietadla	66



3.14 Hodnotenie intenzity ilúzie a teplotná mapa	67
--	----



Zoznam tabuliek

2.1	Výkonnostné parametre simulátora GYRO IPT II	37
3.1	Hodnotenie intenzity Coriolisovej ilúzie v jednotlivých skupinách	67



Zoznam symbolov a skratiek

ω	Uhlová rýchlosť
°/s	Uhlová rýchlosť
°/s ²	Uhlové zrýchlenie (akcelerácia)
mA	Miliampér
mm	Milimeter
ft	Stopy (Feet)
Hz	Herz
MB	Megabajt
NM	Námorná míľa
AMST	Austria Metall Systemtechnik
ATPL	Preukaz spôsobilosti dopravného pilota (Airline transport pilot license)
CPL	Preukazu spôsobilosti obchodného pilota (Commercial pilot license)
csv	Hodnoty oddelené čiarkami (Comma-separated values)
ČR	Česká Republika
DME	Merač vzdialenosti (Distance measuring equipment)
ETC	Environmental Tectonics Corporation
FI	Letový inštruktor (Flight instructor)
HNL	IATA kód pre letisko Daniel K. Inouye International
IATA	Medzinárodné združenie leteckých dopravcov (International Air Transport Association)
ICAO	Medzinárodná organizácia pre civilné letectvo (International Civil Aviation Organization)
IFR	Pravidlá pre leto podľa prístrojov (Instrument Flight Rules)
ILS	Systém pre presné priblíženie a pristátie (Instrument Landing System)
IMC	Meteorologické podmienky pre leto podľa prístrojov (Instrument meteorological conditions)
IRI	Inštruktor prístrojovej kvalifikácie (Instrument rating instructor)
L	Ľavá (Left)
LAPL	Preukaz spôsobilosti pilota ľahkých lietadiel (Light aircraft pilot license)
MATLAB	Programovacie prostredie (Matrix laboratory)
NATO	Severoatlantická aliancia (North Atlantic Treaty Organization)



NIL	Bez zdravotných obmedzení
OML	Obmedzenie na prevádzku s viacpilotnou posádkou
PCA	Analýza hlavných komponentov (Principal component analysis)
PHNL	ICAO kód pre letisko Daniel K. Inouye International
PIC	Veliaci pilot (Pilot-in-command)
PPL	Preukaz spôsobilosti súkromného pilota (Private pilot licence)
PRISMA	Názov metódy systematického postupu rešerše (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)
R	Pravá (Right)
SD	Priestorová dezorientácia (Spatial Desorientation)
SIM	Simulátor
SPL	Preukaz spôsobilosti pilota vetroňa (Sailplane pilot licence)
T&F	Taylor & Francis
VDL	Korekcia chybného videnia na diaľku
VML	Korekcie chybného videnia na diaľku, na stredné vzdialenosti a na krátke vzdialenosti
VNL	Korekcia chybného videnia na krátke vzdialenosti
VOR	VKV všesmerový rádiomaják (VHF omnidirectional radio range)
VR	Virtuálna realita
WoS	World of Science



Úvod

Táto diplomová práca sa zaoberá konceptom priestorovej dezorientácie v letectve, s osobitným zameraním na Coriolisovu ilúziu a jej vplyv na lietajúci personál alebo pilotov. Rozoberá výzvy, ktorým čelia ľudia pri adaptácii na dynamickú povahu letu, jeho náročnosť a následné zmyslové ilúzie. Práca ďalej zdôrazňuje významné dôsledky priestorovej dezorientácie na bezpečnosť letectva, s dôrazom na potenciálne riziká, ktoré predstavuje pre cestujúcich, posádku, celkovú bezpečnosť lietadla a leteckú prevádzku.

Práca poskytuje informácie o prvkoch ľudského tela, ktoré udržujú stabilitu a poskytujú orientáciu v priestore s detailom na komplexný prehľad vestibulárneho systému, popisujúc jeho úlohu pri udržiavaní rovnováhy a priestorovej orientácie u lietajúceho personálu. Podrobne opisuje zložité mechanizmy vestibulárneho systému, vrátane sensorických orgánov vnútorného ucha a ich funkcií pri detekcii zmien spojených s uhlovým zrýchlením a dopadu na orientáciu. Okrem toho diskutuje o vplyve rôznych letových manévrov a síl vyskytujúcich sa počas letu na vestibulárny systém, osvetľuje zložitosti a výzvy, ktorým čelia piloti pri udržiavaní priestorovej orientácie a polohy v priestore počas letu.

Ďalej diplomová práca skúma rôzne metódy na navodenie Coriolisovej ilúzie, ako napríklad využitie špecializovaných simulátorov a technológie virtuálnej reality na tréning pilotov v rozpoznávaní účinkom ilúzie, zmiernení priestorovej dezorientácie počas letu a budovanie odolnosti proti jej vplyvom.

Naviac k tomu diplomová práca poskytuje dôkladnú analýzu predchádzajúceho výskumu Coriolisovej ilúzie, kategorizujúc štúdie na základe ich oblastí zamerania, ako je vplyv na kognitívne a fyziologické funkcie, implementácia tréningu priestorovej dezorientácie v letectve a hodnotenie letových parametrov v súvislosti s priestorovou dezorientáciou. Text zdôrazňuje význam porozumenia a riešenia priestorovej dezorientácie v letectve a snaží sa poukázať na ovplyvnenie pilotov s rôznymi letovými skúsenosťami Coriolisovou ilúziou.

Jej hlavným cieľom je určenie veľkosti dopadu a ovplyvnenia Coriolisovej ilúzie pilotov v rôznych fázach výcviku. Rôzne fázy výcviku reprezentujú ich rozličné letové skúsenosti a teda sa očakáva možná odolnosť pilotov s veľkými letovými skúsenosťami oproti začínajúcim pilotom v oblasti prístrojového lietania. Pre určenie dopadu Coriolisovej ilúzie na pilotov bude potrebné vytvoriť metodiku hodnotenia letových parametrov s dôrazom na jednotný štandard alebo spôsob tohto



hodnotenia pre všetkých pilotov s rôznymi skúsenosťami. Následne bude nutné tieto vyhodnotené letové dáta prezentovať v prehľadných a zrozumiteľných podobách, z ktorých bude možné určiť ovplyvnenie Coriolisovou ilúziou. Vedľajším cieľom je prezentovať výsledky subjektívneho hodnotenia účastníkov experimentu pre konfrontovanie objektívnych výsledkov vychádzajúcich z letových dát.

Výsledky práce by mali byť prínosom pre celú leteckú verejnosť, lietajúci personál a hlavne pre odvetvie ľudského činiteľa v letectve v oblasti priestorovej dezorientácie, kde tejto časti ako aj mnohým ďalším nie je venovaná dostatočná pozornosť. Práca chce byť súčasťou a príspevkom k neustálemu zvyšovaniu bezpečnosti leteckého odvetvia.



1 Ilúzie a priestorová dezorientácia v letectve

Od začiatku evolúcie prebiehal vývoj človeka a ľudského druhu s dolnými končatinami pevne sa dotýkajúcimi zemského povrchu. Táto skutočnosť sa nezmenila ani vtedy keď sa ľudia začali pohybovať vo vzduchu na rôznych lietajúcich zariadeniach. Pre človeka nie je prirodzené byť v objektoch, ktoré sa pohybujú rýchlosťami o hodnotách stoviek kilometrov za hodinu, znášať veľké zrýchlenia a vnímať náklony alebo polohy, ktoré sa tak líšia od tých pre aké sme stavaní a pri ktorých sme sa vyvinuli. Zmysly a senzory vyvinuté u človeka sú pri obsluhu a riadení lietadla veľmi zaťažované. Námaha sa ďalej ešte zvyšuje rôznymi kombinovanými spôsobmi pôsobenia vonkajších vnemov na senzory jedinca. Následkom toho vznikajú rôzne ilúzie, nesprávne vnímanie reality a posudzovanie situácie. Tie sú spôsobené neadekvátnym alebo chybným interpretovaním signálov vychádzajúcich zo senzorov jedinca.

Takto vzniknuté ilúzie a ich nerozpoznanie dokáže spôsobiť ohrozenie cestujúcich, posádky, lietadla a bezpečnosti letu. Pilot sa s lietadlom môže nachádzať v neobvyklej a nebezpečnej polohe s tým, že z jeho alebo jej pohľadu je všetko v poriadku a o tejto skutočnosti vôbec nevie.

Priestorová dezorientácia je v letectve popísaná ako stav, kedy pilot nesprávne vníma pohyb alebo polohu lietadla vzhľadom k zemskému povrchu alebo inému lietadlu v blízkosti. Podľa štúdií, nehody spojené s priestorovou dezorientáciou v lietadlách a helikoptéroch tvoria až 30% všetkých nehôd. Z tohto množstva bolo 80% nehôd fatálnych [1].

Delenie letových ilúzií spôsobujúcich priestorovú dezorientáciu môže byť vykonané podľa rôznych kritérií. Ako vychádza z prieskumu vykonaného Vzdušnými silami Spojených štátov amerických na vzorke 2 582 pilotov ukončeného v roku 2000 so zámerom určiť, ktoré ilúzie sa vyskytujú najčastejšie a špecificky na ktorých typoch lietadiel, bolo rozdelenie ilúzií do štyroch skupín [2]. Z nich je pre kontext tejto práce dôležitá skupina, kde navodená ilúzia pôsobí na vestibulárny systém jedinca a navodzuje falošný pocit vnímania polohy v priestore. Do tejto skupiny patrí:

- Coriolisova ilúzia
- Nadmerné pôsobenie preťaženia
- Ilúzia výťahu (elevator illusion)
- Ilúzia prevrátenia (inversion illusion)



- Graveyard spin and spiral (smrtiaca vývrтка a špirála)
- Ilúzia priečného náklonu
- Ilúzia stúpania (head-up illusion)
- Ilúzia klesania (head-down illusion)
- Nerozpoznanie znosu za letu (undetected drift)

Vyššie spomenuté ilúzie môžu byť ďalej klasifikované na 3 typy podľa Austrálskeho dopravného bezpečnostného úradu pre zisťovanie príčin a nehôd [3] v zmysle závažnosti ich dopadu na pilota a posádku.

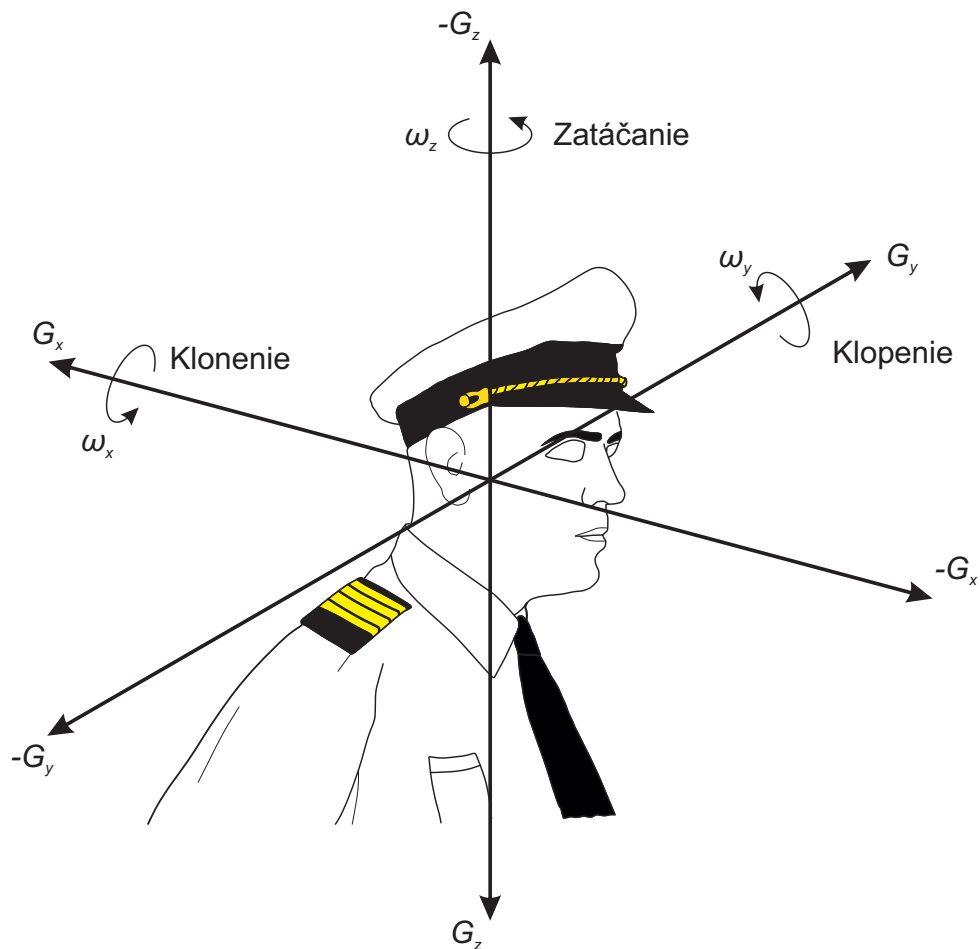
- Typ I (nerozpoznaná) – Pilot si nie je vedomý, že by bol pod vplyvom ilúzie. Pilot si z rôznych dôvodov ako napríklad nevykonanie vzájomnej kontroly prístrojov, zahltenie mysle sústredením sa na iné úlohy alebo rozptýlenie nevšimne, že je pod vplyvom ilúzie a pokračuje v lete ako keby bolo všetko v poriadku. V týchto prípadoch často dochádza k nárazu do terénu pri plne riaditeľnom lietadle .
- Typ II (rozpoznaná a riešiteľná) – Pilot si je vedomý toho, že by mohol byť pod vplyvom ilúzie a stále dokáže riadiť lietadlo. V tomto prípade je nesúlad medzi údajmi z palubných prístrojov a pocitovým vnímaním toho čo lietadlo skutočne vykonáva. Táto skutočnosť môže viesť k rozpoznaní ilúzie a k získaniu ponaučenia z celej situácie. Na druhú stranu sa pilot rovnako môže uchýliť k záveru, že údaje z palubných prístrojov sú chybné a podľahnúť ilúzií.
- Typ III (rozpoznaná ale neprekonateľná)– Pilot si je vedomý svojej dezorientácie ale nedokáže znovu nadobudnúť orientáciu pomocou vizuálnych vnemov či údajov z prístrojov kvôli silnému rozladieniu vestibulárneho alebo zrakového ústrojenstva. Pri tomto type môže dôjsť až k úplnej nečinnosti a šoku alebo k činnostiam, ktoré ďalej zhoršujú vplyv ilúzie. Typ III je úzko zviazaný s únavou a pracovnou záťažou pilota.

1.1 Vestibulárne ústrojenstvo človeka a sily na neho pôsobiace

Vestibulárne ústrojenstvo je jednou z dôležitých súčastí ľudského organizmu pre poskytovanie rovnováhy a orientácie v priestore. Ďalšie dôležité časti prispievajúce k celkovej rovnováhe sú

podnety z nervových zakončení a svalového tkaniva spolu so vstupmi zo zrakového ústrojenstva. Na základe vstupov z vestibulárneho systému, očí, podnetov zo svalového tkaniva a nervových zakončení mozog spracuje tieto signály a vytvorí predstavu o polohe človeka v priestore. Vestibulárne ústrojenstvo nie je na takej dobre úrovni ako zrakové ústrojenstvo v poskytovaní priestorovej orientácie za dobrých svetelných alebo viditeľnostných podmienok. Naopak v zlých svetelných a viditeľnostných podmienkach napríklad ako let v mraku alebo v noci, vestibulárne ústrojenstvo dominuje v poskytovaní priestorovej orientácie [1].

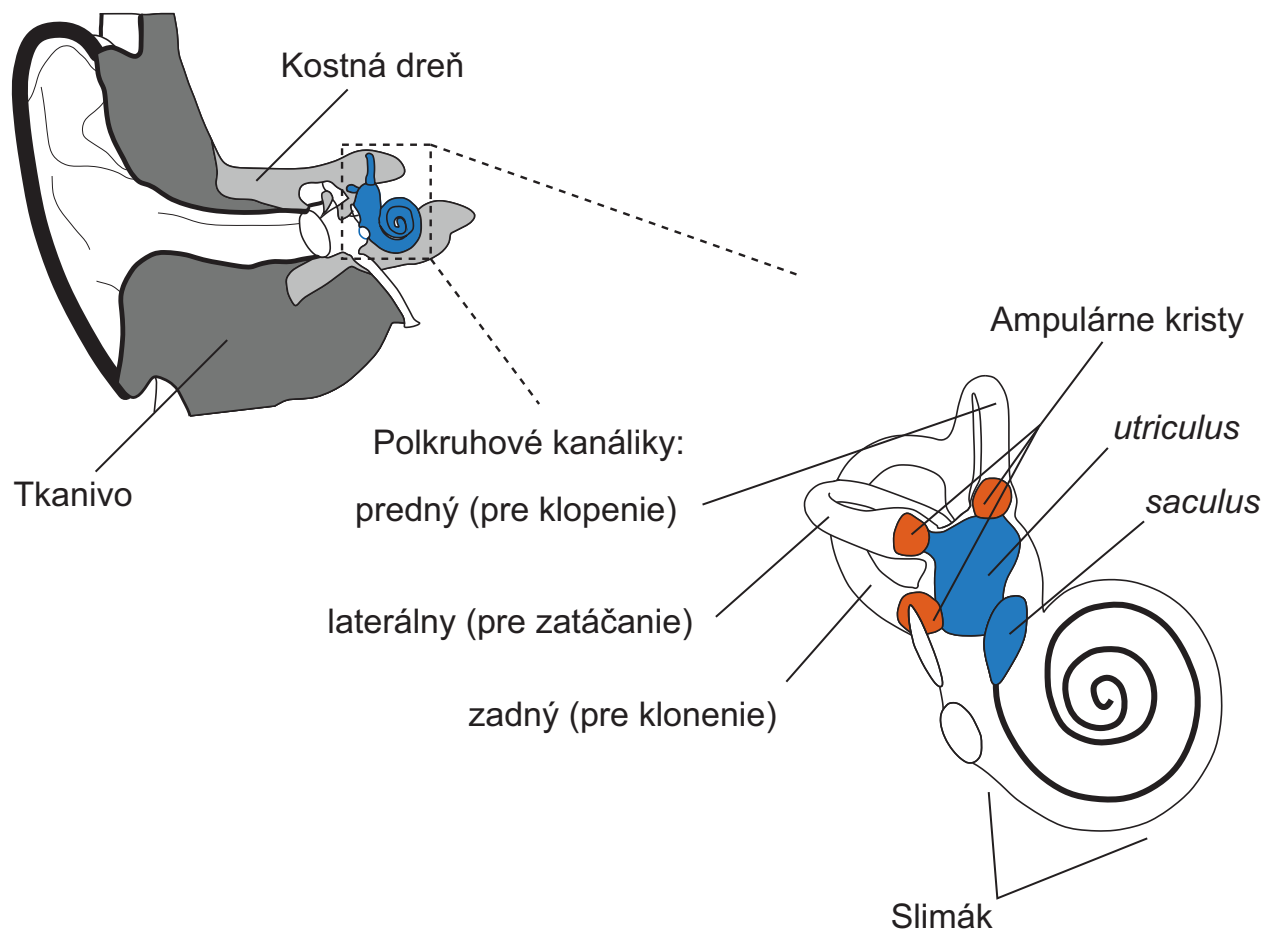
Počas letu je telo pilota vystavené mnohým gravitačným, akceleračným a inerciálnym silám. Pôsobia v troch osiach v kladnom a zápornom smere a takisto aj okolo týchto os. Účinky pôsobení týchto síl na telo pilota vo vzťahu k vestibulárnemu ústrojenstvu človeka sú akcelerácia a decelerácia napríklad pri vzlete a pristáti v ose G_x na obrázku 1.1



Obr. 1.1: Súradnicový systém pre určenie síl pôsobiacich na pilota a ich smeru.

Sily pôsobiace okolo osí x , y a z sú zapríčinené uhlovými zrýchleniami (viď ω na brázku 1.1) vychádzajúcich z manévrov ako klonenie, klopenie, vývrтка, špirála a podobne. Tieto sily zo spomenutých manévrov majú veľký podiel na vyvolaní reakcie vestibulárneho ústrojenstva [1].

Hlavný sensorický prvok vestibulárneho systému, ktorý zabezpečuje rovnováhu človeka v priestore, sa nachádza vo vnútornom uchu.



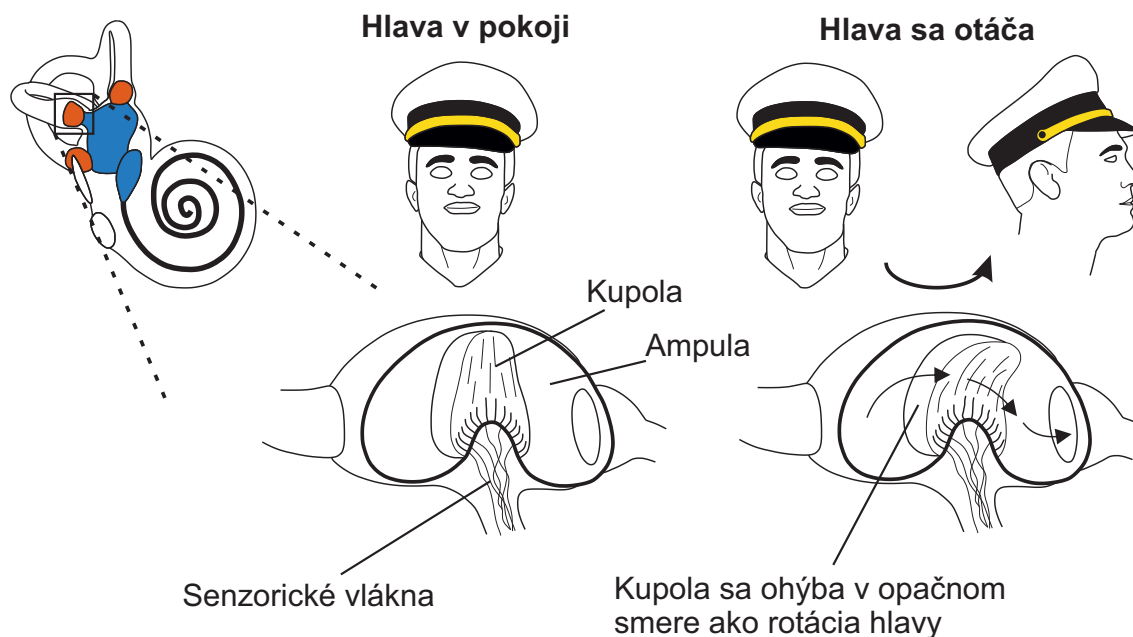
Obr. 1.2: Umiestnenie vnútorného ucha a jeho detailné zobrazenie.

Vnútorné ucho sa skladá z častí slúžiacich pre sluch a rovnováhu. Časť pre rovnováhu sa skladá z troch polkruhových kanálikov a vačkov s názvom utriculus (vajčítý vačok) a sacculus (guľovitý vačok). Polkruhové kanáliky zvierajú medzi sebou 90° uhol a každý je v jednej z osí x , y a z . Jednotlivé kanáliky dokážu zaznamenávať zmeny okolo svojich príslušných os v podobe uhlového zrýchlenia. Utriculus a sacculus zaznamenávajú zmeny v lineárnom zrýchlení. Jednotlivé

části vidieť na obrázku 1.2. Minimálna prahová hodnota pre zachytenie uhlového zrýchlenia je na úrovni $2^\circ/s^2$ [3].

Polkruhové kanálíky sú vyplnené hustou kvapalinou zvanou endolymfa. Vnútrotný priemer týchto kanálikov sa pohybuje okolo hodnoty 0,3 mm [4]. Ďalej sa v každom z týchto kanálikov nachádza ampula, rozširujúca polkruhový kanál v danom mieste. V ampule sa nachádza krísta, ktorá je hlavným snímacím prvkom. Krísta sa skladá z vlasových buniek, ktoré sú obalené v gélovej hmote a spolu tvoria kupolu [5].

Polkruhové kanálíky zaznamenávajú uhlové zrýchlenie pôsobením endolymfy na jednotlivé kupoly. Pri aplikácii vonkajšej sily, sa endolymfa začne pohybovať v polkruhovom kanáliku a vytvorí tlak, ktorý ohne kupolu v opačnom smere rotácie [1], viď obrázok 1.3.



Obr. 1.3: Princíp vnímania rotácie hlavy.

1.2 Dopady Coriolisovej ilúzie na priebeh letu a spôsoby jej navodenia

V priebehu letu kedy prevládajú poveternostné podmienky pre let za viditeľnosti a počas dobrých svetelných podmienok je hlavným sensorickým prvkom pre vnímanie polohy lietadla v priestore zrakové ústrojenstvo. Poloha je jasne vnímaná pri vizuálnom kontakte so zemským povrchom a akékoľvek nejasnosti sú väčšinou v mozgu rýchlo vyriešené.



Počas letu pri poveternostných podmienkach pre let podľa prístrojov alebo v podmienkach noci, pilot pri uvedení lietadla do zatáčky a vnímania uhlového zrýchlenia cíti z pohybu endolymfy a dráždenia krísta s vláskovými bunkami pocit rotácie. Coriolisovej ilúzií väčšinou predchádza zotrvanie lietadla v ustálenej zatáčke, kedy rýchlosť pohybu endolymfy sa vyrovná uhlovej rýchlosti zatáčania. V ustálenej zatáčke teda pocit zatáčania u pilota vymizne, no pri odpútaní pohľadu od prístrojov a pohybe hlavou mimo rovinu rotácie napríklad do opačnej strany ako je zmysel zatáčania z dôvodu povedzme kontroly spínača umiestneného na inom mieste v pilotnej kabíne alebo kontroly letového plánu sa endolymfa dá znovu do pohybu a nastane opäť vnímanie rotácie alebo pocit uhlového zrýchlenia v dvoch alebo viacerých polkruhových kanálikoch čo vytvorí ilúziu a nesprávne vnímanie reality [5].

Dopady na priebeh letu a jeho bezpečnosť zapríčinené Coriolisovu ilúziou môžu byť nebezpečné až katastrofické. Coriolisova ilúzia spôsobuje nevoľnosť, stres a zvyšuje pracovnú záťaž čo odvádza pozornosť od riadenia lietadla a vedie k strate situačného povedomia. Pilot nedokáže správne interpretovať údaje z letových, navigačných a ďalších prístrojov v pilotnej kabíne. Pri silnom pôsobení Coriolisovej ilúzie môže dôjsť k uvedeniu lietadla do neobvyklej polohy z dôvodu príčiny opravy vnímanej pozície, z ktorej je náročné sa dostať späť do ustáleného letu alebo pôvodnej polohy. Ak ilúzia nastane v malých výškach môže dôjsť k riadenému letu do terénu a následnému zrazeniu sa lietadla so zemským povrchom alebo vodnou hladinou.

Minimálna uhlová rýchlosť pre navodenie Coriolisovej ilúzie je v priemere $10^{\circ}/s$ ako vyplýva zo správy výskumu vydanéj v roku 2021 [6]. Zúčastnilo sa ho 19 subjektov a všetci boli bez letových skúseností a nemali znalosť o tom čo je Coriolisova ilúzia. Výskum bol vykonaný na simulátore podporujúcom výcvik rôznych letových ilúzií AIRFOX DSO od firmy AMST. V priebehu experimentu účastníci mali zakryté oči a mali za úlohu verbálne hlásiť vnímaný smer rotácie pri zvyšujúcej sa uhlovej rýchlosti okolo vertikálnej osy. Do toho mali účastníci hlavou vykonávať každú sekundu záklon a predklon.

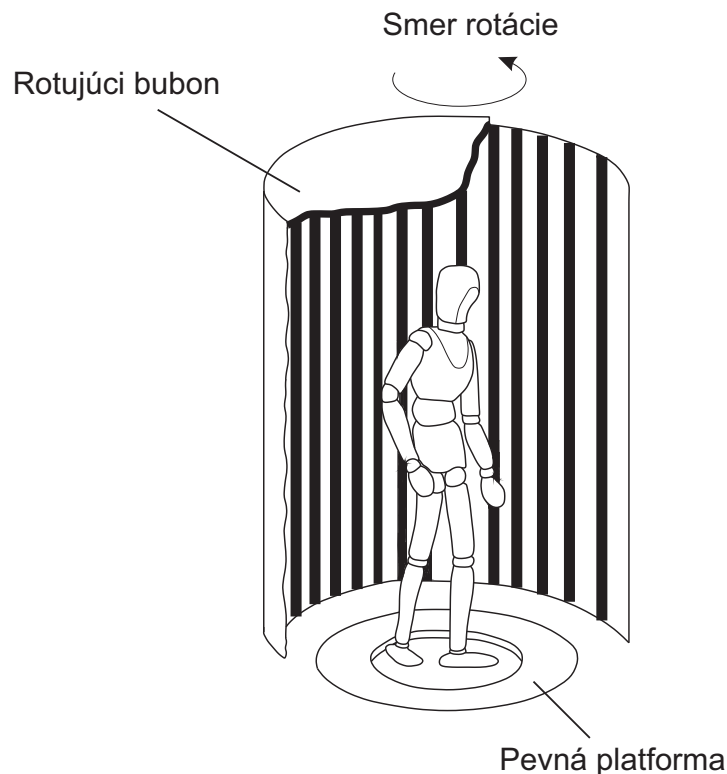
Demonštrácia a výcvik posádok pre lepšiu odolnosť, rozpoznanie a reagovanie na rôzne typy ilúzií vrátane Coriolisovej je rozšírené vo väčšine vzdušných síl vo svete. Majú vytvorené výcvikové plány od teoretickej výuky, pozemný výcvik až po letový.

Jedným z najjednoduchších zariadení pre výcvik na zemi je Bárányho kreslo, ktoré je určené pre výskum funkcie vestibulárneho ústrojenstva skonštruované rakúsko-uhorským lekárom Róbertom Báránym, ktorý zaň v roku 1914 získal Nobelovú cenu za fyziológiu a medicínu.

Podľa webových stránok rakúskeho výrobcu AMST [7], ktorý produkuje rôzne zariadenia pre výcvik vestibulárnych zariadení je kreslo usadené v základni s voľnosťou rotácie okolo osy z. Rotácia môže byť zabezpečená buď elektromotorom alebo manuálne. Subjekt je usadený do kresla a pevne pripútaný. Nasleduje rotovanie po určitý čas do jednej strany kedy má subjekt zavreté alebo zakryté oči a je v predklone. Tvár je natočená v smere rotácie a po čase je otočená do opačnej strany s pokračujúcou rotáciou v pôvodnom smere. Na koniec sa rotácia zastaví a subjekt sa z predklonu vystrie do vzpriamenej polohy kedy sa dostaví Coriolisova ilúzia.

Uhlová rýchlosť by mala byť počas demonštrácie ilúzie menej ako $90^\circ/\text{s}$ pre vyhnutie sa navodenia kinetózy ale dostatočne vysoká pre navodenie Coriolisovej ilúzie čo odpovedá hodnotám viac ako 60° za sekundu [8].

Ďalším jednoduchým zariadením pre navodenie Coriolisovej ilúzie na zemi je optokinetický bubon [8] zobrazený na obrázku 1.4.



Obr. 1.4: Optokinetický bubon.

Slúži hlavne pre lekárske vyšetrenie správnej funkcie očných nervov. Subjekt sa postaví alebo posadí na pevnú platformu, okolo ktorej je rotujúci bubon pokrytý s bieločiernymi pásmi. Pri pohybe



tohto bubna, subjekt vníma najprv pohyb bubna pred jeho očami no po chvíli vníma uhlový pohyb do opačnej strany ako rotuje bubon s obrazcom. Po čase subjekt vníma pocit vlastnej rotácie a z jeho pohľadu je bubon statický. Pri náklonení hlavy sa dostaví pocit rútenia sa alebo prevaľovania podobný pri Coriolisovej ilúzií. Rotácia bubna by mala byť 60° za sekundu.

Nasledujúcim stupňom vo výcviku Coriolisovej ilúzie môže byť centrifúga. V minulosti prebehlo niekoľko štúdií zaoberajúcimi sa trénovaním odolnosti voči Coriolisovej ilúzii pomocou centrifúg. Kabíny môžu byť umiestnené na ramenách rozličnej dĺžky. Pre zlepšovanie odolnosti voči Coriolisovej ilúzii by subjekt mal podstupovať lekcie v trvaní približne 25 minút. Tieto lekcie by mali nasledovať niekoľkokrát po sebe. Výsledky sa dostavili pri desiatich lekciách v priebehu štrnástich dní. Subjekty na začiatku výskumu cítili ilúziu pri 1,8 ot/min a na konci experimentu vybudovali svoju odolnosť na 17,7 ot/min. Coriolisova ilúzia sa dostaví pri natočení hlavy do boku pri usadení subjektu a osy rotácie v smere zemskej vertikály [9].

Zložitejším spôsobom a možno nie úplne najvhodnejším na demonštrovanie je nácvik Coriolisovej ilúzie za letu [8]. Vyskúšanie Coriolisovej ilúzie za letu pre výcvikové účely je možné obmedzeným spôsobom. Prebieha vo výkonnejšom stroji určenom pre akrobaciu. Pre navodenie Coriolisovej ilúzie študentovi, inštruktor vykoná aspoň štyri po sebe idúce výkruty s otvorenými očami pilota vo výcviku, po ktorých študent dostane pokyn nakloniť hlavu mimo osu rotácie. To znamená napríklad dozadu alebo do boku. Po naklonení sa dostaví pocit účinkov Coriolisovej ilúzie.

Jednou z najpopulárnejších metód používaných pre nácvik vestibulárnych ilúzií sú pozemné simulátory priestorovej dezorientácie. Existuje niekoľko dostupných typov týchto zariadení na trhu. Sú hlavne používané vzdušnými silami po celom svete pre výcvik pilotov na oboznámenie sa a trénovanie odolnosti voči rôznym typom ilúzií, vrátane Coriolisovej. Sú dodávané ako jeden celok aj s radiacou stanicou a potrebným softvérom. Sú jednopilotné a môžu mať buď štyri alebo šesť stupňov voľnosti pohybu. Zároveň majú schopnosť simulovať viacero typov lietadiel (od stíhacích cez vrťulové letúne až po helikoptéry) s príslušným kabínovým vybavením a letovým modelom. Ďalej majú schopnosť simulovať rôzne typy meteorologických a viditeľnostných podmienok.

Navodenie ilúzie prebieha počas preddefinovaných scenárov kedy pilot letí po stanovenej trati za pravidiel letu podľa prístrojov so zlou meteorologickou situáciou bez vizuálneho kontaktu so zemou. Na letenej trati sú vytvorené obrazce, ktoré je potrebné zaletieť v rámci určitých parametrov. Konkrétne to môže byť napríklad zatáčka o 180 stupňov kedy sa pilot sústreďí na jej vykonanie a



sústredí sa na let podľa prístrojov. Počas zatáčania lietadla simulátor nezávisle od pilota vykoná viacnásobné rotáciu okolo zvislej osy z , čím sa vydráždi vestibulárny systém pilota. Nasleduje napríklad audio príkaz pre kontrolu určitého prvku v kabíne a pri pohybe hlavou pilota od prístrojov, napríklad za seba, nastane Coriolisova ilúzia.

Ďalším zaujímavým postupom pre nácvik vestibulárnych ilúzií je galvanická stimulácia vestibulárneho ústrojenstva [10]. Jedná sa o dráždenie vestibulárneho systému pomocou elektrických impulzov cez elektródy umiestnené na hlave testovaného subjektu. Tento spôsob bol použitý v štúdiu pre testovanie navodenia Coriolisovej ilúzie počas letu vo virtuálnej realite. Výhodou tohto spôsobu je, že nie je potreba mať k dispozícii simulátory s pohyblivou základňou alebo mať k dispozícii možnosť rotovania so subjektom okolo zvislej osy. Navodzovanie ilúzie je teda možné počas letu vo virtuálnej realite na simulátore s pevnou základňou.

Spôsob využitia okuliarov s virtuálnou realitou v kombinácii so simulátorovou platformou so štyrmi stupňami voľnosti je taktiež vhodnou formou pre nácvik Coriolisovej ilúzie [11].

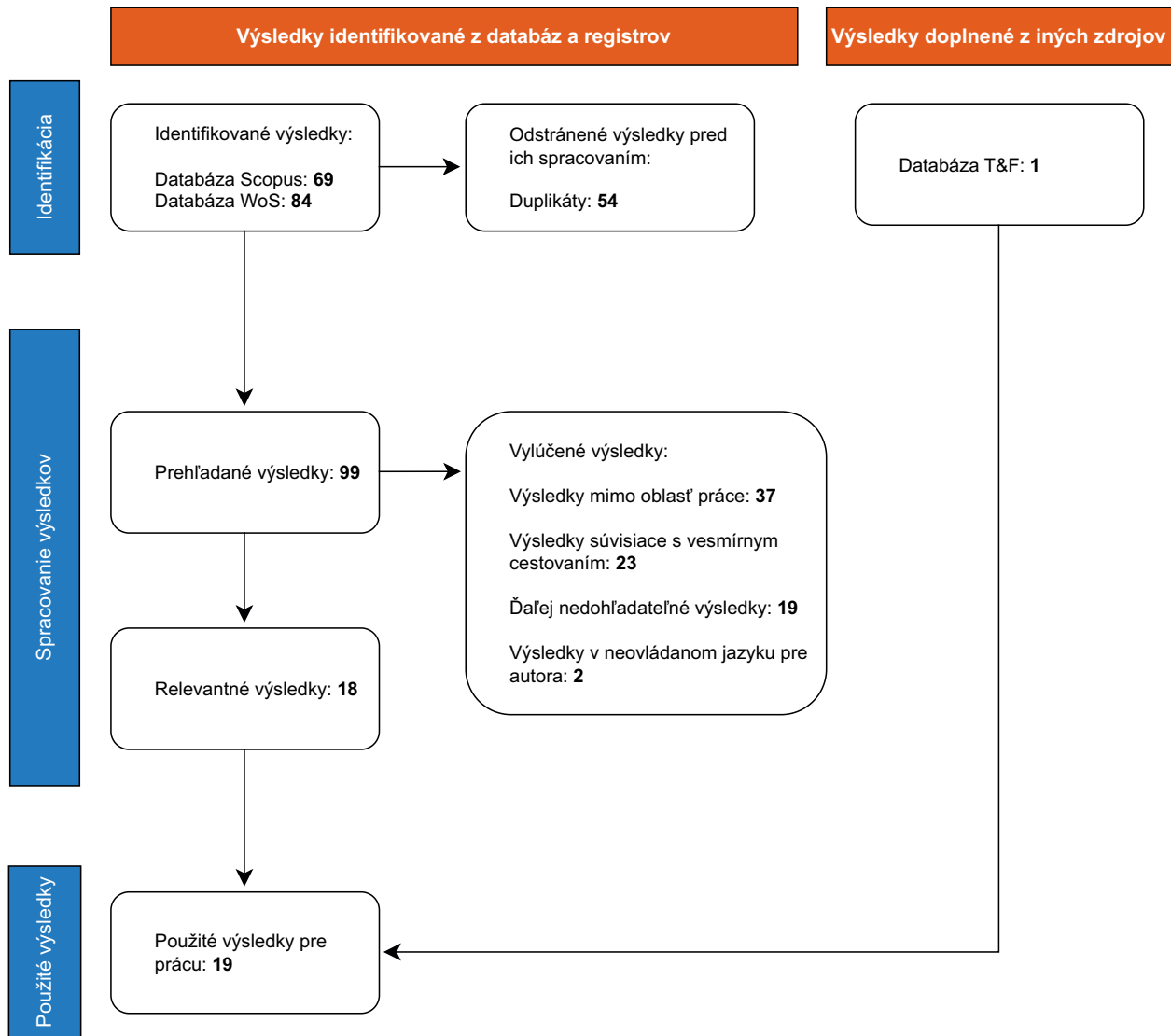
1.3 Predchádzajúci výskum v kontexte tejto práce a jeho limitácie

Analýza súčasného stavu pomocou metódy PRISMA začala prehľadom online akademických databáz Scopus a Web of Science kde je zaručená dôveryhodnosť zverejnených publikácií na začiatku marca. Hlavným hľadaným výrazom bolo spojenie "coriolis AND illusion" pre čo najväčšie obsiahnutie možných výsledkov.

Z tohto kritéria bolo vrátených 154 výsledkov, 69 z databázy Scopus a 85 z Web of Science. Po ich exportovaní a analýze bolo odstránených 54 záznamov kvôli duplicitě. Následne zo 99 zostávajúcich výsledkov bolo odstránených ďalších 81.

Veľkú časť v počte 37, tvorili výsledky nesúvisiace s oblasťou letectva a zamerali sa skôr na oblasť medicíny v kontexte Coriolisovej ilúzie. 23 odstránených výsledkov súvisí s letectvom len okrajovo, pretože skúma spojenie umelej gravitácie pri vesmírnych letoch a pobyte vo vesmíre v spojení s Coriolisovou ilúziou. Ďalších 19 výsledkov bolo odstránených z toho dôvodu, že nebolo možný prístup k plnému textu a neexistovali o ňom ďalšie záznamy. Väčšinou sa jednalo o publikácie zo 70 rokov. Posledné dva záznamy boli odstránené, pretože publikovaný text bol len vo francúzskom a ruskom jazyku.

Z iných zdrojov, konkrétne z databázy Taylor & Francis Online bola doplnená jedna štúdia, ktorá nebola v databázach Scopus a Web of Science. Skupina autorov tohto dokumentu mala väčšinu publikácií zverejnených v dvoch primárnych databázach.

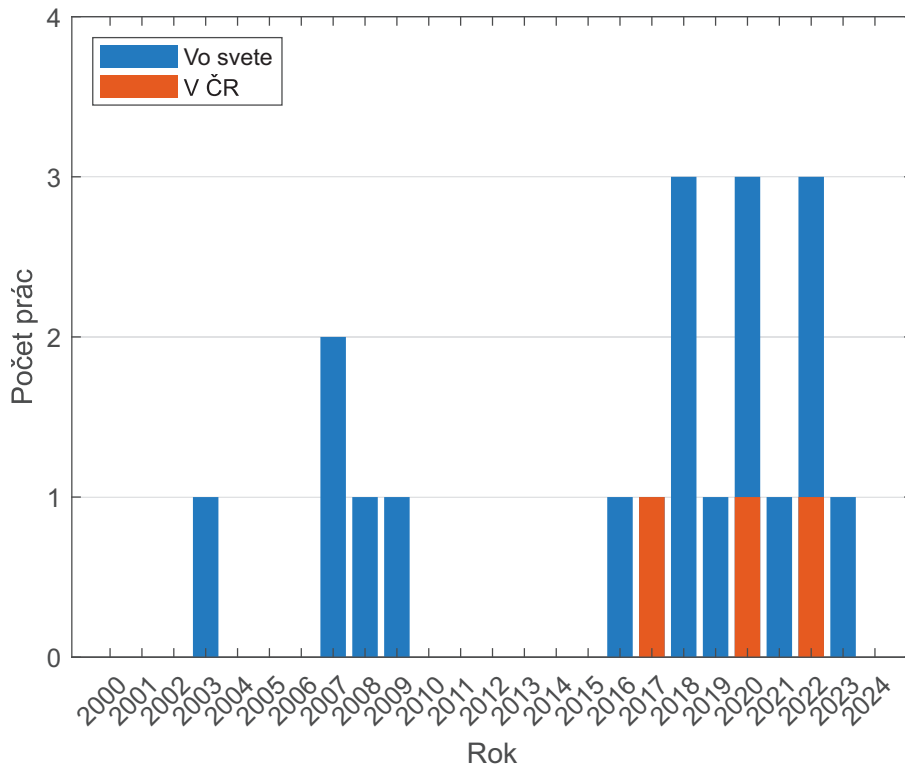


Obr. 1.5: Schéma postupu analýzy predchádzajúcich výskumov.

Výsledný počet použiteľných predchádzajúcich výskumov súvisiacich s Coriolisovou ilúziou samotnou alebo Coriolisovou ilúziou skúmanou spolu s inými ilúziami je 19. Ohraničenie oblastí, podľa ktorých zvyšné publikácie súvisia s touto prácou bolo vykonané podľa faktorov ktorými bol použitý spôsob pre aktívne navodenie Coriolisovej ilúzie, či boli skúmané letové parametre a či bol

použitý špeciálny simulátor pre nácvik vestibulárnych ilúzií. Vyššie popísaný postup je zobrazený graficky na obrázku 1.5.

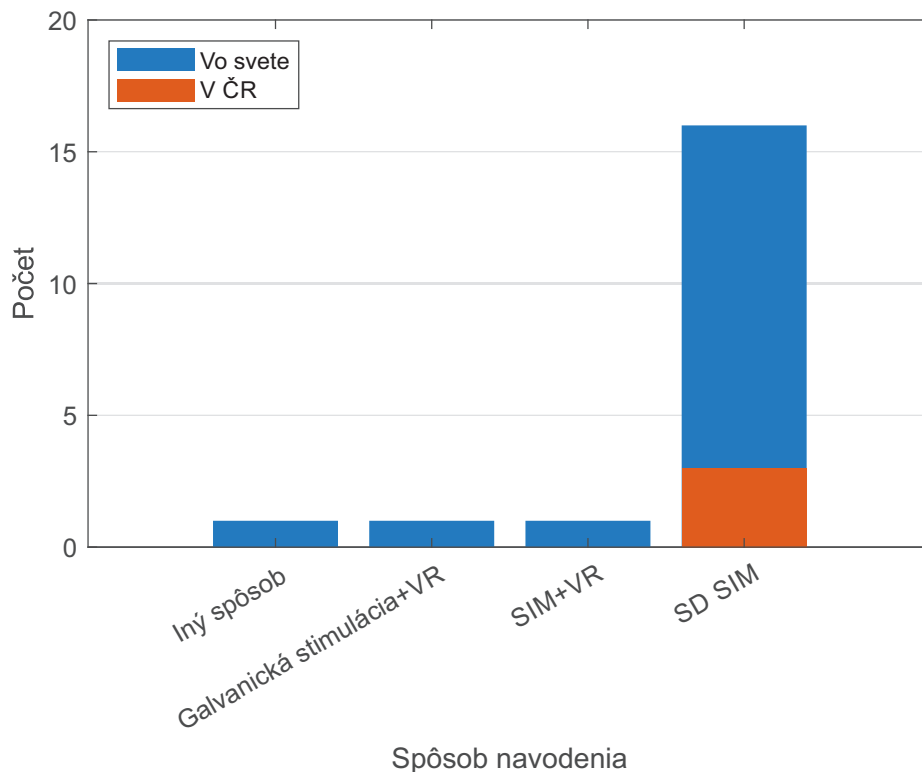
Za posledných viac ako dvadsať rokov prebehlo viacero štúdií a výskumov zameraných na skúmanie Coriolisovej ilúzie a jej navodenia ako je možné vidieť na Obrázku 1.6 počas písania tejto časti práce v období marec 2024.



Obr. 1.6: Počty výskumov zaoberajúcich sa Coriolisovou ilúziou v letectve za posledné roky.

Na obrázku 1.7 sú zastúpené rôzne spôsoby navodenia Coriolisovej ilúzie, ktoré sa vyskytli v publikáciách použitých pre túto časť práce. Najčastejším spôsobom je použitie špeciálneho simulátoru pre nácvik priestorovej dezorientácie. Zvyšné spôsoby sú zastúpené len jedenkrát ako to je v prípade použitia pohyblivého simulátoru v kombinácii okuliarov s virtuálnou realitou [11]. Nasleduje už vyššie spomenutý spôsob navodenia Coriolisovej ilúzie vo forme galvanickej stimulácie znovu v kombinácii s VR [10].

Na obrázku 1.8 vidieť rozdelenie publikácií do kategórií pre ľahké zorientovanie sa v témach, ktorými sa výskumy zaoberali. Napriek tomu, že niekedy nastáva prelínanie medzi jednotlivými kategóriami bolo zadefinovaných 5 kategórií, použitých pre rozdelenie prác. Najpočetnejšiu



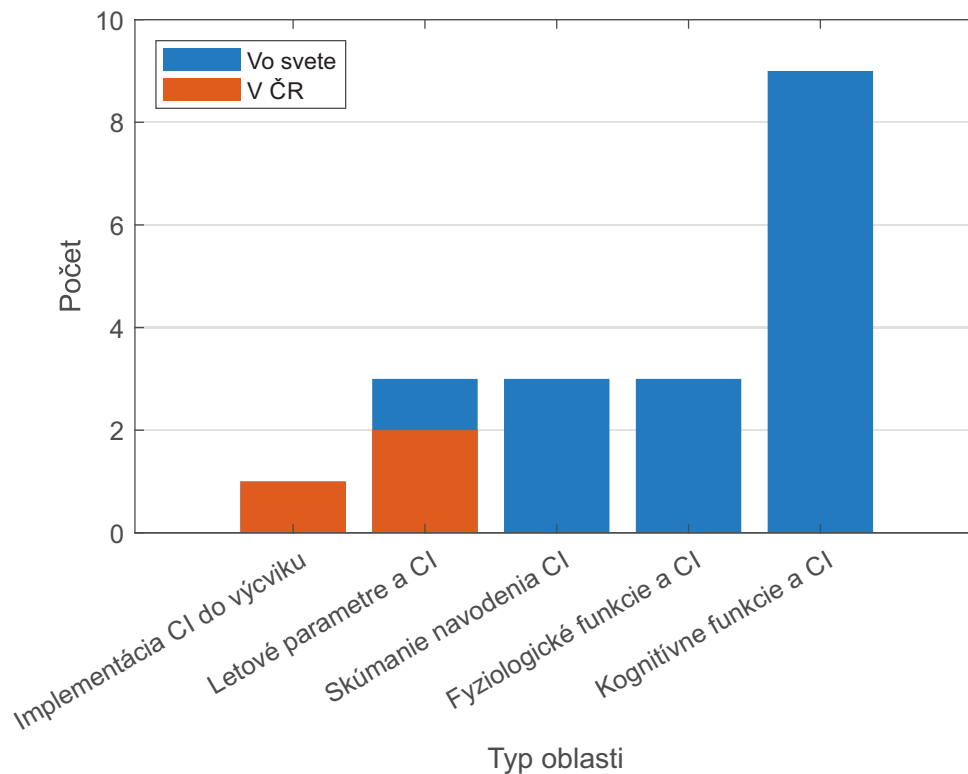
Obr. 1.7: Spôsoby navodenia Coriolisovej ilúzie vo výskumoch za posledné roky.

skupinu tvorí skúmanie Coriolisovej ilúzie v kontexte dopadu na kognitívne schopnosti. Napríklad ako ilúzia ovplyvňuje koncentráciu, pozornosť, skenovanie prístrojov a podobné vlastnosti pomáhajúce udržať si situačné povedomie [12–20].

Tri publikácie sa venovali Coriolisovej ilúzií a jej ovplyvnenia fyziológie človeka. Ako je napríklad ovplyvnená funkcia zraku v kombinácií s Coriolisovou ilúziou alebo jej vzťah v spojení s hypoxiou [21–23].

Ďalšou kategóriou rovnako s trojčlenným zastúpením je skúmanie netradičných spôsobov navodenia Coriolisovej ilúzie ako je galvanická stimulácia v kombinácií s VR alebo použitie pohyblivého simulátora v kombinácií s VR. Je tu zaradená aj publikácia skúmajúca prahovú hodnotu navodenia Coriolisovej ilúzie [6, 10, 11].

Tri práce patria do skupiny skúmania letových parametrov. Dve práce z Českej akademickej obce vykonali výskum ovplyvnenia letových parametrov a výkonu pilotáže po vystavení sa Coriolisovej ilúzii [24, 25] a tretia práca sa zamerala na letové parametre pilotov pod psychickou



Obr. 1.8: Oblasti výskumov Coriolisovej ilúzie (CI) v minulých rokoch.

záťažou počas priestorovej dezorientácie [26]. Jedna práca bola zameraná na implementáciu vestibulárnych ilúzií vrátane Coriolisovej do prístrojového výcviku [27].

Prvá práca, ktorá skúmala letové parametre pod Coriolisovou ilúziou bola vykonaná v spolupráci s Juhokórejskými vzdušnými silami [26] v roku 2020. Zúčastnilo sa jej 30 subjektov (rozdelených na dve skupiny), z ktorých všetci boli vojenský piloti a skúmal sa v nej dopad verbálnych hlásení na letové parametre alebo podaný letový výkon subjektu a mentálnu záťaž. Okrem letových parametrov sa merali a vyhodnocovali aj fyziologické parametre. Spomínané letové parametre boli vyhodnocované subjektívne letovými inštruktormi a subjektívnym udelením sebahodnotenia skúmaných subjektov. Výsledok ukázal pozitívny dopad verbálnych hlásení podávaných pri zmene a rozdelení pozornosti na letové prístroje.

Téma tejto práce sa obsahom najviac približuje publikácií vydané v roku 2017 v Českej republike [24]. Publikácia vydaná príslušníkmi Univerzity obrany v Brne si kládla za cieľ objektívne zhodnotiť ovplyvnenie priestorovej orientácie pilota Coriolisovou ilúziou. Let bol vykonaný podľa pravidiel IFR s podmienkami v IMC a Coriolisova ilúzia bola implementovaná po začatí točenia



do finálneho smeru priblíženia pomocou ILS na letisku Brno-Tuřany na simulátore GYRO IPT II. Boli prevedené dve merania, jedno v roku 2015 a druhé v roku 2016. Obidva lety kvôli časovým a personálnym možnostiam dokončilo len 7 vojenských pilotov vo výcviku. Po aplikovaní Coriolisovej ilúzie boli zaznamenané značné deviácie od ideálneho horizontálneho a vertikálneho vedenia ILS. Tieto deviácie boli pri druhom meraní o rok neskôr menšie čo je možné pripísať predchádzajúcej skúsenosti ale aj väčšiemu náletu a posunu v hlavnom letovom výcviku poslucháčov.

Podobný kolektív naviazal na tento výskumom zverejneným v roku 2020 [25]. Tento krát sa experimentu zúčastnilo 19 vojenských pilotov vo výcviku. Letený profil bol rovnaký a znovu na simulátore GYRO IPT II. Okrem Coriolisovej ilúzie aplikovanej v rovnakej fáze, pri točení do finálneho kurzu pre priblíženie pomocou ILS, bola implementovaná aj somatogyrálna ilúzia no nie obe súčasne v jednom lete. Záverom bolo porovnanie deviácie pri letovej trati s ilúziou a bez. Najväčšie odchýlky boli zaznamenané v prípade Coriolisovej ilúzie. Ďalej bol kladený dôraz na potrebu výcviku a vystavenia sa vestibulárnym ilúziám.

Metóda hodnotenia letových parametrov fungovala na výpočte deviácie od ideálnej letovej trajektórie, ktorá bola zaletená človekom čo najpresnejšie ako referenčné meranie. Vyhodnocovala sa trať reprezentovaná zemepisnými súradnicami, zmeny v priebehu nadmorskej výšky a zmeny v priebehu kurzu lietadla. Pre výsledné hodnotenie boli lety vykonané pod Coriolisovou ilúziou porovnané s referenčným ideálnym meraním.

V nasledujúcich odsekoch sú zhrnuté hlavné ciele niektorých publikácií s popisom metodiky výskumu a jeho výsledkov, ktoré skúmajú Coriolisovu ilúziu pre lepšiu ilustráciu čím sa akademická obec v tejto oblasti zaoberá.

Dizertačná práca vydaná v roku 2007 na tému ovplyvnenia hlavne kognitívnych schopností a neuroendokrinného alebo hormonálneho systému Coriolisovou ilúziou [13]. Výskumu sa zúčastnilo 24 účastníkov s priemerným celkovým náletom 91 hodín. Podmienkou bolo aby nikto z účastníkov nebol vlastníkom kvalifikácie letu podľa prístrojov. Coriolisova ilúzia bola navodená na simulátore General Aviation Trainer II, pri uhlovom zrýchlení $0.3^\circ/s^2$ až po rýchlosť rotácie 72° za sekundu. Účastníci výskumu vykonávali matematické testy a testy pre vnímanie priestorovej orientácie pred, ihneď po a určitý čas po vystavení Coriolisovej ilúzie. Výsledok experimentu nepreukázal žiadne ovplyvnenie vyššie spomínaných sledovaných častí Coriolisovou ilúziou.

Výskum hypoxie a jej dopady na navodenie Coriolisovej ilúzie dokončený v roku 2016 prebehol v spolupráci s Poľskými vzdušnými silami [23]. Zúčastnilo sa ho 14 aktívnych pilotov inštruktorov,



ktorí lietajú na lietadlách Iskra. Navodenie Coriolisovej ilúzie prebiehalo na simulátore GYRO-IPT od firmy ETC. Ilúzia bola prítomná na vytvorenom profile podľa štandardu NATO a normy STANAG 3114. Profil trate bol nasledovný: stúpanie do výšky takmer 5000 stôp s následným stúpaním a zmenou kurzu po dobu 120 sekúnd. Počas prvých 120 sekúnd letu simulátor vykonával otáčanie okolo osy z so zrýchlením $0.5^\circ/s^2$ až pod dosiahnutie rýchlosti rotácie 60° za sekundu. Maximálnu rýchlosť 60° za sekundu dosiahol pri obrátení hlavy pilota vľavo pre vykonanie zmeny nastavenia na letovom odpovedači. Kombinácia uhlového zrýchlenia simulátora a natočenie hlavy vyvolali Coriolisovu ilúziu. Následne pilot dostal príkaz udržiavať priamočiary let po dobu 20 sekúnd. Počas výskumu mali piloti na tvári kyslíkovú pilotnú masku pripojenú ku zdroju kyslíku. Celkovo boli vykonané tri lety. Jeden s prirodzeným zložením vdychovanej zmesi, druhý so zložením zmesi pre výšku 5000 metrov a tretí so zložením zmesi pre výšku 6000 metrov. Dĺžka dezorientácie pre návrat schopnosti udržiavať zadané letové parametre bola v 5000 metroch priemerne 10.63 s a pre 6000 m 21.9 sekundy. V prirodzených kyslíkových podmienkach trval návrat k zadaným parametrom priemerne 6.58 s.

Ďalšou štúdiou tentoraz v spolupráci s Holandskými vzdušnými silami [18], vydanou v roku 2018 na tému vplyv priestorovej dezorientácie na letovú výkonnosť a skenovanie prístrojov, ktorej sa zúčastnilo 10 vojenských pilotov Holandských vzdušných síl, kde každý z nich zaletel 3 okruhy na letovom simulátore, ktorý dokáže navodzovať letové ilúzie. Simulátor bol vyrobený firmou AMST a jednalo sa o typ AD. Každý z okruhov trval približne 15 minút. Letové ilúzie boli navodené v poslednom, treťom okruhu. Takmer celý let bol uskutočnený v meteorologických podmienkach pre let podľa prístrojov. Coriolisova ilúzia bola navodená ako tretia v poradí počas 360° ľavotočivej zatáčky v polohe po vetre. V tejto časti bol simulátor urýchľovaný uhlovým zrýchlením o veľkosti $1^\circ/s^2$ až po dosiahnutie uhlovej rýchlosti $60^\circ/s$. V polovici zatáčky piloti dostali príkaz skontrolovať magnetický kompas umiestnený na stropnom paneli. Výsledok výskumu bol okrem iných zistení, že Coriolisova ilúzia zapríčinila priemerne oneskorenie o 0.44 ± 0.08 s pri prvotnom pohľade na indikátor umelého horizontu. Ďalej Coriolisova ilúzia zapríčiňovala nechcené zatáčanie o veľkosti $1.25 \pm 1.33^\circ/s$ a náklon o veľkosti $3.4 \pm 3.7^\circ$.

Následný výskum v roku 2018 na podobnú oblasť bol o rozdelení pozornosti pod vplyvom ilúzií [19]. Hlavným cieľom bolo sledovať rozdelenie pozornosti medzi prístrojmi za letu s navodenou ilúziou medzi pilotmi a ľuďmi bez pilotnej skúsenosti. Pri profile letu s ilúziami boli účastníci vystavený až šiestim ilúziám. Medzi skúmanými ilúziami bola aj Coriolisova. Výskumu sa zúčastnilo



40 subjektov, 20 pilotov s minimálnym náletom aspoň 100h, licenciou pre komerčné lety s pravidlami letu podľa prístrojov. Zvyšné subjekty nemali žiadnu predchádzajúcu skúsenosť s lietaním v lietadle alebo na simulátore. Ilúzie a lety boli vykonané na simulátore Gyro IPT od firmy ETC. Pre sledovanie očí boli použité elektronické okuliare EyeTracking od spoločnosti SensoMotoric Instruments. Pre Coriolisovu ilúziu a jej navodenie bolo vyhradených 210 sekúnd. Navodenie bolo počas pravotočivej zatáčky s trvaním 173 sekúnd. Za tento čas sa simulátor otáčal okolo osy z s uhlovým zrýchlením $0,5^\circ/s^2$ až po dosiahnutie uhlovej rýchlosti 70° za sekundu. Meranie pozornosti bolo vzťahnuté k nasledovným prístrojom: umelý horizont, výškomer, rýchlomer, variometer, kurz, motorové údaje a pohľad von z kabíny. Výsledkom bol viditeľný rozdiel v čase pozornosti venovanej určitým prístrojom medzi dvomi testovanými subjektmi.

V roku 2021 bol publikovaný článok s cieľom preukázať kladný vplyv verbálnych hlásení pri kontrole prístrojov počas Coriolisovej ilúzie [15]. Výskum prebehol v Kórejských vzdušných silách. 25 aktívnych pilotov stíhacích lietadiel vykonalo lety na simulátore GL-4000 so 4 stupňami voľnosti od firmy ETC. Piloti boli rozdelení do dvoch skupín. V jednej zo skupín piloti mali povinnosť verbálne hlásiť, ktorý prístroj aktuálne sledujú. Počas letového profilu bolo navodených celkovo šesť ilúzií, vrátane Coriolisovej s pomocou dodávaného softvéru k simulátoru. Určitý čas po vzlete v smere 010° a vykonanom stúpaní do 4000 stôp, pilot udržoval rýchlosť 300 uzlov. Následne začal pravotočivú zatáčku s náklonom 45° a ukončil ju v smere 270° v oblačnosti. V tejto časti bola navodená Coriolisova ilúzia. Hlavným cieľom bolo sledovať kam smeruje pohľad očí pilota, konkrétne na ktoré letové údaje poskytované HUD displejom. Tieto informácie boli sledované so systémom Tobii Pro Glasses 2. Piloti v skupine s povinnými verbálnymi hláseniami kam smerujú svoju pozornosť vykazovali lepšie zvládanie situácie pod vplyvom priestorovej ilúzie.

Výskum s cieľom generovať Coriolisovu ilúziu vo VR pomocou galvanickej stimulácie vestibulárneho systému bol dokončený v roku 2022 [10]. Štúdie sa zúčastnilo 19 subjektov, pričom každý z nich vykonal dva lety. Jeden s galvanickou stimuláciou a jeden bez. Boli zisťované možnosti navodenia Coriolisovej ilúzie v zatáčke pomocou elektród a elektrických impulzov. Experiment bol postavený na simulačnom softvéri od firmy Lockheed Martin. Obraz bol privádzaný pilotovi cez okuliare podporujúce virtuálnu realitu od spoločnosti Oculus Rift. Ďalej boli na hlavu každého subjektu pripevnené štyri elektródy, ktoré produkovali impulzy medzi 0 až 2mA. Elektródy boli umiestnené na zátylku, čele a na obidvoch spánkových kostiach. Subjektom bola pustená zo záznamu simulácia letu v zatáčke v trvaní 60 sekúnd. V 30 sekunde subjektom bolo prikázané



sklonit hlavu a vedúci experimentu navodil v tejto situácii Coriolisovu ilúziu v zmysle ľavého zatáčania a stúpania, následne subjekty hlavu zdvihli. Vedúci experimentu ovládal produkovanie impulzov riadiacou pákou a subjekt reagoval na vnímanú polohu v priestore alebo smer vnímaného pohybu, pohybom svojej riadiacej páky. Všetky subjekty vnímali pri navodení Coriolisovej ilúzie veľké výchylky a zmeny polohy v priestore.

Publikácia výskumu vydaná v rámci univerzity Embry-Riddle Aeronautical University v roku 2023 mala ako hlavný cieľ preskúmať možnosti použiť pre výcvik vestibulárnych ilúzií, vrátane Coriolisovej, pohyblivý simulátor v kombinácii s okuliarmi podporujúcimi virtuálnu realitu. Štúdie sa zúčastnil veľký počet subjektov, celkovo 215. Všetci boli študentmi vyššie spomenutej univerzity a ich skúsenosti boli od nelietajúceho personálu až po osoby, ktoré vlastnili komerčnú pilotnú licenciu. Nálety sa pohybovali od 0 hodín až po 500 hodín. Každý účastník výskumu podstúpil jeden letový blok v celkovom trvaní 70 minút vrátane 10 min prestávky. Celkovo boli vystavení 12 ilúziám skladajúcich sa ako z vestibulárnych, kde patrí aj Coriolisova ilúzia a 6 vizuálnych ilúzií. Po lekcií v simulátore boli účastníkom predložené dotazníky a prieskumy. Takmer všetci z testovaných subjektov pociťovali nevoľnosť spojenú s pôsobením ilúzií no nie v takej miere aby bolo nutné požiadať o okamžité ukončenie experimentu. Do budúcnosti je odporúčaný ďalší výskum potrebný pre efektívnosť tohto spôsobu nácviku vestibulárnych ilúzií.

Zo zmienovaných publikácií je možné usudzovať, že hlavnými témami výskumov sú zväčša účinky dopadov Coriolisovej ilúzie na fyziologické a kognitívne schopnosti jedinca. Skúmanie letových parametrov bolo primárnym cieľom len v troch prípadoch. Až na pár štúdií počet testovaných subjektov nepresahoval 40 a účastníci boli často aktívny vojenský piloti alebo nelietajúci personál z civilného sektoru. Kvôli malým počtom testovaných subjektov nebolo možné vytvoriť podskupiny a porovnávať ich výsledky vzájomne medzi sebou alebo druhými skupinami. Merania letových parametrov boli vykonané s veľkými časovými rozstupmi, počas ktorých subjekty mohli získať nové letové skúsenosti alebo stratiť to málo skúseností, ktoré získali z jedného letu pod vplyvom Coriolisovej ilúzie. Ďalej metodika analýzy letových parametrov fungovala na porovnávaní letených tratí s ideálnym referenčným meraním alebo subjektívnym hodnotením inštruktorov, kde takýto typ hodnotenia obsahuje veľkú chybu zapríčinenú jedinečnosťou a odlišnou povahou každého inštruktora.

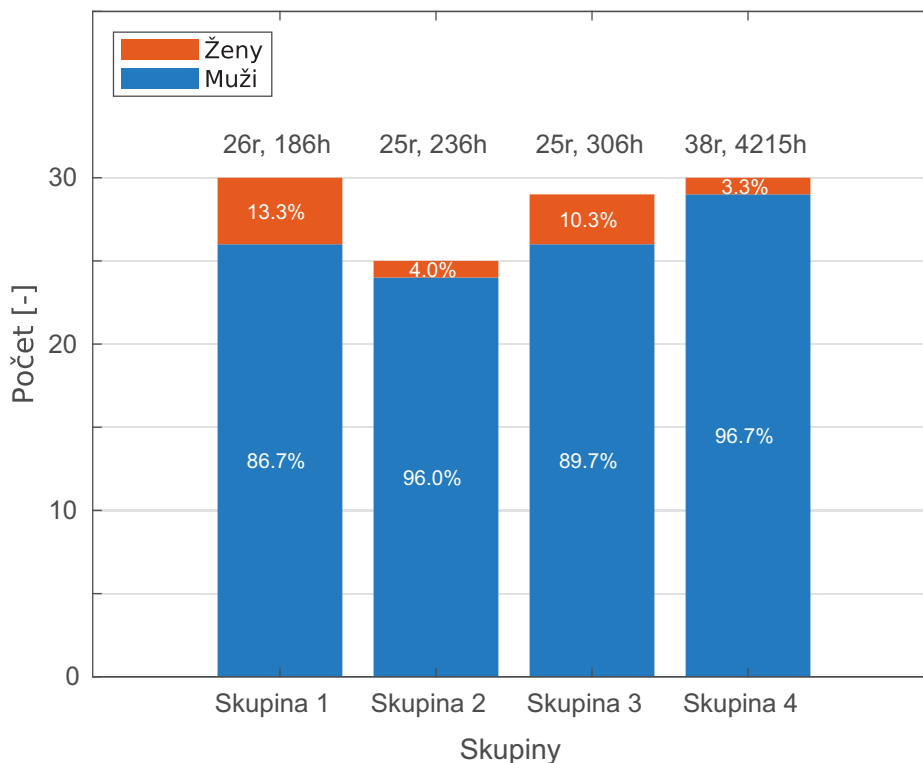


2 Metódy

Pre získanie dát potrebných k spracovaniu a využitiu v tejto práci bolo potrebné pripraviť podmienky a zabezpečiť meracie vybavenie. Ďalej navrhnuť letové profily, vytvoriť harmonogram meraní a zadovážiť subjekty, ktoré sa zúčastnia výskumu. Všetky tieto spomenuté aktivity boli súčasťou projektu CK02000321, ktorý skúmal integráciu simulátora vestibulárnych ilúzií do ab-initio výcviku pilotov. Z toho vyplýva, už existujúci návrh letových profilov, harmonogram a priebeh jednotlivých meraní.

2.1 Subjekty

Celkovo absolvovalo celý experiment 114 účastníkov, ktorý boli rozdelení do 4 kategórií/skupín. Tieto kategórie boli navrhnuté z dôvodu vhodného rozdelenia subjektov podľa ich skúseností a v akej časti letového výcviku sa nachádzajú. Prvá kategória zahrňuje pilotov začínajúcich IFR výcvik. Títo piloti majú väčšinou základné informácie o rozdelení pozornosti počas prístrojových letov a znalosti s letom podľa rádionavigačných zariadení ako je VOR alebo DME čo je možné vďaka povinnosti využívať tieto rádionavigačné zariadenia v predchádzajúcich častiach výcviku, ako sú navigačné lety pre nalietavanie hodín a získavanie skúseností. V druhej kategórii sú piloti nachádzajúci sa po ukončení alebo na konci simulátorovej časti IFR výcviku, čo znamená že museli absolvovať približne 40 hodín na simulátore, ktorý je vhodný pre výcvik letu podľa prístrojov. Subjekty v tejto skupine by mali mať potrebné skúsenosti pre úspešný let vo všetkých fázach letu podľa pravidiel letu podľa prístrojov. Tieto skúsenosti a znalosti obsahujú let s pomocou priestorovej navigácie, VOR, DME, NDB a ILS. Tretia kategória je zložená z pilotov, ktorí úspešne dokončili IFR výcvik a sú pred alebo po praktickom preskúšaní pre získanie prístrojovej kvalifikácie. Posledná štvrtá kategória sú piloti, ktorí vlastnia prístrojovú kvalifikáciu a majú skúsenosti v podobne náletu podľa pravidiel IFR. Hodnota tohto náletu pre odlíšenie od tretej skupiny bola stanovená na hodnotu 250 hodín a viac. Ďalším dôvodom rozdelenia bolo, aby nedošlo k skresleniu alebo znehodnoteniu každej skupiny malým zastúpením subjektov a výsledky skúmaných letových parametrov boli čo najobjektívnejšie.



Obr. 2.1: Grafická vizualizácia informácií o jednotlivých skupinách.

Celkový vekový priemer všetkých subjektov má hodnotu 29 ± 10 rokov a ich vekové rozmedzie je 19 - 63 rokov. Priemerný nálet účastníkov meraní je 1288 ± 2894 hodín s minimom na hodnote 40 a maximom 13 000 hodín. Zo subjektov bolo 9 žien (8 %) a 105 mužov (92 %). Všetky subjekty mali platné osvedčenie o zdravotnej spôsobilosti prvej alebo druhej triedy. 28 (25 %) subjektov malo aspoň jedno zdravotné obmedzenie zo 4 vyskytujúcich sa, ktoré sú OML, VDL, VNL a VML. Informácie o jednotlivých kategóriách alebo skupinách, vrátane priemerného veku a priemerných letových hodín nad stĺpcami, sú vizuálne znázornené na obrázku 2.1 vyššie a slovné sú popísané ďalej v texte.

Skupina 1 má vekový priemer 26 ± 6 rokov a vekové rozpätie je 19 – 46 rokov. Priemerný nálet je v tejto skupine na hodnote 186 ± 152 hodín s minimom na 40 hodinách a maximom 700 hodín. Z 30 subjektov tvoriacich skupinu sú ženy 4 (13 %) a 26 sú muži (87 %). 7 (23 %) subjektov malo zdravotné obmedzenie.

Skupina 2 má vekový priemer 25 ± 7 rokov a vekové rozpätie je 21 – 47 rokov. Priemerný nálet je v tejto skupine na hodnote 236 ± 267 hodín s minimom na 85 hodinách a maximom 1200 hodín.

Z 25 subjektov tvoriacich skupinu je žena 1 (4 %) a 24 sú muži (96 %). 5 (20 %) subjektov malo zdravotné obmedzenie.

Skupina 3 má vekový priemer 25 ± 5 rokov a vekové rozpätie je 22 – 50 rokov. Priemerný nálet je v tejto skupine na hodnote 306 ± 282 hodín s minimom na 197 hodinách a maximom 1700 hodín. Z 29 subjektov tvoriacich skupinu sú ženy 3 (10 %) a 26 sú muži (96 %). 6 (21 %) subjektov malo zdravotné obmedzenie.

Skupina 4 má vekový priemer 38 ± 11 rokov a vekové rozpätie je 25 – 63 rokov. Priemerný nálet je v tejto skupine na hodnote 4215 ± 4158 hodín s minimom na 300 hodinách a maximom 13 000 hodín. Z 30 subjektov tvoriacich skupinu je žena 1 (3 %) a 29 sú muži (97 %). 10 (33 %) subjektov malo zdravotné obmedzenie.

2.2 Meracie vybavenie

Ako zázemím vhodným pre potreby meraní, bol zvolený Ústav leteckého zdravotníctví, Výcvikové expertizní část v areálu Ústřední vojenské nemocnice v Prahe 6. Nachádza sa tu výcvikové zariadenie GYRO IPT II využívané k nácviku priestorovej dezorientácie pre potreby Vzdušných síl Armády Českej republiky, ktoré je zobrazené na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Simulátor GYRO IPT II a jeho riadiace stanovisko.

Tento simulátor priestorovej dezorientácie je pôvodom od amerického výrobcu ETC Aircrew training systems s hlavným sídlom v Southamptone v štáte Pensylvánia. Táto firma má dlhoročné skúsenosti s výrobou podobného typu výcvikových prístrojov/zariadení už od začiatku 70-tych rokov. Konkrétne GYRO IPT II je simulátor pre tréning priestorovej dezorientácie so 6 stupňami



voľnosti. Simulátor je schopný verne navodiť a reprezentovať účinky viacerých letových ilúzií, či už vizuálnych alebo vestibulárnych, medzi ktoré patrí Coriolisova ilúzia.

Zvonku je simulátor umiestnený v základni s rotujúcou časťou pre nezávislý pohyb okolo osy z a taktiež v jej vertikálnom smere nezávisle od pohybov kabíny zapríčinených riadením subjektu, ktorý vykonáva let v simulátore. Ďalej je možný pohyb okolo osí y a x . Rozsahy pohybov, rýchlostí a zrýchlení [28] pre GYRO IPT II sú popísané nižšie v tabuľke 2.1.

Tabuľka 2.1: Výkonnostné parametre simulátora GYRO IPT II.

Pohyby pre	ETC GYRO IPT II
Klonenie/pohyb okolo osy x	Rozsah pohybu $\pm 15^\circ$
	Max. rýchlosť $10^\circ/\text{s}$
	Zrýchlenie $50^\circ/\text{s}^2$
Klopenie/pohyb okolo osy y	Rozsah pohybu $\pm 15^\circ$
	Max. rýchlosť $10^\circ/\text{s}$
	Zrýchlenie $50^\circ/\text{s}^2$
Zatáčanie/pohyb okolo osy z	Rozsah pohybu Súvislých 360°
	Max. rýchlosť $150^\circ/\text{s}$
	Zrýchlenie $15^\circ/\text{s}^2$
Zdvih/pohyb v smere osy z	Rozsah pohybu $\pm 12.7 \text{ cm}$
	Max. rýchlosť 44.9 cm/s
	Zrýchlenie 150 cm/s^2

Kabína je vo vnútri vybavená sedačkou s päťbodovým zapínacím systémom, prístrojovou doskou reprezentovanou displejom pre zobrazenie prístrojov rôznych typov lietadiel, širokouhlou plochou pre premietanie letu pre pilota, bočnými prístrojovými panelmi s potrebnými spínačmi a ovládacími prvkami, letovými riadiacimi prvkami a kamerou so záberom na letiaceho respondenta, ktorá poskytuje živý prenos obrazu do riadiaceho stanovišťa pre vizuálnu kontrolu zdravia a priebehu záťaže uchádzača. Vnútro simulátora je možné prekonfigurovať na rôzne typy lietadiel pre potreby výcviku pilotov letúňov alebo helikoptér. Ovládacie prvky zodpovedajú typom letúňov Z-142, L-159, JAS-39 a rovnako aj prístrojová doska s palubnými prístrojmi. Z vrtuľníkov je



podporovaná konfigurácia typu UH-60. Pre potreby tejto práce subjekty vykonali experimentálne lety v simulátore nakonfigurovanom pre typ letúňa Zlín Z-142.

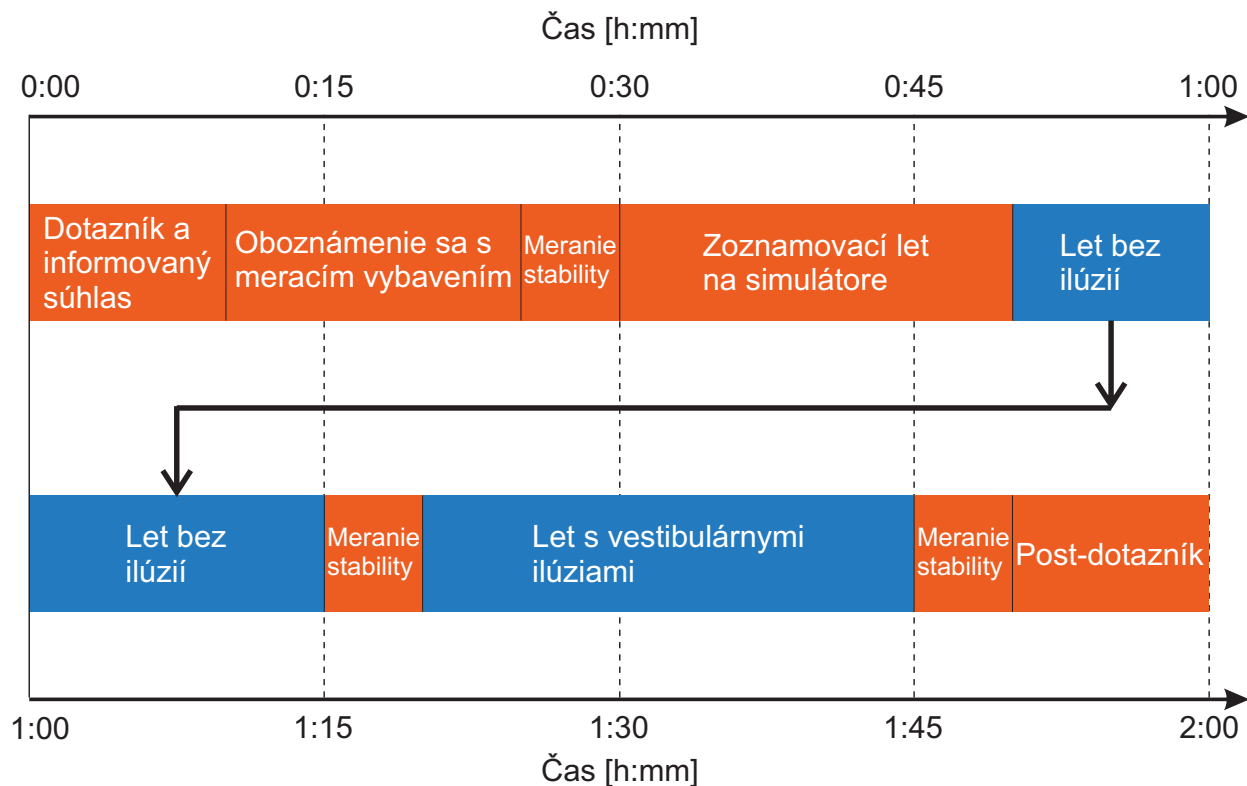
K simulátoru je pripojené riadiace stanovisko, z ktorého je možné vytvárať, prispôbovať podmienky potrebné pre výcvik, riadiť celú simuláciu a sledovať priebeh letu. Upraviť sa dajú poveternostné podmienky ako je dohľadnosť, oblačnosť, vietor, zrážky. Ďalej sa dá špecifikovať oblasť letu, letisko, typ lietadla a mnoho iných. Tu sa zaznamenávajú všetky letové parametre ako sú kurz, výška, rýchlosť, poloha, ďalej pohyby riadiacou pákou a mnoho iných údajov.

2.3 Priebeh meraní

Priebeh meraní z dôvodu časových možností a využitia simulátora na ULZ aj inými zložkami ako napríklad Ozbrojené sily ČR, bolo potrebné plánovať merania jednotlivých subjektov dostatočne dopredu a tvoriť časový harmonogram. Merania prebiehali v pracovné dni v rozmedzí od 08:00 ráno do približne 16:00 poobede. Každému účastníkovi boli venované dve hodiny času a plnej pozornosti pre hladký priebeh meraní, a u každého z nich bolo potrebné vykonať dva takéto experimenty pre absolvovanie oboch profilov s jednotýždňovou maximálnou medzerou medzi týmito dvomi meraniami. Na každom meraní bolo vykonané rozlietanie, let naplánovaného profilu bez vestibulárnych ilúzií a na záver naplánovaný profil s vestibulárnymi ilúziami, vrátane Coriolisovej ilúzie. Grafické zobrazenie harmonogramu je na obrázku 2.3, na druhom meraní sú vynechané úvodné časti, ktoré sú vyplnenie dotazníku a oboznámenie sa s meracím vybavením.

Po príchode na prvé meranie bol každý subjekt požiadaný o vyplnenie dotazníku s osobnými informáciami a údajmi, ktoré budú použité pre kategorizovanie účastníkov do jednotlivých skupín. Na jeho záver každý podpísal informovaný súhlas s vykonaním experimentu a spracovaním jeho osobných údajov. Ďalej boli subjektu pripojené meracie prístroje pre nepretržitý zber fyziologických dát, konkrétne časová zmena elektronickej aktivity srdca alebo EKG, akcelerometre pre neustále snímanie stability subjektu a následne bola vykonaná kontrola jeho alebo jej stability na stabilometrickej podložke. Potom sa subjekt presunul do simulátora kde pre oboznámenie sa s jeho riadiacimi prvkami a komfortom strávil približne 30 minút, počas ktorých absolvoval zoznamovací let.

Po ukončení zoznamovacieho letu bola subjektu poskytnutá mapa s plánovanou traťou prvého letového profilu (obr. 2.4) a po oznámení pripravenosti na let bol absolvovaný tento letový profil bez



Obr. 2.3: Vizualizácia plánovaného harmonogramu a priebeh merania každého subjektu.

ilúzií, počas ktorého prebiehal záznam letových dát v celkovom trvaní 25 minút. Po absolvovaní letu bola subjektu znovu zmeraná stabilita rovnakým spôsobom spomenutým vyššie.

Ďalej sa subjekt vrátil späť do simulátora a absolvoval rovnakú letovú trať ale tentoraz s tromi implementovanými vestibulárnymi letovými ilúziami, vrátane Coriolisovej ilúzie ako druhej v poradí. Let trval znovu približne 25 minút. Po ukončení letu bola subjektu znovu zmeraná stabilita na stabilometrickej podložke. Na záver subjekt ústne odpovedal na otázky z dotazníku pre získanie údajov o jeho/jej skúsenosti a subjektívnych pocitoch.

Na druhom meraní bol subjekt prevedený takmer rovnakým procesom s tým rozdielom, že už znovu nevyplňoval vstupný dotazník a druhý letový profil mal trochu iný návrh. Letová mapa druhého profilu a druhý letový profil je možné vidieť na obrázku 2.5.

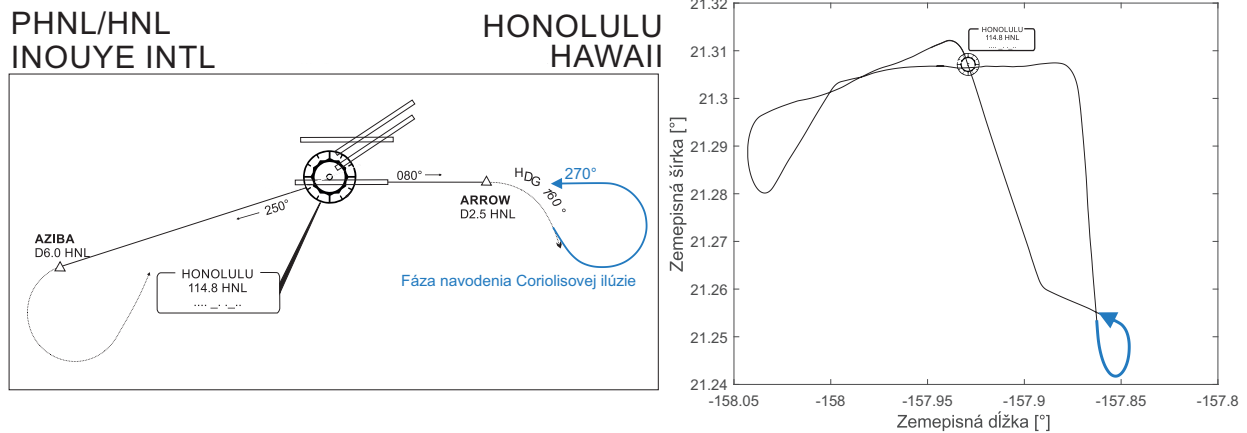
Oba letové profily boli vykonané z letiska Daniel K. Inouye International Airport (PHNL/HNL) na Havaji a sú v nich implementované tri vestibulárne ilúzie. Dĺžka oboch profilov je od vzletu až po pristátie v trvaní približne 20 minút. Na ich začiatku je inicializovaná geografická poloha lietadla a sú nastavené jeho výkonnostné charakteristiky. Ďalej sú nastavené vlastnosti prostredia



a poveternostné podmienky ako základňa oblačnosti, jej typ, vietor v rôznych výškach, zrážky, dohľadnosť, teplota a mnoho iných.

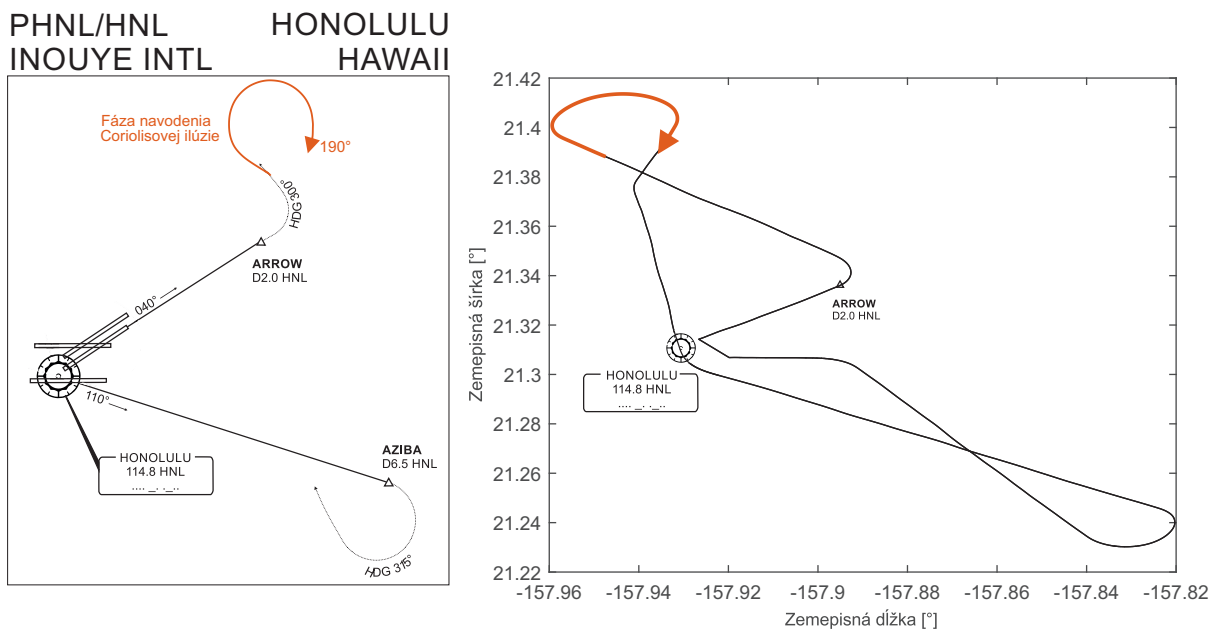
V prípade prvého letového profilu je vzlet z dráhy 08R. Poveternostné podmienky sú nepriaznivé, je nastavená malá dohľadnosť vo vzdialenosti 0.3 námornej míle a nízka oblačnosť so základňou v 100 stopách siahajúca do výšky 4000 stôp. Vietor má nulovú hodnotu vo všetkých nastaviteľných výškach, vonkajšia teplota vzduchu je 32.22°C a tlak vzduchu je 1013.21 hPa. Po audio príkaze od operátora za riadiacou konzolou je subjektom vykonaný vzlet kde po rozlete a krátkom čase v stúpaní bola implementovaná somatogravická ilúzia, ktorá vytvorí ilúziu nadmerného stúpania. Subjekt má ďalej pokračovať po radiále 080 od rádionavigačného zariadenia VOR s označením HNL nachádzajúceho sa v blízkosti dráhy letiska vzletu do vzdialenosti 2.5 NM so stúpaním do 1500 stôp. Po dosiahnutí tejto vzdialenosti je nutné pre správne sledovanie trati točiť vpravo do kurzu 160°. Po dosiahnutí stanoveného kurzu dostane subjekt príkaz stúpať do výšky 2000 stôp a následne vykonať ľavotočivú zatačku do kurzu 270°. Behom tejto ustálenej zatačky je implementovaná Coriolisova ilúzia. Letový profil pokračoval príkazom letieť späť na VOR HNL. Po jeho preletení by mal potom subjekt naletieť radiál 250 od VOR-u a nasledovať audio príkaz klesať do výšky 1500 ft. Po dosiahnutí DME vzdialenosti 6 NM od VOR-u HNL je potrebné začať ľavotočivú zatačku do kurzu 045°. Behom tejto časti bola implementovaná somatogyrálna ilúzia. Na záver dostal účastník výskumu pokyn klesať do výšky 800 stôp a pomocou vektorovania od riadiaceho operátora simulátora bol privedený na finálne priblíženie dráhy 08R a vykonal alebo vykonala vizuálne pristátie za vyhovujúcich poveternostných podmienok a dohľadnosti. Zobrazenie prvého profilu je nižšie na obrázku 2.4.

Druhý letový profil má podobné charakteristiky a rovnaké meteorologické podmienky. Teda malá dohľadnosť vo vzdialenosti 0.3 námornej míle a nízka oblačnosť so základňou v 100 stopách siahajúca do výšky 4000 stôp. Vietor má nulovú hodnotu vo všetkých nastaviteľných výškach, vonkajšia teplota vzduchu je opäť 32.22°C a tlak vzduchu je 1013.21 hPa. Odlet prebieha v smere dráhy 04R s implementáciou somatogravickej ilúzie a pokračovaním po radiále 040 pomocou VOR-u HNL do vzdialenosti 2 NM so stúpaním do 1500 stôp. Po dosiahnutí publikovanej vzdialenosti 2 NM let pokračuje s ľavotočivou zatačkou do kurzu 300° s nadväzujúcimi stúpaním do výšky 2000 stôp. Ďalej subjekt dostal hlasový príkaz točiť vpravo do kurzu 190°. V tejto fáze je implementovaná Coriolisova ilúzia. Nasleduje let priamo na VOR HNL a po jeho preletení je potrebné naletieť radiál 110 od VOR-u HNL a letieť do vzdialenosti 6.5 NM s klesaním do výšky 1500 stôp. Po dosiahnutí



Obr. 2.4: Prvá traťová mapka a prvý letový profil.

vzdialenosti 6.5 NM let pokračuje pravotočivou zatáčkou do kurzu 315° kde je implementovaná somatogyrálna ilúzia. Po tejto sekcii je vydaný subjektu príkaz klesať do 800 ft a prebieha vektorovanie pre priblíženie a pristátie na dráhe 26L za vizuálnych meteorologických podmienok. Traťová mapka druhého profilu je zobrazená v ľavej časti obrázku 2.5 a samotný profil je v časti pravej.



Obr. 2.5: Druhá traťová mapka a druhý letový profil.



V oboch letových profiloch je Coriolisova ilúzia navodená v dlhotrvajúcej ustálenej zatáčke pri zmene kurzu o viac ako 180° . Po vydaní hlasového povelu od operátora simulátora a vstupu do zatáčky subjektom, sa čaká na splnenie podmienok pre úspešné implementovanie ilúzie pohybom simulátora. Podmienky sú splnené vtedy ak sa aktuálna hodnota priečneho sklonu a kurzu lietadla nachádza v určitom rozmedzí preddefinovaných hodnôt.

Následne je vykonaná rotácia celej kabíny simulátora okolo vertikálnej osy z do ľavého smeru. Kabína je urýchlená počas 30 sekúnd na rýchlosť uhlovej rotácie $60^\circ/s$ uhlovým zrýchlením $2^\circ/s^2$. Opätovne prebieha kontrola či momentálny kurz lietadla sa nachádza v prijateľných hodnotách a pokiaľ áno, subjektu je zvykovým povelením prikázané nahlas prečítať sekvenciu čísiel, ktoré sa nachádzajú v priestore za sedačkou subjektu za ľavým alebo pravým ramenom a je teda potrebné vykonať pohyb hlavou za seba a jemne nadol. Tým je podráždený vestibulárny systém a dostaví sa senzácia Coriolisovej ilúzie.

Po tejto časti sa znovu čaká, pokiaľ bude hodnota kurzu v akceptovateľnom rozsahu. Ak je hodnota kurzu podľa softvéru prijateľná, začne decelerácia kabíny simulátora z počiatočnej rýchlosti rotácie $60^\circ/s$ až do klúdu a teda $0^\circ/s$. Zastavenie rotácie je vykonané za čas 60 sekúnd uhlovým zrýchlením $1^\circ/s^2$.

2.4 Zber dát

Počas oboch vykonaných meraní prebiehal zber dát o každom testovanom subjekte v rôznych oblastiach. Je možné ich rozdeliť na letové dáta, dáta o simulátore, fyziologické dáta a dáta z ústneho dotazníku. Fyziologické dáta (EKG a stabilita jedinca) nie sú v tejto práci použité, pretože nie sú potrebné pre dosiahnutie cieľu diplomovej práce a preto ďalej rozoberané nebudú.

Dáta z dotazníku pre zistenie charakteristiky populácie subjekty vypĺňali po príchode na merania. Otázky v dotazníku, na ktoré subjekty odpovedali mimo osobných informácií (vek, meno a priezvisko...) sú nasledovné:

- Lietané typy (označte, ktoré ako PIC)
- Celkový nálet
- Obmedzenie zdravotnej spôsobilosti (VML, VNL..)
- Nálet ako FI



- Nálet ako FI alebo IRI

Dáta z dotazníku zameraného na subjektívne hodnotenie letových ilúzií boli získavané na záver každého merania po vykonaní letu s vestibulárnymi ilúziami. Každý subjekt bol po prvom meraní, ústne opýtaný na nasledujúce otázky:

- Ktorá ilúzia bola najhoršia?
- Pocity pri Coriolisovej ilúzii a hodnotenie jej intenzity medzi 0-10
- Pocity pri somatogyrálnej ilúzii a hodnotenie jej intenzity medzi 0-10
- Pocity pri somatogravickej ilúzii a hodnotenie jej intenzity medzi 0-10
- Iné postrehy, pocity a aké konkrétne?

Tieto otázky boli položené znovu po druhom meraní, doplnené o ďalšie nižšie:

- Cítite zlepšenie v porovnaní s prvým meraním?
- Súhlasíte s implementovaním výcviku vestibulárnych ilúzií do výcviku pilotov?

Dáta o simulátore boli zaznamenávané po spustení letovej simulácie počas oboch letových profilov s a aj bez ilúzie. Tieto dáta pozostávajú celkovo z 396 rôznych parametrov pre každý zaznamenaný let v tvare tabuľky súborového formátu .csv s veľkosťou okolo 250 MB. Sú tu informácie o mnohých vykonaných nastaveniach rôznych prvkov simulátora zo strany pilota ale aj na riadiacom stanovisku. Je tu vidieť, či boli vykonané úpravy nastavenia klapiek, nastavenia barometrického výškomeru, zmeny nastavenia kurzu, trimu pre rôzne prvky, nastavenie letového odpovedača, vzdialenosť od naladeného DME a mnoho ďalších.

Letové dáta boli taktiež zaznamenávané po spustení letovej simulácie počas oboch letových profilov s a aj bez ilúzie. Letové dáta sú tvorené celkovo 158 rôznymi parametrami znovu v tvare tabuľky vo formáte .csv a veľkosťou zhruba 160 MB. Sú tu údaje napríklad o výške letu, pozdĺžnom a priečnom sklone, vertikálnej rýchlosti, rýchlosti letu, zemepisnej polohe a mnoho ďalších. Okrem spomínaných dát sú tu aj informácie o polohe kabíny simulátora ako napríklad jej rotácia okolo osy z, uhlová rýchlosť, uhlové zrýchlenie, sklon atď. Celkovo bolo vytvorených 456 záznamov z meraní 114 subjektov. Každý subjekt absolvoval prvý letový profil dvakrát, raz bez ilúzie a raz s ilúziou a



rovnako aj druhý letový profil s ilúziou a bez ilúzie, čo pripadá na 4 záznamy pre každý subjekt. Letové dáta spolu s dátami o simulátore boli zaznamenávané so vzorkovacou frekvenciou 125 Hz, čo znamená každých 0.008 sekundy.

2.5 Analýza a spracovanie dát

Spracovanie nameraných letových dát bolo vykonané v programovacom prostredí MATLAB a jeho stručný priebeh je vizualizovaný na obrázku 2.8, ktorý sa nachádza na konci kapitoly.

Samotné spracovanie začalo ohraničením a definovaním úseku kde bola implementovaná Coriolisova ilúzia pre obidva letové profily. Kvôli obrovskému množstvu dát, odlišností, unikátnosti v štýle pilotovania každého subjektu a časovým odchýlkam medzi jednotlivými letmi nie je možné definovať tento úsek pohľadom na dáta alebo grafické zobrazenie priebehu profilu. Ohraničenie častí letového profilu, z ktorého sa budú čerpať letové parametre pre ich analýzu bolo vykonané pomocou hľadania zmien v priečnom náklone a kurze lietadla. Letový úsek profilov kde je alebo sa predpokladá Coriolisov ilúzia je navrhnutý ako takmer 180° zatáčka. Preto je tu možné zaznamenať dlhotrvajúcu zmenu náklonu a veľkú zmenu kurzu lietadla. Spolu s použitím funkcie na vyhľadanie a lokalizovanie náhlych zmien v spomenutých parametroch priečneho náklonu a kurzu lietadla je takýmto spôsobom určené započatie zatáčky a jej ukončenie.

Identifikácia výskytu Coriolisovej ilúzie v prípade letov s implementovanou Coriolisovou ilúziou na oboch letových profiloch jedna a dva a ďalšie ohraničenie týchto úsekov bolo vykonané pomocou informácie kedy nastala rotácia hlavy za účelom kontroly nápisu nachádzajúceho sa za pilotom, čo spôsobí senzáciu Coriolisovej ilúzie. Tento akt bol vykonaný po splnení toho, že letové parametre priečneho náklonu a kurzu lietadla sa nachádzajú v preddefinovanom rozmedzí pre úspešné započatie rotácie kabíny simulátora okolo osy z , kedy sa zväčšuje jej uhlová rýchlosť s konštantným uhlovým zrýchlením. Po dokončení rotácie dostal subjekt hlasový povel k otočeniu hlavy. Tento bod sa považuje za moment kedy je subjekt zasiahnutý Coriolisovou ilúziou. Správna identifikácia tohto bodu bola overená kontrolou rotácie kabíny simulátora, konkrétne rýchlosť jej rotácie a uhlové zrýchlenie v stupňoch. V dátach každého letového profilu je možné identifikovať úsek počiatku tejto rotácie a taktiež jej konca. Výstupné skúmané parametre v ďalších častiach pochádzajú z úseku 10 sekúnd pred otočením hlavy a siahajú až do 64 sekúnd po tomto okamihu.



Následne bolo potrebné ohraničenie referenčných úsekov na obidvoch letových profiloch jedna a dva bez Coriolisovej ilúzie, kde je ilúzia približne implementovaná, aby bolo možné porovnať letový profil bez versus letový profil s implementovanou Coriolisovou ilúziou. V tomto prípade bol použitý prístup s definovaním podmienok pre rozmedzie zmeny priečného náklonu spolu so záznamom kedy bol vydaný audio povel pre otočenie hlavy subjektu. Keďže Coriolisova ilúzia nie je prítomná, neexistujú ani dáta o rotácií kabíny simulátora, s ktorými by bolo možné overiť počiatok letovej ilúzie. Napriek tomu je takéto ohraničenie úseku dostačujúce. Úsek od otočenia hlavy bol opäť v rozmedzí -10 s až +64 sekúnd.

S takto definovanými a ohraničenými úsekmi bolo možné z mnohých letových parametrov extrahovať také, ktoré sú potrebné pre porovnanie a hodnotenie dopadu ilúzie na let. Jedná sa o nasledujúce parametre: čas od počiatku simulácie, kurz lietadla, priečny sklon, nadmorská výška letu, vertikálna rýchlosť, pohyb riadiacou pákou pre zmenu pozdĺžneho sklonu a pohyb riadiacou pákou pre zmenu priečného sklonu. Tieto parametre boli vyexportované do tabuliek vo formáte .xlsx pre ďalšiu prácu s nimi a ich analýzu. V tejto časti bolo zistené aj to, že zo 456 záznamov nedošlo v 7 prípadoch k žiadnemu zápisu dát alebo pri ich zázname nastala chyba a teda tieto merania boli vylúčené z ďalšej analýzy a použitia v práci.

Prvým krokom v analýze extrahovaných dát bolo vykonanie normalizácie pre priebeh kurzu, nadmorskú výšku, priečny sklon, pohyb riadiacou pákou pre zmenu pozdĺžneho sklonu a pohyb riadiacou pákou pre zmenu priečného sklonu. Bola použitá klasická normalizácia typu L2 daná vzorcami 2.1 a 2.2.

$$x_{norm} = \frac{x}{\|x\|_2} \quad (2.1)$$

$$\|x\|_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2} \quad (2.2)$$

Tá počíta vzdialenosť medzi jednotlivými bodmi ako druhú odmocninu z celkového súčtu druhých mocnín týchto bodov ako je vidieť vo vzorci 2.2. Jednotlivé hodnoty vo vektore daného parametru sú potom podelené ich vzdialenosťou čo je znázornené vzorcom 2.1. Normalizácia zmení merítka pre jednotlivé parametre z absolútnych hodnôt na relatívne hodnoty, ktoré sa nachádzajú v rozmedzí 0 až 1 a minimalizuje chyby vzniklé rôznymi počiatočnými hodnotami vyplývajúcich z nepresnosti riadenia jednotlivých subjektov a poskytne jednotnú základňu alebo



referenčnú úroveň pre hodnotenie jednotlivých letov medzi nimi. Ako konkrétny príklad môže byť použitý letový parameter priebehu nadmorskej výšky letu. Nariadená výška pri vstupe do časti kde by mala byť navodená Coriolisova ilúzia alebo do časti s implementovanou ilúziou je v oboch letových profiloch 2000 stôp. Absolútna hodnota výšky je ale ovplyvnená jemnými prirodzenými nepresnosťami v riadení alebo väčšími chybami vyplývajúcich z nedostatočnej skúsenosti subjektov a teda nie každý subjekt sa v častiach profilu, ktoré sa porovnávajú, nachádza vo výške 2000 stôp. Normalizácia ďalej vytvára referenčnú základňu pre porovnanie parametrov medzi jednotlivými účastníkmi meraní a pripravuje tieto dáta na použitie v metódach súvisiacich so strojovým učením.

Tieto normované dáta boli vstupnými dátami pre použitie v metóde strojového učenia PCA (Principal Component Analysis). V preklade analýza hlavných komponentov je strojová metóda bez učiteľa (unsupervised). To znamená, že zhlukovanie prebieha bez zásahu do tohto procesu alebo bez vedenia človekom a algoritmus pracuje sám pre nájdenie podobností a odlišností v dátach. Analýza hlavných komponentov sa využíva pre identifikovanie podobností a zhlukov v zložitých dátových celkoch a dokáže poskytnúť informáciu o tom, ktoré komponenty najviac ovplyvňujú hodnoty v dátovom súbore. To sa deje znížením počtu dimenzií dátového súboru, napríklad z 5 dimenzií (kde každá dimenzia reprezentuje jeden faktor) na ich menší počet pri zachovaní stále čo najväčšieho počtu informácií. V metóde je každý komponent s dátami premietnutý do priestoru a preložený najvhodnejšou priamkou prechádzajúcou počiatkom. Na túto priamku je následne položený jej jednotkový vektor pre popis dát v osy x a k nemu je ďalej vytvorený ortogonálny jednotkový vektor pre popis dát v ose y . Rotáciou týchto dvoch vektorov do klasického súradnicového systému x, y dostaneme popis skúmaného komponentu v týchto súradniciach. PCA bola vykonaná pre každý letový parameter samostatne a znížila 9251 dimenzií (počet vzoriek pre každý parameter) na dve dimenzie. Jej použitie bolo aplikované na každý jeden letový parameter pre meranie jedna zahrňujúci všetky skúmané skupiny spolu a ďalej zvlášť na každý letový parameter pre jednotlivé skupiny z merania jedna. Tento postup bol opakovaný pre meranie dva. Na výstupných grafoch je potom možné identifikovať zhluky, ktoré sú spolu a vykazujú podobné vlastnosti. Tieto podobné vlastnosti predstavujú let s ilúziou alebo bez nej. Z tohto je teda možné identifikovať či daný parameter je negatívne ovplyvnený Coriolisovou ilúziou.

Spracovanie letových dát a ich analýza pokračovali s cieľom čo najlepšie zosúladiť letové parametre pre čo ich najlepšie porovnanie a minimalizovať časové deformácie v priebehu

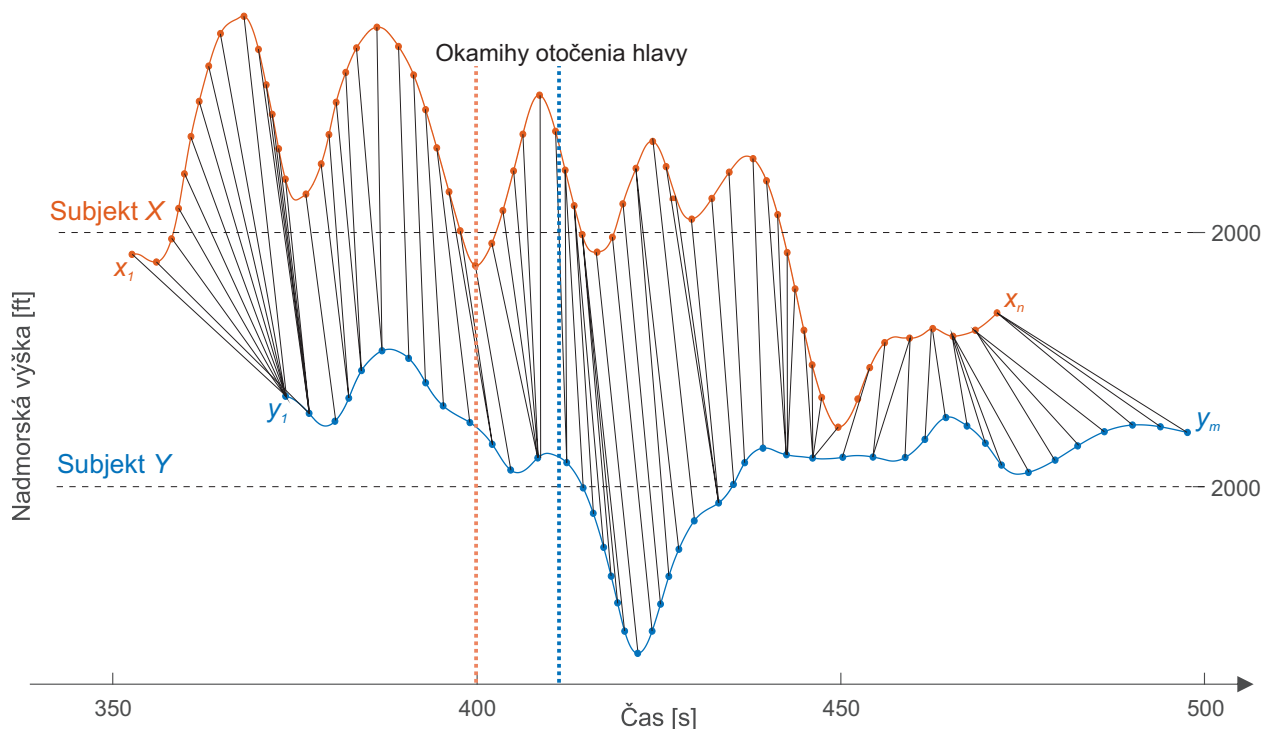


vybraných letových částí z celého profilu, pretože tieto úseky nemajú rovnaké počiatky a konce v čase, čo je zapríčinené znovu jedinečnými odchýlkami v riadení každého subjektu. Niektoré subjekty stúpali do výšky pre Coriolisovu ilúziu trochu rýchlejšie alebo vykonávali zatáčku s trochu menším alebo väčším priečnym náklonom. Riešením pre dosiahnutie tohto najvhodnejšieho zosúladenia porovnávaných tratí bola aplikácia metódy Dynamic Time Warping (DTW) na normované dáta z predchádzajúceho kroku. DTW bolo pôvodne používané pre porovnanie hlasových záznamov a v odvetví automatického rozpoznávania reči [29]. Pomocou tejto metódy prebieha nájdenie optimálneho zosúladenia medzi dvomi časovo závislými signálmi, kde každý z nich má rôznu dĺžku pre ich čo najlepšie porovnanie. Vďaka tomu je možné vyhodnotiť podobnosti a odlišnosti jednotlivých letových parametrov vyskytujúcich sa v letových profiloch medzi testovanými subjektmi v čase pod vplyvom Coriolisovej ilúzie. Fungovanie a aplikácia DTW začína dodaním jedného referenčného signálu s označením X , napríklad priebeh nadmorskej výšky s časom od určitého subjektu a dodaním signálu Y od iného subjektu, kde oba signály pochádzajú z rovnakého profilu. Následne prebieha hľadanie najkratšej Euklidovskej vzdialenosti medzi jednotlivými bodmi (x_1, \dots, x_n) a (y_1, \dots, y_m) , čo je popísané vzorcom 2.3.

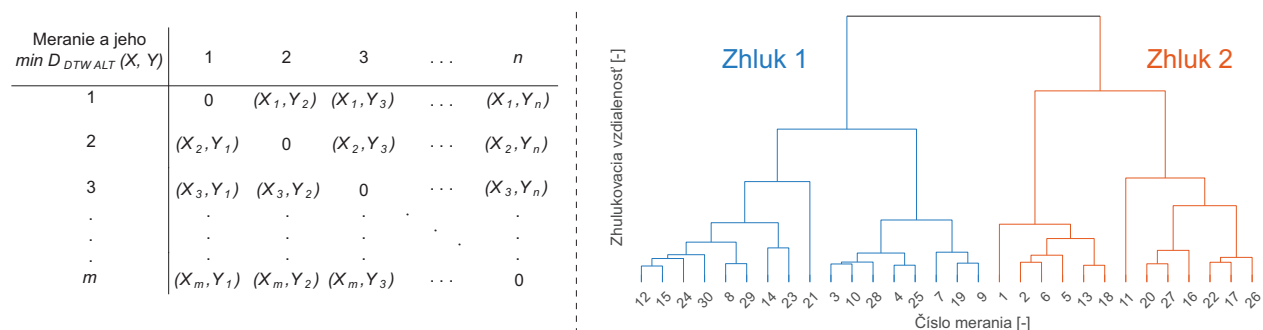
$$D_{DTW}(X, Y) = \min \left(\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (x_i - y_j)^2} \right) \quad (2.3)$$

Tieto vzdialenosti sú zapisované do matice, z ktorej je následne určená najkratšia vzdialenosť alebo najmenšia cena, pre čo najlepšie zosúladenie signálov pre ich porovnanie. To je reprezentované na obrázku 2.6 čo najlepším definovaním dvojice bodov s najkratšou vzdialenosťou pre porovnanie medzi dvomi signálmi.

Porovnanie prebehlo v zmysle každý jednotlivý letový parameter čiže napríklad priebeh výšky z profilu jedna od určitého subjektu versus priebeh výšky od ostatných subjektov z profilu jedna. Takéto porovnanie bolo vykonané pre všetky letové parametre samostatne pre profil jedna a profil dva, v zmysle všetky subjekty oproti všetkým ostatným. Z každého porovnania bola výstupom už spomínaná konečná najkratšia vzdialenosť pre porovnanie vykonaných letov pre jednotlivé parametre. Tieto výsledné vzdialenosti boli zapisované do novej vzdialenostnej matice obsahujúcej všetky najkratšie vzdialenosti medzi jednotlivými letmi pre každý parameter, samostatne pre profil jedna a profil dva.



Obr. 2.6: Vizualizácia princípu DTW na nenormovanej nadmorskej výške letu od dvoch subjektov z rovnakého profilu.



Obr. 2.7: Výstupná vzdialenostná matica vytvorená pomocou metódy DTW a výstupný dendrogram z metódy WHC.

Výstupná vzdialenostná matica z metódy DTW (v ľavej časti na obrázku 2.7) bola využitá pre aplikovanie metódy hierarchického zhľukovania. Konkrétne bola použitá Wardova metóda hierarchického zhľukovania. Táto metóda patrí v oblasti strojového učenia opäť k metódam bez učiteľa a bola použitá pre krížovú kontrolu a konfrontáciu výsledkov poskytnutých z analýzy PCA. Wardova metóda hierarchického zhľukovania sa snaží zhľukovať vzdialenosti zo



vzdialenostnej matice a hľadať zhluky s podobnými vlastnosťami. Charakterizované zhluky potom môžu reprezentovať v každom meranom parametre (priechny sklon, nadmorská výška, pozdĺžny sklon...) vzorce chovania s podobnými vlastnosťami. Z podobností sú nájdené zhluky, ktorými sú identifikované profily s ilúziou a bez ilúzie alebo letový profil z prvého merania a letový profil z druhého merania. Princíp zhlukovania funguje na hľadání minimálneho prírastku rozptylu v rámci zhluku po zlúčení dvoch zhlukov zo vstupnej vzdialenostnej matice. Hodnota prírastku sa počíta cez umocnenú Euklidovskú vzdialenosť medzi zhlukmi. Čím je hodnota rozptylu menšia tým sú si hodnoty v jednom zhluku podobnejšie. Jedná sa o aglomeratívnu metódu zhlukovania, a teda na začiatku zhlukovania je každá vzdialenosť považovaná za jeden zhluk a zhlukovaním sú tvorené ďalšie a ďalšie zhluky až pokiaľ všetky vzdialenosti tvoria jeden spoločný zhluk alebo je dosiahnuté požadované číslo zhlukov. Wardova metóda hierarchického zhlukovania bola aplikovaná na jednotlivé profily pre každý letový parameter a následne pre každú skupinu a príslušný letový parameter.

$$\Delta(Ward) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (x_i - y_j)^2 \quad (2.4)$$

Vzorec číslo 2.4 popisuje spôsob voľby dvojice zhlukov pre ich zlúčenie pri každej iterácii. Premenné x_i a y_i reprezentujú prvky dvoch zhlukov, ktoré sú vyhodnocované pre ich zlúčenie, písmená n a m popisujú ich veľkosť a cieľom je nájsť najmenší prírastok hodnoty $\Delta(Ward)$ po zlúčení týchto dvoch zhlukov.

Po uskutočnení Wardovo hierarchického zhlukovania je možné vytvoriť dendrogram alebo stromový diagram (na obrázku 2.7 v pravej časti), ktorý vizuálne reprezentuje tvorbu jednotlivých zhlukov. Keďže sa jedná o aglomeratívnu metódu zhlukovania a teda od spodku smerom nahor, na osy x sú zobrazené jednočlenné zhluky (sú nazývané aj listy) reprezentované jednou hodnotou, od ktorých je tvorené zhlukovanie ďalej. Tieto jednotlivé zhluky (listy) sú spájané do ďalších zhlukov a tvoria vetvy. Čím je vertikálna vzdialenosť vetiev podľa osy y väčšia, tým je väčší rozdiel medzi danými vetvami a zhluky medzi sebou súvisia menej. Čísla zhlukov na osy x reprezentujú jednotlivé merania, z ktorých sa dá potom určiť o ktorý profil sa jedná a či bol s ilúziou alebo bez. Metóda WHC bola aplikovaná pre overenie a doplnenie výsledkov z PCA. Podľa vytvoreného dendrogramu z metódy WHC boli určené zhluky s podobnými vlastnosťami, ktoré boli premietnuté na výsledky z PCA a tým bola overená správnosť výstupu metódy PCA.

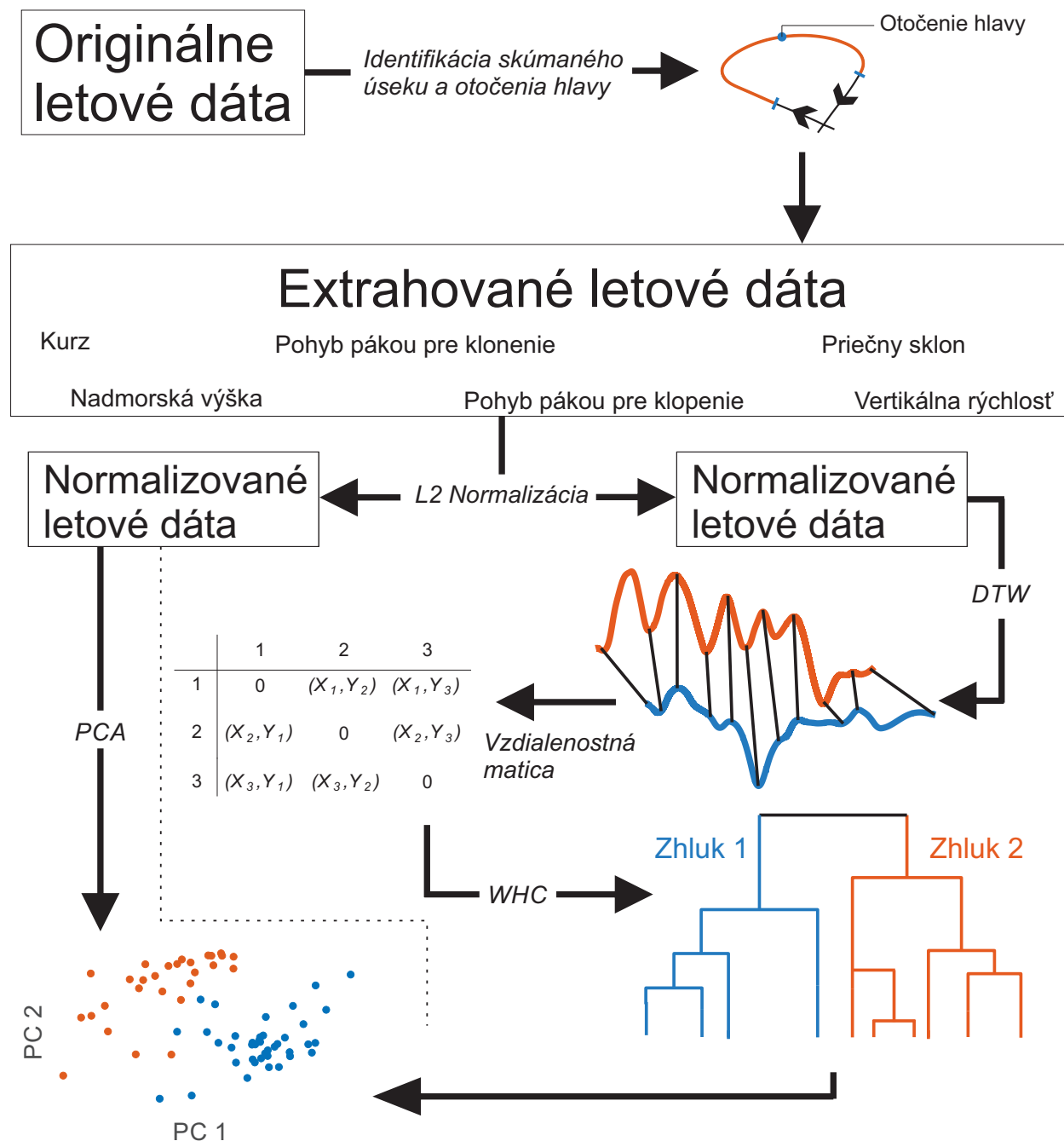


Pre kvantifikovanie dopadu Coriolisovej ilúzie na rôzne skupiny bola použitá opäť výstupná vzdialenosť z metódy DTW. Táto bezrozmerná vzdialenosť čo najlepšie popisuje zosúladenie dvoch profilov pre ich porovnanie. To je použité pre nájdenie rozdielov, ako je ktorá skupina ovplyvnená dopadom Coriolisovej ilúzie na tých letových parametroch, kde sú významné rozdiely nájdené po použití PCA a WHC metód. Pre každý jeden subjekt v skupine bola zistená najkratšia vzdialenosť medzi letom s ilúziou a bez nej v príslušnom profile. Výstupné vzdialenosti boli reprezentované pre každú skupinu krabicovým grafom (boxplotom), ktorý graficky zachytáva hlavné štatistické vlastnosti daného súboru. Pre zistenie závislosti alebo nezávislosti medzi rozdielmi vzdialeností v profile 1 a profile 2 pre každú skupinu bolo použité štatistické testovanie. Najprv bolo potrebné overiť normalitu párových dát. To bolo vykonané pomocou Shapiro-Wilkinson testu na hladine významnosti $\alpha \leq 0.05$. Pri výsledku testu, kedy dáta nepochádzajú z normálneho rozdelenia bol pre zistenie závislosti použitý Wilcoxonov znamienkový test znovu na rovnakej hladine významnosti $\alpha \leq 0.05$. Ak bola splnená normalita testovaných dát, bol na rovnakej hladine významnosti $\alpha \leq 0.05$ použitý párový t-test, pre zistenie závislosti a rozdielov v celkovej chybe spôsobenej Coriolisovou ilúziou pre danú skupinu.

Spracovanie nazbieraných dát z ústneho dopytovania sa jednotlivých účastníkov meraní prebiehalo taktiež v programovacom prostredí MATLAB. Vstupné dáta pre prvotné spracovanie boli vo formáte excel tabuľky.

Prvým krokom v spracovaní dotazníku bolo definovanie rôznych dátových formátov pre jednotlivé údaje pre ich lepšiu prácu v ďalších krokoch. Ďalej prebiehal výpočet veku jednotlivých účastníkov podľa rozdielu medzi ich dátumom narodenia a dátumom druhého merania. Potom nasledovalo transformovanie rozličných informácií na číselné hodnoty. Prebiehala transformácia údajov o tom, či je (hodnota 1) alebo nie je (hodnota 0) daný subjekt FI. Odpovede subjektov, či danú skúsenosť s vestibulárnymi ilúziami považujú za vhodné implementovať do budúceho výcviku pilotov, boli transformované na 1 (áno som za) respektíve na 0 (som proti). Ďalej bola klasifikovaná doba vykonaného merania, čo bolo možné zistiť zo záznamu času a dátumu merania pre každý subjekt. Ak meranie bolo vykonané pred obedom, bola záznamu priradená 0. Ak poobede, záznamu bola priradená 1.

Nasledujúcou aktivitou bolo kategorizovanie zdravotných obmedzení jednotlivých účastníkov meraní. V situácii, že účastník nemal žiadne zdravotné obmedzenie (NIL), bol záznam transformovaný na hodnotu 0. Zdravotnému obmedzeniu typu OML bola priradená hodnota 1.



Obr. 2.8: Vizualizácia postupu spracovania letových parametrov.

Obmedzeniu typu VDL, hodnota 2. Obmedzeniu typu VDL, hodnota 3 a obmedzeniu typu VML, hodnota 4. Podobným štýlom prebiehalo kategorizovanie licencií jednotlivých účastníkov výskumu. V prípade licencie ATPL bola subjektu priradená v tomto poli hodnota 1. V prípade CPL,



hodnota 2. Ak sa jednalo o typ licencie PPL, hodnota 3. Licencie LAPL a SPL boli zaradené do kategórií 4 a 5. V prípadoch kedy boli pri subjekte uvedené viaceré licencie, bola ponechaná kategória s najmenšou číselnou hodnotou, čo napríklad znamená, že u držiteľa licencie ATPL a PPL bude ponechaná len licencia ATPL. Na záver bolo určené pohlavie jednotlivých subjektov, hodnota 1 pre ženy a hodnota 0 pre mužov a kategorizácia pocitu zlepšenia odolnosti voči alebo zlepšenie v zmysle zvládania ilúzie. Ak subjekt cítil alebo cítila zlepšenie, bola tu priradená hodnota 1 a v opačnom prípade hodnota 0. Ako posledné prebiehalo transformovanie hodnotenia jednotlivých ilúzií, ktoré boli hodnotené v rozmedzí 0 (subjekt nevnímal alebo necítil danú ilúziu) až po hodnotu 10 (subjekt vnímal alebo cítil ilúziu veľmi silne). Toto rozmedzie bolo transformované do hodnôt 0 až 5 pre jednoduchšiu prácu s hodnotením príslušnej ilúzie a jasnejšie získanie výsledkov. Zo stupnice 0 až 10, hodnoty 0 až 2 boli zlúčené do skupiny 1, subjekt *necíti ilúziu*. Hodnoty 3 až 4 boli zlúčené do skupiny 2, subjekt *ľahko cíti ilúziu*. Hodnoty 5 až 6 boli zlúčené do skupiny 3, subjekt *stredne cíti ilúziu*. Hodnoty 7 až 8 boli zlúčené do skupiny 4, subjekt *silno cíti ilúziu*. Hodnoty 9 až 10 boli zlúčené do skupiny 5, subjekt *veľmi silno cíti ilúziu*. Takto upravené dáta boli vyexportované opäť vo forme excel tabuľky.

Analýza dotazníku začala zistením informácií o celkovej populácii a o jednotlivých skupinách. Boli tu použité klasické štatistické funkcie pre výpočet priemeru a rozptylu. Výsledky vidieť na začiatku tejto kapitoly na obrázku 2.1. Následne boli vypočítané priemery celkového hodnotenia jednotlivých ilúzií, vrátane priemerov pre jednotlivé skupiny.

Vyhodnotenie rozdielov intenzity medzi prvým a druhým meraním Coriolisovej ilúzie vykonané pomocou Wilcoxonovho znamienkového testu. Dôvody pre použitie tohto testu sú také, že zaznamenané odpovede sú párové dáta a tieto dáta nesplňujú podmienku normálneho rozdelenia. V poslednej rade, odpovede sú kategorické premenné. Testovanie prebiehalo na hladine významnosti $\alpha \leq 0.05$. K získaniu iných informácií typu koľko ľudí chce implementovať podobný výcvik s vestibulárnymi ilúziami alebo koľko ľudí pocítovalo zlepšenie oproti prvému meraniu, boli opäť použité klasické štatistické funkcie.

Na záver spracovania dotazníku boli na dáta použité regresné modely s cieľom pokúsiť sa nájsť, ktoré zo zozbieraných informácií o subjektoch ovplyvňujú hodnotenie intenzity ilúzie. Prvým modelom bol lineárny regresný model vytvorený krokovou regresiou. Vysvetľovanou premennou boli hodnotenia intenzít prerozdelené do dvoch skupín pre lepšiu vstup do regresie kvôli malému počtu dát. Hodnotenie 1, 2 a 3 (*necíti ilúziu*, *ľahko cíti ilúziu* a *stredne cíti ilúziu*)

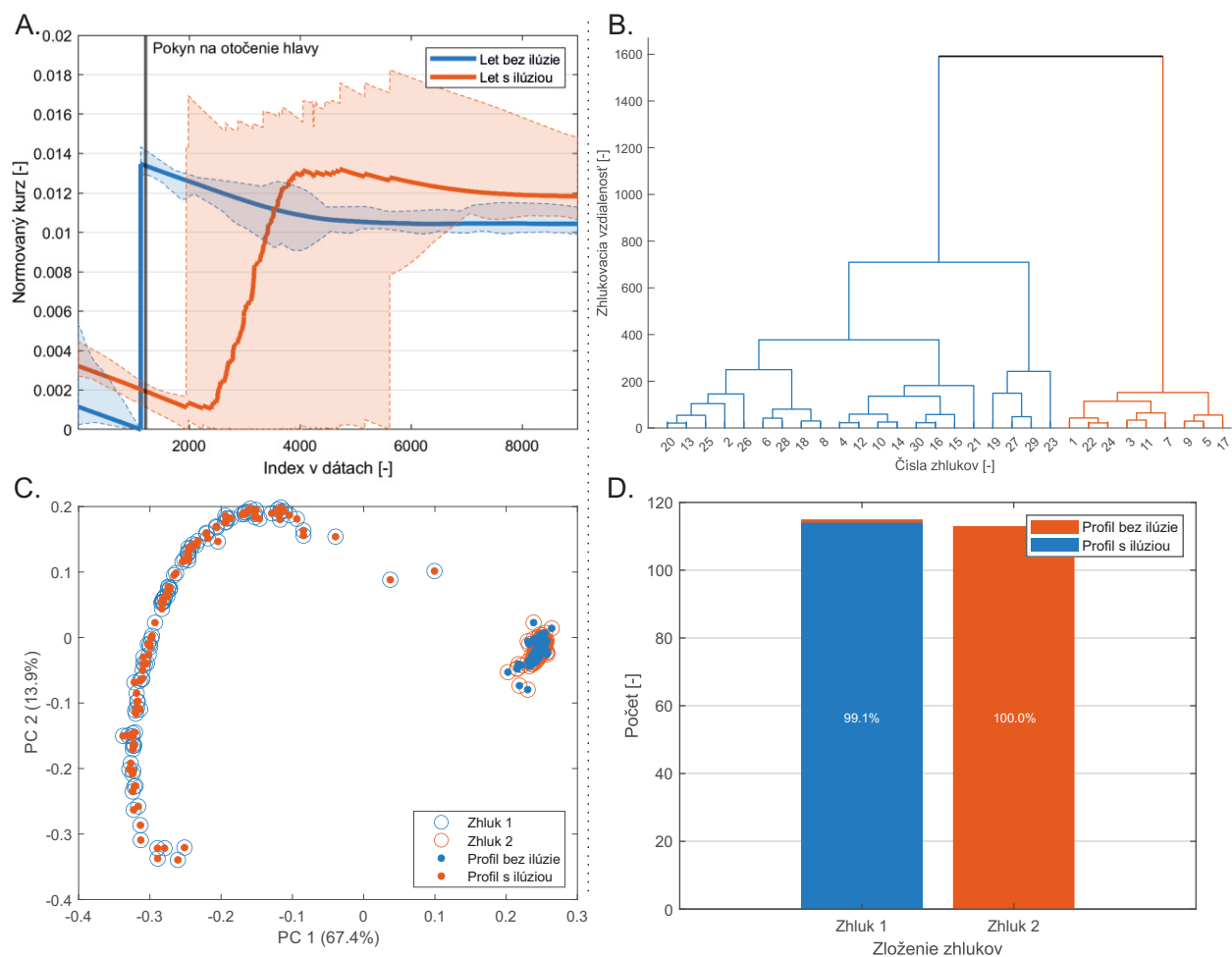


boli pretransformované na 1 a zvyšné hodnotenia (*silno cíti ilúziu a veľmi silno cíti ilúziu*) na 0. Vysvetľujúcimi premennými vstupujúcimi do regresie boli: pohlavie, vek, typ licencie, vlastnenie inštruktorskej kvalifikácie, zdravotné obmedzenie, číslo skupiny, doba kedy bolo uskutočnené prvé meranie a doba kedy bolo uskutočnené druhé meranie.

Druhou použitou regresiou bola multinomická regresia s rovnakými vysvetľujúcimi premennými (pohlavie, vek, typ licencie, vlastnenie inštruktorskej kvalifikácie, zdravotné obmedzenie, číslo skupiny, doba kedy bolo uskutočnené prvé meranie a doba kedy bolo uskutočnené druhé meranie) a rovnakými vysvetľovanými premennými, čo sú hodnotenia vnímaných intenzít Coriolisovej ilúzie v skupinách 0 a 1.

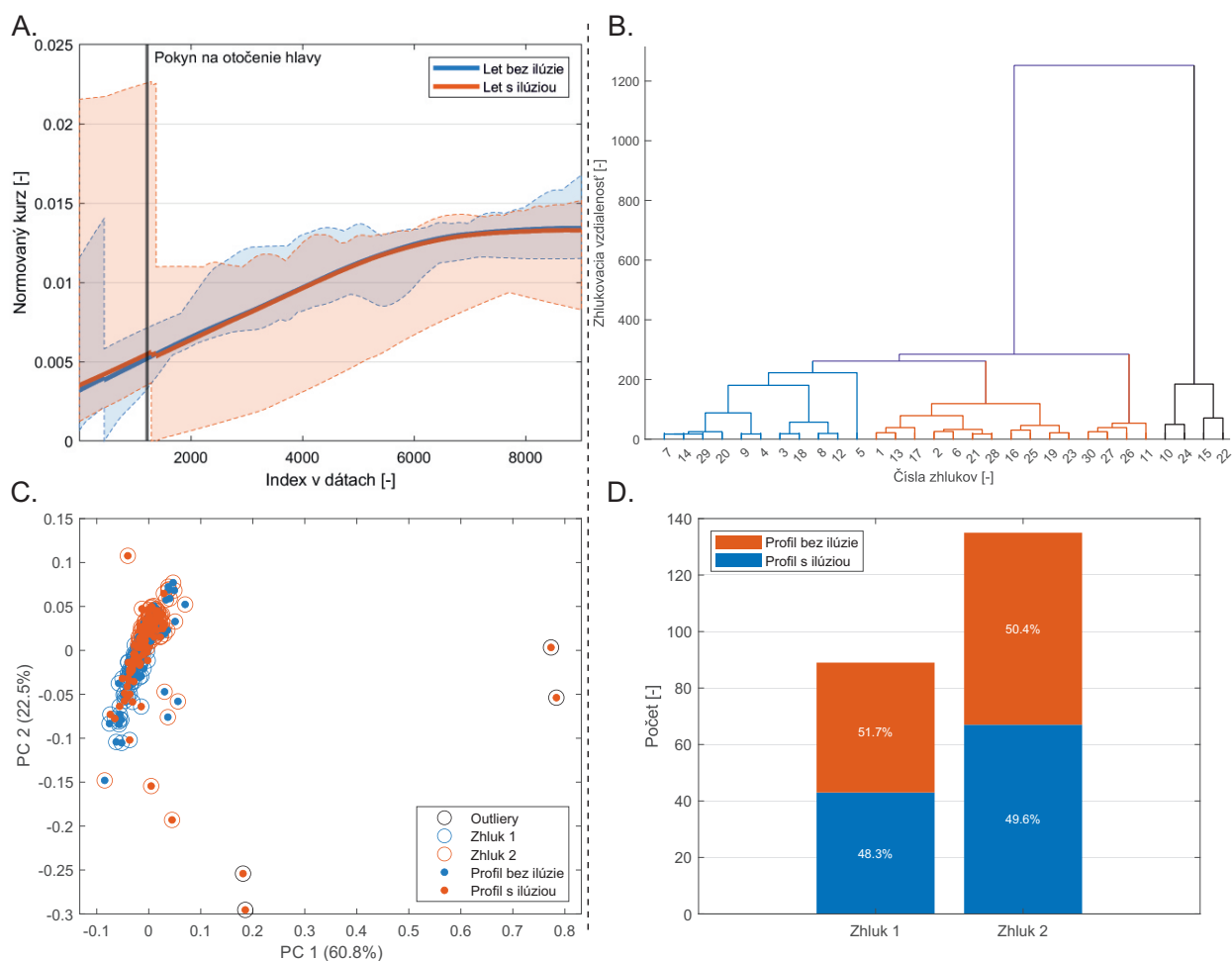
3 Prezentácia výsledkov

V tejto časti sú prezentované hlavné výsledky niektorých letových parametrov, na ktoré bude autor v kapitole 4 Diskusia výsledkov naväzovať a predstavujú jadro výsledkov diplomovej práce. Všetky výsledky použitých metód pre jednotlivé skupiny sa nachádzajú v časti prílohy a rovnako aj výsledky dotazníkových odpovedí pre jednotlivé skupiny. Na prvom obrázku číslo 3.1 je vyobrazenie spracovania letového parametru kurzu lietadla z profilu 1. Na obrázku A je vidieť vykreslenie normovaného kurzu lietadla pre všetky skupiny spoločne z prvého merania.



Obr. 3.1: Spracované letové výsledky kurzu lietadla z profilu 1. Normovaný kurz lietadla (A), Dendrogram z WHC (B), PCA s aplikovaným výsledkom WHC (C), Zloženie zhlukov dendrogramu (D).

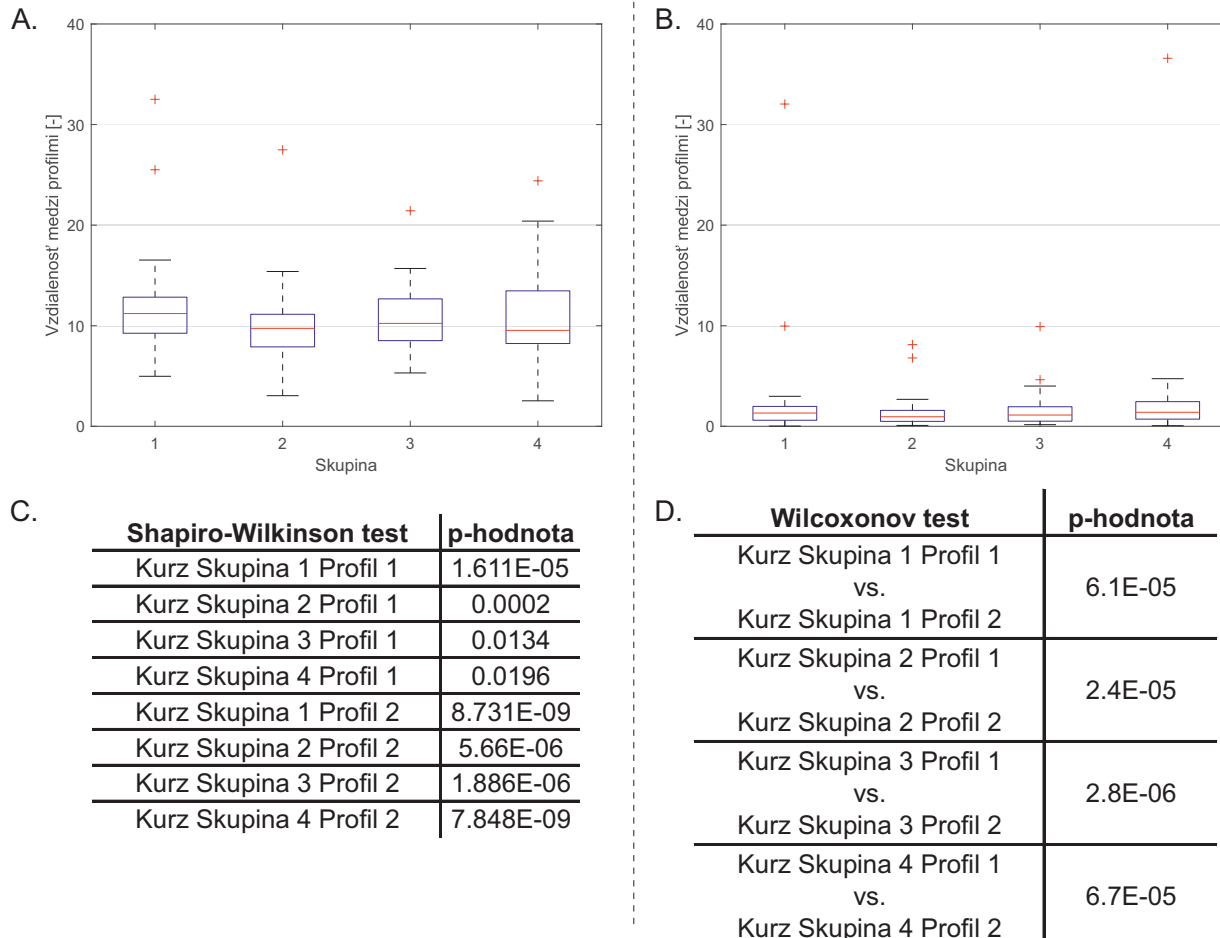
Ďalej v časti A vidieť rozpätie individuálnych priebehov v akom sa subjekty nachádzali a priemerný normovaný priebeh kurzu pre profil číslo 1 s a bez ilúzie. Na obrázku B je výsledný dendrogram z metódy WHC, podľa ktorého zhlukov prebiehala klasifikácia kurzu na let s a bez ilúzie pre profil 1 a slúži ako doplnok analýzy PCA. V časti C je výsledok PCA analýzy s aplikovanou klasifikáciou podľa zhlukov identifikovaných z dendrogramu získaného z metódy WHC. Na časti D obrázku 3.1 je zloženie zhlukov zistených pomocou metódy WHC. Jednotlivé stĺpce sú farebne rozlíšené pre profil s ilúziou a bez ilúzie pre jednoduchšiu vizualizáciu zloženia daného zhuklu aj s percentuálnou hodnotou zastúpenia profilu s ilúziou a profilu bez ilúzie.



Obr. 3.2: Spracované letové výsledky kurzu lietadla z profilu 2. Normovaný kurz lietadla (A), Dendrogram z WHC (B), PCA s aplikovaným výsledkom WHC (C), Zloženie zhlukov dendrogramu (D).



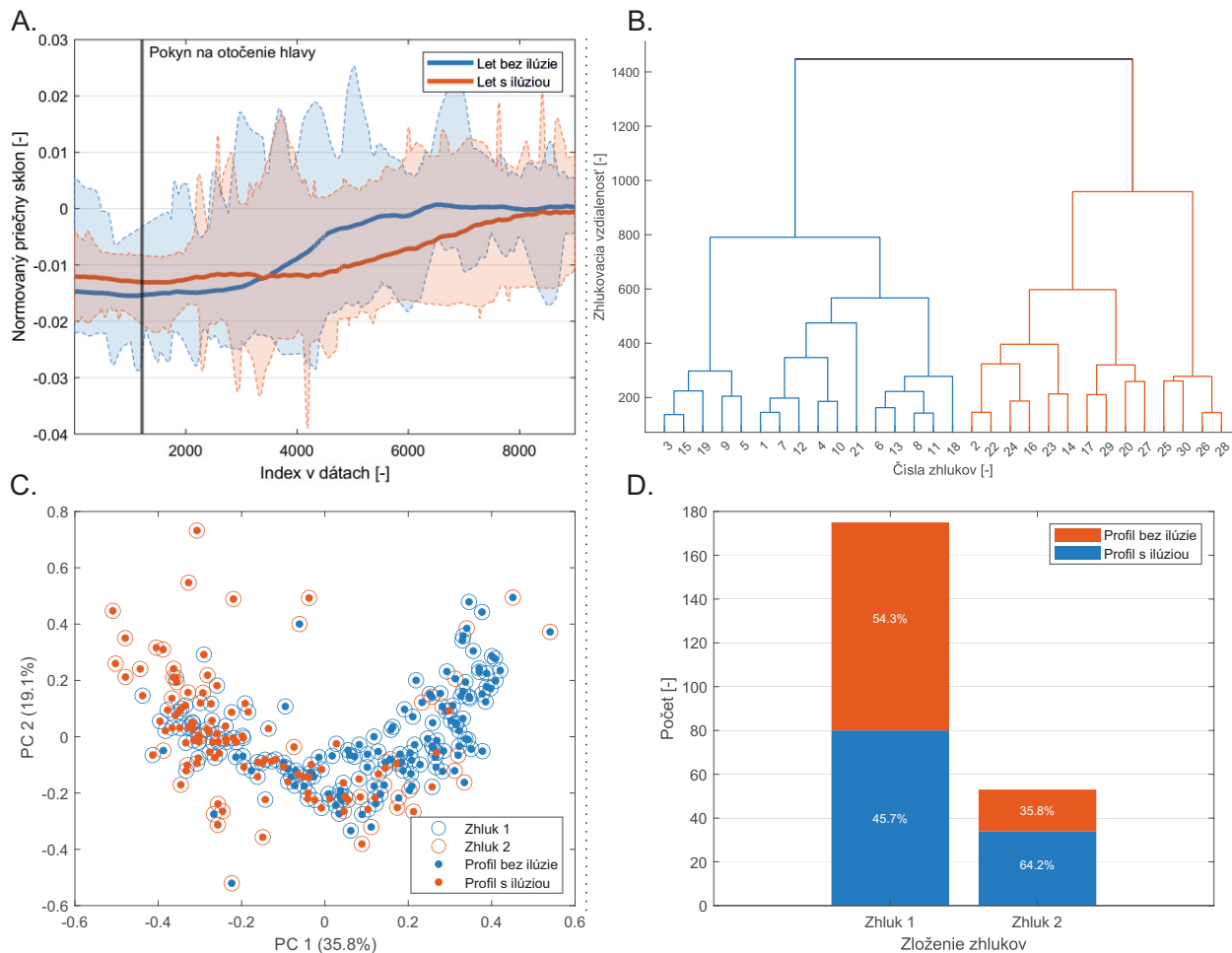
Na obrázku 3.2 sú prezentované výsledky získané použitím rovnakých metód pre parameter letového kurzu lietadla z druhého profilu alebo merania. V časti A sú vykreslené normované priebehy kurzu lietadla, v časti B dendrogram získaný z metódy WHC. Aplikovanie zhlukov zistených z dendrogramu v spolupráci s metódou PCA je v časti C a v časti D je štruktúra nájdených zhlukov vyplývajúcich z metódy WHC.



Obr. 3.3: Spracované štatistické výsledky odchýlky kurzu lietadla pre rôzne skupiny. Krabicový diagram pre každú skupinu z profilu 1 (A), Krabicový diagram pre každú skupinu z profilu 2 (B), Výsledky Shapiro-Wilkinson testu (C), Výsledky Wilcoxonovho testu (D).

Na obrázku 3.3 vidieť výsledky z metódy DTW, ktoré zobrazujú veľkosť chyby zapríčinenou Coriolisovou ilúziou medzi letmi bez ilúzie a letmi s ilúziou. V časti A sú priemerné odchýlky reprezentované krabicovými diagramami pre jednotlivé skupiny pre prvý profil. V časti B sú

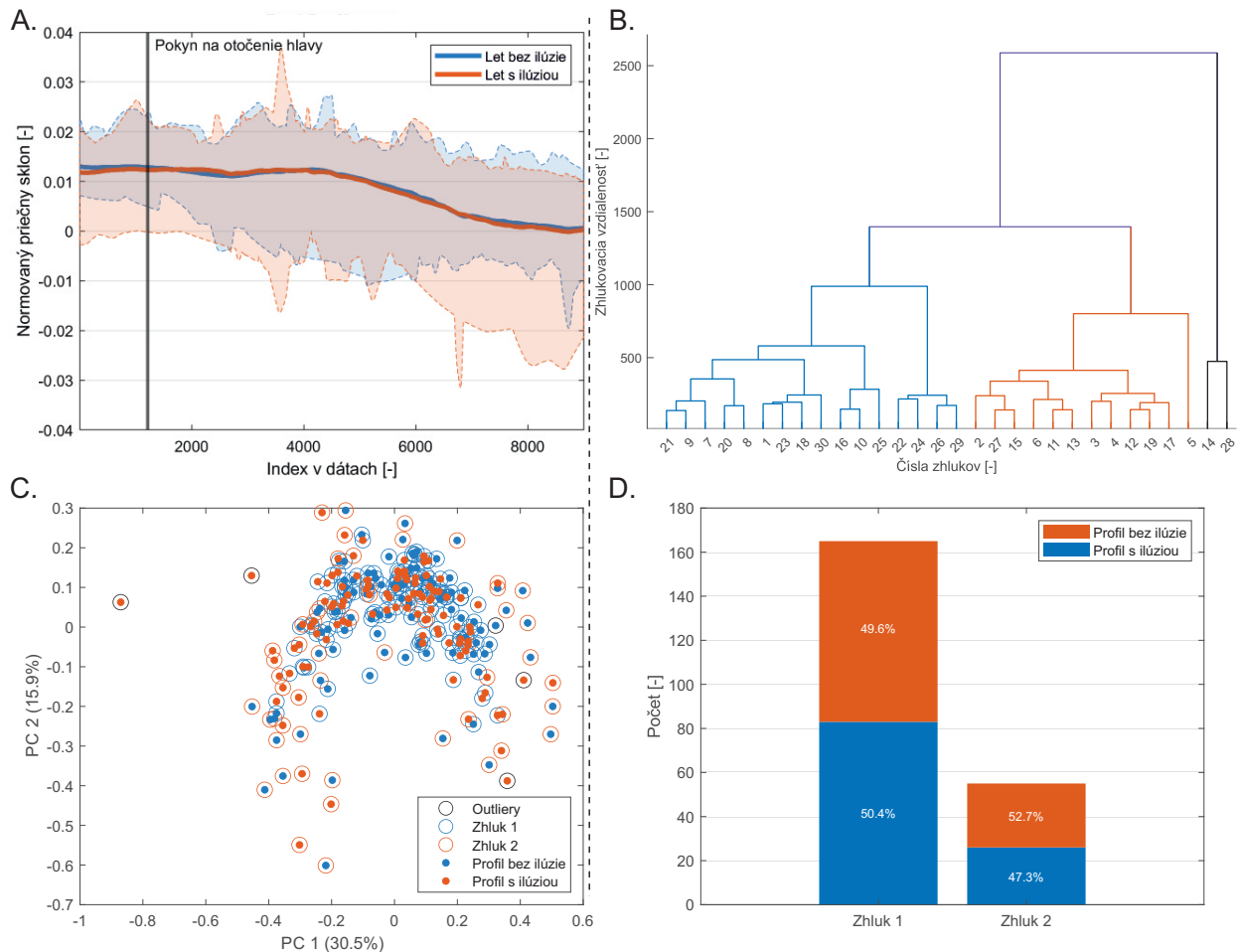
výsledky veľkosti odchýlky spôsobenej Coriolisovou ilúziou pre profil 2. V časti C sú výsledné p hodnoty získané zo Shapiro-Wilkinson testu pre overenie normality dát a v časti D sa nachádzajú výsledné p hodnoty dosiahnuté aplikovaním Wilcoxonovho testu pre zistenie závislosti veľkosti odchýlky medzi profilom 1 a profilom 2 individuálne, pre každú skupinu.



Obr. 3.4: Spracované výsledky náklonu lietadla z profilu 1. Normovaný náklon lietadla (A), Dendrogram z WHC (B), PCA s aplikovaným výsledkom WHC (C), Zloženie zhukov dendrogramu (D).

Na obrázku 3.4 je vyobrazenie spracovania letového parametru náklonu lietadla. Na obrázku A je vidieť vykreslenie normovaného priebehu náklonu lietadla pre všetky skupiny z prvého merania a teda profilu 1. Ďalej vidieť rozpätie v akom sa subjekty nachádzali a zpriemerovaný priebeh náklonu pre profil číslo 1 s a bez ilúzie. Na obrázku B je výsledný dendrogram z metódy WHC,

podľa ktorého zhlukov prebiehala klasifikácia náklonu na let s a bez ilúzie pre profil 1. V časti C je výsledok PCA analýzy s aplikovanou klasifikáciou podľa zhlukov z metódy WHC. Na časti D obrázku 3.4 je zloženie zhlukov zistených pomocou metódy WHC a ich percentuálne vyjadrenie.

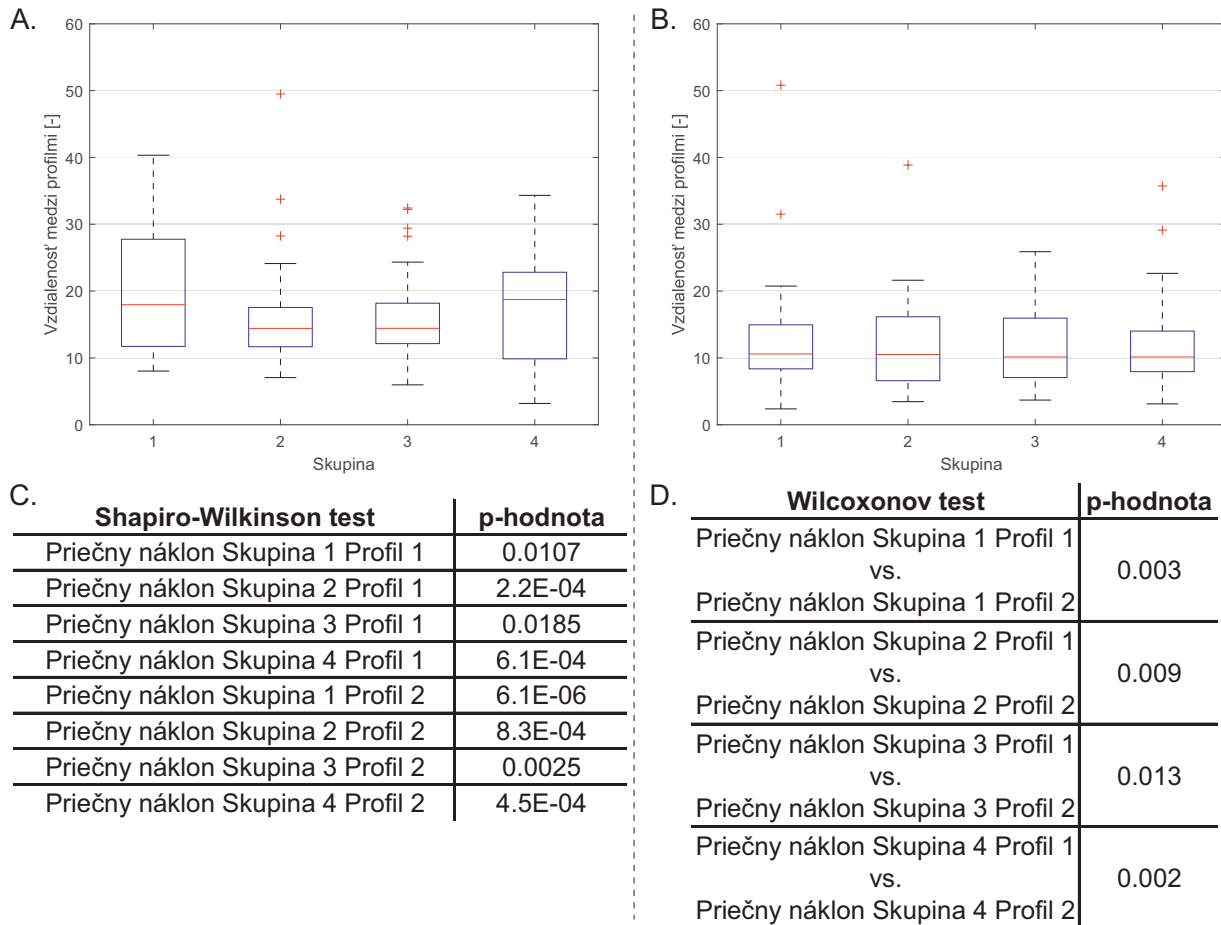


Obr. 3.5: Spracované výsledky priečného náklonu lietadla z profilu 2. Normovaný náklon lietadla (A), Dendrogram z WHC (B), PCA s aplikovaným výsledkom WHC (C), Zloženie zhlukov dendrogramu (D).

Na obrázku 3.5 sú prezentované výsledky z aplikovaných metód na parameter priečného náklonu lietadla získaného z druhého merania počas letu podľa profilu 2. Časť A popisuje normované priebehy priečného náklonu pre let s ilúziou a bez ilúzie podľa profilu 2. Časť B je výstupný dendrogram z metódy WHC, ktorý je aplikovaný s kombináciou metódy PCA pre

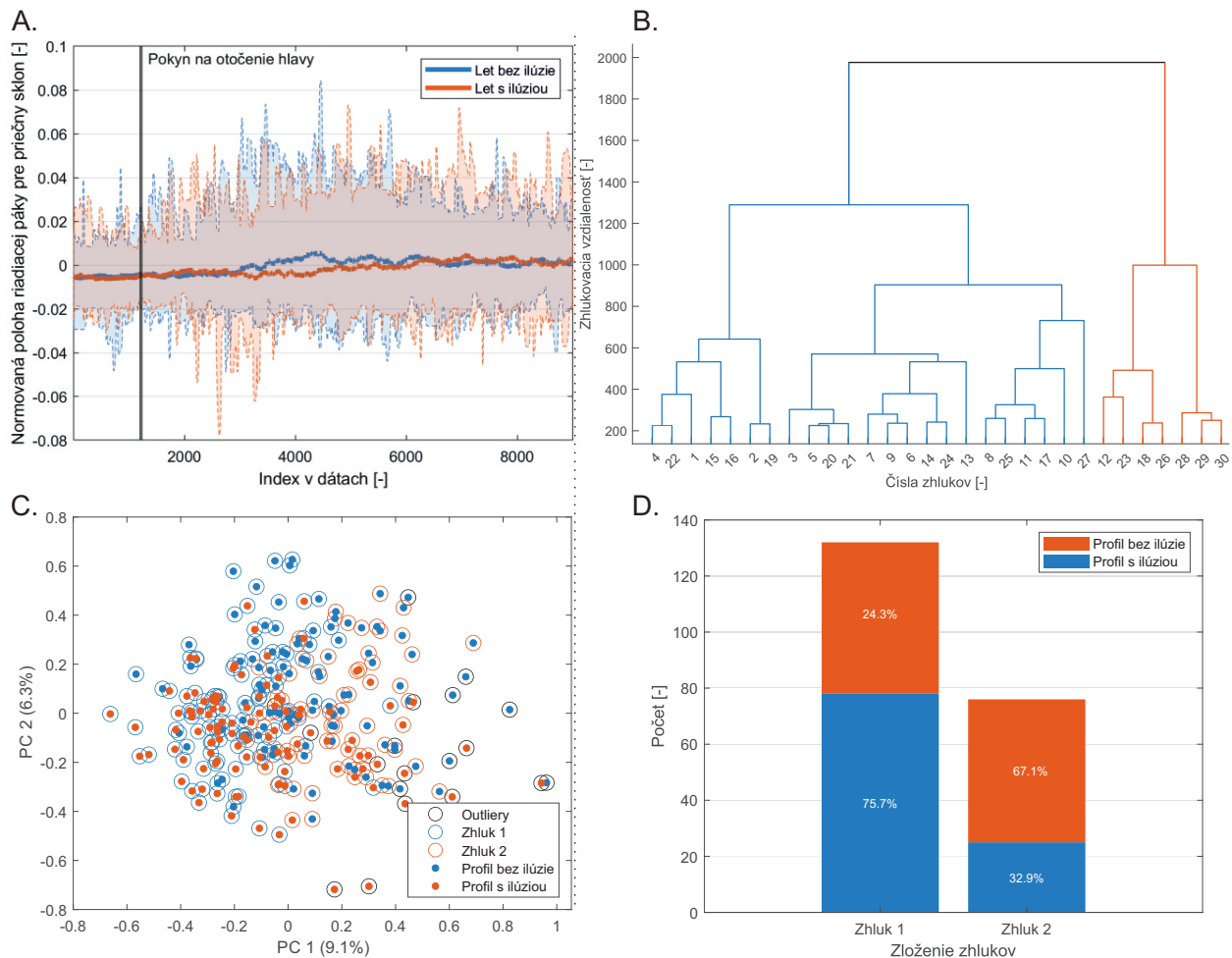


rozlíšenie letov s ilúziou a bez ilúzie. A posledná časť D popisuje štruktúru zhlukov identifikovaných metódou WHC.



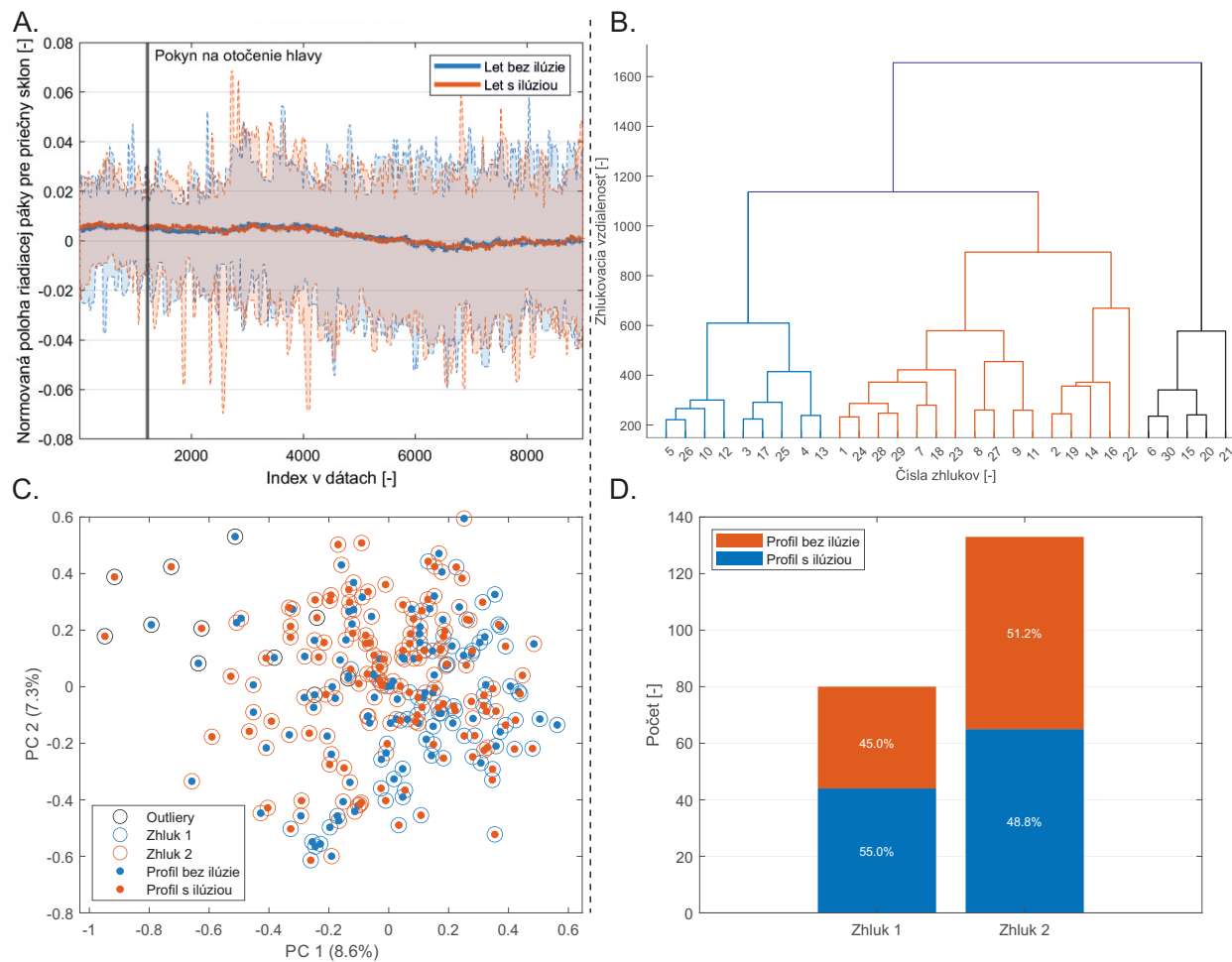
Obr. 3.6: Spracované štatistické výsledky odchýlky náklonu lietadla pre rôzne skupiny. Krabicový diagram pre každú skupinu z profilu 1 (A), Krabicový diagram pre každú skupinu z profilu 2 (B), Výsledky Shapiro-Wilkinson testu (C), Výsledky Wilcoxonovho testu (D).

Na obrázku 3.6 vidieť spracovanie veľkosti odchýlky medzi letovým profil s ilúziou a bez ilúzie, ktorá je spôsobená Coriolsovou ilúziou a je získaná vďaka metóde DTW. V časti A sú krabicovými diagramami veľkosti odchýlok pre jednotlivé skupiny z profilu 1 a v časti B taktiež odchýlky ale pre profil 2. Štatistické spracovanie odchýlky vzniklej prítomnosťou Coriolisovej ilúzie na príslušných letových je v časti C zobrazené výslednými p-hodnotami z Shapiro-Wilkinson testu pre overenie normality dát a v časti D sú výsledné p-hodnoty získané Wilcoxonovým testom pre popisanie závislosti rozdielov odchýlky medzi profilom jedna a profilom dva.



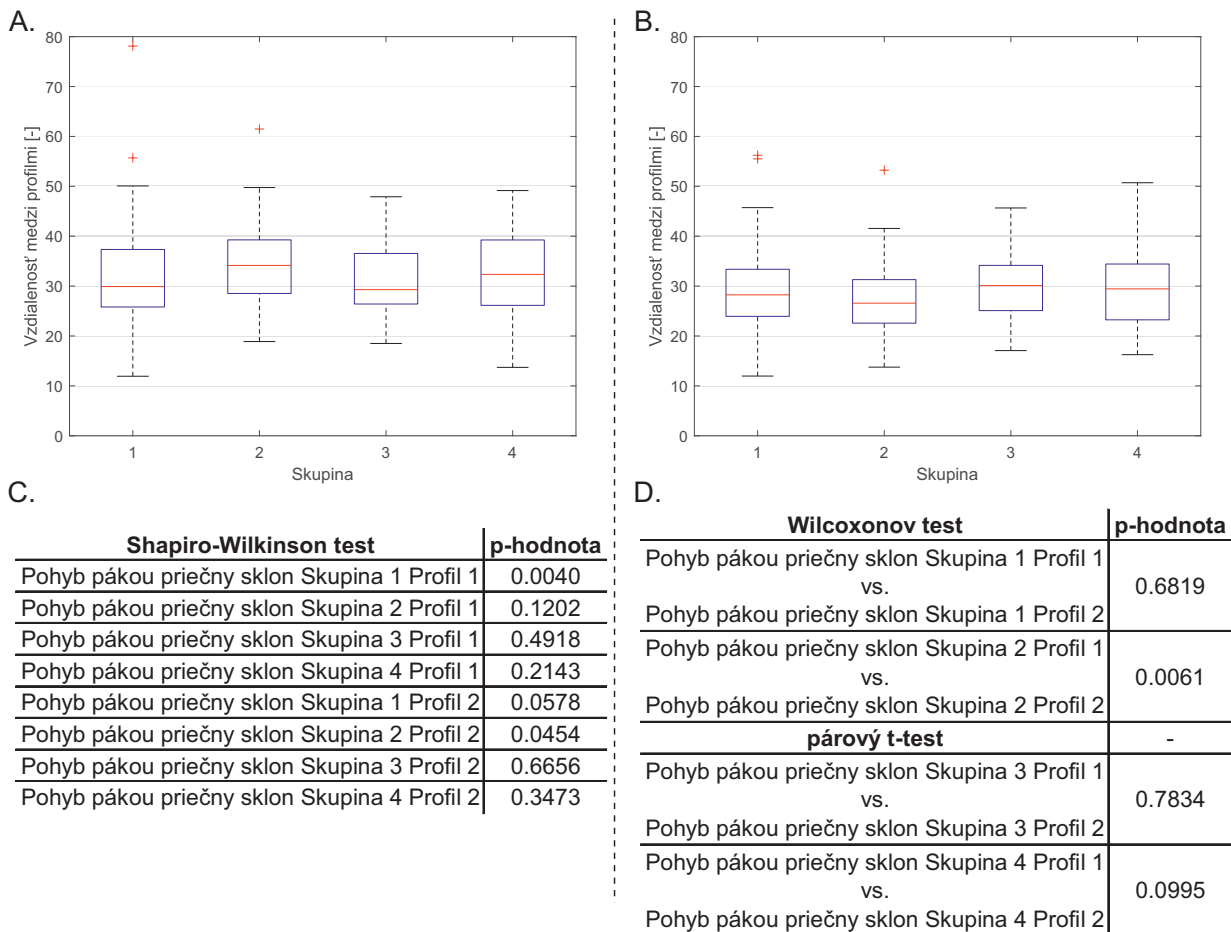
Obr. 3.7: Spracované výsledky z pohybu riadiacou pákou v priechnom sklone pre profil 1. Normované priebehy riadiacou pákou v priechnom sklone lietadla (A), Dendrogram z WHC (B), PCA s aplikovaným výsledkom WHC (C), Zloženie zhlukov dendrogramu (D).

Výsledky na obrázku 3.7, ktoré popisujú zmeny vyvolané pohybom riadiacej páky v priechnom sklone, štandardne v časti A zobrazujú normované priebehy pohybov riadiacej páky pre let s ilúziou a let bez ilúzie získaných za letu podľa profilu 1. V časti B je výstupný dendrogram z metódy WHC, ktorého identifikované zhluky sú aplikované na výsledky pochádzajúce z metódy PCA v časti C. V časti D je štruktúra identifikovaných zhlukov z metódy WHC.



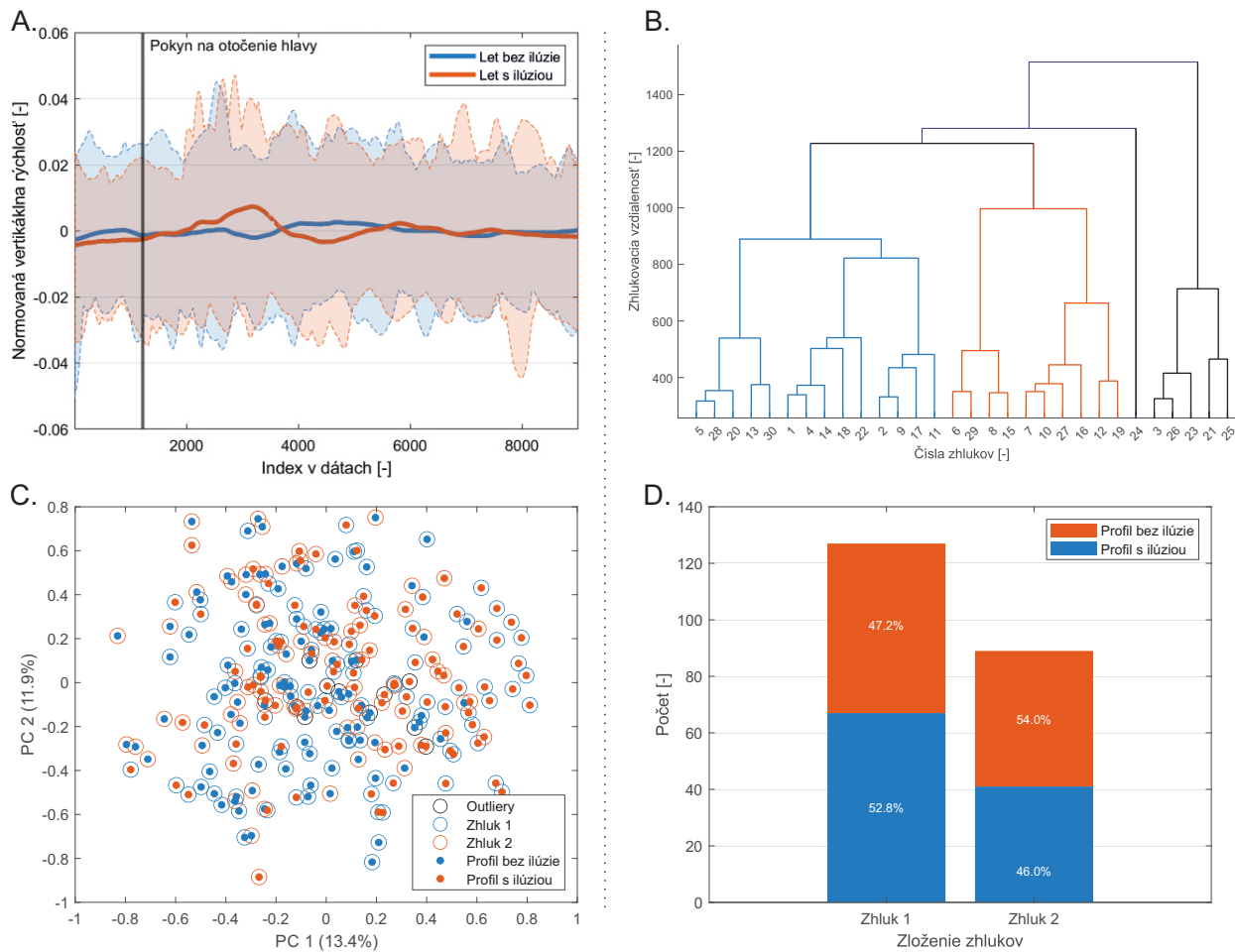
Obr. 3.8: Spracované výsledky z pohybu riadiacou pákou v priečnom sklone pre profil 2. Normované priebehy riadiacou pákou v priečnom sklone lietadla (A), Dendrogram z WHC (B), PCA s aplikovaným výsledkom WHC (C), Zloženie zhlukov dendrogramu (D).

Na obrázku 3.8 sú výsledky doplnujúce analýzu pohybu riadiacej páky v priečnom sklone tentoraz pre druhý letový profil. Časť A na spomenutom obrázku, zobrazuje rozsahy pohybov riadiacej páky v priečnom sklone a priemerné normované pohyby riadiacou pákou pre profil s ilúziou a bez ilúzie na druhom meraní. Časť B reprezentuje výstupný dendrogram získaný z metódy WHC po jej aplikácii na vzdialenostnú maticu z metódy DTW, pre identifikovanie zhlukov s podobnými vlastnosťami a teda letov s ilúziou a bez nej. Jeho výsledky sú aplikované v spolupráci s výsledkami metódy PCA v časti C obrázku 3.8. Obrázok uzatvára časť D, kde je znázornené zloženie zhlukov z metódy WHC.



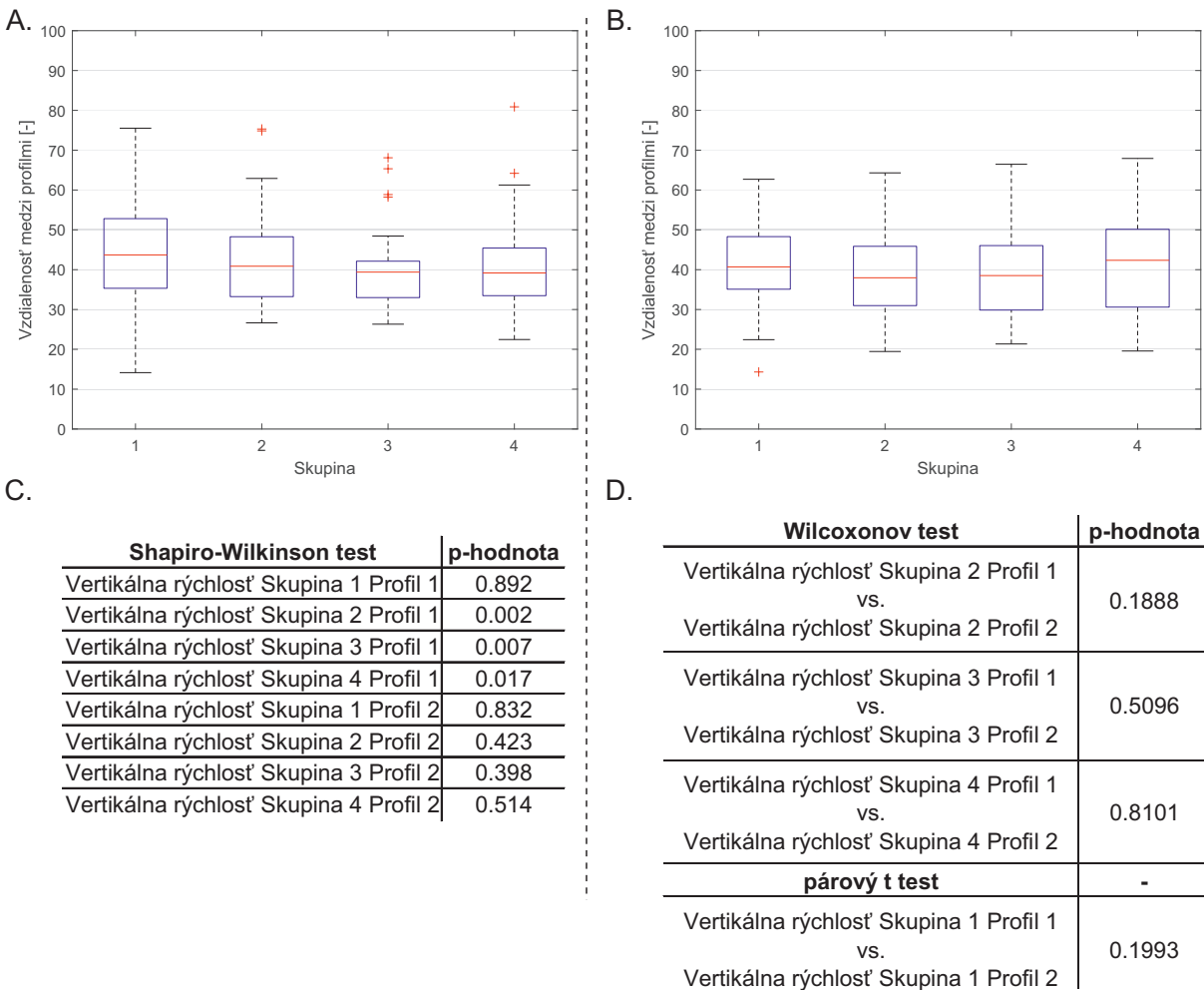
Obr. 3.9: Spracované štatistické výsledky odchýlky pohybu riadiacej páky v priečnom sklone lietadla. Krabicový diagram pre každú skupinu z profilu 1 (A), Krabicový diagram pre každú skupinu z profilu 2 (B), Výsledky Shapiro-Wilkinson testu (C), Výsledky Wilcoxonovho a párového t testu (D).

Obrázok 3.9, popisuje veľkosť zistenej odchýlky, ktorá bola spôsobená vplyvom Coriolisovej ilúzie na jednotlivých profiloch pre každú skupinu. V časti A sú krabicovými diagramami priemerné odchýlky medzi letom s ilúziou a letom bez ilúzie pre jednotlivé skupiny namerané počas letu podľa profilu 1. V časti B sú obdobné výsledky z letu podľa profilu 2. Časť C obrázku 3.9 ukazuje výsledky Shapiro-Wilkinson testu pre overenie normality dát s ich príslušnými p-hodnotami. V časti D sú výsledné p-hodnoty štatistických testov porovnania závislosti deviácií medzi jednotlivými profilmi pre každú skupinu.



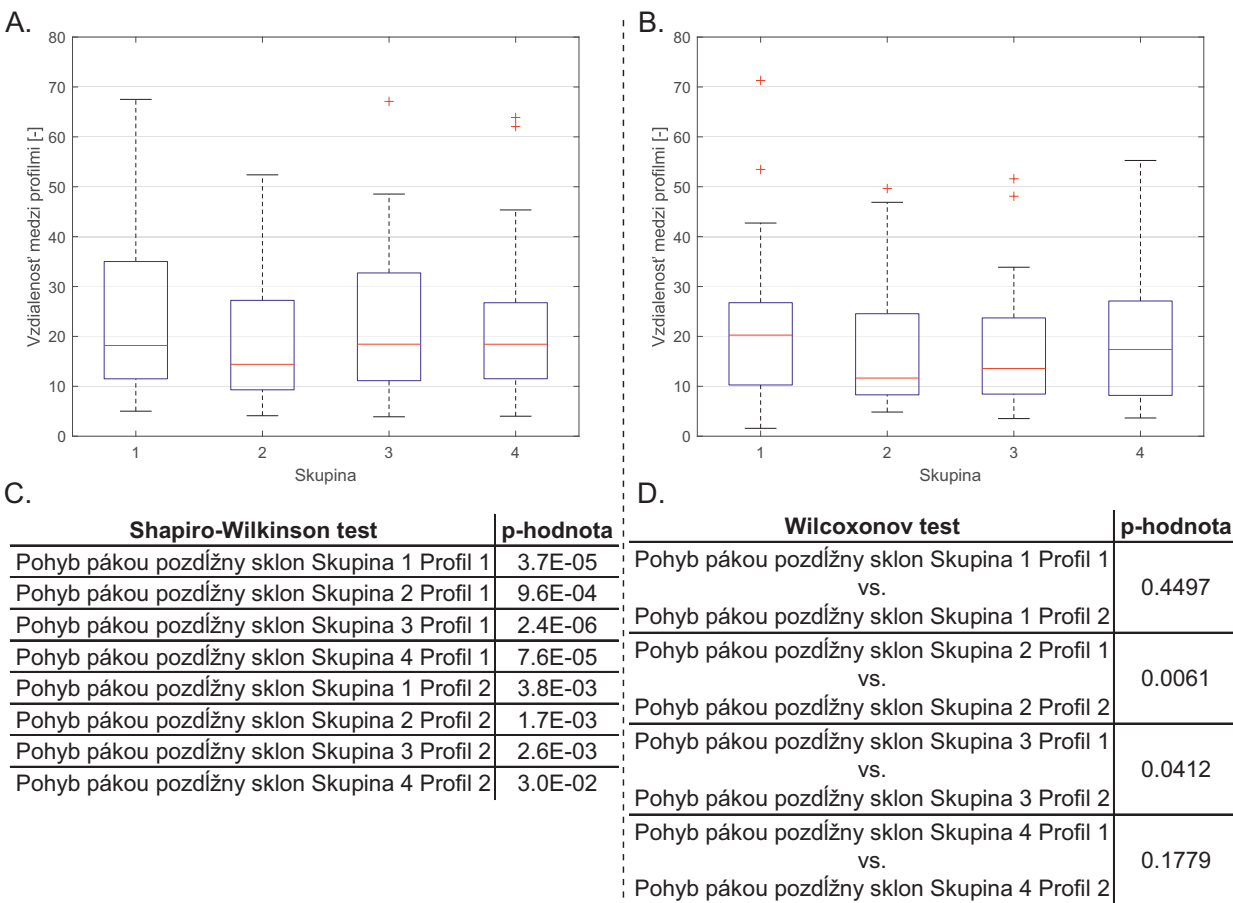
Obr. 3.10: Spracované výsledky pre vertikálnu rýchlosť získanú z letu podľa profilu 1. Normované priebehy vertikálnej rýchlosti lietadla (A), Dendrogram z WHC (B), PCA s aplikovaným výsledkom WHC (C), Zloženie zhukov dendrogramu (D).

Obrázok 3.10 uzatvára použitie metód pre analýzu letových parametrov. Na tomto obrázku je analýza letového parametru vertikálnej rýchlosti pre profil 1. V časti A sú zobrazené rozsahy, v ktorých sa subjekty pohybovali a priemerné priebehy vertikálnej rýchlosti pre let bez ilúzie a s ilúziou v profile 1. Časť B zobrazuje zhluky identifikované pomocou metódy Wardovho hierarchického zhukovania, ktoré boli aplikované ako doplnok výsledkov metódy analýzy hlavných komponentov, čo je zobrazené v časti C. Časť D obsahuje stĺpcové grafy zloženia zhukov identifikovaných pomocou metódy WHC.



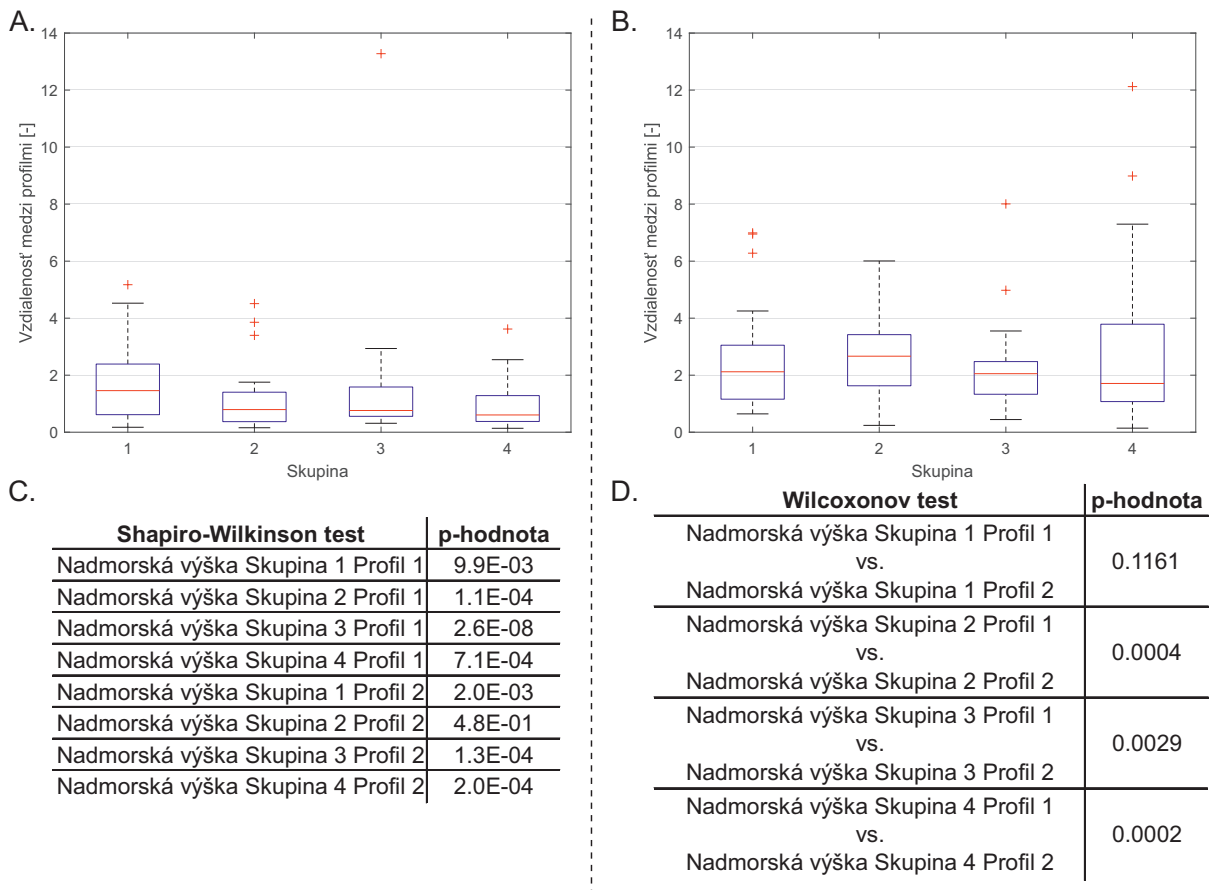
Obr. 3.11: Spracované štatistické výsledky odchýlky vo vertikálnej rýchlosti lietadla. Krabicový diagram pre každú skupinu z profilu 1 (A), Krabicový diagram pre každú skupinu z profilu 2 (B), Výsledky Shapiro-Wilkinson testu (C), Výsledky Wilcoxonovho a párového t testu (D).

Obrázok 3.11 ukazuje veľkosti deviácií spôsobenými Coriolisovou ilúziou, ktoré sú reprezentované krabicovými diagramami v časti A pre profil 1. Časť B popisuje krabicovými diagramami obdobné deviácie medzi letom bez ilúzie a s ilúziou pre let podľa profilu 2. V časti C sú zobrazené výsledné p-hodnoty Shapiro-Wilkinsonovho testu pre overenie normality dát vstupujúcich do štatistických testov závislosti. Výsledky štatistických testov závislosti v podobe p hodnôt sú zobrazené v časti D obrázku 3.11.



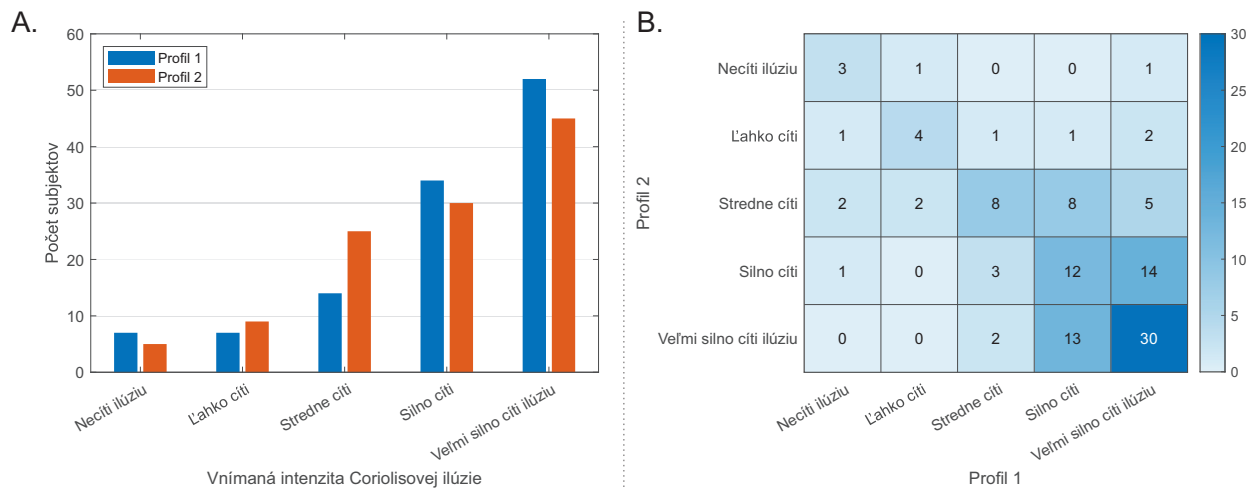
Obr. 3.12: Spracované štatistické výsledky odchýlky pohybu riadiacej páky v pozdĺžnom sklone lietadla. Krabicový diagram pre každú skupinu z profilu 1 (A), Krabicový diagram pre každú skupinu z profilu 2 (B), Výsledky Shapiro-Wilkinson testu (C), Výsledky Wilcoxonovho testu (D).

Na obrázku 3.12 sú zobrazené výsledky analýzy veľkosti odchýlky zapríčinennej vplyvom Coriolisovej ilúzie medzi letom bez ilúzie a s ilúziou pre parameter pohybu riadiacej páky v pozdĺžnom sklone lietadla. V časti A vidieť vďaka krabicovým diagramom priemerné odchýlky pre let podľa profilu 1 a v časti B obdobne priemerné deviácie pre let podľa profilu 2. V časti C sú zobrazené výsledky testovania normality dátových súborov s výslednými p-hodnotami plynúcich z použitia Shapiro-Wilkinson testu. V časti D potom vidieť výsledky závislosti (v podobne p hodnôt) vzniknutých deviácií zapríčinených Coriolisovou ilúziou medzi profilom jedna a profilom dva.



Obr. 3.13: Spracované štatistické výsledky odchýlky v nadmorskej výške lietadla. Krabicový diagram pre každú skupinu z profilu 1 (A), Krabicový diagram pre každú skupinu z profilu 2 (B), Výsledky Shapiro-Wilkinson testu (C), Výsledky Wilcoxonovho testu (D).

V neposlednom rade sú na obrázku 3.13 zobrazené výsledky veľkosti deviácií zapríčinených dopadom Coriolisovej ilúzie na letový parameter nadmorskej výšky lietadla. V časti A spomínaného obrázku je zobrazenie veľkosti priemernej deviácie spôsobenej Coriolisovou ilúziou pre jednotlivé skupiny z letu podľa profilu 1. V časti B sú krabicovými diagramami zobrazené taktiež priemerné deviácie medzi letom bez ilúzie a s ilúziou pre profil dva. V časti C sú výsledky použitia štatistického testu Shapiro-Wilkinson pre overenie normality skúmaných deviácií letového parametru nadmorskej výšky v podobe p hodnôt. Výsledky pre štatistické overenie závislosti veľkosti deviácií medzi profilom jedna a profilom dva sú popísané p-hodnotami v časti D.



Obr. 3.14: Hodnotenie intenzity Coriolisovej ilúzie po oboch meraniach (A) a teplotná mapa intenzity Coriolisovej ilúzie po oboch meraniach (B).

Tabuľka 3.1: Priemerné subjektívne hodnotenie intenzity Coriolisovej ilúzie v jednotlivých skupinách.

Coriolisova ilúzia	Meranie 1	Meranie 2
Priemerná intenzita	4.03 ± 1.18	3.89 ± 1.15
Skupina 1	3.90 ± 1.30	3.83 ± 1.23
Skupina 2	4.12 ± 1.09	3.80 ± 1.15
Skupina 3	4.34 ± 1.01	4.21 ± 1.01
Skupina 4	3.77 ± 1.25	3.70 ± 1.18

Na obrázku 3.14 v časti A vidieť výsledné hodnotenie intenzity Coriolisovej ilúzie všetkých subjektov spolu, čo je reprezentované stĺpcovými grafmi. Modré stĺpce zachytávajú odpovede po vykonanom lete s ilúziou, ktorý bol vykonaný podľa profilu číslo 1 a oranžová farba reprezentuje odpovede na konci druhého merania a teda po lete s ilúziou podľa profilu číslo 2. V časti B je reprezentácia hodnotenia intenzity Coriolisovej ilúzie každého subjektu po prvom a jeho odpoveď znovu po druhom meraní, zobrazená teplotnou mapou.

V tabuľke 3.1 vidieť priemerné hodnoty celkového vnímania alebo hodnotenia intenzity Coriolisovej ilúzie a subjektívneho vnímania Coriolisovej ilúzie v jednotlivých skupinách po prvom a druhom lete.



4 Diskusia výsledkov

Výsledky letových parametrov prezentované v predchádzajúcej kapitole boli zvolené z dôvodu najlepšej ilustrácie dopadu Coriolisovej ilúzie na vykonané lety a zaznamenávané letové parametre. Letové parametre kurz a priečny náklon lietadla sú najviac ovplyvnené Coriolisovou ilúziou a ukazujú jej jasný dopad a rozdiel medzi letmi vykonaných bez ilúzie a s implementovanou ilúziou. V prílohách je možné vidieť nenormované normované priebehy priebehy analyzovaných parametrov pre všetky skupiny spolu a jednotlivo. Ďalej sú v prílohách dostupné výsledky analýz PCA pre všetky skupiny spolu a jednotlivo.

4.1 Letový parameter - Kurz

Na obrázku 3.3 v časti A vidieť významné rozdiely v priebehu normovaného kurzu medzi letom s ilúziou a bez nej po vydanom pokyne na otočenie hlavy a následnom vykonaní otočenia hlavy od sledovaných subjektov počas letu podľa profilu 1. Prezentovaný úsek po pokyne na otočenie hlavy subjektu je v približnej dĺžke 62 sekúnd čo je dostatočne dlhá doba na prejavenie sa a aj vyprchanie účinkov Coriolisovej ilúzie. Klasifikácia vykonaných letov v profile 1 na lety s ilúziou a bez ilúzie pomocou metódy PCA zobrazenej v časti C na obrázku 3.3 ukazuje jasne definované zhluky podľa prítomnosti ilúzie červenou farbou a lety, ktoré boli bez letovej ilúzie reprezentované modrou farbou. Zloženie zhlukov identifikovaných dendrogramom pomocou metódy WHC v časti D je na 99% klasifikované správne, kde Zhluk 1 prislúcha letom s ilúziou a Zhluk 2 prislúcha letom bez ilúzie. Aplikácia výsledkov z metódy WHC znovu v časti C taktiež ukazuje jednoznačné rozdelenie vykonaných letov s ilúziou a bez nej, kde modré krúžky (reprezentujúce Zhluk 1) správne klasifikujú lety s ilúziou. Popis celkovej variability hlavným komponentom 1 (PC 1) na osy x má hodnotu 67,4% čo znamená, že komponent jedna vysvetľuje významnú hodnotu rozptylu pre tento letový parameter. Z tohto zhodnotenia vyplýva jasné identifikovanie prítomnosti ilúzie a jej dopad na letový parameter kurzu lietadla v profile 1. Samostatný výsledok analýzy PCA je možné vidieť v prílohe D.1 časť B.

Pre porovnanie účinkov ilúzie a jej identifikácie rovnakými metódami v prípade profilu 2, čo je zobrazené na obrázku 3.2 nevidieť jasné identifikovanie prítomnosti Coriolisovej ilúzie. V časti A tohto obrázku sú priemerné priebehy kurzu pre profil 2 bez ilúzie a s ilúziou takmer prekrývajúce sa bez najmenších známkov Coriolisovej ilúzie. v časti B obrázku 3.2 na výstupnom dendrograme z



metódy WHC vidieť, podobnosť a nejednoznačnosť medzi identifikovanými zhlukmi aj s časťou odľahlých pozorovaní (outliers), ktoré boli vylúčené z ďalšej analýzy. Metóda PCA taktiež neidentifikovala jednoznačné zhluky pre lety bez ilúzie a s implementovanou Coriolisovou ilúziou vyplývajúcej z profilu 2. Aplikácia zhlukov získaných metódou WHC na výsledky metódy PCA vrátila podobne nejednoznačné identifikovanie rozdielov v letových profiloch. Časť D spomínaného obrázku ukazuje štruktúru zhlukov identifikovaných pomocou metódy WHC, kde Zhluk 1 aj Zhluk 2 obsahujú zmes letov pochádzajúcich z profilu 2 s ilúziou a bez nej s ich rozdelením 50 na 50 pre každý zhluk. Samostatný výsledok analýzy PCA pre profil 2 sa nachádza v prílohe D.6 časť B.

Prítomnosť Coriolisovej ilúzie na priebehu letového parametru kurzu lietadla v profile 1 je dobre identifikovateľná na výsledkoch analýzy PCA pre jednotlivé skupiny ako je možné vidieť v časti B príloh D.2, D.3, D.4 a D.5. Toto nie je možné tvrdiť o priebehu kurzu pre let podľa profilu 2 s ohľadom na jednotlivé skupina čo je zobrazené v prílohách D.7, D.8, D.9 a D.10. Identifikácia prítomnosti na letovom parametre kurzu lietadla pre let podľa profilu 2 neposkytuje jasné výsledky.

Pre popísanie veľkosti dopadu Coriolisovej ilúzie na jednotlivé skupiny rozdelené podľa ich skúseností pre letový parameter kurzu lietadla bolo použité hodnotenie založené na veľkosti deviácie medzi letom bez ilúzie a s ilúziou. V časti A obrázku 3.3 kde sú vyobrazené krabicovými diagramami priemerné odchýlky v kurze spôsobenej Coriolisovou ilúziou v profile 1 nevidieť signifikantné rozdiely medzi jednotlivými skupinami. V časti B obrázku 3.3 nevidieť žiadny dopad Coriolisovej ilúzie na priebeh kurzu v jednotlivých skupinách pri lete bez ilúzie a s ilúziou v profile 2. Porovnanie častí A a B vykazuje veľký rozdiel v ovplyvnení kurzu Coriolisovou ilúziou a dá sa konštatovať, že priemerné odchýlky pre jednotlivé skupiny medzi sebou sú veľmi malé. Pre overenie či existujú závislosti medzi veľkosťou deviácií pre každú skupinu, ktoré boli získané porovnaním veľkosti odchýlok z profilu 1 a profilu 2 boli použité štatistické testy. Štatistické overenie závislosti zmeny vo veľkosti rozdielu deviácie medzi profilom jedna a dva začalo overením normality dát pre následný výber vhodného testu. Ako vidieť v časti C po použití Shapiro-Wilkinson testu, p-hodnoty všetkých skúmaných dátových celkov vykázali iné ako normálne rozdelenie týchto dát, pretože výsledné p-hodnoty použitého Shapiro-Wilkinson testu majú menšiu hodnotu než 0.05. Preto bola zamietnutá normalita dát a použitý Wilcoxonov znamienkový neparametrický test opäť na hladine významnosti 0.05. Tento test zisťuje či je signifikantný rozdiel medzi odchýlkami spôsobenými Coriolisovou ilúziou na profile 1 a profile 2 pre každú skupinu individuálne. V časti D



obrázku 3.3 vidieť výsledné p-hodnoty, z ktorých je zamietnutá nulová hypotéza, že nie je prítomný rozdiel medzi danými profilmi v rámci skupiny.

Z častí A a B obrázku 3.3 vyplýva, že pri prvom lete bola deviácia spôsobená Coriolisovou ilúziou väčšia než na druhom meraní. Ako krabicové diagramy tak aj štatistické testy potvrdzujú, že existujú signifikantné rozdiely medzi veľkosťou deviácie zapríčinenou Coriolisovou ilúziou medzi profilom jedna a dva pre jednotlivé skupiny. V kontexte cieľu práce ale z týchto výsledkov plynie záver, že Coriolisova ilúzia nemá rozdielny vplyv na rozdielne skupiny pre letový parameter kurzu lietadla.

4.2 Letový parameter - Pričný náklon

Druhým hlavným prezentovaným letovým parametrom v horizontálnej rovine sú výsledky z analýzy letového parametru priečného náklonu. V časti A obrázku 3.4 vidieť na normovanom priebehu priečného náklonu pre profil 1, medzi letom bez a letom s ilúziou účinnok Coriolisovej ilúzie v rozpätí indexov 3500 až 8000. V časti B sú identifikované zhluky plynúce z metódy WHC, ktoré sú reprezentované dendrogramom. V časti C je vidieť prítomnosť letov bez ilúzie, ktoré sú znázornené modrými plnými bodmi a letov bez ilúzie, ktoré sú reprezentované červenými plnými bodmi. Samostatný výsledok metódy PCA je taktiež v prílohe D.1 časť D. Aplikácia identifikovaných zhlukov z metódy WHC, čo je v časti C zobrazené prázdnyimi krúžkami v kombinácií s výsledkami PCA stále v časti C ukazuje dostatočne dva zhluky, ktoré delia jednotlivé lety na lety s ilúziou a bez ilúzie. Popis štruktúry zhlukov neukazuje tak jednoznačné jednofarebné zastúpenie letov bez ilúzie v jednom stĺpci a letov s ilúziou v druhom a došlo tu v polovici prípadov ku klasifikovaniu letov s ilúziou ako letov bez nej a opačne (viď. časť D obrázku 3.4). Podobný trend výsledkov metódy PCA pre jednotlivé skupiny, kde vidieť jednoznačne prítomnosť letov s ilúziou a bez nej pre profil 1, vidieť v časti D príloh D.2, D.3, D.4 a D.5.

Výsledky analýzy letového parametru priečného náklonu pre profil 2 nevykazujú signifikantnú identifikáciu letov bez ilúzie a s ilúziou. Priemerné normované priebehy v časti A obrázku 3.5 ukazujú takmer prekrývanie letu bez ilúzie a letu s ilúziou. Výsledky metódy PCA ukázali prekrývanie sa letov bez ilúzie a s ilúziou, čo znamená že tu nie sú výrazné rozdiely medzi týmito letmi pre profil 2. To potvrdzuje aj vykreslenie identifikovaných zhlukov plynúcich z metódy WHC premietnutých do výsledkov PCA v časti C. Štruktúra zhlukov v časti D ukazuje 50% chybovosť pri



klasifikování letov bez ilúzie a s ilúziou. Samostatné výsledky metódy PCA aj pre jednotlivé skupiny je možné vidieť v prílohách D.6, D.7, D.8, D.9 a D.10 časť D.

Vyhodnotenie dopadu Coriolisovej ilúzie pre každú skupinu na priebeh priečného sklonu lietadla vidieť v častiach A pre profil 1 a B pre profil 2 na obrázku 3.6. Z krabicového diagramu v časti A vyplýva, že Coriolisova ilúzia mala najväčší dopad vo veľkosti odchýlky priečného náklonu pre profil 1 na skupinu 1 a skupinu 4. Skupiny 2 a 3 boli na rovnakej úrovni. Takéto rozdiely už ale nie sú prítomné v krabicových diagramoch pre profil 2. Veľkosť chyby spôsobená Coriolisovou ilúziou bola približne rovnaká vo všetkých skupinách. Pre zistenie závislosti medzi zistenými odchýlkami z profilu 1 a profilu 2 pre každú skupinu bol opäť použitý Wilcoxonov test, pretože dáta nepochádzajú z normálneho rozdelenia čo je vidieť z výsledkov Shapiro-Wilkinson testu v časti C obrázku 3.6. Výsledky p hodnôt v časti D obrázku 3.6 znovu vypovedajú o tom, že existuje rozdiel medzi nameranými odchýlkami v rámci jednotlivých skupín. Odchýlky v priečnom náklone ale nie sú význačné len pre určitú skupinu a teda záver z analýzy priečného náklonu lietadla hovorí o tom, že Coriolisova ilúzie ovplyvňuje rovnako negatívne všetky skupiny skúmaných subjektov.

4.3 Parameter - poloha riadiacej páky pre priečny sklon

Pre kompletne uzatvorenie analýzy pohybu lietadla v horizontálnej rovine sú diskutované výsledky parametru zmeny polohy riadiacej páky pre priečny sklon lietadla a ako ho ovplyvnila Coriolisova ilúzia. Z obrázku 3.7 je možné vyčítať výsledky analýzy pre let podľa profilu 1. V časti A na priemernom normovanom priebehu pohybu riadiacej páky pre let bez ilúzie a s ilúziou vidieť malý rozdiel v oblasti indexu 4000 na osy x. Výsledky identifikovaných zhlukov plynúcich z použitia metódy WHC zobrazených na dendrograme v časti B obrázku a ich štruktúra ukazujú klasifikovanie letov bez ilúzie a s ilúziou pre profil 2 s 50% chybou čo vyplýva zo štruktúry zhlukov v časti D. Aplikácia výsledkov metódy WHC pre doplnenie výsledkov z metódy hlavných komponentov PCA ukazuje opäť zmes a nejednoznačné rozdelenie letov v profile 2. Z toho vyplýva, že nie sú význačné rozdiely medzi letmi bez ilúzie a letmi s Coriolisovou ilúziou. V prílohách v časti F sú jednotlivé výsledky z analýzy PCA pre všetky skupiny spolu v a jednotlivo.

Spracovanie výsledkov odchýlky pre pohyb riadiacej páky v priečnom sklone vidieť na obrázku 3.9. Krabicové diagramy A a B vo vrchnej polovici obrázku neukazujú signifikantné rozdiely medzi veľkosťami deviácií zapríčinených Coriolisovou ilúziou v rámci skupín a ani medzi nimi.



To je overené štatistickými testami závislosti skúmaných deviácií. Overenie normality dát tentoraz ukázalo podľa p hodnôt vid'. časť C, že dáta, ktoré prislúchajú skupinám 3 a 4 patria do normálneho rozdelenia podľa Shapiro-Wilkinson testu a pre zistenie závislosti v diferenciách bol pre tieto dve skupiny použitý párový t-test. Až na skupinu dva, kde je rozdiel a teda nezávislosť medzi diferenciami spôsobenými Coriolisovou ilúziou pre profil 1 a 2 ukázali výsledné p-hodnoty, že medzi ostatnými diferenciami neexistujú význačné rozdiely. Z týchto výsledkov sa opakuje záver o tom, že Coriolisova ilúzia vplýva rovnako negatívne na všetky skupiny respondentov.

4.4 Ostatné letové parametre

Pre reprezentovanie použitia metód na parametre súvisiace s vertikálnym priebehom a teda nadmorská výška, vertikálna rýchlosť a pohyb riadiacou pákou v pozdĺžnom sklone sú prezentované výsledky z analýzy vertikálnej rýchlosti na obrázku 3.10. Zo spomínaných parametrov analýza PCA preukázala najlepšie výsledky po použití na vertikálnu rýchlosť. Normované priemerné priebehy pre let s ilúziou a bez ilúzie v profile 1 ukazujú odlišnosti znovu v okolí indexu s číslom 4000 čo je možné vidieť v časti A obrázku 3.10. V časti C, výsledky PCA v kombinácii s výsledkami zhukov identifikovaných metódou WHC nepreukázali význačné rozdelenie letov na lety bez ilúzie a lety s Coriolisovou ilúziou. Štruktúra zhukov v časti D obrázku poukazuje na približne 50% chybnú klasifikáciu letov bez a s ilúziou. Jednotlivé výsledky plynúce z metódy PCA sú v časti C príloh D.1, D.2, D.3, D.4 a D.5.

Vertikálna rýchlosť pre profil 2 vykazovala taktiež nevýznačné výsledky z metódy analýzy hlavných komponentov a metódy Wardovho hierarchického zhukovania. Výsledky poskytnuté metódou PCA pre profil 2 a jednotlivé skupiny sú dostupné v prílohách D.6, D.7, D.8, D.9 a D.10 časti C.

Veľkosti diferencií spôsobených Coriolisovou ilúziou sú na obrázku 3.11. Krabicové diagramy v časti A pre profil 1 a v časti B pre profil 2, nevykazujú signifikantné rozdiely medzi týmito profilmi pre danú skupinu alebo medzi jednotlivými skupinami. Overenie týchto rozdielov pomocou štatistických testov potvrdilo teóriu, že neexistujú význačné rozdiely medzi zistenými odchýlkami a žiadna skupina nie je odolnejšia voči účinkom Coriolisovej ilúzie.

Pohyb riadiacou pákou pre pozdĺžny sklon lietadla po použití metód PCA a WHC nepreukázal žiadne význačné výsledky klasifikovania letov bez ilúzie a letov s ilúziou pre oba letové profily.



Výsledky nenormovaných priebehov, normovaných priebehov ako aj výsledky PCA pre všetkých pohromade a jednotlivé skupiny samostatne sa nachádzajú v prílohách časti E jednotlivých príloh. Veľkosti diferencií spôsobených Coriolisovou ilúziou pre parameter pohybu riadiacej páky pre pozdĺžny sklon lietadla sú analyzované na obrázku 3.12. Krabicové diagramy v častiach A a B, nevykazujú význačné rozdiely v rámci skupiny medzi profilom 1 a 2 ani medzi skupinami samotnými. Štatistické testy toto tvrdenie potvrdzujú no len pre skupiny 1 a 4. Skupiny 2 a 3 vykazujú podľa Wilcoxonovho štatistického testu význačný rozdiel medzi veľkosťami diferencií zistenými pre profil 1 a profil 2. Celkovo sa ale dá vyvodiť záver, že Coriolisova ilúzia ovplyvňuje všetky skupiny rovanko závažne.

Letový parameter nadmorskej výšky sa nachádza v časti A priebehov či už nenormovaných alebo normovaných pre tento letový parameter ako aj vo výsledkoch plynúcich z metódy PCA. Výsledky z metódy PCA poskytujú záver, že nie je rozdiel v priebehu nadmorskej výšky medzi letmi bez ilúzie alebo s ilúziou v prípade oboch letových profilov jedna a dva. Od všetkých predchádzajúcich skúmaných parametrov sa nadmorská výška odlišuje v diferencii vzniklej medzi letovým profilom bez ilúzie a s ilúziou. Krabicové diagramy na obrázku 3.13 ukazujú zhoršenie odchýlky a teda jej nárast na väčšiu hodnotu v lete podľa profilu 2. Signifikantný rozdiel potvrdzujú aj výsledky štatistického testu pre všetky skupiny okrem skupiny 1, kde nedošlo k význačnému rozdielu odchýlky medzi profilom jedna a dva.

4.5 Výsledky subjektívneho hodnotenia, zhrnutie, prínosy a limitácie

Na výsledkoch subjektívneho hodnotenia vnímania intenzity a subjektívneho ovplyvnenia Coriolisovou ilúziou jasne vidieť mnoho odpovedí v rozmedzí *Silno cíti ilúziu* a *Veľmi silno cíti ilúziu* pre profil alebo meranie 1. Tieto hodnotenia sú reprezentované modrou farbou v časti A obrázku 3.14. Priemer týchto hodnotení je v stĺpci Meranie 1 tabuľky 3.1 s výsledkom 4,03. Zo všetkých skupín, Coriolisovu ilúziu najintenzívnejšie cítila skupina 3. Druhé meranie respektíve profil 2 má v stĺpcovom grafe podobné rozloženie s nižším počtom intenzít *Silno cíti ilúziu* a *Veľmi silno cíti ilúziu* a nárastom v hodnotení *Stredne cíti ilúziu*. Priemer týchto hodnotení sa pohybuje na úrovni 3,89 ako vidieť v tabuľke 3.1, pravý stĺpec Meranie 2. Aj v tomto stĺpci cítila ilúziu najintenzívnejšie skupina 3. Použitie Wilcoxonovho testu s nulovou hypotézou, že medzi subjektívnymi hodnoteniami po prvom a druhom meraní sa nevyskytujú významné rozdiely, potvrdilo nulovú hypotézu vďaka



výsledkom štatistického Wilcoxonovho testu. Výsledná p-hodnota s hodnotou 0.1802 nevyvracia spomenutú nulovú hypotézu na hladine významnosti $\alpha \leq 0.05$. Výsledky oboch regresných modelov alebo metód neukázali, že by niektoré z faktorov ako je vek, typ licencie, pohlavie, inštruktorská kvalifikácia alebo doba merania významne ovplyvňovali subjektívne hodnotenie intenzity ilúzie.

V časti B obrázku 3.14 vidieť teplotnú mapu. Teplotná mapa graficky popisuje hodnotenie intenzity po prvom a druhom meraní pre každý unikátny subjekt. To znamená, že rovnakých 30 subjektov v ľavom dolnom rohu, ktorí hodnotili vnímanie ilúzie ako *Veľmi silno cíti ilúziu* po prvom meraní, hodnotilo Coriolisovu ako *Veľmi silno cíti ilúziu* aj v meraní druhom. 14 subjektov hodnotilo vnímanie ilúzie ako *Veľmi silno cíti ilúziu* po prvom meraní no na druhom meraní už ilúziu vnímali len ako *Silno cíti ilúziu*. Naopak 13 subjektov po prvom meraní vnímalo ilúziu ako *Silno cíti ilúziu* no po druhom meraní ilúziu vnímali intenzívnejšie s hodnotením *Veľmi silno cíti ilúziu*. Výsledky v podobe stĺpcových grafov pre jednotlivé skupiny sa nachádzajú v prílohe E.1. Teplotné mapy pre jednotlivé skupiny sa nachádzajú ďalej v prílohe E.2.

Z objektívnych výsledkov letových dát vidieť prítomnosť Coriolisovej ilúzie hlavne na parametroch získaných počas letu podľa profilu 1. Jej signifikantný vplyv vidieť na letových parametroch súvisiacich s horizontálnym pohybom lietadla a teda kurzu a priečného náklonu lietadla. Parameter priamo súvisiaci s týmito parametrami, ktorým je pohyb riadiacou pákou v priečnom sklone nevykázal podobne kladné identifikovanie letov bez ilúzie a s ilúziou. Jej prítomnosť nie je nijak význačná pre ostatné parametre a pri ich vyhodnocovaní metódami PCA a WHC neboli zistené žiadne signifikantné rozdiely medzi letom s ilúziou a bez nej spomenutými metódami. Parametre súvisiace s vertikálnym pohybom lietadla čo sú nadmorská výška, vertikálna rýchlosť a pohyb riadiacou pákou v pozdĺžnom sklone nevykazujú také vlastnosti aby bolo možné identifikovať lety bez a s implementovanou Coriolisovou ilúziou v prípade profilu 1.

Prezentované výsledky plynúce z použitých metód PCA a WHC pre všetky parametre no pochádzajúce z profilu dva neukazujú žiadne význačné rozdiely medzi letmi bez ilúzie a s ilúziou.

Spomínané zistenia môžu byť zapríčinené rôznymi faktormi. Jedným z faktorov prečo sa ilúzia prejavuje viac na horizontálnych parametroch môže byť povaha Coriolisovej ilúzie. Je to ilúzia, ktorá sa vyskytuje v dlhotrvajúcej zatáčke a preto ovplyvňuje viac parametre horizontálneho pohybu lietadla. Aj keď jej účinky nie sú limitované len na horizontálny pohyb, analýza letových dát nepreukázala významné odchýlky vo vertikálnom pohybe lietadla. V profile 2 neboli použitými



metódami zaznamenané žiadne rozdiely medzi letmi bez ilúzie a s ilúziou v prípade všetkých vyhodnocovaných letových parametrov. Príčina tohto výsledku môže zlepšenie subjektov v riadení simulátoru, zvyknutí si na jeho pohyb a odozvu s časom stráveným v simulátore. Ďalšou príčinou žiadneho prejavu Coriolisovej ilúzie pri lete podľa profilu 2 môže byť adaptácia subjektov na účinky Coriolisovej ilúzie a jej anticipácia navodenia takmer rovnakým spôsobom na druhom meraní ako prvom. V kontraste z výsledkov subjektívneho hodnotenia jasne vidieť časté vysoké hodnotenie intenzity Coriolisovej ilúzie pre profil 1 a aj profil 2. Preto dôvodom nezistenia prítomnosti Coriolisovej ilúzie pri mnohých parametroch v profile jedna aj dva by mohli byť účinky Coriolisovej ilúzie. Jej intenzita je tak silná a pocit nepríjemný, že subjekt sa stane pasívnym a pre čas kedy je pod vplyvom ilúzie nezasahuje do riadenia alebo lietadlo vôbec neriadi. Iný dôvod by mohlo byť také intenzívne zasiahnutie ilúziou, že subjekt si je vedomý pôsobenia ilúzie alebo negatívneho externého faktoru na jeho vnímanie polohy v priestore a ako kompenzačný mechanizmus nezasahuje do riadenia a stáva sa pozorovateľom. V ustálenej zatáčke sú potom naďalej pasívne udržiavané rovnaké horizontálne a vertikálne trendy letových parametrov. Posledným dôvodom môže byť po týždennej prestávke a zažitej skúsenosti vybudovanie odolnosti voči samotnej Coriolisovej ilúzii.

Celkovo vplyv ilúzie na jednotlivé skupiny pilotov rozdelené podľa fáze ich výcviku, v ktorej sa nachádzajú alebo ich skúseností nemá žiadny významný vplyv na odolnosť voči navodeniu Coriolisovej ilúzie alebo veľkosti jej účinkov na letové parametre. Pri letových parametroch kurzu a priečného náklonu lietadla je v poriadku konštatovať, že diferenciacia medzi letom bez ilúzie a letom s ilúziou je negatívne ovplyvnená Coriolisovou ilúziou. To je možné vidieť z diferencií, ktoré majú pôvod v prvom profile, kde bola zaručene identifikovaná Coriolisova ilúzia a ich veľkosť je význačne väčšia ako odchýlky plynúce z profilu 2 kde Coriolisova ilúzia nebola zaručene zistená. Rovnaké konštatovanie sa dá použiť na výsledky diferencií pre priečny náklon lietadla. Pri ostatných parametroch vertikálna rýchlosť, pohyby riadiacou pákou v priečnom a pozdĺžnom sklone nie sú významné rozdiely v diferenciách medzi jednotlivými profilmi. Pretože pri týchto parametroch nebola metódami PCA a WHC identifikovaná Coriolisova ilúzia nie je možné ani tvrdiť, že tieto odchýlky sú zaručene zapríčinené ilúziou a možno predstavujú len prirodzené chyby v riadení jednotlivých subjektov. Zaujímavým zistením je zhoršenie diferencie pre parameter nadmorskej výšky. Z neznámeho dôvodu subjekty vykazovali väčšie diferencie v prípade letu podľa profilu 2 ako podľa profilu 1.



Z jednotlivých skupín žiadna nevykazuje výsledky, ktoré by boli významne lepšie voči ostatným skupinám alebo významne horšie. Subjektívne sa zdá, že skupina 2 má najmenšie odchýlky pre takmer všetky letové parametre, no to by mohlo byť prisúdené malému počtu subjektov s počtom 25 oproti ostatným skupinám s 30 respondentmi. Menšia vzorka skupiny 2 môže teda skresľovať dopad Coriolisovej ilúzie na letové parametre.

Prínosmi tejto práce sú veľký počet meraných subjektov, ktoré sú všetky z civilného leteckého prostredia a ich rozdelenie do štyroch skupín podľa ich skúseností. Ďalším prínosom je použitie strojových metód pre analýzu dát a kladné overenie ich schopností nájsť rozdiely vo veľkých objemoch letových dát. V poslednom rade je prínosom poukázanie nebezpečenstva Coriolisovej ilúzie pre všetkých pilotov a pilotiek bez ohľadu na ich predchádzajúce letové skúsenosti. Toto nebezpečenstvo je podporené aj subjektívnymi odpoveďami jednotlivých meraných účastníkov výskumu.

Limitácie a doporučenia pre ďalší výskum sú zlepšenie návrhu letového profilu takým spôsobom aby bol subjekt nútený vykonávať aktívne vertikálnu zmenu priebehu profilu, napríklad stúpacou zatáčkou. Aktívnejšie riadenie lietadla v horizontálnej rovine by mohlo byť vynútené aj iným návrhom procedúry zatáčky kde by mala byť navodená Coriolisova ilúzia. Navrhovanou procedúrou by bol let po DME oblúku (DME arc) v určitej vzdialenosti od zariadenia DME. Ďalšou limitáciou je menšia početná vzorka subjektov v skupine dva čo mohlo spôsobiť skreslenie výsledkov hodnotenia dopadu Coriolisovej ilúzie na letové parametre a pilotov v rôznych fázach výcviku.



5 Závěr

Diplomová práce prináša ucelený pohľad na vplyv vestibulárnych ilúzií so zameraním sa na Coriolisovu ilúziu. Popisuje štruktúru vestibulárneho systému človeka a jeho funkciu na priestorovú orientáciu a udržiavanie polohy v priestore v kontexte pilotovania lietadla. Ďalej rozoberá vplyv a účinok Coriolisovej ilúzie na vestibulárny systém jedinca a možné negatívne následky ovplyvňujúce leteckú bezpečnosť a prevádzku. Čitateľ sa dozvie rôzne spôsoby navodenia Coriolisovej ilúzie a úvodná časť je zakončená prehľadom predchádzajúceho výskumu v kontexte tejto práce a limitáciami plynúcimi z neho.

Počiatkové časti metodiky práce popisujú štyri skupiny, do ktorých bolo rozdelených celkovo 114 subjektov. Metodika pokračuje s popisom meracieho vybavenia so zameraním sa na simulátor priestorovej dezorientácie GYRO IPT II. Nasleduje popis priebehu experimentov od príchodu uchádzača, let podľa dvoch rozličných letových profilov a ukončenie merania a spôsob akým bola navodená Coriolisova ilúzia. Jadro metodiky sa venuje popisu použitých metód pre spracovanie a analýzu letových parametrov. Je to do hĺbky rozpísaný postup získavania a spracovania parametrov, ktorý začínal definovaním správneho úseku s Coriolisovou ilúziou a referenčného úseku bez nej. Následne bolo potrebné extrahované dáta z týchto častí normalizovať pre odstránenie absolútnych chýb plynúcich z nepresností riadenia jednotlivých subjektov a zosúladiť jednotlivé merania pre čo najlepšie porovnania. To bolo vykonané aplikovaním metódy Dynamic Time Warping, z čoho bola získaná vzdialenostná matica vstupujúca do metódy Wardovho hierarchického zhukovania pre identifikovanie zhukov, ktoré odpovedajú letom bez Coriolisovej ilúzie a s ňou. Tieto zhuky boli použité pre konfrontovanie výsledkov získaných z analýzy hlavných komponentov, ktorá taktiež dokáže identifikovať zhuky, ktoré odpovedajú letom bez ilúzie a s ilúziou ale iným spôsobom. Obe metódy pre nájdenie zhukov patria k strojovým metódam pre analýzu dát a nechávajú dáta hovoriť za seba bez extra zásahu človeka. Pomocou metódy Dynamic Time Warping-u sú zistené odchýlky medzi jednotlivými letmi bez ilúzie a s ilúziou pre prezentovanie dopadu Coriolisovej ilúzie na jednotlivé skupiny pilotov.

Diplomová práca prezentuje výsledky z použitých metód na letových parametroch kurz, nadmorská výška, pohyb riadiacou pákou v pozdĺžnom sklone a priečnom sklone, priečny náklon a vertikálna rýchlosť lietadla. Zameriava sa hlavne na rozbor výsledkov letových parametrov kurzu a priečného náklonu lietadla v prvom profile, kde sa prejavili významné rozdiely medzi letom bez a



s Coriolisovou ilúziou. Z výsledkov vidieť jasné negatívne ovplyvnenie každej skúmanej skupiny Coriolisovou ilúziou v prvom meraní letových parametrov, ktoré reprezentujú pohyb lietadla v horizontálnej rovine. Na parametroch, ktoré popisujú pohyb lietadla vo vertikálnej rovine neboli zistené žiadne význačné negatívne dopady Coriolisovej ilúzie. V druhom meraní neboli zistené medzi letmi bez ilúzie a s implementovanou ilúziou žiadne významné rozdiely, a teda sa neprejavili účinky Coriolisovej ilúzie. To môže byť pripísané získanej odolnosti po prvom meraní, získaným skúsenostiam v riadení simulátoru alebo možno očakávaniu navodenia Coriolisovej ilúzie a jej pripravenosťou na tento moment. Následné analýzy letových parametrov z oboch letových parametrov nepreukázali významné rozdiely medzi jednotlivými skupinami z čoho sa dá konštatovať, že predchádzajúce letové skúsenosti neznamenajú väčšiu odolnosť voči účinkom Coriolisovej ilúzie a jej lepšie zvládanie.

Výsledky subjektívneho hodnotenia vykazujú vysoké hodnotenia intenzity Coriolisovej ilúzie na oboch meraniach, vo všetkých skupinách, ktoré podporujú silne dezorientujúce účinky tejto ilúzie. Jej dezorientujúce účinky môžu byť teda dôvodom, že subjekty sa stávajú pozorovateľom a po dobu trvania ilúzia nevykonávajú veľké zásahy do riadenia lietadla čo môže byť veľmi nebezpečné v malých výškach alebo kritických častiach letu, kedy je potrebné aby pilot bol plne schopný lietadlo riadiť.

Hlavnými prínosmi plynúcimi z tejto diplomovej práce sú poukázanie na nebezpečenstvo Coriolisovej ilúzie a jej negatívny dopad na priebeh letu pre všetky subjekty bez ohľadu na ich predchádzajúce letové skúsenosti.



Zoznam použitej literatúry

1. DEMIR, Abdurrahman Engin; AYDN, Erdinc. Vestibular Illusions and Alterations in Aerospace Environment. *Turkish Archives of Otorhinolaryngology*. 2021, roč. 59, č. 2, s. 139–149. Dostupné z DOI: 10.4274/tao.2021.2021-3-3.
2. THE RESEARCH AND TECHNOLOGY ORGANISATION (RTO) OF NATO. *Spatial Disorientation in Military Vehicles: Causes, Consequences and Cures*. NORTH ATLANTIC TREATY ORGANISATION, 2002. ISBN 92-837-0028-7. Dostupné tiež z: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Technical%20Reports/Forms/All%20Documents.aspx?RootFolder=%2Fpublications%2FSTO%20Technical%20Reports%2FRTO-TR-HFM-118>.
3. NEWMAN, Dr David G. *An overview of spatial disorientation as a factor in aviation accidents and incidents*. Australian Transport Safety Bureau, 2007. ISBN 978-1-921165-52-8. Dostupné tiež z: <https://www.atsb.gov.au/publications/2007/b20070063>.
4. DAOCAI, Wang; QING, Wang; XIMING, Wang; JINGZHEN, He; CHENG, Liu; XIANGXING, Ma. Size of the Semicircular Canals Measured by Multidetector Computed Tomography in Different Age Groups. *Journal of Computer Assisted Tomography*. 2014, roč. 38, č. 2, s. 196–199. Dostupné z DOI: 10.1097/rct.0b013e3182aaf21c.
5. PPLK. MUDR. MILOŠ SÁZEL, CSc. Somatosenzorické iluze za letu. *Vojenské zdravotnícké listy*. 1994, roč. 64, č. 2, s. 50–57. Dostupné tiež z: <https://mms1.actavia.cz/pdfs/mms/1995/02/02.pdf>.
6. HOUBEN, Mark M.J.; MESKERS, Arjan J.H.; BOS, Jelte E.; GROEN, Eric L. The perception threshold of the vestibular Coriolis illusion. *Journal of Vestibular Research*. 2022, roč. 32, č. 4, s. 317–324. ISSN 1878-6464. Dostupné z DOI: 10.3233/ves-210073.
7. AMST. *Barany Chair - Aerospace Medicine*. 2021. Dostupné tiež z: <https://www.amst.co.at/aerospace-medicine/training-simulation-products/barany-chair/>.
8. THE RESEARCH AND TECHNOLOGY ORGANISATION (RTO) OF NATO. *Spatial Disorientation Training – Demonstration and Avoidance*. NORTH ATLANTIC TREATY ORGANISATION, 2008. ISBN 978-92-837-0056-2. Dostupné tiež z: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Technical%20Reports/Forms/All%20Documents.aspx?RootFolder=%2Fpublications%2FSTO%20Technical%20Reports%2FRTO-TR-HFM-118>.



9. BRETL, Kathrine N.; MCCUSKER, Aaron T.; SHERMAN, Sage O.; MITCHELL, Thomas R.; DIXON, Jordan B.; CLARK, Torin K. Tolerable acclimation to the cross-coupled illusion through a 10-day, incremental, personalized protocol. *Journal of Vestibular Research*. 2019, roč. 29, č. 2-3, s. 97–110. Dostupné z DOI: 10.3233/ves-190656.
10. PRADHAN, Gaurav N.; GALVAN-GARZA, Raquel; PEREZ, Alison M.; BOGLE, Jamie; CEVETTE, Michael J. Generating Flight Illusions Using Galvanic Vestibular Stimulation in Virtual Reality Flight Simulations. *Frontiers in Neuroergonomics*. 2022, roč. 3. Dostupné z DOI: 10.3389/fnrgo.2022.883962.
11. THOMAS, Robert L; ALBELO, Jorge L. D.; WIGGINS, Michael. Enhancing Pilot Training Through Virtual Reality: Recognizing and Mitigating Aviation Visual and Vestibular Illusions. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*. 2023, roč. 10, č. 3. ISSN 2374-6793. Dostupné z DOI: 10.58940/2374-6793.1839.
12. BOB, Cheung; KEVIN, Hofer. Eye tracking, point of gaze, and performance degradation during disorientation. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. 2003, roč. 74, č. 1, s. 11–20.
13. GRANDIZIO, Catherine. *Quantifying the Cognitive, Symptomatic and Neuroendocrine Impact of the Coriolis Illusion; A Countermeasure for Motion Sickness*. 1 Aerospace Blvd, Daytona Beach, FL 32114, Spojené štáty, 2007. Diplomová práce. Embry-Riddle Aeronautical University - Daytona Beach.
14. LEWKOWICZ, Rafał; FUDALI-CZYŻ, Agnieszka; BAŁAJ, Bibianna; FRANCUZ, Piotr. Change Detection Flicker Task Effects on Simulator-Induced Spatial Disorientation Events. *Aerospace Medicine and Human Performance*. 2018, roč. 89, č. 10, s. 863–872. ISSN 2375-6314. Dostupné z DOI: 10.3357/amhp.5042.2018.
15. KANG, Yohan; LAZARO, May Jorella; KIM, Sungho. Crosschecking through verbal reports under spatial disorientation scenarios: Evidence from eye tracking metrics. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2021, roč. 86, s. 103202. ISSN 0169-8141. Dostupné z DOI: 10.1016/j.ergon.2021.103202.
16. GRETTY, Michael Andrew; GOLDING, John Foster; LE, Huy; NIGHTINGALE, Kelly. Cognitive Impairment by Spatial Disorientation. *Aviation, Space, and Environmental*



- Medicine*. 2008, roč. 79, č. 2, s. 105–111. ISSN 0095-6562. Dostupné z DOI: 10.3357/ asem.2143.2008.
17. STRÓŻAK, Paweł; FRANCUZ, Piotr; LEWKOWICZ, Rafał; AUGUSTYNOWICZ, Paweł; FUDALI-CZYŻ, Agnieszka; BAŁAJ, Bibianna; TRUSZCZYŃSKI, Olaf. Selective Attention and Working Memory Under Spatial Disorientation in a Flight Simulator. *The International Journal of Aerospace Psychology*. 2018, roč. 28, č. 1–2, s. 31–45. ISSN 2472-1832. Dostupné z DOI: 10.1080/24721840.2018.1486195.
 18. LEDEGANG, Wietse D.; GROEN, Eric L. Spatial Disorientation Influences on Pilots' Visual Scanning and Flight Performance. *Aerospace Medicine and Human Performance*. 2018, roč. 89, č. 10, s. 873–882. ISSN 2375-6314. Dostupné z DOI: 10.3357/amhp.5109.2018.
 19. BAŁAJ, Bibianna; LEWKOWICZ, Rafał; FRANCUZ, Piotr; AUGUSTYNOWICZ, Paweł; FUDALI-CZYŻ, Agnieszka; STRÓŻAK, Paweł; TRUSZCZYŃSKI, Olaf. Spatial disorientation cue effects on gaze behaviour in pilots and non-pilots. *Cognition, Technology & Work*. 2018, roč. 21, č. 3, s. 473–486. ISSN 1435-5566. Dostupné z DOI: 10.1007/s10111-018-0534-7.
 20. LEWKOWICZ, Rafał; BAŁAJ, Bibianna; FRANCUZ, Piotr. Susceptibility to Flight Simulator-Induced Spatial Disorientation in Pilots and Non-Pilots. *The International Journal of Aerospace Psychology*. 2020, roč. 30, č. 1–2, s. 25–37. ISSN 2472-1832. Dostupné z DOI: 10.1080/24721840.2019.1696680.
 21. WESTMORELAND, David; KRELL, Robert W.; SELF, Brian P. Physiological Responses to the Coriolis Illusion: Effects of Head Position and Vision. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. 2007, roč. 78, č. 10, s. 985–989. ISSN 0095-6562. Dostupné z DOI: 10.3357/ asem.2010.2007.
 22. HORNG, Chi-Ting; LIU, Chung-Cheng; KUO, Daih-Iluang; SHIEH, Po-Chuen; WU, Yi-Chang; CHEN, Jiann-Torng; TSAI, Ming-Ling. Changes in Visual Function During the Coriolis Illusion. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*. 2009, roč. 80, č. 4, s. 360–363. ISSN 0095-6562. Dostupné z DOI: 10.3357/ asem.2173.2009.
 23. KOWALCZUK, Krzysztof P.; GAZDZINSKI, Stefan P.; JANEWICZ, Michał; GASIK, Marek; LEWKOWICZ, Rafał; WYLEZOŁ, Mariusz. Hypoxia and Coriolis Illusion in Pilots During



- Simulated Flight. *Aerospace Medicine and Human Performance*. 2016, roč. 87, č. 2, s. 108–113. ISSN 2375-6314. Dostupné z DOI: 10.3357/amhp.4412.2016.
24. SMRZ, Vladimír; BORIL, Jan; LEUCHTER, Jan; BLASCH, Erik. Experience with objective measuring of the coriolis illusion influence on the pilot's spatial orientation. In: *2017 IEEE/AIAA 36th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. IEEE, 2017. Dostupné z DOI: 10.1109/dasc.2017.8102063.
25. BORIL, Jan; SMRZ, Vladimír; BLASCH, Erik; LONE, Mudassir. Spatial Disorientation Impact on the Precise Approach in Simulated Flight. *Aerospace Medicine and Human Performance*. 2020, roč. 91, č. 10, s. 767–775. ISSN 2375-6314. Dostupné z DOI: 10.3357/amhp.5591.2020.
26. KANG, Yohan; YUN, Myung Hwan; KIM, Sungho. Verbal Reports Influence on Pilot Flight Performance and Mental Stress Under Spatial Disorientation. *Aerospace Medicine and Human Performance*. 2020, roč. 91, č. 12, s. 948–955. ISSN 2375-6314. Dostupné z DOI: 10.3357/amhp.5620.2020.
27. KARAPETJAN, Liana; SOCHA, Vladimír; MATYÁŠ, Roman; HANÁKOVÁ, Lenka; PETŘÍČEK, Jan; ONIŠČENKO, Boris; SOCHA, Luboš; DOŠEL, Petr. Implementation of a vestibular illusion simulator into IR training. *Transportation Research Procedia*. 2022, roč. 65, s. 222–229. ISSN 2352-1465. Dostupné z DOI: 10.1016/j.trpro.2022.11.026.
28. ETC AIRCREW TRAINING SYSTEMS. *ETC* [<https://www.etcaircrewtraining.com/gyro-ipt-ii-spatial-disorientation.html>]. 2024. Accessed: 2023.
29. In: *Information Retrieval for Music and Motion*. Springer Berlin Heidelberg, 2007, s. 69–84. ISBN 9783540740483. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-540-74048-3_4.



Prílohy

A Mapa rozloženia grafov

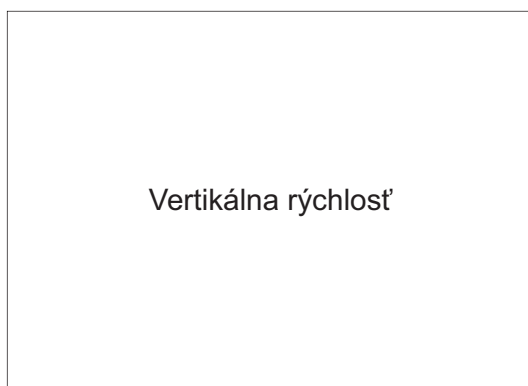
A.



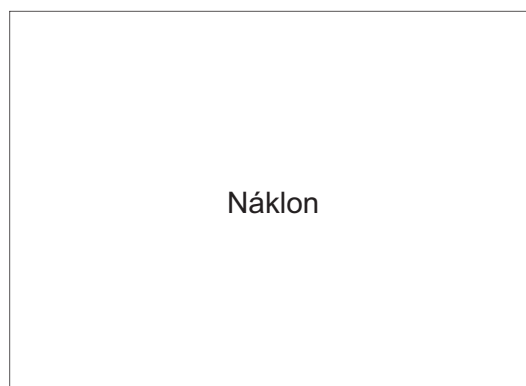
B.



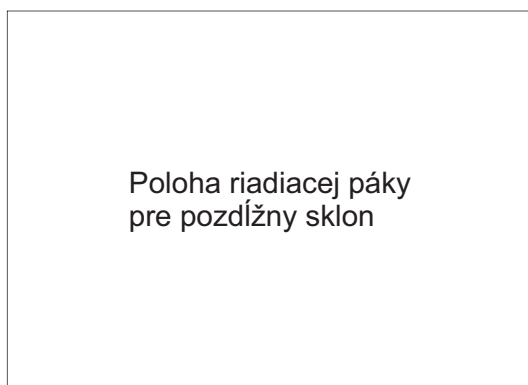
C.



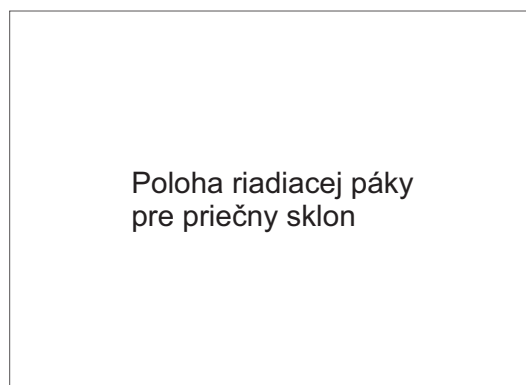
D.



E.



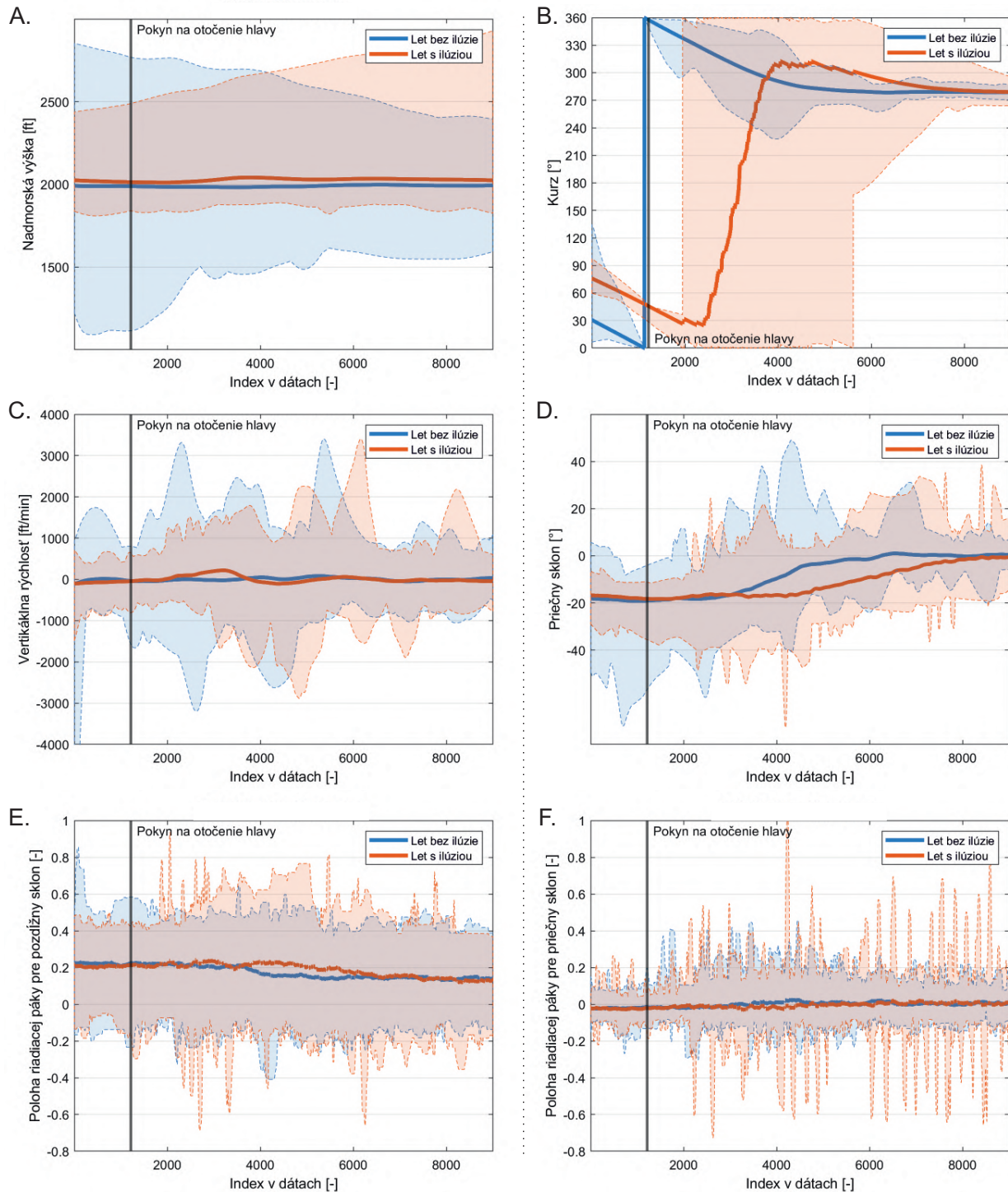
F.



Obr. A.1: Mapa rozloženia grafov v prílohách pre ľahšiu orientáciu

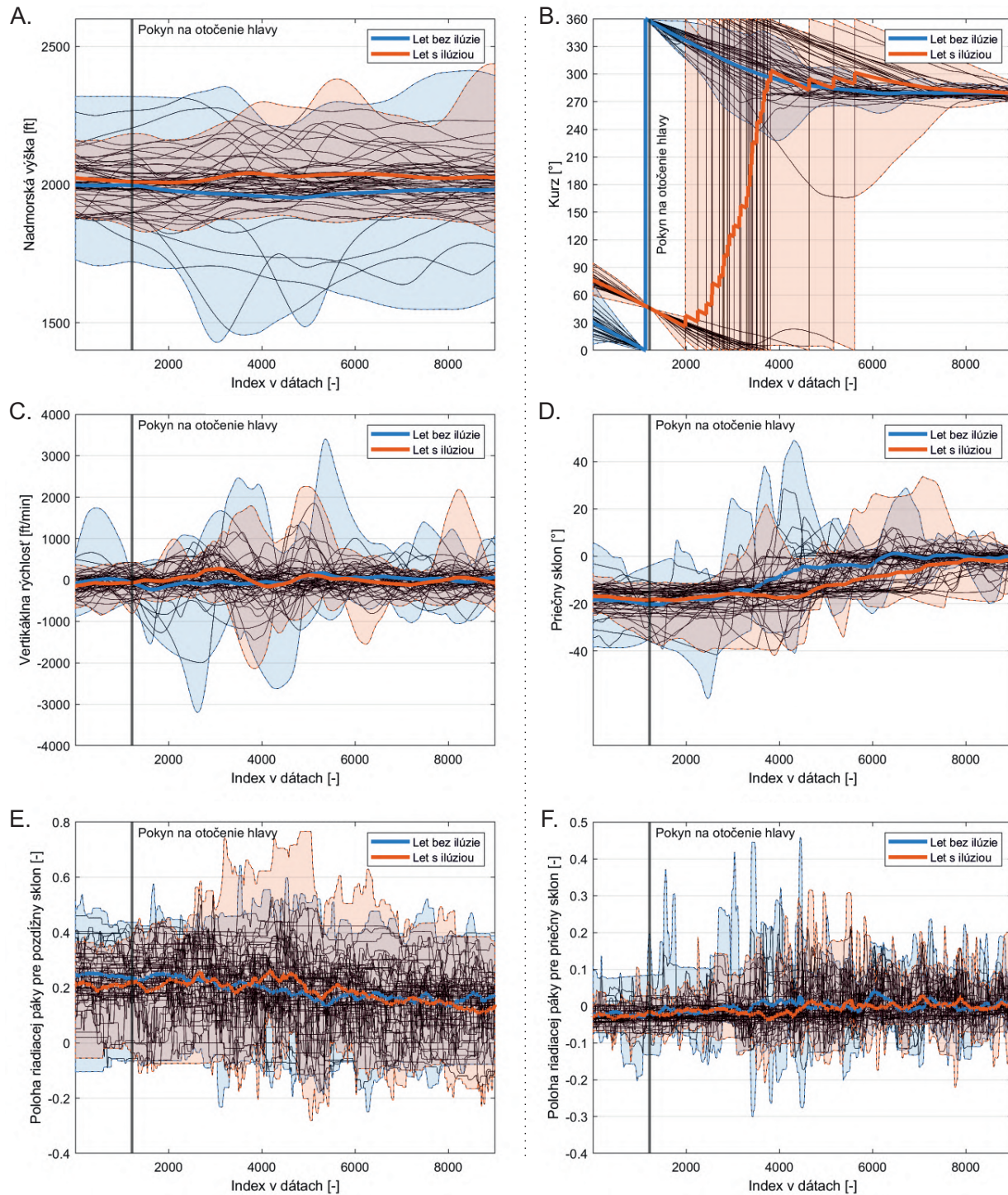
B Grafy nenormovaných priebehov jednotlivých parametrov

B.1 Profil 1



Obr. B.1: Nenormovaný priebeh letových parametrov pre profil 1

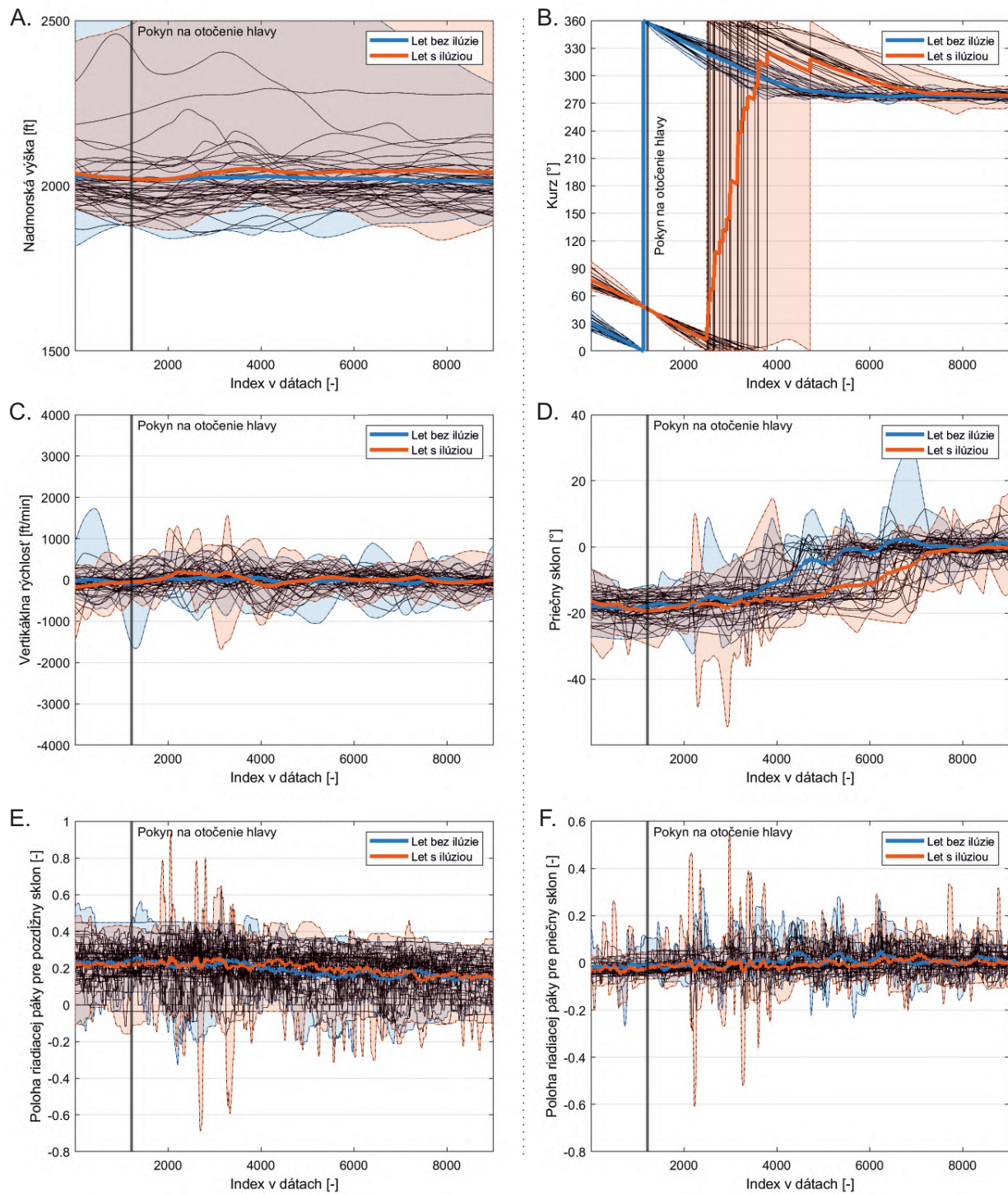
B.2 Profil 1 - Skupina 1



Obr. B.2: Nenormovaný priebeh letových parametrov pre profil 1 - Skupina 1

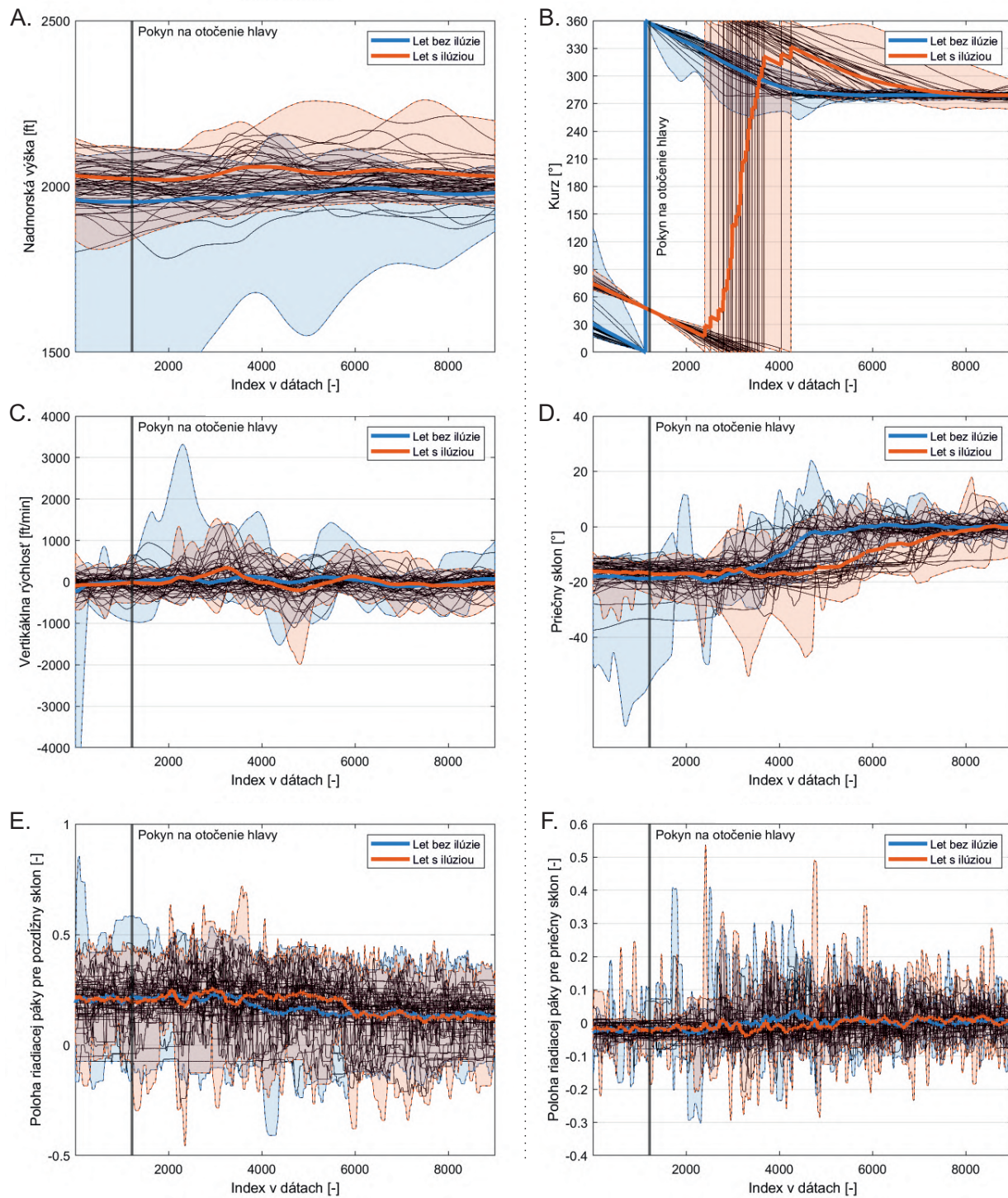


B.3 Profil 1 - Skupina 2



Obr. B.3: Nenormovaný priebeh letových parametrov pre profil 1 - Skupina 2

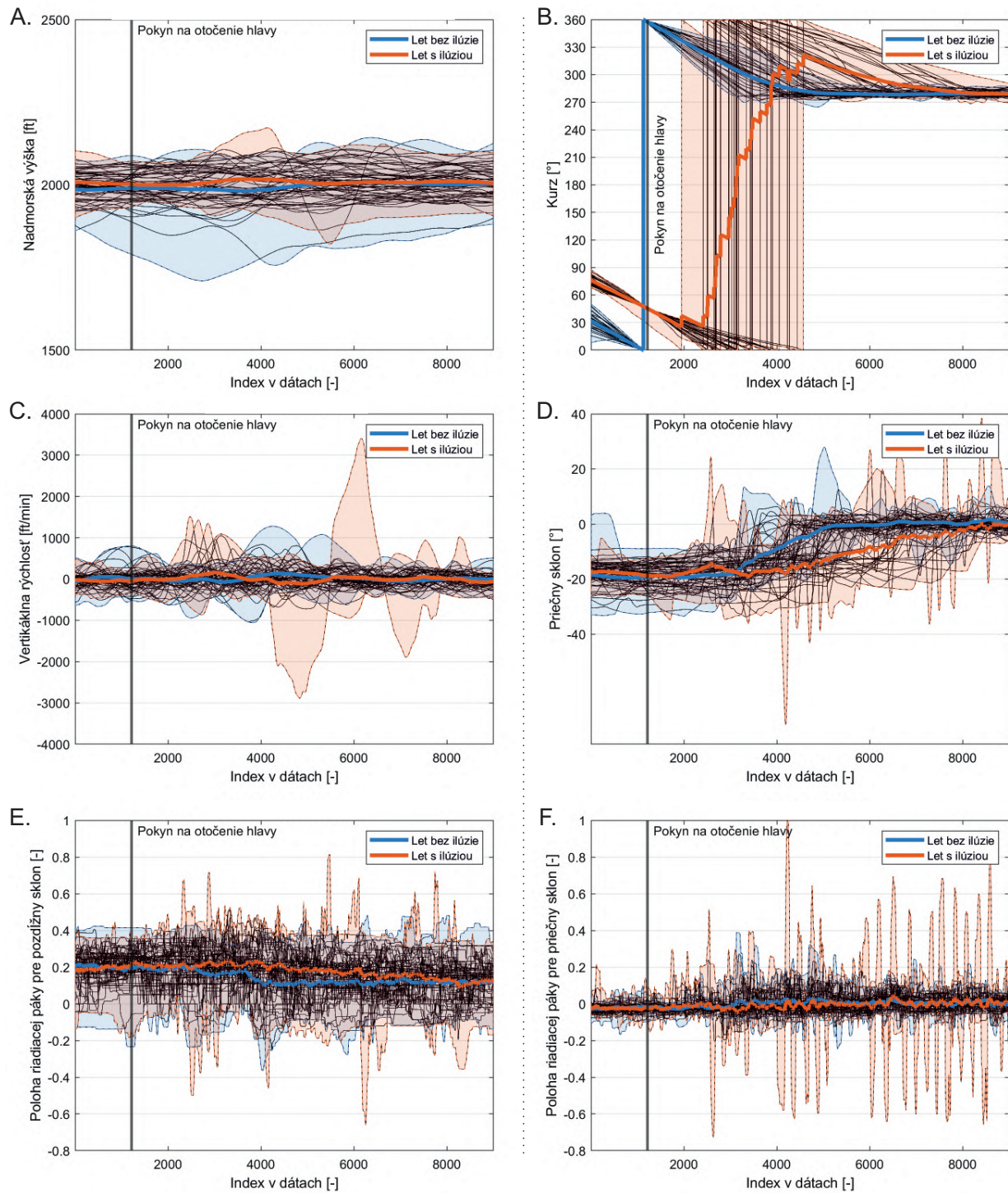
B.4 Profil 1 - Skupina 3



Obr. B.4: Nenormovaný priebeh letových parametrov pre profil 1 - Skupina 3



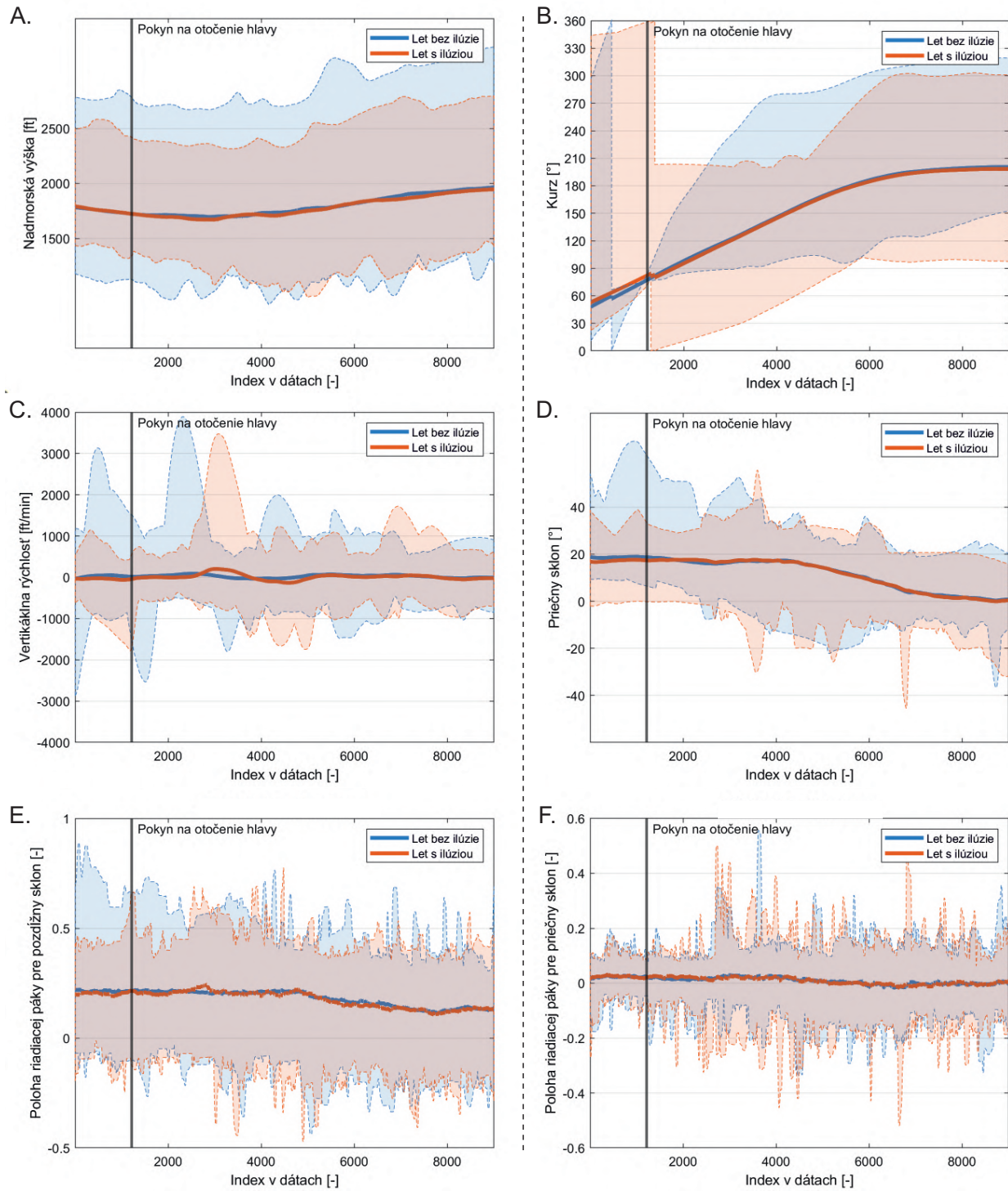
B.5 Profil 1 - Skupina 4



Obr. B.5: Nenormovaný priebeh letových parametrov pre profil 1 - Skupina 4



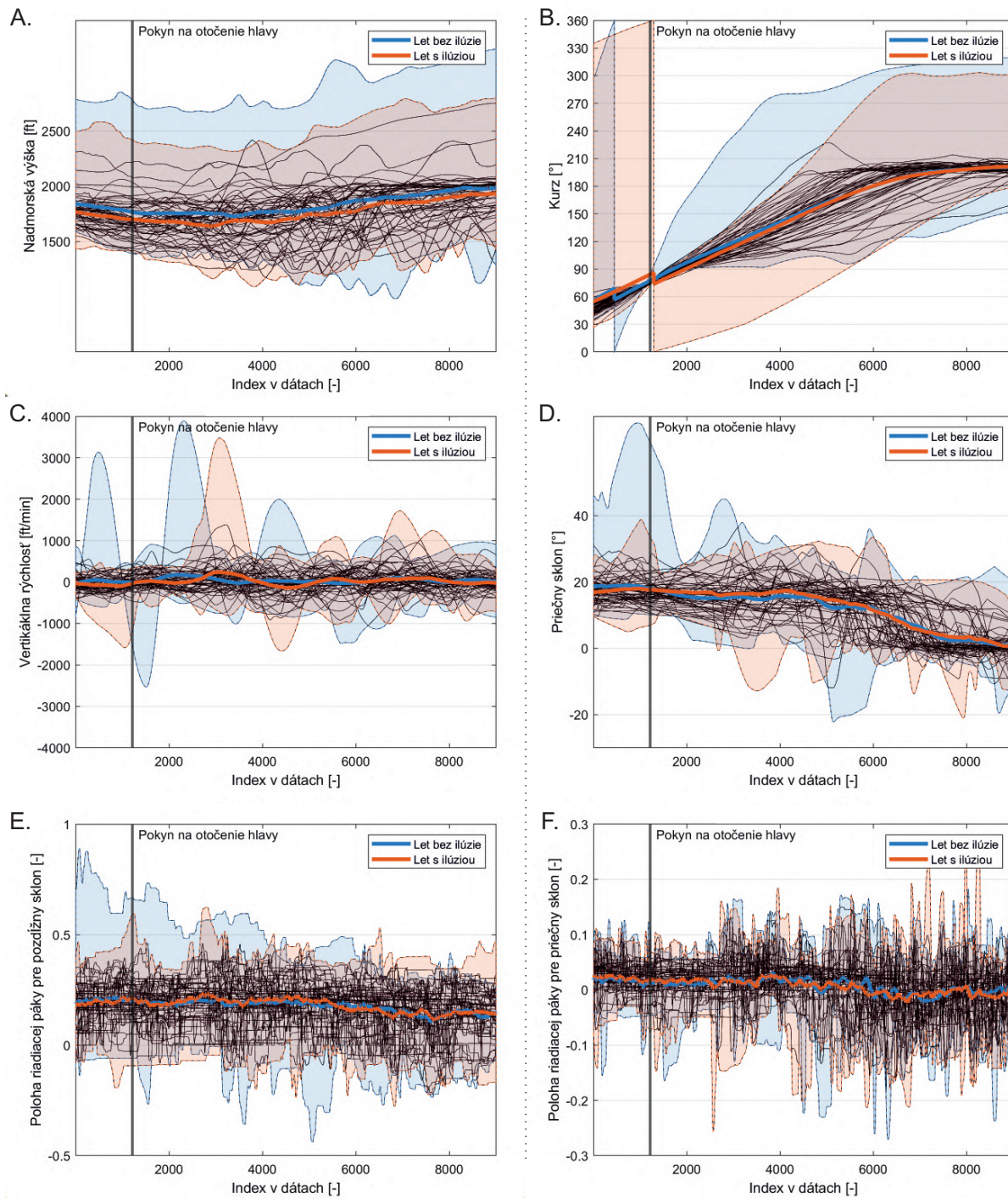
B.6 Profil 2



Obr. B.6: Nenormovaný priebeh letových parametrov pre profil 2



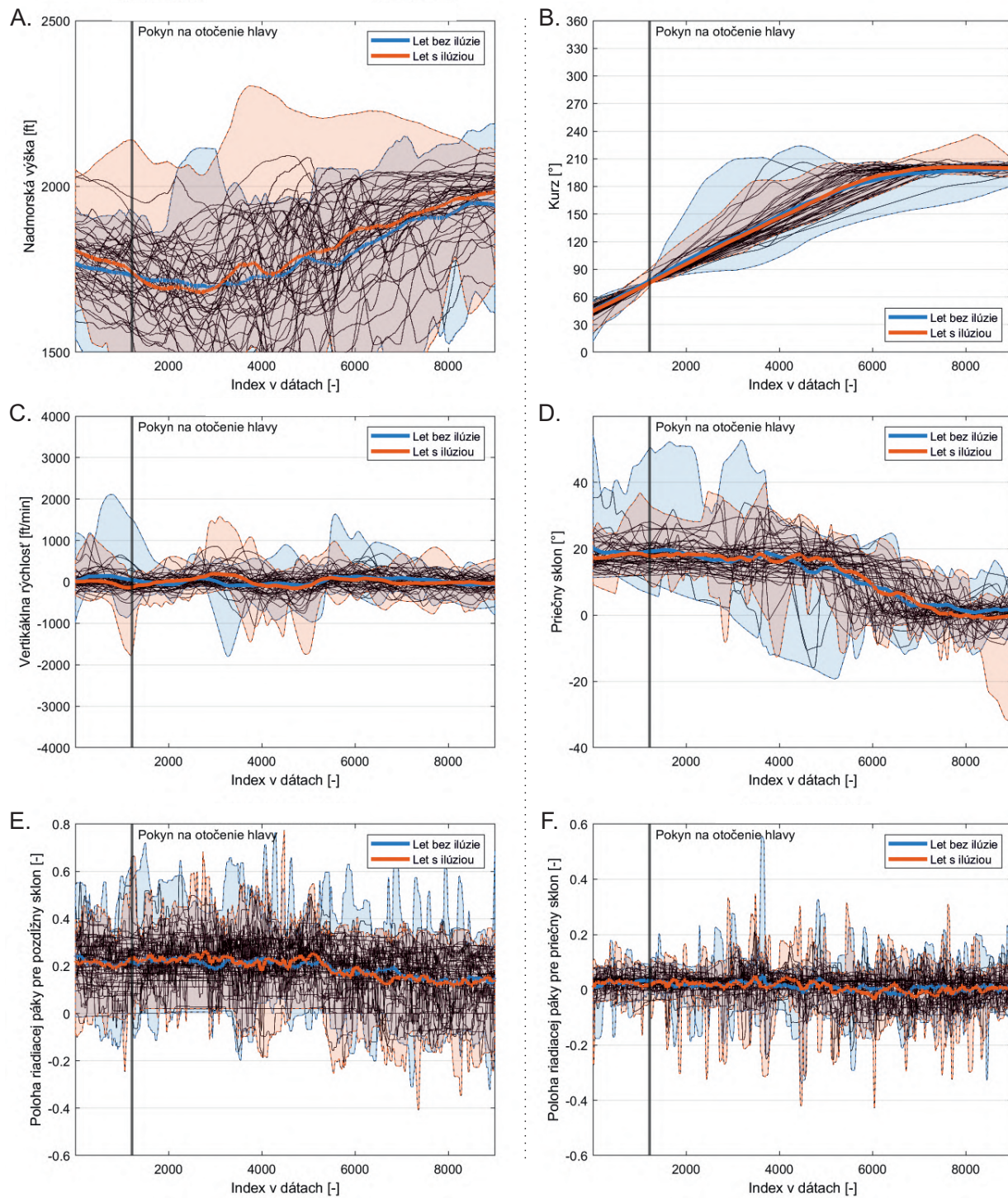
B.7 Profil 2 - Skupina 1



Obr. B.7: Nenormovaný prebeh letových parametrov pre profil 2 - Skupina 1



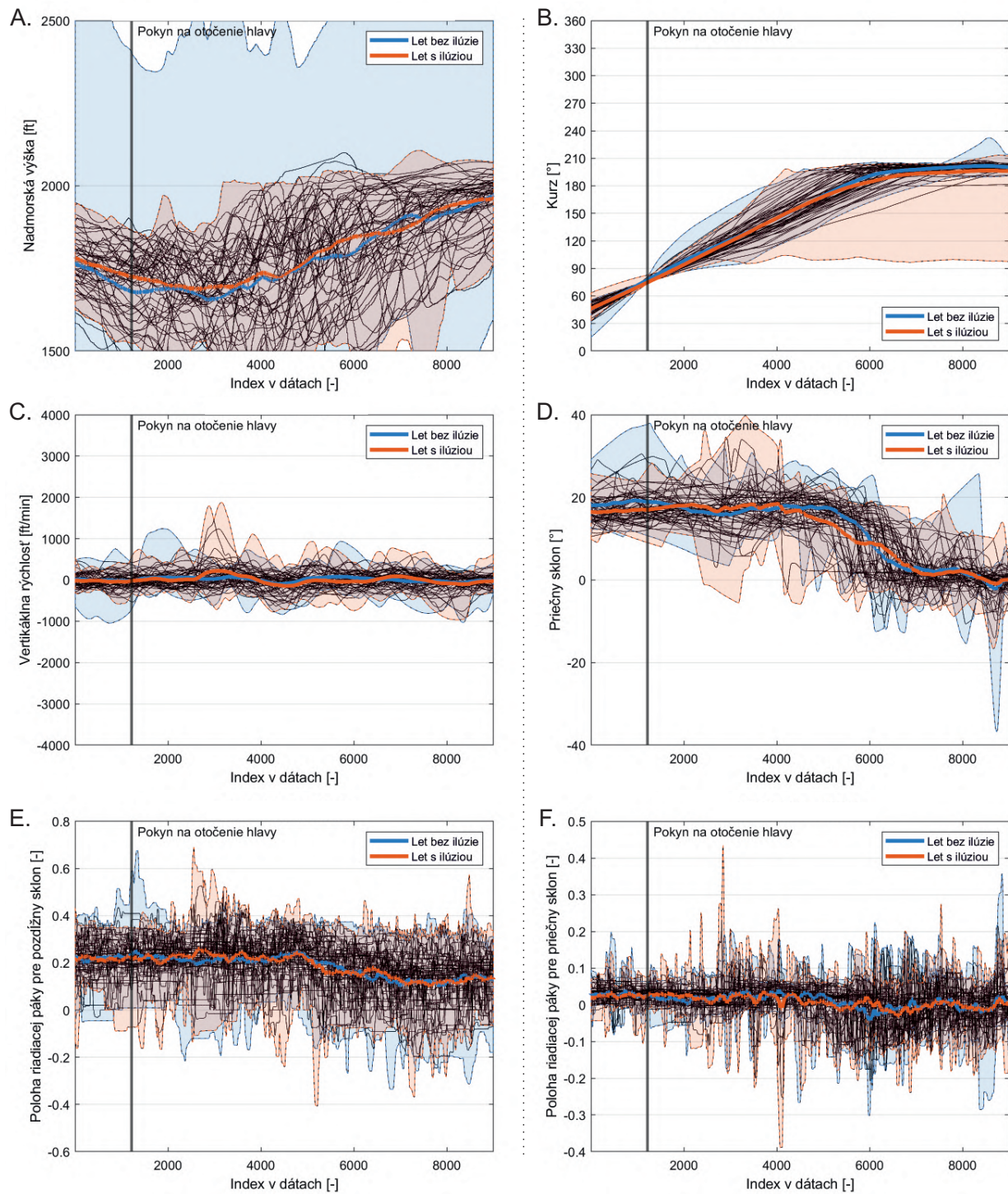
B.8 Profil 2 - Skupina 2



Obr. B.8: Nenormovaný priebeh letových parametrov pre profil 2 - Skupina 2

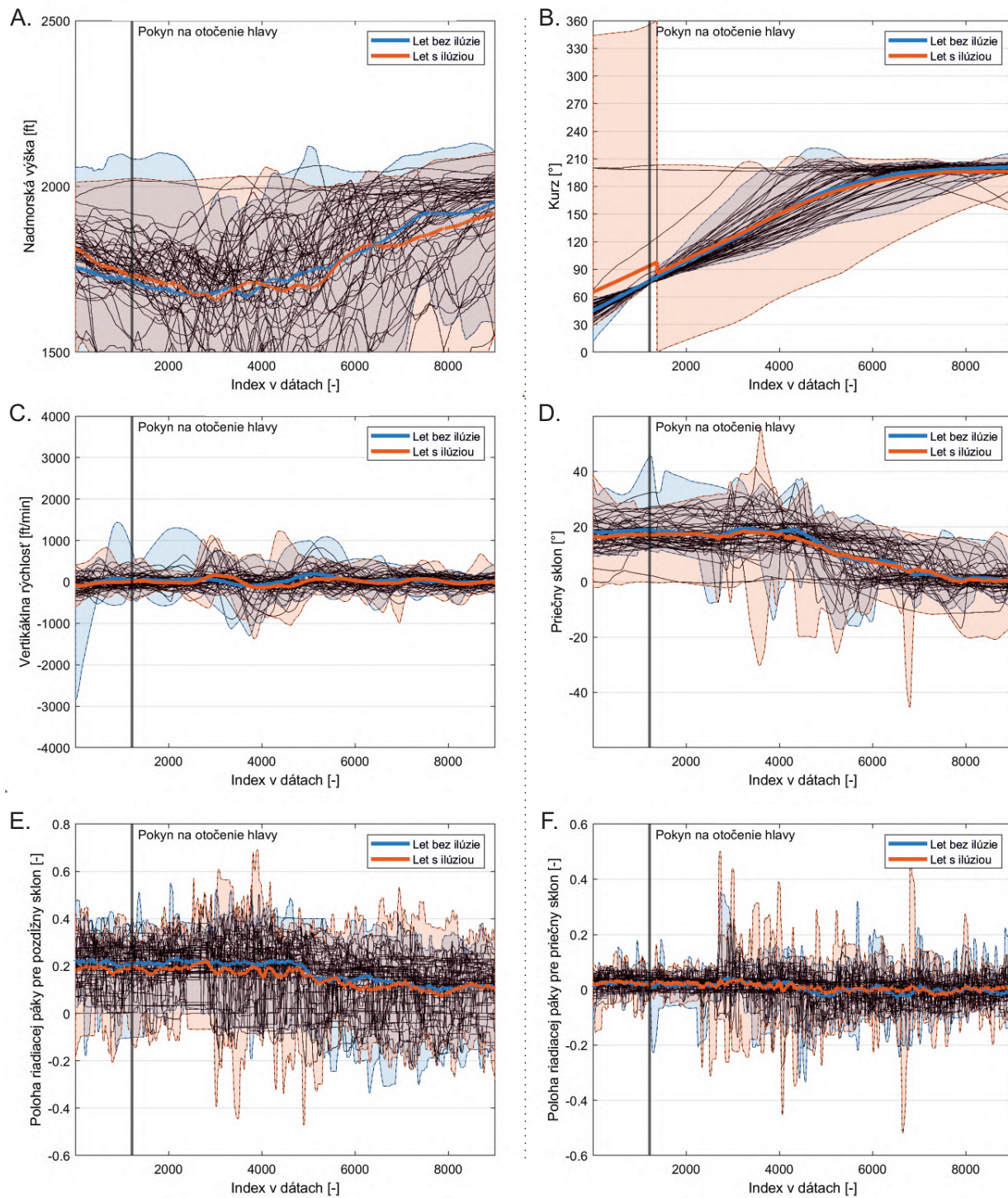


B.9 Profil 2 - Skupina 3



Obr. B.9: Nenormovaný priebeh letových parametrov pre profil 2 - Skupina 3

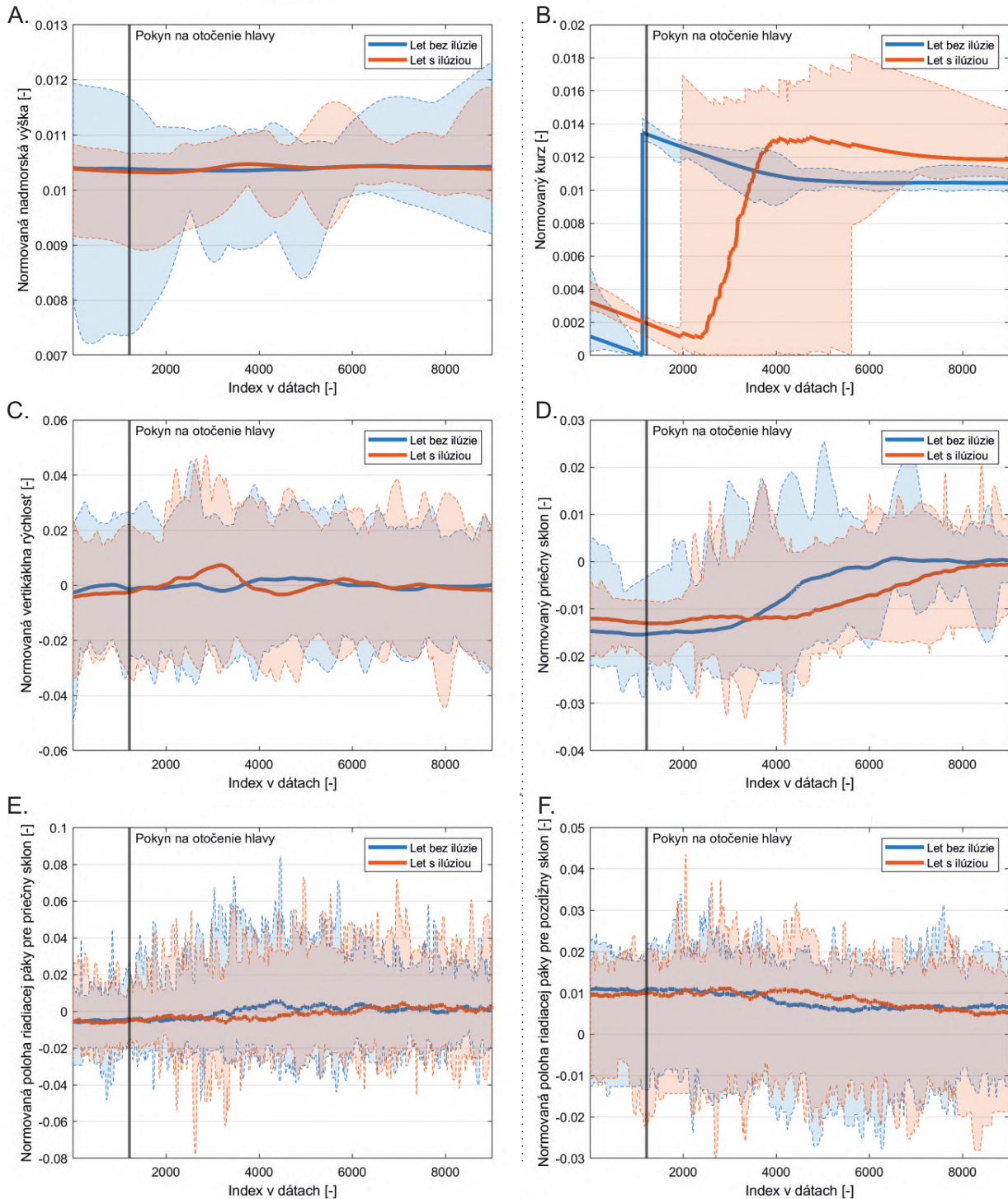
B.10 Profil 2 - Skupina 4



Obr. B.10: Nenormovaný priebeh letových parametrov pre profil 2 - Skupina 4

C Grafy normovaných priebehov jednotlivých parametrov

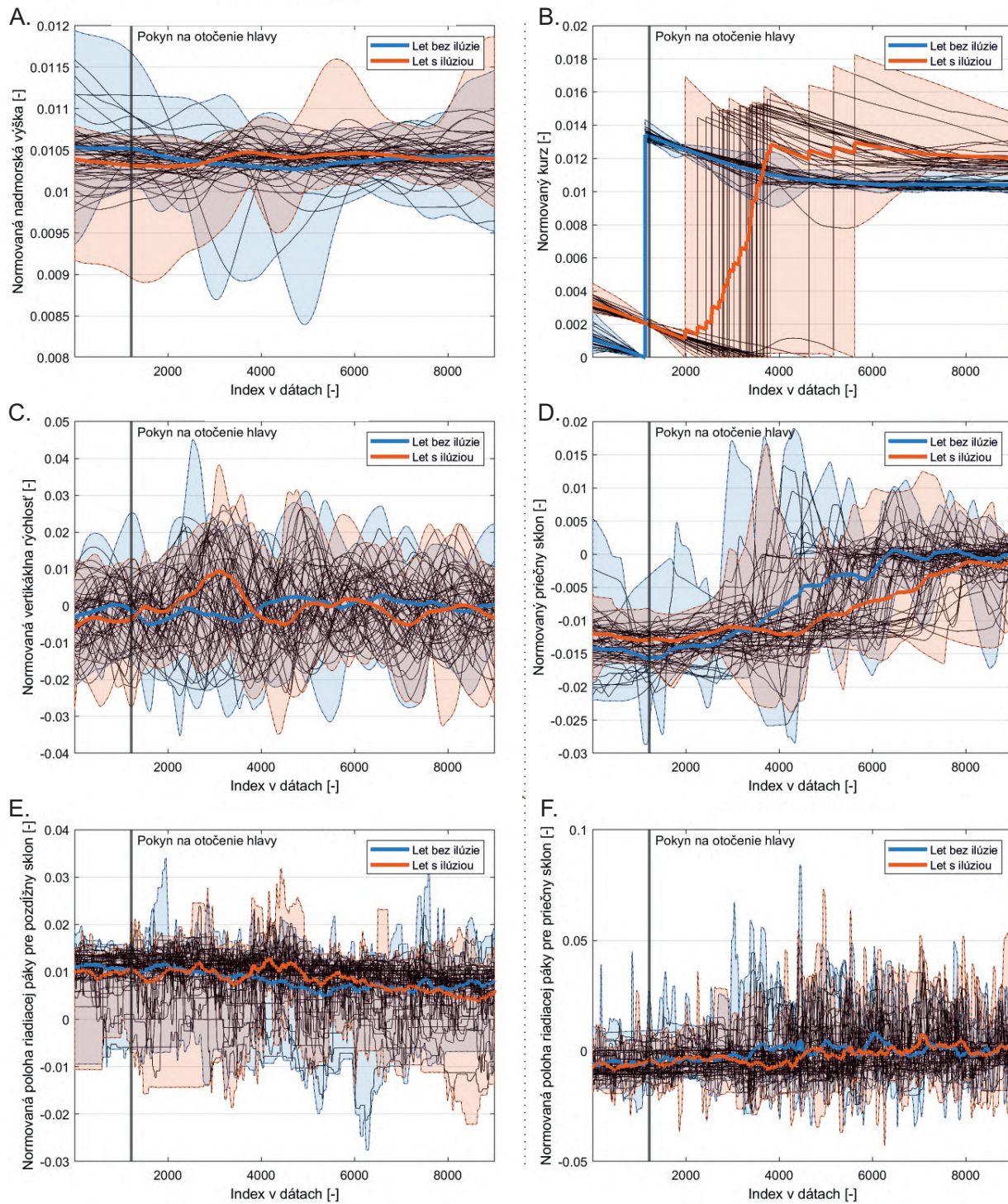
C.1 Profil 1



Obr. C.1: Normovaný priebeh letových parametrov pre profil 1



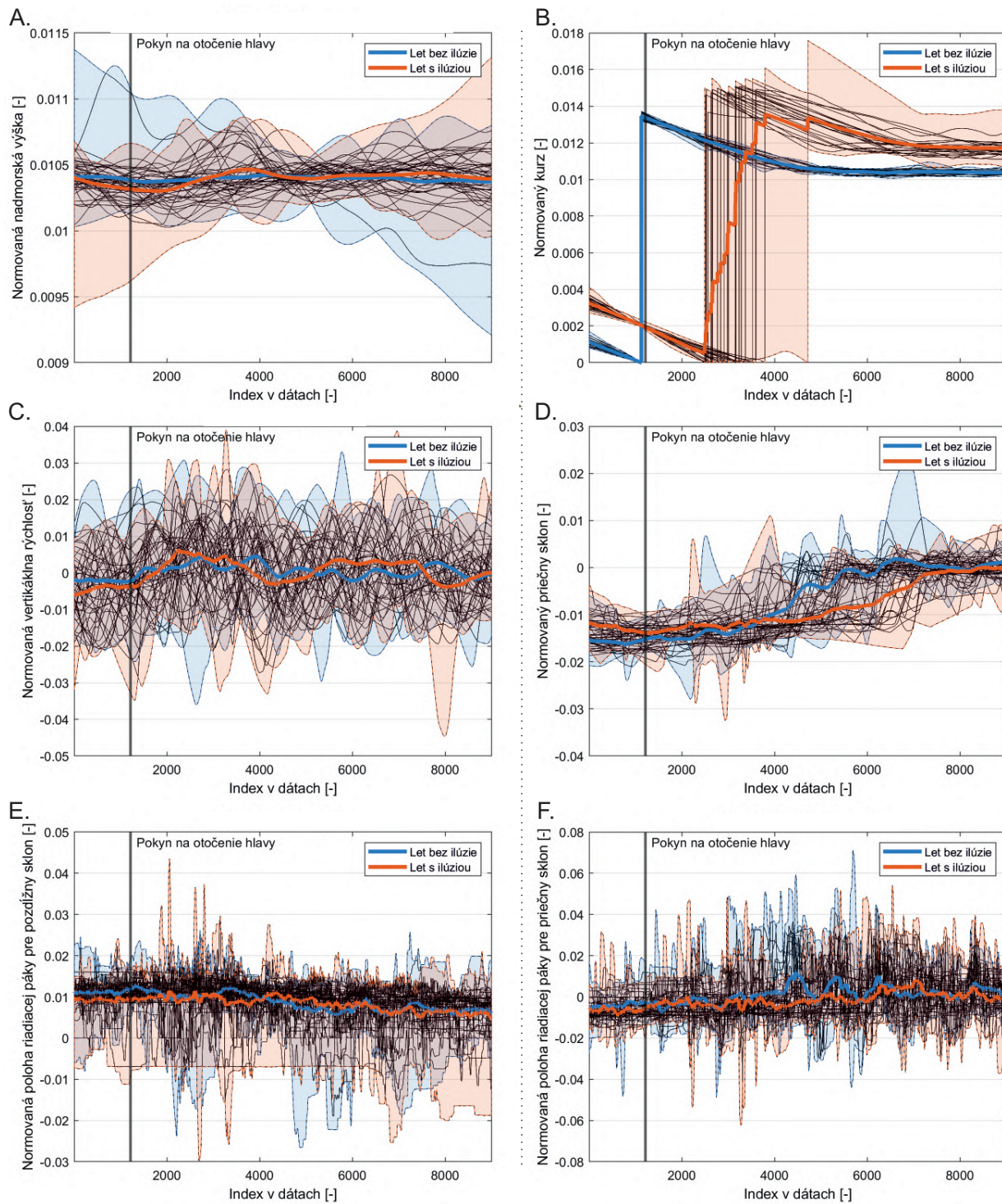
C.2 Profil 1 - Skupina 1



Obr. C.2: Normovaný priebeh letových parametrov pre profil 1 - Skupina 1



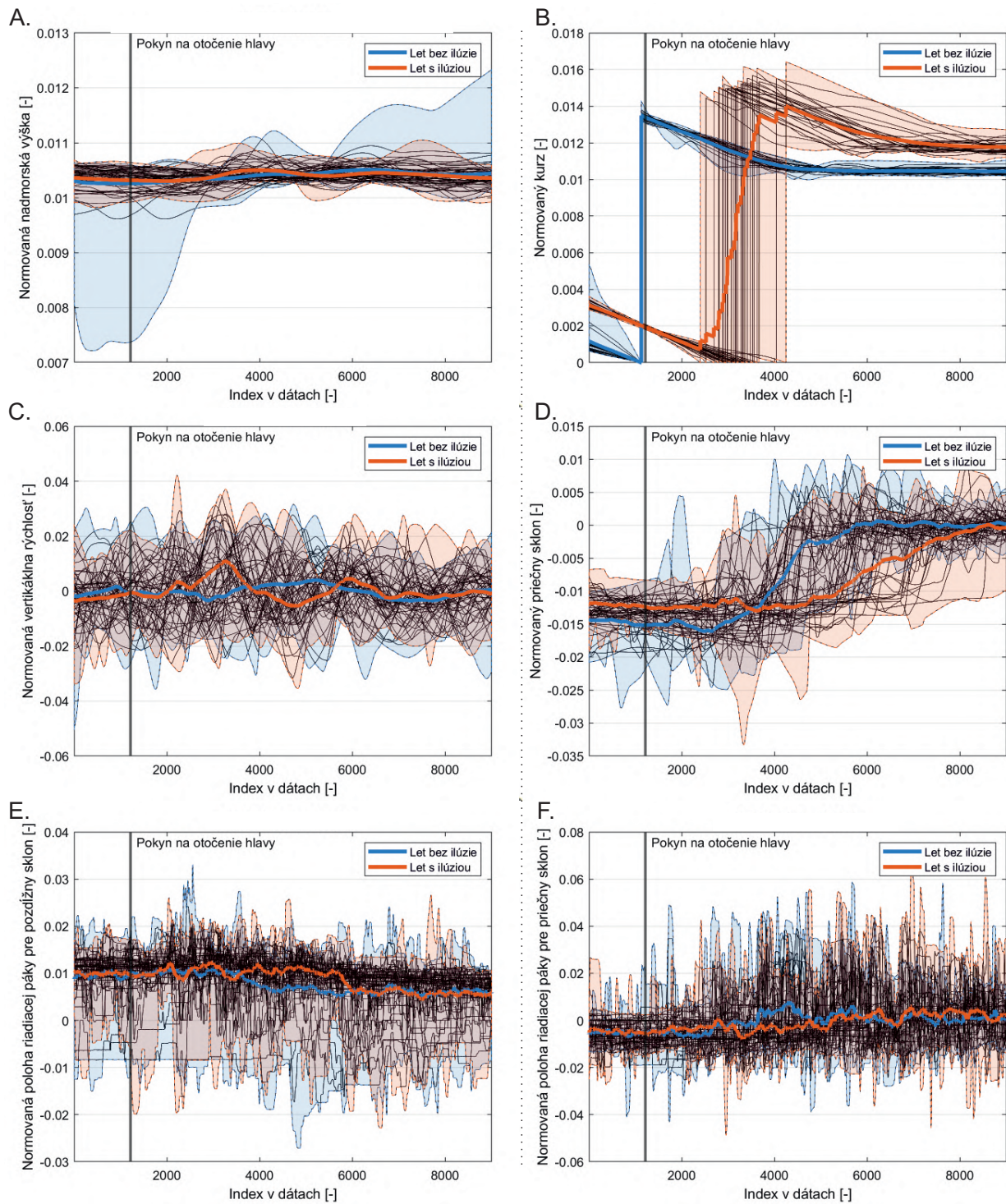
C.3 Profil 1 - Skupina 2



Obr. C.3: Normovaný priebeh letových parametrov pre profil 1 - Skupina 2

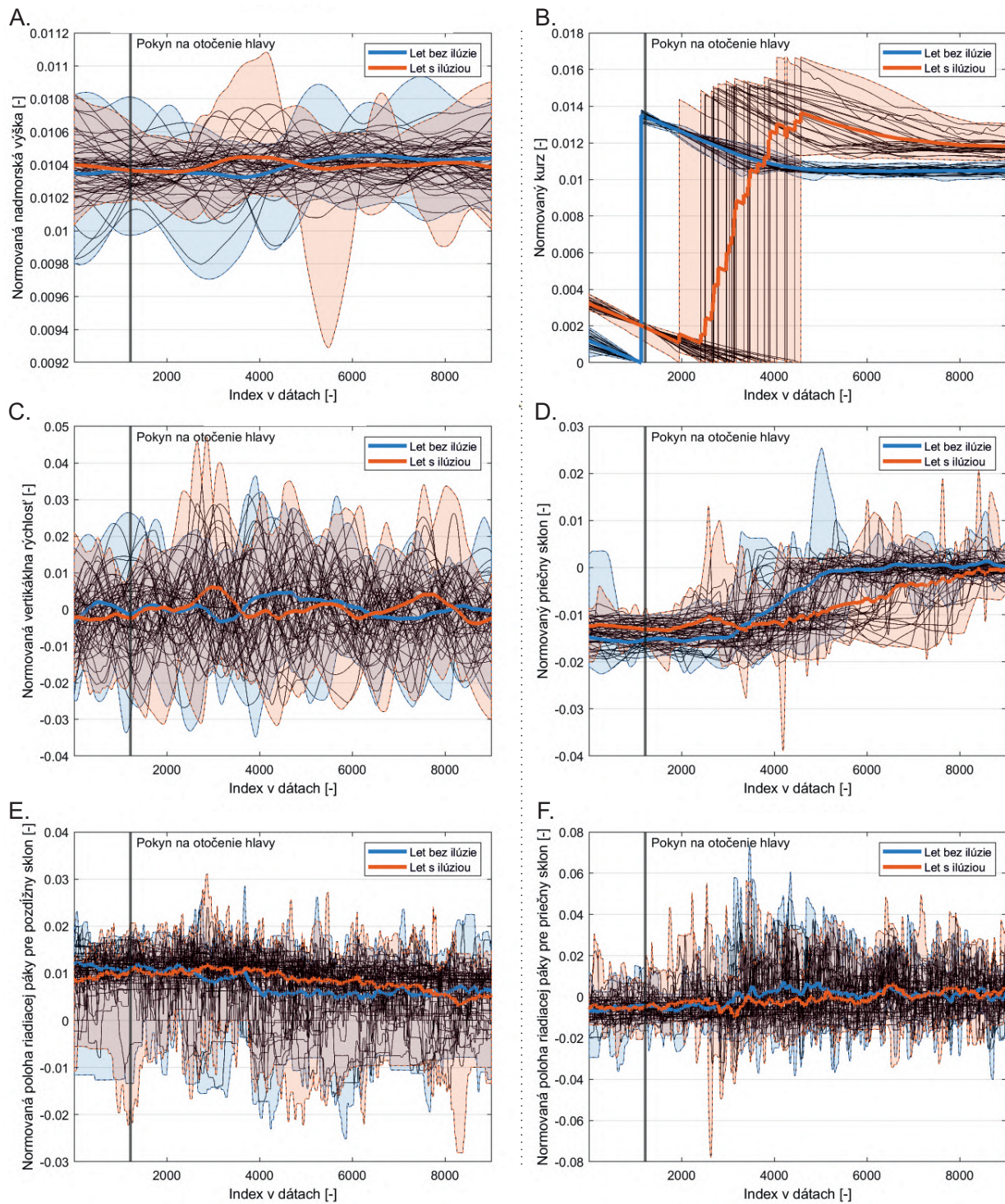


C.4 Profil 1 - Skupina 3



Obr. C.4: Normovaný priebeh letových parametrov pre profil 1 - Skupina 3

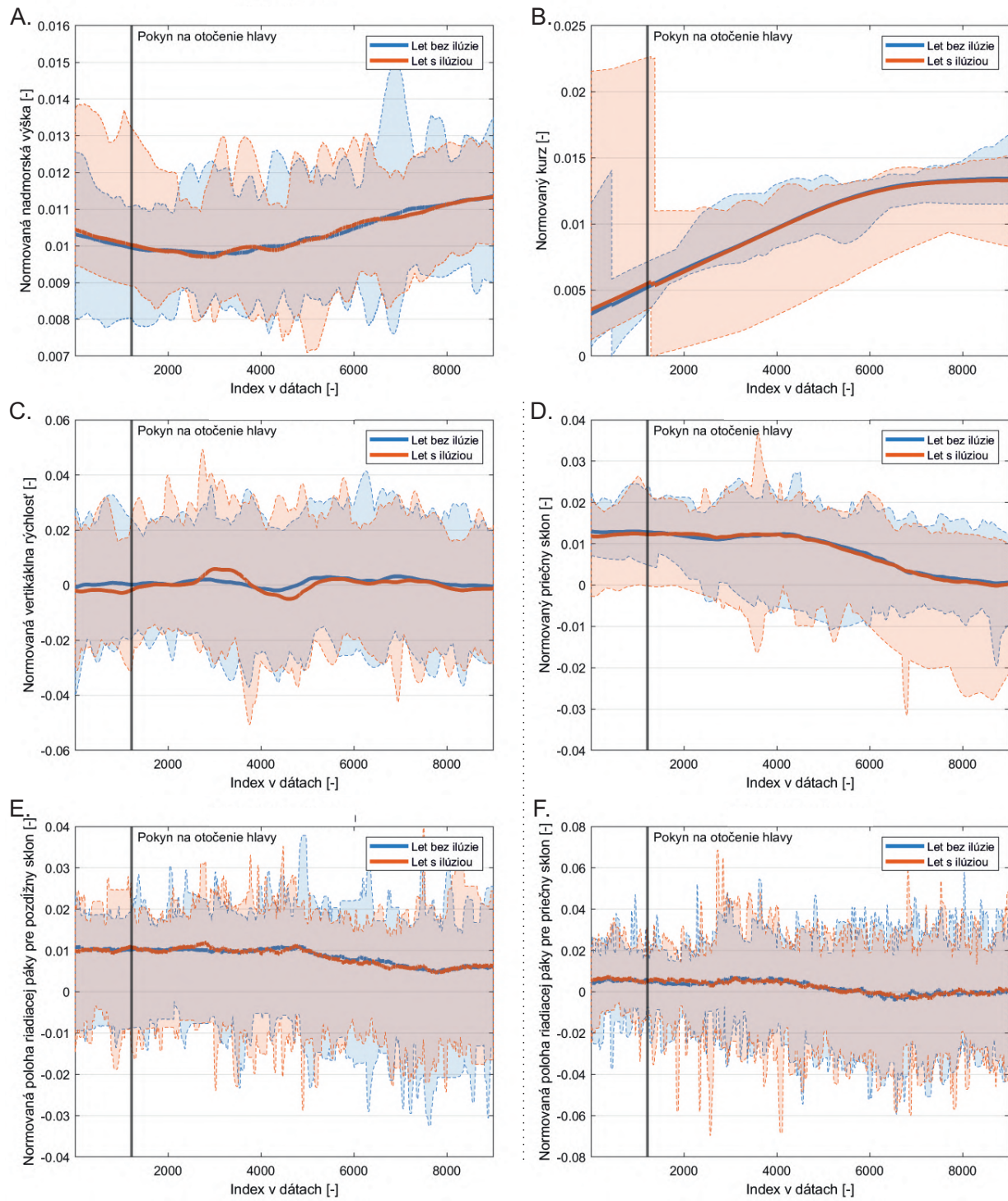
C.5 Profil 1 - Skupina 4



Obr. C.5: Normovaný priebeh letových parametrov pre profil 1 - Skupina 4



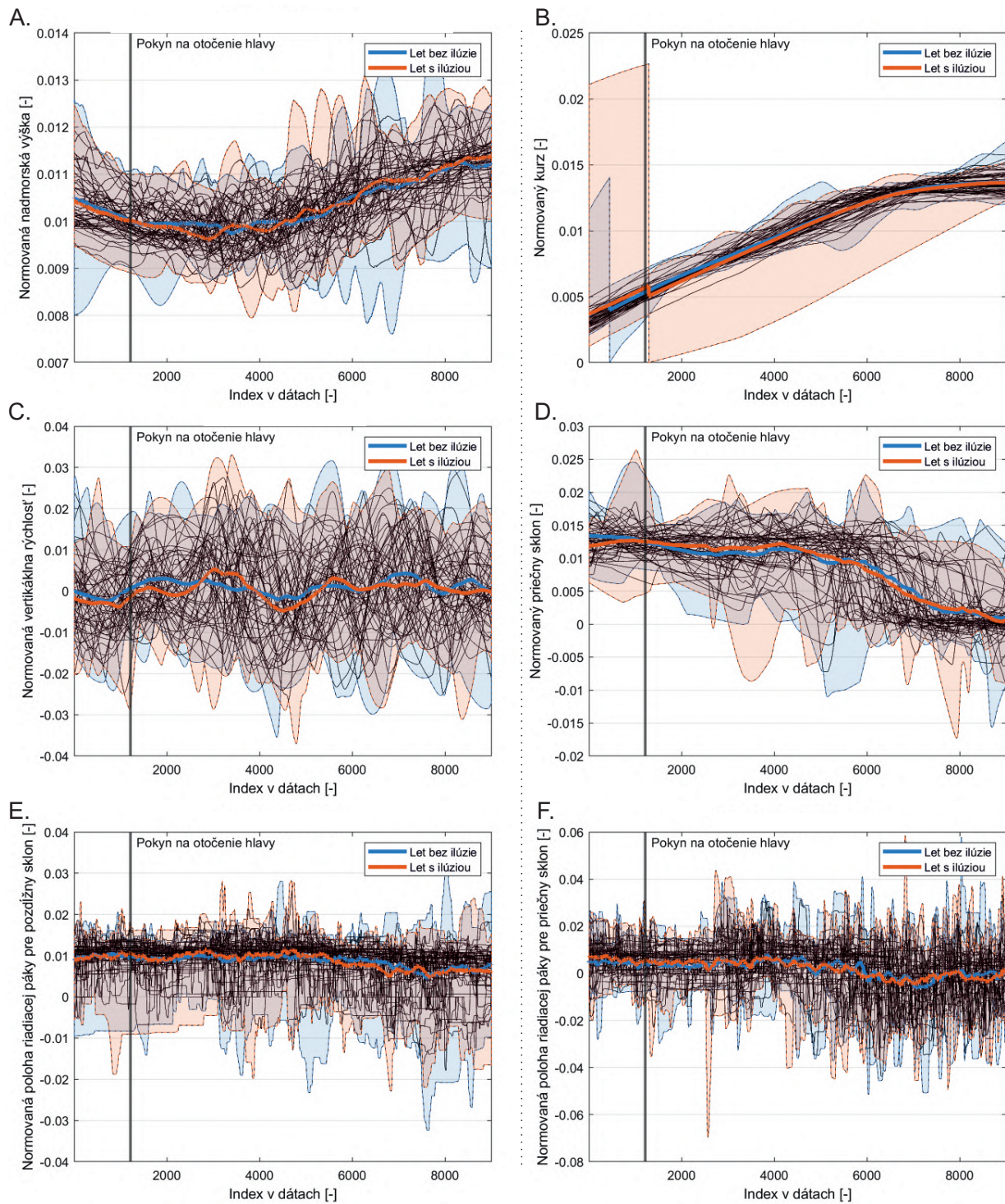
C.6 Profil 2



Obr. C.6: Normovaný priebeh letových parametrov pre profil 2



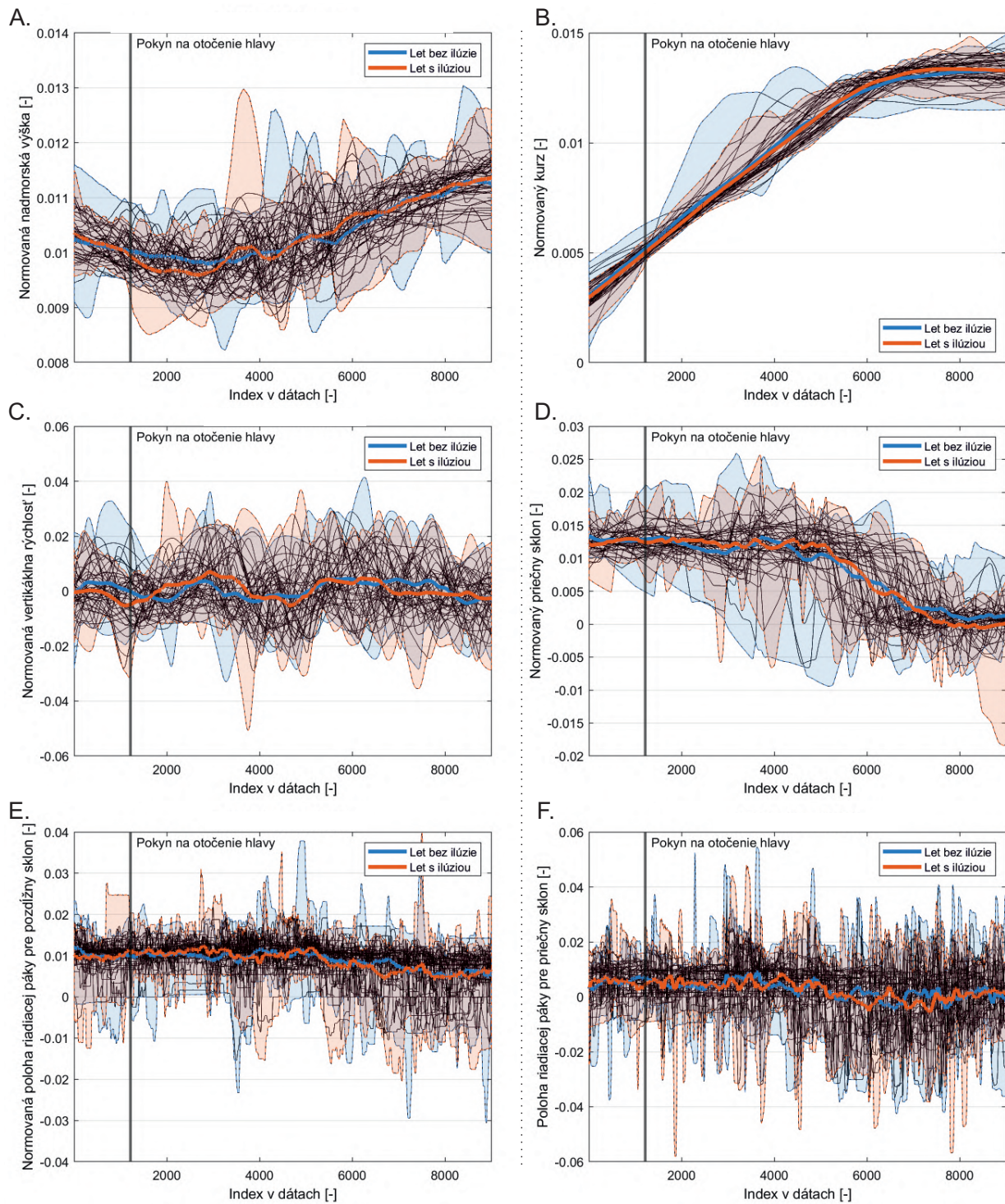
C.7 Profil 2 - Skupina 1



Obr. C.7: Normovaný priebeh letových parametrov pre profil 2 - Skupina 1

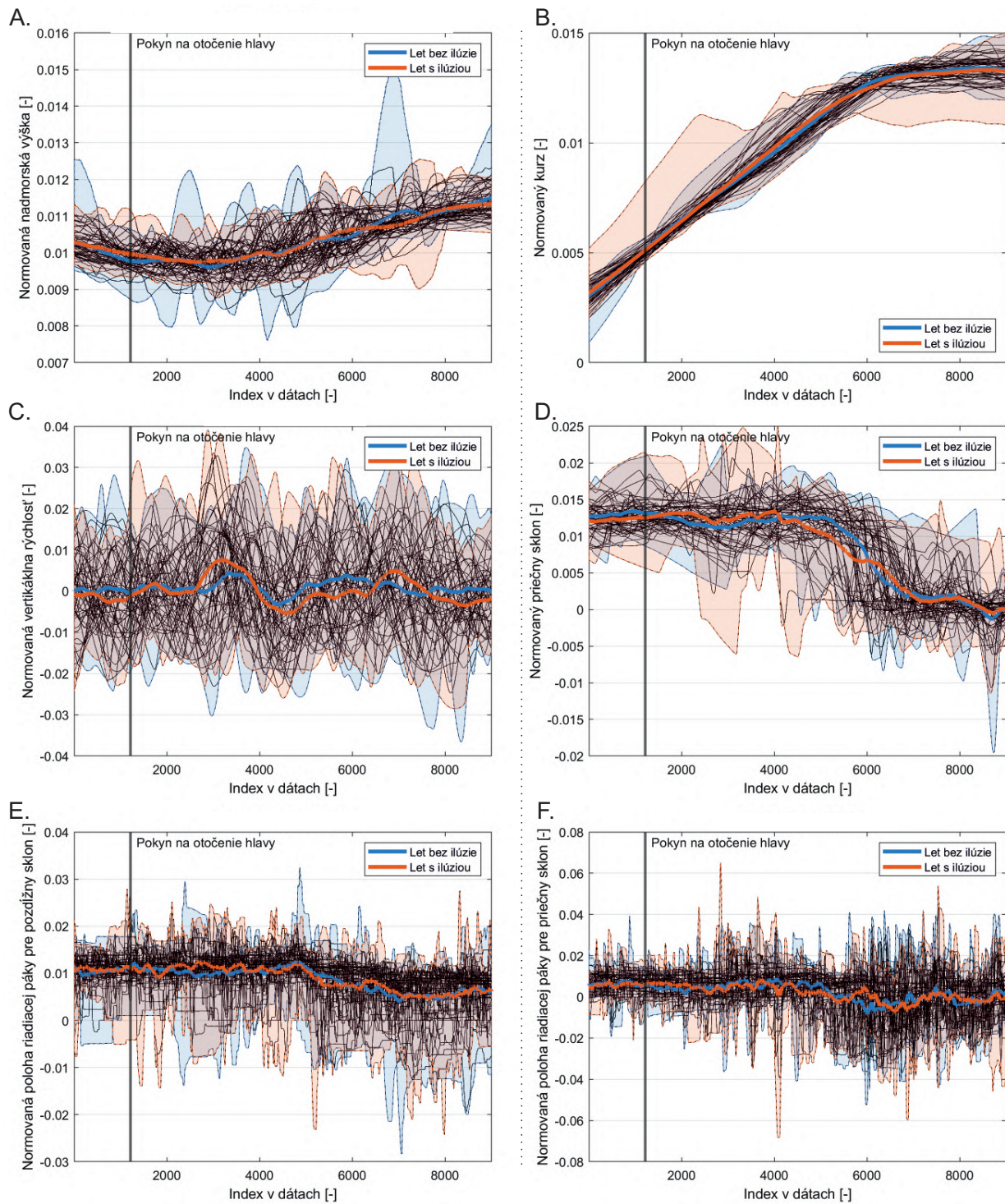


C.8 Profil 2 - Skupina 2



Obr. C.8: Normovaný priebeh letových parametrov pre profil 2 - Skupina 2

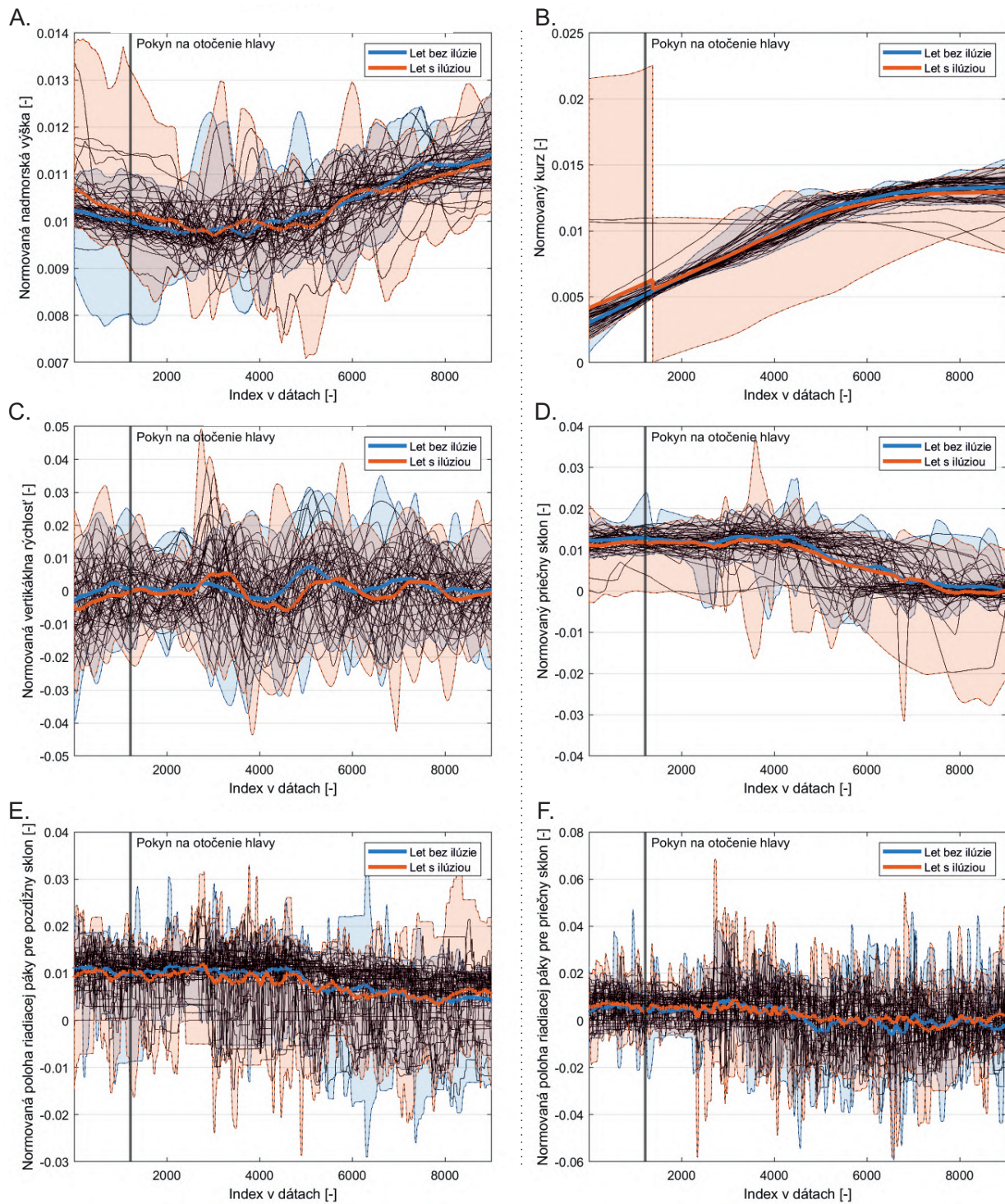
C.9 Profil 2 - Skupina 3



Obr. C.9: Normovaný priebeh letových parametrov pre profil 2 - Skupina 3



C.10 Profil 2 - Skupina 4

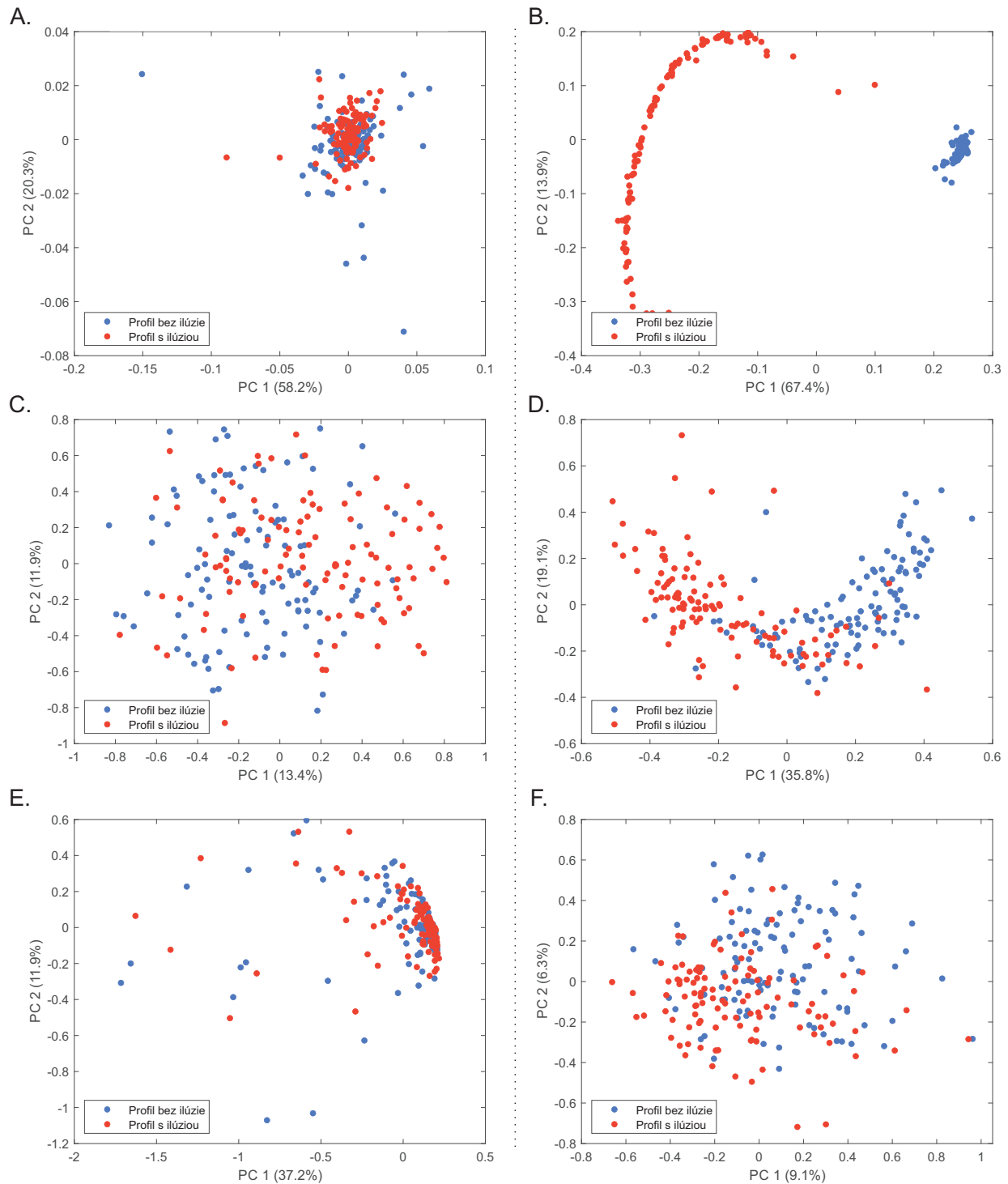


Obr. C.10: Normovaný priebeh letových parametrov pre profil 2 - Skupina 4



D Grafy s výsledkami PCA

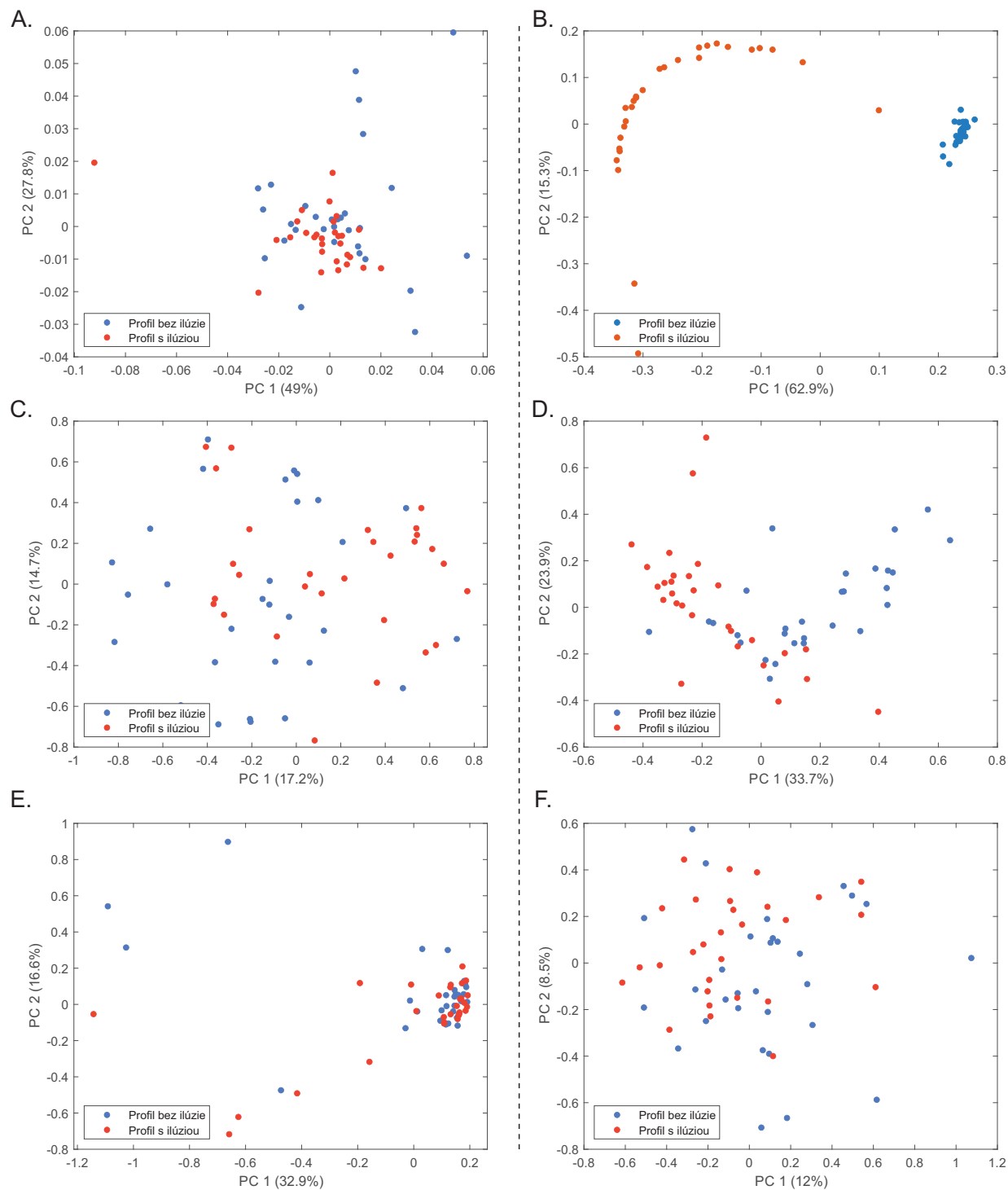
D.1 Profil 1



Obr. D.1: Výsledky PCA jednotlivých parametrov pre profil 1



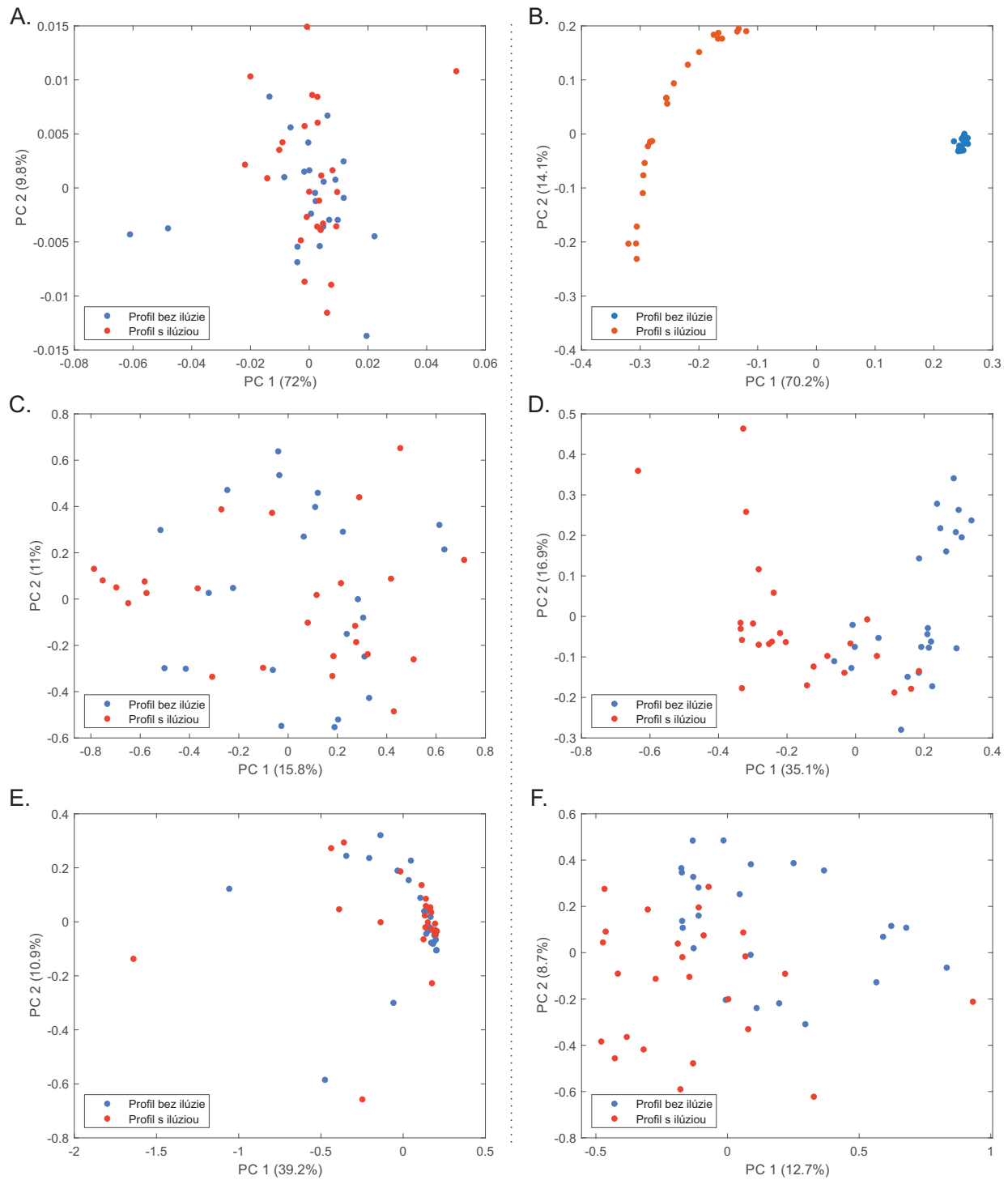
D.2 Profil 1 - Skupina 1



Obr. D.2: Výsledky PCA jednotlivých parametrov pre profil 1 - Skupina 1



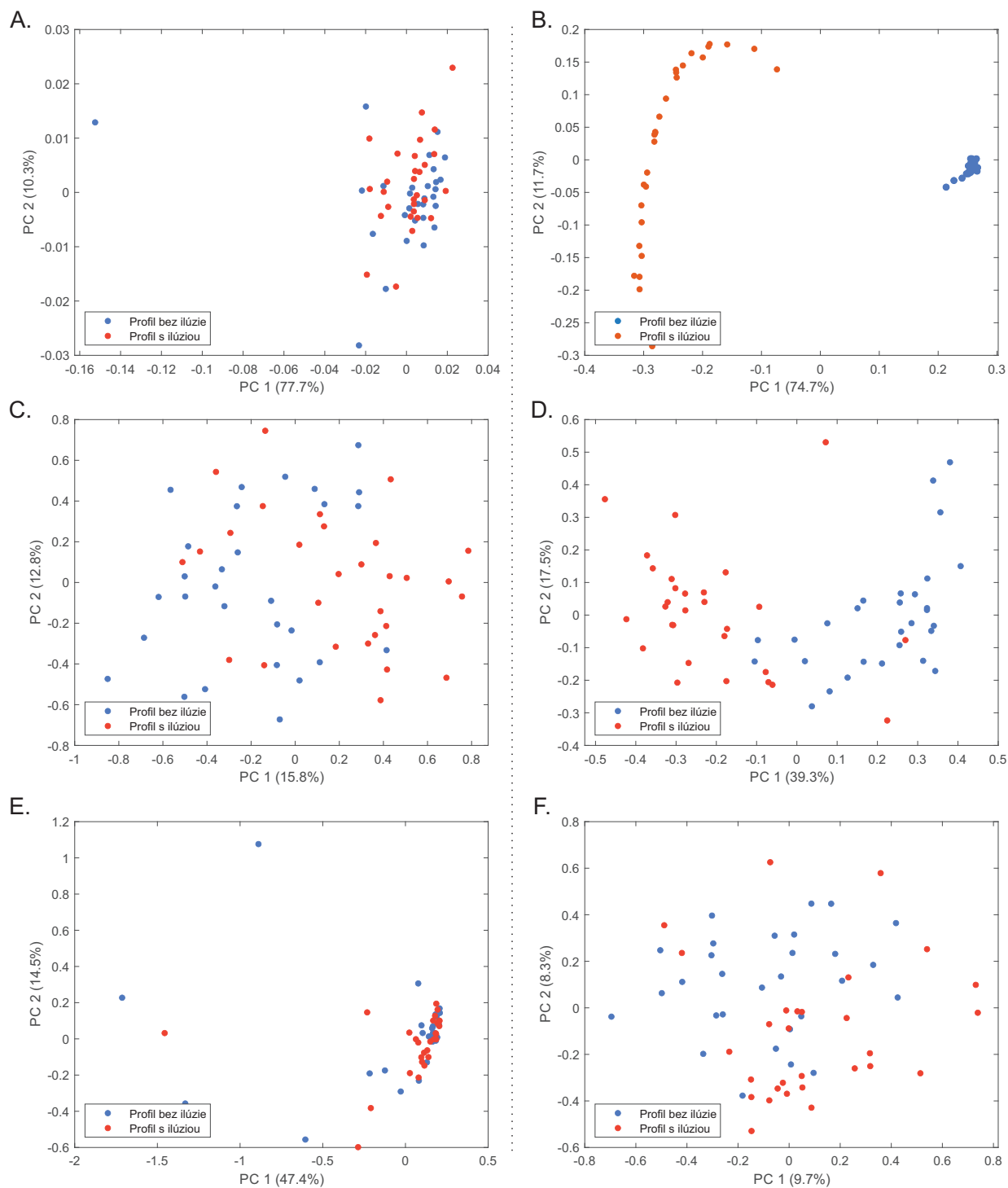
D.3 Profil 1 - Skupina 2



Obr. D.3: Výsledky PCA jednotlivých parametrov pre profil 1 - Skupina 2



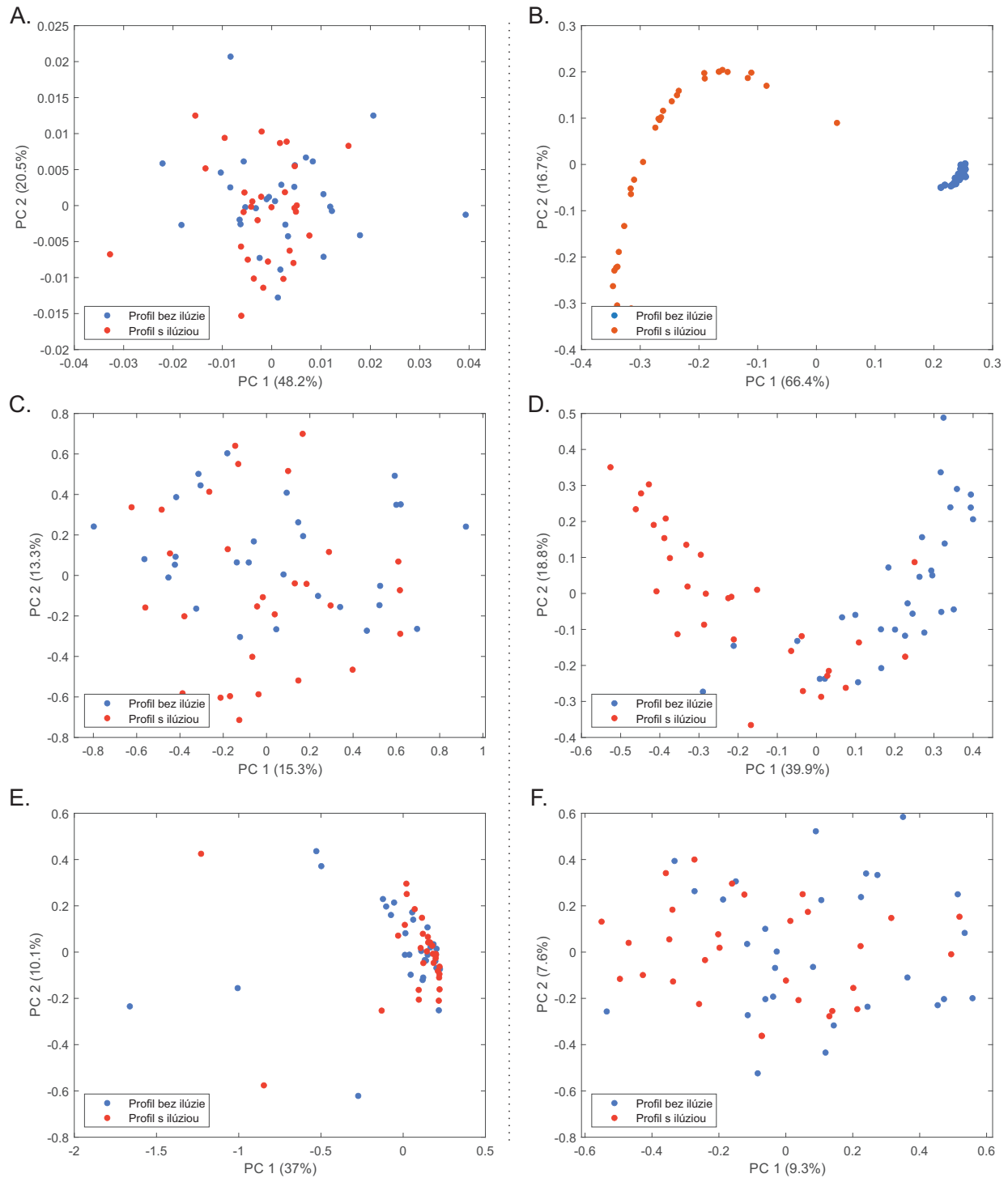
D.4 Profil 1 - Skupina 3



Obr. D.4: Výsledky PCA jednotlivých parametrov pre profil 1 - Skupina 3



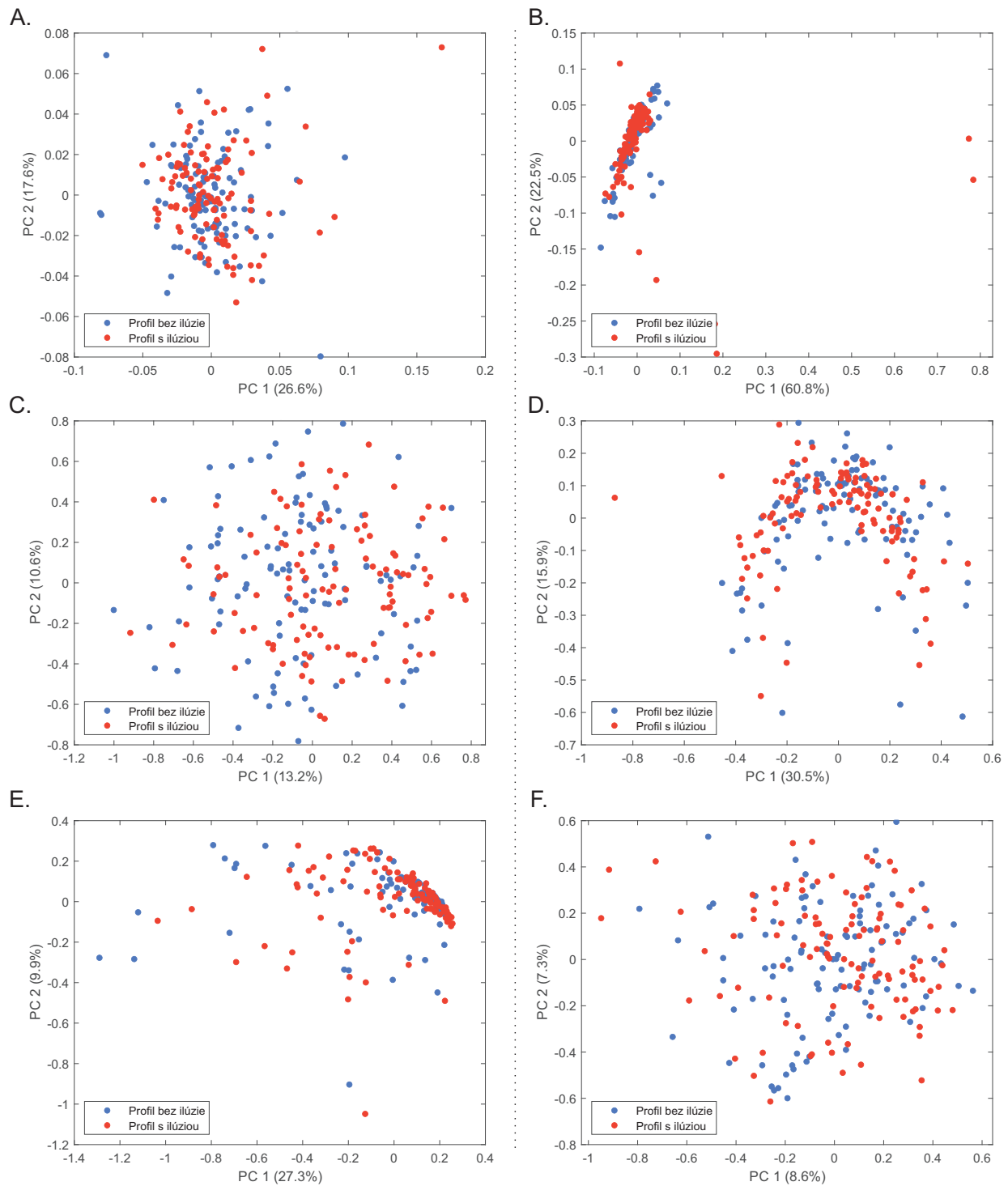
D.5 Profil 1 - Skupina 4



Obr. D.5: Výsledky PCA jednotlivých parametrov pre profil 1 - Skupina 4



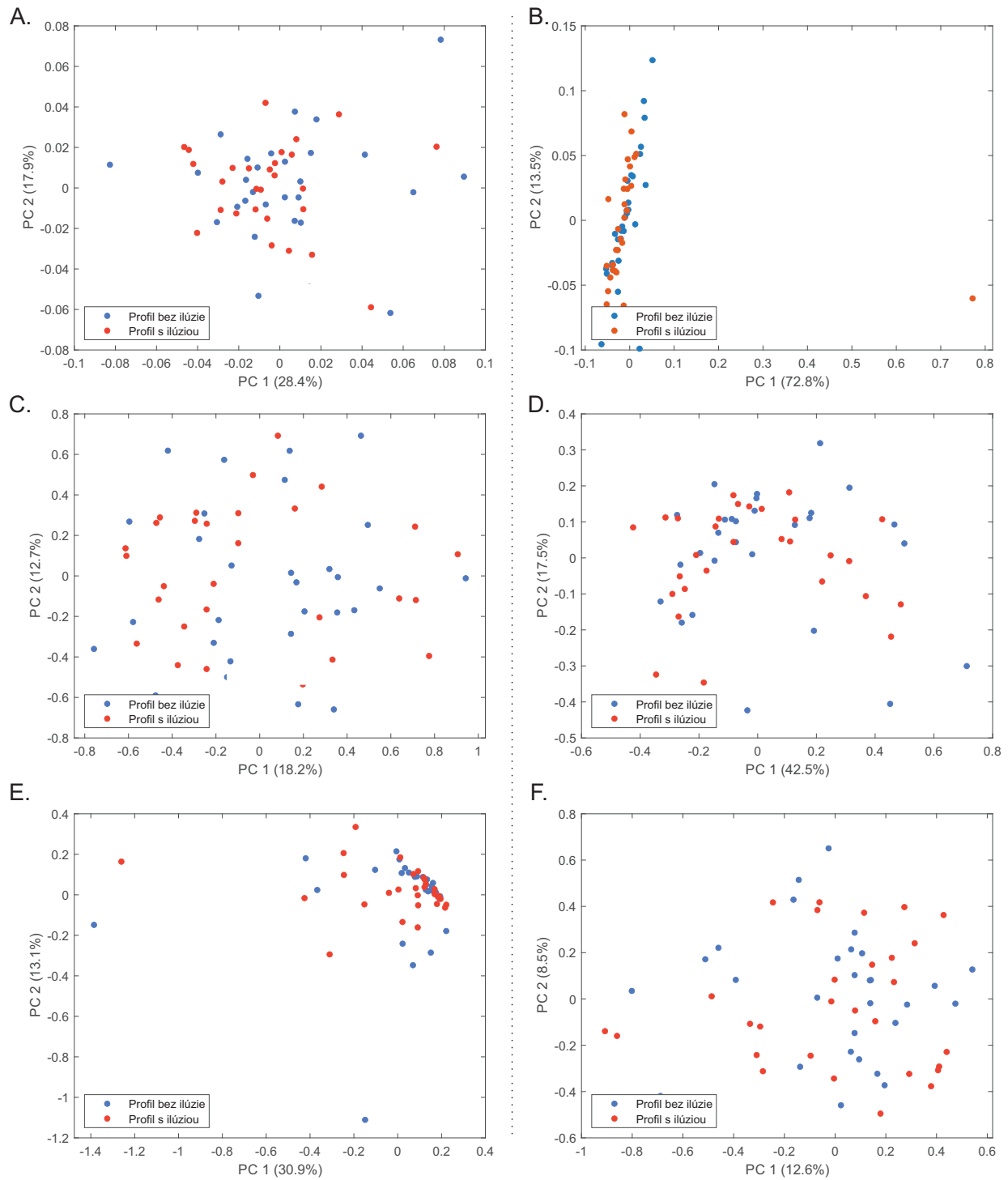
D.6 Profil 2



Obr. D.6: Výsledky PCA jednotlivých parametrov pre profil 1



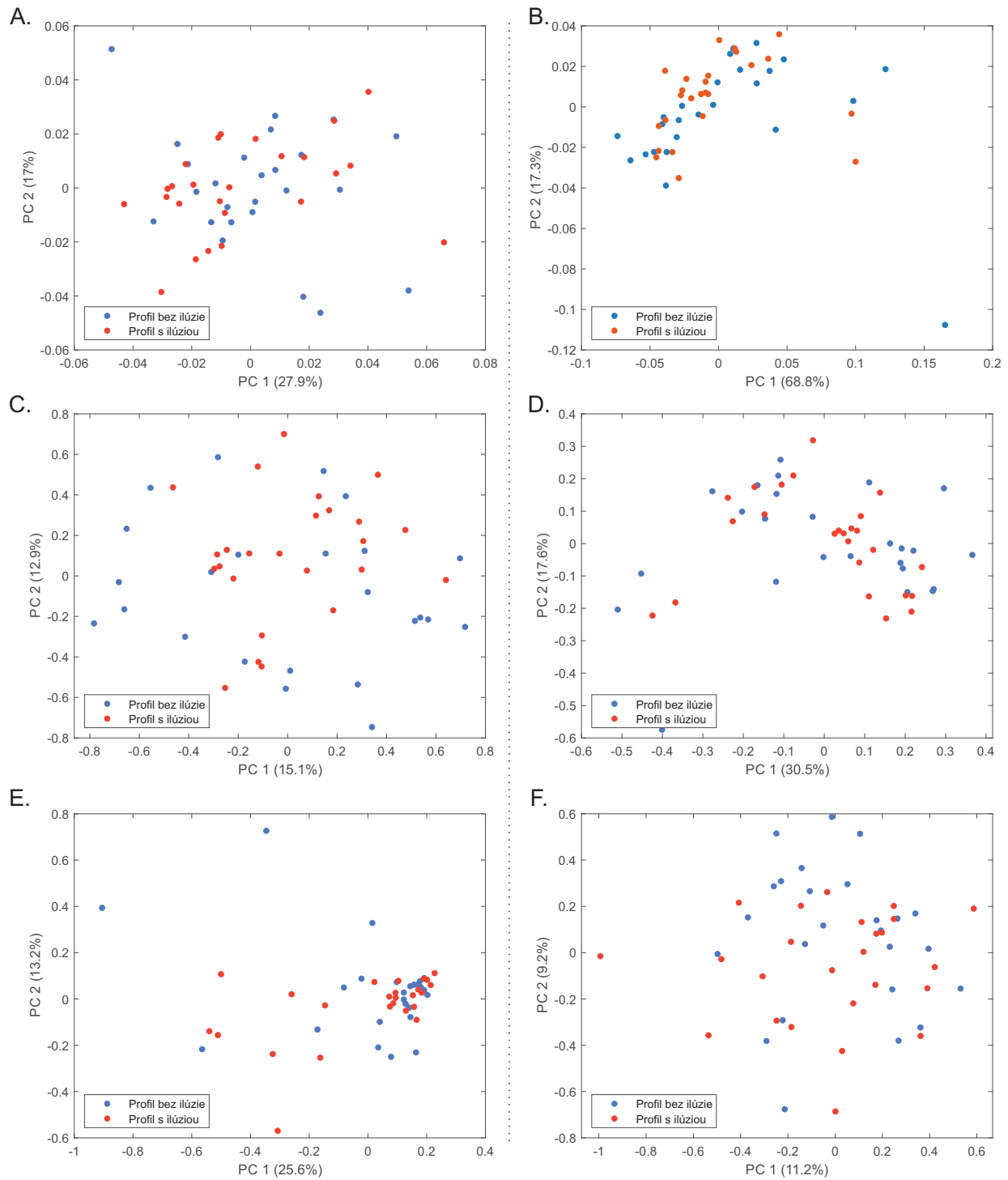
D.7 Profil 2 - Skupina 1



Obr. D.7: Výsledky PCA jednotlivých parametrov pre profil 2 - Skupina 1



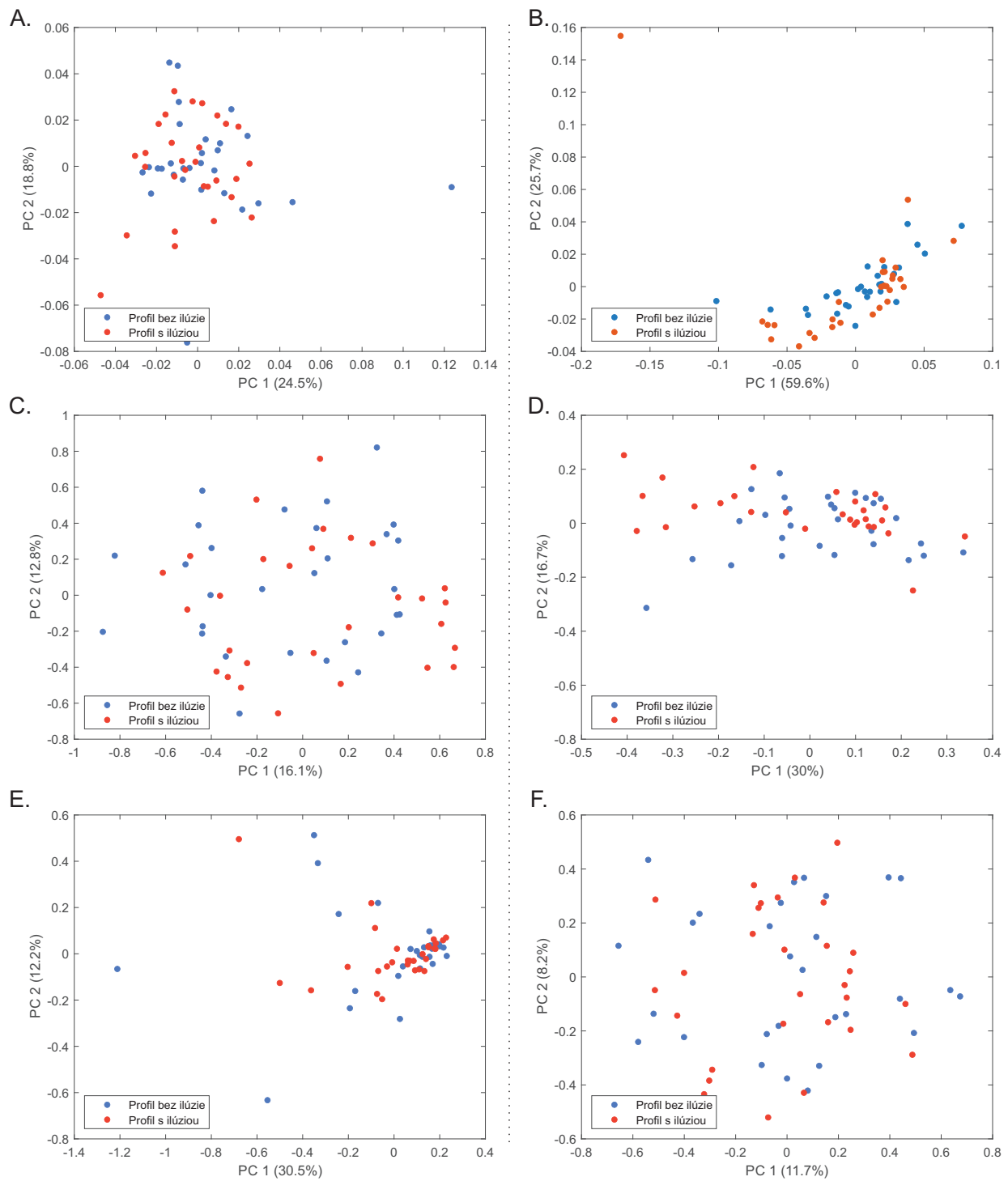
D.8 Profil 2 - Skupina 2



Obr. D.8: Výsledky PCA jednotlivých parametrov pre profil 2 - Skupina 2



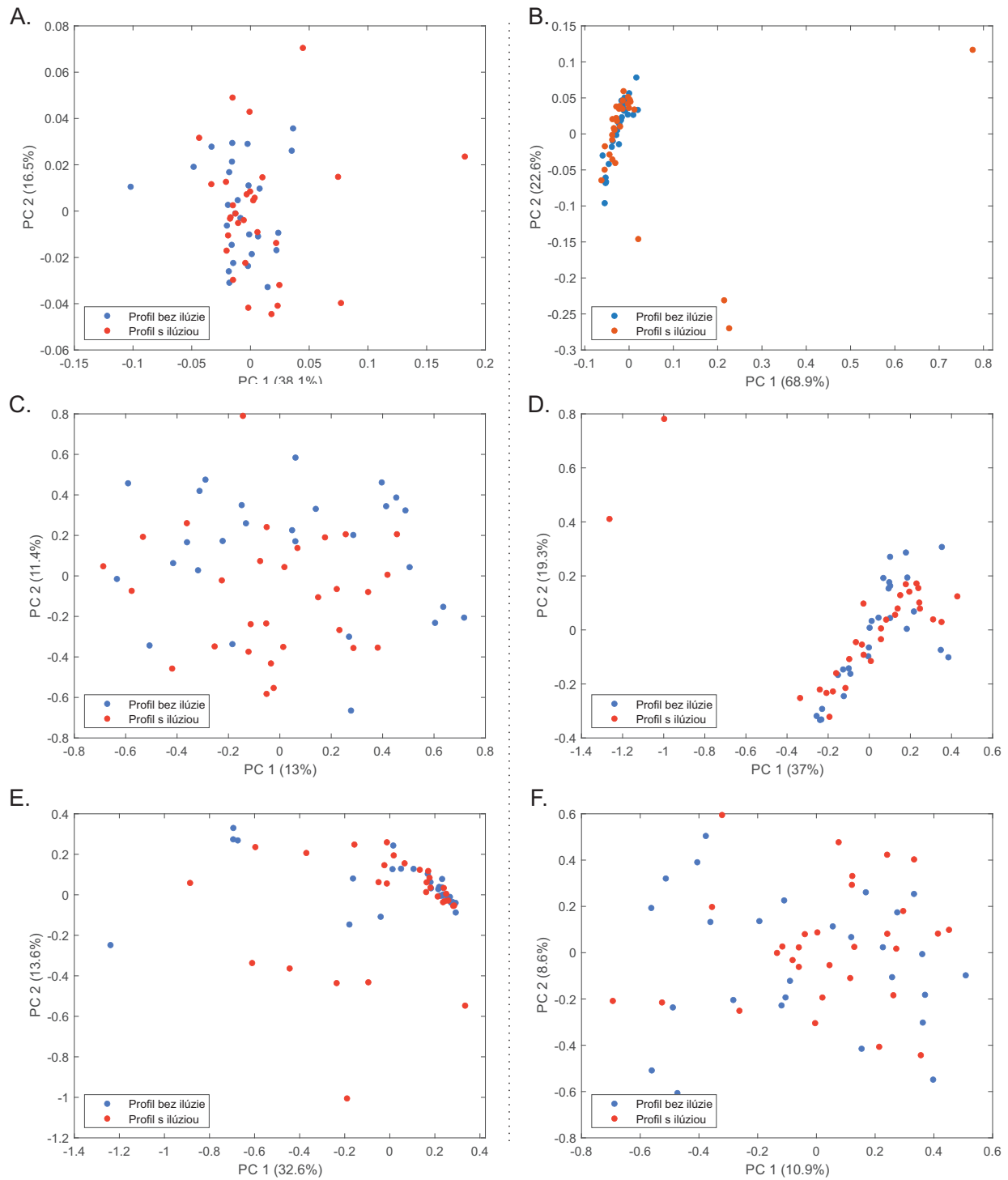
D.9 Profil 2 - Skupina 3



Obr. D.9: Výsledky PCA jednotlivých parametrov pre profil 2 - Skupina 3



D.10 Profil 2 - Skupina 4

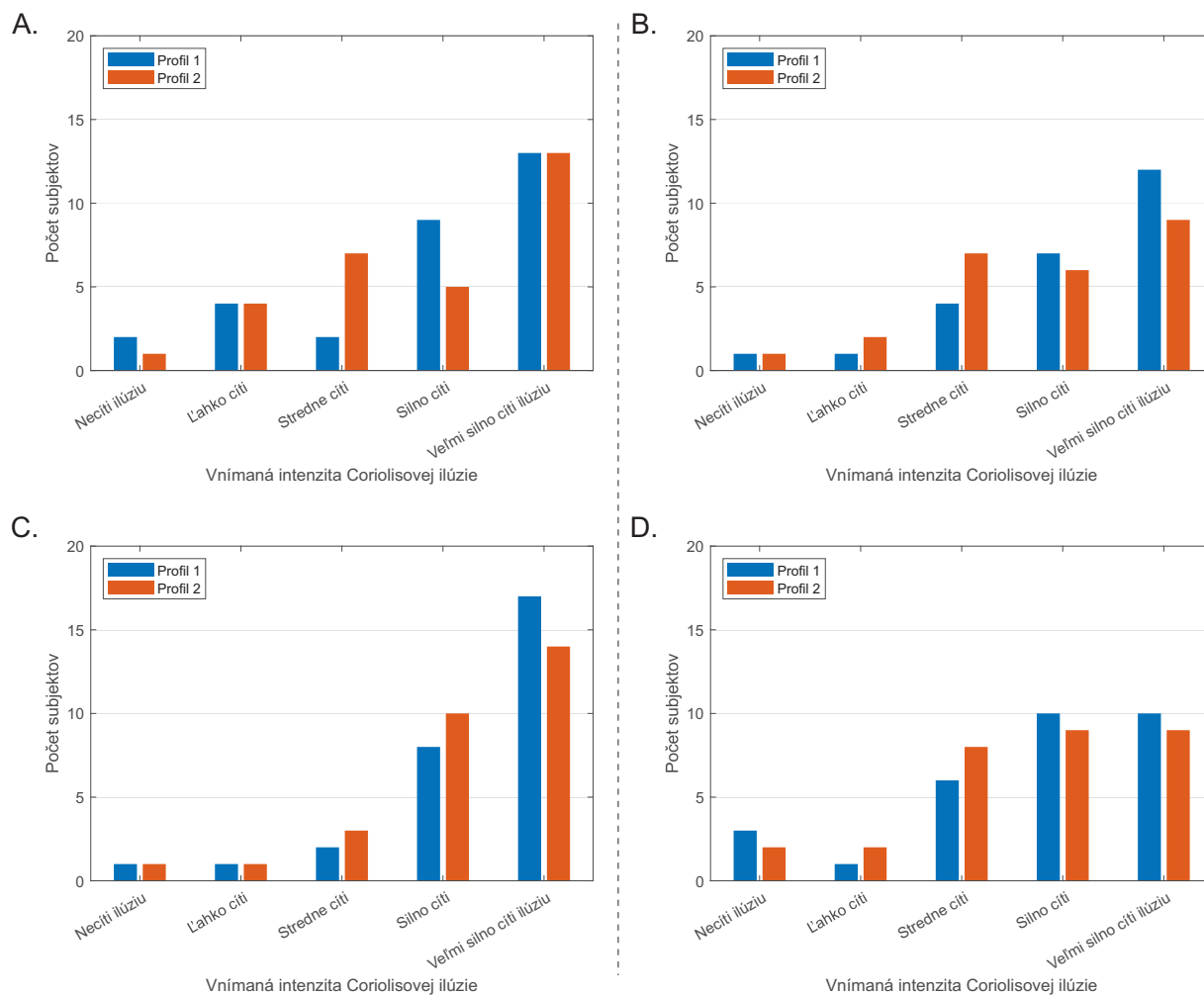


Obr. D.10: Výsledky PCA jednotlivých parametrov pre profil 2 - Skupina 4



E Výsledky ústneho dotazníku

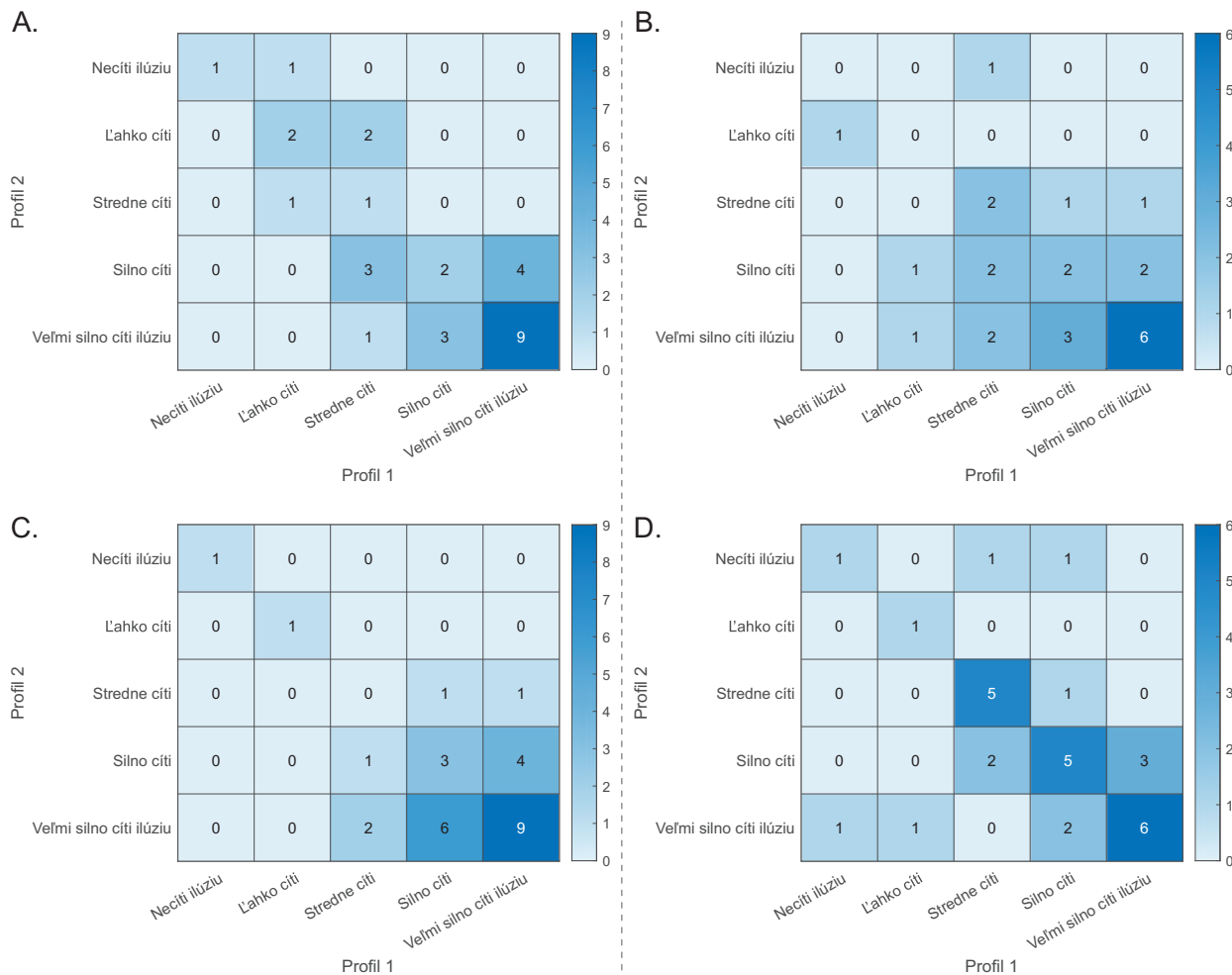
E.1 Hodnotenie intenzity Coriolisovej ilúzie v jednotlivých skupinách



Obr. E.1: Hodnotenie intenzity Coriolisovej ilúzie pre profil 1 a 2 v jednotlivých skupinách. Skupina 1 (A), Skupina 2 (B), Skupina 3 (C), Skupina 4 (D)



E.2 Teplotné mapy hodnotenia intenzity Coriolisovej ilúzie v jednotlivých skupinách



Obr. E.2: Hodnotenie intenzity Coriolisovej ilúzie pre profil 1 a 2 v jednotlivých skupinách reprezentovaných teplotnými mapami. Skupina 1 (A), Skupina 2 (B), Skupina 3 (C), Skupina 4 (D)