

LATVIJAS UNIVERSITĀTE  
FIZIKAS UN MATEMĀTIKAS FAKULTĀTE  
MATEMĀTIKAS NODAĻA

**AKUMULĒTĀ APKALPES NOGURUMA UN CITU FAKTORU  
IETEKME UZ LIDOJUMU PARAMETRU VĒRTĪBĀM**

MAĢISTRA DARBS

Autors: **Maija Ludborža**

Stud. apl. ml05012

Darba vadītājs: asoc. prof. Jānis Valeinis

RĪGA 2015

## **Anotācija**

Maģistra darbā ir raksturota lidojuma apkalpes locekļu noguruma riska aktualitāte aviācijā. Lai objektīvi novērtētu šo faktoru ietekmi uz lidojuma izpildes drošību un kvalitāti, tiek izvērtēti lidojumu datu parametru analīzes rezultāti 2013. gada AirBaltic veiktajiem reisiem. Praktiskajā daļā tiek veikta lidojumu parametru vērtību blīvuma funkciju novērtēšana, korelācijas koeficientu aprēķini starp lidojumu datu parametriem un apkalpju darba laikiem akumulētos laika periodos, kā arī korelācijas koeficientu nozīmīguma novērtēšana. Dati pārbaudīti arī izmantojot dispersiju analīzi (ANOVA) un Kruskala-Vallisa rangu dispersijas analīzi. Lidojumu notikumu analīzei pētīta ar lineārās un neparametriskās regresijas metodēm. Darbam pievienotas programmēšanas valodā R izveidotās programmas un aprēķini.

Atslēgas vārdi: noguruma riska vadības sistēma, lidojumu datu parametru analīze, korelācijas koeficienti un korelācijas nozīmīgums, dispersiju analīze, regresija

## **Abstract**

Masters thesis focuses on the topicality of aviation risks induced by flight crew member fatigue issue. To ensure objective assessment of the impact those factors might have on the quality and safety of flight operations, flight data monitoring results of AirBaltic flights performed within year 2013 were evaluated. Practical part of the paper is constituted by the flight data density distribution fitting, calculations of correlation coefficient between flight data parameters and flight crew duty times accumulated within certain time periods, as well as measurements of correlation coefficient significance. Analysis of variance (ANOVA) and nonparametric Kruskal-Wallis rank sum tests have been applied to particular data samples. Flight data event analysis has been examined by the methods of linear and nonparametric regression.

Keywords: fatigue risk monitoring system, flight data monitoring, correlation coefficients and correlation tests, analysis of variance, regression

# Saturs

<b>Apzīmējumi</b>	<b>2</b>
<b>Ievads</b>	<b>3</b>
<b>1 Lidojuma apkalpes locekļu nogurums</b>	<b>4</b>
1.1 Noguruma risks un tā vadības sistēma . . . . .	4
1.2 Zinātniskie principi noguruma pētījumos . . . . .	5
1.3 FRMS un lidojuma apkalpes darba laiks airBaltic . . . . .	6
1.4 Darba laika ierobežojumi . . . . .	7
1.5 Atpūtas laiku prasības . . . . .	8
<b>2 Lidojumu datu parametru analīze</b>	<b>9</b>
2.1 Vispārīgā informācija par FDM . . . . .	9
2.2 Lidojumu datu parametru analīzes ieguvumi . . . . .	10
2.3 Datu apstrāde . . . . .	11
<b>3 Apkalpes locekļu noguruma analīze 2013. gada datiem</b>	<b>14</b>
3.1 Izejas dati . . . . .	14
3.2 Analizētās vērtības un to sadalījumi . . . . .	16
3.3 Lidojumu analīze . . . . .	22
3.4 Notikumu analīze . . . . .	32
3.5 Notikumu analīze pēc notikuma tipa . . . . .	38
<b>Secinājumi</b>	<b>40</b>
<b>Izmantotā literatūra un avoti</b>	<b>41</b>
<b>A Izveidoto programmu kods</b>	<b>42</b>

## **Apzīmējumi**

**CPT** kapteinis,

**FDM** lidojumu datu parametru analīze,

**FDR** lidojuma datu ierakstītājs,

**FO1** otrais pilots,

**FRMS** noguruma riska vadības sistēma,

**QAR** ātrās piekļuves ierakstītājs,

**SMS** aviokompānijas drošuma vadības sistēma.

## Ievads

Akumulētā noguruma riska vadības sistēmas izveidei un īstenošanai ikdienas lidojumu procedūrās seko līdzī trīs lielas starptautiskas aviācijas organizācijas – Starptautiskā gaisa transporta asociācija (IATA), Starptautiskā civilās aviācijas aģentūra (ICAO) un Eiropas aviācijas drošības aģentūra (EASA). Tās ir izstrādājušas vadlīnijas, kurām seko aviokompānijas, lai apzinātu un mazinātu nogurumu izraisošos faktorus [1], [2]. Lai arī koncepcija nav jauna – dažādi noguruma riska vadības sistēmas punkti atsevišķās aviokompānijās ir ieviesti jau sen, tomēr līdz šim uzmanība tika pievērsta lidojumu darba stundu un atpūtas laiku ierobežojumu ievērošanai, nevis aktīvai risku samazināšanai. Šobrīd aktualizējas efektīvas noguruma riska vadības sistēmas proaktīva lietošana.

Darbā ir apskatīti nogurumu raksturojošie lielumi, to teorētiskā izpēte, iespējas objektīvi novērtēt akumulētā noguruma ietekmi uz lidojumu drošumu un izanalizēt iespējas ieviest noguruma risku samazinošas procedūras, lietojot kompānijas rīcībā jau esošus rīkus – aviokompānijas drošuma vadības sistēmas un lidojumu datu parametru analīzi [3], [4].

Pirmajā nodaļā ir aprakstīts apkalpes locekļu nogurums, zinātniskie principi noguruma pētījumos, apkalpju darba laiki un tos ierobežojošās regulas, aprakstītas pilotu obligātās atpūtas laiku prasības.

Otrā nodaļa veltīta lidojumu datu parametru analīzei – pamatnostādnes, ieguvumi, datu apstrādes process un pielietojums drošuma risku novērtēšanā.

Trešajā nodaļā ir apskatīti un analizēti akumulētā noguruma faktori lidojumu datu parametriem reāliem aviācijas datiem viena kalendārā gada ietvaros, veicot apkalpju deidentifikāciju. Sniegts teorētiskais apraksts datu analīzes metodēm – korelācijas testiem, dispersiju analīzei, parametriskajai un neparametriskajai regresijai utt. Nodaļā ir veikta teorētisko metožu pārbaude dažādu datu izlašu gadījumā – apskatot visus datus kopā vai kādu noteiktu to daļu.



tīto drošības risku nepārtrauktai monitorēšanai un pārvaldīšanai, pamatojoties uz zinātniskajiem principiem un zināšanām kā arī pieredzi, kuras mērķis ir nodrošināt, lai iesaistītais personāls pilda pienākumus adekvātā modrības līmenī.

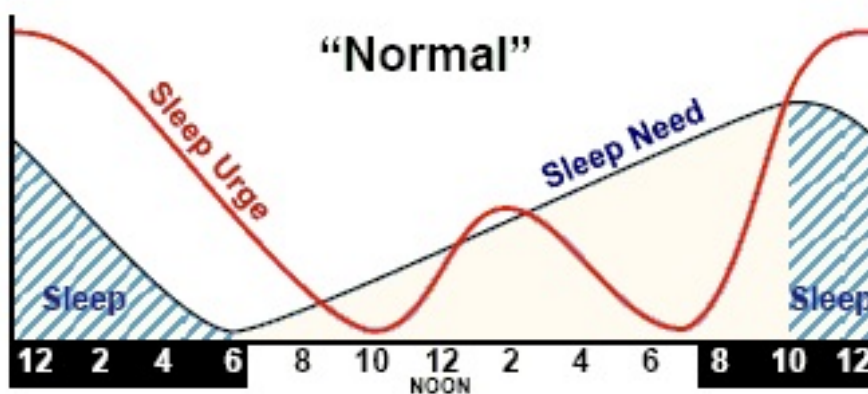
## 1.2 Zinātniskie principi noguruma pētījumos

FRMS mērķis ir uzlabot lidojumu drošību un palielināt ekspluatācijas elastīgumu. Lidojumu plānošanā nogurumu var novērtēt gan subjektīvi – apkalpes locekļi nosaka kā viņi jūtas, gan objektīvi – novērtējot apkalpes locekļu sniegumu. Cits veids kā skatīties uz nogurumu ir to uzskatīt kā stāvokli, kurš izriet no neatbilstības starp:

- fizisko un garīgo nogurumu no nomoda aktivitātēm (ne tikai darba pienākumiem);
- atgūšanos no augstāk minētā noguruma, kam nepieciešams miegs.

Tas nozīmē, ka, lai samazinātu apkalpes locekļu nogurumu, nepieciešams samazināt nespēku no nomoda aktivitātēm un/vai uzlabot miegu. Divas zinātnes jomas apraksta šos procesus [?]:

- miega zinātne – it īpaši sekas no nepietiekama miega daudzuma (vienā vai vairākās naktīs) un kā atgūties no šīm sekām;
- cirkādiskie ritmi – pētījumi par dabiskajiem ritmiem, kas izriet no ikdienas cirkādiskā bioloģiskā pulksteņa cikla. Tie iekļauj:
  1. subjektīvo noguruma un miegainības sajūtu ritmus;
  2. garīgā un fiziskā darba veiktspējas ritmus, kas ietekmē nepieciešamo piepūli, lai sasniegtu pieņemama līmeņa sniegumu (slodze);
  3. miega ritmus (spēja aizmigt un gulēt), kas ietekmē atgūšanos.



Att. 1.2: Cirkādiskais ritms vienai dienai

Pētījumi, kas ir veikti noguruma novērtēšanai, ir balstīti uz modrības faktoru analīzi – subjektīva modrības skalas atzīmēšana, psihomotorās modrības uzdevumi, miega dienasgrāmatas, fizioloģisko datu novērtējumi utt. Šajos pētījumos parasti ir nepieciešama arī lidojuma apkalpes aktīva, brīvprātīga līdzdalība, līdz ar to mērījumu daudzums ir ierobežots, turklāt tā kā daudzi uzdevumi ir individuāli novērtējami, tad rezultāti ir subjektīvi.

Šajā darbā tiks vērtēts apkalpes locekļu sniegums, par pamatu ņemot lidojumu parametru datu analīzi (FDM) laika posmā no 2013. gada 1. janvāra līdz 2013. gada 31. decembrim – tādā veidā tiks apskatīti 44'000 lidojumu, kurus veikuši 288 piloti un kuros piefiksētas 15'500 nozīmīgas vērtības.

### **1.3 FRMS un lidojuma apkalpes darba laiks airBaltic**

Visi lidojumu un darba laiki kā arī atpūtas periodi, kas definēti AS „Air Baltic Corporation” manuāļos, izstrādāti, lai uzturētu augstus lidojumu drošuma standartus un lai nodrošinātu atbilstības standartus ar [6]:

- Pantu 8(4) un apakšsadaļu Q pielikumam III regulai (EEC) Nr 3922/91;
- Regulu 505/2012, ko izdevis Ministru Kabinets;
- ES Padomes direktīvu 2000/79 / EK par drošuma uzturēšanu;
- Padomes regula 965/2012, ar ko nosaka tehniskās prasības un administratīvās procedūras attiecībā uz gaisa pārvadājumiem saskaņā ar (EK) Nr 216/2008;
- (ES) No1178/2011 (Eiropas Parlaments un Padome).

airBaltic pārvalda FRMS kā integrētu elementu kopējā aviokompānijas drošuma vadības sistēmā (SMS) un ikdienas darbu apkalpju plānošanas nodaļā.

airBaltic ir apņēmusies aizsargāt savus pasažierus, apkalpes locekļus un citas personas uz zemes vai gaisā, no riskiem, kas saistīti ar apkalpes locekļu nogurumu. Tāpēc kā FRMS mērķi lidojuma drošībai ir uzstādīti:

- neviena incidenta vai negadījuma, kam cēlonis ir apkalpes nogurums;
- neviena plānota lidojuma darba laika pārsnieguma (virs 1h);
- neviena plānota atpūtas laika trūkuma (virs 1h).

Apkalpju darba laiki tiek plānoti balsoties uz darba un atpūtas laiku ierobežojumiem, apkalpes sastāva prasībām, īpašiem galamērķiem un FRMS principiem.

## 1.4 Darba laika ierobežojumi

Aviācijā izšķir divas darba laika skaitīšanas sistēmas un katrai no tām ir jāiekļaujas ar likumu apstiprinātos noteikumos.

Pirmais ir lidojuma darba laiks (FDP) – laiks, kurā persona darbojas lidmašīnā kā tās apkalpes loceklis. FDP sākas, kad AirBaltic ir pieprasījis apkalpes loceklim pieteikties lidojumam vai lidojumu sērijai. Tas beidzas, kad ir nolidots pēdējais lidojums, kurā persona darbojas kā apkalpes loceklis.

Otrs ir blokstundas (BH) – laiks no lidmašīnas kustības uzsākšanas stāvvietā ar mērķi pacelties gaisā, līdz brīdim, kad tā ir novietota noteiktā stāvvietā, un visi dzinēji vai propelleri ir izslēgti.

Maksimālais pamata dienas lidojuma darba periods (FDP) ir 13 stundas. Noteiktās 13 stundas tiek samazinātas par 30 minūtēm katram nolidotajam sektoram, sākot ar trešo sektoru un ar maksimālo samazinājumu divas stundas (skatīt tabulu 1.1).

Tabula 1.1: Maksimālais dienas lidojumu darba laiks

Maksimālais dienas darba laiks (hh:mm)	Nosēšanos skaits
13:00	0 - 2
12:30	3
12:00	4
11:30	5
11:00	6 vai vairāk

Maksimālais pamata dienas FDP var tikt pagarināts piemērojot: plānoto pagarināšanu, pagarināto FDP (dalītais darba laiks), FDP pagarināšanu dēļ atpūtas lidojumā, pēc lidojuma kapteiņa ieskatiem neparedzētos gadījumos.

Tālāk ir nedefinēti akumulēto darba stundu un akumulēto blokstundu ierobežojumi, lai nodrošinātu, ka apkalpju locekļi ir aizsargāti no noguruma palielinājuma dažādos laika periodos: jebkurās 7 secīgās dienās, jebkurās 28 secīgās dienās un viena kalendārā gada ietvaros. Tā kā visi trīs šie periodi tiek monitorēti katru dienu, tad tie nodrošina nepārtrauktu apkalpes locekļu iespējamā noguruma mazināšanu.

Kopējais darba laika periods, uz kuru apkalpes loceklis ir norīkots, nepārsniedz:

- 60 darba stundas jebkurās 7 secīgās dienās;
- 190 darba stundas jebkurās 28 secīgās dienās;

- 2000 darba stundas vienā kalendārajā gadā.

Kopējais blokstundu skaits, uz kuru apkalpes loceklis ir norīkots kā strādājošs apkalpes loceklis, nepārsniedz:

- 100 blokstundas jebkurās 28 secīgās dienās;
- 900 blokstundas vienā kalendārajā gadā.

## 1.5 Atpūtas laiku prasības

No lidojuma drošuma perspektīvas, minimālie ierobežojumi ir nepieciešami, lai nodrošinātu, ka apkalpes locekļi nākamā lidojuma darba laikā ir spējīgi veikt savus pienākumus esot modriem.

- Minimālajam atpūtas laikam, kas ir jānodrošina pirms lidojuma darba perioda uzsākšanas no mājas stacijas, ir jābūt vismaz tikpat garam kā iepriekšējam darba periodam vai 12 stundas, izvēloties lielāko.
- Minimālajam atpūtas laikam, kas ir jānodrošina pirms lidojuma darba perioda uzsākšanas ārpus mājas stacijas (Rīgas), ir jābūt vismaz tikpat garam kā iepriekšējam darba periodam vai 10 stundas, izvēloties lielāko; kad apskata minimālo atpūtas laiku ārpus Rīgas, apkalpes loceklim ir jāpieļauj 8 stundu miega iespējamību, ņemot vērā ceļošanu un citas fizioloģiskās vajadzības.

Tāpat ir jānodrošina, ka plānoto atpūtas minimumu, kas aprakstīts iepriekš, periodiski palielina līdz nedēļas atpūtas periodam, kas ir 36 stundas, ieskaitot divas naktis Rīgā, tā, lai starp vienas nedēļas beigām un nākošās sākumu nekad nebūtu vairāk kā 168 stundas. Otrā no Rīgā pavadītajām naktīm var sākties pulksten 20:00, ja nedēļas atpūtas perioda ilgums ir vismaz 40 stundas.

Papildus ikgadējam atvaļinājumam, apkalpes locekļiem lidojumu grafikos ir jābūt ielānotām sekojošām dienām brīvām no jebkādiem pienākumiem:

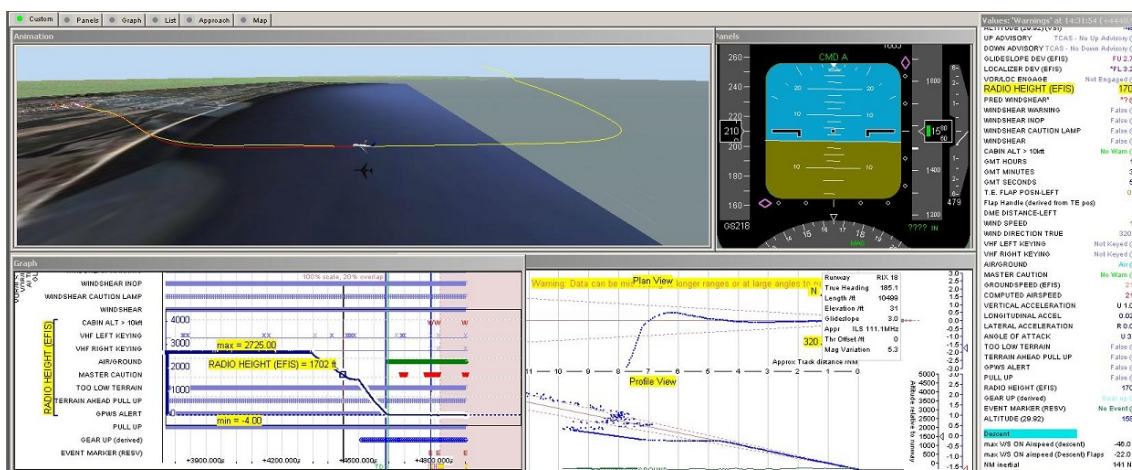
- ne mazāk kā 7 dienas (vietējais laiks) katru kalendāro mēnesi;
- ne mazāk kā 96 dienas (vietējais laiks) katru kalendāro gadu;
- no pienākumiem brīvo dienu skaits tiek aprēķināts proporcionāli darba dienu skaitam attiecīgajā mēnesī.

# 2 Lidojumu datu parametru analīze

## 2.1 Vispārīgā informācija par FDM

Lidojumu datu analīze (FDM) ir process, kurā ikdienā saglabā un analizē lidojuma datu ierakstītāja (FDR) datus, ar mērķi uzlabot lidojumu drošumu [7].

Aviācijas industrija visu laiku strādā pie arvien lielāka lidojumu drošuma uzlabojuma. Lidojumu parametru analīze ir efektīvs ikdienas rīks šai problēmai. Lidojumu parametru analīze zināmā mērā ir kvalitātes nodrošināšanas process, bet tajā pašā laikā ir arī būtiska lidojumu drošuma pārvaldes daļa. FDM process ietver regulāru ikdienas lidojuma datu ierakstītāja datu leju-pielādi un analīzi, kuru plaši izmanto gaisa kuģu operatori visā pasaulē, lai informētu apkalpes par rezultātiem un veicinātu koriģējošus pasākumus vairākās darbības jomās. FDM nodrošina spēju izsekot un novērtēt lidojumu veikšanas tendences, identificēt riskus, kā arī ļauj veikt koriģējošus darbības. FDM potenciāls būtiski pieaug palielinoties ierakstīto datu parametru skaitam un frekvencei, ko izmantojot digitālās ierakstīšanas iespējas veic gaisa kuģī.



Att. 2.1: FDM nolasīšanas iespējas (animācija, karte, grafiks, saraksts)

FDM datu ierakstīšana un analīze pakļaujas vairākiem ierobežojumiem un rekomendācijām:

- Gaisa kuģu operatoram, kura lidmašīnu maksimālā sertificētā pacelšanās masa ir virs

27'000 kg, ir jāizveido un jāuztur lidojumu datu analīzes programma kā daļa no drošuma pārvaldes sistēmas. (Gaisa kuģu operators var nodot FDM programmas izpildi citām personām, saglabājot vispārējo atbildību par šīs programmas uzturēšanu.)

- FDM programmai ir jābūt neresesīvai un jāiekļauj pienācīgi drošības pasākumi datu avotu aizsargāšanai.

## **2.2 Lidojumu datu parametru analīzes ieguvumi**

FDM veicina paaugstinātu lidojumu drošumu un darbības efektivitāti:

- nodrošinot datus, lai palīdzētu novērst incidentus un negadījumus. Mazāks lidojumu negadījumu skaits ne tikai būtiski samazina materiālos zaudējumus un apdrošināšanas izmaksas, bet arī saglabā augstu pasažieru uzticību.
- uzlabo lidojumu operatīvo izpratni, nodrošinot līdzekļus, lai identificētu potenciālus riskus un atbilstoši veiktu izmaiņas pilotu apmācību programmās.
- uzlabo degvielas patēriņu – FDM ļauj identificēt un veikt korekcijas lidojumu procedūrās vai konkrētam gaisa kuģim ar neparasti augstu degvielas patēriņu.
- samazina nevajadzīgu tehnisko apkopju un remontu skaitu, samazinot gaisa kuģa uzturēšanas izmaksas un palielinot gaisa kuģa pieejamību.
- uzlabo apstākļus uz zemes un lidostās – noteiktos gadījumos aviosabiedrības var izmantot no FDM iegūtos datus, lai pamatotu grozījumu pieprasījumus gaisa satiksmes kontrolei vai lidostu procedūrās.
- samazina lidojumu datu ierakstītāju izmantošanu – FDM datu ir iespējams pārraidīt automatiski pa internetu un analizēt nekavējoties.
- uzlabo trokšņu ierobežojumu ievērošanu – FDM palīdz aviokompānijām pierādīt trokšņu ierobežojumu ievērošanu, ja faktiski pārkāpumi nav notikuši, tā izvairoties no naudas sodiem.
- kalpo kā spēcīgs instruments, proaktīvā risku identifikācijā.

## 2.3 Datu apstrāde

FDM ir piemērojama visai airBaltic flotei.

Datu izvade tiek ģenerēta uz ātrās piekļuves ierakstītāju (QAR), kas atrodas tehniskās apkopes personālam viegli pieejamā vietā. Ierakstītājam ir noņemama atmiņas karte, kurā visa nepieciešamā informācija tiek ierakstīta. Lidojumu dati, kas nāk no QAR vai FDR ir kodēti, izmantojot īpašu formātu (*frame layout*). Datu ierakstītājs saglabā visus lidojumus starp kartiņu nomaiņu vienā failā. *Replay* procesa laikā lidojumu dati tiek kopēti uz FDM sistēmu (airBaltic lieto Aerobytes FDM programmatūru), tad notiek datu atšifrēšana un „sadalīšana” atsevišķos lidojumos. *Replay* precesu automātiski veic Aerobytes FDM sistēma.

Kartes no QAR ar datiem airBaltic tiek noņemtas ik pēc 3 dienām, to veic tehniskais personāls.

Pēc *replay* procesa notiek datu analīze, kura laikā programma katram lidojumam meklē iepriekš definētus lidojuma posmus un vērtības šajos posmos. 2.2 attēls parāda datu plūsmu FDM sistēmā.

Mērķis ir izanalizēt 100% no visiem airBaltic lidojumiem, bet 98% datu analīze ir uzskatāma par pieņemamu (2013. gadam tika izanalizēti 99.2% lidojumu).

Dati tiek konvertēti uz tehniskām vienībām un tiem pārbauda noteiktu notikumu klātbūtni, piemēram vēlū aizplākšņu izlaišanu, pārmērīgu vertikālo ātrumu utt. Datus analizē automātiski, bet pieredzējis analītiķis pēc tam pārbauda notikumus manuāli, lai novērstu nepatiesu vērtību saglabāšanu. Sistēma ir tā veidota, ka jebkuru brīvo laiku izmanto, lai pāranalizētu tos lidojumus, kas tika analizēti ar tādām definīcijām, kuras vēlāk tika atjauninātas vai mainītas.

Dati tiek pārbaudīti atbilstoši FDM analīzes aprakstam, kas ietver lidojumu parametru sliekšņus. **Notikumi** izceļ tās lidojuma daļas, kurām ir jāpievērš uzmanība un kurām ir piešķirta nozīmīguma vērtība. Šis nozīmīgums tiek rēķināts automātiski un ir robežās no 0 līdz 100%, kur:

0 - 24% - rutīna – var ignorēt;

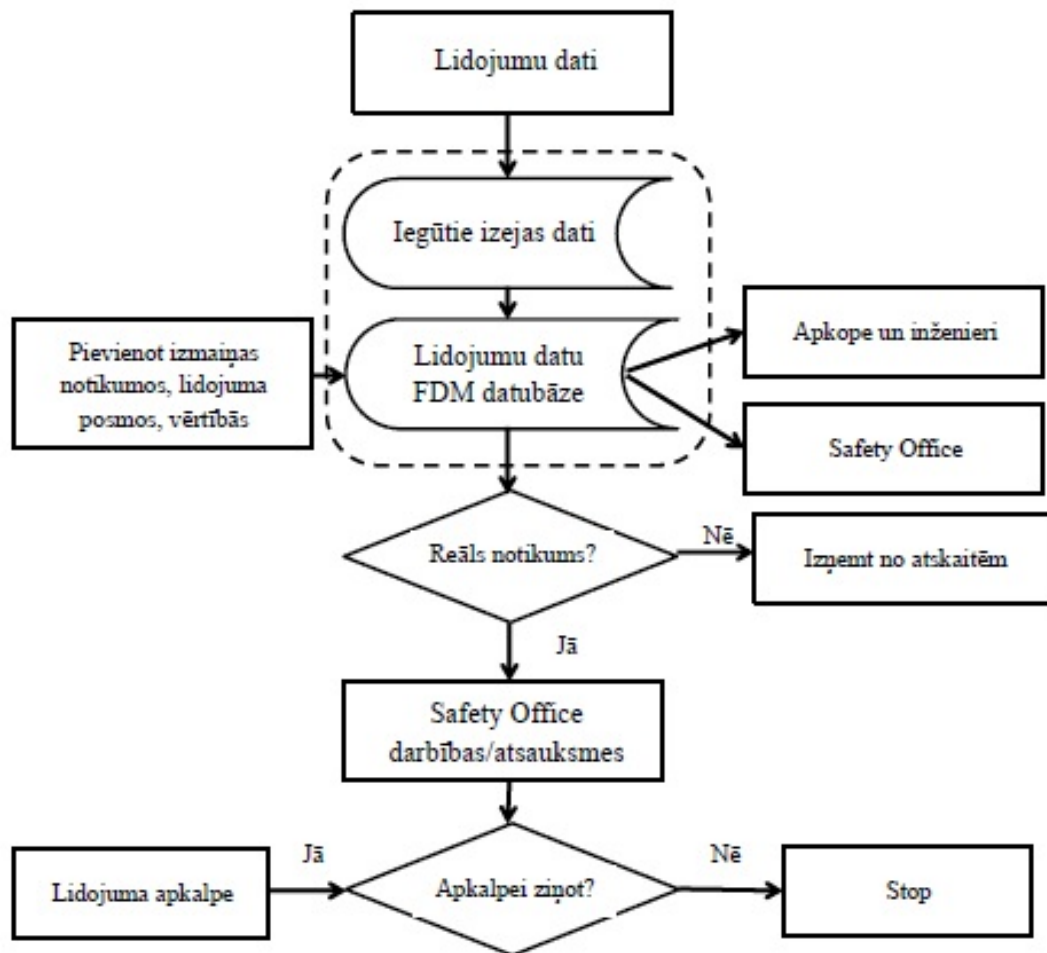
25 - 49% - mazsvarīgs (minor) – interesē, bet nav reāla riska;

50 – 74% - vidējs (major) – nozīmīgs standartu pārkāpums un risku jānovērtē;

75 - 100% - kritisks (critical) – nopietns standartu pārkāpums un ir jāizmeklē.

Validētos notikumus nodod flotes drošuma oficiēriem.

Dati tiek vākti tendenču analīzei un statistikai, lai parādītu lidojumu organizācijas darbību. Tāpēc informācija tiek vākta ne tikai par nopietniem pārkāpumiem, bet arī par vērtībām, kas tikai norāda uz iespējamu notikumu sliekšņu sasniegšanu.



Att. 2.2: FDM datu apstrādes cikls

FDM datus izmanto ikdienas obligāti ziņojamo atgadījumu un tehnisko notikumu pārbaudes procesa daļu. Ar FDM datiem papildina lidojuma apkalpju ziņojumus, papildinot viņu iespaidus un situācijas aprakstus ar ierakstītajām vērtībām.

Ja ir noticis nelaimes gadījums vai incidents, atbilstošs menedžmenta personāls var pieprasīt tūlītēju datu lejupielādi. Inženieru nodaļa var pieprasīt tūlītēju datu lejupielādi, ja ir aizdomas par notikumiem, kas saistīti ar lidmašīnas obligāto tehnisko apkopi (piemēram, motora pārkaršana pie tā palaišanas, stingra nolaišanās, u.c.).

Visa savāktā informācija tiek glabāta airBaltic Aerobytes datu bāzē, kas ļauj pārbaudīt un novērtēt datus ilgam laika periodam. Tas kopā ar lidojumu drošuma un reisa ziņojumiem sniedz pilnīgu priekšstatu par lidojumu izpildi.

Darbā ir apskatīti 106 no 205 airBaltic definētiem notikumiem. Iemesli šādai notikumu atlasei ir to sastopamība un piederība pie apkalpes ietekmes uz notikumu (laikapstākļu, īpaši vēja komponentu ietekme uz lidojumu, dzinēju parametru ierobežojumu pārsniegšana utt. tiek

vērtēti kā ārējie faktori). Papildus vēl ir apskatītas trīs vērtības pilnīgi visiem lidojumiem – vertikālais paātrinājums nosēšanās brīdī un maksimālais un minimālais leņķis pret horizontālo asi nosēšanās brīdī.

# 3 Apklapes locekļu noguruma analīze

## 2013. gada datiem

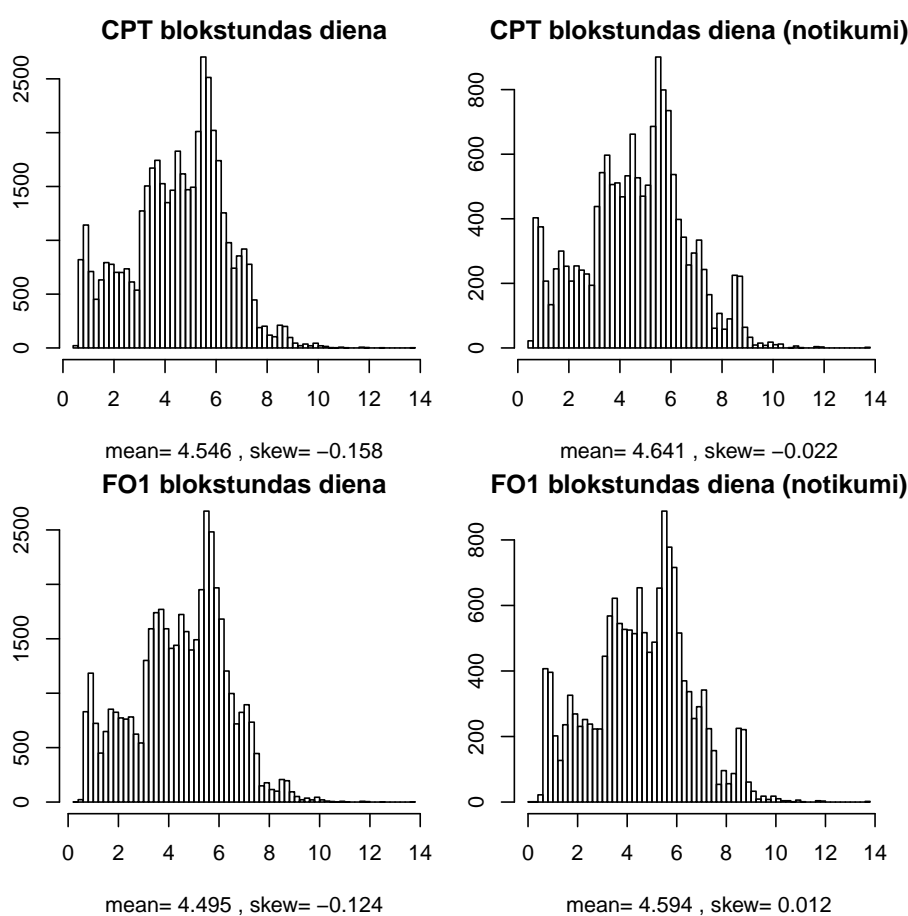
### 3.1 Izejas dati

Darbā apskatīta notikumu nozīmīguma pakāpe un notikumu sadalījums atkarībā no apkalpes blokstundām un kopējām darba stundām aviācijas noteikumu apstiprinātajos starp-periodos (viena diena, 7 dienas, 28 dienas) un 1 līdz 27 dienu nostrādāto kopējo laiku, skatot atsevišķi katra no lidojuma apkalpes locekļu lidojumu plāniem (kapteinis un otrs pilots) - skatīt 3.1 tabulu.

Tabula 3.1: Apkalpju darba laiks

Kapteiņa (CPT) darba stundas	Otrā pilota (FO1) darba stundas
Blokstundas konkrētajā dienā	Blokstundas konkrētajā dienā
Lidojuma darba stundas konkrētajā dienā	Lidojuma darba stundas konkrētajā dienā
Lidojuma darba stundas 7 dienās	Lidojuma darba stundas 7 dienās
Blokstundas 28 dienām	Blokstundas 28 dienām
Lidojuma darba stundas 28 dienās	Lidojuma darba stundas 28 dienās
Kapteiņa (CPT) blokstundas	Otrā pilota (FO1) blokstundas
Blokstundas 1 iepriekšējā dienā	Blokstundas 1 iepriekšējā dienā
...	...
Blokstundas 27 iepriekšējās dienās	Blokstundas 27 iepriekšējās dienās
Kapteiņa (CPT) lidojuma darba stundas	Otrā pilota (FO1) lidojuma darba stundas
Lidojuma darba stundas 1 iepriekšējā dienā	Lidojuma darba stundas 1 iepriekšējā dienā
...	...
Lidojuma darba stundas 27 iepriekš. dienās	Lidojuma darba stundas 27 iepriekš. dienās

Papildus darba laikam, kā nogurumu ietekmējoši faktori ir izvērtēti lidojumu skaits vienā darba dienā un lidojumi pēc nakšņošanas ārpus Rīgas. 2013. gada datiem maksimālais lidojumu skaits vienā darba dienā bija 10, bet parasti tomēr vienas darba dienas ietvaros apkalpei plāno 2 vai 4 lidojumus. Tāpat ir ar nakšņošanu ārpus Rīgas – 2013. gadā 10% no visiem plānotajiem darba laikiem bija iekļauta nakšņošana ārpus Rīgas un atgriešanās nākošajā rītā. 2015. gada sezonai kā vēlams plānošanas nosacījums ir apkalpei veikt tikai vienu lidojumu pēc nakšņošanas ārpus Rīgas (atgriešanās lidojums Rīgā kā vienīgais pēc pārtraukuma tajā darba periodā), bet 2013. gada datiem bija situācijas, kad pēc atgriešanās Rīgā apkalpe lidoja vēl 1 vai 2 lidojumus tajā pašā darba periodā (627 reizes pēc nakšņošanās ārpus Rīgas maksimālais lidojumu skaits bija 3).



Att. 3.1: Blokstundu histogramma kapteiņā (CPT) un otrā pilota (FO1) darba dienai. Datu apjoms lidojumiem ir 43'886 (pa kreisi) un datu apjoms notikumiem, kas lidojumos ir piefiksēti ir 15'464

Kā var redzēt no personāla blokstundu histogrammām konkrētajai darba dienai (3.1 attēlā), tad atšķirības starp lidojuma kapteiņu un otro pilotu sarakstiem ir ļoti nelielas vienas dienas ietvaros. Pamatā tam ir tas, ka lielākoties (līdz 95% gadījumu) dienas saraksta ietvaros apkalpes

locekļi nemainās – abi veic vienādu lidojumu skaitu. Apskatot histogrammas par jau atrastiem notikumiem atlasītiem lidojumu stundu skaitiem, redzam, ka dati ir mazliet novirzīti pa kreisi (pie lielāka dienas blokstundu skaita iespēja lidojumā piedzīvot notikumu pieaug), tomēr atšķirības ir ļoti mazas, tāpēc varam secināt, ka darbosimies ar nelielām vērtībām. Līdzīgi rezultāti tiek iegūti arī izvēloties 7 dienu, 28 dienu vai kādu no starprezultātu nosacījumiem.

## 3.2 Analizētās vērtības un to sadalījumi

Tālāk apskatām vērtības, kas tiek saglabātas katram lidojumam, vertikālais paātrinājums, maksimālais un minimālais leņķis pret horizontālo asi nosēšanās brīdī.

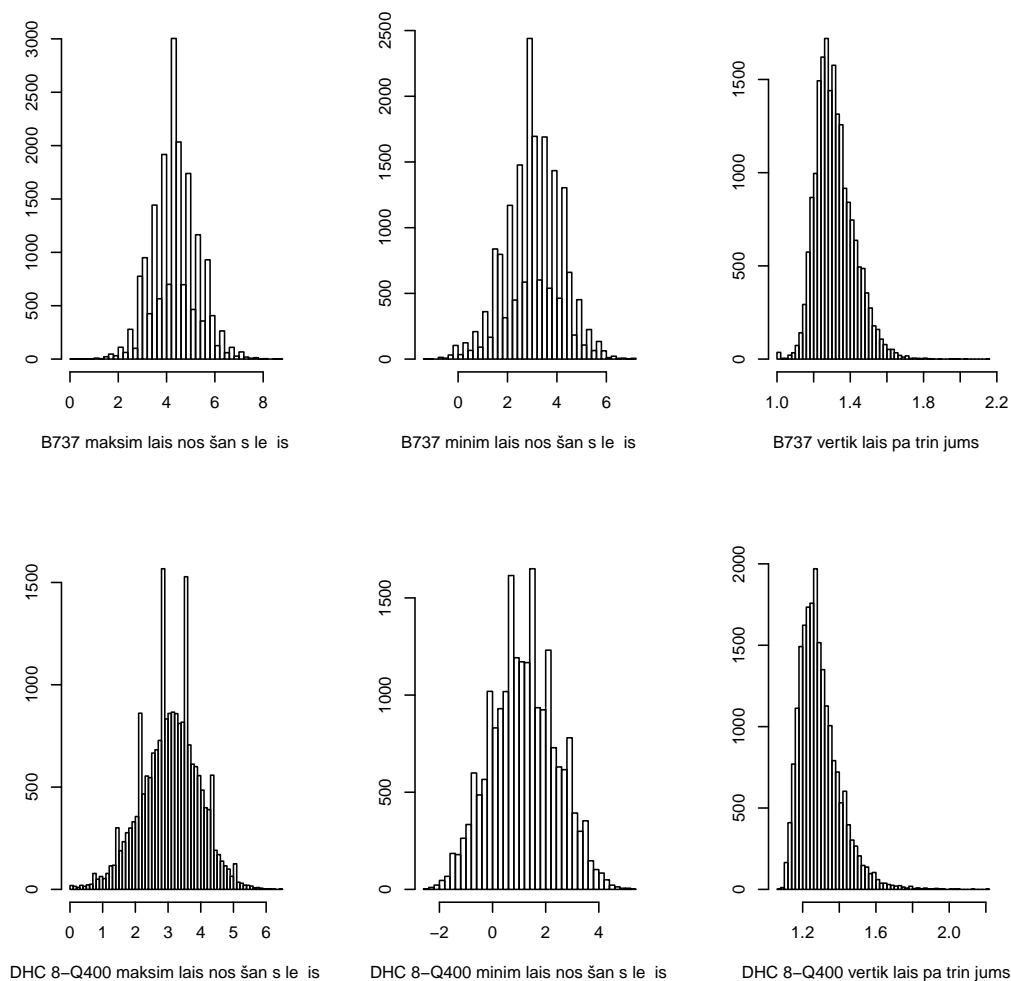
**Vertikālais paātrinājums nosēšanās brīdī** ir parametrs, kurš raksturo asu nosēšanos (*hard landing*). Šāda nosēšanās parasti notiek, kad kontakts ar zemi lidmašīnai notiek ar lielāku vertikālo ātrumu vai lielāku spēku kā tas ir pieņemts normālā situācijā. Paaugstināts vertikālais paātrinājums var būt atkarīgs arī no laikapstākļiem, tehniskiem defektiem, liela svara. Tomēr primāri to ietekmē tieši apkalpes darbības - šajās situācijās pilotam joprojām ir pilnīga kontrole pār lidmašīnu un lēmumu nosēsties vai veikt atkārtotu tuvošanos lidlaukam un nolaišanos (*go-around*) izlemj apkalpe. Asas nosēšanās variē to smaguma pakāpē no neliela diskomforta pasažieriem līdz situācijām, kad lidmašīnai ir radušies nopietni bojājumi, pasažieri gūst savainojumus vai pat zaudē dzīvību. Ja FDM dati apstiprina pārāk lielu vertikālo paātrinājumu nosēšanās brīdī, lidmašīnai veic tehnisko inspekciju pirms tā var atsākt turpmāko lidošanu.

Vertikālā paātrinājuma mērvienība aviācijā ir  $g$  nevis  $m/s^2$ , tā izceļot tās saistību ar paātrinājumu attiecībā pret brīvo kritienu pretēji parastajai paātrinājuma definīcijai. Viens  $g$  atbilst gravitācijas paātrinājumam pie zemes virsmas un atbilst standarta gravitācijai ( $g_n = 9.80665m/s^2$ ). Vertikālo paātrinājumu mēra ar akselerometru. Parasti vertikālais paātrinājums nosēšanās brīdī ir virs  $1 g$ . Dažādiem lidmašīnu tipiēm ir atšķirīgs sliekšnis, no kura asas nosēšanās notikums tiek vērtēts kā kritisks un lidaparātam ir nepieciešama tehniskā inspekcija. Šo sliekšni nosaka lidmašīnas ražotājs. Piemēram, AirBaltic flotes B737 lidaparātiem limits ir  $2.1 g$ , kamēr DHC 8-Q400 lidaparātiem tas ir  $2.2 g$ .

**Maksimālo un minimālo leņķi pret horizontālo asi nosēšanās brīdī** (nosēšanās leņķis) arī iekļaujam kā individuālus parametrus papildus kopējam notikumu sarakstam. Tie ir parametri, kuri kontrolē lidmašīnas ātrumu nosēšanās brīdī un to lielumam jābūt nostabilizētam jau pāris sekundes pirms piezemēšanās, tā ļaujot kontrolēt nosēšanās tehniku. Parametru mēra grādos ( $^\circ$ ). Parametrs ir ierobežots gan no apakšas, gan no augšas, jo tas var mainīties līdz pat  $4^\circ - 5^\circ$  sekundē, kas normālu situāciju var pārvērst bīstamā. Ja maksimālais nosēšanās leņķis ir pārāk

liels (AirBaltic B737 flotei virs  $7^\circ$  un DHC 8-Q400 flotei virs  $5^\circ$ ), tas paaugstina risku lidmašīnas astei aizskart skrejceļu, kas var novest pie lieliem tehniskiem bojājumiem, kā arī ir bīstams pasažieriem. Liels nosēšanās leņķis palielina arī asu nosēšanos (*hard landing*) iespējamību.

Minimālais leņķis, ja tas ir neliels, vai pat nedaudz negatīvs norāda uz zemāku lidmašīnas ātruma kontrolējamību un var likt lidaparātam „peldēt” – šajos gadījumos pieaug risks veikt piezemēšanos pārāk vēlu un, ja skrejceļš ir īss, izbraukt ārpus pieļaujamās zonas. Tāpat pie maziem nosēšanās leņķiem lidmašīna var piezemēties uz priekšējā riteņa, kas negatīvi ietekmē lidaparāta šasiju tehnisko stāvokli.



Att. 3.2: Maksimālais un minimālais leņķis pret horizontālo asi nosēšanās brīdī un vertikālais pātrinājums a) B737 flotes datiem augšā b) DHC 8-Q400 flotes datiem apakšā

Papildus novērotais faktors, analizējot noguruma ietekmi ir **notikumu nozīmības līmenis lidojumā**. Kā bija aprakstīts nodaļā par datu apstrādi, tad FDM sistēmā vērtībām, kuras tiek izmantotas notikumu veidošanā var pievienot sliekšņus, lai analizētu parametru ietekmi uz lidojuma kvalitāti un drošumu. Ja, piemēram, sistēmā ir uzstādīts augšējais 25% sliekšnis 300

mezglu ( $555.6\text{ km/h}$ ) apmērā, ja lidmašīna atrodas ne vairāk kā  $10'000$  pēdas ( $3'048\text{ m}$ ) virs zemes, tad visas situācijas, kad šī vērtība ir sasniegta vai pārsniegta, FDM saglabā kā notikumus. Jo lielāks ir vērtības pārkāpums, jo lielāks % nozīmības līmenis tiek piešķirts ar maksimālo 100% līmeni, ja, piemēram, lidaparāts sasniedz 350 mezglu ātrumu zem  $10'000$  pēdām. Šādā pašā veidā sliekšņus nosaka arī dažādu brīdināumu sistēmu darbības augstumiem un ilgumiem, aizplākšņu, bremžu, šasiju lietojumiem, leņķiem noteiktos lidojuma posmos utt.

Rezultātā tiek summēti visi pieļauto notikumu nozīmības līmeņi (vienā lidojumā var tikt pārkāpti vairāki notikumi, apskatītajiem datiem maksimālais notikumu skaits bija 13 ar 727 vienību nozīmības līmeni, bet maksimālais sasniegtais kopējais nozīmības līmenis bija 757 lidojumā ar 9 notikumiem). Tomēr tikai retos gadījumos notikumu skaits pārsniedz 1 vai 2 notikumus lidojumā.

No 43'886 apskatītajiem lidojumiem 24% gadījumu lidojumā ir vismaz viens notikums. 6% no visiem notikumiem ir ar nozīmības līmeni, kas ir 75% vai lielāks un kuru var dēvēt par kritisku. Šādi kritiski notikumi ir sastopami 1.6% no lidojumiem un ir analizēti arī atsevišķi.

Pirms noskaidrot noguruma faktoru ietekmi uz izvēlētajām vērtībām, dziļāk izanalizēsim pašus parametrus – izpētīsim to histogrammas un piemeklēsim sadalījumus. 3.2 attēlā apskatām vertikālā paātrinājuma, minimālā un maksimālā nosešanās leņķa histogrammas. Dati ir sadalīti pēc AirBaltic flotes tipiem, jo katram no tiem viena un tā pati vērtība ir ar dažādiem nozīmības sliekšņiem. To var novērot arī histogrammās – nosēšanās leņķi ir ievērojami mazāki (novirzīti pa kreisi) DHC 8-Q400 flotei, kamēr vertikālā paātrinājuma datiem mazākas vērtības ir raksturīgas B737 lidmašīnām. Tā pat no 3.2 attēla redzam, ka nosešanās leņķa dati ir simetriski, kamēr vertikālajam paātrinājumam dati vairāk līdzinās lognormālajam sadalījumam ar smagu „asti” lielākām parametra vērtībām.

Pavisam apskatīsim četrus sadalījumus – normālo, lognormālo, Koši un vispārīgo ekstremālo vērtību sadalījumu.

Kā pirmo apskatīsim normālo sadalījumu  $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ , kur  $\mu$  ir matemātiskā cerība un  $\sigma^2$  definīcija Normālā sadalījuma blīvuma funkcija ir

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, x \in \mathbb{R}, \sigma > 0, \mu \in \mathbb{R}. \quad (3.2.1)$$

**Definīcija 1.** [8] Gadījuma lielums ir lognormāli sadalīts -  $Y \sim \text{lognormal}(\mu, \sigma^2)$ , ja  $X = \ln(Y) \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ . Lognormālā sadalījuma blīvuma funkcija ir

$$f(y | \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma y \sqrt{2\pi}} \exp^{-\frac{(\ln y - \mu)^2}{2\sigma^2}}, y > 0, \sigma > 0, \mu \in \mathbb{R}. \quad (3.2.2)$$

Vēl viens no apskatītajiem nepārtrauktajiem, simetriskajiem sadalījumiem ir Koši sadalījums ar lokācijas parametru  $x_0$  un skalēšanas parametru  $\gamma$ ,

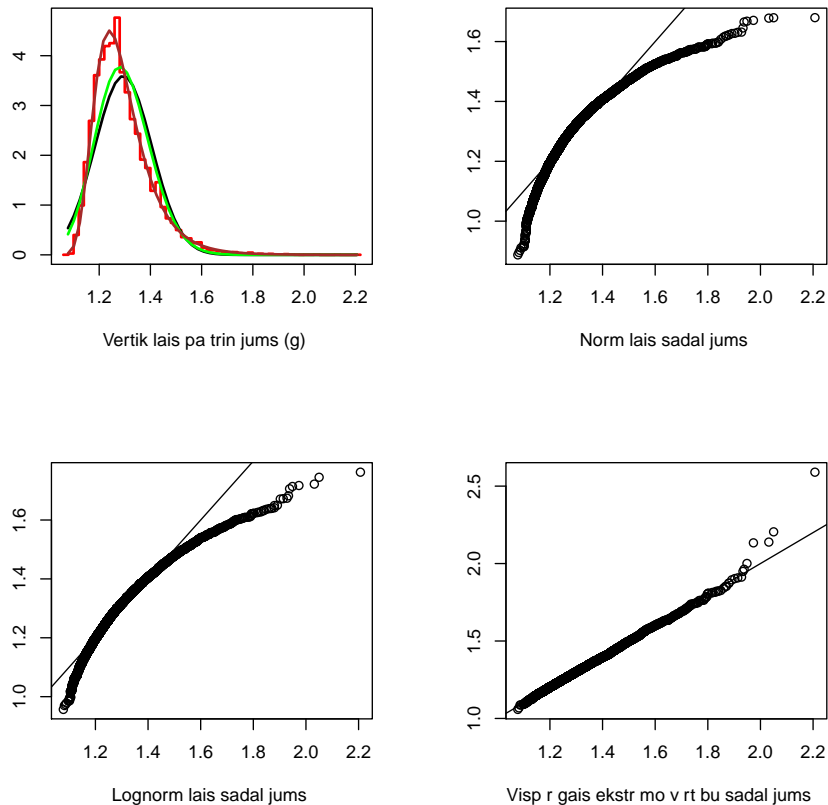
**Definīcija 2.** [9] Koši sadalījuma blīvuma funkcija ir

$$f(x | x_0, \gamma) = \frac{1}{\pi\gamma \left[1 + \left(\frac{x-x_0}{\gamma}\right)^2\right]}, \quad x \in \mathbb{R}, \gamma > 0, x_0 \in \mathbb{R}. \quad (3.2.3)$$

Kā pēdējais ir apskatīts vispārīgais ekstremālo vērtību sadalījums  $GEV(\mu, \sigma, \xi)$ , kur  $\mu$  ir lokācijas parametrs,  $\sigma$  ir skalēšanas parametrs un  $\xi$  ir formas parametrs.

**Definīcija 3.** [10] Vispārīgā ekstremālo vērtību sadalījuma blīvuma funkcija ir

$$f(x | \mu, \sigma, \xi) = \frac{1}{\sigma} t(x)^{\xi+1} e^{-t(x)}, \quad \text{kur } t(x) = \begin{cases} (1 + (x - \mu)\xi)^{-1/\xi}, & \text{ja } \xi \neq 0 \\ e^{-(x-\mu)/\sigma}, & \text{ja } \xi = 0 \end{cases}. \quad (3.2.4)$$



Att. 3.3: Vertikālā paātrinājuma uz nosēšanas novērtējumu ar normālo (melns), lognormālo (zaļš) un vispārīgo ekstremālo vērtību sadalījumu (brūns) blīvuma funkcijas un Q-Q plots ar maksimālās ticamības novērtējumā noteiktajiem parametriem. DHC 8-Q400 flote

Lai piemeklētu pareizo blīvuma funkciju vertikālā paātrinājuma un nosēšanās leņķu datiem, izmantojam lielākās ticamības novērtējuma funkciju statistikas modeļa parametru noteikšanai.

Ja mums ir  $x_1, x_2, \dots, x_n$  no vienmērīgi neatkarīgiem un vienmērīgi sadalītiem gadījuma lielumiem  $X_i$  ar kopīgo blīvuma funkciju

$$f_{\theta}(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_1, x_2, \dots, x_n | \theta).$$

Ticamību  $L$  var uzrakstīt kā funkciju no parametra  $\theta$ :

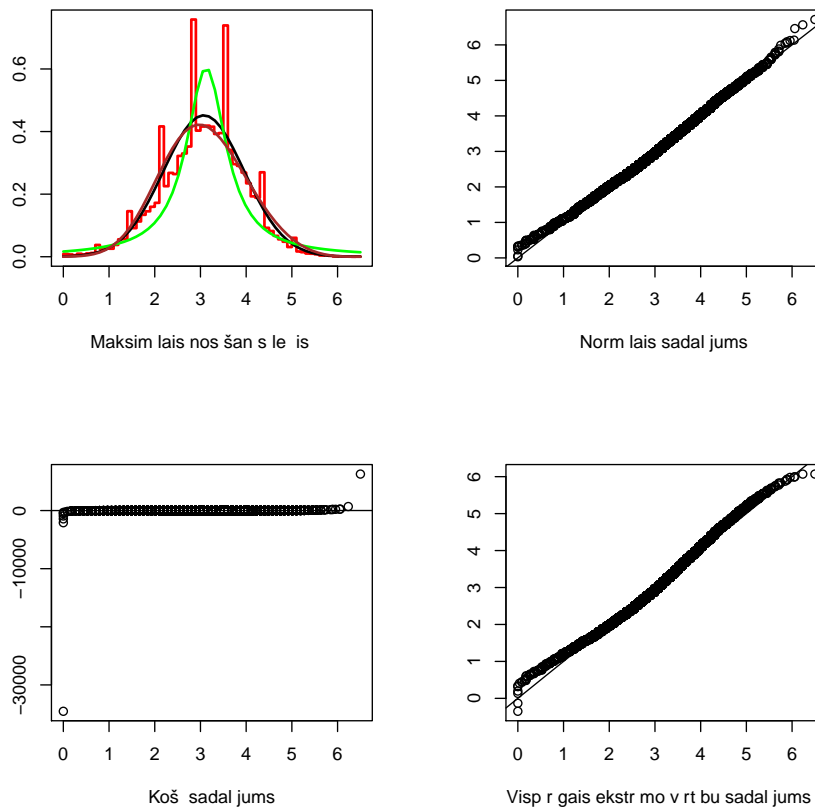
$$L(\theta) = \prod_{i=1}^n f(x_i | \theta).$$

Praktiski izdevīgāk ir maksimizēt logaritmisko ticamības funkciju:

$$l(\theta) = \ln L(\theta) = \sum_{i=1}^n \ln f(x_i | \theta).$$

Līdz ar to, lai atrastu novērtēto parametru  $\theta$ , maksimizējam [11] vidējo logaritmisko novērtējumu:

$$\hat{l} = \frac{1}{n} l(\theta). \tag{3.2.5}$$



Att. 3.4: Maksimālā nosēšanās leņķa pret horizontālo asi novērtējumu ar normālo (melns), Košī (zaļš) un vispārīgo ekstremālo vērtību sadalījumu (brūns) blīvuma funkcijas un Q-Q plots ar maksimālās ticamības novērtējumā noteiktajiem parametriem. DHC 8-Q400 flote

Pārbaudam atbilstību vertikālā paātrinājuma uz nosēšanos datiem un normālajam, lognormālajam un vispārīgajam ekstremālo vērtību sadalījumam (3.3 attēls). Šeit aplūkoti dati DHC 8-Q400 flotei un redzam, ka vislabāk datus apraksta vispārīgais ekstremālais sadalījums ar maksimālās ticamības novērtējumā iegūtajiem  $\xi = -0.09185179$ ,  $\mu = 1.27265128$ ,  $\sigma = 0.09123405$ . Lognormālais sadalījums šoreiz datus neapraksta pietiekoši efektīvi (B737 flotes datiem gan lognormālais, gan vispārīgais ekstremālo vērtību sadalījums apraksta datus vienlīdz labi). Ir labi redzams, ka normālais sadalījums nav labs vertikālā paātrinājuma datiem.

Minimālajam un maksimālajam nosēšanās leņķim lognormālais sadalījums nav piemērojams, jo neizpildās nosacījums par tikai pozitīvām novērojumu vērtībām. Tā vietā apskatīts Košī sadalījums. 3.4 attēlā izpētīts maksimālais nosēšanās leņķis pret horizontālo asi DHC 8-Q400 flotes datiem (arī pārējiem nosēšanas leņķa analīzes gadījumiem rezultāti ir līdzīgi). Rezultāti ļauj secināt, ka normālais sadalījums un vispārīgais ekstremālo vērtību sadalījums labi apraksta datus, kamēr Košī sadalījums ir labs tikai datu virsotnes tuvumā.

### 3.3 Lidojumu analīze

Novērtēsim šo vērtību korelāciju ar obligātajiem darba laiku nosacījumiem. Obligātie darba nosacījumi ir tie, kuri ir apstiprināti normatīvajos aktos kā obligāti ierobežojamie – 1 un 28 dienu blokstundas un 1, 7 un 28 dienu lidojuma darba stundas. Nosacījumi par gada laikā uzkrātajām stundām nav skatīti, jo noteikumi nosaka kalendārā gada ierobežojumu (no 1. janvāra līdz 31. decembrim), kas FDM vērtību analīzei nav interesants.

Ir izvēlēti vairāki veidi kā novērtēt korelāciju – apskatot visus lidojumus, kas veikti 2013. gadā, apskatot divus no regulāri lidotajiem lidmašīnu tipiem, kas ir aktuāli arī šobrīd (B737 un DHC 8-Q400), un visus šos nosacījumus vērtējam gan kapteinim (CPT), gan otrajam pilotam (FO1). Papildus pievienojam rezultātus arī par notikumu sastopamību lidojumos.

Aplūkosim Pīrsona korelācijas koeficientu un tā p-vērtības [12]. Pīrsona korelācijas koeficients ir lineārās sakarības ciešuma pakāpes mērs starp diviem mainīgajiem  $X$  un  $Y$ .

Pīrsona korelācijas koeficients pieņem vērtības starp -1 un +1 ieskaitot, kur vērtība 1 raksturo pilnīgi negatīvu korelāciju, 1 raksturo pilnīgi pozitīvu korelāciju un ja korelācijas koeficients ir vienāds ar 0, tad korelācija starp  $X$  un  $Y$  nepastāv.

**Definīcija 4.** Pīrsona koeficients populācijai ir:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y}, \quad (3.3.1)$$

kur cov ir kovariācija  $X$  un  $Y$ ,  $\sigma_X$  ir standartnovirze.

$$\begin{aligned} \text{cov}(X, Y) &= \mathbb{E}[(X - \mathbb{E}X)(Y - \mathbb{E}Y)], \\ \sigma_X^2 &= \mathbb{E}[(X - \mathbb{E}(X))^2] = \mathbb{E}(X^2) - \mathbb{E}(X)^2, \\ \sigma_Y^2 &= \mathbb{E}[(Y - \mathbb{E}(Y))^2] = \mathbb{E}(Y^2) - \mathbb{E}(Y)^2. \end{aligned}$$

Līdz ar to vienādību (3.3.1) var uzrakstīt kā

$$\begin{aligned} \rho_{X,Y} &= \frac{\mathbb{E}[(X - \mathbb{E}X)(Y - \mathbb{E}Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\mathbb{E}(XY) - \mathbb{E}(X)\mathbb{E}(Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \\ &= \frac{\mathbb{E}(XY) - \mathbb{E}(X)\mathbb{E}(Y)}{\sqrt{\mathbb{E}(X^2) - \mathbb{E}(X)^2} \sqrt{\mathbb{E}(Y^2) - \mathbb{E}(Y)^2}} \end{aligned} \quad (3.3.2)$$

**Definīcija 5.** Ja mums ir divas izlases  $x_1, \dots, x_n$  un  $y_1, \dots, y_n$  ar  $n$  novērojumiem katrā, tad (3.3.2) varam uzrakstīt kā

$$r = r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3.3.3)$$

kur

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Lai novērtētu vai iegūtie Pīrsona korelācijas koeficienti ir nozīmīgi, varam pārbaudīt

$$H_0 : \rho = 0 \quad H_1 : \rho \neq 0.$$

Otrs veids kā novērtēt izlases Pīrsona korelācijas koeficientu ir konstruēt ticamības intervālus priekš  $r$ .

Tabula 3.2: Korelāciju tabula blokstundām un lidojumu darba stundām pret maksimālo un minimālo nosēšanās leņķi, vertikālo paātrinājumu uz nosēšanos un notikumu nozīmības vērtībām. Katra no vērtībām skatīta kapteinim (CPT) un otrajam pilotam (FO1)

	Tekošās dienas blokstundas	Tekošās dienas lidojumu darba stundas	Lidojuma darba stundas 7 dienām	Blokstundas 28 dienām	Lidojuma darba stundas 28 dienām
Max nosēšanās leņķis CPT	-0.003	0.001	-0.083	-0.041	-0.036
Min nosēšanās leņķis CPT	0.012	-0.034	-0.191	-0.123	-0.187
Vertikālais paātrinājums CPT	0.156	0.062	-0.313	-0.130	-0.165
Notikumu nozīmība CPT	0.048	0.092	-0.065	-0.016	0.010
Max nosēšanās leņķis FO1	-0.009	-0.013	-0.109	0.017	-0.042
Min nosēšanās leņķis FO1	0.011	-0.032	-0.120	-0.006	-0.096
Vertikālais paātrinājums FO1	0.169	0.076	0.123	0.029	0.178
Notikumu nozīmība FO1	0.043	0.112	-0.086	-0.102	-0.012

Pīrsona korelācijas koeficientu nulles hipotēzes pārbaudi var veikt izmantojot  $t$  sadalījumu ar  $n - 2$  brīvības pakāpēm.

**Apgalvojums 1.** Ja

$$H_0 : \rho = 0$$

izpildās, tad

$$t = r \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \sim t_{n-2}.$$

**Piezīme 2.**  $H_0$  tiek noraidīta pie lielām statistikas vērtībām, tas ir,

$$|t| > t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-2}.$$

Kā redzam 3.2 tabulā, korelācijas koeficientu tabula uzrāda lielaku korelāciju starp maksimālo nosēšanās leķi un apskatītajiem darba laikiem. Tāpat lielāka korelācija novērojama kapteiņu minimalajiem nosēšanās leķiem pret akumulēto darba laiku ilgākam periodam.

Tabula 3.3: Korelācijas koeficientu p-vērtības blokstundām un lidojumu darba stundām pret maksimālo un minimālo nosēšanās leņķi, vertikālo paātrinājumu uz nosēšanos un notikumu nozīmības vērtībām. Katra no vērtībām skatīta kapteinim (CPT) un otrajam pilotam (FO1)

	Tekošās dianas blokstundas	Tekošās dianas lidojumu darba stundas	Lidojuma darba stundas 7 dienām	Blokstundas 28 dienām	Lidojuma darba stundas 28 dienām
Max nosēšanās leņķis CPT	0.976	0.989	0.414	0.686	0.721
Min nosēšanās leņķis CPT	0.904	0.736	0.057	0.223	0.063
Vertikālais paātrinājums CPT	0.121	0.542	0.002	0.198	0.102
Notikumu nozīmība CPT	0.634	0.361	0.521	0.874	0.923
Max nosēšanās leņķis FO1	0.926	0.896	0.281	0.867	0.680
Min nosēšanās leņķis FO1	0.910	0.753	0.233	0.952	0.340
Vertikālais paātrinājums FO1	0.092	0.451	0.222	0.775	0.077
Notikumu nozīmība FO1	0.673	0.267	0.394	0.314	0.909

Tomēr pārliecināsimies vai 3.2 tabulā iegūtie korelācijas koeficienti ir nozīmīgi, tāpēc apskatīsim p-vērtības tiem pašiem datiem (3.3 tabula). Secinām, ka gandrīz nevienai no apskatītajām korelācijām koeficienti nav nozīmīgi ( $p < 0.05$ ) pie 95% nozīmības līmeņa. Diemžēl ir jāsecina, ka tikai viens no korelācijas koeficientiem ir nozīmīgs – kapteiņiem 7 dienu darba stundu skaitam pieaugot, samazinās minimālais nosēšanās leņķis. Pozitīvu korelāciju varētu interpretēt vertikālā paātrinājuma datiem otrajiem pilotiem pret 28 lidojumu darba stundām.

Apkalpes nogurumu ietekmē ne tikai nostrādāto stundu skaits. Pats lidojumu skaits arī var palielināt nogurumu, jo lielākā koncentrācija un piepūle ir nepieciešama lidmašīnas pacelšanās

un nosēšanās fāzēs – tātad jo vairāk šādu palielinātas uzmanības fāžu ir dienā, jo lielāks nogurums uzkrājas. Tāpat stabils nakšņošanas grafiks ir svarīgs. Ierastā vidē atpūta ir pilnvērtīgāka, tāpēc sakarā ar lidojumu plānu paredzētās nakšņošanas viesnīcās AirBaltic galamērķos ārpus Rīgas arī veicina noguruma risku – viesnīcas var būt trokšņainas, nokļūšana tajās var aizņemt daudz laika (reizēm nakšņošanu garums ir mazāks par 6 stundām un ceļā pavadāmais laiks to vēl vairāk samazina). Tāpēc nakšņošana ārpus Rīgas ir faktors, kas 2015. gadā ir sasniedzis ļoti lielu aktualitāti – piloti jūtas noguruši pēc šādām darba dienām, un arī aktīvi ziņo par samazinātu modrības līmeni.

Tāpēc papildus ir veikta korelāciju analīze starp augstāk minētajiem parametriem katram no lidojumiem un nosacījumiem par dienas gaitā veiktajiem lidojumiem – kurš pēc kārtas konkrētajā darba dienā lidojums ir bijis un vai lidojums ir bijis pēc nakšņošanas ārpus Rīgas (0, ja tajā darba dienā visi lidojumi ir bijuši pēc nakšņošanas mājās vai arī vēl pirms nakts pārtraukuma) un kurš pēc kārtas tādā gadījumā lidojums ir bijis. No 3.4 tabulas var redzēt, ka liels korelācijas koeficients ir tikai starp maksimālo nosēšanās leņķi un lidojuma secību vienas darba dienas periodā B737 flotei, jāpiebilst, ka koeficients ir negatīvs. Apskatot korelācijas koeficientu p-vērtības, secinām to pašu – tas ir vienīgais nozīmīgais koeficients šiem datiem.

Tomēr jāpiebilst, ka nakšņošana ārpus mājas stacijas 2013. gadā nebija regulāri izmantota prakse airBaltic tāpēc datus nevar viennozīmīgi interpretēt, it īpaši salīdzinot ar notikumu nozīmību lidojumos, jo gan vienā, gan otrā gadījumā ir daudz ierakstu ar nulles vērtību.

Izlašu pārbaudei izmantosim arī dispersiju analīzi (ANOVA)[13] [14]. Apskatītajam faktoram ietekmes būtiskumu noskaidrim, pārbaudot hipotēzi  $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n$ . Alternatīvā hipotēze  $H_1$ : vismaz viens no  $\mu_i$  atšķiras no pārējiem.

Apskatam izlasi  $x_{ij} : 1 \leq i \leq n_j, 1 \leq j \leq k$ . Ar  $\bar{x}_j$  apzīmēsim  $x_j$  vidējo vērtību un ar  $\bar{x}$  visas izlases vidējo vērtību.

Tādā gadījumā  $j$ -tā faktora kvadrātu summa ir:

$$SS_j = \sum_i (x_{ij} - \bar{x}_j)^2. \quad (3.3.5)$$

Un visas izlases kvadrātu summa ir:

$$\begin{aligned} SS_T &= \sum_j \sum_i (x_{ij} - \bar{x})^2 = SS_W = \sum_j SS_j = \sum_j \sum_i (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 + SS_B = \\ &= \sum_j n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2, \end{aligned} \quad (3.3.6)$$

kur  $SS_W = \sum_j \sum_i (x_{ij} - \bar{x}_j)^2$ ,  $SS_B = \sum_j n_j (\bar{x}_j - \bar{x})^2$ ,  $SS_T = \sum_j \sum_i (x_{ij} - \bar{x})^2$ .

Tabula 3.4: Korelācijas koeficienti un to p-vērtības lidojuma kārtas numuram un numurētiem lidojumiem pēc pārtraukuma pret maksimālo un minimālo nosēšanās leņķi, vertikālo paātrinājumu uz nosēšanos un notikumu nozīmības vērtībām. Katra no vērtībām skatīta aktuālajiem lidaparātu tiem (B737 un DHC 8-Q400)

	Lidojuma kārtas numurs B737	Lidojums pēc pārtraukuma B737	Lidojuma kārtas numurs Q400	Lidojums pēc pārtraukuma Q400
Korelācijas koeficienti				
Maksimālais nosēšanās leņķis	-0.206	0	-0.148	-0.079
Minimālais nosēšanās leņķis	-0.158	-0.001	-0.086	-0.05
Vertikālais paātrinājums	0.078	0.002	-0.145	-0.073
Notikumu nozīmība	-0.079	-0.043	0.032	0.068
Korelācijas koeficientu p-vērtības				
Maksimālais nosēšanās leņķis	0.040	0.998	0.143	0.437
Minimālais nosēšanās leņķis	0.116	0.994	0.395	0.621
Vertikālais paātrinājums	0.439	0.987	0.15	0.471
Notikumu nozīmība	0.436	0.674	0.752	0.501

Tālāk definēsim brīvības pakāpes, ja  $n = \sum_{j=1}^k n_j$ . Tātad:

$$df_T = n - 1, \quad df_B = k - 1, \quad df_W = \sum_{j=1}^k (n_j - 1) = n - k. \quad (3.3.7)$$

Tad vidējais kvadrātiskais lielums ir  $MS = SS/df$ , līdz ar to

$$MS_T = SS_T/df_T, \quad MS_B = SS_B/df_B, \quad MS_W = SS_W/df_W. \quad (3.3.8)$$

**Apgalvojums 3.** Pie  $x_{ij}$  no neatkarīgi un vienādi sadalītiem gadījuma lielumiem  $X_i$  un visas  $\sigma_j^2$  ir vienādas, tad

$$MS_T \sim \frac{\sigma_T^2}{df_T} \chi^2(df_T), \quad MS_B \sim \frac{\sigma_B^2}{df_B} \chi^2(df_B), \quad MS_W \sim \frac{\sigma_W^2}{df_W} \chi^2(df_W).$$

**Apgalvojums 4.**  $SS_T = SS_W + SS_B$   $df_T = df_W + df_B$ .

Ja katras grupas vidējais  $\bar{\mu}_j = \mu + a_j$ , kur  $a_j$  ir  $j$ -tās grupas nozīmīgums un izlases novērtējums  $\bar{x}_j = \bar{x} + a_j$ , tad nulles hipotēzi var uzrakstīt

$$H_0 : a_j = 0 \text{ katram } j.$$

Tā mēs varam apzīmēt katru izlases elementu kā  $x_{ij} = \mu + \alpha_j + \varepsilon_{ij}$ , kur  $\varepsilon_{ij}$  ir kļūda. Un izlasei  $x_{ij} = \bar{x} + a_j + e_{ij}$ , kur  $e_{ij}$  ir izlases kļūda. Atzīmējam, ka  $\varepsilon_{ij} = x_{ij} - \mu_j$  un  $e_{ij} = x_{ij} - \bar{x}_j$ .

**Piezīme 5.** Tā kā  $\varepsilon_{ij} = x_{ij} - \mu_j$ , tad izriet, ka  $n_j \bar{x}_j = \sum_i x_{ij} = \sum_i (\bar{x}_j + e_{ij}) = n_j \bar{x}_j + \sum_i e_{ij}$  un  $\sum_i e_{ij} = 0$  katram  $j$ , un  $\bar{e} = \frac{1}{n-1} \sum_j \sum_i e_{ij} = 0$ .

Ja visi faktori ir vienāda apjoma ( $n_j = m$ ) katram  $j$ , tad  $\frac{1}{k} \sum_j \bar{x}_j = \frac{1}{km} \sum_j \sum_i x_{ij} = \bar{x}$  un  $\sum_j a_j = \sum_j (\bar{x}_j - \bar{x}) = 0$ .

**Apgalvojums 6.**  $Var(e) = \frac{n-k}{n-1} MS_W$ .

Līdz ar to  $\mathbb{E}[MS_W] = \sigma_\epsilon^2$  un  $\mathbb{E}[MS_B] = \sigma_\epsilon^2 + \sum_j n_j \alpha_j^2$ .

Ja izpildās nulles hipotēze, tad  $\alpha_j = 0$  un

$$\frac{MS_B}{MS_W} \approx \frac{\sigma_\epsilon^2}{\sigma_\epsilon^2} = 1. \quad (3.3.9)$$

Ja izpildās  $H_1$ , tad  $\alpha_j \neq 0$  un

$$\frac{MS_B}{MS_W} \approx \frac{\sigma_\epsilon^2}{\sigma_\epsilon^2 + \sum_j n_j \alpha_j^2} > 1. \quad (3.3.10)$$

Tādējādi nulles hipotēze ir ekvivalenta  $H_0 : \sigma_B = \sigma_W$ . Tas nozīmē, ka mēs varam izmantot F-testu, lai noteiktu vai nulles hipotēze ir noraidāma.

**Teorēma 7.** Izlasei  $x_{ij} : 1 \leq i \leq n_j, 1 \leq j \leq k$ , kur  $x_{ij}$  ir neatkarīgi un ienādi sadalītiem gadījumu lielumiem un visi  $\mu_j$  un  $\sigma_j^2$  ir vienādi, tad

$$\frac{MS_B}{MS_W} \sim F(df_B, df_W). \quad (3.3.11)$$

Papildus apskatīsim analoģu neparametrisku procedūru Kruskala - Vallisa rangu dispersijas analīzi [15].

Kruskala - Vallisa tests ir metode, ar kuru var noteikt, vai vairākas izlases ir no vienas un tās pašas populācijas vai arī no identiskām populācijām ar vienādām mediānām. Nulles hipotēze ir

$$H_0 : \theta_1 = \theta_2 = \dots = \theta_k$$

un alternatīvā hipotēze

$$H_1 : \exists i, j \in (1, k) : i \neq j, \theta_i \neq \theta_j.$$

**Definīcija 6.** Kruskala-Vallisa statistika ir vienāda ar

$$K = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{j=1}^k n_j (\bar{R}_j - \bar{R})^2, \quad (3.3.12)$$

kur  $n_j$  ir  $j$ -tās izlases novērojumu skaits,  $R_j$  ir rangū summa  $j$ -tajā izlasē,  $\bar{R} = \frac{N+1}{2}$  visu izlašu kopējā vidējā ranga vērtība.

Ja vairākām vērtībām ir piešķirti vieni un tie paši rangi, tad Kruskala-Vallisa statistiku  $K$  (3.3.12) uzlabo, to izdalot ar

$$1 - \frac{\sum_{i=1}^g (t_i^3 - t_i)}{N^3 - N}, \quad (3.3.13)$$

kur  $g$  ir grupu skaits ar vienādiem rangiem un  $t_i$  ir vienādo rangu skaits  $i$ -tajā grupā. Šādi tiek palielināta statistikas  $K$  vērtība un tā kļūst būtiskāka. Ja ir liels vienādu rangu skaits, tad uzlabotā  $K$  statistikas vērtība būs ievērojami uzlabota.

**Teorēma 8.** Ja  $H_0$  ir spēkā, tad statistika  $K$  konverģē uz  $\chi^2$  – kvadrāta sadalījumu ar  $k - 1$  brīvības pakāpēm:

$$K \xrightarrow[H_0]{d} \chi_{k-1}^2. \quad (3.3.14)$$

Piemērs ANOVA statistikai un Kruskala-Vallisa rangu dispersiju statistikai apskatīts lidojumu kārtas numuriem pret maksimālo nosēšanās leņķi, minimālo nosēšanās leņķi, vertikālo paātrinājumu un notikumu nozīmību DHC 8-Q400 flotes datiem (skatīt 3.3 un 3.5 attēlus). Novērojam, ka ANOVA nulles hipotēzi par vidējo vērtību vienādību nevaram noraidīt vertikālā paātrinājuma datiem (vertikālā paātrinājuma dati bija novērtēti ar vispārīgā ekstremālo vērtību blīvuma funkciju), kamēr Kruskala-Vallisa rangu tests noraida hipotēzi par vienādām mediānām. Visneskaidrākā situācija ir ar notikumu nozīmību – lai arī abi testi noraida nulles hipotēzi, Kruskala-Vallisa rangu testa  $p$ -vērtība ir 0.04384, turklāt arī no kastu grafika un citiem vizuāliem novērtējumiem nav iespējams gūt drošus secinājumus.

ANOVA

Maksimālais nosēšanās leņķis ~ Lidojuma kārtas numurs

Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
1	18	17.811	22.88	1.74e-06 ***

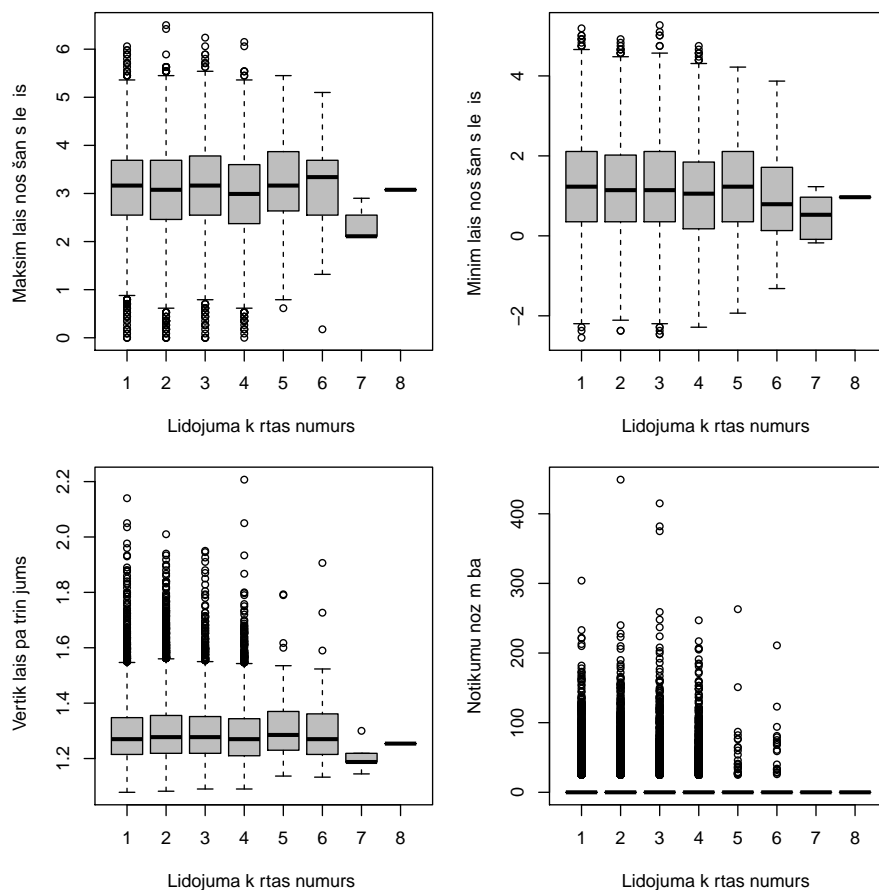
Minimālais nosēšanās leņķis ~ Lidojuma kārtas numurs

Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
1	79	78.53	51.74	6.56e-13 ***

Vertikālais paātrinājums ~ Lidojuma kārtas numurs

Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
1	0.01	0.006769	0.55	0.458

Notikumu nozīmīgums ~ Lidojuma kārtas numurs



Att. 3.5: Kastu grafiki lidojumu secībai vienā darba periodā pret lidojumos novērtētajiem parametriem - nosēšanās leņķiem, vertikālo paātrinājumu uz nosēšanos un notikumu kopējo nozīmību lidojumā. DHC 8-Q400 dati apjomā 20'637

Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
1	5904	5904	9.706	0.00184 **

Kruskal-Wallis rank sum test

Maksimālais nosēšanās leņķis ~ Lidojuma kārtas numurs

Kruskal-Wallis chi-squared = 88.9979, df = 7, p-value < 2.2e-16

Minimālais nosēšanās leņķis ~ Lidojuma kārtas numurs

Kruskal-Wallis chi-squared = 71.7784, df = 7, p-value = 6.453e-13

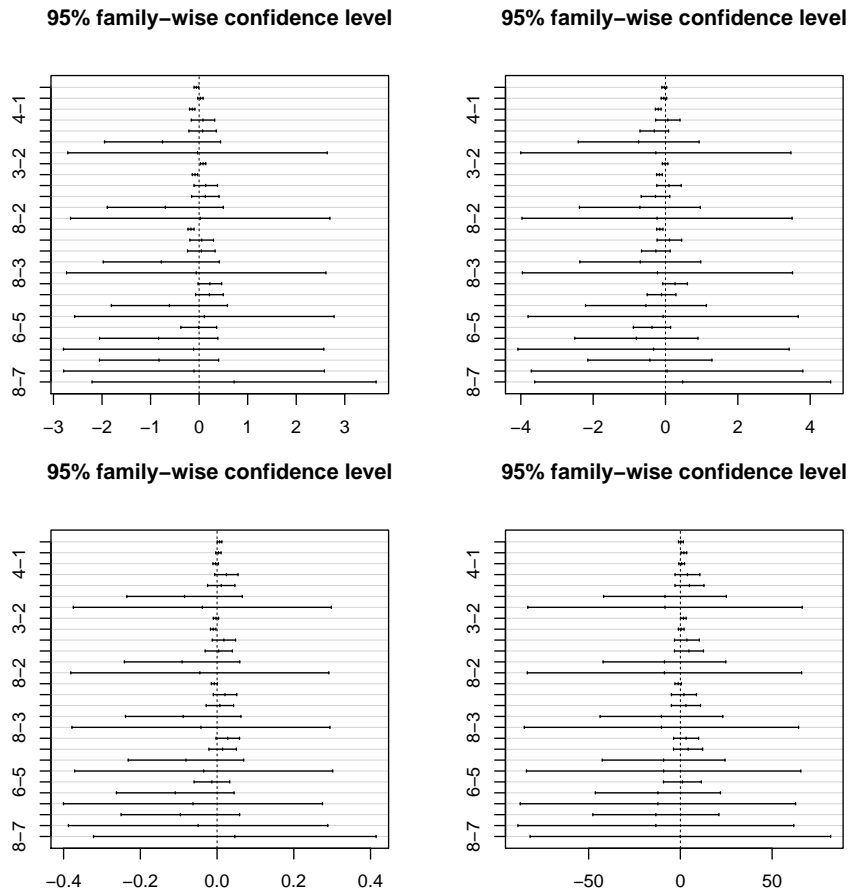
Vertikālais paātrinājums ~ Lidojuma kārtas numurs

Kruskal-Wallis chi-squared = 35.3193, df = 7, p-value = 9.74e-06

Notikumu nozīmīgums ~ Lidojuma kārtas numurs

Kruskal-Wallis chi-squared = 14.4429, df = 7, p-value = 0.04384

Lai pārbaudītu, kuras tieši vidējās vērtības atšķiras ANOVA analīzē, veicam to pārbaudi,



Att. 3.6: Tukey HSD testa nozīmība lidojumu secībai darba dienā. a) Augšā pa kreisi maksimālajam nosēšanās leņķim b) augšā pa labi minimālajam nosēšanās leņķim c) lejā pa kreisi vertikālajam paātrinājumam un d) lejā pa kreisi notikumu nozīmībai

izmantojot Tukey HSD nozīmības testu, kas apstrāda katru no vērtību pāriem (3.6 attēlā). P-vērtības liecina, ka vidējās vērtības nozīmīgi atšķiras tikai dažos no pa pāriem salīdzinātajos lidojumu secības testos. Pamatā tas ir novērojams pirmo 4 lidojumu starpā, kamēr pie lielāka veikto lidojumu skaita nozīmīgums ir mazinājies.

Maksimālais nosēšanās leņķis ~ lidojuma kārtas numurs

```
Tukey multiple comparisons of means
  95% family-wise confidence level

      diff      lwr      upr p adj
2-1 -0.05623 -0.1030 -0.00947 0.007
4-1 -0.14140 -0.1970 -0.08580 0.000
3-2  0.08229  0.0280  0.13661 0.000
4-2 -0.08517 -0.1407 -0.02964 0.000
4-3 -0.16746 -0.2296 -0.10537 0.000
```

Minimālais nosēšanās leņķis ~ lidojuma kārtas numurs

Tukey multiple comparisons of means

95% family-wise confidence level

	diff	lwr	upr	p adj
4-1	-0.2013	-0.2790	-0.1235	0.000
4-2	-0.1678	-0.2455	-0.0902	0.000
4-3	-0.1572	-0.2440	-0.0704	0.000

Vertikālais paātrinājums uz nosēšanos ~ lidojuma kārtas numurs

Tukey multiple comparisons of means

95% family-wise confidence level

	diff	lwr	upr	p adj
2-1	0.00650	0.000614	0.012389	0.019
4-2	-0.01010	-0.017095	-0.003113	0.000

Notikumu nozīmīgums ~ lidojuma kārtas numurs

Tukey multiple comparisons of means

95% family-wise confidence level

	diff	lwr	upr	p adj
3-1	1.93e+00	0.405	3.450	0.003
3-2	1.64e+00	0.117	3.158	0.024

Lidojumus ar nakšņošanu ārpus mājas stacijas būs vērtīgi analizēt 2015. gada datiem, jo lidojumu maršrutu un izlidošanas laiku grafikā vasaras sezonā ir būtiski palielinājies šādas prakses pielietojums, īpaši Q400 flotei. Tas sakrīt arī ar palielinātu apkalpes locekļu subjektīvā noguruma novērtējumu šai sezonai. Neregulārie miega ritmi traucē ne tikai darba pienākumu pildīšanā un līdz ar to ietekmē lidojuma drošumu, bet ievieš izmaiņas arī ārpus darba pavadītā laika notiekošajā.

### 3.4 Notikumu analīze

Notikumu analīze ir būtisks lidojumu drošuma un kvalitātes novērtēšanas rīks, kura ietvaros ar atšķirīgu regularitāti dati tiek apkopoti un ar rezultātiem iepazīstina vairākas airBaltic personāla grupas, kas iesaistītas ar lidojuma drošību saistītu darbību veikšanā, nodarbojas ar plānošanas efektivitātes uzlabošanā vai seko līdzi tehniskajam stāvoklim.

Katru mēnesi airBaltic piloti *Safety Newsletter* ietvaros var iepazīties ar iepriekšējā mēneša aktualitātēm FDM informācijā – pozitīvās un negatīvās tendences biežāk pieļautajos notikumos, statistiku par pēdējiem 3 mēnešiem relatīvi uz 1000 lidojumiem un gadījumos, ja ir kādas īpaši atzīmējamās tendences, tad pievienotas tiek arī notikumus veidojošo vērtību histogrammas un absolūtie skaitļi. Dažos gadījumos mēra arī notikumu attiecību pret tikai to lidojumu skaitu, kuros ir bijis vismaz viens piefiksēts notikums.

Tāpat reizi gadā apkalpes locekļi saņem individualizētus FDM datu izrakstus par iepriekšējā gadā piefiksētajiem vidējas un kritiskas nozīmes notikumiem, kuros piloti ir lidojuši (netiek dalīts vai pilots ir bijis kā galvenais pilots vai kā monitorējošais pilots).

Iepriekšējā paragrāfā visas vērtības tika skatītas no lidojuma izpildes skatu punkta – katram lidojumam bija pievienoti apskatāmie parametri un noguruma faktori. Šajā paragrāfā kā primārais vienojošais faktors ir lidojumā reģistrēts notikums (vērtība ar vismaz 25% nozīmības līmeni). Un tad jau šādi atlasītiem datiem tiks novērtēti noguruma faktori.

Šeit tiks apskatīti dati, kas notika, kad kā galvenais pilots (*pilot flying*) darbojās attiecīgi kapteinis vai otrais pilots. Tādā veidā datiem būs ērtāk noteikt noguruma ietekmi uz lidojumu ņemot vērā arī pieredzes līmeni. Papildus atsevišķi apskatīti arī dati par kritiskajiem notikumiem – gadījumi, kad lidojuma standartu pārkāpums jau ir jāizmeklē (vērtība ar 75% līdz 100% nozīmības līmeni). Šādi pētāmo datu sadalīšanas veidi ir radīti pieredzes ceļā, lai tos aktualizētu katrai no lidojuma nodrošināšanā iesaistītajām personām.

Tabula 3.5: Korelāciju tabula blokstundām un lidojumu darba stundām pret a) notikuma laikā nominēto galveno pilotu (kapteinis vai otrais pilots) un b) kritisko notikumu izlasi notikumu laikā nominēto galveno pilotu (kapteinis vai otrais pilots). Izceltie koeficienti ir ar nozīmīgām p-vērtībām

	Notikumu nozīmīgums CPT	Notikumu nozīmīgums FO1	Kritiskie notikumi CPT	Kritiskie notikumi CPT
Tekošās dienas blokstundas	0.238	0.071	-0.017	0.025
Tekošās dienas lidojumu darba stundas	0.052	0.135	-0.132	0.058
Lidojumu darba stundas 7 dienām	-0.071	0.153	-0.146	0.184
Blokstundas 28 dienām	-0.142	0.095	-0.004	0.127
Lidojumu darba stundas 28 dienām	-0.188	0.089	-0.018	0.138
1 akumulētās dienas blokstundas	0.114	0.081	-0.108	0.077
2 akumulēto dienu blokstundas	-0.011	0.130	-0.119	0.018
3 akumulēto dienu blokstundas	-0.104	0.109	-0.046	-0.041
4 akumulēto dienu blokstundas	0.011	0.122	-0.076	-0.031
5 akumulēto dienu blokstundas	-0.032	0.132	-0.124	0.045
6 akumulēto dienu blokstundas	0.011	0.102	-0.145	0.033
7 akumulēto dienu blokstundas	0.021	0.104	-0.199	0.008
8 akumulēto dienu blokstundas	-0.031	0.094	-0.172	-0.047
9 akumulēto dienu blokstundas	-0.062	0.103	-0.124	0.017
10 akumulēto dienu blokstundas	-0.076	0.073	-0.126	-0.035

Korelāciju rezultātus redzam 3.5 tabulā. Nozīmīga pozitīva korelācija ir novērojama starp notikumu nozīmību, apskatot visus notikumu nozīmības līmeņus un tekošās dienas blokstundām kapteiņu veiktajos lidojumos. Toties ka bīstamāku tendenci var interpretēt nozīmīgu pozitīvo korelāciju starp kritisku notikumu nozīmību otro pilotu veiktajos lidojumos akumulētā 7 dienu lidojumu darba stundu ietekmē.

Tāpat ir novērojama negatīva korelācija starp notikumu nozīmību kapteiņiem un akumulēto darba laiku garākā periodā, kas ļauj secināt, ka pilotu pieredze ļauj mazināt uzkrātā noguruma drošuma riskus.

Vēl viens praktisks veids kā novērtēt akumulētā noguruma faktoru ietekmi uz lidojumu ir regresija. Apskatīsim gan parametrisko lineāro regresijas modeli, gan neparametrisko regresiju.

**Definīcija 7.** Datiem  $(x_1, Y_1), \dots, (x_n, Y_n)$ , kur  $Y_i \in \mathbb{R}$  un  $x_i = (x_{i1}^T \in \mathbb{R}^p$  lineārās regresijas modelis ir

$$Y_i = r(x_i) + \epsilon_i \equiv \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} + \epsilon_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (3.4.1)$$

kur  $\mathbb{E}(\epsilon_i) = 0$  un  $D(\epsilon_i) = \sigma^2$ .

Lai novērtētu parametrus  $\beta_j$ , definējam  $n \times p$  matricu  $X$ :

$$X = \begin{pmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & \cdots & x_{1,p} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & \cdots & x_{2,p} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \cdots & x_{n,p} \end{pmatrix}.$$

Apzīmēsim  $Y = (Y_1, \dots, Y_n)^T$ ,  $\epsilon = (\epsilon_1, \dots, \epsilon_n)^T$  un  $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_p)^T$ . Tādā gadījumā (3.4.1) var uzrakstīt:

$$Y = X\beta + \epsilon. \quad (3.4.2)$$

Mazāko kvadrātu metodes novērtējums  $\hat{\beta} = (\hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_p)^T$  ir vektors, kas minimizē atlikumu kvadrātu summu

$$RRS = (Y - X\beta)^T(Y - X\beta) = \sum_{i=1}^n \left( Y_i - \sum_{j=1}^p x_{ij}\beta_j \right)^2.$$

Pieņemsim, ka matricai  $X^T X$  eksistē inversā matrica, tad

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (3.4.3)$$

Tad  $r(x)$  novērtējums pie  $x = (x_1, \dots, x_p)^T$  ir

$$\hat{r}_n = \sum_{j=1}^p \hat{\beta}_j x_j = x^T \hat{\beta}. \quad (3.4.4)$$

Tāpēc  $r = (\hat{r}_n(x_1), \dots, \hat{r}_n(x_n))^T$  var uzrakstīt kā

$$r = X\hat{\beta} = LY, \quad (3.4.5)$$

kur  $L = X(X^T X)^{-1} X^T$ .

Vektora  $\hat{\epsilon} = Y - r$  sauc par kļūdu vektoru. Gludināšanas matrica  $L$  ir simetriska  $L = L^T$  un idempotenta  $L^2 = L$ . Parametru skaitu  $p$  var izteikt no matricas  $L$ :

$$p = \text{tr}(L),$$

kur  $\text{tr}(L)$  ir matricas  $L$  pēda un ir vienāda ar matricas diagonāles elementu summu.

Jebkuram  $x = (x_1, \dots, x_p)^T$  izpildās

$$\hat{r}_n(x) = l(x)^T Y = \sum_{i=1}^n l_i(x) Y_i, \quad (3.4.6)$$

kur

$$l(x)^T = x^T (X^T X)^{-1} X^T.$$

Novērtējums parametram  $\sigma^2$  ir

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{r}_n(x_i))^2}{n - p} = \frac{\|\hat{\epsilon}\|^2}{n - p}. \quad (3.4.7)$$

Tālāk apskatīsim neparametrisko regresiju,

**Definīcija 8.** Dotiem  $n$  novērojumu pāriem  $(x_1, Y_1), \dots, (x_n, Y_n)$  neparametriskās regresijas vienādojums ir formā:

$$Y_i = r(x_i) + \varepsilon_i, \quad \text{kur } \mathbb{E}(\varepsilon_i) = 0, \quad i = 1, \dots, n. \quad (3.4.8)$$

Regresijas funkcijas  $r(x)$  novērtējumu apzīmēsim ar  $\hat{r}_n(x)$  un pieņemam, ka dispersija  $D(\varepsilon_i) = \sigma^2$  ir atkarīga no  $x$ . (...) uzskatām, ka  $x_i$  ir fiksēti. Novērojumus  $(x_1, Y_1), \dots, (x_n, Y_n)$  varam aplūkot arī gadījumu lielumu formā, tad pieraksts būs  $(X_1, Y_1), \dots, (X_n, Y_n)$  un  $r(x)$  interpretē kā matemātisko cerību:

$$r(x) = \mathbb{E}(Y|X = x). \quad (3.4.9)$$

**Piezīme 9.** *Neparametriskās regresijas mērķis ir novērtēt regresijas funkciju  $r$ .*

**Definīcija 9.** Novērtējums  $\hat{r}_n$  ir  $r$  lineārs gludinātājs, ja  $\forall x \exists l(x) : l(x) = (l_1(x), \dots, l_n(x))^T$  tāds, ka

$$\hat{r}_n(x) = \sum_{i=1}^n l_i(x) Y_i. \quad (3.4.10)$$

**Definīcija 10.** Pieņemsim, ka jostas platums  $h > 0$ , tad Nadaraya-Watson kodolu novērtējums definēts:

$$\hat{r}_n(x) = \sum_{i=1}^n w_i(x) Y_i, \quad (3.4.11)$$

kur

$$w_i(x) = \frac{K\left(\frac{x-x_i}{h}\right)}{\sum_{j=1}^n K\left(\frac{x-x_j}{h}\right)} \quad (3.4.12)$$

un  $K$  ir kodols.

**Piezīme 10.**  $\forall x : \sum_{i=1}^n l_i(x) = 1$ . Ja  $h \rightarrow 0$ , tad svāri  $w_i(x) \rightarrow 1$ , ja  $x = X_i$ . Tādējādi punktā  $X_i$  novērtējums  $\hat{r}_n(X_i)$  tiecas uz novērojumu  $Y_i$  un mēs iegūstam datu interpolāciju. Ja  $h \rightarrow \infty$ , tad svāri  $w_i(x) \rightarrow \frac{1}{n} \forall x$  un tad  $\hat{r}_n(X_i) = \bar{Y}$ .

Parametru  $h$  izvēlas tā, lai minimizētu izteiksmi

$$R(h) = \mathbb{E} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{r}_n(x_i) - r(x_i) \right)^2, \quad (3.4.13)$$

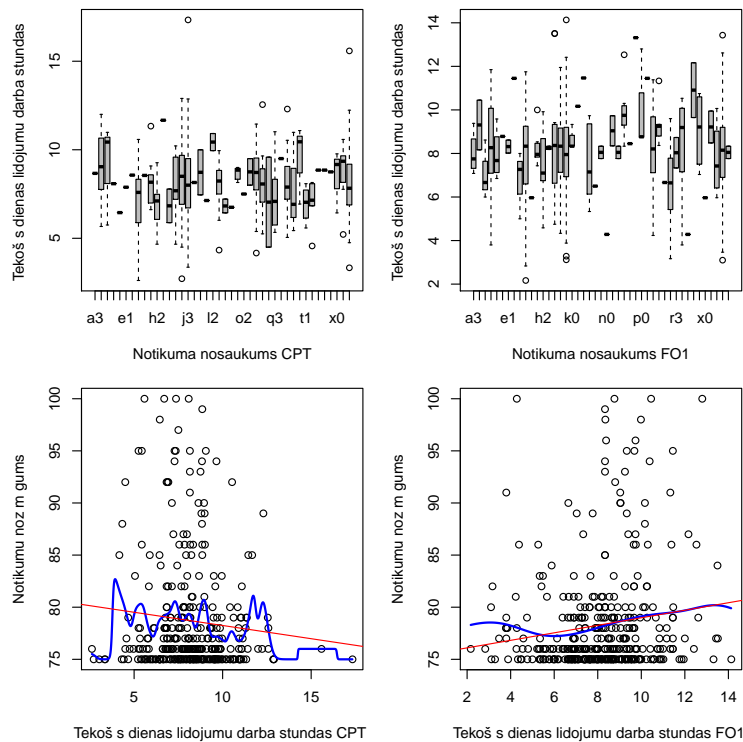
Bet tā kā  $R(h)$  ir atkarīgs no nezināmās regresijas funkcijas  $r(x)$ , tad minimizējamā izteiksme ir:

$$\hat{R}(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{r}_n(x_i))^2. \quad (3.4.14)$$

Plug-in metodei parametru  $h$  novērtē:

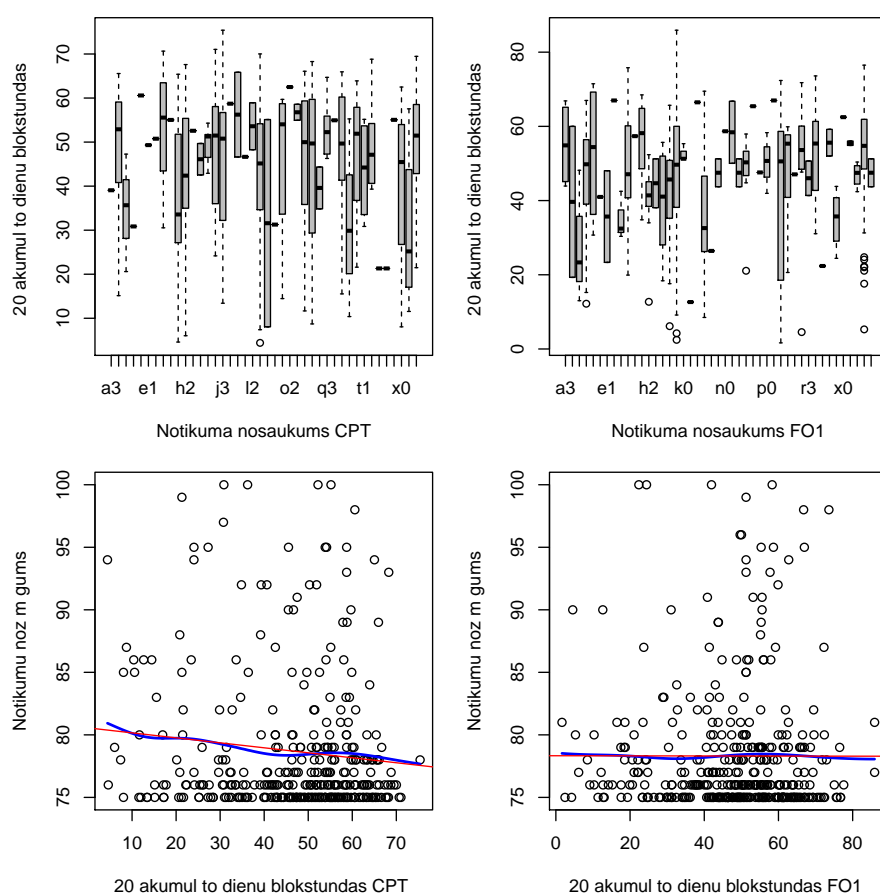
$$\hat{h} = \left( \frac{R(h)}{\mu_2(K)^2 \hat{\psi}_4(r)n} \right)^{\frac{1}{5}}, \quad (3.4.15)$$

kur  $\mu_2(h) = \int z^2(h)dh$  un  $\hat{\psi}_4(r)$  ir kodola novērtējums. Tātad nezināmais parametrs tiek aizstāts ar tā novērtējumu.



Att. 3.7: Tekošās dienas lidojuma darba stundas. Notikumu kastu grafiki (augšā)- individuālu notikumu apzīmējumi (u0 – pāragra aizplākšņu konfigurācijas maiņa, u1 – asa bremzēšana, w2 – pazemināts degvielas atlikums uz nosēšanas utt.); regresijas (apakšā) tekošās dienas lidojuma darba stundām pret notikumu nozīmīgumu. Atlasīti tikai kritiskie notikumi (notikuma nozīmības līmenis ir no 75% līdz 100%). Dati dalīti kapteiņa (CPT) lidotajos un pirmā pilota (FO1) lidotajos notikumos

Tekošās dienas lidojuma darba stundām kritisko notikumu kastu grafiki un regresiju novērtējumi redzami 3.7 attēlā. Var redzēt, ka lielai daļai notikumu matemātiskā cerība pie mazāka blokstundu skaita ir otro pilotu lidojumos. Tāpat kā korelāciju tabulas gadījumā tekošās dienas lidojuma darba stundām pieauguma gadījumā regresijas novērtējums ir augošs otro pilotu notikumiem. Tomēr robežā neparametriskās regresijas gadījumā novērtējums pārlietu tiecas uz vienu izolētu vērtību un aproksimācija kļūst sliktāka. Kamēr kapteiņu veiktajiem notikumiem ir novērojams dilstošs lineārais novērtējums, toties neparametriskās regresijas novērtējums ir neregulārs (noteiktais jostas platums nedod labu rezultātu). Šādi var novērtēt jebkuru no akumulēto darba laiku nosacījumiem.



Att. 3.8: 20 akumulēto dienu blokstundas. Notikumu kastu grafiki (augšā)- individuālu notikumu apzīmējumi (n1 – pārtraukta nosēšanās un aiziešana uz otru apli, b4 – piezemēšanās uz priekšējās šasijas, t3 – pārmērīga glisādes variācija utt.); regresijas (apakšā) 20 akumulēto dienu blokstundām pret notikumu nozīmīgumu. Atlasīti tikai kritiskie notikumi (notikuma nozīmības līmenis ir no 75% līdz 100%). Dati dalīti kapteiņa (CPT) lidotajos un pirmā pilota (FO1) lidotajos notikumos

Piemēram 3.8 attēlā 20 akumulēto dienu blokstundām gan lineārais, gan neparametriskais

regresijas novērtējums uzvedas ļoti līdzīgi - joprojām ir spēkā negatīva regresija kapteiņa veiktajos lidojumos, kamēr otro pilotu datiem mainoties akumulēto blokstundu skaitam notikumu nozīmīgums nemainās.

### 3.5 Notikumu analīze pēc notikuma tipa

Tā kā kopā ir apskatīti vairāk kā 100 dažādi notikumi, tad analizēt katru no tiem atsevišķi nav pārāk vērtīgi, jo vairāk tāpēc, ka ir tādi notikumi, kas gada laikā notiek tikai pāris reizes. Tāpēc tālāk ir apskatīti notikumi pēc notikumu tipa: ātruma, lidojuma trajektorijas un lidmašīnas novietojumu pret lidojuma horizontālo asi (3.6 tabulā).

Tabula 3.6: Korelāciju tabula blokstundām un lidojumu darba stundām pret a) lidmašīnas pozu jeb attiecību pret virziena asīm aprakstošie notikumi, b) lidojuma trajektoriju aprakstošie notikumi un c) ātrumu aprakstošie notikumi. Dati reprezentē tikai otrā pilota (FO1) veiktos lidojumus galvenā pilota pozīcijā

	Lidmašīnas poza	Lidojuma trajektorija	Ātrums
Tekošās dienas blokstundas	0.127	0.088	0.070
Tekošās dienas lidojumu darba stundas	0.103	0.072	0.166
Lidojumu darba stundas 7 dienām	0.085	0.076	-0.062
Blokstundas 28 dienām	-0.094	0.146	-0.033
Lidojumu darba stundas 28 dienām	-0.070	0.185	-0.046
1 akumulētās dienas blokstundas	0.122	0.142	0.112
2 akumulēto dienu blokstundas	0.072	0.106	0.105
3 akumulēto dienu blokstundas	0.057	0.054	0.042
4 akumulēto dienu blokstundas	0.049	0.079	-0.026
5 akumulēto dienu blokstundas	0.075	-0.017	-0.056
6 akumulēto dienu blokstundas	0.024	0	-0.058
7 akumulēto dienu blokstundas	0.015	-0.006	-0.024
8 akumulēto dienu blokstundas	-0.004	0.004	0.005
9 akumulēto dienu blokstundas	-0.020	0.064	0.014
10 akumulēto dienu blokstundas	-0.060	0.072	-0.018

Lai arī pēc notikumu tipa apskatītajos datos ir veikti daudzi mērījumi, starp visiem aprē-

ķinatajiem ir tikai viens nozīmīgs korelācijas koeficients – lidojuma trajektorijas korelācija ar akumulētu lidojuma darba stundu skaitu 28 dienās. Tāpēc jādomā, ka nogurums neietekmē lidojumu parametru datus tādā mērā, lai būtu pamats veikt korekcijas lidojumu darba laiku plānošanā.

Šie ir tikai daži no iespējamajiem veidiem kā analizēt lidojumu parametru datus akumulētā noguruma riska noteikšanai. Gan pētamo faktoru, gan apskatamo parametru skaits ir daudz lielāks un šajā nodaļā tika veikts tikai neliels ievads noguruma datu procesēšanas izvērtēšanā.

## Secinājumi

Darba izstrādes gaitā tika pilnveidotas metodes, ar kuru palīdzību apvienot akumulētā apkalpes noguruma faktorus ar lidojumu datu parametru analīzes rezultātiem.

Pētot reālus lidojumu operāciju datus 2013. kalendārajam gadam, bija iespējams atpazīt tos procesus, kas būs aktuāli arī turpmākajiem datiem, kā arī novērtēt tās datu īpašības, kas ir mainījušās vai guvušas lielāku aktualitāti, piemēram, lidmašīnu flote ir sarukusi no 4 līdz 2 lidaparātu tipiem, nakšņošanas ārpus Rīgas šobrīd sastāda daudz lielāku daļu no datiem, kā tas bija iepriekš, ir mainījušās lidojumu plānošanas procedūras utt.

Novērtējot sakarības starp akumulētā noguruma faktoriem un lidojuma parametriem (notikumu nozīmību, nosēšanās leņķiem, vertikālo paātrinājumu), tika secināts, ka gan korelācijas koeficienti, gan regresiju novērtējumi lielāku pozitīvo sakarību uzrāda otro pilotu vadītajos lidojumos, kamēr kapteiņiem tie paši faktori lidojumu parametrus neietekmē vai arī sakarība ir negatīva. Tas norāda uz pieredzes līmeņa atšķirībām starp kapteiņiem un otrajiem pilotiem.

Šajā pētījumā nācies saskarties ar to, ka lieli datu apjomi (vairāk kā 43 tūkstoši lidojumu) ne vienmēr ļauj objektīvāk novērtēt tendences. Korelācijas koeficientu aprēķiniem un nozīmības pētīšanai vajadzēja ievērojami samazināt izlašu lielumus. Tajā pašā laikā tas ļauj izstrādāt metodes individuālu pilotu nogurumu līmeņa pētījumiem nākotnē.

# Izmantotā literatūra un avoti

- [1] IATA. Fatigue risk management system (frms) implementation guide for operators, 2011.
- [2] EASA. Questions and answers on the new eu fatigue management regulation for commercial air transport (cat) with aeroplanes, 2014.
- [3] Phil Barton Ashok N. Srivastava. First annual report. nasa-easjet collaboration on the human factors monitoring program (hfmp) study, 2010.
- [4] Phil Barton Ashok N. Srivastava. Second annual report. nasa-easjet collaboration on the human factors monitoring program (hfmp) study, 2012.
- [5] Beatge M.M. Acomb D. Foushee C.H., Lauber J.K. Crew factors in flight operations: Iii. the operational significance of exposure to short-haul air transport operations. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 88322, 1986.
- [6] Official Journal of the European Union. Subpart q flight and duty time limitations and rest requirements, 2008.
- [7] EASA. Good practice on the oversight of fdm programmes, 2015.
- [8] Abbt M. Limpert E., Stahel W. Log-normal distributions across the sciences: Keys and clues. *BioScience*, 51 (5), 2001.
- [9] Balakrishnan N. Johnson N. L., Kotz S. *Continuous Univariate Distributions, Volume 1*. Wiley, 1994.
- [10] Coles S. *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer-Verlag, 2001.
- [11] A. W. van der Vaart. *Asymptotic Statistics*. 1998.
- [12] Popovich P. M. Chen P. Y. *Correlation: Parametric and nonparametric measures*. Sage Publications, 2002.
- [13] Freedman David A. *Correlation: Parametric and nonparametric measures*. Cambridge University Press, 2005.
- [14] Lehmann E .L. *Testing Statistical Hypotheses*. John Wiley and Sons, 1959.
- [15] Lehmann E .L. Hodges J. L. The efficiency of some nonparametric competitors of the t-test. *The Annals of Mathematical Statistics*, 27(2), 1956.

# A Izveidoto programmu kods

## REGRESIJA

```
data_q<- read.csv2(file='flights_q.csv',sep=';',header=T)
data_b<- read.csv2(file='flights_b.csv',sep=';',header=T)
#####
n<-11
pdf(paste("plot_", "flights_q", ".pdf", sep = ""))
t<-function(n)
{
  par(mfrow=c(2,2))
  plot(data_q[,n],data_q[,171],xlab=colnames(data_q)[n],
        ylab=colnames(data_q)[171],col="grey")
  x.dati<-data_q[,n]
  y.dati<-data_q[,171]
  fun.nw<-function(x,x.dati,y.dati,h)
  {
    sum(dnorm((x-x.dati)/h)*y.dati)/sum(dnorm((x-x.dati)/h))
  }
  fun.nw<-Vectorize(fun.nw,vectorize.args="x")
  xx2<-seq(min(x.dati),max(x.dati),by=0.1)
  hh<-dpill(x.dati,y.dati)
  lines(xx2,fun.nw(xx2,x.dati,y.dati,hh),lwd=2,col="blue")

  plot(data_q[,n],data_q[,172],xlab=colnames(data_q)[n],
        ylab=colnames(data_q)[172],col="grey")
  x.dati<-data_q[,n]
  y.dati<-data_q[,172]
```

```

fun.nw<-function(x,x.dati,y.dati,h)
{
sum(dnorm((x-x.dati)/h)*y.dati)/sum(dnorm((x-x.dati)/h))
}
fun.nw<-Vectorize(fun.nw,vectorize.args="x")
xx2<-seq(min(x.dati),max(x.dati),by=0.1)
hh<-dpill(x.dati,y.dati)
lines(xx2,fun.nw(xx2,x.dati,y.dati,h),lwd=2,col="blue")
plot(data_q[,n],data_q[,173],xlab=colnames(data_q)[n],
ylab=colnames(data_q)[173],col="grey")
x.dati<-data_q[,n]
y.dati<-data_q[,173]

```

```

fun.nw<-function(x,x.dati,y.dati,h)
{
sum(dnorm((x-x.dati)/h)*y.dati)/sum(dnorm((x-x.dati)/h))
}
fun.nw<-Vectorize(fun.nw,vectorize.args="x")
fun.nw
xx2<-seq(min(x.dati),max(x.dati),by=0.1)
hh<-dpill(x.dati,y.dati)
lines(xx2,fun.nw(xx2,x.dati,y.dati,h),lwd=2,col="blue")
plot(data_q[,n],data_q[,175],xlab=colnames(data_q)[n],
ylab=colnames(data_q)[175],col="grey")
x.dati<-data_q[,n]
y.dati<-data_q[,175]

```

```

fun.nw<-function(x,x.dati,y.dati,h)
{
sum(dnorm((x-x.dati)/h)*y.dati)/sum(dnorm((x-x.dati)/h))
}
fun.nw<-Vectorize(fun.nw,vectorize.args="x")
fun.nw
xx2<-seq(min(x.dati),max(x.dati),by=0.1)

```

```

hh<-dpill(x.dati,y.dati)
lines(xx2,fun.nw(xx2,x.dati,y.dati,hh),lwd=2,col="blue")
}
for (n in 11:20)
{
t(n)
}
dev.off()

```

## KORELĀCIJU KOEFICIENTI UN KORELĀCIJU TESTI

```

data_c<- read.csv2(file='events_c.csv',sep=';',header=T)
data_c<-head(data_c,100)
data_f<- read.csv2(file='events_f.csv',sep=';',header=T)
data_f<-head(data_f,100)
data_c_75<- read.csv2(file='events_c_75.csv',sep=';',header=T)
data_c_75<-head(data_c_75,100)
data_f_75<- read.csv2(file='events_f_75.csv',sep=';',header=T)
data_f_75<-head(data_f_75,100)
i<-22
v<-c(0)
#####
for ( i in 22:80)
{
v[1]<-cor(data_c[,13],data_c[,i])
v[2]<-cor(data_f[,13],data_f[,i])
v[3]<-cor(data_c_75[,13],data_c_75[,i])
v[4]<-cor(data_f_75[,13],data_f_75[,i])
print(v,digits=4)
}
i<-22
v<-c(0)
#####
for ( i in 22:80)
{

```

```

v[1]<-cor.test(data_c[,13],data_c[,i)][[3]]
v[2]<-cor.test(data_f[,13],data_f[,i)][[3]]
v[3]<-cor.test(data_c_75[,13],data_c_75[,i)][[3]]
v[4]<-cor.test(data_f_75[,13],data_f_75[,i)][[3]]
print(v,digits=4)
}

```

## ANOVA UN KRUSKAL-WALLIS DISPERSIJU ANALĪZE

```

data_q<- read.csv2(file='flights_q.csv',sep=';',header=T)
data_b<- read.csv2(file='flights_b.csv',sep=';',header=T)
n<-176
data_q[,176]<- factor(data_q[,176])
pdf(paste("plot_", "flights_q2", ".pdf", sep = ""))
t<-function(n)
{
par(mfrow=c(2,2),mai=c(0.7,0.7,0.2,0.2))
boxplot(data_q[,171]~data_q[,n],ylab="Maksimālais nosēšanās leņķis",
xlab="Lidojuma kārtas numurs",col="grey")
anov171<-aov(data_q[,171]~data_q[,n])
kw171<-kruskal.test(data_q[,171]~data_q[,n])
boxplot(data_q[,172]~data_q[,n],ylab="Minimālais nosēšanās leņķis",
xlab="Lidojuma kārtas numurs",col="grey")
anov172<-aov(data_q[,172]~data_q[,n])
kw172<-kruskal.test(data_q[,172]~data_q[,n])
boxplot(data_q[,173]~data_q[,n],ylab="Vertikālais paātrinājums",
xlab="Lidojuma kārtas numurs",col="grey")
anov173<-aov(data_q[,173]~data_q[,n])
kw173<-kruskal.test(data_q[,173]~data_q[,n])
boxplot(data_q[,175]~data_q[,n],ylab="Notikumu nozīmība",
xlab="Lidojuma kārtas numurs",col="grey")
anov175<-aov(data_q[,175]~data_q[,n])
kw175<-kruskal.test(data_q[,175]~data_q[,n])

par(mfrow=c(2,2))

```

```

print(summary(anov171))
print(summary(anov172))
print(summary(anov173))
print(summary(anov175))
print((kw171))
print((kw172))
print((kw173))
print(kw175)
}
for (n in 176:176)
{
t(n)
}
dev.off()
#####
pdf(paste("plot_tukey_", "flights_q2", ".pdf", sep = ""))
par(mfrow=c(2,2), mai=c(0.35,0.7,0.7,0.2))
tky1<-TukeyHSD(aov(data_q[,171]~data_q[,176]))
print(tky1,digits=3)
plot(tky1)
tky2<-TukeyHSD(aov(data_q[,172]~data_q[,176]))
print(tky2,digits=3)
plot(tky2)
tky3<-TukeyHSD(aov(data_q[,173]~data_q[,176]))
print(tky3,digits=3)
plot(tky3)
tky4<-TukeyHSD(aov(data_q[,175]~data_q[,176]))
print(tky4,digits=3)
plot(tky4)
dev.off()
#####
n<-176
pdf(paste("plot_", "flights_b2", ".pdf", sep = ""))
t<-function(n)

```

```

{
par(mfrow=c(2,2))
boxplot(data_b[,171]~data_b[,n],ylab=colnames(data_b)[171],
xlab=colnames(data_b)[n],col="grey")
anov171<-aov(data_b[,171]~data_b[,n])
kw171<-kruskal.test(data_b[,171]~data_b[,n])
boxplot(data_b[,172]~data_b[,n],ylab=colnames(data_b)[172],
xlab=colnames(data_b)[n],col="grey")
anov172<-aov(data_b[,172]~data_b[,n])
kw172<-kruskal.test(data_b[,172]~data_b[,n])
boxplot(data_b[,173]~data_b[,n],ylab=colnames(data_b)[173],
xlab=colnames(data_b)[n],col="grey")
anov173<-aov(data_b[,173]~data_b[,n])
kw173<-kruskal.test(data_b[,173]~data_b[,n])
boxplot(data_b[,175]~data_b[,n],ylab=colnames(data_b)[175],
xlab=colnames(data_b)[n],col="grey")
anov175<-aov(data_b[,175]~data_b[,n])
kw175<-kruskal.test(data_b[,175]~data_b[,n])

par(mfrow=c(2,2))
print(summary(anov171))
print(summary(anov172))
print(summary(anov173))
print(summary(anov175))
print((kw171))
print((kw172))
print((kw173))
print(kw175)
}
for (n in 176:177)
{
t(n)
}
dev.off()

```

## SADALĪJUMA NOTEIKŠANA LIDOJUMU PARAMETRIEM

```
library(MASS)
library(ismev)
library(QRM)
library(evir)
library(nortest)
data_b<- read.csv2(file='flights_b.csv',sep=';',header=T)
data_q<- read.csv2(file='flights_q.csv',sep=';',header=T)
data_bg<-data_b[,173]
h<-hist(data_bg,breaks=50)
xhist<-c(min(h$breaks),h$breaks)
yhist<-c(0,h$density,0)
xfit<-seq(min(data_bg),max(data_bg),length=50)
yfit<-dnorm(xfit,mean(data_bg),sd(data_bg))

yfit2<-dlnorm(xfit,meanlog=0.272281355,sdlog= 0.077610634)
yfit3<-dgev(xfit,xi=-0.09185179,mu=1.27265128,sigma=0.09123405)

pdf(paste("plot_","values1",".pdf",sep = ""))
par(mfrow=c(2,2))

plot(xhist,yhist,col="red",type="s",lwd=2,ylim=c(0,max(yhist,yfit)),
xlab="Vertikālais paātrinājums (g)",ylab="")
lines(xfit,yfit,col="black",lwd=2)
lines(xfit,yfit2,col="green",lwd=2)
lines(xfit,yfit3,col="brown",lwd=2)

qqplot(data_bg,rnorm(n=10000,mean(data_bg),sd(data_bg)),
xlab="Normālais sadalījums",ylab="")
abline(0,1)
qqplot(data_bg,rlnorm(n=10000,meanlog=0.272281355,sdlog= 0.077610634),
xlab="Lognormālais sadalījums",ylab="")
abline(0,1)
```

```

qqplot(data_bg,rgev(n=10000,xi=-0.09185179,mu=1.27265128,
sigma=0.09123405),xlab="Vispārīgais ekstrēmo vērtību sadalījums",
ylab="")
abline(0,1)
dev.off()

fitdistr(data_bg,densfun="lognormal")
fit.GEV(data_bg)

pdf(paste("plot_", "values2", ".pdf", sep = ""))
par(mfrow=c(2,3))
h<-hist(data_b[,171],breaks=50,main="",ylab="",xlab="B737 maksimālais
nosēšanās leņķis")
h<-hist(data_b[,172],breaks=50,main="",ylab="",xlab="B737 minimālais
nosēšanās leņķis")
h<-hist(data_b[,173],breaks=50,main="",ylab="",xlab="B737 vertikālais
paātrinājums")
h<-hist(data_q[,171],breaks=50,main="",ylab="",xlab="DHC 8-Q400
maksimālais nosēšanās leņķis")
h<-hist(data_q[,172],breaks=50,main="",ylab="",xlab="DHC 8-Q400
minimālais nosēšanās leņķis")
h<-hist(data_q[,173],breaks=50,main="",ylab="",xlab="DHC 8-Q400
vertikālais paātrinājums")
dev.off()

```

Maģistra darbs “Akumulētā apkalpes noguruma un citu faktoru ietekme uz lidojumu parametru vērtībām” izstrādāts LU Fizikas un Matemātikas fakultātē.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autors: Maija Ludborža

\_\_\_\_\_  
(paraksts) (datums)

Rekomendēju darbu aizstāvēšanai.

Vadītājs: asoc. prof. Jānis Valeinis

\_\_\_\_\_  
(paraksts) (datums)

Recenzents:

\_\_\_\_\_  
(paraksts) (datums)

Darbs iesniegts Matemātikas nodaļā \_\_\_\_\_

(datums)

\_\_\_\_\_  
(darbu pieņēma)

Darbs aizstāvēts maģistra gala pārbaudījuma komisijas sēdē

\_\_\_\_\_ prot. Nr. \_\_\_\_\_, vērtējums \_\_\_\_\_

(datums)

Komisijas sekretārs/-e: \_\_\_\_\_

(Vārds, Uzvārds)

(paraksts)