



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Mehaanika ja tööstustehnika instituut

**EESTIS TEGUTSEVATE LENNULIINIDE
KASVUHOONEGAASIDE EMISSIOONIDE
OPTIMEERIMISE STSENAARIUMID**

**SCENARIOS FOR OPTIMIZING GREENHOUSE GAS
EMISSIONS OF AIRLINES OPERATING IN ESTONIAN AIR
TRAFFIC**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Markus Paabus

Üliõpilaskood: 221344EALM

Juhendaja: Kati Kõrbe, PhD

Tallinn 2024

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

(kuupäev digiallkirjas)

Autor: Markus Paabus

(allkirjastatud digitaalselt)

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

(kuupäev digiallkirjas)

Juhendaja: Kati Kõrbe, PhD

(allkirjastatud digitaalselt)

Kaitsmisele lubatud

(kuupäev digiallkirjas)

Kaitsmiskomisjoni esimees Ott Koppel, PhD

(allkirjastatud digitaalselt)

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, **Markus Paabus** (18.06.1998)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose
Eesti lennuliikluses tegutsevate lennuliinide kasvuhoonegaaside emissioonide optimeerimise stsenaariumid

mille juhendaja on **Kati Kõrbe, PhD,**

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

(allkirjastatud digitaalselt)

(kuupäev digiallkirjas)

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

TalTech Mehaanika ja tööstustehnika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Markus Paabusk, 221344EALM

Õppekava, peeriala: EALM02/22, logistika ja tarneahela juhtimine

Juhendaja: kaasprofessor Kati Kõrbe, PhD, Tallinna Tehnikaülikool

Lõputöö teema:

Eestis tegutsevate lennuliinide kasvuhoonegaaside emissioonide optimeerimise stsenaariumid
Scenarios for optimizing greenhouse gas emissions of airlines operating in Estonian air traffic

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Tuvastada Tallinna Lennujaama läbivate lennukite süsinikuefektiivsused ja lendudest tekkinud süsiniku kulu.
2. Leida meetod, kuidas saaks Tallinna Lennujaam suunata lennuliine vähendama oma süsinikujalajälge.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Magistritöö teema valimine	08.12.2023
2.	Materjali kogumine ja teooria kirjutamine	10.03.2024
3.	Metoodika kirjeldamine ja andmete kogumine	10.04.2024
4.	Andmete töötlemine ja analüüs	17.04.2024
5.	Järelduste ja tegevuskava loomine	24.04.2024
6.	Lõputöö kaitsmine	28.05.2024

Töö keel: eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: 20.05.2024.a

Üliõpilane: Markus Paabusk (allkirjastatud digitaalselt) (kuupäev digiallkirjas)

Juhendaja: Kati Kõrbe, PhD (allkirjastatud digitaalselt) (kuupäev digiallkirjas)

Programmijuht: Peep Tomingas (allkirjastatud digitaalselt) (kuupäev digiallkirjas)

SISUKORD

EESSÕNA	7
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	8
SISSEJUHATUS	10
1. TEOORIA	12
1.1 Kestlik areng lennundussektoris	12
1.1.1 Rahvusvahelise lennunduse süsinikdioksiidiheite kompenseerimise ja vähendamise süsteem	13
1.1.2 Euroopa Liidu heitkogustega kauplemise süsteem	15
1.2 Jätkusuutlikud meetmed lennunduses	18
1.2.1 Säästev lennukikütus	18
1.2.2 Innovatsioon lennukite tehnoloogias	21
1.2.3 Alternatiivkütused	23
1.2.4 Infrastruktuur ja operatiivtäiustused	26
1.3 Tallinna Lennujaama kestliku arengu eesmärgid	30
2. METOODIKA	34
2.1 Uurimisstrateegia	34
2.2 Stsenaariumite kirjeldus	36
2.3 Uuringu valim	38
2.4 Andmekogumismeetodid	40
2.5 Analüüsimeetodid	42
2.6 Lennujaama tasud	48
3. ANALÜÜS JA TULEMUSED	52
3.1 Kvantitatiivse osa analüüs	52
3.1.1 Ülevaade Eesti lennuliikluses osalevate lennuliinide hetkeolukorrast	52
3.1.2 Tallinn-Kopenhaagen liin	56
3.1.3 Riia-Tallinn liin	59
3.1.4 Tallinn-Stockholm liin	63
3.1.5 Varssavi-Tallinn liin	65
3.1.6 Tallinna Lennujaama CO2 emissiooni tasu	68
3.2 Kvalitatiivse osa analüüs	69
3.3 Järeldused ja ettepanekud	70
KOKKUVÕTE	72
SUMMARY	75
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	77
LISAD	89

Lisa 1 Intervjuu küsimustik	89
Lisa 2 Lennukite CO2 emissioonid, transiidiajad, kütusekulud	90
Lisa 3 Lennukite tehnilised andmed	91
Lisa 4 Nelja stsenaariumi süsiniku kulud tonnkilomeetri kohta	92
Lisa 5 Nelja stsenaariumi süsiniku kulude summad eurodes	93

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö pealkiri on „Eestis tegutsevate lennuliinide kasvuhoonegaaside emissioonide optimeerimise stsenaariumid.“

Magistritöö uurimisprobleem seisneb asjaolus, et puudub teadmine, millised Tallinna Lennujaama läbivad lennukid on süsinikuefektiivsed ja kuidas saaks lennujaam kehtestada süsiniku tasu, et suunata lennuliine vähendama kasvuhoonegaaside emissioone.

Töö eesmärk on selgitada, kuidas saaks Tallinna Lennujaam aidata lennuliine kasvuhoonegaaside heitkoguseid piirata. Selle kaudu uurida lennukite süsiniku efektiivsust ja lendudest tekkinud süsiniku kulu. Seejärel luua kolm stsenaariumit, mis näitavad kui palju peaksid lennuliinid optimeerima CO₂ emissioone, et vähendada süsiniku kulusid. Nende andmete abil koostada arvutamismudel, millega saab Tallinna Lennujaam tasustada lennukitest emiteeritud CO₂ koguseid. Selle abil saavutades nii lennujaama kui ka lennuliinide kliimaeesmärgid. Püstitatud uurimistöö eesmärgi saavutamiseks kasutab autor töö koostamisel nii kvantitatiivset kui ka kvalitatiivset meetodit. Kvantitatiivse uurimismeetodi puhul kasutab autor andmeanalüüsi meetodeid. Kvalitatiivse osana viib autor läbi poolstruktureeritud ekspertintervjuu Tallinna Lennujaama keskkonnaspetsialistiga.

Autor soovib tänada väärtusliku aja ja sisendinfo andmise eest Tallinna Lennujaama keskkonnaspetsialisti, Carolina Sinisalu. Samuti tänan minu juhendajat, Kati Kõrbe Kaaret, kes andis juhtnööre ja aitas juhendada antud magistritööd.

Märksõnad: lennuliin, Tallinna Lennujaam, jätkusuutlikkus, lennundus, magistritöö

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

ACA - Airport Carbon Accreditation

A-CDM - Lennujaama ühisotsuste tegemine (inglise keeles airport collaborative decision-making)

ADS-B - Automatic Dependent Surveillance - Broadcast

ATJ - Alcohol-to-Jet

BWB - Segatud tiivakere disain (inglise keeles blended-wing-body design)

CCD tsükkel -Tõusu, kruisi ja lähenemise lendamise faasid (inglise keeles cruise)

CO₂ - Süsinikdioksiid (inglise keeles carbon dioxide)

CORSIA - Rahvusvahelise lennunduse süsinikdioksiidiheite kompenseerimise ja vähendamise süsteem (inglise keeles Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation)

EUA - Lubatud heitkoguse ühik (inglise keeles European Emission Allowance)

EU ETS - Euroopa Liidu heitkogustega kauplemise süsteem (inglise keeles European Union Emissions Trading Scheme)

HEFA - Estrite ja rasvhapete hüdrotootlemine (inglise keeles hydroprocessing of esters and fatty acids)

HFS - Kääritatud suhkru hüdrotootlemine (inglise keeles hydroprocessing of fermented sugars)

IATA - Rahvusvaheline Lennutranspordi Ühendus (inglise keeles International Air Transport Association)

ICAO - Rahvusvahelise Tsiviillennunduse Organisatsioon (inglise keeles International Civil Aviation Organization)

LLO - Lennuliinid ja lennuliinide operaatorid (inglise keeles airlines and the airline operators)

LTO tsükkel - Ruleerimise, õhkutõusu, maandumise lendamise faasid (inglise keeles landing and take off)

MTOW - Maksimaalne stardimass (inglise keeles maximum take-off mass)

NOx - Lämmastikoksiid (inglise keeles nitrogen oxides)

PBN - Jõudluspõhine navigeerimine (inglise keeles performance-based navigation)

RNP - Required Navigation Performance

SAF - Säästev lennukikütus (inglise keeles sustainable aviation fuel)

SESAR - Single European Sky ATM Research

TKM - Tonnikilomeeter (inglise keeles tonne-kilometre)

SISSEJUHATUS

Ülemaailmselt on lennunduse valdkonnas viimasel kahel kümnendil hakatud reguleerima kasvuhoonegaaside heitkoguseid, mis tekivad õhutranspordist. Õhutransport on kõige saastavam transpordiliik, moodustades 2 protsenti kogu maailma emiteeritud kasvuhoonegaasidest. Sellest tulenevalt on probleemi lahendamiseks lennuliinid ja lennujaamad seadnud peamiseks eesmärgiks piirata kasvuhoonegaase heitkoguseid ja saavutada süsinikuneutraalsuse.

Lennundussektori kasvuhoonegaaside tõusu takistamiseks on loodud rahvusvahelised algatused, mis sunnivad kogu sektorit oma süsiniku jalajälge vähendama. CORSIA ja EU ETS aitavad reguleerida sektori siseseid kasvuhoonegaase, tuginedes Pariisi kliimakokkuleppele piirata keskmise temperatuuri tõusu alla kahe kraadi. Meetmed haaravad säästva lennukikütuse kasutamist, innovaatiliste tehnoloogiate kasutusele võtmist, alternatiivkütuseid ja infrastruktuuride ning operatiivseid täiustusi.

Rahvusvahelised algatused mõjutavad ka Eesti lennuliikluses tegutsevaid lennuliine. Enamus Eesti lennuliiklusest läbib Tallinna Lennujaama, mis on seadnud oma eesmärgiks saavutada 2025. aastaks süsinikuneutraalsuse. Samuti töötab lennujaam koos partneritega, et aidata nende süsinikujalajälge vähendada. Töö autor soovib tuvastada võimalusi, kuidas on võimalik Tallinna Lennujaamal lennuliinide kasvuhoonegaaside heitkoguseid piirata. Selle kaudu uurides lennukite süsiniku efektiivsust ja lendudest tekkinud süsiniku kulu. Seejärel luua kolm stsenaariumit, mis näitavad kui palju peaksid lennuliinid optimeerima CO₂ emissioone, et vähendada süsiniku kulusid. Nende andmete abil koostada arvutamismudel, millega saab Tallinna Lennujaam tasustada lennukitest emiteeritud CO₂ koguseid. Selle abil saavutades nii lennujaama kui ka lennuliinide kliimaeesmärgid.

Käesoleva magistr töö uurimisprobleem on, et Tallinna Lennujaamal puudub teadmised, millised Tallinna Lennujaama läbivad lennukid on süsinikuefektiivsed ja kuidas saaks lennujaam kehtestada süsiniku tasu, et suunata lennuliine vähendama kasvuhoonegaaside emissioone. Töö eesmärk on luua uus lennujaama tasuliik, millest Tallinna Lennujaam teeniks tulu ja suunaks lennuliine vähendama oma süsinikujalajälge.

Lähtuvalt töö eesmärgist, püstitas autor neli uurimisküsimust. Need on järgnevad:

1. Milliste lennuliinide kasutuses olevad lennukimudelid on kõige jätkusuutlikumad lendudel, mis läbivad Tallinna Lennujaama?
2. Millistes stsenaariumites suudavad lennuliinid oma lennukimudelite valikute pealt säästa kõige rohkem transpordikulusid rakendades Euroopa Liidu heitkogustega kauplemise süsteemi printsiipe?
3. Kuidas saaks Tallinna Lennujaam optimeerida lennuliini põhiselt lennujaama tasusid?
4. Millise mudeliga/valemiga saab arvutada CO₂ emissiooni tasu Tallinna Lennujaamas?

Uurimistöö eesmärgi täitmiseks kasutas autor eelkõige kvantitatiivset meetodit, kuid ka kvalitatiivset meetodit, et toetada töö kvantitatiivset osa. Kvalitatiivse osana viib autor läbi intervjuu Tallinna Lennujaama keskkonnaspetsialistiga. Intervjuu abil saab töö autor valideerida uurimisprobleemi olemasolu ja toetada järelduste tegemist.

Antud lõputöö koosneb kolmest peatükist. Esimene peatükk koosneb kirjanduse ülevaatest. Ülevaates tuuakse välja rahvusvahelised algatused, mis mõjutavad lennundussektorit ja meetmed, mis aitavad süsinikuneutraalsuse eesmärkide saavutamiseks. Samuti räägitakse Tallinna Lennujaamast ja nende kestlikku arengukava ning kuidas selle abil vähendada lennuliinide kasvuhooonegaaside heitkoguseid. Töö teises osas selgitatakse uuringu läbiviimist. Siinkohal kirjeldatakse milliseid kvantitatiivsete andmete allikaid töö autor kasutas ja kuidas uuring läbi viiakse. Lisaks kirjeldatakse uuringu valimit ja kvalitatiivset osa. Seal selgitatakse, millisel viisil viidi läbi intervjuu töö kvalitatiivse osana. Kolmandas peatükis tuuakse välja kvantitatiivse osa tulemused ja intervjuu kokkuvõte. Lisaks sisaldab viimane osa autori järeldusi ja ettepanekuid.

1. TEOORIA

1.1 Kestlik areng lennundussektoris

Viimase 10 aasta jooksul on lennundusest tulenevate heitmete maht suurenenud ligikaudu 15 protsendi võrra, mis on tekitanud muret nii keskkonnaekspertide kui ka erinevate riikide valitsusorganites. Euroopa Liidu lennundussektorit mõjutavad täna umbes kolmkümmend emissioone reguleerivat erinevat meetet. Peamiselt reguleerivad meetmeid Rahvusvahelise Tsiviillennunduse Organisatsioon (ICAO). "*Sustainable development is one of the greatest challenges and opportunities facing the aviation industry in the 21st century.*" Seda siiski vaatamata asjaolule, et lennundustööstus on viimase aastakümne jooksul investeerinud ligikaudu 5 miljardit eurot süsiniku jalajälje vähendamisele. Siiski on vaja täiendavaid tehnoloogilisi ja operatiivseid muudatusi, et vähendada lennundusest tekkinud kasvuhooonegaase. (European Aviation Safety Agency 2013)

Lennundussektorist tulenevad kasvuhooonegaasid moodustavad 2-3 protsenti ülemaailmsest kasvuhooonegaaside emissioonidest. Sellest tulenevalt on lennuliinid ja lennujaamad hakanud rakendama meetmeid oma süsiniku jalajälje vähendamiseks. Lennujaamades on hakatud ehitama elektrilaadimisjaamu, kasutama ehitistes ja lennuradadel keskkonnasõbralike ja taaskasutatavaid ehitusmaterjale. Lennuliinid üritavad kaasata ka reisijaid oma süsiniku jalajälje vähendamiseks. USA-s 2017. aastal uuringu tulemusel küsiti 725 reisija käest, kui palju reisijad sooviksid maksta rohkem lennupileti eest, et lennuliinid kasutaksid lendudel rohkem biokütust. Keskmiselt olid reisijad nõus tasuma kuni 13 protsenti rohkem pileti eest raha, kui nende lennud oleksid rohkem säästlikumad. (Forbes 2019) Lufthansa ja veel kuus lennuliin on 2023. aastal tutvustanud rohelised lennupiletid reisijatele. Kuigi hetkel ainult 3 protsenti reisijatest ostavad lisatasu eest neid pileteid, siiski prognoositakse trendi, et püsivalt peaks see 2 protsendi võrra igal aastal kasvama. Nõudluse suurenemine näitab, et reisijad on aina enam huvitatud jätkusuutlikumalt reisima. (Lufthansa 2023)

IATA prognoosib, et ülemaailmselt on vaja investeerida 5 trillion dollarit, et saavutada süsinikuneutraalsust 2050. aastaks. See tähendaks, et igal aastal tuleks lennundussektorisse investeerida 180 miljardit dollarit. (IATA 2022) Sellepärast prognoositakse, et Euroopa sisestel lendudel tõstetakse 2024. aastal keskmiselt lennupileti hinda 8 euro võrra. Usutakse, et kahe aasta pärast võib piletihind võib juba tõusta 30 euro võrra. Kaudselt mõjutavad hindade tõusu kaks meetet, mida rakendatakse ülemaailmselt. EU ETS ja CORSIA, mille peamine eesmärk on reguleerida lennundussektori kasvuhooonegaaside emissioone. (Bloomberg 2024)

1.1.1 Rahvusvahelise lennunduse süsinikdioksiidiheite kompenseerimise ja vähendamise süsteem

Rahvusvahelise lennunduse süsinikdioksiidiheite kompenseerimise ja vähendamise süsteem (CORSIA) on ICAO poolt vastu võetud ülemaailmne meede rahvusvahelise lennunduse süsinikdioksiidiheite kompenseerimiseks. (Euroopa Liidu Nõukogu ja Euroopa Ülemkogu 2022)

CORSIA on esimene ülemaailmne turupõhine meede mis tahes sektori jaoks ja esindab koostööl põhinevat lähenemisviisi. Meede kiideti heaks 2016. aastal, mille rahvusvahelised standardid võeti vastu lisana Chicago konventsioonile, mida kõik ICAO 193 liikmesriiki peavad rakendama alates 2019. aastast. (IATA 2023a)

CORSIA kohustab liikmesriikidel teavitada liidus asuvaid lennuliine ja lennuliinide operaatoreid (LLO) CORSIA kompenseerimisnõuetest kooskõlas oma rahvusvaheliste kohustustega ICAO-s. Vastu võetud kompenseerimise kava aitab saavutada 2050. aastaks lubatud kliimaneutraalsuse. (Euroopa Liidu Nõukogu ja Euroopa Ülemkogu 2022a)

Fly Net Zero lubadus kiideti heaks IATA 77. aastakoosolekul 2021. aastal kliimaneutraalsuse saavutamiseks. Antud lubadus aitab viia lennutranspordi eesmärgid kooskõlla Pariisi kliimakokkuleppe poolt sätestatud eesmärkidega, piirata keskmise temperatuuri tõusu 2 kraadi alla tööstusrevolutsioonieelse tasemest. Samuti teha pingutusi selle nimel, et temperatuuri tõus võrreldes tööstusrevolutsioonieelse tasemega piirduks üksnes 1,5 kraadiga. Eesmärgi saavutamiseks on vaja kogu lennundustööstuse (lennufirmad, lennujaamad, aeronavigatsiooniteenuste pakkujad, tootjad) ja kohaliku valitsuse efektiivset koostööd. (IATA 2023b)

CORSIA tegevuskava on jaotatud kolme faasi. Piloodi faas kestab 2021.a-2023.a vahemikus ja esimene faas 2024.a-2026.a vahemikus. Mõlemad faasid on vabatahtlikud kõikidele ICAO liikmesriikidele. Teine faas kestab 2027.a-2035.a, mis on kõikidele liikmesriikidele kohustuslik, välja arvatud juhul kui liikmesriik langeb kahe erandi alla. Esimene erand - kui liikmesriigi käive tonnkilomeetri osalus globaalsest kogu käive tonnkilomeetri osalusest jääb alla 0,5 protsendi. Teine erand - kui liikmesriik ei kuulu olemasolevasse loendisse, mille riigid moodustavad kokku 90% kogu käive tonnkilomeetri osalusest. (ICAO 2022a)

CORSIA kohustab liikmesriike osalema heitkoguste seires, aruandluses ja tõendamises. Peamine eesmärk on hoida kasvuhoonegaaside summaarset kogust alla 2020. aasta taseme kogu summast ja samal ajal kasvuhoonegaaside vähendamise meetmeid arendada. Süsteem on mõeldud kasvuhoonegaaside vähendamiseks rahvusvahelistel lendudel. Kõik lennuliinid, kelle aastase heitkoguste summa ületab 10 000 tonni CO₂ on kohustatud raporteerima emissioone kõikidelt rahvusvahelistelt lendudelt. Lennuliinid peavad iga individuaalse lennu CO₂ arvutamiseks jälgima täpset kütusekulu. (IATA 2023c)

Süsinikdioksiidiheitmete kompenseerimine on ettevõtte tegevus, mille eesmärk on kompenseerida oma heitkoguseid, rahastades heitkoguste vähendamist mujal. Kompenseerimine toimub süsinikukrediitide alusel, kus süsinikukrediidiks on kaubeldav sertifikaat või luba, millega ettevõtte tõendab, et neil on luba emiteerida ühte tonni süsinikdioksiidi või selle ekvivalenti. (Scheelhaase et al., 2018, 57)

Emissioonide vähendamiseks, võetakse kasutusele erinevaid meetodeid. Need on:

1. Taastuvad energiaallikad.
2. Puhta toiduvalmistamise tehnoloogia.
3. Metaani kogumine.
4. Puude, taimede istutamine.
5. Investeerimine emissioonide vähendamise projektidesse. (IATA 2023c)

Enam kui 80 protsenti lennuliinidest hetkel eelistavad investeerida emissioonide vähendamise projektidesse. Näiteks energiaprojektide kaudu CO₂ kompenseerimist. Sellisel juhul tagab projekti korraldav ettevõtte, et teatud koguses heitmeid on kompenseeritud. Teiseks on metsakaitse projektide kaudu CO₂ kompenseerimine. Tegemist on projektiga, mis peamiselt tegeleb konkreetsetes riigis koos kohaliku valitsusega, et vähendada metsade hävimist. Samuti veel on võimalik heitmeid kompenseerida ka taasmetsastamise projektide kaudu. Antud meetod on kõige populaarsem lennuliinide seas, kuna see on kõige kuluefektiivsem. Puude istutamisega on kõige vahetum meetod täpsete kompenseeritud emissioonide arvutamiseks. (Becken, Mackey 2017, 74)

Vaatamata eelnevatele lahendustele, siiski suunab CORSIA lennundussektorit investeerima uutesse tehnoloogiatesse ja infrastruktuuri ning arendama säästva lennukikütuse kasutuselevõttu lennukites. Need on peamised põhipunktid emissioonide vähendamisel. *Fly Net Zero* eesmärk on vähendada emissioone lennundussektori siseselt, kasutades emissioonide vähendamise projekte ajutise alternatiivse lahendusena. (IATA 2023c)

1.1.2 Euroopa Liidu heitkogustega kauplemise süsteem

Euroopa Liidu heitkogustega kauplemise süsteem (EU ETS) on kohustus, mille võtsid vastu kõik Euroopa Liidu liikmesriigid Pariisi kliimaleppe ratifitseerimisega. Eesmärk on vähendada 2030. aastaks kasvuhoonegaaside heitkogusid 40 protsendi võrra võrreldes 1990. aastaga. (Kliimaministerium 2023) EU ETS loodi 2005. aastal, mille esialgne eesmärk oli edendada kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamist majanduslikult tulemuslikul ja kulutõhusal viisil. Selle abil piiratakse kasvuhoonegaaside mahtu, mida energiamahukad tööstusharud, lennuettevõtjad ja energiatootjad võivad eraldada. (Euroopa Liidu Nõukogu ja Euroopa Ülemkogu 2019)

EU ETS põhineb piiramise ja kauplemise süsteemil, kus piiratakse lubatud heitkoguste üldist taset. Selle piires on süsteemis osalejatel võimalik lubatud heitkoguse ühikuid (EUA) osta ja müüa vastavalt vajadusele. (Kliimaministerium 2021) EU ETS mõjutab ainult Euroopa siseseid lende. Aluseks on võetud 95 protsenti 2004.a-2006.a lennutranspordist emiteeritud keskmise CO₂ emissioonide kogusest. See on määratud ülempiiriks, mida ei tohi EL liikmesriikide vaheliste lendude emissioonide kogusumma ületada iga aastaselt. EUA-sid jagatakse iga aastaselt kindlas koguses lennuliinidele, kus üks EUA on luba emiteerida 1 tonn väärt CO₂. (Maertens et al 2019, 3)

Süsteem toimib faasides, kus hetkel oleme 4. faasis, mis kestab 2021.a-2030.a. Lennundussektoris on jaotatud EUA-d kolmeks, kus 82 protsenti lubadest on jaotatud vastavalt lennuliini turuosale tasuta. See tähendab, et kuni 82 protsendi ulatuses määratud laest võib lennuliini operaator tasuta emiteerida CO₂. Järgmised 15 protsenti kaubeldakse oksjonil, kus kõige suurema summaga pakkuja saab osta juurde endale EUA-sid ühiku kaupa. Ülejäänud 3 protsenti pannakse kõrvale kiiresti kasvavatele ja uutele lennuliinidele. (European Commission 2021a)

Alates 2021. aastast iga aastaselt kahaneb EUA-de kogus 2,2 protsendi võrra. Selle eesmärk on kiirendada CO₂ emissioonide vähendamise protsessi. Samuti 2021. aastal jagati laiali 24,5 miljonit luba, millest 20,7 miljonit on tasuta ja 3,8 miljonit suunatakse oksjonile. (European Commission 2021a) Lennuliinid peavad iga aasta raporteerima oma kogu emissioonide hulka ja hoidma neid vastavalt neile jagatud EUA-de piirides. Kui ületatakse antud piir, siis rakendub trahv. Alates 2012. aastast on piirmääraks olnud 100 eurot ühe tonni CO₂ kohta. Antud piirmäär tõuseb iga aastaselt koos tarbijahinnaindeksiga. Ühe EUA alghind sõltub kindla ajahetke süsiniku keskmisest kauplemise hinnast. (European Commission 2021b)

EU ETS emissioonide arvestamisele ei kuulu mõned erandid. Need on:

1. ärilise lennutranspordi teostaja lennud, kes sooritab kolmel järjestikusel neljakuulisel perioodil vähem kui 243 lendu perioodi kohta või kelle iga-aastane heitkogus kokku on alla 10 000 tonni.
2. sõjaväe lennud, mida sooritatakse sõjalennukiga.
3. politsei ja tolli tegevusega seotud lennud.
4. lennud, mida sooritavad õhusõidukid, mille maksimaalne stardimass on alla 5700 kg. (Kliimaministerium 2023)

EU ETS kaudu teenitud tulu EUA-de müügist liigub lennuliini riigi eelarvesse. Liikmesriigid omakorda investeerivad neid taastuvate energiaallikatesse, energiatõhususe arendamisele ja vähese CO₂ heitega tehnoloogiatesse. Samuti liigub tulu veel kahte toetusmehhanismi, et aidata lennundus- kui ka tööstus- ja energiasektoritel toime tulla innovatsiooni ja investeerimisega seotud probleemidega. Esimene on innovatsioonifond, millega laiendatakse senist uuendusliku tehnoloogia tutvustamise toetust murrangulistele uuendustele. Teine on moderniseerimisfond, millega soodustatakse investeringuid laiemate energiasüsteemide moderniseerimiseks ja suurendatakse energiatõhusust kolmeteistkümnes väiksema sissetulekuga liikmesriigis. (Euroopa Liidu Nõukogu ja Euroopa Ülemkogu 2019)

Alates 2023. aastast on laienenud innovatsioonifond ka lennundussektorile. EU ETS-ist saadud tulu investeeritakse innovaatilistesse projektidesse, mis tegelevad emissioonide vähendamisega. Need on projektid, mis keskenduvad kliimaneutraalsete transpordivahendite ja CO₂ efektiivsemate lennuterminalide arendamisele. (European Commission 2023a) Moderniseerimisfond sarnaselt innovatsioonifondile kasutab tulu EU ETS-ist ja see investeeritakse jätkusuutlike vahendite arendamiseks. Oluline on teada, et antud fondi suunatud rahalised vahendid investeeritakse madalama sissetulekuga ELi liikmesriikidesse, kaasa arvatud Eestisse. Moderniseerimisfondi abil investeeritakse taastuva energia tootmisele ja selle utiliseerimisel transpordivahendites ning energiatõhususe arendusse transpordis. (European Commission 2023b)

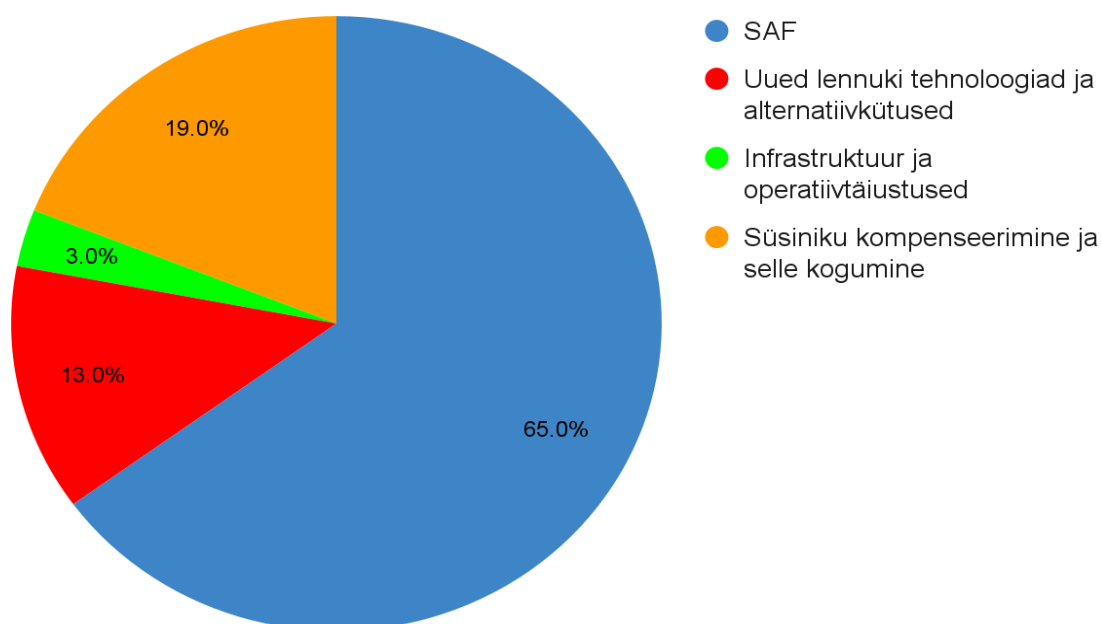
Tabel 1. EU ETS ja CORSIA võrdlus

Kriteeriumid	EU ETS	CORSIA
Metoodika	Piiramise ja kauplemise süsteem	Süsinikukrediitide kompenseerimine
Keskkonna terviklikkus	Üldine "lagi" on fikseeritud	Sõltub kompenseerimise kvaliteedi standarditest ja nende jõustamisest
Verifitseerimise vajadus ametiasutustest	Lennuvahendite emissioonide tasemel	Lennuvahendite emissioonide- ja süsiniku kompenseerimise projektide tasemel
Ülempiir	95% keskmine emissioonide kogus 2004.a-2006.a vahemikust, ülempiiri astmeline vähendamine iga aastaselt	2020. a keskmine emissioonide summa, astmeline ülempiiri vähendamine puudub
Ulatus/skoop	Euroopa sisesed lennud	Rahvusvahelised lennud CORSIA liikmesriikide vahel
Mõjutatud lennuliinid	Kõikidel marsruutidel opereerivad lennuliinid, välja arvatud kui kehtivad erandid	

Allikas: Maertens et al., 2019 (Autori koostatud)

1.2 Jätksuutlikud meetmed lennunduses

IATA on vastavalt enda algatatud initsiatiivile *Fly Net Zero* seadnud eesmärgiks saavutada 2050. aastaks kliimaneutraalsuse lennundussektoris. Eesmärgi saavutamiseks kasutatakse sadakond erinevat vahendit, et vähendada lennundussektori CO₂ emissioone. Spetsiifilisemalt on IATA koostanud neli eraldi kategooriat, mis kõige tõenäolisemalt võiksid aidata täita initsiatiivi lubadusi. Need on säästev lennukikütus (SAF), innovaatilised lennuki tehnoloogiad ja alternatiivkütused, infrastruktuur ning operatiivtäiustused, süsiniku kompenseerimine ja selle kogumine. (IATA 2023f)



Joonis 1. IATA *Fly Net Zero* kategooriad
Allikas: IATA 2023f

1.2.1 Säästev lennukikütus

Säästev lennukikütus (SAF) on peamine termin, mida kasutatakse lennunduses kui kirjeldatakse mitte fossiilsed lennukikütuseid. Niinimetatud biokütused viitavad kütusele, mis on toodetud, kasutades taimseid- või loomseid saaduseid. Tootmisprotsessis on kasutatud toormaterjalina toidu- ja taimeõlisid, olmejäätmeid, põllumajandusjääke ja veelgi. Lõpptoodang on toornafta, mida kasutatakse lennukites. (IATA 2023d)

SAF on peamine vahend, mida tänapäeval kui ka tulevikus soovitakse kasutusele võtta lennukites, et vähendada transpordis tekkinud emissioone. EU ETS ja CORSIA mõlemad on seadnud oma peamise fookusesse SAF-i tootmise, et eemaldada emissioone lennundussektori siseselt. 2017. aasta andmetel emiteeriti 859 megatonni CO₂ lennukitest, mis on 2 protsenti kogu inimtekkelisest CO₂ emissioonidest ülemaailmsest. Sellepärast nähakse SAF-i efektiivse vahendina emissioonide vähendamisel. (Air Transportation Action Group 2020)

SAF iseenesest emiteerib sama palju CO₂ kui fossiilne lennukikütus. Erinevus seisneb sellest, et toormaterjalid ja tootmismeetodid, mida kasutatakse SAF-i puhul on erinevad fossiilkütuse omast. Täpsemalt, millised seadmeid kasutatakse saagi kasvatamiseks, kuidas toormaterjali transporditakse ning missuguseid kütuse rafineerimise meetodid rakendatakse. Kõik eelmainitud faktorid moodustavad SAF-i elutsükli ehk võetakse vaatluse alla alates saagi kasvatamisest kuni selle põletamiseni lennuki mootoris kõik emiteeritud CO₂ emissioonid. Kui võrrelda SAF-i ja fossiilkütust, siis kütuse põletamisel tekkinud otsesed CO₂ emissioonide summad on sarnased. Analüüsides laiemat pilti ehk kaudseid emissioone, siis näeme et elutsükli jooksul võime kuni 80 protsendi ulatuses saavutada vähem CO₂ emissioone. (IATA 2023d)

SAF-i kasutamise juures lennukites on oluline selle kvaliteet ja omadused. Need peavad olema identsed võrreldes fossiilkütustega. See on oluline faktor, kuna sellisel juhul on neid võimalik kasutada ka praegustes lennukites. Sellepärast ei pea lennukite tootjad ümber kujundama lennuki mootoreid ega ehitama uusi kütuse toitesüsteeme lennujaamadesse. (Noh et al., 2016, 301) Tänapäeval ja tõenäoliselt ka järgneva kümnendi jooksul segatakse kuni 50 protsendi ulatuses SAF-i fossiilkütustega lennukite mootoris, et saavutada vähem emissioone. Segu on võimalik kasutada praegustes lennukites, nii et see ei muudaks nende töövõimet ega jõudlust. (Durdina et al., 2021, 14576)

2023. aasta andmetel moodustab SAF vähem kui 0,1 protsenti kogu tarbitavatest lennukikütustest kogu maailmas. 2027. aastaks kavandatud SAF-i tootmise võimekus suudab ainult 1-2 protsenti kogu SAF-i tarbimisest ära katta. Seega on vaja oluliselt suuremaid ülemaailmseid investeeringuid SAF-i tootmisesse. (International Energy Agency 2023) Peamine probleem SAF-i kasutamise puhul on selle saadavus ja sellest tulenev kõrge hind. SAF-i hind võrreldes fossiilsete lennukikütustega on üldiselt kuni viis korda kallim, mis teeb selle kasutamise väga kulukaks kõikidele LLO-le. (O'Malley et al., 2021, 8)

Lufthansa AG tegevjuht ütles, et kõik nende lennukid lendaksid 100 protsendi ulatuses SAF-i abil, oleks neil vaja suunata pool kogu Saksamaa elektri tootmisest SAF-i tootmisele. (Yahoo Finance 2023) Teoreetiliselt on võimalik asendada kogu fossiilsete lennukikütuste tarbimine SAF-iga, kuid see nõuaks 170 uue biorafineerimistehase ehitamist igaaastaselt perioodil 2020.a-2050.a. Selle kulu oleks ligikaudselt 15-60 miljard dollarit iga aasta ja vähendaks lennundussektori üleüldisi CO₂ emissioone 63 protsendi võrra. (Chiaramonti 2019, 1203) ICAO on arvamusel, et analüüsid kõige optimistlikumaid prognoose ei ole füüsiliselt võimalik täies ulatuses täita SAF-i nõudlust 2050. aastaks. Samuti arvavad, et toota sellises koguses SAF-i nõuab väga suuri kapitaliinvesteeringuid jätkusuutlike alternatiivkütuste tootmise infrastruktuuri. (ICAO 2019)

Tänapäeval ja ka järgmised aastakümned SAF-i käsitletakse kui *drop-in* lennuki kütusena. See tähendab, et SAF-i on võimalik kasutada praegustes lennukimootorites ja lennujaama infrastruktuuris, mis ei nõua tehnilisi muudatusi. Hetkel on kasutusel neli peamist sertifitseeritud biokütuse tootmismeetodit. Need on:

1. Fischer-Tropsch süntees.
2. Estrite ja rasvhapete hüdrotootlemine (HEFA).
3. *Alcohol-to-Jet* (ATJ).
4. Kääritatud suhkru hüdrotootlemine (HFS). (Ng et al., 2021, 3)

Fischer-Tropsch sünteesi puhul gaasistatakse biomassi. Biomass on üldjuhul näiteks mitte kvaliteetne metsamaterjal või võsa. Tulemusena saab bensiini, lennukikütust ja diisli. (Ng et al., 2011a, 3218-3234) HEFA puhul hüdrotoodetakse taime-, toidujäätmete-, pürolüüs- ja vetika õlisid ning looma rasva, et toota lennukikütust. Protsessi käigus eemalduvad vabad rasvhapped biomassist. (IATA 2015) *Alcohol-to-Jet* puhul esialgselt gaasistatakse biomass alkoholiks (metanool, etanool, butanool). Seejärel alkohol omakorda sünteesitakse lennukikütuseks. (Ng et al., 2011b, 1153-1169) HFS puhul sünteesitakse suhkur biomassist, mis kääritatakse ja seejärel hüdrotoodetakse, et saada biokütus. (GreenAir Online 2020)

Fossiilsete lennukikütuste tootmine toimub kindlates piirkondades maailmas. SAF-i tootmisega tekib olukord, kus on võimalik toota biomassi ülemaailmselt. Vastavalt kindla piirkonna kliimale on võimalik panustada kõikidel riikidel toormaterjali tootmisele. Samuti riigid, kus leidub palju olmejäätmeid saavad aidata SAF-i tootmisega. Paljudes riikides, eriti arengumaades oleks see väga suureks abistavaks meetmeks põllumajandussektorile. Selle kaudu stimuleeritakse kohaliku majandust ja tekiks uued töökohad. Arenguriikides areneks jäätmekäitluse korraldus, kus üldjuhul jäätmed ei ole keskkonnaprobleemiks. SAF-i kasutamine aitaks nii CO₂ vähendamist lennundussektoris ja samal ajal on ka kasulik strateegia jäätmete töötlemiseks. (IATA 2023d)

1.2.2 Innovatsioon lennukite tehnoloogias

Säästva lennukikütuse kõrvalt vähendatakse CO₂ emissioone uute innovaatiliste lennukite tehnoloogiate kasutuselevõttuga. Uute tehnoloogiate kaudu arendatakse lennukite kütusesäästlikust. (Holland et al., 2011, 14) Viimase 50 aasta jooksul on lennukite kütusesäästlikust hüppeliselt paranenud ja usutakse, et 2050. aastaks võib see 40-50 protsendi ulatuses veel omakorda paraneda. (Ribeiro et al., 2007, 326) Lennuki kütusesäästlikuse parendamisel on kolm peamist parendusvaldkonda. Need on:

1. Lennuki massi vähendamine.
2. Lennuki aerodünaamika parandamine.
3. Mootori tõhususe parandamine. (Inderwildi et al., 2010, 58)

Lennuki massi vähendamist on aidanud erinevate tehnoloogiate arengud. Nagu näiteks kerged täiustatud sulamid, komposiitmaterjalid, uued disainilahendused ja tootmisprotsessid. Boeing 787 lennuki kere, mida kasutatakse 2011. aastast koosneb 50 protsendi ulatuses süsinikkiuga tugevdatud plastikust ja muudest komposiitmaterjalidest. Selle tulemusena on vähendatud 20 protsenti lennuki kaalu kui võrrelda traditsioonilise alumiinium ehitusega lennukil. (Boeing 2006)

Lennuki aerodünaamilisust kõige suuremad mõjutavad faktorid on lennuki tõusust tulenev takistus ja hõõrdetakistus. Mõlemad liigid moodustavad kokku 71 protsenti kogu takistusest lennukites. (Inderwildi et al., 2010, 61) Edusammud materjalides, disainis ja aerodünaamiluses aitavad oluliselt vähendada lennuki tõusust tulenevat takistust. ICAO usub, et järgmise 10-20 aasta jooksul pakub hõõrdetakistus kõige suuremat potentsiaali edasiseks täiustamiseks. (ICAO 2010) Modelleerimissüsteemide abil arvatakse, et suudetakse vähendada 20-70 protsendi ulatuses hõõrdetakistust võrreldes tänapäevaste lennukitega. (Inderwildi et al., 2010, 61)

Selle kõrvalt veel katsetatakse lennukikere ümber kujundamist. Spetsiifilisemalt uuritakse segatud tiivakere disaini (BWB), mis erineb praeguste lennukite disainist. BWB puhul sulanduvad tiivad lennuki põhikerega võrreldes tänapäevaste lennukitega, kus tiivad on sisuliselt kinnitatud toru külge. Uudsel lennukitüübil on vähendatud lennuki pealseid pindu, mis aitab kaasa lennuki aerodünaamilisusele ja muudab lennuki kütusesäästlikumaks. (Inderwildi et al., 2010, 62)



Joonis 2. Segatud tiivakerega lennuki disain

Allikas: IATA 2023e

BWB lennukite kasutuselevõtuga nõuaks praeguste lennujaamade infrastruktuuri ümber kujundamist. BWB lennukitele on vaja täiesti erinevaid laadimis- ja mahalaadimistehnoloogiaid kauba transpordiks võrreldes praeguste lahendustega. Kuigi täpsemalt pole veel uuritud kui efektiivne on BWB lennukid lühematel ja pikematel kaugustel. Siiski arvatakse, et BWB on rohkem mõeldud suuremahulistele lennukitele, mis lendavad pikematel kaugustel. (Morris et al., 2009, 34)

Lennuki mootori tõhusus on 20. sajandi algusest pidevalt arenenud. Tänapäevased lennukid võrreldes lennukitega 10 aastat tagasi suudavad kulutada 15 protsenti vähem kütust. Sellest tulenevalt emiteeritakse 40 protsenti vähem CO₂ emissioone võrreldes 20. sajandil ehitatud lennukitega. See kõik tuleneb lennuki mootoris kasutatavatest materjalidest, sensoritest, põlemise- ja jahutuse tehnikatest, mis samuti arenevad aja möödudes. (ICAO 2010) Pikemas perspektiivis nähakse potentsiaali avatud rootoriga mootorites. Probleemaatiline on nende juures müra ja vibratsioon, mis mõjutavad lennukis olevaid reisijaid. (Lee et al., 2009, 3531)

Viimaste aastakümnedite jooksul lennuki mootori tehnoloogia arengus on tekkinud kompromiss. Täpsemalt kütusesäästlikkuse ja lämmastikoksiidi tekkimises. Mida rohkem suudetakse kütusesäästlikust tõsta, seda kõrgem rõhk ja temperatuur tekivad mootoris. Selle tulemusena tekitab mootor rohkem lämmastikoksiidi. Sellepärast on väljakutseks leiutada lahendus, mis suudaks piirata emissioone, mis samal ajal tõstaks kütusesäästlikust. Üheks lahenduseks võib olla lisajahutuse süsteemide kasutamine mootori põlemiskambritele, mis piiraks emissioone. (Lee et al 2010, 4719)

1.2.3 Alternatiivkütused

SAF-i kõrvalt nähakse potentsiaalset tuleviku teiste alternatiivkütuste juures. Täpsemalt vesiniku ja elektri kasutamises lennuki kütusena. Vesinik on kõige enam levinud element universumis. See sisaldab 2,5 korda rohkem energiat kilogrammi kohta võrreldes petrooleumiga. (Najjar 2013, 10720) Vesiniku põlemisel tekib kõrvalsaadusena veeaur. Selle tulemusena tekib 90 protsenti vähem lämmastikoksiidi võrreldes petrooleumi põlemisega. (Agarwal et al., 2019, 1)

Vesiniku põlemisel on tulemusena võimalik eemaldada selle käigus tekkinud emissioonid. Teise tähtsa omadusena saab vesiniku kasutada, kas kütusena või kütuseelemendina elektri tootmiseks. Elektrokeemilised kütuseelemendid võivad olla efektiivsemad lühemate vahemaade lendude ja väikesemahuliste lennukite jaoks ning vesinik kui kütuseallikana sobiks pikemate kauguste ja suuremate kandevõimetega lennukitele. (Baroutaji et al., 2019, 39) Veeldatud vesinikul on madalam mahutihedus kui petrooleumil. See tähendab, et kuigi veeldatud vesiniku kaal on väiksem ehk seda on lennukis vähem vaja, on selle mahutamiseks vaja 4 korda rohkem ruumi kui petrooleumi jaoks. Sellepärast on see takistuseks lennukite tootjatele, kuna see nõuaks tavapärase lennuki täielikku ümber kujundamist. (Verstraete 2009, 41)

Veeaur on nagu ka süsinik ühte tüüpi kasvuhooonegaas, mis mõjutab globaalset soojenemist. Vesiniku põlemine toodab 2,6 korda rohkem veeauru kui petrooleum. Siiski on vesiniku kiirgussuund (atmosfääri neeldunud energia ja kosmosesse tagasi peegeldunud energia vahe) väiksem kui võrrelda süsinikdioksiidiga. CO₂ püsib atmosfääris kuni 100 aastat, vesinik aga paar päeva kuni aasta. Uuringute kohaselt arvatakse, et kui kasutada vesiniku jõul töötavaid lennukeid, siis suudaksime 2050. aastaks vähendada lennundusest tulenevat kiirgussuunda 20-30% võrra ja 2100. aastaks 50-60% võrra. (Ponater et al., 2007, 6940)

Vesiniku kasutamisega kaasnevad ka riskid. Üks nendest riskidest on selle transportimine. Tavaliselt leidub vesiniku ainult gaasilises olekus. Selle keemistemperatuur on -253 kraadi. Vesinik on tuleohtlik ja seda käsitletakse ohtliku ainenähtena nagu petrooleum ja bensiin. Seda peab seega transportima jahutatud keskkonnas ja suure rõhu all. (IATA 2020) Vesiniku isesüttimistemperatuur on 550 kraadi võrreldes petrooleumiga, millel on 220 kraadi. Vesinik on ka 14 korda õhust kergem, mis tähendab et kui see peaks segunema õhuga, siis see valguks kõik laiali õhku. (World Economic Forum 2019)

Atmosfääris leidub palju vesiniku ja sellest tulenevalt ei kujutaks see endast ohtu keskkonnale võrreldes fossiilse kütuse lekkega. Vesiniku süttimiseks vajaminev süttimisenergia on aga oluliselt madalam kui teistel süsinikupõhistel kütustel. See tähendab, et vesinik võib kergemini süttida, puutudes kokku tulega. (Najjar 2013, 10718) Vesiniku põlemisest tekkinud leek on nähtamatu ja lõhnatu ehk seda on raske tuvastada õhus, mis muudab selle kustutamise keeruliseks. Seega on oluline, et kütusepaak oleks lennukis korralikult isoleeritud. (IATA 2020)

Tänapäeval vesiniku kasutamine laialdaselt lennukites on ülesandepüstituseks. Peamiseks ülesandeks võib pidada vesiniku ladustamist lennukites, mis nõuaks suuremaid kütusepaake ja see omakorda lennuki ümber kujundamist. Samuti uue lennuki mootori arendamine nõuab keskmiselt 10 aastat aega. Kõik need piirangud nõuavad lennuki tootjate suuri finants-, ajalisi investeeringuid uute lennukite tootmisesse. Teiseks ülesandeks on vesiniku hind. Kuigi võrreldes tänapäeva ja 20 aastat tagasi, on vesiniku tootmine tõusnud vähemalt 100 kordselt. See on tänu vesiniku kasutuselevõtu kiirele arengule tööstus ja transpordi sektorites. Siiski vesiniku hind pole veel sellisel tasemel, mis muudaks vesiniku kasutamise kõige optimaalseks kuluefektiivseks meetodiks. (IATA 2020)

Teiseks alternatiivkütuseks nähakse lennukites elektrit. Elektrilennukid kasutavad elektrimootori toiteks akusid, kus mootor muudab elektrienergia mehaaniliseks energiaks. Elektri jõul lendavad lennukid on 2024. aasta andmetel veel alguses prototüüp faasis. Viimastel 6 aasta jooksul on tehtud katselende lennukitega nagu näiteks Airbus E-Fan 1.1, ACCEL ja EEL. Kõik eelmainitud lennukid on võimelised mahutama ainult paari inimest ja pole mõeldud kauba vedamiseks. Samuti ei suuda antud lennukid lennata samasugustel kaugustel nagu tänapäevased lennukid. (Amprius 2023)

Keskmiselt kaaluvad lennukid, mis transpordivad kaupu üle 25 tonni. Lennundussektori 92% CO₂ emissioonidest tulenevad antud lennukitest ja nõuavad 150 000 kuni 2 500 000 kilovatt-tundi energiat õhkutõusul. Arvestades praeguseid läbimurranguid akude tehnoloogias ei suuda ükski teadaolev aku toita piisavalt energiat lennukitesse. See tähendab, et elektrilennukid ei suuda lennata sarnastel kõrgustel ja distansidel nagu kaasaja lennukid, mis lendavad fossiilsetel kütustel. Praegused lennukimootorid toodavad oluliselt vähem süsinikdioksiidi kilovatti kohta võrreldes elektrivõrguga. Prognoositakse, et sarnane trend jätkub veel järgmised 25 aastat. Seega akude laadimine elektrivõrgust ei aita CO₂ emissioonide vähendamisele kaasa. (Epstein, O'Flarity 2019, 581)

Kui võtta arvesse veel 21. sajandi keskmised energia hinnad, siis elektri ja lennukikütuse hinnad ühe energia ühiku kohta tarnitud lennuki tõukejõusse on sarnased. Tulevikus on võimalik, et energia hinnad võivad muutuda elektri kasuks. Samuti tuleb veel arvestada, et akude installeerimisega lennukisse tõstab lennuki kaalu ja vajab rohkem ruumi. Seetõttu peaksid elektrilennukid olema suuremad kui lennukid tänapäeval. Analüüsidest kõiki eelmainitud faktoreid ei nähta suurt tulevikku täies ulatuses elektri jõul lendavatel kaubalennukitel järgmistel aastakümnetel. Kuigi potentsiaal siiski eksisteerib väiksematel lennukitel. (Epstein, O'Flarity 2019, 581)

Siiski jäävad 100 protsendi ulatuses elektri jõul lendavad lennukid veel kaugtulevikku. Selle asemel on arendus suunatud hübriid lennukitele, mis lendavad nii elektri kui ka fossiilsete kütuste abil. Uue hübriid-elektrilise tõukejõusüsteemi abil tagatakse lennuki tõukejõule energia integreerides elektrilise jõuõlekande sise põlemismootori kaudu. Selle abil on võimalikult vähendada emissioone ja samal ajal säilitada suuremat lennuulatust. Samuti on hübriid lennukid oluliselt vaiksemad kui sise põlemismootoriga lennukid. Tänapäevaks on tehtud katselende väikesemahuliste lennukitega, kuid mitte suuremahuliste lennukitega. Suurimaks takistuseks on elektri salvestamise tehnoloogiad, mis ei suuda hetkel piisavalt suures koguses elektrit endisse salvestada. (Xie et al., 2021, 433)

Joris Van Bogaert-i uuringus teoretiseeriti täpsemalt, kas suuremahulised hübriid lennukid on võimelised läbima pikemaid vahemaid. Tulemusena ehitati prototüüp hübriid lennuk ATR 72-600 lennuki mudeli põhjal. Lennuk suutis maksimaalselt vedada 68 inimest. Prototüüp lennukit ja ATR 72-600 võrreldi omavahel ja suurim erinevus oli lennuki tiibade pikkuses. Prototüübil oli 18 protsenti pikemad tiivad ja uuringus järeldati, et kütusekulu sõltus paljuski prototüübi lennuulatusest. (Bogaert 2015, 80) Airbus ja Rolls Royce avalikustasid 2017. aastal E-Fan X projekti. Tegemist oli hübriid lennuki prototüübiga, mille esimene katselend pidi toimuma 2021. aastal. Lennuki üks neljast mootorist oli kahe megavatine elektrimootor. Projekt lõpetati 2020. aastal tehnoloogiliste piirangute tõttu, mis takistasid lennuki arendamist, spetsiifilisemalt kõrgepingesüsteemid ja akud. Airbus kommenteeris, et sooviksid suunata oma ressursid vesiniku uurimisse, kui potentsiaalse alternatiivkütuse allikana. Tänapäevase tehnoloogiaga pole veel hübriid- ja elektrilennukid mõeldavad kui ei toimu märkimisväärseid arenguid akude tehnoloogias. (Airbus 2020) ICAO on arvamusel, et suuremahulised hübriid kommertslennukid, mis mahutavad vähemalt 100-135 inimest, jõuavad turule peale 2030. aastat. (ICAO 2022b)

1.2.4 Infrastruktuur ja operatiivtäiustused

Lennunduse infrastruktuuris ja operatiivtäiustustes nähakse potentsiaali CO₂ emissioonide vähendamiseks. Kuigi võrreldes teiste lahendustega ei ole võimalik märkimisväärselt emissioone vähendada. Siiski saab meetmeid sageli kiiremini rakendada kui teisi lennukite tehnoloogiad. Alates 1990. aastast on töötõhusus aidanud vähendada 55 protsenti võrra kütusekulu reisijakilomeetri kohta. Infrastruktuuri täiustused, aga pole arenenud nii kiiresti kui on ette prognoositud. (IATA 2023g)

Lennukis toitlustuse kärude kaalu on võimalik kolmandiku võrra vähendada kasutades kergemaid komposiitmaterjale. Nende abil on võimalik säästa ligikaudselt 28 tonni CO₂ ühe aasta kohta. Kasutades kergemaid ja kitsamaid istmeid, sellega vähendades 30 protsendi võrra istme kaalu võib lennuliin säästa rohkem kui 21 tonni CO₂ emissioone aasta kohta. Lennukonteinerid on võimalik ehitada kevlarist, mis teeb konteineri tulekindlaks ja samal ajal kergemaks ning vastupidavaks. (ATAG 2021) Uudsete konteinerite abil saab vähendada 3000 tonni CO₂. Samuti aitaks minimiseerida hooldusaega ja oleks võimalik vedada rohkem kaupa. (IATA 2023g)

Lennukite ruleerimisel on võimalik piirata lennuki mootori kasutamist. Lennuki telikutele saab paigaldada elektrimootorid, mis aitavad juhatada lennuki terminalivärvast välja ilma lennuki mootoreid kasutamata. Selle abil on võimalik vähendada lennuki ruleerimise faasis 60 protsenti ulatuses tekkinud CO₂ emissioone. Alternatiivina nähakse veel võimalust elektri jõul sõitval puksiiril, mida juhib piloot kokpitist lennurajale. Eriti efektiivne on antud lahendus suuremates lennujaamades, kus lennukid peavad ruleerima pikematel distantsidel. Arvatakse, et on võimalik vähendada 85 protsenti ulatuses ruleerimise faasist tekkinud emissioone. (ATAG 2021) Ruleerimise faasis on veel võimalus kasutada ainult osa lennuki mootoritest. Kui lennukid saavad lähemale lennurajale, siis käivitada sisse kõik mootorid. Sellise meetmega võib säästa lennuliin 4 100 tonni kütust aasta peale. (IATA 2023g)

Vedelama kroomivaba värvi kasutamine lennukil võib vähendada 15 protsenti võrra kogu lennuki värvi kaalu. Selle abil eemaldades potentsiaalselt üle 100 kilogrammi koguses värvi lennukil. Lennuliinil on võimalik säästa 60 000 tonni CO₂ aastas, ilma et see kahjustaks värvi kvaliteeti. Kaasaegsed mootoripesu süsteemid on välja töötatud nii, et need aitaksid eemaldada õhus levivad saasteained. Selle tulemusena töötavad lennuki mootorid kõrgematel temperatuuridel ja kasutavad rohkem lennukikütust. Süsteem, mis kasutab deioniseeritud ja kuumutatud vett tavalise vee asemel aitaks saasteaineid efektiivsemalt puhastada turbiini labadelt. Selle abil muutes lennuki mootorid 1,5 protsenti kütusesäästlikumaks ja säästes 500 000 tonni CO₂ aastas kogu lennuliini masinapargist. (ATAG 2021)

Olemasolevate tarkvarade, tehnoloogiate ja operatiivmeetmete uuendamine võib parandada lennukite kütusesäästlikust 6,4 protsenti võrra. Uuendused võivad aidata vähendada lennuki takistust, parandada tõukejõu tõhusust ja muuta lennukit aerodünaamilisemaks. Uute süsteemide arendamine, mis analüüsivad olemasolevaid lennumarsruute nii õhus kui ka maal olles. Nende abil optimeerides marsruute võimalikult keskkonnasäästlikuks. (ATAG 2021) Euroopa Liidus aitab uuendusi ellu viia projekt SESAR (*Single European Sky ATM Research*). Spetsiifilisemalt aitavad integreerida erinevaid lennujaama tegevusi efektiivsemalt ja arendavad lennunduse trajektooride optimeerimise süsteeme CO₂ emissioonide piiramiseks. (SESAR 2016)

Tabel 2. Lennundussektori operatiivtäiustustega võimalik aastane CO2 sääst

Meetme kirjeldus	Säästetud CO2 aastas
30% kergemad toitlustuse kärud lennukis	28 000 tonni
30% kergemad ja kitsamad lennuki istmed	21 000 tonni
Kevlarist lennukonteinerid	3 000 tonni
Vedelam kroomivaba värv lennuki värvimiseks	60 000 tonni
Deioniseeritud, kuumutatud vee kasutamine lennuki mootorite pesemiseks	500 000 tonni

Allikas: ATAG 2021 (Autori koostatud)

Lennujaama ühisotsuste tegemine (A-CDM) on initsiatiiv, mida paljud Euroopa lennujaamad juba rakendavad. Initsiatiiv on väljatööteldud IATA ja suuremate Euroopa lennujaamade abil. A-CDM hõlbustab informatsiooni vahetust lennukite, maapealse käitleja ja lennujuhtimise teenuse osutaja vahel. A-CDM aitab edastada täpsemat teavet lennuliinidele, kui kaua teatud protsessid aega võtavad või millal on need täpselt lõpetatud. Protsessid nagu näiteks reisijate mahatulek, pagasite ja kauba mahalaadimine, lennuki puhastamine-, hooldus ja tankimine. Samuti aitab tõhusamalt kordineerida lennujaama maandumisplatse erinevate osapoolte vahel, mis vähendavad viivitusi ja lennuki kütuse kulusid. Kui A-CDM rakendati 17 lennujaamas Euroopas, siis suudeti säästa üle 102 700 tonni väärt CO₂ kogu aasta peale ja 2,2 miljon minutit lennuki ruleerimise faasist ning 26,7 miljonit eurot kütuse pealt. (EUROCONTROL 2016)

Jõudluspõhine navigeerimine (PBN) aitab lennukitel kasutada GPS ja satelliite, et leida paremaid lennutrajekte, parandada õhuruumi läbilaskevõimet, turvalisust ja keskkonnasäästlikust. PBN-i kasutamise eeliseks on selle paindlikkus lennutrajektoride kujundamisel, kuna see ei kasuta maapealseid navigatsioonivahendeid. Selle abil saab paremini prognoosida lennukite saabumisi kui tegemist on keerulise maastikuga või õhuruumis tekivad ummikud. PBN aitab vähendada lennujaamades müra kui ka märkimisväärselt vähendada CO₂ emissioone ja kütusekulu iga maandumise pealt. (Nakamura, Royce 2008, 14) Uuringute kohaselt suudeti USA 46 kohalikus lennujaamas säästa 39 000 tonni lennukikütust ja 124 556 tonni CO₂ aasta kohta peale PBN-i rakendamist. (ATAG 2021)

Lennujuhid kasutavad lendude jälgimiseks ja juhtimiseks radarit ja *Automatic Dependent Surveillance - Broadcast* (ADS-B). Antud maapealsed seiretehnoloogiad on piiratud vaateväljaga ja pole saadaval kõikides piirkondades. Näiteks piirkonnad, mis on vee kohal või väga isoleeritud suurematest linnadest. Kosmosepõhise seiretehnoloogia abil on võimalik jälgida ülemaailmselt lennuki asukohta-, kõrgust ja kiirust interneti teel. Eriti aitaks eelmainitud piirkondi, kus õhuruumis ei tööta praegused seiretehnoloogiad. (ATAG 2021)

Tulemusena saab parandada õhuruumi läbilaskevõimet ja optimeerida olemasolevaid lennumarsruute, et vähendada kütusekulu ning CO₂ emissioone. (ATAG 2021) Paljud lennuliinid kasutavad ajaloolisi andmeid eelnevatest lendudest ADS-B kaudu, et optimeerida olemasolevaid lennumarsruute. Samuti kasutavad lennuliinid antud andmeid, et koostada kasvuhoonegaaside raporteid nii endale kui ka oma klientidele. Siin kohal mõõdetakse vaid otseseid emissioone. (Hilpert et al., 2011, 1)

Aeronavigatsiooniteenuste pakkujad saavad kasutusele võtta uudse lennukite navigeerimise süsteemi RNP (Required Navigation Performance). RNP aitab lennukeid suunata mööda täpset trajektoori õhuruumis kõige kütusesäästlikumal viisil. RNP võimaldab edastada aeronavigatsiooniteenuse pakkujal reaajas teavet uue võimaliku lennumarsruudi kohta kui olemasoleval marsruudil peaksid ilmastikutingimused muutuma. Samuti aitab navigeerida madalatel kõrgustel õhus ja keerulistel maastikel. Täpsemalt analüüsib antud hetkel olevaid ilmastikutingimusi ja suudab optimeerida lennutrajektoori kui on olemas lennumeeskonna ja lennujuhi nõusolek. (Enge et al., 2015, 19) Aastas võib süsteemi juurutamisega kogu Euroopas säästa kuni 500 000 tonni CO₂. Praegused lennukite ümbersuunamisprotseduurid õhuruumides on juba võimalikud lendudel üle vaikse ookeani. (ATAG 2021)

Paljude riikide õhuruumide osad on kohalike sõjavägede halduses. Nendest piirkondadest ei lubata kommertslennukitel läbida ja need suunatakse ümber antud piirkondade. Mitmed riigid on suutnud sellistes piirkondades edukalt rakendada paindlikuma kasutusega õhuruumid. Nimelt jagades õhuruumi tsiviillennuliiklusega kui seda teatud hetkel ei kasuta sõjavägi. Sellega saavutades sirgjoonelisemad lennumarsruudid. Näitena suudeti avada Kanadas sõjaväe halduses olev õhuruum kommertslennuki jaoks. Sellega suudeti säästa 6 minutit transpordi ajast ja 5 000 tonni CO₂. (ATAG 2021)

Erinevad uuringud on näidanud potentsiaali lennukikütuse säästmisel kui kaks lennukit lendavad üksteise läheduses. Airbus-i projekt fello'fly aitab tarkvara kaudu sooritada katselende, kus üks kahest lennukist lendab esimese taga. Spetsiifilisemalt öeldes, lendab tagumine lennuk kolme kilomeetri kaugusel ees olevast lennukist. Inspiratsioon tuleb rändhanede v-kujuliselt mustrist, kus tagaolev lind suudab kasutada ära eesoleva linnu tõusust tekkinud tuule võnke. Sarnaselt lennukitega, kasutab lennuk antud hetkel vähem tõukejõudu mootoritest, sellega säästes kütust. Pikematel lendudel on suudetud säästa antud meetmega 5-10 protsenti kütust ja sellest tulenevalt ka CO₂ emissioone. Oluline on, et reisijate turvalisus on tagatud antud meetme kasutamisega. (Airbus 2021)

Tabel 3. Lennundussektori infrastruktuuriliste uuendustega võimalik aastane CO₂ sääst

Meetme kirjeldus	Säästetud CO₂ aastas
Üleminek A-CDM-ile	102 700 tonni
PBN süsteemi juurutamine lennukites	124 556 tonni
RNP süsteemi juurutamine lennukites ja aeronavigatsiooniteenuste pakkujatel	500 000 tonni
Paindlikum sõjaväe õhuruumi kasutus (ühe lennu kohta)	5 000 tonni

Allikas: ATAG 2021 (Autori koostatud)

1.3 Tallinna Lennujaama kestliku arengu eesmärgid

AS Tallinna Lennujaam on seadnud endale eesmärgiks saavutada aastaks 2025 süsinikuneutraalsuse. Tallinna Lennujaam on kontsern, kus lähtutakse ÜRO säästva arengu eesmärkidest. Ettevõtte peamised fookused on seotud süsinikuheitmete vähendamisega, välisõhukvaliteedi, müra ja looduskeskkonnaga parandamisega. Samuti on nende jaoks olulised ka energiatõhusus, puhta joogivee tagamine ja jäätmete vähendamine. (Rohetiiger 2022)

Tallinn Lennujaam on liitunud akrediteerimissüsteemiga *Airport Carbon Accreditation* (ACA), mille raames on saavutanud 3. taseme. (Tallinna Lennujaam 2024) ACA on ülemaailmne CO₂ tasemete haldamisega seotud sertifitseerimisprogramm. Programm kategoriseerib lennujaamu vastavalt emiteeritud CO₂ kogustele, aidates lennujaamu jätkusuutlikumaks muutuda. Kolmanda taseme saavutamiseks peab lennujaam täitma teatud kriteeriumid. Need on:

1. Lennujaam peab raporteerima skoop 1 ja skoop 2 kõrvalt ka skoop 3 emissioone vastavalt kasvuhooonegaaside protokollile.
2. Skoop 3 peab haarama lennukite LTO tsükli emissioone, reisijate ja töötajate maapealset juurdepääsu lennujaamale ning töötajate ärireiside heitkoguseid.
3. Lennujaam peab tõendama, et töötavad koos kolmandate osapooltega, et vähendada lennujaama põhiseid CO₂ emissioone. (Airport Carbon Accreditation 2024)

Tabel 4. Airport Carbon Accreditation tasemete kirjeldused

ACA tase	Taseme kriteeriumid
Tase 1	Määrata kasvuhooonegaaside allikad lennujaamas. Arvutada lennujaama aastase emiteeritud CO ₂ emissioonide kogused ja koostada aruanne sellest.
Tase 2	Eelneva taseme kriteeriumid peavad olema täidetud. Lisaks tuleb tõestada, milliseid vahendeid kasutab lennujaam kasvuhooonegaaside piiramiseks.
Tase 3	Eelneva taseme kriteeriumid peavad olema täidetud. Lennujaam peab aitama piirata kolmandate osapoolte kasvuhooonegaase, kes tegutsevad lennujaamas.
Tase 3+	Eelneva taseme kriteeriumid peavad olema täidetud. Lennujaam peab saavutama süsinikuneutraalsuse. Ülejäänud CO ₂ emissioonid tuleb kompenseerida süsiniku krediitidega.
Tase 4	Eelneva taseme kriteeriumid peavad olema täidetud. Lennujaam peab koostama pikaajalise CO ₂ tasemete haldamise tegevuskava. Samuti peavad tõestama, et aktiivselt tegelevad kolmandate osapoolte kasvuhooonegaaside piiramisega.
Tase 4+	Eelneva taseme kriteeriumid peavad olema täidetud. Lennujaam peab kompenseerima kõik ülejäänud CO ₂ emissioonid kasutades rahvusvaheliselt tunnustatud süsiniku kompenseerimise mudelit.
Tase 5	Eelneva taseme kriteeriumid peavad olema täidetud. Lennujaam peab saavutama täielikku süsinikuneutraalsuse skoop 1 ja skoop 2 emissioonidest. Samuti peab aktiivselt haldama skoop 3 emissioone. Lennujaama kolmandaid osapooli reguleerivad meetmed tuleb tõhustada.

Allikas: Airport Carbon Accreditation 2024 (Autori koostatud)

Kolmandate osapoolte alla liigituvad veel lennuliinid ja lennujaama teenindavad ettevõtted. Lennujaam peab aktiivselt osalema ka nende partnerite süsinikujalajälje vähendamisel. Samuti on kohustus arendada energiatõhususe ja jätkusuutlikkuse alast teadlikkust oma partnerite ja reisijate hulgas. (Airport Carbon Accreditation 2024)

Lennujaam võib vajadusel veel kasutada diferentseeritud tasustamist lennuliinide põhiselt. Sellega tasustades lennuliine, kas vähem või rohkem, vastavalt kui säästlikud on kasutatavad lennukid, mis läbivad lennujaama. Samuti võivad integreerida jätkusuutlikkuse nõudeid eksisteerivatesse kolmanda osapoolte koostöö- ja rendilepingutesse. Lennujaam võib luua uusi strateegilisi partnerlusi lennujaama-, lennuliini operaatorite ja lennuliinidega, et investeerida jätkusuutlikesse projektidesse nagu näiteks SAF-i tootmisesse. (Airport Carbon Accreditation 2024)

ACA on laialdaselt kasutusel mitmetes Euroopa lennujaamades. Alates 3. tasemest on lennujaamale nõue aidata vähendada kolmandate osapoolte kasvuhoonegaaside emissioone, mis hõlmab ka lennuliine. Liikudes tasemetes kõrgemale kohale peavad lennujaamad aina tugevamalt hakkama piirama partnerite poolt emiteeritud kasvuhoonegaaside emissioone. (Airport Carbon Accreditation 2024) Seepärast on mitmetes Euroopa lennujaamades kehtestatud CO₂ emissiooni tasu, et aidata suunata lennuliine vähendama kasvuhoonegaaside emissioonide koguseid. CO₂ emissiooni tasu sunnib lennuliine investeerima jätkusuutlikesse vahenditesse, et vähendada lisakulusid. Antud juhul säästlikematesse lennukitesse investeerimine.

Tallinna Lennujaamas on alates 2020. aastast tõusnud lennutranspordist tekkinud kasvuhoonegaaside kogused. See on tingitud paljuski reisijate arvust, mis omakorda on mõjutanud lennuliikluse tihedust. Kui 2020. aastal läbis Tallinna Lennujaama 7 986 lendu, emiteeriti 64,4 tonni süsinikdioksiidi ja 42,4 tuhat tonni lämmastikoksiidi. 2021. aasta andmetel läbis Tallinna Lennujaama 9 011 lendu ja emiteeriti 68,8 tonni süsinikdioksiidi ja 66,9 tonni lämmastikoksiidi. (Statistikaamet 2024)

Tabel 5. 2020. a - 2023. a Tallinna Lennujaama lennuliikluse andmed

Aasta	Näitaja	Saabumine	Väljumine
2020. a	Sõitjate arv pardal	429 759	428 406
	Kaup ja post (tonnides)	5 358	3 773
	Ärilendude arv	7 986	7 953
2021. a	Sõitjate arv pardal	641 215	651 900
	Kaup ja post (tonnides)	5 641	4 892
	Ärilendude arv	9 011	9 010
2022. a	Sõitjate arv pardal	1 353 688	1 378 112
	Kaup ja post (tonnides)	5 733	5 056
	Ärilendude arv	14 989	14 975
2023. a	Sõitjate arv pardal	1 471 321	1 475 002
	Kaup ja post (tonnides)	4 382	3 967
	Ärilendude arv	15 469	15 376

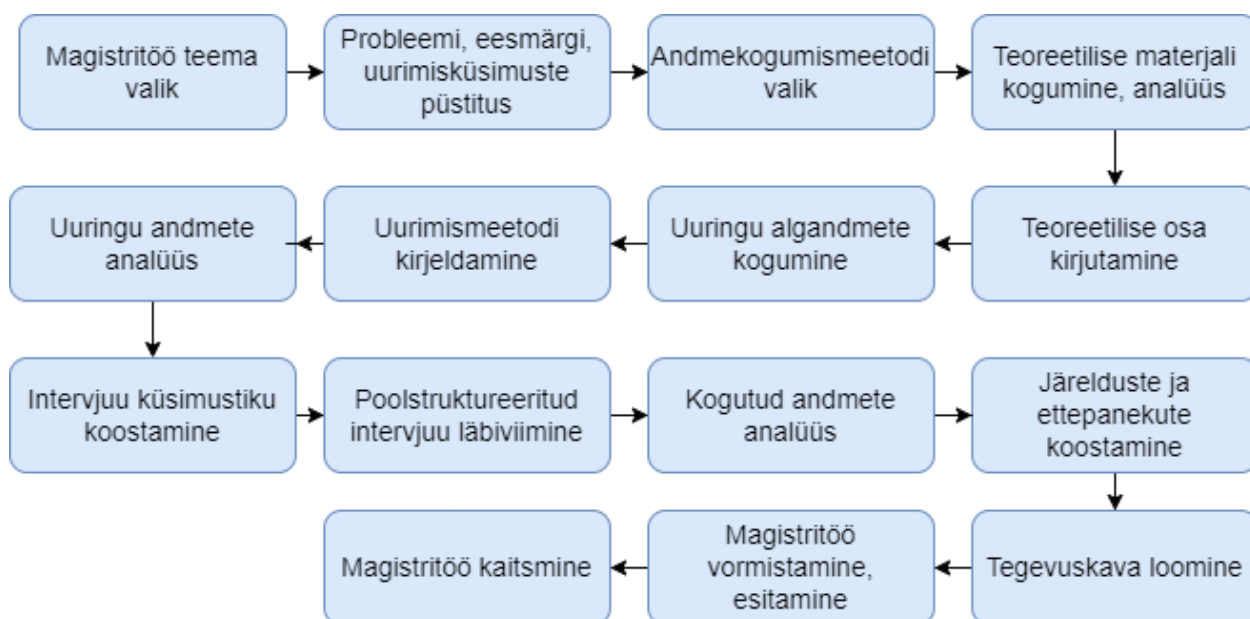
Allikas: Statistikaamet 2024 (Autori koostatud)

Tallinna Lennujaama läbivate lendude arv suureneb igal aastal (tabel 5). Sellega tõusevad ka kasvuhoonegaaside kogused, mida lennukid siin emiteerivad. Sellega arvestades, saaks Tallinna Lennujaam sarnaselt mitmete Euroopa lennujaamadega, kehtestada CO₂ emissiooni tasu. Eesmärgiga suunata lennuliine vähendama oma kasvuhoonegaaside emissioonide koguseid, investeerides säästlikematesse lennukitesse.

2. METOODIKA

2.1 Uurimisstrateegia

Antud magistritöö uuringu läbiviimiseks tuli esmalt autoril analüüsida teoreetiline materjal ja see läbi töödelda ning kujundada strateegia töö koostamiseks. Autor töötas välja magistritöö koostamise strateegia etapid (joonis 3).



Joonis 3. Magistritöö etapid

Allikas: Autori koostatud

Tabel 6. Uurimismeetodi kasutamine vastavalt uurimisküsimusele

Uurimisküsimus	Uurimismeetod	Töö osa
Milliste lennuliinide kasutuses olevad lennukimudelid on kõige jätkusuutlikumad lendudel, mis läbivad Tallinna Lennujaama?	Andmeanalüüs	2.4
Millistes stsenaariumites suudavad lennuliinid oma lennukimudelite valikute pealt säästa kõige rohkem transpordikuluseid rakendades Euroopa Liidu heitkogustega kauplemise süsteemi printsiipe?	Andmeanalüüs	2.4

Tabel 6. järg

Kuidas saaks Tallinna Lennujaam optimeerida lennuliini põhiselt lennujaama tasusid?	Poolstruktureeritud intervjuu, sisuanalüüs	2.2
Millise mudeliga/valemiga saab arvutada CO2 emissiooni tasu Tallinna Lennujaamas?	Poolstruktureeritud intervjuu, sisuanalüüs, andmeanalüüs	2.5

Allikas: Autori koostatud

Autor kasutab uuringu teostamiseks antud töös kvantitatiivset ja kvalitatiivset uurimismeetodit. Kvantitatiivne uurimus aitab autoril eesmärgist lähtuvalt lahendada uurimisprobleemi ja aitab saavutada selgema ülevaate tulemustest. Kvantitatiivse uurimistöö eesmärk on kirjeldada ja eksperimenteerida, et välja selgitada põhjuslikud ja korrelatiivsed seosed tunnuste vahel. Kasutatud meetodid on korratavad. Uuritava nähtuse tunnuseid muudetakse ja nendega manipuleeritakse, et kontrollida hüpoteese ja põhjuse-tagajärje seoseid. Uurimine põhineb varasematel teooriatel ja uurimistulemustel. (Hartas 2010, 65) Käesoleva magistritöö kvantitatiivse uurimisstrateegia rõhutab kvantifitseerimist andmete kogumisel ja analüüsimisel. Teooria ja uurimistöö seosele lähenetakse deduktiivselt: teooria eelneb uurimisele, mille rõhuasetus omakorda on teooria kontrollimisel. (Hardy, Bryman 2004, 35-42)

Kvalitatiivne uurimistöö on mõeldud teadmiste hankimiseks, et mõista paremini inimsüsteeme. Kvalitatiivse uurimistöö tüüpilised meetodid on intervjuud ja vaatlused, ent ka juhtumiuuringud, kaardistusuuringud ja dokumentide analüüsid. Uurimine korraldatakse loomulikes tingimustes. See tähendab, et keskkonda manipuleerimata. Kvalitatiivne uurimistöö annab rikkalikke detailseid kirjeldusi inimeste käitumisest ja arvamustest. Käsitus põhineb seisukohal, et inimesed konstrueerivad ise oma tegelikkuse ning selle mõistmine on võimalik, kui uurida, kuidas nad seda teevad. (Savenye, Robinson 2001, 1171-1173)

Uuringu tulemuste saavutamiseks kasutab autor andmeanalüüsi ja poolstruktureeritud intervjuu meetodeid. Andmeanalüüs on uuritava nähtuse tunnuste mõõtmisel või registreerimisel kogutud andmetes sisalduva informatsiooni ilmutamine. Autor lahendab püstitatud andmeanalüüsi ülesande. Poolstruktureeritud intervjuu on osaliselt standardiseeritud vestlus. Töö käigus selguvad, milliseid väärtuslikke andmeid hakkab ilmema ja mida võiks registreerida. Intervjuu kavandamisel pannakse kirja konkreetsed teemad ja üldist laadi küsimused. Poolstruktureeritud intervjuus kasutatakse avatud küsimusi. (Õunapuu 2014, 171-182)

Tulemused esitatakse arvandmete kujul, mis võimaldab edasist analüüsi ja järelduste tegemist. Arvandmed visualiseeritakse viisil, mis annab ülevaatliku ja kompaktselt informatsiooni. Käesolevas magistritöös esitatakse andmed graafikute ja diagrammide kaudu. Spetsiifilisemalt kasutatakse tulp- ja joondiagramme. Tulpdiaagrammide kaudu näitab autor tunnuste väärtuste esinemissagedust. Joondiagrammide kaudu visualiseeritakse väärtuste esinemissageduste jaotust, kus mõõdetud tunnus väljendab ajalist dünaamikat. (Õunapuu 2014, 185)

Uurimistulemuste tõlgendamine põhineb uuringus kogutud andmetel. Autor esitab järeldused tõenäosuslike väidetena, mitte faktidena. (Kumar 2002, 324) Tulemused analüüsitakse, selgitatakse nende tähendused ja teisendatakse loogiliseks ning sidusaks seletuseks. Seejärel püstitatakse uued küsimused edasiste uurimistööde jaoks ning luuakse uus uurimisperspektiiv. (Õunapuu 2014, 207)

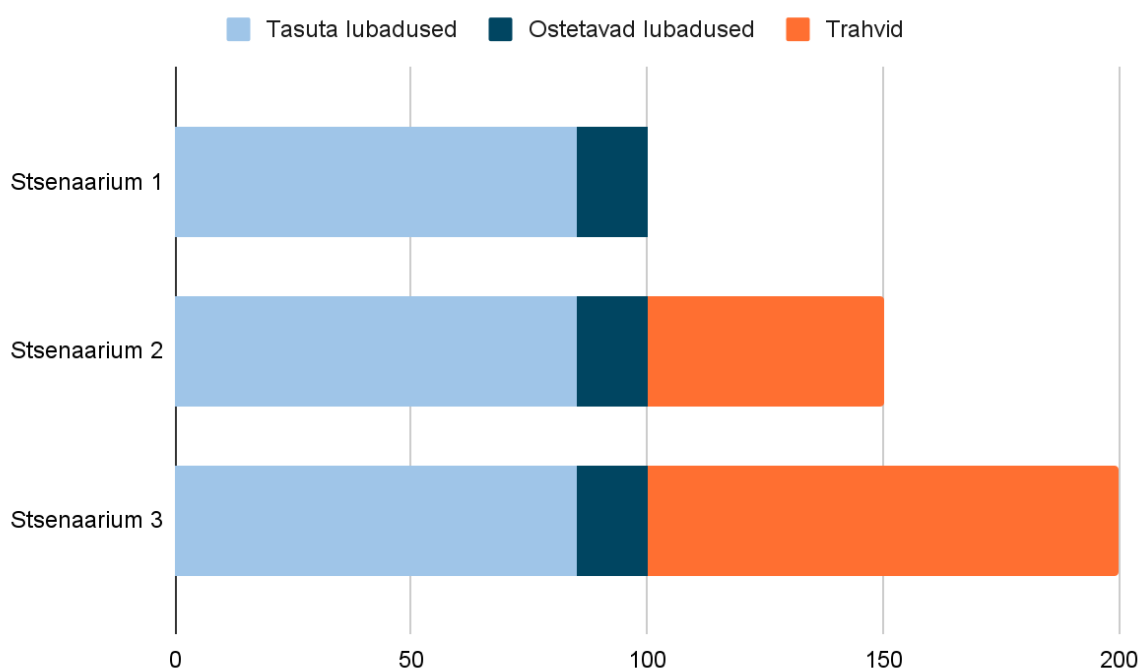
2.2 Stsenaariumite kirjeldus

Antud magistritöö uuringu teostamisel kasutab autor Euroopa Liidu heitkogustega kauplemise süsteemi komisjoni otsuse (EU) 2023/2440 põhimõtteid. Komisjoni otsus, mis avaldati 27. oktoober 2023. aastal sätestab 2024. aasta EUA-de koguse kõikidele liikmesriikidele. Alates 2024. aastast hakkab vähenema lennundussektori EUA-de kogus 4,3 protsendi võrra. 2023. aasta andmetel väljastati 30 259 690 EUA-d liikmesriikidele, mis 2024. aasta kohta vähenes 1 393 112 EUA võrra. (EUR-LEX 2023)

Selle tulemusena on 2024. aasta kogu EUA-de summa 28 866 578. Antud summast 85 protsenti EUA-dest jagatakse välja tasuta kõikidele lennuliinidele ehk 24 536 591 EUA-d. Ülejäänud 15 protsenti lubadest suunatakse oksjonile. (EUR-LEX 2023) Antud uuringu kontekstis arvestame ühe kaubeldava süsiniku krediidi (EUA) hinnaks 57,98 eurot. (Trading Economics 2024) Ühe tonni CO₂ kohta rakendub trahvi piirmäär 100 eurot kui ületatakse lubatud heitkoguste piir. (European Commission 2021b)

Esmalt loob autor kolm stsenaariumit, kus iga stsenaariumi puhul arvestatakse lennuliinile kindla emiteeritud CO₂ koguse. Kogus väljendub osakaalus, kui palju olemasolevatest lubadustest kasutab lennuliin ühe aasta tegutsemise peale.

1. Stsenaarium 1: Lennuliini emiteeritud CO₂ emissioonid kasutavad 100 protsenti lubadustest. Lennuliin peab soetama oksjonilt 15 protsenti rohkem lubadusi.
2. Stsenaarium 2: Lennuliini emiteeritud CO₂ emissioonid kasutavad 150 protsenti lubadustest. Antud juhul pole lennuliinil võimalik soetada piisavas koguses lubadusi oksjonilt ja on sunnitud tasuma 50 protsenti lubaduse eest trahvi vastavalt piirmäärale.
3. Stsenaarium 3: Lennuliini emiteeritud CO₂ emissioonid kasutavad 200 protsenti lubadustest. Antud juhul pole lennuliinil võimalik soetada piisavas koguses lubadusi oksjonilt ja on sunnitud tasuma 100 protsenti lubaduse eest trahvi vastavalt piirmäärale.



Joonis 4. Kolme stsenaariumi osakaalud
Allikas: Autori koostatud

2.3 Uuringu valim

Käesolevas magistritöös eraldab autor uuritavast populatsioonist valimi. Valimisse on valitud objektide hulk on väiksem, mis vastavad autori poolt soovitud tunnustele ja omadustele. (Õunapuu 2014, 137) Kvantitatiivse analüüsi sooritamiseks on valimisse valitud neli erinevat lennukimudelit. Lennukimudelid on spetsiifilisemalt piiritletud järgnevate kriteeriumite alusel. Need on:

1. Lennukimudel veab kaupa, mida käsitletakse lennulastina. Antud kriteeriumi puhul ei oma tähtsust, kas tegemist on kaubalennuki või reisilennukiga.
2. Lennukimudelit kasutatakse ainult kommertseesmärkidel.
3. Lennukimudel on läbinud Tallinna Lennujaama 2024. aastal.
4. Lennukimudel on kasutusel ainult ühe lennuliini poolt, mis on läbinud Tallinna Lennujaama.

Valmisse on autor valinud kolm turboventilaatormootoriga lennukit ja ühe turbopropellerimootoriga lennuki. Turboventilaatormootor on elementaarne gaasiturbiinmootor, mille suurema osa tõmbejõust annab turbiiniga käitatav ventilaator. (NASA 2021a) Turbopropellerimootor on gaasiturbiinmootor, mis aitab käitada propelleri. Mõlematel mootori liikidel on varieeruvad kütusekulud ja maksimum kiirused. Seetõttu aitavad saavutada parema võrdleva analüüsi CO₂ emissioonide kahe mootori liigi vahel. (NASA 2021b)

Tabel 7. Lennukimudelite tehnilised andmed

Lennukimudel	Maksimaalne kandevõime	Mootori liik
Airbus A220-300	16,7 tonni	Turboventilaator
ATR 72-600	7,4 tonni	Turbopropeller
Embraer E190LR	13 tonni	Turboventilaator
Boeing 757-200F	36 tonni	Turboventilaator

Allikas: Air Baltic, ATR, Embraer, EuroAsian Cargo Solutions 2024 (Autori koostatud)

Lennukimudeli kriteeriumite kõrvalt kehtivad kitsendused ka valitud lennumarsruutidel. Lennumarsruudid on valitud Flightradar24 statistika põhjal, kus leidub andmed, millistel lennumarsruutidel on kõige tihedam liiklus Tallinna Lennujaama läbivatele lendudele (tabel 9). Autor on valinud neli peamist marsruuti, mida analüüsitakse. Lisaks on valitud neli eraldi lennuliini, kelle kasutuses olevaid lennukimudeleid analüüsitakse (tabel 8).

Tabel 8. Lennumarsruutide, lennuliinide ja lennuliini operaatorite kokkuvõte

Lennumarsruut	Lennuliin	Lennuliini operaator
Tallinn-Kopenhaagen	DHL Air Austria GmbH (DHL)	DHL Air Austria
Riia-Tallinn	AS Air Baltic Corporation (Air Baltic)	Air Baltic
Tallinn-Stockholm	SAS AB (Scandinavian Airlines)	Xfly
Varssavi-Tallinn	Polskie Linie Lotnicze LOT S.A. (LOT Polish Airlines)	LOT

Allikas: Flightradar24 2024 (Autori koostatud)

Tabel 9. Lennuliikluse tihedus Tallinna Lennujaamas

Lennumarsruut	Lendude tihedus nädalas
Tallinna-Riia/Riia-Tallinn	28 lendu
Tallinn-Stockholm/Stockholm-Tallinn	27 lendu
Tallinn-Varssavi/Varssavi-Tallinn	23 lendu
Tallinn-Kopenhaagen/Kopenhaagen-Tallinn	14 lendu

Allikas: Flightradar24 2024 (Autori koostatud)

2.4 Andmekogumismeetodid

Kvantitatiivse uuringu läbiviimiseks kasutab autor interneti allikatest kogutud arvulisi andmeid. Lennukimudelite ja lennumarsruutide andmed on kogutud Flightradar24 statistikast. Autor on valinud lennumarsruudid vastavalt lennuliikluse tihedusele. Lennukimudelid on valitud antud marsruutidel lendavate lennukite põhjal. Lennujaamade vaheliste kauguste andmed on kogutud Great Circle Mapper keskkonnast, kus on võimalikult täpsed toodud välja kõik lennujaamade vahelised kaugused meremiilides. Lennukimudelite tehnilised andmed on leitavad lennukitootja-, lennuliinide kodulehekülgedelt, lennukimudeli spetsifikatsioonidest ja lennukimudelite andmebaasidest.

Autor on lendude CO₂ emissioonide arvutamisel kasutanud Euroopa Keskkonnaagentuuri (inglise keeles European Environment Agency) 2023. aasta master emissions kalkulaatorit. Kalkulaatori abil on võimalik tuletada 2023. aasta andmetel keskmised CO₂ emissioonide kogused autori poolt valitud lennukimudelitel. Samuti on võimalik tuletada eelduslikud transiidiajad, kütusekulud valimis nimetatud lennumarsruutide puhul. Andmeid analüüsitakse matemaatiliste meetoditega.

Süsiniku keskmise kauplemise hinna andmed on kogutud Trading Economics keskkonnast. Magistritöös on kasutatud 2024. aasta, 29. veebruari süsiniku keskmist kauplemise hinda. EU ETS poolt sätestatud ühe tonni CO₂ trahvi piirmäära hind on võetud Euroopa Komisjoni koduleheküljelt.

Kvalitatiivse uuringu eesmärgiks oli valideerida töös kasutatavate kvantitatiivsete meetodite tulemusi. Käesolevas magistritöös kasutati poolstruktureeritud intervjuud, kus intervjueeritavale esitati 13 küsimust. Vastamisel oli võimalik lisada juurde oma ideid ja ettepanekuid. Vajadusel intervjuu käigus võis autor esitada intervjueeritavale lisaküsimusi. Intervjuu viidi läbi Tallinna Lennujaama keskkonnaspetsialistiga, kasutades e-kirju.

Tallinna Lennujaama esindajale esitatud küsimused olid järgmised:

1. Mis on Tallinna Lennujaama kestliku arengu eesmärgid?
2. Milliseid meetmeid teie kasutate Tallinna Lennujaama süsinikujalajälje vähendamiseks?
3. Kas teie partnerid ja reisijad on teadlikud jätkusuutlikkuse arengu teemadel?
4. Mis on ACA (Airport Carbon Accreditation) ja mida see Tallinna Lennujaamale toob?
5. Kas teie töötate koos kolmandate osapooltega (lennuliinid, operaatorid, teised lennujaama teenindavad ettevõtted), et vähendada nende süsinikujalajälge? Kuidas teie seda teete?
6. Kas te olete teadlikud palju CO₂ emiteerivad teie partnerid (lennuliinid)?
7. Kas teil eksisteerib teave, millised lennukid emiteerivad kõige rohkem CO₂?
8. Millised meetmeid teie kasutate koostööpartnerite süsinikujalajälje vähendamiseks?
9. Kas teie integreerite koostöölepingutesse lennuliinidega jätkusuutlikkuse nõudeid? Millisel moel?
10. Kas teie rakendate lennujaamade tasudel diferentseeritud tasustamist lennuliinide põhiselt vastavalt emiteeritud CO₂ kogustest?
11. Kas te olete mõelnud, et luua uue lennujaama tasuliigi, millega tasutakse saastavamaid lennuliine/premeeriks "rohelisi" lennuliine? Kuidas peaks sellist tasu integreerima?
12. Kas Tallinna Lennujaam investeerib koos lennuliinidega jätkusuutlikkuse projektidesse? Millised on need projektid?
13. Kas Tallinna Lennujaam saab kunagi süsiniku neutraalseks? Kui kaua see aega võtab ja mis peaks selleks tegema?

2.5 Analüüsimeetodid

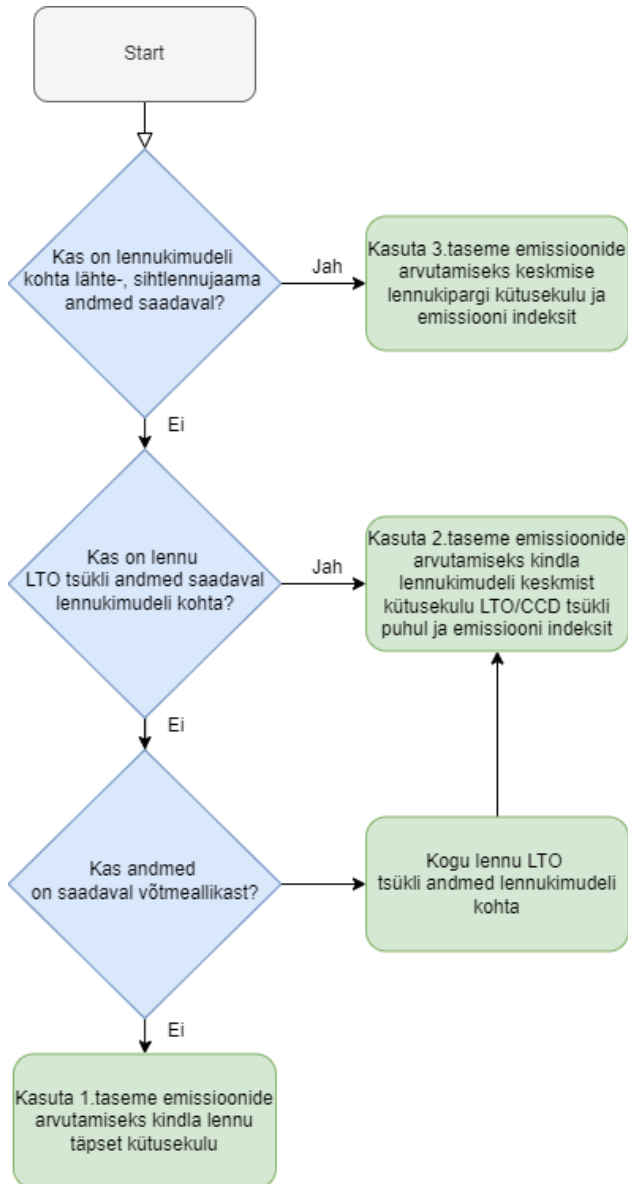
Kvantitatiivse uurimismeetodi andmetest ülevaate saamiseks kasutatakse statistilise andmeanalüüsi meetodit. Autor kasutab ülevaate koostamiseks ja andmete analüüsimiseks Microsoft Excel programmi. Andmete esitamisel kasutatakse tabelleid ja graafikuid, et luua parem arusaam andmetest.

Kvalitatiivse uurimismeetodi puhul kasutab autor analüüsi meetodiks kvalitatiivset sisuanalüüsi. Sisuanalüüsi meetodiga kasutatakse tekstide või muude tähendusrikaste objektide uurimiseks, et teha täpseid ja usaldusväärseid järeldusi kontekstide kohta, kus neid on kasutatud. (Krippendorff 2004, 18)

Käesolevas magistritöös kasutab autor kvantitatiivsete andmete analüüsimiseks Euroopa Keskkonnaagentuuri master emissions kalkulaatorit ja teadlase C.C.Chao poolt tuletatud valemeid. Kalkulaatori abil leitakse lendudest emiteeritud CO₂ emissioonide koguse. Valemite abil tuletame CO₂ emissioonid ja süsiniku kulu tonnkilomeetri kohta.

Lendude CO₂ emissioonide koguste fikseerimiseks on kasutusel kolm meetodit, mis väljenduvad tasemetena. Igal tasemel on kindel skoop, mis määrab kui täpselt soovib kasutaja CO₂ emissioone fikseerida. Need on:

1. Tase 1: Fikseeritakse kogu lennukipargi keskmised CO₂ emissioonid.
2. Tase 2: Fikseeritakse kindla lennukimudeli keskmised CO₂ emissioonid.
3. Tase 3: Fikseeritakse reaajas toimunud lendude andmed EUROCONTROL andmebaasist, et leida kõrgeima täpsusega CO₂ emissioonid. (European Environment Agency 2023)

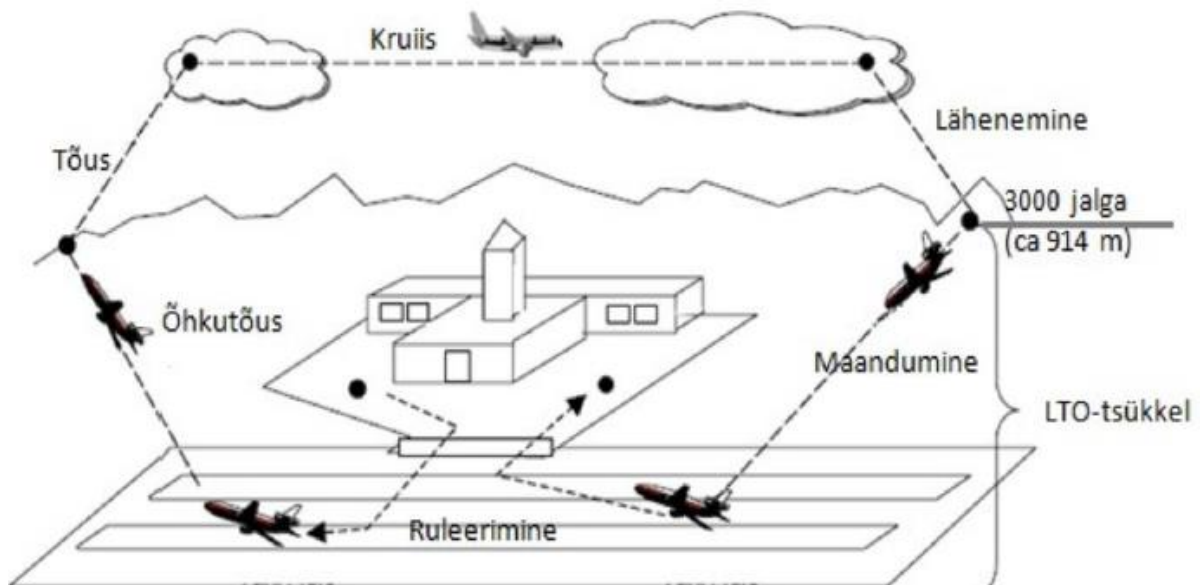


Joonis 5. CO₂ koguse arvutamise meetodi valik

Allikas: European Environment Agency 2023 (Autori poolt modifitseeritud)

Antud uuringu läbiviimiseks kasutame 2. taseme arvutamise põhimõtteid. Kalkulaatori abil arvutame lennu erinevates faasides emitteeritud CO₂ kogused. Lennu faasid on jagatud järgnevalt:

1. Ruleerimine (inglise keeles taxi-out)
2. Õhkutõus (inglise keeles take-off)
3. Tõus (inglise keeles climb)
4. Kruis (inglise keeles cruise)
5. Lähenemine (inglise keeles decent)
6. Maandumine (inglise keeles landing)
7. Ruleerimine (inglise keeles taxi-in)



Joonis 6. Lendamise faasid
Allikas: Heintalu 2009

Ruleerimise faasis lennuk liigub oma jõul parkimisplatsilt lennuväljale. Õhkutõusul tõuseb lennuk lennuväljalt õhku ja hakkab lendama. Tõusul peab lennuk saavutama piisava ettenähtud kõrguse, et jätkata kruisi faasis. Kruisifaas on üldiselt kõige pikem lendamise faas. Kruisifaasi ajal võib lennuki kõrgus maast varieeruda kogu lennuaja vältel vastavalt sellele kui palju kütust on veel lennukis alles. Lähenemisel lennuk alustab kõrguse vähendamist ja valmistub maandumiseks. Maandumisel saabub lennuk lennuväljale ja algab uuesti ruleerimise faas, kus lennuk suundub parkimisplatsile. (European Environment Agency 2023)

Lendamise faasid on kategoriseeritud kahte kategooriasse. Esimese kategooria alla kuuluvad lendamise faasid, mille tegevused toimuvad alla 914 meetri. Siia alla kuuluvad ruleerimine, õhkutõus ja maandumine. Antud kategooriat nimetatakse LTO tsükliks. Teise kategooria alla kuuluvad tõusu, kruisi ja lähenemise faasid. Antud kategooriat nimetatakse CCD tsükliks. (European Environment Agency 2023)

Kalkulaatoriga arvutame lennukimudeli põhiselt välja LTO ja CCD tsükli keskised CO₂ emissioonide kogused. LTO tsükli emissioonide arvutamisel on võetud aluseks ICAO lennuki mootori emissioonide andmebaasi (inglise keeles ICAO Aircraft Engine Emissions Databank). Antud andmebaasis leidub andmeid lennuki mootorite emissioonidest, mis on jagatud mootori tootjate poolt. ICAO andmete põhjal on arvutatud välja LTO tsükli faaside keskised ajalised kestvused ja tõukejõu režiimid. (EASA 2023) CCD tsükli puhul on vaja sisestada kalkulaatorisse lennujaamade vaheline kaugus, mille põhjal arvutatakse välja CCD tsükli pikkus. Antud andmed võivad erineda vastavalt kaugusele, mis kasutaja sisestab. Samuti arvutatakse välja eelduslik transiitaeg ja kütusekulu kahe lennujaama vahel, võttes arvesse sisestatud lennukimudeli keskmist kiirust. (European Environment Agency 2023)

Tabel 10. ICAO lendamise faaside keskised näitajad

Lendamise faas	Tõukejõu režiim	Faasi pikkus (minut)
Õhkutõus	100%	0,7
Tõus	85%	2,2
Lähenemine/maandumine	30%	4
Ruleerimine	7%	26

Allikas: EASA 2023 (Autori koostatud)

Esimesena tuleb CO₂ emissioonide arvutamiseks fikseerida kogu lennu vältel kasutatud lennukikütuse kogus kilotonnides. Seejärel leitakse kui palju lennukikütust kulutati LTO ja CCD tsükli jaoks sisestatud lennukitüübile. Koguse arvutamisel korrutatakse kütuse summa kütuse kasuteguriga. Mõlema tsükli kütuste kogus korrutatakse läbi emissiooni indeksiga. Antud juhul on selleks süsiniku emissiooni indeks. Valemina väljenduvad võrrandid järgnevalt (European Environment Agency 2023):

$$E_{pollutant} = \sum_{Aircraft\ type} AR_{fuel\ consumption, aircraft\ type} \times EF_{pollutant, aircraft\ type}$$

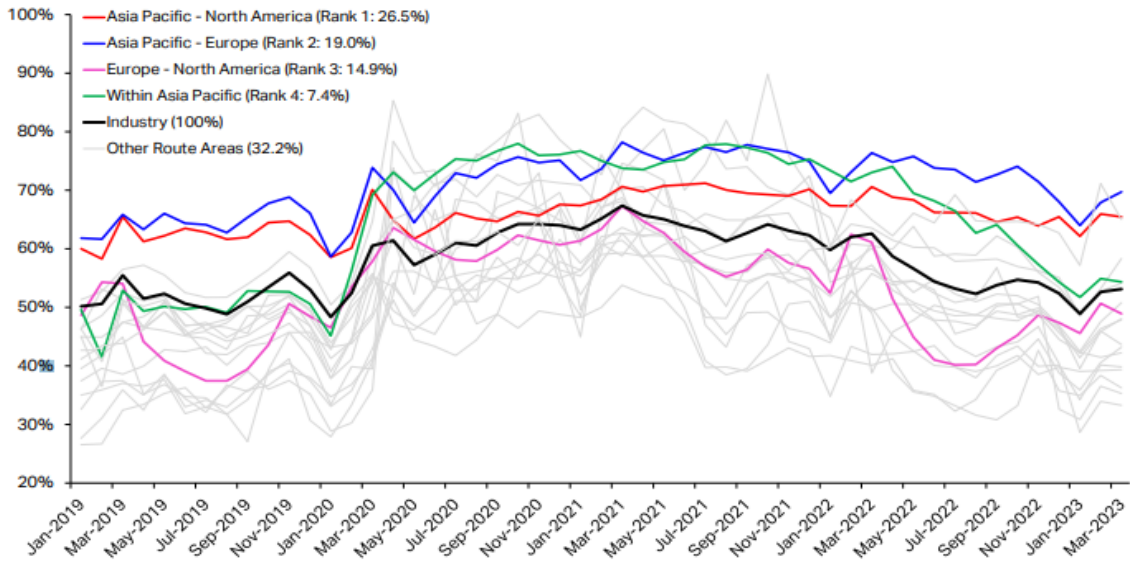
kus E - LTO/CCD tsükli kasvuhoonegaasi emissiooni kogus
 AR - Lennukikütuse kogus
 EF - Kasvuhoonegaasi emissiooni indeks
 $pollutant$ - Kasvuhoonegaasi nimetus
 $Aircraft\ type$ - Lennukimudel
 $fuel\ consumption$ - Põletatud lennukikütuse kogus

Järgnevalt arvutatakse, mis koguses süsinikdioksiidi emiteeritakse tonnkilomeetri (TKM) kohta. TKM on kaubaveo mõõtühik, mis tähistab ühe tonni kauba vedu antud transpordiliigil ühe kilomeetri kohta. Kaubaks arvestatakse ka kauba pakendit. (EUROSTAT 2023) Käesolevas magistritöös on autor valinud transpordi liigiks õhustranspordi.

Esimesena mõõdetakse lähtelennujaama ja sihtlennujaama vaheline kaugus. Lennust emiteeritud CO₂ emissioonide kogus jagatakse lennuki maksimaalse kandevõimega ja korrutatakse läbi lennuki laadimisteguriga ning lennujaamade vahelise kaugusega. Autor määrab uuringus kõikidele lennukimudelitele identsed laadimistegurid. Laadimistegurite määramisel lähtutakse IATA 2023. aasta keskmisest lennulasi laadimistegurist Euroopa sisestel lendudel. Ühest lennust antud lennukimudeli puhul kujuneb CO₂ kogus TKM kohta järgnevalt (Chao 2014, 189):

$$UE_{ij}^{od} = \frac{E_{ij}^{od}}{V_i^{od} \times p_i^{od} \times D^{od}}$$

kus UE_{ij}^{od} - Kasvuhoonegaasi kogus tonnkilomeetri kohta
 E_{ij}^{od} - kasvuhoonegaaside kogus
 V_i^{od} - maksimaalne kandevõime
 p_i^{od} - laadimiskordaja
 D^{od} - vahemaa lennujaamade vahel
 o - lähtelennujaam
 d - sihtlennujaam
 i - vahemaa lennujaamade vahel
 j - veetava kauba kaal



Joonis 7. Ülemaailmse lennukite lennulasti laadimistegurid erinevate piirkondade vahel
Allikas: IATA 2023h

Süsiniku kulu arvutamisel võetakse aluseks EU ETS stsenaariumid (joonis 4), mis autor on seadnud käesoleva magistritöö uuringu teostamiseks. Vastavalt stsenaariumile fikseeritakse mitu lubadust on lennuliin soetanud. Seejärel fikseeritakse, kas antud stsenaariumis on ületatud ostetud lubaduste ülempiiri. Kui on ületatud ülempiiri, siis rakenduvad trahvi nõuded. Eelmainitud liikmed väljenduvad osakaaludena. Antud osakaalud korrutatakse läbi lennust emiteeritud kogu CO₂ kogusega ja keskmise süsiniku kauplemise hinna ning trahvi nõude teguriga. Edaspidi jagatakse summa lennuki maksimaalse kandevõime, laadimiskordaja ja kahe lennujaama vahelise kauguse korrutisega. Valemina kujutatakse võrrandit järgnevalt (Chao 2014, 189):

$$UEC_{ic}^{od} = \frac{E_{ic}^{od} \times (\alpha \times p \times \beta \times f)}{V_i^{od} \times p_i^{od} \times D^{od}}$$

kus UEC_{ic}^{od} - süsiniku kulu tonnkilomeetri kohta

E_{ic}^{od} - CO₂ kogus

α - ostetud lubaduste osakaal

p - keskmine süsiniku kauplemise hind

β - trahvi nõuete osakaal

f - trahvi nõude tegur

V_i^{od} - maksimaalne kandevõime

p_i^{od} - laadimiskordaja

D^{od} - vahemaa lennujaamade vahel

o - lähtelennujaam

d - sihtlennujaam

i - vahemaa lennujaamade vahel

j - veetava kauba kaal

c - süsinikdioksiidi tähis

2.6 Lennujaama tasud

Tallinna Lennujaam saabuvad ja väljuvad lennukid on kohustatud tasuma lennujaama tasude eest. Lennujaama teenuseid korraldab Tallinna Lennujaama tütarettevõtte AS Tallinn Airport GH, kes teenindavad kõiki läbivaid lennuliine. Ettevõtte korraldab maapealset teenindust ja haldab õigusi ja kohustusi, mis on seotud maapealse tegevusega. (Tallinna Lennujaam 2024)

Tallinna Lennujaamal on liigitatud lennujaama tasud 13 kategooria alla. Iga kategooria all on omakorda kuni 20 erinevat teenust, mida pakutakse. Teenused on kategoriseeritud järgnevalt:

1. Maapealne põhiteenus.
2. Reisijate ja pagasi käitlemisteenused.
3. Kauba laadimise teenus.
4. Koordinatsiooniteenus.
5. Üldised teenused.
6. Koristamine teenused.
7. Pagasite veoteenused.
8. Sõidukite ja seadmete teenused.
9. Lennumeeskonna teenused.
10. Seadmete rent.
11. Jää sulatamise teenused.
12. Navigatsiooni ja lennujaama tasud.
13. Infrastruktuuri tasud. (Tallinn Airport GH 2023)

Euroopa lennujaamad kasutavad laialdaselt ACA süsteemi lennujaama jätkusuutlikkuse edusammude fikseerimiseks. Alates 3. tasemest peavad lennujaamad osalema kolmandate osapoolte kasvuhooonegaasi emissioonide piiramises. Sellest tulenevalt täheldatakse lennujaamades tõusu lennuliinide CO₂ või NO_x (lämmastikoksiid) emissioonide tasustamise rakendamises. Lennujaamad, kes on saavutanud 3+ taseme või kõrgema on hakanud kehtestama saastavamatele lennukitele CO₂ emissioonide tasusid, et suunata lennuliine vähendama oma süsinikujalajälge.

Tallinna Lennujaamas ei tasustata lennukeid CO₂ emissioonide põhjal. Siiski rakendatakse emissioonide lisatasu mitmetes Euroopa lennujaamades. Näiteks lennujaamades - Stockholm Arlanda, Schiphol, Heathrow, Gatwick. Kõikides lennujaamades on kasutatud erinevaid tasude arvutamise põhimõtteid. Tasusid arvutatakse, kas CO₂ või NO_x koguste pealt. Kogused väljendatakse, kas tonnides või kilogrammides. Kõikide eelmainitud lennujaamade puhul on võetud aluseks LTO tsükli emissioonid. Käesolevas magistritöös on võetud aluseks nii LTO kui ka CCD tsükli jooksul emiteeritud CO₂ kogused.

Stockholm Arlanda lennujaamas arvutatakse läbivatelt lennukitelt CO₂ emissioonide tasu. Lennukid on kategoriseeritud kolme gruppi. Esimese grupi alla kuuluvad lennukid, mille MTOW on suurem kui 175 tonni. Teine grupp koosneb lennukitest, mille MTOW on võrdne või vähem kui 175 tonni. Antud grupp koosneb ainult reisilennukitest. Kolmas grupp on lennukid, mille MTOW on võrdne või vähem kui 175 tonni. Antud grupi alla kuuluvad lennukid, mis ei ole kategoriseeritud reisilennukitena. Kõikide gruppide puhul on arvutatud välja keskmised CO₂ kogused LTO tsükli, mida emiteerivad lennukid, mis on läbinud viimase aasta jooksul Stockholm Arlanda lennujaama. Aluseks on võetud keskmised näitajad ICAO Engine Emission andmebaasist. Kõik lennukid, mis emiteerivad üle keskmise näitaja peavad tasuma vastavalt lennujaamale hinnakirjale CO₂ emissiooni trahvi (tabel 11). Antud tulu suunatakse boonuseks lennuliinidele, kes kasutavad säästlikumaid lennukeid. (Swedavia Airports 2022)

Schiphol lennujaamas arvutatakse NO_x emissioone kilogrammi kohta, CO₂ koguseid ei arvestata. Lennukilt arvutatakse emiteeritud NO_x kilogrammi kohta LTO tsükli, mille keskmine väärtus võetakse ICAO Engine Emissions andmebaasist. Antud kogus korrutatakse 4 euroga läbi ja leitakse emissiooni tasu kogusumma. (Schiphol 2023)

Heathrow lennujaamas arvutatakse nii CO₂ kui ka NO_x emissioonide emissioonide tasud. Lennukitelt võetakse samuti keskmised CO₂ ja NO_x näitajad ICAO Engine Emission andmebaasist. Lennuki LTO tsüklis emiteeritud CO₂ kogus kilogrammi kohta korrutatakse läbi 0,04 Suurbritannia naelsterlinguga ning NO_x 35,25 Suurbritannia naelsterlinguga. (Heathrow 2023) Sarnast mudelit järgib ka Gatwick lennujaam, mis arvestab emissioone kilogrammide asemel tonnides. Lennukite LTO tsüklis emiteeritud CO₂ kogus tonnides korrutatakse läbi 40,55 Suurbritannia naelsterlinguga ja NO_x kogus korrutatakse 4,86 Suurbritannia naelsterlinguga. (Gatwick Airport 2023)

Tabel 11. Stockholm Arlanda, Schiphol, Heathrow, Gatwick lennujaamade emissioonide tasu võrdlus

Lennujaam	Ühik	Tasukordaja
Stockholm Arlanda	Kg CO ₂ / MTOW	10-50 SEK/MTOW
Schiphol	Kg NO _x	4 € / kg NO _x
Heathrow	Kg NO _x	35.25 £ / kg NO _x
	Kg CO ₂	0.04 £ / kg CO ₂
Gatwick	Kg NO _x	4.86 £ / kg CO ₂
	Tonn CO ₂	40.55 £ / tonn CO ₂

Allikas: Swedavia Airports, Schiphol, Heathrow, Gatwick Airport (Autori koostatud)

Kõigi nelja eelmainitud lennujaama puhul on vähemalt üks ühine omadus. CO₂ või NO_x emissioonid on arvutatud LTO tsükli põhjal. Sellega pole arvestatud kogu lennu jooksul emiteeritud kasvuhoonegaaside emissioone. Käesolevas magistritöös arvestatakse nii LTO kui ka CCD tsüklite CO₂ emissioone. Samuti võetakse arvesse lennuliinide hetkeolukorrad. Sellega arvestatakse, kui mitme protsendi võrra ületavad lennuliinid tasuta EU ETS lubaduste ülempiiri. Antud tulemuste põhjal saab näha lennuliini põhiselt, millised lennuliinid peaksid rohkem keskenduma oma süsinikujalajälje vähendamisele.

Tallinna Lennujaama CO₂ emissiooni tasu arvutamisel on võetud aluseks lennu süsiniku kulu. Tasu arvutamisel on võetud uuringus kasutatavad lennukimudelid ja määratud nende LTO tsükli emissioonid. Seejärel on tulemuste põhjal arvutatud välja keskmised CO₂ emissiooni tasude summad Heathrow ja Gatwick lennujaamades (tabel 12).

Keskliste CO₂ emissiooni tasude summadest tuletatakse orienteeruv summa Tallinna Lennujaama tasuks. Autor on Tallinna Lennujaama CO₂ emissiooni tasu arvutamiseks võtnud lennu süsiniku kulu ja jaganud antud summa viiega. Tasu summat on võimalik korrigeerida vajadusel kasutades, kas väiksemat või suuremat numbrit.

Tabel 12. Heathrow ja Gatwick lennujaamade CO₂ emissiooni eeldatavad tasud

TLL-CPH	CO ₂ tonnides	Heathrow	Gatwick
Boeing 757-200F	4.29	171.6	174.0
Airbus A220-300	1.67	66.8	67.7
ATR 72-600	0.63	25.2	25.5
Embraer E190LR	1.88	75.2	76.2
RIX-TLL	x	x	x
Boeing 757-200F	4.29	171.6	174.0
Airbus A220-300	1.67	66.8	67.7
ATR 72-600	0.63	25.2	25.5
Embraer E190LR	1.88	75.2	76.2
TLL-ARN	x	x	x
Boeing 757-200F	4.29	171.6	174.0
Airbus A220-300	1.67	66.8	67.7
ATR 72-600	0.63	25.2	25.5
Embraer E190LR	1.88	75.2	76.2
WAW-TLL	x	x	x
Boeing 757-200F	4.29	171.6	174.0
Airbus A220-300	1.67	66.8	67.7
ATR 72-600	0.63	25.2	25.5
Embraer E190LR	1.88	75.2	76.2
Keskmine GBP	x	84.7	85.9
Keskmine EUR	x	98.3	99.6

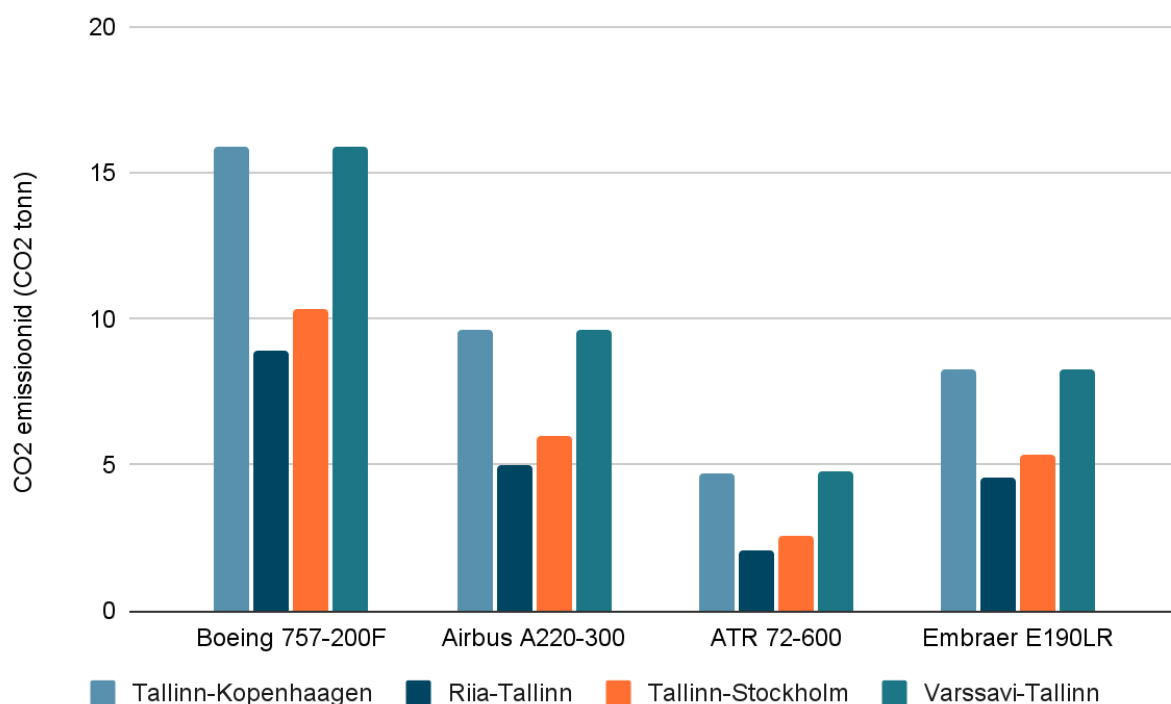
Allikas: Autori koostatud

3. ANALÜÜS JA TULEMUSED

3.1 Kvantitatiivse osa analüüs

3.1.1 Ülevaade Eesti lennuliikluses osalevate lennuliinide hetkeolukorrast

Kvantitatiivsete tulemuste analüüsimiseks valis autor neli lennumarsruuti, mis läbivad Tallinna Lennujaama. Lennumarsruutidele on valitud neli lennukimudelit olemasolevatelt lennumarsruutidelt, mis läbivad 2024. aasta andmetel Tallinna Lennujaama. Antud lendudel on fikseeritud CO₂ emissioonid, mida võrreldakse ja analüüsitakse.



Joonis 8. Ülevaade lennukitest emiteeritud CO₂ kogustest neljal lennumarsruudil
Allikas: Autori koostatud

Neljast uuritavast lennukimudelist on kõige saastavam turboventilaatormootoriga Boeing 757-200F kõigil neljal lennumarsruudil. Tegemist on uuringus kasutatava suurima kandevõime lennukiga. Boeing 757-200F emiteeris keskmiselt kõikidelt lennumarsruutidelt 68 protsenti võrra rohkem CO₂ kui Airbus A220-300. Airbus A220-300 on samuti turboventilaatormootoriga lennuk, mis on uuringus kandevõimet arvestades teisel kohal. Erinevus tuleneb sellest, et kahe lennuki kandevõime erinevus on 2,16 kordne.

ATR 72-600 on ainukene uuringus kasutatav turbopropellerimootoriga lennuk. Kuna lennuk on antud uuringus mahu poolest kõige väiksem, seetõttu on ka see kõige säästlikum. Võrreldes turboventilaatormootoriga Embraer E190LR, mis on suuruselt kolmas lennuk, on igal lennumarsruudil emiteeritud keskmiselt 47 protsenti vähem CO₂. ATR 72-600 ja Embraer E190L - kandevõime erinevus on 1,75 kordne.

Tabel 13. Ülevaade lendudel emiteeritud CO₂ kogustest

Lennumarsruut	Lennukaugus (meremiil)	Lennukimudel	CO₂ emissioonid (tonn)
Tallinn-Kopenhaagen	454	Boeing 757-200F	15.87
		Airbus A220-300	9.65
		ATR 72-600	4.74
		Embraer E190LR	8.27
Riia-Tallinn	152	Boeing 757-200F	8.94
		Airbus A220-300	5.01
		ATR 72-600	2.07
		Embraer E190LR	4.56

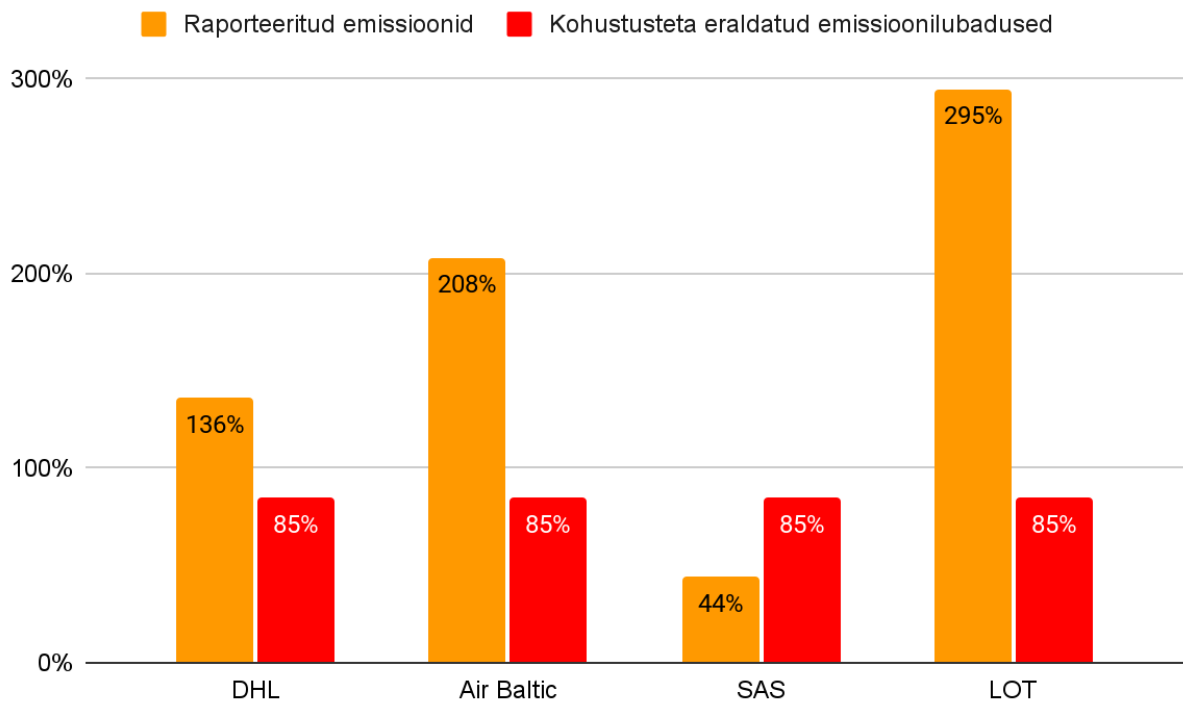
Tabel 13. järg

Tallinn-Stockholm	212	Boeing 757-200F	10.35
		Airbus A220-300	5.98
		ATR 72-600	2.58
		Embraer E190LR	5.38
Varssavi-Tallinn	455	Boeing 757-200F	15.89
		Airbus A220-300	9.66
		ATR 72-600	4.75
		Embraer E190LR	8.28

Allikas: Autori koostatud

EU ETS initsiatiivi kohaselt jagatakse igale EL liikmesriigile igal aastal teatud hulk lubadusi. Vastavalt lennuliinide turuosa suurustele saavad teatud riigid, kust pärinevad suuremad lennuliinid rohkem lubadusi. Kehtib reegel, kus lennuliinid on lubatud emitteerida ilma tasudeta kuni 85 protsendi ulatuses neile jagatud lubadustega. Kõik emissioonid, mis ületavad 85 protsendist ülempiiri tekitavad iga tonni CO₂ kohta täiendavat kulu lennuliinile. (EUR-LEX 2023)

Antud uuringus on hetkeolukorra fikseerimiseks kasutatud Euroopa Keskkonnaagentuuri 2023. andmeid ja on leitud kõigi nelja lennuliini omavate riikide emissioonide kogused protsentuaalselt. Andmed on üldistatud lennuliini põhiselt liikmesriigile jagatud lubaduste kogustest. (European Environment Agency 2024) Boeing 757-200F, mida esindab DHL on lennuliini operaatoriks määratud DHL Air Austria, mille puhul on võetud aluseks Austria andmed. Airbus A220-300 esindab lennuliini operaatorina Air Baltic ehk antud juhul on võetud aluseks Läti andmed. Kuigi ATR 72-600 esindavaks lennuliiniks on SAS, siiski on lennuliini operaatoriks Xfly, mis on varustanud SAS-i lennuki ja meeskonnaga. Seetõttu on kasutatud Eesti andmeid. Embraer E190LR puhul esindab lennuliini operaatorina LOT ja aluseks on võetud Poola andmed.

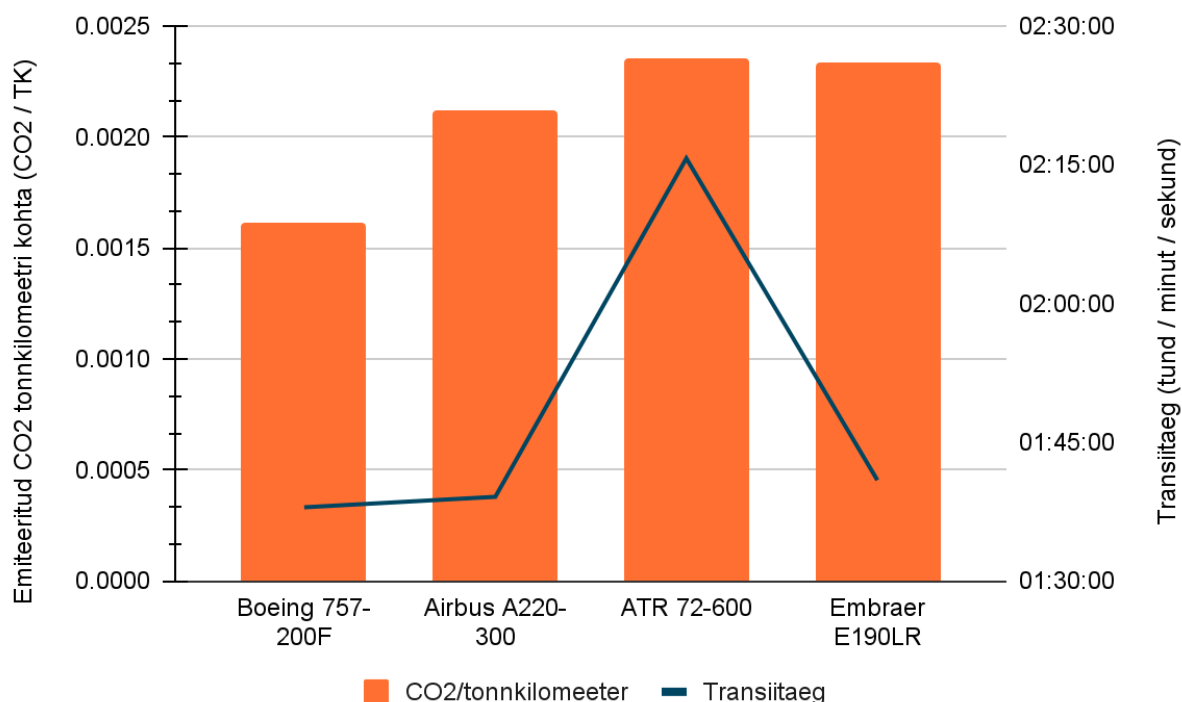


Joonis 9. Ülevaade lennuliinide lubaduste utiliseerimisest 2023. aastal
Allikas: Autori koostatud

Neljast lennuliinist on ainult SAS, mille operaatoriks on Xfly suutnud kasutada 44 protsenti neile jagatud lubadustest. Seega on SAS suutnud ilma lisakuludeta lennata uuringus etteantud lennumarsruudil. Kuna ülempiiri ja raporteeritud emissioonide vahe on 39 protsenti, siis neil on võimalus antud lubadusi oksjonile suunata ja sellest tulu hoopis teenida. Ülejäänud kolmel lennuliinil on vaatlusperioodil ületatud 85 protsendilist ülempiiri. Sellises olukorras peavad need kolm lennuliini soetama oksjonilt juurde 15 protsenti lubadusi. See on eriti kulukas suurematel lennuliinidel, kes emiteerivad kõige rohkem. Kui lennuliin ületab sadat protsenti, siis rakendub iga ühe tonni CO₂ pealt trahvi piirmäär. DHL-i puhul on vaja kompenseerida kokku 51 protsendi ulatuses emiteeritud emissioonide pealt. Air Baltic peab tasuma 123 protsenti lubadustest ja LOT peab tasuma 210 protsendi eest.

3.1.2 Tallinn-Kopenhaagen liin

Lennu süsiniku efektiivsuse arvutamisel on võetud arvesse nelja tegurit. Need on kogu lennu vältel emiteeritud CO₂ emissioonid, lennuki laadimistegur ja maksimaalne kandevõime ning lennukaugus. Uuringus kasutatud laadimistegur on kõikidel lennukimudelitel samaväärne. 2024. aasta andmetel lendab Tallinn-Kopenhaagen liinil Boeing 757-200F, mille lennuaega kasutatakse baasväärtusena lendude transiidiaegade võrdlemisel.



Joonis 10. Tallinn-Kopenhaagen liinil emiteeritud CO₂ tonnkilomeetri kohta ja lennu transiitaja suhe
Allikas: Autori koostatud

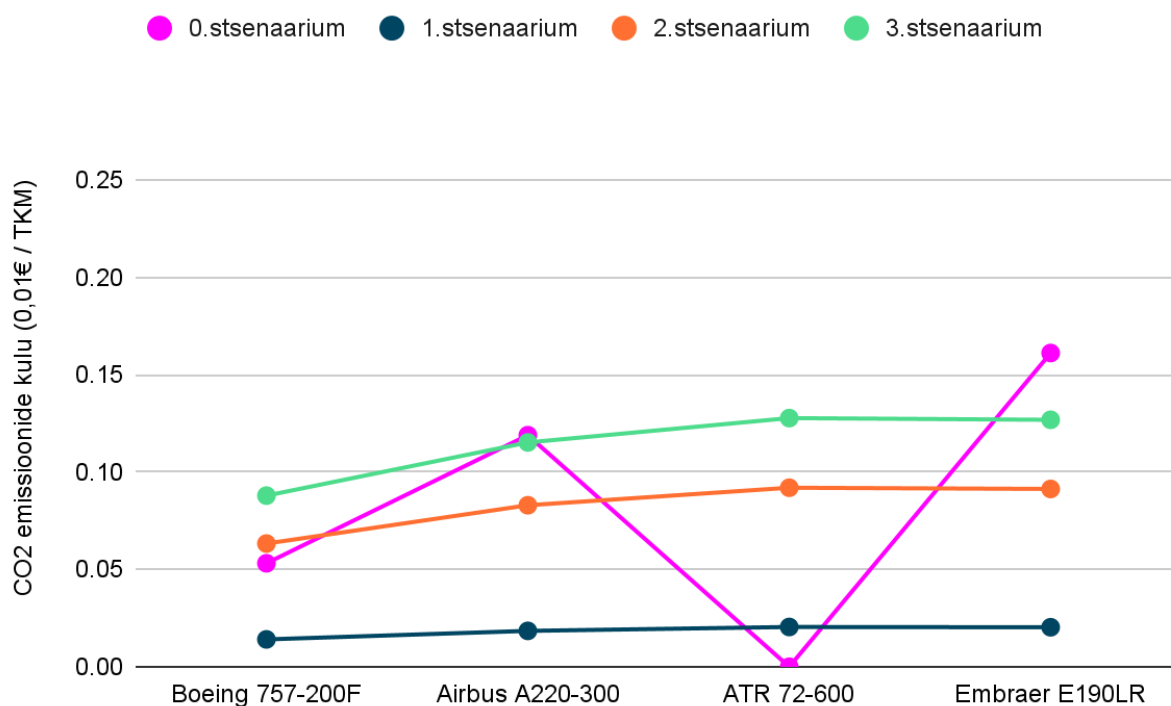
ATR 72-600 lennukimudeli emiteeritud CO₂ TKM kohta on kõige suurem vaadeldavatest lennukitest. Selle väärtus on 0,00235, mis tähendab et lennuk on Tallinn-Kopenhaagen liinil kõige ebaefektiivsem. Antud väärtus näitab, et ATR 72-600 emiteerib kõige rohkem CO₂ ühe tonni kauba kohta, mida veetakse üle ühe kilomeetri. Arvestades, et tegemist on võrdluses oleva väikseima lennukiga on lennu transiitaaeg samuti kõige pikem, 2 tundi ja 15 minutit.

Embraer E190LR-i emiteeritud CO₂ TKM kohta on 0,00233, mis on 0,7 protsenti vähem kui ATR 72-600. Käesolev lennukimudel on turboventilaatormootoriga, mis on kõigist kolmest turboventilaatormootoriga lennukist kõige ebaefektiivsem. Peamine erinevus seisneb lennu transiitajas, mille kestvus on 1 tund, 40 minutit ja 53 sekundit. Antud näitaja poolest on lennuaeg 36 protsenti lühem kui ATR 72-600 lennukimudelil. Embraer E190LR-il on keskmine ja maksimum kiirus suuremad kui turbopropellerimootoriga lennukil, mis tagab kiirema transiitaja. Näeme, et Embraer E190LR on kõige ebaefektiivsem kolmest turboventilaatormootoriga lennukist, mis viitab, et antud lennukimudeli kütuseefektiivsus on kõige madalam.

Airbus A220-300 emiteeritud CO₂ TKM kohta on 0,00212, mis on 9 protsenti vähem kui Embraer E190LR-il. Lennu transiitajaeg on 1 minut, 48 sekundit kiirem antud marsruudil. See viitab sellele, et kuigi Airbus A220-300 kütuseefektiivsus on parem kui Embraer E190LR-il, siiski olulist erinevust transiitajas ei ole, sest mõlemad lennukid kasutavad sarnast tüüpi mootorit.

Boeing 757-200F on Tallinn-Kopenhaagen liinil kõige süsiniku efektiivsem lennukimudel. Lennu jooksul emiteeritud CO₂ TKM kohta on 0,00161, seda on 24 protsenti vähem kui Airbus A220-300. Transiitaja osas on see samuti kõige kiirem, jõudes lennu läbida 1 minuti ja 8 sekundit kiiremini kui Airbus A220-300. Kuigi Boeing 757-200F emiteeritud CO₂ kogus ühest lennust on kõige suurem lennuki suuruse tõttu. Siiski on emiteeritud CO₂ kõige madalam ühe tonni kauba vedamisel üle ühe kilomeetri kohta.

Lendude süsiniku kulu arvutamisel on võetud arvesse seitse tegurit. Lennust emiteeritud CO₂ kogus, lennuki maksimaalne kandevõime ja laadimiskordaja ning lennukaugus. Antud tegurite kaudu on leitud mudeli põhiselt emiteeritud CO₂ TKM kohta. Seejärel on vastavalt stsenaariumile arvestatud ostetud lubaduste ja trahvi nõuete osakaaludega ning keskmise süsiniku kauplemise hinnaga, et leida süsiniku kulu, mida lennuliinid peavad tasuma kolmes stsenaariumis. Hetkeolukord on 0.stsenaarium (joonis 11), kus on toodud 2023. aasta andmetel lennuliinid poolt emiteeritud CO₂ pealt makstavad tasud.



Joonis 11. Tallinn-Kopenhaagen liinil nelja stsenaariumi CO₂ emissioonidest tulenev süsiniku kulu
Allikas: Autori koostatud

DHL-i lennuliini esindav Boeing 757-200F on 0.stsenaariumis ühe TKM kohta süsiniku kulu 0,053 eurot (joonis 11). Ehk ühe lennu kohta on kogu süsiniku kulu 521,57 eurot. Tallinna-Kopenhaagen liinil on DHL ületanud kohustusteta eraldatud emissioonilubaduste ülempiiri 51 protsendi võrra. See tähendab, et lennuliin on sunnitud oksjonilt soetama 15 protsendi ulatuses lubadusi oksjonilt ja ülejäänud 36 protsendi eest peab tasuma trahve vastavalt seatud piirmääradele. Kui võrrelda 1.stsenaariumiga, siis peaks lennuliin vähendama lennust emiteeritud emissioone 73 protsendi võrra, et vähendada süsiniku kulu 0,014 euro peale TKM kohta. Sellega vähendades lennu kogu süsiniku kulu 138,02 euro peale.

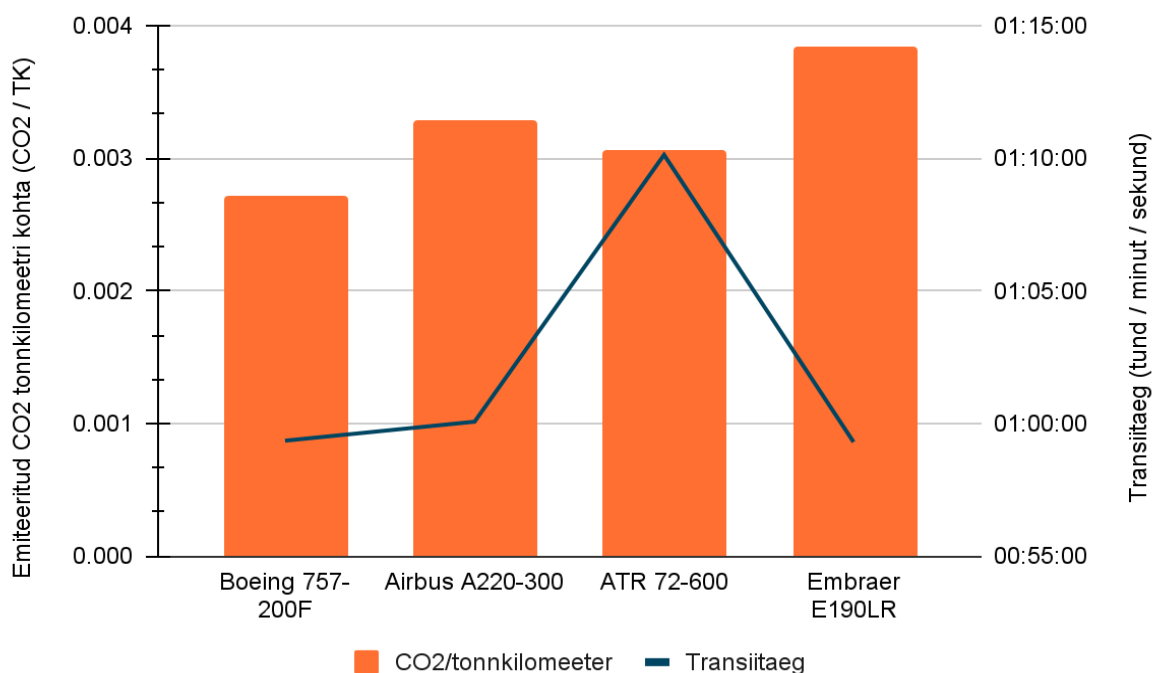
Air Baltic lennuliini esindav Airbus A220-300 on 0.stsenaariumis ühe TKM kohta süsiniku kulu 0,119 eurot. Sellest tulenevalt on hetkeolukorras lennu kogu süsiniku kulu 541,41 eurot. Air Baltic on ületanud kohustusteta eraldatud emissioonilubaduste ülempiiri 123 protsendi võrra. Kui vähendada emiteeritud CO₂ emissioone 3. stsenaariumi tasemele, siis suudaks 3,2 protsendi võrra vähendada süsiniku kogu kulu 524,46 euro peale. Stsenaariumi number 2 puhul väheneks süsiniku kulu 30 protsendi võrra, mille kogu süsiniku kulu on 377,62 eurot. Stsenaariumi number ühega on võimalik vähendada kogu süsiniku kulu 84 protsendi võrra ehk 83,92 euro peale.

SAS-i esindav ATR 72-600 on käesolevas uuringus ainukene lennuk, millest ei teki süsiniku kulu antud näites. See tuleneb sellest, et lennuliin pole ületanud kohustusteta eraldatud emissioonilubaduste ülempiiri. Täpsemalt on kasutatud 41 protsendi võrra vähem lubadusi, jäädes seega alla piirmäära ja lennata täiendava süsiniku kuluta.

LOT lennuliini esindav Embraer E190LR on 0.stsenaariumis ühe TKM kohta süsiniku kulu 0,161 eurot. Sellega olles kõige suurema süsiniku kuluga lennuliin. Hetkeolukorras on lennu kogu süsiniku kulu 571,04 eurot. LOT on ületanud kohustusteta eraldatud emissioonilubaduste ülempiiri 210 protsendi võrra. Sellest tulenevalt saaks lennuliin vähendada 3. stsenaariumis 22 protsendi võrra süsiniku kulu, tuues kogu süsiniku kulu 449,46 euro peale. Stsenaarium number kahe puhul väheneks 43 protsendi võrra süsiniku kulu ehk süsiniku kogu kulu oleks 323,61 eurot. Stsenaarium number ühega on võimalik minimiseerida süsiniku kulu 87 protsendi võrra, mille tulemusena oleks süsiniku kogu kulu 71,92 eurot.

3.1.3 Riia-Tallinn liin

Riia-Tallinna liini eripära on kahe lennujaama vaheline kaugus. Käesolevas uuringus on selleks 152 meremiili, mistõttu on tegemist kõige lühema lennukaugusega. Sellest tulenevalt erinevad tulemusest kui võrrelda pikemate lennukauguse marsruutidega (joonis 12). Antud liinil lendab 2024. aasta andmetel Airbus A220-300, mille lennuaega kasutatakse baasväärtusena lendude transiitaegade võrdlemisel.



Joonis 12. Riia-Tallinn liinil emiteeritud CO₂ tonnkilomeetri kohta ja lennu transiitaja suhe

Allikas: Autori koostatud

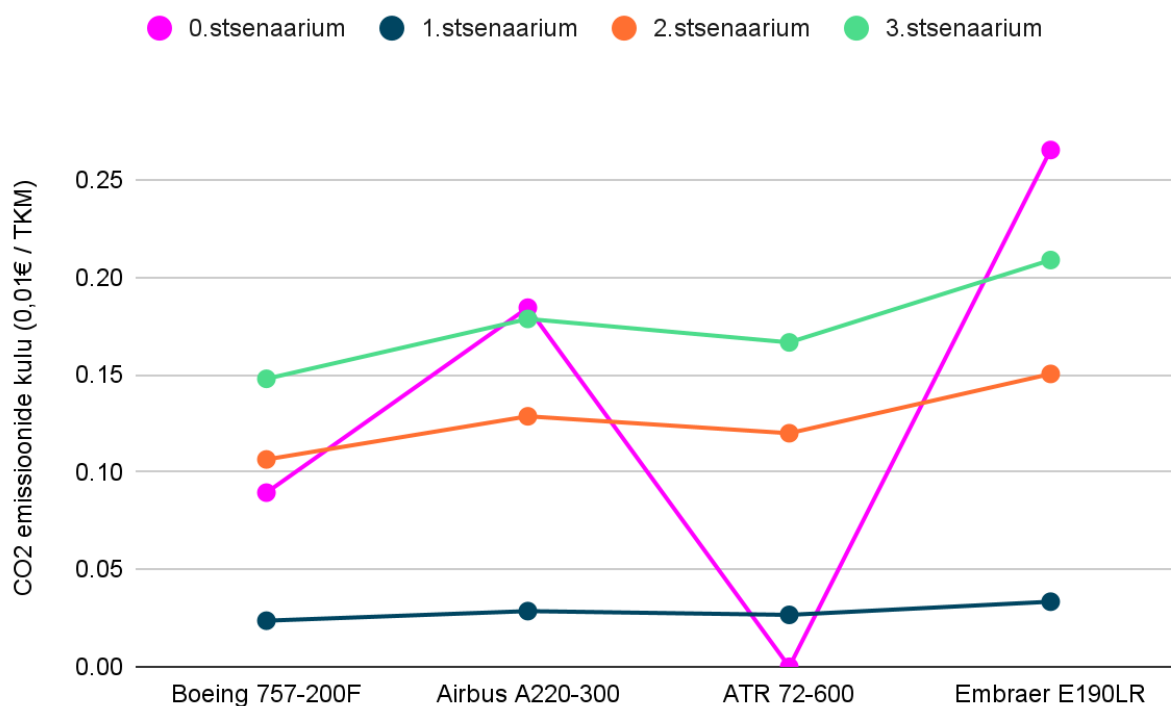
Embraer E190LR on Riia-Tallinn liinil kõige madalam süsiniku efektiivsus. Lennuki emiteeritud CO₂ TKM kohta on 0,00385. Antud väärtus on 14 protsendi võrra suurem kui A220-300 lennukimudelil. Vaatamata sellele on Embraer E190LR lennuaja kestvus kõige lühem. Kuigi turboventilaatormootoritega lennukitel pole täheldada transiitajas märkimisväärset erinevust, siiski on Embraer E190LR 46 sekundit kiirem kui Airbus A220-300. Embraer E190LR on turboventilaatormootoritega lennukitest mahult kõige väiksem, kuid samas kõige madalama süsiniku efektiivsusega.

Airbus A220-300 emiteeritud CO₂ TKM kohta on 0,00385. Antud väärtus on 7 protsendi võrra suurem kui ATR 72-600 lennukimudel. Lennu transiitaaeg on turboventilaatormootoriga lennukitest kõige pikem. Lennu kestvus on 1 tund ja 4 sekundit.

ATR 72-600 on turbopropellerimootoriga lennuk ja on süsiniku efektiivsuse parameetrilt teine kõige efektiivsem lennukimudel. Lennuk emiteeris 0,00307 CO₂ TKM kohta, mis on 11 protsendi võrra ebaefektiivsem kui Boeing 757-200F. Lennu transiitaaeg on 10 minutit ja 4 sekundit pikem kui Airbus A220-300. Arvestades, et lennukaugus on lühike ja ATR 72-600 on kõige väiksema mahuga lennuk. Siiski on see konkurentsivõimeline võrreldes teiste lennukitega.

Boeing 757-200F on kõige süsiniku efektiivsem lennuk Riia-Tallinna marsruudil. Lennuk emiteeris 0,00272 CO₂ TKM kohta. Lennu transiitaeag on 43 sekundit kiirem kui Airbus A220-300. Arvestades lennukaugust on kõige suuremahulisem lennuk antud uuringus ka efektiivne lühematel distantidel.

Riia-Tallinn liinil on täheldada keskmiselt 35 protsendilist tõusu emiteeritud CO₂ TKM kohta kõikidel lennukimudelitel, võrreldes Tallinn-Kopenhaagen liiniga. Erinevus seisneb selles, et läbitud distant on lühem. See tähendab, et lennukid lendavad CCD tsüklis vähem kui Tallinn-Kopenhaagen liinil. Kuna CCD tsüklis on lennukid üldiselt stabiilsete kütusekuludega, mis tähendab, et kogu lennu peale on ühtlasemalt kütusekulu jaotatud. Riia-Tallinn liinil on lennukid LTO tsüklis protsentuaalselt 30-50 protsenti kauem kui Tallinna-Kopenhaagen liinil, mis tõttu on kütusekulu suurem. Seega on ka suuremad lennust emiteeritud CO₂ kogused.



Joonis 13. Riia-Tallinn liinil nelja stsenaariumi CO₂ emissioonidest tulenev kulu
Allikas: Autori koostatud

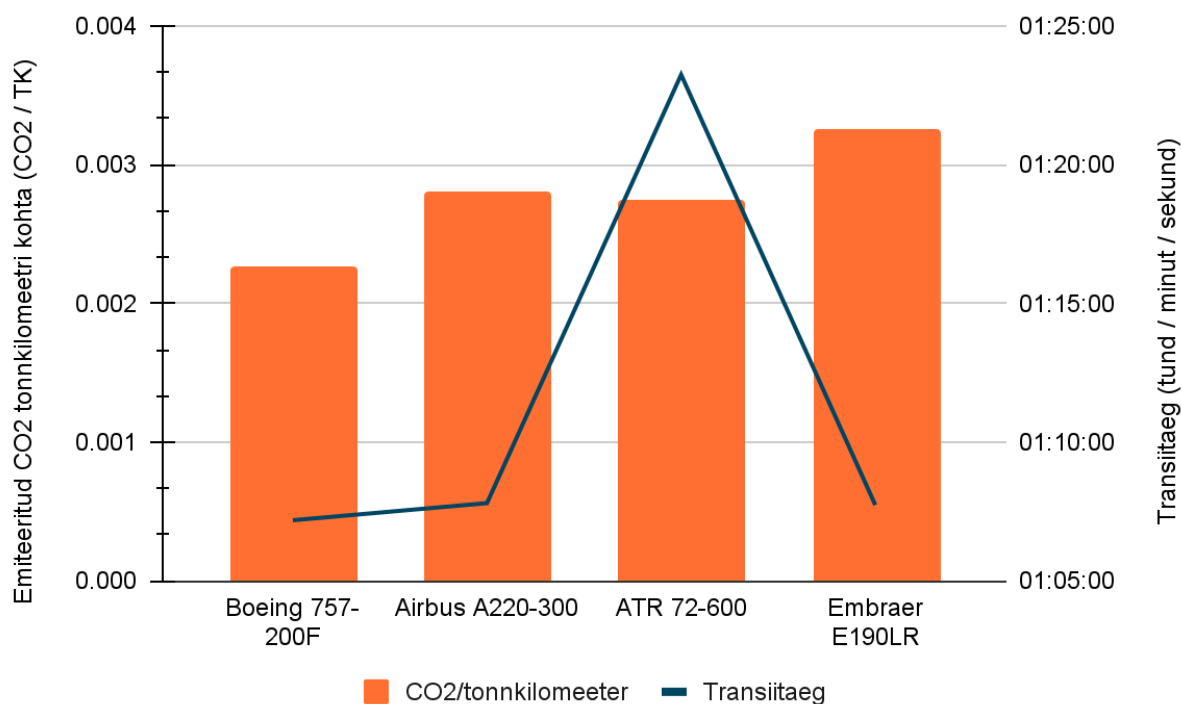
Boeing 757-200F on 0.stsenaariumis ühe TKM kohta süsiniku kulu 0,089 eurot (joonis 13). Ehk ühe lennu kohta on kogu süsiniku kulu 293,82 eurot. Võrreldes Tallinn-Kopenhaagen liiniga on süsiniku kogu kulu väiksem, kuigi CO₂ TKM kohta on Riia-Tallinn liinil suurem. Kuna tegemist on oluliselt lühema distantsiga, siis on ka süsiniku kulu oluliselt madalam. Kui võrrelda 1.stsenaariumiga, siis peab lennuliin vähendama emiteeritud CO₂ emissioone 74 protsendi võrra, et saavutada süsiniku kogu kuluks 77,75 eurot. Sellisel juhul ei pea lennuliin tasuma rohkem trahve ja peab ainult soetama oksjonilt 15 protsendi ulatuses lubadusi.

Airbus A220-300 on 0.stsenaariumis ühe TKM kohta süsiniku kulu 0,18 eurot. Sellest tulenevalt on ühe lennu kogu süsiniku kulu 281,08 eurot. Kõikidel liinidel, kaasa arvatud Riia-Tallinn liinil on protsentuaalselt võrdsel määral vaja vähendada CO₂ emissioone, et jõuda võrreldava stsenaariumini. Uuringus on kasutatud iga stsenaariumi puhul identseid ostetud lubaduste ja trahvide osakaalusid. Ainukene erinevus seisneb kogu süsiniku kulus, mis erineb igal liinil. Vastavalt 3.stsenaariumile saab lennuliin säästa 8,79 eurot kui võrrelda 0.stsenaariumiga. Lähtudes stsenaarium number kahest, siis saab lennuliin kokku hoida 85,03 eurot ehk kogu süsiniku kulu oleks 196,05 eurot. Esimese stsenaariumi puhul on lennuliinil võimalik vähendada kogu süsiniku kulu 237,51 euro võrra, mille lõpp summaks jääks 43,57 eurot. ATR 72-600 lennukimudelil sarnaselt Tallinn-Kopenhaagen liinil ei teki süsiniku kulu samuti Riia-Tallinn liinil, sest lennuliin ei ole ületanud kohustusteta eraldatud emissioonilubaduste ülempiiri.

Embraer E190LR on 0.stsenaariumis ühe TKM kohta süsiniku kulu 0,27 eurot. Selle tulemusena on hetkeolukorras ühe lennu kogu süsiniku kulu 314,87 eurot. Antud lennukimudeli puhul aitaks lennuliinil kulusid säästa iga stsenaariumi rakendamine. Kõige pessimistlikuma stsenaarium number kolmega saaks lennuliin säästa 67,04 eurot lennult. Süsiniku kogukulu on sellisel juhl 247,83 eurot. Stsenaarium number kahega saab lennuliin kokku hoida 136,43 eurot lennult, millega oleks süsiniku kogukulu 178,44 eurot. Kõige optimistlikumat stseenariumi järgides (number üks stsenaarium) peaks lennuliin optimeerima CO₂ emissioone, nii et süsiniku kulu lennust väheneks 275,21 euro võrra. Sellest tuleks süsiniku kogukulu 39,65 eurot. Lennuliin peaks vähendama 7,93 korda lennust emiteeritud CO₂ emissioone, et saavutada 1.stsenaariumi taseme. Sellega ei peaks lennuliin enam tasuma trahve, kuid peaks siiski oksjonilt juurde soetama 15 protsendi ulatuses lubadusi.

3.1.4 Tallinn-Stockholm liin

Tallinn-Stockholm liinil on kahe lennujaama vaheline kaugus pikkuselt teisel kohal võrreldavates lennumarsruutidest. Lennujaamade vaheline kaugus on 212 meremiili, mis on 60 meremiili kaugemal kui Riia ja Tallinna lennujaamad. 2024. aasta andmetel lendab Tallinn-Stockholm liinil ATR 72-600. Anutd lennuki lennuaega kasutatakse baasväärtusena lendude transiidiaegade võrdlemisel (joonis 14).



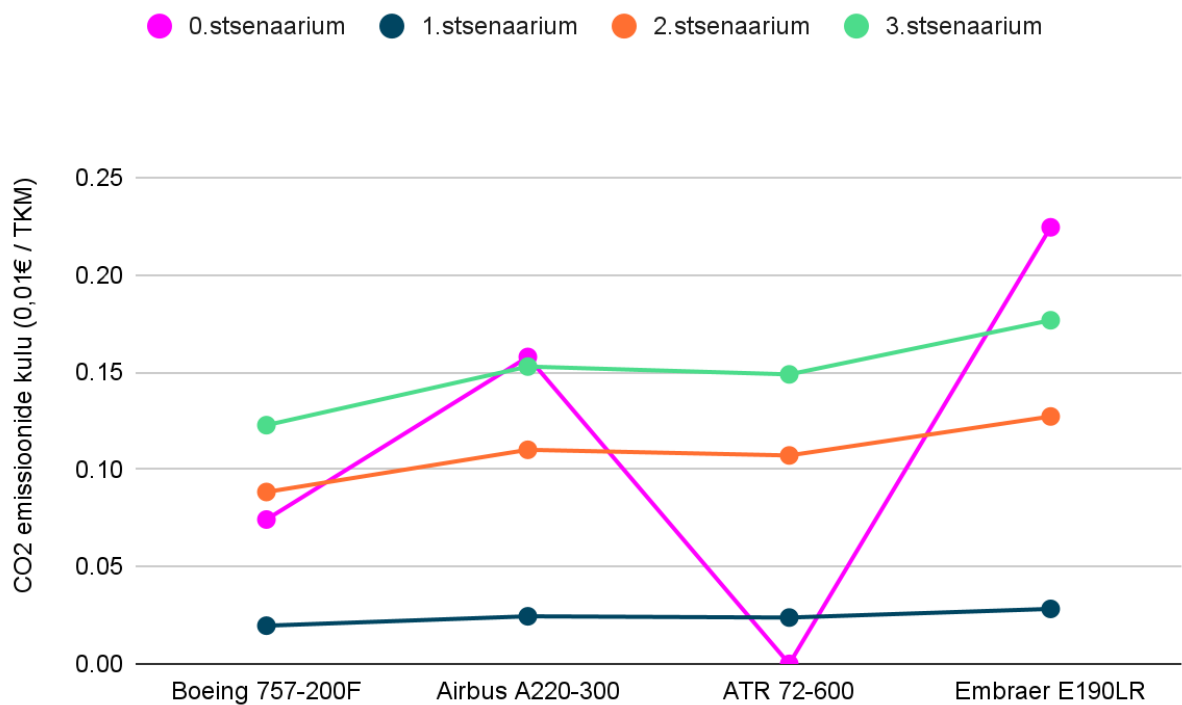
Joonis 14. Tallinn-Stockholm liinil emiteeritud CO₂ tonnkilomeetri kohta ja lennu transiitaja suhe
Allikas: Autori koostatud

Embraer E190LR on Tallinn-Stockholm liinil kõige madalama süsiniku efektiivsusega lennuk. Lennust emiteeritud CO₂ TKM kohta on 0,00325. Lennu kestvus on 15 minutit ja 31 sekundit lühem kui lennukimudelil ATR 72-600. Kuna Embraer E190LR on turboventilaatormootoriga, millel on keskmine kiirus suurem kui turbopropellerimootoril, siis on ka lennu transiidiaegade erinevus suurem. Embraer E190LR oli Tallinn-Kopenhaagen liinil rohkem süsiniku efektiivsem kui ATR 72-600. Riia-Tallinn ja Tallinn-Stockholm liinidel on see vastupidi. Hinnanguliselt hakkab turbopropellerimootori süsiniku efektiivsus langema kui lennujaamade vaheline kaugus ületab 440 meremiili. Antud olukorras hakkavad turboventilaatormootoriga lennukite süsiniku efektiivsused iga lennatud meremiiliga tõusma võrreldes turbopropellerimootoriga lendudel.

Airbus A220-300 emiteeritud CO₂ TKM kohta on 0,00281. Süsiniku efektiivsuse parameetrilt on lennuk 3. kohal, olles efektiivsem kui Embraer E190LR. Lennu kestvus on 15 minutit ja 27 sekundit lühem kui ATR 72-600. Airbus A220-300 lennu transiitaeg on 4 sekundit pikem, selle poolest on ta marginaalselt aeglasem kui Embraer E190LR.

ATR 72-600 on saavutanud teise kõige parema süsiniku efektiivsuse antud marsruudil. Lennust emiteeritud CO₂ TKM kohta on 0,00274. Lennu kestvuselt jääb alla kõikidele teistele vaatluse all olevatest lennukitest. Seega kõik kolm lennukimudelit suudaksid lennu sooritada kiiremini Tallinna lennujaamast Stockholmi lennujaama kui ATR 72-600.

Boeing 757-200F on süsiniku efektiivsuse parameetrilt saavutanud kõige parema tulemuse. Lennuk on emiteerinud lennust 0,00226 CO₂ TKM kohta. Lennu kestuse poolest on see samuti kõige kiirem, olles 16 minutit ja 4 sekundit kiirem kui ATR 72-600.



Joonis 15. Tallinn-Stockholm liinil nelja stsenaariumi CO₂ emissioonidest tulenev kulu
Allikas: Autori koostatud

Tallinn-Stockholm liinil on võrreldes Riia-Tallinn liiniga näha keskmiselt 14 protsendilist langust emiteeritud CO₂ kogustes TKM kohta kõikidel lennukimudelitel. Erinevus tuleneb lennukaugusest, mis on 60 meremiili. Protsentuaalselt on Tallinn-Stockholm liin 28 protsenti pikem kui Riia-Tallinn liin. Selle tulemusena tähendab, et lennukite kütusekulud on sarnasemad, kuna CCD tsüklis lennatud aeg on 14 protsendi võrra pikem.

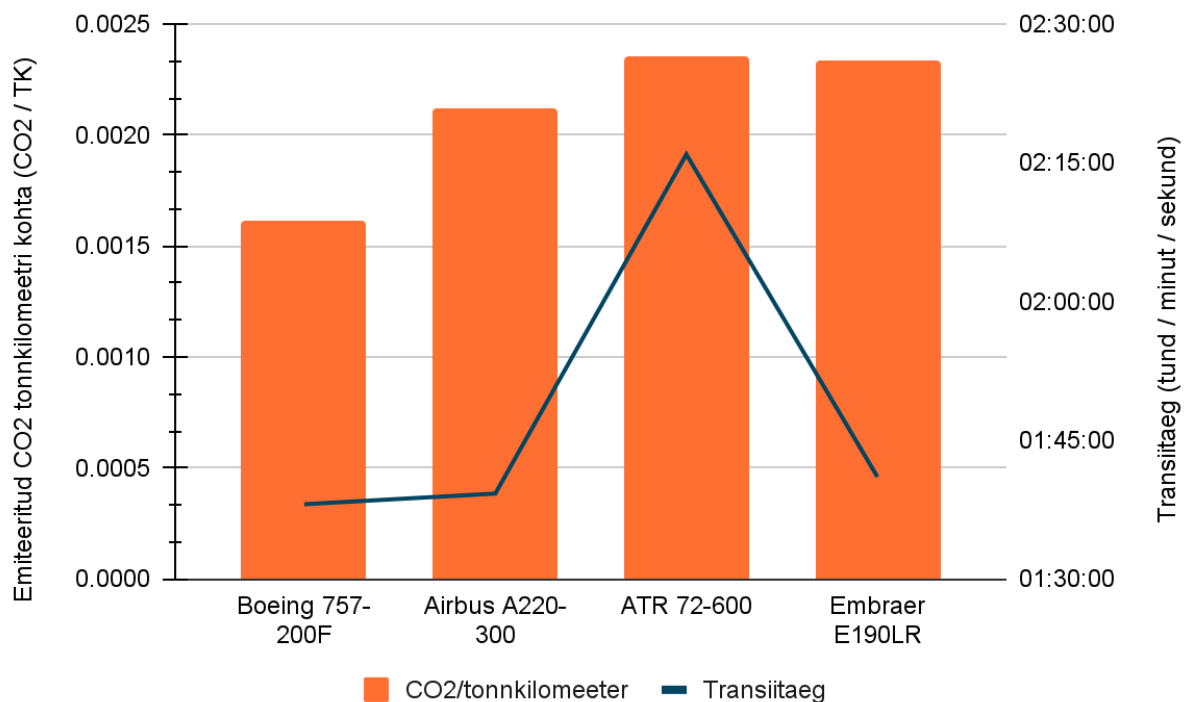
Boeing 757-200F on 0.stsenaariumis ühe TKM kohta süsiniku kulu 0,074 eurot (joonis 15). Lennust emiteeritud CO₂ kogusest tuleb lennu kogu süsiniku kuluks 340,16 eurot. Lennuliin peaks vähendama 250,14 euro võrra kogu süsiniku kulu, et saavutada 1.stsenaariumit. Sellisel juhul jääks süsiniku kogukuluks 90,01 eurot.

Airbus A220-300 on hetkeolukorras ühe TKM kohta süsiniku kulu 0,16 eurot. See tähendab, et lennu kogu süsiniku kulu on 335,5 eurot. Rakendades 3.stsenaariumit peaks lennuliin säästma 10,5 eurot süsiniku pealt, et saavutada süsiniku kogu kuluks 325 eurot. Stsenaarium number kahe puhul peab lennuliin vähendama süsiniku kulu 101,5 euro võrra. Selle abil saab lennu süsiniku kogukulu viia 234,01 eurole. Jälgides stsenaarium number kolme, siis peaks lennuliin vähendama süsiniku kulu 283,5 euro võrra. Selle tulemusena saavutaks süsiniku kogu kuluks 52,01 eurot. ATR 72-600 hetkeolukorras ei teki süsiniku kulu.

Embraer E190LR on 0.stsenaariumis ühe TKM kohta süsiniku kulu 0,225 eurot. Lennu kogu süsiniku kulu on 371,49 eurot. Kolmanda stsenaariumi rakendamiseks, peaks lennuliin vähendama süsiniku kulu 79,09 euro võrra. Sellisel juhul on lennu kogu süsiniku kulu 292,39 eurot. Lähtudes 2. stsenaariumist, peaks lennuliin minimeerima lennu süsiniku kulu 160,96 euro võrra. Sellega saavutades lennu kogu süsiniku kuluks 210,53 eurot. Stsenaarium number ühe puhul peab lennuliin langetama lennu süsiniku kulu 324,7 euro võrra. Nii on võimalik saavutada lennu süsiniku kogu kuluks 46,79 eurot.

3.1.5 Varssavi-Tallinn liin

Varssavi-Tallinn liinil on kahe lennujaama vaheline kaugus 455 meremiili. Selle poolest on antud liin sarnane Tallinn-Kopenhaagen liiniga, kus lennujaamade vaheline kaugus on 454 meremiili. Seetõttu on paljud tulemused sarnased. Varssavi-Tallinn liinil lendab 2024. aasta andmetel Embraer E190LR. Antud lennuki lennuaega kasutatakse baasväärtusena lendude transiidiaegade võrdlemisel (joonis 16).



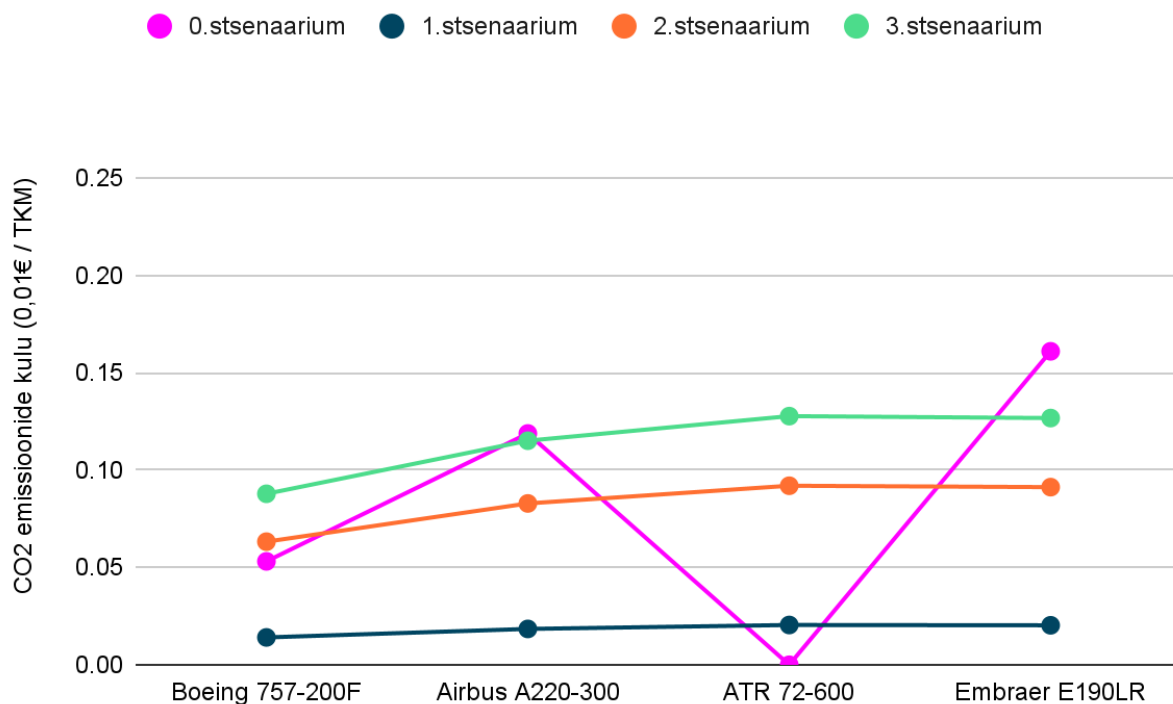
Joonis 16. Varssavi-Tallinn liinil emiteeritud CO₂ tonnkilomeetri kohta ja lennu transiitaja suhe
Allikas: Autori koostatud

ATR 72-600 on Varssavi-Tallinn liinil kõige madalama süsiniku efektiivsusega lennuk. Sarnaselt Tallinn-Kopenhaagen liiniga, seisneb probleem lennuki suuruses. Võrreldes teiste lennukimudelitega hakkab turbopropeller mootoriga lennukil üle 440 meremiili pikkustel lendudel süsiniku efektiivsus langema. Seda muutust ei täheldanud Riia-Tallinn ja Tallinn-Stockholm liinidel. ATR 72-600 emiteeritud CO₂ TKM kohta on 0,00235. Madalama keskmise kiiruse tõttu on ATR 72-600 ka kõige aeglasem lennuk. Lennu kestvus on 34 minutit ja 53 sekundit pikem kui Embraer E190LR-il.

Embraer E190LR on 2. kohal kõige madalama süsiniku efektiivsuse näitajalt. Lennuki emiteeritud CO₂ TKM kohta on 0,00233. Lennu kestvus on 1 tund, 41 minutit ja 2 sekundit. See on kõige aeglasem turboventilaatormootoriga lennukite hulgas.

Airbus A220-300 on emiteerinud 0,00212 CO₂ TKM kohta. Antud parameetri poolest on lennuk 2. kõige süsiniku efektiivsem lennuk antud marsruudil. Lennu kestvus on ühe minuti ja 49 sekundit võrra kiirem kui Embraer E190LR.

Boeing 757-200F on kõige süsiniku efektiivsem lennuk. Lennuk on emiteerinud 0,00162 CO₂ TKM kohta. Samuti on lennu kestvus kõige lühem, olles 2 minutit ja 58 sekundit lühem kui Embraer E190LR-il.



Joonis 17. Varssavi-Tallinn liinil nelja stsenaariumi CO₂ emissioonidest tulenev kulu
Allikas: Autori koostatud

Varssavi-Tallinn liinil on sarnased süsiniku kulud võrreldes Tallinn-Kopenhaagen liiniga. Mõlematel liinidel on lennujaamade vahelised kaugused sarnased. Varssavi-Tallinn liin on 1 meremiili võrra pikem. Kuna läbitud distantsid on sarnased, siis lendudest emiteeritud CO₂ kogused on ligikaudselt samaväärsed.

Boeing 757-200F on hetkeolukorras ühe TKM kohta süsiniku kulu 0,053 eurot (joonis 17). Sellest tulenevalt on lennu süsiniku kogukulu 522,23 eurot. Arvestades hetkeolukorda, siis peab lennuliin rakendama 1.stsenaariumit, et vähendada süsiniku kulu. Sellisel juhul on lennu kogu süsiniku kulu 138,2 eurot.

Airbus A220-300 on 0.stsenaariumis ühe TKM kohta süsiniku kulu 0,119 eurot. Sellest tulenevalt on lennu kogu süsiniku kulu 541,97 eurot. Jälgides 3.stsenaariumit, peab lennuliin vähendama süsiniku kulu 16,96 euro võrra. Selle tulemusena saab lennu süsiniku kogu kuluks 525,01 eurot. Stsenaarium number kahte rakendades, peab lennuliin vähendama süsiniku kulu 163,96 euro võrra. Sellest saaks minimeerida lennu kogu süsiniku kulu 378,01 eurole. Stsenaarium number ühe puhul peab lennuliin vähendama lennu süsiniku kulu 457,95 euro võrra. Sellega saavutades lennu kogu

süsiniku kuluks 84,01 eurot. ATR 72-600 puhul ei teki süsiniku lisakulu, kuna lennuliin ei ole ületanud kohustusteta eraldatud emissioonilubaduste ülempiiri.

Embraer E190LR on 0.stsenaariumis ühe TKM kohta süsiniku kulu 0,161 eurot. Lennu süsiniku kogukulu on 571,73 eurot. Stsenaarium number kolme jälgides, peab lennuliin vähendama lennu süsiniku kulu 121,73 euro võrra. Sellega oleks lennu kogu süsiniku kulu 450,01 eurot. Stsenaarium number kahega saab lennuliin kokku hoida 247,73 eurot. Selle tulemusena oleks lennu kogu süsiniku kulu 324,01 eurot. Kõige optimistlikuma tulemuse saab lennuliin saavutada 1.stsenaariumiga. Sellisel juhul peab lennuliin vähendama lennu süsiniku kulu 499,72 euro võrra. Sellest saab lennu süsiniku kogu kuluks 72,01 eurot.

3.1.6 Tallinna Lennujaama CO2 emissiooni tasu

Tallinna Lennujaama CO2 emissiooni tasu arvutamisel on aluseks võetud Heathrow ja Gatwick lennujaamade andmed. Heathrow ja Gatwick lennujaamades on arvatud keskmised CO2 emissiooni tasud kasutades käesoleva magistritöö valimis kasutatud lennukimudeleid. Antud keskmiste tasude põhjal on arvatud Tallinna Lennujaamas CO2 emissiooni tasu eurodes (tabel 14). Samuti on arvatud 2023. aasta andmete põhjal uue lennujaama tasu rakendamisest eeldatav kogusumma, mis Tallinna Lennujaamale võiks laekuda.

Tabel 14. Tallinna Lennujaama CO2 emissiooni tasu kokkuvõte

Keskmine süsiniku kulu lennu kohta eurodes			
Stsenaarium 0	Stsenaarium 1	Stsenaarium 2	Stsenaarium 3
325.43	58.62	138.89	192.90
Eeldatav CO2 emissiooni tasu lennu kohta eurodes			
Stsenaarium 0	Stsenaarium 1	Stsenaarium 2	Stsenaarium 3
65.09	11.72	27.78	38.58
2023. a eeldatav CO2 emissiooni tasu kogusumma eurodes			
Stsenaarium 0	Stsenaarium 1	Stsenaarium 2	Stsenaarium 3
1006813.40	181346.95	429705.62	596803.69

Allikas: Autori koostatud

Stsenaariumite lõikes on võimalik näha, kui suuri summasid peavad lennuliinid tasuma Tallinna Lennujaamale kui rakendada uut tasuliiki. Samuti saab näha, kui palju peavad lennuliinid keskmiselt tasuma süsiniku kulu neljas stsenaariumis. Stsenaariumis number kolm peaksid lennuliinid vähendama keskmiselt 41 protsendi võrra CO₂ emissioone, et CO₂ emissiooni tasu oleks 38,58 eurot. Stsenaariumis number kaks peaksid lennuliinid keskmiselt vähendama CO₂ emissioone 58 protsendi võrra, et lennujaama tasu oleks 27,78 eurot. Stsenaariumi number üks puhul peaksid lennuliinid vähendama CO₂ emissioone keskmiselt 82 protsendi võrra, et lennujaama tasu oleks 11,72 eurot. Vähendades lendudest emiteeritud CO₂ emissioone saaksid lennuliinidele ennetada lisakulusid. Selle meetodiga saaks suunata lennuliine investeerima jätkusuutlikesse lahendustesse.

3.2 Kvalitatiivse osa analüüs

Intervjuu tulemused on esitatud Carolina Sinisalu intervjuu põhjalt, kes on Tallinna Lennujaama keskkonnaspetsialist. Intervjuu käsitleb lennujaama koostööd lennuliinidega, kuidas piiratakse nende kasvuhoonegaaside emissioone ja milliseid meetmeid selleks rakendatakse. Lisaks eelnevale, kas Tallinna Lennujaamal on plaanis rakendada CO₂ emissiooni tasu ja millisel moel. Saadud uurimistulemuste põhjal esitatakse kolmanda peatüki viimases punktis järeldused ning ettepanekud tulevikuks.

Tallinna Lennujaam on alates 2021. aastast teavitanud partnereid kasvuhoonegaaside emissioonide vähendamise teekonnast. Lennujaam alustas 2023. aastal oma partnerite süsinikujalajälje mõõtmisega. Partneritele kehtestati kestlikkuse nõuded, mis hõlmavad keskkonnapoliitikat ja oluliste keskkonnaaspektide hindamist koos leevendusmeetmetega. Samuti nõutakse andmete edastamist süsinikujalajälje arvutamiseks ja kestlikkuaruandluse (CSRD) koostamiseks. Tallinna Lennujaam auditeerib perioodiliselt nõuetele vastavust, kusjuures kõik uued lepingupartnerid peavad vastama kestlikkuse nõuetele, mis on eelnevalt sätestatud lepingutesse. (Sinisalu 2024)

ACA nõuab territooriumil opereerivate partnerite skoop kolme süsinikujalajälje mõõtmist, kus oluliseks peetakse ettevõtteid, kes tekitavad vähemalt 10 protsenti lennujaama koguheitmetest. Tallinna lennujaama vaates ei ületa ühegi partneri territooriumil tekitatud süsinikujalajalg kümmet protsenti koguheitmetest. Seetõttu on lennujaam otsustanud vähendada kõikide ettevõtete mõju. Praegusel hetkel jäävad lennuliinide CO₂ heitkogused ACA partnerite heitmete andemetest välja. Siiski on lennujaama kohustus raporteerida kõikide lennuoperatsioonide õhkutõusmise ja maandumise CO₂ kogused. (Sinisalu 2024)

Tallinna Lennujaam ei ole kaardistanud, millised maanduvad lennukid emiteerivad kõige rohkem kasvuhoonegaaside. Hetkel pole lennujaamal plaanis kehtestada nõudeid lennukitest emiteeritud heitkogustele. Pigem tuginetakse Euroopa Liidu määrustele ja ICAO nõuetele, mis kehtestavad heitmetele piirangud. (Sinisalu 2024)

2024. aasta andmetel pole Tallinna Lennujaamal plaanis tasustada lennuliinide CO₂ heitmeid. Uue lennujaama tasu loomine nõuab teiste lennujaamade praktikate analüüsimist ja lennuliinidega konsulteerimist. Lennujaama peamine fookus on lennujaama territooriumil opereerivate partnerite süsinikujalajälje vähendamisel. Sellel on lennujaama jätkusuutlikkusele otsene mõju ja seda saab lennujaam mõõta ja mõjutada. (Sinisalu 2024)

3.3 Järeldused ja ettepanekud

Autori poolt teostati uuring, kus analüüsiti kui süsiniku efektiivsed on lennukid, mis läbivad Tallinna Lennujaama ning millised on lendudest tekkinud süsiniku kulud. Antud tulemuste põhjal tuletati CO₂ emissiooni tasu, mida Tallinna Lennujaam saab kasutada, et suunata lennuliine vähendama nende CO₂ emissioone.

Uuringus kasutatavatest lennukitest on kõige süsiniku efektiivsem Boeing 757-200F. Antud lennukimudel suutis kõigil neljal liinil saavutada kõige parema süsiniku efektiivsuse. Pikemate lennukauguste puhul täheldatakse turboventilaatormootoriga lennukitel suuremat süsiniku efektiivsust kui turbopropeller mootoriga lennukil. Kui lennukaugus ületab 440 meremiili, siis turbopropeller mootoriga ATR 72-600 lennukimudelil väheneb süsiniku efektiivsus kui võrrelda teiste valimis olevate lennukitega. Lühematel lennukaugustel ehk alla 440 meremiili puhul ATR 72-600 süsiniku efektiivsus tõuseb.

Lennu süsiniku kulu vähendamiseks peavad lennuliinid piirama CO₂ emissioone, mida emiteerivad lennukid. Uuringu tulemuste alusel peavad lennuliinid keskmiselt vähendada 3. stsenaariumi puhul 41 protsendi võrra CO₂ emissioone. Stsenaarium number kahe puhul peavad lennuliinid vähendada keskmiselt 58 protsendi võrra emiteeritud CO₂ emissioone. Kõige optimistlikuma stsenaariumi number üks puhul peavad lennuliinid keskmiselt 82 protsendi võrra vähendada CO₂ emissioone.

Autori viis läbi intervjuu Tallinna Lennujaama esindajaga. Intervjuu tulemusena sai autor teada, et Tallinna Lennujaamal pole hetkel plaanis kehtestada CO₂ emissiooni tasu lennuliinidele, kuigi seda juba mitmetes Euroopa lennujaamades rakendatakse. Uue tasuliigi rakendamisega on võimalik suunata lennuliine vähendama oma süsinikujalajälge, aidates saavutada nii lennujaama kui ka lennuliinide kliimaeesmärke. Siiski puuduvad Tallinna Lennujaamal hetkel plaanid lennuliinide CO₂ emissioonide piiramisel. Pigem keskendutakse lennujaama territooriumil opereerivatele partneritele.

Tallinna Lennujaamas saab rakendada CO₂ emissiooni tasu kasutades lennu süsiniku kulu. Süsiniku kulu võtab arvesse lennust emiteeritud CO₂ koguse, lennukauguse, lennuki maksimaalse kandevõime ja laadimiskordaja ning süsiniku kauplemise hinna. Samuti arvestab kui palju on lennuliin ületanud EU ETS lubaduste ülempiiri ehk kui saastav või säästlik lennuliin üldiselt on. Süsiniku kulu jagatakse seejärel viiega, et saada CO₂ emissiooni tasu. Uuringu tulemusena oleks hetkel keskmine CO₂ emissiooni tasu 65,09 eurot. Kui rakendada antud summa 2023. aasta kõikidele Tallinna Lennujaama läbivatele lendudele, oleks saadud kogutulu 1 006 813,4 eurot.

Autori arvates võib tulevikus uurida, kuidas Tallinna Lennujaamas saaks rakendada teiste Euroopa lennujaamade CO₂ emissiooni tasude arvutamismudelit. Eeldusel, et Tallinna Lennujaam pole ise juba alustanud CO₂ emissioon tasu rakendamist. Kuigi neljast analüüsitud lennujaamast on üldiselt kasutatud keskmiseid LTO tsükli CO₂ või NO_x emissioone ja korrutatud läbi tasukordajaga. Siiski oleks huvitav kasutada näiteks Rootsi lennujaamade arvutamismudelit, mis premeerib säästlike lennuliine ja n.ö. trahvib saastavaid lennuliine. Analüüsides erinevaid lennujaama tasude arvutamise mudeleid ja sellega luua võrdluse Tallinna lennujaama kohalt, millised arvutamismudelid on mõistlikud, kas finants või jätkusuutliku arengu seisukohast.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärk on selgitada, kuidas saaks Tallinna Lennujaam aidata lennuliine kasvuhoonegaaside heitkoguseid piirata. Selle kaudu uurida lennukite süsiniku efektiivsust ja lendudest tekkinud süsiniku kulu. Seejärel luues kolm stsenaariumit, mis näitavad kui palju peaksid lennuliinid optimeerima CO₂ emissioone, et vähendada süsiniku kulusid. Nende andmete abil koostada arvutamismudel, millega saab Tallinna Lennujaam tasustada lennukitest emiteeritud CO₂ koguseid. Selle abil saavutades nii lennujaama kui ka lennuliinide kliimaeesmärgid.

Lähtuvalt töö eesmärgist püstitati neli uurimisküsimust:

1. Milliste lennuliinide kasutuses olevad lennukimudelid on kõige jätkusuutlikumad lendudel, mis läbivad Tallinna Lennujaama?
2. Millistes stsenaariumites suudavad lennuliinid oma lennukimudelite valikute pealt säästa kõige rohkem transpordikuluseid rakendades Euroopa Liidu heitkogustega kauplemise süsteemi printsiipe?
3. Kuidas saaks Tallinna Lennujaam optimeerida lennuliinipõhiselt lennujaama tasusid?
4. Millise mudeliga/valemiga saab arvutada CO₂ emissiooni tasu Tallinna Lennujaamas?

Magistritöö teoreetilises osas tuuakse välja rahvusvahelised algatused, mis mõjutavad lennundussektorit ja meetmed, mis aitavad saavutada süsinikuneutraalsuse. Samuti kirjeldatakse Tallinna Lennujaama kestlikku arengukava ja milliseid meetmeid rakendatakse nii lennujaama kui ka kolmandate osapoolte kasvuhoonegaaside emissioonide piiramiseks.

Metoodilises osas kirjeldati uurimisstrateegiat, uuringu valimit ja seletati lahti teooria, millele tuginedes autor viib uuringu läbi. Kvantitatiivse uuringu jaoks kasutab autor andmeanalüüsi. Kvalitatiivses uuringus viidi läbi poolstruktureeritud ekspertintervjuu Tallinna Lennujaama keskkonnaspetsialistiga.

Magistritöö empiirilises osas on kvantitatiivse uuringu tulemusena leitud kui süsiniku efektiivsed on neljal lennumarsruudil neli lennukimudelit kolmes stsenaariumis. Samuti kui suur on süsiniku kulu, mida lennuliinid tasuvad iga lennu kohta. Eelmainitud andmete põhjal on arvutatud välja eeldatava CO₂ emissiooni tasu, mida Tallinna Lennujaam saaks rakendada lennuliinidele süsiniku jalajälje vähendamiseks. Kvalitatiivse uuringu tulemusena sai autor valideerida uurimisprobleemi olemasolu ja sai tagasisidet Tallinna Lennujaamalt, nende plaanide kohta tulevikus CO₂ emissiooni tasu rakendada.

Autori poolt püstitatud neljale uurimisküsimusele saadi vastused ja magistritöö täitis oma eesmärgi. Uurimisküsimuste vastused on kokkuvõtlikult välja toodud järgnevas neljas lõigus. Igale lõigule vastab üks uurimisküsimus.

Uuringus kasutatavatest lennukitest on kõige süsiniku efektiivsem Boeing 757-200F. Antud lennukimudel suutis kõigil neljal liinil saavutada kõige parema süsiniku efektiivsuse. Pikemate lennukauguste puhul täheldatakse turboventilaatormootoritega lennukitel suuremat süsiniku efektiivsust kui turbopropellermootoriga lennukil. Kui lennukaugus ületab 440 meremiili, siis turbopropellermootoriga ATR 72-600 lennukimudelil väheneb süsiniku efektiivsus kui võrrelda teiste valimis olevate lennukitega. Lühematel lennukaugustel ehk alla 440 meremiili puhul ATR 72-600 süsiniku efektiivsus tõuseb.

Lennu süsiniku kulu vähendamiseks peavad lennuliinid piirama CO₂ emissioone, mida emiteerivad lennukid. Uuringu tulemuste alusel peavad lennuliinid keskmiselt vähendama 3. stsenaariumi puhul 41 protsendi võrra CO₂ emissioone. Stsenaarium number kahe puhul peavad lennuliinid vähendama keskmiselt 58 protsendi võrra emiteeritud CO₂ emissioone. Kõige optimistlikuma stsenaarium number ühe puhul peavad lennuliinid keskmiselt 82 protsendi võrra vähendama CO₂ emissioone.

Autori viis läbi intervjuu Tallinna Lennujaama esindajaga. Intervjuu tulemusena sai autor teada, et Tallinna Lennujaamal pole hetkel plaanis kehtestada CO₂ emissiooni tasu lennuliinidele, kuigi seda juba teistes Euroopa lennujaamades rakendatakse. Uue tasuliigi rakendamisega on võimalik suunata lennuliine vähendama oma süsinikujalajälge, aidates saavutada nii lennujaama kui ka lennuliinide kliimaeesmärke. Siiski puuduvad Tallinna Lennujaamal hetkel plaanid lennuliinide CO₂ emissioonide piiramisel. Pigem keskendutakse lennujaama territooriumil opereerivatele partneritele.

Tallinna Lennujaamas saab rakendada CO₂ emissiooni tasu kasutades lennu süsiniku kulu. Süsiniku kulu võtab arvesse lennust emiteeritud CO₂ koguse, lennukauguse, lennuki maksimaalse kandevõime ja laadimiskordaja ning süsiniku kauplemise hinna. Samuti arvestab kui palju on lennuliin ületanud EU ETS lubaduste ülempiiri ehk kui saastav või säästlik lennuliin üldiselt on. Süsiniku kulu jagatakse seejärel viiega, et saada CO₂ emissiooni tasu. Uuringu tulemusena oleks hetkel keskmine CO₂ emissiooni tasu 65,09 eurot. Kui rakendada antud summa 2023. aasta kõikidele Tallinna Lennujaama läbivatele lendudele, oleks saadud kogutulu 1 006 813,4 eurot.

Autor usub, et tulevikus võib uurida, kuidas saaks rakendada teiste Euroopa lennujaamade CO₂ emissiooni tasude arvutamismudeid Tallinna Lennujaamas. Selle kaudu leida arvutamismudelid, millelt teeniks lennujaam kõige rohkem tulu ja suunaks lennuliine vähendama oma süsinikujalajälge.

SUMMARY

The aim of this master's thesis is to clarify how Tallinn Airport could help airlines limit greenhouse gas emissions. This involves investigating the carbon efficiency of aircraft and the carbon cost of flights. Then, by creating three scenarios, it demonstrates how much airlines should optimize the CO₂ emissions to reduce carbon costs. Using this data, a computational model is developed to enable Tallinn Airport to charge airlines for the CO₂ emitted by aircraft, thus achieving both the airport's and airlines' climate goals.

Based on the thesis's objectives, four research questions were formulated:

1. Which aircraft models used by airlines are the most sustainable for flights passing through Tallinn Airport?
2. In which scenarios can airlines save the most on transportation costs by applying principles of the European Union Emissions Trading System (EU ETS)?
3. How could Tallinn Airport optimize their airport fees for airlines case by case?
4. What model/formula can be used to calculate CO₂ emission charges at Tallinn Airport?

The theoretical part of the thesis outlines international initiatives affecting the aviation sector and measures to achieve carbon neutrality. It also describes Tallinn Airport's sustainable development plan and measures implemented to limit greenhouse gas emissions from both the airport and third parties.

The methodological part describes the research strategy, sample selection, and explains the theory on which the author conducts the study. For the quantitative study, data analysis is used. A semi-structured expert interview was conducted with Tallinn Airport's environmental specialist for the qualitative study.

In the empirical part of the thesis, the quantitative study found the carbon efficiency of four aircraft models on four flight routes in three scenarios. It also identified the amount of carbon airlines pay for each flight. Based on this data, the expected CO₂ emission charge that Tallinn Airport could apply to airlines to reduce their carbon footprint was calculated. The qualitative study validated the existence of the research problem and provided feedback from Tallinn Airport regarding their plans to implement CO₂ emission charges in the future.

The answers to the four research questions posed by the author were obtained, and the master's thesis fulfilled its objective. The answers to the research questions are summarized in the following four paragraphs, each corresponding to one research question.

Among the aircraft used in the study, the Boeing 757-200F was found to be the most carbon-efficient. This aircraft model achieved the best carbon efficiency on all four routes. For longer flight distances, aircraft with turbofan engines exhibited greater carbon efficiency than those with turboprop engines. However, for flight distances exceeding 440 nautical miles, the carbon efficiency of the ATR 72-600, equipped with turboprop engines, decreased compared to other aircraft models in the selection. For shorter flight distances, i.e., under 440 nautical miles, the carbon efficiency of the ATR 72-600 increased.

To reduce carbon emissions from flights, airlines must limit the CO₂ emissions from their aircraft. Based on the study results, airlines need to reduce CO₂ emissions by an average of 41% for the third scenario. For scenario two, the airlines need to reduce the emitted CO₂ emissions by an average of 58%. In the most optimistic scenario, scenario one, airlines need to reduce CO₂ emissions by an average of 82%.

The author conducted an interview with a representative from Tallinn Airport. As a result of the interview, the author learned that Tallinn Airport currently has no plans to impose CO₂ emission charges on airlines, although this is already being implemented at other European airports. Implementing a new type of charge could encourage airlines to reduce their carbon footprint, helping to achieve both the airport's and airlines' climate goals. However, Tallinn Airport currently has no plans to limit airlines' CO₂ emissions. Instead, the focus is on the airport's partners operating within its territory.

Tallinn Airport could implement CO₂ emission charges by using the carbon cost of flights. The carbon cost takes into account the amount of CO₂ emitted from the flight, flight distance, maximum payload of the aircraft, and carbon trading price. It also considers how much the airline has exceeded the EU ETS allowances cap, reflecting how polluting or efficient the airline generally is. The carbon cost is then divided by five to obtain the CO₂ emission charge. Based on the study results, the current average CO₂ emission charge would be 65,09 euros. If this amount were applied to all flights passing through Tallinn Airport in 2023, the total revenue would be 1,006,813.4 euros.

The author believes that in the future, it may be possible to explore how to apply CO₂ emission charge calculation methods used at other European airports to Tallinn Airport. This could lead to the identification of calculation models that generate the most revenue and incentivize airlines to reduce their carbon footprint.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

Agarwal. P., Sun. Xiaoxiao. S., Gauthier. P. Q., Sethi. V. Injector Design Space Exploration for an Ultra-Low NOx Hydrogen Micromix Combustion System. *Researchgate*, 2019, 1.

https://www.researchgate.net/publication/337070104_Injector_Design_Space_Exploration_for_an_Ultra-Low_NOx_Hydrogen_Micromix_Combustion_System (viimati 06.02.2024)

Air Baltic. (2024). Fleet. <https://www.airbaltic.com/en-EE/fleet> (viimati 15.03.2024)

Airbus. (2020). Our decarbonisation journey continues: looking beyond E-Fan X. <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-04-our-decarbonisation-journey-continues-looking-beyond-e-fan-x> (viimati 13.02.2024)

Airbus. (2021). fello'fly. <https://www.airbus.com/en/innovation/disruptive-concepts/biomimicry/fellofly> (viimati 21.02.2024)

Airport Carbon Accreditation. (2024). Level 3: Optimisation. <https://www.airportcarbonaccreditation.org/about/7-levels-of-accreditation/optimisation/> (viimati 09.04.2024)

Air Transport Action Group. (2020). Aviation: benefits beyond borders. <https://www.atag.org/our-publications/latest-publications.html> (viimati 24.01.2024)

Amprius. (2023). The Future of Commercial Electric Planes. <https://amprius.com/commercial-electric-planes-future/> (viimati 08.02.2024)

ATAG. (2021). Waypoint 2050. https://aviationbenefits.org/media/167417/w2050_v2021_27sept_full.pdf (viimati 14.02.2024)

ATR. (2024). ATR 72-600. <https://www.atr-aircraft.com/aircraft-services/aircraft-family/atr-72-600/> (viimati 15.03.2024)

Baroutaji. A., Wilberforce. T., Ramadan. M., Olabi. A. G. Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors.

Sciencedirect, 2019, 39.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119301157> (viimati 06.02.2024)

Becken. S., Mackey. B. (2017). What role for offsetting aviation greenhouse gas emissions in a deep-cut carbon world? *Sciencedirect*, 2017, 74.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969699716302538> (viimati 17.01.2024)

Bloomberg. (2024). <https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-03-21/flights-are-about-to-get-even-more-expensive-as-going-green-costs-5-trillion> (viimati 24.04.2024)

Boeing. (2006). Aero Magazine - Qtr_04 06.

https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_04_09/pdfs/AERO_Q409.pdf (viimati 01.02.2024)

Bogaert. J. V. ASSESSMENT OF POTENTIAL FUEL SAVING BENEFITS OF HYBRID-ELECTRIC REGIONAL AIRCRAFT. *TU Delft*, 2015, 80.

<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A0fc7019f-d988-45c1-a7e2-55825f4f90ca> (viimati 09.02.2024)

Chao. C. Assessment of carbon emission costs for air cargo transportation.

Sciencedirect, 2014, 187-194.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361920914000698> (viimati 11.03.2024)

Chiaromonti. D. (2019). Sustainable Aviation Fuels: the challenge of decarbonization. *Sciencedirect*, 2019, 1203.

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610219303285?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=84b40dd6ad645426 (viimati 26.01.2024)

Durdina. L., Brem. T. B., Elser. M., Schönenberger. D., Siegerist. F., Anet. G. J. (2021). Reduction of Nonvolatile Particulate Matter Emissions of a Commercial Turbofan Engine at the Ground Level from the Use of a Sustainable Aviation Fuel Blend. *ACS Publications*, 2021, 14576.
<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.1c04744> (viimati 25.01.2024)

EASA. (2023). ICAO Aircraft Engine Emissions Databank.
<https://www.easa.europa.eu/en/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank> (viimati 19.03.2024)

Embraer. (2024). E190. <https://www.embraercommercialaviation.com/commercial-jets/e190/> (viimati 05.03.2024)

Enge. P., Enge. N., Walter. T., Eldredge. L. Aviation Benefits from Satellite Navigation. *Liebertpub*, 2015, 19. <https://www.liebertpub.com/doi/full/10.1089/space.2014.0011> (viimati 21.02.2024)

Epstein. A. H., O'Flarity. S. M. Considerations for Reducing Aviation's CO₂ with Aircraft Electric Propulsion. *Aerospace Research Central*, 2019, 581.
<https://arc.aiaa.org/doi/full/10.2514/1.B37015> (viimati 09.02.2024)

EUR-LEX. (2023). Commission Decision (EU) 2023/2440 of 27 October 2023 on the Union-wide total quantity of allowances to be allocated in respect of aircraft operators under the EU Emissions Trading System for 2024. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202302440 (viimati 29.02.2024)

EuroAsian Cargo Solutions. (2024). BOEING B757-200F.
<https://www.euascargo.com/en/useful-info/freighter-aircraft/boeing-b757-200f> (viimati 25.03.2024)

EUROCONTROL. (2016). A-CDM Impact Assessment.
<https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-04/a-cdm-impact-assessment-2016.pdf> (viimati 20.02.2024)

Euroopa Liidu Nõukogu ja Euroopa Ülemkogu. (2019). ELi heitkogustega kauplemise süsteemi reform. <https://www.consilium.europa.eu/et/policies/climate-change/reform-eu-ets/> (viimati 18.01.2024)

Euroopa Liidu Nõukogu ja Euroopa Ülemkogu. (2022). Nõukogu võttis vastu otsuse CORSIA süsteemi kohaste lennutranspordi heite kompenseerimise nõuete kohta. <https://www.consilium.europa.eu/et/press/press-releases/2022/12/19/council-adopts-decision-on-offsetting-requirements-for-air-transport-emissions-corsia/> (viimati 10.01.2024)

European Commission. (2021a). Emissions cap and allowances. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/emissions-cap-and-allowances_en#:~:text=In%20phase%20of%20the,is%20fixed%20at%201%2C571%2C583%2C007%20allowances%20. (viimati 18.01.2024)

European Commission. (2021b). Monitoring, reporting and verification of EU ETS emissions. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/monitoring-reporting-and-verification-eu-ets-emissions_en#:~:text=Penalty%20for%20excessive%20emissions,-Operators%20in%20the&text=For%20each%20tonne%20of%20emissions,cost%20of%20surrendering%20allowances%20due. (viimati 22.01.2024)

European Commission. (2023a). What is the Innovation Fund? https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/what-innovation-fund_en (viimati 23.01.2024)

European Commission. (2023b). Modernisation Fund. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/modernisation-fund_en (viimati 23.01.2024)

European Environment Agency. (2023). 1.A.3.a Aviation 2023. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation-2023/view> (viimati 19.03.2024)

European Environment Agency. (2024). EU Emissions Trading System (ETS) data viewer. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/emissions-trading-viewer-1> (viimati 04.04.2024)

EUROSTAT. (2023). Glossary:Tonne-kilometre (tkm).
[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Tonne-kilometre_\(tkm\)#:~:text=A%20tonne%2Dkilometre%2C%20abbreviated%20as,a%20distance%20of%20one%20kilometre.](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Tonne-kilometre_(tkm)#:~:text=A%20tonne%2Dkilometre%2C%20abbreviated%20as,a%20distance%20of%20one%20kilometre.) (viimati 20.03.2024)

Flightradar24. Tallinn Lennart Meri Airport. (2024).
<https://www.flightradar24.com/data/airports/tll> (viimati 26.03.2024)

Forbes. (2019). The Public Supports Sustainable Aviation And They're Willing Pay For It. <https://www.forbes.com/sites/stephenrice1/2019/06/05/the-public-supports-sustainable-aviation-and-they-are-willing-pay-for-it/> (viimati 08.04.2024)

Gatwick Airport. (2023). Gatwick Airport: Conditions of Use 2023/24.
<https://www.gatwickairport.com/on/demandware.static/-/Sites-Gatwick-Library/default/dwad04da25/images/Business-PDFs/Gatwick-Airport-conditions-of-use.pdf> (viimati 22.04.2024)

GreenAir Online. (2020). Amyris/Total renewable jet fuel gets ASTM green light as SIP fuels are approved for commercial aviation use.
<https://www.greenaironline.com/news.php?viewStory=1937> (viimati 30.01.2024)

Hardy. M., Bryman. A. (2004). *Handbook of Data Analysis*. University of Leicester : SAGE Publications Ltd, 2004.

Hartas. D. (2010). *Educational Research and Inquiry:Qualitative and Quantitative Approaches*. University of Warwick : Bloomsbury Publishing, 2010.

Heathrow. (2023). Heathrow Airport Limited Conditions of Use Airport Charges Decision 2024.
<https://www.heathrow.com/content/dam/heathrow/web/common/documents/company/doing-business-with-heathrow/flights-condition-of-use/conditions-of-use-documents/2024-Heathrow%20Airport-Limited-Conditions-of-Use-Airport-Charges-Decision-2024.pdf> (viimati 22.04.2024)

Heitalu. H. (2009). Välisõhuaruandluse kohustused ja tulemused: Liikuvad saasteallikad. *Envir*, 2009, 3.
https://www.envir.ee/sites/default/files/transport_helenheitalu.pdf (viimati 18.03.2024)

Hilpert. H., Friedemann. S., Schumann. M. Improved Emission Data Collection in Air Cargo Processes using ADS-B. *ACIS*, 2011, 1. <https://aisel.aisnet.org/acis2011/16/> (viimati 22.02.2024)

Holland. M., Mann. M., Ralph. M., Owen. B., Lee. D., Horton. G., Dickson. N., Kollamthodi. S. A MARGINAL ABATEMENT COST CURVE MODEL FOR THE UK AVIATION SECTOR. *EMRC, AEA*, 2011, 14. https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ActionPlan/UK_AbatementModel_en.pdf (viimati 31.01.2024)

IATA. (2015). IATA Sustainable Aviation Fuel Roadmap. <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/safr-1-2015.pdf> (viimati 30.01.2024)

IATA. (2020). FACT SHEET 7: Liquid hydrogen as a potential low-carbon fuel for aviation. https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/fact_sheet_7-hydrogen-fact-sheet_072020.pdf (viimati 07.02.2024)

IATA. (2022). IATA Net Zero Roadmaps. <https://www.iata.org/contentassets/4b18fa1ac4a246879c058cf75954dbda/netzero-roadmaps-presentation-agm2023.pdf> (viimati 24.04.2024)

IATA. (2023a). CORSIA Fact sheet. <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet---corsia/> (viimati 10.01.2024)

IATA. (2023b). Net zero carbon 2050 resolution. <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet----iata-net-zero-resolution/> (viimati 10.01.2024)

IATA. (2023c). Offsetting CO2 Emissions with CORSIA. <https://www.iata.org/en/programs/environment/corsia/> (viimati 17.01.2024)

IATA. (2023d). What is SAF? <https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/saf-what-is-saf.pdf> (viimati 24.01.2024)

IATA. (2023e). Net zero 2050: new aircraft. <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet-new-aircraft-technology/#:~:text=Blended%20wing%3A%20Wide%20airfoil%E2%80%90shaped,i s%20designed%20to%20generate%20lift.> (viimati 01.02.2024)

IATA. (2023f). Developing Sustainable Aviation Fuel (SAF). <https://www.iata.org/en/programs/environment/sustainable-aviation-fuels/> (viimati 06.02.2024)

IATA. (2023g). Net zero 2050: operational and infrastructure improvements. <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet-netzero-operations-infrastructure/> (viimati 13.02.2024)

IATA. (2023h). Cargo load factors on major route areas outperform industry average. <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/cargo-load-factors-on-major-route-areas-outperform-industry-average/> (viimati 20.03.2024)

ICAO. (2010). ICAO ENVIRONMENTAL REPORT 2010. https://www.icao.int/environmental-protection/documents/publications/env_report_2010.pdf (viimati 01.02.2024)

ICAO. (2019). Environmental Trends in Aviation to 2050. https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2019/ENVReport2019_pg17-23.pdf (viimati 26.01.2024)

ICAO. (2022). Electric and Hybrid Aircraft Platform for Innovation (E-HAPI). <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/electric-aircraft.aspx> (viimati 13.02.2024)

ICAO. (2022a). Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) - Frequently Asked Questions (FAQs). https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_FAQs_Dec2022.pdf (viimati 11.01.2024)

Inderwildi. O. R., Carey. C., Santos. G., Yan. X., Behrendt. H., Holdway. A., Maconi. L., Owen. N., Shirvani. T., Teytelboym. A. Future of Mobility Roadmap Ways to Reduce Emissions While Keeping Mobile. *Researchgate*, 2010, 58-62.

https://www.researchgate.net/publication/269038626_Future_of_Mobility_Roadmap_Ways_to_Reduce_Emissions_While_Keeping_Mobile (viimati 31.01.2024)

International Energy Agency. (2023). Aviation. <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation> (viimati 26.01.2024)

Kliimaministeerium. (2021). Heitkogustega kauplemine.

<https://kliimaministeerium.ee/rohereform-kliima/susinikuturud/heitkogustega-kauplemine> (viimati 18.01.2024)

Kliimaministeerium. (2023). ELi heitkogustega kauplemise süsteem.

<https://kliimaministeerium.ee/kliima/eli-heitkogustega-kauplemise-susteem#lennundus> (viimati 18.01.2024)

Krippendorff, K. (2004). *Content Analysis: An Introduction to Its Methodology* (2nd ed.). Thousand Oaks, CA: Sage, 2004.

Kumar.A. (2002). *Research Methodology in Social Science*. New Delhi: Sarup & Sons.

Lee. D. S., Fahey. D. W., Forester. P. M., Newton. P. J., Wit. R. C. N., Lim. L. L., Owen. B., Sausen. R. Aviation and global climate change in the 21st century. *Sciencedirect*, 2009, 3531.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231009003574> (viimati 02.02.2024)

Lee. D. S., Pitari. G., Grewe. V., Gierens. K., Penner. J. E., Petzold. A., Prather. M. J., Schumann. U., Bais. A., Brentsen. T., Iachetti. D., Lim. L. L., Sausen. R. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Sciencedirect*, 2010, 4719.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231009004956> (viimati 02.02.2024)

Lufthansa. (2023). More sustainable flying.

<https://www.lufthansagroup.com/en/themes/green-fares.html> (viimati 09.04.2024)

Maertens. S., Grimme. W., Scheelhaase. J., Jung. M. (2019). Options to Continue the EU ETS for Aviation in a CORSIA-World. *MDPI*, 2019, 3. <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/20/5703#sec2dot3-sustainability-11-05703> (viimati 18.01.2024)

Morris. J., Rowbotham. A., Morrell. P., Foster. A., Poll. I., Owen.B., Raper. D., Mann. M., Ralph. M. UK Aviation: Carbon Reduction Futures Final Report to the Department for Transport. *Academia*, 2009, 62.
https://www.academia.edu/1074086/UK_Aviation_Carbon_Reduction_Futures_Final_Report_to_the_Department_for_Transport (viimati 01.02.2024)

Najjar. Y. S. H. Hydrogen safety: The road toward green technology. *Sciencedirect*, 2013, 10718-10720.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031991301358X> (viimati 06.02.2024)

Nakamura.D., Royce. W. Operational Benefits of Performance-Based Navigation. *Aeromagazine*, 2008, 14.
http://www.phantomworks.org/commercial/aeromagazine/articles/qtr_2_08/AERO_Q2_08_article3.pdf (viimati 22.02.2024)

NASA. Turbofan Engine. (2021a). <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/aturbf.html> (viimati 26.03.2024)

NASA. Turboprop Engine. (2021b). <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/aturbp.html> (viimati 26.03.2024)

Ng. K. S., Farooq. D., Yang. A. (2021). Global biorenewable development strategies for sustainable aviation fuel production. *Sciencedirect*, 2021, 3.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121007814> (viimati 30.01.2024)

Ng. K. S., Sadhukhan. J. (2011a). Techno-economic performance analysis of bio-oil based Fischer-Tropsch and CHP synthesis platform. *Sciencedirect*, 2011, 3218-3234.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096195341100239X> (viimati 30.01.2024)

Ng. K. S., Sadhukhan. J. (2011b). Process integration and economic analysis of bio-oil platform for the production of methanol and combined heat and power. *Sciencedirect*, 2011, 1153-1169.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953410004320> (viimati 30.01.2024)

Noh. M. H., Benito. A., Alonso. G. (2016). Study of the current incentive rules and mechanisms to promote biofuel use in the EU and their possible application to the civil aviation sector. *Sciencedirect*, 2016, 301.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136192091630219X?via%3Dihub> (viimati 25.01.2023)

Õunapuu. L. (2014). Kvalitatiivne ja kvantitatiivne uurimisviis sotsiaalteadustes. Tartu : Tartu Ülikool, 2014.

O'Malley. J., Pavlenko. N., Searle. S. (2021). Estimating sustainable aviation fuel feedstock availability to meet growing European Union demand. *International Council on Clean Transportation*, 2021, 8.

<https://theicct.org/sites/default/files/publications/Sustainable-aviation-fuel-feedstock-eu-mar2021.pdf> (viimati 26.01.2024)

Ponater. M., Pechtl. S., Sausen. R., Schumann. U., Hüttig. G. Potential of the cryoplane technology to reduce aircraft climate impact: A state-of-the-art assessment. *Researchgate*, 2007, 6940.

https://www.researchgate.net/publication/225018760_Potential_of_the_cryoplane_technology_to_reduce_aircraft_climate_impact_A_state-of-the-art_assessment (viimati 07.02.2024)

Ribeiro. S. K., Kobayashi. S., Beuthe. M., Gasca. J., Greene. D. L., Lee. D. S., Muromachi. Y., Newton. P. J., Plotkin. S., Sperling. D., Wit. R., Zhou. P. J. Transport and its infrastructure. *Researchgate*, 2007, 326.

https://www.researchgate.net/publication/235360467_Transport_and_its_infrastructure (viimati 31.01.2024)

Rohetiiger. (2022). Tallinna lennujaam veab lennundussektori rohepöoret.

<https://rohetiiger.ee/erasektor-blogi/tallinna-lennujaam-veab-lennundussektori-rohepooret/> (viimati 09.04.2024)

Savenye. W., C.Robinson. R. S. (2001). *Qualitative Research Issues and Methods: An Introduction for Educational Technologists*. Mahwah: Lawrence Erlbaum Associates Inc Publishers, 2001.

Scheelhaase. J., Maertens. S., Grimme. W., Jung. M. (2018). EU ETS versus CORSIA – A critical assessment of two approaches to limit air transport's CO2 emissions by market-based measures. *Sciencedirect*, 2018, 57.

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969699717303277?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=846eb3b1dd6d543b (viimati 17.01.2024)

Schiphol. (2023). Schiphol Airport Charges and Conditions.

<https://www.schiphol.nl/en/schiphol-group/page/non-co2-emissions/> (viimati 22.04.2024)

SESAR. (2016). MODERNISING AIR TRAFFIC MANAGEMENT IN EUROPE.

https://transport.ec.europa.eu/system/files/2016-09/2008_sesar_brochure_en.pdf (viimati 16.02.2024)

Carolina Sinisalu, Tallinna Lennujaam AS keskkonnaspetsialist. Autori intervjuu. 10. mai 2024.

Statistikaamet. (2024). TS203: LENNULIIKLUS TALLINNA LENNUJAAMA KAUDU.

https://andmed.stat.ee/et/stat/majandus__transport__ehutransport/TS203/table/tablaViewLayout2 (viimati 11.03.2024)

Swedavia Airports. (2022). Swedavia CO2 Emission Charge 2022.

<https://www.swedavia.com/contentassets/09d30ecf868d4611b7ab2dee9623daea/swedavia-co2-emission-charge-2022.pdf> (viimati 22.04.2024)

Tallinna Lennujaam. (2024). Tallinn Airport GH. <https://airport.ee/ettevotte/tallinn-airport-gh/> (viimati 16.04.2024)

Trading Economics. (2024). EU Carbon Permits.

<https://tradingeconomics.com/commodity/carbon> (viimati 29.02.2024)

Verstraete. D. The Potential of Liquid Hydrogen for long range aircraft propulsion.

Cranfield University, 2009, 41. <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/4089> (viimati 06.02.2024)

World Economic Forum. (2019). Hydrogen power is safe and here to stay.
<https://www.weforum.org/agenda/2019/04/why-don-t-the-public-see-hydrogen-as-a-safe-energy-source/> (viimati 07.02.2024)

Xie. Y., Savvarisal. A., Tsourdos. A., Zhang. D., Gu. J. Review of hybrid electric powered aircraft, its conceptual design and energy management methodologies. *Sciencedirect*, 2021, 433.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936120303368> (viimati 09.02.2024)

Yahoo Finance. (2023). German airline Lufthansa says it would consume half of Germany's electricity if it were to switch to green fuels.
<https://finance.yahoo.com/news/german-airline-lufthansa-says-consume-112352475.html> (viimati 26.01.2024)

LISAD

Lisa 1 Intervjuu küsimustik

1. Mis on Tallinna Lennujaama kestliku arengu eesmärgid?
2. Milliseid meetmeid teie kasutate Tallinna Lennujaama süsinikujalajälje vähendamiseks?
3. Kas teie partnerid ja reisijad on teadlikud jätkusuutlikkuse arengu teemadel?
4. Mis on ACA (Airport Carbon Accreditation) ja mida see Tallinna Lennujaamale toob?
5. Kas teie töötate koos kolmandate osapooltega (lennuliinid, operaatorid, teised lennujaama teenindavad ettevõtted), et vähendada nende süsinikujalajälge? Kuidas teie seda teete?
6. Kas te olete teadlikud palju CO2 emiteerivad teie partnerid (lennuliinid)?
7. Kas teil eksisteerib teave, millised lennukid emiteerivad kõige rohkem CO2?
8. Milliseid meetmeid teie kasutate koostööpartnerite süsinikujalajälje vähendamiseks?
9. Kas teie integreerite koostöölepingutesse lennuliinidega jätkusuutlikkuse nõudeid? Millisel moel?
10. Kas teie rakendate lennujaamade tasudel diferentseeritud tasustamist lennuliinide põhiselt vastavalt emiteeritud CO2 kogustest?
11. Kas te olete mõelnud, et luua uus lennujaama tasuliik, millega tasustaks saastavamaid lennuliine/premeeriks "rohelisi" lennuliine? Kuidas peaks sellist tasu integreerima?
12. Kas Tallinna Lennujaam investeerib koos lennuliinidega jätkusuutlikkuse projektidesse? Millised on need projektid?
13. Kas Tallinna Lennujaam saab kunagi süsiniku neutraalseks? Kui kaua see aega võtab ja mis peaks selleks tegema?

Lisa 2 Lennukite CO2 emissioonid, transiidiajad, kütusekulud

	Kaugus (nm)	CO2 emissioonid (tonn)	Transiitaeg (hh:mm:ss)	Kütusekulu (tonn)
TLL-CPH	454	x	x	x
Boeing 757-200F		15.87	01:37:57	5.04
Airbus A220-300		9.65	01:39:05	3.06
ATR 72-600		4.74	02:15:42	1.5
Embraer E190LR		8.27	01:40:53	2.62
RIX-TLL	152	x	x	x
Boeing 757-200F		8.94	00:59:21	2.84
Airbus A220-300		5.01	01:00:04	1.59
ATR 72-600		2.07	01:10:08	0.66
Embraer E190LR		4.56	00:59:18	1.45
TLL-ARN	212	x	x	x
Boeing 757-200F		10.35	01:07:11	3.29
Airbus A220-300		5.98	01:07:48	1.9
ATR 72-600		2.58	01:23:15	0.82
Embraer E190LR		5.38	01:07:44	1.71
WAW-TLL	455	x	x	x
Boeing 757-200F		15.89	01:38:04	5.04
Airbus A220-300		9.66	01:39:13	3.07
ATR 72-600		4.75	02:15:55	1.51
Embraer E190LR		8.28	01:41:02	2.63

Lisa 3 Lennukite tehnilised andmed

Lennukimudel	Maksimaalne kandevõime (tonn)	Laadimiskordaja	Kaugus (nm)
Boeing 757-200F	36	0.6	454
Airbus A220-300	16.7	0.6	454
ATR 72-600	7.4	0.6	454
Embraer E190LR	13	0.6	454
Boeing 757-200F	36	0.6	152
Airbus A220-300	16.7	0.6	152
ATR 72-600	7.4	0.6	152
Embraer E190LR	13	0.6	152
Boeing 757-200F	36	0.6	212
Airbus A220-300	16.7	0.6	212
ATR 72-600	7.4	0.6	212
Embraer E190LR	13	0.6	212
Boeing 757-200F	36	0.6	455
Airbus A220-300	16.7	0.6	455
ATR 72-600	7.4	0.6	455
Embraer E190LR	13	0.6	455

Lisa 4 Nelja stsenaariumi süsiniku kulud tonnkilomeetri kohta

Lennukimudel	CO ₂ tonnkilomeetri kohta	Süsiniku kulu tonnkilomeetri kohta (euro)			
		Stsenaarium 1	Stsenaarium 2	Stsenaarium 3	Stsenaarium 0
Boeing 757-200F	0.00162	0.01407	0.06333	0.08795	0.05319
Airbus A220-300	0.00212	0.01845	0.08301	0.11529	0.11901
ATR 72-600	0.00235	0.02045	0.09202	0.12780	0.00000
Embraer E190LR	0.00234	0.02031	0.09139	0.12692	0.16126
Boeing 757-200F	0.00272	0.02368	0.10655	0.14799	0.08949
Airbus A220-300	0.00329	0.02861	0.12872	0.17878	0.18455
ATR 72-600	0.00307	0.02668	0.12002	0.16670	0.00000
Embraer E190LR	0.00385	0.03345	0.15051	0.20903	0.26558
Boeing 757-200F	0.00226	0.01966	0.08845	0.12284	0.07428
Airbus A220-300	0.00282	0.02448	0.11016	0.15300	0.15794
ATR 72-600	0.00274	0.02384	0.10726	0.14897	0.00000
Embraer E190LR	0.00325	0.02830	0.12731	0.17682	0.22465
Boeing 757-200F	0.00162	0.01406	0.06327	0.08787	0.05314
Airbus A220-300	0.00212	0.01843	0.08291	0.11516	0.11888
ATR 72-600	0.00235	0.02045	0.09201	0.12779	0.00000
Embraer E190LR	0.00233	0.02029	0.09130	0.12680	0.16110

Lisa 5 Nelja stsenaariumi süsiniku kulude summad eurodes

	Stsenaarium 0	Stsenaarium 1	Stsenaarium 2	Stsenaarium 3
TLL-CPH	x	x	x	x
Boeing 757-200F	521.57	138.02	0	0
Airbus A220-300	541.41	83.92	377.62	524.46
ATR 72-600	0	0	0	0
Embraer E190LR	571.04	71.92	323.61	449.46
RIX-TLL	x	x	x	x
Boeing 757-200F	293.82	77.75	0	0
Airbus A220-300	281.08	43.57	196.05	272.29
ATR 72-600	0	0	0	0
Embraer E190LR	314.87	39.65	178.44	247.83
TLL-ARN	x	x	x	x
Boeing 757-200F	340.16	90.01	0	0
Airbus A220-300	335.5	52.01	234.01	325
ATR 72-600	0	0	0	0
Embraer E190LR	371.49	46.79	210.53	292.39
WAW-TLL	x	x	x	x
Boeing 757-200F	522.23	138.2	0	0
Airbus A220-300	541.97	84.01	378.01	525.01
ATR 72-600	0	0	0	0
Embraer E190LR	571.73	72.01	324.01	450.01