

**MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU**

**ULKOISEN KUORMAN VAIKUTUS HÄVITTÄJÄN SUORITUSKYKYYN**

Kandidaatintutkielma

Kadettiväpeli

Lauri Lappalainen

Kadettikurssi 98

Ilmasotalinja

Maaliskuu 2014

Kurssi Kadettikurssi 98	Linja Ilmasotalinja
Tekijä Kadettiväapeli Lauri Lappalainen	
Tutkielman nimi <b>Ulkoisen kuorman vaikutus hävittäjän suorituskykyyn</b>	
Oppiaine, johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka Maanpuolustuskorkeakoulun kurssikirjasto
Aika Maaliskuu 2014	Tekstisivuja 26                      Liitesivuja 3
<p><b>TIIVISTELMÄ</b></p> <p>Valtaosassa nykyaikana käytössä olevista hävittäjistä aseistus, lisäpolttoainesäiliöt ja maalinosoitusjärjestelmät kiinnitetään koneen ulkopuolelle joko siipi- tai runkoripustimiin. Tämä on yksinkertainen tapa, mutta se lisää koneen vastusta ja näin ollen heikentää sen suorituskykyä. Siiven alle kiinnitetty kuorma vaikuttaa myös nostovoimaan häiritsemällä siiven ympärillä kulkevaa virtausta. Lisäksi ulkoinen kuorma aiheuttaa usein rajoituksia suurimpaan sallittuun kuormitusmonikertaan, jolloin koneen liikehtimis- ja kaartokyky heikkenevät.</p> <p>Tässä kandidaatintutkielmassa selvitetään miten ulkoinen kuorma vaikuttaa hävittäjän suorituskykyyn ja edellä mainittuihin ominaisuuksiin. Havainnot esitellään ja perustellaan enimmäkseen laskennallisesti aerodynamiikan kaavoja apuna käyttäen. Tutkielmassa käytetään kvalitatiivista tutkimusstrategiaa ja sen tutkimusmenetelmänä on kirjallisuusanalyysi. Lähteinä on käytetty aerodynamiikan peruskirjallisuutta, eri korkeakoulujen oppimateriaaleja, Koelentokeskuksen materiaalia sekä ulkomaisia tutkimuksia.</p> <p>Tutkielman päätutkimuskysymys on: ”Miten ulkoinen kuorma vaikuttaa hävittäjän suorituskykyyn?”. Alatutkimuskysymyksiä ovat: ”Miten ulkoinen kuorma vaikuttaa hävittäjän vastukseen?”, ”Miten ulkoinen kuorma vaikuttaa hävittäjän nostovoimaan?” ja ”Miten ulkoinen kuorma vaikuttaa hävittäjän kaartokykyyn?”.</p> <p>Kun koneeseen lisätään ulkoista kuormaa, sen sakkausnopeus kasvaa, parhaan liitosuhteen nopeus pienenee, lentoonlähdon maakiito pitenee ja kohoamisnopeus heikkenee. Lisäksi polttoaineen kulutus kasvaa ja tätä kautta kantama ja toiminta-aika lyhenevät. Joissain tapauksissa koneen maksiminopeuksiin saattaa tulla rajoituksia, ja etenkin suurella kuormalla lennon rajakäyrä supistuu huomattavasti. Edellä mainitut yhdistettynä mahdollisiin kuormitusmonikerran rajoituksiin heikentävät koneen kaartokykyä ilmataistelussa. Voidaankin sanoa, että ulkoinen kuorma heikentää koneen suorituskykyä sen kaikilla osa-alueilla.</p>	
<p><b>AVAINSANAT</b></p> <p>aerodynamiikka, hävittäjä, kaartokyky, nostovoima, suorituskyky, ulkoinen kuorma, vastus</p>	

# SISÄLLYS

<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>1</b>
1.1 TUTKIMUSONGELMA JA RAJAUS.....	3
1.2 TUTKIMUSMENETELMÄ JA LÄHTEIDEN KÄYTTÖ.....	4
<b>2 ULKOISEN KUORMAN VAIKUTUS AERODYNAAMISIIN OMINAISUUKSIIN ..</b>	<b>5</b>
2.1 VASTUS .....	6
2.2 NOSTOVOIMA.....	10
2.3 KAARTOKYKY.....	15
<b>3 ULKOISEN KUORMAN VAIKUTUS HÄVITTÄJÄN SUORITUSKYKYYN .....</b>	<b>19</b>
3.1 NOPEUS .....	19
3.2 LENTOONLÄHTÖ, KOHOAMISNOPEUS JA KANTAMA .....	21
3.3 KAARTOTAISTELUOMINAISUUDET.....	22
<b>4 JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>24</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>27</b>
<b>LIITTEET.....</b>	<b>30</b>
TUTKIELMASSA KÄYTETYJÄ KÄSITTEITÄ .....	31
KAAVOISSA KÄYTETYT LYHENTEET JA SYMBOLIT.....	32

## ULKOISEN KUORMAN VAIKUTUS HÄVITTÄJÄN SUORITUSKYKYYN

### 1 JOHDANTO

Suurin osa nykyisin käytössä olevista hävittäjistä on neljättä sukupolvea. Niissä aseistus, lisäpolttoaine ja erilaiset maalinosoitusjärjestelmät kuljetetaan pääsääntöisesti ulkoisissa ripustimissa rungon ja siipien alla. Ulkoiset ripustimet ovat kohtuullisen yksinkertainen ratkaisu kuorman kiinnittämiseksi, koska niitä varten ei tarvitse suunnitella tekniikaltaan monimutkaisia asekuiluja [13]. Ulkoiset ripustimet aiheuttavat kuitenkin vastuksen lisääntymistä sekä rakenteellisia rajoituksia suurimpiin sallittuihin nopeuksiin ja kuormitusmonikertoihin. Esimerkiksi Ilmavoimien käyttämän Hawk-harjoitushävittäjän suurin sallittu kuormitusmonikerta laskee kahdeksasta kuuteen lennettäessä koneella, johon on kiinnitetty lisäpolttoainesäiliöt [9]. Lisäksi ulkoinen kuorma häiritsee virtauskenttää siiven ympärillä ja vaikuttaa täten nostovoiman syntyyn [25]. Tämä kandidaatintutkielma käsittelee ulkoisen kuorman aerodynaamisia vaikutuksia hävittäjän suorituskykyyn.

Vastus voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin, joita ovat vahingollinen eli parasiittinen vastus, nostovoiman tuottama eli indusoitu vastus sekä lähi- ja ylisoonisilla nopeuksilla syntyvä aaltovastus. Vahingollinen vastus jakautuu edelleen profiilivastukseen ja interferenssivastukseen. [5] Ulkoisen kuorman aiheuttama vastus koostuu pääosin profiili- ja interferenssivastuksesta. Runkoon kiinnitettävän kappaleen profiilivastus riippuu kappaleen muodosta ja pintamateriaalista. Interferenssivastukseen sen sijaan vaikuttaa kappaleen kiinnitystapa sekä etäisyys rungosta tai siivestä. [16; 25]

Nostovoimaa tuottavat pääsääntöisesti siivet, mutta useissa hävittäjissä myös runko tuottaa muotonsa vuoksi suuren osan siitä. Nostovoiman syntymisessä merkittävää on ilman virtaus siiven ylä- ja alapinnalla. [25] Siiven alapinnalle kiinnitetty ulkoinen kuorma vaikuttaa virta-

ukseen siiven ympärillä. Tietyissä tilanteissa virtausta pyritään nostovoiman parantamiseksi muuttamaan esimerkiksi rajakerrosaidoilla, mutta ulkoista kuormaa ei lähtökohtaisesti ole suunniteltu tätä tarkoitusta varten. Nostovoiman tuottaman eli indusoidun vastuksen suuruuteen pystytään vaikuttamaan siiven kärjen suunnittelulla. Indusoitua vastusta pienentäviä ratkaisuja kutsutaan yleisesti wingleteiksi ja niiden tarkoitus on vähentää vortex-pyörrettä. [10] Wingletit eivät ole yleinen ratkaisu hävittäjissä, sillä usein siiven kärkiin pitää pystyä kiinnittämään ulkoista kuormaa, tyypillisesti ohjuksia.

Hävittäjän suorituskykyä tarkasteltaessa huomioitavia asioita ovat hetkellinen kaartokyky ja jatkuva kaartokyky. Hetkellisessä kaartokyvyssä merkittäviä seikkoja ovat suurin sallittu kuormitusmonikerta ja nostovoiman tuottaminen, kun taas jatkuvaan kaartokykyyn vaikuttaa myös moottoreiden tehokkuus ja tätä kautta työntövoimaylijäämä. [16] Eri hävittäjätyypeillä ulkoisen kuorman vaikutukset kyseisiin ominaisuuksiin ovat yksilöllisiä, mutta tiettyjä aerodynamiikan aiheuttamia yhtäläisyyksiäkin on. Ulkoinen kuorma pienentää poikkeuksetta koneen liikehtimisvaran ja -rajan kuvaajia vaikuttaen näin koneen suoritusarvoihin esimerkiksi kaartotaistelutilanteessa. [1]

Suomen kielistä tutkimusta ulkoisen kuorman vaikutuksista hävittäjän suorituskykyyn on julkisista lähteistä saatavilla melko vähän. Lähimmäs käsiteltävää aihetta osuu Aaltoyliopistossa tehty kandidaatintutkielma *Ulkoisten kuormien vaikutukset lentokoneiden ominaisuuksiin* (Niki Loppi, 2012). Siinä käsitellään kuormien vaikutuksia useasta näkökulmasta melko suppeasti sisältäen vaikutukset aerodynamiikkaan, lentokoneen rakenteisiin, suoritusarvoihin sekä tutkalla havaittavuuteen. Maanpuolustuskorkeakoulussa on tutkittu kandidaattitasolla muun muassa hybridisiiven, suunnattavien suihkusuutinten sekä etusiiven vaikutuksia hävittäjien aerodynamiikkaan ja suorituskykyyn (Laamanen, J., Taanila, H., Penttinen, J.).

Yhdysvalloissa NASA:n tutkimuskeskus on tehnyt paljon aiheeseen liittyvää tutkimusta eri hävittäjien suunnittelu- ja koelentoprosessien yhteydessä. Esimerkiksi Dryden Flight Research Centerissä on tutkittu siipiin kiinnitetyn ulkoisen kuorman vaikutusta Douglas D-558-II -koneen nostovoimaan ja vastukseen. [6] NASA:n tutkimustulokset perustuvat tuulitunnelimitoituksiin sekä koelentoihin.

Aiheen ajankohtaisuutta tukee Suomessa lähivuosina käynnistyvä uuden hävittäjän hankintaprosessi. F/A-18 Hornetin seuraaja tulee todennäköisesti olemaan joko kehittyneempää neljät-

tä sukupolvea, kuten Eurofighter Typhoon, tai viidettä sukupolvea, kuten F-35 JSF [7]. Suurin ero neljännen ja viidennen sukupolven välillä on häiveteknologia, johon viidennen sukupolven hävittäjien suunnittelussa on kiinnitetty merkittävästi huomiota. Muita eroja ovat viidennen sukupolven kehittyneemmät tutka- ja avioniikkajärjestelmät, mahdollisuus äänennopeuden ylittämiseen ilman jälkipolttoa (supercruise) sekä aselastin sijoittaminen rungon sisään. [7] Tutkielma antaa perusteita ulkoisen kuorman aiheuttamien aerodynaamisten ja suorituskyvyllisten muutosten tutkimiselle ja tätä kautta erilaisessa kuormassa olevien hävittäjien suorituskyvyn vertailulle. Toisaalta *Sotateknisen arvion ja ennusteen 2025* mukaan aerodynaamisten ominaisuuksien kehittäminen jäänee jatkossa häiveominaisuuksien kehittämisen varjoon, sillä heikkoa havaittavuutta taistelukentällä pidetään tulevaisuudessa selviytymisen kannalta tärkeämpänä tekijänä kuin hyviä aerodynaamisia ominaisuuksia. [24]

## 1.1 Tutkimusongelma ja rajaus

Tämän kandidaatintutkielman tavoitteena on selvittää yleisellä tasolla, miten ulkoinen kuorma vaikuttaa hävittäjän aerodynaamisiin ominaisuuksiin ja tätä kautta suorituskykyyn. Tutkielmassa ei tuoteta uutta tietoa, vaan tarkoituksena on tuottaa mahdollisimman kattava yhteenve-to tutkittavasta aiheesta.

Tutkielman pääkysymys on: Miten ulkoinen kuorma vaikuttaa hävittäjän suorituskykyyn?

Pääkysymys on jaettu seuraaviin alakysymyksiin:

- Miten ulkoinen kuorma vaikuttaa hävittäjän vastukseen?
- Miten ulkoinen kuorma vaikuttaa hävittäjän nostovoimaan?
- Miten ulkoinen kuorma vaikuttaa hävittäjän kaartokykyyn?

Tutkielma keskittyy ulkoisen kuorman aiheuttamiin aerodynaamisiin ominaisuuksiin sekä näistä johtuviin suorituskyvyn muutoksiin. Ominaisuuksia tarkastellaan alisoonisella nopeusalueella, sillä se kuvaa parhaiten tyypillistä kaartotaistelutilannetta. [15] Esimerkkeinä käytetään kolmannen ja neljännen sukupolven hävittäjiä, koska niissä aseistus, lisäpolttoaine ja maalinosoitusjärjestelmät kiinnitetään lähes poikkeuksetta koneen ulkopuolelle. Tutkielmassa ei käsitellä ulkoisen kuorman vaikutuksia häiveominaisuuksiin eli tutkalla näkymiseen. Tutkielmassa ei suoriteta vertailua eri hävittäjä sukupolvien välillä eikä käsitellä viidennen sukupolven hävittäjissä yleisesti käytössä olevia suorituskykyä parantavia tekniikoita. Näitä tek-

niikoita ovat esimerkiksi tehokkaammat moottorit, jotka vaikuttavat luonnollisesti koneen nopeuteen, tai suunnattavat suihkusuuttimet, joilla koneen kaartokykyä voidaan parantaa. Tutkielman suppeuden ja rajallisen sivumäärän vuoksi lukijalta oletetaan aerodynamiikan perustietämystä. Tutkielmassa perustellaan kaavojen avulla ulkoisesta kuormasta aiheutuvia aerodynaamisia vaikutuksia. Kaavoissa käytetyt lyhenteet ja symbolit on koottu liitteeseen 2.

## 1.2 Tutkimusmenetelmä ja lähteiden käyttö

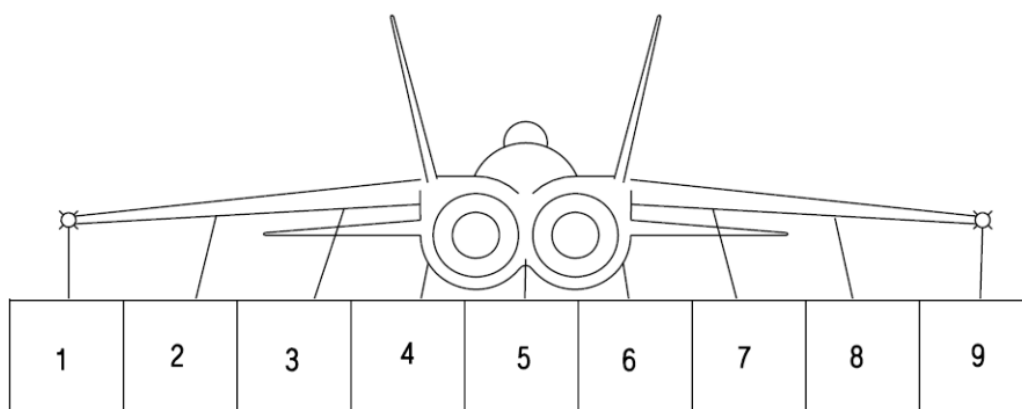
Tutkielmassa käytetään kvalitatiivista tutkimusstrategiaa. Tutkimusmenetelmänä on julkisiin kirjallisuuslähteisiin perustuva kirjallisuusanalyysi. Tarkoituksena on selvittää aerodynamiikan peruskirjallisuuden ja julkisten sotilaslähteiden avulla ulkoisen kuorman aiheuttamia vaikutuksia hävittäjän vastukseen, nostovoimaan ja kaartokykyyn.

Tutkielman runkona käytetään sekä kotimaista että englanninkielistä aerodynamiikan peruskirjallisuutta ja opintomateriaalia. Sitä täydennetään julkisista lähteistä saatavissa olevalla tutkielman aihetta käsittelevällä sotilasmateriaalilla, Koelentokeskuksen materiaalilla, sotilasihteisten lehtien artikkeleilla sekä muilla julkaisuilla. Laajan lähdeaineiston tarkoitus on luoda tutkijalle kattava ymmärrys tutkittavasta aiheesta. Vertailemalla eri lähteiden tietoja keskenään voidaan harjoittaa lähdekritiikkiä ja näin ollen parantaa tutkimuksen luotettavuutta.

## 2 ULKOISEN KUORMAN VAIKUTUS AERODYNAAMISIIN OMINAISUUKSIIN

Lentokonetta suunniteltaessa on otettava huomioon useita aerodynaamisia ominaisuuksia, eli on tutkittava miten virtaus käyttäytyy koneen ympärillä. Hävittäjän suunnittelussa ei aina voida valita parhaita aerodynaamisia ominaisuuksia, vaan on huomioitava tehtävät joita koneella tulisi kyetä suorittamaan. Usein tehtävää varten vaadittava aseistus ja lisäpolttoaine kiinnitetään runkoon ja siipien alle, eli koneen ulkopuolelle. Ulkoinen kuorma vaikuttaa hävittäjän aerodynaamisiin ominaisuuksiin, joita ovat vastus, nostovoima sekä kaartokyky.

Suomessa käytössä olevassa F/A-18 Hornet -hävittäjässä ulkoista kuormaa voidaan kiinnittää yhteensä yhdeksään eri ripustimeen (Kuva 1). Kummankin siiven kärjessä on ripustin (1 ja 9), joihin voidaan kiinnittää esimerkiksi lämpöhakuisia ohjuksia (AIM-9 Sidewinder). Molempien siipien alla on ripustimia kaksin kappalein, ulompi ja sisempi (2, 3, 7 ja 8). Näihin voidaan kiinnittää muun muassa tutkahakuisia ohjuksia (AIM-120 AMRAAM), erilaisia ilmasta maahan pommeja sekä sisempiin ripustimiin lisäksi lisäpolttoainesäiliöt. Kuhunkin siipiripustimeen on mahdollista kiinnittää kaksi AIM-120-ohjusta. Lisäksi ulompiin runkoripustimiin (4 ja 6) voidaan kiinnittää kumpaankin yksi AIM-120-ohjus, joten yhteensä niitä saadaan kiinni koneen alle 10 kpl kerrallaan. Kesimmäiseen runkoripustimeen (5) voidaan kiinnittää lisäpolttoainesäiliö tai erilaisia pommeja. Kaiken kaikkiaan ulkoista kuormaa voidaan kiinnittää koneeseen huomattava määrä, jolla on luonnollisestikin vaikutuksia koneen aerodynamiikkaan ja lento-ominaisuuksiin. [11; 12; 22]

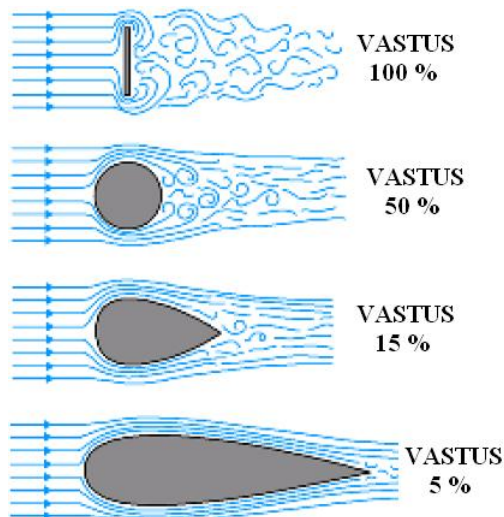


Kuva 1: F/A-18 Hornet -hävittäjän siipi- ja runkoripustimet ja niiden numerointi [22 s. I-4-12]



## 2.1 Vastus

Ulkoisen kuorman aiheuttama vastus on niin sanottua vahingollista, eli parasiittista vastusta. Vahingollinen vastus jaetaan yleisesti interferenssivastukseen ja profiilivastukseen [10, s. 41]. Interferenssivastuksella tarkoitetaan koneen eri osien keskinäisistä vuorovaikutuksista aiheutuvaa vastusta, ja siihen vaikuttaa suuresti se, miten osat on liitetty toisiinsa. Esimerkiksi ulkoisen kuorman etäisyys rungosta tai siivestä sekä sen kiinnitystapa vaikuttavat syntyvän interferenssivastuksen suuruuteen. Yksittäin kiinnitetyt (single mounted) ohjukset ja pommit aiheuttavat vielä suhteellisen vähän vastuslisää verrattuna tilanteeseen, jossa samaan ripustimeen on kiinnitetty useita ohjuksia tai pommeja (multiple rack) [21, s. 340–346]. Profiilivastus taas jakautuu muotovastukseen (form drag) ja kitkavastukseen (friction drag) [10, s. 41–42]. Kuten kuvasta 2 nähdään, muotovastus on erittäin suuresti riippuvainen kappaleen muotoilusta, joten onkin selvää että lentokoneen suunnittelussa eri osien muotoilulla on olennainen merkitys. Muotovastuksen lisäksi suuri osa lentokoneen vastuksesta aiheutuu virtaavan ilman ja koneen ulkopintojen välisestä leikkausjännityksestä, eli kitkasta. Tähän vastukseen voidaan vaikuttaa pintamateriaaleilla ja pinnan sileydellä. [10; 16]



Kuva 2: Kappaleen muotoilun vaikutus muotovastukseen [10, s.42]

Ulkoisen kuorman aiheuttaman vahingollisen vastuksen suuruus voidaan laskea kaavalla 1. Vahingollisen vastuksen suuruuteen vaikuttavat kunkin kappaleen vastuskerroin, kappaleen liikesuunnasta katsottuna sen poikkipinta-ala sekä dynaaminen paine, jossa suurena tekijänä on koneen ilmanopeus. [25]

$$(1) D_P = C_D A q \text{ [25, s. 209]}$$

Kuten aiemmin on todettu, Suomessa käytössä oleviin F/A-18 Hornet -hävittäjiin voidaan lastata yhteensä 10 AIM-120 AMRAAM -ohjusta. Niistä aiheutuva vahingollisen vastuksen lisä voidaan selvittää laskennallisesti. Yhden ohjuksen vastuskerroin on noin 0,2, sillä kyseessä on perästä tylppä, tasapaksu kappale, jonka  $l/d$  -suhde on noin 20. Lisäksi ohjaussiivekkeet vaikuttavat vastuskertoimeen jonkin verran. [25, s. 207–217] AIM-120-ohjuksen halkaisija on 17,78 cm, jolloin liikesuuntaa vastaan kohtisuoraksi poikkipinta-alaksi saadaan  $0,025 \text{ m}^2$  [12]. Dynaamisesta paineesta ja ilman tiheydestä johtuen vastuslisä on suurin lennettäessä matalalla suurella nopeudella. Kaavan 1 avulla lasketut AIM-120-ohjuksen vastuslisät eri korkeuksilla ja nopeuksilla löytyvät taulukosta 1.

Taulukko 1: AIM-120 AMRAAM -ohjuksen laskennallinen vahingollinen vastus eri lentokorkeuksilla ja -nopeuksilla ja vastuksen osuus F/A-18 Hornetin moottoreista saatavasta maksimityöntövoimasta

$C_D = 0,2$	<u>VASTUS ERI NOPEUKSILLA JA SEN</u>					
	<u>%- OSUUS TYÖNTÖVOIMASTA</u>					
$A = 0,025 \text{ m}^2$	250 km/h		500 km/h		1 000 km/h	
<u>KORKEUS</u>	<b>N</b>	<b>%</b>	<b>N</b>	<b>%</b>	<b>N</b>	<b>%</b>
1 000m	<b>13</b>	0,008	<b>54</b>	0,034	<b>214</b>	0,137
2 500m	<b>12</b>	0,008	<b>46</b>	0,029	<b>185</b>	0,118
5 000m	<b>9</b>	0,006	<b>35</b>	0,022	<b>142</b>	0,091
10 000m	<b>5</b>	0,003	<b>20</b>	0,013	<b>80</b>	0,051
15 000m	<b>2</b>	0,001	<b>9</b>	0,006	<b>37</b>	0,024

Laskujen mukaan yhden ohjuksen aiheuttama vastuslisä on suurimmillaan 214 N, joka vastaa 0,137 %:a Hornetin moottoreista saatavasta maksimityöntövoimasta. Suuremmalla kuormalla vastus kuitenkin moninkertaistuu. Esimerkiksi lennettäessä 1 000 m korkeudessa nopeudella 1 000 km/h, kymmenestä ohjuksesta aiheutuva vastuslisä on noin 2 140 N. Tulos vastaa noin 1,4 %:a Hornetin moottoreista saatavasta maksimityöntövoimasta ( $2 \times 78,3 \text{ kN}$ ) [11]. Tuloksessa ei ole mukana vielä ohjusten aiheuttamaa interferenssivastusta. [16; 26]

Samoin kuin AIM-120-ohjuksen, myös lisäpolttoainesäiliöiden aiheuttama vahingollinen vastus voidaan selvittää laskennallisesti. Ohjuksista poiketen lisäpolttoainesäiliöissä ei tarvitse olla tylppää perää tai ohjaussiivekkeitä, joten niiden vastuskerroin on hieman pienempi kuin ohjusten. Tähän vaikuttaa kuitenkin suuresti säiliön kiinnitys koneeseen. Aivan koneen runkoon tai siipeen kiinnitetyn säiliön vastuskerroin voi olla jopa 0,26, kun taas sopivan matkan päähän ripustetun säiliön vastuskerroin putoaa arvoon 0,06 [16, s. 428]. Ero selittyy interferenssivastuksella, jota ei ohjuksen vastusta laskettaessa otettu huomioon. Tyypillisesti käytössä olevan 1 250 litran (330 US GAL) lisäpolttoainesäiliön liikesuuntaa vastaan kohtisuora poikkipinta-ala on noin  $0,40 \text{ m}^2$  [22]. Samoin kuin ohjuksen, myös lisäpolttoainesäiliön aiheuttama vastuslisä on suurimmillaan lennettäessä matalalla suurella nopeudella. Kaavan 1 avulla lasketut 1 250 litran lisäpolttoainesäiliön vastuslisät eri korkeuksilla ja nopeuksilla löytyvät taulukoista 2 ja 3. Taulukossa 2 vastuskertoimena on 0,06 ja taulukossa 3 0,26.

Taulukko 2: 1 250 litran lisäpolttoainesäiliön laskennallinen vahingollinen vastus eri lentokorkeuksilla ja -nopeuksilla vastuskertoimella 0,06 ja vastuksen osuus F/A-18 Hornetin moottoreista saatavasta maksimityöntövoimasta

$C_D = 0,06$	<u>VASTUS ERI NOPEUKSILLA JA SEN</u>					
	<u>%- OSUUS TYÖNTÖVOIMASTA</u>					
$A = 0,40 \text{ m}^2$	250 km/h		500 km/h		1 000 km/h	
<u>KORKEUS</u>	<b>N</b>	<b>%</b>	<b>N</b>	<b>%</b>	<b>N</b>	<b>%</b>
1 000m	<b>64</b>	0,041	<b>257</b>	0,164	<b>1 029</b>	0,657
2 500m	<b>55</b>	0,035	<b>221</b>	0,141	<b>886</b>	0,566
5 000m	<b>43</b>	0,027	<b>170</b>	0,109	<b>682</b>	0,436
10 000m	<b>24</b>	0,015	<b>96</b>	0,061	<b>382</b>	0,244
15 000m	<b>11</b>	0,007	<b>45</b>	0,029	<b>179</b>	0,114

Lisäpolttoainesäiliön oikeanlaisella kiinnityksellä pystytään minimoimaan sen aiheuttama interferenssivastus. Yhden säiliön aiheuttama vastuslisä on suurimmillaan 1 029 N, joka on 0,657 %:a Hornetin moottoreista saatavasta maksimityöntövoimasta (Taulukko 2).

Taulukko 3: 1 250 litran lisäpolttoainesäiliön laskennallinen vahingollinen vastus eri lentokorkeuksilla ja -nopeuksilla vastuskertoimella 0,26 ja vastuksen osuus F/A-18 Hornetin moottoreista saatavasta maksimityöntövoimasta

$C_D = 0,26$	<u>VASTUS ERI NOPEUKSILLA JA SEN</u>					
	<u>%- OSUUS TYÖNTÖVOIMASTA</u>					
$A = 0,40 \text{ m}^2$	250 km/h		500 km/h		1 000 km/h	
<u>KORKEUS</u>	<b>N</b>	<b>%</b>	<b>N</b>	<b>%</b>	<b>N</b>	<b>%</b>
1 000m	<b>279</b>	0,178	<b>1 115</b>	0,712	<b>4 460</b>	2,848
2 500m	<b>240</b>	0,153	<b>959</b>	0,612	<b>3 838</b>	2,451
5 000m	<b>185</b>	0,118	<b>738</b>	0,471	<b>2 953</b>	1,886
10 000m	<b>103</b>	0,066	<b>414</b>	0,264	<b>1 656</b>	1,057
15 000m	<b>49</b>	0,031	<b>194</b>	0,125	<b>777</b>	0,496

Jos taas lisäpolttoainesäiliö on kiinnitetty hyvin lähelle siipeä, interferenssivastuksen osuus on huomattavan suuri. Vastuskertoimella 0,26 yhden säiliön aiheuttama vastuslisä on suurimmillaan 4 460 N, joka on 2,848 % Hornetin moottoreista saatavasta maksimityöntövoimasta (Taulukko 3). Tuloksia vertailemalla huomataan, että oikeanlaisella kiinnityksellä lisäpolttoainesäiliöstä aiheutuvaa vastusta voidaan pienentää 77 %.

Harvoin koneessa on kuitenkin kiinni ainoastaan lisäpolttoainesäiliöitä tai AIM-120-ohjuksia. Ajatellaan hypoteettinen tilanne, jossa Hornetiin olisi kiinnitetty optimaalisella kiinnityksellä kolme lisäpolttoainesäiliötä (ripustimiin 3, 5, ja 7) sekä kuusi AIM-120-ohjusta (ripustimiin 2 ja 8 kaksi kappaletta sekä ripustimiin 4 ja 6 yhdet kumpaankin). Tällöin syntyvä vastuslisä on suurimmillaan  $3 \cdot 1\,029 \text{ N} + 6 \cdot 214 \text{ N}$  eli yhteensä noin 4,3 kN (1 000 m, 1 000 km/h) joka vastaa 2,79 %:a koneen moottoreista saatavasta maksimityöntövoimasta. Saman kuorman aiheuttama vastuslisä epäoptimaalisella kiinnityksellä (lisäsäiliöiden vastuskertoimella 0,26) on  $3 \cdot 4\,460 \text{ N} + 6 \cdot 214 \text{ N}$  eli yhteensä noin 14,8 kN (1 000 m, 1 000 km/h) joka on jo 9,48 % maksimityöntövoimasta. [11] Tässä tutkimuksessa ei oteta kantaa siihen, miten juuri Hornetin lisäpolttoainesäiliöt on kiinnitetty, vaan laskujen tarkoitus on havainnollistaa interferenssivastuksen merkitystä.

Edellä esitetyt laskut ovat vielä suhteellisen yksinkertaisia, mutta suuntaa antavia. Ulkoisen kuorman aiheuttamaa todellista vastuslisää on hyvin vaikeaa, ellei mahdotonta selvittää las-

kennallisesti. Etenkin interferenssivastuksen laskeminen ja arviointi tuottaa hankaluuksia, joten sen määrittämiseksi tuulitunnelitestit, koelennot tai kehittyneet matemaattiset virtauksenmallinnusohjelmat ovat välttämättömiä [8, s. 216–218]. Niinpä edellä laskettua AIM-120-ohjusten aiheuttamaa vastusta määritettäessä ei ole otettu huomioon interferenssivastusta. Lisäpolttoainesäiliöiden erilaiselle kiinnitykselle sen sijaan löytyi lähdemateriaalista suoraan eriyvät vastuskertoimet riippuen säiliön kiinnitystavasta.

Ulkoisen kuorman aiheuttamaa vastuksen lisääntymistä tukevat useat Yhdysvaltalaiset tutkimukset. Ames Aeronautical Laboratory on tutkinut kahden lisäpolttoainesäiliön ja neljän rakettikasetin vaikutusta pyrstöttömän hävittäjän vastukseen. Tutkimuksen mittaukset toteutettiin tuulitunnelissa ja tulosten mukaan kyseinen kuorma aiheutti 30 %:n vastuslisän nopeudella 0,60 Ma ja 50 %:n vastuslisän nopeudella 0,90 Ma [23]. Dryden Flight Research Center on tutkinut ulkoisen kuorman vaikutusta Douglas D-558-II -koelentokoneella nopeushaarukalla 0,48 – 1,03 Ma. Tutkimuksen mukaan siipiin kiinnitetyn ulkoisen kuorman aiheuttama vastuslisä oli suunnilleen yhtä suuri, kuin ulkoisesta kuormasta aiheutuvan märkäpinta-alan lisääminen koneeseen olisi aiheuttanut [6]. Kyseiset tutkimukset ovat melko vanhoja mutta tukevat hyvin yllä esitettyjä laskuja ja havaintoja.

## 2.2 Nostovoima

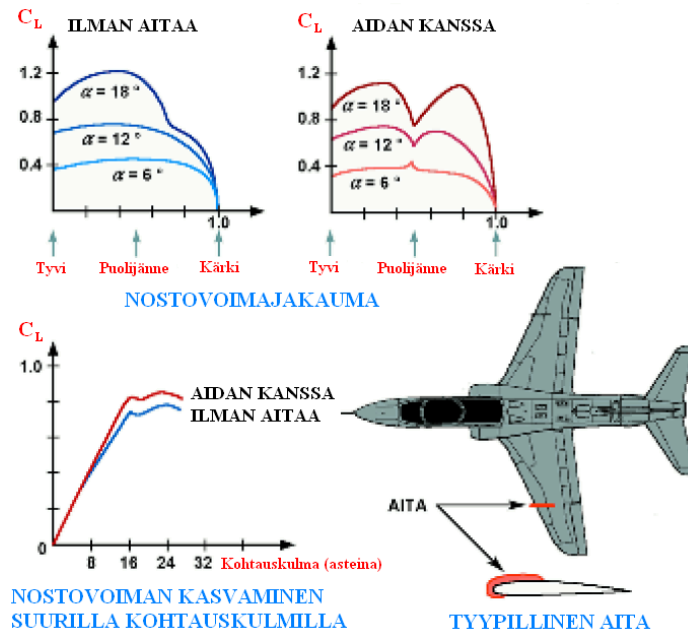
Nostovoimalla tarkoitetaan ylöspäin suuntautuvaa voimaa, joka vaakalennossa kumoaa koneen painon. Nostovoimaa tuottavat pääsääntöisesti siivet, mutta etenkin hävittäjissä myös runko tuottaa muotonsa takia merkittävän osan siitä. Teorioita nostovoiman syntymiseen on olemassa muutama, joista tässä käsitellään paine-ero -teoriaa. Sen mukaan nostovoima syntyy siiven ylä- ja alapinnan välisestä paine-erosta. Siiven kohtauskulmasta ja käyrityksestä johtuen virtauksen nopeus kiihtyy siiven yläpinnalla, jolloin siellä vallitseva paine laskee. Vastaavasti siiven alapinnalla virtauksen nopeus hidastuu ja paine nousee. Nostovoima syntyy paine-eron pyrkiessä tasaantumaan. [2; 16; 17]

Nostovoima voidaan laskea kaavan 2 avulla. Siihen vaikuttavat nostovoimakerroin, kohtauskulma, siipipinta-ala sekä dynaaminen paine [1]. Nostovoimakerroin ilmaisee siiven ”tehokkuuden”, eli suhteellisen kyvyn tuottaa nostovoimaa. Sen suuruus riippuu muun muassa siiven geometriasta. Kun siiven ylä- ja alapinnan välillä vallitseva paine-ero pyrkii tasoittumaan, syntyy siiven ylä- ja alapinnalle kärkeä suuntaista virtausta. Se suuntautuu yläpinnalla

kohti runkoa ja alapinnalla kohti siivenkärkeä. Poikittaisvirtaus purkautuu siipien päissä pyörteenä joka tunnetaan paremmin nimellä vortex- tai jättöpyörre. Jos vortex- pyörre saadaan muodostumaan haluttuun kohtaan siipeä, voidaan sillä parantaa nostovoimaa. Tätä ominaisuutta on hyödynnetty muun muassa F/A-18 Hornetissa. [3; 4]

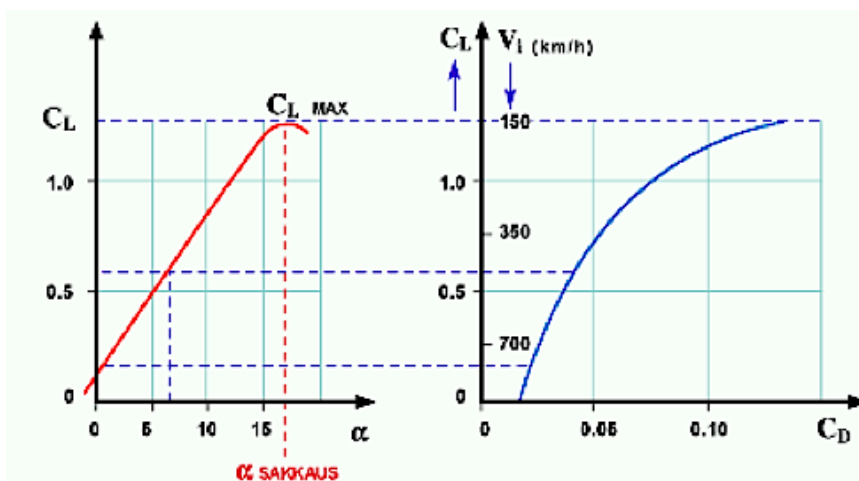
$$(2) L = C_L(\alpha)qS \text{ [1, s. 87]}$$

Haitallista poikittaisvirtausta estämään on kehitelty erilaisia ratkaisuja, joista ehkä tunnetuin ja käytetyin on rajakerrosaidat. Niillä pyritään estämään kärkivälin suuntaisen virtauksen aiheuttamaa virtauksen ennen aikaista irtoamista. Rajakerrosaidan siiven etupuolelle ulottuva osa on merkityksellinen, sillä se vääristää paikallista virtausta aiheuttamalla irronneen turbulentsin virtauksen aidan sisäpuolelle ja pyörteiden muodostumisen aidan ulkopuolelle. Irronnut virtaus ei yleensä johda nostovoiman tai vastuksen lisääntymiseen, ellei rajakerrosaitoja ole useampia. [10, s. 203–204] Tämä ei kuitenkaan ole nykyään kovin yleinen ratkaisu. Siiven alapuolelle kiinnitetty kuorma saattaa aiheuttaa jompaakumpaa edellä mainituista, sillä se ulottuu lähes poikkeuksetta siiven johtoreunan etupuolelle ja vääristää ainakin siiven alapinnan virtauskuviota. Kuvasta 3 nähdään oikein sijoitettujen rajakerrosaitojen vaikutus nostovoimakertoimeen. Nostovoimakertoimen maksimin kasvu rajakerrosaidan kanssa on kuvan 3 tilanteessa kohtuullisen pieni. Sen sijaan nostovoima jakautuu tasaisemmin koko siiven alueelle, joka taas on hyvä asia esimerkiksi sakkasominaisuuksien kannalta. Jos siiven alapuolelle kiinnitetty ulkoinen kuorma todellakin toimisi lähellekään kuten rajakerrosaidat, olisi kuorman vaikutus nostovoimakertoimeen jonkin verran kasvattava. [3; 15]



Kuva 3: Rajakerrosaidan vaikutus siiven nostovoimajakaumaan sekä nostovoimaksimin kasvamiseen suurilla kohtauskulmilla [10, s.204]

Nostovoiman suuruus riippuu siipiprofiilin muodon lisäksi kohtauskulmasta. Nostovoimakerroin kasvaa kohtauskulman kasvaessa, kuten kuvasta 4 voidaan nähdä. Piirrettäessä koordinaatistoon nostovoimakerroin vastuskertoimen funktiona, syntyy kuvaaja on lentokoneen polaari (kuvassa 4 oikealla) [10, s. 124]. Polaari on siinä mielessä merkittävä, että piirrettäessä origosta tangentti polaarille, saadaan leikkauspisteestä selville koneen liitosuhteen maksimiarvo. Tätä kutsutaan usein myös nostovoima/vastus -suhteen (Lift/Drag Ratio) maksimiarvoksi, ja se tarkoittaa sellaista kohtauskulmaa, jolla saavutetaan suurin mahdollinen nostovoima pienimmällä mahdollisella vastuksella. Liitosuhde on siis eräänlainen koneen aerodynaamisen tehokkuuden mitta. [3; 5]



Kuva 4:  $C_L = \alpha$  -kuvaaja ja lentokoneen polaari ( $C_L = C_D$  -kuvaaja) [10, s.126]

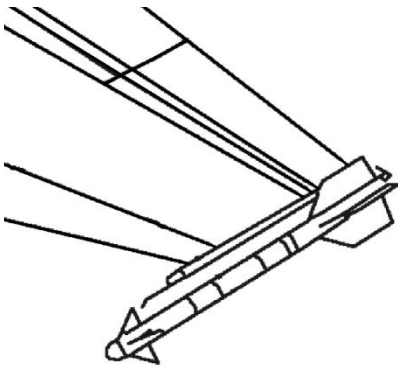
Ulkoinen kuorma ei merkittävästi muuta kuvaajaa  $C_L = \alpha$ , eli tämän väittämän mukaan sillä ei olisi juurikaan merkitystä nostovoimakertoimeen [10, s. 129]. Sen sijaan se lisää profiilivas-tusta, jonka lisääntyminen taas vaikuttaa  $C_L = C_D$  -kuvaajaan siirtämällä polaaria muotonsa säilyttäen  $C_D$  -akselin suunnassa oikealle. Niki Loppi on tutkinut kandidaatintutkielmassaan (Aalto-yliopisto, 2012) ulkoisen kuorman vaikutusta lentokoneen nostovoimakertoimeen McDonnell Douglasin kehittämällä empiirisiin tuloksiin perustuvalla DATCOM- menetelmäl-lä. Hän tutki ulkoisten kuormien vaikutusta mallilla, johon oli kiinnitetty yhdeksän ulkoista kuormaa. Tulosten mukaan ulkoiset kuormat aiheuttavat lähes poikkeuksetta nostovoimakertoimen alenemista ali- ja transsoonisilla nopeuksilla. Pienillä nopeuksilla nostovoimakertoimen muutokset olivat kuitenkin lähes olemattomia ja suuremmillakin nopeuksilla nostovoimakerroin heikkeni maksimissaan noin 3 %. Tämän perusteella siiven alle kiinnitetty ulkoi-nen kuorma ei toimi kuten rajakerrosaidat, eli kasvata nostovoimakerrointa, vaan päinvastoin. Vaikutus on kuitenkin ilmeisen vähäinen. [19]

Nostovoiman tuottamiseen vaikuttaa merkittävästi myös siiven sivusuhte. Periaatteessa mitä suurempi sivusuhte, sitä enemmän siipi pystyy tuottamaan nostovoimaa kohtauskulman py-syessä vakiona. [16, s.118–126] Suuren sivusuhteen ongelmana on kuitenkin siiven kasvanut pituus ja tämän myötä paino. Muutenkaan suurisivusuhteiset siivet eivät tule kyseeseen hävit-täjissä käytettävän nopeusalueen, heikentyneen siiveketehon sekä lisääntyneen parasitiittisen vastuksen takia [15]. Pienen sivusuhteen ongelmana on kuitenkin kohtalaisen voimakas kär-kivälin suuntainen virtaus, joka purkautuu siiven kärjessä vortex- pyörteenä. Paine-eron pur-kautuminen lisää merkittävästi indusoitua vastusta, mutta myös heikentää nostovoimaa siiven kärjessä. Siipien tuottama nostovoima ei siis jakaudu tasaisesti koko kärkivälille. Tätä ilmiötä estämään on kehitetty erilaisia ratkaisuja, joista edellä on mainittu jo rajakerrosaidat. Niiden lisäksi siiven kärki voidaan muotoilla siten, että paine-ero ei pääsisi niin voimakkaasti pur-kautumaan [5, s.76]. Tällaisia ratkaisuja kutsutaan yleisesti wingleteiksi. Ne siis pienentävät vastusta, mutta myös parantavat siiven nostovoimaa ilman kärkivälin kasvattamista ja näin ollen painon lisääntymistä. Oikein suunniteltujen winglettien avulla sama nostovoima voidaan saada aikaan jopa puolet pienemmällä sivusuhteella kuin ilman winglettejä. [2, s.102–109; 25, s. 122–149]

Siiven kärkiin kiinnitetty ulkoinen kuorma saattaa joissain tapauksissa pienentää syntyvää jättöpyörrettä, eli kuorma saattaa toimia ikään kuin wingletteinä. Väitteen tieteellinen todis-taminen tämän tutkielman rajoissa on mahdotonta, mutta viitteitä oletuksen paikkansapitä-

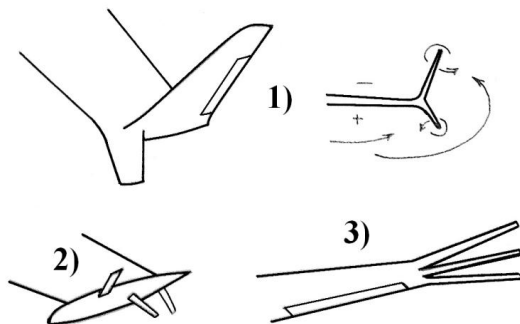


vyydestä on löydettävissä. Esimerkiksi F/A-18 Hornet -hävittäjissä siivenkärkiripustimiin voidaan kiinnittää AIM-9 Sidewinder-ohjukset. AIM-9 on noin 3 m pitkä, sen halkaisija on 12,7 cm ja siipien kärkiväli 27,9 cm [12]. Se kiinnitetään siiven kärkeen siten, että ohjuksen kärki on selvästi siiven johtoreunan etupuolella ja perä on suunnilleen siiven jättöreunan tasalla (kuva 5) [22, s. I-1-2].



Kuva 5: AIM-9 Sidewinder-ohjuksen kiinnitys F/A-18 Hornet -hävittäjän siipeen [22 s. I-1-2]

Ohjuksen suurimmat siivekkeet ja näin ollen suurin halkaisija sijaitsevat sen perässä (kuva 5). Ohjuksen rungon halkaisija ei ole juurikaan siiven paksuutta suurempi, joten sillä tuskin on merkittävää vaikutusta vortex- pyörteiden vähentämisessä. Sen sijaan siiven jättöreunan paikoilla olevat siivekkeet saattavat niitä pienentää. Tämä perustuu havaintoihin joita on tehty tutkittaessa vortex- pyörteen vähentämiseen soveltuvia ratkaisuja [25, s. 122–149]. Erilaisia ratkaisuja on esitetty kuvassa 6. On siis mahdollista, että siiven kärkeen kiinnitetyllä ohjuksella olisi nostovoimaa kasvattava vaikutus.



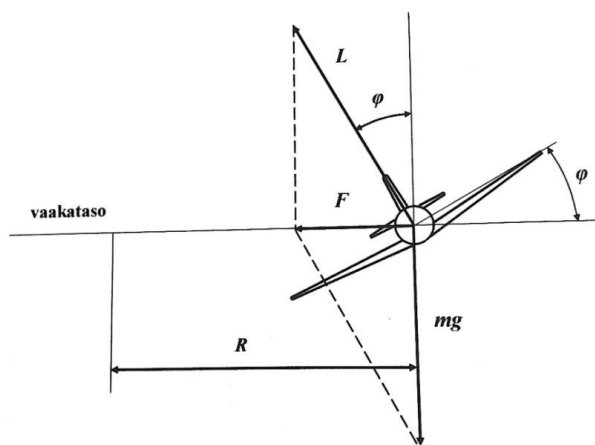
Kuva 6: Vortex pyörteen vähentämiseen suunniteltuja winglet-ratkaisuja [25, s.142]  
 1) Whitcomb's winglet, parantavat "tehollista" sivusuhteen arvoa, 2) Cranfield 'sails',  
 3) NASA 'energy efficient' wingtip

## 2.3 Kaartokyky

Kaartokyky tarkoittaa lentokoneen kykyä muuttaa lentosuuntaansa, ja se voidaan jakaa sekä hetkelliseen kaartokykyyn että jatkuvaan kaartokykyyn. Hetkellinen kaartokyky tarkoittaa tiettyinä tarkasteluajankohtana saavutettuja arvoja. Se riippuu koneen kyvystä tuottaa nostovoimaa sekä kuormitusmonikerran maksimiarvosta. Hetkellisessä kaarrossa vastus voi olla suurempi kuin työntövoima, jolloin koneen nopeus hidastuu. Jatkuva kaartokyky sen sijaan tarkoittaa sellaista lentosuunnan muutosnopeutta, jonka lentokone kykenee ylläpitämään vakionopeudella. Tällöin siis moottoreiden työntövoiman tulee kumota vastus. Lentokoneen kaartokykyä mitataan kaartokulmanopeudella (turn rate), kaartosäteellä (turn radius) sekä kuormitusmonikerralla. Kaartokulmanopeuden yksikkö on  $^{\circ}/s$  (tai rad/s) ja kaartosäteen esimerkiksi metri. [5; 16]

Kaarrossa koneeseen vaikuttaa nostovoiman ja koneen painon lisäksi voima  $F$ , joka saa aikaan lentosuunnan muutoksen. [16, s. 376–379] Koska nostovoima ei suuntaudu suoraan ylöspäin, vaan kuvan 7 mukaisesti viistosti kaarron suuntaan, voidaan se jakaa pysty- ja vaakakomponentteihin. Kuten kuvasta 7 nähdään, on vaakakomponentti lentosuunnan muutoksen aiheuttama voima  $F$  ja pystyakselin suuntainen komponentti koneen painon kumoava osuus nostovoimasta. Kuten kaavasta 3 nähdään, tulee kaarrossa nostovoiman olla aina suurempi kuin koneen paino. Tästä johtuvaa suhdetta  $L/(mg)$  kutsutaan kuormitusmonikerraksi  $n$ . [5; 16]

$$(3) L \cos \varphi = mg \quad [16, s. 377]$$



kuva lentokoneen edestä katsottuna

Kuva 7: Koneeseen vaikuttavat voimat kaarrossa [16, s.378]

Hetkellistä kaartokykyä tarkasteltaessa merkittävä seikka on koneen liikehtimisnopeus. Liikehtimisnopeuden alapuolella, eli suhteellisen pienillä nopeuksilla kaartokykyä rajoittaa koneen kyky tuottaa nostovoimaa [16, s. 379–382]. Liikehtimisnopeudella saavutetaan suurin mahdollinen kaarron kulmanopeus, ja tätä suuremmilla nopeuksilla kaartokykyä rajoittavaksi suureeksi muodostuu kuormitusmonikerran maksimiarvo. Hetkellinen sakkauksen rajoittama vaakakaarron kulmanopeus voidaan laskea kaavalla 4. Se saavutetaan nostovoimakertoimen maksimiarvolla liikehtimisnopeuden alapuolella.

$$(4) \omega = \frac{s}{2m} \sqrt{(\rho V C_{L_{max}})^2 - \left(\frac{2mg}{SV}\right)^2} \quad [16, s.383]$$

Ulkoinen kuorma vaikuttaa sakkauksen rajoittamaan kaartokykyyn suurentamalla koneen massaa sekä pienentämällä nostovoimakertoimen maksimiarvoa [19]. Tämä johtuu virtauksen häiriintymisestä siiven ympärillä. Kuten kaavasta 4 nähdään, massan kasvaminen ja nostovoimamaksimin pieneneminen vaikuttavat kaartokulmanopeuteen laskevasti, eli liikehtimisnopeuden alapuolella hetkellinen kaartokyky heikkenee ulkoisen kuorman johdosta.

Tarkastellaan tilannetta liikehtimisnopeuden yläpuolella. Jotta hävittäjä voi tällä nopeusalueella saavuttaa mahdollisimman suuren hetkellisen liikehtimiskyvyn, tulee kuormitusmonikerran maksimiarvo suunnitella niin korkeaksi kuin mahdollista. Tällöin kuormitusmonikerran rajoittamat kaartokulmanopeus ja kaartosäde voidaan laskea kaavojen 5 ja 6 avulla. [8; 16]

$$(5) \omega = \frac{g}{V} \sqrt{n_{max}^2 - 1} \quad [16, s.384]$$

$$(6) R = \frac{V}{\omega} = \frac{V^2}{g\sqrt{n_{max}^2 - 1}} \quad [16, s.384]$$

Ulkoinen kuorma saattaa aiheuttaa rajoituksia koneen suurimpaan sallittuun kuormitusmonikertaan. Esimerkiksi Suomen Ilmavoimien käyttämässä BAe Hawk -harjoitushävittäjässä ulkoiset lisäpolttoainesäiliöt laskevat suurimman sallitun kuormitusmonikerran kahdeksasta kuuteen [9]. Kyseinen kahden g:n lasku vaikuttaa jo melko huomattavasti koneen hetkelliseen kaartokykyyn. Esimerkissä kaarto tapahtuu vakionopeudella.

Merkitään:

$\omega_1$  = kaartokulmanopeus kuormitusmonikerran arvolla 8

$\omega_2$  = kaartokulmanopeus kuormitusmonikerran arvolla 6

Tällöin kaartokulmanopeus voidaan laskea kaavan 5 avulla käyttämällä yhtälöparia.

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{g}{v} \sqrt{n_{1max}^2 - 1} \\ \omega_2 = \frac{g}{v} \sqrt{n_{2max}^2 - 1} \end{cases} \parallel \text{Kerrotaan yhtälöpari ristiin}$$

$$\Rightarrow \omega_1 \sqrt{n_{2max}^2 - 1} = \omega_2 \sqrt{n_{1max}^2 - 1}$$

Sijoittamalla arvot  $n_{1max} = 8$  ja  $n_{2max} = 6$  ja ratkaisemalla  $\omega_2$  saadaan

$$\Rightarrow \omega_2 = 0,75\omega_1$$

Hävittäjän maksimi kaartokulmanopeus siis pienenee 25 % kuormitusmonikerran maksimin laskiessa kahdeksasta kuuteen. Vastaavasti kuormitusmonikerran rajoittama kaartosäde voidaan ratkaista kaavan 6 ja siitä muodostetun yhtälöparin avulla.

Merkitään:

$R_1$  = kaartosäde kuormitusmonikerran arvolla 8

$R_2$  = kaartosäde kuormitusmonikerran arvolla 6

$$\begin{cases} R_1 = \frac{v^2}{g \sqrt{n_{1max}^2 - 1}} \\ R_2 = \frac{v^2}{g \sqrt{n_{2max}^2 - 1}} \end{cases} \parallel \text{Kerrotaan yhtälöpari ristiin}$$

$$\Rightarrow R_1 \sqrt{n_{1max}^2 - 1} = R_2 \sqrt{n_{2max}^2 - 1}$$

Sijoittamalla arvot  $n_{1max} = 8$  ja  $n_{2max} = 6$  ja ratkaisemalla  $R_2$  saadaan

$$\Rightarrow R_2 = 1,34R_1$$

Hävittäjän kaartosäde siis kasvaa 34 % kuormitusmonikerran maksimin laskiessa kahdeksasta kuuteen. Edelleen voidaan kaavan 7 avulla laskea  $360^\circ$ :een kaartoon kuluva aika kuormitusmonikerran arvoilla 8 ja 6. Käytetään hyväksi aiemmin saatua tulosta  $\omega_2 = 0,75\omega_1$ . Ratkaistaan yhtälöparilla.

$$(7) t_{360} = \frac{2\pi}{\omega} [20]$$

Merkitään:

$t_1 = 360^\circ$ :een kaartoon kuluva aika kuormitusmonikerralla 8

$t_2 = 360^\circ$ :een kaartoon kuluva aika kuormitusmonikerralla 6

$$\begin{array}{l} t_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} \\ t_2 = \frac{2\pi}{\omega_2} \end{array} \Rightarrow \begin{array}{l} t_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} \\ t_2 = \frac{2\pi}{0,75\omega_1} \end{array} \parallel \text{Kerrotaan yhtälöpari ristiin ja ratkaistaan } t_2$$

$$\Rightarrow t_2 = 1,33t_1$$

Kuormitusmonikerran maksimin laskiessa kahdeksasta kuuteen  $360^\circ$ :een kaartoon kuluva aika kasvaa 33 %.

Jatkuvassa kaartokyvyssä saavutettava suurin mahdollinen kuormitusmonikerran arvo voidaan laskea kaavalla 8. Sen mukaan kuormitusmonikerran maksimiarvoon vaikuttavat moottorista saatava työntövoima, koneen paino sekä nostovoima- ja vastuskertoimet. Ulkoinen kuorma kasvattaa vastuskerrointa sekä koneen painoa ja näin ollen pienentää kuormitusmonikerran maksimia, jonka pieneneminen vaikuttaa edelleen kaartokulmanopeuteen, kaartosäteeseen ja kaartoon kulutettuun aikaan yllä lasketun mukaisesti.

$$(8) n_{max} = \frac{T_{max}}{mg} \left( \frac{C_L}{C_D} \right)_{max} [16, s.387]$$

### 3 ULKOISEN KUORMAN VAIKUTUS HÄVITTÄJÄN SUORITUSKYKYYN

Lentokoneen suorituskyvystä puhuttaessa tarkoitetaan sellaisia lento-ominaisuuksia, joita voidaan jollain tapaa mitata. Ne määrittävät kunkin koneen sopivuuden tietyn tyyppiin tehtäviin, ja niitä ovat esimerkiksi lentoonlähtömatka, kohoamisnopeus, lakikorkeus, kantama sekä sakkausnopeus. Kyseiset arvot riippuvat koneen aerodynaamisista ominaisuuksista, voimalaitteesta saatavasta työntövoimasta sekä koneen painosta. Matkustajakoneille ensiarvoista on taloudellisuus, joten kantamaan ja polttoaineen kulutukseen liittyvät suoritusarvot ovat tärkeitä. Sen sijaan hävittäjillä suorituskyvystä puhuttaessa tärkeitä ominaisuuksia ovat Huenecken mukaan lyhyt lentoonlähtö- ja laskumatka, suuri kohoamisnopeus, kiihtyvyys sekä huippunopeus [8, s. 24]. Tämä johtuu operaatioiden luonteesta, sillä niillä on pystyttävä toimimaan lyhyiltä kiitoteiltä, noustava nopeasti operaatiokorkeuteen, päästävä nopeasti taistelualueelle sekä vielä pystyttävä irtautumaan taistelusta ja palaamaan tukikohtaan mahdollisimman pienellä polttoaineen kulutuksella. Lisäksi tärkeää taistelussa pärjäämisen kannalta on liikehtimiskyky, eli koneen kyky muuttaa nopeutensa suuntaa ja suuruutta. Usein puhutaan kokonaisenergian muuttamisesta. Liikehtimiskyky sisältää käsitteet hetkellinen ja jatkuva kaartokyky. [5; 14; 16]

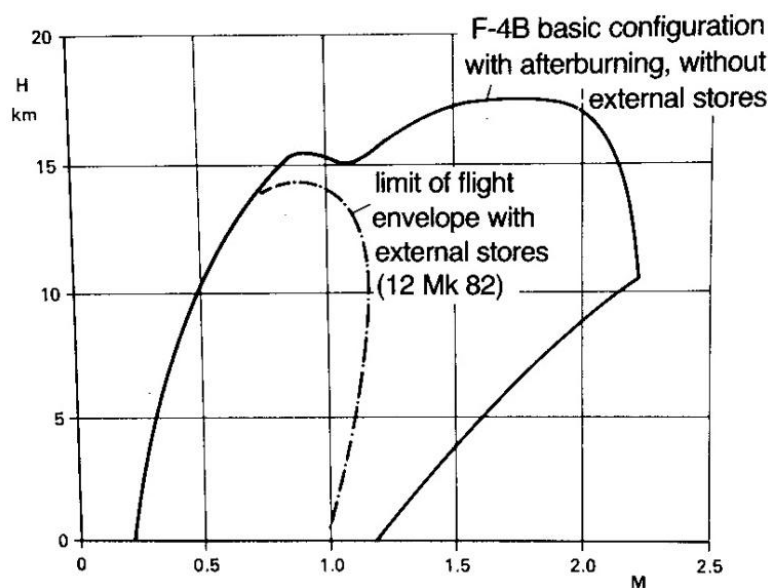
#### 3.1 Nopeus

Lentokoneen sakkausnopeus, eli nopeus jolla virtaus irtoaa siivestä, voidaan laskea kaavalla 9. Kuten kaavasta nähdään, ulkonen kuorma vaikuttaa sakkausnopeuteen kasvattavasti lisäämällä massaa sekä heikentämällä nostovoimakerrointa. Sakkausnopeus taas on merkityksellinen paitsi lentoonlähdeissä ja laskuissa niin myös kaartotaistelutilanteessa lennettäessä liikehtimisnopeuden alapuolella [15]. Tällä alueella sakkausnopeuden kasvaminen heikentää koneen kaartokykyä, kuten kappaleessa kolme on todettu. Sakkausnopeuden kasvaessa liikehtimisnopeus kasvaa ja näin ollen myös suurimman mahdollisen kuormitusmonikerran antava nopeus kasvaa.

$$(9) V_S = \sqrt{\frac{2mg}{C_{Lmax}\rho S}} \quad [16, s. 347]$$

Toinen merkittävä nopeus on pienimmän vastuksen nopeus, jota kutsutaan myös parhaan liitosuhteen nopeudeksi. Se saadaan määritettyä koneen  $C_L=C_D$ -kuvaajasta, eli polaarista. Tällä nopeudella saavutetaan suurin mahdollinen nostovoima pienimmällä mahdollisella vastuksella. [10] Ulkoinen kuorma lisää profiilivastusta, jonka kasvaminen siirtää  $C_L=C_D$ -kuvaajaa muotonsa säilyttäen  $C_D$ -akselin suunnassa oikealle (kuva 4). Tällöin paras liitosuhde ja parhaan liitosuhteen nopeus pienenevät, eli koneen liitokyky heikkenee. NASA on aikoinaan tutkinut ulkoisen kuorman vaikutusta hävittäjän liitosuhteen maksimiarvoon Douglas D-558-II -koelentokoneella. Kyseisen kokeen tulosten mukaan liitosuhteen maksimiarvo pieneni noin 14 %, mikä johtuu yllä mainitun mukaan profiilivastuksen lisääntymisestä. [6; 10]

Ulkoinen kuorma aiheuttaa usein hävittäjälle myös joitain suunnitteluvaiheessa asetettuja nopeusrajoituksia. Käytetään esimerkkinä Suomessa käytössä olevaa F/A-18 Hornet -hävittäjää. Ilmasta ilmaan ammuttavat ohjukset eivät aiheuta nopeusrajoituksia, mutta lisäpolttoainesäiliöt sen sijaan kyllä. Siipiin kiinnitetyt lisäsäiliöt rajoittavat koneen maksiminopeuden tyypillisesti arvoon 1,6 Ma / 635 KCAS, kun koneen maksiminopeudeksi on ilmoitettu 1,8 Ma. Toisena esimerkkinä kuvassa 8 näkyy McDonnell Douglas F-4 Phantom II -koneen lentoalueen rajat ilman ulkoista kuormaa ja sen kanssa. Kyseisessä tapauksessa ero maksiminopeuden suhteen on erittäin huomattava, mutta toisaalta kuormakin on iso, 12 kpl Mk 82 -pommeja. [8; 22]



Kuva 8: Ulkoisen kuorman vaikutus McDonnell Douglas F-4 Phantom II -hävittäjäpommittajan lennon rajakäyrään [8, s.217]

### 3.2 Lentoonlähtö, kohoamisnopeus ja kantama

Ulkoinen kuorma vaikuttaa luonnollisesti myös lentoonlähtökiitoon ja kohoamisnopeuteen. Kaavalla 10 voidaan laskea lentoonlähdön maakiitoon tarvittava etäisyys. Maakiitomatkaan vaikuttavat koneen siipikuormitus, nostovoimakertoimen maksimi-arvo sekä työntövoimaylijäämä. Kuten luvussa kolme on todettu, ulkoinen kuorma heikentää nostovoimakerrointa hieman. Siipikuormitukseen sillä ei ole suoraa vaikutusta, joskin välillisesti se nostaa koneen massaa ja lisää näin ollen myös siipikuormitusta. Jo pelkän massan merkitys yksittäisenä tekijänä on suuri, sillä 10 %:n massan lisäys kasvattaa maakiitoon tarvittavaa matkaa noin 20 % [16, s.400]. Sen sijaan työntövoimaylijäämään ulkoisella kuormalla on suoraan vaikutusta lisääntyneen vastuksen kautta, eli työntövoimaylijäämä pienenee ja  $mg/(T-D_G)$  -suhde kasvaa. Kaikki edellä mainitut yhdessä kasvattavat maakiitoon tarvittavaa etäisyyttä. [16, s. 398–400]

$$(10) S_{LO} = \frac{k^2 m}{\rho C_{L_{max}} S} \frac{mg}{(T-D_G)} \quad [16, s.400]$$

Kasvaneen maakiitomatkan lisäksi myös koneen kiihtyvyys ilmassa kärsii, sillä suurempi osa työntövoimasta menee kasvaneen vastuksen voittamiseen. Toisin sanoen työntövoima–vastus -suhde pienenee ja kiihdyttämiseen käytössä oleva ylijäämätyöntövoima siis laskee. Koneen kohoamisnopeus  $C$  voidaan laskea kaavalla 11. Kohoamisnopeus on ratanopeuden pystysuora komponentti ja siihenkin työntövoima-vastus -suhteen pieneneminen vaikuttaa heikentävästi. [3; 16, s. 364–365]

$$(11) C = V \sin \gamma = \frac{TV-DV}{mg} \quad [16, s.365]$$

Suihkukoneen kantama ja toiminta-aika tietyllä polttoainemäärällä riippuvat koneen liitoluvusta, moottorin polttoaineen ominaiskulutuksesta sekä käytettävästä lentomenetelmästä [16, s. 358]. Hävittäjällä operoitaessa käytettävä lentomenetelmä ja -profiili riippuvat tehtävän luonteesta ja erityispiirteistä. Polttoaineen ominaiskulutukseen ja liitolukuun sen sijaan ulkoisella kuormalla on vaikutusta. Ensinnäkin se vaikuttaa koneen massaan. Koska kone painaa enemmän, tarvitaan nostovoimaa enemmän, jolloin indusoitu vastus kasvaa. Tämä taas kasvattaa pienimmän vastuksen nopeutta ja heikentää liitolukua. [10] Lisäksi haitallinen vastus lisääntyy ulkoisen kuorman myötä. Tällöin polttoaineen kulutus kasvaa, sillä suurempi massa ja lisääntynyt vastus vaativat tietyn lentotilan säilyttämiseksi enemmän työntövoimaa. Tämä



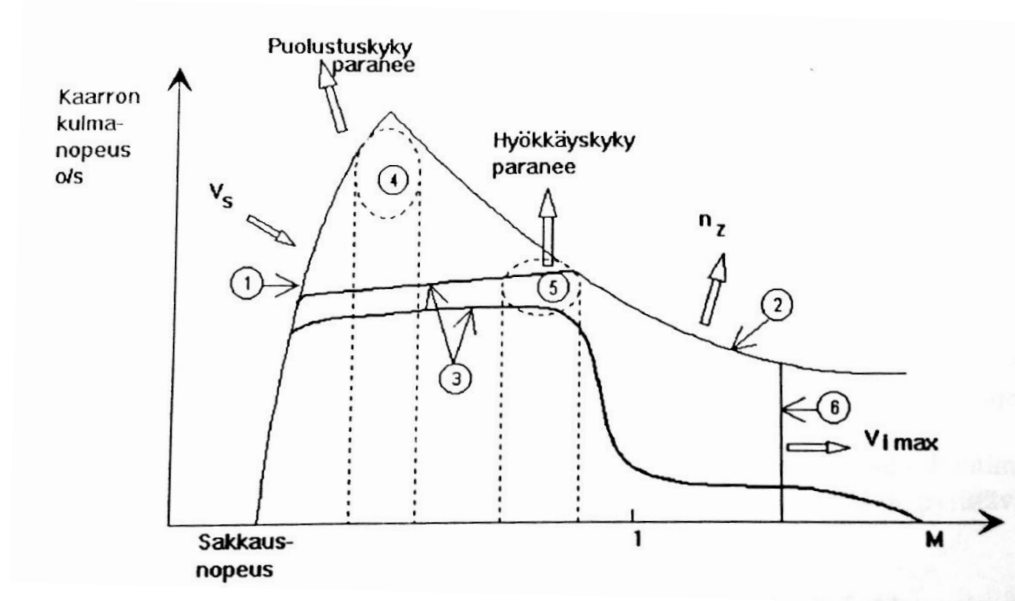
tarkoittaa lyhentynyttä toimintamatkaa ja -aika. Toisaalta jos lisämassa johtuu polttoaineesta (lisäpolttoainesäiliöt), toimintamatka- ja aika luonnollisesti kasvavat. [15]

### 3.3 Kaartotaistelumuinaisuudet

Perinteisessä kaartotaistelussa viholliseen vaikuttaminen onnistuu yleensä vain melko kapeasta sektorista sen takaa. Hyökkääjän on pyrittävä pääsemään tähän sektoriin ja puolustajan on omalla toiminnallaan estettävä hyökkääjän pääsy taakse. Puolustajan liikehinnässä tärkeää on mahdollisimman suuri hetkellinen kaarron kulmanopeus ja pieni kaartosäde, jotta hyökkääjää voidaan väistää mahdollisimman tiukasti. Hyökkääjälle tärkeää on mahdollisimman suuri jatkuva kaarron kulmanopeus, jolloin voidaan hakeutua asevaikutuksen kannalta edulliseen sektoriin energiaa menettämättä. [15] Jos puolustaja pystyy väistämään tämän hetkellisellä liikehinnällä, on hyökkääjä jatkossa vahvoilla, sillä puolustaja on menettänyt energiansa maksimaalisen hetkellisen liikehinnän seurauksena.

Kuvassa 9 on esitetty tyypillinen hävittäjän kaartokyky matalalla nopeuden funktiona. Rajat 1 ja 2 rajoittavat koneen liikehtimistä hetkellisessä kaartokyvyssä, kun taas rajaan 3 vaikuttaa myös moottoreista saatava työntövoima eli kyseessä on jatkuvan kaartokyvyn raja. Ulkoinen kuorma vaikuttaa luonnollisestikin rajoihin. Koneen lisääntynyt massa kasvattaa sakkausnopeutta, jolloin liikehtimisrajan määrittämä raja (1) siirtyy kuvassa oikealle. Suurempi sakkausnopeus tarkoittaa pienempää hetkellisen kaarron kulmanopeutta, joten sakkausnopeuden kasvu on kaartokyvyn kannalta huono asia. [15]

Ulkoisen kuorman aiheuttama vastuslisä laskee liikehtimisvaran määrittämää rajaa (3) alaspäin, sillä yhä suurempi osa moottoreiden tuottamasta työntövoimasta kuluu vastuksen voittamiseen. Tällä on negatiivinen vaikutus etenkin hyökkäyskykyyn, sillä hyökkääjän kannalta suuri jatkuva kulmanopeus on tärkeä. Lisäksi ulkoinen kuorma aiheuttaa usein rakenteellisia rajoituksia maksiminopeuden ja suurimman sallitun kuormituskertoimen suhteen. Näiden vaikutukset hävittäjän hetkelliseen ja jatkuvaan kaartokykyyn on laskettu kappaleessa 3.3. Kuvassa 9 edellä mainitut tarkoittavat rakenteellisen rajan (2) siirtymistä alaspäin sekä maksimi-ilmanopeuden määrittämisen rajan siirtymistä vasemmalle. Kaikki yllämainitut vaikutukset pienentävät koneen liikehtimisrajoja ja näin ollen heikentävät sen suorituskykyä kaartotaistelussa. [3; 15]



Kuva 9: Hävittäjän kaartokyky matalalla nopeuden funktiona [15]

(1 = Liikehtimisrajan määrittävä raja, 2 = Rakenteellinen raja, 3 = Liikehtimisvaran määrittävä raja, 4 = Puolustajan kannalta edullinen alue, 5 = Hyökkääjän kannalta edullinen alue, 6 = Maksimi-ilmanopeuden määrittämä raja)

## 4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin ulkoisen kuorman vaikutusta hävittäjän aerodynaamisiin ominaisuuksiin ja suorituskykyyn. Päätutkimuskysymys oli ”Miten ulkoinen kuorma vaikuttaa hävittäjän suorituskykyyn?” Muuttunutta suorituskykyä voidaan tarkastella lisääntyneen vastuksen, muuttuneen nostovoiman tai heikentyneen kaartokyvyn avulla. Alatutkimuskysymyksinä olivat ”Miten ulkoinen kuorma vaikuttaa hävittäjän vastukseen?”, ”Miten ulkoinen kuorma vaikuttaa hävittäjän nostovoimaan?” ja ”Miten ulkoinen kuorma vaikuttaa hävittäjän kaartokykyyn?”. Tutkielmassa ei paneuduttu minkään tietyn hävittäjätyypin suorituskykyyn, vaan luotiin yleiskuva ulkoisen kuorman aiheuttamista ominaisuuksista. Esimerkkeinä käytettiin muun muassa Suomessa käytössä olevaa F/A-18 Hornet -hävittäjää sekä BAe Hawk -harjoitushävittäjää.

Ulkoisen kuorman vaikutukset hävittäjän suorituskykyyn johtuvat lisääntyneestä vastuksesta, kasvaneesta koneen painosta, virtauskentän häiriintymisestä siiven ympärillä sekä rajoituksista joita kuorma aiheuttaa koneen suurimmalle sallitulle kuormitusmonikerralle ja maksiminopeudelle. Ulkoisen kuorman aiheuttama vastus on parasiittista, eli vahingollista vastusta, joka koostuu interferenssi- ja profiilivastuksesta. Kuorman aiheuttaman profiilivastuksen suuruus riippuu kappaleen vastuskertoimesta, poikkipinta-alasta, lentonopeudesta sekä ilman tiheydestä. Profiilivastuksen suuruus saadaan laskettua helposti, mutta interferenssivastuksen määrittäminen laskennallisesti on huomattavasti haastavampaa. Yksittäin kiinnitetyn kuorman aiheuttama vastuslisä on merkittävästi pienempi kuin jos samaan ripustimeen on kiinnitetty useampia kuormia. Ero johtuu kasvaneen profiilivastuksen lisäksi kuormien välisestä interferenssistä ja sen aiheuttamasta vastuksesta.

Ulkoisen kuorman aiheuttaman parasiittisen vastuksen suuruutta tarkasteltiin luvussa 3.1. Esimerkkeinä laskuissa käytettiin AIM-120 AMRAAM -ohjusta sekä 1 250 litran lisäpolttoainesäiliötä. Kuormasta aiheutunut vastus on molemmissa tapauksissa suurimmillaan lennetäessä matalalla suurella nopeudella. Lisäpolttoainesäiliön vastus laskettiin kahdella vastuskertoimella (0,06 ja 0,26) interferenssivastuksen suuruuden havainnollistamiseksi. Kokonaisvastus pieneni 77 % lisäsäiliöiden optimaalisella kiinnityksellä. Taulukoista 1, 2 ja 3 huomataan, että lennetäessä samalla korkeudella parasiittinen vastus pienenee 75 % nopeuden puolettua. Vastaavasti nopeuden pieneneminen neljäsosaan alkuperäisestä pienentää syntyvää

vastusta 94 %. Myös korkeudella on merkitystä, sillä samalla nopeudella lennettäessä korkeuden lisääntyminen 1 000 metristä 10 000 metriin pienentää vastusta 63 %.

Hornetiin voidaan kiinnittää maksimissaan kymmenen AIM-120-ohjusta. Tällöin lennettäessä matalalla suurella nopeudella aiheutuva parasiittinen vastuslisä on 2 140 N, joka vastaa noin 1,4 %:a koneen moottoreista saatavasta maksimityöntövoimasta. Tilanteessa, jossa koneeseen on kiinnitetty kolme lisäpolttoainesäiliötä sekä kuusi AIM-120-ohjusta, syntyvä vastuslisä optimaalisella lisäpolttoainesäiliöiden kiinnityksellä on noin 4,3 kN (1 000 m, 1 000 km/h). Epäoptimaalisella kiinnityksellä samalla korkeudella ja nopeudella vastuslisä kasvaa interferenssivastuksen takia noin 14,8 kN:iin, eli se kolminkertaistuu. Ensin mainittu vastaa 2,79 %:a koneen moottoreista saatavasta maksimityöntövoimasta ja jälkimmäinen jopa 9,48 %:a. Esimerkin tilanne saattaisi olla mahdollinen lennettäessä matalalla tutkakatveessa täydessä aselastissa operaatioalueelle mahdollisimman nopeasti. Tällöin kuormasta aiheutuva vastus tulisi ottaa huomioon etenkin lisääntyneenä polttoaineen kulutuksena ja pienentyneenä toimintaetäisyytenä.

Luvussa 3.2 käsitellyt ulkoisen kuorman aiheuttamat muutokset koneen nostovoimaan ovat hieman ristiriitaisia. Siiven alle kiinnitetty kuorma häiritsee virtausta siiven ympärillä ja näin ollen vaikuttaa nostovoimakertoimeen alentavasti, joskin alisoonisilla nopeuksilla vaikutus on maksimissaan noin 3 %. Siiven kärkiin kiinnitetyt ohjukset saattavat taas toimia kuten wingletit, jotka todistetusti pienentävät indusoitua vastusta ja kasvattavat nostovoimaa. Tämän todistaminen laskennallisesti ei ollut tämän tutkielman puitteissa mahdollista, vaan tarkkojen tulosten saamiseksi vaadittaisiin tuulitunnelimittauksia tai kehittyneitä virtauksenmallinnusohjelmia.

Tutkielmassa todettiin että ulkoinen kuorma vaikuttaa kaartokykyyn heikentäen sitä kaikilla nopeusalueilla. Liikehtimisnopeuden alapuolella lisääntynyt massa ja pienentynyt nostovoima heikentävät hetkellistä kaartokykyä, sillä tällä alueella suurin hetkellinen kaartokyky on riippuvainen nostovoiman tuottamisesta ja sakkausnopeudesta. Liikehtimisnopeuden yläpuolella hetkellistä kaartokykyä rajoittaa suurin sallittu kuormitusmonikerta, johon ulkoinen kuorma usein aiheuttaa rajoituksia. Esimerkiksi suurimman sallitun kuormitusmonikerran laskiessa kahdeksasta kuuteen suurin saavutettava kaartokulmanopeus pienenee 25 %, pienin mahdollinen kaartosäde kasvaa 34 % ja 360°:een kaartoon kuluva aika kasvaa 33 %. Ulkoinen kuorma heikentää myös jatkuvaa kaartokykyä pienentämällä työntövoiman ja koneen painon välistä suhdetta, kasvattamalla painoa, heikentämällä nostovoimaa sekä lisäämällä vastusta.

Ulkoisen kuorman aiheuttamia suorituskyvyn muutoksia tarkasteltiin luvussa 4. Ulkoisen kuorman aiheuttama kasvanut massa ja pienentynyt nostovoima kasvattavat sakkausnopeutta, joka on merkityksellinen liikehtimisnopeuden alapuolella kaarrettaessa. Myös liikehtimisnopeus kasvaa, jolloin suurin mahdollinen kuormitusmonikerta saavutetaan suuremmalla nopeudella. Profiilivastuksen lisääntyminen siirtää polaaria  $C_L=C_D$  -koordinaatistossa oikealle, jolloin parhaan liitosuhteen nopeus pienenee ja tietyn lentotilan säilyttämiseen tarvitaan enemmän työntövoimaa. Tuloksia vahvistavana argumenttina käytettiin NASA:n Douglas D-558-II -koelentokoneella suorittamaa tutkimusta, jonka mukaan koneen liitosuhteen maksimiarvo pieneni noin 14 % lisääntyneen profiilivastuksen johdosta. Heikkenemisen suuruus riippuu toki pitkälti kuormasta.

Tutkielmassa todettiin että ulkoinen kuorma aiheuttaa usein myös nopeusrajoituksia koneelle. Näin käy etenkin lennettäessä koneella, johon on kiinnitetty lisäpolttoainesäiliöt. Esimerkiksi Hornetin siipiin kiinnitetyt lisäpolttoainesäiliöt rajoittavat koneen maksiminopeuden arvoon 1,6 Ma, kun koneen maksiminopeudeksi on ilmoitettu 1,8 Ma. Todettiin myös, että kasvanut siipikuormitus, pienentynyt nostovoimakerroin sekä kasvanut vastus kasvattavat lentoonlähden maakiitomatkaa sekä heikentävät kohoamisnopeutta ja kiihtyvyyttä. Jos muita ominaisuuksia ei oteta huomioon, jo pelkkä 10 %:n massanlisäys pidentää maakiitomatkaa 20 %. Suurempi vastus ja lisääntynyt paino kasvattavat luonnollisesti polttoaineen kulutusta ja lyhentävät kantamaa ja toiminta-aikaa. Kokonaisuutena koneen suorituskyky heikkenee ja kaartotaistelussa vaadittavat ominaisuudet kärsivät ulkoisen kuorman johdosta.

Tutkielmassa ei tuotettu uutta tietoa, vaan kirjallisuusanalyysin avulla koottiin yhteen eri lähteistä hankittua tietoa. Tutkielman painopiste oli ulkoisen kuorman aiheuttamisessa aerodynaamisissa ominaisuuksissa ja niiden vaikutuksissa hävittäjän suorituskykyyn. Vaikutukset vastukseen ja kaartokykyyn saatiin helposti perusteltua kaavojen avulla, mutta nostovoimaan aiheutuvien muutosten tarkempi selvittäminen ei ollut tämän tutkielman rajoissa mahdollista. Jatkotutkimuksena aiheesta voisi olla syvällisempi perehtyminen ulkoisen kuorman vaikutuksista nostovoimaan. Pelkkä kirjallisuuskatsaus ei tällöin olisi riittävä tutkimusmenetelmä, vaan halutut kuormayhdistelmät ja -vaihtoehdot pitäisi mallintaa kutakin tilannetta varten erikseen. Mielenkiintoista olisi myös perehtyä siihen, onko kuorman aiheuttamalla siiven taipumisella vaikutusta nostovoimaan.

## LÄHTEET

- [1] Anderson, J. D. Jr. *Fundamentals of aerodynamics*, 4<sup>th</sup> edition, McGraw-Hill, 2007. 1008 s. ISBN 007-125408-0.
- [2] Barnard, R. H., Philpott, D. R. *Aircraft Flight*, 3<sup>th</sup> edition, Pearson Education Limited, 2004. 370 s. ISBN 0131200437.
- [3] Bristol Groundschool JAA ATPL course, 2012.
- [4] Chambers, J. *Contributions of the Langley Research Center to U.S. Military Aircraft of the 1990's*, The NASA History Series, Washington, DC, 2000. Saatavissa: [http://www.nasa.gov/centers/langley/pdf/70897main\\_PiF.pdf](http://www.nasa.gov/centers/langley/pdf/70897main_PiF.pdf). Viitattu 14.5.2013
- [5] Dole, C. E., Lewis, J. E. *Flight Theory and Aerodynamics* 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons 2000. 314 s. ISBN 0-471-37006-1.
- [6] Dryden Flight Research Center, *Effect of wing-mounted external stores on the lift and drag of the Douglas D-558-II Research Airplane at transonic speeds*. Saatavissa: <http://www.nasa.gov/centers/dryden/news/DTRS/1957/>. Viitattu 30.7.2013
- [7] Hebert, A. *Fighter Generations*, Air Force Magazine, September 2008, Vol. 91, No. 9, s. 32. Saatavissa: <http://www.airforcemag.com/MagzineArchive/Pages/2008>. Viitattu 14.6.2013.
- [8] Huenecke, K. *Modern Combat Aircraft Design*, Naval Institute Press 1987. 254 s. ISBN 0-87021-426-8.
- [9] Ilmavoimien Materiaalilaitos, Lentokalusto-osasto. *Hawk Mk.51/51A Aircrew Manual*, chapter 4, Limitations.

- [10] Ilmavoimien teknillinen koulu, *Lentokone-oppi*. Oppimateriaali, Kadettikurssi 98. 2013. 320 s.
- [11] Jane's All the World's Aircraft, Development & Production.
- [12] Jane's Air-Launched Weapons.
- [13] Keijsper, G. *Lockheed F-35 Joint Strike Fighter, Design and Development of the International Aircraft*. Pen & Sword Aviation, 2007. 320 s. ISBN 978-1-84415-631-3.
- [14] Kermode, A. C. *Mechanics of Flight*, 10<sup>th</sup> edition. Pearson Education Limited. 1996. 514 s. ISBN 0-582-23740-8.
- [15] Koelentokeskuksen materiaali, materiaali insinöörikapteeni Mika Niemisen hallussa.
- [16] Laine, S., Hoffren, J., Renko, K. *Lentokoneen aerodynamiikka ja lentomekaniikka*. 1. Painos. Helsinki. WSOY, 2006. 434 s. ISBN 951-0-31376-9.
- [17] Laine, S. *Lentokoneen Aerodynamiikka, Siipi-runko -yhdistelmän Aerodynamiikka*. Teknillinen korkeakoulu, Opetusmoniste, 1998.
- [18] Lappalainen, E., Jormakka, J. *Tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoulussa*. Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, 2004. 203 s. ISBN 951-25-1540-7.
- [19] Loppi, N. *Ulkoisten kuormien vaikutukset lentokoneiden ominaisuuksiin*, Kandidaatintutkielma, Aalto-yliopisto 2012.
- [20] Matemaattisten Aineiden Opettajien Liitto, *MAOL taulukot*, Otava, 2007.

- [21] National Aeronautics and Space Administration, *Conference on Aircraft Aerodynamics*, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield, VA. 1966. Saatavissa: [http://archive.org/stream/nasa\\_tech-doc\\_19750065506/19750065506\\_djvu.txt](http://archive.org/stream/nasa_tech-doc_19750065506/19750065506_djvu.txt). Viitattu 14.5.2013
- [22] NATOPS FLIGHT MANUAL NAVY MODEL F/A-18A/B/C/D 161353 AND UP AIRCRAFT. Saatavissa: <http://info.publicintelligence.net/F18-ABCD-000.pdf>. Viitattu 2.5.2013
- [23] Smith, W. *Wind-tunnel investigation at subsonic speeds of a model of a tailless fighter airplane employing a low-aspect-ratio swept-back wing – Effects of external fuel tanks and rocket packets on the drag characteristics*, Ames Aeronautical Laboratory, Calif. 1953. Saatavissa: <http://naca.central.cranfield.ac.uk/reports/1953/naca-rm-a52j31.pdf>. Viitattu 30.7.2013.
- [24] *Sotatekninen arvio ja ennuste 2025*, osa 1, Teknologian kehitys, Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos, Julkaisusarja 14, 2008. 564 s. ISBN 978-951-25-1888-3.
- [25] Stinton, D. *The design of the aeroplane*, 2<sup>nd</sup> edition, Blackwell Science Ltd, 2001. 684 s. ISBN 0-632-05401-8.
- [26] Sweetman, B. *Advanced fighter technology*, Airlife Publishing Ltd, 1988. 176 s. ISBN 1-85310-0269.



## **LIITTEET**

Liiteluettelo

Liite 1 Tutkielmassa käytettyjä käsitteitä

Liite 2 Kaavoissa käytetyt lyhenteet ja symbolit

## Tutkielmassa käytettyjä käsitteitä

Alisooninen nopeus	Nopeus, jolla Machin luku on alle 1
Liikehtimisraja ja -vara	Sakkausnopeuden, maksimikuormitusmonikerran, maksimi-ilmanopeuden sekä moottorista saatavan työntövoiman aiheuttamia rajoituksia koneen käyttöarvoihin
Liitosuhde	Nostovoima/vastus suhde (lift/drag-ratio). Liitosuhteen maksimiarvo tarkoittaa sellaista kohtauskulmaa, jolla lentokone saavuttaa suurimman mahdollisen nostovoiman pienimmällä mahdollisella vastuksella
Polaari	Siiven koko vastuskertoimen ja nostovoimakertoimen välinen riippuvuus. Polaari vaikuttaa oleellisesti koneen suoritusarvoihin, ja polaarilta voidaankin määrittää esimerkiksi parhaan liitosuhteen nopeus
Rajakäyrä	Esittää lentokorkeuden ja nopeuden tai Machin luvun avulla rajat, joiden sisäpuolella koneella on mahdollista lentää vaakalentoa vakionopeudella. Rajat riippuvat koneen massasta, lentoasusta ja moottorin tehoasetuksesta
Sivusuhte	Kuvaa siiven hoikkuutta, eli suhteellista pituutta. Mitä suurempi sivusuhte, sitä pitempi siipi on suhteessa profiilin jänteeseen. Sivusuhte lasketaan jakamalla kärkivälin neliö siipipinta-alalla
Vortex-pyörre	Siiven tuottaessa nostovoimaa sen ylä- ja alapinnan välinen painero purkautuu turbulenttisenä, pyörteisenä ilmaa jota kutsutaan vortex-pyörteeksi
Wingletit	Siiven kärkiin kehitettyjä ratkaisuja, joilla voidaan vähentää vortex-pyörteen syntymistä ja vähentää koneen vastusta

## Kaavoissa käytetyt lyhenteet ja symbolit [16]

A	Kappaleen poikkipinta-ala
C	Kohoamisnopeus
$C_D$	Vastuskerroin
$C_L$	Nostovoimakerroin
D	Vastus
$D_G$	Keskimääräinen vastus maakiidon aikana
$D_P$	Vahingollinen (parasiittinen) vastus
F	Voima, joka saa kaarrossa aikaan lentokoneen suunnan muutoksen
g	Maan vetovoiman kiihtyvyys
k	Nostovoimasta riippuva vastuskerroin
L	Nostovoima
Ma	Machin luku
m	Massa
n	Kuormitusmonikerta
q	Dynaaminen paine ( $q = \frac{1}{2}\rho V^2$ )
R	Kaartosäde
S	Siipipinta-ala
$S_{LO}$	Maakiidon pituus lentoonlähdessä
T	Työntövoima
t	Aika
V	Lentonopeus (ilmanopeus)
$V_A$	Liikehtimisnopeus
$V_{LO}$	Irtoamisnopeus
$V_R$	Rotaationopeus
$V_S$	Sakkausnopeus
W	Lentokoneen paino ( $W=mg$ )
$\alpha$	Kohtauskulma
$\gamma$	Ratakulma
$\rho$	Ilman tiheys
$\varphi$	Kallistuskulma (kaarrossa)
$\omega$	Kaartokulmanopeus