

**MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU**

**TAISTELUNKESTÄVYYTTÄ            PARANTAVIEN            OMINAISUUKSIEN  
KEHITTYMINEN 3.- 5. SUKUPOLVEN HÄVITTÄJISSÄ**

Pro gradu -tutkielma

Yliluutnantti  
Joonas Sunnari

SMOHJ11  
Ilmasotalinja

Huhtikuu 2017

# MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi SMOHJ11	Linja Ilmasotalinja
Tekijä Yliluutnantti Joonas Sunnari	
Tutkielman nimi <b>Taistelunkestävyyttä parantavien ominaisuuksien kehitys 3.-5. sukupolven hävittäjissä</b>	
Oppiaine, johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka Maanpuolustuskorkeakoulun kirjasto
Aika Huhtikuu 2017	<b>Tekstisivuja 74</b> <b>Liitesivuja 7</b>
<b>TIIVISTELMÄ</b> <p>Tutkielmassa paneudutaan taistelunkestävyyden käsitteeseen, sekä tarkastellaan hävittäjän taistelunkestävyyttä parantavien ominaisuuksien kehittymistä kolmen viimeisen hävittäjä sukupolven aikana. Tutkielma keskittyy Yhdysvaltalaisvalmisteisiin monitoimihävittäjiin ja niiden taistelunkestävyyttä parantaviin ominaisuuksiin.</p> <p>Tutkielma on suurilta osin laadullinen tutkimus. Tutkimusmenetelminä ovat kirjallisuusselvitys, sekä vertailu. Vertailussa käytetään hyväksi sekä laadullista, että määrällistä tutkimusta. Tutkielman pääkysymys on: Miten taistelunkestävyyttä parantavat keskeiset ominaisuudet ovat kehittyneet 3.-5. sukupolven hävittäjissä? Pääkysymyksen tueksi on asetettu seuraavat apukysymykset: Mistä seikoista taistelunkestävyys koostuu? Mitkä hävittäjän ominaisuudet parantavat taistelunkestävyyttä?</p> <p>Taistelunkestävyyden merkitys on jatkuvasti kasvanut hävittäjän suunnittelussa, sillä taistelunkestävyys vaikuttaa suoraan hävittäjän kokonaistehokkuuteen. Taistelunkestävyys koostuu uhka-alttiudesta, sekä haavoittuvuudesta. Uhka-alttius määrittää hävittäjän kykyä väistää taistelukentän asettamia uhkia. Haavoittuvuus määrittää kykyä sietää vaurioita, joita vihollisen asejärjestelmä on hävittäjälle aiheuttanut. Taistelunkestävyyttä parantavat ominaisuudet ovat kehittyneet merkittävästi kolmen viimeisen hävittäjä sukupolven aikana. Merkittävimpinä hävittäjän taistelunkestävyyden suunnitteluun vaikuttavina tekijöinä ovat kustannustehokkuus, sekä hävittäjälle suunniteltu uhkaympäristö. Hävittäjän taistelunkestävyyden suunnittelu tulisi ottaa huomioon mahdollisimman aikaisin hävittäjän suunnitteluprosessissa, jolloin minimoidaan taistelunkestävyyttä parantavien ominaisuuksien negatiiviset vaikutukset hävittäjän suorituskykyyn.</p> <p>Uhka-alttiutta vähentävien järjestelmien osalta merkittävimpänä kehityksenä ovat häiveteknologia, laajalla sähkömagneettisen spektrin alueella toimivat omasuojajärjestelmät, sekä hävittäjän ohjaajan tilannetietoisuutta parantava sensorifuusio. Haavoittuvuutta vähentävien ominaisuuksien kehitys on ollut merkittävää neljänteen hävittäjä sukupolven saakka. Kehitystä on tapahtunut etenkin ohjausjärjestelmän, sekä polttoainejärjestelmän osalta. Viidennen sukupolven hävittäjän haavoittuvuus on lisääntynyt haavoittuvuutta vähentävien järjestelmien valossa. Tämä voi olla seurausta uhka-alttiutta vähentävien järjestelmien kehityksestä, jolloin haavoittuvuus on voitu jättää pienemmälle huomiolle.</p>	
<b>AVAINSANAT</b> <p>Taistelunkestävyys, haavoittuvuus, uhka-alttius, taistelunkestävyyden kehitys</p>	

# SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO .....	1
1.1	Johdatus tutkimusaiheeseen.....	1
1.2	Tutkimuskysymys ja tavoitteet .....	2
1.3	Tutkimuksen rajaukset.....	3
1.4	Tutkimuksen rakenne ja tutkimusmenetelmät .....	3
1.5	Aiempi tutkimus.....	4
2	TAISTELUNKESTÄVYYS.....	6
2.1	Historia.....	6
2.2	Taistelunkestävyyden määrittely .....	9
2.3	Uhka-alttius $P_H$ .....	13
2.4	Haavoittuvuus, $P_{K H}$ .....	15
2.5	Taistelunkestävyyden kehittäminen.....	21
3	TAISTELUNKESTÄVYYTTÄ PARANTAVAT OMINAISUUDET .....	31
3.1	Uhka-alttiutta vähentävät ominaisuudet .....	31
3.1.1	Elektroniset omasuojajärjestelmät .....	31
3.1.2	Häiveominaisuudet.....	39
3.1.3	Suorituskyky .....	43
3.2	Haavoittuvuutta vähentävät ominaisuudet.....	45
3.2.1	Komponenttien redundanttisuus ja -sijoittelu .....	45
3.2.2	Aktiivinen- ja passiivinen vauriontorjunta.....	47
3.2.3	Panssarointi ja komponenttien korvaaminen .....	50
4	VERTAILU .....	51
4.1	Vertailussa käytettävät konetyypit.....	51
4.1.1	Boeing (Mcdonnell Douglas) F-4B Phantom II.....	52
4.1.2	Boeing (McDonnell Douglas) F/A-18C/D Hornet.....	53
4.1.3	Lockheed Martin F-35 Lightning II .....	54
4.2	Vertailun lähtökohta.....	55
4.3	Uhka-alttiuden vertailu .....	56

4.4	Haavoittuvuuden vertailu.....	64
5	YHTEENVETO.....	70
5.1	Tutkimuskysymyksiin vastaaminen sekä johtopäätökset .....	70
5.2	Tutkimuksen luotettavuus.....	73
5.3	Jatkotutkimusehdotukset .....	73
	LÄHTEET.....	75
	LIITTEET .....	81

# TAISTELUNKESTÄVYYTTÄ PARANTAVIEN OMINAISUUKSIEN KEHITTYMINEN 3.- 5. SUKUPOLVEN HÄVITTÄJISSÄ

## 1 JOHDANTO

### 1.1 Johdatus tutkimusaiheeseen

Hävittäjän taistelunkestävyys on suhteellisen uusi tieteenala hävittäjän suunnittelussa. Tieteenala sai alkunsa Vietnamin sodan aikana, jolloin suurista konetappioista johtuen alettiin miettiä ilma-alusten taistelunkestävyyden kehittämistä. Hävittäjän taistelunkestävyys tarkoittaa hävittäjän kykyä välttää tai sietää taistelukentän uhkia. Taistelunkestävyys jaetaan kahteen alakäsitteeseen: Uhka-alttiuteen (susceptibility) ja haavoittuvuuteen (vulnerability). Uhka-alttius ja sen vähentäminen käsittää kaikkia niitä hävittäjän ominaisuuksia, joilla hävittäjä pyrkii välttämään taistelukentän uhkia. Haavoittuvuus ja sen vähentäminen käsittää kaikkia niitä ominaisuuksia, jotka pyrkivät minimoimaan mahdollisten osumien vaikutusta hävittäjään.

Nykyaikaisella taistelukentällä järjestelmän tehokkuus on saanut uuden merkityksen. Aikaisemmin sotilaslentokoneen suunnittelu painottui lentokoneen optimaaliseen suorituskykyyn. Hävittäjän suoriutuminen mitattiin sen kyvykkyytenä suoriutua vähintään suunniteltujen vaatimusten mukaisesti, kuin myös kyvykkyytenä sopeutua nopeasti muuttuvaan taisteluympäristöön. Viimeaikaiset määritteet ovat kuitenkin siirtyneet painottamaan järjestelmän kokonaistehokkuutta järjestelmän suorituskyvyn sijaan. Nykyään järjestelmän kokonaistehokkuus ei keskity pelkästään järjestelmän suorituskykyyn, vaan järjestelmän kykyyn suorittaa sille määrätty tehtävä muuttuvassa uhkaympäristössä edullisilla elinkaarikustannuksilla. Hävittäjän kokonaistehokkuus muodostuu suureista, jotka antavat raakaa dataa koneen kyvystä suoriutua tehtävästä. Tehokkuuden mittareina voi olla esimerkiksi lennetyt lennot tehtävän aikana, tuhottujen maakohteiden lukumäärä, pudotettujen viholliskoneiden määrä, omien tappioiden määrä, koneiden käytettävyyden prosentti jne.

Tähän saakka lentokoneen suunnittelun perusteet keskittyivät aerodynamiikan, propulsioon, rakenteiden jne. välisiin kompromisseihin. Nykyään teknologian kehitys ja elinkaarikustannusten huomioiminen ovat tuoneet mukanaan lentokoneen suunnittelun epäkonventionaalisia perusteita. Näitä perusteita ovat esimerkiksi huollettavuus, luotettavuus

ja turvallisuus. Kuitenkin tällä hetkellä yksi merkittävimmistä suunnittelun perusteista on lentokoneen taistelunkestävyys. Taistelunkestävyydellä on havaittu olevan suuri merkitys hävittäjän kokonaistehokkuuteen. Danielle S. Sobanin ja Dimitri N. Mavrisin mukaan ”*Lentokoneen taistelunkestävyys on avainsuure, joka vaikuttaa suoraan hävittäjän kokonaistehokkuuteen ja pienempiin elinkaarikustannuksiin*” [47]. Siksi uutta hävittäjää hankittaessa tulisi arvioida hävittäjän taistelunkestävyyttä sille kaavailussa uhkaympäristössä. Hävittäjä, jossa ei ole panostettu taistelunkestävyyttä parantaviin ominaisuuksiin on todennäköisesti hinnaltaan halvempi ja samalla kyseinen hävittäjä voi omata paremman suorituskyvyn. Nopeasti katsottuna voikin vaikuttaa siltä, että edullisempi ja paremman suorituskyvyn omaava hävittäjä voi olla parempi ostos. Kuitenkin taistelutilanteessa taistelunkestävä hävittäjä voi olla tehokkaampi ja kokonaisuudessaan edullisempi. Esimerkiksi operaatio, jossa 100 hävittäjää suorittaa 60 pommitustehtävää. Hävittäjien taistelunkestävyyttä on parannettu, jonka johdosta selviytymistodennäköisyys paranee 98%:sta 99%:n. Operaation jälkeen taistelunkestävyyden parantamisella on säästetty 20 hävittäjää. Samalla pommitettujen kohteiden lukumäärä nousee 22%. Tuloksena lineaarisella parannuksella taistelunkestävyyteen saavutetaan exponentiaalisia tuloksia teokkuuden saralla.

Hävittäjän taistelunkestävyyttä parannetaan ominaisuuksilla, jotka pienentävät hävittäjän uhka-alttiutta ja haavoittuvuutta. Ominaisuuksia ovat esimerkiksi: häiveominaisuudet, liikehtimiskyky, panssarointi jne. Taistelunkestävyyttä parantavien ominaisuuksien kehitys ja tutkimus alkoi kolmannesta hävittäjä sukupolvesta vietnamin sodan aikana. Neljäs hävittäjä sukupolvi oli ensimmäinen, jossa taistelunkestävyys oli osa koneen suunnittelua. Viidennessä hävittäjä sukupolvessa taistelunkestävyys on noussut keskeiseksi suunnittelun perusteeksi. Taistelunkestävyyden kehitys on ollut merkittävää viime vuosikymmeninä. Toisessa maailmansodassa selviytymistodennäköisyys oli huonoimmillaan 50%. Kosovossa f-117:n selviytymistodennäköisyys oli parantunut jo 99,99%:n. Tämän jälkeen taistelunkestävyyden kehittäminen on ottanut vielä askelia eteenpäin [3, s 83].

## 1.2 Tutkimuskysymys ja tavoitteet

Tämän tutkielman tarkoituksena on avartaa lukijalle taistelunkestävyyden käsitettä. sekä hävittäjän taistelunkestävyyttä parantavien ominaisuuksien kehitystä kolmen viimeisen hävittäjä sukupolvien osalta. Lisäksi tutkielman tarkoituksena on lisätä tietämystä taistelunkestävyydestä lukijalle, joka ensimmäistä kertaa perehtyy taistelunkestävyyden käsitteeseen.

Tutkielman pääkysymys:

- Miten hävittäjän taistelunkestävyyttä parantavat keskeiset ominaisuudet ovat kehittyneet 3.- 5. sukupolven hävittäjissä?

Pääkysymystä tukevat apukysymykset:

- Mistä seikoista taistelunkestävyys koostuu?
- Mitkä hävittäjän ominaisuudet parantavat taistelunkestävyyttä?

### 1.3 Tutkimuksen rajaukset

Tässä tutkimuksessa keskitytään arvioimaan hävittäjien taistelunkestävyyttä parantavien keskeisten ominaisuuksien kehitystä kolmen viimeisen hävittäjä sukupolven aikana. Tutkielma rajataan vertailun osalta koskemaan ainoastaan Yhdysvaltalaisvalmisteisia monitoimihävittäjiä.

Tutkielmassa taistelunkestävyyttä parantavilla ominaisuuksilla tarkoitetaan joko hävittäjän järjestelmiä tai kyvykkyyksiä, jotka keskeisesti vaikuttavat taistelunkestävyyteen. Tutkielmassa esitellään keskeiset hävittäjän taistelunkestävyyteen vaikuttavat ominaisuudet, joiden pohjalta vertailu suoritetaan.

Lisäksi tutkielmassa avataan taistelunkestävyyden käsitettä ja siihen liittyviä keskeisiä seikkoja. Aihealuetta on tutkittu paljon ulkomailla, mutta aiheen arkaluontoisuuden vuoksi suurin osa tutkimuksista on salaisia. Tämä tutkielma on julkinen ja se koostuu julkisista lähteistä. Tästä syystä tutkielma pysyy hyvin yleisellä tasolla ja tarkkoja suoritusarvoihin liittyvää dataa ei käytetä.

### 1.4 Tutkimuksen rakenne ja tutkimusmenetelmät

Tutkimustyö toteutetaan kvalitatiivisena tutkimuksena. Tutkimusmenetelminä työssä käytetään kirjallisuustutkimusta, sekä vertailua. Kirjallisuustutkimuksen menetelmänä käytetään kirjallisuusselvitystä [25]. Tutkimusmenetelmien käyttö jakautuu tutkimustyössä karkeasti päälukujen mukaan. Tutkimuksen pääkysymyksenä on: Miten hävittäjän taistelunkestävyyttä parantavat ominaisuudet ovat kehittyneet 3.-5. sukupolven hävittäjissä. Jotta pääkysymykseen voidaan vastata, on ensin kyettävä vastaamaan tutkimuksen pääkysymystä tukeviin alakysymyksiin.

Tutkimuksen kolmessa ensimmäisessä pääluvussa on käytetty apuna kirjallisuusselvitystä, jonka avulla pääkysymystä tukeviin apukysymyksiin vastataan. Kirjallisuusselvitystä varten työn tekijä on perehtynyt kattavasti taistelunkestävyyteen liittyvään kirjallisuuteen, sekä julkisista lähteistä saataviin tutkimuksiin. Tutkimuksen toisen pääluvun tarkoituksena on avata taistelunkestävyyden käsitettä ja vastata ensimmäiseen apukysymykseen: Mistä seikoista taistelunkestävyys koostuu? Tutkimuksen kolmannen pääluvun tarkoituksena on kartoittaa hävittäjän taistelunkestävyyttä parantavat ominaisuudet ja vastata toiseen apukysymykseen: Mitkä hävittäjän ominaisuudet parantavat taistelunkestävyyttä?

Tutkimuksen pääkysymykseen vastataan neljännen pääluvun vertailulla. Vertailu perustuu aikaisempien päälukujen kirjallisuustutkimukseen. Vertailun analysoinnissa ja päätelmissä käytetään apuna kirjoittajan henkilökohtaista ammattitaitoa. Vertailun päämääränä on kartoittaa hävittäjän taistelunkestävyyttä parantavien ominaisuuksien kehitys kolmen viimeisen hävittäjäskupolven aikana. Vertailututkimukset ovat yleisesti ottaen kvantitatiivisia, mutta tämän tutkimuksen vertailussa on käytetty pääosin kvalitatiivisia menetelmiä [25].

## 1.5 Aiempi tutkimus

Ilma-aluksiin liittyvää taistelunkestävyyden tutkimusta on tehty laajasti ympäri maailmaa 1980-luvulta lähtien. Julkisista lähteistä saatavat tutkimukset käsittelevät taistelunkestävyyttä yleisellä tasolla. Tarkempaa hävittäjän suorituskykyyn liittyvää dataa sisältävät tutkimukset ovat salaisia ja siksi niitä ei ole saatavilla julkisista lähteistä. Tästä syystä tässä kappaleessa käsiteltävä aiempi tutkimus käsittää vain julkisista lähteistä saatavilla olevat tutkimukset.

Suurin osa saatavilla olevista tutkimuksista on tehty Yhdysvalloissa. Tutkimusta on myös tehty Kiinassa sekä Euroopassa. Lähes kaikki tutkimukset viittaavat yhteen taistelunkestävyyden pääteokseen: ”The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design, second edition – Robert E. Ball”. Robert E. Ball on Yhdysvaltalainen emeritusprofessori, joka on tehnyt uraa uurtavaa tutkimusta taistelunkestävyyden saralla 30 vuoden ajan. Ball:n kirja toimii myös tämän tutkimuksen päälähteenä. Yhdysvaltalainen Danielle S. Soban Georgian teknillisestä yliopistosta on tehnyt useita tutkimuksia taistelunkestävyydestä ja taistelunkestävyyden vaikutuksesta hävittäjän kokonaistehokkuuteen. Yhdysvaltalainen Matthew G. Richards Massachusetts:n teknillisestä yliopistosta on tehnyt tutkimuksia taistelunkestävyyden osuudesta hävittäjän suunnitteluprosessissa. Yhdysvalloissa JASPO (Joint Aircraft Survivability Program Office)



julkaisee neljä kertaa vuodessa Aircraft survivability journal -lehteä, jossa on artikkeleita ja tutkimuksia liittyen sotilas ilma-alusten taistelunkestävyyteen.

Suomessa aalto yliopistossa Johnny Heikell on tehnyt väitöskirjan helikoptereiden omasuojajärjestelmistä. Kyseinen tutkimus liittyy läheisesti myös taistelunkestävyyteen. Suomessa ei ole tehty julkisia tutkimuksia suoraan taistelunkestävyydestä.

## 2 TAISTELUNKESTÄVYYS

### 2.1 Historia

Toisen maailmansodan alussa lentokoneiden suunnittelun perusteissa ominaisuudet, kuten nopeus ja korkeus olivat tärkeämpiä, kuin koneen taistelunkestävyys. Myöhemmin sodassa raskaista tappioista opittuna koneisiin tuotiin taistelunkestävyyttä parantavia ominaisuuksia. Koneisiin lisättiin konekiväärit omasuojaksi, polttoainejärjestelmät suojattiin tulipaloilta ja räjähdyksiltä, parempia taktiikoita kehitettiin, omasuojahäirintää kehitettiin ja naamiomaalauksia maalattiin koneisiin. Kuitenkin koneiden suunnittelun perusteet säilyivät samana. Taistelunkestävyyttä parantavien ominaisuuksien lisääminen perusteltiin sillä, että koneet olivat kestävämpiä ja tehokkaampia, kuin koneet joissa näitä ominaisuuksia ei ollut. Virallinen taistelunkestävyyden tutkimus ja tieteenala kehittyi yhdysvalloissa vietnamin sodan suurista tappioista oppineena. Ensin 1960- luvun puolivälissä lentokoneen suunnittelussa paneuduttiin parantamaan koneiden kestävyyttä taistelussa. 1970- luvun puolivälissä tuli mukaan koneen havaittavuuden pienentäminen stealth-hävittäjän suunnittelun yhteydessä. ”Design of Fighter Aircraft for Combat Survivability, 1969.” oli ensimmäinen julkaisu, joka paneutui hävittäjän taistelunkestävyyden kehittämiseen. A-10A thunderbolt II ja F/A-18A/B-Hornet ovat ensimmäisiä hävittäjiä, joissa yksi suunnittelun lähtökohdista oli hävittäjän taistelunkestävyys. Nykyään on olemassa monia instituutioita eri maissa, joiden tarkoituksena on tutkia ja kehittää sotilaskoneiden taistelunkestävyyttä. [3, s. 132-133]

Lentokonetta käytettiin ensimmäisen kerran sotilaallisiin tarkoituksiin Marokon kriisissä vuonna 1911. Koneita käytettiin lähinnä tiedustelutehtäviin, mutta sodan aikana lentokoneista tehtiin ensimmäisen kerran koepommituksia. Italian riveissä taistellut venäläispilotti Sakoff oli ensimmäinen lentokoneen ohjaaja, jonka kone oli saanut osumia vihollisen kivääristä. Samassa sodassa ensimmäinen pilotti sai myös surmansa taisteluissa. [3, s82; 37, s.5]

Ensimmäisen maailmansodan aikana maa- ja merijoukkoja vastaan tehdyt pommitukset ja tiedustelulennot johtivat ilmassa tapahtuvaan sotaan. Ilmataistelut pakottivat lentokoneiden suunnittelijoita suunnittelemaan yhä taistelunkestävämpiä lentokoneita. Ensimmäisen maailmansodan alussa taistelunkestävyyttä parannettiin lentokoneen suorituskyvyllä, kuten nopeus, korkeus ja luotettavuus. Koneiden kasvanut nopeus ja korkeus johtivat yhä kestävämpien rakenteiden suunnitteluun, joka myötävaikutti myös koneen haavoittuvuuden pienenemiseen vihollisen tulen alla. Vihollisen ilmatorjunnan kehittyminen johti koneiden panssaroinnin kehittämiseen. Aluksi suojana käytettiin metallikypäriä ja metallisia panssarilevyjä pilotin tuolin alla. 1917 Saksalaiset kehittivät kaksimoottorisen pommikoneen,

jossa oli n. 400kg verran 5mm teräslevyjä panssarointina koneen kriittisissä paikoissa. Samaan aikaan Englantilaiset asensivat muutamiin koneisiin teräksiset penkit ja 15mm paksuiset nikkeli-kromi teräspanssarit koneen moottorin jäähdyttimien, polttoainetankkien ja ohjaamon ympärille. 1930- luvulla Yhdysvaltalaiset olivat asentaneet panssarointeja osaan koneistaan, mutta he keskittyivät tekemään vahvarakenteisia koneita, joiden suunnittelu perustui suureen nopeuteen ja toimintasäteen lisäämiseen. [19; 1, s. 89]

Toisessa maailmansodassa 10.5.1940 Saksalaiset hyökkäsivät Hollantiin, Belgiaan ja Ranskaan. Englannin ja Ranskan ilmakomponentit suorittivat ilmahyökkäyksiä saksan joukkoja vastaan. Näissä hyökkäyksissä Englanti ja Ranska menettivät ensimmäisen kuukauden aikana yli 200 pommi- ja hävittäjäkonetta. Saksan hyökätessä Venäjälle kesäkuussa 1941 venäläiset menettivät ensimmäisen päivän aikana 1489 lentokonetta. Samaan aikaan saksalaiset menettivät 35 lentokonetta. Suuret liittoutuneiden tappiot johtuivat sodan alussa lentokoneiden teknologisista eroista ja eroista taktiikassa. Jo toisen maailmansodan aikana lentokoneiden taistelunkestävyys kehittyi suurin harppauksin oppina suurista menetyksistä. Lentokoneen suunnittelun näkökulmasta suuret menetykset olisi voitu välttää keskittymällä lentokoneiden taistelunkestävyyteen suunnitteluun lentokoneen suunnittelun alkuvaiheessa. Voidaan sanoa, että taistelunkestävyyden parantaminen oli enemmän reagoivaa, kuin ennakoivaa. [19, s. 5-8; 1, s. 89-93]

Vietnamin sota (1964-1973) toi mukanaan täysin uuden lentokonesukupolven, jonka suorituskyky oli noussut eksponentiaalisesti. Lentokoneiden aerodynamiikka ja rakenteiden suunnittelu oli mennyt suuria harppauksia eteenpäin. Myös koneita uhkaavat asejärjestelmät olivat kehittyneet. Ilmatorjunta käytti ensimmäistä kertaa maasta ilmaan -ohjuksia. Ilmasta ilmaan -taistelussa mukaan tulivat lämpöhakeutuvat ohjukset ja tutka-avusteiset tykkitähtäimet, jotka paransivat asejärjestelmien osumistodennäköisyyttä. Suurin osa taktiikoista, jotka pyrkivät vähentämään uhka-alttiutta perustui toisen maailmansodan taktiikoihin. Erona toiseen maailmansotaan oli, että pommikoneosastot olivat pienempiä ja niillä ei ollut lainkaan omasuojaa. Pommikoneiden omasuoja perustui täysin niitä saattaviin F-4 ja F-8 hävittäjiin. Taistelunkestävyyden saralla lentokoneiden suunnitteluprosessi säilyi reagoivana. Kaksipaikkainen F-4 phantom II -hävittäjä oli suunniteltu alun perin torjuntahävittäjäksi. Sen tehtäväksi oli suunniteltu vihollisen pommikoneiden tuhoaminen tutka-hakeutuvien ohjuksin. Vietnamin sodassa F-4:a käytettiin hävittäjä-, pommikone-, ja ilmatorjunnan lamauttamiseen tarkoitetuissa rooleissa. F-4:n suunnittelussa ei ollut lainkaan huomioitu taistelunkestävyyttä, jonka vuoksi kyseisiä koneyksilöitä menetettiin sodan alkuvaiheessa suuria määriä. Suurten tappioiden tuloksena Yhdysvaltojen ilmavoimat perusti

työryhmän tekemään haavoittuvuuden arviointeja sodassa käytetyistä konetyypeistä. Arvioiden tarkoituksena oli löytää pääsyitä suuriin konetappioihin. F-4:n suurimpia haavoittuvuuteen liittyviä tekijöitä olivat polttoainejärjestelmien tulipalojen ja räjähdysten estäminen, sekä ohjausjärjestelmän menetyksen estäminen. F-4:n hydraulikkajärjestelmä oli välttämätön koneen ohjaamiseen kannalta. Järjestelmä sisälsi monia kohtia, jossa yhden komponentin hajoaminen tai vikaantuminen aiheutti ohjaamattoman lentotilan ja koneen menetyksen. Yhdysvaltojen ilmavoimat kulutti miljoonia dollareita koneiden taistelunkestävyyden parantamiseen jälkikäteen tehdyillä muutoksilla. Muutoksien avulla tappioita saatiin pienennettyä merkittävästi. Jos vietnamin sodassa käytetyt lentokoneet olisi suunniteltu etukäteen taistelunkestäviksi, olisi säästetty enemmän ihmishenkiä ja rahaa, kuin jälkikäteen tehdyillä muutoksilla. [3, s. 98-99; 19]

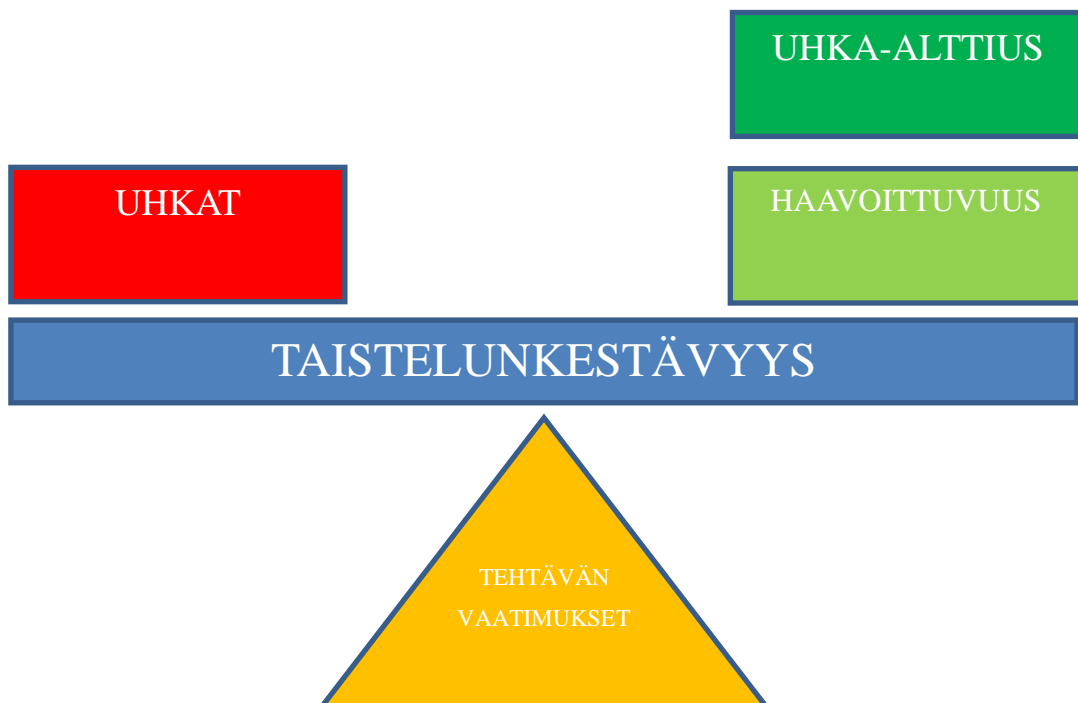
Vietnamin sodan menetyksistä oppineena, taisteluissa saadut vauriot analysoitiin ja analyyseistä saatuja oppeja käytettiin suoraan uuden hävittäjä sukupolven suunnittelussa 1980-luvun taitteessa. Vietnamin sodan taisteluissa lentokoneisiin saatujen vaurioiden analysoiminen ja niistä tehdyt johtopäätökset johtivat sotilaskoneiden taistelunkestävyyttä tutkivan tieteenalan kehittymiseen. Yhdysvaltojen puolustushallinto DoD (Department of Defence) perusti vuonna 1971 JTCG/AS- osaston (Joint Technical Coordinating Group for Aircraft Survivability), jonka päätarkoituksena oli lentokoneen uhka-alttiuden ja haavoittuvuuden vähentäminen. JTCG/AS:llä oli kolme päätarkoitusta:

1. Koordinoida ja jakaa tietoa käytössä olevien lentokonetyyppien taistelunkestävyyttä edistävien hankkeiden välillä, jotta kaikkien konetyyppien taistelunkestävyys paransi.
2. Jalkauttaa taistelunkestävyyttä parantavia hankkeita käytössä oleviin lentokoneisiin
3. Säilyttää tiivis yhteydenpito uusia konetyyppejä suunnittelevien organisaatioiden välillä, jotta varmistetaan viimeisimmän tietotaidon siirtyminen.

1980-luvun puolivälissä JTCG/AS perusti SURVIAC- alajaoston (Survivability/Vulnerability Information Analysis Center), jonka tarkoituksena oli kerätä ja analysoida historiallista dataa taisteluista ja uutta dataa haavoittuvuuksista ja uhkista. Samaan aikaan DoD aloitti koeammuntaohjelman (Joint Live Fire Program) käytössä oleville lentokonetyypeille. Tarkoituksena oli kerätä realistista dataa konetyyppien haavoittuvuuksista. Vuonna 2003 JTCG/AS muutti nimeään JASPO:ksi (Joint Aircraft Survivability Program), joka on tällä hetkellä DoD:n pääasiallinen taistelunkestävyyden tutkimuksen ja analysoinnin instituutio Yhdysvalloissa. [19, s. 9; 1, s. 129-131]

## 2.2 Taistelunkestävyyden määrittely

Taistelunkestävyys on hävittäjälle kriittinen ominaisuus, sillä hävittäjä on suunniteltu suorittamaan tehtäviä vihamielisessä ympäristössä eriasteisten uhkien ympäröimänä. Vihollisen ilmapuolustuksen tehokkuus vaikuttaa suoraan hävittäjän taistelunkestävyyteen asetettuihin vaatimuksiin. Vaatimuksiin vaikuttavat myös toimintaympäristö, jossa hävittäjä on suunniteltu käytettäväksi. Hävittäjän taistelunkestävyys ja hävittäjällä operoiminen tulee suunnitella uhkaympäristön mukaan, jotta vihollisen mahdollinen asevaikutus saataisiin laskettua hyväksyttävälle tasolle.



Kuva 1. Taistelunkestävyyden tasapaino [19].

Robert E. Ball:n mukaan hävittäjän taistelunkestävyys (ACS- Aircraft Combat Survivability) kuvaa lentokoneen kykyä välttää tai sietää siihen kohdistuvia uhkia hävittäjälle ominaisessa toimintaympäristössä. Ball jakaa taistelunkestävyyden uhka-altiuteen (susceptibility): hävittäjän kyvyttömyyteen välttää siihen kohdistuvia uhkia ja haavoittuvuuteen (vulnerability): hävittäjän kyvyttömyyteen sietää siihen kohdistuvia uhkia [3, s. 1]

Hävittäjän taistelunkestävyys koostuu uhka-altiudesta sekä haavoittuvuudesta. Sekä uhka-altiuteen, että haavoittuvuuteen ovat hävittäjälle negatiivisia ominaisuuksia. Jos hävittäjä on altis uhkille ja haavoittuva toimintaympäristössään, silloin voidaan sanoa, että hävittäjä on

tuhottavissa. Toisin sanoen: kun hävittäjän tuhottavuutta pienennetään, sen taistelunkestävyys paranee. Hävittäjän noustessa ilmaan ja lähtiessä suorittamaan taistelutehtävää, sen selviytyminen riippuu tuhansista eri muuttujista. Esimerkiksi todennäköisyys, millä hävittäjä havaitaan. Näiden muuttujien tulona saadaan tietty laskettavissa oleva todennäköisyys, jota voidaan kuvata termillä  $P_S$ , todennäköisyys, millä hävittäjä selviytyy. Hävittäjän selviytymistodennäköisyyttä voidaan mitata suureella, joka saadaan laskemalla:

$$P_S = 1 - P_K \quad (1) [3]$$

, missä

$P_S$  = hävittäjän selviytymistodennäköisyys

$P_K$  = todennäköisyys tuhoutumiselle

Kaavan mukaan: selviytymistodennäköisyys = 1 – tuhottavuus.

Selviytymistodennäköisyys vaihtelee välillä 0 – 1. Mitä lähempänä lukua yksi selviytymistodennäköisyys on, sitä suuremmalla todennäköisyydellä hävittäjä selviytyy. Selviytymistodennäköisyys  $P_S$  voidaan laskea koko tehtävälle tai ainoastaan yhdelle kohtaamiselle, esimerkiksi ilmatorjuntajärjestelmän kanssa. Mikäli hävittäjä ei selviydy tehtävästä, sanotaan sen olevan tuhottu [3, s. 3]. Tuhoutumisella  $P_K$  voi olla useampi eri kategorinen määritelmä. Tuhoutuminen ei aina yksiselitteisesti tarkoita hävittäjän totaalista tuhoutumista, vaan tuhoutumisella voi olla useampia eri-asteisia kategorioita. Esimerkiksi yhdessä tuhoutumisen kategoriassa hävittäjä tuhoutuu täysin vihollisen asejärjestelmän vaikutuksesta. Toisessa kategoriassa vihollisen asejärjestelmä on saanut aikaan asevaikutusta hävittäjään, jonka vuoksi se joutuu keskeyttämään tehtävän ja palaamaan kotitukikohtaansa. Molemmissa tapauksessa hävittäjä katsotaan olevan tuhottu, mutta niiden tuhoutumisen kategoriat ovat erit. Tuhoutumisen kategoriat on tarkemmin kuvattu luvussa 2.3.

Jotta hävittäjä tuhoutuu, täytyy vihollisen asejärjestelmän ensin osua kohteeseen ja sen jälkeen osuman pitää saada aikaan vaikutusta. Tästä syystä hävittäjän tuhottavuus riippuu sekä hävittäjän uhka-alttiudesta, että haavoittuvuudesta. Uhka-alttiuden ja haavoittuvuuden määrä riippuu hävittäjää uhkaavasta asejärjestelmästä. Viimekädessä hävittäjän tuhoutumistodennäköisyys määräytyy uhkaavan asejen taistelukärjestä, joka saa aikaan asevaikutusta. Taistelukärkiä on käytännössä kahta tyyppiä. Ensimmäisessä tyypissä taistelukärjen sytytin toimii kontaktin vaikutuksesta, eli taistelukärki pitää osua kohteeseen, jotta sen sytytin aktivoituu. Kontaktisytytteisiä taistelukärkiä ovat esimerkiksi

ilmatorjuntakonekiväärin panssaria läpäisevät luodit tai ohjusten taistelukärjet. Kontaktisyytteen taistelukärjen tulee osua kohteeseen, jotta sytytin aktivoituu. Toisen tyyppin taistelukärjet ovat lähisyytteisiä. Kun lähisyytteinen taistelukärki havaitsee maalin läheisyyden, taistelukärjen lähisyytteen aktivoituu ja taistelukärki räjähtää. Monissa ilmatorjuntajärjestelmissä on käytössä taistelukärkiä, joissa on sekä lähisyytteen, että kontaktisyytteen [3, s. 5]. Hävittäjän todennäköisyys tuhoutumiselle, kun otetaan huomioon taistelukärjen ominaisuudet:

$$P_K = P_H P_{K|H}, \text{ tai } P_K = P_F P_{K|F} \quad (2,3)[3]$$

,missä

$P_H$  = todennäköisyys, jonka mukaan taistelukärki osuu hävittäjään.

$P_{K|H}$  = todennäköisyys, jonka mukaan hävittäjä tuhoutuu kontaktisyytteen taistelukärjen toimesta.

$P_F$  = todennäköisyys, jonka mukaan lähisyytteen aktivoituu onnistuneesti.

$P_{K|F}$  = todennäköisyys, jonka mukaan hävittäjä tuhoutuu lähisyytteen taistelukärjen toimesta.

Kaavan 2 mukaan tuhoutumistodennäköisyys  $P_K$  on riippuvainen kontaktisyytteen taistelukärjen osumistodennäköisyydestä, sekä todennäköisyydestä, jolla kontaktisyytteinen taistelukärki tuhoaa hävittäjän. Kaavan 3 mukaan tuhoutumistodennäköisyys  $P_K$  on riippuvainen lähisyytteen taistelukärjen onnistuneesta aktivoitumisesta, sekä todennäköisyydestä, jolla lähisyytteinen taistelukärki tuhoaa hävittäjän.

Sijoittamalla saadaan, että selviytymistodennäköisyys kontaktisyyttimelle:

$$P_S = 1 - P_K = 1 - P_H P_{K|H} \quad (4) [3]$$

,tai lähisyyttimelle

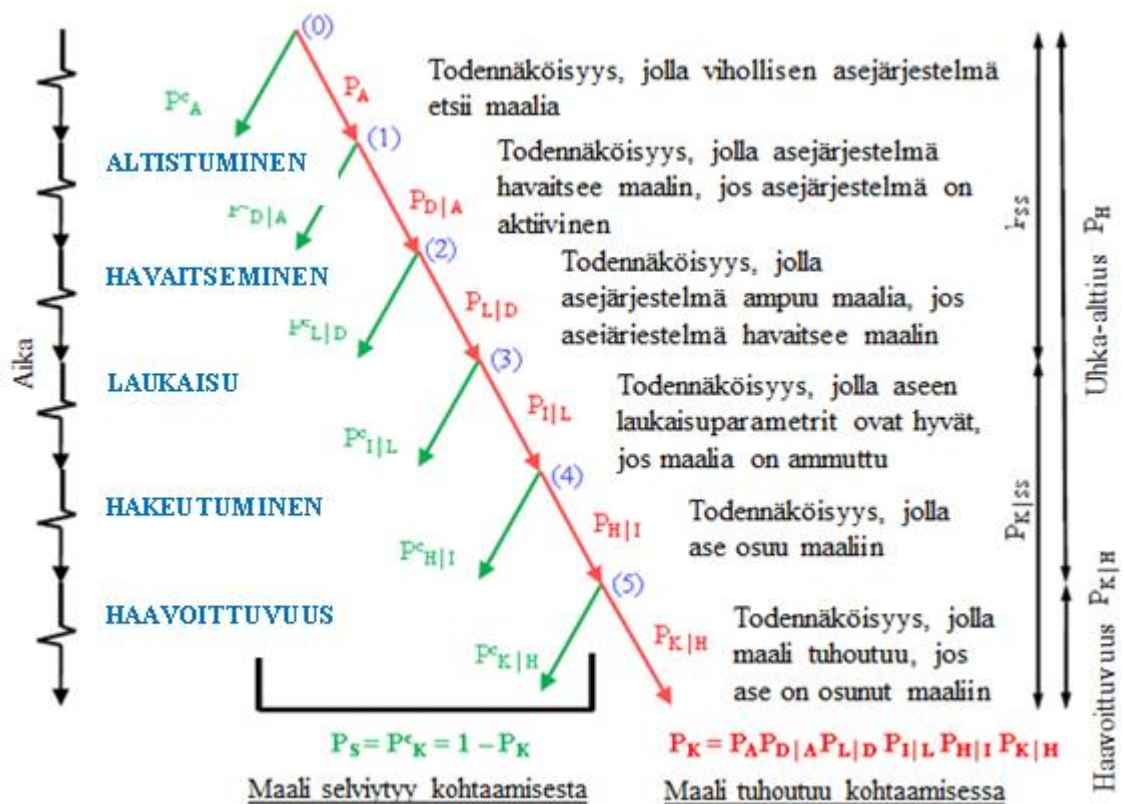
$$P_S = 1 - P_K = 1 - P_F P_{K|F} \quad (5) [3]$$

Seikat, jotka johtavat lähisyyttimen aktivoitumiseen tai kontaktisyyttimen osumaan voidaan katsoa olevan hävittäjän uhka-alttiutta. Seikat, jotka tapahtuvat taistelukärjen räjähtämisen jälkeen ovat osa hävittäjän haavoittuvuutta. Kaavoista voidaan päätellä, että selviytymistodennäköisyys riippuu uhka-alttiudesta ja haavoittuvuudesta. Toisin sanoen:

selviytymistodennäköisyys = 1 - uhka-alttius x haavoittuvuus.

Käytännössä voidaan ajatella, että selviytyäkseen tehtävästä hävittäjän on vältettävä osumaa viimeiseen saakka. Mikäli hävittäjä saa osuman, pitää varmistua siitä, että hävittäjä ei tuhoudu.

Hävittäjän selviytymistodennäköisyyttä ja siihen vaikuttavia seikkoja voidaan havainnollisesti kuvata ns. kill chain -kaaviolla (Kuva2). Kuvassa oleva kaavio kuvaa yksinkertaistettua tilannetta, jossa hävittäjää uhkaa ainoastaan yksi vihollisen asejärjestelmä. Kaaviota luetaan ylhäältä alaspäin. Kaaviossa on esitelty kronologisesti eri vaiheet, jotka vaikuttavat uhka-alttiuteen sekä haavoittuvuuteen. Viisi ensimmäistä vaihetta kuvaavat uhka-alttiutta. Viimeinen vaihe kuvaa haavoittuvuutta. Jokaisen ylempänä olevan vaiheen tulee täytyä, jotta alempana oleva vaihe voi tapahtua. Jokainen vaihe kuvaa todennäköisyyttä, millä hävittäjä joko selviää- tai ei selviä tilanteesta. Kaikkien kaavion vaiheiden täytyttyä hävittäjä katsotaan olevan tuhoutunut. Tuhoutumisen todennäköisyys saadaan kaikkien vaiheiden todennäköisyyksien tulona. Selviytymisen todennäköisyys saadaan vähentämällä luvusta 1 hävittäjän tuhoutumisen todennäköisyys.



Kuva 2. Kill chain -kaavio 1vs1 tilanteesta [3, s.11].



Kuvan 2:n mukaan uhkaavan asejärjestelmän tulee kyetä seuraaviin vaiheisiin, jotta hävittäjä voidaan tuhota:

0. Hävittäjän etsiminen eri sensoreilla
1. Hävittäjän havaitseminen
2. Maalin lukitseminen sekä aseiden laukaisu
3. Projektiilin tai ohjuksen hakeutuminen maaliin
4. Taistelukärjen osuminen kohteeseen joko kontaktisyytteen tai lähisyytteen taistelukärjen toimesta
5. Projektiilin on tuhottava yksi tai useampi hävittäjän kriittinen komponentti, jotta hävittäjä ei kykene suorittamaan tehtäväänsä

### 2.3 Uhka-alttius $P_H$

Uhka-alttius  $P_H$  on todennäköisyys, jolla hävittäjä saa osuman suorittaessa tehtävää. Hävittäjän uhka-alttius kattaa kaikki ne vihollisen asejärjestelmän vaiheet, jotka johtavat osumaan. Hävittäjän Uhka-alttius  $P_H$  voidaan laskea:

$$P_H = P_A P_{D|A} P_{L|D} P_{I|L} P_{H|I} \quad (6) [3, s. 33]$$

,missä

$P_A$  = Todennäköisyys, millä hävittäjä altistuu aktiiviselle uhalle.

$P_{D|A}$  = Todennäköisyys, millä aktiivinen uhka havaitsee hävittäjän.

$P_{L|D}$  = Todennäköisyys, millä hävittäjää ammutaan.

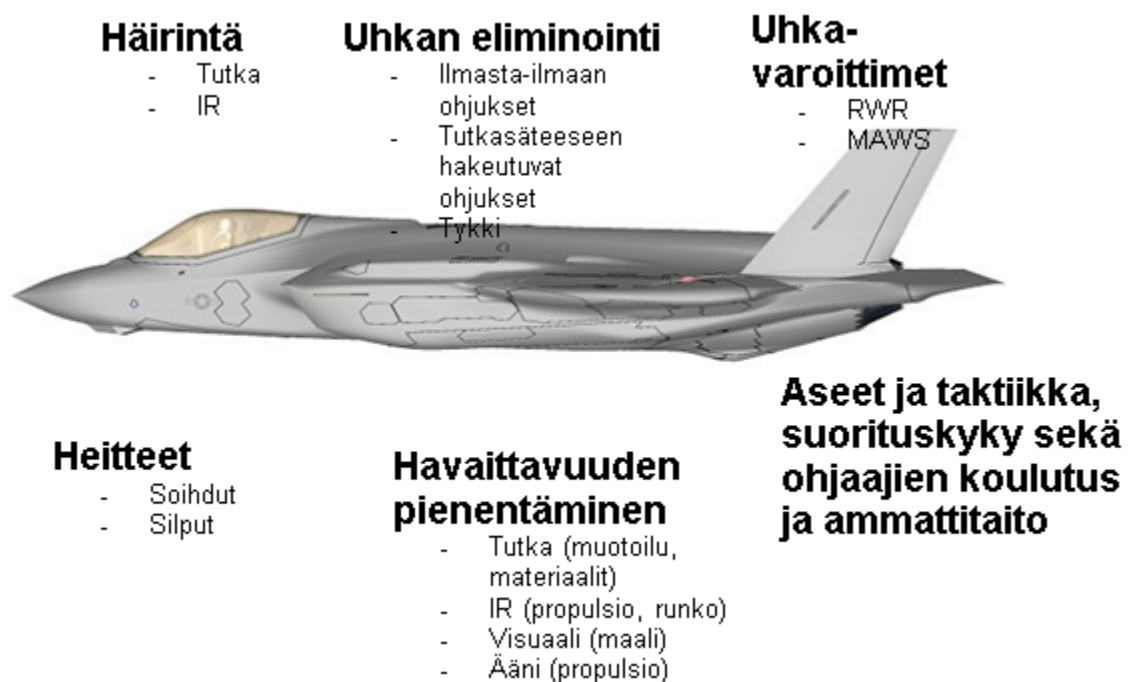
$P_{I|L}$  = Todennäköisyys, millä uhkaava ase pääsee taistelukärjen vaikutusalueelle.

$P_{H|I}$  = Todennäköisyys, millä uhkaava ase osuu hävittäjään.

Hävittäjän uhka-alttiuden määrä kohtauksessa määräytyy kolmesta tekijästä: uhkasta, hävittäjän ominaisuuksista, sekä skenaariosta. Uhkassa merkittävimminä asioina ovat uhkan ominaisuudet, operointi sekä tehokkuus. Hävittäjän ominaisuuksia ovat uhka-alttiutta pienentävät ominaisuudet, kuten: häiveominaisuudet, elektroniset vastatoimet, suorituskyky sekä aseistus itsepuolustukseen. Skenaario pitää sisällään fyysisen ympäristön, jossa

kohtaaminen tapahtuu. Skenaarioon sisältyy uhkan aktiivisuus, hävittäjän lentoreitti ja taktiikka, sekä muut mahdolliset hävittäjää tukevat elementit [3, s. 445].

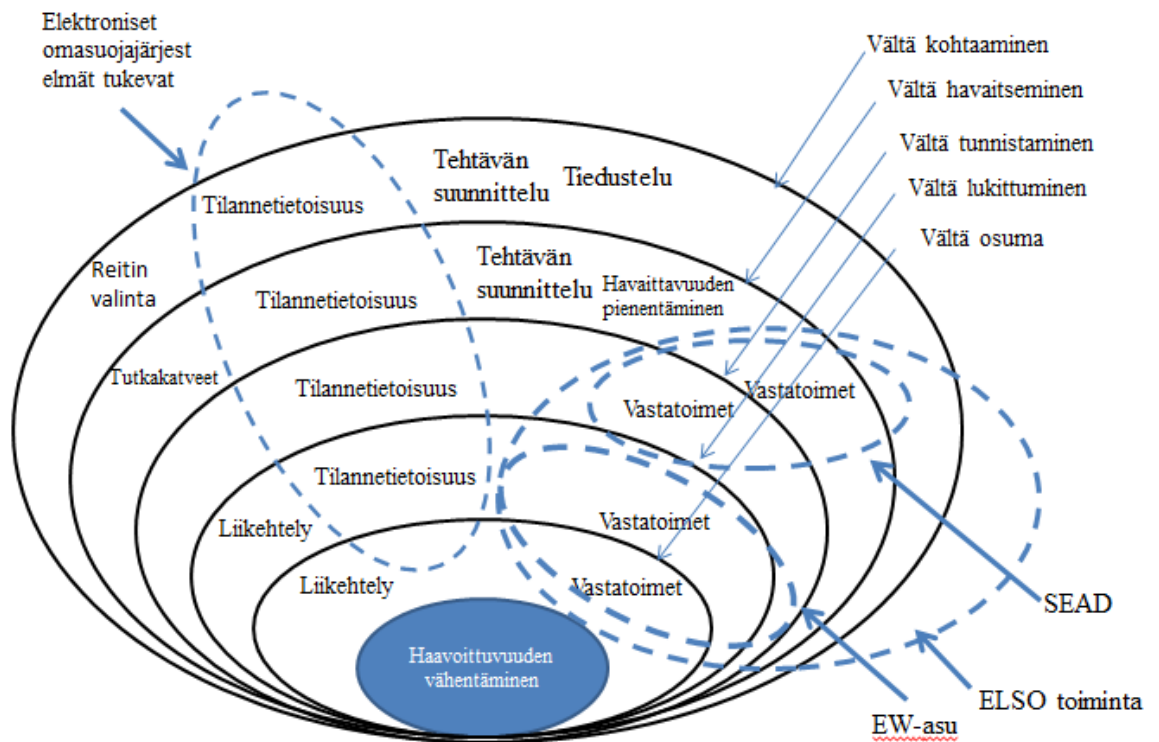
Jos hävittäjä voitaisiin suunnitella siten, että sen uhka-alttius olisi nolla kaikissa tilanteissa, olisi hävittäjä tuhoutumaton asejärjestelmä. Tällaisen hävittäjän suunnittelu on mahdotonta ja siksi hävittäjän suunnittelijoiden päämääränä onkin vähentää hävittäjän uhka-alttiutta hyväksyttävälle tasolle. Alla olevassa kuvassa (kuva 3.) on kuusi uhka-alttiuden vähentämisen konseptia.



Kuva 3. Kuusi uhka-alttiuden vähentämisen konseptia [3, s.135].

Häiveominaisuuksilla varustetut hävittäjät edustavat viimeisimpiä uhka-alttiutta vähentäviä ominaisuuksia. Vaikka nykypäivänä häiveominaisuudet ovat erittäin näkyvässä roolissa, tulee muistaa, että häiveominaisuudet ovat vain osa hävittäjän uhka-alttiuden vähentämistä. Uhka-alttiutta kuvataan usein peräkkäisenä prosessina, jota alla oleva ”sipulinkuori” malli kuvaa. Askeleet taistelunkestävyyden parantamiseksi halvemmasta ja tehokkaammasta järjestelmästä kalliimpaan ja tehottomampaan ovat: taktiikka, havaittavuuden pienentäminen, varoitin, häirintä ja harhauttaminen sekä hävittäjän kestävyuden lisääminen. Mitä syvemmmälle sipulin kuorissa mennään, sitä kalliimpia järjestelmät ovat ja sitä epävarmempaa on hävittäjän selviytyminen. Uhkasta katsoen uhkan pitää murtaa sipulin kuoret tuhotakseen hävittäjän. Sipulin kuoret edustavat vaiheita, joita uhkaavan asejärjestelmän tulee läpäistä. Läpäistävät vaiheet ovat: maalin etsintä, maalin havaitseminen, asejärjestelmän laukaisu, ammutun

ammuksen hakeutuminen maaliin, taistelukärjen osuma/aktivoituminen ja maalin tuhoaminen [16].



Kuva 4. Sipulinkuori-malli hävittäjän uhkista ja vastatoimista [16].

Kun hävittäjä otetaan palveluskäyttöön, sen suunnittelun perusteita ei voida enää muuttaa. Etenkin tämä pätee haavoittuvuutta pienentäviin ominaisuuksiin, sillä ne ovat usein rakenteellisia ja komponenttien sijoitteluun liittyviä ratkaisuja. Kuitenkin uhka-alttiutta pienentäviä ominaisuuksia voidaan kehittää vielä hävittäjän valmistumisen jälkeen. Ominaisuuksia voi kehittää jälkikäteen esimerkiksi päivittämällä omasuojajärjestelmiä uusilla ohjelmistoilla tai kehittämällä uusia tehokkaampia taktiikoita. Tällä hetkellä kehittyneinkin viidennen sukupolven hävittäjä tulee jossain vaiheessa kokemaan uhka-alttiuden lisääntymisen uusien kehittyneempien uhkien myötä. Siksi uhka-alttiutta vähentävien ominaisuuksien päivittäminen on keskeisessä roolissa hävittäjän elinkaaren aikana [46].

## 2.4 Haavoittuvuus, $P_{K|H}$

Nykyaikaiset hävittäjät on suunniteltu välttämään kaikkia mahdollisia uhkia mahdollisimman tehokkaasti. Hävittäjän uhka-alttiuden minimoimiseksi hävittäjien häiveominaisuuksia, sekä elektronisen vaikuttamisen kykyä on paranneltu. Jokaista uhkaa vastaan on olemassa jonkinasteinen suojautumiskeino. Stealth -teknologian ajateltiin olevan avain näkymättömyyteen

taistelukentällä. Kuitenkin vuonna 1999 Kosovon sodassa Yhdysvaltojen ensimmäinen stealth-kone F-117 ammuttiin alas vanhalla SA-3 Goa -ilmatorjuntaohjuksella [17]. Vaikka hävittäjien suunnittelijat ja vaatimusten asettajat halusivat hävittäjän, johon ei voi osua, tulee suunnittelussa yhä miettiä mitä tapahtuu, jos hävittäjä saa osuman.

Hävittäjä on rakentunut monista erilaisista järjestelmistä, joilla jokaisella on oma tärkeä roolinsa hävittäjän toiminnan kannalta. Monet järjestelmät toimivat yhteistyössä toisten järjestelmien kanssa, jolloin yhden järjestelmän vikaantuminen voi vaikuttaa koko hävittäjän toimintakykyyn. Vikaantuminen voi johtua esimerkiksi vikaantuneesta moottorista tai hävittäjän hydraulikkajärjestelmän vaurioitumisesta. Hävittäjän haavoittuvuutta tarkasteltaessa ollaan kiinnostuneita vihollistulen vaikutuksesta hävittäjän järjestelmien vikaantumiseen ja toimintakykyyn. Robert E. Ball:n mukaan ”*Lentokoneen haavoittuvuus kuvaa hävittäjän kyvyttömyyttä sietää vihollismielisen ympäristön aiheuttamia vaurioita*” [3, s. 603]. Haavoittuvuus  $P_{K|H}$  on todennäköisyys, jolla hävittäjä vaurioituu yhdestä tai useasta osumasta. Haavoittuvuus kuvaa taistelussa menetettyjen hävittäjien suhdetta osuman saaneisiin hävittäjiin. Haavoittuvuutta voidaan myös mitata haavoittuvana pinta-alana  $A_V$  [57]. Haavoittuva pinta-ala  $A_V$  voidaan laskea kaavalla

$$A_V = A_p P_{K|H} \quad (7) [57]$$

,missä  $A_p$  on komponentin uhkasuunnasta projisoitu alue

Hävittäjän haavoittuvuuden pienentäminen lisää hävittäjän kykyä sietää vihollistulesta aiheutuneita osumia. Haavoittuvuuden pienentäminen saavutetaan, kun hävittäjän toiminnan kannalta kriittiset komponentit eivät tuhoudu hävittäjän saadessa osuman [3, s. 38]. Haavoittuvuutta voidaan pienentää haavoittuvuutta pienentävillä ominaisuuksilla. Alla lista haavoittuvuutta pienentävistä konsepteista:

- Komponenttien kahdentaminen
- Komponenttien sijoittelu
- Passiivinen vauriontorjunta
- Aktiivinen vauriontorjunta
- Komponenttien suojaus (panssarointi)
- Komponenttien eliminointi tai korvaaminen

Hävittäjän haavoittuvuuden tutkimukseen käytetään yleisesti useita erityyppisiä hävittäjän tuhoutumiseen liittyviä kategorioita. Kategoriat mittaavat hävittäjän suorituskyvyn laskua osumahetkellä tai sen jälkeen. Hävittäjän haavoittuvuuden arviointiin yleisimmin käytetty kategoria on attrition kill -kategoria. Attrition kill -kategoria määrittää tuhoutumisen tason, joka johtaa hävittäjän menetykseen. Hävittäjä voidaan menettää eri tavoin. Hävittäjä voi olla esimerkiksi osuman saatuaan kyvytön palaamaan tukikohtaan. Toisaalta hävittäjä voi olla kykenevä palaamaan tukikohtaan, mutta lentokuntoiseksi korjaaminen voi olla mahdotonta tai taloudellisesti kannattamatonta. Pääajatuksena on se, että kaikissa näissä tapauksissa hävittäjää ei voida enää käyttää taistelussa, vaan se poistetaan vahvuudesta lopullisesti [3, s. 615]. Attrition kill -kategorian tuhoutumistasoja on viisi: KK, K, A, B ja C. Tuhoutumistasot KK, K, A ja B määrittävät ajan osuman ja tuhoutumisen välillä. Osuman ja tuhoutumisen välillä oleva aika on tärkeä haavoittuvuuden määrittelemisen kannalta. Mitä kauemmin hävittäjä pysyy ohjattavissa, sitä suuremmalla todennäköisyydellä ohjaaja pystyy pelastautumaan tai palaamaan tukikohtaan vaurioituneella koneella. C- kategoria määrittää vaurion, joka johtaa hävittäjän menetykseen ennen tehtävän tavoitteiden täyttymistä (mission kill) [55]. Alla on luettelo eri attrition-kill -kategorioista:

- KK = Vaurio, joka johtaa suoraan hävittäjän tuhoutumiseen.
- K = Vaurio, joka johtaa hävittäjän menetykseen 30 sekunnin kuluessa.
- A = Vaurio, joka johtaa hävittäjän menetykseen 5 minuutin kuluessa.
- B = Vaurio, joka johtaa hävittäjän menetykseen 30 minuutin kuluessa.
- C = Vaurio, joka johtaa hävittäjän menetykseen ennen tehtävän tavoitteiden täyttymistä. (mission kill)

Listassa olevat vauriot ovat järjestyksessä kriittisyyden mukaan ylhäältä alas. Mikäli ylemmän tason vaurio K tapahtuu ja hävittäjä menetetään 30 sekunnin sisällä, sisältää vaurio K myös alemman tason vauriot A ja B. Toisin sanoen, jos osumasta johtuneen komponentin tuhoutuminen johtaa kategorian K vaurioon, voidaan olettaa että kyseinen komponentti on kriittinen komponentti myös tason A ja B vaurioille. Liitteessä 1 on esimerkkejä komponenttien tuhoutumistasoista [3, s. 615]. Eri tuhoutumiskategoriat ja tuhoutumisasteet on tarkoitettu apuvälineeksi vähemmän haavoittuvan lentokoneen suunnittelussa. Yksi haavoittuvuuden pienentämisen tavoitteista on viivästyttää väistämätöntä tuhoutumista. Tämä saavutetaan suunnittelemalla hävittäjä siten, että esimerkiksi attrition kill -kategorian KK-tason osuma saadaan muutettua A- tason osumaksi [3, s. 616].

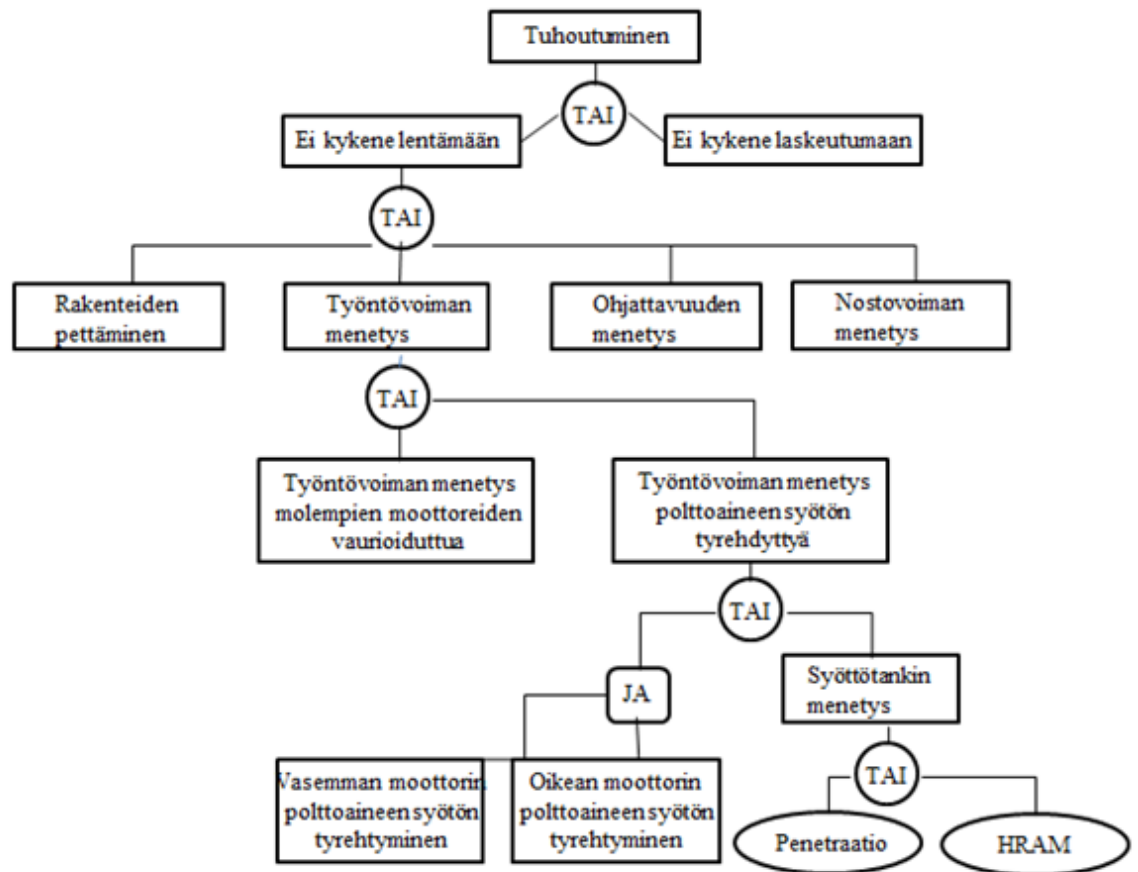
Hävittäjä muodostuu tuhansista eri komponenteista. Hävittäjän haavoittuvuus muodostuu hävittäjän komponenttien haavoittuvuuksien perusteella. Jotkin komponentit ovat hävittäjän toiminnan kannalta tärkeämpiä, kuin toiset komponentit. Suoranaisesti tai välillisesti hävittäjän toimintaan liittyviä komponentteja kutsutaan kriittisiksi komponenteiksi. Vikaantuessaan kriittinen komponentti voi suoraan tai välillisesti aiheuttaa hävittäjän menetykseen taistelussa [3, s. 603; 10].

Komponentit, jotka eivät suoranaisesti vaikuta hävittäjän välttämättömiin toimintoihin muuttuvat kriittisiksi komponenteiksi, kun niiden reagointi osumaan (kill mode) johtaa jonkin hävittäjän välttämättömiin toimintoihin liittyvän kriittisen komponentin tuhoutumiseen. Esimerkkinä hävittäjän omasuojaheitteet: Omasuojaheitteet eivät liity hävittäjän välttämättömiin toimintoihin. Omasuojaheite voi osuman saadessaan sytyttää tulipalon, joka voi tuhota jonkin hävittäjän kriittisen komponentin. Tämän seurauksena omasuojaheite on myös kriittinen komponentti, sillä sen kill mode (räjähdys) välillisesti johtaa hävittäjän menetykseen. Kriittiset komponentit voivat olla yksittäisiä, kuten yksittäinen lentäjä ja yksittäinen moottori yksipaikkaisessa ja yksimoottorisessa koneessa. Komponentit voivat olla myös kahdennettuja, kuten kaksi moottoria kaksimoottorisessa koneessa. Kun kriittiset komponentit ovat kahdennettuja, vaaditaan molempien komponenttien tuhoutuminen, jotta hävittäjä tuhoutuisi. Yleisesti tietyn hävittäjän kriittiset komponentit eivät määräydy uhkaavan aseiden-, vaan tuhoutumiskategorian- ja komponentin kill mode:n mukaan [7].

Taulukko 1. keskeisiä hävittäjän järjestelmien kill-modeja [1, s. 39].

<b>POLTTOAINEJÄRJESTELMÄ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Polttoaineen syötön tyrehtyminen</li> <li>- Tankin sisäinen räjähdys/palo</li> </ul>	<b>SÄHKÖJÄRJESTELMÄ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mekaaninen vaurio</li> <li>- Oikosulku</li> <li>- Ylikuumeneminen</li> </ul>	<b>AVIONIikka</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mekaaninen vaurio</li> <li>- Tulipalo</li> <li>- Ylikuumeneminen</li> </ul>
<b>RAKENTEET</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Repeytyminen</li> <li>- Paineesta johtuva ylikuormitus</li> <li>- Lämmöstä johtuva heikkeneminen</li> <li>- Delaminaatio</li> </ul>	<b>OHJAUSJÄRJESTELMÄ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sähkövika ohjausjärjestelmässä</li> <li>- Ohjausjärjestelmätietokoneen menetys</li> <li>- Sensorin vaurioituminen</li> <li>- Hydraulikkajärjestelmän vika</li> <li>- Ohjauspintojen vikaantuminen</li> <li>- Hydraulikkaneesteen palo</li> </ul>	<b>MIEHISTÖ</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Loukkaantuminen</li> <li>- Kuolema</li> </ul>
<b>PROPULSIO</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Imuaukon ilmanoton häiriintyminen</li> <li>- Moottorivauriot</li> <li>- Moottorin palo</li> <li>- Moottorin apulaitteen vika</li> </ul>	<b>ASEISTUS</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tulipalo/räjähdys</li> </ul>	

Hävittäjän yksittäisten ja kahdennettujen kriittisten komponenttien havaitsemiseksi käytetään kriittisten komponenttien analyysiä. Yleisesti analyysit tehdään kahden eri menetelmän mukaan. Ensimmäinen menetelmä on FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) –analyysi, jossa identifioidaan hävittäjän kaikki mahdolliset välttämättömien toimintojen komponenttien vikaantumis-, vaurioitumis- ja kill modet. Toisena menetelmänä on FTA (Fault Tree Analysis) analyysi, jossa etsitään kaikki ne kriittiset komponentit ja komponenttien kill modet, jotka voivat johtaa hävittäjän menettämiseen taistelussa [7].



Kuva 5. Kaksimoottorisen hävittäjän fault tree [3, s. 648]

Kuvassa 5 on esimerkki kaksimoottorisen hävittäjän fault tree -analyysistä. Fault tree kuvaa tapahtumaketjun, jonka toteuduttua hävittäjä tuhoutuu. Kaaviossa on kaksimoottorinen hävittäjä, jonka tuhoutumisen aiheuttama työntövoiman menetys on tarkastelussa. Fault tree -analyysissä pyritään pääsemään kaavion pohjalle aina tuhoutumiseen johtaneeseen perus tapahtumaan saakka. Sen jälkeen kaaviota luetaan alhaalta ylöspäin ja/tai -porttien kautta. Kaaviota luettaessa pyritään löytämään järjestelmän kriittiset komponentit ja niiden kill-modet. Jos komponentin tuhoutuminen kulkee suoraan tai -portin kautta (kuvassa syöttötankki), voidaan komponentin katsoa olevan yksittäinen kriittinen komponentti. Jos komponentin tuhoutuminen kulkee suoraan ja -portin kautta (kuvassa oikean moottorin polttoaineen syöttö), voidaan komponentin katsoa olevan kahdennettu kriittinen komponentti. Hävittäjän tuhoutumiseksi molempien kahdennettujen kriittisten komponenttien tulee tuhoutua. Kuvassa perustapahtuma on osua hävittäjän syöttötankkiin. Syöttötankissa tapahtuu joko projektiilin penetroitumisen aiheuttama kriittinen vuoto tai HRAM (Hydrodynamic RAM) -ilmiö, jossa koko tankki tuhoutuu paineen vaikutuksesta. Penetroituminen ja HRAM -ilmiö ovat syöttötankin kill modet. Syöttötankista hävittäjän tuhoutumiseen jatkuu suora tai -ketju tuhoutumiseen saakka, joten syöttötankki on hävittäjän



yksittäinen kriittinen komponentti (komponenttitaso). Syöttötankin menetyksestä johtuva polttoaineen syötön tyrehtyminen on polttoainejärjestelmän kill mode (järjestelmätaso). Polttoaineen syötön tyrehtyminen johtaa työntövoiman menetykseen, joten työntövoiman menetys on moottorin kill mode. Fault tree:n perusteella voidaan päätellä, että syöttötankki on hävittäjän kriittinen komponentti ja sen tuhoutuminen aiheuttaa hävittäjän tuhoutumisen. Tuhoutumisen tasoa voidaan arvioida attrition-kill -kategorialla. Syöttötankin tuhoutuminen johtaa hävittäjän tuhoutumiseen 30 minuutin sisällä, jolloin syöttötankki aiheuttaa tason B tuhoutumisen hävittäjälle.

Alhaalla on lista tärkeysjärjestyksessä hävittäjän tyypillisimmistä kriittisistä komponenteista, jotka voivat johtaa A-tason tuhoutumiseen:

1. Ohjaaja
2. Ohjausjärjestelmän komponentit
3. Hydrauliikkajärjestelmän komponentit
4. Polttoainejärjestelmän komponentit
5. Moottorin- ja apulaitteiston komponentit
6. Hävittäjän rakennetta ylläpitävät komponentit
7. Aseistus

[3, s. 648]

## 2.5 Taistelunkestävyyden kehittäminen

Hävittäjän taistelunkestävyyttä voidaan parantaa:

1. Hyvällä suunnittelulla, joka ei aiheuta merkittäviä muutoksia hävittäjän painoon, hintaan tai suorituskykyyn
2. Erillisten elementtien tuominen suunnitteluun, jotka aiheuttavat muutoksia hävittäjän painoon, hintaan tai suorituskykyyn
3. Hävittäjän oikeanlaisella käytöllä

Millä tahansa hävittäjän ominaisuudella, laitteistolla, suunnittelulla, aseistuksella tai taktiikalla, jolla voidaan vähentää hävittäjän uhka-alttiutta  $P_H$  tai haavoittuvuutta  $P_{K|H}$ , on

potentiaalia parantaa hävittäjän taistelunkestävyyttä. Näitä seikkoja voidaan kutsua taistelunkestävyyttä parantaviksi ominaisuuksiksi (Taulukko 2) [3, s. 34].

Taulukko 2. Tyypillisiä taistelunkestävyyttä parantavia ominaisuuksia [1, s. 34].

Nopeus ja korkeus	Liikehtimiskyky	Soihdut
Räjähdyksen -tai tulipalon torjunta	Aseistus itsepuolustukseen	Hävittäjäsaatto
Reduntanttinen hydraulikka	Koneen tuottama tilannetietoisuus	Kestävät rakenteet
Yötoiminta kelpoisuus	HRAM	Hyvä maalintamiskyky
Kaksimoottorisuus	Ohjaajan koulutus	Uhka varoittimet
Häiveominaisuudet	Palamaton hydraulikkaneeste	Tehtäväsuunnittelujärjestelmät
Taktiikka	SEAD kyky	Panssarointi
Koneen avioniikka	Silput	ELSO -kyky

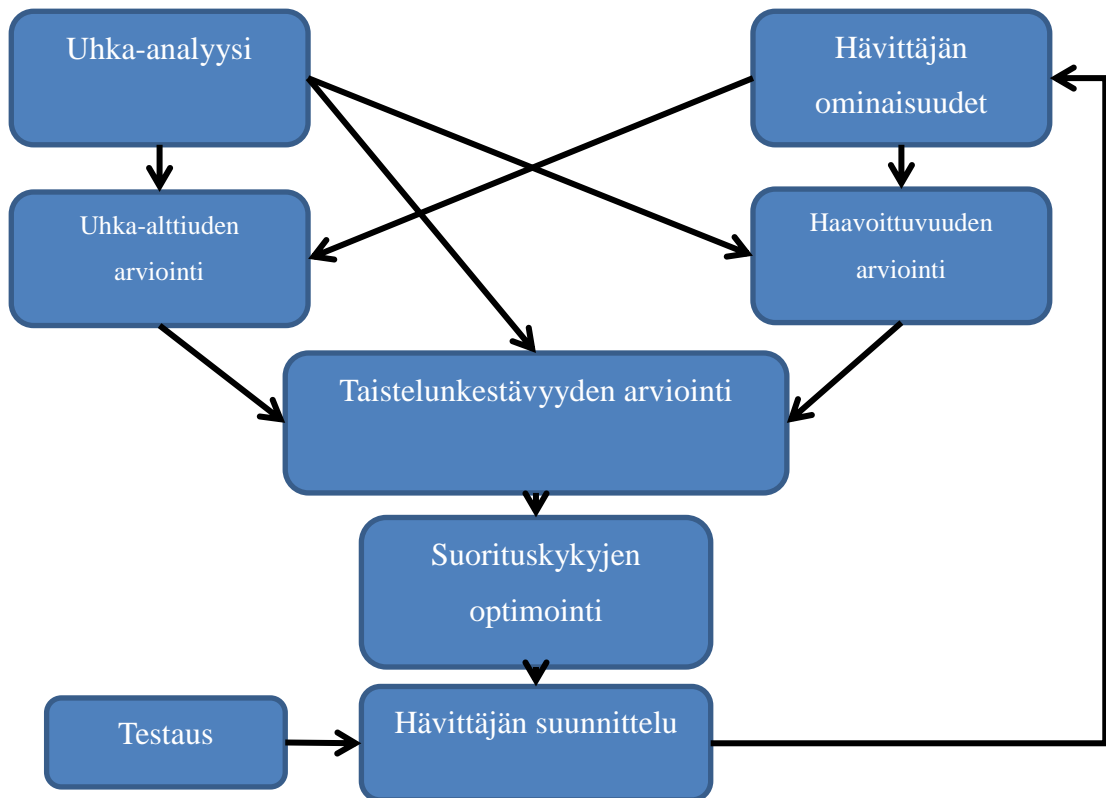
Jokainen taulukossa 2 oleva ominaisuus pienentää joko hävittäjän haavoittuvuutta tai uhka-alttiutta. Jokainen ominaisuus osaltaan vaikuttaa kill chain -kaaviossa (kuva 2.) olevaan ketjuun pienentämällä vaiheiden 0-5 toteutumisen todennäköisyyttä. Taistelunkestävyyttä parantavien ominaisuuksien tärkeyteen ja määrään vaikuttaa: hävittäjän tehtävä, tukevat joukot, sekä vihollisen ilmapuolustuksen määrä ja tehokkuus [3, s. 34].

Kaikki hävittäjän taistelunkestävyyttä parantavat ominaisuudet eivät välttämättä ole yhtä tärkeitä kaikissa tilanteissa. Pahimmassa tapauksessa haavoittuvuuden pienentäminen voi johtaa uhka-alttiuden kasvuun. Esimerkiksi raskaan panssaroinnin lisääminen voi heikentää hävittäjän liikehtimistä tehden hävittäjästä helpomman maalin. Toisaalta esimerkiksi hävittäjän uhka-alttiutta pienentävät soihdut voivat osuman saadessaan syttyä palamaan aiheuttaen tulipalon ja näin lisätä hävittäjän haavoittuvuutta. Tavoitteet hävittäjän taistelunkestävyyden parantamiselle ovat seuraavat:

- Niiden taistelunkestävyyttä parantavien ominaisuuksien riittävän aikainen havainnointi ja onnistunut integrointi, jotka suoranaisesti lisäävät hävittäjän kustannustehokkuutta asejärjestelmänä taistelukentällä [3, s. 44].
- Tilanteissa, joissa hävittäjä tuhoutuu, taistelunkestävyyttä parantavat ominaisuudet mahdollistavat ohjaajalle mahdollisuuden turvalliseen heittoistuinhyppyyn ystävällismielisellä alueella [3, s. 44].

Kustannustehokkuus on noussut suureen rooliin asejärjestelmien monimutkaistuessa ja kallistuessa. Käytännössä asejärjestelmän pitäisi tuottaa maksimaalinen hyöty minimaalisella rahallisella panostuksella. Nykyaikaisen hävittäjän tulee kyetä suorittamaan enemmän tehtäviä pienemmällä konemäärällä. Hävittäjä jonka taistelunkestävyyteen on panostettu, on myös yleisesti turvallisempi ja luotettavampi rauhan aikaisessa toiminnassa. Tästä johtuen turvallisempi ja luotettavampi hävittäjä omaa myös pienemmät elinkaarikustannukset. Sodan aikana taistelunkestävä hävittäjä kykenee suorittamaan tehtävän ja palaamaan tukikohtaan suuremmalla todennäköisyydellä, kuin hävittäjä, jossa ei ole otettu huomioon taistelunkestävyyttä. Tämä lisää onnistuneiden tehtävien todennäköisyyttä missä tahansa operaatiossa, jonka ansiosta hävittäjä on käytettävissä myös seuraavissa tehtävissä [47].

Taistelunkestävyyttä parantavien ominaisuuksien integrointi tulee tapahtua mahdollisimman aikaisessa vaiheessa hävittäjän suunnitteluprosessia. Myöhemmässä vaiheessa integroitu ominaisuus voi aiheuttaa alentuneen suorituskyvyn, jota ei välttämättä olisi tapahtunut, mikäli ominaisuus olisi otettu huomioon aikaisin suunnitteluprosessissa. Monesti ominaisuuden lisäämisestä myöhäisessä vaiheessa suunnitteluprosessia luovutaan kokonaan, sillä ominaisuus voi jopa heikentää taistelunkestävyyttä [3, s. 44]. Seuraavalla sivulla oleva kuva (Kuva 6.) kuvaa mallia, jonka mukaan hävittäjän taistelunkestävyyttä kehitetään osana suunnitteluprosessia.



Kuva 6. Hävittäjän taistelunkestävyyden suunnittelu [3, s. 54]

Hävittäjän taistelunkestävyyden suunnittelu alkaa hävittäjälle ominaisen taistelukentän uhka-arviolla. Uhka-arvio käsittää hävittäjälle suunnitellut tehtäväprofiilit ja uhkat. Uhka pyritään mallintamaan mahdollisimman todennukaisesti ottaen huomioon uhkan toimintamalli, sekä ominaisuudet. Ominaisuuksia ovat esimerkiksi uhkan tyyppi (esimerkiksi suojahävittäjä), asejärjestelmä (esimerkiksi aktiivinen tutkaohjus), taistelukärjen laatu (esimerkiksi lähisyntyinen taistelukärki), sekä taistelukärjen vaikuttavuus räjähtäessä. Toimintamalli pitää sisällään maalin etsintään liittyviä seikkoja, asejärjestelmän kommunikointia toisten asejärjestelmien kanssa, maalin havaitsemiseen liittyvät seikat, sekä maalin lukitukseen ja aseeseen hakeutumiseen liittyvät seikat. Myös tietoutta taistelukentän fyysisistä ominaisuuksista halutuille skenaarioille voidaan kerätä tässä vaiheessa [3, s. 54].

Hävittäjän ominaisuuksien- ja rakenteiden tunteminen on tärkeä osa taistelunkestävyyden suunnittelua. Hävittäjästä- ja sen komponenteista pitää saada mahdollisimman yksityiskohtaista dataa, johon taistelunkestävyyden suunnittelu voidaan perustaa. Datan tulee pitää sisällään kaikkien järjestelmien sijainti, rakenne sekä toiminta. Dataa tarvitaan sekä haavoittuvuuden, että uhka-alttiuden arvioinnissa. Tämä data on tärkeää etenkin hävittäjän suunnittelun alkumetreillä, jolloin taistelunkestävyyttä parantavien ominaisuuksien yhteistoimintaan liittyvät seikat tulee päättää. Hävittäjän keskeisiä järjestelmiä ovat: Hävittäjän rakenteet, propulsioon liittyvät järjestelmät, ohjausjärjestelmään liittyvät

järjestelmät, polttoainejärjestelmä, sekä muut järjestelmät, kuten sähköjärjestelmä ja ECS-järjestelmä (Environmental Control System). [3, s. 55, s. 203-222].

Uhka-arvion- ja hävittäjän ominaisuuksien perusteella tehdään hävittäjän uhka-alttiuden, sekä haavoittuvuuden arviot. Uhka-alttiuden arvio pohjautuu suurimmilta osin hävittäjän uhka-arvioon. Uhka-arviossa kerätään dataa vihollisen asejärjestelmien suorituskyvystä, joka liittyy asejärjestelmän havainnointi-, maalintamis- ja seurantakykyyn. Uhka-alttiutta pienentävien ominaisuuksien, kuten häirintälähettimien ja heitteiden toimintamoodit ja parametrit perustuvat vihollisen asejärjestelmien ominaisuuksiin. Uhka-alttiuden arvioinnissa ollaan erityisen kiinnostuneita hävittäjän tutkapoikkipinta-alasta, sekä lämpöjäljestä. Uhka-alttiutta tutkitaan ja arvioidaan tietokonemallinnuksella, sekä ammutakokeilla. Tutkimuksien perusteella arvioidaan vihollisen asejärjestelmän  $P_H$  (osumistodennäköisyys) ja  $P_F$  (taistelukärjen sytyttimen aktivoitumisen todennäköisyys) kyseiselle hävittäjälle. [3, s. 55] Alla olevassa taulukossa on keskeisiä ohjelmistoja uhka-alttiuden mallintamiseen.

Taulukko 3. Uhka-alttiuden mallintamisessa käytettäviä ohjelmistoja [15;3, s. 146].

Ohjelmisto:	Käyttötarkoitus:
AIRADE / ALARM	Tutkalla havaitsemisen mallinnus
BLUEMAX	Lentokoneen lentoradan mallinnus
ESAMS	Ohjusilmatorjunnan mallinnus
TRAP	Ilmasta-ilmaan uhkan mallinnus
RADGUNS	Ammusilmatorjunnan mallinnus
SHAZAM	Ohjuksen loppuhakeutumisen mallinnus

Haavoittuvuuden arvioinnissa arvioidaan hävittäjän haavoittuvuutta tietyn vaurioitumisasteen suhteen (attrition kill level) ks. kohta 2.4. Vaurioitumisasteen valinnan jälkeen tehdään hävittäjälle FTA, sekä FMEA, -analyysit, joissa saadaan selville hävittäjän kriittiset komponentit, sekä niiden kill modet. Lopuksi tehdään hävittäjän haavoittuvuuden analyysi tietokoneavusteisesti erilaisille taistelukärjille ja ammuksille. Haavoittuvuuden mallintamiseksi on olemassa erilaisia ohjelmistoja. Alla olevassa taulukossa (taulukko 3) on esiteltynä haavoittuvuuden mallintamiseen käytettäviä ohjelmistoja [3, s. 55].

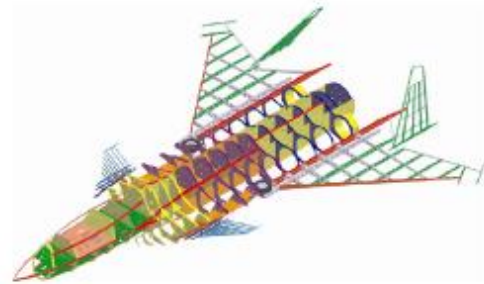
Taulukko 4. Haavoittuvuuden arvioinnissa käytettäviä ohjelmistoja [20].

Ohjelmisto:	Käyttötarkoitus:
BLR-CAD	Haavoittuvuuden mallinnus
SHOTGEN/FASTGEN	Ammuksen lentoradan mallinnus
VAREA	Haavoittuvan alueen mallinnus
COVART	Haavoittuvan alueen ja korjaus ajan mallinnus
AVCAS/ATVASS/WLTVAS	Haavoittuvuuden arviointi
CATIA	3D mallinnuksen työkalu

Esimerkkinä CATIA -ohjelmisto, jolla voidaan mallintaa hävittäjä komponenttitasolta lähtien. Kuvassa 7 on mallinnettu hävittäjän rakenteet ja järjestelmät CATIA -ohjelmiston avulla. Alhaalla olevia malleja käyttämällä luodaan malli haavoittuvuuden todennäköisyydestä eri kohdissa hävittäjää, tietyllä taistelukärjellä.



Konfiguraatio malli

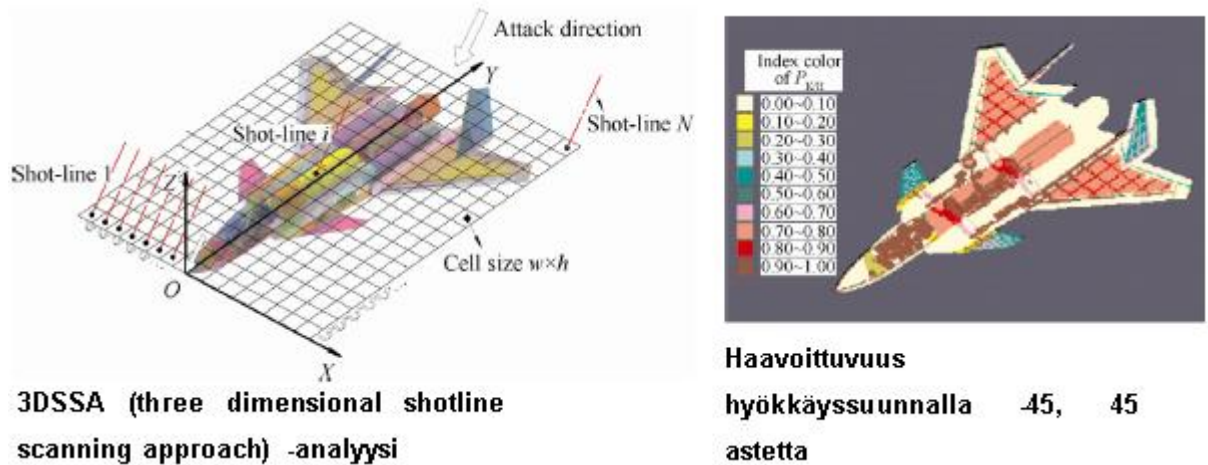


Rakenne malli



Järjestelmä malli

Kuva 7. Rakenteiden ja järjestelmien mallinnus hypoteettisesta hävittäjästä [20].

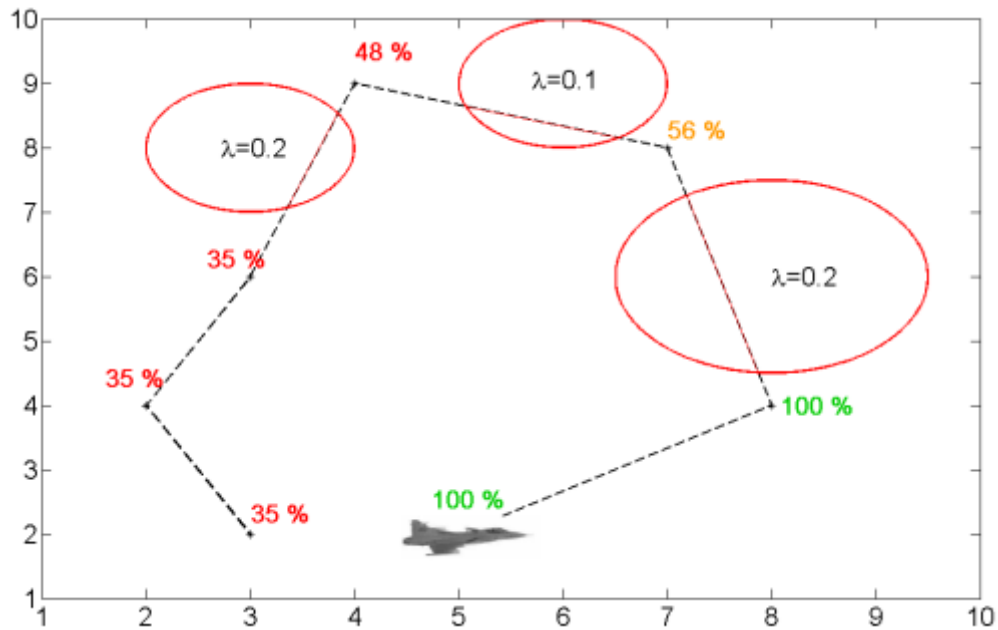


Kuva 8. 3DSSA –analyysi, sekä hypoteettisen hävittäjän mallinnettu haavoittuvuus [20].

3DSSA -analyysissä mallinnetaan satoja ampumalinjoja hilarakenteisessa muodossa. Jokainen ampumalinja lasketaan käyttämällä hyväksi valmiita mallinnuksia hävittäjän rakenteista ja materiaaleista. Analyysistä saadaan aikaiseksi värillinen malli hävittäjän haavoittuvuudesta eri kohdissa hävittäjän runkoa. Värit kuvaavat todennäköisyyttä, millä hävittäjä tuhoutuu tietyn tyyppisen projektiilin osumasta, jos hävittäjä saa osuman [20].

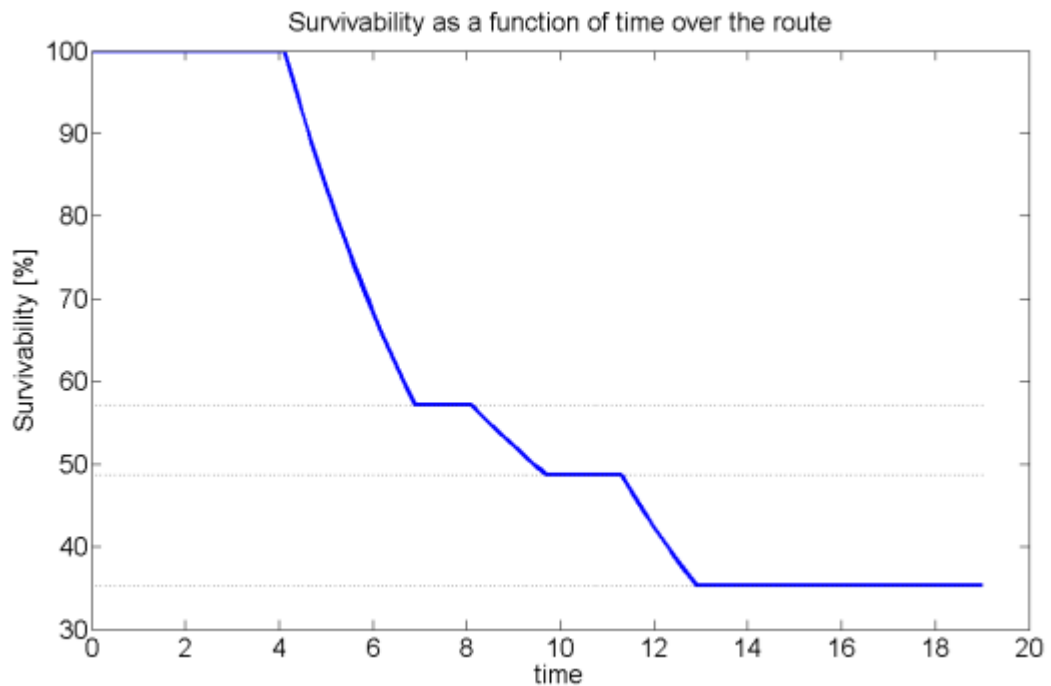
Taistelunkestävyyden arvioissa yhdistetään hävittäjän uhka-analyysin-, haavoittuvuuden-, sekä uhka-alttiuden arvioista saatu data. Tämän jälkeen hävittäjän taistelunkestävyyttä analysoidaan erityyppisissä skenaarioissa, jotka pohjautuvat saatuun dataan. Skenaariotyyppisiä ovat: 1 vs 1 tilanne, jossa hävittäjä kohtaa yhden uhkan (engagement-level survivability assesment), Monta hävittäjää kohtaa monta uhkaa (mission-level survivability assesment), Monta hävittäjää kohtaa monta uhkaa monella tehtävällä (campaign-level survivability assesment). Skenaarioista haettava selviytymisen todennäköisyys saadaan käyttämällä hyväksi tietokoneohjelmistoja, sekä erilaisia matemaattisia malleja [3, s. 59].

Seuraavalla sivulla oleva kuva (kuva 9.) on yksinkertainen esimerkki uhkan mallinnuksesta, jossa on kolme erityyppistä uhkaa hävittäjän lentoreitillä. Reitillä olevat prosenttiluvut kuvaavat hävittäjän selviytymisen todennäköisyyttä reitin eri vaiheissa. Punaiset ympyrät kuvaavat uhkaa ja uhkan intensiteettiä.



Kuva 9. Simuloidun skenaarion uhkamalli [21].

Kuva 10 kertoo, kuinka hävittäjän selviytymisen todennäköisyys muuttuu ajan funktiona kuvan 9 reitillä. Selviytymisen todennäköisyys pienenee eksponentiaalisesti, kun hävittäjä saapuu uhkan vaikutusalueelle. Samalla tulee huomata, että selviytymisen todennäköisyys pysyy vakiona, vaikka hävittäjä poistuu uhkan vaikutusalueelta.



Kuva 10. Taistelunkestävyys hävittäjän lentoreitin varrella, ajan funktiona [11].



Suorituskykyjen optimoinnissa otetaan huomioon hävittäjän taistelunkestävyyden lisäksi muut ominaisuudet, jotka vaikuttavat hävittäjän suorituskykyyn, sekä kustannustehokkuuteen koko elinkaaren aikana. Suorituskykyjen optimoinnissa arvioidaan kunkin ominaisuuden vaikutusta suorituskykyyn ja kustannustehokkuuteen. Esimerkiksi ohjaamon panssarointi, joka pienentää hävittäjän haavoittuvuutta suojaamalla hävittäjän ohjaajaa. Toisaalta panssarointi lisää hävittäjän painoa, joka vaikuttaa suoraan suorituskykyyn ja painojakaumaan. Suorituskykyjen optimoinnissa mietitään esimerkiksi, että saavutetaanko suurempi kustannustehokkuus panssaroinnilla, joka parantaa haavoittuvuutta, mutta heikentää muita ominaisuuksia? Vai pienentääkö panssarointi kustannustehokkuutta heikentämällä muita hävittäjän ominaisuuksia [3, s. 60]?

Vaikka suuri osa hävittäjän mallinnuksesta ja testaamisesta tapahtuu suunnittelun alkuvaiheessa, suoritetaan hävittäjälle lopulta taistelunkestävyyttä mittaavia testejä valmiilla koneyksilöllä. Esimerkiksi hävittäjän häiveominaisuuksia testataan kokonaisella hävittäjällä häiveominaisuuksia mittaavassa laboratorioissa (kuva 11.).



Kuva 11. Hävittäjän häiveominaisuuksien mittaamista laboratorioissa [33].

Hävittäjää ei siirretä tuotantoon ennen, kuin ammutakokeet on suoritettu ja raportoitu. Yhdysvalloissa on käytössä LFT&E- ohjelma (Live Fire Testing and Evaluation), jossa hävittäjän järjestelmien vaurion sietoa tarkastellaan ammutakokein. Ammutakokeissa todennetaan hävittäjän haavoittuvuuteen liittyviä seikkoja realistisesti. Ammutakokeissa käytettävät taistelukärjet ja amukset ovat samanlaisia, kuin hävittäjän odotetaan kohtaavan oikealla taistelukentällä. Lisäksi hävittäjä on kuormattuna ja aseistettuna samalla tavalla, kuin oikeassa sotatilanteessa [12].



Kuva 12. F-35:n kriittisten järjestelmien haavoittuvuuden testaus ammuntakokein [12].

### 3 TAISTELUNKESTÄVYYTTÄ PARANTAVAT OMINAISUUDET

#### 3.1 Uhka-alttiutta vähentävät ominaisuudet

Uhka-alttiuden vähentämisen konseptit on esitelty kuvassa 3. Näiden konseptien alle mahtuu paljon hävittäjän uhka-alttiutta vähentäviä ominaisuuksia. Suurin osa ominaisuuksista on järjestelmiä, joilla vähennetään hävittäjän uhka-alttiutta. Uhka-alttiutta vähentävät ominaisuudet vähentävät suoraan osumistodennäköisyyttä  $P_H$  tai ohjuksen taistelukärjen sytyttimen aktivoitumisen todennäköisyyttä  $P_F$ . Hävittäjän uhka-alttiutta vähentävät ominaisuudet suunnitellaan nykyisin ottaen huomioon koko hävittäjän elinkaari. Nykyään uhkan aiheuttavat asejärjestelmät käyttävät hyväkseen enenevissä määrin laajaa sähkömagneettisen aluetta, jonka vuoksi monet uhka-alttiutta pienentävistä järjestelmistä toimivat laajalla sähkömagneettisen spektrin alueella. Uhka-alttiuden vähentämiseen liittyvät läheisesti termit: elektroninen sodankäynti (engl. Electronic Warfare, EW), Elektroninen hyökkäys (engl. Electronic Attack, EA), Elektroniset vastatoimet (engl. Electronic Counter Measures, ECM), elektroninen suojaus (engl. Electronic Protection, EP), Elektroniset vasta-vastatoimet (engl. Electronic Counter-Counter Measures, ECCM), sekä elektroniset tukitoimet (engl. Electronic Support, ES). Hävittäjän uhka-alttiuden vähentäviin ominaisuuksiin voidaan myös lukea hävittäjän suorituskyky, sekä tehtävän ja taktiikan suunnitteluun käytettävät ohjelmistot [3, s. 536].

Tässä luvussa uhka-alttiuden vähentämisen konseptit on selkeyttämisen vuoksi jaettu kolmeen kategoriaan: elektroniset omasuojajärjestelmät, häiveominaisuudet, sekä suorituskyky.

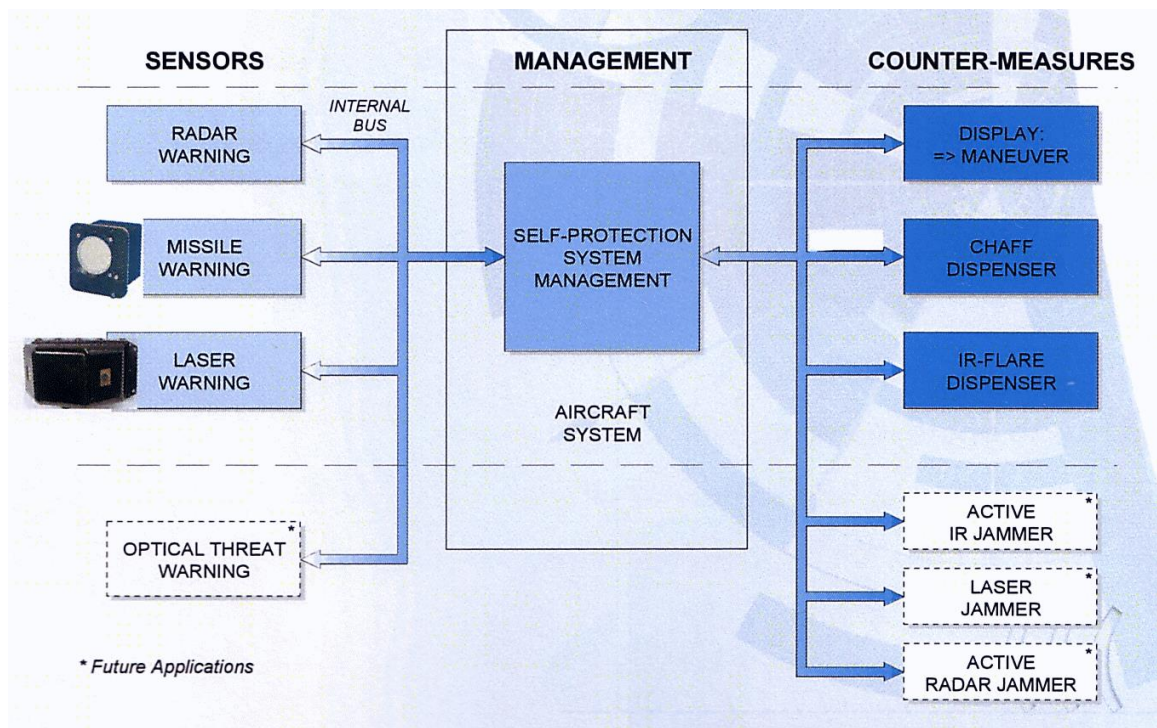
##### 3.1.1 Elektroniset omasuojajärjestelmät

Nykyaikaisen elektronisen omasuojajärjestelmän tarkoituksena on havaita, luokitella ja tunnistaa ilma-alusta uhkaava asejärjestelmä, varoittaa koneen miehistöä, sekä laskea vaadittavat oikea-aikaiset vastatoimet ja suorittaa ne joko automaattisesti tai puoliautomaattisesti. Elektroninen omasuojajärjestelmä koostuu seuraavista pääosista:

- Tutkavaroitin (RWR)
- Laservaroitin (LWS)
- Ohjusvaroitin (MAW)
- Prosessointiyksikkö (CPU)

- Uhkakirjasto (ELIB)
- Näyttölaitteet
- Omasuojajehitteet (CMD)
- Omasuojahäirintälähettimet (DECM)

Elektroniset omasuojajärjestelmät kykenevät luokittelemaan sensoreilla vihollisesta saadun havainnon uhkakirjaston mukaan. Luokittelun perusteella järjestelmä suorittaa/ ehdottaa sopivia vastatoimia kirjastoon tallennetun toimintamallin mukaisesti. Järjestelmä varoittaa myös hävittäjän ohjaajaa uhkasta näyttölaitteella sekä äänivaroituksella. Yleisesti ohjaaja saa tietoon uhkan tyypin, suunnan sekä suhteellisen signaalin voimakkuuden. Alla olevassa kuvassa (kuva 13) on esitelty tyypillinen RLM (Radar, Laser, Missile) –järjestelmäkaavio. Kaaviossa vasemmalla on uhkatietoa keräävät anturit, jotka on kytketty samaan EW -väylään. Antureilta saatu data käsitellään prosessointiyksikössä (engl. Central Processing Unit - CPU). Prosessointiyksikköön ladataan myös uhkakirjasto (engl. Electronic Library - ELIB). Prosessointiyksikkö päättää / ehdottaa ohjaajaa sopivista vastatoimista, jotka näkyvät kaaviossa oikealla [29, s. 247; 29].



Kuva 13. Yksinkertaistettu RLM-järjestelmäkaavio [53].

Tätä eri sensoreilta saatua datan käsittelyä, sekä vastatoimia kutsutaan hävittäjän sensorifuusioksi. Nykyään järjestelmästä käytetään valmistajasta riippuen nimiä: DAS (Distributed Aperture system) DASS (Defensive Aids Sub-System) tai IDAS (Integrated Defensive Aids Systems). Sensoreilta saatava data lisää hävittäjän ohjaajan tilannetietoisuutta kill chain:n eri vaiheissa. Tilannetietoisuus lisää mahdollisuuksia reagoida uhkaan ja sitä tilannetietoisuus parantaa hävittäjän taistelunkestävyyttä [44; 34; 26]

### **Tutkavaroitin (RWR)**

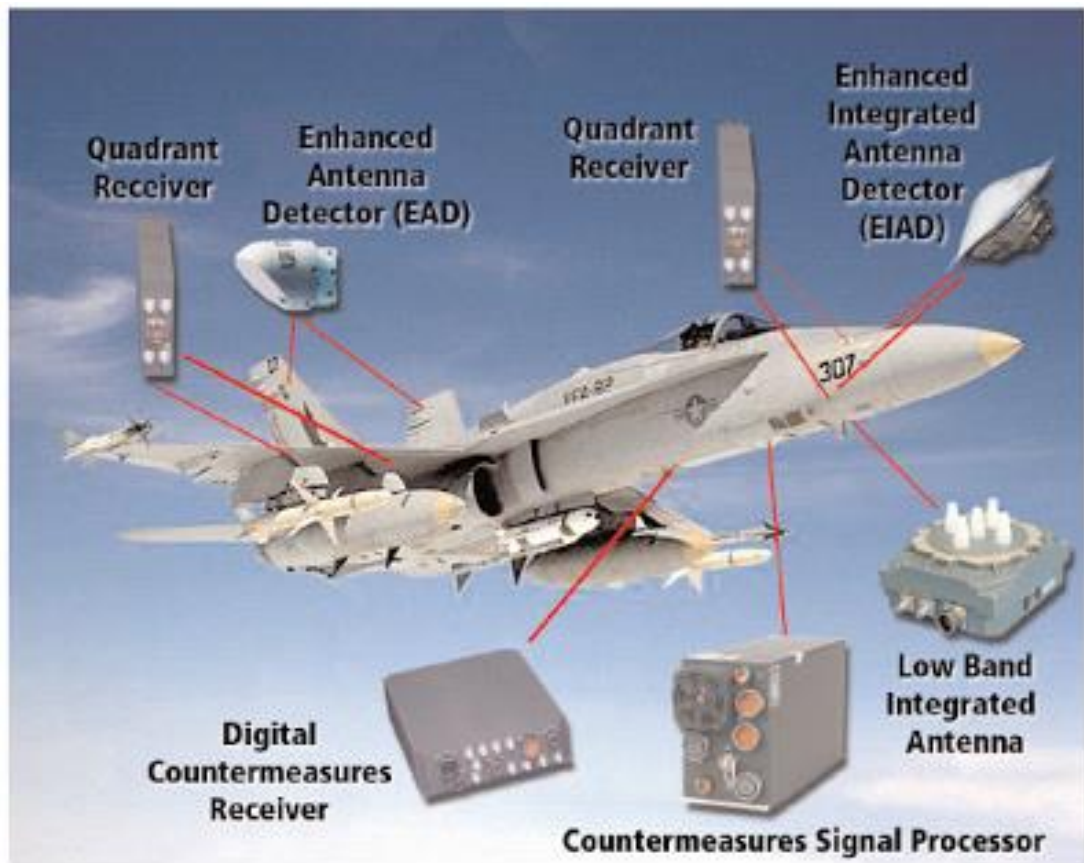
Tutkavaroittimet on yleisesti suunniteltu passiivisesti havaitsemaan ja tunnistamaan vihollisen seuranta- ja maalinosoitustutkat. Tutkavaroitin luo hävittäjän ohjaajalle tilannekuvaa valaisevista tutkista, tunnistamalla valaisijan tyyppin, sijainnin sekä valaisun tason (etsintä / seuranta). Tutkavaroittimen antaman tilannetiedon perusteella hävittäjän ohjaaja reagoi uhkaan esimerkiksi matalalla lentokorkeudella, omasuojaheitteillä, omasuojahäirinnällä tai suorittamalla ohjusväistön, mikäli ohjus on lähietäisyydellä [3, s. 543].

Tutkavaroitin on tärkein uhkavaroituksen muoto. Tutkavaroittimen käyttäjävaatimuksia ovat maa-, meri- ja ilmatutkien havaitseminen taajuuskaistoilla E – K, eli alueella 2 GHz – 40 GHz. Tyypillisen tutkavaroittimen (RWR) sensorit sijaitsevat eri puolilla hävittäjää. Sensoreita on tyypillisesti neljä ja ne sijaitsevat hävittäjässä siipien kärjissä tai sivuvakaimissa. Tarkoituksena on luoda 360 astetta kattava havaintokyky tutkataajuudella toimivista uhkista. Sensorina tutkavaroittimessa toimii spiraali-antenni, joka kykenee parhaimmassa tapauksessa kattamaan 90 asteen kartion muotoisen alan. Spiraali-antenni havaitsee ja suuntii tutkataajuiset signaalit, jotka osuvat antennin havaintoalueelle. Tutkavaroittimen signaaliprosessori analysoi ja kategorisoi vastaanotetun signaalin olemassa olevan uhkikirjaston mukaan seuraavilla kriteereillä:

- signaalin taajuus
- modulaation tyyppi
- signaalin voimakkuus
- signaalin suuntima

Signaaliprosessorin analyysin perusteella tieto vallitsevasta uhkasta, sen sijainnista ja tyyppistä välitetään hävittäjän ohjaajalle äänimerkillä ja visuaalisena symbolina näyttölaitteella [29; 49].





Kuva 14. AN/ALR-67v3 tutkavaroittimen komponentit - ja sijainti F/A-18 E/F Super hornetissa [40].

### Ohjusvaroitin (MAW)

Ohjusvaroitin tarkoitus on havaita hävittäjää kohti ammutut ohjukset. Ohjusvaroitinta käytetään yleisesti täydentämään RWR:n antamaa dataa, sillä molemmat varoitimet varoittavat hävittäjää kohti ammutuista ohjuksista. Ohjusvaroitin tarkoitus on havaita infrapuna- tai elektro-optista hakeutumista käyttävät ohjukset. Ohjusvaroitimet voivat olla joko passiivisia tai aktiivisia. Passiivisen ohjusvaroitimen sensori havaitsee ohjuksen rakettimoottorin palokaasuista tulevan UV- tai IR- säteilyn, jonka perusteella saadaan selville saapuvan ohjuksen tulosuunta. Passiivisen ohjusvaroitimet ovat alttiita taustakohinasta johtuville väärille hälytyksille, jonka vuoksi sensoreina käytetään sekä IR-, että UV- alueen sensoreita, jolloin saadaan edut molemmista taajuusalueista. Sensorit sijoitellaan tarkoituksenmukaisesti ympäri hävittäjää, jotta varoitus saataisiin kaikista uhkasuunnista. Yleisimmin hävittäjässä käytetään neljää passiivista ohjusvaroitimen sensoria. Yhden sensorin kattama ala voi olla jopa 110 astetta. Passiivisten ohjusvaroitimien haittapuolena ovat usein virheelliset varoitukset. Aktiivisen ohjusvaroitimen roolia näyttää hävittäjän tutka, joka kykenee tuottamaan tarkkaa suunta- ja etäisyystietoa saapuvista ohjuksista kaikissa

sääolosuhteissa. Huonona puolena tutkassa on kohteiden pieni tutkapoikkipinta-ala, joka vaikeuttaa havainnointia. Lisäksi tutkan toimiessa aktiivisena mahdollistaa se vihollisen tutkasäteilyyn hakeutuvan ohjuksen laukaisun. Sensoreilta saatu data analysoidaan signaaliprosessorissa, jonka jälkeen havainto ohjuslaukaisusta välitetään hävittäjän ohjaajalle taktisella näytöllä sekä äänimerkein. Ohjusvaroitin on ainoa varoitin, joka kykenee havaitsemaan passiivisesti hakeutuvat ohjukset ja on sen vuoksi hyvä lisä hävittäjän omasuojajärjestelmään [29, s. 249; 3,s.545; 9, s. 147].



Kuva 15. AN/AAR-54(V) passiivinen UV-alueen ohjusvaroitin [35].

### **Laservaroitin (LWS)**

Laservaroitin toimii samalla toimintaperiaatteella, kuin tutkavaroitin. Koska asejärjestelmän laserosoitin on aktiivinen järjestelmä, sen täytyy lähettää säteilyä kohti hävittäjää. Erona tutkavaroitimeen, laservaroitin toimii laservalon taajuusalueella [29, s. 249].

### **Heitin (silppu ja soihtu)**

Heitin on osa hävittäjän omasuojajärjestelmää. Hävittäjissä on yleisesti käytössä heitinjärjestelmä, jolla saadun uhkatiedon perusteella voidaan pudottaa oikeassa suhteessa ohjuksen hakeutumista häiritseviä silppuja ja soihtuja. Soihtujen ja silpun tarkoituksena on häiritä ohjuksen hakupäätä tai hävittäjää seuraavaa tutkaa. Käytännössä heitteet toimivat vain rajoitetun ajan ja niitä on mukana rajoitettu määrä. Heitteet ovat kertakäyttöisiä, jonka vuoksi niiden tulee olla edullisia suhteessa suojattavaan hävittäjään. Hävittäjän ohjaaja voi valita heittimen toimimaan joko manuaalisesti, puoli automaattisesti tai automaattisesti. Automaattisessa moodissa hävittäjä pudottaa joko silppua tai soihtuja havaitseman uhkan mukaan. Manuaalisessa moodissa hävittäjän ohjaaja voi itse valita pudotettavat heitteet ja niiden määrän [3, s. 576; 29, s. 251].



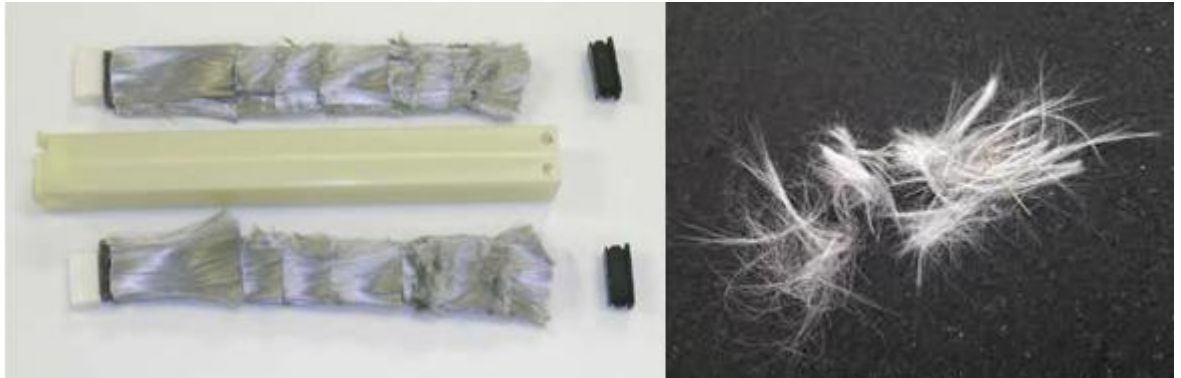
Kuva 16. Mekaanikko asentaa heitteitä AN-ALE-47- heittimeen [51].

Silpun tarkoituksena on häiritä vihollisen asejärjestelmien tutkia. Silppu on heijastavasti pinnoitettuja muovi- tai metallisilppua. Silppu on suunniteltu toimimaan puolelle aallonpituudelle tyypillisestä maalinosoitustutkasta. Silppua voidaan heittää eri määrä eri sekvensseillä. Heittimen sijoittelulla on suuri vaikutus silputuksen tehokkuuteen osana omasuojaa. Omasuojatarkoituksessa silppu pitää saada levittymään nopeasti, jotta vihollisen tutka näkee sekä hävittäjän, että silppupilven samassa etäisyysportissa. Silpun levittyminen tehostuu, kun silppu heitetään turbulenttiseen ilmavirtaan. Siipien etupuoli tai moottorin suihkuputken läheisyys ovat hyviä paikkoja heittimelle ajatellessa silputtamista [3, s. 576; 29, s. 251].

Soihtujen tarkoituksena on toimia vastatoimena IR- hakupäällä varustettuihin ohjuksiin. Heitettäessä ulos hävittäjästä, soihdut syttyvät palamaan samalla aallonpituusalueella, kuin hävittäjästä aiheutunut lämpöjälki. Soihdun lämpöjälki on suunniteltu pidemmäksi, kuin maalina oleva hävittäjä. Suuremman lämpöjäljen ansiosta infrapunaohjuksen hakupää voidaan saada lukittumaan soihtuun hävittäjän sijaan. Soihdut tulee heittää oikealla hetkellä, jotta ne olisivat tehokkaita. Liian kaukaa heitettynä kulmaero hävittäjän ja soihdun välillä on liian pieni, eikä hakupää tällöin lukitu soihtuun. Liian lähellä heitettynä ohjus voi räjähtää soihtuun ja ohjuksen taistelukärjen projektiilit voivat osua hävittäjään. Suuren kulma-eron luomiseksi liikehtiminen on tärkeää soihtujen heittämisen yhteydessä. Heittimen sijainnin kannalta soihdut tulisi pudottaa mahdollisimman puhtaaseen ilmavirtaan (toisin kuin silput). Siksi



heittimen sijoittelu on monesti kompromissi silppujen- ja soihtujen osalta [3, s. 576; 29, s. 251].



Kuva 17. RR-188 silppupatruuna, joka sisältää 400000 silppudipolia [10].

### Hinattava valemaali

Hinattava valemaali on pääsääntöisesti lämmönlähde tai häirintälähetin, jota hinataan hävittäjän perässä kaapeliin kiinnitettynä. Kuljetuksen aikana valemaali sijaitsee siiven kärjessä, siiven ripustimeen kiinnitettyssä säiliössä tai vaihtoehtoisesti hävittäjän sisällä. Tarkoituksena valemaalilla on saada ohjuksen hakupää lukkiutumaan hävittäjän sijaan valemaaliin. Hinattava valemaali on suunniteltu hinattavaksi sellaisella etäisyydellä, että ohjuksen räjähtäessä lentävät sirpaleet eivät osu hävittäjään. Valemaali voidaan hinata tarvittaessa takaisin sisälle tai sen kaapeli voidaan katkaista vikatapauksissa.



Kuva 18. AN-ALE-55 hinattava valemaali [51].

## Omasuojahäirintä (DECM – Defensive electronic countermeasures)

Omasuojahäirintälähetin on osa hävittäjän elektronisia omasuojajärjestelmiä. Häirintälähtetimen tehtävänä on vaikeuttaa vihollisen asejärjestelmän seuranta ja lukittumista maaliin. Vihollisen asejärjestelmän tutkan häiritsemiseksi on kaksi keinoa. Ensimmäinen on suuren kohinatason muodostaminen ja toinen on harhauttavan häirinnän muodostaminen. Tehokkaan kohinahäirinnän onnistumiseksi häirintälähtetimen tulee kyetä lähettämään lähetettä kohtuullisen suurella teholla vihollisen tutkan kaistanleveydellä (2-18 GHz), jotta hävittäjästä heijastunut signaali katoaisi kohinan taakse. Tutkavaroitimelta saadun vihollisen tutkan signaalin perusteella häirintälähetin kykenee häiritsemään valaisevaa tutkaa, jolloin kaistanleveyttä voidaan pienentää ja häirintää tehostaa. Kohinahäirintä on tehokasta siihen saakka, kunnes vihollisen tutka kykenee läpipolttoon. Läpipoltossa vihollisen tutkan teho peittoaa häirintälähtetimen tehon, jolloin ohjuslaukaisu onnistuu kohti maalia [29, s. 239-241; 3, s. 551-553]..

Harhauttava häirintä on monimutkaisempaa, kuin suuren kohinatason muodostaminen. Harhauttavassa häirinnässä tarkoituksena on lähettää vihollisen tutkalle signaaleja, jotka vaikuttavat tutkan näkemän maalin nopeuteen, etäisyyteen tai paikkaan. Lisäksi harhauttava häirintä kykenee luomaan harhamaaleja vihollistutkalle. Parhaassa tapauksessa vihollisen asejärjestelmä ja sen operaattori ei havaitse häirintää lainkaan ja ammutut ohjukset eivät osu maaliin. Harhauttavaa häirintää on pääasiassa neljää tyyppiä:

1. Harhamaalin luonti. Jos vihollisen tutkan modulaation luonne on tiedossa, on mahdollista lähettää pulsseja, jotka esiintyvät useampana maalina vihollisen tutkalla.
2. Etäisyysportin vedättäminen. Luotu valepulssi pyritään luomaan voimakkaammaksi, kuin itse maali, jonka jälkeen valepulssia muutetaan siten, että pulssin etäisyystieto muuttuu vihollisen tutkalla.
3. Nopeusportin vedättäminen. Nopeusportin vedättäminen tapahtuu periaatteessa samalla tavalla, kuin etäisyysportin vedättäminen. Nopeusportin vedättämisessä muutetaan vastaanotettua signaalia, jonka jälkeen se lähetetään takaisin vihollisen tutkan vastaanottimelle. Tutkalla nähdään tällöin virheellistä nopeustietoa
4. Suuntatiedon muuttaminen

Tutkaa häiritsevät laitteistot voivat olla hävittäjään sisäänrakennettuja laitteistoja tai esimerkiksi siiven kärkiin tai ripustimiin asennettavia säiliöitä [29, s. 239-241; 3, s. 551-553].

Infrapunahäirintä on tarkoitettu IR- hakupäillä varustettuja ohjuksia vastaan. Infrapunahäirintälähettimet toimivat periaatteeltaan samalla tavalla tutkahäirintälähettimien kanssa. Infrapunahäirinnällä joko sokaistaan ohjuksen IR- hakupää riittävän voimakkaalla läheteellä tai pyritään harhauttamaan hakupäätä valemaalin luonnilla [3, s. 555].

### 3.1.2 Häiveominaisuudet

Häiveominaisuuksien tehtävänä on estää tai vaikeuttaa vastustajan tiedustelua ja hakeutuvien aseiden osumista saattamalla suojattavan kohteen herätteet yhteneviksi toimintaympäristön kanssa. Häiveteknologia perustuu pääasiassa sähkömagneettisen spektrin eri taajuuksialueiden tuntemiseen. Häiveteknologialla pyritään pienentämään hävittäjän tutka-, infrapuna- ja näkyvän valon aallonpituuksien alueilla tapahtuvaa havaittavuutta. Hävittäjän havaittavuutta pienentäviä ominaisuuksia voidaan kutsua stealth- ominaisuuksiksi. [3, s. 557].

### **Tutkapoikkipinta-alan pienentäminen**

Millimetri- ja tutka-alueella kohteiden havaittavuutta kuvataan kohteen tutkapoikkipinta-alana (engl. Radar Cross Section, RCS), RCS:n yksikkö on  $m^2$ . Tutkapoikkipinta-ala vaikuttaa suoraan hävittäjästä heijastuvan tutkasäteilyn määrään. Tutkapoikkipinta-ala on voimakkaasti sidoksissa vihollisen asejärjestelmän katselukulmaan ja se saattaa vaihdella tuhatkertaisesti muutaman asteen kulmavälillä. Näin ollen tavallisesti tutkapoikkipinta-ala esitetään muodossa:

$$\text{dBsm} = \log (\text{tutkakaikupinta} / 1 \text{ m}^2)$$

Tutkapoikkipinta-ala muodostuu kolmen tekijän tulosta:

- geometrinen poikkipinta-ala
- pinnan suuntaavuus
- pinnan heijastuskerroin

Tutkapoikkipinta-alaa voidaan pienentää ulkoisesti sopivalla muotoilulla. Muotoilun tarkoituksena on heijastaa tuleva tutkasäteily pois päin uhkasta. Konventionaalisen hävittäjän suhteellisen suuri RCS johtuu koneen tutkan, ohjaamon kuomun, moottorin ilmanottoaukkojen, ulkoisen kuorman, suihkuputkien ja sivu- ja korkeusvakaimien aiheuttamista suurista tutkaheijasteista. Kyseiset pinnat toimivat ikään kuin heijastimina

vihollisen asejärjestelmän tutkalle. Tutkakapoikkipinta-alan minimoimiseksi muotoilussa pitää ottaa huomioon kyseiset hävittäjän osat seuraavalla tavalla:

- Yhtenäinen siipirakenne
- Siiven johtoreunan nuolimuoito
- Matalaprofiilinen ohjaamo, joka sulautuu runkoon
- Rungon sisäiset ripustimet pommeille ja ohjuksille
- Tutkan radomin suunnittelu matalaherätteiseksi
- Kallistetut sivuvakaimet / sivuvakaimien poisto
- Moottorin suojatut ilmanottoaukot



Kuva 19. Northrop Grumman B-2 Spirit [36].

Kuvassa 19 oleva B-2 Spirit edustaa tutkakapoikkipinta-alaa pienentävän muotoilun kehittyneintä teknologiaa. Häiveominaisuuksia parantavalla muotoilulla monesti heikennetään hävittäjän aerodynaamisia ominaisuuksia. Häiveominaisuuksia parantava muotoilu on tasapainoilua hävittäjän suorituskyvyn ja havaittavuuden välillä. Muotoilusta aiheutuvat kompromissit voidaan paikata (Radar Absorbing Materials, RAM), vaimennusrakenteilla (Radar Absorbing Structures, RAS) ja tutkasäteilyä läpäisevillä materiaaleilla. Tällöin hävittäjä säilyttää pienen havaittavuuden uhraamatta suorituskykyä. Tutkakapoikkipinta-alaa

voidaan pienentää myös kompensoimalla aktiivisesti tai passiivisesti tutkakaikusignaalia. Kaikki nämä ominaisuudet tulee ottaa huomioon suunniteltaessa hävittäjän antamia herätteitä tutkan taajuusalueilla. [29, s. 175-177; 38]. Käytännössä tutkapoikkipinta-alan pienentämisellä pienennetään uhkaavan asejärjestelmän tutkan havaintoetäisyyttä, sekä samalla parannetaan oman häirintälähtetimen tehokkuutta [3, s. 562].

### **Lämpöherätteen pienentäminen**

Lämpöherätteen pienentäminen käsittelee hävittäjän lämpöjäljen pienentämistä sähkömagneettisen spektrin infrapuna-alueella (IR). Hävittäjän kolme pääasiallista lämpöherätettä ovat:

- Hävittäjän rungosta ja moottoreista heijastuva lämpösäteily
- Moottorin palokaasujen lämpösäteily
- Ulkoisesta lähteestä heijastunut säteily (esim. aurinko) [3, s. 568].

Hävittäjän lämpöherätettä voidaan pienentää seuraavin keinoin:

- Kuumien osien lämpötilan pienentäminen
- Kuumien osien pinnan emissiivisyyden pienentäminen
- Moottorin palokaasujen lämpötilan pienentäminen
- Lämpöä säteilevien pintojen pinta-alan pienentäminen
- Lämpösäteilyä heijastavien pintojen heijastavuuden pienentäminen [3, s. 568].



Kuva 20. Northrop YF-23:n lämpöherätettä pienentävät suihkusuuttimet [54].

Kuvassa 20 olevassa YF-23 hävittäjässä moottoreiden lämpöherätettä on pienennetty tekemällä suihkusuuttimet osaksi runkoa, jonka ansiosta suihkuvirtaus sekoittuu koneen rungon ylitse kulkevaan ilmapirtaan ennen, kuin suihkuvirtaus ylittää koneen rungon. Lisäksi suihkusuuttimet on pinnoitettu lämpösäteilyä heijastavalla materiaalilla, jolloin lämpösäteily heijastuu ylöspäin, eli pois pääasiallisesta uhkasuunnasta [3, s. 568].

### **Visuaalinen havaittavuus**

Visuaalisen havaittavuuden pienentämisen tavoitteena on minimoida kontrastierot hävittäjän ja taustan välillä näkyvän valon aallonpituuksien alueella. Käytännössä hävittäjän visuaalisen havaittavuuden pienentämisessä tulee kiinnittää huomiota: hävittäjän moottoreiden palokaasujen- ja moottoreiden hehkumisen havaittavuuden vähentämiseen, ohjaamon kuomun heijasteisiin, hävittäjän rungon havaittavuuteen (maalaukset), sekä hävittäjän valaistukseen. Moottoreiden palokaasujen havaittavuutta voidaan vähentää suunnittelemalla moottorin polttokammio siten, että polttoaineen palaminen olisi mahdollisimman tehokasta. Tällöin moottori savuttaa vähemmän, jolloin hävittäjän visuaalinen havaittavuus pienenee [3, s. 569].





Kuva 21. Puolalainen Mig-29 RIAT 2015 lentonäytöksessä [43].

Kuvassa 21 olevan Mig-29:n visuaalinen havaittavuus kasvaa merkittävästi savuttavien moottoreiden vuoksi. Hävittäjän kuomun heijasteita voidaan pienentää suunnittelemalla kuomu mahdollisimman tasapintaiseksi. Tasainen pinta heijastaa auringon valon takaisin peilin tavoin, jolloin valo heijastuu takaisin samassa kulmassa valon tulokulman kanssa. Tässä tapauksessa heijastuskulmat ovat pieniä. Kaareva kuomun pinta heijastaa valon merkittävästi suuremmille kulmille, jolloin kuomun heijasteet ovat näkyvissä monessa paikkaa yhtä aikaa. Lisäksi hävittäjän asennon muutos ei välttämättä poista heijastuksen havaitsemista kaarevilla pinnoilla. Hävittäjän rungon maalauksella voidaan myös pienentää visuaalista havaittavuutta. Maalin väritys määräytyy hävittäjän toimintaympäristön mukaan. Tarkoituksena maalauksella on pienentää hävittäjän ja taustan kontrastieroja näkyvän valon alueella. Esimerkiksi B-2 Spirit (kuva 19.) on maalattu kauttaaltaan mustaksi, sillä sitä käytetään pääasiassa yöllä [3, s. 570].

### 3.1.3 Suorituskyky

Suorituskyvyn alle on listattu sellaiset hävittäjän uhka-alttiutta pienentävät ominaisuudet, jotka ovat enemmän hyökkäyksellisiä, kuin uhkaan reagoivia ominaisuuksia. Näitä ominaisuuksia yleisesti pidetään hävittäjän suorituskykyinä. Ominaisuuksia ovat: uhkan lamauttaminen, aseet ja taktiikka sekä hävittäjän suorituskyky [3, s. 584-585]. Lisäksi

suorituskykyyn liittyy hävittäjän ohjaajien koulutus, mutta tässä tutkimuksessa sitä ei käsitellä.

### **Uhkan lamauttaminen**

Hävittäjän uhkan lamauttamiseen liittyvillä ominaisuuksilla pyritään fyysisesti vaurioittamaan tai tuhoamaan hävittäjää vastaan olevat uhkat. Uhkan lamauttamiseen liittyvät läheisesti tutkasäteilyyn hakeutuvat ohjukset (engl. Anti-Radiation Missile, ARM), sekä hävittäjän ilmasta ilmaan -aseistus (Ohjukset sekä tykki). Uhkan lamauttamisella pyritään paikallisesti madaltamaan vihollisen ilmapuolustuksen uhkaa, joka lisää omia toimintaedellytyksiä taistelukentällä [3, s. 584].



Kuva 22. AGM-88 HARM -tutkasäteeseen hakeutuva ohjus [41].

### **Aseet ja taktiikka**

Hävittäjän käyttämällä aseilla ja aseiden mahdollistamalla taktiikalla on merkittävä rooli hävittäjän taistelunkestävyydessä. Mikäli hävittäjän sensorit ja aseet mahdollistavat hyökkäyksen viholliskohteisiin vihollisen ilmapuolustuksen ulottumattomissa, voidaan olettaa hävittäjälle koituvan uhkan olevan minimaalinen. Lisäksi taktiikalla voidaan pienentää uhka-altiutta myös uhkan vaikutusalueella. Taktiikan suunnitteluun ja tehokkuuteen vaikuttavat läheisesti tehtävän suunnitteluun käytettävät ohjelmistot (JMPS, TAMPS, AFMSS), sekä lentosimulaattorit, joilla tehtävää voidaan harjoitella etukäteen [3, s. 585].



## Suorituskyky

Tässä kontekstissa suorituskyvyllä tarkoitetaan hävittäjän nopeutta, työntövoimaa, liikehtimiskykyä, sekä muita aerodynaamisia ominaisuuksia. Vielä toisen maailmansodan aikaan hävittäjän suorituskyvyllä oli merkittävin rooli taistelunkestävyyden, sekä kokonaistehokkuuden kannalta. Ohjusjärjestelmien kehittyessä hävittäjän suorituskyvyn merkitys taistelunkestävyyden kannalta on pienentynyt. Esimerkiksi hävittäjän suorituskykyä voidaan uhrata muiden ominaisuuksien kustannuksella, jotta taistelunkestävyys ja kokonaistehokkuus kasvaisi. Nykyään hävittäjän kokonaistehokkuutta arvioitaessa tulee ottaa huomioon myös muut hävittäjän tehokkuutta lisäävät ominaisuudet, kuten häiveominaisuudet [47, s. 585]. Voidaan miettiä, onko tärkeämpää saada hävittäjän kaarron kulmanopeutta kasvatetuksi tutkapoikkipinta-alan kasvamisen kustannuksella, jolloin hävittäjä on havaittavissa ja tuhottavissa suuremmalla todennäköisyydellä.

### 3.2 Haavoittuvuutta vähentävät ominaisuudet

Kappaleessa 2.4 on lueteltuna kuusi haavoittuvuuden vähentämisen konseptia. Hävittäjän haavoittuvuuden vähentäminen tapahtuu hyvän suunnittelun ja haavoittuvuutta vähentävien ominaisuuksien avulla. Niiden avulla pyritään pienentämään hävittäjän tuhoutumisen todennäköisyyttä  $P_{KH}$ . Haavoittuvuutta vähentävät ominaisuudet monesti lisäävät hävittäjän painoa ja ovat täysin turhia, mikäli hävittäjä ei saa osumaa. Toisaalta haavoittuvuutta vähentävillä ominaisuuksilla voidaan parantaa hävittäjän toimintavarmuutta esimerkiksi ohjausjärjestelmän kahdentamisen ansiosta. Tässä alaluvussa on jaettu haavoittuvuutta vähentävät ominaisuudet kolmeen kokonaisuuteen: Komponenttien redundanttisuus ja -sijoittelu, aktiivinen ja passiivinen vauriontorjunta, sekä panssarointi ja komponenttien korvaaminen.

#### 3.2.1 Komponenttien redundanttisuus ja -sijoittelu

##### **Redundanttisuus**

Ilmailussa redundanttisuus usein yhdistetään turvallisuuteen [3, s. 697]. Tekniikassa redundanttisuus yhdistetään luotettavuuteen [23]. Redundanttisuus tarkoittaa jonkin järjestelmän tai komponentin kahdentamista, jonka ansiosta saavutetaan suurempi luotettavuus. Järjestelmien ja komponenttien kahdentamisella voidaan pienentää myös hävittäjän haavoittuvuutta. Redundanttisuus voi muodostua pääasiassa kahdella eri tavalla: Redundanttisuus voi olla täydellistä, jolloin redundanttinen elementti kykenee toimimaan

täydellisesti hajonneen elementin sijaan, tai se voi olla myös osittaista, jolloin redundanttinen elementti kykenee täyttämään osan tuhoutuneen elementin tehtävistä. Redundanttisuutta kutsutaan aktuaaliseksi, kun järjestelmän komponentit ja toiminnot ovat vastaavat rinnakkaisen järjestelmän kanssa. Redundanttisuus on funktionaalista, jos rinnakkainen järjestelmä tuottaa saman toiminnallisuuden eri komponenteilla. [3, s. 697]. Esimerkki täydellisestä aktuaalisesta redundanttisuudesta on hävittäjän kaksi generaattoria. Toisen generaattorin vikatapauksessa toinen generaattori kykenee kantamaan koko sähköjärjestelmän kuorman. Hävittäjän hydraulikkajärjestelmä voi olla osittain redundanttinen, jolloin hydraulikkajärjestelmän vikatapauksessa rinnakkainen hydraulikkajärjestelmä kykenee suorittamaan osan vikaantuneen järjestelmän toiminnoista. Esimerkki funktionaalisesta redundanttisuudesta hävittäjässä voi olla esimerkiksi stabilaattoreiden (korkeusperäsin) käyttö kallistusohjaukseen siivekkeiden vikatapauksessa. Tällainen funktionaalinen redundanttisuus on mahdollista ainoastaan fly-by-wire -tyyppisessä ohjausjärjestelmässä.

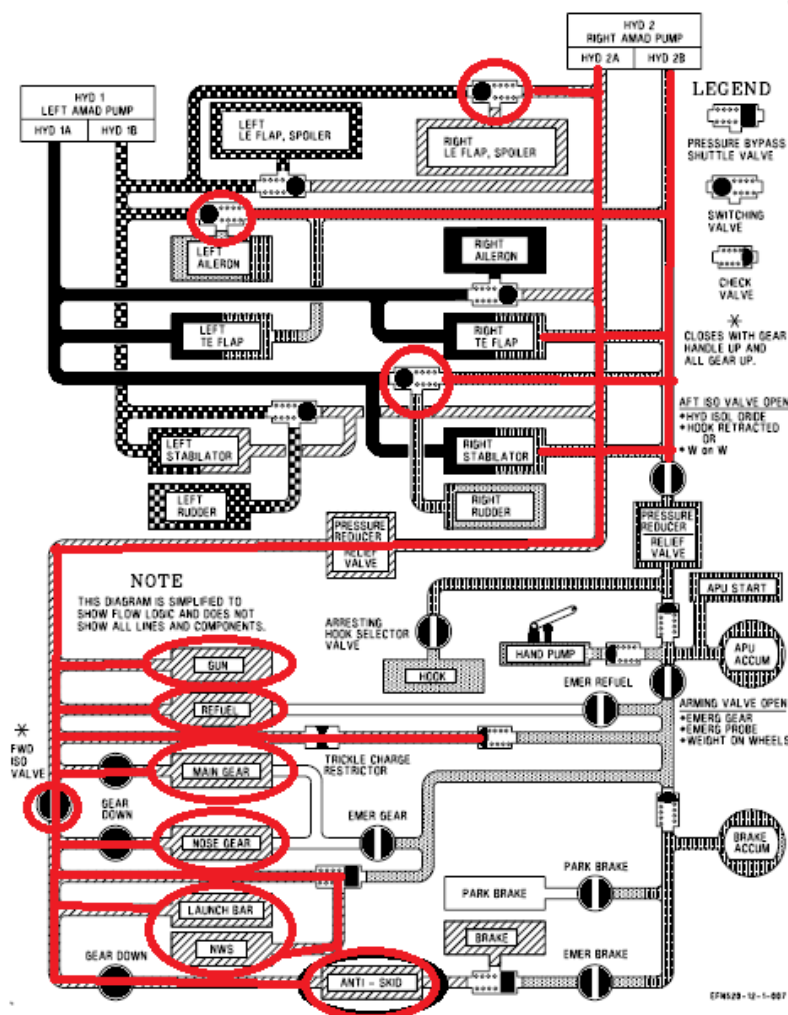


Figure 2-16. Hydraulic Flow

I-2-43

ORIGINAL

Kuva 23. F/A-18 E/F Superhornetin hydraulikkajärjestelmän kaavio [30].

Kuvassa 23 on esiteltyä Superhornetin hydraulikkakaavio. Kaaviosta voidaan lukea, että kyseisessä hävittäjässä on kaksi rinnakkaista hydraulikkajärjestelmää (HYD1 ja HYD2), joissa molemmissa on kaksi erillistä hydraulikkapiiriä. Itse HYD1- ja HYD2 järjestelmät ovat osittain redundanttisia, sillä HYD2- järjestelmällä on enemmän toimintoja, kuin HYD-1 järjestelmällä. HYD2- järjestelmän vikatapauksessa HYD1- järjestelmä kykenee suorittamaan ainoastaan lennon kannalta tärkeimmät tehtävät HYD-2- järjestelmän osalta.

Haavoittuvuuden kannalta on tärkeää, että redundanttinen komponentti tai järjestelmä on eristetty rinnakkaisesta komponentista tai järjestelmästä. Tällöin osuman saadessaan vioittunut järjestelmä ei tuhoa rinnakkaista järjestelmää, joka pahimmassa tapauksessa johtaisi hävittäjän tuhoutumiseen. Esimerkiksi hävittäjän moottorin tuhoutumisesta johtuva tulipalo ei saa edetä toiseen jäljellä olevaan moottoriin. Siksi hävittäjän moottorit tulee eristää toisistaan sekä fyysisesti, että järjestelmien osalta. [3, s. 697]

### **Komponenttien sijoittelu**

Komponenttien sijoittelu hävittäjän haavoittuvuuden pienentämisessä tarkoittaa menetelmää, jossa hävittäjän kriittiset komponentit sijoitellaan siten, että tuhoutumisen todennäköisyys osuman vaikutuksesta pienenee. Komponenttien sijoittelussa pyritään keskittymään seuraaviin seikkoihin:

- Sijoitetaan vähemmän kriittiset tai kestävämmät komponentit kriittisten komponenttien suojaksi
- Sijoitetaan kriittiset komponentit siten, että niiden haavoittuva pinta-ala on mahdollisimman pieni oletetusta uhkasuunnasta
- Ei redundanttisten kriittisten komponenttien asettelu päällekkäin, tai samaan ryhmään hävittäjän rungossa,
- Komponenttien sijoittelu tai eristäminen siten, että estetään muiden kriittisten komponenttien tuhoutuminen [3, s. 697]

#### **3.2.2 Aktiivinen- ja passiivinen vauriontorjunta**

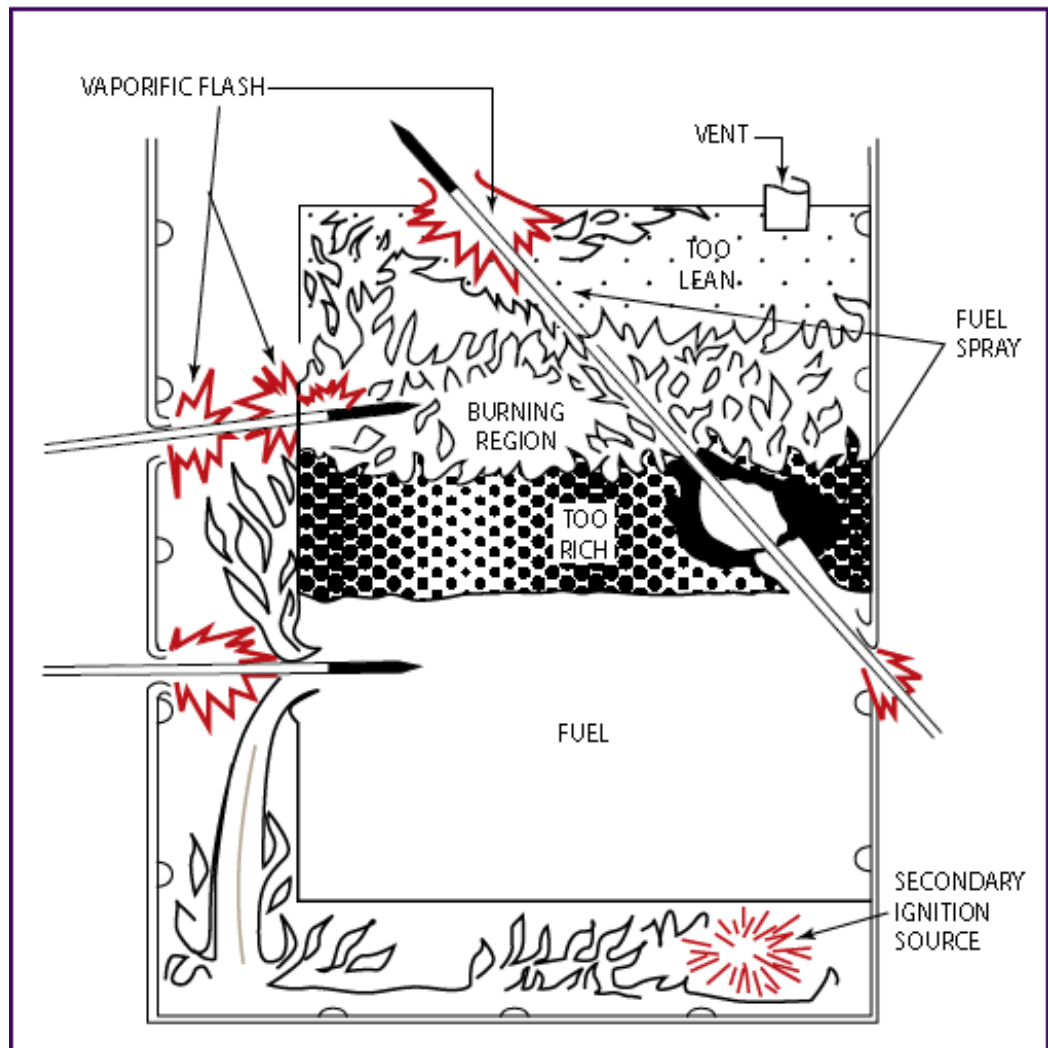
Passiivisessa vauriontorjunnassa pyritään pienentämään hävittäjän haavoittuvuutta ominaisuudella, joka sitoo itseensä vaurion tai pienentää osumasta aiheutuneita seurauksia. Passiivisessa vauriontorjunnassa käytetyt ominaisuudet eivät sisällä mitään vaurion havaitsevaa teknologiaa ja siksi järjestelmiä kutsutaan passiivisiksi. Aktiivinen

vauriontorjunta eroaa passiivisesta vauriontorjunnasta siten, että aktiivisessa vauriontorjunnassa käytetään vaurion havaitsevaa sensoria. Sensori havaitsee ja aktivoi toiminnon, joka sitoo itseensä vaurion tai pienentää osumasta aiheutuneita seurauksia. [3, s. 698-699]

### **Passiivisen vauriontorjunnan keinoja:**

1. Vaurioita kestävien rakenteiden ja komponenttien suunnittelu, jotka sietävät tietyn asteisia vaurioita ilman, että niiden toiminta estyy. Merkittävimpana vaurioita sietävänä rakenteena voidaan pitää hävittäjän polttoainesäiliötä. Lentokoneen polttoainesäiliöt muodostavat suurimman haavoittuvan pinta-alan lentokoneen rakenteissa. Operaatio Desert Stormissa 75% lentokoneiden menetyksistä johtui polttoainejärjestelmään liittyvistä ongelmista, joista suurimpana ongelmana oli polttoainesäiliössä projektiilin liike-energiasta aiheutuva hydrodynaaminen paineaalto. Paineaalto pahimmassa tapauksessa aiheuttaa polttoainesäiliöön suuria rakennemuutoksia ja repeymiä. Nykyään hävittäjän polttoainesäiliöt on suunniteltu kestävämmän kyseinen ilmiö. [21; 52]
2. Ballistisen suojan lisääminen hävittäjän rakenteissa, jossa tehdään halutut rakenteet vaurioita sietävistä materiaaleista [3, s. 698]. Esimerkiksi hydraulisten aktuaattoreiden koteloiden valmistaminen suojaaviksi kestävillä komposiittimateriaaleilla, jolloin kotelon rakenne suojaa aktuaattoria osumilta.
3. Viivästetyn vaurioitumisen suunnittelu, jossa vaurioitunut järjestelmä jatkaa toimintaansa tietyn ajanjakson [3, s. 698]. Esimerkkinä hävittäjän moottori, joka voitelujärjestelmän tuhouduttua jatkaa toimintaansa jopa 30 minuuttia ennen tuhoutumista.
4. Vuotojen torjunta, jossa käytetään hyväksi itse paikkaavia materiaaleja, jotka kestävät vaurioita ja estävät vuotoja nesteitä sisältävistä säiliöistä. Vuotojen torjunta on tärkeää nesteiden sisällä pysymisen varmistamiseksi. Yhtä tärkeänä osana vuotojen torjunnalla on estää vuotavan nesteen syttyminen säiliön ulkopuolelle tyrehdyttämällä mahdollinen vuoto [3, s. 698]. Esimerkkinä vuotojen torjunnasta on itse paikkaavat polttoainesäiliöt ja -polttoainelinjat.
5. Tulipalon- ja räjähdysten torjunta: Tulipalot ja räjähdykset tarvitsevat tapahtuakseen happea, syttyvää materiaalia tai kaasua sekä palonlähteen. Tulipalon- ja räjähdysten torjunta vaatii joko palon syttymisen estämisen, tai palon syttyttyä palorintaman

etenemisen estämisen. Palavien nesteiden ja kaasujen palon torjunnassa pyritään palavan nesteen tai kaasun, sekä hapen oikean seossuhteen syntymisen estämiseen. Keinoina voidaan pitää hävittäjän rungon sisällä olevien tyhjien tilojen (kuten moottoritila) tuulettaminen, polttoainesäiliön tyhjiön täyttäminen typpellä tai polttoainesäiliön täyttäminen osittain sienimäisellä polyuretaanirakenteella [8].



Kuva 24. Mahdollisia palon syttymissyitä polttoainesäiliön sisällä sekä ympäristössä [8]

6. Hävittäjän suunnitteleminen vikaturvalliseksi (engl. Fail-Safe). Vikaturvallinen on hävittäjän järjestelmän rakenneratkaisu, jossa vikaantuminen ei johda suoraan vaaratilanteisiin. [3, s. 699] Esimerkkinä hävittäjän moottorinohjausyksikkö, joka vikaantuessaan säättyy automaattisesti sellaiseen tilaan, joka mahdollistaa moottorin toiminnan jatkumisen. Vikatilassa moottori ei kuitenkaan toimi normaalisti, vaan vikatila mahdollistaa turvallisen paluun lähimpään tukikohtaan.

## **Aktiivinen vauriontorjunta**

Aktiivisen vauriontorjunnan järjestelmä eroaa passiivisesta järjestelmästä siten, että aktiivisessa järjestelmässä on sensori, joka havaitsee häiriötekijän ja aktivoi sen seurauksena toiminnon, joka estää vaurion tai pienentää vaurion vaikuttavuutta [3, s. 699]. Esimerkkinä Tulipalon sammutusjärjestelmä (engl. Linear Fire Extinguisher, LFE). LFE- järjestelmän tarkoituksena on estää projektiilin aiheuttama polttoainesäiliön räjähdys. LFE- järjestelmässä on sensori, joka havaitsee projektiilin aiheuttaman iskun. Sensori aktivoi sammutusjärjestelmän, joka estää polttoainesäiliön räjähtämisen aiheuttavan ylipaineen [4]. Toisena esimerkkinä RLS- järjestelmä (Reservoir Level Sensing), jonka tarkoituksena on hydraulikkavuodon sattuessa sulkea vioittunut hydraulikkalinja ja näin estää koko hydraulikkajärjestelmän tyhjeneminen [30].

### **3.2.3 Panssarointi ja komponenttien korvaaminen**

Panssaroinnin tarkoituksena on suojata hävittäjän kriittisiä komponentteja. Panssaroinnissa käytetään levyjä, jotka on valmistettu erityyppisistä komposiittimateriaaleista. Panssarointia kutsutaan parasiittiseksi, kun panssaroinnin tehtävänä on ainoastaan suojata jotain komponenttia. Parasiittinen panssarointi tulee kyseeseen, kun panssarointia asennetaan hävittäjän jälkikäteen. Paras vaihtoehto on ottaa panssarointi huomioon aikaisin hävittäjän suunnitteluprosessissa, jolloin panssarointi voidaan suunnitella osaksi hävittäjän rakennetta [3, s. 700].

Komponenttien korvaamisessa poistetaan kriittinen komponentti tai kriittinen komponentti korvataan vähemmän haavoittuvalla komponentilla [3, s. 700]. Esimerkkinä komponentin korvaamisesta on perinteisen hydraulikkajärjestelmän hydraulikkalinjojen korvaaminen sähköjohdoilla, jolloin haavoittuva pinta-ala pienenee. Kriittisen komponentin poistamisen esimerkkinä ovat UAV:t, jossa hävittäjän ohjaaja on poistettu.

## 4 VERTAILU

### 4.1 Vertailussa käytettävät konetyypit

Hävittäjän taistelunkestävyyden suunnittelu perustuu aina hävittäjälle suunnitellun toimintaympäristön mukaan. Siksi tässä vertailussa on pyritty hakemaan samaan tehtävään ja toimintaympäristöön tarkoitettuja hävittäjiä. Vertailu rajataan koskemaan kolmannen-, neljännen- ja viidennen sukupolven Yhdysvaltalaisvalmisteisia monitoimihävittäjiä. Hävittäjä sukupolvista on erityyppisiä tulkintoja, mutta tässä tutkimuksessa käytetään Australian ilmavoimien tulkintaa hävittäjä sukupolvista [1]:

1. Sukupolvi: 1945-1950- luvulla valmistettu hävittäjä. Suihkumoottori, lähisooninen, konventionaaliset aseet
2. Sukupolvi: 1955-1960- luvulla valmistettu hävittäjä. Supersooninen, tutka, ilmasta-ilmaan ohjukset
3. Sukupolvi: 1960-1970- luvulla valmistettu hävittäjä. multirooli- kyky, look-down/shoot-down, asekselin ulkopuolelle targetointi, puoliaktiiviset ohjukset, kyky näköetäisyyden ulkopuolella tapahtuvaan sodankäyntiin.
4. Sukupolvi: 1970-1980- luvulla valmistettu hävittäjä. HUD, sähköinen ohjausjärjestelmä
5. Sukupolvi: Stealth teknologia, multispektriset sensorit, verkottuneisuus

Hävittäjän ominaisuuksia voidaan päivittää uudemman sukupolven tekniikalla, jolloin hävittäjä sukupolvien erot pienenevät. Siksi vertailussa käytetään konetyypin perusvarustelua, jolloin sukupolvien erot ovat esillä näkyvämmiin. Vertailuun valittiin F-4B phantom II, F/A-18 C/D hornet sekä F-35 lightning II. Koneet ovat oman sukupolvensa edustajia ja koneet on suunniteltu samantyyppiseen toimintaympäristöön. Taistelunkestävyyden tutkimus alkoi F-4B:n aikakaudella, jolloin F-4B:n taistelunkestävyyttä parannettiin vietnamin sodan aikana. F-18C/D oli ensimmäinen konetyyppi, jossa taistelunkestävyys oli osana suunnitteluperusteita. F-35 oli ensimmäinen konetyyppi, jossa taistelunkestävyys oli yksi neljästä pääpilarista, jolle kone suunniteltiin. Vertailun tarkoituksena on saada käsitys taistelunkestävyyden kehityksestä taistelunkestävyyttä parantavien ominaisuuksien tasolla. Suurin osa suorituskykyä kuvaavasta datasta on salaista, joten vertailussa keskitytään julkisista lähteistä saatavaan dataan eri järjestelmien ominaisuuksista [3; 22].

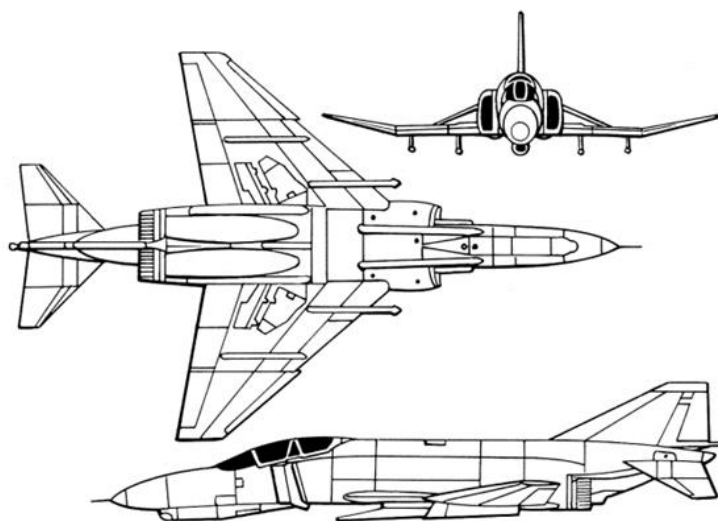
#### 4.1.1 Boeing (Mcdonnell Douglas) F-4B Phantom II

Phantom II on kaksimoottorinen, kaksipaikkainen pitkän matkan joka sään hyökkäyssotaan suunniteltu hävittäjä, joka edustaa kolmatta hävittäjä sukupolvea. Alun perin konetyyppi suunniteltiin US Navy:n tarpeita silmällä pitäen, mutta myöhemmin konetyypistä on tehty eri versioita eri tarpeisiin. F-4B versio on US Navy:n, F-4C USAF:n versio. Lisäksi vietnamin sodan aikana jatkokehitetty F-4E versio on varustettu tykillä. F-4:n ensimmäinen versio tuli palveluskäyttöön vuonna 1960 ja konetyypin valmistus lopetettiin vuonna 1979. Konetyyppiä valmistettiin yhteensä 5195 kappaletta. F-4 on tällä hetkellä käytössä Egyptissä, Kreikassa, Iranissa, Japanissa, Eteläkoreassa ja Turkissa [6].

F-4 on monitoimihävittäjä, joka on tarkoitettu ilmaherruushävittäjäksi, lähitulitukeen ja ilmapuolustuksen lamauttamisen tehtäviin. Aseistuksena F-4:ssä on sisäänrakennettu M-61A1- tyyppinen kanuuna, AIM-7 sparrow-, ja AIM-9 tyyppiset ilmasta ilmaan -ohjukset. Lisäksi pommitustehtäviä varten F-4:n voi varustaa erityyppisillä pudotettavilla pommeilla. F-4:ssä on seitsemän ripustus pistettä siivissä sekä keskirungossa. Tutkana F4:ssä on AN/APQ-120 pulssitutka [6].

Rakenteeltaan F-4 on kokometallinen pääosin alumiinista valmistettu hävittäjä. Rungon takaosassa on käytetty myös terästä ja titaania rakenteiden vahvistamiseksi. Rungon sisässä on kuusi polttoainesäiliötä. Lisäksi siipisalkojen välissä siivessä sijaitsee siipisäiliöt. F-4:n ohjausjärjestelmä toimii mekaanisesti kahden itsenäisen hydraulikkapiirin toimesta keino tunnan välityksellä ohjainpinnoille. Moottoreina F-4:ssä toimivat General Electricin J79-GE-17A ohivirtausmoottorit [31].





Pituus	19,20m
Korkeus	5,02m
Leveys	8,41m
Siipien kärkiväli	11,77m
Siipipinta-ala	49,2m <sup>2</sup>
Tyhjäpaino	14400kg
Max lentoonlähtöpaino	28030kg
Max laskupaino	20865kg
Tutkapoikkipinta-ala	6m <sup>2</sup>
Maksiminopeus	M 2,2
Maksimikorkeus	60000ft
Työntövoima	79,6kNx2

Kuva 25. F-4 Phantom II [5; 56]

#### 4.1.2 Boeing (McDonnell Douglas) F/A-18C/D Hornet

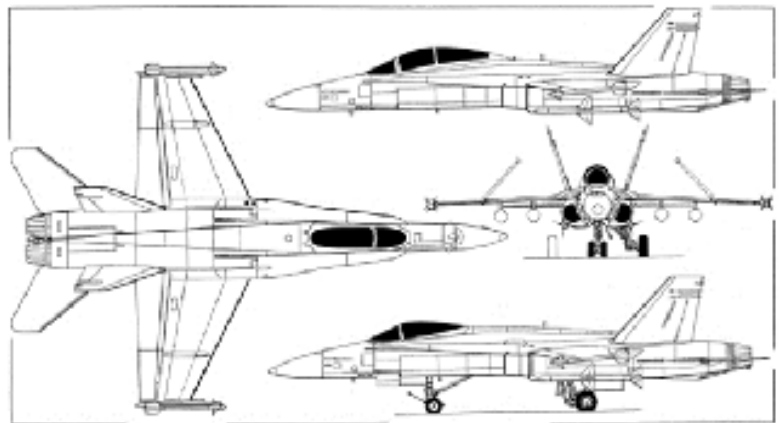
F/A-18 Hornet on yksi- kaksipaikkainen neljännen sukupolven monitoimihävittäjä, joka suunniteltiin korvaamaan US Navy:n vanhentuneet F-14 Tomcat- hävittäjät. F-18 on jatkokehitemmä kevyestä multiroolihävittäjä YF-17:sta. F-18 otettiin palveluskäyttöön vuonna 1980 ja viimeinen kone valmistui linjastolta vuonna 2000. Konetyypistä on tehty kahta versiota. Ensimmäinen versio on F/A-18A/B ja ensimmäisestä versiosta paranneltu ja modernisoitu versio on F/A-18C/D. Konetyyppeä on käytössä Yhdysvalloissa, Australiassa, Kanadassa, Suomessa, Kuwaitissa, Malesiassa sekä Sveitsissä [5].

F-18:ssa on yhdeksän ripustinpistettä, joihin voidaan varustaa aseistusta eri kombinaatioina. Pääaseistuksena F-18:ssa on kaksi AIM-9 Sidewinder- ohjusta, maksimissaan 8 AIM-120 AMRAAM aktiivista tutkaohjusta sekä M61A1 20mm gatling. Myös A/A ja A/G kuormien kombinaatiot ovat mahdollisia. Tutkana F-18:ssa on joko APG-65 tai APG-73 pulssidoppler -tutka, jolla on mahdollista seurata kymmentä maalia yhtäaikaaisesti. Lisäksi tutka mahdollista sekä ilmasta ilmaan, että ilmasta maahan operoinnin. Omasuojajärjestelmänä F-18:ssa on AN/ALR-67 tutkavaroinin, AN/ALE-47 heitinjärjestelmä, sekä AN/ALQ-165 häirintälähetin. Järjestelmät toimivat yhteistyössä toistensa kanssa. Järjestelmät toimivat automaattisesti tai manuaalisesti asetusten mukaan [5].

F-18:n runko on pääasiassa alumiininen, mutta suurin osa pintarakenteista on hiilikuitukomposiittia. Lisäksi suuremmalle rasitukselle joutuvat kohteet ovat joko titaania tai

suurlujuusterästä. F-18:n ohjausjärjestelmä on täysin digitaalinen fly-by-wire tyyppinen. Ohjausjärjestelmää hallinnoi kaksi lennonohjaustietokonetta neljällä eri kanavalla. Ohjauskäskyt välittyvät ohjainpinnoille kahden erillisen hydraulikkapiirin välityksellä. Polttoainetankit ja polttoainelinjat ovat itsepaikkaavia. Sisäistä polttoainetta neljässä runkosäiliössä, sekä kahdessa siipisäiliössä yhteensä 6061 litraa. F-18 on kaksimoottorinen hävittäjä. Moottoreina uusimmassa C/D versiossa toimivat General Electricin F404-GE-402 ohivirtausmoottorit. [5].

Pituus	17,07m
Korkeus	4,66m
Maksiminopeus	M1,8
Siipien kärkiväli	11,43m
Siipipinta-ala	37,2m <sup>2</sup>
Tyhjäpaino	10810kg
Max lentoonlähtöpaino	25,401kg
Maksimikorkeus	15240m
Tutkapaikkipinta-ala	1m <sup>2</sup>
Työntövoima	78,3kN x 2



Kuva 26. F/A-18C/D- Hornet [14]

#### 4.1.3 Lockheed Martin F-35 Lightning II

F-35 on yksipaikkainen, yksimoottorinen, häiveominaisuuksin varustettu monitoimihävittäjä. F-35 edustaa viidettä hävittäjä sukupolvea ja se on suunniteltu suorittamaan sekä ilmasta ilmaan, että ilmasta maahan -tehtäviä. Hävittäjästä on kolmea eri versiota: F-35A (CTOL – Conventional Takeoff And Landing) Yhdysvaltojen ilmavoimille, F-35B (STOVL – Short Take-off And Landing) Yhdysvaltojen merijalkaväelle, sekä F-35C (CATOBAR – Catapult Assisted Take-off Barrier Assisted Recovery) Yhdysvaltojen laivastolle. Konetyyppejä ovat tilanneet: Yhdysvallat, Englanti, Australia, Kanada, Tanska, Italia, Alankomaat, Norja, Israeli, Etelä-korea, ja Turkki [13].

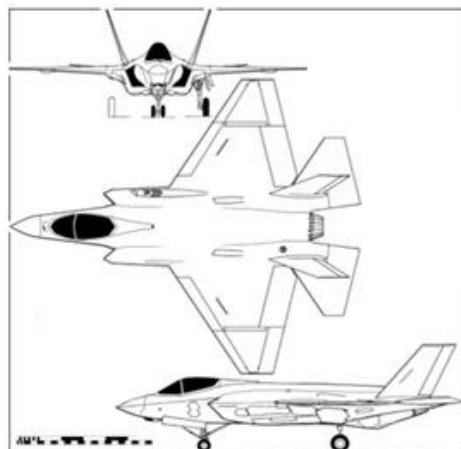
F-35 teki ensilentonsa vuonna 2006 ja se saavutti operatiivisen valmiuden 17.helmikuuta 2016. F-35:n rakenteissa on käytetty enenevässä määrin hiilikuitua ja muita komposiittimateriaaleja. F-35:n ohjausjärjestelmä on täysin sähköinen. Käskyt ohjainpintojen aktuaattoreille liikkuvat sähköisesti ja aktuaattoreina toimivat ensimmäistä kertaa sotilaskoneessa elektrohydraattiset aktuaattorit. F-35:n polttoainejärjestelmän paloja

ehkäisee OBIGGS- järjestelmä, joka tuottaa tyypeä polttoainesäiliön paineistuksessa käytettävään ilmaan.

F-35:n taistelunkestävyys perustuu pitkälti uhka-alttiutta vähentäviin häiveominaisuuksiin, sekä laajalla spektrin alueella toimivaan omasuojajärjestelmään. Omasuojajärjestelmään kuuluvat AN/AAQ-37 elektro-optinen maalinnus- ja omasuojajärjestelmä, sekä AN/ASQ-239 elektronisen sodankäynnin omasuojajärjestelmä. F-35:n sensorifuusio on viety kaikkein pisimmälle nykypäivän hävittäjistä. Sensorifuusion avulla hävittäjän ympäristöstä laajalla spektrillä kerätty data esitetään ohjaajalle loogisesti näyttölaitteella. Data parantaa ohjaajan tilannetietoisuutta, jonka avulla ohjaaja kykenee tekemään oikeita taktisia päätöksiä taistelukentällä [13].

Aseistuksena F-35:ssä on AN/APG-81 elektronisesti skannaava tutka, AIM-9X infrapunaohjus, AIM-120 AMRAAM aktiivinen tutkaohjus sekä ilmasta maahan aseistusta. F-35:n aseistus sijoitetaan lähtökohtaisesti neljään sisäiseen ripustuspisteeseen. Rungon sisäinen ripustus pienentää merkittävästi hävittäjän tutkapoikkipinta-alaa sekä ilmanvastusta [13].

Pituus	15,67m
Korkeus	4,45m
Maksiminopeus	1,6M
Siipien kärkiväli	13,11m
Siipipinta-ala	62,1m <sup>2</sup>
Tyhjäpaino	15785kg
Max lentoonlähtöpaino	31751kg
Maksimikorkeus	15240m
Työntövoima	191,3kN
Tutkapoikkipinta-ala	0,00143m <sup>2</sup>



Kuva 27. F-35 lightning II [13]

## 4.2 Vertailun lähtökohta

Vertailussa vertaillaan Yhdysvaltalaisvalmisteisien 3.-5. sukupolven multirooli-hävittäjien taistelunkestävyyttä parantavia ominaisuuksia. Vertailu on jaoteltu uhka-alttiutta vähentäviin ominaisuuksiin ja haavoittuvuutta vähentäviin ominaisuuksiin. Taistelunkestävyyttä parantavien ominaisuuksien suorituskyky on salaista tietoa. Tämän työn turvallisuusluokitus on julkinen, jonka vuoksi vertailussa tarkastellaan ainoastaan julkisista lähteistä saatavia tietoja vertailtavista koneyksilöistä. Vertailussa vertaillaan keskeisimpiä taistelunkestävyyteen

vaikuttavia ominaisuuksia. Vertailu perustuu kirjallisuudesta saataviin lähteisiin ja pohdinta perustuu kirjoittajan omaan ammattitaitoon aiheesta.

Hävittäjän taistelunkestävyyttä parantavien ominaisuuksien tärkeyttä kuvaa hyvin kill chain -kaavio (kuva 2). Hävittäjän täytyy kyetä katkaisemaan kill chain, jotta hävittäjä selviytyy vihollisen asejärjestelmän vaikutukselta. Taistelunkestävyyttä parantavat ominaisuudet ovat tehokkaimpia ja yleensä edullisimpia ketjun alkupäässä. Järjestys tehokkaimmasta tehottomimpaan ominaisuuteen: Taktiikka, Häiveominaisuudet, varoittimet, Häirintälähettimet ja valemaalit, sekä haavoittuvuutta vähentävät ominaisuudet [16]. Vertailu tullaan tekemään tässä järjestyksessä kill chain:n mukaan.

### 4.3 Uhka-alttiuden vertailu

Taulukko 5. Vertailtavien konetyyppien keskeiset uhka-alttiutta vähentävät ominaisuudet.

<b>Uhka-alttiutta vähentävät järjestelmät</b>			
<b>Konetyyppi</b>	<b>F-4B</b>	<b>F-18 C/D</b>	<b>F-35</b>
<b>Häiveominaisuudet</b>			
Tutka-alue	- (RCS 6m <sup>2</sup> ) [42; 56]	-/x (RCS 1m <sup>2</sup> ) [42; 56]	x (RCS 0,00143m <sup>2</sup> ) [42; 56]
Infrapuna-alue	-	-	x [22]
Näkyvän valon alue	x (maalaukset) [6; 31]	x (maalaukset / moottorit suunniteltu savuttomiksi) [5],	x (maalaukset / moottori suunniteltu savuttomiksi) [22]
<b>Varoittimet</b>			
RWR	x AN/ALR-50 (L-alue) [6; 31]	x ALR-67 [5; 32]	x AN/ASQ-239 [22; 29]
LWS			x AN/AAQ-37 [22; 29]
MAW	x AN/APR-27 [6; 31]		x AN/AAQ-37 [22; 29]
<b>Sensorifuusio</b>		x [5; 32]	x [22; 29]
<b>Omasuojahäirintä</b>		x AN/ALQ-165 Tutkahäirintä [5; 32]	
<b>Heitteet</b>			
soihdut	x AN/ALE-29 [6; 31]	x ALE-47 [5; 32]	x AN/ASQ-239 [22; 29]
silput	x AN/ALE-29 [6; 31]	x ALE-47 [5; 32]	x AN/ASQ-239 [22; 29]

### Häiveominaisuudet

Hävittäjän tutkakaikupinnan pienentäminen vaikuttaa suoraan uhkaavan tutkan havaintoetäisyyteen, sekä omasuojahäirinnän tehokkuuteen [3, s. 562]. Vertailussa käytettävät

RCS:t ovat julkisista lähteistä, eikä niissä ole ilmoitettu katselukulmaa. Oletan, että arvot ovat minimiarvoja, jotka yleisesti ottaen ovat etusektorista ilman asekuormaa. F-4B:n RCS on  $6\text{m}^2$ , joka vastaa keskimääräistä hävittäjää ilman stealth- ominaisuuksia. F-18 C/D- mallin suunnittelussa on otettu huomioon tutkakaikupinnan pienentäminen, mutta hävittäjä ei edusta stealth- teknologiaa. F-18C/D:n RCS on  $1\text{m}^2$ , joka on ihmisen kokoluokkaa. F-35 edustaa stealth- teknologiaa. F-35:n RCS on  $0,00143\text{m}^2$ , joka on hyönteisen kokoluokkaa.

Koneiden havaintoetäisyyksiä voidaan verrata tutkayhtälöllä:

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4 \cdot \pi)^3 \cdot \text{Pr. min}}} \quad (8) [24]$$

,missä

$P_t$  = tutkan lähetysteho

$G$  = tutkan antennivahvistus

$\lambda$  = tutkan aallonpituus

$\sigma$  = tutkapoikkipinta-ala

Pr. min = pienin vastaanotettavissa oleva teho, jolla maali voidaan havaita

Ainoa muuttuja kaavassa on tutkapoikkipinta-ala, kun vertaillaan hävittäjien tutkapoikkipinta- alan vaikutusta tutkan havaintoetäisyyteen. Siksi voidaankin supistaa yhtälön muut muuttujat pois. Havaintoetäisyyksien vertailu kahden koneen välillä voidaan esittää:

$$\frac{R_{\max}(\sigma_2)}{R_{\max}(\sigma_1)} = \left( \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (9) [3, s. 562]$$

Tutkan havaintoetäisyys  $R_{\max}$  tietylle hävittäjälle määräytyy  $\sigma^{\frac{1}{4}}$  :n mukaan [3, s. 562].



Kuva 28. Vertailtävien hävittäjien havaintoetäisyyksien suhde.

Kuvassa 28 on vertailtävien hävittäjien havaintoetäisyyksien suhde, joka määräytyy kunkin hävittäjän RCS:n mukaan. Kuvasta voidaan päätellä, että mikäli F-4B havaitaan tutkalla aikaisintaan 100km etäisyydeltä, on vastaava etäisyys F-18C/D:llä 64km ja F-35:llä 12km. Tämä ero havaintoetäisyyksissä on merkittävä ja se vaikuttaa hävittäjän toimintamahdollisuuksiin ja käytettävään taktiikkaan. Käytännössä F-35:llä on mahdollista suorittaa ammunta ja irtiotto tilanteesta siten, että vihollisen asejärjestelmä ei havaitse kohdetta lainkaan.

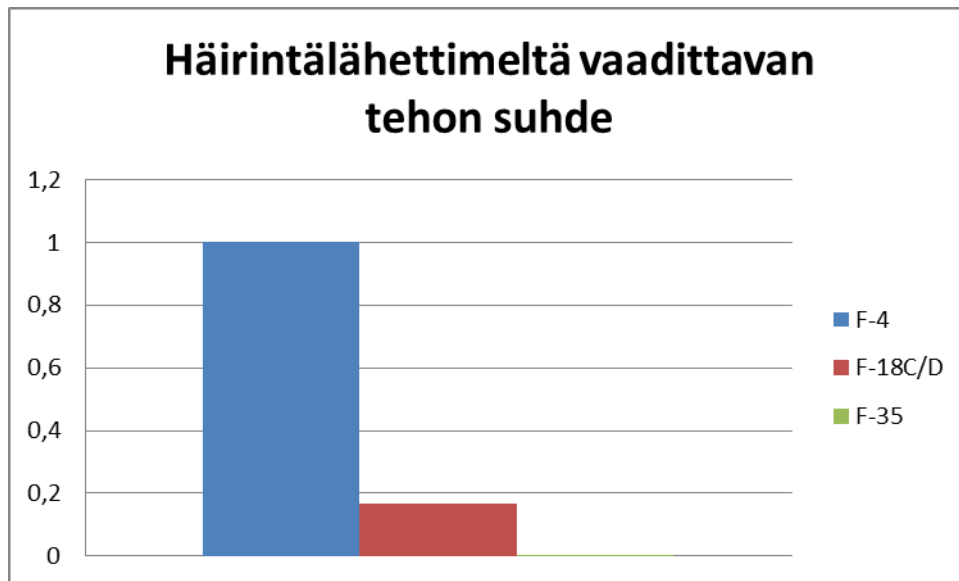
RCS:n avulla voidaan myös vertailla tutkan läpipolttotoetäisyyttä hävittäjien välillä. Läpipolttotoetäisyydellä tarkoitetaan sitä etäisyyttä, jolloin tutkan teho kykenee voittamaan häirintälähtetimen tehon ja maaliin voidaan lukittua. Tutkan läpipolttotoetäisyys  $R_B$  koneelle, jossa on omasuojahäirintälähtetin, määräytyy  $\sigma^{\frac{1}{2}}$ :n mukaan [3, s. 562].



Kuva 29. Vertailtävien hävittäjien läpipolttoetäisyyksien suhde.

Kuvassa 29 on havainnollistettu vertailtävien hävittäjien läpipolttoetäisyyksien suhde. Suurta tutkapaikkipinta-alaa voidaan kompensoida omasuojahäirinnällä. Häirintälähetin parhaassa tapauksessa kykenee estämään vihollisen asejärjestelmän aselaukaisun läpipolttoetäisyydelle saakka. Kuitenkin hävittäjän RCS vaikuttaa myös läpipolttoetäisyyteen. RCS:n vaikutus läpipolttoetäisyyteen on vielä merkittävämpi, kuin maksimaaliseen havaintoetäisyyteen. Mikäli F-4B:n läpipolttoetäisyys tietyllä asejärjestelmällä on 20km, vastaava etäisyys F-18C/D:llä on 8km ja F-35:llä 1,5km.

Hävittäjän RCS vaikuttaa lisäksi häirintälähtimeltä vaadittavaan tehoon. Vaadittava omasuojahäirintälähtimen teho  $J$ , määräytyy  $\sigma$  :n mukaan [3, s. 562].



Kuva 30. Vertailtavien hävittäjien häirintälähtimiltä vaadittavan tehon suhde

Kuvassa 30 on vertailtavien hävittäjien häirintälähtimiltä vaadittavan tehon suhde. Jos F-4B:n häirintälähtimeltä vaadittava teho olisi tietyllä etäisyydellä 100W, F-18C/D:ltä vaadittava teho olisi 17W ja F-35:ltä 0,00024W. Tästä voidaan päätellä, että RCS vaikuttaa merkittävästi häirintälähtimeltä vaadittavaan tehoon. Käytännössä Pienemmän RCS:n omaavan hävittäjässä saadaan samalla häirintälähtimellä moninkertainen hyöty verrattuna suuremman RCS:n hävittäjään.

F-4B:n suunnittelussa ei ole keskitytty häiveominaisuuksiin [13]. F-4B:n tutkapoikkipinta-ala vastaa tyypillistä kolmannen sukupolven hävittäjää, jossa ei ole otettu huomioon häiveominaisuuksia. Sen häiveominaisuudet ovat heikommat, kuin F-18C/D:n ja merkittävästi heikommat, kuin F-35:n. F-4B:ssä ei ole otettu huomioon infrapuna-alueen herätteiden pienentämistä, jonka vuoksi F-4B on alttiimpi IR-hakupäällä varustetuille ohjuksille. Ainoa näkyvän valon alueella tehty parannus F-4B:n havaittavuuden pienentämiseen on havaittavuutta pienentävä maalaus.

F-18C/D:n suunnittelussa on otettu huomioon häiveominaisuudet. F-18C/D:n RCS on kuusi kertaa pienempi, kuin F-4B:n. RCS:n pienennys on saatu aikaan koneen rakenteiden suunnittelulla siten, että hävittäjän RCS on suhteellisen pieni etenkin etusektoriin [5; 56]. F-18C/D:n suunnittelussa on otettu huomioon infrapuna-alueen havaittavuuden pienentäminen. Lisäksi näkyvän valon alueen havaittavuutta on pienennetty suunnittelemalla moottorit savuttomiksi.



F-35:n suunnittelun lähtökohtana on ollut havaittavuuden pienentäminen koko sähkömagneettisen spektrin alueella. RCS:n pienentäminen on keskittynyt etusektoriin. F-35:n RCS:n pienentäminen on saavutettu muotoilun, tutkasäteilyä imevän pinnoitteen, sekä sisäisten ripustuspisteiden avulla [22]. F-35:n RCS on etusektoriin 4200 kertaa pienempi, kuin F-4B:n ja 700 kertaa pienempi, kuin F-18C/D:n. Maksimaalisena havaintoetäisyytenä nämä luvut tarkoittavat 800% vähennystä verrattuna F-4:n havaintoetäisyyteen ja 500% vähennystä verrattuna F-18C/D:n havaintoetäisyyteen. F-35:n infrapuna-alueen havaittavuuden pienentämiseen on panostettu ja visuaaliseen havaittavuuteen ei ole eroa suhteessa F-18C/D:n tai F-4B:n [22].

### **Varoittimet**

F-4B:n varoittimet edustavat varoittimien ensimmäistä sukupolvea. F-4B:ssä on analoginen tutkavaroitin (AN/ALR-50), joka toimii L-alueella (1-2GHz). Varoitin antaa uhkasta audiosignaalin ja valaisevan asejärjestelmän suunnan erilliselle näyttölaitteelle. Varoitin ei kykene luokittamaan uhkaa. Tutkavaroitimen yhteydessä on ohjuslaukaisuvaroitin (AN/APR-27), joka käytännössä havaitsee ainoastaan valaisevan tutkan tehon muutoksen L-alueella. Varoitin varoittaa hävittäjän ohjaajaa ohjusuhkasta audiosignaalinä [6; 31].

F-18C/D:ssä varoittimet ovat digitaalisia ja kehittyneempiä, kuin F-4B:ssä. F-18C/D:ssä on ainoastaan tutkavaroitin (AN/ALR-67). Varoitin toimii C-J- alueella (0,5-20 GHz). AN/ALR-67:ssä on 6 antennia (2 matalille taajuuksille ja 4 korkeille taajuuksille) sekä 4 tutkasäteilyn suunnan havaitsinta (quadrant receivers). Varoitin kykenee havaitsemaan valaisevan asejärjestelmän suunnan sekä tutkamoodin. Lisäksi riippuen ladatusta uhkakirjastosta varoitin kykenee tunnistamaan uhkan. Tieto uhkasta välitetään hävittäjän ohjaajalle erilaisina audiosignaaleina, sekä visuaalisesti eri näytöille [4; 29; 32]. F-18C/D:n tutkavaroitin hoitaa osittain ohjusvaroittimen virkaa. Varoitus annetaan ainoastaan vihollisen asejärjestelmän tutkan toimintamoodin vaihdoksesta ja sen vuoksi järjestelmä ei kykene aukottomasti todentamaan ohjuslaukaisua. Lisäksi tutkavaroitin ei kykene havaitsemaan infrapunaohjusta. F-18C/D:n tutkavaroitin on kuitenkin merkittävästi kehittyneempi, kuin F-4B:n varoitin. Se toimii laajemmalla taajuusalueella ja jakaa tietoa enemmän, tarkemmin ja paremmassa muodossa, kuin F-4B:n tutkavaroitin. Tämä lisää hävittäjän ohjaajan tilannetietoisuutta, joka edistää taktista päätöksentekokykyä ja sitä kautta pienentää hävittäjän uhka-alttiutta.

F-35:ssä on AN/ASQ-239 ”Barracuda” –elektronisen sodankäynnin järjestelmä (engl. Integrated Defensive Avionics Suite – IDAS). Järjestelmä käsittää tutkavaroitimen, heittimen sekä häirintälähtetimen. Lisäksi F-35:ssä on elektro-optinen AN/AAQ-37- järjestelmä (engl.

Electro-Optical Distributed Aperture System – EO DAS). AN/AAQ-37 on infrapunasensoreista koostuva järjestelmä, joka käsittää ohjusvaroittimen (MAW), laservaroittimen (LWS), sekä infrapuna etsintä- ja seurantajärjestelmän (IRST). F-35:n tutkavaroinin kykenee havaitsemaan, paikantamaan ja tunnistamaan kaikista suunnista valaisevat tutkat. Ohjusvaroitin havaitsee ammutun ohjuksen lähettämän lämpöjäljen kaikista uhkasuunnista [29; 22] Käytännössä F-35 eroaa varoittimien osalta F-4B:stä ja F-18C/D:stä elektro-optisten sensoreiden osalta. F-35 kattaa suuremman osan sähkömagneettisesta spektristä sensoreillaan. F-35 on vertailtavista koneista ainoa, joka kykenee varoittamaan lähestyvistä infrapunaohjuksista. Lisäksi F-35:n järjestelmät ovat integroituja, eivätkä erillisiä edellisten sukupolvien tapaan.

### **Häirintälähetimet**

F-4B:n häirintälähetin on AN/ALQ-51, joka on suunniteltu S-alueen (2-4GHz) tutkahäirintään. F-18C/D:n häirintälähetin AN/ALQ-165 on automaattinen omasuojahäirintälähetin, joka on suunniteltu toimimaan kaiken tyyppisiä uhkia vastaan. F-35:n häirintälähetin on osa AN/ASQ-239- järjestelmää. Häirintälähetin kykenee häiritsemään kaikentyyppisiä uhkia sekä IR, että tutka-alueella [5; 6; 29; 31; 32; 51]. Muista hävittäjistä poiketen F-35:n häirintälähetin kykenee häiritsemään myös IR-hakupäitä. F-35:n häirintälähettimen häirinnän tehokkuus on väistämättä vertailun paras pienimmän RCS:n myötä. F-18C/D:n häirintälähetin eroaa F-4B:n lähettimestä suuremman taajuusalueen ja automaattisuuden osalta. Lisäksi F-18C/D:n RCS on pienempi, kuin F-4B:n, jolloin häirintälähettimen tehokkuus on parempi.

### **Heitteet**

F-4B:n heitin on mallia AN/ALE-29. Se kykenee heittämään soihtuja ja silppuja. Järjestelmä on täysin manuaalinen, eikä sitä ole integroitu muiden järjestelmien kanssa [6; 31]. F-18C/D:n heitin on mallia AN/ALE-47. Se kykenee heittämään soihtuja ja silppuja. Heitin voidaan ohjelmoida etukäteen ja sillä on kolme toimintamoodia: automaattinen, puoliautomaattinen sekä manuaalinen. Automaattisessa moodissa heitin käyttää RWR:ltä saatua tietoa vihollisesta hyväkseen ja heittää tarvittavan määrän soihtuja ja silppuja uhkakirjaston mukaan [5; 32]. F-35:n heitin on osa AN/ASQ-239-järjestelmää. Heitin on täysin automaattinen. Heitin käyttää hyväkseen kaikilta koneen sensoreilta saatua dataa, minkä perusteella se kykenee toimimaan optimaalisesti [22; 29]. F-4B:n heitin-järjestelmä on vertailtavista hävittäjistä yksinkertaisin ja se jättää kaiken päätöksenteon hävittäjän ohjaajalle. Lisäksi heitettävien soihtujen ja silppujen määrä ja sekvenssit jäävät täysin hävittäjän ohjaajan päätettäväksi. F-18C/D:n järjestelmä

käyttää hyväkseen RWR:n uhkatietoa ja sen avulla järjestelmä kykenee uhkakirjaston mukaan käyttämään haluttua heitinsekvenssiä. Ohjaajan päätettävissä on, käyttääkö hän järjestelmää manuaalisena, puoli-automaattisena vai automaattisena. F-35:n järjestelmä käyttää sensoreita laajemmalla spektrin alueella. Lisäksi se käyttää silppuja ja soihtuja täysin automaattisesti. Järjestelmä vähentää eniten ohjaajan työkuormaa vertailtavista koneyksilöistä.

### **Sensorifuusio**

F-4B:n uhka-alttiutta pienentävät järjestelmät ovat itsenäisiä kokonaisuuksia. Ne eivät keskustele keskenään ja lisäävät ohjaajan kuormittumista. F-18C/D:n järjestelmät ovat erillisiä, mutta ne keskustelevat keskenään. Tämä sensorifuusio vähentää ohjaajan kuormitusta merkittävästi. F-35:ssä on vain kaksi erillistä järjestelmää, jotka keskustelevat keskenään. F-35:n etuna on suuremman alan kattaminen sähkömagneettisessa spektrissä, sekä pidemmälle viety automaatio.

## 4.4 Haavoittuvuuden vertailu

Taulukko 6: Vertailtavien konetyyppien keskeiset haavoittuvuutta vähentävät ominaisuudet.

<b>Haavoittuvuutta vähentävät järjestelmät</b>			
<b>Konetyyppi</b>	<b>F-4B</b>	<b>F-18C/D</b>	<b>F-35</b>
<b>Polttoaine/palot</b>			
Polttoainesäiliön tyhjiön palontorjunta	-	x passiivinen (polyuretaani vaahtomuovi) [3; 32]	x aktiivinen OBIGGS [28]
Rungon tyhjiön palontorjunta	-	x (jäykkä, ballistinen vahto tankin ulkopinnassa) [3]	-
Itse paikkaavat polttoainesäiliöt	-	x (syöttötankkien pohjat) [32]	-
Itse paikkaavat polttoaineputket	-	x (putket polttoainesäiliön sisässä, päätelinekuilussa päällystetty itse paikkaavalla vaahdolla) [3], [49]	-
Palonaran nesteen sulkuventtiilit	myöhemmät versiot	x [3; 32]	-
<b>Propulsio</b>			
Monimoottorisuus	x [31]	x (moottoreiden koko vs teho parannettu)	-
Moottorin palon sammutus	myöhemmät versiot	x Moottorin/AMAD:n palon sammutus, APU:n palon sammutus[32]	-
<b>Ohjausjärjestelmä</b>			
Hajauttaminen	x [31]	x FCSA ja FCSB tietokoneet, RLS [32]	x EHA [28]
Redundanttisuus	x [31]	x HYD1A/B, HYD2A/B [32]	x
<b>Ballistinen suoja</b>			
Ohjaamo	-	-	-
Aseistus	-	-	-

## **Polttoaine ja palot**

F-4B:n suunnittelussa ei ole alun perin otettu huomioon haavoittuvuutta vähentävää teknologiaa. Tästä syystä kyseisessä konetyypissä ei ole polttoainevuotojen- ja palon torjuntaan liittyviä ominaisuuksia. Kuitenkin Vietnamin sodan aikana kyseiseen konetyyppiin tehtiin jälkikäteen asennettuja parannuksia. Näitä parannuksia ei oteta tässä vertailussa huomioon [3, s. 98].

F-18C/D:n palon- ja polttoainevuotojen torjuntaan on keskitytty heti konetyypin suunnittelun alkumetreillä [3, s. 134]. Polttoaineen vuotojen varalle F-18C/D:ssä on itse paikkaavalla materiaalilla pinnoitetut polttoaineen syöttösäiliöt, jolla pystytään takaamaan jatkuva polttoaineen syöttö molemmille moottoreille. Lisäksi Erilliset syöttösäiliöt syöttävät polttoainetta omalle moottorille. Polttoaineputket on sijoitettu kulkemaan mahdollisimman paljon säiliöiden sisällä, jolloin vuototapauksissa polttoaine vuotaa tankkeihin. Niissä kohdissa, joissa polttoainelinjat kulkevat säiliön ulkopuolella on linjat suojattu itse paikkaavalla vaahdolla. Lisäksi molempien moottoreiden polttoaineen syöttölinjat sekä siipisäiliöt on varustettu sulkuventtiilein vuotojen ja palon varalta. F-18C/D:n palontorjunta polttoaineen osalta perustuu siivissä olevaan polyuretaani vaahtoon, sekä tankkien ulkopinnassa olevaan jäykkään ballistiseen vaahtoon [3, s. 709; 32]. Siivissä olevalla vaahdolla estetään räjähdysmäiset palot polttoainesäiliöiden tyhjässä tilassa [3, s. 704]. Ballistisella vaahdon tarkoitus on osumahetkellä täyttää polttoainesäiliön ja rungon välinen tyhjä tila. Vaahdolla estetään ilman ja mahdollisen vuotavan polttoaineen optimaalisen seoksen syntyminen ja sitä kautta estetään tulipalo polttoainesäiliön ulkopuolella [3, s. 705]

F-35:ssä ei ole polttoaineen vuotojen estämiseen liittyvää teknologiaa. Polttoainetankkien palon torjunta on toteutettu OBIGGS- järjestelmällä (On-Board Inert Gas Generating System). OBIGGS- järjestelmä tuottaa tyypellä rikastettua ilmaa moottorin vuodatusilmasta. Tyypellä rikastettu ilma vähentää polttoainesäiliössä olevan ilman happipitoisuutta. Happipitoisuuden lasku vähentää polttoainesäiliössä tapahtuvien palojen todennäköisyyttä merkittävästi [28].

F-4B on vertailun perusteella kaikkein haavoittuvin polttoaine vuodoille ja paloille polttoainejärjestelmän osalta, sillä kyseisessä konetyypissä ei ole mitään järjestelmää, mikä estäisi palon tai vuodon polttoainejärjestelmässä. F-35:n järjestelmät eivät estä polttoainevuotoja. Lisäksi palontorjunta rajoittuu ainoastaan polttoainesäiliön sisälle, jolloin vuototapauksissa palo voi syttyä polttoainesäiliön ulkopuolella. F-18C/D:n järjestelmät

kattavat sekä vuototilanteet, että palon torjunnan. F-18C/D:n ainoa heikkous on runkosäiliöiden tyhjiön palontorjunnan puute.

### Propulsio

F-4B sekä F-18C/D ovat kaksimoottorisia hävittäjiä. F-35 on yksimoottorinen hävittäjä. Moottori on hävittäjän kannalta kriittinen komponentti. F-35:n yksimoottorisuus on vakava puute haavoittuvuuden sekä luotettavuuden kannalta. Kaksimoottorinen hävittäjä on täysin lennettävissä yhdellä moottorilla, jolloin kaksimoottorisella hävittäjällä on varaa yksittäisen moottorin menetykseen, toisin kuin yksimoottorisella. Voidaankin sanoa, että F-35:llä ei ole redundanttisuutta moottorin osalta, joka on sen kriittinen komponentti.

F-4B:n moottori on General Electric J79 suora suihkumoottori. F-18C/D:n moottori on General Electric F404 ohivirtausmoottori. Molemmat moottorit tuottavat saman työntövoiman. J79 edustaa 1950-luvun teknologiaa ja F404 on 1980-luvun teknologiaa. F-35:ssa on Pratt & Whitneyn F-135 ohivirtausmoottori, joka edustaa uusinta moottoriteknologiaa [28; 31; 32].

Taulukko 7. Vertailtavien konetyyppien moottoreiden ominaisuuksia

	Pituus	Leveys	Paino	Työntövoima	Pinta-ala	Ohivirtaussuhde	Teho painosuhde
<b>J79</b>	5,3m [31]	1,0m [31]	1750kg [31]	79,6kN [31]	5,3m <sup>2</sup>	0 [31]	0,045kN/kg
<b>F404</b>	3,91m [13]	0,89m [13]	1035kg [13]	78,7kN [13]	3,91m <sup>2</sup>	0,34 [13]	0,076kN/kg
<b>F135</b>	5,59m [39]	1,17m [39]	1701kg [39]	191,3 kN [39]	6,54m <sup>2</sup>	0,57 [39]	0,11kN/kg

Ohivirtausmoottorin palokaasut ovat kylmempiä, kuin suoran suihkumoottorin, sillä ohivirtausmoottorissa osa ilmasta virtaa ahtimen ohi suoraan palotilaan. Tämä vähentää hävittäjän lähettämän lämpösäteilyn määrää, joka vaikuttaa suoraan IR-ohjusten hakeutumiseen [14]. F-4B:n J79- moottorissa ei ole lainkaan ohivirtausta [14]. F-18C/D:n F404- moottorissa ohivirtaussuhde on 0,34 ja F-35:n F135- moottorissa ohivirtaussuhde on 0,57 [32; 28]. Tämän perusteella F-35:n moottorin palokaasut ovat viileimmät ja niiden aiheuttama lämpöjälki on pieni.

Moottori on hävittäjän kriittinen komponentti. Sen pinta-ala vaikuttaa merkittävästi hävittäjän haavoittuvaan pinta-alaan. J79- moottorin pinta-ala on 5,3m<sup>2</sup>. Kahden moottorin muodostama pinta-ala on 10,6m<sup>2</sup>. F404- moottorin pinta-ala on 3,91m<sup>2</sup> ja kahden moottorin pinta-ala on 7,82m<sup>2</sup>. F-18C/D:n moottoreiden muodostama pinta-ala on 26% pienempi, kuin F-4B:n

moottoreiden muodostama pinta-ala. F-35:n F135- moottorin muodostama pinta-ala on 6,54m<sup>2</sup>. F-35:n moottorin muodostama pinta-ala on 39% pienempi, kuin F-4B:n moottoreiden pinta-ala ja 16% pienempi, kuin F-18C/D:n moottoreiden pinta-ala. F-4B:n moottorin teho painosuhte on 0,045kN/kg. F-18C/D:n moottorin teho painosuhte on 0,076kN/kg. F-35:n moottorin teho painosuhte on 0,11kN/kg. F-18C/D:n moottorin teho painosuhte on 41% parempi, kuin F-4B:n moottorin teho painosuhte. F-35:n moottorin teho painosuhte on 60% parempi, kuin F-4B:n moottorin teho painosuhte ja 31% parempi, kuin F-18C/D:n teho painosuhte.

Voidaan päätellä, että moottoritekniikka on mennyt eteenpäin vuosikymmenten aikana. F-35:n moottori on pinta-alaltaan pienempi ja teho painosuhteeltaan merkittävästi parempi, kuin F-4B:n tai F-18C/D:n moottori. F-35:n haavoittuvuus moottorin pinta-alan suhteen on pienin vertailtavista koneista. Lisäksi hyvä teho painosuhte parantaa hävittäjän suoritusarvoja ja sitä kautta pienentää uhka-alttiutta.

Moottorin palontorjunnan suhteen F-4B:ssä ei ole mitään palontorjuntaan liittyviä järjestelmiä. F-18C/D:ssä on moottorin palontorjuntajärjestelmä. Järjestelmässä on anturit, jotka havaitsevat moottorin palon. Järjestelmä varoittaa ohjaajaa moottoripalosta, jonka jälkeen ohjaaja voi aktivoida palon sammutusjärjestelmän. Sammutusjärjestelmän aktivoituessa, järjestelmä tyhjentää sammutusvaahdon moottoritilaan ja katkaisee polttoainesyötön palavalle moottorille. Lisäksi F-18C/D:ssä on APU:n palon sammutus. APU:n sammutusjärjestelmä käyttää samaa sammutusvaahtoa moottorin kanssa [32]. F-35:ssä ei ole mitään järjestelmää moottorin palontorjunnan suhteen.

F-4B ja F-35 ovat selvästi haavoittuvampia moottorin palontorjunnan suhteen, kuin F-18C/D. Palo voi helposti laajeta polttoainejärjestelmään, jonka jälkeen kone viimeistään tuhoutuu. F-35:ssä on vain yksi moottori, jonka vuoksi palontorjunta voi olla turhaa. Toisaalta maassa F-35:n palontorjunta voisi lisätä turvallisuutta ja pienentää haavoittuvuutta. Uskoisin, että palotilanteessa menetetään lähes poikkeuksetta koko hävittäjä, mikäli ei ole asianmukaista sammutusjärjestelmää.

### **Ohjausjärjestelmä**

Ohjausjärjestelmä on tärkein järjestelmä lentokoneen vakauden ja hallittavuuden säilyttämiseen [3, s. 712]. Tästä syystä ohjausjärjestelmän haavoittuvuuden minimointi on tärkeässä roolissa hävittäjän suunnittelussa.

F-4B:ssä on mekaaninen ohjausjärjestelmä. Se on toteutettu kahdella itsenäisellä hydraulikkapiirillä (PC1 ja PC2), sekä vaijereilla. Käskyt ohjaussauvalta siirtyvät vaijereiden välityksellä keinoautojärjestelmän kautta hydraulikkajärjestelmän aktuaattoreille. Molempien moottorien apulaitevaihteistoissa sijaitsevat hydraulikkapumput paineistavat PC1- ja PC2 piirit. Hydraulikkapiirit tuottavat painetta F-4B:n ohjainpinnoille: stabilaattoreille, spoilereille sekä siivekkeille. Toisen järjestelmän vikaantuessa jäljellä oleva järjestelmä kykenee tuottamaan hydraulipainetta kyseisille ohjainpinnoille (Liite 2) [31]. Hydraulikkapumput ja hydraulikkalinjat ovat siis redundanttisia F-4B:ssä. Kuitenkin F-4B:n hydraulikkajärjestelmä on suunniteltu luotettavuuden kannalta, eikä siinä ole otettu huomioon taistelunkestävyyttä. Esimerkiksi stabilaattorin aktuaattorin tuhoutuessa osuman johdosta molemmat järjestelmät vuotavat tyhjiin ja hävittäjän ohjattavuus menetetään [3, s. 98].

F-18C/D:ssä on fly-by-wire tyyppinen ohjausjärjestelmä. Ohjausjärjestelmä koostuu sauvan asentoanturista, kahdesta ohjausjärjestelmätietokoneesta, ohjainpintojen aktuaattoreista sekä kahdesta hydraulikkajärjestelmästä HYD1 ja HYD2. Hydraulikkajärjestelmiä paineistaa kaksi hydraulikkapumppua, jotka sijaitsevat molempien moottoreiden apulaitevaihteistoissa. Molemmat hydraulikkajärjestelmät koostuvat kahdesta hydraulikkapiiristä HYD1A/B sekä HYD2A/B. Käytännössä F-18C/D:n moottorit ovat redundanttisia, jotka pyörittävät redundanttisia hydraulikkapumppuja, joiden paineistamat hydraulikkajärjestelmät ovat osittain redundanttisia ristiin toisen hydraulikkajärjestelmän kanssa (Liite 2) [32]. Lisäksi F-18C/D:n molemmissa hydraulikkaneustesäiliöissä on RLS-järjestelmä (Reservoir Level Sensing), joka aistii hydraulikkapiirin vuodon ja tarvittaessa sulkee vuotavan piirin, jotta järjestelmän toinen toimiva piiri ei vuoda tyhjiin. F-18C/D:n kaikki ohjainpinnat toimivat kahden hydraulikkapiirin avulla. F-18C/D:n hydraulikkajärjestelmään on sijoitettu vaihtoventtiileitä kaikkien ohjainpintojen yhteyteen. Yhden ohjainpinnan aktuaattorin tuhoutuessa vaihtoventtiili aistii paineen menetyksen ja sulkee hydraulikkanesteen virtauksen kyseiselle aktuaattorille. Mikäli ohjainpinnan hydraulikkapiiri menetetään, kytkee vaihtoventtiili toisen piirin tuottamaan hydraulikkapainetta kyseiselle ohjainpinnalle ja samalla sulkee vioittuneen piirin [31]. F-18C/D:n ohjausjärjestelmän haavoittuvuus on lukuisten redundanttisuuksien, sekä vaihtoventtiilien ja RLS-järjestelmän ansiosta vähäisempi, kuin F-4B:n haavoittuvuus.

F-35:ssä on F-18C/D:n tapaan fly-by-wire tyyppinen ohjausjärjestelmä. Järjestelmä toimii käytännössä samalla tavalla sähköisesti ohjausjärjestelmätietokoneiden avulla. Käskyt aktuaattoreille kulkevat sähköisesti, kuten F-18C/D:ssä. F-35:n ohjausjärjestelmä eroaa



merkittävästi vertailtavista koneista, sillä siinä ei ole lainkaan hydraulikkapiirejä ohjainpinnoille. F-35:ssä on käytössä EHA- tyyppiset aktuaattorit (Electro Hydrostatic Actuator), joissa jokaisessa on sisällä sähkötoiminen hydraulikkapumppu, joka luo hydraulipaineen aktuaattorille (Liite 2). Lisäksi F-35:n siiven etureunan siivekkeet toimivat täysin sähköisillä aktuaattoreilla (ElectroMechanical Actuator- EMA). EHA:n ja EMA:n ansiosta F-35:n hydraulikkalinjat on korvattu sähköjohdoilla. Sähköjohdot ovat pinta-alaltaan pienempiä, painoltaan kevyempiä ja ne voidaan reitittää useaa reittiä pitkin. Lisäksi vältytään palon aralta hydraulikkaneesteeltä, joka voi edesauttaa tulipaloja.

F-35:n ohjausjärjestelmä on vähiten haavoittuva vertailtavista konetyypeistä. F-35:n ohjausjärjestelmässä on käytetty hyväksi komponenttien korvaamista, jossa haavoittuva komponentti (hydraulikkalinjat) korvataan vähemmän haavoittuvalla komponentilla (sähköjohdot). F-18C/D:n ohjausjärjestelmä edustaa vanhempaa teknologiaa, mutta siinä on otettu haavoittuvuus hyvin huomioon lukuisten järjestelmien ja redundanttisuuksien ansiosta. F-4B:n ohjausjärjestelmä on luonnollisesti vanhanaikaisin ja se omaa kriittisiä heikkouksia haavoittuvuuden kannalta.

## 5 YHTEENVETO

### 5.1 Tutkimuskysymyksiin vastaaminen sekä johtopäätökset

Tutkimuksen ensimmäisenä apukysymyksenä oli: Mistä seikoista taistelunkestävyys koostuu? Tutkimuskysymykseen on vastattu tutkimuksen toisessa pääluvussa. Taistelunkestävyys määrittää hävittäjän kykyä välttää tai sietää taistelukentän uhkia. Tätä kykyä voidaan mitata todennäköisyydellä, jolla hävittäjä selviytyy tietyn tyyppisestä uhkasta. Todennäköisyys koostuu todennäköisyydestä, millä hävittäjä saa osuman taistelukentällä (Uhka-alttius), sekä todennäköisyydestä, jolla hävittäjä selviytyy osumasta (Haavoittuvuus).

Taistelunkestävyyden tutkimus alkoi 1970-luvulta Yhdysvalloissa. Suurimpana vaikuttajana tutkimuksen aloittamiselle oli Vietnamin sodan suuret tappiot hävittäjien osalta. Taistelunkestävyys nähdään nykyään hävittäjän suunnittelun yhtenä tärkeimpänä kulmakivenä, jolla on suora vaikutus hävittäjän kokonaistehokkuuteen. Taistelunkestävyys tulee ottaa huomioon aikaisin hävittäjän suunnitteluprosessissa, jolloin saadaan otettua huomioon taistelunkestävyyden lisäksi myös muut hävittäjän ominaisuudet. Taistelunkestävyyttä kehitetään nykyään tietokonemallinnuksen, sekä simuloinnin avulla. Taistelunkestävyyden suunnitteluun vaikuttaa hävittäjän suunniteltu toimintaympäristö, sekä kustannustehokkuus. Asejärjestelmien tekninen kehitys on tuonut mukanaan kustannusten nousun. Tästä syystä myös taistelunkestävyyteen liittyvät ominaisuudet tulee optimoida kustannustehokkaiksi.

Tutkimuksen toisena alakysymyksenä oli: Mitkä hävittäjän ominaisuudet parantavat taistelunkestävyyttä? Taistelunkestävyyttä parantavat ominaisuudet jaetaan karkeasti hävittäjän uhka-alttiutta vähentäviin ominaisuuksiin ja hävittäjän haavoittuvuutta vähentäviin ominaisuuksiin. Uhka-alttiutta vähentävät ominaisuudet pyrkivät estämään vihollisen asejärjestelmien osumista hävittäjään. Haavoittuvuutta vähentävät ominaisuudet pyrkivät minimoimaan osuman vaikutukset hävittäjälle.

Uhka-alttiuden vähentämisen keinot, joihin ominaisuudet liittyvä ovat: Häiveominaisuudet, elektroniset omasuojajärjestelmät sekä suorituskyky. Häiveominaisuuksilla pyritään vähentämään hävittäjän havaittavuutta koko sähkömagneettisen spektrin alueella. Elektroniset omasuojajärjestelmät koostuvat varoittimista, uhkakirjastosta, keskustietokoneesta sekä häirintälähtetystä ja heitteistä. Suorituskykyyn liittyvät sellaiset ominaisuudet, joilla pyritään vaikuttamaan uhkaan offensiivisesti. Uhka-alttiutta vähentävät ominaisuudet ovat

päivitetävissä hävittäjän elinkaaren aikana. Ne ovat yleisesti halvempia ja tehokkaampia, kuin haavoittuvuutta vähentävät ominaisuudet.

Haavoittuvuutta vähentävät ominaisuudet pyrkivät minimoimaan mahdollisen osuman vaikutukset. Tavoitteena on joko pitkittää hävittäjän tuhoutumiseen kuluva aikaa siten, että hävittäjän ohjaaja kykenee pelastautumaan turvallisesti tai estää hävittäjän tuhoutuminen. Haavoittuvuuden vähentämisen keinoina ovat: Hävittäjän selviytymisen kannalta kriittisten komponenttien ja järjestelmien kahdentaminen (redundanttisuus) ja sijoittelu, Aktiivinen- ja passiivinen vauriontorjunta sekä panssarointi ja komponenttien korvaaminen.

Kriittisten komponenttien ja järjestelmien kahdentamisella pyritään vähentämään hävittäjän haavoittuvuutta ja lisäämään luotettavuutta. Sijoittelulla pyritään sijoittelemaan esimerkiksi redundanttiset komponentit eri puolille hävittäjää, jotta osuma yhdessä kohtaa hävittäjää ei tuhoaisi molempia järjestelmiä. Aktiivisella ja passiivisella vauriontorjunnalla pyritään minimoimaan hävittäjälle aiheutuneet vauriot. Järjestelmät voivat olla joko passiivisia tai vaurioon reagoivia, eli aktiivisia. Panssarointi on käytännössä ballistisen suojan lisäämistä kriittisten komponenttien ympärille. Hävittäjissä käytetään hyvin vähän ballistista suojaa sen painon vuoksi. Komponenttien korvaamisella pyritään vähentämään haavoittuvuutta korvaamalla haavoittuva komponentti vähemmän haavoittuvalla komponentilla.

Tutkimuksen pääkysymyksenä oli: Miten hävittäjän taistelunkestävyyttä parantavat keskeiset ominaisuudet ovat kehittyneet 3.- 5. sukupolven hävittäjissä? Kysymykseen vastattiin vertailun avulla, jonka tarkoituksena oli selvittää vertailtavien hävittäjien ominaisuudet, sekä niiden kehitys siirryttäessä seuraavaan hävittäjä sukupolveen. Vertailtavina konetyyppeinä olivat Yhdysvaltojen laivaston hävittäjät: F-4B Phantom II, F/A-18C/D Hornet, sekä F-35C Lightning II. Tutkielman toisessa pääluvussa selvitettiin, että taistelunkestävyys muodostuu uhka-alttiudesta, sekä haavoittuvuudesta. Kolmannessa pääluvussa selvitettiin hävittäjän taistelunkestävyyttä parantavat ominaisuudet. Vertailu tehtiin toisen- ja kolmannen pääluvun pohjalta. Vertailu jaettiin kahteen osioon: uhka-alttiuden vertailuun ja haavoittuvuuden vertailuun. Molempiin osioihin vertailtaviksi ominaisuuksiksi valittiin keskeisimmät taistelunkestävyyttä parantavat ominaisuudet.

Uhka-alttiuden vertailun perusteella voidaan päätellä, että uhka-alttiutta parantavat ominaisuudet ovat kehittyneet merkittävästi lähinnä laajemman sähkömagneettisen spektrin huomioon ottamisella kaikissa järjestelmissä. Häiveominaisuudet ovat kehittyneet merkittävästi siten, että kolmannessa sukupolvessa häiveominaisuuksia ei otettu huomioon, neljännessä sukupolvessa häiveominaisuuksiin oli otettu kantaa ja viidennessä sukupolvessa

häiveominaisuudet ovat olleet merkittävässä roolissa hävittäjän suunnittelun kannalta. Hävittäjien tutkapaikkipinta-ala on pienentynyt merkittävästi, joka vaikuttaa havaintoetäisyyksien lisäksi omasuojahäirinnän tehokkuuteen. Sensoreiden keräämän datan määrä on lisääntynyt merkittävästi kolmannelta viidenteen hävittäjä sukupolveen. Datan avulla hävittäjä kykenee väistämään taistelukentän uhkia ja datan määrä lisää hävittäjän ohjaajan tilannetietoisuutta, joka edelleen edistää taistelunkestävyyttä. Tärkeimmässä roolissa datan käsittelyyn ja vastatoimiin on sensoreiden fuusio, joka on kehittynyt merkittävästi. Kolmannen sukupolven hävittäjässä tieto eri järjestelmiltä esitetään vaikealukuisesti eri näyttölaittein. Neljännessä sukupolvessa kaikki data esitetään selkeämmin samalla näyttölaitteella. Viidennessä sukupolvessa sensorifuusio on viety pidemmälle älykkäämpien näyttölaitteiden, sekä laajemman spektrin omaavien sensoreiden ansiosta.

Haavoittuvuuden vertailun perusteella voidaan päätellä, että uhka-alttiutta parantavat ominaisuudet ovat kehittyneet merkittävästi kolmannelta neljännelle sukupolveen ja vain vähän neljännen ja viidennen sukupolven välillä. Polttoainejärjestelmän vuotoihin ja tulipaloihin liittyvät järjestelmät ovat kattavimmat neljännen sukupolven hävittäjässä. Kolmannen sukupolven hävittäjässä ei ole polttoainevuotoihin tai tulipaloihin liittyviä järjestelmiä. Viidennen sukupolven hävittäjässä ei ole polttoainevuotoja estäviä järjestelmiä. Viidennen sukupolven hävittäjässä on polttoainesäiliöiden tulipalon estämiseksi ainoastaan yksi järjestelmä. Moottoritekniikka on kehittynyt merkittävästi sekä taistelunkestävyyden, että haavoittuvuuden kannalta. Moottorit ovat nykyisin kevyempiä, tehokkaampia ja omaavat pienemmän haavoittuvan pinta-alan suhteessa saatavaan tehoon. Kuitenkin vertailussa ollut viidennen sukupolven hävittäjä oli ainut, joka oli yksimoottorinen. Yksimoottorisuus on merkittävä heikennys haavoittuvuuden kannalta. Ohjausjärjestelmän haavoittuvuus on vähentynyt merkittävästi.

Yhteenvetona uhka-alttiutta vähentävät ominaisuudet ovat kehittyneet merkittävästi kolmannelta viidenteen hävittäjä sukupolveen. Haavoittuvuutta vähentävien ominaisuuksien kehitys vaikuttaa hidastuneen ja haavoittuvuutta vähentävien ominaisuuksien määrä on selvästi vähentynyt kolmannelta viidenteen hävittäjä sukupolveen. Taistelunkestävyys määräytyy kokonaisuudessaan uhka-alttiudesta, sekä haavoittuvuudesta. Voidaan päätellä, että viidennen sukupolven hävittäjän taistelunkestävyys on saatu hyväksyttävälle tasolle parantamalla uhka-alttiutta vähentäviä ominaisuuksia. Tällöin on voitu katsoa, että haavoittuvuus ei näyttele enää merkittävää roolia hävittäjän suunnittelussa. Toisaalta kehitystä on voinut ajaa mahdollisesti kehittyneet ohjusten taistelukärjet, joiden osuma voi tuhota hävittäjän väistämättömästi. Lisäksi kehitykseen on voinut vaikuttaa haavoittuvuutta

vähentävien järjestelmien negatiivinen vaikutus suorituskykyyn ja haavoittuvuutta vähentävien järjestelmien suuri hinta. Hävittäjän suunnittelussa keskeisimpiä asioita nykypäivänä on kustannustehokkuus, joihin viidennen sukupolven hävittäjän yksimoottorisuus ja sähköhydraulinen ohjausjärjestelmä viittaa. Taistelunkestävyyden tutkimus on kehittynyt suurin harppauksin kolmen viimeisen hävittäjä sukupolven aikana. Yhä tehokkaammat simulaatio-ohjelmistot, sekä tietokonemallinnukset optimoivat hävittäjän taistelunkestävyyden uhkan mukaan. Tästä syystä uskon, että haavoittuvuuden vähentäminen on ollut tiedostettu tutkimukseen perustuva päätös.

## 5.2 Tutkimuksen luotettavuus

Tutkimus perustuu julkisiin lähteisiin ja se itsessään voi vaikuttaa tutkimuksen luotettavuuteen. Sotateollisuudessa järjestelmien suorituskyvyt ja mahdolliset heikkoudet ovat salassa pidettävää tietoa. Tutkimus ei tästä syystä käsittele tarkkoja lukuarvoja, eikä vertaile järjestelmien hyvyttä keskenään. Kuitenkin julkisista lähteistä saadusta datasta voi päätellä kehityssuuntia, joita tutkimus pääasiassa käsittelee. Lisäksi johtopäätökset perustuvat kirjoittajan omaan kokemukseen ja ammattitaitoon tutkielman aiheesta, joka lisää tutkimuksen luotettavuutta.

Tutkimuksessa käytetty lähdemateriaali painottuu länsimaiseen, ja erityisesti Yhdysvalloissa tehtävään tutkimukseen ja kehitystyöhön. Syinä tähän ovat englanninkielisten lähteiden suosiminen, sekä julkisista lähteistä saatavan tiedon keskittyminen länsimaisiin tutkimuksiin. Tästä syystä tutkimuksen vertailu rajattiin koskemaan ainoastaan yhdysvalloissa valmistettuja koneyksilöitä. Toisaalta vertailussa oli ainoastaan yksi kunkin hävittäjä sukupolven edustajista, jonka vuoksi tarkkojen johtopäätösten tekeminen voi olla kyseenalaista.

Tutkimuksen lähdemateriaalin painottuminen länsimaisiin lähteisiin voi kuitenkin vaikuttaa kirjallisuustutkimuksen tuloksiin. Toisaalta tutkimuksen päälähteenä on käytetty taistelunkestävyyden tieteenalan oppi-isän Robert E. Ball:n tutkimuksiin perustuvaa kirjaa taistelunkestävyydestä, johon myös tutkimuksessa käytetyt itämaiset tutkimukset nojaavat. Tutkimuksessa pyrittiin vertailemaan useammasta eri lähteestä saatua tietoa keskenään, jolla osittain varmistetaan lähteiden luotettavuus.

## 5.3 Jatkotutkimusehdotukset

Tutkimus on painottunut vahvasti länsimaissa tehtyyn tutkimukseen taistelunkestävyydestä. Lisäksi vertailu tehtiin ainoastaan yhdysvaltalaisien monitoimihävittäjien kesken. Tutkimusta

voisi jatkaa vertaamalla Venäläisvalmisteisten hävittäjien taistelunkestävyyttä parantavia ominaisuuksia länsimaiseen kalustoon. Vertailu voitaisiin myös tehdä laajemmalla otannalla.

Tämä tutkimus oli hyvin laaja ja yleisen pohjan antava tutkimus hävittäjän taistelunkestävyydestä. Siksi voitaisiin tehdä tutkimus, joka rajattaisiin koskemaan ainoastaan hävittäjän uhka-alttiutta tai haavoittuvuutta. Taistelunkestävyydestä voisi myös tehdä tutkimuksen koskien maa- tai merivoimien kalustoa.

Tutkimuksen päätelmissä esiintyi merkittävä muutos haavoittuvuutta vähentävien ominaisuuksien väheneminen viidennen sukupolven hävittäjässä. Tutkimus voisi etsiä vastausta sille, miksi viidennen sukupolven hävittäjän suunnittelussa haavoittuvuus ei näyttele enää niin suurta roolia. Lisäksi tutkimuksessa voisi kartoittaa hävittäjän taistelunkestävyyden tulevaisuutta.

## LÄHTEET

- [1] Air Power Development Centre Bulletin. *Five Generations of Jet Fighter Aircraft*. Royal Australian Air Force, 2012.
- [2] BAE systems. *AN/ALE-55 Fiber optic towed decoy*. [Viitattu 7.3.2017]. Saatavissa: <http://www.baesystems.com/en-us/product/anale55-fiberoptic-towed-decoy> viitattu 7.3.2017
- [3] Ball, R.E. *The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design*. 2<sup>nd</sup> edition. Blacksburg: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003. 889 s. ISBN 978-1-56347-582-5
- [4] Bennet, G. *Review of technologies for active suppression for fuel tank explosions*. Halon Options Technical Working Conference, 2000.
- [5] *Boeing (McDonnell Douglas) F/A-18 Hornet*. Jane's All The World's Aircraft. Posted 1.7.2016 [viitattu 9.2.2017]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/1337873>
- [6] *Boeing (McDonnell Douglas) F-4 Phantom II*. Jane's All The World's Aircraft. Posted 20.1.2017 [viitattu 9.2.2017]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/1337349>
- [7] Committee on weapons effects on airborne systems and Air Force studies board. *A Review of the Department of Defence Live Fire Test and Evaluation Program*. Washington, D.C: National academy press, 1993.
- [8] Couch, M. – Volpe, V. *Relationship between lower explosive limit and ullage combustion reactions*. Aircraft survivability journal, 2009. Summer, p. 20-24.
- [9] De Martino, A. *Introduction to modern ew systems*. Artech house, 2012. ISBN 978-1-60807-207-1
- [10] *Electronic-countermeasure – ECM*. [Viitattu 7.3.2017]. Saatavissa: <https://basicsaboutaerodynamicsandavionics.wordpress.com/2016/03/29/electronic-countermeasure-ecm/>

- [11] Erlandsson, T – Niklasson, L – Nordlund, P – Wartson,H. *Modeling fighter aircraft mission survivability*. Informatics Research Center. University of Skövde. Sweden, 2011. INSPEC 12177562
- [12] Frankenberger, C. *JSF full up system level testing*. Aircraft survivability journal, 2012. Spring, p. 13-15.
- [13] General Electric. *F 404 turbofan engines*. [viitattu 5.4.2017] Saatavissa: <https://www.geaviation.com/sites/default/files/datasheet-F404-Family.pdf>
- [14] Gilman, R. *Survivability considerations during aircraft conceptual design*. California: Naval postgraduate school, 1986.
- [15] Hall, D. – Ketcham, R. *Integrated survivability assessment*. Aircraft survivability journal, 2012. Fall. p. 23-25.
- [16] Heikell, J. *Electronic warfare self-protection of battlefield helicopters: a holistic view*. Teknillisen korkeakoulun sovelletun elektroniikan laboratorion julkaisusarja E: Elektronisia julkaisuja E18, Espoo 2005. ISBN 951-22-7546-5
- [17] *How was f-117 shot down?* [Viitattu 8.1.2017]. Saatavissa: <http://www.defenceaviation.com/2007/02/how-was-f-117-shot-down-part-1.html>
- [18] JCIDS. *Manual for the operation of the joint capabilities integration and development system*, 2015. [Online – Viitattu 21.9.2016]. Saatavilla www-muodossa: <http://www.acqnotes.com/wp-content/uploads/2014/09/Manual-for-the-Operation-of-the-Joint-Capabilities-Integration-and-Development-System-JCIDS-12-Feb-2015.pdf>
- [19] Jerome, C. *Fixed-wing aircraft combat survivability analysis for operation enduring freedom and operation Iraqi freedom*. Air Force Institute of Technology, Ohio, 2011.
- [20] Jun, L. – Wei, Y. – Yugang, Z. – Yang, P. – Youngsong, R. – Wei, W. *Aircraft vulnerability modeling and computation methods based on product structure and CATIA*. School of aeronautics, Northwestern polytechnical university. Xi'an, China, 2012.



- [21] Kangjie, Y. – Young, K. – Adams, C. – Liu, D. *Modeling and simulation of hydrodynamic ram for aircraft survivability*. Aircraft survivability journal, 2016. Fall, p. 21-31.
- [22] Keijsper, G. *Joint Strike Fighter: Design and Development of the International Aircraft*. Pen and Sword, 2008. ISBN 978-1844156313
- [23] *Kone-ja prosessiautomaation kunnossapito*. [Viitattu 9.3.2017] Saatavissa: <http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/koneautomaatio/luotettavuus.html>
- [24] Kosola, J. – Solante, T. *Digitaalinen taistelukenttä – informaatioajan sotakoneen tekniikka*. Maanpuolustuskorkeakoulu, sotatekniikan laitos, 2013. ISBN 978-951-25-2503-4
- [25] Lappalainen, E. – Jormakka, J. *Tekniset tutkimusmenetelmät maanpuolustuskorkeakoulussa*. Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, 2004. ISBN 951-25-1540-7
- [26] Leonard company. *Praetorian DASS (Defensive Aids Sub-System)*. [Viitattu 8.3.2017]. Saatavissa: <http://www.leonardocompany.com/en/-/praetorian-2>  
[viitattu 8.3.2017](#)
- [27] *Lockheed Martin F-35 Lightning II*. Jane's All The World's Aircraft. Posted 20.10.2016 [viitattu 7.4.2017]. Saatavissa: <https://janes.ihs.com/Janes/Display/1343368>
- [28] Moir, I. – Seabridge, A. *Aircraft Systems: Mechanical, electrical and avionics subsystems integration*. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. ISBN 978-0-470-05996-8
- [29] Moir, I. Seabridge, A. *Military avionics systems*. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006. 520 s. ISBN 1-56347-833-1
- [30] *Natops flight manual navy model F/A-18E/F 165533 and up aircraft*. Department of the navy naval air systems command, 2008.
- [31] *NATOPS Flight manual Navy model RF-4B Aircraft*. Department of The Navy Office of The Chief of Naval Operations. Washington, D,C, 1965.

- [32] *NATOPS Flight manual Navy model F/A-18C/D 161353 and up aircraft.* Department of The Navy Naval Air Systems Command, 2006.
- [33] Naval air warfare center aircraft division, patuxent river MD. *Advanced systems integration lab (ASIL).* [Viitattu 3.3.2017]. Saatavissa: [http://thehowlandcompany.com/RDT-E\\_facilities/ASIL.htm](http://thehowlandcompany.com/RDT-E_facilities/ASIL.htm)
- [34] Northrop-Grumman. *AN/AAQ-37 Distributed Aperture System (DAS) for the F-35.* [Viitattu 8.3.2017]. Saatavissa: <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/ANAAQ37F35/Pages/default.aspx> viitattu 8.3.2017
- [35] Northrop-Grumman.. *AN/AAR-54(V) Missile Approach Warning System (MWS).* [Viitattu 7.3.2017]. Saatavissa: <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/ANAAR54/Pages/default.aspx>
- [36] Northrop-Grumman. *B-2 Spirit stealth bomber.* [Viitattu 8.3.2017]. Saatavissa: <http://www.northropgrumman.com/Capabilities/B2SpiritBomber/Pages/default.aspx>
- [37] Olsen, J. *A History of Air Warfare.* Potomac Books, 2010. ISBN 978-1-59797-433-2
- [38] Ozdemir, L. *Analyzing the Multi-national Cooperative Acquisition Aspect of the Joint Strike Fighter (JSF) Program.* Naval Postgraduate School, 2009.
- [39] Pratt & Whitney. *F135 Specs Charts.* [viitattu 5.4.2017] Saatavissa: [www.pw.utc.com/Content/F135\\_Engine/Pdf/B-2-4\\_F135\\_SpecsChart.pdf](http://www.pw.utc.com/Content/F135_Engine/Pdf/B-2-4_F135_SpecsChart.pdf)
- [40] Raytheon. *AN/ALR-67 v3 Radar warning receiver.* [Viitattu 6.3.2017]. Saatavissa: <http://www.raytheon.com/capabilities/products/alr67/>
- [41] Raytheon. *High-Speed Anti-radiation Missile.* [Viitattu 9.3.2017]. Saatavissa: <http://www.raytheon.com/capabilities/products/harm/>
- [42] *Radar Cross Section, RCS.* [Online - Viitattu 8.2.2017]. Saatavissa: <http://www.globalsecurity.org/military/world/stealth-aircraft-rcs.htm>
- [43] *RIAT sun 19 Mig-29 Polish air force.* [Viitattu 9.3.2017]. Saatavissa: <http://forum.keypublishing.com/showthread.php?135714-RIAT-Sun-19-MIG29-Polish-A-F-What-was-theheavy-black-smoke-was-before-take-off>

- [44] Saab. *IDAS – integrated defensive aids system, self-defence for airborne platform*. [Viitattu 8.3.2017]. Saatavissa: <http://saab.com/air/electronic-warfare/self-protection-systems/idas/>
- [45] Santoso, I. *A system dynamics approach to aircraft survivability-attrition analysis*. Virginia Polytechnic Institute and State University, 1984.
- [46] Song, H. – Xiao, M. – Zhang, L. – Xiao, J. – Feng, D. *Generic model of aircraft susceptibility to radar under conditions of electronic counter measures*. Air Force Engineering University. Xi'an, China 2016. DOI 10.1109/MAES.2016.150044
- [47] Soban, D. – Mavris, D. *Methodology for Assessing Survivability Tradeoffs in the Preliminary Design Process*. Aerospace Systems Design Laboratory, Georgia Institute of Technology, 2000. 522 s. DOI 10.4271/2000-01.5589
- [48] Sotatekninen arvio ja ennuste 2025 STAE 2025, osa 1. Teknologinen kehitys. Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos, 2008.
- [49] Syrjälä, P. *Ilma-alusten omasuojajärjestelmien toiminnallisuus ja käyttäjävaatimukset*. Tampereen teknillinen yliopisto, 2010.
- [50] Ugrina, S. *Aircraft survivability, LFT&E, and the future*. Aircraft survivability journal, 2016. Spring, p. 11-14.
- [51] US Navy- kuvagalleria. *B-2 Spirit*. [Viitattu 7.3.2017]. Saatavissa: [http://www.navy.mil/view\\_image.asp?id=36363](http://www.navy.mil/view_image.asp?id=36363)
- [52] Varas, D. – Lopez-Puente, J. – Zaera, R. *Numerical Analysis of the Hydrodynamic Ram Phenomenon in Aircraft Fuel Tanks*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012. DOI 10.2514/1.J051613
- [53] Vogt, C. *EADS Deutschland GmbH. Training for Casa*, Finland. Academic course. Tikkakoski 03/2009 198 s.
- [54] Wikipedia. *Northrop YF-23*. [Viitattu 8.3.2017]. Saatavissa: [https://en.wikipedia.org/wiki/Northrop\\_YF-23](https://en.wikipedia.org/wiki/Northrop_YF-23)
- [55] Yang, P. – Ting, G. – Qiang, D. – Bifeng, S. *Kill tree analysis method and cad tool for aircraft complex system vulnerability assessment and safety design*.

Northwestern polytechnical university. XiAn, China, 2011. DOI 10.1109/ICICTA.2011.533

- [56] Yuricich, J. *Applying Radar Cross-Section Estimation to Minimize Radar Echo in Unmanned Combat Air Vehicle Design*. Department of Mechanical and Aerospace Engineering. Ohio State University, 2016.
- [57] Zhang, H. – Li, S. – Tong, Z. – Jiang, Y. *Survivability evaluation and sustainable developability integrated tradeoff methods for military aircraft*. Air Force Engineering University, P.R.China, 2006.

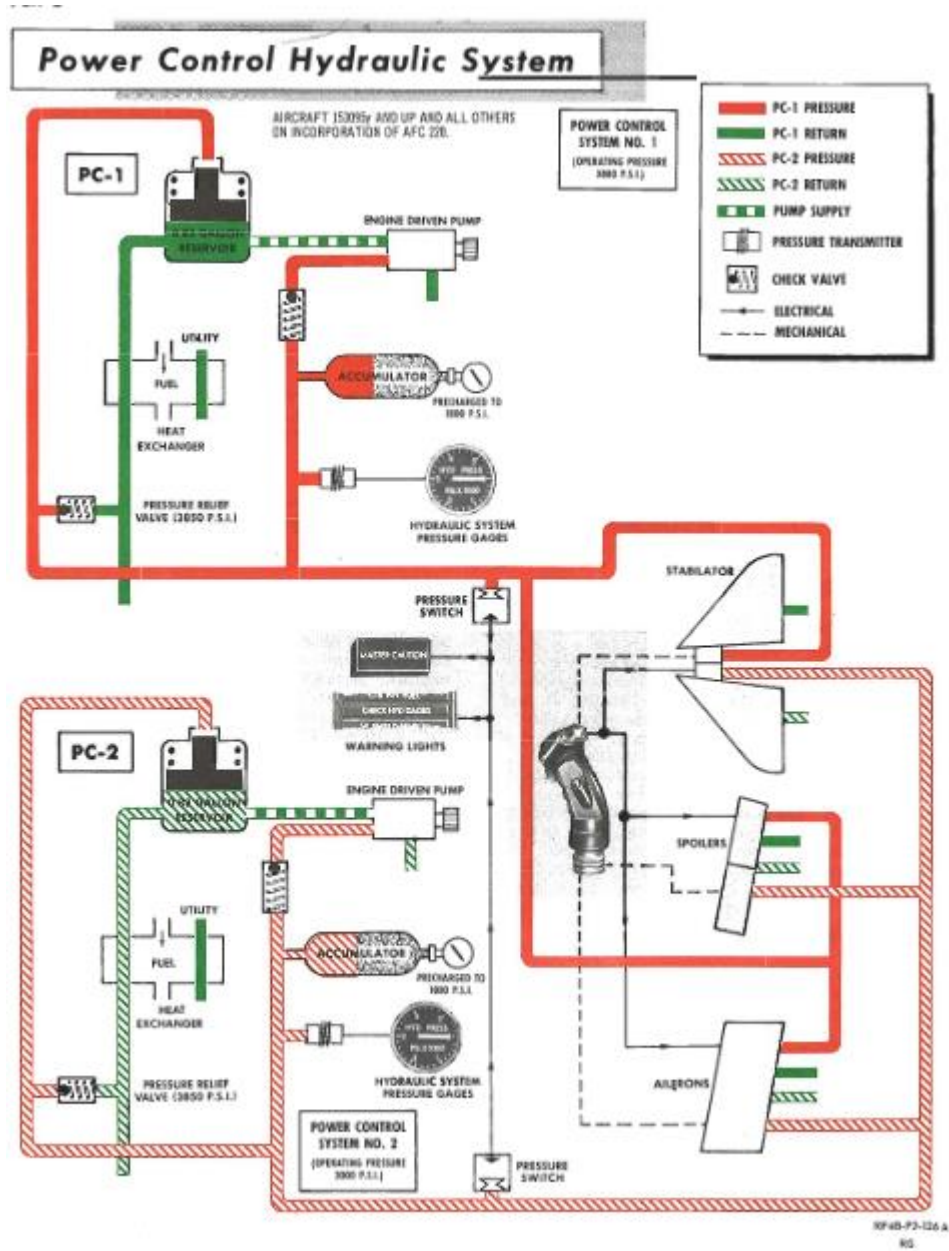
## **LIITTEET**

- LIITE 1      Esimerkkejä komponenttien eri tuhoutumistasoista
- LIITE 2      Vertailtavien koneyksilöiden ohjausjärjestelmän osia
- LIITE 3      Tutkielmassa esiintyvät lyhenteet

## Esimerkkejä komponenttien tuhoutumistasoista

Tuhoutumistaso	Esimerkkejä komponenttien tuhoutumisista:
<b>KK</b>	Tapahtumat jotka aiheuttavat hävittäjän välittömän tuhoutumisen:
	1. Polttoainesäiliön räjähtäminen
	2. Moottorin tuhoutuminen
	3. Siiven menetys
<b>K</b>	Kaikki edeltävät tapahtumat, joiden lisäksi seuraava tapahtuu 30s. Sisällä:
	1. Ohjaajan inkapasitaatio
	2. Hydraulipaineen menetys ohjausjärjestelmän aktuaattoreissa
	3. Polttoaineen syöttö tuhoutuneesta polttoainesäiliöstä, joka johtaa moottorin tuhoutumiseen
<b>A</b>	Kaikki edeltävät tapahtumat, joiden lisäksi seuraava tapahtuu 5min. Sisällä: Useita minutteja kestävä tulipalo, joka lopulta tuhoaa hydraulijärjestelmän tai tuhoaa molemmat moottorit tai aiheuttaa suurta savun tuloa ohjaamoon, joka johtaa ohjaajien heittoistuinhyppyyn 5 minuutin
<b>B</b>	Kaikki edeltävät tapahtumat, joiden lisäksi seuraava tapahtuu 30 min. sisällä: Generaattoreiden menetys, jonka vuoksi lennonohjaustietokoneet toimivat akkuvirralla.

Vertailtavien koneyksilöiden ohjauksjärjestelmän osia



F-4B:n hydraulikkakaavio ohjauksjärjestelmän osalta

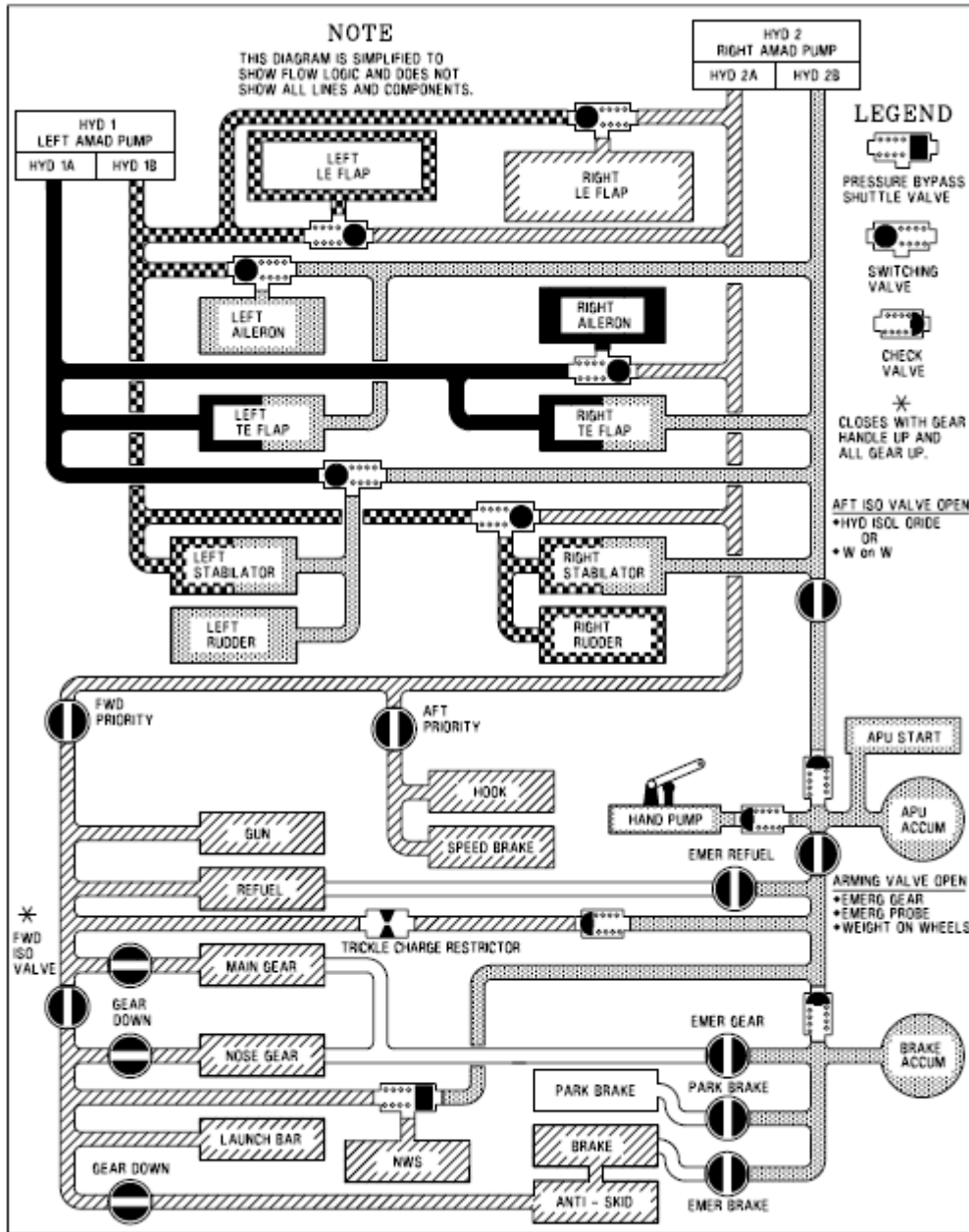
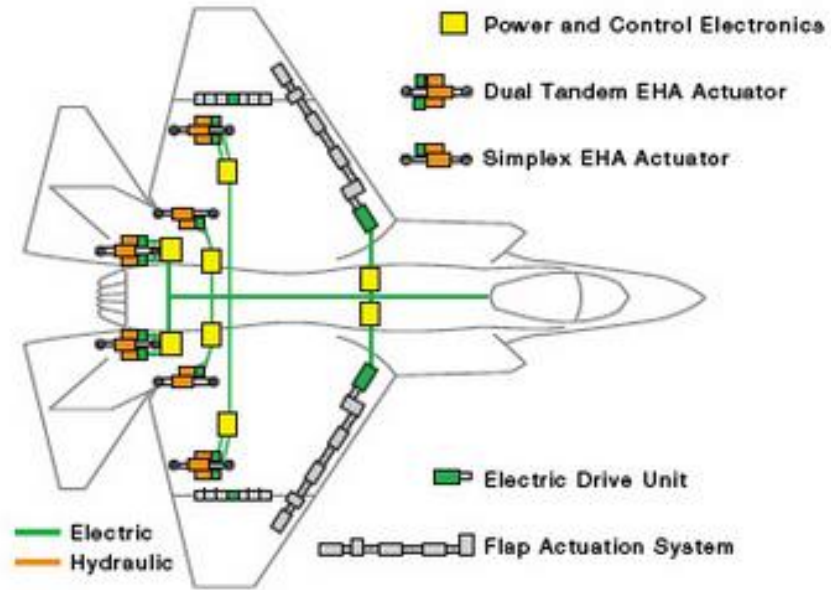


Figure 2-11. Hydraulic System

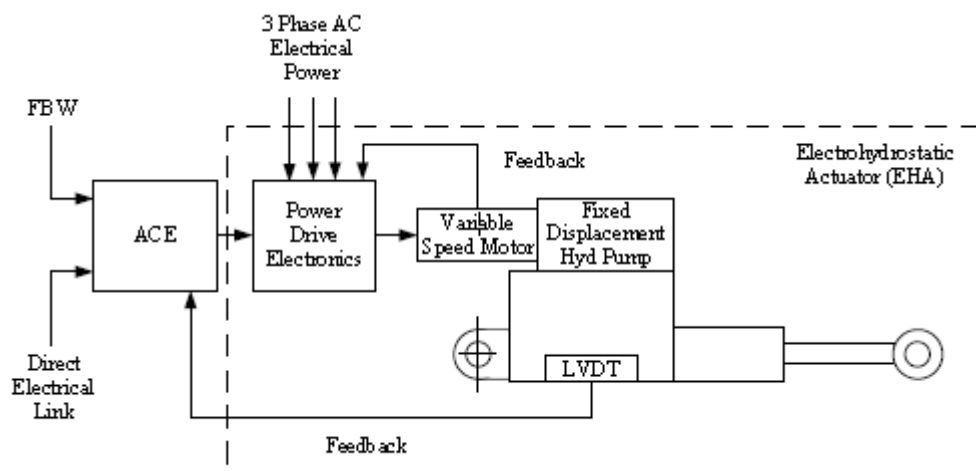
F-18C/D:n Hydraulikkakaavio



## Power-By-Wire Architecture



F-35:n sähkö-hydraulinen ohjausjärjestelmä



F-35:n EHA:n havainnekuva

## TUTKIELMASSA ESIINTYVÄT LYHENTEET

ACS	Aircraft Combat Survivability
ARM	Anti Radiation Missile
CPU	Central Processing Unit
DAS	Distributed Aperture System
DASS	Defensive Aids Sub-System
DECM	Defensive Electronic Counter Measures
DoD	Department of Defence
EA	Electronic Attack
ECM	Electronic Counter Measures
ECCM	Electronic Counter-Counter Measures
ECS	Environmental Control System
EHA	Electro Hydrostatic Actuator
ELIB	Electronic Library
EMA	ElectroMechanical Actuator
EP	Electronic Protection
ES	Electronic Support
EW	Electronic Warfare
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
HRAM	Hydrodynamic RAM
LFE	Linear Fire Extinguisher
IDAS	Integrated Defensive Aids Systems
JASPO	Joint Aircraft Survivability Program
JTCG/AS	Joint Technical Coordinating Group for Aircraft Survivability
LFT&E	Live Fire Testing & Evaluation
LWS	Laser Warning System

MAW	Missile Approach Warning
MWR	Missile Warning Receiver
RAM	Radar Absorbing Materials
RAS	Radar Absorbing Structures
RCS	Radar Cross Section
RLS	Reservoir Level Sensing
RLM	Radar Laser Missile
RWR	Radar Warning Receiver
SURVIAC	Survivability/Vulnerability Information Analysis Center
UAV	Unmanned Aerial Vehicle