

**LIVE - VIRTUAL - CONSTRUCTIVE -SIMULAATIOMALLI
ILMATAISTELUTAKTIIKAN KEHITTÄMISEEN**

Diplomityö

Majuri
Jaakko Salomäki

Yleisesikuntaupseerikurssi 59
Ilmasotalinja

Heinäkuu 2019

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Yleisesikuntaupseerikurssi 59	Linja Ilmasotalinja
Tekijä Majuri Jaakko Salomäki	
Tutkielman nimi LIVE - VIRTUAL - CONSTRUCTIVE -SIMULAATIOMALLI ILMA- TAISTELUTAKTIIKAN KEHITTÄMISEEN	
Oppiaine johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka MPKK:n kirjasto
Aika Heinäkuu 2019	Tekstisivuja 95 Liitesivuja 3
TIIVISTELMÄ Tässä diplomityössä esitellään live-(L)-virtual-(V)-constructive-(C)-simulaatiomalli ilma- taistelutaktiikan kehittämisen tueksi. Mallissa Ilmavoimien olemassa olevia L-, V- ja C-simulaattoreita käytetään uudella tapaa ottamalla huomioon ohjaajien suoriutuminen ja vuorovaikutus lentokoneen kanssa sekä ilmataisteluun liittyvät tuhoamis- ja selviytymisto- dennäköisyydet. Ihmisen ja koneen vuorovaikutusta arvioidaan normatiivisen suoritusky- vyn, tilannetietoisuuden ja kognitiivisen kuormituksen perusteella. Työssä hyödynnetään operaatioanalyysin tutkimusmenetelmiä, joita tarkastellaan Beha- vioural Operational Research -näkökulmasta. L-V-C-simulaatiomalli demonstroidaan esi- merkkikäyttötapauksella, jossa käytetään simulaattoreita, F/A-18 Hornet -koulutettuja len- täjiä ja operatiivisessa käytössä olevia lentokoneita. Työn L-V-C-simulaatiomallia vastaa- vaa yhteiskäyttöä ei ole aiemmin esitelty julkisessa tieteellisessä kirjallisuudessa. Toteutettu esimerkkikäyttötapaus osoitti, miten L-V-C-simulaatiomallilla voidaan kehittää ja vertailla ilmataistelutaktiikoita tuhoamis- ja selviytymistodennäköisyyksien sekä ohjaa- jan tilannetietoisuuden, normatiivisen suorituskyvyn ja kognitiivisen kuormituksen suhteen menestyksekkäästi. Mallin käyttöperiaatteet eivät ole rajoitettuja tiettyyn toimintaympäris- töön tai teknologiaan. Tutkimustulosten perusteella ihmisen ja teknologian välinen vuoro- vaikutus tulee huomioida ilmataistelutaktiikan kehittämisessä nyt ja tulevaisuudessa. Dip- lomityön läpivienti sekä saadut tulokset ovat ainutlaatuisia ja urauurtavia. L- V-C-simulaatiomalli muuttaa ilmataistelutaktiikoiden kehittämisen rakennetta pysyvästi.	
AVAINSANAT: ilmataistelutaktiikka, simulaatio, konstruktiivinen, virtuaalinen, live, Beha- vioural Operational Research, tilannetietoisuus, normatiivinen suorituskyky, kognitiivi- nen kuormitus.	

LIVE - VIRTUAL - CONSTRUCTIVE -SIMULAATIOMALLI ILMATAISTELUTAKTIIKAN KEHITTÄMISEEN

Sisältö

1	JOHDANTO	1
1.1	TUTKIMUKSEN TAUSTA	5
1.2	KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT	6
1.3	TUTKIMUSTEHTÄVÄ JA TUTKIMUSKYSYMYKSET	10
1.4	TUTKIMUKSEN VIITEKEHYS, RAJAUKSET JA NÄKÖKULMA	11
1.5	TUTKIMUSTILANNE JA LÄHDEMATERIAALI	13
1.6	TUTKIMUSMENETELMÄT	14
1.6.1	OPERAATIOANALYYSSIN MENETELMÄT	14
1.6.2	TILANNETIETOISUUS JA SEN MITTAAMINEN	17
1.6.3	KOGNITIIVINEN KUORMITUS JA SEN MITTAAMINEN	20
2	L-, V-, C- JA LVC-SIMULAATIOIDEN VAHVUUDET JA HEIKKOUEDET	22
2.1	C-SIMULAATIOT	23
2.2	V-SIMULAATIOT	24
2.3	L-SIMULAATIOT	25
2.4	LVC-SIMULAATIOT	26
2.5	SYNTEESI	28
3	L-V-C-SIMULAATIOMALLI	30
3.1	TTP T&E:N KÄYNNISTÄMINEN	30
3.2	C-VAIHE	31
3.3	V-VAIHE	32
3.4	L-VAIHE	34
3.5	V- JA L-VAIHEISSA KÄYTETTÄVÄT MITTARIT	35
3.5.1	NORMATIIVISEN SUORITUSKYVYN (NP:N) MITTAAMINEN	35
3.5.2	TILANNETIETOISUUDEN (SA:N) MITTAAMINEN	36
3.5.3	KOGNITIIVISEN KUORMITUKSEN (MWL:N) MITTAAMINEN	37
4	LIVE - VIRTUAL - CONSTRUCTIVE -SIMULAATIOMALLIN ESIMERKKIKÄYTTÖTAPAUSET	38
4.1	ESIMERKKIKÄYTTÖTAPAUKSEN YLEISKUVAUS	38
4.2	C-SIMULAATIOIDEN TOTEUTUS	40
4.3	V-SIMULAATIOIDEN TOTEUTUS	41
4.3.1	V-SIMULAATIOIDEN TTP JA SKENAARIO	41
4.3.2	V-SIMULAATIOIDEN KOEASETELMA JA TULOSTEN MITTAAMINEN	43
4.4	L-SIMULAATIOIDEN TOTEUTUS	49
4.4.1	L-SIMULAATIOIDEN TTP JA SKENAARIO	49
4.4.2	L-SIMULAATIOIDEN KOEASETELMA JA TULOSTEN MITTAAMINEN	49
5	LIVE - VIRTUAL - CONSTRUCTIVE -SIMULAATIOMALLIN ESIMERKKITARKASTELUN TULOKSET	51
5.1	ENSIMMÄISEN C-SIMULAATION (C1) TULOKSET	51
5.2	ALUSTAVAT V-SIMULAATIOT	52
5.3	ENSIMMÄISEN V-SIMULAATION (V1) TULOKSET	52
5.3.1	V1 NP	52
5.3.2	V1 SA TR	54
5.3.3	V1 SA PT-SAGAT	56
5.3.4	V1 MWL	58
5.3.5	V1-TULOSTEN YHTEENVETO JA TTP:N KEHITTÄMINEN	59
5.4	TOISEN C-SIMULAATION (C2) TULOKSET	62
5.5	TOISEN V-SIMULAATION (V2) TULOKSET	63
5.5.1	V2 NP	64
5.5.2	V2 SA TR	66
5.5.3	V2 SA PT-SAGAT	68
5.5.4	V2 MWL	72
5.5.5	V2-TULOSTEN YHTEENVETO JA TTP:N KEHITTÄMINEN	73
5.6	ENSIMMÄISEN L-SIMULAATION (L1) TULOKSET	74
5.6.1	L1 NP	74
5.6.2	L1 SA TR	76
5.6.3	L1 SA PT-SAGAT	77
5.6.4	L1 MWL	78

5.6.5	L1-TULOSTEN YHTEENVETO	79
6	DISKUSSIO	81
6.1	L-V-C-SIMULAATIOMALLIN SOVELTUMINEN KEHITTÄMISEEN	81
6.2	TUTKIMUKSEN LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTI	83
6.3	JATKOTUTKIMUSMAHDOLLISUUDET	84
6.4	LVC-SIMULAATIOIDEN KEHITYSNÄKYMÄT ILMATAISTELUTAKTIIKAN KEHITTÄMISEN NÄKÖKULMASTA	HX-AIKAKAUDELLA 85
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	90

DIPLOMITYÖSSÄ KÄYTETTÄVÄT LYHENTEET:

ACEM:	Air Combat Evaluation Model
AR:	Augmented Reality
AV:	Augmented Virtuality
BOR:	Behavioural Operational Research
C:	Constructive eli konstruktiivinen simulaatio
HMP:	Human-Machine Process
HP:	Human Process
L:	Live-simulaatio
LVC:	Live, Virtual, Constructive
MACE:	Modern Air Combat Environment
MP:	Machine Process
MR:	Mixed Reality
MWL:	Mental Workload
NASA-TLX:	National Aeronautics and Space Administration - Task Load Index
NP:	Normative Performance
Pk:	Probability of kill
Ps:	Probability of survival
PT-SAGAT:	Post-Trial Situational Awareness Global Assessment Technique
SA:	Situation Awareness
T&E:	Test and Evaluate
TR:	Testable Response
TTP:	Tactics, Techniques and Procedures
V:	Virtuaalisimulaatio
VR:	Virtual Reality
WTSAT:	Weapon Tactics and Situational Awareness Trainer

LIVE - VIRTUAL - CONSTRUCTIVE -SIMULAATIOMALLI ILMATAISTELUTAKTIIKAN KEHITTÄMISEEN

1 JOHDANTO

Suomen ilmavoimien nykyaikaisen ilmataistelutaktiikan kehittäjä eversti Richard Lorentz (1900 - 1963) on aikanaan todennut seuraavaa: ”*Talvisodan merkittävin oppi oli se, että hävittäjätaktiikka, ilmataistelutaidot ja hävittäjien ylivoimainen suorituskyky ovat määräävämpiä kuin viholliskoneiden lukumäärä.*” [1] Lorentz kehitti muun muassa parven eli neljän hävittäjän iskuosaston käytön osaksi ilmataistelutaktiikkaa. Lisäksi on todettu, että ”*Lorentzin mielestä jalkaväkitaktiikka ei tue erilaisten rajoitettujen taktisten mallien käyttöä. Ilmataktiikassa niiden käyttö on erityisen suotavaa, minkä ymmärtäminen oli avain suomalaisen hävittäjätaktiikan menestyksiin.*” [2] Taktisten mallien käytöllä tarkoitetaan ilmataistelun hyväksi todettujen taktiikoiden, erilaisten taistelutekniikoiden ja hyvien käytänteiden hyödyntämistä ilmataistelussa. Näitä kutsutaan nykytermillä TTP (Tactics, Techniques and Procedures) [3]. Lorentzin oppeja hyödynnetään tässä diplomityössä, jonka perimmäinen tarkoitus on kehittää modernia ilmataistelutaktiikkaa.

Tähän diplomityöhön liittyvät käsitteet ja termit ovat pääosin englanninkielisiä. Suomenkielisten vastineiden puuttuessa, työssä esiintyy paljon englannin kieleen perustuvia sanoja ja lyhenteitä. [4]

Ilmataistelutaktiikoita kehitetään yleensä parvikokonaisuuksille. Parvessa on neljä hävittäjä-lentokonetta, jotka muodostavat kaksi paria. Kummassakin parissa on johto- ja siipikone. [4] Ilmataistelussa parven ensisijaisena tavoitteena on saavuttaa mahdollisimman suuri tuhoamis- ja selviytymistodennäköisyys (ks. esim. [5]). Ilmataistelutaktiikoiden kehittämisen perusajatus on parven tuhoamis- ja selviytymistodennäköisyyksien maksimoiminen.

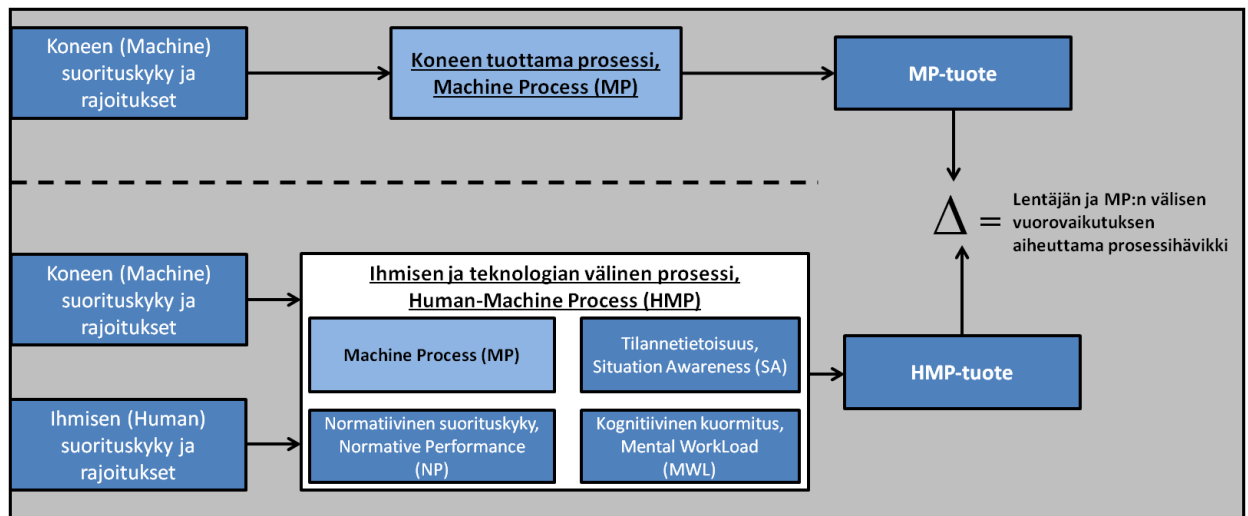
Vaikeasti ennakoitavassa ja nopeatempoisessa ilmataistelussa parven ensisijaisen tavoitteen saavuttaminen vaatii parvelta koordinoitua yhteistoimintaa. Parvi koordinoi toimintaansa noudattamalla ennalta määritettyjä TTP:itä, jotka muodostuvat joukosta kvalitatiivisia ja kvantitatiivisia TTP-sääntöjä. Kvantitatiivinen TTP-sääntö koostuu muuttujasta ja sen arvosta.

Esimerkiksi ”Ammuntahetken lentonopeuden tulee olla Mach 0.9” on kvantitatiivinen TTP-sääntö, jossa Mach 0.9 on sen arvo. Kvalitatiivinen TTP-sääntö on verbaalinen kuvaus taktiikan edellyttämästä toiminnasta ilman säännön numeerista arvoa. Esimerkiksi ”Ohjaajan tulee ilmoittaa havaitsemattomista maaleista” on kvalitatiivinen TTP-sääntö. Koska virheelliset TTP-säännöt voivat merkittävästi heikentää parven ensisijaisen tavoitteen saavuttamista, TTP:t testataan ja evaluoidaan ennen niiden hyväksymistä operatiiviseen käyttöön. Tässä diplomityössä esitellään live-(L)-virtual-(V)-constructive-(C)-simulaatiomalli TTP:iden testaamisen ja evaluoinnin tueksi.

Hävittäjälentokone ja lentäjä ovat keskenään vuorovaikutuksessa, jota kuvataan ihmisen ja teknologian välisenä prosessina. Prosessin syötteinä toimivat hävittäjälentokoneen suorituskyky ja rajoitukset sekä ihmisen kognitiiviset ominaisuudet, jotka määrittävät lentäjän kyvyn toimia vuorovaikutuksessa koneen tuottaman prosessin (Machine Process, MP) kanssa. [6] Vuorovaikutuksen laatuun vaikuttaa kolme komponenttia, joita ovat normatiivinen suorituskyky, tilannetietoisuus ja kognitiivinen kuormitus [7][8][9]. Normatiivinen suorituskyky kuvaa miten täsmällisesti lentäjä noudattaa käskettyjä TTP-sääntöjä. Kognitiivinen kuormitus kuvaa vuorovaikutuksen vaatimien ja lentäjän kognitiivisten resurssien välistä suhdetta [10][11]. Tässä diplomityössä käytetään laajasti käytössä olevaa tilannetietoisuuden kuvausta, jossa se määritellään kolmitasoiseksi kuvaukseksi havaita, ymmärtää ja ennakoida asioita toimintaympäristössä. Tilannetietoisuuden taso 1 tarkoittaa kykyä havaita tapahtumia tai ilmiöitä toimintaympäristössä. Tilannetietoisuuden taso 2 tarkoittaa kykyä ymmärtää havaittujen elementtien ja ilmiöiden väliset merkitykset ja tilannetietoisuuden taso 3 tarkoittaa kykyä ennakoida toimintaympäristön lyhyen aikavälin muutoksia. [12] Lentäjien normatiivinen suorituskyky, tilannetietoisuus ja kognitiivinen kuormitus vaikuttavat parven ensisijaisen tavoitteen saavuttamiseen. Tätä vaikutusta kutsutaan tässä työssä HMP (Human Machine Process) -tuotteeksi. Jos TTP:n testaamisessa ja evaluoinnissa huomioitaisiin ainoastaan hävittäjälentokoneen suorituskyvyn ja rajoitusten tuottama tuhoamis- ja selviytymistodennäköisyys (jäljempänä MP-tuote), ihmisen ja teknologian välisen prosessin vaikutus parven ensisijaisen tavoitteen saavuttamiseksi jätettäisiin huomiotta. Näin muodostettava TTP olettaisi lentäjillä olevan täydellinen tilannetietoisuus, optimaalinen kognitiivinen kuormitus ja virheetön normatiivinen suorituskyky. [13]

TTP:n testaamisessa ja evaluoinnissa ei välttämättä ole mahdollista ennakoida kuinka kompleksisissa ja monimutkaisissa ilmataisteluissa TTP:tä saatetaan myöhemmin käyttää. Jotta TTP:lle voidaan taata tarvittava redundanssi, TTP:n testaamisessa ja evaluoinnissa tulee varmistaa hyväksyttävien tuhoamis- ja selviytymistodennäköisyyksien lisäksi riittäväksi arvioitu

kognitiivinen kuormitus, normatiivinen suorituskyky ja tilannetietoisuus. Näiden lentäjän ja koneen tuottaman prosessin vuorovaikutuksen laatuun vaikuttavien komponenttien välillä ei vallitse sellaista vuorovaikutusta, jonka perusteella yhden komponentin arvo kyettäisiin määrittelemään toisen avulla [13]. Tämän vuoksi TTP:n testaamisessa ja evaluoinnissa on huomioitava sekä kognitiivinen kuormitus, normatiivinen suorituskyky että tilannetietoisuus. Kuvassa 1 esitetään yksinkertaistus koneen tuottaman prosessin ja ihmisen ja teknologian välisen prosessin eroista, sekä siitä, miten lentäjän ja MP:n välinen vuorovaikutus aiheuttaa prosessihävikkiä. Kuvan 1 sisältöä tarkastellaan yksityiskohtaisemmin pääluvussa 3.



Kuva 1. Lentäjän ja MP:n välisen vuorovaikutuksen aiheuttama prosessihävikki [13].

TTP:iden kehittämisessä voidaan hyödyntää neljää erilaista simulaatiotyyppiä: Live (L), Virtual (V) ja Constructive (C) -simulaatioita sekä näiden yhdistelmää LVC-simulaatiota. L-simulaatio tarkoittaa aitoa simulaatiota, jossa simulaatio tapahtuu oikeilla välineillä todellisessa ympäristössä ja ihmisten operoimana. V-simulaatiossa maailma on tietokoneen luoma, mutta simulaattoria ohjaa aito ihminen. C-simulaatio tapahtuu pääasiassa tietokoneen ohjaamana siten, että simuloitujen toimijoiden käyttävät simuloituja järjestelmiä simuloitussa ympäristössä. LVC-simulaatio sisältää niin ihmisiä, todellisia järjestelmiä kuin simuloituja järjestelmiä, jotka ovat verkottuneita keskenään luoden simuloitun toimintaympäristön. LVC-simulaatiot ovat hybridisimulaatioita, jotka sisältävät erilaisia menetelmiä erilaisissa järjestelmissä ja ohjelmistoissa. [14] Kullakin simulaattorityypillä on vahvuutensa ja heikkoutensa. Eri simulaatioiden ominaisuuksia ja piirteitä tarkastellaan luvussa 2.

Tässä diplomityössä esitellään L-V-C-simulaatiomalli TTP:iden testaamisen ja evaluoinnin tueksi. LVC-simulaatioista poiketen L-V-C-simulaatiomalli ei pyri eri simulaatiotyyppien

samanaikaiseen käyttöön, vaan tavoitteena on käyttää erityyppisiä simulaatioita pääosin toisistaan erillään. Simulaatiomalli jakaantuu selkeästi erottuviin C-, V- ja L-vaiheisiin. C-vaiheessa käytetään konstruktivistista simulaatiota, V-vaiheessa käytetään pääosin virtuaalisimulaatiota ja L-vaiheessa käytetään oikeita lentokoneita ja todellisia järjestelmiä. Vaiheet etenevät järjestyksessä C, V ja L. Lisäksi simulaatiomallissa toistetaan tarvittaessa eri vaiheita, jonka vuoksi malli on luonteeltaan iteratiivinen. Tällä menettelyllä kyetään yhtäältä hyödyntämään erityyppisten simulaatioiden vahvuuksia ja toisaalta välttämään yhdistetyille LVC-simulaatioille tyypilliset arkkitehtuuri- ja yhteensopivuusongelmat. [15] [16] L-V-C-simulaatiomallin esittelyn yhteydessä esitellään myös tilannetietoisuuden, normatiivisen suorituskyvyn ja kognitiivisen kuormituksen mittarit, jotka soveltuvat käytettäväksi V- ja L-vaiheissa. [13]

Tutkimuksessa tuotettavan L-V-C-simulaatiomallin tavoitteena on kehittää Ilmavoimien ilmataistelutaktiikan testaamisen ja evaluoinnin menetelmiä. Simulaatiomallin avulla pyritään kehittämään ilmataistelutaktiikoihin liittyviä hyviä käytänteitä, TTP:itä nyt ja tulevaisuudessa. L-V-C-simulaatiomallin peruseriaatteita olisi mahdollista hyödyntää myös muissa puolustushaaroissa uusien taktisten ja taisteluteknisten menetelmien kehittämiseen, jos käytettävissä ovat siihen soveltuvat C- ja V- ja L-simulaattorit. [17][18]

Tutkimuksessa hyödynnetään operaatioanalyysin tutkimusmenetelmiä, erityisesti simulaatioita [19]. Simulaatioita tarkastellaan Behavioural Operational Research (BOR) -näkökulmasta [20]. Ihmisen käyttäytymisen tutkiminen osana ilmataistelua on erityisen tärkeää siksi, että ihmisen tuottamat virheet ovat merkittävässä roolissa aina, kun tarkastellaan lentotoimintaa suhteessa tavoiteltuun tehokkuuteen ja lentoturvallisuuteen [21]. Lisäksi tutkimuksen tekemisen yhteydessä toteutetaan laaja LVC-aihealueen kirjallisuuskatsaus.

Tässä diplomityössä L-V-C-simulaatiomallin käyttö demonstroidaan esimerkkikäyttötapauksella, jossa käytetään olemassa olevia simulaattoreita, koulutettuja F/A-18 Hornet-lentäjiä sekä operatiivisessa käytössä olevia lentokoneita. Esimerkissä käytetään Ilmavoimilla käytössä olevia L-, V- ja C-simulaattoreita eli konstruktivistista ACEM simulaattoria, virtuaalista WTSAT-lentosimulaattoria, jota tukee konstruktivinen MACE-simulaattori, sekä F/A-18 Hornet -lentoja eli L-simulaatioita.

Ennen tätä diplomityötä TTP:iden kehittäminen on ollut pääosin C-simulaatioiden tuloksiin pohjautuvaa kokeiluluontoista toimintaa. C-simulaatioiden pohjalta on rakennettu ilmataistelun skenaario, joka on todennettu useimmiten suoraan L-simulaatioilla. Kokeiluluontoisten L-simulaatioiden lähtökohtana on ollut koneen tuottamaan prosessiin

pohjautuva tarkastelu, jossa joko arvioon tai karkeisiin laskelmiin perustuen on määritetty päätöksentekoaikavälisiä tai ohjusten laukaisuarvoja ohjaajien taktiseen ohjeistukseen. TTP:iden tarkastelussa ei ole aiemmin huomioitu kognitiivinen kuormituksen, normatiivisen suorituskyvyn, tilannetietoisuuden tai HMP-tuotteen vaikutuksia, jolloin ei ole ollut mahdollista myöskään muuttaa kvalitatiivisia TTP-sääntöjä. [4] TTP:iden kehittäminen ei ole ollut kustannustehokasta, eikä ole huomioinut ihmisen ja teknologian välistä vuorovaikutusta. TTP:iden tarkastelu tuhoamis- ja selviytymistodennäköisyyksien kannalta on voinut näyttää hyväksyttävältä, mutta ollut esimerkiksi lentäjien kognitiivisen kuormituksen kannalta sopimaton eli liian kuormittava. Tällaista TTP:tä olisi liian vaikea noudattaa, jolloin se pahimmillaan johtaisi tappioihin monimutkaisissa ilmataisteluharjoituksissa tai sodassa. Väärillä perusteilla hyväksytyt TTP johtaa vääränlaisten operatiivisten TTP:iden hyväksymiseen. [4]

Tämän työn L-V-C-simulaatiomallia vastaavaa menetelmää ei ole aiemmin esitelty julkisessa tieteellisessä kirjallisuudessa, eikä myöskään kotimaisessa tietoturvaluokitellussa materiaalis- sa. Näillä perusteilla tämän työn katsotaan olevan ainutlaatuinen ja urauurtava.

1.1 Tutkimuksen tausta

Tutkimuksen käynnistämiseen on vaikuttanut Ilmavoimien F/A-18 Hornetin korvaamiseen tähtäävä HX-hanke. HX on lyhenne, jollaista käytetään perinteisesti Ilmavoimien lentokaluston korvaamishankkeissa. Suomen nykyiset hävittäjät eli F/A-18 Hornetit poistuvat käytöstä vuoteen 2030 mennessä. HX-hankkeen tavoitteena on korvata vuodesta 2025 alkaen poistuvan Ilmavoimien Hornet-kaluston suorituskyky. HX-hankkeen tehtävänä on tuottaa annetuilla resursseilla paras mahdollinen sotilaallinen suorituskyky osaksi puolustusjärjestelmää. [23] [22] HX-hankinnassa pyritään pienentämään eri järjestelmien yhteensovittamiseen ja tehokkaaseen yhteistoimintaan liittyviä riskejä pyytämällä toimittajilta kokonaisvaltaisia ratkaisuja suorituskykyvaatimusten täyttämiseksi. [22] Tämä tarkoittaa itse lentokoneita, mutta myös lentokoulutukseen ja taktiikan kehittämiseen tarkoitettuja simulaattoreita sekä erityisesti LVC-simulaatioiden ratkaisumalleja.

Tutkimuksen taustalla onkin Ilmavoimissa syntynyt tarve tarkastella uuden hävittäjäkaluston hankinnan ja teknologian kehityksen aiheuttamia muutoksia osana ilmataistelun TTP:iden testaamista ja evaluointia. Tarkastelun pyrkimyksenä on myös lisätä taistelutehokkuutta ja tukea kustannustehokkaamman lentokoulutuksen toteutusta. LVC-tutkimuksen tarve on kasvanut, koska teknologian kehityksen myötä kustannukset ovat nousseet, mutta resurssit ovat

niukat, jolloin on kyettävä toteuttamaan TTP:iden testaaminen ja evaluointi kustannustehokkaasti. Uuden hävittäjäkaluston hankkiminen johtaa siihen, että siirtymävaiheessa vanhasta kalustosta uuteen TTP:iden testaaminen ja evaluointi eri kalustoilla korostuvat. [22] Tutkimuksen tavoitteena onkin erityisesti tukea siirtymävaihetta vanhan HN-kaluston poistussa asteittain käytöstä ja uuden kaluston käyttöönotossa. Tutkimuksen näkökulma on ilmataistelutaktiikan kehittämisessä, jota tukevat L-V-C-simulaatioiden mahdollistamat menetelmät. L-V-C-simulaatiomalli mahdollistaa HX-kandidaattien evaluoinnin jo nyky menetelmillä ja samalla tukee poistuvan Hornet-kaluston taktiikan kehittämistä sen elinkaaren loppuun saakka. Siinä vaiheessa, kun Ilmavoimien käytössä on sekä HN (Hornet)- että HX-koneita, voidaan tutkimuksen simulaatiomallia hyödyntää arvioitaessa minkä tyyppiset ilmataistelutehtävät kannattaa toteuttaa HN:llä ja mitkä HX:llä.

1.2 Käsitteet ja määritelmät

ACEM (Air Combat Evaluation Model)

ACEM on Raytheon-yhtiön valmistama stokastinen konstruktiiivinen simulointiohjelma, joka on ollut Ilmavoimien käytössä vuodesta 2002 lähtien. ACEM:lla kyetään simuloimaan F/A-18 Hornetin lisäksi Suomessa käytössä olevia ilmataisteluohjuksia ja vastustajan ilmasodankäynnin eri osa-alueita realistisesti. ACEM tarjoaa useita analyyttisiä välineitä, joita käyttäjä voi hyödyntää erilaisissa ilmasta ilmaan toteutettavissa ilmataistelun simulaatioissa. Näiden tulokset esitetään simulaation aikajanoina, tilastollisina tietoina, vaikuttavuuslaskelmina ja graafisina esityksinä. [24]

HMP-OPTIMAALISET TTP-SÄÄNNÖT

V- ja L-vaiheissa mitataan HMP:n (Human-Machine Process) tuottamaa tuhoamistodennäköisyyttä (Pk) ja selviytymistodennäköisyyttä (Ps) sekä lentäjien kognitiivista kuormitusta (MWL), normatiivista suorituskykyä (NP) ja tilannetietoisuutta (SA). HMP-optimaalisuudella tarkoitetaan, että tarkasteltavat TTP-säännöt johtavat riittävän korkeaan Pk:hon ja Ps:ään, ja lisäksi ohjaajien NP, SA ja MWL tulee olla hyväksyttävällä tasolla. V-vaiheen tuloksena saadaan HMP-optimaaliset TTP-säännöt simulaatioympäristöön. L-vaiheessa varmistetaan, että ne tuottavat hyväksyttävän MWL:n, NP:n, SA:n, Pk:n ja Ps:n myös todellisessa lentoympäristössä. [13]

HMP-TUOTE

HMP-tuote tarkoittaa parven menestystä ilmataistelussa, eli sitä kuinka hyvin parvi saavuttaa ensisijaisen tavoitteensa, kun simuloituja lentokoneita lentää oikeat ohjaajat. HMP-tuotetta mitataan tässä työssä Pk:n ja Ps:n perusteella. [13]

ILMAVOIMIEN TAKTINEN OHJEISTUS

Ilmavoimissa käytössä olevat ohjekirjat, jotka pitävät sisällään eri konetyyppien taktisen ohjeistuksen. TTP:t pohjautuvat kunkin konetyypin omiin ohjekirjoihin, suorituskykyihin sekä taktiseen käyttöön niin normaali- kuin poikkeusoloissa. [4]

KOGNITIIVINEN KUORMITTUMINEN (Mental Workload, MWL)

Hävittäjäohjaajan kognitiivinen kuormittuminen, MWL kuvaa vallitsevaa epätasapainoa TTP:n vaatiman vuorovaikutuksen sekä ohjaajan kognitiivisten resurssien välillä. [13] [25] Tässä tutkimuksessa MWL:ää arvioidaan NASA-TLX-menetelmällä [26].

MACE (Modern Air Combat Environment)

MACE on Battlespace Simulations -yhtiön kehittämä konstruktiivinen ja virtuaalisimulaattoreita tukeva simulaatio- ja uhkaympäristö, jolla on kattava taistelujärjestelmien valikoima. MACE sisältää niin maahan sijoitetut kuin myös lentävät asejärjestelmien kokonaisuudet, joihin kuuluvat aseet, lavetit ja erityisesti elektronisen sodankäynnin järjestelmät. MACE omaa laajan kirjon tietokoneavusteisia, puoliautomatisoituja sotilaallisen suorituskyvyn sovelluksia, joilla on kattava ja käyttäjäystävällinen taistelujärjestelmien valikoima. MACE voi simuloida edistyneitä, viidennen sukupolven järjestelmiä, mukaan lukien matalan tutkapoikkipinta-alan lavetit sekä aktiiviset ja passiivisesti elektronisesti keilaavat tutkat (AESA- ja PESA-tutkat). MACE tukee Distributed Interactive Simulation (DIS) -arkkitehtuuria, joka sisältää simulointien hallinnan kannalta laajan valikoiman erilaisia tapoja simuloida. MACE sopii erinomaisesti yksittäisten skenaarioiden luomiseen, mutta myös monimutkaisten ilmaisteluiden simulointiin. [27] Ilmavoimat on saanut MACE:n käyttöönsä keväällä 2018.

MP-OPTIMAALISET TTP-SÄÄNNÖT

Kvantitatiivinen TTP-sääntö koostuu muuttujasta ja sen arvosta. Tämä voi olla esimerkiksi ammutahetken lentonopeus. C-vaiheessa määritellään kvantitatiivisten TTP-sääntöjen optimaaliset arvot, joista käytetään nimitystä MP-optimaaliset TTP-säännöt ja MP-optimaalisten TTP-sääntöjen arvot. [13] MP-optimaalinen TTP-säännön käyttäminen C-vaiheessa johtaa Pk:n maksimiarvoon ja Ps=1 rajoituksen toteutumiseen.

MP-TUOTE

MP-tuote tarkoittaa parven menestystä ilmataistelussa, eli sitä kuinka hyvin parvi saavuttaa ensisijaisen tavoitteensa, kun simuloituja lentokoneita lentää simuloitujen ohjaajat, joilla oletetaan olevan täydellinen SA, optimaalinen MWL ja virheetön NP. MP-tuotetta mitataan Pk:n ja Ps:n perusteella. [13]

NASA-TLX (National Aeronautics and Space Administration - Task Load Index)

NASA-TLX on moniulotteinen mittari, jolla mitataan kognitiivista kokonaiskuormitusta kuuden eri ulottuvuuden avulla asteikolla 1–10. [26]

NORMATIIVINEN SUORITUSKYKY (Normative Performance, NP)

Yleiskielellä ”normatiivinen” tarkoittaa toimintaa, joka toteutetaan normeja tai standardeja noudattaen [28]. Tässä tutkimuksessa normiksi tai standardiksi tulkitaan TTP ja sen sisältämät säännöt. Ilmataistelussa normatiivinen suorituskyyky (Normative Performance, NP) kuvaa sitä, miten tarkasti ohjaaja noudattaa käskettyjä TTP:n sääntöjä. [13]

OHJAAJA, LENTÄJÄ

Ohjaaja on sotilaslentäjätutkinnon suorittanut koulutettu lentäjä. Ohjaaja voi lennolla toimia saamansa lentotehtävän suorittamiseksi muun muassa ilma-aluksen päällikkönä. Ilma-aluksen päällikkö vastaa lentotehtävän valmistelusta, lennon suorittamisesta sekä lennon raportoinnista. Ilma-aluksen päälliköstä voidaan käyttää myös nimitystä ohjaaja. [29]

OPERAATIOANALYYSI (Operational Analysis, OA)

Operaatioanalyysi on tieteenala, jossa hyödynnetään tieteellisiä menetelmiä päätöksenteon tuessa. Operaatioanalyysi on tieteellinen käytänte ja näkökulma ongelmien analysoimiseen sekä päätöksentekoon. Operaatioanalyysillä pyritään myös luomaan käsitys monimutkaisista tilanteista ja systeemeistä sekä ymmärtämään niiden rakenne. Syntyneen ymmärryksen perusteella ennustetaan systeemin toimintaa ja parannetaan sen suorituskyykyä. Suuri osa tämän diplomityön simulaatioiden tulosten analyysistä tehdään analyttisillä ja laskennallisilla menetelmillä. [30]

OPERATIIVISESTI OPTIMAALISET TTP-SÄÄNNÖT

Operatiiviset HMP-optimaaliset TTP-säännöt ovat L-V-C-simulaatiomallin tuloksena saatavat todelliseen lentoympäristöön soveltuvat HMP-optimaaliset TTP-säännöt. Tällöin MWL, NP,

SA ja HMP-tuote on todennettu hyväksyttäväksi ja tasapainoisiksi todellisessa lentoympäristössä. [13]

PT-SAGAT (Post-Trial Situational Awareness Global Assessment Technique)

SAGAT-menetelmään pohjautuva tilannetietoisuuden (SA) mittaamisen tapa, jossa SAGAT-menetelmää käytetään simulaation jälkeen. [13]

SA (Situation Awareness, Tilannetietoisuus)

SA on yhden näkemyksen mukaan kolmitasoinen kuvaus koehenkilön kyvystä havaita toimintaympäristöään (SA taso 1), ymmärtää havaitsemiensa elementtien ja ilmiöiden väliset merkitykset (SA taso 2) ja ennakoida toimintaympäristön lyhyen aikavälin muutokset (SA taso 3) [12].

SAGAT (Situational Awareness Global Assessment Technique)

Endsleyn vuonna 1988 esittelemä tilannetietoisuuden (SA:n) mittaamisen menetelmä, joka on tarkoitettu erityisesti lentosimulaatioiden arviointiin. [12] [31] [32]

SELVIITYMISTODENNÄKÖISYYS (Probability of Survival, Ps)

Selviytymistodennäköisyys (Probability of survival, Ps) kuvaa hävittäjän ja sen ohjaajan kykyä selviytyä vihamielisessä toimintaympäristössä ilman, että oma tehtävä keskeytyy tai hävittäjä vaurioituu. [33]

SIMULAATTORI

Simulaattori on laite, järjestelmä tai tietokoneohjelma, jolla voidaan toteuttaa simulaatioita. Harjoittelutarkoituksessa simulaattori on laite, jossa mallinnetaan esimerkiksi lentotehtävän ominaisuuksia, jotka vaativat ihmisen toteuttamia toimia, jotta saavutetaan annetun lentotehtävään vaatimukset. [34]

SIMULOINTI

Simulointi on todellisuuden jäljittelyä. Simulointia ja siihen liittyvää analyysia käytetään lisäämään ymmärrystä erilaisista ilmiöistä ja erilaisten systeemien toiminnasta. Lentokoulutuksessa käytettävien simulointimenetelmien tarkoituksena on harjoittaa tekemään parempia päätöksiä tai parantaa prosessin suorituskykyä esimerkiksi ohjaajien osaamista kehittämällä. [35]

TR (Testable Response)

TR-tapahtumien arviointi on SA:n suorituskykyperustainen mittausmenetelmä, joka on käytökelpoinen tilanteissa, joissa arvioidaan ennalta määritettyihin TR-mittareihin perustuvaa toimintoa ja sen suhdetta SA:han. Tarkoituksena on selvittää koehenkilön SA:n taso ulkopuolisen arvioitsijan toimesta yksiselitteisesti. [36]

TTP (Tactics, Techniques and Procedures)

TTP:t ovat ennalta määritettyjä ilmasodassa käytettäviä taktiikoita, tekniikoita ja menetelmiä, jotka muodostuvat joukosta kvalitatiivisia ja kvantitatiivisia TTP-sääntöjä. TTP:itä kehitetään koko ajan johtuen muun muassa uhan sodankäyntikyvyn kehittymisestä sekä omien teknisten järjestelmien päivittämisestä. [4] [13]

TUHOAMISTODENNÄKÖISYYS (Probability of Kill, Pk)

Pk on erilaisten todennäköisyyksien yhdistelmä, jolla ammuttu ohjus tuhoaa maalin. Pk:hon vaikuttavat muun muassa ohjuksen ohjautumisen tarkkuus, maalin löytymisen kyky, lähisytyttimen toiminta ja maalin liikehtelykyky. [37]

WTSAT (Weapon Tactics And Situational Awareness Trainer)

WTSAT on Boeing Companyn valmistama F/A-18-virtuaalisimulaattori, jota käytetään suomalaisten Hornet-ohjaajien perus- ja taktiseen koulutukseen sekä tilannetietoisuuden kehittämiseen lentokoulutuksessa. WTSAT on liikkumaton lentosimulaattori, jossa on 135-asteen näyttökenttä, ja sen ohjaamo on yksityiskohtainen jäljennös aidon lentokoneen ohjaamoympäristöstä. [38]

1.3 Tutkimustehtävä ja tutkimuskysymykset

Tämän diplomityön tavoitteena ja tutkimustehtävänä on kehittää uusi tapa käyttää Ilmavoimissa tällä hetkellä olevia L-, V- ja C-simulaattoreita ilmataistelutaktiikoiden kehittämiseen ottaen huomioon tuhoamis- ja selviytymistodennäköisyydet sekä ohjaajien suoriutuminen ja vuorovaikutus lentokoneen kanssa ilmataistelun aikana.

Tutkimuksen otsikko on

LIVE - VIRTUAL - CONSTRUCTIVE -SIMULAATIOMALLI
ILMATAISTELUTAKTIIKAN KEHITTÄMISEEN

Tutkimuskysymykset ovat

Pääkysymys:

Miten L-, V- ja C-simulaatioita voidaan hyödyntää ilmataistelutaktiikoiden kehittämisessä?

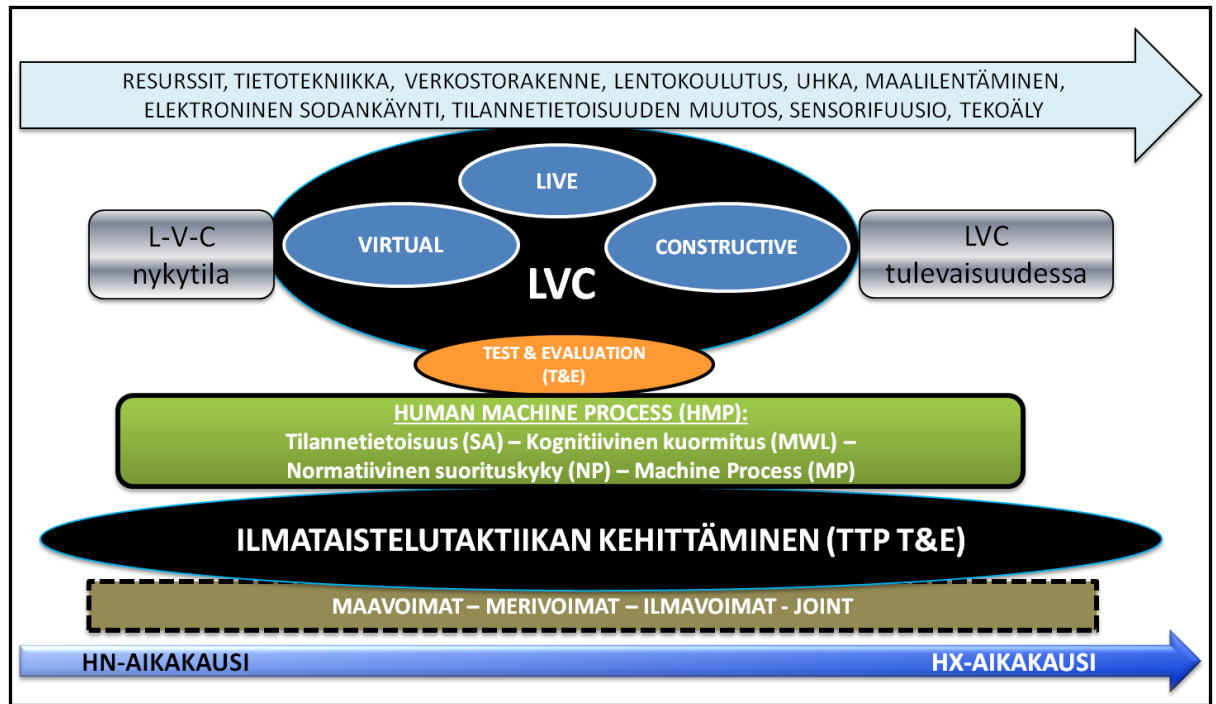
Alakysymykset:

1. Mitkä ovat L-, V-, C- ja LVC-simulaatioiden vahvuudet ja heikkoudet?
2. Millaisella L-, V- ja C-simulaatioita yhdistävällä mallilla voidaan kehittää ja vertailla ilmataistelutaktiikoita tuhoamis- ja selviytymistodennäköisyyksien sekä ohjaajan tilan-tietoisuuden, normatiivisen suorituskyvyn ja henkisen kuormituksen suhteen?
3. Millaisella L-V-C-simulaatiomallin esimerkkitarkastelulla kyetään osoittamaan sen toimivuus?

Tutkimuksen ensimmäiseen alakysymykseen vastataan luvussa 2, jossa tarkastellaan L-, V-, C- ja LVC-simulaatioiden vahvuuksia ja heikkouksia. Tutkimuksessa kehitettävän L-V-C-simulaatiomallin rakenne ja toimintaperiaate esitetään luvussa 3, joten tässä luvussa vastataan toiseen alakysymykseen. Tutkimuksen kolmanteen alakysymykseen vastataan luvuissa 4 ja 5, joissa esitellään L-V-C-simulaatiomallin toimivuus esimerkkikäyttötapauksen avulla ja esitetään simulaatioiden tulokset. Tutkimuksen pääkysymykseen vastataan luvussa 7, jossa esitellään tutkimuksen johtopäätökset.

1.4 Tutkimuksen viitekehys, rajaukset ja näkökulma

Tutkimus on osa Ilmavoimien ilmasotataktiikan kehittämistä. Tutkimuksen viitekehyksessä esitetään ihmisen ja koneen välinen vuorovaikutus, jossa huomioidaan ilmataistelussa menestyminen ja selviytyminen. Tutkimus rajataan koskemaan vain ilmasotataktiikkaa ja ilmataiste-luita. Tarkastelun näkökulma on ilmavoimallinen ja taktiikan kehittämiseen suuntautunut. Tutkimus asettuu nykyhetkeen, mutta tarkastelee myös tulevaisuuden näkymiä niin LVC:n kuin taktiikan kehittämisen osalta. Tutkimuksen simulaatioissa hyödynnetään tällä hetkellä Ilmavoimissa käytössä olevia L-, V- ja C- simulaattoreita. Tutkimus tarkastelee osaltaan LVC-simulaatioiden ratkaisuja huomioiden myös HX-hankkeen. Tutkimuksen diskussio-osuudessa arvioidaan HX-aikakauden LVC-simulaatioiden tulevaisuutta niiltä osin, kuin se on tällä hetkellä olevalla tiedolla mahdollista, ja ainoastaan ilmataistelutaktiikan kehittämisen näkökulmasta huomioiden ihmisen ja koneen välinen vuorovaikutus. Tutkimuksen viitekehys on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Tutkimuksen viitekehys.

Kuvasta 2 nähdään, miten L-, V- ja C-simulaatiot esitetään ratkaisuna ilmataistelutaktiikan kehittämiseksi osana ihmisen ja teknologian välistä prosessia eli HMP:tä, johon liittyy oleellisesti lentäjän normatiivinen suorituskyky (NP), tilannetietoisuus (SA) ja kognitiivinen kuormitus (MWL) sekä MP (Machine Process). Tämä lentäjän ja MP:n välisen vuorovaikutuksen aiheuttama prosessihävikki tulee ottaa huomioon TTP:iden testaamista ja evaluointia (T&E) tarkastellessa, koska muuten ei kyetä huomioimaan ihmisen todellisia vaikutuksia ilmataistelutaktiikan noudattamiseen. Tekninen kehitys ja muuttuva uhkakuva aiheuttavat sen, että ilmataistelun TTP T&E on oltava jatkuva prosessi. Näistä tekijöistä huolimatta lentäjän ja MP:n välisen vuorovaikutuksen olemassaolo ei tule poistumaan tulevaisuudessa, vaan sen osuus osana ilmataistelutaktiikan kehittämistä tulee todennäköisesti kasvamaan. Tämä johtuu muun muassa teknologian kehityksestä. Sensorifuusio ja tekoäly mahdollistavat lentokoneen ilmataistelukyvyyn parantumisen, jolloin ihmiselle tuotetun informaation määrä kasvaa. Tämä tekee ihmisen tekemästä päätöksenteosta entistä tärkeämpää ja samalla haavoittuvampaa, kun tilanteiden muutosnopeus kiihtyy. LVC-simulaatiot nähdään tulevaisuudessa osana kaikkien puolustushaarojen koulutusta ja tutkimustoimintaa. LVC:n rooli korostuu erityisesti sotilaallisessa koulutuksessa, koska sillä kyetään simuloimaan omat ja vihollisen toimijat realistisesti ja kustannustehokkaasti.

1.5 Tutkimustilanne ja lähdemateriaali

Tämän diplomityön tyypistä tutkimusta, jossa tarkastellaan L-V-C-simulaatioiden yhteiskäyttöä osana TTP:iden testaamista ja evaluointia, ei ole julkisen ulkomaisen kirjallisuuden eikä luokitellun kotimaisen aineiston mukaan aiemmin toteutettu. Ihmisen suorituskykyä, tilannetietoisuutta ja kuormittumista on tutkittu paljon, mutta ei kuitenkaan näitä kaikkia tässä diplomityössä yhdistettävällä tavalla. Lähdemateriaalin määrä liittyen tilannetietoisuutta, kuormittumista ja yleisesti ihmisen suorituskykyä koskevaan tutkimukseen on laaja. Myös ilmataistelun simulaatioita on mallinnettu monella tapaa, erityisesti konstruktiiivisilla menetelmillä. LVC-simulaatioiden osalta julkista lähdemateriaalia löytyy runsaasti. Tämä johtuu siitä, että käytännössä kaikki länsimaiset ilmavoimat ovat tällä hetkellä kehittämässä omaa LVC-simulaatiokonseptiaan [39][40]. Julkisessa mediassa esitetty materiaali on kuitenkin hyvin yleisluontoista. Eri ilmavoimien käytössä oleva LVC-lähdemateriaali on pääsääntöisesti tietoturvarajoitettua ja tästä syystä sen saanti on ollut rajallista. HX-hankemateriaalia on hyödynnetty LVC-aihealueen osalta sekä ilmataistelun mallintamisen ymmärtämisessä ja määrittelyssä. Ilmavoimien taktinen ohjeistus on ollut ilmataistelun skenaarion taustamateriaalina ja se on ollut tutkijan käytettävissä. Maanpuolustuskorkeakoulussa on aiemmin tehty joitakin aihetta sivuavia tutkimuksia. Ulkomaisia tutkimuksia liittyen tässä työssä esiteltävään simuloitiluokkien yhteiskäyttötapaan ei ole esitelty julkisissa lähteissä, mutta tutkimuksen aihealueen osatekijöihin liittyvää tutkimusta on tehty mittava määrä.

Tämän diplomityön aihealuetta sivuavat merkittävimmät raportit ja artikkelit liittyvät tässä diplomityössä käytettävään tutkimusmenetelmään, ihmisen tilannetietoisuuden, suorituskyvyn ja kuormituksen mittaamiseen sekä LVC-simulaatioiden nykytilaan. Mansikka, Virtanen ja Harris ovat raportissaan: *Dissociation Between Mental Workload, Performance, and Task Awareness in Pilots of High Performance Aircraft* (2019) arvioineet lentäjän henkistä kuormittumista, suorituskykyä ja tilannetietoisuutta virtuaalisimulaattorissa hyödyntäen SAGAT- ja NASA TLX -menetelmiä [13]. He jatkavat lentäjien arvioimista virtuaalisimulaattorissa raportissaan: *Comparison of NASA-TLX scale, modified Cooper-Harper scale and mean inter-beat interval as measures of pilot mental workload during simulated flight tasks* (2019), jossa keskitytään kognitiivisen kuormittumisen mittaamiseen NASA TLX -menetelmän lisäksi sykevälivaihtelun ja modifioidun Cooper-Harper-menetelmän mukaisesti [8]. Hodson & Hill esittelevät raportissaan: *The art and science of live, virtual, and constructive simulation for test and analysis* (2014) LVC-simulaatioiden määritelmät sekä niiden hyödyntämismahdollisuuksia testaamisen ja analysoinnin näkökulmasta [14]. Hämäläinen, Luoma ja Saarinen esittelevät raportissaan: *On the importance of behavioral operational research: The case of*

understanding and communicating about dynamic systems (2013) BOR-tarkastelun perusteet ja sen hyödyntämismahdollisuudet huomioiden inhimillisen näkökulman osana operaatiotutkimusta [20]. Endsley esittelee luennoissaan: *Situational awareness global assessment technique (SAGAT)* [31] ja lehtiartikkelissaan *Toward a theory of situation awareness in dynamic systems* (1995) [12] SAGAT-menetelmän perusteita ja hyödyntämismahdollisuuksia tilannetietoisuuden mittaamiseen. Samaa aihealuetta hän jatkaa yhdessä Garlandin kanssa raportissa: *Situation Awareness Analysis and Measurement* (2000) [36]. Hart ja Staveland esittelevät raportissaan: *Development of NASA TLX (Task Load Index)* (1988) NASA TLX -menetelmän perusteet ja hyödyntämismahdollisuudet [26]. Menetelmän arviointia Hart jatkaa raportissaan: *NASA-Task Load Index, 20 Years Later* (2006) [41]. Beringer ja Hancock arvioivat esityksessään: *Exploring situational awareness- A review and the effects of stress on rectilinear normalization (aircraft pilot performance)* (1989) lentäjän tilannetietoisuuden ja henkisen suorituskyvyn vuorovaikutusta [42].

1.6 Tutkimusmenetelmät

1.6.1 Operaatioanalyysin menetelmät

Tutkimuksessa hyödynnetään operaatioanalyysin menetelmistä simulaatiota ja mallinnusta. Operaatioanalyysia (Operational Analysis, OA) kutsutaan yleisesti siviilisovelluksissa operaatiotutkimukseksi (Operational Research, OR), mutta sotilasympäristössä operaatioanalyysin sanan käyttö on yleisempää. Operaatioanalyysi on tieteellinen metodi, jossa erilaisten lähinnä matemaattisten mallien avulla tuotetaan päätöksentekijöille ratkaisujen kvantitatiivisia perusteita. Tyypillisesti päätöksenteko koskee tekijöitä ja kokonaisuuksia, joissa on ihmisiä, koneita ja organisaatioita sekä useimmiten myös epävarmuutta. Operaatioanalyysi etsii parasta, optimaalista menettelytapaa tai yleensä rationaalisesti käytettyihin mallinnusoletuksiin pohjautuen perusteltavaa toimintatapaa päätöksentekotilanteissa, joissa resurssit ja toimintamahdollisuudet ovat erilaisten ehtojen rajaamia. [19]

Tässä diplomityössä toteutettavat simulaatiot ovat C-, V- ja L-simulaatioita. Simulointi on yksi operaatioanalyysin piiriin lukeutuvista tekniikoista [19][17][18]. Tutkimuksen C-simulaatioilla tarkoitetaan muun muassa Monte Carlo -simulointia, jossa malli ratkaistaan antamalla sille useita sarjoja satunnaisia syötteitä ja päättämällä tulosten jakauman perusteella mallin ratkaisu [19]. Tutkimuksen C-simulaatiot toteutetaan stokastisella ACEM-simulaattorilla. Stokastinen tarkoittaa satunnaista prosessia, jossa on todennä-

köisyysmalli systeemille, jonka kehittymiseen ajan kuluessa liittyy satunnaisuutta [19]. Ilmataistelun mallintaminen osana simulointia toteutetaan tässä työssä C-, V- ja L-simulaattoreissa. Ilmataistelu on ilmiönä yleensä niin monitahoinen, että sen lopputuloksen ennustaminen ilman simulaatioita ei ole mielekäästä tai mahdollista. Tietokoneavusteisissa simulaatioissa voidaan laskea koehenkilöiden päätösten mukaisten toimien aiheuttamaa asevaikutusta viholliseen, ja tuottaa siihen hallitusti satunnaisuutta. [19] Näin saadaan monimutkaiseen ilmataisteluun mukaan laskentaa, jonka avulla ainakin osia sen monimutkaisesta kokonaisuudesta on mahdollista tilastoida ja tätä kautta ymmärtää paremmin.

Tutkimuksen V-simulaatioissa painopiste on ihmisen ja teknologian välisen vuorovaikutuksen tutkimisessa, jossa huomioidaan myös tuhoamis- ja selviytymistodennäköisyys. Tämä tarkoittaa operaatioanalyysin alalla ongelmanratkaisua ja päätöksentekoa BOR:n (Behavioural Operational Research) näkökulmasta. BOR-tarkastelussa korostetaan inhimillisen toiminnan ja inhimillisten tekijöiden huomioon ottamisen tarvetta osana operaatioanalyysiä. Laajasti määriteltä BOR liittyy ihmisen käyttäytymisen näkökulmasta ongelmanratkaisuun ja päätöksentekoon operaatioanalyysin alalla. BOR:n tarkoituksena onkin lisätä käsitystä siitä, miten erilaiset inhimilliset käyttäytymistekijät vaikuttavat malleja hyödyntävään ja tukena käyttävään ongelmanratkaisuun ja päätöksentekoon. [20]

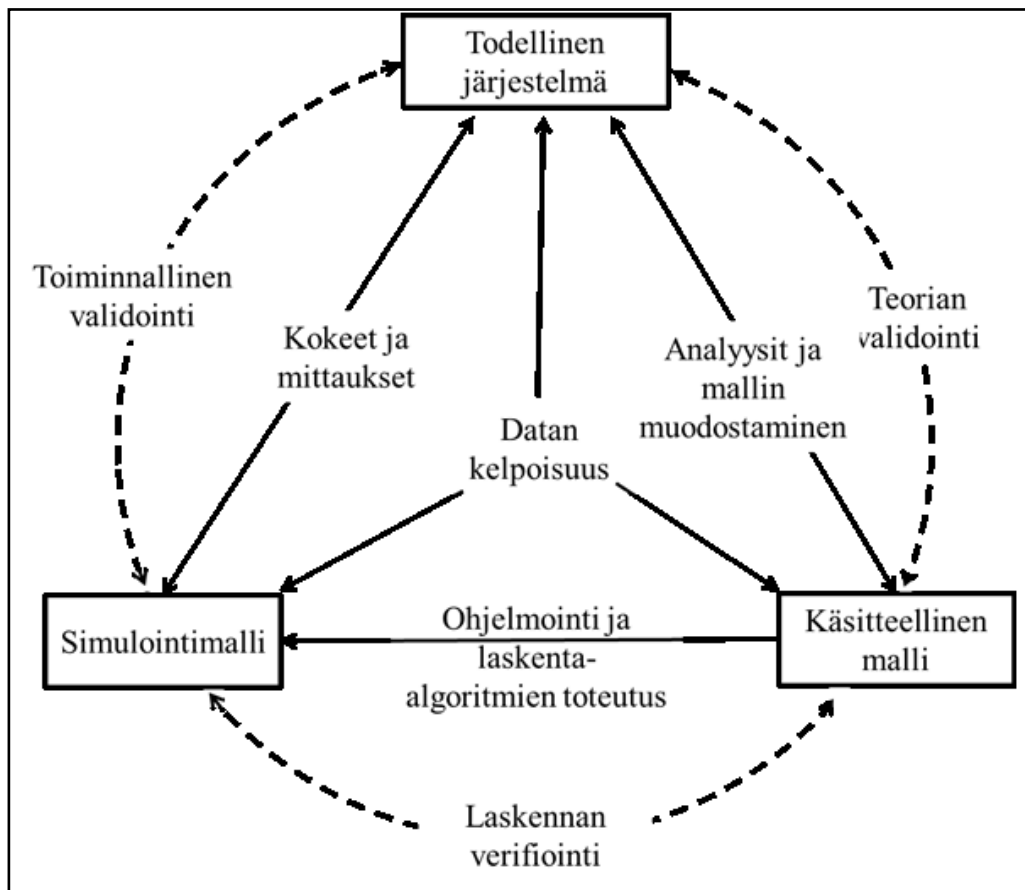
Ihmisen käyttäytymisen ilmiöt ovat aina läsnä, kun malleja hyödynnetään ongelman ratkaisun tukena. BOR-tarkasteluissa arvioidaan ihmisen tekemiä menettelyvirheitä tai kognitiivisia ongelmia liittyen mallien hyödyntämiseen päätöksenteon tukena. Käyttäytymisvaikutukset voivat liittyä muun muassa ryhmävuorovaikutukseen ja yleiseen kommunikaatioon. BOR-tutkimusten tulokset viittaavat siihen, että operaatioanalyysin prosessit ja mallit ovat herkkiä erilaisille ihmisen käyttäytymisvaikutuksille. Tästä syystä on kiinnitettävä huomiota tapaan, jolla operaatioanalyysin malleja käsitellään. Tällöin BOR:n menetelmillä kyetään tulkitsemaan ja analysoimaan ihmisen ja teknologian välistä prosessia. [20] Tässä työssä hyödynnetään BOR:n tutkimusotetta, koska työssä kehitettävässä L-V-C-simulaatiomallissa yhdistetään ihmisen toiminta ja inhimillinen päätöksenteko simulointimallinnuksen kanssa.

Simulaatioiden avulla pyritään mallintamaan tutkittavaa ilmiötä tai järjestelmää riittävällä tarkkuudella sen ymmärtämiseksi. Tutkittava ilmiö mallinnetaan ensin sopivalla tarkkuudella, jonka jälkeen malli ajetaan simulaattorilla. [43] Simulaatiotulosten tulkitseminen ei aina ole suoraviivaista. Simulaatiomallin käyttäjän on oltava tietoinen sen tarkkuudesta ja mallinnuksessa käytetyistä oletuksista. Simulaatiotulosten oikeellisuus ja luotettavuus voidaan varmistaa mallin verifioinnilla ja validoinnilla. Validoinnilla varmistetaan mallin oikeellisuudesta

sekä riittävästä tarkkuudesta suhteessa simulaatiolla kuvattavaan kohteeseen tai ilmiöön. Validoinnilla haetaan vastusta seuraaviin kysymyksiin:

- Vastaavatko simulaatiomallin teoriat ja oletukset imitoitavaa kohdetta, ja onko simulaatio käyttökelpoinen sen suunniteltua käyttötarkoitusta varten?
- Millä tarkkuudella mallin eri muuttujat on huomioitava, jotta saadaan käyttökelpoisia ja luotettavia tuloksia?
- Kuinka tarkasti mallin tulokset vastaavat tutkittavan kohteen tai ilmiön käyttäytymistä?

Verifioinnilla puolestaan varmistetaan siitä, että simulaatiomalli on rakennettu siten, että se vastaa käyttötarkoitustaan ja tuottaa oikeaan muotoiset tulokset. [44]



Kuva 3. Sargentin esittämä malli simulaation verifioinnista ja validoinnista. [44]

Kuvassa 3 on esitetty Sargentin malli, jonka mukaan simulaatiomalli voidaan validoida ja verifioida huomioiden käsitteelliseen mallin teorian ja laskenta sekä todellisen järjestelmän osoittamat tulokset. Sargentin malli muodostaa kokonaisuuden, jota hyödyntäen todennetaan myös tässä työssä kehitetyn simulaatiomallin luotettavuus. Simulaatiomalli verifioidaan toteuttamalla L-simulaatiot. Kun L-simulaatioiden tuloksia verrataan V-vaiheen tuloksiin, varmistetaan, että simulaatiomalli ja simulaatiot ovat rakennettu siten, että ne vastaavat käyttötarkoitustaan. Tutkimuksen L-V-C-simulaatiomallin validointi toteutetaan hyödyntämällä L-, V- ja C-simulointimenetelmiä, jolloin niiden mahdolliset ristiriidat voivat paljastaa mallin sisältämiä virheitä. L-V-C-simulaatiomallin esimerkkikäyttötapauksen avulla toteutetaan toiminnallinen validointi, joka yhdistää myös tutkimuksen teorian validoinnin. Tällöin teoria kyetään kokonaisuudessaan mittaamaan, jolloin simulaatiotulosten data voidaan määrittellä kelpolliseksi tai vastaavasti jatkokehittää simulaatioita. Näin kyetään toteuttamaan Sargentin mallin mukainen validointi ja verifiointi, joka lisää osaltaan työn reliabiliteettia.

1.6.2 Tilannetietoisuus ja sen mittaaminen

Situation Awareness (SA) suomennetaan joko tilannetietoisuudeksi tai tilanneymmärrykseksi. Tilanne-käsitteeseen liittyy tapahtuma ja aika. Tilanne kuvaa ajallisilla määreillä rajattavissa olevia tapahtumia aika-avaruudessa, jossa vähintään kaksi toimijaa on vuorovaikutuksessa keskenään. Tilannetietoisuuden ja tilanneymmärryksen käsitteet ovat lähellä toisiaan, mutta eivät ole yksiselitteisesti toistensa synonyymejä. Tietoisuudessa on kyse jostakin, jonka tarkoitus on arvioitavalle täysin selvä, jolloin tekeminen on tarkoituksellista. Tietoisuuteen liittyy ulkoisesta maailmasta saadun tiedon tulkinta sisäistä tietoa vasten sekä tämän avulla syntyneen uuden tiedon sisäistäminen. Tietoisuus todentaa sen, mitä jokin on. [45] Ymmärrys on kykyä ymmärtää. Se on käsitys-, ajatus- ja arvostelukyky. Ymmärtämisellä on kaksi merkitystä. Älyllisesti painottunut merkitys on käsittää jokin asia, jolloin se on itselle selvä. Toinen merkitys viittaa intuition. Tällöin kyse on vaistonvaraisesta, tuntemuksiin perustuvasta tajuamisesta. Ymmärrys kertoo, miksi jokin on. [46] Tässä tutkimuksessa SA suomennetaan tilannetietoisuudeksi.

Lähteestä riippuen SA:n määritelmät vaihtelevat erittäin abstraktista hyvinkin yksityiskohtaisiin kuvailuihin. SA on määritelty muun muassa tiedostetuksi tietoisuudeksi toimista, jotka ovat avustamattomia ja avustettuja aistinvaraisia tiloja [42]. SA voidaan nähdä myös käyttäytymisilmiönä [47], erillisenä identiteetin tietoisuutena ja automaattisena, spatiaalisenä tai ajallisena tietoisuutena [48]. Osa SA:ta tutkineista korostavat SA:n komponenttien kontekstiriippuvuutta [49] tai määrittelevät SA:n kaiken tiedon ymmärtäväksi tekijäksi, joka voidaan integroida johdonmukaiseen kuvaan tilanteen arvioimiseksi ja siitä selviämiseksi [50]. Osa tutkijoista taas tarkastelee SA:ta pääasiassa työmuistin tuntemuksena [51] tai kuvaavat SA:ta yleisenä kognitiivisena taitona [52]. Tässä tutkimuksessa nojaututaan Endsleyn 1988 esittelemään SA:n määritelmään [31], jossa SA esitetään kolmena eritasoisena hierarkkisena tilana, jotka ovat

- SA-taso 1 elementtien ja ilmiöiden havaitseminen vallitsevassa toimintaympäristössä
- SA-taso 2 toimintaympäristön elementtien ja ilmiöiden välisten merkitysten ymmärtäminen
- SA-taso 3 toimintaympäristön lyhyen aikavälin muutosten ennakoiminen. [31][12]

Ilmataistelussa hyvän SA:n saavuttaminen ja ylläpitäminen ovat keskeistä. Joidenkin havaintojen mukaan hyvä SA on keskeinen edellytys korkealle normatiiviselle suorituskyvylle [53] [12]. Toisaalta on myös raportoitu tilanteita, joissa hyvä SA on ollut yhteydessä matalaan normatiiviseen suorituskyvyn ja päinvastoin [54]. SA:n hyvyttä tai huonoutta ei siis ole mahdollista aukottomasti määritellä normatiivisen suorituskyvyn tason avulla. Tämän vuoksi TTP-kehitystyössä on oleellista mitata sekä ohjaajien SA:ta että normatiivista suorituskyyä. [55]

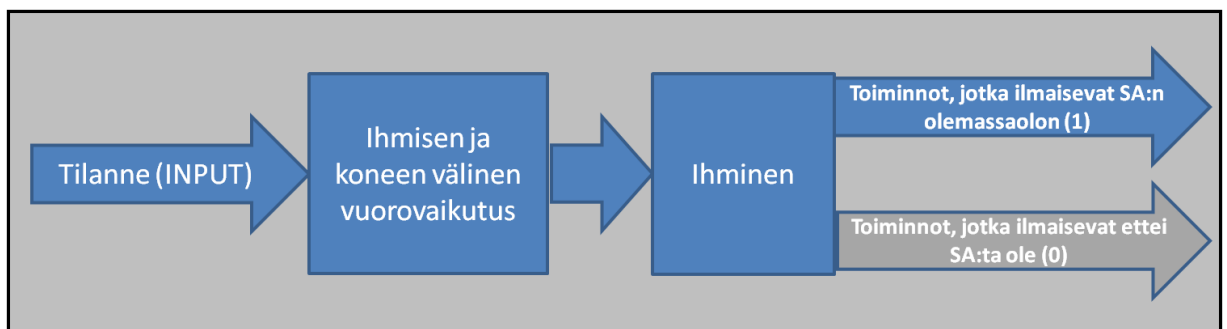
Ennen kuin SA:ta voidaan mitata, on tunnistettava ne toimintaympäristön elementit, ilmiöt ja muutokset sekä niiden väliset merkitykset, joista ohjaajalla tulee olla SA. Tunnistamiseen on mahdollista käyttää strukturoituja menetelmiä, kuten tavoiteohjattu tehtävänälyysi (Goal Directed Task Analysis) [56][57][58], kognitiivinen tehtävänälyysi (Cognitive Task Analysis) [59][60] ja hierarkkinen tehtävänälyysi (Hierarchical Task Analysis) [61] [62]. Edellä mainittuja menetelmiä ei kuitenkaan tässä työssä hyödynnetä, koska Endsleyn [31] esittelemä SA:n määritelmä on monipuolinen, lentosimulaattoreissa testattu ja työhön parhaiten soveltuva.

SA:n mittaamiseen on kehitetty runsaasti erilaisia menetelmiä, joista SAGAT (Situational Awareness Global Assessment Technique) -menetelmä [31][12][36] on yleisimmin käytetty

[62] [63] [64]. SAGAT-menetelmässä tarkastelun kohteena oleva toiminta keskeytetään satunnaisin väliajoin. Keskeytyksen aikana koehenkilöille esitetään kysymyksiä koskien SA:n kannalta keskeisiksi katsottuja toimintaympäristön elementtejä, ilmiöitä ja muutoksia sekä niiden välisiä merkityksiä. SAGAT-menetelmää on kritisoitu siitä, että tehtävän keskeyttäminen kysymysten esittämisen ja vastaamisen ajaksi on tehtävän suorittamisen kannalta häiritsevää [32] ja esimerkiksi L-simulaatioissa jopa mahdotonta. Lentämisen keskeyttäminen haittaa tehtävään keskittymistä ja katkaisee lentämiseen liittyvien toimintojen suorittamisen. Näillä tekijöillä voi olla heikentävä vaikutus tehtävästä suoriutumiseen. [65]

Tässä työssä SA:ta mitataan V- ja L-simulaatioissa. Mittaamiseen käytetään kahta menetelmää. Toinen menetelmä on PT-SAGAT-menetelmä (Post Trial - Situational Awareness Global Assessment Technique) [65] [6] [13], joka on muunnos SAGAT:sta. Toisin kuin SAGAT:ssa, PT-SAGAT:ssa kysymykset esitetään ja niihin vastataan L- ja V-simulaatioiden jälkeen. Muilta osin käytettävä SA:n mittaamenetelmä vastaa pääosin SAGAT-menetelmän periaatteita. Ohjaajille esitetään kysymyksiä ja ohjaajien vastauksia verrataan oikeisiin vastauksiin. Kullekin oikealle vastaukselle annetaan arvo '1' ja kullekin väärälle vastaukselle annetaan arvo '0'. Summaamalla vastauksille annetut arvot, muodostetaan SA-PT-SAGAT-indeksi. [13].

Toinen tässä työssä SA:n mittaamiseen käytettävä menetelmä on Endsleyn ja Garlandin vuonna 2000 kehittämä Testable Response (TR)-menetelmä [36]. TR-menetelmä perustuu oletukseen, että jotkin lentäjän simulaation aikana suorittamat, ulkopuolisen tarkkailijan havaittavissa olevat toimenpiteet on mahdollista toteuttaa hyvällä SA:lla. TR-menetelmässä valitut toimenpiteet arvioidaan sen mukaan, toteuttaako ohjaaja ne oikein (arvo=1) vai väärin (arvo=0). Toteuttamatta jätettyä toimenpidettä tarkastellaan, kuten se olisi tehty väärin. Summaamalla toimenpiteille annetut arvot muodostetaan SA-TR-indeksi (ks. kuva 4).



Kuva 4. TR-menetelmän käyttö SA:n mittaamisessa [36].

1.6.3 Kognitiivinen kuormitus ja sen mittaaminen

Ohjaaja käyttää kognitiivisia resurssejaan informaation havainnointiin, merkityksen antamiseen informaatiolle, päätöksentekoon ja toimintavaihtoehtojen valitsemiseen. Kognitiivinen kuormitus (engl. Mental WorkLoad, MWL) kuvaa tehtävän suorittamisen asettamia vaatimuksia ohjaajan rajallisille kognitiivisille resursseille tilanteessa, jossa suoritustaso halutaan ylläpitää [66][67]. Mikäli tehtävän suorittamiseen vaadittavat kognitiiviset resurssit ja ohjaajan käytettävissä olevat kognitiiviset resurssit ovat epätasapainossa, lentäjälle muodostuu kognitiivista yli- tai alikuormitusta. Tehtävän kognitiivisten vaatimusten noustessa ohjaaja voi tietoisella ponnistelullaan kohdentaa tehtävään lisää kognitiivisia resurssejaan halutun suoritustason säilyttämiseksi. Kun ohjaaja on kohdentanut kaikki käytössään olevat kognitiiviset resurssit tehtävään, tehtävän kognitiivisten vaatimusten noustessa ohjaajan suorituskky laskee riippumatta tietoisesta ponnistelun määrästä. Tässä työssä MWL:llä tarkoitetaan ohjaajan kognitiivista ylikuormitusta. [13]

Kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen käytettävät menetelmät jaotellaan yleisesti objektiivisiin-, subjektiivisiin- ja suorituskkyymenetelmiin [68]. Objektiivisissa menetelmissä MWL:ää mitataan epäsuorasti havainnoimalla sen aiheuttamia fysiologisia muutoksia [69]. Suorituskkyymenetelmissä MWL määritetään mittaamalla ohjaajan suoritustasoa varsinaisessa tehtävässä tai tarkoitukseen erikseen määritetyssä sekundaarisessa tehtävässä [70]. Tällöin oletuksena on, että ohjaajan suorituskky laskee MWL:n noustessa. Subjektiiviset menetelmät perustuvat ohjaajan itsearvioon kokemastaan MWL:stä [71]. Suorituskkyymenetelmät häiritsevät tehtävän suorittamista ja saattavat muodostaa lentoturvallisuusriskin L-simulaatioissa [72]. Toisaalta myös objektiiviset menetelmät soveltuvat huonosti V- ja L-simulaatioihin, joissa fyysinen kuormitus ja ympäristötekijät aiheuttavat fysiologisia muutoksia ja joiden erottaminen MWL:stä saattaa olla vaikeaa [73][74]. Sen sijaan subjektiiviset menetelmät eivät häiritse tehtävän suoritusta, eikä fyysinen kuormitus tai ympäristötekijät vaikuta niiden tarkkuuteen. Subjektiivisia menetelmiä onkin käytetty laajasti lentäjien MWL:n mittaamiseen [8][75][76][77].

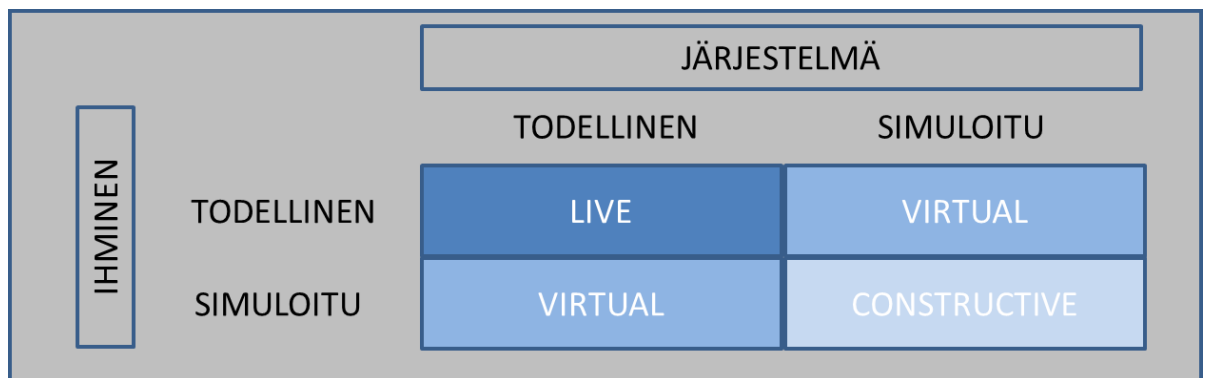
Tässä työssä kognitiivista kuormitusta mitataan NASA Task Load Index:llä (NASA-TLX) (Hart & Staveland, 1988), joka on laajasti käytetty subjektiivinen MWL:n mittaamenetelmä [26]. NASA-TLX:ssä ohjaajat arvottavat MWL:n kuuden dimension avulla asteikolla 1 (pieni kuormitus) – 10 (suuri kuormitus). NASA-TLX:n dimensiot ovat: henkinen, fyysinen ja ajallinen vaatimustaso, suoritustaso, ponnistelu ja turhautuminen. Henkisellä vaatimustasolla mitataan, kuinka paljon tehtävän suorittaminen kuluttaa kognitiivisia resursseja. Fyysisellä vaatimustasolla mitataan, kuinka fyysisesti kuormittavaa tehtävän suorittaminen on. Ajallisella

vaatimustasolla mitataan millaista aikapainetta tehtävän suorittaminen aiheuttaa. Suoritustasolla mitataan, kuinka hyvin tehtävässä koetaan onnistuttavan. Ponnistelulla mitataan, kuinka paljon ponnistelua halutun suoritustason saavuttaminen edellyttää. Turhautumisella mitataan, kuinka paljon tehtävä aiheuttaa epävarmuutta, lannistumista tai ärtymystä. [26]

NASA-TLX-mittaria käytettäessä kognitiivisen kokonaiskuormituksen taso voidaan laskea joko koehenkilöiden antamia arvoja painottamalla dimensioiden suhteen tai laskemalla keskiarvo koehenkilöiden antamista dimensioiden arvoista. Tässä tutkimuksessa MWL määritetään ilman painoja [41]. Aiempien tutkimusten perusteella NASA-TLX on validiteetiltaan hyvä ja käyttökelpoinen MWL:n mittari [63] [41].

2 L-, V-, C- JA LVC-SIMULAATIOIDEN VAHVUUDET JA HEIKKOUEDET

L-, V-, C- ja LVC-simulaatiot esitellään tässä luvussa. Lisäksi kunkin simulaation vahvuuksia ja heikkouksia tarkastellaan perustuen saatavilla oleviin lähteisiin sekä eri maiden ilmavoimien kokemuksiin järjestelmistä. Lopuksi arvioidaan eri simulaatiotyyppien käytettävyyttä tässä työssä esiteltävässä L-V-C-simulaatiomallissa. Kuvassa 5 on esitetty viitekehys L-, V- ja C-simulaatioiden luokitteluksi.



Kuva 5. Simulaatioiden luokitusten viitekehys [14].

Kuvan 5 viitekehys määrittelee olemassa olevien simulaatiojärjestelmien luokituksen, joka perustuu niihin sisältyviin entiteettityyppeihin. L-simulaatioiden kokonaisuudet sisältävät todellisia ihmisiä ja todellisia järjestelmiä. V-simulointiin kuuluvat yksiköt taas ovat todellisia ihmisiä käyttämässä simuloituja järjestelmiä tai simuloitujen ihmisten käyttämiä todellisia järjestelmiä. V-simulaatiot sisältävät yleensä sekä virtuaalisia että konstruktiivisia kokonaisuuksia. Käytännössä C-simulaattori ja V-simulaattori voivatkin olla sama tietokonesovellus, mutta niitä käytetään eri tarkoituksiin. Niissä mallinnettavien lavettien, aseiden ja sensorien parametrit ovat kuitenkin samat. C-simulaatiossa olevat oliot simuloidaan ainoastaan tietokoneille. Tämän viitekehysten avulla LVC-arkkitehtuuria voidaan tarkastella simulaationa, joka sisältää erilaisia kokonaisuuksia. Tämä laajentaa virtuaalisten simulaatioiden kenttää sisällyttämällä valikoimaan eläviä olioita vuorovaikutteiseen ympäristöön. Tästä syystä LVC-simulaatiot ovatkin hybridisimulaatioita, jotka sisältävät sekoituksen erilaisia tietokoneen laitteistoja, ohjelmistokomponentteja, todellisia ihmisiä ja reaaliympäristöjä. [14]

2.1 C-simulaatiot

C-simulaatiot tapahtuvat pääasiallisesti tietokoneen ohjaamana, missä simuloitujen toimijain käyttävät simuloituja järjestelmiä simuloitussa ympäristössä. Tällöin käyttäjä antaa järjestelmälle syötteitä, joten hän vaikuttaa vain epäsuorasti lopputulokseen. Tähän simulaatioluokkaan kuuluvat esimerkiksi strategiset simulaatiot sekä erilaiset päätöksentekoa mallintavat simulaatiot, joissa simuloitujen olioiden operoivat simuloituja järjestelmiä. [14] C-simulaatiot ovat käyttökelpoisia niin sotapelien simuloimiseen kuin myös päätöksenteon testaamiseen ja harjoitteluun erilaisissa toimintaympäristöissä. [78] C-simulaatioiden erityinen vahvuus on niiden toistettavuus. C-simulaatioissa on helppo kokeilla esimerkiksi päätöksentekoaikaväyden variaation vaikutusta taistelun kulkuun tai ammuntaaikaväyden muutosten vaikutusta ilmataisteluhjunnan ohjautumistodennäköisyyteen. [79] Stokastisuus ja Monte Carlo -ominaisuudet muodostavat C-simulaatioista uskottavia ja käyttökelpoisia työkaluja. C-simulaatioita on mahdollista toistaa helposti jopa tuhansia kertoja. [80]

C-simulaatioissa saadaan todennettua kustannustehokkaasti erilaisia T&E-tapahtumia osana ilmataistelujen monimutkaista ja vaikeasti mallinnettavaa tapahtumien kulkua. Näistä syistä johtuen C-simulaatiot sopivat parhaiten TTP:n alustavaan arvioimiseen, jolloin tavoitellaan MP-optimaalisia kvantitatiivisia TTP-sääntöjä. Näitä määritettäessä huomioidaan annetut optimointikriteerit ja rajoitteet, jotka voivat riippua Pk:sta ja Ps:stä. C-simulaatioissa voidaan etsiä esimerkiksi optimaalisia arvoja eri päätöksentekoaikaväyksille tai eri taistelutavoille erilaisia vihollisen kuvauksia vastaan. [81]

C-simulaatioiden skenaariot kannattaa pilkkoa osiin, jolloin ilmataistelun yksittäisiä osia voidaan tarkastella halutulla tarkkuudella. Tällaisia osia ovat esimerkiksi päätöksentekoaikaväydet ja ilmataisteluhjunnan ammuntaaikaväydet erilaisissa TTP:issä. C-simulaattorit ovat hankintakustannuksiltaan suhteellisen edullisia, mutta niissä skenaarioiden rakentaminen vaatii suuren määrän erilaisten parametriarvojen määrittelyä. C-simulaattoriin on yleensä syötettävä lähtöarvot vastustajan lentokoneiden suoritusarvoista ja ilmataisteluhjunnan kantamasta. Lisäksi on määriteltävä käytettävät taktiikat ja toimintatavat. On myös määriteltävä omien hävittäjien, käytettävien ilmataisteluhjunnan ja tutkamallien parametrit. Vasta parametrien syöttämisen jälkeen C-simulaattori on todennukainen ja käyttökelpoinen. [65] Yleisesti ihmisen toteuttama operointi ja päätöksenteko luovat viiveitä ja virheitä verrattuna puhtaaseen tietokonesimulaatioon. [21] C-simulaatioissa ei kyetä arvioimaan ihmisen ja teknologian välisen prosessin vaikutusta ilmataisteluun.

2.2 V-simulaatiot

V-simulaatiossa maailma on tietokoneen luoma, mutta sitä ohjaa aito ihminen. Tällöin oikeat toimijat käyttävät simuloituja järjestelmiä simuloitussa ympäristössä. Esimerkkinä tästä on ihmisen ohjaama virtuaalinen lentosimulaattori, jossa kyetään laukaisemaan simuloituja ilmataisteluohjuksia simuloituihin maaleihin. [14] V-simulaatioissa ihmisen toiminta on oleellisessa roolissa. Tällöin kyetään harjoittelemaan muun muassa motorisia taitoja, kuten lentokoneella lentämistä, ilmataistelun päätöksentekoa, ilmataisteluohjusten oikeanlaista laukaisemista ja erityisesti kommunikaatiota muiden toimijoiden kanssa [33]. Erityisenä vahvuutena V-simulaatioissa on mahdollisuus arvioida ohjaajien toimintaa osana ilmataistelun monimutkaista päätöksentekoa tilanteissa, joissa lentoturvallisuus ja resurssit eivät mahdollista suoraa TTP:n testaamista L-simulaatioissa. [82][83]

V-simulaatioissa on useita etuja verrattuna L-simulaatioihin. V-simulaatioissa on esimerkiksi käytössä rajattomasti polttoainetta ja ohjuksia. Ennen todellisen ilmataisteluohjuksen koelaukaisua voidaan kyseistä laukaisuhetkeä käydä toistamassa V-simulaattorissa lukuisia kertoja. Tällöin todellista toimintaympäristöä jäljittelemällä mahdollistetaan tehokas harjoittelu, jolloin myös minimoidaan inhimilliset virheet todellisessa tilanteessa. Sen lisäksi että V-simulaatioissa säästetään rahaa suhteessa L-simulaatioihin, kyetään niissä riskittömästi harjoittelemaan vaarallisiakin lentotehtäviä, kuten esimerkiksi sotatoimialueen realistista vastustajan maasta ilmaan ohjusuhkaa. V-simulaatioilla harjoittelu mahdollistaa erilaisten havaintojen keräämisen monimutkaisista ilmataistelun skenaarioista, jolloin realistista vihollista vastaan opitaan toimimaan oikein. V-simulaatiot on myös helppo käynnistää ja toistaa uudelleen, jolloin esimerkiksi skenaarion läpivientiä voidaan vaikeuttaa asteittain. [84]

V-simulaatioiden heikkoutena ovat puutteet eri V-simulaatioiden toimintaympäristöjen yhdistämisessä. Myös tietotekniset yhteydet eri simulaatiotyyppien välillä ovat toisinaan haastavia rakentaa. Tämä johtuu erityisesti siitä, että nykyään käytössä olevat V-simulaattorit on kehitetty yleensä toisistaan erillään. Niiden yhdistämistä virtuaaliseksi harjoitusympäristöksi ei järjestelmää suunnitellessa ole osattu huomioida, jolloin niiden uudelleenohjelmointi on vaikeaa ja kallista. [84] Realistisen skenaarion rakentaminen edellyttää kaikkien lavettien, järjestelmien ja aseiden realistista mallintamista sekä mallien parametrien syöttämistä järjestelmään. V-simulaatioiden toteuttaminen on kuitenkin hyödyllistä, koska ne ovat mahdollisesti ainoa keino joidenkin ilmataistelun osa-alueiden harjoitteluun. Esimerkiksi taktiset ohjeistukset rajoittavat L-simulaatioissa elektronisen sodankäynnin toteuttamista [4]. V-simulaatioissa näitä rajoituksia ei ole. V-simulaattorit ovat korvaamattomia välineitä niin hävittäjäohjaajan

koulutuksessa kuin erityisesti tulevaisuuden realististen ilmataistelun skenaarioiden harjoittelussa. [22]

2.3 L-simulaatiot

L-simulaatio tarkoittaa simulaatiota, joka tapahtuu todellisilla välineillä todellisessa ympäristössä ihmisten operoimana. Tällöin oikeat toimijat käyttävät oikeita järjestelmiä, mutta ainakin osittain simuloidusti. Parhaiten L-simulaatiota kuvaava esimerkki on ohjaajan aidosta hävittäjästä simuloidusti laukaisema ilmataisteluohjus aitoon maalilentokoneeseen yleensä harjoitustarkoituksessa. [14] Tyypillisesti L-simulaatioiden toimintaympäristö on luotu mahdollisimman identtiseksi operatiivisen toimintaympäristön, kuten sotatoimialueen kanssa. Tällöin kyetään kehittämään sekä järjestelmiä että menetelmiä siihen suuntaan, että operatiiviset tehokkuusvaatimukset saavutetaan, mutta samalla ylläpidetään lentotoiminta turvallisenä. Operatiivisten järjestelmien hyödyntäminen digitaalisissa, reaaliaikaisissa harjoitusympäristöissä eli L-simulaatioissa on ohjaajalle toimiva tapa saavuttaa tarvittavat tiedot, taidot ja menetelmät menestyäkseen ilmasodassa. [85] Toisaalta L-simulaatioita on toteutettava muun muassa siksi, että C- ja V-simulaatioissa saadut tulokset tai menetelmät kyetään validoimaan ennen, kuin ne hyväksytään operatiiviseen käyttöön. [86]

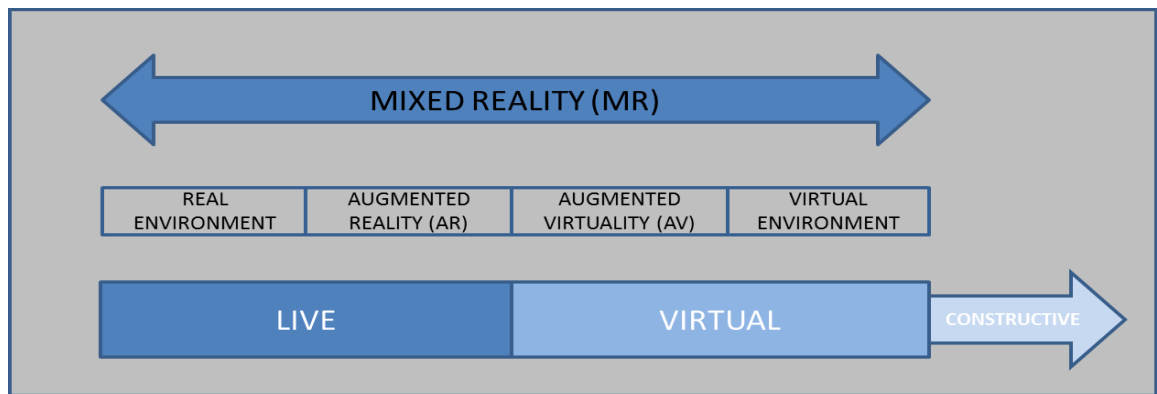
L-simulaation ensisijainen vahvuus on sen todenmukaisuus, koska vain oikealla hävittäjällä lennettäessä saadaan aikaan realistisesti aisteihin vaikuttavat ilmiöt, kuten G-voimat. L-simulaatioihin liittyy myös todellisia riskejä muun muassa törmätä muihin ilmassa oleviin lentokoneisiin tai maastoon. Odottamattomat sääolosuhteet voivat aiheuttaa kyseisen simulaation eli lentotehtävän keskeyttämisen. L-simulaatioissa on huomioitava muun muassa polttoaineen riittävyys, harjoitusalueen ja muun lentämiseen liittyvien määräysten muodostamat rajoitukset sekä ilmassa oleva muu lentoliikenne. [81]

Hävittäjälentokoneella lennetty lentotunti maksaa yleensä useita tuhansia euroja. Tämä tekee L-simulaatioista selvästi kalliimpia verrattuna C- ja V-simulaatioiden tuntihintoihin. Tästä syystä L-simulaatioiden painopiste on lentokoulutuksessa, eikä niinkään taktiikan kehittämisessä. Yhtenä merkittävänä haasteena L-simulaatioissa on realistisen uhkamallin toteuttaminen. Tällöin ilmassa on oltava useita vastustajaa simuloivia lentokoneita, jotta esimerkiksi määrällisesti ylivoimaista vihollista vastaan toteutettava harjoitusskenaario saadaan toteutettua. [81] Lisäksi taktinen ohjeistus rajoittaa merkittävästi sitä, millaisia signaaleja lentokone saa säteillä ulospäin. Oman sotilaallisen suorituskyvyn kannalta on oleellista estää omien sotilaallisten suorituskykyjen paljastuminen vastustajalle. L-simulaatioiden toteuttaminen on tar-

kasti kontrolloitua johtuen esimerkiksi elektromagneettisen säteilyn rajoituksista. Jos näin ei olisi, niin vihollinen kykenisi tiedustelemaan lähetetyn säteilyn ja hyödyntämään sitä sotilaallisesti omaa toimintaa vahingoittavasti. [4] L-simulaatiot ovat kuitenkin ainoa keino verifioida operatiivinen TTP ennen, kuin se voidaan hyväksyä operatiiviseen käyttöön. [85]

2.4 LVC-simulaatiot

LVC-simulaatiot sisältävät niin ihmisiä kuin todellisia ja simuloituja järjestelmiä. Nämä kaikki ovat verkottuneita keskenään luoden yhteisen simuloidun toimintaympäristön. LVC-simulaatiot ovat hybridisimulaatioita, jotka sisältävät laajan valikoiman menetelmiä erilaisissa järjestelmissä ja tietoteknisissä ohjelmistoissa. [14]



Kuva 6. Reality - Virtuality -määrittely Yhdysvaltain puolustusministeriön mukaan [14].

Kuvassa 6 esitetään todellisen (L) ja virtuaalisen (V) ympäristön suhde simulaatioiden toteutuksessa. L-simulaatiot toteutuvat käytännössä kokonaan todellisessa ympäristössä, kunnes niihin lisätään keinotekoisia eli Augmented Reality (AR) ja Augmented Virtuality (AV) -tekijöitä. Nämä yhdessä kun yhdistetään V-simulaatioihin, niin toimintaympäristö muuttuu sekoitetuksi todellisuudeksi (Mixed Reality, MR). Virtuaaliset simulaattorit toimivat siten lähes kokonaan sekoitetussa toimintaympäristössä. LVC-simulaatiot sisältävät kokonaisuuksia, jotka laajentavat V-simulaatioiden toimintaympäristöä kattamaan valikoiman erilaisia menetelmiä L-simulaatioiden vuorovaikutteiseen ympäristöön. LVC-simulaatioita voidaan käyttää lentokoulutukseen, ilmataisteluiden harjoitteluun, ilmaoperaatioiden analysointiin sekä näiden kaikkien osa-alueiden testaamiseen, kehittämiseen, verifiointiin ja validointiin. [87]

Ilmataistelukoulutuksessa on tarkoitus opetella koneiden ominaisuudet, toiminnot ja taktiikat kehittyneessä simulointiympäristössä ja verifioida ne sitten ilmassa oikealla koneella. Tule-

vaisuudessa tämä tulee johtamaan siihen, että L-simulaatioiden määrä tulee vähenemään sen korkean kustannustason vuoksi. Koulutuksessa haetaan toimivinta tasapainoa eri simulaatioiden ja koulutusmuotojen välillä. Merkittävimmät kustannushyödyt saadaan LVC-simulaatioista, koska niissä voidaan simuloida suuria ilmaoperaatioita päivittäin. Jotta ilmaoperaatioon saadaan riittävän paljon elementtejä, kuten vihollista simuloivia lentokoneita, toteutetaan suuria harjoituksia monikansallisesti. Tällaiset harjoitukset ovat kalliita, muutosherkkiä ja aikaavieviä toteuttaa. Niihin osallistuvat ilmavoimat kykenevät testaamaan omaa osaamistaan realistisessa toimintaympäristössä eli L-simulaatioissa vain muutaman kerran vuodessa. LVC-toimintaympäristö mahdollistaa vastaavan kokoisten harjoituskokonaisuuksien toteuttamisen kotimaassa huomattavan kustannustehokkaasti.[88]

Kokeneen hävittäjäohjaajan mukaan: ”*Jos vain olisi riittävästi rahoitusta, tarpeeksi suuret harjoitusalueet sekä riittävästi omia ja vastustajaa simuloivia lentokoneita, niin LVC:tä ei tarvittaisi. LVC:ssä onkin kyse koulutuskyvyn ja resurssien niukkuudesta, lentokoneiden pienestä määrästä sekä resurssien optimoinnista*”. LVC-simulaatioympäristö koostuu erilaisista tietoteknisten järjestelmien toimivasta verkostosta. Vaikka todellista taistelutilannetta ei voidakaan täydellisesti simuloida, on LVC:n avulla suhteellisen helppo mallintaa ja todentaa realistisen taistelun vaatimukset. [89]

LVC:n ratkaisumalleja ja mahdollisuuksia on käsitelty laajasti ilmasotaan liittyvissä kansainvälisissä seminaareissa. [39] LVC:n kehittäminen on erityisesti länsimaisilla ilmavoimilla suunnitteilla varsinkin uusittavan hävittäjäkaluston hankinnan yhteydessä, kuten Suomella lähivuosina. [22]

Tällä hetkellä LVC-simulaatioiden harjoitusympäristö ei vielä täytä ilmataistelukoulutukselle määritettyjä vaatimuksia, koska C-, V- ja L-simulaatiot ovat edelleen riittämättömällä tavalla keskenään integroituja. Niiden käyttö on monella tapaa haastavaa ja teknisesti ongelmallista. [16] Erilaisten tietokoneiden käyttöjärjestelmien rajapintojen yhdistäminen on haastavaa ja vaatii tietokoneilta merkittävää laskentakykyä. Myös simulaatiojärjestelmien käyttökustannukset nousevat tulevaisuudessa, koska tarvitaan runsaasti suorituskykyisiä tietokoneita ja osaavia ihmisiä luomaan ja ylläpitämään simulaatioympäristöjä, jotta edellä mainitut edut saadaan hyödynnettyä. LVC-simulaatioilla ei voi korvata kaikkea todellista lentokoulutusta tai testaustoimintaa, joten edelleen tarvitaan myös L-simulaatioita. LVC-simulaatioilla kyetään kuitenkin mallintamaan suuria ilmataistelun skenaarioita toimivalla tavalla. TTP T&E:n kannalta on kustannustehokkaampaa kehittää ja arvioida TTP:tä yksi simulaattorityyppi kerrallaan. Tällöin kunkin simulaatiotyypin vahvuuksia kyetään hyödyntämään parhaiten, eikä

LVC-simulaatiolla ylipäätään kyetä toteuttamaan tässä työssä esitettävää L-V-C-simulaatiomallin mahdollistamaa TTP T&E:tä. [90]

2.5 Synteesi

Taulukossa 1 on esitetty luvun 2 yhteenveto oleellisimpien havaintojen osalta. L-, V-, ja C-simulaatiot omaavat erilaisia vahvuuksia ja heikkouksia, joita tarkasteltiin alaluvuissa 2.1 - 2.4. Kustannustehokkuuden näkökulmasta olisi hävittäjäohjaajia koulutettava pääosin V-simulaattorissa ennen kuin hyödynnetään vaikeasti toistettavaa ja kallista L-simulaatiota. V-simulaattorissa ei kuitenkaan opita kaikkia lentokoneen ominaisuuksia tai lentokoneen käytöstä tietyissä ääriolosuhteissa. Lisäksi sääolosuhteiden ja esimerkiksi toisen koneen näkeminen V-simulaattorissa on erilaista kuin L-simulaatioiden todellisessa toimintaympäristössä. Erityisesti 3D-hahmottaminen ja toisen koneen näkeminen ovat V-simulaattorissa vaikeaa verrattuna L-simulaatioihin.

Taulukko 1: Yhteenveto L-, V-, C- ja LVC-simulaatioiden hyödyistä ja haitoista.

	C-SIMULAATIOT	V-SIMULAATIOT	L-SIMULAATIOT	LVC-SIMULAATIOT
HYÖDYT	<ul style="list-style-type: none"> Tuottaa MP-optimaaliset kvantitatiivisten TTP-sääntöjen arvot Simulaatiot toistettavissa Kustannustehokas mallintaa ja validoida Kyetään hyödyntämään stokastisuutta ja Monte Carlo –simulaatioita 	<ul style="list-style-type: none"> Tuottaa HMP-optimaaliset TTP-sääntöjen arvot Toistettavuus todellisen tuntuisessa toimintaympäristössä kustannustehokkaasti Ohjaajaan lentotaidon lentoturvallinen kouluttaminen 	<ul style="list-style-type: none"> Tuottaa operatiivisesti HMP-optimaaliset TTP-sääntöjen arvot Realistinen toimintaympäristö Ohjaajan kouluttamisen kannalta paras toimintaympäristö Ohjusammuntojen toistettavuus 	<ul style="list-style-type: none"> Yhdistää eri simulaatioiden vahvuudet Suurten ilmaoperaatioiden realistinen ja kustannustehokas simulointi ja analyysi Kyetään sekä kouluttamaan ohjaajaa että arvioimaan TTP:tä
HAITAT	<ul style="list-style-type: none"> Ei kyetä arvioimaan ihmisen ja teknologian välistä prosessia Ei kouluta ohjaajan lentotaitoja Työläs parametrizoida 	<ul style="list-style-type: none"> Skenaarioiden rakentaminen ja parametrizointi työlästä Ei kykene mallintamaan toimintaympäristöä, G-voimia tai säällimiöitä realistisesti Virtuaalisten toimintaympäristöjen yhdistämisen tekniset haasteet 	<ul style="list-style-type: none"> Suhteessa muihin kallein menetelmä Polttoaine, harjoitusalue tai ohjeistus rajoittaa toimintaa Vastustajan tiedusteltavissa 	<ul style="list-style-type: none"> Integroinnin haasteet Vielä kallis ja vaikea toteuttaa Haastavaa arvioida ihmisen ja teknologian välistä prosessia

C-simulaattori ei kouluta ohjaajien lentotaitoa, mutta taktista ajattelua kylläkin. C-simulaattorin vahvuus on TTP:n kvantitatiivisten sääntöjen kehittämisessä. Niillä saadaan MP-optimaaliset kvantitatiivisten sääntöjen arvot jotakin tiettyä päätöksentekoaikaa tai toimintatapaa ajatellen. Näitä optimiarvoja kyetään soveltamaan V- ja L-simulaatioissa. Oh-

jaajan kouluttamisen kannalta on kustannustehokasta panostaa V-simulaattoreiden realismiin, kuten ohjaintuntuman, ohjaamoympäristön, liikehtelyn ja visuaalisuuden parantamiseen. V-simulaattoriin voidaan rakentaa todellista ilmasotaa simuloiva ympäristö hyödyntäen C-simulaattoreiden ominaisuuksia saumattomasti. C- ja V-simulaatioiden parametrisointi ja todellisuutta lähentelevä mallintaminen on työlästä, mutta kustannustehokkaampaa kuin L-simulaatioiden toteuttaminen. Kokonaisuuden kannalta on kannattavaa lisätä V-simulaatioiden laatua ja määrää, mutta ylläpitää riittävä L-simulaatioiden määrä. Jokaisen simulaatiotyypin on tulevaisuudessa oltava toisiaan tukeva. Tällöin on kannattavaa sisällyttää kaikki simulaatiotyypit samaan harjoitus- tai testausympäristöön reaaliaikaisesti, kuten LVC-simulaatioissa. Tällöin myös kaikkien mallinnettavien järjestelmien kuvaukset olisivat samanlaiset jokaisessa simulaattorissa. LVC-simulaatioiden haasteena on edelleen erilaisten käyttöjärjestelmien ja tietokonerakenteiden yhdistäminen saumattomasti ja kustannustehokkaasti [90]. Tämän johdosta LVC-simulaatioiden toteuttaminen on vielä kallista, mutta lähivuosina sen nähdään jo olevan osa jokapäiväistä harjoitus- ja testaus toimintaa. Todennäköistä onkin, että V-simulaatioita kehitetään asteittain kohti kustannustehokasta LVC-simulaatioiden toimintaympäristöä. [81]

L-, V-, ja C-simulaattoreiden tarkastelu erillisinä kokonaisuuksina on toimiva menetelmä, kun tavoitteena on ilmataistelutaktiikan kehittäminen ja erityisesti ihmisen ja teknologian välisen prosessin arvioiminen osana ilmataistelua. Tällä menettelyllä kyetään yhtäältä hyödyntämään erityyppisten simulaatioiden vahvuuksia ja toisaalta vältetään LVC-simulaatioille tyypilliset arkkitehtuuri- ja yhteensopivuusongelmat. Yhteenvetona voidaan todeta, että tässä työssä kehitettävä L-V-C-simulaatiomalli mahdollistaa sen, että ihmisen ja teknologian välinen prosessi otetaan asianmukaisesti huomioon ilmataistelutaktiikan kehittämisessä. Tällöin operatiiviset HMP-optimaaliset TTP-säännöt ovat hyväksyttäviä ja tasapainossa kognitiivisen kuormituksen, normatiivisen suorituskyvyn, tilannetietoisuuden ja HMP-tuotteen suhteen [13].

3 L-V-C-SIMULAATIOMALLI

Tässä luvussa esitellään L-V-C-simulaatiomallin rakenne, vaiheet ja toimintaperiaate. Lisäksi esitellään L- ja V-simulaatioissa normatiivisen suorituskyvyn, tilannetietoisuuden ja kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen käytettävät menetelmät ja tarkennetaan johdannossa esitetyn kuvan 1 sisältöä.

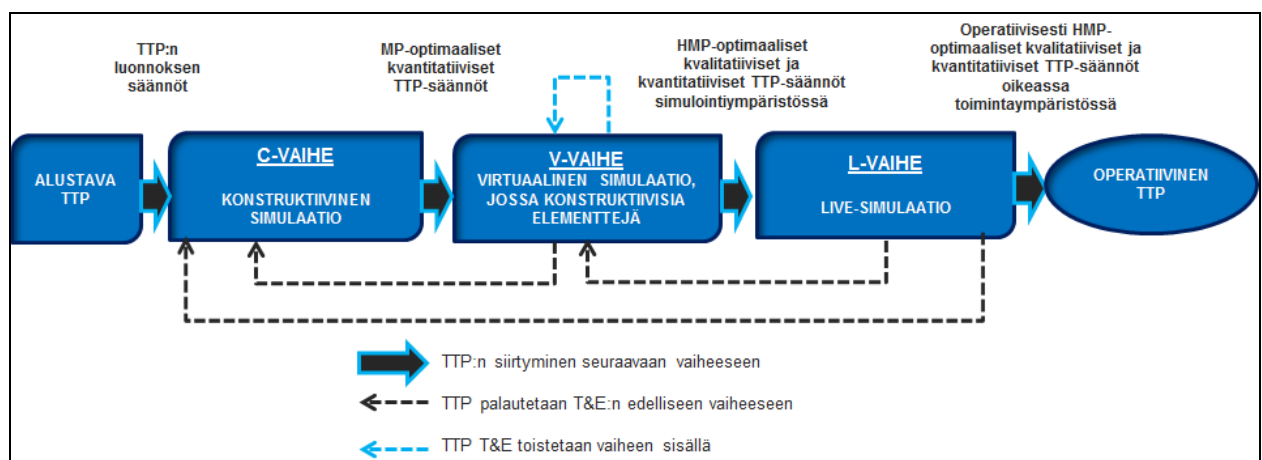
3.1 TTP T&E:n käynnistäminen

Kuvassa 7 esitetään L-V-C-simulaatiomallin peruseriaate. Simulaatiomallin käyttö alkaa TTP-luonnoksen ja ilmataisteluskenaarion (jäljempänä skenario) määrittämisestä, joissa kuvataan omien (jäljempänä 'sinisten') ja vihollisen (jäljempänä 'punaisen') hävittäjät ja niiden tavoitteet, millaisessa ympäristössä TTP:tä käytetään ja mitä TTP:llä tavoitellaan. TTP:n avulla kuvataan miten siniset hävittäjät saavuttavat parhaiten omat tavoitteensa annetussa skenaariossa. TTP esitellään lentäjille yleensä aikamittakaavana, jossa TTP-säännöt on sijoitettu määrättyille etäisyyksille suhteessa punaiseen. Tämän perusteella määritetään hetket, jolloin tehdään TTP:n mukaisia päätöksiä eli liikehditään, kommunikoidaan muille parven jäsenille, ammutaan ilmataisteluohjus tai käytetään muita koneen järjestelmiä. TTP sisältää keinovalikoiman, jolla parven on mahdollista saavuttaa edullinen asema suhteessa viholliseen. Simulaatioissa käytettävät lentokoneet ja järjestelmät mallinnetaan C- ja V-simulaattoreihin. Mallien sisältämät lievät epätarkkuudet eivät merkittävästi vaikuta L-V-C-simulaatiomallin käyttöön, koska tarkasteltava TTP evaluoidaan C- ja V-vaiheiden jälkeen L-simulaatiossa, jossa sininen osapuoli käyttää todellisia järjestelmiä.

Työssä esiteltävän L-V-C-simulaatiomallin C-vaiheessa määritellään kvantitatiivisten TTP-sääntöjen optimaaliset arvot, joista käytetään jatkossa nimitystä MP-optimaaliset TTP-säännöt ja MP-optimaalisten TTP-sääntöjen arvot (ks. kuva 1). MP-optimaalisia TTP-sääntöjä ja niiden arvoja määritettäessä huomioidaan annetut optimointikriteerit ja rajoitteet, jotka riippuvat Pk:sta ja Ps:stä. C-vaiheessa ei huomioida kvalitatiivisia TTP-sääntöjä. V-vaiheessa käytetään sekä kvalitatiivisia että kvantitatiivisia TTP-sääntöjä. V-vaiheessa mitataan HMP:n tuottamaa Pk:ta ja Ps:sää sekä lentäjien MWL:ää, NP:tä ja SA:ta. Tällä mekanisoinnilla varmistetaan, että lentäjän ja hävittäjälentokoneen vuorovaikutus on sellaista, että MWL, NP ja SA pysyvät hyväksyttävänä sekä HMP:n tuottamat Pk ja Ps ovat riittävän korkeat. Mikäli MWL, NP, SA tai HMP-tuote eivät ole hyväksyttäviä, V-vaiheen sisällä on mahdollista korjata kvalitatiivisten TTP-sääntöjen sanamuotoja. Toisaalta, jos ilmenee tarvetta

muuttaa kvantitatiivisia TTP-sääntöjä, C-vaihe uusitaan uusien MP-optimaalisten sääntöjen määrittämiseksi. V-vaiheen tuloksena saadaan HMP-optimaaliset TTP-säännöt simulaatioympäristöön. L-vaiheessa käytetään V-vaiheessa tuotettuja HMP-optimaalisia TTP-sääntöjä ja varmistetaan, että ne tuottavat hyväksyttävän MWL:n, NP:n, SA:n, Pk:n ja Ps:n myös todellisessa lentoympäristössä. Mikäli L-vaiheen tulokset eivät ole hyväksyttäviä, TTP palautetaan V- tai C-vaiheeseen. L-vaiheen tuloksena muodostuu todelliseen lentoympäristöön soveltuvat HMP-optimaaliset TTP-säännöt (operatiiviset HMP-optimaaliset TTP-säännöt), joita käytetään MWL, NP, SA ja HMP-tuote ovat hyväksyttäviä ja tasapainossa. [6] [13]

TTP-luonnoksen kvantitatiivisten TTP-sääntöjen arvot ja kvalitatiivisten TTP-sääntöjen verbaaliset kuvaukset perustuvat parhaaseen käytössä olevaan tietoon. L-V-C-simulaatiomallin avulla tunnistetaan operatiiviset HMP-optimaaliset TTP-säännöt valituille TTP-luonnoksen säännöille. L-V-C-simulaatiomalli ei rajoita tarkasteltavien TTP-sääntöjen lukumäärä ja operatiiviset HMP-optimaaliset TTP-säännöt voidaan määritellä koko parvelle, parille tai yksittäiselle ohjaajalle. [6]



Kuva 7. L-V-C-simulaatiomallin peruseriaate.

3.2 C-vaihe

C-vaiheessa analysoidaan ainoastaan kvantitatiivisia TTP-sääntöjä. Ensimmäisessä C-vaiheessa TTP-luonnoksen kvantitatiiviset säännöt implementoidaan C-simulaatioon ja punainen mallinnetaan seuraamaan TTP-luonnoksen skenaariota. Valittuja kvantitatiivisia TTP-sääntöjä varioidaan ja simulaatiota toistetaan, kunnes MP-optimaaliset TTP-sääntöjen arvot on löydetty. TTP-sääntöjä varioidaan kaikkien niiden sinisten osalta, joiden TTP-säännöt vaikuttavat tarkastelun kohteena oleviin lentäjiin. Jos esimerkiksi L-V-C-simulaatiomallilla etsitään siipikoneiden optimaalisia sääntöjä, myös parin- ja parven-

johtajan sääntöjä säädetään niiltä osin, kuin ne vaikuttavat siipimiehen toimintaan. C-vaiheessa maksimoitavana optimointikriteerinä käytetään P_k :ta ja rajoituksena $P_s=1$. C-vaiheessa P_k :n arviointi perustuu sinisten $P_k=1$ ohjusammuntojen ja kaikkien sinisten ampumien ohjusten lukumäärien suhteeseen. Vastaavasti P_s :n arviointi perustuu punaisten $P_k=0$ ohjusammuntojen ja kaikkien punaisten ampumien ohjusten lukumäärien suhteeseen. P_k ja P_s arvioidaan erikseen jokaiselle ammutatapahtumalle. P_k :n ja P_s :n keskiarvoja käytetään MP-tuotteen arvona, joka myös kuvaa parven ensisijaista tavoitetta. Vaikka tässä diplomityössä P_k :ta ja P_s :ää käytetään optimointikriteerinä ja rajoituksena, L-V-C-simulaatiomalli sinällään ei rajoita käytettävää optimointikriteeriä ja rajoitusta.

Mikäli V- tai L-vaiheen jälkeen SA, MWL, NP tai HMP-tuote ei ole hyväksyttävä, C-vaihe uusitaan (ks. kuvan 7 musta katkoviiva V- ja L- vaiheista C-vaiheeseen). Tässä tapauksessa V- tai L-vaiheen tulosten perusteella tunnistetaan ne kvantitatiiviset säännöt, joita muuttamalla on todennäköisintä parantaa SA:ta, MWL:ää, NP:tä, tai HMP-tuotetta. Kun C-vaihe uusitaan, alkuperäinen optimointikriteeri muutetaan minimoitavaan muotoon $(P_k - P_{kref})^2$. P_{kref} :n valinnassa otetaan huomioon aiempien C-vaiheiden perusteella määritetty optimaalinen P_k sekä V- ja L-vaiheiden tulokset. Jos V- tai L-vaiheissa tunnistetaan tarve muuttaa kvantitatiivisten TTP-sääntöjen arvoja NP:n, SA:n tai MWL:n parantamiseksi, P_{kref} :n arvon tulee olla pienempi kuin edellisessä C-vaiheessa määritelty optimaalinen P_k . On oletettavaa, että uusitun C-vaiheen tulos tuottaa toivotun NP, SA ja/tai MWL muutoksen, aiemmin asetetun $P_s=1$:n ja aiempaa optimiarvoa pienemmän P_k :n. L-V-C-simulaatiomalli ei aseta esteitä $P_s=1$ rajoituksen muuttamiseksi tai poistamiseksi. Tässä diplomityössä rajoitus $P_s=1$ kuitenkin säilytetään, koska TTP:n ei sallita aiheuttavan sinisiä tappioita. L-V-C-simulaatiomalli mahdollistaa myös uuden P_k :sta riippumattoman optimointikriteerin ottamisen käyttöön. Koska uusitun C-vaiheen optimointikriteeri ja rajoitus perustuvat aiempien L- ja V-vaiheiden tuloksiin, nyt saatavat MP-optimaaliset TTP-säännöt ottavat epäsuorasti huomioon SA:n, MWL:n ja HMP-tuotteen.

3.3 V-vaihe

V-vaiheessa huomioidaan kvalitatiiviset ja MP-optimaaliset (ts. kvantitatiiviset) TTP-säännöt. V-vaiheen MP-optimaaliset TTP-säännöt määräytyvät edeltävässä C-vaiheessa. Ensimmäisen V-vaiheen kvalitatiiviset TTP-säännöt ovat samat, joita käytettiin TTP-luonnoksessa. Jos V-vaihe toistetaan, kvalitatiiviset TTP-säännöt saadaan edeltävästä V- tai L-vaiheesta (ks. kuvan 7 musta katkoviiva L-vaiheesta V-vaiheeseen ja sininen katkoviiva V-vaiheesta

V-vaiheeseen). V-vaihetta toistamalla on mahdollista säätää kvalitatiivisten TTP-sääntöjen verbaalisia kuvauksia. Tällöin kvantitatiiviset TTP-säännöt säilytetään muuttumattomina iteraatioiden välillä.

Ohjaajat, joiden TTP-säännöt ovat tarkastelun kohteena, ovat koehenkilöitä ja he lentävät V-simulaation. Skenaarion muut lentokoneet implementoidaan V-simulaatioon konstruktiiivisina simulaatio-olioina. V-vaiheessa mitataan koehenkilöiden NP:tä, SA:ta ja MWL:ää sekä HMP-tuotetta, joka kuvaa parven ensisijaisen tavoitteen toteutumista. HMP-tuotetta arvioidaan Pk:n ja Ps:n avulla. Pk määräytyy simulaation alussa ja simulaation lopussa elossa olevien punaisten hävittäjälentokoneiden lukumäärien suhteena. Ps määräytyy simulaation alussa ja simulaation lopussa elossa olevien sinisten hävittäjälentokoneiden lukumäärien suhteena.

V-simulaatiossa koehenkilöiden tehtävänä on noudattaa annettuja kvalitatiivisia ja MP-optimaalisia kvantitatiivisia TTP-sääntöjä. Jokaisessa V-simulaatiossa käytetään eri koehenkilöitä. Siniset konstruktiiiviset oliot määritetään noudattamaan TTP T&E:n aiemmissa vaiheissa määritettyjä kvalitatiivisia ja MP-optimaalisia kvantitatiivisia TTP-sääntöjä. Punaiset konstruktiiiviset oliot määritetään noudattamaan TTP-luonnoksen skenaariota. Koehenkilöille ei etukäteen kerrota, miten V-simulaatio etenee. Menettelyn avulla varmistetaan, että V- ja C-simulaatiot ovat keskenään samanlaisia ja että yksittäiset V-simulaatiot etenevät kaikille koehenkilöille samalla tavalla. V-simulaatioissa mitataan koehenkilöiden SA:ta, MWL:ää, NP:tä ja HMP-tuotetta. V-simulaatioiden lukumäärä valitaan siten, että otoskoko mahdollistaa mittaustulosten tilastollisen tarkastelun.

V-vaiheen päätteeksi NP-, SA- ja MWL-tulokset analysoidaan ilmataistelun asiantuntijoiden toimesta. Jos Ps ja Pk eivät ole hyväksyttäviä, analyysin tavoitteena on tunnistaa ne TTP-säännöt, joita muuttamalla HMP-tuotetta on mahdollista parantaa. Jos sen sijaan Ps ja Pk ovat hyväksyttäviä, analyysillä pyritään tunnistamaan ne TTP-säännöt, joita muuttamalla NP-, SA- ja MWL-tuloksia kyetään parantamaan. Koska NP mittaa TTP-sääntöjen noudattamista, matalat NP-tulokset on mahdollista yhdistää täsmällisesti tiettyihin TTP-sääntöihin. Matalimpiin NP-tuloksiin liittyvät TTP-säännöt ovat kandidaatteja muutettavia TTP-sääntöjä valittaessa. Toisin kuin NP-tulokset, SA- ja MWL-tulokset eivät liity tiettyihin TTP-sääntöihin. SA-tulokset liittyvät yksittäisiin simulaation kohtiin ja MWL-tulokset liittyvät simulaatioon kokonaisuutena. Mikäli SA- tai MWL-tulokset ovat matalia, ilmataistelun asiantuntijat pyrkivät simulaatiotallenteita analysoimalla arvioimaan, mitkä TTP-säännöt todennäköisimmin aiheuttivat matalat SA- tai MWL-tulokset. Näin tunnistetut TTP-säännöt ovat kandidaatteja muutettavia TTP-sääntöjä valittaessa. Lopuksi kaikkien tunnistettujen kandidaatti-

en joukosta valitaan muutettavaksi ne TTP-säännöt, joiden muuttamisen arvioidaan todennäköisimmin parantavan NP:tä, SA:ta, MWL:ää, Pk:ta ja Ps:ää.

Jos muutettavat TTP-säännöt ovat kvantitatiivisia, TTP palautetaan C-vaiheeseen muuttamatta kvalitatiivisia sääntöjä (ks. kuvan 7 musta katkoviiva V-vaiheesta C-vaiheeseen). Jos sen sijaan muutettavat TTP-säännöt ovat kvalitatiivisia, V-vaihe uusitaan koehenkilöiden muuteilla kvalitatiivisten sääntöjen verbaalisilla kuvauksilla (ks. kuvan 7 sininen katkoviiva V-vaiheesta V-vaiheeseen). Konstruktivistien olioiden kvalitatiivisia TTP-sääntöjä muutetaan vain, mikäli niillä on vaikutusta koehenkilöiden kykyyn noudattaa omia TTP-sääntöjään.

Viimeisimmän V-vaiheen NP-, SA- ja MWL-tuloksia sekä Pk:ta ja Ps:ää verrataan aina edeltävän V-vaiheen tuloksiin. Vertailu tehdään sekä tilastollisena tarkasteluna että asiantuntijoiden toteuttamana laadullisena tarkasteluna. Tilastollisten menetelmien avulla tunnistetaan merkittävät erot V-vaiheiden NP-, SA- ja MWL-tuloksissa sekä Pk- ja Ps-arvoissa. Mikäli viimeisimmän V-vaiheen tulokset ovat laadullisen ja tilastollisen tarkastelun valossa hyväksyttäviä, TTP T&E etenee L-vaiheeseen. Muussa tapauksessa TTP T&E:tä jatketaan V- tai C-vaiheessa. Päätökseen saatetun V-vaiheen tuloksena tarkasteltavalle TTP:lle saadaan HMP-optimaaliset säännöt.

3.4 L-vaihe

L-vaiheessa aiemmin määritetyt HMP-optimaaliset TTP-säännöt evaluoidaan todellisessa lentoympäristössä. L-vaiheessa tuotetaan koehenkilöiden SA-, NP- ja MWL-tulokset sekä HMP-tuotteen Pk ja Ps, joilla tuetaan asiantuntijoiden päätöstä TTP:n hyväksymisestä operatiiviseen käyttöön.

L-vaiheessa käytetään oikeita hävittäjälentokoneita ja lentäjiä. Lentäjät jakaantuvat koehenkilöihin ja tukeviin lentäjiin. Koehenkilöt ovat lentäjiä, joiden HMP-optimaalisia TTP-sääntöjä tarkastellaan ja joiden tehtävänä on noudattaa V-vaiheessa määritettyjä HMP-optimaalisia TTP-sääntöjä. Koehenkilöille ei paljasteta, miten V-simulaatiossa käytettävä skenaario kehittyy. Tukevia toimintoja suorittavat lentäjät lentävät muita sinisen ja punaisen lentokoneita. Tukevien toimintojen lentäjien tehtävänä on noudattaa samoja TTP-sääntöjä, joita konstruktivistiset oliot käyttivät V-vaiheessa. Punaista simuloivat tukevat lentäjät ohjeistetaan noudattamaan C- ja V-vaiheissa käytettyä skenaariota.

Jokaisesta L-simulaatiosta kerätään koehenkilöiden NP-, SA- ja MWL-tulokset sekä Pk ja Ps. L-simulaatioiden Pk ja Ps arvioidaan samalla tavoin kuin V-vaiheessa. Hävittäjälentokoneiden ja lentäjien rajallinen käytettävyys saattaa rajoittaa L-vaiheen otoskokoja. Tämän vuoksi L- ja V-vaiheiden tuloksia tulee valmistautua vertailemaan kokonaisvaltaisesti, ilman tilastollisia menetelmiä. Vertailun tuloksena muodostetaan arvio siitä, ovatko L- ja V-vaiheen tulokset keskenään tasapainoisia. Tässä yhteydessä tasapainoinen tarkoittaa hyväksyttävää HMP-tuotetta sekä L-vaiheen NP-, SA- ja MWL-tuloksia, jotka eivät ole ilmataistelun asiantuntijoiden arvioon perustuen merkittävästi huonompia kuin V-vaiheessa saadut tulokset. Mikäli L- ja V-vaiheiden tulokset eivät ole tasapainossa, asiantuntijat tunnistavat NP-, SA- ja MWL-tulosten avulla ne TTP-säännöt, joita muuttamalla on mahdollista parantaa L-vaiheen tuloksia. Kun muutettavat TTP-säännöt on tunnistettu, TTP palautetaan C- tai V-vaiheeseen jatkokehittämiseksi (ks. kuvan 7 musta katkoviivat L- vaiheesta V- ja C-vaiheisiin). Jos L- ja V-vaiheiden tulokset ovat tasapainossa, TTP-luonnoksen TTP-säännöt on saatu muutettua operatiivisesti HMP-optimaalisiksi TTP-säännöiksi ja TTP T&E voidaan päättää.

3.5 V- ja L-vaiheissa käytettävät mittarit

Hävittäjälentokone ja lentäjä ovat keskenään vuorovaikutuksessa, jota kuvataan ihmisen ja teknologian välisenä prosessina eli HMP:nä. V- ja L-simulaatioissa mitataan HMP-tuotetta Pk:n ja Ps:n avulla sekä koehenkilöiden SA:ta, MWL:ää ja NP:tä. [6] [7] [13] Tässä aluvuorossa kuvataan, miten NP:tä, SA:ta ja MWL:ää mitataan L-V-C-simulaatiomallin V- ja L-vaiheissa.

3.5.1 Normatiivisen suorituskyvyn (NP:n) mittaaminen

Täydellinen normatiivinen suorituskyky (Normative Performance, NP) on ideaalisesti päätöksiä tekevällä ihmisellä. Todellisissa tilanteissa ihmisen tekemät päätökset eivät kuitenkaan ole koskaan ideaalisia, koska ihmiset eivät tyypillisesti noudata esimerkiksi hyötyteorian aksioimia päätöksiä tehdessään. [91] NP ilmaisee todellisen ihmisen ja ideaalisen ihmisen päätöksenteon eroa. Mitä lähempänä ideaalista päätöksentekoa ihmisen päätöksenteko on, sitä parempi on NP. [6] [13]

Ilmataistelussa NP kuvaa, miten täsmällisesti lentäjä noudattaa käskettyjä TTP-sääntöjä. NP:n mittaaminen koostuu valituista kvantitatiivisista ja kvalitatiivisista TTP:n säännöistä. Valitut säännöt muodostetaan niin, että niiden avulla kyetään mittaamaan ohjaajan NP:tä eli

kykyä noudattaa TTP:n sääntöjä. NP-tapahtumat pisteytetään niin, että ohjaajan lennettyä V- tai L-simulaation, tarkastellaan tuloksia NP-mittariin valittujen sääntöjen. Jokaisesta noudatetusta säännöstä saa yhden pisteen ja jokaisesta noudattamattomasta säännöstä nolla pistettä. NP-mittarin sääntöjä ovat esimerkiksi TTP:ssä määritetyt vähimmäisetäisyydet vihollisen hävittäjiin sekä ohjusten laukaisun ja -päivittämisen aikana noudatetut lentoarvot. Kunkin NP-mittarin säännön osalta ohjaajien saamat pisteiden keskiarvot lasketaan. Lisäksi voidaan laskea NP-mittarin pistearvot koko simulaatiolle yksittäisten sääntöjen keskiarvona.

3.5.2 Tilannetietoisuuden (SA:n) mittaaminen

SA:n mittaamisessa käytetään luvussa 1.6.2 esiteltyjä PT-SAGAT- ja TR-menetelmiä. PT-SAGAT-mittarin säännöt koostuvat ennalta määritellyistä kutakin SA-tasoa koskevista säännöistä, jotka esitetään ohjaajille kysymysten muodossa. TR-mittarin säännöt koostuvat ennalta määritetyistä ilmataisteluun liittyvistä säännöistä, jotka osoittavat ohjaajan eli koehenkilön SA:n tai sen puutteen yksiselitteisesti.

PT-SAGAT-menetelmän, kuten muidenkin menetelmien osalta simulointi tallennetaan, ja se toistetaan koehenkilöille lennetyn simulaation jälkeen. Tällöin SA:n mittaaminen voidaan toteuttaa niin V- kuin L-simulaatioissa samalla tavalla. Tallennetun simulaation toisto keskeytetään ennalta määritetyissä ajanhetkissä ja koehenkilöille esitetään SA-mittarin säännöiksi valittuja SA-tasoja 1-3 koskevia kysymyksiä. Pysäytysten aikana koehenkilöt saavat hyödyntää ohjaamonäyttöjään sekä ääninauhoitetta, joiden avulla kyetään vertaamaan SA:ta lennetyn skenaarion tapahtumiin. Tällainen ilmataistelulennon jälkeinen läpikäynti on ohjaajille tuttu menetelmä, joten tämä tukee osaltaan menetelmän validiteettia [65]. Koehenkilöiden SA-tapahtumat pisteytetään niin, että ohjaajan lennettyä V- tai L-simulaation, tarkastellaan tuloksia SA-mittariin valittujen sääntöjen pohjalta. PT-SAGAT-mittarin SA-tasoa 1-3 kuvaaviin kysymyksiin ohjaaja vastaa joko kyllä tai ei. Kustakin oikeasta (kyllä) vastauksesta saa yhden pisteen ja väärästä (ei) vastauksesta nolla pistettä.

Käytettäessä TR-menetelmää on kuvan 4 mukaisesti oltava selkeä ja yksiselitteinen mahdollisuus todeta koehenkilön toimista, että onko hänellä SA:ta jostakin tapahtumasta vai ei. Esimerkiksi kiitotiellä olevan toisen lentokoneen olisi aiheutettava testattavan tekemään ylösveto laskeutumisen sijaan. Jos ylösvetoa ei tapahdu, voidaan todeta, että ohjaajalla ei ollut SA:ta vaaratilanteen aiheuttaneesta toisesta lentokoneesta. Tällaiset selkeät reaktiot ovat käytännössä helppoja mitata, ja näin niiden avulla voidaan mitata ohjaajan SA:ta. Testattavat tilanteet voivat olla esimerkiksi kokonaisuuden kannalta tärkeimpiä vaikuttavia asioita, kuten ilmatais-

telussa menestymiseen tai selviytymiseen liittyä asioita. TR:n mittaamisen käyttö suorituskykyperustaisen SA:n mittaamisessa on suunniteltava hyvin. Jokainen tapahtuma on oltava ennakkoon määritetty. Menetelmän etuna on se, että kun löydetään uskottava tapahtuma ja siihen yksiselitteinen reaktio koehenkilön toimesta, kyetään siitä mittaamaan SA yksiselitteisesti. TR-menetelmä on toimiva SA:n mittaamisen menetelmä silloin, kun mitataan esimerkiksi arvioitavan toimia poikkeuksellisissa olosuhteissa tai esimerkiksi hätätoimenpiteitä simulaattorissa. [36] Jokaisesta koehenkilön toteuttamasta TR-mittarin säännön noudattamisesta saa yhden pisteen ja jokaisesta säännön noudattamattomuudesta nolla pistettä. Kunkin SA:n mittaamisen menetelmän PT-SAGAT- tai TR-pistearvona käytetään koehenkilöiden pisteiden keskiarvoa. Koko simulaation PT-SAGAT- tai TR-pisteet ovat kaikkien kysymyksiä pisteiden keskiarvo.

3.5.3 Kognitiivisen kuormituksen (MWL:n) mittaaminen

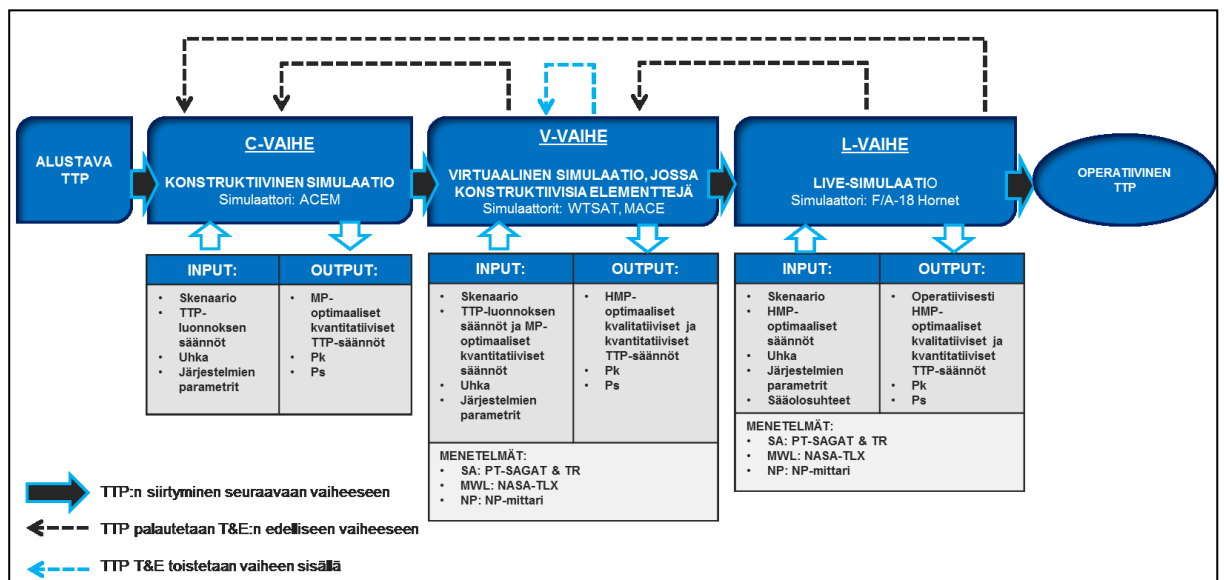
MWL:n mittaamisessa käytetään alaluvussa 1.6.3 esiteltyä NASA-TLX-menetelmää. Dimensioiden MWL-pistearvona käytetään koehenkilöiden antamien pisteiden keskiarvoa. Kokonais-MWL-pisteinä käytetään dimensiopisteiden keskiarvoa. Huomioitavaa on, että MWL-pisteitä on yksi koko simulaatiolle. Tämä eroaa NP-, PT-SAGAT- ja TR-mittareiden sääntöjen keskiarvojen esitystavasta siten, että näitä kyetään arvioimaan myös pienempinä kokonaisuuksina. Tallöin simuloitava skenaario voidaan pilkkoa osiin ja tarkastella erikseen.

4 LIVE - VIRTUAL - CONSTRUCTIVE -SIMULAATIOMALLIN ESIMERKKIKÄYTTÖTAPAUS

Tässä luvussa demonstroidaan diplomityössä kehitetyn ja luvussa 3 esitellyn L-V-C-simulaatiomallin käyttäminen TTP T&E:ssä esimerkkikäyttötapausten avulla. Käyttötapausta esitetään vaiheittain painottaen mallin erityispiirteitä. Esimerkkikäyttötapausten yleiskuvaus on esitetty kuvassa 8.

4.1 Esimerkkikäyttötapausten yleiskuvaus

L-V-C-simulaatiomallin käyttö alkaa alustavan TTP:n ja skenaarion määrittelyllä. Skenaario koostuu kolmesta peräkkäisestä tutkahyökkäyksestä, joissa kaikissa käytetään erilaista taistelutekniikkaa. Taistelutekniikka sisältää alustavan TTP:n mukaiset päätöksenteko- ja ammuntaetäisyydet. Esimerkin TTP-luonnos perustuu Ilmavoimien taktiseen ohjeistukseen. TTP:n yleisimmät kvantitatiivisten sääntöjen muuttujat ovat ilmanopeus, lentokorkeus sekä lentokoneen muodostamat lentoradat. TTP:n kvalitatiivisten sääntöjen verbaliset kuvaukset liittyvät parven jäsenten toteuttamaan sisäiseen ja ulkoiseen kommunikaatioon sekä erilaisiin informaation jakamisen menetelmiin, kuten radiopuhelinfraseologiaan ja Link 16 -verkon jakamaan ilmatilannekuvaan.



Kuva 8. L-V-C-simulaatiomallin esimerkkikäyttötapausten yleiskuvaus.

C-vaiheessa TTP, skenaario ja järjestelmien parametrit syötetään Air Combat Evaluation Model (ACEM) C-simulaattoriin. ACEM-simulaatioilla tunnistetaan TTP:n kvantitatiivisten sääntöjen optimiarvot ilmataistelussa, kuten lentoarvot, päätöksenteko- ja ammuntaetäisyydet. C-vaiheessa etsitään optimiarvoja siten, että Pk maksimoidaan ja lisäksi vaaditaan, että rajoitus $Ps=1$ toteutuu. C-simulaatioiden perusteella muodostuu MP-optimaaliset kvantitatiiviset TTP-säännöt sekä MP-tuote eli Pk:n ja Ps:n estimaatit. C-vaiheessa tarkastellaan ainoastaan kvantitatiivisia TTP-sääntöjä, joten ihmisen ja koneen välistä vuorovaikutusta ei huomioida.

V-vaiheessa Weapon Tactics and Situation Awareness Trainer (WTSAT) V-simulaattoriin ja Modern Air Combat Environment (MACE) C-simulaattoriin viedään C-vaiheesta saadut MP-optimaaliset kvantitatiiviset TTP-säännöt, TTP-luonnoksen kvalitatiiviset säännöt, skenaario, uhka ja järjestelmien parametrit. MP-optimaaliset kvantitatiiviset TTP-säännöt pysyvät ennallaan ja lisäksi huomioidaan kvalitatiiviset säännöt liittyen parven kommunikaatioon ja esimerkiksi ohjaajan toteuttamaan tutkan käyttöön. Käytettävää TTP:tä noudatetaan tarkasti, jolloin myös päätöksenteko- ja ilmataisteluohjusten ammuntaetäisyydet säilyvät ennallaan.

V-vaihetta testataan ja valmistellaan useilla koesimulaatioilla. Näin saadaan lentoarvot, päätöksenteko- ja ammuntaetäisyydet ja muut tarvittavat määreet yhteneväksi C-vaiheen parametrien kanssa. Kun V-vaiheen testaaminen ja valmistelevat simulaatiot ovat valmiit, lentää ryhmä Hornet-koulutettuja ohjaajia koehenkilöinä skenaarion WTSAT:illa tarkoituksenaan mahdollisimman tarkasti noudattaa TTP:tä. Ohjaajia arvioidaan SA:n, NP:n ja MWL:n suhteen luvuissa 1 ja 3 esitetyillä tavoilla ja havainnot kirjataan ylös. Lisäksi arvioidaan HMP-tuotetta, joka kuvaa parven ensisijaisen tavoitteen toteutumista. HMP-tuotetta arvioidaan Pk:n ja Ps:n avulla.

V-simulaatioiden tulosten analyysivaiheessa arvioidaan onko TTP riittävän hyvä ja ovatko Ps ja Pk hyväksyttävät. Tällöin pyritään tunnistamaan ne potentiaaliset TTP-säännöt, joita muuttamalla HMP-tuotetta, NP:tä, SA:ta tai MWL:ää on mahdollista parantaa. Tarvittaessa TTP palautetaan jatkokehitettäväksi C-vaiheeseen. Toistettujen C-simulaatioiden jälkeen toteutetaan jälleen V-simulaatiot huomioiden HMP:hen vaikuttavat komponentit (NP, SA ja MWL) kuten aiemminkin. Kun V-simulaatioiden tulosten todetaan olevan riittävän hyvät, voidaan siirtyä L-vaiheeseen.

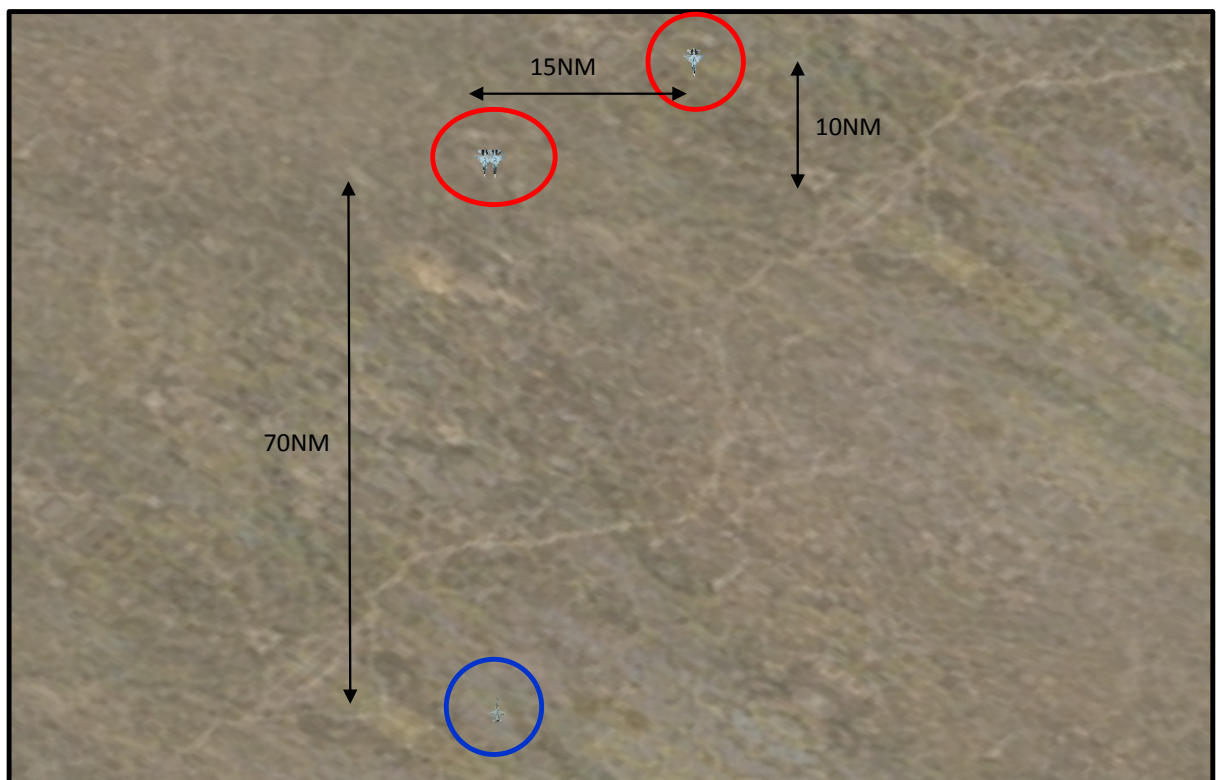
L-simulaatioiden tarkoitus on validoida C- ja V-simulaatioiden tulokset. Jos L-simulaatioiden tulokset eroavat merkittävästi V-simulaatioiden tuloksista, niin siirrytään takaisin C- tai

V-vaiheeseen. Jos taas L-simulaatioiden tulokset ovat riittävän hyvät, voidaan todeta TTP:n olevan hyväksyttävissä operatiiviseen käyttöön.

4.2 C-simulaatioiden toteutus

Tässä työssä C-simulaatiot toteutetaan ACEM:lla. ACEM:ssa on käytössä seuraavien järjestelmien validoidut mallit:

- yksi sininen F/A-18 Hornet
- kolme punaisen hävittäjälentokonetta
- sinisen ja punaisten maalinosoitustutkat
- sinisen ja punaisten ilmataisteluohjukset



Kuva 9. C-simulaatioiden lähtöasetelma.

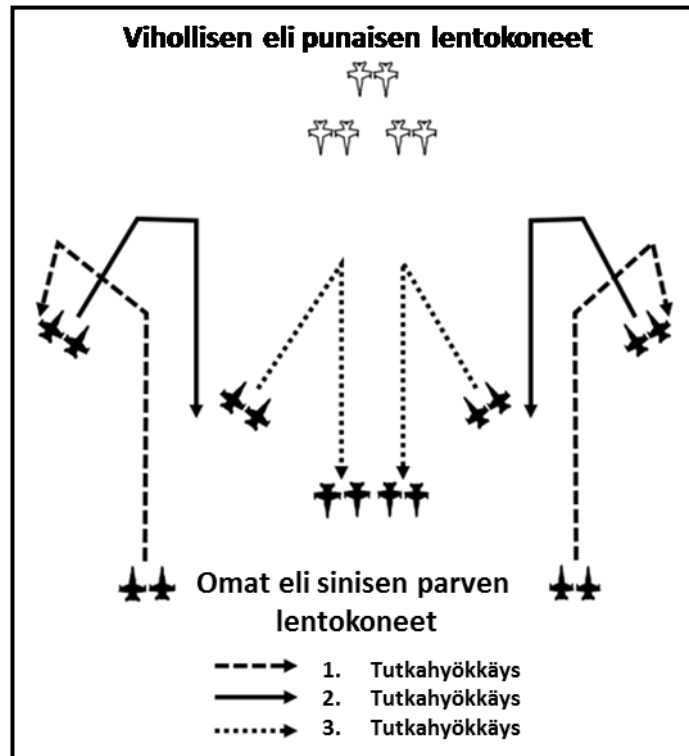
C-simulaatioiden lähtöasetelma esitetään kuvassa 9. Kuvasta nähdään sinisen ja punaisen välinen aloitusetäisyys sekä punaisen lentomuoto. C-simulaatioissa punaisen maalimalli sisältää kolme ilmasta ilmaan hävittäjää. Punaisen taktiikka on hyökätä suoraviivaisesti sinistä eli tässä tapauksessa yhtä simuloitua F/A-18 Hornetia vastaan. Punainen toteuttaa ennalta määri-

tetyn skenaarion mukaista toimintaa, jolloin punaisen lentoradat on ohjelmoitu lentämään suoraan kohti sinistä, kunnes se omalla tutkallaan havaitsee sinisen ja aloittaa hyökkäyksen näkemäänsä lentokonetta kohti. TTP:n luonnoksen säännöt määrittävät C-simulaatioiden ammunta- ja päätöksentekokoetäisyydet. C-simulaatioita toistetaan, kunnes löydetään TTP:n MP-optimaaliset kvantitatiiviset sääntöjen arvot, joilla Pk maksimoituu ja rajoitus $Ps=1$ toteutuu. MP-tuotetta mitataan Pk:n ja Ps:n tulosten pohjalta, jotka estimoidaan yksittäisten ohjusten Pk:n ja Ps:n perusteella. Vaikka C-simulaatiot toteutetaan yksittäisellä simuloidulla F/A-18 Hornetilla, muodostaa se perustan koko parven MP-optimaalisten kvantitatiivisten sääntöjen arvoille.

4.3 V-simulaatioiden toteutus

4.3.1 V-simulaatioiden TTP ja skenaario

Ensimmäisen V-vaiheen kvalitatiiviset TTP-säännöt ovat samat, jotka määriteltiin TTP-luonnoksessa. Lisäksi V-simulaatioissa käytetään C-vaiheesta saatuja MP-optimaalisia kvantitatiivisia sääntöjä. V-simulaatioissa tarkastellaan samaa skenaariota kuin C-vaiheessa, mutta hieman eri tavalla. V-simulaatioissa käytetään neljän F/A-18 Hornetin osastoa eli parvea. Parven tehtävä on estää lukumäärältään ylivoimaisen vihollisen tunkeutuminen taistelualueelle tuhoamalla vihollisen lentokoneet. V-simulaatiossa parven jäsenet pyrkivät noudattamaan annettuja kvalitatiivisia ja MP-optimaalisia TTP-sääntöjä mahdollisimman tarkasti. Skenaario on jaettu kolmeen eri ilmataistelun vaiheeseen eli tutkahyökkäykseen kuvan 10 mukaisesti.



Kuva 10. V- ja L-simulaatioiden ilmataistelun skenaario ja tutkahyökkäysten vaiheistus.

V-simulaatioissa punainen toteuttaa ennalta määritettyä taktiikkaa, joka on sama kuin C-vaiheessa. V-simulaatioissa sinisen parven johtokoneet eivät ammu ilmataisteluohjuksia. Johtokoneiden tehtävä on ensisijaisesti määrittää skenaarion kulku eli lentoradat ja päätöksentekoaetäisyydet noudattamalla käskettyä TTP:tä. Lisäksi johtokoneet kommunikoivat siipikoneiden kanssa ja käskvät heille oikea-aikaisesti TTP:ssä määritetyt tehtävät. Johtokoneiden osalta vaatimuksen $Ps=1$ on myös toteuduttava. Tällä menettelyllä mahdollistetaan identtinen johtokoneiden toiminta kaikissa toistettavissa V-simulaatioissa.

V-simulaatiot koostuvat kuvan 8 mukaisesti alustavasta TTP:stä, skenaariosta, järjestelmien parametreista ja C-vaiheessa saaduista MP-optimaalisista kvantitatiivista TTP-säännöistä. WTSAT:n virtuaalista simulaatioympäristöä tuetaan konstruktiiivisella MACE-simulaattorilla. MACE:lla simuloidaan parven johtokoneita ja vihollisen lentokoneita. WTSAT:lla simuloidaan parven siipikoneita, joita lentävät Hornet-koulutetut valmiusohjaajat eli koehenkilöt. Koehenkilöt lentävät WTSAT-simulaattoreilla verkotetusti eli koko parvi ja vastustajat toimivat samassa virtuaalisessa simulaatioympäristössä. V-simulaatioiden sääolosuhteet ovat koko operaatioalueella hyvät eli näkyvyys toimintaympäristössä on yli 10km, tuulen nopeus on nolla, taivas on pilvetön ja turbulenssia ei esiinny. Simulaatio toteutetaan päivällä ja vuodenaika on keskikesällä heinäkuun ensimmäinen päivä kello 12:00. Operaatioalue on yksi Hävittäjälentolaivue 31:n päivittäin käytössä olevista harjoitusalueista.

V-simulaatioissa punaisen lentokoneiden toiminnot mallinnetaan kuten C-simulaatioissakin. V-simulaatioissa sinisellä parvella on käytössä Link-16-johtamisjärjestelmä, jolla parannetaan ohjaajien tilannekuvaa. Tämä on normaali menetelmä osana parven ilmataistelua. Lisäksi parven tilannekuvaa tukee taistelunjohtaja, joka johtaa puheella parven taistelua annetun TTP:n mukaisesti. Niin johtokoneiden kuin taistelunjohtajan toiminta ja radiopuhelinfraseologia on ennalta määritetty ja nauhoitettu, jotta se on kaikissa simulaatioissa toistettavissa samalla tavalla. Skenaario lennetään pysäyttämättä läpi. Se käynnistyy noin 70NM etäisyydeltä vastustajasta, jatkuu kolmena tutkahyökkäyksenä käyttäen kolmea erilaista taistelutekniikkaa ja päättyy taistelusta irtautumiseen.

4.3.2 V-simulaatioiden koeasetelma ja tulosten mittaaminen

V-simulaatioissa käytetään C-vaiheessa tuotettuja MP-optimaalisia kvantitatiivisia sääntöjä ja TTP:n luonnoksen kvalitatiivisia sääntöjä. V-simulaatioiden tarkoituksena on arvioida siipimiesten toimintaa osana parvea SA:n, NP:n ja MWL:n avulla. V-vaiheen lopputuloksena saadaan HMP-optimaaliset TTP-säännöt. HMP-tuotetta mitataan Pk:n ja Ps:n perusteella, koska parven tavoitteena on saavuttaa edullinen asema suhteessa viholliseen. Pk:n estimointi V-simulaatioissa poikkeaa C-simulaatioiden menetelmästä laskentatoteutuksen osalta, mutta tämä ei vaikuta tulosten luotettavuuteen.

Ennen V-simulaation toteuttamista koehenkilöiltä kysytään ennakkotiedot koskien lentokemusta, vireystilaa, lentotuntumaa ja henkilötietoja. Lisäksi heitä pyydettiin allekirjoittamaan suostumus tietojen käytöstä tutkimukseen. Ennakkotietolomake sekä suostumus on esitetty liitteessä 2.

Ennen WTSAT-simulaation toteuttamista siipimiehinä toimiville koehenkilöille ohjeistetaan lennettävä skenaario ja TTP. Koehenkilöt saavat käyttöönsä kuvan 11 mukaisen tietokortin, joka sisältää lennolle tarvittavat parametrit, parvenjohtajan toiminta-ajatuksen ja käytettävät taistelutaktiikat sekä kuvan toiminta-alueesta.

BRIEF	0:00	STEP	0:00	VIN	0:00	TX	0:00	TO	0:00	LND	0:00
C/S	#	PILOT	AC	LOAD	SEF	ALT	WPN	C	F	TCN	
BLACK	21	USM									
BLACK	22	OH1									
BLACK	23	LLO									
BLACK	24	OH2									
GCI		FREQ1	FREQ2	FREQ3							
DECONFLICTION	QNH	HD	SD	M SA	SAFETY / INNER BLOCKS						
					#1	#2	#3	#4			
GND OPS					PRIMARY				DIVERT		
INGRESS					JOKER		JOKER				
LATECOMERS					BINGO		BINGO				
FBI/VERJET S					CODE/WORDS						
NORDO											
OSC											
EGRESS											
FIGHTS ON											
KILL CRITERIA											
KILL RELAY											
KILL REMOVAL											
REGENERATION											
RELOAD											
TERMINATE											
SAFE AREA											
CATEGORY											
CIT											
					COM1	WHEN	COM2				
CAP						CHECK					
COMMIT FORM.						TAXI					
TACTICS						T/O					
SHOT DOCTRINE						AREA					
AMR						KILL					
RISK LEVEL						RTB					
WPN BINGO						LAND					
MIN GO						OPS					
ID CRITERIA					ROE/VOKS						
					DATACARD_BLUE						

TASK		RDR INTERCEPT TIMELINE
TARGET		COMMIT
THREAT		
TACTICS & FLOW		

Kuva
toiminta-alueesta

DCA	OCA	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
BE	GRFS	###	###	###	###	###	###	###	###	###	###
									NORDO		

Kuva 11. Esimerkki F/A-18 Hornet -parven käyttämästä tietokortista.

Koehenkilöille esitetty lentotehtävänanto materiaaleineen sisältää vain välttämättömät tiedot operaation kulusta, jotta käytettävä simulaation käsikirjoitus ei paljastu heille. Tietokortti ja kirjallisessa muodossa olevat lentotehtävän tarkennukset annetaan koehenkilöille paperitulosteena, jonka jälkeen heillä on 10 minuuttia aikaa tutustua materiaaliin. Lentotehtävää koskeva tarkentava tehtävänanto sisältää seuraavat TTP:n sääntökohdat sekä muut lentotehtävään liittyvät asiakokonaisuudet:

- Lentotehtävän numero
- Operaation tavoite ja komentajan tahto
- Käytettävissä oleva oma voima
- Toiminta-alue
- Uhka
- Käytettävät taistelutekniikat
- Ammuntadoktriinit
- Radiopuhelinliikenteen tarkennukset
- Omasuojalaitteiden käyttö

- Simulaattorin toimintaan liittyvät tarkennukset
- Taistelunjohtajaa koskevat tarkennukset
- Ennen simulaatiota tehtävät asetukset
- Parvenjohtajan painottamat TTP:n säännöt.

Tämän jälkeen koehenkilöt valmistelevat WTSAT:n ohjaamossa lentotehtävään liittyvät tarvittavat ohjaamoasetukset valmiiksi. Kun koehenkilöt ovat valmiita, käynnistetään simulaatio. Tutkimuksen V-simulaation kesto on 7 minuuttia ja 36 sekuntia.

Lähtöasetelmassa sinisen parven lentokoneet lentävät tehtävänannossa määritetyllä lentokorkeudella ja nopeudella. Parven lentomuoto on kuvan 10 mukainen asetelma, jossa kaikki koneet ovat rinnakkain ennalta määritetyn etäisyyden päässä toisistaan. Tutkijan toimesta nauhoitettu johtokoneiden ja taistelunjohtajan radiopuhelinliikenteen ja MACE:lla simuloitujen johtokoneiden realistinen lentäminen tekevät V-simulaatiosta todentuntuisen tapahtuman koehenkilöille. V-simulaation kulku on nopeampainen. Skenaariossa korostuu se, että jokainen johtokoneen, taistelunjohtajan tai toisen siipikoneen radion välityksellä esille tuoma ilmataisteluun liittyvä tekijä on huomioitava omassa toiminnassa. Samalla on ilmataistelulle tyypillisesti toteutettava oman koneen lentäminen sekä johtokoneiden käskemät tehtävät. Lisäksi on kyettävä huomioimaan omilta näytöiltä tutkan ja omasuojajärjestelmien tuottamat havainnot sekä Link 16 -järjestelmän kautta esitetty muun parven toiminta. Kun kaikki kolme tutkahyökkäystä on toteutettu ja taistelusta on päästy irtautumaan, pysäytetään simulaatio.

Välittömästi simulaation pysäyttämisen jälkeen koehenkilöt täyttävät NASA-TLX-kaavakkeen, joka on esitetty liitteessä 1. Tämän jälkeen lennetyn skenaarion tallenne esitetään koehenkilöille siten, että se pysäytetään ennalta valittuina ajanhetkinä. Koehenkilöt näkevät sekä oman että toisen siipikoneen ohjaamon näytöt ja skenaarion kokonaiskuvan. Pysäytyskohdissa koehenkilöt vastaavat PT-SAGAT-mittarin sääntöjä koskeviin kysymyksiin. Samalla tutkija täydentää NP- ja TR-mittareiden arvioitavat säännöt. Arvioitavia sääntöjä on yhteensä 115 kappaletta koehenkilöä kohden: NP-mittarin sääntöjä on yhteensä 25, PT-SAGAT-mittarin sääntöjä 45 ja TR-mittarin sääntöjä 45 kappaletta. Jokaisen arvioitavan säännön tulos on joko 1 tai 0 riippuen siitä, täyttyykö ennalta määritetty NP-, TR- tai PT-SAGAT-mittarin sääntö. V- ja L-simulaatioissa arvioitava PT-SAGAT-mittarin säännöt esitetään taulukossa 2, TR -mittarin säännöt taulukossa 3 ja NP-mittarin säännöt taulukossa 4.

Taulukko 2: V- ja L-simulaatioiden PT-SAGAT-mittarin sääntöjä koskevat kysymykset.

SÄÄNNÖN NUMERO & TUTKAHYÖKKÄYKSEN KIRJAIN	SA-TASO 1 KOODI: PTSA1	SA-TASO 2 KOODI: PTSA2	SA-TASO 3 KOODI: PTSA3
1	Havaitko oikein oman ja parven jäsenten sijainnit suhteessa viholliseen ja valittuun taistelutekniikkaan?	Ymmärsitkö oikein aikamitta-kaavan, sekä oman ja osastosi muiden jäsenten paikan siinä?	Kykenitkö riittävällä tarkkuudella ennakoimaan, miten hyökkäys eteni?
TUTKAHYÖKKÄYS A / B / C	PTSA1_1 / PTSB1_1 / PTSC1_1	PTSA2_1 / PTSB2_1 / PTSC2_1	PTSA3_1 / PTSB3_1 / PTSC3_1
2	Havaitko oikein vaikuttavien maalien sijainnit ja geometriat?	Ymmärsitkö oikein valitun taistelutekniikan / TTP:n?	Kykenitkö riittävällä tarkkuudella ennakoimaan, miten osastosi muut jäsenet toimivat hyökkäyksen aikana?
TUTKAHYÖKKÄYS A / B / C	PTSA1_2 / PTSB1_2 / PTSC1_2	PTSA2_2 / PTSB2_2 / PTSC2_2	PTSA3_2 / PTSB3_2 / PTSC3_2
3	Havaitko oikein vaikuttavien maalien luokitukset ja tyypit?	Ymmärsitkö oikein noudattiko osastosi valittua taktiikkaa / TTP:tä?	Kykenitkö hyökkäyksen aikana ennakoimaan taktiikassa käytettäviä päätöksentekovaihtoehtoja ja muita päätöspisteitä?
TUTKAHYÖKKÄYS A / B / C	PTSA1_3 / PTSB1_3 / PTSC1_3	PTSA2_3 / PTSB2_3 / PTSC2_3	PTSA3_3 / PTSB3_3 / PTSC3_3
4	Havaitko oikein, mitkä maaleista oli maalinnettu ja mitkä olivat maalintamatta?	Ymmärsitkö oikein maalitalanteen muutokset?	Muodostitko hyökkäyksen aikana vaihtoehtoisia toimintamalleja tai mietitkö taktiikan muutoksia siltä varalta, että maaliryhmät käyttäytyvät ennakoimattomasti tai jotain muuta odottamatonta tapahtuu?
TUTKAHYÖKKÄYS A / B / C	PTSA1_4 / PTSB1_4 / PTSC1_4	PTSA2_4 / PTSB2_4 / PTSC2_4	PTSA3_4 / PTSB3_4 / PTSC3_4
5	Havaitko oikein oman ja parven muiden jäsenten tutkaetsintä- ja maalintamistehtävät?	Ymmärsitkö oikein omasi ja parven muiden jäsenten taktisen statuksen muutokset?	Päätyikö hyökkäys odotamaasi asetelmaan?
TUTKAHYÖKKÄYS A / B / C	PTSA1_5 / PTSB1_5 / PTSC1_5	PTSA2_5 / PTSB2_5 / PTSC2_5	PTSA3_5 / PTSB3_5 / PTSC3_5

Taulukossa 2 esitettävät PT-SAGAT-mittarin sääntöjen koodit tarkoittavat seuraavaa: PTSA_i j viittaa ensimmäisen tutkahyökkäyksen SA-tason i PT-SAGAT-sääntöön numero j, PTSB_i j viittaa toisen tutkahyökkäyksen SA-tason i PT-SAGAT-sääntöön numero j ja PTSC_i j viittaa kolmannen tutkahyökkäyksen SA-tason i PT-SAGAT-sääntöön numero j.

Taulukko 3: V- ja L-simulaatioiden TR-mittarin säännöt.

SÄÄNNÖN NUMERO	1. TUTKAHYÖKKÄYS KOODI: TRA	2. TUTKAHYÖKKÄYS KOODI: TRB	3. TUTKAHYÖKKÄYS KOODI: TRC
1	TRA1 Ovatko tutkan etsintäparametrit lentotehtävänannon mukaiset tai oikein suhteessa ilmoitettuun ilmatilanne- ja uhkakuvaan?	TRB1 Ovatko tutkan etsintäparametrit lentotehtävänannon mukaiset tai oikein suhteessa ilmoitettuun ilmatilanne- ja uhkakuvaan?	TRC1 Ovatko tutkan etsintäparametrit lentotehtävänannon mukaiset tai oikein suhteessa ilmoitettuun ilmatilanne- ja uhkakuvaan?
2	TRA2 Onko maalien luokitus ja tunnistus tehty oikein?	TRB2 Onko maalien luokitus ja tunnistus tehty oikein?	TRC2 Onko maalien luokitus ja tunnistus tehty oikein?
3	TRA3 Onko ennen ohjuslaukaisua tapahtuva liikehtely käsketyt TTP:n mukaista?	TRB3 Onko ennen ohjuslaukaisua tapahtuva liikehtely käsketyt TTP:n mukaista?	TRC3 Onko ennen ohjuslaukaisua tapahtuva liikehtely käsketyt TTP:n mukaista?
4	TRA4 Onko maalintanut oikean maalin?	TRB4 Onko maalintanut oikean maalin?	TRC4 Onko maalintanut oikean maalin?
5	TRA5 Tapahtuuko ohjuslaukaisu TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?	TRB5 Tapahtuuko ohjuslaukaisu TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?	TRC5 Tapahtuuko ohjuslaukaisu TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?
6	TRA6 Ilmoitetaanko ohjuksen aktiivisuus oikein ja oikealla hetkellä?	TRB6 Ilmoitetaanko ohjuksen aktiivisuus oikein ja oikealla hetkellä?	TRC6 Ilmoitetaanko ohjuksen aktiivisuus oikein ja oikealla hetkellä?
7	TRA7 Toteutetaanko ohjuksen päivityksen katkaisu oikein ja oikealla hetkellä?	TRB7 Toteutetaanko ohjuksen päivityksen katkaisu oikein ja oikealla hetkellä?	TRC7 Toteutetaanko ohjuksen päivityksen katkaisu oikein ja oikealla hetkellä?
8	TRA8 Aktivoidaanko koneen omasuoja oikea-aikaisesti?	TRB8 Aktivoidaanko koneen omasuoja oikea-aikaisesti?	TRC8 Aktivoidaanko koneen omasuoja oikea-aikaisesti?
9	TRA9 Onko ammunnan jälkeinen liikehtely käsketyt TTP:n mukaista?	TRB9 Onko ammunnan jälkeinen liikehtely käsketyt TTP:n mukaista?	TRC9 Onko ammunnan jälkeinen liikehtely käsketyt TTP:n mukaista?
10	TRA10 Tapahtuuko liikehtely TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?	TRB10 Tapahtuuko liikehtely TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?	TRC10 Tapahtuuko liikehtely TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?
11	TRA11 Osuuko ohjus oikeaan maaliin?	TRB11 Osuuko ohjus oikeaan maaliin?	TRC11 Osuuko ohjus oikeaan maaliin?
12	TRA12 Vastaako uloslentoradan aikainen radiopuhelinliikenne ja toiminta todellista uhkatilannetta?	TRB12 Vastaako uloslentoradan aikainen radiopuhelinliikenne ja toiminta todellista uhkatilannetta?	TRC12 Vastaako uloslentoradan aikainen radiopuhelinliikenne ja toiminta todellista uhkatilannetta?
13	TRA13 Säilyykö keskinäinen suojaus TTP:n mukaisesti?	TRB13 Säilyykö keskinäinen suojaus TTP:n mukaisesti?	TRC13 Säilyykö keskinäinen suojaus TTP:n mukaisesti?
14	TRA14 Kommunikoidaanko taktinen status oikein?	TRB14 Kommunikoidaanko taktinen status oikein?	TRC14 Kommunikoidaanko taktinen status oikein?
15	TRA15 Säilyykö osaston keskinäinen porrastus ja porrastus maastoon?	TRB15 Säilyykö osaston keskinäinen porrastus ja porrastus maastoon?	TRC15 Säilyykö osaston keskinäinen porrastus ja porrastus maastoon?

Taulukossa 3 esitettävät TR-mittarin sääntöjen koodit tarkoittavat seuraavaa: TRAi viittaa ensimmäisen tutkahyökkäyksen TR-sääntöön numero i, TRBi viittaa toisen tutkahyökkäyksen TR-sääntöön numero i ja TRCi viittaa kolmannen tutkahyökkäyksen TR-sääntöön numero i.

Taulukko 4: V- ja L-simulaatioiden NP-mittarin säännöt. Kvantitatiiviset TTP-säännöt on esitetty vihreissä laatikoissa ja kvalitatiiviset TTP-säännöt sinisissä laatikoissa.

1. TUTKAHYÖKKÄYS	2. TUTKAHYÖKKÄYS	3. TUTKAHYÖKKÄYS
PA1 Lentonopeus 30 s. ajalta (0:30 - 1:00)	PB1 Lentonopeus 45 s. ajalta (4:00 - 4:45)	PC1 Lentonopeus 45 s. ajalta (5:00 - 5:45)
PA2 Lentokorkeus 30 s. ajalta (1:00 - 1:30)	PB2 Lentokorkeus 45 s. ajalta (4:00 - 4:45)	PC2 Lentokorkeus 45 s. ajalta (5:00 - 5:45)
PA3 Ammunta-arvot	PB3 Ammunta-arvot	PC3 Ammunta-arvot
PA4 Ohjuksen päivityskulma	PB4 Ohjuksen päivityskulma	PC4 Ohjuksen päivityskulma
PA5 Uloslennon kuormituskerroin	PB5 Puolustuksellisen väistön lentosuunta ja kesto	PC5 Uloslennon kuormituskerroin
PA6 Uloslennon suunta	PB6 Uloslennon kuormituskerroin	PC6 Uloslennon suunta
PA7 Keskinäisen suojauksen etäisyys	PB7 Uloslennon suunta	PC7 Keskinäisen suojauksen etäisyys
PA8 Selviytyykö ampuja	PB8 Keskinäisen suojauksen etäisyys	PC8 Selviytyykö ampuja
	PB9 Selviytyykö ampuja	

Taulukossa 4 esitettävät NP-mittareiden sääntöjen koodit tarkoittavat seuraavaa: PA_i viittaa ensimmäisen tutkahyökkäyksen NP-tapahtumaan numero i, PB_i viittaa toisen tutkahyökkäyksen NP-tapahtumaan numero i ja PC_i viittaa toisen tutkahyökkäyksen NP-tapahtumaan numero i.

V-simulaation jälkeen SA-, NP- ja MWL-tulokset sekä HMP-tuote analysoidaan ilmasodan asiantuntijoiden toimesta. Jos Ps ja Pk eivät ole hyväksyttäviä, tavoitteena on tunnistaa ne TTP-säännöt, joita muuttamalla HMP-tuotetta on mahdollista parantaa. Tällöin palataan kuvien 7 ja 8 mukaisesti takaisin C-vaiheeseen, jos muokattava TTP-sääntö on kvantitatiivinen. Jos muokattava TTP-sääntö on kvalitatiivinen, palataan V-vaiheeseen. Jos sen sijaan Ps ja Pk ovat hyväksyttäviä, pyritään tunnistamaan ne TTP-säännöt, joita muuttamalla NP-, SA- ja MWL-tuloksia kyetään parantamaan. Jälleen palataan takaisin C-vaiheeseen, jos muokattava TTP-sääntö on kvantitatiivinen ja V-vaiheeseen, jos muokattava TTP-sääntö on kvalitatiivinen.

Koska NP:n tulokset mittaavat TTP:n sääntöjen noudattamista, niiden avulla tunnistetaan suoraan mahdollisesti kehitettävä sääntö. Matalat SA-tulokset taas liittyvät yksittäisiin SA-mittarin sääntöihin ja MWL-tulokset simulaatioon kokonaisuutena. Mikäli SA-tulokset ovat matalia tai MWL-tulokset ovat korkeita, pyritään tunnistamaan, mitkä TTP-säännöt todennäköisimmin aiheuttivat matalat SA- tai korkeat MWL-tulokset. Näin tunnistetut TTP-säännöt ovat kandidaatteja muutettavia TTP-sääntöjä valittaessa. Lopuksi kaikkien

tunnistettujen kandidaattien joukosta valitaan muutettavaksi ne TTP-säännöt, joiden muuttamisen arvioidaan todennäköisimmin parantavan NP:tä, SA:ta ja MWL:ää sekä tarpeen vaatiessa myös Pk:ta ja Ps:ää. Kun ilmasodan asiantuntija toteavat, että V-vaiheessa on tunnistettu HMP-optimaaliset TTP-säännöt, joiden käyttö johtaa riittävän korkeisiin Pk:hon ja Ps:ään sekä lentäjien NP, SA ja MWL on hyväksyttävällä tasolla, voidaan siirtyä L-vaiheeseen.

4.4 L-simulaatioiden toteutus

4.4.1 L-simulaatioiden TTP ja skenaario

L-vaiheessa arvioidaan V-vaiheessa saadut HMP-optimaaliset TTP-säännöt. L-simulaatioiden skenaario on muuten sama kuin V-vaiheessa, mutta vihollista simuloidaan neljällä todellisella lentokoneella kuuden sijaan. Tämä ei kuitenkaan heikennä L-vaiheen tulosten luotettavuutta, koska yksi lentokone voidaan määrittää simuloimaan kahta vastustajan lentokonetta skenaarion aikana. Lisäksi niin johto- kuin maalikoneiden ohjaajina ja taistelunjohtajina toimivat todelliset henkilöt. Lentotehtävä toteutetaan todellisilla F/A-18 Horneteilla. L-vaiheessa arvioidaan edelleen vain siipimiehinä toimivia koehenkilöitä. Johtokoneiden lentäjät simuloivat V-vaiheessa MACE:lla simuloituja johtokoneita. Samalla tavalla vastustajaa simuloivat ohjaajat pyrkivät noudattamaan tarkasti skenaariossa määriteltyä vihollisen toimintaa.

4.4.2 L-simulaatioiden koeasetelma ja tulosten mittaaminen

V-simulaatiossa saadut HMP-optimaaliset TTP-säännöt viedään L-vaiheessa todelliseen toimintaympäristöön. Johtuen todellisen toimintaympäristön muodostamista tekijöistä, kuten muusta lentoliikenteestä ja säätekijöistä, on odotettavissa, että MWL on korkeammalla tasolla sekä NP ja SA alemmalla tasolla kuin V-simulaatioissa. Nämä lentäjän ja koneen vuorovaikutuksen hyvyttä kuvaavat suuret arvioidaan samalla tavalla kuin V-vaiheessa. L-vaiheen tuloksissa on huomioitava V-vaihetta selvästi pienempi koehenkilöiden määrä, joka johtuu L-simulaatioiden kustannuksista ja käytettävissä olevasta konemäärästä. Tämän vuoksi L- ja V-vaiheiden tuloksia vertaillaan hyödyntäen erilaisia tilastollisia tunnuslukuja. Toisin sanoen V-vaiheen tulosten tarkastelussa ei voida käyttää formaaleja tilastollisen päättelyn menetelmiä.

Koehenkilöille esitetty lentotehtävänanto on identtinen V-simulaatioiden lentotehtävän kanssa. Koehenkilöt, jotka osallistuivat V-simulaatioihin, eivät saa osallistua L-simulaatioihin parven siipimiehinä. Lisäksi L-simulaatioissa vuodenaika, sääolosuhteet ja valaistusolosuhteet ovat erilaiset kuin V-simulaatioissa. Rajoittavana tekijänä ovat kuitenkin sääolosuhteet. Johtaja ja siipikoneiden on kyettävä näkemään toisensa simulaation aikana eli L-vaihetta ei saa toteuttaa IMC (Instrument Meteorological Conditions) -olosuhteissa. IMC-olosuhteet tarkoittavat lentämistä pilven sisällä tai muuten erittäin huonossa lentonäkyvyydessä.

L-simulaation läpivienti edellyttää perusteellista johtokoneiden ja viholliskoneiden ohjaajien sekä taistelujohtajien ohjeistamista. Heidän kaikkien on kyettävä noudattamaan TTP:tä ja skenaarion käsikirjoitusta mahdollisimman tarkasti, jotta siipimiehinä toimivien koehenkilöiden arviointi on yhtenevä V-simulaatioiden kanssa. Tämän lisäksi lentoturvallisuuteen liittyvät seikat sekä mahdolliset rajoituksen harjoitusalueeseen tuovat L-simulaatioihin ylimääräistä tarvetta kommunikoida esimerkiksi taistelun- tai lennonjohtajan kanssa.

L-simulaation päättymisen jälkeen koehenkilöt lentävät odotuskuvioon, jossa heillä on välittömästi mahdollista täyttää NASA-TLX-lomake. Vasta tämän jälkeen suoritetaan normaalit lähestymiset laskeutumista varten. Lennetyt L-simulaation kokonaiskesto on selvästi pidempi kuin V-simulaatio, mutta arvioitava osuus on identtinen V-simulaation kanssa. Jokaista koehenkilöä arvioidaan yhteensä 115:sta SA-, NP- ja MWL-mittarin säännön osalta. Lentotehtävän läpikäynti toteutetaan kuten V-simulaatioissakin. Lentotehtävän läpikäynnissä lennetyn skenaarion tallenne esitetään ohjaajille siten, että se pysäytetään ennalta määriteltynä ajanhetkinä. Pysäytyskohdissa koehenkilöt vastaavat PT-SAGAT:ia koskeviin kysymyksiin. Samanaikaisesti pisteytetään NP- ja TR-mittarien sääntöjen arvioitavat kohdat.

Jos L-simulaatioiden NP, SA ja MWL tai HMP-tuote eivät ole hyväksyttävällä tasolla ja V-vaiheen tulosten kanssa tasapainoisia, niin on palattava kuvien 7 ja 8 mukaisesti joko V- tai C-vaiheeseen riippuen siitä, että onko muokattaviksi säännöiksi tunnistettu kvantitatiivisia vai kvalitatiivisia sääntöjä. Toisaalta jos V- ja L-vaiheiden tulokset ovat riittävällä tavalla tasapainossa, TTP-luonnoksen TTP-säännöt on saatu muutettua operatiivisesti HMP-optimaaliseksi TTP-säännöiksi, ja TTP T&E voidaan päättää.

5 LIVE - VIRTUAL - CONSTRUCTIVE -SIMULAATIOMALLIN ESIMERKKITARKASTELUN TULOKSET

Tässä luvussa esitetään L-V-C-simulaatiomallin esimerkkitarkastelun tulokset. Esimerkissä tulosten perusteella määrätään vaiheittain MP-optimaaliset kvantitatiiviset TTP-säännöt, HMP-optimaaliset kvalitatiiviset ja kvantitatiiviset TTP-säännöt sekä lopuksi operatiivisesti HMP-optimaaliset kvalitatiiviset ja kvantitatiiviset TTP-säännöt. Esimerkkitarkastelun avulla arvioidaan kehitetyn simulaatiomallin toimivuutta, verifioidaan simulaatioiden laatua ja validoidaan työssä tuotetun simulointidatan laatua.

TR-, PT-SAGAT- ja NP-tulosten erojen tilastollista merkitsevyyttä testataan Friedmannin testillä, Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testillä ja Mann-Whitneyn U -testillä. [92] [93] Nämä testit ovat niin sanottuja epäparametrisiä testejä, jolloin havainnoilta ei tarvitse olettaa normaalijakautuneisuutta. Näin testejä voidaan käyttää alaluvussa 3.5 esiteltyjen TR-, PT-SAGAT- ja NP-mittareiden 0-1-mitta-asteikon yhteydessä. Seuraavissa tulosalaluvuissa viitataan mediaaninen vertailuun tulososion luettavuuden helpottamiseksi, vaikka testeissä täsmällisesti ottaen tarkastellaan keskimääräisten sijalukujen erotuksia. [92] MWL-tulosten tarkastelussa käytetään toistettujen mittausten varianssianalyysia ja t-testiä [92], koska kuuden NA-SA-TLX-dimension mitta-asteikko on 0-10 (ks. alaluku 3.5.3). Työn tilastoanalyysit toteutettiin IBMTM SPSSTM ohjelmiston versiolla 24. [92][93]

Seuraavissa alaluvuissa esitetään tarvittavissa kohdissa käytetyn testin nimi, mutta tulosten esittämisen yksinkertaistamiseksi tekstissä ei esitetä kunkin testin testisuureen arvoa ja p-arvoa. Kaikissa testeissä käytetty merkitsevyytaso oli 0.05. Näin termi ”tilastollisesti merkitsevä” tarkoittaa sitä, että testin p-arvo oli alle 0.05 ja vastaavasti ”tilastollisesti ei-merkitsevä” viittaa p-arvoon, joka oli suurempi kuin 0.05. [93]

5.1 Ensimmäisen C-simulaation (C1) tulokset

C1-simulaatioissa sinisen kvantitatiivisia sääntöjä muokattiin, kunnes MP-optimaaliset arvot olivat hyväksyttäviä koskien sinisen ammuttujen ohjusten laukaisuetäisyyksiä, punaisten ohjusten väistöetäisyyksiä ja etäisyyden säilyttämistä suhteessa punaiseen. MP-optimaaliset arvot toteuttivat $P_s=1$ vaatimuksen. Ensimmäisen tutkahyökkäyksen P_k oli 0.77, toisen 0.72 ja kolmannen 0.71. MP-tuotteen P_k :n keskiarvo oli 0.73, joten P_k - ja P_s -tulokset ovat hyväksyttäviä. C1-simulaatioiden yksityiskohtaiset tulokset ovat tutkijan hallussa.

5.2 Alustavat V-simulaatiot

C1-simulaatioiden perusteella havaittiin, että osa MP-optimaalisista kvantitatiivisista säännöistä oli epärealistisia parven normaaliin toimintatapaan verrattuna. C1-simulaatioiden MP-optimaaliset kvantitatiiviset säännöt johtivat sellaisiin lentoratoihin, jotka eivät jätä aikaa sinisen parven kommunikaatiolle tai ohjaajan tekemälle manuaaliselle tutkan käytölle. Alustavien V-simulaatioiden toteuttamisen osalta tämä tarkoitti käytännössä sitä, että parven kvalitatiivisia TTP-sääntöjä muutettiin peräkkäisissä V-vaiheissa useaan otteeseen. Taulukon 4 mukaisia kvalitatiivisia sääntöjä muokattiin muun muassa siten, että punaisen tutkan väistäminen oli mahdollista toisen tutkahyökkäyksen aikana. Tällä tavoin TTP-säännöt, jotka muutosten jälkeen ovat toteutettavissa myös L-simulaatioissa, saatiin määriteltyä V-simulaattoriin.

5.3 Ensimmäisen V-simulaation (V1) tulokset

V1-vaiheessa koehenkilöinä toimi 14 valmiusohjaajaa. Koehenkilöiden lentokokemus Hornetilla oli keskiarvolta 770 lentotuntia. Testaushetkellä kaikki koehenkilöt kokivat olevansa lentokuntoisia lentämään myös todellista Hornetia. Lisäksi jokainen koehenkilö osasi Ilmavoimien taktisen ohjeistuksen. Voidaankin todeta, että kaikki koehenkilöt olivat kykeneviä toteuttamaan V1-simulaation.

Kaikilla koehenkilöillä oli samanlainen mahdollisuus tutustua kuvassa 11 esitettävään tietokorttiin ja lentotehtävänantoon sekä toteuttaa WTSAT-simulaattorin pohjustaminen ennen simulaation aloittamista. Lisäksi jokainen koehenkilö sai esittää lentotehtävään liittyviä kysymyksiä, joihin vastattiin ainoastaan niiltä osin, joilla ei ollut vaikutusta skenaarion luonteen paljastamiseen. Simulaation jälkeisen lentotehtävän läpikäynnin kesto oli noin 50 minuuttia.

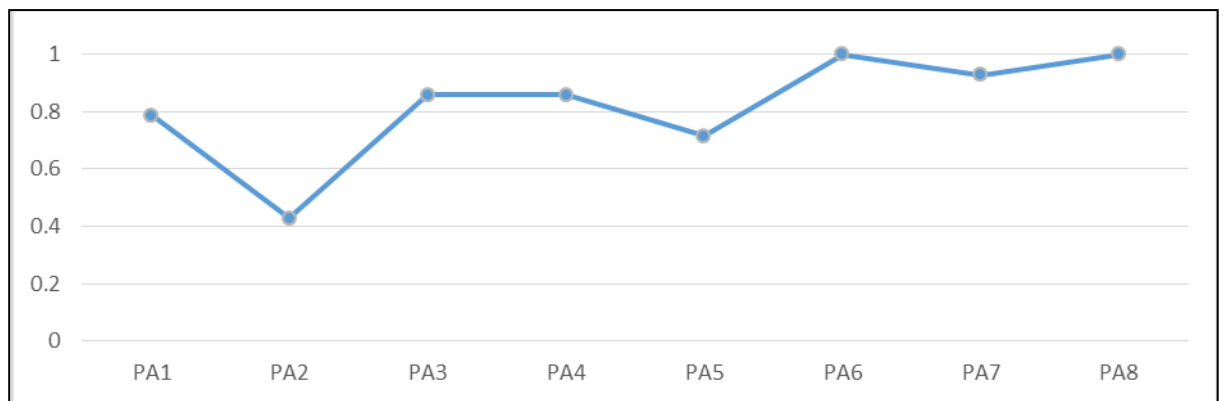
5.3.1 V1 NP

NP-mittarin kokonaiskeskiarvo V1-simulaatioissa oli 0.75 (SD=0.44). Tutkahyökkäyskohtaiset keskiarvot olivat

- 1. tutkahyökkäys: 0.82 (SD=0.38)
- 2. tutkahyökkäys: 0.69 (SD=0.46)
- 3. tutkahyökkäys: 0.73 (SD=0.44).

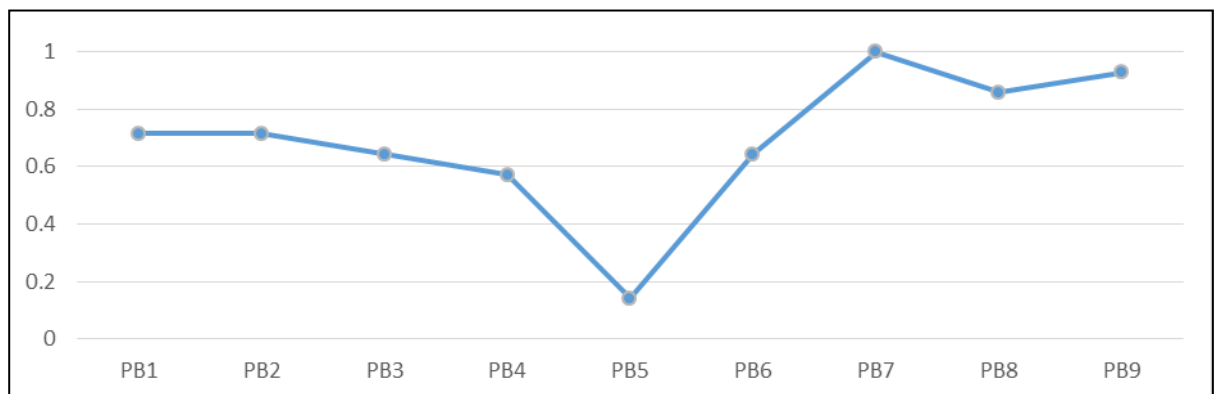
NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot on esitetty kuvissa 12 - 14.

Ensimmäisen tutkahyökkäyksen NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot (Kuva 12) eivät eronneet toisistaan tilastollisesti merkittävästi (Friedmanin testi). Keskiarvojen perusteella PA2 (*Lentokorkeus 30 s. ajalta (1:00 - 1:30)*) ja PA5 (*Uloslennon kuormituskerroin*) eroavat muista säännöistä, mutta eivät kuitenkaan tilastollisesti merkittävästi (Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi). Lentokorkeuden säilyttäminen (PA2) on potentiaalinen kehitettävä TTP-sääntö.



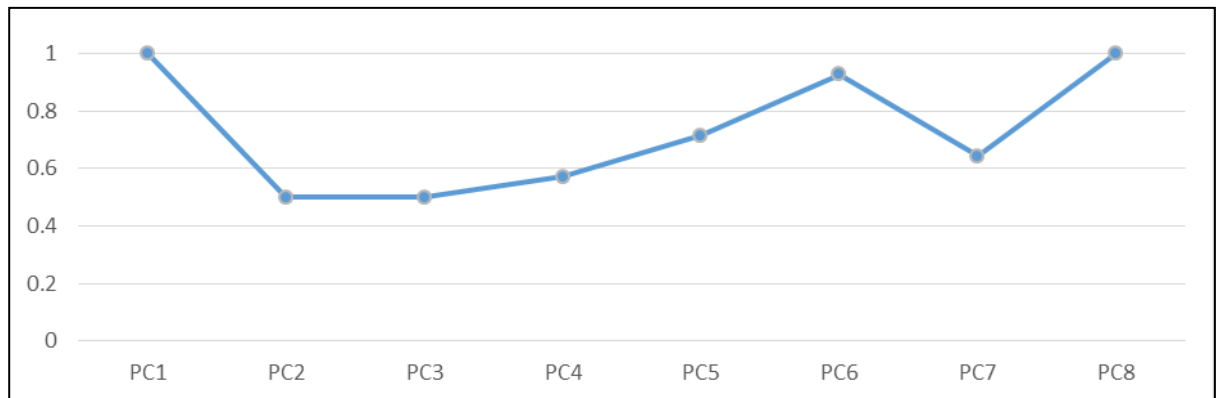
Kuva 12. Ensimmäisen tutkahyökkäyksen NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 4.

Toisen tutkahyökkäyksen NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot (Kuva 13) eivät eronneet toisistaan tilastollisesti merkittävästi (Friedmanin testi). Keskiarvojen perusteella PB5 (*Puolustuksellisen väistön lentosuunta ja kesto*) eroaa alhaisen keskiarvon takia säännöistä. Ero on tilastollisesti merkitsevä (Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi). Tämä on potentiaalinen kehitettävä TTP-sääntö, koska tämä on Ps:n kannalta oleellinen tekijä.



Kuva 13. Toisen tutkahyökkäyksen NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 4.

Kolmannen tutkahyökkäyksen NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot (Kuva 14) eivät eronneet toisistaan tilastollisesti merkittävästi (Friedmanin testi). Keskiarvojen perusteella PC2 (*Lentokorkeus 45 s. ajalta (5:00 - 5:45)*) ja PC3 (*Ammunta-arvot*) eroavat alhaisten keskiarvojen takia hieman muista säännöistä, mutta eivät kuitenkaan tilastollisesti merkittävästi (Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi). Nämä ovat potentiaalisia muutettavia kvalitatiivisia TTP-sääntöjä. PC3-sääntö vaikuttaa Pk:hon.



Kuva 14. Kolmannen tutkahyökkäyksen NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 4.

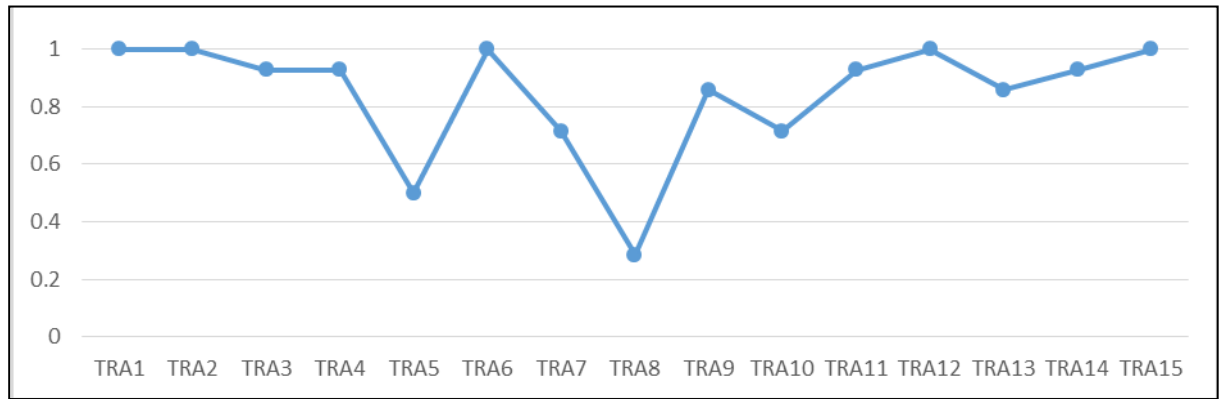
5.3.2 V1 SA TR

SA TR-mittarin kokonaiskeskiarvo V1-simulaatioissa oli 0.79 (SD=0.41). Tutkahyökkäyskohtaiset keskiarvot olivat

- 1. tutkahyökkäys: 0.84 (SD=0.36)
- 2. tutkahyökkäys: 0.81 (SD=0.39)
- 3. tutkahyökkäys: 0.71 (SD=0.46).

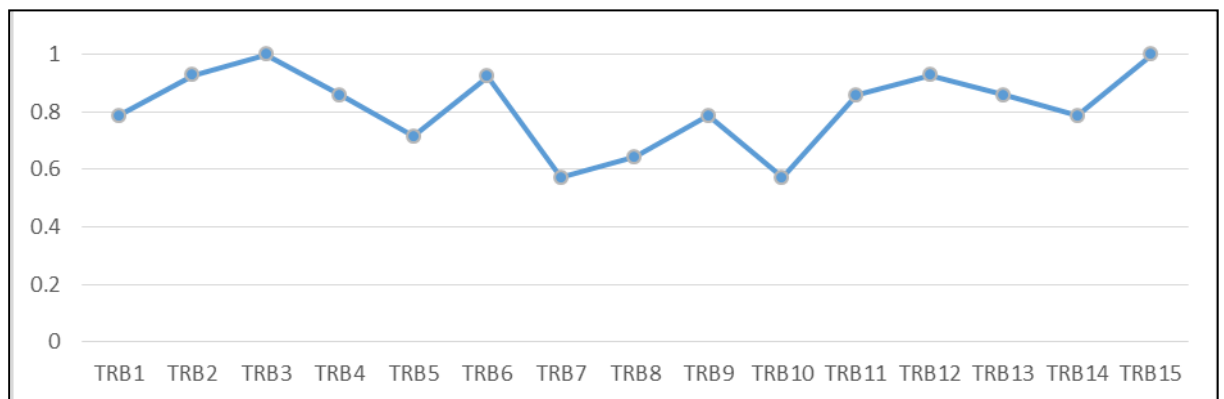
TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot on esitetty kuvissa 15 - 17.

Ensimmäisen tutkahyökkäyksen TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot (Kuva 15) erosivat toisistaan tilastollisesti merkittävästi (Friedmanin testi). Keskiarvojen perusteella TRA8 (*Aktivoidaanko koneen omasuoja oikea-aikaisesti?*) ja TRA 5 (*Tapahuuko ohjuslaukaisu TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?*) eroavat alhaisten keskiarvojen takia muista säännöistä (Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi). Molemmat säännöt ovat potentiaalisia muutettavia TTP-sääntöjä. TRA8-säännön toteutumisella on vaikutusta Ps:ään ja TRA5-säännön toteutumisella Pk:hon.



Kuva 15. Ensimmäisen tutkahyökkäyksen TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 3.

Toisen tutkahyökkäyksen TR-mittarin tapahtumakohtaiset arvot (Kuva 16) eivät eronneet toisistaan tilastollisesti merkittävästi (Friedmanin testi). Keskiarvojen perusteella TRB7 (*To-teutetaanko ohjuksen päivityksen katkaisu oikein ja oikealla hetkellä?*) ja TRB10 (*Tapahtuuko liikehtely TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?*) eroavat jonkin verran muista säännöistä, mutta eivät kuitenkaan tilastollisesti merkittävästi (Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi). Molemmat ovat potentiaalisia muutettavia TTP-sääntöjä. TRB7-säännön toteutumisella on vaikutusta Pk:hon ja TRB10-säännön toteutumisella Ps:ään.



Kuva 16. Toisen tutkahyökkäyksen TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 3.

Kolmannen tutkahyökkäyksen TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot (Kuva 17) eroavat toisistaan tilastollisesti merkittävästi (Friedmanin testi). Keskiarvojen perusteella TRC10 (*Tapahtuuko liikehtely TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?*) ja TRC5 (*Tapahtuuko ohjuslaukaisu TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?*) eroavat alhaisten keskiarvojen takia muista säännöistä. TRC10 eroaa muista tilastollisesti merkittävästi, mutta TRC 5 ei eroa (Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi). Molemmat ovat potentiaalisia muutettavia TTP-sääntöjä.

TRC10-säännön toteutumisella on vaikutusta Ps:ään ja TRC5-säännön toteutumisella sekä Pk:hon että Ps:ään.



Kuva 17. Kolmannen tutkahyökkäyksen TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 3.

5.3.3 V1 SA PT-SAGAT

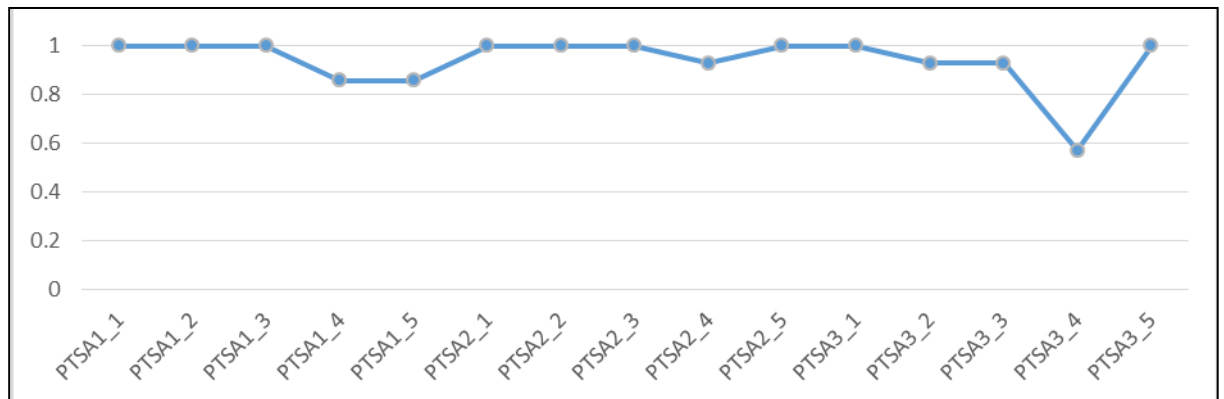
SA PT-SAGAT-mittarin kokonaiskeskiarvo V1-simulaatioissa oli 0.81 (SD=0.39). Tutkahyökkäyskohtaiset keskiarvot olivat

- 1. tutkahyökkäys: 0.94 (SD=0.24)
- 2. tutkahyökkäys: 0.76 (SD=0.43)
- 3. tutkahyökkäys: 0.73 (SD=0.45).

PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot on esitetty kuvissa 18 - 20.

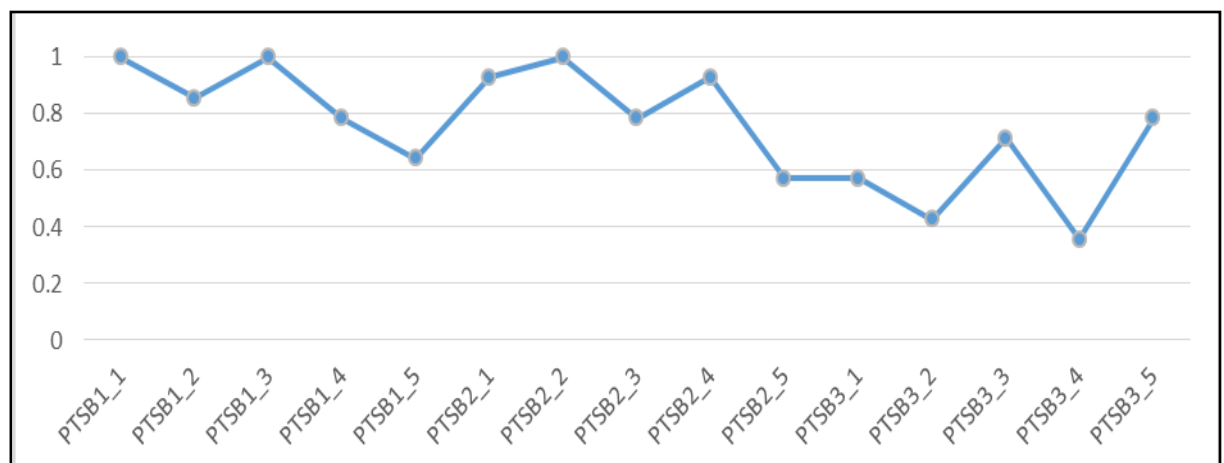
Ensimmäisen tutkahyökkäyksen PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot (Kuva 18) eivät eronneet toisistaan tilastollisesti merkittävästi (Friedmanin testi). Keskiarvojen perusteella PTSA3_4 (*Muodostitko hyökkäyksen aikana vaihtoehtoisia toimintamalleja tai mietti taktiikan muutoksia silta varalta, että maaliryhmät käyttäytyvät ennakoimattomasti tai jotain muuta odottamatonta tapahtuu?*), PTSA3_3 (*Kykenitkö hyökkäyksen aikana ennakoimaan taktiikassa käytettäviä päätöksentekoaikaisuuksia ja muita päätöspisteitä?*), PTSA3_2 (*Kykenitkö riittävällä tarkkuudella ennakoimaan miten osastosi muut jäsenet toimivat hyökkäyksen aikana?*), PTSA2_4 (*Ymmärsitkö oikein maalitilanteen muutokset?*), PTSA1_5 (*Havaitsitko oikein oman ja parven muiden jäsenten tutkaetsintä ja targetointi tehtävät?*) ja PTSA1_4 (*Havaitsitko oikein mitkä maaleista oli maalinnettu ja mitkä olivat maalintamatta?*) eroavat alhaisten keskiarvojen takia hieman muista PT-SAGAT-kysymyksistä, mutta eivät

kuitenkaan tilastollisesti merkittävästi (Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi). Näiden kysymysten kautta voidaan tunnistaa potentiaalisia muokattavia TTP-sääntöjä.



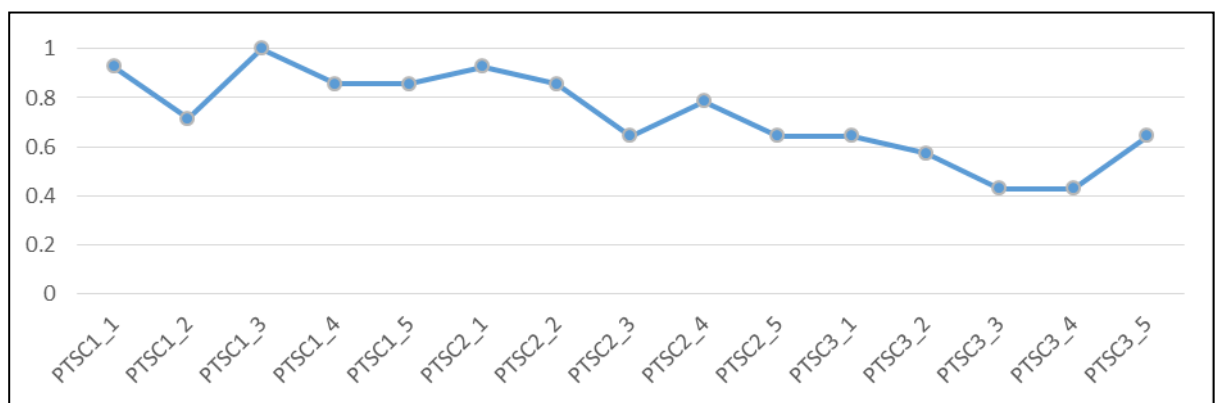
Kuva 18. Ensimmäisen tutkahyökkäyksen PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 2.

Toisen tutkahyökkäyksen PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot (Kuva 19) eroavat toisistaan tilastollisesti merkittävästi (Friedmanin testi). Keskiarvojen perusteella PTSB3_4 (*Muodostitko hyökkäyksen aikana vaihtoehtoisia toimintamalleja tai mietitkö taktiikan muutoksia siltä varalta, että maaliryhmät käyttäytyvät ennakoimattomasti tai jotain muuta odottamatonta tapahtuu?*) eroaa alhaisen keskiarvon takia muista PT-SAGAT-kysymyksistä, mutta ei tilastollisesti merkittävästi (Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi). Tämän kysymyksen kautta voidaan tunnistaa potentiaalinen muokattava TTP-sääntö.



Kuva 19. Toisen tutkahyökkäyksen PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 2.

Kolmannen tutkahyökkäyksen PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot (Kuva 20) eivät eronneet toisistaan tilastollisesti merkittävästi (Friedmanin testi). Keskiarvojen perusteella PTSC3_3 (*Kykenitkö hyökkäyksen aikana ennakoimaan taktiikassa käytettäviä päätöksentekoaikavälisiä ja muita päätöspisteitä?*) ja PTSC3_4 (*Muodostitko hyökkäyksen aikana vaihtoehtoisia toimintamalleja tai mietitkö taktiikan muutoksia silta varalta, että maalityhmät käyttäytyvät ennakoimattomasti tai jotain muuta odottamatonta tapahtuu?*) eroavat alhaisten keskiarvojen takia muista PT-SAGAT-kysymyksistä, mutta eivät tilastollisesti merkittävästi (Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi). Näiden kysymysten kautta voidaan tunnistaa potentiaalisia muokattavia TTP-sääntöjä.



Kuva 20. Kolmannen tutkahyökkäyksen PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 2.

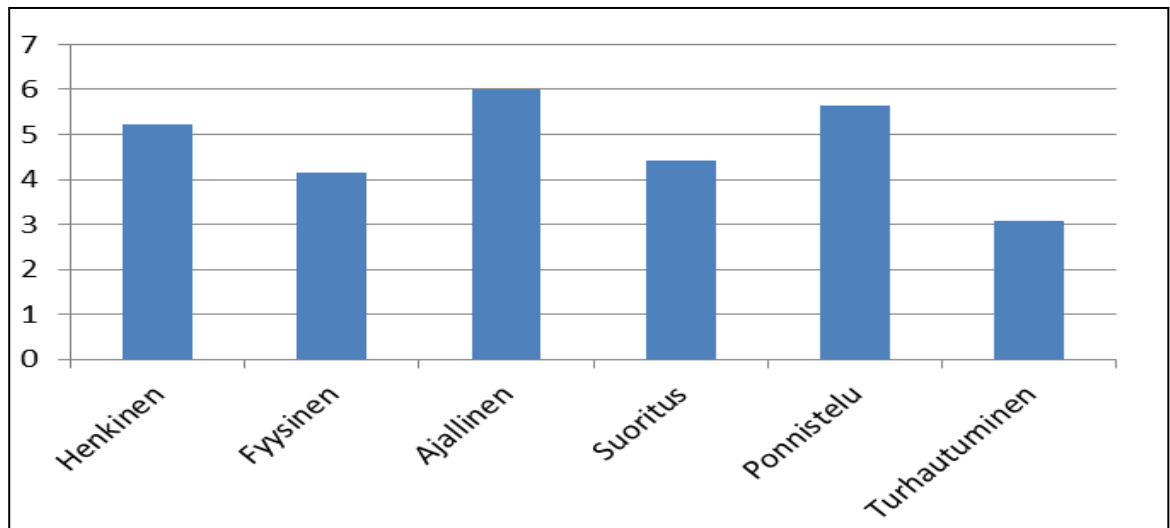
5.3.4 V1 MWL

V1-simulaation NASA-TLX:n kaikkien dimensioiden keskiarvo oli 4,75 (SD=1,44). Taulukossa 5 ja kuvassa 21 esitetään V1:n dimensiokohtaiset tulokset. Keskiarvojen perusteella havaittiin dimensioiden välillä tilastollisesti merkittäviä eroja (Friedmanin testi). Ajallisen ja ponnistelun dimensiot eroavat korkeimpien keskiarvojen perusteella muista mittauspisteistä, mutta eivät tilastollisesti merkittävästi (Wilcoxonin määrättyjen sijalukujen testi). Näiden lisäksi henkinen kuormittavuus nousee osaksi eniten koettuja kuormittavuuksia. Tämän perusteella potentiaalinen TTP-säännön muutos koskisi sitä, että ohjaajalla olisi enemmän aikaa tehdä päätöksiä. Toisaalta parven parempi sisäinen kommunikaatio mahdollistaisi paremman yhteistyön tai ainakin vähentäisi ajallista painetta tehtävästä suoriutumisessa. MWL:n näkökulmasta paras keino parantaa TTP:tä olisi saada siihen lisää aikaa, jolloin kaikki kolme korkeimmaksi arvioitua dimensiota olisi mahdollista saada paremmaksi. Ilmataistelussa aika tarkoittaa käytännössä pidempää etäisyyttä viholliseen. Tällöin ohjaajalla on enemmän aikaa

kommunikoida muun parven kanssa, kiinnittää enemmän huomiota omaan lentämiseen tai suunnitella tarkemmin omia ja parven tulevia TTP:n sisältämiä tapahtumia.

Taulukko 5: V1-simulaation NASA-TLX-dimensioiden keskiarvot ja keskihajonnat.

NASA-TLX-dimensiot	Keskiarvo	Keskihajonta
Henkinen	5.21	2.08
Fyysinen	4.14	2.18
Ajallinen	6.00	1.88
Suoritus	4.43	2.06
Ponnistelu	5.64	2.59
Turhautuminen	3.07	2.09



Kuva 21. V1-simulaation NASA-TLX-dimensioiden keskiarvot.

5.3.5 V1-tulosten yhteenveto ja TTP:n kehittäminen

V1-simulaatioiden tulosten perusteella vaatimus $P_s=1.00$ toteutui ja $P_k=0.73$ oli riittävällä tasolla. Tämän perusteella HMP-tuote oli tyydyttävä.

Alhaisimmat NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot koskivat seuraavia TTP-sääntöjä:

- PA2 (*Lentokorkeus 30 s. ajalta (1:00 - 1:30)*)
- PA5 (*Uloslennon kuormituskerroin*)
- PB5 (*Vihollisen tutkan väistämisen lentosuunta ja kesto*)
- PC2 (*Lentokorkeus 45 s. ajalta (5:00 - 5:45)*)
- PC3 (*Ammunta-arvot*)

Alhaisimmat SA TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot olivat:

- TRA8 (*Aktivoidaanko koneen omasuoja oikea-aikaisesti?*)
- TRA 5 (*Tapahtuuko ohjuslaukaisu TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?*)
- TRB7 (*Toteutetaanko ohjuksen päivityksen katkaisu oikein ja oikealla hetkellä?*)
- TRB10 (*Tapahtuuko liikehtely TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?*)
- TRC10_1 (*Tapahtuuko liikehtely TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?*)
- TRC5 (*Tapahtuuko ohjuslaukaisu TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?*)

Alhaisimmat SA PT-SAGAT-mittarin keskiarvot koskivat seuraavia kysymyksiä:

- PTSA3_4 (*Muodostitko hyökkäyksen aikana vaihtoehtoisia toimintamalleja tai mietitkö taktiikan muutoksia silta varalta, että maaliryhmät käyttäytyvät ennakoimattomasti tai jotain muuta odottamatonta tapahtuu?*)
- PTSB3_4 (*Muodostitko hyökkäyksen aikana vaihtoehtoisia toimintamalleja tai mietitkö taktiikan muutoksia silta varalta, että maaliryhmät käyttäytyvät ennakoimattomasti tai jotain muuta odottamatonta tapahtuu?*)
- PTSC3_3 (*Kykenitkö hyökkäyksen aikana ennakoimaan taktikassa käytettäviä päätöksentekoaikaväleitä ja muita päätöspisteitä?*)
- PTSC3_4 (*Muodostitko hyökkäyksen aikana vaihtoehtoisia toimintamalleja tai mietitkö taktiikan muutoksia silta varalta, että maaliryhmät käyttäytyvät ennakoimattomasti tai jotain muuta odottamatonta tapahtuu?*)

Korkeimmat MWL-dimensiot koskivat seuraavia osa-alueita:

- ajallinen dimensio
- ponnistelun dimensio
- henkisen kuormittavuuden dimensio

Kun V1-simulaatiota tarkastellaan tutkahyökkäyskohtaisesti, huomataan että SA:n kannalta PT-SAGAT-tulokset ovat toisen tutkahyökkäyksen aikana alhaisimmillaan (ks. kuva 19). Tätä tukee ohjaajien MWL:n osalta kokema ajallisen vaatimustason haasteet, sillä toinen tutkahyökkäys on selvästi ajallisesti kriittisin (ks. kuva 21). Tällöin myös SA:n muodostamiseen on vähiten aikaa.

Toisen tutkahyökkäyksen TR-tapahtumat, joissa TRB7 (*Toteutetaanko ohjuksen päivytyksen katkaisu oikein ja oikealla hetkellä?*) ja TRB10 (*Tapahtuuko liikehtely TTP:n mukaiselta etäisyydeltä*) kertovat siitä, että tähän tutkahyökkäykseen tarvitaan lisää aikaa. Tällöin etukäteen suunnitellut päätöksentekotapahtumat toteutuisivat oikea-aikaisesti ja TTP:n mukaisia päätöksentekoaikaisuuksia kyettäisiin noudattamaan paremmin. Toisen tutkahyökkäyksen osalta myös NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot ovat matalammat verrattuna ensimmäiseen ja kolmanteen tutkahyökkäykseen (ks. kuvat 12 - 14). Tämä osaltaan tukee ajatusta siitä, että 2. tutkahyökkäykseen olisi saatava lisää aikaa, jotta SA- ja NP-mittareiden tapahtumakohtaiset keskiarvot paranisivat sekä NASA-TLX-menetelmällä mitattujen MWL-dimensioiden keskiarvot laskisivat.

Yhtä lailla kolmannen tutkahyökkäyksen TRC10 (*Tapahtuuko liikehtely TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?*) sekä TRC5 (*Tapahtuuko ohjuslaukaisu TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?*) ovat muutoksen tarvetta tukevia seikkoja. Näihin vaikuttavat erityisesti tehtävänannossa määrätty ammundoktriini sekä myös CAF (Clear Avenue of Fire), joka tarkoittaa riittävän turvallista ilmataisteluoituksen ammuttilannetta, jolloin omien koneiden on oltava pois ammutalinalta. Tästä syystä on kehitettävä tilanteeseen sidottua parven- tai parinjohtajan radioliikennettä enemmän informatiiviseksi.

Ilmataistelun asiantuntijoiden toteuttaman analyysin perusteella TR-tapahtumat TRA5 ja TRC5 (*Tapahtuuko ohjuslaukaisu TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?*) tunnistettiin merkittävimmiksi potentiaalisiksi muutettaviksi kvantitatiivisiksi TTP-säännöiksi. Ensimmäisen tutkahyökkäyksen ammuntaetäisyyttä pidentämällä voidaan laskea ajallisen MWL-dimension arvoa toisessa ja kolmannessa tutkahyökkäyksessä. Näin parantuisi myös punaisen tutkan väistämisen lentosuunta ja kesto, koska sen tekemiseen olisi enemmän aikaa. Ajallisen MWL-dimension arvon pienenemisen myötä myös kolmannen tutkahyökkäyksen asetelma paransi, jolloin ohjuslaukaisu tapahtuisi TTP:n mukaiselta etäisyydeltä ja paremmilta ampu-ma-arvoilta. Tällöin myös kolmannen tutkahyökkäyksen aloitusetäisyys kasvaisi. Näiden lisäksi asiantuntijat arvioivat, että tutkahyökkäysten ajallisen keston lisääminen parantaisi parven sisäistä kommunikaatiota, jolloin oman koneen lentäminen tarkentuisi ja kapasiteetti

käyttää koneen omasuojaa myös kasvaksi. Parven sisäisen kommunikaation paranemisella edistetään myös SA-tason 3 paranemista, jolloin ajallisen- ponnistelun ja henkisen kuormittavuuden MWL-dimensioiden keskiarvot oletettavasti paranisivat.

5.4 Toisen C-simulaation (C2) tulokset

Perustuen V1-vaiheen tuloksista tehtyihin johtopäätöksiin, päätettiin pidentää ensimmäisen tutkahyökkäyksen ammuntaetäisyyttä. Tämä toteutettiin niin, että uuden MP-optimaalisen TTP-säännön arvon löytämiseksi luovuttiin V1-vaiheen P_k 0.73:sta hieman (ks. alaluku 5.1). Tämä toteutettiin kuitenkin niin, että $P_s=1$ rajoitus edelleen toteutuu, samoin kuin P_{kref} :n arvo 0.70.

C2-vaiheessa päädyttiin kasvattamaan ensimmäisen tutkahyökkäyksen ammuntaetäisyyttä 17 %:lla. Tämän johdosta toiseen tutkahyökkäykseen saatiin lisää aikaa 11.2 sekuntia. Tällöin myös toiseen tutkahyökkäykseen saadaan lisää aikaa punaisen tutkan lukituksen väistämiseen. Samalla kyetään noudattamaan paremmin TTP:n mukaista ammuntaetäisyyttä sekä toisessa ja erityisesti kolmannessa tutkahyökkäyksessä.

C2-simulaatioiden tulosten perusteella $P_k = 0.70$, sen ollessa C1-simulaatioissa 0,73. Tutkahyökkäyskohtaiset P_k -keskiarvot C2-vaiheessa olivat

- 1. tutkahyökkäys: 0.75
- 2. tutkahyökkäys: 0.69
- 3. tutkahyökkäys: 0.65.

P_s oli C2-simulaatioissa edelleen 1.0, kuten C1-simulaatioissakin. Kaiken kaikkiaan MP-optimaaliset kvantitatiiviset TTP-säännöt osoittautuivat C2-simulaatioissa onnistuneiksi P_k :n ja P_s :n ollessa hyväksyttäviä.

5.5 Toisen V-simulaation (V2) tulokset

Uudet 14 koehenkilöä toteuttivat V2-simulaatiot, määrän ollessa sama kuin V1:ssä. Heidän lentokokemus Hornetilla oli keskiarvolta 630 lentotuntia, joka on hieman vähemmän, kuin V1-simulaation koehenkilöillä (770). Lentokokemusten keskiarvot eivät kuitenkaan eronneet tilastollisesti merkitsevästi (t-testi), joten mahdolliset erot V1- ja V2-tuloksissa eivät johdu koehenkilöiden erilaisesta lentokokemuksesta. Testaushetkellä kaikki koehenkilöt kokivat olevansa lentokuntoisia lentämään myös todellista Hornetia. Lisäksi jokainen koehenkilö hallitsi Ilmavoimien taktisen ohjeistuksen. Voidaankin todeta, että kaikki koehenkilöt olivat kykeneviä toteuttamaan V2-simulaatiot yhtäläisellä tavalla, kuin koehenkilöt V1-simulaatioissa.

V2-simulaatioissa arvioidaan kvalitatiivisten TTP-sääntöjen muutosten lisäksi C2-simulaatioiden perusteella muokattujen kvantitatiivisten TTP-sääntöjen muutosten vaikutusta parven toimintaan. Tällöin ohjaajalle jää V2-simulaatioissa enemmän aikaa etsiä maali tutkalla, ampua ilmataisteluoohjus ja väistää punaisen ampumat ohjukset viimeistään TTP:n mukaiselta etäisyydeltä. V1-simulaatioiden tulosten perusteella tehtiin seuraavat muutokset ja tarkennukset TTP:n kvalitatiivisiin sääntöihin:

- Lentokorkeuden säilytyksen merkitystä korostettiin
- Omasuojajärjestelmien käyttöä tarkennettiin
- Ohjuksen päivittämisen menetelmää tarkennettiin
- Toisen tutkahyökkäyksen vihollisen tutkan väistämisen ajallista kestoa painotettiin
- Kolmannen tutkahyökkäyksen ammutadoktriinia tarkennettiin
- Ohjusten ampumisen optimiarvojen tärkeyttä korostettiin

Parvenjohtajan radioliikennettä TTP:n noudattamisen osalta muokattiin seuraavilta osin:

- Ensimmäisen tutkahyökkäyksen liikehtelyn suunta ilmoitettiin aiemmin
- Toisen tutkahyökkäyksen TTP:n mukaisesta etäisyydestä huomautettiin parvea aiemmin
- Kolmannen tutkahyökkäyksen taisteluaajatus kerrottiin parvelle aiemmin

Seuraavan alaluvun kuvissa esitetään sekä V1- että V2-vaiheiden tulokset. Näin on mahdollista verrata kuvien perusteella V1- ja V2-vaiheiden tulosten tapahtumakohtaisia keskiarvoja visuaalisesti. Samalla voidaan arvioida TTP-sääntöjen muutosten vaikutusta koehenkilöiden NP:hen, SA:han ja MWL:ään.

5.5.1 V2 NP

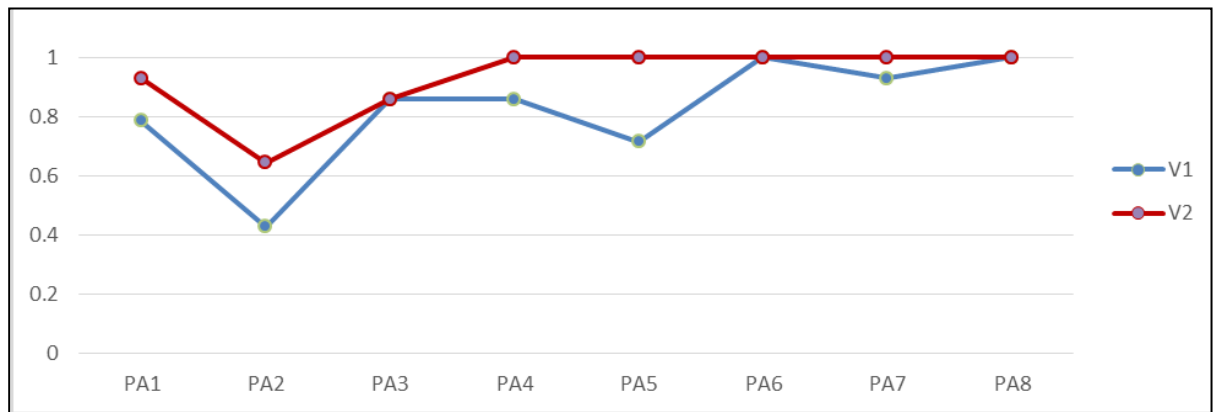
NP-mittarin kokonaiskeskiarvo V2-simulaatioissa oli 0.91 (SD=0.31) sen ollessa V1:ssä 0.75 (SD=0.44). Taulukossa 6 on esitetty NP-mittarin keskiarvot V1:ssä ja V2:ssa tutkahyökkäyskohtaisesti.

Taulukko 6: V1- ja V2-simulaatioiden NP-mittarin keskiarvot ja keskihajonnat tutkahyökkäyskohtaisesti.

NP-tulokset	V1		V2	
	Keskiarvo	Keskihajonta	Keskiarvo	Keskihajonta
1. Tutkahyökkäys	0.82	0.38	0.93	0.24
2. Tutkahyökkäys	0.69	0.46	0.88	0.33
3. Tutkahyökkäys	0.73	0.44	0.93	0.24

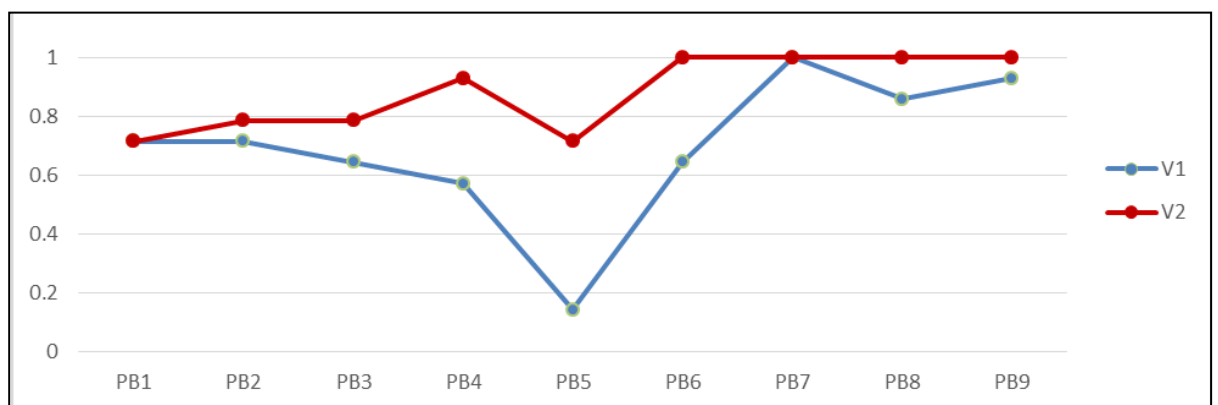
NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot on esitetty kuvissa 22 - 24.

Ensimmäisen tutkahyökkäyksen V2:n NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot (Kuva 22) eivät eronneet toisistaan tilastollisesti merkittävästi (Friedmanin testi). Keskiarvojen perusteella PA2 (*Lentokorkeus 30 s. ajalta (1:00 - 1:30)*) eroaa muista tapahtumista, mutta ei kuitenkaan tilastollisesti merkittävästi (Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi). PA5 (*Uloslennon kuormituskerroin*) eroaa V2:ssa tilastollisesti merkittävästi V1:stä (Mann-Whitneyn U-testi). Lentokorkeuden säilyttäminen (PA2) on potentiaalinen kehitettävä TTP-sääntö. V2-vaiheen ensimmäisen tutkahyökkäyksen NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot ovat yleisesti paremmat kuin V1-simulaatioissa.



Kuva 22. Ensimmäisen tutkahyökkäyksen NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 4.

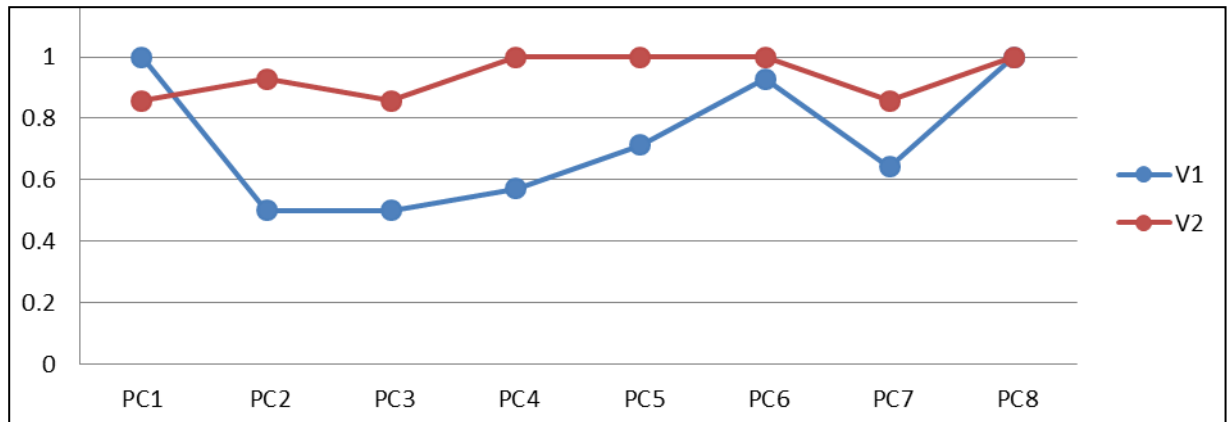
Toisen tutkahyökkäyksen V2:n NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot (Kuva 23) eivät eronneet toisistaan tilastollisesti merkittävästi (Friedmanin testi). Keskiarvojen perusteella PB5 (*Puolustuksellisen väistön lentosuunta ja kesto*), eroaa edelleen alhaisen keskiarvon takia muista tapahtumista, mutta ei kuitenkaan tilastollisesti merkittävästi (Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi). PB3 (*Ammunta-arvot*), PB4 (*Ohjuksen päivityskulma*), PB5 (*Puolustuksellisen väistön lentosuunta ja kesto*) ja PB6 (*Uloslennon kuormituskerroin*) eroavat V2:ssa tilastollisesti merkittävästi V1:stä (Mann-Whitneyn U-testi). V2:n toisen tutkahyökkäyksen NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot ovat yleisesti paremmat kuin V1:ssä.



Kuva 23. Toisen tutkahyökkäyksen NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 4.

Kolmannen tutkahyökkäyksen V2:n NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot (Kuva 24) eivät eronneet toisistaan tilastollisesti merkittävästi (Friedmanin testi). PC2 (*Lentokorkeus 45 s. ajalta (5:00 - 5:45)*), PC3 (*Ammunta-arvot*), PC4 (*Ohjuksen päivityskulma*) ja PC5 (*Uloslennon kuormituskerroin*) eroavat V2:ssa tilastollisesti merkittävästi V1:stä (Mann-Whitneyn

U-testi). V2-vaiheen kolmannen tutkahyökkäyksen NP-mittarin NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot ovat yleisesti paremmat kuin V1:ssä. Ainoastaan PC1 (Lentonopeus 45 s. ajalta (5:00 - 5:45)) on keskiarvoltaan huonompi V2:ssa kuin V1:ssä.



Kuva 24. Kolmannen tutkahyökkäyksen NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 4.

5.5.2 V2 SA TR

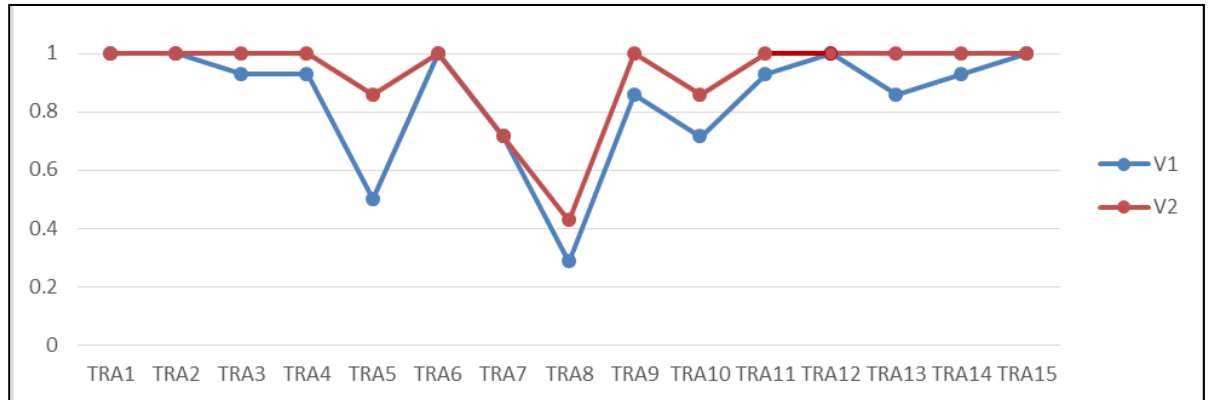
SA TR-mittarin kokonaiskeskiarvo V2:ssa oli 0.91 (SD=0.28) sen ollessa V1:ssä 0.79 (SD=0.41). Kokonaiskeskiarvo oli tilastollisesti merkitsevästi korkeampi V2:ssa (Mann-Whitneyn U-testi). Taulukossa 7 on esitetty SA TR-mittarin keskiarvot V1:ssä ja V2:ssa tutkahyökkäyskohtaisesti. V2:n keskiarvo on korkeampi jokaisessa tutkahyökkäyksessä, mutta ei tilastollisesti merkittävästi (Mann-Whitneyn U -testi). SA TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot V1:ssä ja V2:ssa on esitetty kuvissa 25 - 27.

Taulukko 7: V1- ja V2-simulaatioiden SA TR-mittarin keskiarvot ja keskihajonnat tutkahyökkäyskohtaisesti.

TR-tulokset	V1		V2	
	Keskiarvo	Keskihajonta	Keskiarvo	Keskihajonta
1. Tutkahyökkäys	0.84	0.36	0.92	0.27
2. Tutkahyökkäys	0.81	0.39	0.92	0.30
3. Tutkahyökkäys	0.71	0.46	0.89	0.31

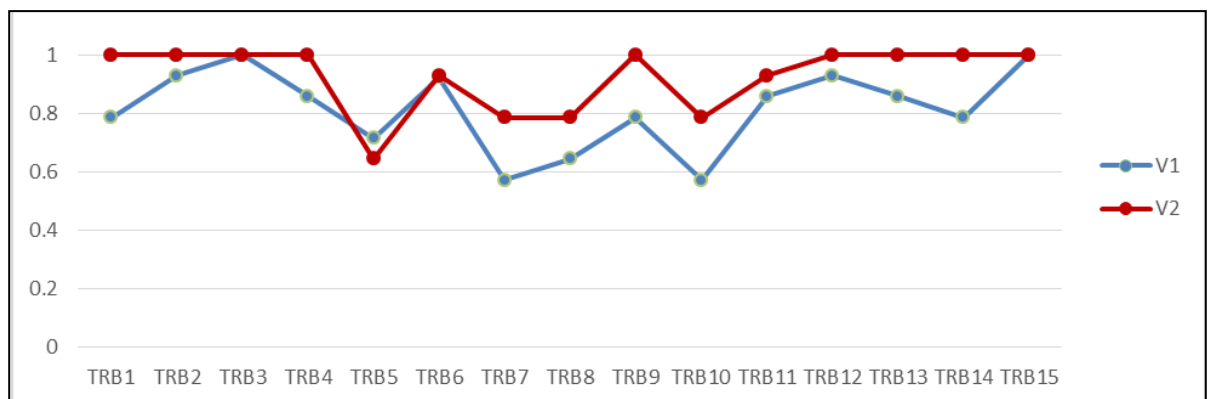
Ensimmäisen tutkahyökkäyksen V2:n TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot (Kuva 25) erosivat toisistaan tilastollisesti merkittävästi (Friedmanin testi). TRA8 (*Aktivoidaanko koneen omasuoja oikea-aikaisesti?*) ja TRA5 (*Tapahtuuko ohjuslaukaisu oikealta TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?*) eroavat alhaisten arvojen takia muista mittauspisteistä, kuten V1:ssä (Wil-

coxonin merkittyjen sijalukujen testi). TRA5 eroaa V2:ssa tilastollisesti merkittävästi V1:stä (Mann-Whitneyn U-testi).



Kuva 25. Ensimmäisen tutkahyökkäyksen TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 3.

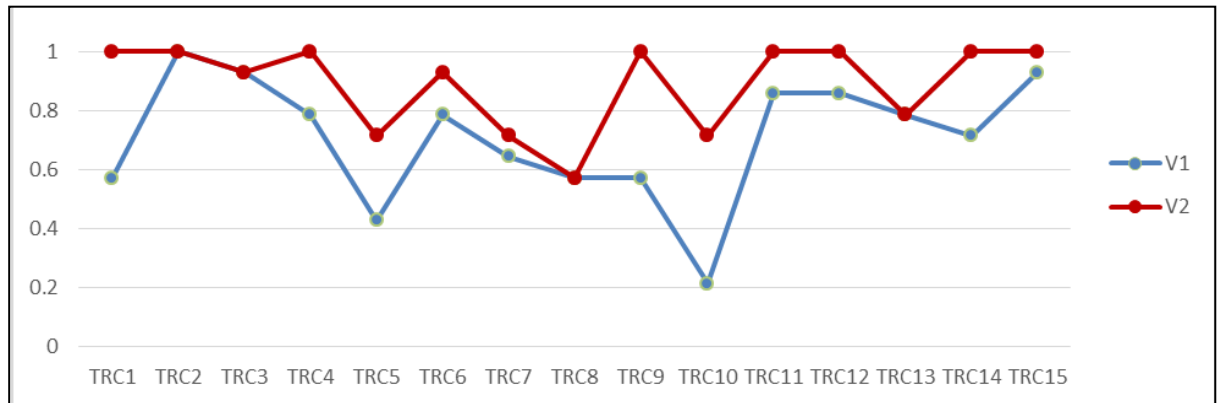
Toisen tutkahyökkäyksen V2:n TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot (Kuva 26) eivät eroa toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Friedmanin testi). Keskiarvojen perusteella TRB5 (*Tapahtuuko ohjuslaukaisu oikealta, TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?*) eroaa alhaisen keskiarvon perusteella muista mittauspisteistä, mutta ei tilastollisesti merkittävästi (Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi). Keskiarvojen perusteella TRB5 on V2:ssa hieman heikompi kuin V1:ssä, mutta ei kuitenkaan tilastollisesti merkittävästi (Mann-Whitneyn U -testi). Muut tulokset ovat parempia tai yhtä hyviä kuin V1:ssä.



Kuva 26. Toisen tutkahyökkäyksen TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 3.

Kolmannen tutkahyökkäyksen V2:n TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot (Kuva 27) eivät eroa toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Friedmanin testi). Keskiarvojen perusteella TRC8 (*Aktivoidaanko koneen omasuoja oikea-aikaisesti?*) eroaa alhaisen keskiarvon takia

muista mittauspisteistä (Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi). TRC1 (*Ovatko tutkan etäisyysparametrit lentotehtävänannon mukaiset tai oikein suhteessa ilmoitettuun ilmatilanne- ja uhkakuvaan?*), TRC9 (*Onko ammunnan jälkeinen liikehtely käsketyt TTP:n mukaista?*) ja TRC10 (*Tapahtuuko liikehtely TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?*) ovat parantuneet tilastollisesti merkittävästi (Mann-Whitneyn U -testi) verrattuna V1:een. Myös muut tulokset ovat parempia tai yhtä hyviä kuin V1:ssä.



Kuva 27. Kolmannen tutkahyökkäyksen TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 3.

5.5.3 V2 SA PT-SAGAT

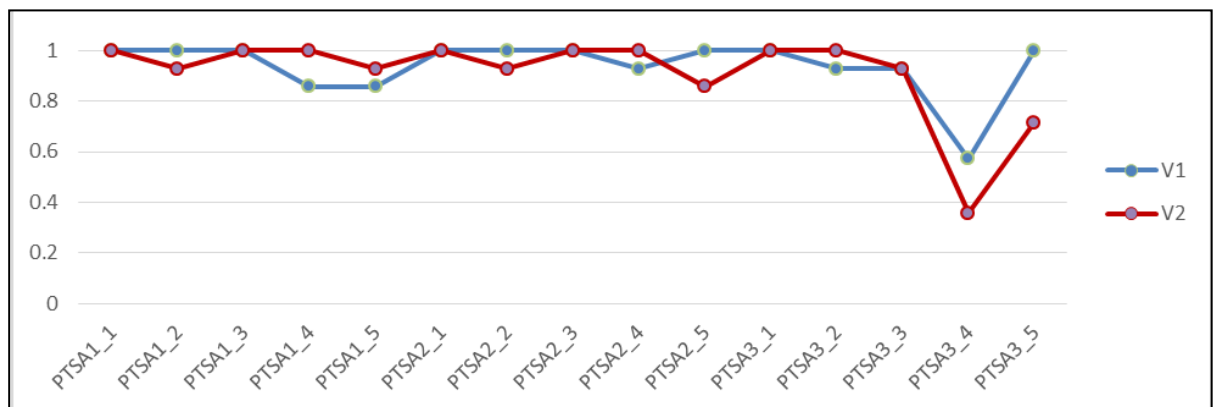
PT-SAGAT-mittarin kokonaiskeskiarvo V2:ssä oli 0.89 (SD=0.32) sen ollessa V1:ssä 0.81 (SD=0.39). Kokonaiskeskiarvo oli korkeampi V2:ssa, mutta ei tilastollisesti merkittävästi (Mann-Whitneyn U -testi). Taulukossa 8 on esitetty SA PT-SAGAT-mittarin keskiarvot V1:ssä ja V2:ssa huomioiden SA-tasot tutkahyökkäyskohtaisesti.

Taulukko 8: V1- ja V2-simulaatioiden PT-SAGAT-mittarin keskiarvot (Mean) ja keskihajonnat (SD) SA-tasoinen tutkahyökkäyskohtaisesti.

PT-SAGAT-tulokset	SA		SA:n taso 1		SA:n taso 2		SA:n taso 3	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
V1 Tutkahyökkäys 1	0.94	0.24	0.94	0.23	0.99	0.12	0.89	0.32
V2 Tutkahyökkäys 1	0.91	0.29	0.97	0.17	0.96	0.20	0.80	0.40
V1 Tutkahyökkäys 2	0.76	0.43	0.86	0.35	0.84	0.37	0.57	0.50
V2 Tutkahyökkäys 2	0.91	0.28	0.97	0.17	0.97	0.17	0.80	0.40
V1 Tutkahyökkäys 3	0.73	0.45	0.87	0.34	0.77	0.42	0.54	0.50
V2 Tutkahyökkäys 3	0.84	0.36	0.96	0.20	0.86	0.35	0.71	0.46

Kaikissa kolmessa V2:n tutkahyökkäyksessä havaittiin eroja, mutta ei kuitenkaan tilastollisesti merkittäviä (Friedmanin testi). Toisessa ja kolmannessa tutkahyökkäyksessä PT-SAGAT-tulokset olivat V2:ssa korkeammat kuin V1:ssä. Toisessa tutkahyökkäyksessä tämä ero oli myös tilastollisesti merkittävä (Mann-Whitneyn U -testi). SA:n tasojen vertailu osoitti sen, että ainoastaan ensimmäisen tutkahyökkäyksen SA:n tasot 2 ja 3 olivat alhaisemmat V2:ssa kuin V1:ssä, mutta eivät tilastollisesti merkittävästi (Mann-Whitneyn U -testi). Toisessa tutkahyökkäyksessä SA:n tasojen 2 ja 3 tulokset olivat V2:ssa tilastollisesti merkittävästi paremmat kuin V1:ssä. PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot on esitetty kuvissa 28 - 30.

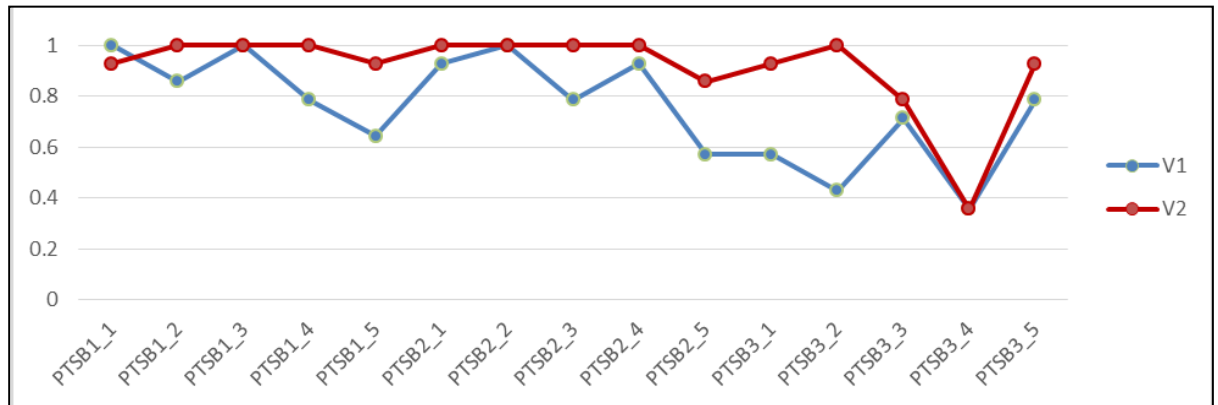
Ensimmäisen tutkahyökkäyksen V2:n PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot (Kuva 28) erosivat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Friedmanin testi). Keskiarvojen perusteella PTSA3_4 (*Muodostitko hyökkäyksen aikana vaihtoehtoisia toimintamalleja tai mietitkö taktiikan muutoksia silta varalta, että maaliryhmät käyttäytyvät ennakoimattomasti tai jotain muuta odottamatonta tapahtuu?*) eroaa edelleen alhaisen keskiarvon takia muista mittauspisteistä (Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi). PTSA3_5 (*Päätyikö hyökkäys odottamaasi asetelmaan*) on V2:ssa tilastollisesti merkittävästi parempi kuin V1:ssä (Mann-Whitneyn U -testi). Myös muut tulokset ovat vain hieman parempia tai huonompia kuin V1:ssä.



Kuva 28. Ensimmäisen tutkahyökkäyksen PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 2.

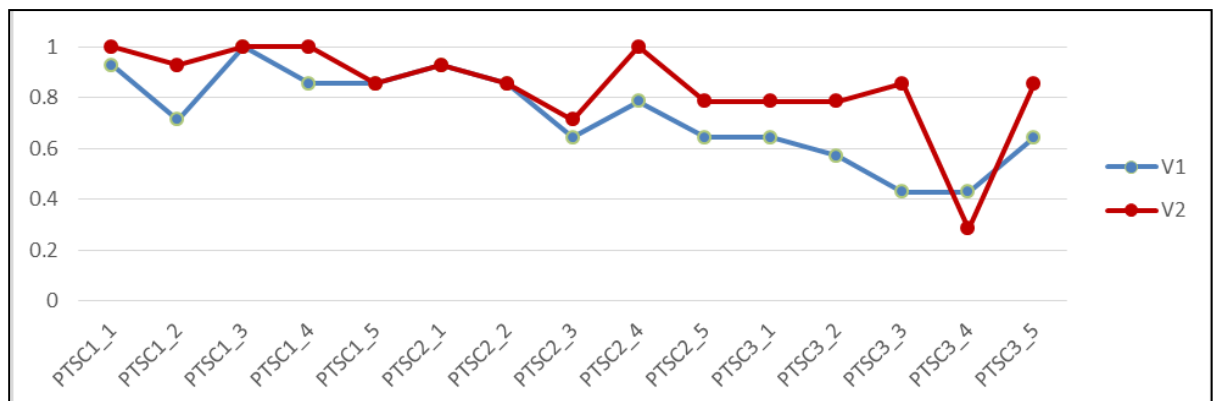
Toisen tutkahyökkäyksen V2:n PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot (Kuva 29) erosivat toisistaan tilastollisesti merkitsevästi (Friedmanin testi). Keskiarvojen perusteella PTSB3_4 (*Muodostitko hyökkäyksen aikana vaihtoehtoisia toimintamalleja tai mietitkö taktiikan muutoksia siltä varalta, että maaliryhmät käyttäytyvät ennakoimattomasti tai jotain muuta odottamatonta tapahtuu?*) eroaa edelleen alhaisen keskiarvon takia muista mittauspisteistä,

mutta ei kuitenkaan tilastollisesti merkittävästi (Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi). PTSB3_1 (*Kykenitkö riittävällä tarkkuudella ennakoimaan miten hyökkäys eteni?*) ja PTSB3_2 (*Kykenitkö riittävällä tarkkuudella ennakoimaan miten osastosi muut jäsenet toimivat hyökkäyksen aikana?*) on V2:ssa tilastollisesti merkittävästi parempi kuin V1:ssä (Mann-Whitney U -testi). Myös muut tulokset ovat pääosin hieman parempia kuin V1:ssä.



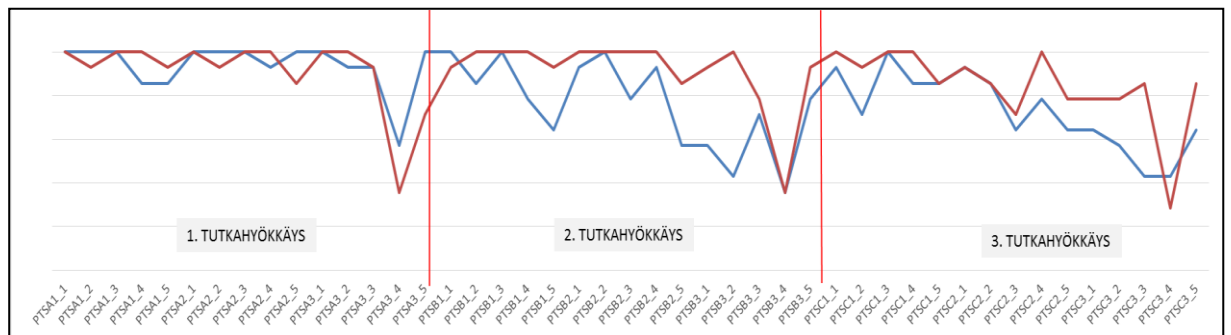
Kuva 29. Toisen tutkahyökkäyksen PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 2.

Kolmannen tutkahyökkäyksen V2:n PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot (Kuva 30) erosivat toisistaan tilastollisesti merkittävästi (Friedmanin testi). Keskiarvojen perusteella PTSC3_4 (*Muodostitko hyökkäyksen aikana vaihtoehtoisia toimintamalleja tai mietitkö taktiikan muutoksia siltä varalta, että maaliryhmät käyttäytyvät ennakoimattomasti tai jotain muuta odottamatonta tapahtuu?*) eroaa alhaisen keskiarvon takia muista mittauspisteistä tilastollisesti merkittävästi (Wilcoxonin merkittyjen sijalukujen testi). Keskiarvojen perusteella PTSC3_3 (*Kykenitkö hyökkäyksen aikana ennakoimaan taktiikassa käytettäviä päätöksenteo-koetäisyyksiä ja muita päätöspisteitä?*) eroaa V2:ssa tilastollisesti merkittävästi V1:stä (Mann-Whitney U -testi). Myös muut tulokset ovat pääosin parempia kuin V1:ssä.



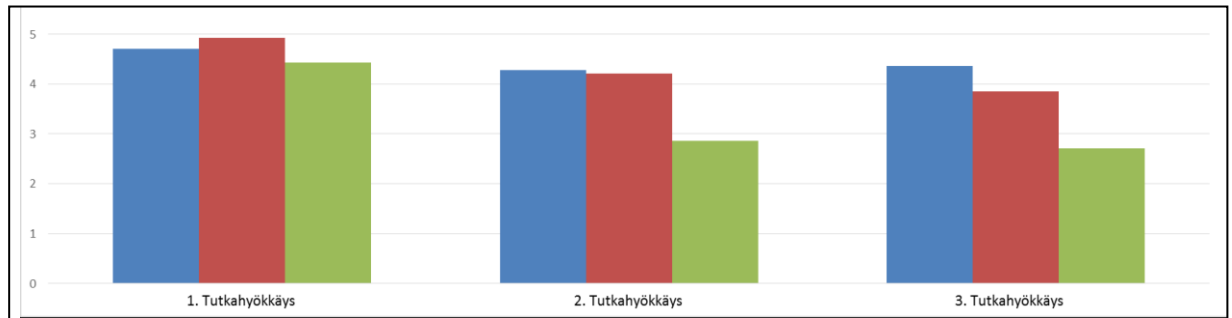
Kuva 30. Kolmannen tutkahyökkäyksen PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 2.

Kuvaan 31 on koottu kuvat 28 - 30. Kuvasta nähdään, että PT-SAGAT-mittarin keskiarvot ovat pääosin parempia kuin V1-simulaatioissa. Kuva osoittaa myös sen, miten eri taistelutekniikat vaikuttavat TTP:n läpivientiin, jolloin keskimäärin SA huononee taistelun edetessä. Ensimmäisen tutkahyökkäyksen aikana on pisin etäisyys punaiseen ja runsaasti aikaa tehdä päätöksiä. Toisen tutkahyökkäyksen aikana etäisyys vastustajaan pienenee ja parven kommunikaatiolle käytössä oleva aika vähenee johtuen käytössä olevasta taistelutekniikasta. Kolmannessa tutkahyökkäyksessä tilannekuva on todennäköisesti vielä epäselvä johtuen siitä, että ei ole varmaa mitkä vihollisista ovat tuhoutuneet. Lisäksi viimeisen tutkahyökkäyksen aikana joudutaan porrastamaan korkeussuunnassa muihin parven koneisiin, jolloin huomio kiinnittyy osaltaan myös siihen. [65]



Kuva 31. Koko skenaarion PT-SAGAT-mittarin tulosten tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 2

Kuvaan 32 on koottu SA-tasojen keskiarvot tutkahyökkäyskohtaisesti. Kuvasta nähdään, että SA-tason 1 ja 2 keskiarvot ovat hieman paremmat, kuin tason 3. Tämän perusteella voidaan todeta se, että mitä paremmin parven jäsenet noudattavat käytössä olevaa TTP:tä sitä selvemmin se näkyy SA:n eri tasojen välillä. Tämä osoittaa, että TTP:n tarkan noudattamisen lisäksi parven jäsenten on kyettävä kommunikoimaan keskenään sekä tulkitsemaan omilta näytöiltään vallitsevaa tilannetta. [81] Tämä korostaa yhteisten toimintatapojen eli TTP:n noudattamisen tärkeyttä.



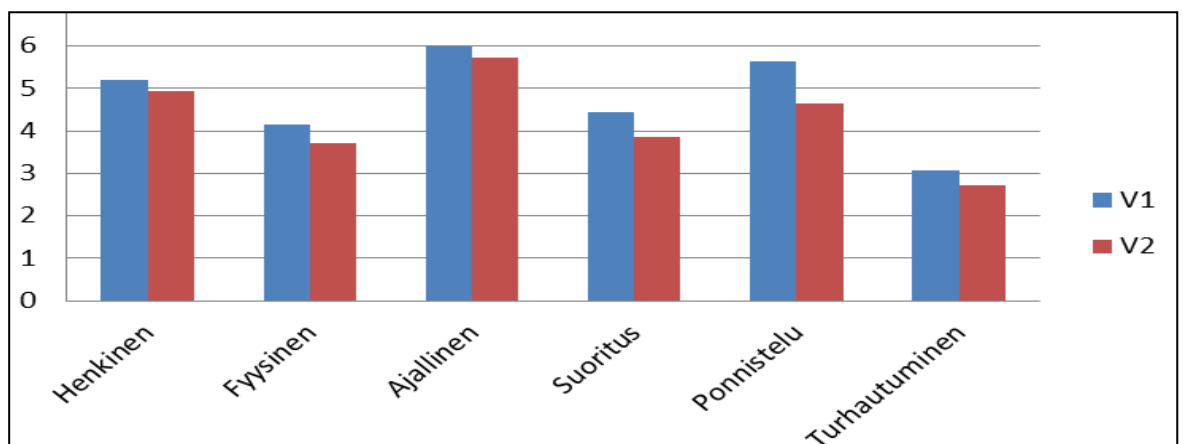
Kuva 32. V2-simulaation PT-SAGAT-mittarin SA-tasojen 1-3 keskiarvot tutkahyökkäyskohtaisesti. Sininen väri tarkoittaa SA-tasoa 1, punainen SA-tasoa 2 ja vihreä SA-tasoa 3.

5.5.4 V2 MWL

V2-simulaation NASA-TLX:n kaikkien dimensioiden keskiarvo oli 4.26 (SD=1.27) niiden ollessa V1:ssä 4,75 (SD=1,44). Taulukossa 9 ja kuvassa 33 esitetään V1:n ja V2:n dimensiokohtaiset tulokset. Kaikki MWL-dimensiot olivat V2:ssa alhaisemmat kuin V1:ssä, mutta eivät kuitenkaan minkään dimension osalta tilastollisesti merkittävästi (Mann-Whitneyn U-testi).

Taulukko 9: V1- ja V2-simulaatioiden NASA-TLX-dimensioiden keskiarvot ja keskihajonnat.

NASA-TLX-dimensiot	Keskiarvo		Keskihajonta	
	V1	V2	V1	V2
Henkinen	5.21	4.93	2.08	1.82
Fyysinen	4.14	3.71	2.18	1.59
Ajallinen	6.00	5.71	1.88	1.94
Suoritus	4.43	3.86	2.06	1.88
Ponnistelu	5.64	4.64	2.59	1.55
Turhautuminen	3.07	2.71	2.09	2.05



Kuva 33. NASA-TLX-dimensioiden keskiarvot V1:ssä ja V2:ssa. Sininen väri kuvaa V1:stä ja punainen väri V2:sta.

5.5.5 V2-tulosten yhteenveto ja TTP:n kehittäminen

V2-simulaatioiden perusteella sekä Ps että Pk ovat hyväksyttäviä ($P_k=1.00$ and $P_s=1.00$) eli samat kuin V1:ssä. Voidaan myös todeta, että HMP:n komponenttien SA:n, NP:n ja MWL:n kehitys on ollut positiivinen verrattuna V1:een.

NP-mittarin kokonaiskeskiarvo oli V2:ssa parempi kuin V1:ssä. Ero on tilastollisesti merkittävästi parempi yhdeksän säännön osalta. Ainoastaan kolmannen tutkahyökkäyksen PC1 (*Lentonopeus 45 s. ajalta (5:00 - 5:45)*) on keskiarvoltaan heikompi V2:ssa kuin V1:ssä, mutta ei kuitenkaan tilastollisesti merkittävästi.

SA TR-mittarin kokonaiskeskiarvo oli V2:ssa parempi kuin V1:ssä. Ainoastaan toisen tutkahyökkäyksen TRB5 (*Tapahtuuko ohjuslaukaisu oikealta, TTP:n mukaiselta etäisyydeltä?*) on V2:ssa heikompi kuin V1:ssä, mutta ei kuitenkaan tilastollisesti merkittävästi.

PT-SAGAT-mittarin kokonaiskeskiarvo oli V2:ssa korkeampia kuin V1:ssä. Taulukon 8 perusteella PT-SAGAT-mittarin tulokset toisen tutkahyökkäyksen osalta olivat tilastollisesti merkittävästi parempia V2:ssa kuin V1:ssä. SA-tason 3 keskiarvot olivat myös parantuneet toisen tutkahyökkäyksen osalta tilastollisesti merkittävästi. Ainoastaan seitsemän PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaista keskiarvoa oli V2:ssa pienempiä kuin V1:ssä.

Tauluko 9 ja kuvan 33 perusteella voidaan todeta, että V2-simulaation NASA-TLX:n dimensiot olivat kaikilta osin alhaisemmat V2:ssa kuin V1:ssä, mutta eivät kuitenkaan minkään dimension osalta tilastollisesti merkittävästi. Ajallisen dimension aleneminen (ks. taulukko 9) ja SA-tason 3 paraneminen toisessa ja kolmannessa tutkahyökkäyksessä (ks. taulukko 8) yhtenevät siihen, että NP-mittarin tulokset ovat parantuneet.

Yhteenvetona voidaan todeta, että V2-simulaatiot johtivat paremman TTP:n muodostumiseen, koska NP, SA ja MWL ovat parantuneet samalla, kun HMP-tuote eli Pk ja Ps olivat hyväksyttäviä. Vain yksittäiset NP- ja SA-mittarin säännöt olivat V2:ssa keskiarvoltaan huonompia kuin V1:ssä. Edelleen olisi mahdollista jatkokehittää TTP:tä C- ja V-simulaatioissa, mutta tähän työhön se ei toisi merkittävää lisäarvoa. L-V-C-simulaatiomallin esimerkkikäyttötapausten perusteella päätettiin, että NP, SA, MWL ja HMP-tuote ovat hyväksyttävällä tasolla. Näin V2:ssa on muodostettu HMP-optimaaliset kvalitatiiviset ja kvantitatiiviset TTP-säännöt (ks. kuva 8) ja voidaan siirtyä L-vaiheeseen.

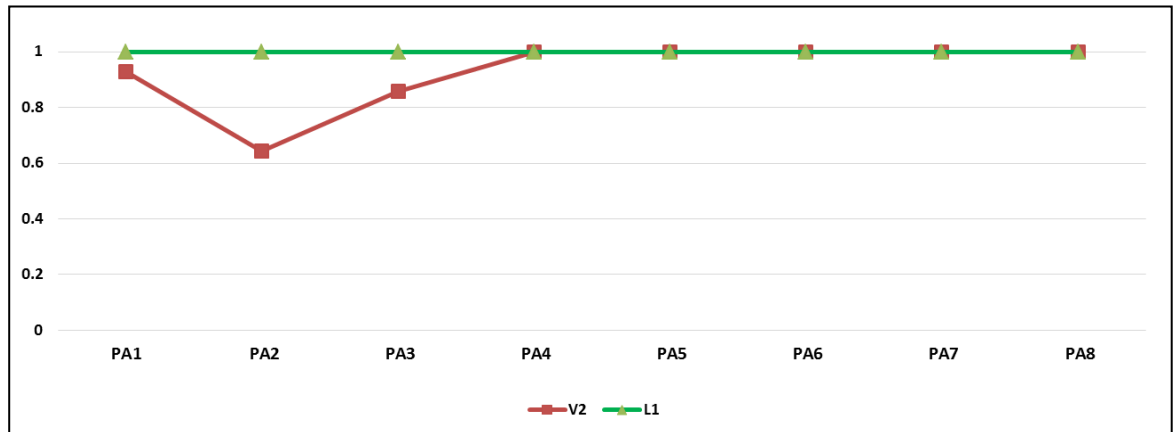
5.6 Ensimmäisen L-simulaation (L1) tulokset

V2:ssa saadut HMP-optimaaliset TTP-säännöt evaluoitiin L-vaiheessa. L1-simulaatiot toteutettiin F/A-18 Hornet -hävittäjillä. L1-simulaatioiden koehenkilöinä toimi kaksi valmiusohjaajaa, jotka eivät olleet osallisena V1- ja V2- vaiheissa. Ohjaajien lentokokemus Hornetilla oli keskiarvolta 220 lentotuntia, joka on selvästi vähemmän kuin V1- ja V2-simulaatioissa (V1=770 tuntia & V2=630 tuntia). Molemmat ohjaajat osasivat Ilmavoimien taktisen ohjeistuksen. L1-simulaatiot toteutettiin mahdollisimman tarkasti V2-simulaatioiden toteutusta noudattaen. Ainoastaan toimintaympäristön tekijät, kuten sää, pilvisuus ja muu lentoliikenne erosivat V-simulaatioiden olosuhteista. L1-simulaatioiden tarkoituksena oli V2:sta saatujen HMP-optimaalisten TTP-sääntöjen evaluointi eli selvittää ovatko Pk ja Ps riittävän korkeat ja säilyykö NP, SA ja MWL hyväksyttävänä. Toisin sanoen, jos V2:n ja L1:n tulokset ovat riittävän lähellä toisiaan, muodostavat ne operatiivisesti HMP-optimaaliset kvalitatiiviset ja kvantitatiiviset TTP-säännöt (ks. kuva 8).

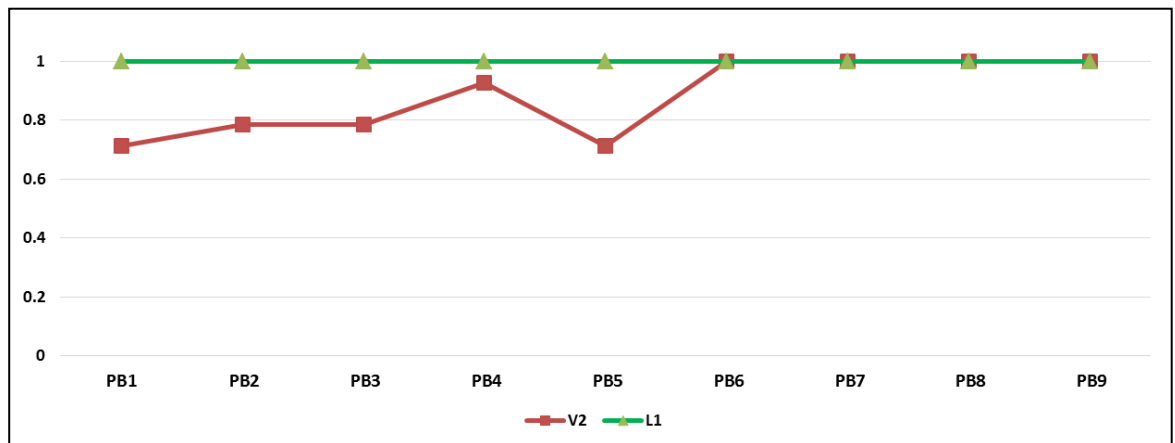
L-simulaatiot toteutettiin lentämällä yksi lentokierros, jolloin ilmassa oli yhteensä kahdeksan Hornetia eli sininen parvi sekä neljä punaista simuloivaa Hornetia. Koehenkilöt lensivät sinisen parven siipimiehinä. Heidän tehtävänään oli noudattaa mahdollisimman tarkasti HMP-optimaalisia TTP-sääntöjä, jotka tuotettiin V2-vaiheessa. L1-simulaatioiden tehtävänänto toteutettiin koehenkilöiden osalta kuten V2-simulaatioissa. Taistelunjohtajien ja punaisen lento-osaston lentäjien tehtävänänto toteutettiin erikseen. L1-simulaation tavoitteena oli toteuttaa identtinen suorite V2-simulaatioiden kanssa (ks. alaluku 4.4.1).

5.6.1 L1 NP

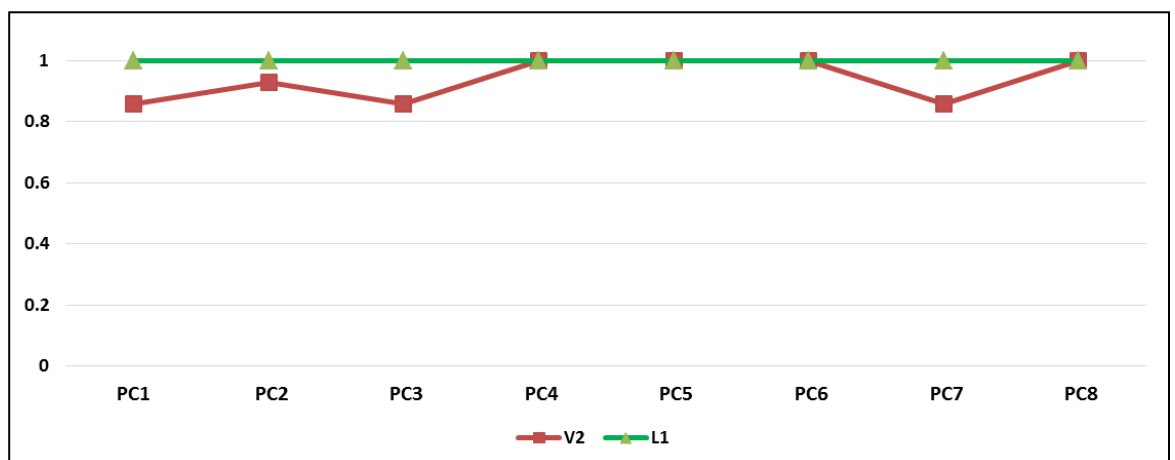
NP-mittarin kokonaiskeskiarvo L1:ssä oli 0.94 (SD=0.24) sen ollessa V2:ssa 0.91 (SD=0.31). Kuvissa 34 - 36 on esitetty NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot L1:ssä ja V2:ssa tutkahyökkäyskohtaisesti. L1:n NP-tulokset olivat jokaisen NP-mittarin säännön osalta yhtä hyviä tai parempia kuin V2:ssa.



Kuva 34. Ensimmäisen tutkahyökkäyksen NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 4.



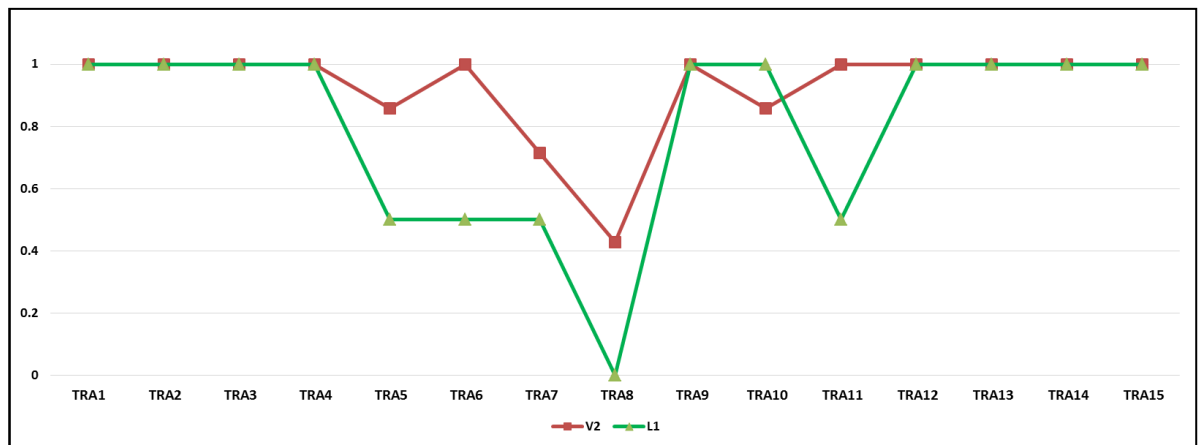
Kuva 35. Toisen tutkahyökkäyksen NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 4.



Kuva 36. Kolmannen tutkahyökkäyksen NP-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 4.

5.6.2 L1 SA TR

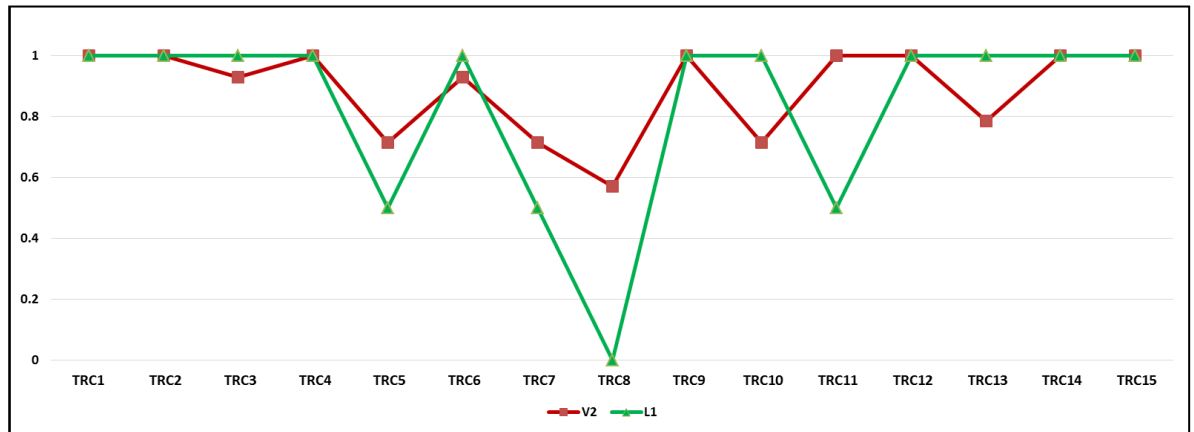
SA TR-mittarin kokonaiskeskiarvo L1:ssä oli 0.86 (SD=0.34) sen ollessa V2:ssa 0.89 (SD=0.28). Kuvissa 37 - 39 on esitetty TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot L1:ssä ja V2:ssa tutkahyökkäyskohtaisesti. L1-tulokset ovat vain 11 tapauksessa huonompia kuin V2:ssa, joista 5 tapauksessa keskiarvojen erotus oli 0.5 tai enemmän. Alhaisimmat tulokset esiintyi jokaisessa tutkahyökkäyksessä TRA/B/C8-säännön kohdalla (*Aktivoidaanko koneen omasuoja oikea-aikaisesti?*).



Kuva 37. Ensimmäisen tutkahyökkäyksen TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 3.



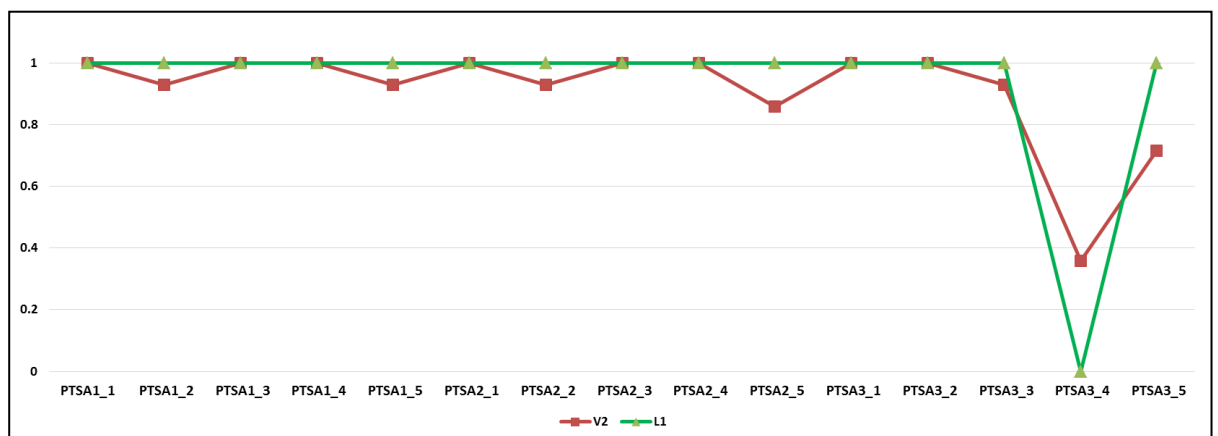
Kuva 38. Toisen tutkahyökkäyksen TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 3.



Kuva 39. Kolmannen tutkahyökkäyksen TR-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 3.

5.6.3 L1 SA PT-SAGAT

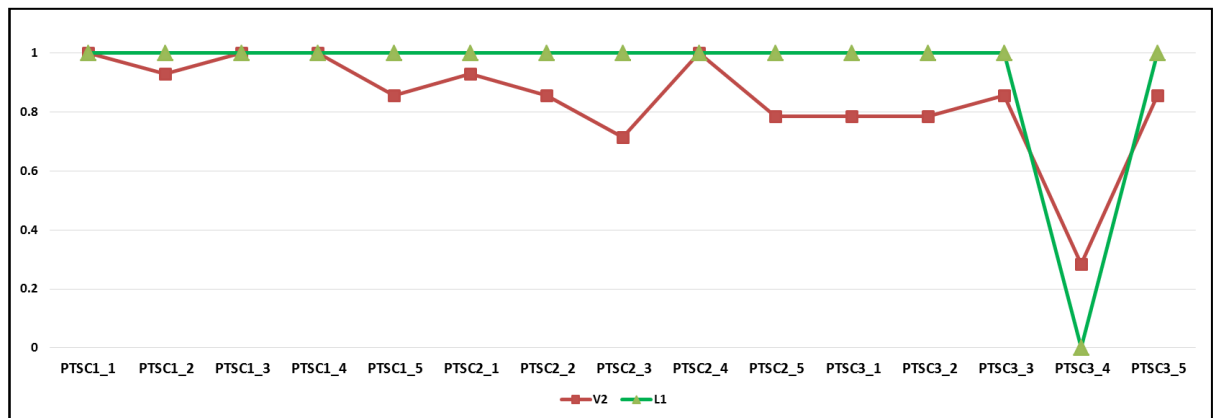
PT-SAGAT-mittarin kokonaiskeskiarvo L1:ssä oli 0.91 (SD=0.12) sen ollessa V2:ssä 0.89 (SD=0.32). Kuvissa 40 - 42 on esitetty PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot tutkahyökkäyskohtaisesti. L1-tulokset olivat 4 vain tapauksessa huonompia kuin V2:ssa, joista ainoastaan yhdessä tapauksessa keskiarvojen erotus oli 0.5 tai enemmän. L1-tulokset olivat kaikissa muissa tapauksissa yhtä hyviä tai parempia kuin V2:ssa. Molemmilla koehenkilöillä oli vaikeuksia muodostaa vaihtoehtoisia toimintamalleja siltä varalta, että maaliryhmät käyttäytyvät ennakoimattomasti tai jotain muuta odottamatonta tapahtuu (PTSA3_4 & PTSC3_4) ja ennakoida taktiikassa käytettäviä päätöksentekotäisyyksiä ja muita päätöspisteitä (PTSB3_3).



Kuva 40. Ensimmäisen tutkahyökkäyksen PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 2.



Kuva 41. Toisen tutkimuksen PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 2.



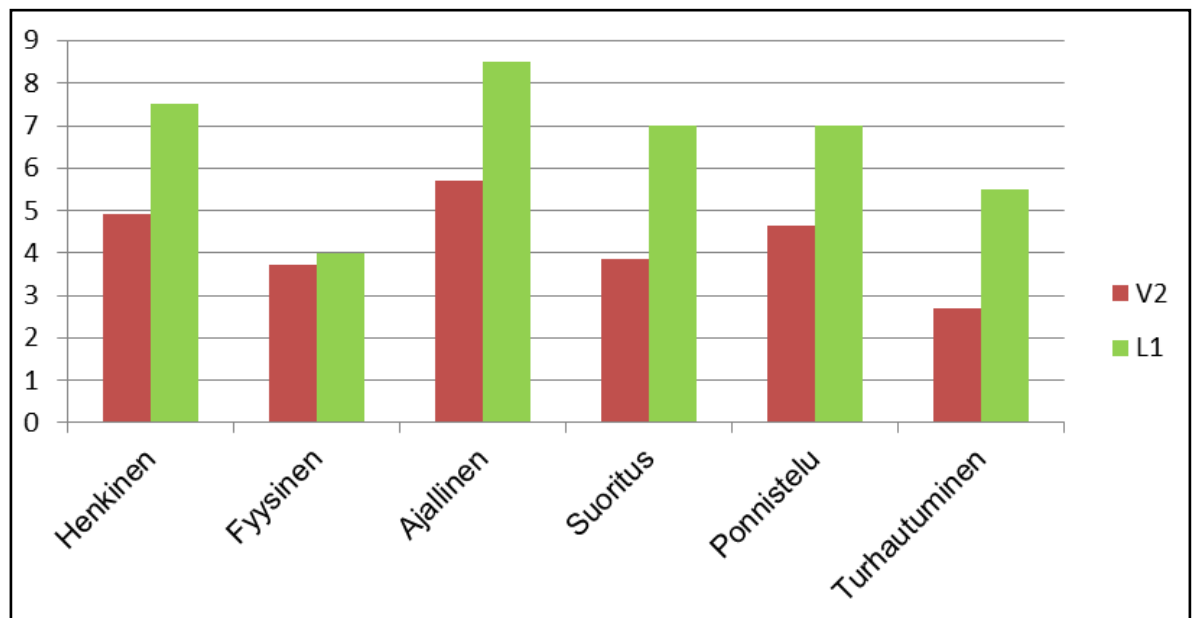
Kuva 42. Kolmannen tutkimuksen PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaiset keskiarvot. Kuvassa käytettävät lyhenteet on esitetty taulukossa 2.

5.6.4 L1 MWL

L1-simulaation NASA-TLX:n kaikkien dimensioiden keskiarvo oli 6.58 (SD=1.98) sen ollessa V2:ssa 4.26 (SD=1.27). V2- ja L1-simulaatioiden NASA-TLX-dimensioiden keskiarvot on esitetty taulukossa 10 ja kuvassa 43. Odotetusti jokaisen NASA-TLX-dimension tulos oli korkeampi L1:ssä kuin V2:ssa. Huomioitavaa on se, että fyysisen- ja turhautumisen dimensiot pois lukien on muiden dimensioiden tulosten järjestys sama V2:ssa ja L1:ssä.

Taulukko 10: V2- ja L1-simulaatioiden NASA-TLX-dimensioiden keskiarvot.

NASA-TLX-dimensiot	Keskiarvo		Keskihajonta	
	V2	L1	V2	L1
Henkinen	4.93	7.50	1.82	7.07
Fyysinen	3.71	4.00	1.59	1.41
Ajallinen	5.71	8.50	1.94	7.07
Suoritus	3.86	7.00	1.88	2.83
Ponnistelu	4.64	7.00	1.55	1.41
Turhautuminen	2.71	5.50	2.05	2.12



Kuva 43. V2- ja L1-simulaatioiden NASA-TLX-dimensioiden keskiarvot. Punainen väri kuvaa V2:sta ja vihreä väri L1:stä.

5.6.5 L1-tulosten yhteenveto

L1-simulaatioiden tulosten perusteella vaatimus $P_s=1.00$ toteutui ja $P_k=0.85$ oli riittävällä tasolla. Tämän perusteella HMP-tuote oli tyydyttävä. L1:n NP-, SA- ja MWL-tulokset ovat samansuuntaisia kuin V2:ssa.

NP-mittarin tapahtumakohtaisten keskiarvojen osalta L1-tulokset olivat kaikissa tapauksissa yhtä hyviä tai parempia kuin V2:ssa (ks. kuvat 34 - 36). Tämän perusteella voidaan todeta, että todellista lentokonetta on lennetty tarkemmin, kuin V-simulaattoria. Tämä tarkoittaa esimerkiksi tarkempaa lentokorkeuden- ja nopeuden säilyttämistä, parempaa ammunta-arvojen laatua ja tarkempia ohjuksen päivityskulmia.

SA TR-mittarin tapahtumakohtaisten keskiarvojen osalta L1-tulokset ovat 35 tapauksessa parempia tai yhtä hyviä kuin V2:ssa. Alhaisimmat keskiarvot esiintyivät jokaisessa tutkahyökkäyksessä TRA/B/C8-mittarin säännön (*Aktivoidaanko koneen omasuoja oikea-aikaisesti?*) kohdalla (ks. kuvat 37 - 39). Tämä sääntö oli alhainen myös V2-tuloksissa (ks. kuvat 25 - 27). L1:n SA TR-tulokset ovat samansuuntaisia kuin V2:n tulokset.

SA PT-SAGAT-mittarin tapahtumakohtaisten keskiarvojen osalta L1-tulokset ovat 41 tapauksessa parempia tai yhtä hyviä kuin V2:ssa. SA-taso 3 oli edelleen alhaisin jokaisen tutkahyökkäyksen aikana (ks. kuvat 40 - 42). L1:n SA PT-SAGAT-tulokset ovat samansuuntaisia kuin V2:n tulokset.

L1-simulaation NASA-TLX:n kaikkien dimensioiden keskiarvot olivat L1:ssä korkeammat kuin V2:ssa (ks. taulukko 10 sekä kuva 43). Keskiarvot olivat odotusten mukaisesti korkeammat, koska simulaatiot toteutettiin todellisilla lentokoneilla. MWL-dimensioiden tuloksista voidaan päätellä se, että koehenkilöiden kognitiivinen kuormittuminen oli L1:n aikana koko ajan korkeampi kuin V2:n aikana. Edelleen tulokset ovat kuitenkin samansuuntaisia kuin V2:ssa.

Yhteenvetona todettakoon, että L1:n otannan koko ei mahdollista tilastoanalyysin menetelmien käyttöä L1:n ja V2:n välillä. L1:n TTP T&E merkitsee kuitenkin sitä, että L1-vaiheessa todennettiin operatiivisesti HMP-optimaaliset kvalitatiiviset ja kvantitatiiviset TTP-säännöt todellisessa toimintaympäristössä hyödyntäen tutkimuksessa muodostettua L-V-C-simulaatiomallia (ks. kuva 8). Jos päätettäisiin jatkaa TTP:n kehittämistä, olisi tarkoituksenmukaisinta toteuttaa vielä yksi V-vaiheen simulaatio (V3), jolloin olisi mahdollista kehittää V2:ssa ja L1:ssä havaittuja heikoimpia TTP-sääntöjä. Koska L1:n ja V2:n tulokset olivat NP:n, SA:n ja MWL:n osalta samansuuntaisia ja hyväksyttäviä ja HMP-tuote oli molemmissa tyydyttävä, voidaan todeta L-V-C-simulaatiomallin esimerkkitarkastelun tuottaneen geneeriseen käyttöön soveltuvan TTP:n.

6 DISKUSSIO

6.1 L-V-C-simulaatiomallin soveltuminen ilmataistelutaktiikan kehittämiseen

Tässä diplomityössä esiteltiin L-V-C-simulaatiomalli TTP:n testaamisen ja evaluoinnin tueksi. Esitelty L-V-C-simulaatiomalli ja sen demonstraatio osoittivat normatiivisen suorituskyvyn, tilannetietoisuuden ja kognitiivisen kuormituksen mittaamisen hyödyllisyyden TTP:n testaamisessa ja evaluoinnissa arvioitaessa TTP:n hyvyyttä ja tunnistettaessa muutettavia TTP-sääntöjä. Ilman kognitiivisen kuormituksen mittausta on mahdollista päätyä tilanteeseen, jossa operatiivisessa käytössä olevalla TTP:llä on sekä MP-optimaaliset kvantitatiiviset säännöt että TTP-luonnoksen kvalitatiiviset säännöt (ks. kuva 1), joista kumpiakaan ohjaajat eivät kykene noudattamaan. Ilman normatiivisen suorituskyvyn mittausta on mahdotonta tietää onko TTP hyvä vai huono, koska ei tiedetä noudattavatko ohjaajat käskettyä TTP:tä. Ilman tilannetietoisuuden mittaamista saatetaan päätyä valitsemaan TTP, jonka noudattaminen vie kohtuuttomasti ohjaajien huomiota ja kognitiivista kapasiteettia. Mikäli tällaisessa tilanteessa toimintaympäristö muuttuu monimutkaisemmaksi, ohjaajien kognitiivinen kapasiteetti ei välttämättä enää riitä toimintaympäristön havainnointiin ja ymmärtämiseen. Kognitiivisen kuormituksen mittaamisella varmistetaan, että TTP:n noudattaminen ei muodostu ohjaajille kognitiivisesti liian kuormittavaksi. Ilman kognitiivisen kuormituksen mittaamista on mahdollista, että TTP:n noudattaminen on niin kuormittavaa, että sen noudattaminen muodostuu mahdottomaksi. Kaikissa edellä mainituissa tapauksissa on vaarana, että tuhoamis- ja selviytymistodennäköisyydet muodostuvat vaadittua heikommiksi. On kuitenkin muistettava, ettei kognitiiviselle kuormitukselle, tilannetietoisuudelle ja normatiiviselle suorituskyvyllä ole olemassa yleispäteviä raja-arvoja, eikä yhden muuttujan arvosta voi päätellä toisen muuttujan arvoa tai tuhoamis- tai selviytymistodennäköisyyttä.

PT-SAGAT-menetelmä tilannetietoisuuden mittaamisessa soveltui koehenkilöiden arviointiin hyvin. Tämä johtui osittain siitä, että menetelmä muistutti ohjaajien lentokoulutuksessa käytössä olevaa lentotehtävän läpikäyntiä. PT-SAGAT-menetelmän soveltuvuus voidaan kyseenalaistaa, jos koehenkilöt eivät ole tottuneet kyseiseen menetelmään. PT-SAGAT-kysymysten asettelu on tärkeää, jotta esitettyihin kysymyksiin on yksiselitteinen tapa vastata. Kysymysten asettelussa onnistuttiin työssä hyvin. SA TR-menetelmän osalta kyettiin työssä muodostamaan selkeät ja yksiselitteiset tilanteet todeta koehenkilöiden SA, joten menetelmä osoittautui luotettavaksi ja laadukkaaksi tavaksi arvioida tilannetietoisuutta. Kahta erilaista tilannetietoisuuden mittaamismenetelmää hyödyntämällä saatuja tuloksia kyettiin analysoimaan niitä kes-

kenään vertaamalla, ja samalla arvioimaan menetelmien luotettavuutta. Tämä osoittautui käyttökelpoiseksi tavaksi arvioida niin tilannetietoisuutta kuin menetelmien soveltuvuutta mittaamiseen. Normatiivisen suorituskyvyn mittaamisella arvioitiin koehenkilöiden kykyä noudattaa käskettyä TTP:tä. Arvioinnin toteuttaminen onnistui luotettavasti, koska lentotehtävän läpikäyntiin tarkoitetut laitteet mahdollistivat tarkan arvioinnin tekemisen ja arvioitavaksi määrättyjen kvalitatiivisten ja kvantitatiivisten sääntöjen asettelu oli onnistunut. Tällä perusteella normatiivisen suorituskyvyn mittarin arviointi ja analyysi kyettiin toteuttamaan työssä laadukkaasti. Kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen käytetyn NASA-TLX-menetelmän tulosten perusteella arvioitiin TTP:n kuormittavuutta. MWL-dimensioiden paraneminen V2:ssa verrattuna V1:een, mutta jälleen huonontuneen L1:ssä osoittaa sen, että kognitiivisen kuormituksen mittari oli looginen ja käyttökelpoinen (ks. alaluvut 5.3.4, 5.5.4 ja 5.6.4). Jos jatkuva MWL:n seuraaminen olisi tarpeen, se olisi syytä toteuttaa fyysisellä, esimerkiksi sykevälivaihtelun mittaamisella [69] NASA-TLX-menetelmän sijaan.

Lentäjän tilannetietoisuutta, kuormittumista ja suorituskykyä on tutkittu paljon - sekä yhdessä että erikseen [8] [97][98][99][100]. Toisin kuin aikaisemmissa tutkimuksissa, tämän työn L-V-C-simulaatiomalli osoittaa selvästi, miten hyödyntämällä normatiivista suorituskykyä, tilannetietoisuutta ja kognitiivista kuormitusta yhdessä HMP-tuotteen kanssa, mallia voidaan käyttää potentiaalisten kvalitatiivisten ja kvantitatiivisten TTP-sääntöjen tunnistamiseen ja kehittämiseen.

Esitetty L-V-C simulaatiomallin demonstraatio osoitti myös eri simulaatioiden vaiheittaisen ja iteratiivisen käytön hyödyllisyyden. Ilman V- ja L- vaiheita TTP:lle olisi ollut mahdollista määrittää vain MP-optimaaliset TTP-säännöt. Ilman C-vaihetta V-vaiheessa olisi vaadittu kohtuuttomasti toistoja HMP-optimaalisten TTP-sääntöjen löytämiseksi. Ilman V-vaihetta L-vaiheen toteuttaminen olisi ollut paitsi huomattavan kallista, mahdollisesti myös vaarallista. C- ja V-vaiheiden poisjättäminen olisi entisestään nostanut L-vaiheen kustannuksia ja kasvattanut sen toteuttamisen riskejä. Lisäksi useiden eri simulaatiotyyppien käyttö vähentää yksittäisen simulaatiotyypin aiheuttamaa virhettä. Tässä diplomityössä esitellyn L-V-C-simulaatiomallin avulla TTP:n testaaminen ja evaluointi kyettiin toteuttamaan turvallisesti ja tehokkaasti, hyödyntäen eri simulaatiotyyppien vahvuuksia. Työn L-V-C-simulaatiomalli tulee nähdä päätöksenteon apuvälineenä (ilma)taistelun ammattilaisille, jotka työkseen suunnittelevat operatiivisia TTP:itä.

6.2 Tutkimuksen luotettavuuden arviointi

Työn L-V-C-simulaatiomalli validoitiin toteuttamalla erilaisia simulointimenetelmiä, jolloin simulaatioiden tulosten mahdolliset ristiriidat paljastivat mallin sisältämiä virheitä ja virheiden vaikutus voitiin eliminoida lopputuloksesta. Näin ollen TTP:n kehittäminen oli läpinäkyvää, laadukasta ja simulaatiotulosten osalta helposti tulkittavaa. Samalla vältettiin väärien johtopäätösten tekeminen yksittäisten simulaatiotulosten perusteella. Simulaatiomallin esimerkkikäyttötapaus osoitti myös sen, että simulaatiotuloksista tehtävien johtopäätösten ei tarvinnut perustua tilastoanalyysin menetelmien käyttöön, vaan laadullisella ilmataistelun asiantuntijoiden toteuttamalla analyysillä kyettiin tuloksia arvioimaan ja vertailemaan luotettavasti.

L-V-C-simulaatiomallin esimerkkikäyttötapausten avulla toteutettiin toiminnallinen validointi (ks. kuva 3), jolloin validoitiin myös tutkimuksessa käytettävä teoria. Työssä käytetty teoria eli koehenkilöiden arviointiin käytetyt menetelmät kyettiin kokonaisuudessaan mittaamaan, jolloin simulaatiotulosten data voitiin määritellä kelpolliseksi tai niiden pohjalta voitiin vastaavasti jatkokehittää simulaatioita. Näin kyettiin toteuttamaan Sargentin mallin mukainen validointi ja verifiointi [44], joka lisää osaltaan työn reliabiliteettia.

Simulaatioiden avulla pyrittiin mallintamaan tutkittavaa ilmiötä tai järjestelmää riittävällä tarkkuudella sen ymmärtämiseksi. [43] Työn painopiste oli V-vaiheen simulaatioissa, jolloin tutkittiin ihmisen ja teknologian välistä vuorovaikusta, jossa huomioidaan myös tuhoamis- ja selviytymistodennäköisyys. C- ja V-vaiheen simulaatioiden mallit rakennettiin simulaattori-asiantuntijoiden toimesta. C- ja V-simulaatioiden mallinnus verifioitiin L-vaiheessa todellisilla lentokoneilla. Tulosten perusteella C- ja V-simulaattoreiden mallinnus vastasi L-simulaatioiden mallinnusta. L-vaiheen verifiointilla varmistuttiin siitä, että simulaatiot olivat rakennettu siten, että ne vastasivat käyttötarkoitustaan ja tuottivat oikean muotoiset tulokset. [44]

Työn BOR-tarkastelussa korostettiin inhimillisen toiminnan ja inhimillisten tekijöiden huomioon ottamisen tarvetta osana operaatioanalyysiä. BOR:n tarkoituksena oli lisätä käsitystä siitä, miten erilaiset inhimilliset käyttäytymistekijät vaikuttivat malleja hyödyntävään ongelmanratkaisuun ja päätöksentekoon. Tässä työssä hyödynnettiin BOR:n tutkimusotetta menestyksekkäästi, koska työssä kehitetyssä L-V-C-simulaatiomallissa yhdistettiin ihmisen toiminta ja inhimillinen päätöksenteko simulointimallinnuksen kanssa.

Työn reliabiliteetti pohjautuu siihen, että ihmisen arviointiin käytetyt menetelmät olivat käytökelpoisia ja niiden tuottamat tulokset luotettavia samalla, kun niitä testattiin useissa eri simulaatioiden vaiheissa. Tilannetietoisuuden, normatiivisen suorituskyvyn ja kognitiivisen kuormituksen arviointiin käytetyt menetelmät osoittivat, että tutkimustulokset olivat selvästi yhteydessä toisiinsa samalla, kun HMP-tuote säilyi hyväksyttävällä tasolla. Jos olisi verrattu vain tuhoamis- ja selviytymistodennäköisyyksiin ja normatiiviseen suorituskykyyn pohjautuvia TTP:itä, olisi työssä ollut huomattavasti vähemmän tarkasteltavia muuttujia. Vaikka jokaisella työssä käytetyllä mittarilla oli vahvuutensa ja heikkoutensa [94], voidaan todeta, että menetelmät onnistuttiin valitsemaan työn tarpeen ja kehittämistavoitteiden mukaisesti. Työn havaintojen perusteella voidaan todeta, että L-V-C-simulaatiomallin arvioinnissa käytetyt mittarit soveltuivat erinomaisesti mallin tulosten esittämiseen, koska dataa kyettiin keräämään häiriöttä ja analysoimaan laadukkaasti. Samalla osoitettiin, että käytössä olleilla inhimillisen toiminnan mittareilla saadut tulokset vastasivat sekä odotuksia että korreloivat toisiinsa loogisesti ja odotusten mukaisesti.

6.3 Jatkotutkimusmahdollisuudet

Tämä diplomityö perustui simulaatioihin, joita tarkasteltiin Behavioural Operational Research -näkökulmasta. Tavoitteena oli kehittää ilmataistelutaktiikkaa huomioiden ihmisen ja teknologian välinen vuorovaikutus. Työssä arvioitiin vain sinisen parven siipikoneita. Koko parven arviointi on erittäin haastavaa johtuen ilmataistelun kulun vaikeasta ennustettavuudesta ja monimutkaisuudesta. Johtokoneiden toiminnan vakiointi mahdollisti simulaatioiden identtisen toistettavuuden kaikissa vaiheissa. Koko parven arviointi tämän työn peruseriaatteiden mukaisesti, mutta lisättynä parven sisäisen tilannetietoisuuden, Team SA:n mittaamisella, mahdollistaisi TTP:iden kehittämisen jälleen uudella tavalla. Tällöin voitaisiin arvioida esimerkiksi parven ja kahden parin välistä taistelutehokkuutta ja lentäjien kykyä noudattaa käskettyä TTP:tä silloin, kun lento-osastot ovat erikokoisia. Perusteltua olisi tutkia myös koneoppimisen menetelmiä konstruktiivisten ja virtuaalisen simulaatioiden avulla toteutettavan taktiikan kehittämisen tukena. Tällöin olisi mahdollista semiautomaattisesti tunnistaa muokattavia TTP-sääntöjä konstruktiivisissa ja virtuaali-simulaattoreissa. Dataa keräämällä ja datan määrää kasvattamalla kyettäisiin tunnistamaan mahdollisia TTP:n menestystekijöitä. Samalla olisi mahdollista hyödyntää metamallinnustekniikoita myös Live-simulaatioiden datan analysoinnissa. Myös dynaamisiin Bayes-verkkoihin perustuvien metamallien hyödyntäminen simulaation tarkasteluissa olisi hyödyllistä. Tällöin tarkoituksena olisi tunnistaa esimerkiksi ilmataistelun kannalta kriittisiä sääntöjä, jotka potentiaalisesti vaikuttavat eniten MP-tuotteen

ja HMP-tuotteen väliseen prosessihävikkiin. Konstruktivisissa ja virtuaalisissa simulaatioissa voitaisiin tavoitella simulointi-optimointi-tekniikoiden käyttöä, jolloin tarkoituksena olisi tunnistaa mahdollisimman vähillä simulointimäärillä monen kriteerin suhteen tilastollisesti merkitsevästi parhaat kvalitatiiviset TTP-säännöt sekä niiden verbaaliset kuvaukset. Menetelmänä tällöin voisi olla esimerkiksi Multiobjective Ranking And Selection Procedure. Työssä käytettyjen mittareiden hyödyntäminen päivittäisissä lentotehtävien läpikäynneissä mahdollistaisi jatkuvan ihmisen ja teknologian välisen vuorovaikutuksen seurannan. Samalla olisi mahdollista mitata niin TTP:n kuin lentokoulutusohjelmien hyvyttä. Tämän toteuttaminen vaatisi erillisen tutkimuksen, mutta menetelmien hyödyntäminen olisi luonnollista, helppoa ja kustannustehokasta.

Tämän diplomityön näkökulmasta on hyödyllistä tutkia ihmisen roolia päätöksentekijänä silloin, kun uusien sukupolvien hävittäjät muodostavat selvästi nykyistä enemmän valmiiksi prosessoitua sensoridataa lentäjälle. Tässä työssä esiteltyä peruseriaatetta noudattaen on olemassa tarve mitata ihmisen kognitiivista kuormittumista silloin, kun lentokoneen lentäminen ja siihen liittyvien sensorien käyttö helpottuu, mutta ihminen kuormittuu selvästi nykyistä enemmän kasvaneesta tiedon määrästä. Samalla kun lentäjän tilannetietoisuus todennäköisesti kasvaa, päätöksenteon määrä ja vaikeus korostuvat, koska lentokone kerää tietoa suuremmalta maantieteelliseltä alueelta tarkemmin ja entistä nopeammin. Tämä aiheuttaa muutostarpeen ilmataistelutaktiikan kehittämiseksi, koska teknologian suorituskyky kasvaa ja ihmisen rooli osana vuorovaikutusta muuttuu. Kasvaneen informaation myötä myös lento-osaston, kuten parven johtaminen tulee muuttumaan. Tällöin on mahdollista kyseenalaistaa tiettyyn tehtävään tarvittava konemäärä nykyisen neljän koneen kokoisen parven sijaan. Teknologian kehittymisen lomassa on huomioitava, miten ihminen kykenee kommunikoimaan johtaessaan erikokoisia lento-osastoja. Kyseenalaista on se, miten ihminen pysyy nopean teknologisen kehittymisen mukana niin, että kykenee edelleen toimimaan koneita laadukkaampana päätöksentekijänä osana ilmataistelun monimutkaista kulkua.

6.4 LVC-simulaatioiden kehitysnäkymät HX-aikakaudella ilmataistelutaktiikan kehittämisen näkökulmasta

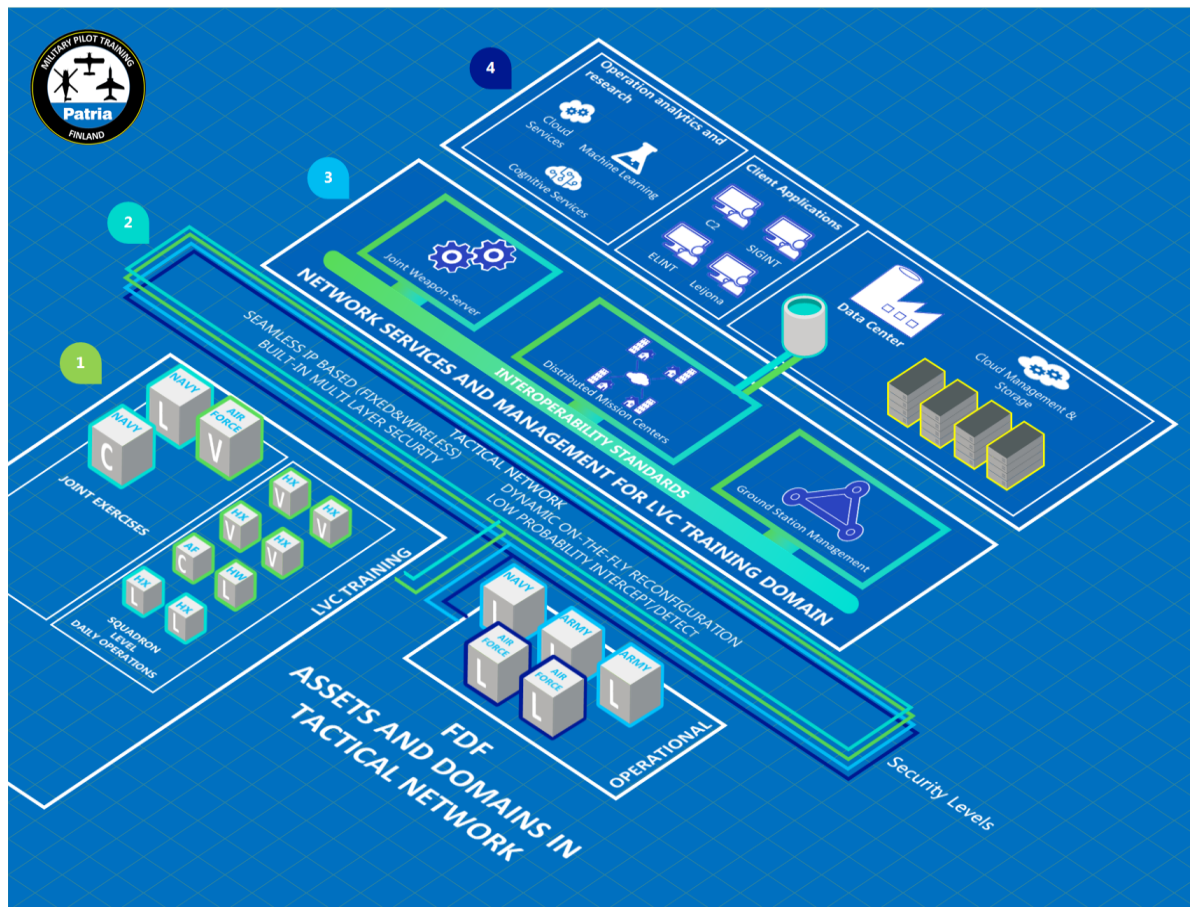
LVC-simulaatioiden haasteena on ollut käyttöjärjestelmien ja tietokonerakenteiden yhdistäminen saumattomasti ja kustannustehokkaasti [90], kuten luvussa 2 todettiin. Tästä syystä eri simulaatiota kehitetään asteittain kohti integroitua LVC:tä. Samalla kun haetaan teknisesti vaihtoehtoisia simulointiratkaisuja, pyritään hyödyntämään teknologian kehittymisen tuomat

edut, kuten kustannustehokkaiden laitteiden tuominen osaksi sekoitettua todellisuutta (ks. kuva 14). Esimerkkinä tällaisesta menetelmästä ovat VR (Virtual Reality) -lasit, joissa kustannustehokkaasti voidaan esittää virtuaalinen tietokoneen luoma todellisuus keinotekoisesti. Näin käyttäjä voi olla vuorovaikutuksessa simuloitun maailman kanssa. VR:ää voidaan käyttää esimerkiksi suunnitteluun, pelaamiseen ja koulutukseen. [101] Sotilaallisesta näkökulmasta tärkeintä on luoda mahdollisimman realistinen simuloitu toimintaympäristö, jossa sotilaat voivat harjoitella sekä testata ja kehittää TTP:itä kustannustehokkaasti realistista uhkaa vastaan. [102]

”Opetuksen sisällön ja tehokkuuden kehittämisessä katse kääntyy ennen kaikkea verkko-, virtuaali- ja simulointijärjestelmien täysimääräiseen hyödyntämiseen” totesi Puolustusvoiman komentaja, kenraali Lindberg vuonna 2017. [103] LVC-simulointi yhdistetäänkin yleensä koulutukseen. Tämä johtuu siitä, että LVC-simulaatioiden merkittävimmät kustannushyödyt saadaan koulutusta edistävästä toiminnasta. LVC:llä voidaan simuloida suuria kokonaisuuksia, kuten ilmaoperaatioita vaikka päivittäin. LVC:n hyödyntämisessä on kyse koulutuskyvyn ja resurssien optimoinnista [89]. LVC-simulaatioympäristö koostuu erilaisten tietoteknisten järjestelmien integroidusta verkostosta. Vaikka todellista taistelutilannetta ei voidakaan täydellisesti simuloida, on LVC:n avulla suhteellisen helppo mallintaa ja todentaa nykyaikaisen taistelun vaatimukset realistisesti [89]. LVC:n katsotaan olevan tulevaisuudessa dynaaminen ja verkottunut taistelutila [65] [81]. LVC-simulaatioiden merkityksen nähdään luvun 2.4 mukaisesti kasvavan tulevaisuudessa. Nykyisellään Ilmavoimien sotilaslentokoulutuksesta keskimäärin noin 40 % lennetään simulaattoreilla. [104] LVC vähentää erityisesti vastustajan simuloinnin määrää L-simulaatioissa, koska vastustajaa simuloivat lentokoneet voidaan korvata konstruktiivisilla simulaatiomaaleilla. Tämä tuo merkittäviä kustannussäästöjä lentokoulutukseen. Lisäksi hyödytään yhdistelmistä, joissa esimerkiksi toinen parvi voi lentää samaa operaatiota todellisen parven kanssa, mutta toteuttaa sen virtuaalisimulaattoreilla maasta käsin. [105]

LVC-konsepti on tunnistettu tärkeäksi kehittämisen kohteeksi käytännössä kaikissa operoivissa sotavoimissa. Tarkoituksena on pyrkimys kehittää kokonaisjärjestelmä vaativien taktisten operaatioiden harjoittelua tukevaksi toimintaympäristöksi. LVC-konseptissa useiden aselavettien ja sensorien tilannekuva sekä operaattorin tekemät ratkaisut ovat vuorovaikutuksessa keskenään, jolloin hyötyinä ovat yleensä kalliiden asejärjestelmien käyttökustannusten minimointi ja monimutkaisten operaatioiden syvällisempi ja moniulotteisempi harjoittelu. Tämä vähentää vihollista simuloivien todellisten lavettien määrää, jolloin toiminta on kustannustehokkaampaa. [102] LVC:llä toteutetun koulutuksen ja

harjoittelun tavoitteena on lisätä kykyä harjoitella mahdollisimman todenmukaisilla järjestelmillä. Samalla on mahdollista vähentää koneiden vikaantumisia ja kasvattaa saavutettavan koulutustuloksen onnistumisedellytyksiä. [22] [88] [102]



Kuva 44. Patrian näkemys LVC-simulaatioiden rakenteesta ja toteutuksesta tulevaisuudessa. Numerot kuvaavat rakenteen osa-alueita, joita selvennetään tekstissä. [105] Copyright Patria Oyj.

Kuvasta 44 nähdään, että LVC-simulaatioiden kokonaisuus on monimutkainen. LVC-arkkitehtuurin on oltava laaja-alaisesti yhteensopiva Puolustusvoimissa (1), jolloin sen avulla kyetään harjoittelemaan esimerkiksi kaikkia puolustushaaroja koskevia operaatioita vaikka päivittäin. LVC-arkkitehtuurin on mahdollistettava operointi suojatussa verkkoympäristössä saumattomasti eri menetelmiä hyödyntäen (2). LVC-toimintaympäristön verkko koostuu korkean teknologia verkostosta, joka ulottuu kaikille toiminnan tasoille System of Systems -periaatteen mukaisesti. Verkossa toimii erilaisia osajärjestelmiä, jotka muodostavat entistä suuremman simulaatioiden kokonaisuuden erilaisissa ulottuvuuksissa. LVC:n eri ulottuvuuksien on oltava joustavia ja helposti uudelleen määritettävissä (3). Lopulta kaiken datan on oltava yhteensopivaa ja mahdollistettava yhteensopivien parametrien syöttäminen järjestelmään. Erilaisia LVC-toimintaympäristössä toteutettavia operaatioita on kyettävä prosessoimaan ja säilömään turvallisesti sekä erityisesti analysoimaan

operaatiotutkimuksen keinovalikoimaa hyödyntäen (4). [105] Ilmataistelutaktiikan kehittäminen kuvan 44 toimintaympäristössä on tulevaisuudessakin tärkeä osa-alue. Tällöin on kyettävä huomioimaan teknologinen kehitys kuten koneoppiminen ja tekoäly osana ihmisen ja koneen välistä vuorovaikutusta. Vuorovaikutusta voidaan tehostaa simulaatiodataa keräämällä ja analysoimalla näin ihmisen käyttäytymistä esimerkiksi päätöksentekijänä ilmataistelun monimutkaisessa toimintaympäristössä.

LVC-simulaatioiden kehityssuuntaan HX-aikakaudella eniten vaikuttava tekijä on teknologinen kehittymisen suunta ja muutosnopeus. Koko ajan tehokkaammat sensorit, häiveteknologia ja uudet asejärjestelmät vaikuttavat yhdessä ja erikseen niin omaan ilmataistelutaktiikan kehittämiseen kuin samalla vastustajan toimintaan. Nämä ominaisuudet tekevät yksittäisestä lentokoneesta tehokkaamman. Ennen kaikkea uusi teknologia mahdollistaa verkottuneemmat toimintatavat, jolloin tiedon määrä kasvaa samalla, kun sen päivitysnopeus kiihtyy. Tekniikoiden ja teknologioiden muutokset tulevat arvioiden mukaan olemaan seuraavan 15 vuoden aikana vieläkin voimakkaampia kuin menneen 15 vuoden aikana. [22][39][65]

Inhimillisestä näkökulmasta tarkasteltuna tulevaisuudessa lentäjän tilannetietoisuus tulee teknisen kehittymisen kautta paranemaan. Hävittäjän sensorifuusion avulla ohjaajalle esitetään sensorien muodostama tilannekuva havainnollisemmin ja automaattisemmin kuin nyt käytössä olevilla hävittäjillä. Tulevaisuudessa sensorit tuottavat ohjaajalle merkittävästi enemmän dataa laajemmalla maantieteelliseltä alueelta ja entistä nopeammin. Tämä vaikuttaa kaikkiin kolmeen työssä esitettyyn tilannetietoisuuden tasoon. SA-taso 1 eli kyky havaita tapahtumia tai ilmiöitä toimintaympäristössä tulee sensorifuusion takia tulevaisuudessa paranemaan. SA-taso 2 eli kyky ymmärtää havaittujen elementtien ja ilmiöiden väliset merkitykset tulee todennäköisesti olemaan nykyistä haastavampi, koska käsiteltävää tietoa tulee niin paljon ja nopeasti. Sama koskee SA-tasoa 3 eli kykyä ennakoida toimintaympäristön lyhyen aikavälin muutoksia. SA-tasoa 3 parantava tekijä voi kuitenkin olla tilannetiedon nopea päivitystahti. [12] Mainitut tilannetietoisuuteen vaikuttavat tekijät muuttavat ilmataistelun kulkua oleellisesti, joten ilmataistelutaktiikat tulevat tämän myötä muuttumaan. [81] Tällöin ihmisen tekemästä päätöksenteosta tulee entistä tärkeämpää, koska koneelle ei vielä kyetä antamaan täyttä päätöksentekovapautta. Monimutkaiset ilmataistelutilanteet vaativat edelleen inhimillisen tarkastelun, ennen kuin ilmataisteluohjus voidaan ampua tai pommi tiputtaa automaattisesti lentokoneesta koneen päättämänä [106]. Teknologian kehitys olisikin hyödynnettävä siten, että ihminen osaisi tehdä parempia päätöksiä. Näin parannettaisiin taistelutehokkuutta ja samalla pystyttäisiin vastaamaan myös

uhkan kehittyneeseen suorituskyyyn. Tulevaisuuden taistelukentästä onkin kehittymässä entistä moniulotteisempi.

Tässä diplomityössä toteutetun L-V-C-simulaatiomallin perusteella on mahdollista tarkastella ihmisen ja koneen välistä vuorovaikutusta teknologian kehityksestä johtuvassa muuttuneessa toimintaympäristössä. Työn esimerkkitarkastelun L-V-C-simulaatiomallin tulokset osoittivat, että tilannetietoisuutta, kognitiivista kuormitusta ja normatiivista suorituskyyä mittaamalla myös muuttuneen toimintaympäristön vaikutuksia on mahdollista arvioida laadukkaasti, riippumatta käytössä olevasta teknologiasta.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän diplomityön päätarkoituksena oli vastata kysymykseen, miten L-, V- ja C-simulaatioita voidaan hyödyntää ilmataistelutaktiikoiden kehittämisessä. Pääkysymystä tuettiin kolmella alakysymyksellä:

1. Mitkä ovat L-, V-, C- ja LVC-simulaatioiden vahvuudet ja heikkoudet?
2. Millaisella L, V- ja C-simulaatioita yhdistävällä mallilla voidaan kehittää ja vertailla ilmataistelutaktiikoita tuhoamis- ja selviytymistodennäköisyyksien sekä ohjaajan tilannetietoisuuden, normatiivisen suorituskyvyn ja henkisen kuormituksen suhteen?
3. Millaisella L-V-C-simulaatiomallin esimerkkitarkastelulla kyetään osoittamaan sen toimivuus?

Tässä diplomityössä esiteltiin L-V-C-simulaatiomalli ja demonstroitiin sen käyttö TTP:n testaamisessa ja evaluoinnissa. L-, V-, C- ja LVC-simulaatioiden vahvuudet ja heikkoudet esiteltiin työn pääluvussa 2. Tarkastelu perustui pääosin julkisista lähteistä löydettyihin kutakin simulaatiotyyppiä koskeviin julkaisuihin. Tarkastelujen tuloksena esiteltiin koonnos kunkin simulaatiotyypin vahvuuksista ja heikkouksista (ks. taulukko 1). Simulaatiotyyppien vahvuuksia hyödynnettiin työn L-V-C-simulaatiomallissa. Samalla havaittiin, että ilmataistelutaktiikan kehittämisen kannalta paras tapa oli toteuttaa työn simulaatiot selvästi vaiheittain ja käyttää erityyppisiä simulaatioita pääosin toisistaan erillään. Työssä ei hyödynnetty LVC-simulaatioita, vaan tällä hetkellä Ilmavoimissa käytössä olevia C-, V- ja L-simulaattoreita.

L, V- ja C-simulaatiot yhdistävä malli (ks. kuva 7) esiteltiin työn pääluvussa 3. Tavoitteena oli rakentaa simulaatiomalli, jossa voidaan kehittää ja vertailla ilmataistelutaktiikoita tuhoamis- ja selviytymistodennäköisyyksien sekä ohjaajan tilannetietoisuuden, normatiivisen suorituskyvyn ja kognitiivisen kuormituksen suhteen. Ensin tarkasteltiin Ilmavoimissa käytössä olevien C-, V- ja L-simulaattoreiden käyttömahdollisuuksia ilmataistelun mallintamisen hyödyntämisessä. Tältä pohjalta muodostettiin alustava TTP ja määritettiin ilmataistelun skenaario. Behavioural Operational Research (BOR) -näkökulmasta määritettiin ne osa-alueet, joiden perusteella ihmisen ja koneen välistä vuorovaikutusta oli hyödyllistä arvioida. Ihmisen käyttäytymisen tutkiminen osana ilmataistelua oli oleellista siksi, että ihmisen tuottamat virheet ovat merkittävässä roolissa aina, kun tarkastellaan lentotoimintaa suhteessa tavoiteltuun tehokkuuteen ja lentoturvallisuuteen [21]. Määrittely toteutettiin laajan kirjallisuusselvityksen pohjalta. Selvityksen perusteella päädyttiin käyttämään useita erilaisia ja toisistaan riippumattomia menetelmiä koehenkilöiden arviointiin. PT-SAGAT- ja TR-menetelmillä arvioitiin

koehenkilöiden tilannetietoisuutta. Hyödyntämällä kahta erilaista tilannetietoisuuden mittaamismenetelmää, saatuja tuloksia kyettiin analysoimaan vertaamalla niitä keskenään ja samalla arvioimaan menetelmien luotettavuutta. Tämä osoittautui käyttökelpoiseksi tavaksi sekä arvioida menetelmiä että niiden soveltuvuutta mittaamiseen. Normatiivisen suorituskyvyn mittaamisella arvioitiin koehenkilöiden kykyä noudattaa käskettyä TTP:tä. Arvioinnin toteuttaminen onnistui luotettavasti, koska lentotehtävän läpikäyntiin tarkoitettut laitteet mahdollistivat tarkan arvioinnin tekemisen ja arvioitavaksi määrättyjen kvalitatiivisten ja kvantitatiivisten sääntöjen asettelu oli onnistunut. Tällä perusteella normatiivisen suorituskyvyn arviointi ja analyysi toteutettiin työssä laadukkaasti. Kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen käytettiin NASA-TLX-menetelmää, jolla arvioitiin TTP:n kuormittavuutta. Kognitiivisen kuormituksen mittaamisessa käytettyjen kuuden eri dimension keskiarvojen loogiset muutokset osoittivat sen, että tulokset olivat johdonmukaisia ja vastasivat odotuksia, mutta tulokset olivat myös tulkinnanvaraisia. L-V-C-simulaatiomallin käyttö perustui L-, V- ja C-simulaatioiden vaiheittaiseen ja iteratiiviseen käyttöön. Simulaatiomallin avulla pyrittiin kehittämään sellainen operatiivinen TTP, jossa parven siipimiesten: 1) TTP:n kvalitatiiviset ja kvantitatiiviset säännöt ovat HMP-optimaalisia annettujen optimointikriteerien suhteen, 2) valitut rajoitteet toteutuvat, 3) ohjaajien normatiivinen suorituskyky, tilannetietoisuus ja kognitiivinen kuormitus ovat hyväksyttäviä ja tasapainossa HMP-tuotteen suhteen. Tämän jälkeen L-V-C-simulaatiomalli demonstroitiin esimerkkikäyttötapausten avulla.

L-V-C-simulaatiomallin demonstraatio toteutettiin työn pääluvun 4 mukaisesti vaiheittain ja iteratiivisesti (ks. kuva 8). Demonstraation tulokset esitellään työn pääluvussa 5. ja saatuja tuloksia sekä tutkimuksessa käytettyjen menetelmien soveltuvuutta pohditaan pääluvussa 6. L-V-C-simulaatiomallin esimerkkitarkastelu aloitettiin määrittelemällä TTP-luonnos ja ilmaisteluskenaario, joissa kuvattiin mallinnettavat lentokoneet, TTP:n toimintaympäristö sekä se mitä TTP:llä tavoitellaan. TTP:n avulla määritettiin, miten omat hävittäjät saavuttavat parhaiten ensisijaisen tavoitteensa annetussa skenaariossa. C-vaiheessa TTP, skenaario ja järjestelmien parametrit syötettiin C-simulaattoriin, jolla tunnistettiin TTP:n kvantitatiivisten sääntöjen optimiarvot ilmataistelussa. Näitä olivat muun muassa lentoarvot sekä päätöksenteko- ja ammuntaetäisyydet. C-vaiheessa tarkasteltiin ainoastaan kvantitatiivisia TTP-sääntöjä, joten ihmisen ja koneen välistä vuorovaikutusta ei huomioitu. C- ja V-vaiheet toteutettiin kumminkin kaksi kertaa.

Demonstraation ensimmäisessä C-vaiheessa (C1) TTP-luonnoksen MP-optimaaliset TTP-säännöt määritettiin C-simulaattorissa. Maksimoitavana optimointikriteerinä käytettiin

tuhoamistodennäköisyyttä (Pk) ja rajoituksena selviytymistodennäköisyyttä $Ps=1$ (ks. alaluku 5.1). Tuhoamis- ja selviytymistodennäköisyyksien keskiarvoja käytettiin MP-tuotteen arvona.

Demonstraation ensimmäisessä V-vaiheessa (V1) käytettiin C1-vaiheessa määritettyjä MP-optimaalisia TTP-sääntöjä ja TTP-luonnoksen kvalitatiivisia TTP-sääntöjä, sekä C1-vaiheessa käytettyjä optimointikriteereitä ja rajoituksia. Näiden lisäksi V-simulaattoriin vietiin skenaario, uhka ja järjestelmien parametrit. V1-vaihetta testattiin ja valmisteltiin useilla koesimulaatioilla. V1-vaiheesta saatujen tulosten perusteella HMP-tuote oli hyväksyttävä eli parvi menestyi ilmataistelussa riittävän hyvin ja saavutti ensisijaisen tavoitteensa hyväksyttävällä tasolla (ks. alaluku 5.3.5). Tulosten perusteella TTP:stä kuitenkin tunnistettiin potentiaalisia kvalitatiivisia ja kvantitatiivisia sääntöjä, joita muuttamalla oletettiin voitavan parantaa kognitiivista kuormitusta, tilannetietoisuutta ja normatiivista suorituskyykyä siten, että tuhoamistodennäköisyys säilyy edelleen hyväksyttävänä ja selviytymistodennäköisyys $Ps=1$ täyttyy. Uusien kvantitatiivisten TTP-sääntöjen MP-optimaalisten arvojen määrittämiseksi TTP palautettiin C2-vaiheeseen, jossa rajoite säilytettiin ennallaan ja optimointikriteeriä mädallettiin (ks. kuva 8). V1-vaiheessa muutettavaksi valittuja kvalitatiivisia sääntöjä tarkennettiin ja korjattiin. V2-vaihe uusittiin muutetuilla MP-optimaalisilla kvantitatiivisilla ja kvalitatiivisilla säännöillä. V2- ja V1-vaiheiden tuloksia vertaamalla todettiin, että muutokset paransivat tilannetietoisuutta (ks. taulukot 7 ja 8 sekä kuvat 30 ja 42), normatiivista suorituskyykyä (ks. taulukko 6 ja kuvat 22 - 24) ja kognitiivista kuormitusta (ks. taulukko 9 ja kuva 33). Muutetuilla säännöillä toteutetussa V2-vaiheessa saavutettiin edelleen hyväksyttävä HMP-tuote. V2-vaiheen lopputuloksena todettiin, että TTP:lle oli määritetty HMP-optimaaliset kvalitatiiviset ja kvantitatiiviset TTP säännöt V-ympäristöön ja oli perusteltua aloittaa TTP:n evaluointi L-vaiheessa todellisessa toimintaympäristössä (ks. alaluku 5.5.5).

Viimein L-vaiheessa (L1) evaluoitiin aiemmissa vaiheissa määritetyt TTP-säännöt todellisessa toimintaympäristössä. L1-vaiheessa arvioitiin säilyykö HMP-tuote sekä normatiivinen suorituskyyky, tilannetietoisuus ja kognitiivinen kuormitus hyväksyttävänä myös todellisessa lentoympäristössä. Vaikka L1-vaiheen tuloksista ei ollut mahdollista tehdä luotettavaa tilastollista analyysiä pienen otannan takia, voitiin L1- ja V2-vaiheiden tuloksien laadullisen arvioinnin perusteella todeta, että HMP-tuote pysyi tyydyttävänä myös todellisessa lentoympäristössä ja normatiivisen suorituskyyvyn, tilannetietoisuuden ja kognitiivisen kuormituksen tulokset olivat samansuuntaisia kuin V2-vaiheessa (ks. kuvat 34 - 43 ja taulukko 10). Vaikka TTP-sääntöjen kehittämistä olisi ollut mahdollista jatkaa uusilla C- ja V-simulaatioilla (ks. kuva 8), katsottiin L1-vaiheessa saavutetun HMP-tuotteen sekä normatiivisen suorituskyyvyn, tilannetietoisuuden ja kognitiivisen kuormituksen olevan riittäviä L-V-C simulaatiomallin demonstroimiseksi.

L1-vaiheen tuloksena todettiin, että TTP:lle oli määritetty operatiivisesti HMP-optimaaliset kvalitatiiviset ja kvantitatiiviset TTP säännöt (ks. kuva 8), joten TTP:n testaaminen ja evaluointi voitiin päättää (ks. alaluku 5.6.5).

L-V-C-simulaatiomalli esitteli monitahoisen lähestymistavan ilmataistelutaktiikan kehittämiseen. Tutkimuksessa hyödynnettiin operaatioanalyysin menetelmistä erityisesti simulaatiota. Työn V-simulaatioissa painopiste oli ihmisen ja teknologian välisen vuorovaikutuksen tutkimisessa. Tämä tarkoitti ongelmanratkaisua BOR:n näkökulmasta. Koska BOR-tarkastelussa korostetaan inhimillisen toiminnan ja inhimillisten tekijöiden huomioon ottamisen tarvetta osana operaatioanalyysiä, soveltui se erinomaisesti työn tutkimusmenetelmäksi. Työssä hyödynnettiin useita eri simulaatiomenetelmiä sekä ihmisen ja teknologian välisen vuorovaikutuksen arviointiin käytettyjä mittareita, joten demonstraatiosta saadut tulokset ovat läpinäkyviä ja luotettavia. Samalla kyettiin rajaamaan pois tarkastelusta yksittäisen mallin tai tuloksen virheellisyys, joka osaltaan paransi saatujen tulosten reliabiliteettia. Lentäjän päätöksentekoa ilmataistelun skenaariossa arvioitiin usealla eri menetelmällä, jolloin on epätodennäköistä, että yksittäiset väärät johtopäätökset olisivat vaikuttaneet TTP:n operatiiviseen soveltuvuuteen. Menetelmien tavoitteena oli mitata ohjaajan tilannetietoisuutta, normatiivista suorituskykyä ja henkistä kuormitusta laadukkaasti ja luotettavasti. Simulaatiomenetelmien ja inhimillisen arvioinnin mittarien moninaisuus mahdollisti myös sen, että voitiin käyttää laadullista arviota tilastollisen analyysin lisäksi. Tilannetietoisuuden, normatiivisen suorituskyvyn ja kognitiivisen kuormituksen arviointiin käytetyt menetelmät osoittivat, että tutkimustulokset olivat selvästi yhteydessä toisiinsa samalla, kun HMP-tuote säilyi hyväksyttävällä tasolla.

Tässä työssä tilannetietoisuuden arviointiin käytetty PT-SAGAT-menetelmä soveltui koehenkilöiden arviointiin hyvin, koska menettely muistutti ohjaajien normaalia lentotehtävän läpikäyntiä. PT-SAGAT-menetelmän soveltuvuus tilannetietoisuuden mittaamisen voidaan kuitenkin kyseenalaistaa, jos koehenkilöt eivät ole tottuneet vastaavaan tapaan arvioida tilannetietoisuutta suorituksen jälkeen. Kognitiivisen kuormituksen mittaamiseen käytetyn NASA-TLX-menetelmän arviointi perustui koehenkilön omaan tulkintaan simulaation kuormitavuudesta. Arvio toteutettiin välittömästi simulaation jälkeen. Menetelmä jättää tuloksiin kuitenkin tulkinnanvaraa. NASA-TLX-menetelmän rinnalla olisi suositeltavaa käyttää esimerkiksi sykevälivaihtelun mittaamista, jotta tulosten tulkinta olisi yksiselitteisempää ja niiden keskinäinen vertailu parantaisi tulosten reliabiliteettia. L-simulaatioiden otanta oli ainoastaan kaksi koehenkilöä. Tästä syystä tulosten vertailu V-vaiheen tuloksiin oli toteutettava ilmataistelun ammattilaisten toimesta laadullisesti, eikä tilastoanalyysin menetelmiä voitu hyödyntää. Jatkotutkimuksissa olisi kyettävä saamaan isompi L-vaiheen otanta, jotta vertailu

V-simulaatioihin voitaisiin toteuttaa myös tilastoanalyysin menetelmiin perustuen. Toisaalta tulevaisuudessa on mahdollista hyödyntää integroidun LVC-simulaation menetelmiä, jolloin otannan kokoa olisi mahdollista kasvattaa kustannustehokkaasti. Yleensä ilmataistelutaktiikoita kehitetään parvikokonaisuuksille. Tässä työssä arvioitiin kuitenkin vain parven siipikoneiden toimintaa osana parven ilmataistelua. Tällä menettelyllä mahdollistettiin identtinen johtokoneiden toiminta kaikissa toistettavissa simulaatioissa. Jatkotutkimuksissa on syytä arvioida koko parven toimintaa ilmataistelussa. Samalla tulee mahdolliseksi kyseenalaistaa neljän hävittäjän parven käyttö ilmataisteluissa, vertailemalla saatuja tuloksia esimerkiksi kahden parin toimintaan.

Ennen tätä diplomityötä ilmataistelutaktiikan kehittäminen on perustunut C-simulaatioilla tuotettuihin tuloksiin, jolloin ei ole huomioitu kognitiivisen kuormituksen, normatiivisen suorituskyvyn, tilannetietoisuuden tai HMP-tuotteen vaikutuksia TTP:hen. Näin ei ole ollut mahdollista myöskään muuttaa kvalitatiivisia TTP-sääntöjä. Väärillä perusteilla hyväksytyt TTP voi johtaa vääränlaisten operatiivisten TTP:iden hyväksymiseen. [4] Työn L-V-C-simulaatiomalli osoitti systemaattisen tavan kehittää TTP:tä ja huomioida kehitystyössä teknologian, ihmisen, sekä ihmisen ja teknologian välisen rajapinnan rajoitteet ja mahdollisuudet. L-V-C-simulaatiomallin käyttö edellyttää aina asiantuntijoiden tekemiä tulkintoja ja valintoja koskien TTP:tä, simulaatioiden tuloksia, optimointikriteereitä ja rajoitteita. Simulaatiomallin avulla tuotetut tulokset ovat kuitenkin helposti tulkittavissa ja mallin toimintaperiaate edesauttoi tulkintojen ja valintojen tekemistä johdonmukaisesti ja läpinäkyvästi.

Tässä diplomityössä osoitettiin, että taktiikan kehittämisen näkökulmasta ihmisen ja teknologian välinen vuorovaikutus on oleellinen tekijä TTP:n testaamisen ja evaluoinnin kannalta. Työn perusteella C-, V- ja L-simulaatioita oli tehokkaampaa soveltaa erikseen niiden vahvuuksia hyödyntäen. LVC-simulaatioiden hyödyntäminen tulevaisuudessa kuitenkin tehostaa TTP:n testaamista ja evaluointia, koska eri simulaatiomenetelmiä on tällöin joustavampaa hyödyntää kuin nykyään. Suurin hyöty HX-aikakaudella tullaan saamaan niin testaamisen kuin kouluttamisenkin näkökulmasta kehittyvästä korkean teknologia simulaatioverkostosta, joka ulottuu kaikille toiminnan tasoille System of Systems -periaatteen mukaisesti. LVC:n eri osa-alueet ovat siten joustavasti muokattavissa, kun kaikki tarvittava data vain on yhteensopivaa. Tämä asettaa vaatimuksia myös HX-hankkeen LVC-ratkaisujen valinnalle. HX-aikakauden LVC-simulaattoreita on kyettävä joustavasti muokkaamaan ja kehittämään. Toimintaympäristö on oltava mahdollisimman realistinen, mutta samalla ihmisen ja teknologian välistä vuorovaikutusta on kyettävä arvioimaan laadukkaasti. Uusien teknologisten ratkaisujen hyödyntäminen on tulevaisuudessa oleellista ihmisen ja koneen

välisen vuorovaikutuksen arvioinnissa. Koneoppimisen menetelmien hyödyntäminen konstruktiivisten ja virtuaalisen simulaatioiden avulla toteutettavan taktiikan kehittämisen tukena, toisi tämän työn näkökulmasta lisäarvoa. Hyödyllistä olisi tutkia myös ihmisen roolia päätöksentekijänä silloin, kun uuden sukupolven hävittäjät tuottavat nykyistä enemmän valmiiksi prosessoitua sensoridataa lentäjälle. Tällöin olisi arvioitava ihmisen kognitiivista kuormitusta tilanteissa, joissa lentokoneen lentäminen ja siihen liittyvien sensorien käyttö on nykyistä helpompaa, mutta lentäjä kuormittuu nykyistä enemmän kasvaneesta tiedon määrästä. Tilannetietoisuuden muutos tulee vaikuttamaan ilmataistelutaktiikoihin sekä niiden testaamiseen ja evaluointiin merkittävästi. Tässä työssä osoitetut TTP:n testaamisen ja evaluoinnin peruseriaatteen tulevat todennäköisesti säilymään ennallaan. Ihminen on tulevaisuudessa yhä enemmän vuorovaikutuksessa teknologian kanssa, joten jatkokutkimusten tekeminen aihealueesta on suositeltavaa. Tutkimuksessa demonstroidun L-V-C-simulaatiomallin peruseriaatetta noudattaen, voidaan jatkokehittää ilmataistelutaktiikoiden testaamista ja evaluointia myös tulevaisuudessa. Tutkimuksen L-V-C-simulaatiomalli mahdollistaa HX-kandidaattien TTP:iden testaamisen ja evaluoinnin jo nyky menetelmillä ja samalla tukee poistuvan Hornet-kaluston taktiikan kehittämistä sen elinkaaren loppuun saakka.

L-V-C-simulaatiomalli osoitti, miten L-, V- ja C-simulaatioita voitiin hyödyntää ilmataistelutaktiikoiden kehittämisessä menestyksekkäästi. Tämä toteutettiin etsimällä kunkin simulaatiotyypin vahvuudet ja hyödyntämällä niitä simulaatiomallin rakentamisessa. Samalla osoitettiin se, millaisella mallilla voitiin kehittää ja vertailla ilmataistelutaktiikoita tuhoamis- ja selviytymistodennäköisyyksien sekä ohjaajan tilannetietoisuuden, normatiivisen suorituskyvyn ja henkisen kuormituksen suhteen onnistuneesti. Mallin soveltuvuus todennettiin menestyksekkäästi esimerkkitarastelun avulla. Työssä esiteltyä L-V-C-simulaatiomallin yhteiskäyttöä ei ole aiemmin toteutettu olemassa olevan julkisen tieteellisen kirjallisuuden mukaan. Vaikka L-V-C-simulaatiomalli esiteltiin ja demonstroitiin ilmataistelu-ympäristössä, sen käyttöperiaatteet eivät ole rajoitettuja tiettyyn toimintaympäristöön tai teknologiaan. Mikäli käytettävissä on simulaatiomallin edellyttämät L-, V- ja C-simulaattorit, voidaan mallia hyödyntää kaikkien puolustushaarojen ja aselajien TTP:iden testaamisessa ja evaluoinnissa. Ihmisen ja teknologian välinen vuorovaikutus on nyt ja tulevaisuudessa huomioitava niin lentokoulutuksessa kuin ilmataistelutaktiikan kehittämisessä. Tutkimuksen läpivienti sekä saadut tulokset ovat ainutlaatuisia ja urauurtavia. Diplomityössä esitelty L-V-C-simulaatiomalli muuttaa ilmataistelutaktiikoiden kehittämisen rakennetta pysyvästi.

LÄHTEET

- [1] Lorentz, R. *Iskuja ilmaan*, osa I, 1953, s. 167–179. Maanpuolustuskorkeakoulu, 978-951-25-2507-2, 2014.
- [2] Lindberg, J., *Richard Lorentz, Suomen ilmasodankäynnin ykkösmies*, osa 2. Kylkirauta 3/2005.
- [3] Air University, Yhdysvallat, Curtis E. Lemay Center. [Viitattu 4.7.2019] Saatavilla: https://www.doctrine.af.mil/Portals/61/documents/Volume_1/V1-D06-Levels-of-Doctrine.pdf. TTP määritellään Taktisen tasan doktriiniksi, joka sisältää usein salaiseksi luokiteltuja menetelmiä.
- [4] Ilmavoimien taktinen ohjekirjallisuus, 1.1.2019. Lähdeviitettä ei nimetä erikseen johduen ohjekirjallisuuden turvaluokituksesta. Kaikki Ilmavoimien taktinen ohjekirjallisuus on ollut tutkijan käytössä.
- [5] Schreiber, B., & Bennett Jr, W. *Distributed Mission Operations within-simulator training effectiveness baseline study: Summary report*. United States Air Force Research Laboratory report AFRL-HE-AZ-TR-2006-0015-Vol II. 2006.
- [6] Mansikka, H., Virtanen, K., Harris, D., & Salomäki, J. *Live-virtual-constructive simulation framework for testing and evaluation of air combat tactics, techniques and procedures*. Journal of Defense Modeling and Simulation, M-JDMS-2019-07-0044. 2019.
- [7] Bolstad, C. A., & Cuevas, H. M. *Integrating situation awareness assessment into test and evaluation*. ITEA Journal 31, sivut 240-246. 2010.
- [8] Mansikka, H., Virtanen, K., & Harris, D. *Comparison of NASA-TLX scale, Modified Cooper-Harper scale and mean inter-beat interval as measures of pilot mental workload during simulated flight tasks*. Ergonomics, 1-22. 2018.
- [9] Salmon, P., Stanton, N., Walker, G., & Green, D. *Situation awareness measurement: A review of applicability for C4i environments*. Applied Ergonomics, 37(2), s. 225-238. 2006.
- [10] Wickens, C.D. *Processing resources and attention*. Multiple-task performance, 3-34. 1991. [Viitattu 3.1.2019] Saatavilla: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a102719.pdf>
- [11] Wickens, C.D. *Multiple resources and performance prediction*. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 3(2), s. 159-177. 2002. ISSN 1463-922X

- [12] Endsley, M.R., *Toward a theory of situation awareness in dynamic systems*. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society. 1995. 37(1) 32-64.
- [13] Mansikka, H., Virtanen, K., & Harris, D. *Dissociation Between Mental Workload, Performance, and Task Awareness in Pilots of High Performance Aircraft*. IEEE Transactions on Human-Machine Systems. 2019.
- [14] Hodson D., Hill R. *The art and science of live, virtual, and constructive simulation for test and analysis*. Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Method-ology, Technology 2014, Vol. 11(2) 77–89. 2014.
- [15] Keuning, M. F. R. *Embedded Training and LVC*, National Aerospace Laboratory, Alankomaat. [Viitattu 4.7.2019] Saatavilla: <https://reports.nlr.nl/xmlui/bitstream/handle/10921/185/TP-2010-469.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [16] The Office of Naval Research (ONR), *Live, Virtual and Constructive (LVC) Training Fidelity*, ONR BAA Number 11-005. 2011. 23s.
- [17] Law M. A: *Simulation Modeling and Analysis*, Mcgraw-hill Series in Industrial Engineering and Management, 5th Edition. [Viitattu 1.4.2019] Saatavilla: <https://www.amazon.com/Simulation-Mcgraw-hill-Industrial-Engineering-Management/dp/0073401323>
- [18] Tolk A. *Engineering Principles of Combat Modeling and Distributed Simulation*, 1st Edition [Viitattu 1.4.2019] Saatavissa: <https://www.amazon.com/Engineering-Principles-Modeling-Distributed-Simulation/dp/0470874295>
- [19] Lehtinen, M., *Operaatioanalyysia sotilaille*. Helsinki, Maanpuolustuskorkeakoulu, 2003, s.69. ISBN 951-25-1461-3.
- [20] Hämäläinen Raimo. P., Luoma, J., Saarinen, E.: *On the importance of behavioral operational research: The case of understanding and communicating about dynamic systems*. European Journal of Operational Research, 228(3), 2013, s. 623-634.
- [21] Aviation Week & Space Technology, *Fighting Human Error*, 165(22), s. 8-9. 2006 [Viitattu 3.1.2019] Saatavissa: <http://www2.anac.gov.br/arquivos/pdf/fightingHumanError.PDF>.
- [22] HX RFI -materiaali. Materiaali on Ilmavoimien esikunnan ja Logistiikkalaitoksen HX-hankehenkilöstön hallussa.

- [23] Puolustusministeriön internetsivusto. [Viitattu 3.1.2019]. Saatavissa: https://www.defmin.fi/puolustushallinto/strategiset_suorituskykyhankkeet/havittajahanke_hx/hx-hanke
- [24] Raytheon Missile Systems, Operations Research Department, ACEM Operator's Guide, Version 4.5F. 2003. 242s.
- [25] Johanssen, G., Moray, N., Pew, R., Rasmussen, J., Sanders, A., & Wickens, C. *Final report of experimental psychology group Mental Workload*. 1979. Sivut:101-114
- [26] Hart, S., G. & Staveland, L., E. *Development of NASA-TLX (Task Load Index): results of empirical and theoretical research*. Teoksessa Hancock, P., A. & Meshkati, N., Human Mental Workload. Amsterdam: North Holland Press. 1988.
- [27] Battlespace Simulations, Inc. Modern Air Combat Environment (MACE) User's Manual, version R1 - 2017.
- [28] [Viitattu 15.3.2019] Saatavilla: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/normative>
- [29] Sotilasilmalukäsikirja (SIK), HO075 PVHSMK-ILMAVE, Ilmavoimien esikunta, 24.6.2018
- [30] The Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS). *What is Operations Research*. [Viitattu 4.10.2017]. Saatavilla: <https://www.informs.org/about-informs/what-is-operations-research>.
- [31] Endsley Mica. R. *Situational awareness global assessment technique (SAGAT)*. Proceedings of the National Aerospace and Electronics Conference, NAECON, Ohio, USA, 1988.
- [32] Jones, D., & Kaber, D. *Situation awareness measurement and the situation awareness global assessment technique*. Handbook of human factors and ergonomics methods, s.42-41, 2004. [Viitattu 3.1.2019] Saatavilla: <https://www.taylorfrancis.com/books/e/9780429205712/chapters/10.1201/9780203489925-53>
- [33] Military Handbook: Aircraft Survivability MIL-HDBK-2069, 10.4.1997. [Viitattu 22.2.2019.] Saatavuus: http://everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-2000-2999/MIL-HDBK-2069_21052/
- [34] DoD Modeling and Simulation (M&S) Glossary, DOD 5000.59-M. 1998. 176 s. [Viitattu 5.1.2019] Saatavilla: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a349800.pdf>

- [35] Chung, C.A. *Simulation Modelling Handbook: A Practical Approach*. Danvers: CRC Press, 2003. 608 p. ISBN 978-0849312410.
- [36] Endsley M., R., Garland D., J., *Situation Awareness Analysis and Measurement, SA Technologies Inc*, Lontoo 2000. [Viitattu 1.1.2019] Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/292771806_Situation_awareness_analysis_and_measurement_chapter_theoretical_underpinnings_of_situation_awareness
- [37] Salomäki, J. *Validin ohjautumisen kriteerit Suomessa käytettävillä AIM-120-ohjuksilla*. Esiupseerikurssin tutkielma. Maanpuolustuskorkeakoulu 2013. 44 s.
- [38] Mansikka, Heikki, Väitöskirja: *Fighter Pilot's Performance and Mental Workload*, Coventry institute. 2016. 133s. Aineisto on tutkijan hallussa.
- [39] Air Power -seminaarit: Lontoo 5-6.7.2016 ja Helsinki 1-2.12.2016. Muistiinpanot ovat tutkijan hallussa.
- [40] Aero Society: The RNLAf and simulation, Tim Robinson, 2017. [Viitattu 7.1.2019] Saatavissa: <https://www.aerosociety.com/news/going-dutch-with-cae/>
- [41] Hart, S., G. *NASA-Task Load Index (NASA-TLX). 20 Years Later*. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 50, s. 904-908, 2006. [Viitattu 19.12.2017] Saatavissa: <https://doi.org/10.1177/154193120605000909>
- [42] Beringer, D., & Hancock, P. *Exploring situational awareness- A review and the effects of stress on rectilinear normalization (aircraft pilot performance)*. Paper presented at the International Symposium on Aviation Psychology, 5 th, Columbus, OH, 1989.
- [43] Lappalainen, E. Jormakka, J. Tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoulussa. Julkaisusarja 5 No 1. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu Tekniikan laitos, 2004. 203 s. ISBN 951-25-1540-7.
- [44] Sargent, R., G. *Verification and Validation of Simulation Models*. Department of Electrical Engineering and Computer Science. 2010. [Viitattu 13.10.2018]. Saatavissa: <https://www.informs-sim.org/wsc10papers/016.pdf>
- [45] Kuusisto, R. & Kuusisto, T. *Yhteinen tilanneymmärrys - Strategis-operatiivisten päätösten tukipalvelujen perusteet*. Helsinki: Edita Prima Oy, 2005. s. 13.
- [46] Sadeniemi, M. *Nykysuomen Sanakirja*, osat 1-6. Juva: Suomalaisen kirjallisuuden seura, WSOY. 2002

- [47] Flach, J., M. Situation awareness: Proceed with caution. *Human factors*, 37(1), 1995, s.149-157. [Viitattu 2.1.2019] Saatavilla: <https://pdfs.semanticscholar.org/1ae1/6f17147c86395a09aab4d9af4477415a56c7.pdf>
- [48] Harwood, K., Barnett, B., & Wickens, C. *Situational awareness: A conceptual and methodological framework*. Paper presented at the Proceedings of the 11th Biennial Psychology in the Department of Defense Symposium, 1988. [Viitattu 2.1.2019] Saatavilla: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/154193128803200222>
- [49] Sarter, N. B., & Woods, D. D. *Situation awareness: A critical but ill-defined phenomenon*. *The International Journal of Aviation Psychology*, 1(1), 1991 s. 45-57. [Viitattu 2.1.2019] Saatavilla: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/s15327108ijap0101_4
- [50] Smith, K., & Hancock, P. *The risk space representation of commercial space (air traffic controller situational awareness viewpoint)*. Paper presented at the International Symposium on Aviation Psychology, 8 th, Columbus, OH, 1995. Aineisto on tutkijan hallussa.
- [51] Bell, H. H., Lyon, D. R., & DIVISION., A. F. R. L. M. A. W. R. R. (2000). *Using Observer Ratings to Assess Situation Awareness*, Defense Technical Information Center. [Viitattu 1.1.2019] Saatavilla: <https://apps.dtic.mil/docs/citations/ADA489528>
- [52] Gaba, D. M., Howard, S. K., & Small, S. D. *Situation awareness in anesthesiology*. *Human factors*, 37(1), 1995. s.20-31. [Viitattu 30.12.2018] Saatavilla: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1518/001872095779049435>
- [53] Endsley, M., R. *Situation awareness in aviation systems*. In a. H. Garland D. J., V. D. (Ed.), *Handbook of aviation human factors* Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1999. [Viitattu 30.12.2018] Saatavilla: <https://www.pacdeff.com/pdfs/Situation%20Awareness%20in%20Aviation%20Endsley%201999.pdf>
- [54] Tenney, Y. J., Adams, M. J., Pew, R. W., Huggins, A., & Rogers, W. H. *A principled approach to the measurement of situation awareness in commercial aviation*, 1992. [Viitattu 30.12.2018] Saatavilla: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19920021063>
- [55] Endsley, M, .R. *Predictive utility of an objective measure of situation awareness*. Paper presented at the Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. 1990. [Viitattu 22.12.2018] Saatavilla:

https://www.researchgate.net/publication/243765514_Predictive_Utility_of_an_Objective_Measure_of_Situation_Awareness

- [56] Bolstad, C. A., Riley, J. M., Jones, D. G., & Endsley, M. R. *Using goal directed task analysis with Army brigade officer teams*. Raportti esitelty Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting -tapahtumassa, 2002. [Viitattu 22.12.2018] Saatavilla: https://www.academia.edu/5550496/USING_GOAL_DIRECTED_TASK_ANALYSIS_WITH_ARMY_BRIGADE_OFFICER_TEAMS
- [57] Endsley, M. R. *A survey of situation awareness requirements in air-to-air combat fighters*. The International Journal of Aviation Psychology, 3(2), 1993. s.157-168. . [Viitattu 22.12.2018] Saatavilla: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/s15327108ijap0302_5
- [58] Matthews, M. D., Strater, L. D., & Endsley, M. R. *Situation Awareness Requirements for Infantry Platoon Leaders*. Military Psychology, 16(3), 2004, s.149. [Viitattu 22.7.2019] Saatavilla: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/s15327876mp1603_1
- [59] Clark, R. E., Feldon D. F., Van Merriënboer J. J. G., Yates K., *Cognitive Task Analysis*, Chapter 43, 2008. [Viitattu 26.12.2018] Saatavissa: <https://www.researchgate.net/publication/294699964>
- [60] Feldon, D., & Clark, R. *Instructional implications of cognitive task analysis as a method for improving the accuracy of experts' self-report*. In G. Clarebout & J. Elen (Eds.), *Avoiding*. Rotterdam: Sense Publishers. 2006. [Viitattu 22.12.2018] Saatavilla: https://digitalcommons.usu.edu/itls_facpub/368/
- [61] Annett, J., & Stanton, N. A. *Hierarchical task analysis (HTA)*, Published on HP repository, 2000. [Viitattu 26.12.2018] Saatavissa: <http://webprisme.cfm.eurocontrol.int/ehp>
- [62] Shanmugaratnam, S., & Parush, A. *Situation awareness: a review of definitions, measurements and predictors, and implications for creating a task-based selection battery*. Technical Report DGMPRA CR 2009-005, Defence R&D, Canada, 2009.
- [63] Miller S., University of Iowa, Literature review: *Workload Measures*, ID: N01-006. 2001. s. 17. [Viitattu 5.1.2019] Saatavilla: <http://www.nads-sc.uiowa.edu/publicationStorage/200501251347060.N01-006.pdf>

- [64] Breton, R., & Rousseau, R. *Situation awareness: a review of the concepts and its measurement*. Technical Report, TR-2001-220, DRDC Valcatier, 2003. [Viitattu 5.1.2019] Saatavilla: <http://cradpdf.drdc-rddc.gc.ca/PDFS/unc13/p518754.pdf>
- [65] Ilmاتاistelukeskus, Satakunnan Lennosto: C- ja V-simulaatioiden testaamiseen ja iterointiin liittyvät ilmاتاisteluopettajien haastattelut ja testilennot. Ajankohdat: 20 - 21.12.2017, 2 - 3.5.2018, 27 -28.6.2018 ja 22.10.2018. Tapaamisiin liittyvä suojaustason 2 aineisto on tutkijan hallussa.
- [66] Vicente, T & M: *Spectral analysis of sinus arrhythmia: a measure of mental effort*. Human Factors, Apr: 29(2):171 - 182, 1987. [Viitattu 5.1.2019] Saatavilla: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/001872088702900205>
- [67] Wickens C., D. *Multiple resources and mental workload*. Human Factors 50(3): 449-455. 2008. [Viitattu 5.1.2019] Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/23157812_Multiple_Resources_and_Mental_Workload
- [68] O'Donnell, R. D., Eggemeier, F. T., & Thomas, F. *Workload assessment methodology*. In L. K. K.R. Boff & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of Perception and Human Performance*, Vol. 2, pp. 41-49, John Wiley and Sons, Inc. 1986. [Viitattu 2.1.2019] Saatavilla: <http://apps.usd.edu/coglab/schieber/psyc792/workload/odonnell.pdf>
- [69] Mansikka, H., Simola, P., Virtanen, K., Harris, D., & Oksama, L. *Fighter pilots' heart rate, heart rate variation and performance during instrument approaches*. Ergonomics, vol 56, pp. 213-219. 2016. DOI 10.1016/j.apergo.2016.04.006, ISSN 0003-6870.
- [70] Muse, L. A., Harris, S. G., & Feild, H. S: *Has the inverted-U theory of stress and job performance had a fair test?* Human Performance, 16(4), pp. 349-364. 2003. [Viitattu 2.2.2019] Saatavilla: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/S15327043HUP1604_2
- [71] Johanssen, G., Moray, N., Pew, R., Rasmussen, J., Sanders, A., & Wickens, C, *Final report of experimental psychology group Mental Workload*, Springer. 1979. S. 101 – 114. [Viitattu 2.2.2019] Saatavilla: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4757-0884-4_7
- [72] Casali, J. G., & Wierwille, W., W. *On the measurement of pilot perceptual workload: a comparison of assessment techniques addressing sensitivity and intrusion is-*

- sues*. Ergonomics, 27(10), 1984, s. 1033-1050. [Viitattu 2.2.2019] Saatavilla: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00140138408963584>
- [73] Lutfi, M. F., & Sukkar, M. Y: Effect of blood pressure on heart rate variability. *Khartoum Medical Journal*, 4(1). 2012. [Viitattu 2.2.2019] Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/215509485_Effect_of_blood_pressure_on_heart_rate_variability_KMJ
- [74] Stauss, H., M. *Heart rate variability*. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 285(5), R927-R931. 2003. [Viitattu 1.2.2019] Saatavilla: <https://www.physiology.org/doi/full/10.1152/ajpregu.00452.2003>
- [75] Casner, S., M. *Perceived vs. measured effects of advanced cockpit systems on pilot workload and error: Are pilots' beliefs misaligned with reality?* *Applied Ergonomics*, 40(3). 2009, s. 448-456. [Viitattu 1.2.2019] Saatavilla: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19028379>
- [76] Lee, Y.-H., & Liu, B.-S: Inflight workload assessment: Comparison of subjective and physiological measurements. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 74(10). 2003, s.1078-1084.
- [77] Vidulich, M. A., & Tsang, P. S. *Techniques of subjective workload assessment: A comparison of SWAT and the NASA-Bipolar methods*. *Ergonomics*, 29(11), 1986, s. 1385-1398.
- [78] GlobalSim, *Constructive Simulation System*, [viitattu 9.1.2019] Saatavissa: <https://www.cae.com/media/media-center/documents/GlobalSim.pdf>
- [79] Möller, B., Antelius, F., van den Berg, T., Jansen, R: *Scalable and Embeddable Data Logging for Live, Virtual and Constructive Simulation: HLA, Link 16, DIS and more*. [viitattu 9.1.2019] Saatavissa: <http://www.pitchtechnologies.com/wp-content/uploads/2016/04/11F-SIW-055.pdf>
- [80] Structured Data LLC, Raportti RiskAMP-sovelluksesta: *What is Monte Carlo Simulation?* [viitattu 9.1.2019] Saatavissa: <https://www.riskamp.com/files/RiskAMP%20-20Monte%20Carlo%20Simulation.pdf>
- [81] Military Handbook: Aircraft Survivability MIL-HDBK-2069, 10.4.1997. [Viitattu 22.2.2019.] Saatavuus: http://everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-2000-2999/MIL-HDBK-2069_21052/

- [82] Haase, C. L., Hill, R. R., & Hodson, D. *Planning for LVC Simulation Experiments*. Applied Mathematics, 5(14), 2153. 2014. [Viitattu 1.2.2019] Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/273745723_Planning_for_LVC_Simulation_Experiments
- [83] Harvey, P., Hatter, S., & Davis, M. *Joint Training: Live, Virtual, and Constructive (LVC)*. 2008 [Viitattu 27.12.2018] Saatavissa: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a513847.pdf>
- [84] Shufelt, J., Jr. *A Vision for Future Virtual Training, 2016*. [viitattu 9.1.2019] Saatavissa: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a473302.pdf>
- [85] Morse, Katherine L. PhD, Live-Virtual-Constructive (LVC) Overview, USMC. 2015. Materiaali tutkijan hallussa.
- [86] Systems Engineering Fundamentals, Chapter 13, Modeling and Simulation. [Viitattu 9.1.2019] Saatavissa: http://ocw.metu.edu.tr/pluginfile.php/409/mod_resource/content/0/lecture13.pdf
- [87] Hodson, D. D., & Baldwin, R. O. *Characterizing, Measuring, and Validating the Temporal Consistency of Live—Virtual—Constructive Environments*. Simulation, 85(10), pp. 671-682. 2009.
- [88] Manninen O., Patria Oyj. Live, Virtual, Constructive – kustannustehokasta ja parempaa koulutusta, 2018. [Viitattu 10.1.2019]. Saatavissa: <https://www.patriamagazine.fi/live-virtual-constructive/>
- [89] Davis, J. Haastattelu: Modern Military Training, 2018. [viitattu 10.1.2019] Saatavissa: <https://modernmilitarytraining.com/lvc-today/warfighters-perspective-lvc/>
- [90] Bowers A., Cutts D. & Gustavson P. Common Object Model Components: *A First Step Toward LVC Interoperability*, Research Gate -artikkeli s.2. 2009. [Viitattu 29.12.2018]. Saatavissa: <https://www.researchgate.net/publication/290314317>
- [91] Bell, D., Raiffa, H. and Tversky, A. *Descriptive, normative, and prescriptive interactions in decision making*. In: Bell D, Raiffa H and Tversky A (eds) Decision making: Descriptive, normative, and prescriptive interactions. Cambridge University Press, 1988; s. 9-32 sekä Journal of Economic Psychology, 1990, vol. 11, issue 1, pp. 147-149.
- [92] Tilastoapu Internet-sivusto. [Viitattu 15.3.2019] Saatavilla: <https://tilastoapu.wordpress.com/2012/03/18/wilcoxon-merkittyjen-sijalukujen-testi/>

- [93] Tilastoapu Internet-sivusto. [Viitattu 15.3.2019] Saatavilla: <https://tilastoapu.wordpress.com/2012/02/14/kahden-riippuvan-otoksen-vertailu/>
- [94] Salmon P., Stanton N., Walker G., Jenkins D., Ladva D., Rafferty L. and Young M. *Measuring situation awareness in complex systems: comparison of measures study*. Int J Ind Ergon 2009; 39, pp.490-500.
- [95] Poropudas J. & Virtanen K. *Simulation metamodeling with dynamic Bayesian networks*. Eur J Oper Res 2011; 214, pp. 644-655. [Viitattu 15.3.2019] Saatavilla: <http://lib.tkk.fi/Diss/2011/isbn9789526042688/article1.pdf>
- [96] Hill R, Miller J and McIntyre G. *Simulation analysis: applications of discrete event simulation modeling to military problems*. In: Proceedings of the 33rd conference on Winter simulation, Arlington, VA, 9-12 December 2001, pp. 780-788. Washington, DC: IEEE Computer Society Press.
- [97] Endsley M., R. A Survey of situation awareness requirements in air-to-air combat fighters. Int J Aviat Psychol 1993; 3: 157-168. [Viitattu 15.3.2019] Saatavilla: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/s15327108ijap0302_5
- [98] Roscoe A. Assessing pilot workload. *Why measure heart rate, HRV and respiration?* Biol Psychol 1992, 34, pp. 259-287. [Viitattu 19.3.2019] Saatavilla: <https://eurekamag.com/research/008/191/008191656.php>
- [99] Jorna P. *Heart rate and workload variations in actual and simulated flight*. Ergonomics 1993; 36: 1043-1054.
- [100] Krebs W., Mc Carley J. & Bryant E. *Effects of mission rehearsal simulation on airtoground target acquisition*. Hum Factors 1999; 41, s. 553-558. [Viitattu 11.3.2019] Saatavilla: <https://www.questia.com/library/journal/1G1-62384133/effects-of-mission-rehearsal-simulation-on-air-to-ground>
- [101] Blog.e-villen verkkokaupan blogi, *Mitä on VR ja mitkä lasit sopivat minulle?* [viitattu 18.7.2019] Saatavissa: <https://blog.e-ville.com/mita-on-vr-ja-mitka-lasit-sopivat-minulle/>
- [102] Scarnato, N. Modern Military Training internetsivusto. [Viitattu 6.7.2019]. Saatavilla: <http://modernmilitarytraining.com/lvc-today/2019-predictions-lvc-today-future/>
- [103] Valtakunnallisen maanpuolustuskurssin MPK220 avajaistilaisuus 23.1.2017, Säätö-talo, Puolustusvoimain komentajan kenraali Jarmo Lindbergin tervehdyssanat. [Viitat-

tu 31.5.2019] Saatavissa: <https://puolustusvoimat.fi/220.-valtakunnallisen-maanpuolustuskurssin-avajaiset>

[104] Itä-Suomen ympäristölupavirasto, päätös Nro 72/09/1, Dnro ISY-2008-Y-90. [Viitattu 6.7.2019]. Saatavilla:

<https://www.google.com/search?q=Lentokoulutuksesta+keskim%C3%A4%C3%A4rin+noin+40+%25+lennet%C3%A4%C3%A4n+simulaattoreilla&ie=utf-8&oe=utf-8&client=firefox-b>

[105] Patria Oyj, Jari-Matti Taskinen, Development Manager, Military Pilot Training. Aineisto vastaanotettu sähköpostilla 15.3.2019 ja on tutkijan hallussa.

[106] Wang, J. C., Yung Sern, V. C. Development Trends & Technology Forecast, *Unmanned Aerial Vehicle*. [Viitattu 6.7.2019]. Saatavilla:

<https://www.dsta.gov.sg/docs/default-source/dsta-about/dh01200502-unmanned-aerial-vehicle-development-trends-technology-forecast.pdf?sfvrsn=2>

LIITE 1

MAJ JAAKKO SALOMÄEN YEK59 DIPLOMITYÖN SIMULAATIOT:

LIVE - VIRTUAL - CONSTRUCTIVE -SIMULAATIOMALLI ILMATAISTELUTAKTIIKAN KEHITTÄMISEEN.

NASA-TLX-lomake: Koehenkilön numero: _____

1. HENKINEN VAATIMUSTASO

Oliko tehtävä helppo ja yksinkertainen vai vaativa ja monimutkainen? Kuinka paljon tehtävä vaati päätöksentekoa, ajattelua, etsimistä, muistamista, laskemista jne.?

VÄHÄN 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 **PALJON**

2. FYYSINEN VAATIMUSTASO

Kuinka paljon tehtävä vaati fyysistä toimintaa, nappien painamista, pään liikuttelua jne?

VÄHÄN 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 **PALJON**

3. AJALLINEN VAATIMUSTASO

Oliko tehtävä hidas-, sopiva- vai nopearytmisen? Kuinka paljon aikapainetta tunsit tehtävän aikana?

VÄHÄN 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 **PALJON**

4. SUORITUS

Kuinka tyytyväinen olet toimintaasi tavoitteiden saavuttamisessa? Kuinka hyvin mielestäsi saavutit tehtävän tavoitteet?

HYVIN 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 **HEIKOSTI**

5. PONNISTELU

Kuinka paljon sinun täytyi ponnistella henkisesti ja fyysisesti tehtävän aikana?

VÄHÄN 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 **PALJON**

6. TURHAUTUMINEN

Olitko rasittunut ja turhautunut tehtävän suorituksen aikana?

VÄHÄN 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 **PALJON**

LIITE 2

ENNAKKOTIETOLOMAKE

MAJ JAAKKO SALOMÄEN YEK59 DIPLOMITYÖN SIMULAATIOT:

LIVE - VIRTUAL - CONSTRUCTIVE -SIMULAATIOMALLI ILMATAISTELUTAKTIKAN KEHITTÄMISEEN

1. NIMI: _____

2. LENTOEROTE: _____

3. SYNTYMÄAIKA (DD.MM.YYYY): _____

4. LENTOTUNNIT (HN): _____ FLH

Ympyröi yksi kustakin alla olevan kohdan vaihtoehdosta.

5. LENTOKOKEMUS/KOULUTUS: SIIPIMIES / PARINJOHTAJA / PARVENJOHTAJA

6. OLETKO JUURI NYT LENTOKUNTOINEN: KYLLÄ / EI

7. VIREYSTILA: VIRKEÄ / HIEMAN VÄSYNYT / VÄSYNYT

8. LENTOTUNTUMA: HYVÄ / KOHTALAINEN / HEIKKO

Koehenkilön numero: _____ (tutkija täyttää).

SUOSTUMUS

Suostun osallistumaan koehenkilönä Maj Jaakko Salomäen diplomityön simulaatiotutkimukseen.

Tutkimuksessa pyritään selvittämään miten kognitiivisen kuormituksen kasvattaminen vaikuttaa koehenkilön kykyyn suorittaa annettu lentotehtävä. Koehenkilöt altistetaan vaihtelevalle kognitiiviselle kuormitukselle. Kognitiivinen kuormitus on ajoittain erittäin korkea.

Tutkimuksessa koehenkilön suorituskyvyn arviointiin käytetään arvosteltavaa WTSAT- simulaattorilentoa. Kognitiivisen kuormittavuuden arviointiin käytetään NASA-TLX ja PT-SAGAT kyselyitä, sekä Testable Response ja Performance mittauksia. Tutkimuksessa koehenkilöistä kerätään tietoja edellisten arviointityökalujen lisäksi erillisellä ennakkotietolomakkeella.

Koehenkilöistä kerättyä, muusta aineistosta irrotettua aineistoa ei luovuteta tutkimusryhmään kuulumattomille. Koetulokset esitetään tilastollisessa muodossa siten, että yksittäisen koehenkilön tiedot eivät ole tunnistettavissa. Koetuloksista saadut tilastolliset tulokset ja niiden pohjalta laaditut tutkimusraportit ovat julkisia.

Koehenkilöllä on oikeus keskeyttää tutkimukseen osallistuminen missä tutkimuksen vaiheessa tahansa. Mikäli koehenkilö keskeyttää osallistumisen tutkimukseen, koehenkilöllä on oikeus kieltää hänsä kerätyn aineiston käyttämisen tutkimuksessa, jos se on mahdollista irrottaa muusta tutkimusaineistosta. Koehenkilön ei tarvitse perustella osallistumisen keskeyttämistä, eikä keskeyttämisestä aiheudu koehenkilölle haittaa.

Tutkimuksen aikana koehenkilöt kuuluvat työnantajan vakuutusturvan piiriin.

Aika, paikka **Allekirjoitus ja nimenselvennys**