LENTOAMMUNNAN VIRHETEKIJÖIDEN MÄÄRITTÄMISESTÄ

Yleisesikuntaeversti, filosofian maisteri V Pernaa

JOHDANTO

Lentoammunta muodostaa ampumaopin piirissä mielenkiintoisen osa-alueen. Ammuttaessahan sekä ampuja että maali voivat olla liikkeessä ehkä hyvinkin suurella nopeudella, eri korkeuksissa, erilaisten kiihtyvyysvoimien alaisina jne. Ammunnan virhetekijät ovat ilmeisestikin eri tekijöistä johtuen moninaisemmat kuin pinta-asein tapahtuvassa ammunnassa.

Virhetekijöiden huomioonottaminen on liittynyt lentoammuntaan sen historian alusta saakka. Joiltakin osin virheiden vaikutus tunnetaan täydellisesti, joiltakin osin korkeintaan kvalitatiivisesti. Tykistöaselajien piiristä tunnettu virheen arviointi differentiaalilaskentaa soveltaen on kirjoittajan havaintojen mukaan jäänyt toistaiseksi soveltamatta lentoammunnan piirissä.

Keskeisinä syinä lentoammunnan vähäiseen perustutkimukseen ovat olleet ilmeisesti tietyt vaikeudet ongelman ballististen perusteiden hallinnassa. Lentoammunnasa ampumaetäisyys on pieni, suuruusluokaltaan muutamasta sadasta metristä kilometriin. Ammuksen putoama on pieni tällaisilla ampumaetäisyyksillä ja pienten poikkeamien määrittäminen hankalaa. Tietty vaikeus on myös koordinaatiston valinnassa. Lentoradan laskeminen eksaktisti aikaisemmilla keinoilla elektronisten laskinten puuttuessa on ollut sangen työlästä.

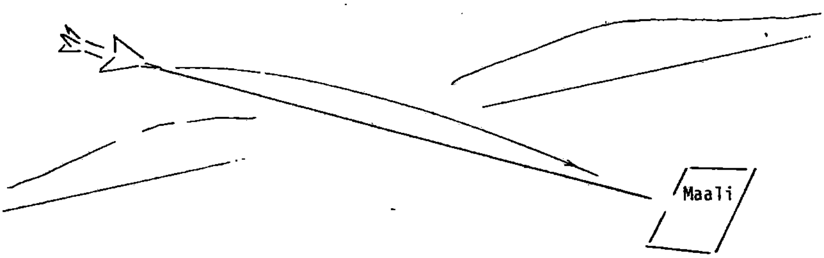
Tässä tutkielmassa pyritään selvittämään lentoammunnassa tykkiaseilla maamaaliin tapahtuvien pienten virheiden vaikutusta tulen tarkkuuteen. Muilla aseilla tapahtuvan tulituksen (raketit, pommit, ohjukset) osalta tyydytään toteamukseen, että mitä ammunnan virheisiin tulee, on tykkitulitusta koskeva tarkastelu suhteellisen pitkälle voimassa raketeilla ja pommeilla tapahtuvaan tulitukseen nähden; ohjuksin tapahtuvaan tulitukseen yhtymäkohtia ei juuri ole. Koulutuksellisia näkökohtia ajatellen voidaan sanoa, että tykkiammunta muodostaa yleisen perustan lentoampumataidolle.

Tutkielman lentoratalaskut perustuvat tyhjiöolosuhteiden lentorataan. Tämä ei kuitenkaan muuta tarkasteltavien ilmiöiden luonnetta.

1. TUTKIMUSTEHTÄVÄN MÄÄRITTELY

1.1. Yleistä ilmasta—maahan tulituksesta

Tulitus maamaaliin lentokoneasein tapahtuu (kuva 1) tyypillisesti 15°—30° syöksykulmilla koneen lentosuuntaan. Aseet ovat kiinteästi asennetut, ja niiden suuntaus tapahtuu ohjaamalla kone haluttuun suuntaan tähtäintä apuna käyttäen.



Kuva 1. Lentoammunta maamaaliin

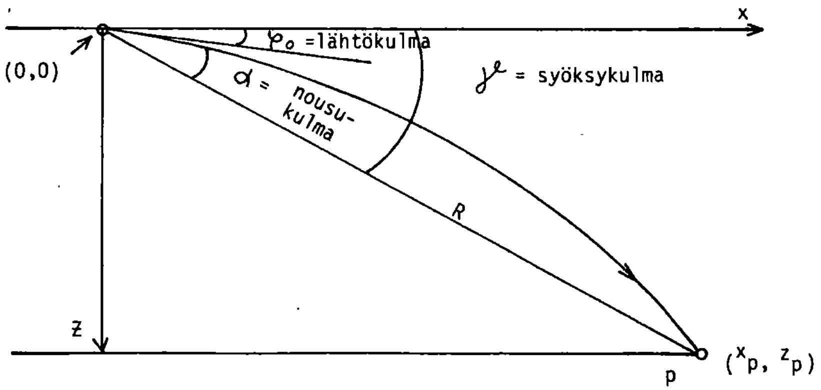
Vallitsevat olosuhteet tulitushetkellä määräävät iskemien sijainnin. Ulkoisten olosuhteiden (esim tuuli) lisäksi koneen lentotila ja lentoarvot laukaisuhetkellä ovat avainasemassa. Koneen aseet kohdistetaan eli tarkkuutetaan siten, että laukaisun tapahtuessa normaaliolosuhteissa ja tähtäyksen tapahtuessa moitteettomasti iskemät osuvat tähtäyspisteeseen. Tarkkuutusolosuhteiksi valitaan koneen tyypilliset keskimääräiset käyttöolosuhteet. Ammuttaessa maamaaliin tarkkuutusarvot esimerkiksi Fouga Magister -koneelle ovat seuraavat:

— ampumaetäisyys $R_o = 500$ m,
— lentonopeus v $v_h = 520$ km/h,
— syöksykulma $\gamma = 20^o$.

Lisäksi edellytetään, että ammunta tapahtuu normaaliolosuhteissa ja että kone lentää laukaisuhetkellä moitteettomasti, siis luisumatta sivusuunnassa ja siten, ettei koneeseen kohdistu arvosta n = 1 poikkeavaa kiihtyvyysmonikertaa.

Aseistuksen osalta edellytyksenä on, että ammuksen lähtönopeus on 827 m/s.

Koordinaatiston valinta lentoammunnassa maamaaliin vaatii tavanomaisesta poikkeavan ratkaisun. Tässä tutkielmassa koordinaatistoksi on valittu suorakulmainen x, y, z-koordinaatisto, jossa z kasvaa alaspäin (kuva 2).



Huom

- Piste p on tarkuutuspiste sijaiten etäisyydellä R lähtöpisteestä
- Z kasvaa alaspäin
- $\varphi_o = \gamma - \alpha$

Kuva 2. Koordinaatisto

Kuvassa 2 on piste p tarkkuutuspiste sijaiten etäisyydellä R lähtöpisteestä. Lähtökulma $\varphi_o = \gamma - \alpha$. Koordinaaatisto on maakiinteinen siten, että koordinaatiston origo asettuu lähtöpisteeseen tulitushetkellä.

Suureelle R, joka on *kalteva ampumaetäisyys*, voidaan helposti johtaa seuraava kaava:

$$(1) \quad R = \frac{2v_o^2 \cdot \sin\alpha \cdot \cos(\gamma - \alpha)}{g \cdot \cos^2\gamma} .$$

Tekijässä v_o supernoituu sekä ammuksen että ampujakoneen nopeus. Koska v_o, α ja γ ovat tietyssä ampumatilanteessa tunnettuja, voidaan R niiden perusteella laskea. On huomattava, että kaava (1) on johdettu tyhjiöradalle, ilmaradoilla R tulee olemaan kaavalla (1) laskettuja arvoja pienempi.

1.2. Tutkimuksen päämäärä

Kuten edellä todettiin, iskemien moitteeton osuminen maaliin edellyttää, että ammunta tapahtuu tarkkuutusarvoilla ja normaaliolosuhteissa (elleivät virheet sattumalta kompensoi toisiaan). Näin ollen (vrt kaava (1) tekijöiden v_o, α ja γ poikkeavuudet aiheuttavat iskemien poikkeamisen tähtäyspisteestä. Niiden lisäksi koneen luisuminen sivulle antaa v_o:lle virheellisen nopeuskomponentin ja koneeseen vaikuttava mahdollinen kiihtyvyys, jossa $n \neq 1$, lähtösuuntavirheen pystytasossa. Väärältä ampumaetäisyydeltä suoritettu tulitus tietenkin myös johtaa vääriin iskemäpisteisiin.

Ulkoiset tekijät, ennenkaikkea tuuli, vaikuttavat osumiseen samaan tapaan kuin pinta-asein tapahtuvassa ammunnassa. Lämpötilan ym ilmakehän arvojen poikkeaminen standardi-ilmakehän arvoista vaikuttavat myös asiaan, mutta nämä tekijät sivuutetaan vähäisyytensä vuoksi tässä yhteydessä.

Virhetekijöistä aiheutuneiden poikkeamien kvantitatiivinen määritys on tähän mennessä ollut tunnettua tuulen aiheuttaman virheen sekä väärästä ampumaetäisyydestä aiheutuneen virheen osalta; jälkimmäisen virheen vaikutus on arvioitu ammuksen putoamispiirroksesta. Sen sijaan muiden tekijöiden, jotka on esitelty aikaisemmin, vaikutus on jäänyt määrittämättä.

Tässä tutkimuksessa pyritään määrittämään kvantitatiivisesti, joskin vain likiarvomenetelmiä soveltaen lentoammunnassa ilmasta maamaaliin tapahtuvien virheiden vaikutus. Tutkimuksessa nojaudutaan aikaisemmin olemassa olevaan tietouteen ja puuttuvilta osin johdetaan arvioinnissa tarvittavat virhekaavat. Lopuksi pyritään numeroesimerkkien avulla luomaan kuva virheiden keskinäisestä suuruusluokasta ja näin antamaan tukea käytännön ampumakoulutustoiminnalle.

Huomautettakoon, että nykyaikainen asetekniikka tuottaa markkinoille uusia tähtäinkonstruktioita, jotka enenevässä määrin korjaavat automaattisesti tietyt ammunnan virheet. Kuten edellä esitetystä jo selviää, tässä tutkimuksessa ei oleteta olevan automatiikkaa apuna, vaan pitäydytään itse virhetekijöiden perusteiden selvittämisessä.

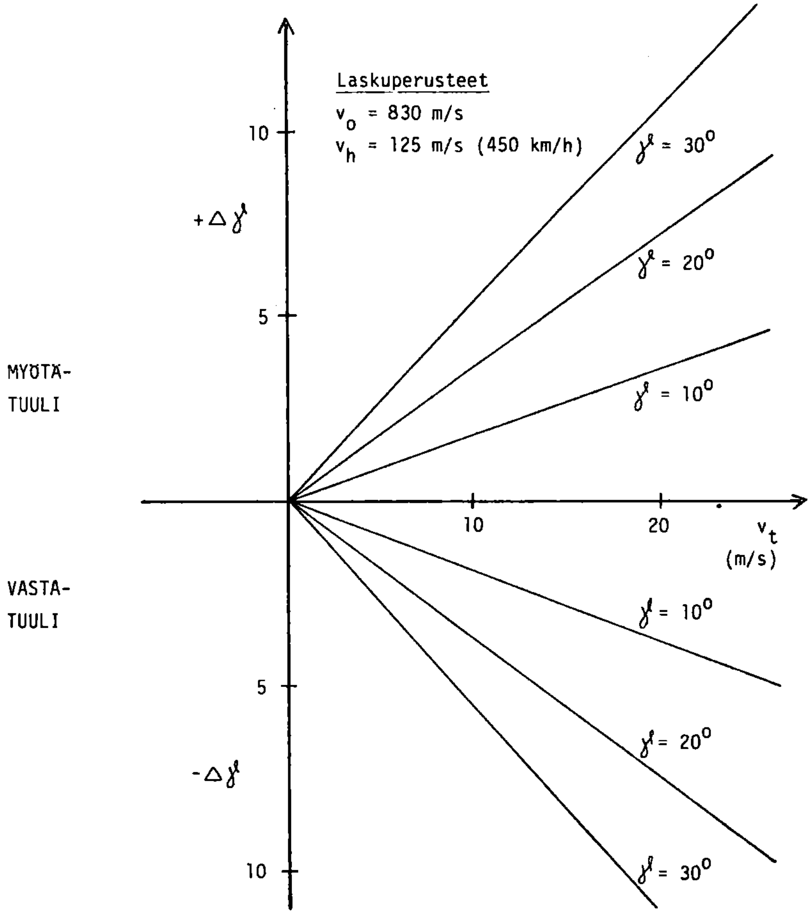
2. ERI VIRHETEKIJÖIDEN VAIKUTUS TULEN TARKKUUTEEN

2.1. Tuulen vaikutus

Tuulen vaikutuksen ongelma on sama kuin yleisessä ampumaopissa; oman lisänsä siihen vielä tuo ampujan oma liiketila. Tuulen vaikutukselle on niin pituus- kuin poikittaissuuntaisessakin tapauksessa johdettu laskukaavat. Tällöin on oletettu, että ampuva kone liikkuessaan ilmamassan mukana antaa ammukselle tuulen nopeusvektorin suuruisen lisäkomponentin. Ammuksen ajautumista tuulen mukana lentoradallaan ei pienten ampumaetäisyyksien takia ole otettu huomioon.

Käytännön toiminnassa tuulen vaikutus arvioidaan nomogrammeja käyttäen. Näistä esimerkkeinä ovat FM-konetta varten laaditut nomogrammit kuvissa 3 ja 4.

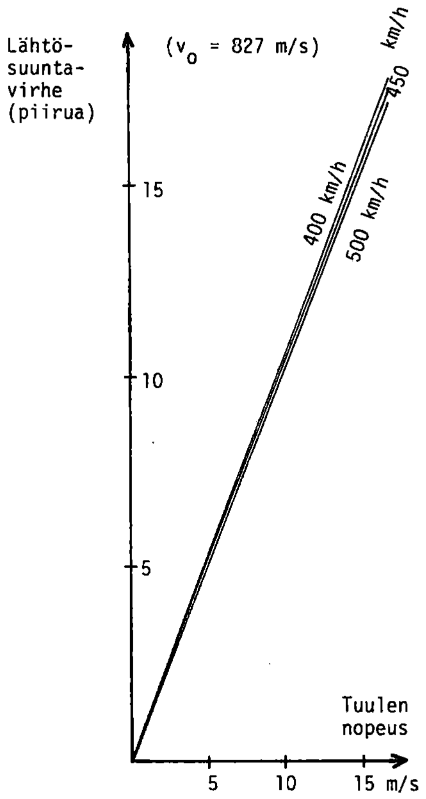
$$\Delta\gamma^{\ell v} = \gamma^{\ell o} \cdot \frac{v_t}{v_o + v_h \pm v_t} \cdot \frac{100\,\pi}{18}$$



Kuva 3. Myötä- ja vastatuulen aiheuttama lähtösuuntavirhe $\Delta\gamma^\ell$ piiruina.

Kaavojen johtamisessa on oletettu, että tuulen nopeus superponoituu koneen ja ammuksen nopeuteen. Käytännössä tämä riippuu ammunnan suoritustekniikasta. Vaihtoehtoina on kaksi mahdollisuutta, joista ensimmäisessä tähtäyspiste otetaan tuulen yläpuolelta ja varaudutaan siihen, että kone laukaisuhetkeen mennessä tuuliennakko huomioiden ajautuu juuri oikeaan kohtaan maaliin nähden. Toinen mahdollisuus on se, että tähtäyspiste pidetään kiinteästi maalissa. Tuulen vaikutuksesta tämä johtaa kaartavaan lentorataan, koska on kaarrettava tuuleen päin sortuman kompensoimiseksi. Tämä edelleen johtaa koneen kallistumiseen, mistä on seurauksena omat haittavaikutuksensa, mutta tuuliennakkoa ei tarvita.

$$\Delta p^{v} = \arctan\left(\frac{v_t}{v_h}\right) \frac{1}{1 + v_o/v_h} \cdot \frac{100\pi}{18}$$



Kuva 4. Suoran sivutuulen aiheuttama lähtösuuntavirhe

Kuvien 3 ja 4 nomogrammit on johdettu ensinmainittua vaihtoehtoa varten.

Numeroesimerkki. FM-koneella ammutaan syöksykulmalla 20° olosuhteissa, joissa tuulee 30° ampumasuuntaan nähden oikealta vastaan voimakkuudella 10 m/s. Minkälaisen lähtöpoikkeaman tuuli aiheuttaa?

Ratkaisu: Tuulen pituussuuntaiseksi komponentiksi saadaan 10 m/s · cos 30° = 8,66 m/s, ja vastaavasti sivusuuntaiseksi komponentiksi 10 m/s · sin30° = 5 m/s. Kuvan 3 nojalla saadaan vastatuulen aiheuttamaksi lähtöpoikkeamaksi noin 3,2 piirua. Vastaavasti sivutuulen aiheuttamaksi poikkeamaksi saadaan kuvan 4 nojalla noin 5,3 piirua.

2.2. Muut lähtönopeusvektorin suuntavirheet

2.2.1. Virheiden syntyminen

Ammusten osuminen maaliin edellyttää luonnollisesti, että ammuksella on lähtöpisteessä tarkkuutusarvojen mukainen nopeusvektori. Kyseisen vektorin tekijät ovat ammuksen aseessa saama lähtönopeus ja ampuvan koneen nopeus. Viimeksi mainitun suunta ei yhdy edelliseen pystytasossa, koska putoaman eliminoimiseksi ammuksella täytyy olla tähtäysviivaan nähden tietty korotus. Aseet tarkkuutetaan siten, että ammuksen ja koneen nopeusvektorien resultantti (ks kuva 5) vastaa tarkkuutusampumaetäisyyden mukaista lähtönopeutta. Resultanttivektorin muuttuessa joko sen suunta tai suuruus muuttuu. Kuten myöhemmin havaitaan, suuntavirheellä on painavampi osuus kuin itseisarvon virheellä.

Jos siis koneen nopeus ampumahetkellä poikkeaa tarkkuutusnopeudesta, tulee lähtönopeusvektoriin poikkeama pystytasossa. Poikkeamaa kutsutaan lyhyesti lähtöpoikkeamaksi.

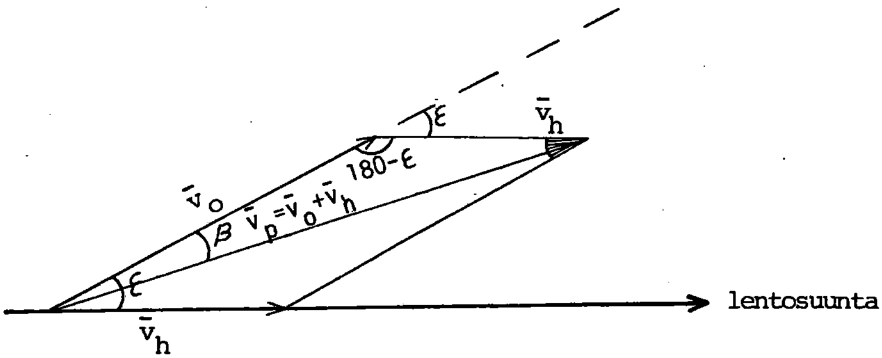
Tällainen virhe esiintyy yleisimmin ampumatilanteissa, joissa tulitus tapahtuu väärällä nopeudella. Jos esimerkiksi nopeus on jatkuvasti alle tarkkuutusnopeuden, vaatisi korkeuden säilyttäminen kohtauskulman lisäämistä eli nokan nostamista. Koska tähtäyspiste on kuitenkin pidettävä maalissa, ei kohtauskulmaa voida muuttaa ja kone alkaa vajota. Lentoradasta tulee tässä tapauksessa käyrä alaspäin, jolloin ammuksen lähtönopeusvektori saa alaspäin suuntautuvan lisäkomponentin. Yli tarkkuutusarvon olevilla lentonopeuksilla virhe on luonnollisesti vastakkaissuuntainen.

Vastaava ilmiö voi esiintyä myös vaakatasossa. Tarkkuustilanteessa kone ei saa luisua sivusuunnassa, vaan sen on uitava siten, että tähtäysviiva ja koneen pituusakseli ovat yhdensuuntaiset. Mikäli tulitustilanteessa ei näin tapahdu, ammus saa vaakatasossa eli siis sivusuunnassa poikkeaman lähtönopeusvektoriinsa. Tällainen virhe tapahtuu hyvin yleisesti silloin, kun kone on puuskan vaikutuksesta heilahtanut pois maalin suunnasta ja ohjaaja pelkästään jalkaohjaimia käyttäen (siis moitteettomasta ohjauksesta poiketen) pakottaa laukaisuhetkellä tähtäinkuvion siirtymään maaliin.

Kolmas tähän ryhmään kuuluva tekijä on laukaisuhetkellä vallitseva kiihtyvyysmonikerta. Tarkkuustilanne edellyttää, että kiihtyvyysmonikerran n arvo on tasan yksi ($n = 1$). Tällöin koneella on tarkkuusnopeuden mukainen kohtauskulma, mistä edelleen seuraa oikea nopeusvektorin arvo. Jos kone on tulitushetkellä sellaisessa jatkuvassa lentotilassa, jossa $n \neq 1$, tulee lentorata kaarevaksi joko alaspäin ($n > 1$) tai ylöspäin ($n < 1$). Lähtönopeusvektori saa kyseisissä tilanteissa vastaavan poikkeaman. Tällainen virhe lentoammunnassa esiintyy tyypillisesti sellaisissa tilanteissa, joissa tähtäys on tulitushetkeä lähestyttäessä huomattavasti poikennut maalista alas- tai ylöspäin ja ohjaaja kovalla vedolla tai työnnöllä (jona aikana $n \neq 1$) pyrkii siirtämään tähtäyspisteen maaliin eikä kiihtyvyysmonikerran arvo ole ehtinyt palautua arvoon $n = 1$.

2.2.2. Lähtöpoikkeaman määrittäminen

Lähtöpoikkeama voidaan likimääräisesti laskea käyttäen kuvassa 5 olevia merkintöjä.



Kuva 5. Lähtöpoikkeama

Kulma β määrätään seuraavasti: Vektorien $\bar{v}_o$, $\bar{v}_h$ ja $\bar{v}_p$ muodostamassa kolmiossa saadaan vektorien itseisarvoja käyttäen siniväittämän nojalla:

(2a) $$\frac{v_h}{\sin\beta} = \frac{v_o + v_h}{\sin\varepsilon}$$

eli

(2b) $$\sin\beta = \frac{v_h}{v_o + v_h} \cdot \sin\varepsilon \,.$$

sin .

Koska kulmat β ja ε ovat pieniä (muutaman asteen suuruusluokkaa), ovat $\sin\beta \approx \beta$ ja $\sin\varepsilon \approx \varepsilon$, joten

(3a) $$\beta \approx \frac{v_h}{v_o + v_h} \cdot \varepsilon$$

eli

(3b) $$\beta \approx \frac{\varepsilon}{1 + v_o/v_h} \,.$$

Kulma β osoittaa, paljonko todellinen lähtösuunta poikkeaa aseiden $\bar{v}_o$:lle määrittämästä suunnasta.

Määrä, jolla β poikkeaa tarkkuutusarvosta, on haettu lähtöpoikkeama,

Sovellutusesimerkki

FM-koneella on $v_o = 827$ m/s, $v_h = 520$ km/h ja $\varepsilon = 0{,}164°$.

Tulitus tapahtuu muuten tarkkuutusarvoilla, mutta ohjaaja käyttää vakionopeutenaan $v_h = 460$ km/h. Mikä lähtöpoikkeama syntyy?

Ratkaisu: Koska kone on jatkuvassa lentotilassa, joka poikkeaa tarkkuutusarvosta, on koneella virheellinen kohtauskulma. Kulma ε on kasvanut, ja ohjekirjasta saadaan kasvun arvoksi ao nopeuksien perusteella

$1{,}316° - 0{,}912° = 0{,}404°$. Uusi $\varepsilon = 0{,}164° + 0{,}404° = 0{,}568°$.

Laskien kaavalla (3b) saadaan ensin tarkkuutustilanteessa:

$$\beta_{tarkk} = \frac{0{,}164^{\circ}}{1+827/144} \approx 0{,}024^{\circ} = 0{,}41^{v} .$$

Vastaavasti saadaan esimerkin ampumatilanteessa:

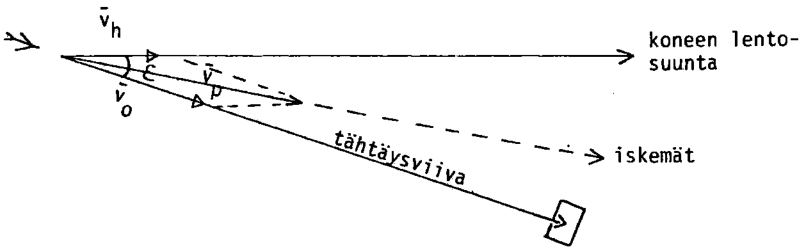
$$\beta = \frac{0{,}568^{\circ}}{1+827/144} \approx 0{,}084^{\circ} = 1{,}40^{v} .$$

Tulos: Väärä nopeus aiheuttaa $1{,}40^{v} - 0{,}41^{v} = 0{,}99^{v}$
$\approx 1{,}0^{v}$ virheen.

Huomattakoon, että väärä lentonopeus vaikuttaa välittömästi myös putoamaan. Tätä kysymystä käsitellään myöhemmin erikseen kohdassa 2.4.3.

2.2.3. Sivuluisun aiheuttaman poikkeaman määrittäminen

Jos kone on tulitushetkellä luisussa, ts koneen pituusakseli (tähtäysviiva) pidetään jalkaa painaen maalissa ja kone lentää hieman kyljittäin, on tilanne kuvan 6 mukainen.



Kuva 6. Sivuluisun vaikutus

Kuvan tilanteessa on oikea jalka painettuna ja kone lentää vasen kylki edellä. Koska projektiilien todellinen lähtösuunta on

$$\bar{v}_p = \bar{v}_o + \bar{v}_h ,$$

on resultanttivektori $\bar{v}_p$ kuvan osoittamalla tavalla $\bar{v}_o$:n ja $\bar{v}_h$ välissä ja iskemät menevät vasemmalta ohi maalin. Tilanne on täysin analoginen lähtöpoikkeaman kanssa, jota tarkasteltiin pystytasossa. Luisun aiheuttamaan poikkeamaan pätee näin ollen kaava (3b), jossa tässä tapauksessa θ = luisukulma:

$$(4) \quad \delta = \frac{1}{1 + v_o/v_h} \cdot \theta \quad .$$

Esimerkki

Ammuttaessa FM-koneella tarkkuutusarvoilla on kone kuitenkin luisussa 3°. Paljonko iskemät poikkeavat tarkkuutuspisteestä (taulun keskipisteestä)?

Ratkaisu: $\theta = 3^o = 3.16{,}67^v = 50{,}0^v$; $v_o = 827$ m/s,

$$v_h = 144{,}4 \text{ m/s} \qquad \delta = \frac{1}{1 + 827/144{,}4} \cdot 50{,}0^v \approx 7{,}4^v \; .$$

Luisun vaikutus on näin ollen varsin merkittävä.

2.2.4. Laukaisuhetkellä vallitsevan kiihtyvyysmonikerran vaikutus

Poikettaessa kiihtyvyysmonikerran $n = 1$ arvosta muuttuu koneen kohtauskulma siten, että $n > 1$ kohtauskulmaa joudutaan suurentamaan ja $n < 1$ pienentämään. Viitaten kuvan 5 merkintöihin ja kaavan (3b) kulma ε saa tällöin muuttuneet arvot, ja tämän vaikutuksesta syntyy lähtöpoikkeama, joka on suuruudeltaan verrannollinen kulmaan ε. Verrannollisuuskerroin on sama kuin kaavassa (3b) eli

$$(4) \quad \frac{1}{1 + v_o/v_h} \; .$$

Muuttunut kiihtyvyysmonikerta vaikuttaa siis kohtauskulman välityksellä. Kohtauskulman muutos kiihtyvyysmonikerran funktiona saadaan koneen ohjekirjasta.

Varsinkin deltasiipisellä koneella muutos on huomattava.

Korostettakoon vielä, että arvon $n = 1$ täytyy nimenomaan olla voimassa tulitushetkellä. Jos tähtäyspiste on esimerkiksi kovalla vedolla saatu maaliin ja veto on sitten löysätty arvoon $n=1$, johon se on ehtinyt tasaantua ennen laukaisua, ei tähtäysvirhettä synny.

Esimerkki kiihtyvyysmonikerran $n \neq 1$ vaikutuksesta

FM-kone suorittaa maa-ammuntaa tarkkuutuslentoarvoilla, mutta kone on laukaisuhetkellä vedettynä niin, että kohtauskulma on kasvanut 2°. Paljonko osumat poikkeavat?

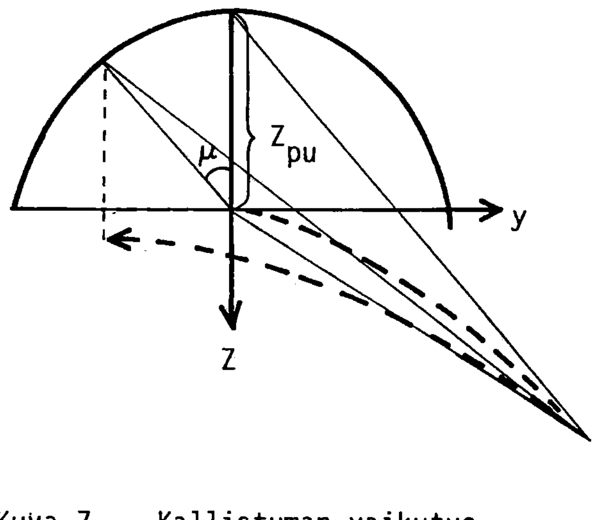
Ratkaisu: Kulma ε on tarkkuutustilanteessa (ks ohjekirja) 0,164°, jolloin $\beta_1 = 0{,}164/(1 + 827/144{,}4) = 0{,}024° \approx 0{,}4^v$.
Vedettynä $\varepsilon = 0{,}164° + 2{,}0° = 2{,}164°$, jolloin

$$\beta_2 = \frac{2{,}164^{\circ}}{1 + 827/144{,}44} \approx 0{,}32^{\circ} \approx 5{,}36^{v}\ .$$

Muuttunut lentotila on aiheuttanut lähtöpoikkeamaa ($\beta_2 - \beta_1$) siis noin 5 piirua.

2.3. Koneen kallistuksen vaikutus

Koneen ollessa kallistettuna ampumahetkellä eivät projektiilit pysy ampumatasossa, vaan putoaman vaikutuksesta poikkeavat siitä (kuva 7).



Kuva 7. Kallistuman vaikutus

Osumapisteen poikkeamalle tarkkuutuspisteestä (taulun keskipisteestä) saadaan seuraavat lausekkeet:

$$(5)\begin{cases} \Delta y = z_{pu} \cdot \sin \nu \\ \Delta z = z_{pu} \cdot (1-\cos \nu) \end{cases}$$

Kaavassa ovat

ν = koneen kallistuma asteissa,
z_{pu} = tulitusetäisyyttä vastaava putoama.

Säteittäinen poikkeama on (5):n perusteella:

(6) $\Delta r = \sqrt{\Delta y^2 + \Delta z^2}$ m, sekä piiruina:

(7) $r^v = \dfrac{z_{pu} \cdot \sqrt{1-\cos \nu} \cdot 1000 \sqrt{2}}{R}$

Esimerkki

FM-koneen ammuksen putoama 500 metrin ampumaetäisyydellä on noin 3,50 m. Paljonko iskemät poikkeavat tarkkuuspisteestä, kun kone on kallistettuna 10° oikealle tulitushetkellä?

Ratkaisu: $z_{pu} = 3,50$ m, $\Delta y = 3,50 \cdot \sin 10^{\circ} \approx 0,61$ m.
$\Delta z = 3,50 \cdot (1-\cos 10^{\circ}) \approx 0,05$ m.

Säteittäinen poikkeama:

$$r^v \approx \frac{3,50 \cdot \sqrt{1-\cos 10^{\circ}}\, 1000 \sqrt{2}}{500} \approx 1,22^v$$

2.4. Syöksykulman, lentonopeuden itseisarvon ja ampumaetäisyyden pienten muutosten vaikutus

2.4.1. Virheen arviointi kokonaisdifferentiaalia käyttäen

Mikäli virhetarkastelun kohteena olevalle suureelle on olemassa analyyttinen lauseke, voidaan virheen arvointi likimääräisesti suorittaa funktion kokonaisdifferentiaalia soveltaen. Jos muuttujia on mielivaltainen määrä: x_1, $x_2, \ldots x_n$, ja jos $\Delta x_1, \Delta x_2, \ldots, \Delta x_n$ merkitsevät vastaavasti näiden virheitä, ilmaisee lauseke

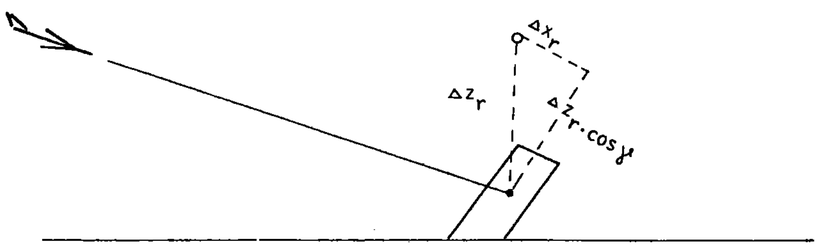
$$(8) \quad \Delta f \approx f_{x_1} \cdot \Delta x_1 + f_{x_2} \cdot \Delta x_2 + \ldots + f_{x_n} \cdot \Delta x_n$$

funktion $f(x_1, x_2, \ldots x_n)$ vastaavan virheen likiarvon.

Merkintä f_{x_1} tarkoittaa funktion osittaisderivaattaa muuttujan x_1 suhteen. Toinen merkintätapa, jota seuraavassa käytetään, on $\frac{\partial f}{\partial x_1}$.

Lähtökohtana seuraavassa laskettaville virhekaavioille on aikaisemmin esitetty yhtälö (1):

$$R = \frac{2v_o^2 . \sin \alpha . \cos(\gamma - \alpha)}{g . \cos^2 \gamma} .$$



Kuva 8. Iskemien säteittäinen poikkeaminen

Tulituksessa maamaaliin ei niinkään kiinnosta muutokset ampumaetäisyydessä R, vaan paljonko iskemät poikkeavat maalista itse maalin tasossa (ks kuva 8), ts z-koordinaatin muutoksena. Muutos on vielä kerrottava termillä $\cos\gamma$, jotta saataisiin säteittäinen poikkeama tähtäyspisteestä. Virheiden arviointia varten on siis ensin johdettava

(9) $$z_r = z_r(R,\ v_o,\ \gamma)\ .$$

Koska nyt $\varphi_o = \gamma - \alpha$ ja ammutaan alaspäin, on

(10) $$z_r = x_r.\tan(\gamma-\alpha) + \frac{gx_r^2}{2v_o^2.\cos^2(\gamma-\alpha)}\ .$$

Eliminoidaan x_r edellisestä yhtälöstä. Tätä varten sijoitetaan siihen

(11) $$x_r = R.\cos\gamma\ .$$

Tällöin saadaan

(12) $$z_r = R\cos\gamma.\tan(\gamma-\alpha) + \frac{g.R^2\cos^2\gamma}{2v_o^2\cos^2(\gamma-\alpha)}\ .$$

Saatua kaavaa (12) voidaan käyttää sen sisältämien muuttujien pienten virheiden arviointiin.

2.4.2. Syöksykulman pienten muutosten vaikutus

Syöksykulman γ pienten muutosten aiheuttaman virheen määrittämiseksi on johdettava lauseke

(13) $$z_r = \frac{\partial z_r}{\partial\gamma}\cdot\Delta\gamma\ .$$

Huomautettakoon, että kulman γ muuttuessa tähtäyspiste pysyy kuitenkin maalissa, joten tähtäyspisteen paikka maalin tasossa muuttuu määrällä

$$R(\sin(\gamma+\Delta\gamma)-\sin\gamma) \approx R\cos\gamma.\Delta\gamma\ .$$

Suorittamalla osittaisderivointi kaavassa (12) saadaan:

(14) $$\frac{\partial z_r}{\partial \gamma} = R.\frac{\cos\gamma - \sin\gamma \sin(\gamma-\alpha)\cos(\gamma-\alpha)}{\cos^2(\gamma-\alpha)} - \frac{gR^2.\sin\alpha\cos\gamma}{v_o^2.\cos^3(\gamma-\alpha)}.$$

Jälkimmäinen termi on edellisestä vain noin 10^{-4}, joten se voidaan jättää vaille huomiota likimääräislaskuissa.

Huomioiden tähtäysviivan suunnan muutos saadaan siis:

(15) $$\Delta z_r(\Delta\gamma) \approx R.\frac{(\cos\gamma - \sin\gamma.\sin(\gamma-\alpha)\cos(\gamma-\alpha)}{\cos^2(\gamma-\alpha)} - \cos\gamma).\Delta\gamma$$

eli sievennettynä

(15) $$\Delta z_r(\Delta\gamma) \approx R.\frac{(\cos\gamma - \cos\alpha.\cos(\gamma-\alpha))}{\cos^2(\gamma-\alpha)}.\Delta\gamma.$$

Suure $\Delta\gamma$ on ilmoitettu radiaaneissa. Mikäli se on ilmoitettu asteissa, saadaan säteittäinen poikkeama piiruina lopulta muodossa:

(16) $$\Delta r(\Delta\gamma) \approx \left(\frac{\cos\gamma - \cos\alpha.\cos(\gamma-\alpha)}{\cos^2(\gamma-\alpha)}\right).\cos\gamma.\frac{100\pi}{18}.\Delta\gamma^o.$$

Syöksykulman muutoksen vaikutus on melko pieni, kuten nähdään seuraavasta taulukosta, joka on laskettu FM-koneen tarkkuutusarvoilla. Huomattakoon, että laskut on tehty tyhjiörataa varten; ilmaradalla poikkeamat ovat suuremmat. Vertaamalla putoamia tyhjiö- ja ilmaradoilla on poikkeamien todellinen suuruusluokka ilmaradalla noin kaksinkertainen tyhjiörataan verrattuna.

Todettakoon myös, että suurentunut syöksykulma nostaa iskemien paikkaa maalissa (z on pienentynyt).

Perusteet	$\Delta\gamma$	Δz_p	Δr^v
v_o = 827 m/s) v_p = 971 m/s	5^o	-0,041 m	$0{,}08^v$
v_h = 520 km/h)	10^o	-0,082 m	$0{,}16^v$
R = 500 m			
γ = 20^o			
α = $0{,}14^o$			

Taulukko 1. Syöksykulman muutoksen vaikutus.

Voidaan todeta, että verraten suurikin poikkeama tarkkuutusarvosta eli 10° aiheuttaa varsin pienen virheen. Syöksykulman muutos ei näin ollen aiheutakaan huomionarvoista virhettä putoaman muutoksena, vaan välillisesti suuremman virheen lentonopeuden muuttuessa ja mm vaikuttaessa väistöetäisyyteen.

2.4.3. Lentonopeuden itseisarvon pienten muutosten vaikutus

Lähtönopeusvektorin suuntavirheitä käsiteltiin jo kohdassa 2.2, jossa ei kiinnitetty huomiota nopeusvektorin itseisarvon poikkeamiin. Muuttunut v_o, johon tässä oletetaan sisältyvän poikkeamat sekä ammuksen lähtönopeudessa että koneen lentonopeudessa, vaikuttaa luonnollisesti myös putoamaan.

Pienten v_o:n muutosten vaikutuksen selvittämiseksi muodostetaan lähtien kaavasta (12) z_r:n osittaisderivaatta v_o:n suhteen:

$$(17)\quad \frac{\partial z_r}{\partial v_o} = - \frac{gR^2\cos^2\gamma}{\cos^2(\gamma-\alpha)} \cdot \frac{1}{v_o^3}$$

eli likimäärin, koska α on erittäin pieni:

$$(18)\quad \frac{\partial z_r}{\partial v_o} = - \frac{gR^2}{v_o^3} \ .$$

Näin ollen

$$(19)\quad \Delta z_r(\Delta v_o) = - \frac{gR^2}{v_o^3} \cdot \Delta v_o \ .$$

Poikkeama piiruina taulun tasossa saadaan edellisestä:

$$(20)\quad \Delta r(\Delta v_o) = \frac{gR\cos\gamma}{v_o^3} \cdot 1000 \cdot \Delta v_o \ .$$

Lentonopeuden itseisarvon muutoksen välitön vaikutus on FM-koneen tarkkuutusarvoilla seuraavan taulukon mukainen.

Perusteet	Δv_o km/h	Δv_o m/s	Δz m	Δr piirua
v_o = 827 m/s, v_h = 520 km/h } v_p=971 m/s R = 500 m γ = 20° α = 0,14°	50	13,8	0,037	0,069
	100	27,8	0,074	0,14

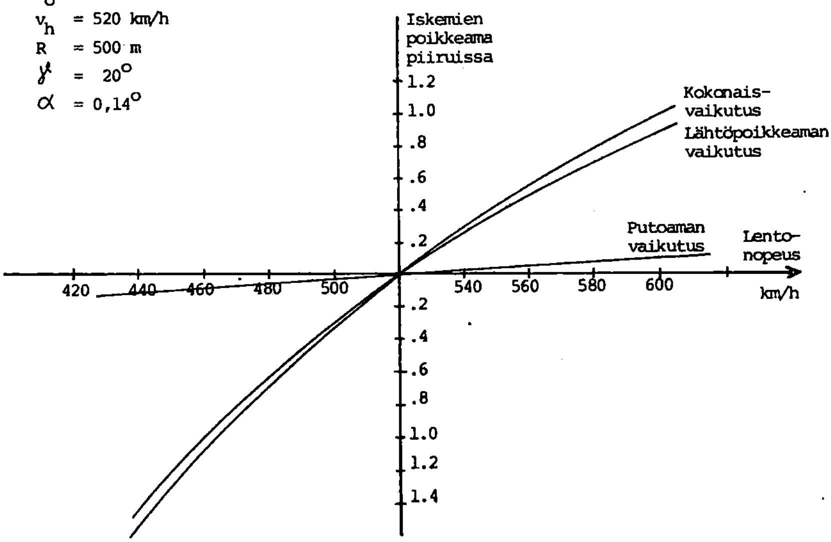
Taulukko 2. Lentonopeuden itseisarvon muutoksen vaikutus.

Huomioon ottaen kohdassa 2.2.2. saatu tulos voidaan todeta, että lentonopeuden muuttuessa aiheutuu iskemien poikkeaminen pääasiassa kohtauskulman muutoksen aiheuttamasta lähtöpoikkeamasta. Lentonopeuden itseisarvon muutoksen välitön vaikutus putoamaan on vähäinen.

Nomogrammi lentonopeuden pienten muutosten kokonaisuudessaan aiheuttamasta iskemäpisteen muutoksesta on kuvassa 9.

Perusteet

v_o = 827 m/s
v_h = 520 km/h
R = 500 m
γ = 20°
α = 0,14°



Kuva 9. Lentonopeuden muutoksen vaikutus FM-koneella

2.4.4. Ampumaetäisyyden pienten muutosten vaikutus

Putoaman muutos tarkkuutusetäisyydestä poikkeavalla ampumaetäisyydellä saadaan suoraan käytetyn ammuksen putoamapiirroksesta, jonka tulee olla laadittu tarkkuutusolosuhteita vastaavalla lähtönopeudella ja syöksykulmalla. Tällaisen piirroksen puuttuessa voidaan poikkeaman likimääräiseen arviointiin käyttää piirrosta, joka on saatu koeammunnoissa kiinteällä aseella vaakatasossa.

Matemaattisesti voidaan virheelle johtaa likimääräinen malli seuraavasti.

$$(21)\quad \frac{\partial z}{\partial R} = (\cos\gamma \tan\ (\gamma-\alpha) + \frac{gR\cos^2\gamma}{v_o^2\cos^2(\gamma-\alpha)})\ .$$

Koska vertailu tapahtuu tasossa, joka on kaltevuuskulmalla γ vaakatasoon nähden, on edellisestä vähennettävä tekijä Δ Rsin γ .

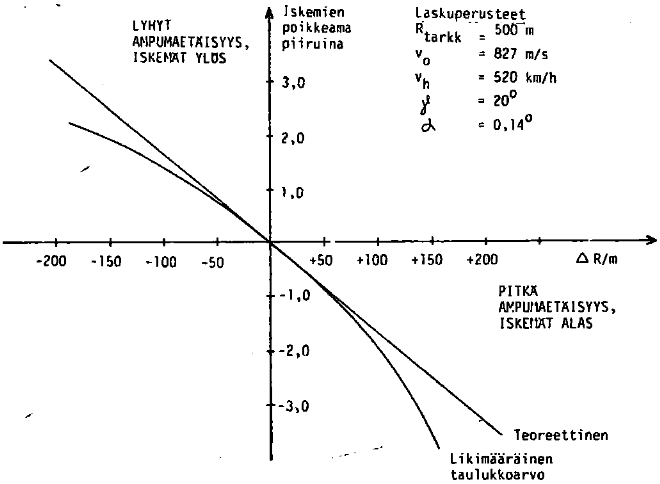
Likimääräiseksi lentoradan poikkeamaksi taulun kohdalla saadaan seuraava kaava:

$$(22)\quad \Delta z_r(\Delta R) \approx ((\cos\gamma \tan(\gamma-\alpha) + \frac{gR\cos^2\gamma}{v_o^2 \cdot \cos^2(\gamma-\alpha)}) - \sin\gamma) \cdot \Delta R\ .$$

Säteittäiseksi poikkeamaksi piiruina saadaan:

$$(23)\quad \Delta r\ (\Delta R) \approx ((\cos\gamma \tan(\gamma-\alpha) + \frac{gR\cos^2\gamma}{v_o^2\cos^2(\gamma-\alpha)}) - \sin\gamma)\frac{1000\ \Delta R}{R}.$$

Nomogrammi Δ R:n vaikutuksesta FM-koneen tarkkuutusarvoilla on kuvassa 10, johon havainnollisuuden vuoksi on lisätty ammuksen putoamapiirros.



Kuva 10. Väärästä ampumaetäisyydestä johtuva iskemien poikkeama

3. YHTEENVETO VIRHETEKIJÖIDEN VAIKUTUKSESTA TULEN TARKKUUTEEN JA SUOSITUKSET AMMUNNAN SUORITTAMISTA VARTEN

3.1. Yhdistelmä virhetekijöiden vaikutuksesta

Eri virhetekijöiden vaikutusta käsiteltäessä on todettu, että niillä on huomattavia suuruusluokkaeroja. Asian havainnollistamiseksi on seuraavaan taulukkoon kerätty kunkin virhetekijän suuruusluokka tyypillisessä ammuntatilanteessa FM-koneella.

Virhetekijä	Poikkeaman suuruusluokka piiruina	Arviointiperusteet	
Tuuli	5	Kuten esimerkissä	kohta 2.1.
Virheellinen lentonopeus	1	—"—	kohta 2.2.2.
— kohtauskulman muutoksen suhteellinen osuus	0,9		
— lentonopeuden itseisarvon suhteellinen osuus	0,1		
Sivuluisu	5	Luisukulma 2°	
Kiihtyvyysmonikerta n ≠ 1	5	Kuten esimerkissä	kohta 2.2.4
Koneen kallistus	1	—"—	kohta 2.3.
Virheellinen syöksykulma	0,1	Taulukko I	kohta 2.4.2.
Virheellinen ampumaetäisyys	5	+ 200 m virhe	

Taulukko 3. Eri virhetekijöiden suuruusluokka lentoammunnassa.

Virhetekijöiden vaikutuksesta voidaan yhteenvetona todeta, että painavia virhetekijöitä on neljä eli tuuli, sivuluisu, arvosta yksi poikkeava kiihtyvyysmonikerta tulitushetkellä sekä väärä ampumaetäisyys. Muut virhetekijät aiheuttavat pienehkön poikkeaman; virheellinen syöksykulma niin pienen virheen, ettei sitä kannata ottaa lainkaan huomioon. Virheellinen lentonopeus vaikuttaa pääasiassa kohtauskulman muutoksen välityksellä. Jos nopeuden muutos on ohimenevä eikä kone ehdi saavuttaa jatkuvuustilaa kyseisellä lentonopeudella, ei tässäkään tapauksessa synny huomionarvoista virhettä.

Tärkeimpiä virhetekijöitä tarkasteltaessa voidaan todeta, että tuulitietojen osalta lentäjä on riippuvainen käytännöllisesti katsoen täysin ulkopuolisista tiedoista. Sen sijaan sivuluisun ja kiihtyvyysmonikerran $n \neq 1$ osalta on kyse täysin lentäjän omasta taidosta. Ampumaetäisyyden huomioon ottaminen on arvointikyvyn varassa ja kokemuksen mukaan vaikeaa outoon maaliin. Viime kädessä sekin on koulutuskysymys.

3.2. Suositukset ammunnan suorittamista varten

Yleissuositus ammunnan onnistumiseksi parhaalla mahdollisella tavalla on luonnollisesti edellä käsiteltyjen virhetekijöiden mahdollisimman huolellinen välttäminen. Koska virhetekijöillä on suuruusluokkaerot, on pahimpiin virhetekijöihin kiinnitettävä suurin huomio.

Lähtökohtana hyvään suoritukseen on tarkkuutusarvojen mahdollisimman huolellinen noudattaminen. Kone on säädettävä eli trimmattava lentämään mahdollisimman suoraan. Laukaisutilanteessa koneen on uitava moitteettomasti, ilman kallistusta ja kuula keskellä. Sauvassa ei saa olla vetoa eikä työntöä. Tähtäyspisteen poikkeamiset maalista korjataan moitteettomalla ohjauksella. Pelkkien jalkaohjainten käyttö johtaa luisumiseen ja iskemien poikkeamiseen. Koska syöksyn aikana nopeus lisääntyy ja nokka pyrkii nousemaan, on tähän varauduttava ja otettava tähtäyspiste aluksi hieman maalin alapuolelta, jolloin kone itsestään ajautuu ampumasyöksyn aikana oikeaan asemaan. Samoin tuuli pyrkii painamaan konetta myötätuuleen, joten tähtäyspisteeksi valitaan aluksi sopiva kohta tuulen yläpuolelta siten, että kone ajautuu tähtäyspistettä kohti, jonka paikka on laskettava etukäteen tuulitietojen perusteella.

Ohjausliikkeet tähtäyspisteen korjaamiseksi maalin keskipisteeseen (tähtäyspisteeseen) on oltava sitä pienempiä ja tarkempia, mitä lähemmäksi laukaisuhetkeä tullaan. Kone pitäisi mahdollisimman aikaisessa vaiheessa saada ohjatuksi sopivaan suuntaan maaliin nähden — tarvittaessa voimakkaillakin ohjausliikkeillä — mutta ohjaus pitäisi ennen laukaisuhetkeä saada rauhoittumaan ainakin 2—3 sekunniksi.

Laukaisuhetken lähestyessä on päähuomio kiinnitettävä ampumaetäisyyden tarkkailuun. On muistettava, että huomattavasti suurempi virhe on ampua liian kaukaa kuin liian läheltä.

Väistäminen maalin kohdalla tapahtuu nopeimmin — mikäli pyritään mahdollisimman etäälle maalista sirpaleiden takia — vetämällä suoraan ylös. Mikäli samalla pyritään kaartamaan, ei saavutettava etäisyys tule yhtä suureksi. Todellisissa suorituksissa tulevat taktilliset näkökohdat tietenkin määräämään menettelytavan.

Tempoileva ohjaustapa, jalkaohjainten karkea käyttö, tuulitietojen unohtaminen ja oikean ampumaetäisyyden arvioinnin laiminlyöminen ovat varmat keinot epäonnistua ampumasuorituksessa.

PÄÄTÄNTÄ

Lentokoneen asejärjestelmien menestyksellisen käytön edellytyksenä on käytettävän välineen ja menetelmien täydellinen tuntemus. Lentoammunnan teoreettiset perusteet muodostavat vain osan tästä kokonaisuudesta.

Tämä tutkimus, jolla on pyritty selvittelemään lähinnä lentoammunnan teoreettisia perusteita, on rajoittunut ilmasta maamaaliin tapahtuvan lentoammunnan virheiden selvittelyyn. Meikäläisen hävittäjätoiminnan keskeisempi alue on kuitenkin ilmamaalin torjunta ja siis ilmassa olevan maalin tulittaminen. Siihen liittyvä problematiikka on luonnollisesti maalin liikkeestä johtuen laaja-alaisempi, mutta perusteiltaan sama. Itse asiassa maamaaliin tapahtuvan tulituksen tutkiminen muodostaa ensimmäisen osan aiheen kokonaistutkimukselle.

Lentoammunnan suoritusta on tekniikan avulla pyritty helpottamaan kehittämällä yhä täydellisempiä tähtäinratkaisuja. Ennakon laskeva gyrotähtäin ilmamaalin tulitusta varten on ollut tunnettu jo pyöreästi neljä vuosikymmentä. Nykyhetken viimeiset tähtäinkonstruktiot ottavat automaattisesti huomioon ampumaetäisyyden. Koneen lentonopeus, kallistuma ja hetkellinen kohtauskulma mitataan myös ja asejärjestelmän keskuslaskin antaa myös nämä tekijät huomioon ottaen valmiit ampuma-arvot ohjaajan käyttöön. Sekä maaettä ilmamaaleja voidaan tunnetusti tulittaa myös ohjuksin, jotka itse hakeutuvat maaliin.

Mitä sitten enää vaaditaan ohjaajalta? Kieltämättä ohjaajan tehtävä huomattavasti helpottuu kehittyvän tekniikan myötä. Silti hänen tehtäväkseen jää koneen asianmukainen ohjaaminen ja automatiikan nopea ja oikea-aikainen käyttö. Tilanteet on osattava ennakoida ja kone on osattava ohjata hyvissä ajoin edulliseen ampumatilanteeseen, koska automatiikka ei pysty korjaamaan suuria virheitä.

Maamme ilmavoimia ajatellen joudutaan toteamaan, että meillä on tuskin koskaan kaluston kalleuden takia käytettävissä kehityksen kärjessä olevaa supervaltojen huipputekniikkaa. Lentokaluston keskimääräisessä iässä me olemme muutenkin aina jonkin verran jäljessä. Näin ollen meidän on varauduttava toimimaan kalustolla, jonka käytössä on pyrittävä kompensoimaan inhimillisellä suorituskyvyllä teknillisiä puutteita.

Lähteitä

Myrberg, P J: Differentiaali- ja integraalilaskennan oppikirja

SKK:n moniste: Yleinen ampumaoppi

Pernaa, V Y: Lentoampumaopin luentorunko kapteenikursseille

Spiegel, Murray R: Theoretical Mechanics