Doktori (PhD) értekezés

(tervezet)

Vozsech István

2025

NEMZETI KÖZSZOLGÁLATI EGYETEM
Katonai Műszaki Doktori Iskola

Vozsech István

K+F lehetőségek, különös tekintettel a több üzemállapotú rendszerekre az automata kézi lőfegyverek konstrukciós megoldásaiban

Doktori (PhD) értekezés

Témavezető:

dr. Hajdú Ferenc PhD

Budapest, 2025

TARTALOMJEGYZÉK

ELŐSZÓ

A változtatható kezdősebességű (a továbbiakban: kettős működésű) kézi lőfegyverekkel 2003-ban találkoztam először, amikor is dr. Bartha Tibor mérnök ezredes, a saját PhD értekezésében feldolgozta a nem halálos, kinetikus elven működő lőfegyverek akkori fejlesztési irányvonalait. Disszertációjában megemlíti a változtatható kezdősebességű lőfegyvereket, amelyeket az USA-ben fejlesztettek, kormányzati tender keretében. A kísérleti eszköz rendeltetése az lett volna, hogy a hagyományosnak tekinthető töltény lövedékét lényegesen kisebb torkolati sebességgel is ki lehet lőni a fegyverből, így a fegyver ebben az üzemállapotban nem halálos fegyverként működik. A téma szakirodalma szegényes volt, és a helyzet pozitívan máig sem változott, sőt az akkori digitális tartalmak is eltűntek, újak pedig nem születtek. Ebből levonhatjuk azt a következtetést, hogy az ilyen típusú termékek fejlesztése zsákutcába jutott, de azt nem, hogy ilyen fegyverek elméletileg sem létezhetnek.

A téma érdekessége okán a 2000-es években részben kidolgoztam a kettős működésű lőfegyverek ballisztikai összefüggéseit, és több lehetséges konstrukciót is megterveztem, konstrukciós tervezési szinten. A Magyar Honvédség és a hadiipar akkori leépülése és/vagy érdektelensége miatt ezen irányú tevékenységemet hobbi szinten folytattam, hivatalos fejlesztési témába állítására az akkori HM Technológiai Hivatalnál nem került sor.

A hazai hadiipar fejlődése ösztönzött arra, hogy ezt a meglehetősen régi témát „leporoljam”, és tisztán elméleti oldalról megközelítve, a mérnöki tervezést teljes mértékben ignorálva, doktori munka keretein belül igazoljam, hogy a kettős működésű fegyverek elméletileg megépíthetők.

BEVEZETÉS

Az automata kézilőfegyverek napjainkra gyakorlatilag elérték műszaki fejleszthetőségük végállapotát, konstrukciós „tartalékiak” kimerültek. A 20. század második felében ugyan egyes gyártók részéről voltak próbálkozások konstrukciós szinten megváltoztatott, a hagyományostól eltérő működésű fegyverek kifejlesztésére, de ezek a fejlesztések mind zsákutcának bizonyultak, a jelenlegi konstrukciós megoldások véglegesnek tekinthetők.

Az ezredforduló fejlesztéseinek fő iránya a különböző lövészfegyver típusok egy fegyverbe való integrálása volt – OICW program –, valamint új, innovatív technológiák adaptálása a hagyományos sorozatlövő fegyverek platformján. Ilyen próbálkozások voltak a Benelli CB-M2 géppisztoly, valamint a hozzá kifejlesztett 9x25 mm AUPO hüvely nélküli lőszer, továbbá a HK G11 gépkarabély. Bár az utóbbit a Bundeswehr-nél rendszeresítették, azonban a hozzá fűzött reményeket nem váltotta be [1], manapság mindkét eszköz legfeljebb technikatörténeti érdekesség.

A 90-es évekre a technika fejlődése miatt felgyorsult a hírközlés, ebből következően a média jelentősége megnőtt. A különböző harci cselekmények egyre szélesebb nyilvánosság előtt zajlottak, lehet mondani, hogy manapság sokszor élőben „élvezhetjük” ezeket. Ezzel összefüggésben megállapítható, hogy „A katonai műveletekkel kapcsolatban nagyfokú társadalmi és politikai érzékenység figyelhető meg szerte a világon [2, p. 4]”. Nyilvánvaló következménye kell legyen a hírközlés fejlődésének, hogy a katonai műveletek, harci cselekmények során minimalizálni szükséges az áldozatok, de kiváltképpen a polgári áldozatok számát. A nem katonai, hanem rendészeti jellegű feladatok végrehajtása során a fentiek különösen érvényesek, gondoljunk csak a számos nyugat európai eseményre, ahol köztörvényes bűnözők – egyébként teljesen jogszerű –, lelövése miatt törnek ki utcai zavargások. A nagyfokú társadalmi „érzékenység” miatt napjainkban megfigyelhető a kevésbé halálos eszközök iránti fokozott érdeklődés és igény, különösen rendvédelmi felhasználási területen. Az egyre sűrűbb helyi feszültségek, konfliktusok, háborúk miatt fokozott igény mutatkozik békeműveletekre is. Ezeket a feladatokat legtöbbször nemzeti, vagy nemzetközi katonai erők hajtják végre, tehát katonai szervezeteknek egyre sűrűbben kell majd rendvédelmi feladatokat ellátnia. Ez alól nem kivétel a Magyar Honvédség sem, gondoljunk csak a különböző missziós feladatokra, de legfőképpen Magyarország határait terhelő migrációs nyomásra, ahol a határvédelmet a Honvédség rendőri erőkkel látja el, kifejezetten rendészeti feladatokat végezve. Végig lehet gondolni, és be lehet látni azt, hogy halálos erő alkalmazása ebben az esetben milyen következményekkel járna. Összefoglalva mondható, hogy felhasználói oldalról egyértelműen jelentkezik az igény a nem, vagy kevésbé halálos eszközök iránt, de a felhasználónak egyben meg kell tartania azt a képességét is, hogy szükség esetén halálos erő bevetésére is képes legyen. Ez a képesség jelenleg legalább két fegyverrel biztosítható, ezen változtathatnak a több üzemállapotú lőfegyverek.

Megfigyelhető, hogy a gyártók elkülönültek, a nem halálos eszközöket más cégek fejlesztik és gyártják, mint a hagyományos lövészfegyvereket, átjárás legfeljebb annyiban van, hogy a NATO-ban szabványosított sínrendszerekre applikálnak a felhasználók különböző nem halálos eszközöket, valamint némely lőszergyártó forgalmaz nem, vagy kevésbé halálos lőszertípusokat, amelyeket hagyományos lövészfegyverekből lehet használni, több-kevesebb megszorítással. Fontos látni, hogy egy katona, vagy zsoldos felszerelése legalább 20 kg, így minden egyes újabb kiegészítő eszköz, fegyver, felszerelés alkalmazása megfontolás tárgyát kell képezze. Jogosan merülhet fel a kérdés, hogy van-e lehetőség például egy hagyományos lövészfegyvert kiegészíteni nem halálos eszközzel, hogy az ne két különböző szerelési egység összeépítéséből álljon, hanem mint új konstrukció önmagában biztosítsa a kettős működést? Az ipari K+F szektor egy válasza volt erre az amerikai Army Research Laboratory (ARL) kísérleti lövészfegyvere, a Variable Velocity Rifle System (VVRS) [2, p. 64]. Az elképzelés szerint egy .50-es űrméretű csőből kilőtt accelerátor csészébe ültetett 5,56 mm-es lövedéket lehet több kezdősebességgel kilőni úgy, hogy a cső több pontján zárható gázleeresztő furatok segítségével lehet a gáznyomást variálni, amely a kezdősebességre hat. A működés elve egyrészt a változtatható kinetikus energián, másrészt annak felületre értelmezett fajlagos értékén alapult, miszerint nagy sebességek esetén az accelerátor csésze a légerők hatására leválik, és a tovább repülő nagy sebességű lövedék hagyományos módon pusztítja a célt, kis sebességű kilépés esetén pedig a csésze nem válik le a lövedékről, így egyrészt kisebb sebességgel, másrészt nagyobb felülettel csapódik a célba, amibe jó esetben nem hatol be. Mint elképzelés igen gondolatébresztő, de sorozatgyártott termék nem készült az ötlet nyomán, csak technológiai demonstrátor fázisig jutott a fejlesztés, egy .50 BMG kaliberű ismétlő rendszerű puska átalakításával. A fejlesztés vélhetően teljesen elhalt, szakfolyóiratok internetes felületein, valamint az Army Research Laboratory, mint egykori fejlesztő hivatalos oldalán már semmilyen információ nem található.

Látható, hogy felhasználói igény **mutatkozhatna** konstrukciós szinten egyesített halálos/nem halálos fegyverek alkalmazására, de ilyen konstrukciók jelenleg nem állnak rendelkezésre, legalábbis piaci termékként nem. Mindazonáltal konkrét felhasználói igényt nem is lehet várni olyan termék iránt, amely új, eddig nem ismert megoldásokat tartalmaz, és/vagy új képességekkel rendelkezik, de még nem létezik, ugyanis ez a fajta előrelátó, előrejelző gondolkodásmód nem várható el felhasználói szinten, ők abból válogatnak, ami van, nem pedig abból, ami majd talán lesz. Ezeknek a termékeknek a kifejlesztése minden esetben az ipari K+F szereplők feladata, a várható igények és gazdasági haszon figyelembevételével.

KUTATÁSI CÉLKITŰZÉSEK

Doktori értekezésem elkészítésénél az alábbi részfolyamatokat hajtottam végre, két hipotézisem igazolása érdekében:

1 Megvizsgáltam a létező automatika rendszereket. Komplex ballisztikai-dinamikai modelleket állítottam fel azok működésének szimulálására annak érdekében, hogy a modellek segítségével a lehető legkevesebb méréssel, jó leírását kapjam azon automatika rendszereknek, amelyek alkalmassá tehetők, kiterjeszthetők több üzemállapotú rendszerek megalkotásához.

2 Ballisztikai témájú szakirodalmi kutatás után, létező fegyverkonstrukciókra fizikai modelleket állítottam, majd azokat a kettős modellállítás szabályai szerint matematikai modellekre bontottam. A megalkotott modellek egyenleteit saját fejlesztésű szoftverek segítségével megoldottam, és az így kapott eredményeket – ahol ez lehetséges volt –, validáltam. A mérésekkel visszaigazolt eredményeket a [3], illetve a [4] tanulmányokban közzétettem.

3 Megvizsgáltam annak a lehetőségét, hogy a hagyományos elven működő automatika rendszerek alkalmassá tehetők-e csökkentett energiaszintű[1]

[1] A csökkentett energiaszintű üzemállapotban a lövedék mozgási energiája legalább egy nagyságrenddel kisebb, mint a kézi lőfegyvereknél megszokott, ún. normál vagy hagyományos üzemállapot esetén.

üzemmódban való alkalmazásra. Ennek folyamán kiválasztottam két merőben eltérő műszaki megoldást, amelyekre a szükséges szimulációkat elvégeztem, és részben mérésekkel validáltam.

4 Megvizsgáltam a legkisebb lövedéksebesség problémáját, amely mellett a fegyver még üzembiztosan működtethető. Ennek keretében számítási eljárást dolgoztam ki a minimális sebesség meghatározására, valamint ajánlásokat tettem a kettős működésű rendszerek fegyver- és lőszerkonstrukcióival kapcsolatban.

KUTATÁSI MÓDSZEREK

Munkám történeti áttekintés részénél szekunder kutatási módszert alkalmaztam. Tanulmányoztam és feldolgoztam a relevánsnak ítélt publikációkat és könyveket. Az ezekből nyert adatokból, információkból következtetéseket vontam le azon műszaki megoldásokra, amelyek alkalmassá tehetők a több üzemállapotú fegyverek műszaki megvalósítására.

A módosított konstrukciók fizikai modelljeinek, egyenleteinek kidolgozásánál a klasszikus fizika egyenleteit felhasználva állítottam elő azokat. A modellek egyszerűsítéseinél, elhanyagolásainál figyelembe vettem a modell elhanyagolásainak várható hatását.

A validáló mérési eljárásaim, mint a primer-kvantitatív módszerek, viszonylag kevés mintavételi ponttal rendelkeztek, de a validálási feladathoz ezek elégségesek voltak.

A legkisebb lövedéksebesség elméleti meghatározásánál a BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP és az OIML nevében publikált, „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” nemzetközileg elfogadott útmutató ajánlásait vettem figyelembe, a lőszerparaméterek gyártási szóródásából származó bizonytalanságok meghatározásánál.

AZ ELVÉGZETT KUTATÁS RÖVID ISMERTETÉSE FEJEZETENKÉNT

A tudományos kutatómunkám eredményeit összefoglaló értekezésem négy fejezetből áll, melyek az alábbi tömör leírás szerint készültek:

Az első fejezetben:

1 Szakirodalmi kitekintéssel rövid összefoglalását adtam a lőporral működő lőfegyverek fizikájának, a fegyverben lejátszódó ballisztikai folyamatok elemzésével.

2 Ismertettem az általam használt klasszikus belsőballisztikai egyenletrendszert, mint kiindulási alapot a nem hagyományos konstrukciók számításaihoz.

A második fejezetben:

1 Igazoltam az első hipotézisem, miszerint: *„Tervezhető olyan hagyományos lőszert tüzelő automata kézilőfegyver, amely normál „halálos" és – egy üzemállapotváltó-kapcsoló működtetésével – mintegy egy nagyságrenddel kisebb energiaszintű lövedéket lő ki, mindezt úgy, hogy az automatika mindkét üzemállapotban rendeltetésszerűen működik."*

2 Az igazolást két különböző műszaki megoldású rendszerre is elvégeztem, alternatívát adva a jövőbeni konstrukciós megoldások megvalósításához. Az egyik egy speciális gázmotorral ellátott konstrukció, a másik egy változtatható reteszelési rendszerű műszaki megoldás. Mindkét esetben ismertettem a megoldások modelljeit, valamint a szimulációs futtatások eredményeit, ezzel igazolva az első hipotézisem.

A harmadik fejezetben:

1 Igazoltam a második hipotézisem: *„Létezik és kiszámítható egy kritikus lövedékenergia, amely a csökkentett energiaszintű üzemmódban a fegyverből kilőtt lövedék legkisebb energiája, ami alá a lövedék energiája nem csökkenthető az üzembiztonság jelentős romlása nélkül."*

2 A fegyver-lőszer rendszer bizonytalansági változóinak feltásásával, valamint a gyártás jellemző szórásjellemzőinek figyelembevételével megalkottam az összegzett bizonytalanságra vonatkozó elméleti sűrűségfüggvényt.

3 A sűrűségfüggvény ismeretében megállapítottam az adott meghibásodási valószínűséghez rendelhető minimális lövedéksebességet.

4 A bizonytalansági változók elemzésével javaslatot tettem ezek hatásainak csökkentésére, a lőszer és a fegyver konstrukciós tervezésének támogatására.

A negyedik fejezetben:

1 Összegeztem kutatásaim tapasztalatait, eredményeit az elosztott paraméterű ballisztikai rendszerekről.

2 Összegeztem a kutatásaim mellékszálaként kapott eredményeimet a nagysebességű videófelvételek kiértékeléseinek sajátos problémáiról.

1 A HAGYOMÁNYOS MÓDON MŰKÖDŐ AUTOMATA FEGYVEREK MŰKÖDÉSE

A sorozatlövő fegyverek automatikájuk működése szempontjából két fő csoportba sorolhatók. Az egyik a lőporgázok energiáját közvetlenül felhasználó, a másik pedig közvetetten a lövés impulzusát kihasználó műszaki megoldások. Közös jellemzőjük, hogy az automatikájukat mindkét esetben a lőporgázok energiája működteti. Az automata lőfegyverek hőerőgépek, amelyek a lőporban tárolt (kémiailag kötött) hőenergiát alakítják mozgási energiává.

Ha dinamikai szempontból vizsgáljuk működésüket, akkor megállapíthatjuk, hogy automatikájuk főmozgását modellezhetjük egy többszabadságfokú, erőgerjesztett, csillapított lengőrendszer mozgásával, amelyet jó közelítéssel leegyszerűsíthetünk egyszabadságfokú rendszerré.

A működést a lengőrendszer alkotóelemein kívül a gerjesztés milyensége határozza meg, azaz a fegyvercsőben kialakuló gáznyomás, de ez a gáznyomás egyben a kialakuló lövedéksebesség, lövedékút és lőporégésért is felelős.

A következőkben a gerjesztésért felelős ballisztikai egyenletrendszert vizsgáljuk, kiterjesztve azt a több üzemállapotú fegyverek számításaihoz szükséges módon.

1.1 A LŐPORÉGÉS ÉS ÉGÉSI MODELLJE

Lőpornak nevezhetünk minden olyan szilárd anyagot, amely összetételénél fogva alkalmas arra, hogy egy lövedéket a kívánt sebességre, a kívánt paraméterek (pl. maximális nyomás) teljesítése mellett felgyorsítson, a fegyver-lőszertechnikában jellemző tartományokon belül. A XIX. század közepén feltalált gyér füstű lőpor alapanyaga a nitrált cellulóz, a korábbinál (fekete lőpor) hatékonyabb energiahordozó, amely a kor tudósait a lövési folyamatok pontos leírására, a kémikusokat a lőfegyverek működtetéséhez szinte használhatatlan szálas anyag használhatóvá tételére késztette. A nitrált cellulózszálak feloldása, majd adott geometriai alakzatra formázása jelentette a megoldást. Az így keletkező szemcsés anyagot nevezzük gyérfüstű lőpornak. Ez egykomponensű, egyfázisú szilárd anyag, diszkrét geometriai formával, amit lőpornak csak hagyományból neveznek.

A második világháború előtt kialakultak a több bázisú lőporok, az alapösszetevőben megjelentek más nitrált szénhidrogének. Ezek az ún. több bázisú lőporok, energiaforrásuk többfajta vegyület szilárd oldata. Ezeket a lőporokat a többkomponensű, egyfázisú szilárd anyagok kategóriájába lehet sorolni. A lőporok hatásosságát a fajlagos energiatartalmuk (égéshő, $\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$) jellemzi. A többkomponensű lőporokat azért fejlesztették ki, mert ezek fajlagos energiatartalma nagyobb, mint az egykomponensűeké. A kézi lőfegyverek töltényeiben leggyakrabban egy- vagy kétbázisú nitrált cellulóz alapú lőport használnak, mi is ennek a ballisztikáját fogjuk vizsgálni.

A hajtóanyagok kémiai átalakulása bonyolult fizikai-kémiai folyamat. Amiben a modellek megegyeznek, a lőpor a felületén ég, és alapvetően három reakciózónát lehet elkülöníteni.

1 lőporszemcse felület,

2 gáznemű reakciózóna,

3 gáztér, a reakció befejeződik.

Mérésekkel igazolható, hogy a felületre merőleges lineáris égési sebesség – a reakciórend és a gázfázis-mechanizmusból a felület-mechanizmusba való átmenet miatt –, erősen függ a nyomástól, ezért írható az alábbi egyenlet:

$$\frac{de(t)}{dt} = C \cdot p(t)^{\nu}, \qquad 1\text{–}1$$

ahol:

ν egy nyomásfüggő anyagjellemző, mértékegysége: nincs,

C egy anyagfüggő konstans, mértékegysége: $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{Pa \cdot s}}$,

$p(t)$ a lőporgáz nyomása az idő függvényében, mértékegysége: Pa,

$e(t)$ a felületre merőleges irányban leégett rétegvastagság az idő függvényében, mértékegysége: m.

Mérési eredményekből az is megfigyelhető, hogy ν értéke a nyomás emelkedésével aszimptotikusan, szigorúan monoton növekszik az egységhez, valamint a C anyagfüggő konstans értéke a lőporszemcse környezeti nyomáson mérhető, felületre merőleges lineáris égési sebessége. Ezekkel a 1–1 egyenletünk a következő egyszerűbb alakot ölti:

$$\frac{de(t)}{dt} = u_1 \cdot p(t), \qquad 1\text{–}2$$

ahol u_1 a lőporszemcse környezeti nyomáson mérhető, felületre merőleges lineáris égési sebessége, mértékegysége: $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s \cdot bar}}$.

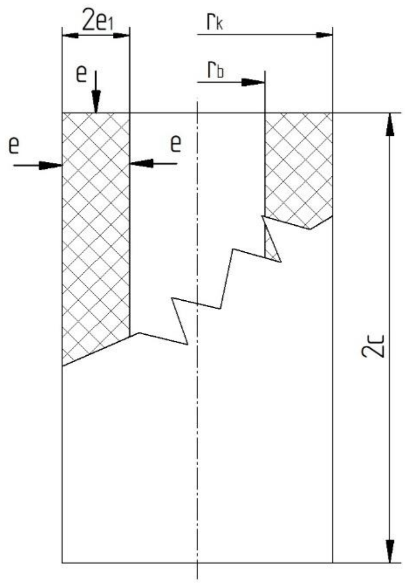
Meg kell jegyezni, hogy rakéták reaktív hüvelyeinek számításai során a ν paraméter nem közelíthető egységgel.

1.2 GEOMETRIAI ÉGÉSI MODELL ÉS A LINEÁRIS ÉGÉSI TÖRVÉNY

A modell fő kikötése, hogy lőportöltet adott geometriájú lőporszemcsékből épül fel, azaz minden lőporszemcse egybevágó geometriai objektum. A geometriai égési modell alapján a lőpor a felületén, a kezdeti felülettel paralel rétegekben ég, így geometriájának jellegét az égés végéig megőrizi. Amennyiben élünk azzal a feltételezéssel, hogy minden lőporszemcse egybevágó, valamint a lőportöltetet egyszerre, egyenletesen az egész felületen sikerül begyújtani, úgy a lőportöltet egyszerre fog elégni, amely egyszerűsítés a számításokat nagymértékben megkönnyíti.

A geometriai égési modellt azért használjuk, mert annak állandói csak a lőpor geometriájából származnak, mérési eredményekre nincs szükség, amely elméleti tárgyalásunkhoz a legjobban illeszkedő modell.

Egy egylyukú csőlőporra a geometriai égési modell paramétereinek (a_1, a_2, a_3) meghatározását – az 1. ábra szerinti jelölésekkel –, az alábbiak szerint végezzük:



1. ábra: Egy egylyukú cső geometriájú lőporszemcse hosszmetszete a jellemző méreteivel.

Felírjuk a lőporszemcse elégett térfogatát az e változó függvényében egy r_k, r_b és $2c$ méretekkel jellemezhető cső alakú geometria esetében:

$$w(e) = \pi \cdot \left(2 \cdot c \cdot ({r_k}^2 - {r_b}^2) - 2 \cdot (c - e)((r_k - e)^2 - (r_b + e)^2)\right), \tag{1–3}$$

amelyet kifejtve és rendezve kapjuk, hogy:

$$w(e) = -4 \cdot \pi \cdot (r_k + r_b) \cdot e^2 + 2 \cdot \pi \cdot (2 \cdot c \cdot (r_k + r_b) + {r_k}^2 - {r_b}^2) \cdot e. \tag{1–4}$$

Az alaktényezők az e független változó koefficiensei, tehát bármely geometria esetén az alaktényezők csak a geometria jellegéből meghatározhatók. Ezek a példában szereplő, minden felületén égő egylyukú és körkeresztmetszetű csőlőporra:

$$a_1 = 2 \cdot \pi \cdot (2 \cdot c \cdot (r_k + r_b) + {r_k}^2 - {r_b}^2), \tag{1–5}$$

$$a_2 = -4 \cdot \pi \cdot (r_k + r_b), \tag{1–6}$$

$$a_3 = 0, \tag{1–7}$$

ahol:

a_1, a_2, a_3 az elégett lőportérfogat-függvény együtthatói egy szemcsére, mértékegységeik m^2, m, egység,

A geometriai égésmodell alapján a lőporszemcse elégett térfogatának függése az elégett réteg vastagságától:

$$w(e) = a_3 \cdot e^3 + a_2 \cdot e^2 + a_1 \cdot e, \tag{1–8}$$

Egy lőporszemcse tömege az égés előtt:

$$\omega_1 = \varrho_{lp} \cdot (a_3 \cdot {e_1}^3 + a_2 \cdot {e_1}^2 + a_1 \cdot e_1), \tag{1–9}$$

az elégett lőportöltet tömege az égés folyamán az égőréteg függvényében:

$$\omega(e) = w(e) \cdot \varrho_{lp} \cdot \frac{\Omega_0}{\omega_1}, \tag{1–10}$$

ahol:

e_1 a lőporszemcse félfalvastagsága, mértékegysége m,

ϱ_{lp} a lőpor sűrűsége, mértékegysége: $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$,

Ω_0 a betöltött lőpor tömege, mértékegysége: kg.

Az előbbiek alapján a térfogatváltozási sebesség:

$$\frac{d}{dt} w(e) = \frac{\omega_1 \cdot \left(\frac{d}{dt} \omega(e)\right)}{\Omega \cdot \varrho_{lp}}, \tag{1–11}$$

a gázfejlesztési sebesség pedig a deriválás kifejtése nélkül:

$$\frac{d}{dt}\omega(e) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\Omega \cdot \varrho_{lp}}{\omega_1} \cdot (a_3 \cdot e^3 + a_2 \cdot e^2 + a_1 \cdot e)\right). \qquad 1\text{–}12$$

1.3 A GÁZNYOMÁSFÜGGVÉNY

A fegyvercsőben kialakuló gáznyomás meghatározásához modellt kell állítanunk a lövési folyamatra. Ehhez meg kell tudnunk határozni a lövésfolyamat során felszabaduló hőenergia felhasználódásának részeit. A lövési folyamatunkban a lőporgázok energiáját csak részben tudjuk a lövedék gyorsítására felhasználni. A lövedék által felhasznált energia egyrészt a körfolyamat nyomásviszonyának a függvénye, másrészt a keletkező másodlagos munkáké.

Nézzük meg, hogyan alakulnak az energetikai viszonyok huzagolt csövű fegyverek esetében.

A teljes lőporenergia egyenleg csöves lőfegyvereknél az alábbiak szerint alakul:

$$Q_{lp} = \sum_{i=1}^{10} E_i, \qquad 1\text{–}13$$

ahol:

Q_{lp} a rendszerbe bevitt lőporenergia, mértékegysége: J, aránya; 100%,

E_1 a lövedék haladó mozgási energiája, mértékegysége: J, aránya; cca. 30-45%,

E_2 a lövedék forgási energiája, mértékegysége: J, aránya; cca. 0,2%,

E_3 a fegyver mozgási energiája, mértékegysége: J, aránya; cca. 0,1%,

E_4 a lőporgázok és a lőporszemcsék kinetikus energiája, mértékegysége: J, aránya; cca. 3,5%,

E_5 a lövedék és a csőfal közti súrlódási munka, mértékegysége: J, aránya; cca. 3%,

E_6 a besajtolódási munka, mértékegysége: J, aránya; cca. 2%,

E_7 a gázmegszökés által elveszett energia, mértékegysége: J, aránya; cca. 0,1%,

E_8 a lövedék előtt lévő levegőoszlop gyorsítására fordított munka, mértékegysége: J, aránya; cca. 0,1%,

E_9 a fegyver szerkezeti elemek, a lövedék és a hüvely felmelegedése révén elvesző hőmennyiség, mértékegysége: J, aránya; cca. 21%,

E_{10} a kilépő gázok által képviselt kalorikus energia, mértékegysége: J, aránya; cca. 37%. [5]

Látni kell, hogy **az E_1 szimbólummal értelmezett energia részaránya, egyben a fegyver hatásfoka**.

A folyamat modellezésénél az alábbi feltételezések, elhanyagolások, egyszerűsítések alkalmazhatók:

1 Főmunkának csak az E_1 energiát tekintjük.

2 Másodlagos munkáknak tekintjük az $E_2,\ E_3,\ E_4,\ E_5$ energiákat.

3 A másodlagos munkák az egész lövési folyamat alatt arányosak a főmunkával[2].

4 Az $E_6,\ E_7,\ E_8$ energiákat elhanyagoljuk.

5 Az E_9 energiával nem foglalkozunk, ugyanis kikötjük, hogy a fajlagos fali hőelvonás a lövés alatt állandó értékű, hatására a bombakísérletekkel meghatározott "force" érték a jellemző, amely a jellemző hőveszteségekkel csökkentett fajlagos energia.

6 Az E_{10} energiával külön nem foglalkozunk, ugyanis az az egyenleteinkből közvetlenül számítható, azaz ott figyelembe vesszük.

7 A lövés folyamán a rendszer összes intenzív állapotjelzője homogén eloszlású a rendszeren belül, azaz a rendszer koncentrált paraméterű.

8 A lőporgázok összetétele a lövési folyamat alatt nem változik, fajhői konstansok, azaz a fajhőviszony állandó.

9 A lőpor égése követi a geometriai égéstörvényt.

10 A lőpor égési sebessége egyenesen arányos a nyomással.

11 A lövedék mozgása akkor kezdődik, amikor a kialakuló nyomás eléri a besajtolódási nyomást.

12 A csövet merevtestként idealizáljuk.

13 A gyújtónyomás statikus értékét vesszük figyelembe az inicializálásnál, a csappantyúelegyből származó gázok összetételét azonosnak vesszük a lőporgázok összetételével.

A pirodinamika alapegyenletének előállítása – azaz a gáznyomásfüggvény

---

[2] Amennyiben az arányosságot kikötjük, úgy a számítások leegyszerűsödnek, ui. elégséges a főmunkát kiszámítani és egy arányossági tényező segítségével a másodlagos munkák hatása egyszerűen figyelembe vehető.

megadása – előtt definiálunk kell a rendszer másodlagos munkáit.

A rendszer másodlagos munkáinak nevezve az E_2, E_3, E_4, E_5 energiákat írható, hogy:

$$E_i = k_i \cdot \frac{1}{2} \cdot m_{löv} \cdot v^2, \tag{1–14}$$

és:

$$\varphi_0 = 1 + \sum_{i=2}^{5} k_i, \tag{1–15}$$

valamint:

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{\Omega_0}{3 \cdot m_{löv}}, \tag{1–16}$$

ahol:

$m_{löv}$ a lövedék tömege, mértékegysége: kg,

v a lövedék sebessége, mértékegysége: $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$,

φ_0 az univerzális lövegállandó, mértékegysége: nincs,

φ a fiktív lövedéktömeg együtthatója, mértékegysége: egység. Ezzel a korrekciós tényezővel vesszük figyelembe a rendszer másodlagos munkáit.

Az univerzális lövegállandó megadható a fegyver jellegének (pisztoly, puska, ágyútarack, páncéltörő ágyú stb.) ismeretében.

Értéke $\varphi_0 = 1{,}03 \ldots 1{,}30$ között mozog:

- légvédelmi löveg: $\varphi_0 = 1{,}03$,
- páncéltörő ágyú: $\varphi_0 = 1{,}05$,
- tarack: $\varphi_0 = 1{,}06$,
- puska: $\varphi_0 = 1{,}20$,
- pisztoly: $\varphi_0 = 1{,}30$.

A termodinamika I. főtétele szerint állandó térfogatú térben a bevitt hőmennyiség egyenlő a belső energia megváltozásával. Ennek alapján:

$$Q(t) = U(t), \tag{1–17}$$

azaz esetünkben:

$$Q(t) = Q_e \cdot \omega(t), \tag{1–18}$$

A közölt hőenergia izochor esetben egyenlő a gázok belső energiájával, amely az égés végi hőmérséklettel:

$$Q(t) = c_v \cdot T_1 \cdot \omega(t),$$ 1–19

ahol:

Q_e a lőpor felső fűtőértéke (égéshője), mértékegysége: $\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}$,

c_v a lőporgázok izochor fajhője, mértékegysége: $\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg \cdot K}}$,

T_1 a lőporgázok égés végi izochor gázhőmérséklete, mértékegysége: K,

$Q(t)$ a felszabaduló hőmennyiség függvénye, mértékegysége: J,

$U(t)$ a belső energia függvénye, mértékegysége: J.

A termodinamika I. főtétele, ha van munkavégzés is:

$$Q(t) = U(t) + L(t).$$ 1–20

Az ideális gázok belső energiája:

$$U(t) = c_v \cdot T(t) \cdot \omega(t),$$ 1–21

a gázok által végzett munka:

$$L(t) = \frac{\varphi \cdot m \cdot v(t)^2}{2},$$ 1–22

ahol:

$T(t)$ a rendszer gázainak hőmérséklete az idő függvényében, mértékegysége: K,

$L(t)$ a rendszeren végzett munka az idő függvényében, mértékegysége: J.

A termodinamika I. főtételének 1–20 egyenletébe írjuk be a 1–19, a 1–21 és a 1–22 formulákat. Ekkor kapjuk, hogy:

$$c_v \cdot T_1 \cdot \omega(t) = c_v \cdot T(t) \cdot \omega(t) + \frac{\varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{2}.$$ 1–23

Ez $L(t)$-re rendezve:

$$c_v \cdot \left(T_1 - T(t)\right) \cdot \omega(t) = \frac{\varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{2}.$$ 1–24

Fejezzük ki a gázhőmérsékleteket a gáznyomás felhasználásával. Mivel:

$$c_p - c_v = R_{spec},$$ 1–25

ahol c_p a lőporgázok izobár fajhője, mértékegysége: $\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg \cdot K}}$. Ezzel:

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v},$$ 1–26

ezért:

$$c_v = \frac{R_{spec}}{\kappa - 1}, \qquad 1\text{–}27$$

ahol

κ a lőporgáz adiabatikus vagy politropikus fajhőviszonya, mértékegysége: egység,

R_{spec} a lőporgáz specifikus (egyedi) gázállandója, mértékegysége: $\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg \cdot K}}$.

Mindezeket felhasználva a 1–24 egyenletbe helyettesítsük be a 1–27 egyenletet, ekkor kapjuk, hogy:

$$\frac{R_{spec} \cdot \left(T_1 - T(t)\right) \cdot \omega(t)}{\kappa - 1} = \frac{\varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{2}. \qquad 1\text{–}28$$

A nagy nyomású gázok egyszerűsített állapotegyenlete esetünkben:

$$p \cdot (W - b) = \Omega_0 \cdot R_{\mathrm{spec}} \cdot T, \qquad 1\text{–}29$$

ahol b a lőporgázok saját (tömör) térfogata, mértékegysége m^3.

Ezt felhasználva:

$$R_{spec} = \frac{p(t) \cdot W(t)}{\omega(t) \cdot T(t)}. \qquad 1\text{–}30$$

Felhasználva a ballisztikai bombamérések során meghatározott, ún. force érték (a lőpor maximálisan hasznosítható fajlagos energiája) definícióját:

$$f = R_{spec} \cdot T_1, \qquad 1\text{–}31$$

melynek mértékegysége: $\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}$.

Helyettesítsük be a 1–30 formulát a 1–28 egyenletbe, ekkor:

$$\frac{\left(f - \frac{p(t) \cdot W(t)}{\omega(t) \cdot T(t)} \cdot T(t)\right) \cdot \omega(t)}{\kappa - 1} = \frac{\varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{2}, \qquad 1\text{–}32$$

kifejtve és egyszerűsítve:

$$\frac{f \cdot \omega(t) - p(t) \cdot W(t)}{\kappa - 1} = \frac{\varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{2}, \qquad 1\text{–}33$$

végül a nyomásra rendezve megkapjuk a lőporgázok nyomásának időfüggését:

$$p(t) = \frac{f \cdot \omega(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{W(t)}. \qquad 1\text{–}34$$

Vezessük be a végtelen nagy nyomáson értelmezett fajtérfogatot a lőporgázokra, és nevezzük el kovolumennek:

$$\alpha = \frac{W_{gáz\, p=\infty}}{\Omega_0} = \frac{b}{\Omega_0}, \qquad 1\text{–}35$$

amely mértékegysége: $\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{kg}}$.

A kovolumennel felírt mindenkori égési térfogat:

$$W(t) = W_0 - \frac{\Omega_0 - \omega(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t) + A_{cső} \cdot l(t), \qquad 1\text{–}36$$

ahol:

κ itt a gyakorlati fajhőviszony (politropikus kitevő), mértékegysége: egység,

$A_{cső}$ a fegyvercső belső keresztmetszete, mértékegysége: m^2,

W_0 a lövedékkel lezárt hüvely lőportöltet nélküli belső térfogata, mértékegysége: m^3,

$p(t)$ a lőporgázok nyomása az idő függvényében, mértékegysége: Pa,

$l(t)$ a lövedékelmozdulás az idő függvényében, mértékegysége: m,

$v(t)$ a lövedéksebesség az idő függvényében, mértékegysége: $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$,

$W(t)$ a rendszer térfogatfüggvénye, mértékegysége: m^3,

$\omega(t)$ az elégett lőportömeg az idő függvényében, mértékegysége: kg.

A 1–36 összefüggést behelyettesítve a 1–34 formulába, **megkapjuk a táguló térben égő lőpor hatására kialakuló nyomásfüggvényt:**

$$p(t) = \frac{f \cdot \omega(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{W_0 - \frac{\Omega_0 - \omega(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t) + A_{cső} \cdot l(t)}, \qquad 1\text{–}37$$

Ennek deriváltfüggvénye a pirodinamika alapegyenlete, amelyet inkább kijelölt derivált formájában célszerű felírni:

$$\frac{d}{dt} p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{f \cdot \omega(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{W_0 - \frac{\Omega_0 - \omega(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t) + A_{cső} \cdot l(t)} \right). \qquad 1\text{–}38$$

Fontos, hogy az egyenletekben szereplő fajhőviszony értéke nem az elméleti adiabatikus, hanem az adott lőpor műbizonylatán megadott, ballisztikai bombamérés során meghatározott politropikus fajhőviszony. A politropikus viszonyokat az energiabevitelnél a „force” értékkel, a gázokra nézve a politropikus kitevővel vesszük figyelembe.

1.4 A KLASSZIKUS BELBALLISZTIKAI MODELL

A kézi lőfegyverek csövében lejátszódó folyamatokat fel kell osztanunk jól elkülöníthető szakaszokra. A szakaszolás természetesen nem ötletszerű, az egyes részfolyamatokat az azokban eltérő fizikai jelenségek jellemzik. A klasszikus belballisztikai modell három szakaszra bontja a fegyvercsőben lévő folyamatokat. A szakaszokat az azokat legjobban leíró jelzőkkel azonosítjuk. A klasszikus modellre jellemző, hogy a szakaszokat a lövedékmozgás és a lőporégés meghatározó pontjai alapján deklarálja, és a fegyvercsőben lejátszódó folyamatokat csak a lövedék csőben tartózkodásának időintervallumában vizsgálja.

Pirostatikus szakasz (nulladik periódus, előperiódus)

A lőportöltet munkavégzés nélküli, zárt térben történő égése. A gyakorlatban a lövedék és a csőfar által lezárt térrészben játszódik le. A lövedék megmozdulása és a besajtolódás nem mindig történik egyszerre, ekkor a nyomásgörbén tranziens jelenségek lehetnek. A besajtolódás alatt is utat tesz meg a lövedék, ez bizonytalanná teszi a szakasz végét jelentő határvonal meghúzását. A lőportöltet gyors és egyenletes begyújtásához szükséges a nagy gyújtónyomás, amit a csappantyúban elhelyezett robbanóanyag biztosít. Meg kell jegyezni, hogy ez a szakasz – különösen huzagolatlan kézi lőfegyverek esetében –, figyelmen kívül hagyható, mivel sok esetben a besajtolást már a csappantyúgázok elvégzik, azaz a lövedék már megmozdult, de a lőpor még nem ég teljes felületén.

Pirodinamikus szakasz (első periódus)

A lőportöltet munkavégzéssel egybekötött, expandáló térben történő égése. Általában a fegyvercső aktív részében lejátszódó folyamat, amely jól konstruált lőpor esetén a fegyvercső torkolata előtt befejeződik. A gáznyomás általában a pirodinamikus szakaszban éri el a maximális értékét, a lövedék itt közelíti meg kilépő sebességét. A belső ballisztikai számítások legkomplikáltabb része a lőportöltet égése az expandáló térben. Általános fegyverszerkesztői törekvés az, hogy a pirodinamikus szakasz a fegyvercső egy adott pontjáig befejeződjön. A lőportervezés tulajdonképpen az első periódusra koncentrálódik, mert a lövedék itt éri el kilépő sebességének jelentős hányadát, valamint a fegyver méretezésénél kulcsfontosságú maximális gáznyomás is itt alakul ki.

Politropikus szakasz (második periódus, utóperiódus)

A lőporgázok expanziója az égés után, politropikus expanzió. A pirodinamikus szakasz végeztével kezdődik, és a lövedék csőből való kilépéséig tart. A még forró és nagy nyomású lőporgázok – entalpiájuk csökkenése árán –, növelik a lövedék mozgási energiáját.

1.4.1 EGYENLETEK A PIROSTATIKUS SZAKASZBAN

A 1–38 egyenletet vizsgálva szembeötlő, hogy a számláló első tagja a lőporból felszabaduló energiával arányos, a második tagja pedig a lövedék mozgási energiájával. A nevező negyedik tagja az égési űr lövedék elmozdulás miatti növekedését fejezi ki. A statikus szakaszban munkavégzés nincs, így a számláló második, valamint a nevező utolsó tagja az egyenletből kiesik, ezáltal az egyszerűsödik. A redukálódott egyenlet alakja ezáltal:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{f \cdot \omega(t)}{W_0 - \frac{\Omega_0 - \omega(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t)}\right). \qquad 1\text{–}39$$

Szükségünk van – a geometriai égéstörvény alapján –, az elégett lőportömeg idő szerinti deriváltjára, azaz a gázfejlesztési sebességre az 1–12 egyenletből:

$$\frac{d}{dt}\omega(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\Omega_0 \cdot \varrho_{lp}}{\omega_1} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \qquad 1\text{–}40$$

valamint szükséges a lineáris égési törvény elégett rétegvastagsággal kifejezett formulája, az 1–2 egyenlet:

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1 \cdot p(t). \qquad 1\text{–}2$$

A pirostatikus szakaszt ez a három differenciálegyenletből álló egyenletrendszer írja le.

1.4.2 EGYENLETEK A PIRODINAMIKUS SZAKASZBAN

A pirodinamikus szakaszban a lőpor égése a lövedék mozgását eredményezi, amely expandáló térben való gázfejlődést jelent. Itt teljes a 1–38 összefüggés, kieső tag nincs.

A nyomásfüggvény differenciálegyenlete:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{f \cdot \omega(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{W_0 - \frac{\Omega_0 - \omega(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t) + A_{cső} \cdot l(t)}\right). \qquad 1\text{–}38$$

Szükségünk van továbbá a geometriai égéstörvény alapján az elégett lőportömeg idő szerinti deriváltjára, azaz a gázfejlesztési sebességre:

$$\frac{d}{dt}\omega(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\Omega_0 \cdot \varrho_{lp}}{\omega_1} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \qquad 1\text{–}40$$

valamint szükséges a lineáris égési törvény gáznyomással kifejezett formulája:

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1 \cdot p(t). \qquad 1\text{–}2$$

Newton II. törvénye alapján írhatjuk, hogy:

$$\frac{d}{dt}v(t) = p(t) \cdot \frac{A_{cső}}{\varphi \cdot m_{löv}}. \qquad 1\text{–}41$$

A sebességfüggvény az elmozdulás-függvény deriváltja, amely formálisan:

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t). \qquad 1\text{–}42$$

A dinamikus szakaszt ez az öt differenciálegyenletből álló egyenletrendszer írja le.

1.4.3 EGYENLETEK A POLITROPIKUS SZAKASZBAN

Ebben a periódusban az egyenletek erősen leegyszerűsödnek, mivel a lőpor-szemcsék égése befejeződött, felírhatók a gázdinamikából ismert képletek. Annak érdekében, hogy az egyes szakaszokban a nyomásösszefüggések formailag hasonlóak legyenek, érdemes ezen szakasz nyomásösszefüggését is a 1–38 egyenletből származtatni.

Mivel lőpor teljesen elégett, így a felszabaduló energiát reprezentáló $f \cdot \omega(t)$ érték az $f \cdot \Omega$ konstans értéket veszi fel. A nevező második tagja zérus, a harmadik tag az $\alpha \cdot \Omega$ konstans érték lesz. Ezekkel a gáznyomás differenciálegyenlete:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{f \cdot \Omega_0 - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{W_0 - \alpha \cdot \Omega_0 + A_{cső} \cdot l(t)}\right). \qquad 1\text{–}43$$

Érvényesek továbbá a mozgást leíró egyenletek:

$$\frac{d}{dt}v(t) = p(t) \cdot \frac{A_{cső}}{\varphi \cdot m_{löv}}. \qquad 1\text{–}41$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t). \qquad 1\text{–}42$$

A politropikus szakaszt ez a három differenciálegyenletből álló egyenletrendszer írja le.

1.5 A MÓDOSÍTOTT BELBALLISZTIKAI MODELL

Mint az előző pontban szó volt róla, a klasszikus modell a szakaszokat a lövedékmozgás és a lőporégés meghatározó pontjai alapján deklarálja, és a fegyvercsőben lejátszódó folyamatokat csak a lövedék csőben tartózkodásának időintervallumában vizsgálja. Ez a megközelítés tökéletesen alkalmas a lövedékmozgás leírására, de a fegyvercsőben lévő állapotokat csak a lövedék kirepülése után nem írja le, holott erre a gázmotorok tervezésénél, a csőszájszerelvények számításainál szükségünk van, sőt csőszájszerelvények esetében csak erre.

1.5.1 A NYELŐK HATÁSA

A klasszikus modell segítségével nem tudjuk kezelni a fegyvercső palástján lévő furatokon, réseken – mint nyelőkön –, kiáramló lőporgázok, égő lőporszemcsék hatását a fegyvercsőben lévő állapotjelzőkre, így a klasszikus belballisztikai modell fegyvertervezésre csak korlátozottan alkalmas, ki kell azt egészítenünk, legalább a politropikus szakaszban elhelyezkedő nyelők hatásainak számíthatósága érdekében.

Két esetet fogunk kirészletezni, a csőszáj, valamint a radiális palástfurat hatását. A ballisztikai folyamatok általában a légköri nyomással meghatározott kritikus viszonyok[3] felett játszódnak le, így szükségünk van a nyelő tömegáramfüggvényére, ehhez pedig a kritikus állapotjelzőkre.

Levezetés nélkül a nyelőt jellemző kritikus állapotjelzők[4] és a mindenkori hangsebesség:

$$p_{krit}(t) = p(t) \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}, \qquad \text{1–44}$$

$$T_{krit}(t) = T(t) \cdot \frac{2}{\kappa + 1}, \qquad \text{1–45}$$

$$\varrho_{gáz\_krit}(t) = \varrho_{gáz}(t) \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{1}{\kappa - 1}}, \qquad \text{1–46}$$

$$u_{krit}(t) = a(t)\sqrt{\frac{2}{\kappa + 1}}, \qquad \text{1–47}$$

---

[3] Lőporgázok esetében 1 bar légköri nyomás mellett a kritikus nyomás értéke megközelítőleg 2,5 bar. Ez a nyomásérték eltörpül a fegyvercsőben kialakuló nyomások mellett, így az a közelítés, hogy minden esetben kritikus áramlással számolunk a nyelőknél, megengedhető.

[4] A kritikus állapotjelzők egyenleteinek levezetéseit számos hő- és áramlástani egyetemi jegyzet tárgyalja, pl.: [20]

$$\dot{m}_{gáz\_krit}(t) = \sqrt{A_{krit}{}^2 \cdot \varrho_{gáz}(t) \cdot p(t) \cdot \frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1}} \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{2}{\kappa-1}} - \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}}}, \tag{1–48}$$

$$a(t) = \sqrt{\kappa \cdot R_{spec} \cdot T(t)}, \tag{1–49}$$

ahol:

$p_{krit}(t)$ a nyelő kritikus nyomása az idő függvényében,

$T_{krit}(t)$ a nyelő kritikus gázhőmérséklete az idő függvényében,

$\varrho_{gáz\_krit}(t)$ a nyelő kritikus gázsűrűsége az idő függvényében,

$u_{krit}(t)$ a nyelő kritikus áramlásisebessége az idő függvényében,

$a(t)$ a fegyvercsőben lévő állapotokkal meghatározott hangsebesség az idő függvényében,

$\dot{m}_{gáz\_krit}(t)$ a nyelő kritikus tömegárama az idő függvényében.

A kritikus állapotjelzők ismeretében megalkotható a nyelő tömegárama:

$$\frac{d}{dt} m_{gáz\_ki}(t) = \eta_{csőszáj} \cdot A_{cső} \cdot \varrho_{krit}(t) \cdot u_{krit}(t). \tag{1–50}$$

1.5.2 A LÖVEDÉKET GYORSÍTÓ GÁZNYOMÁS

A klasszikus modell segítségével kiszámított gáznyomás a lőporgázok össznyomása, amelyet azonban két részre kell bontatunk, ha az áramló lőporgázok feszítőerejére pontosabban vagyunk kíváncsiak. Kétfelé kell osztanunk az áramló gázok össznyomását, egy ún. statikus- és egy ún. dinamikus nyomásra, amelyek összege a kiszámított össznyomás.

A dinamikus nyomás az áramló közeg mozgási energiájának fajlagos értéke:

$$p_{din}(t) = \frac{\rho_{gáz}(t) \cdot v(t)^2}{2}, \tag{1–51}$$

A statikus nyomás az áramlással együtt mozgó megfigyelő által mérhető gáznyomás. Az áramlással együtt mozgó megfigyelő jelen esetben a lövedékfenék, így arra a ballisztikai egyenletekkel kiszámított össznyomás statikus része hat. Ezzel a dinamika alapegyenlete:

$$\frac{d}{dt} v(t) = \frac{A_{cso} \cdot \big(p(t) - p_{din}(t)\big) - F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \tag{1–52}$$

ahol F_s a csőfurat és a lövedék közötti súrlódóerő, mértékegysége: N, amit szintén figyelembe veszünk a módosított modell esetében.

1.5.3 A CSAPPANTYÚGÁZOK HATÁSA

Ki kell térni még a gyújtónyomás kérdésére, amelyet a csappantyúgázok okoznak. Bár a pirostatikus szakasz kezdeti értékeinek megadásánál a nyomás kezdeti értékét könnyedén megadhatjuk, de ekkor a gázok állapotegyenlete el fog fajulni, ui. zérus gáztömegnek kellene véges gáznyomást eredményezni. Ezt a problémát feloldhatjuk, ha a gáznyomás kezdeti értékét úgy kezeljük, mintha az egy teljesen elégett additív lőportöltetből keletkezett volna, amely lőpor anyagában egyező a lőportöltetünk lőporával.

Ekkor felírható az alábbi égés végi egyenlet:

$$p_{inic} \approx \frac{f \cdot \Omega_{fikt}}{W_0}, \qquad 1–53$$

amelyből a fiktív lőportöltet tömege:

$$\Omega_{fikt} \approx \frac{p_{inic} \cdot W_0}{f}. \qquad 1–54$$

Ezzel a fiktív értékkel kell megnövelnünk a ténylegesen betöltött lőportömeget, az elégett lőportöltet – mint kezdeti érték –, pedig ezzel a fiktív értékkel lesz azonos:

$$\Omega = \Omega_0 + \Omega_{fikt}, \qquad 1–55$$

$$\omega(t = 0) = \Omega_{fikt}, \qquad 1–56$$

ahol:

p_{inic} a gyújtó vagy iniciáló nyomás, mértékegysége: Pa,

Ω_{fikt} a gyújtás hatását reprezentáló fiktív lőportömeg, mértékegysége: kg,

Ω_0 a ténylegesen betöltött lőportömeg, mértékegysége: kg,

Ω az egyenértékű lőportömeg, mértékegysége: kg.

1.5.4 A LÖVEDÉK SÚRLÓDÁSA

A lövésfolyamat során a lövedék és a csőfal között kialakuló súrlódóerő az ormózatok és a lövedék deformált külső palástfelületein ébred. A felületeket összeszorító erő a képlékeny deformáció után visszamaradó feszültségből származik. A képlékeny alakváltozás utáni maradó feszültség értéke függ többek között a lövedék konstrukciójától, a huzagok profiljától, az átmeneti kúp jellegétől. Értéke végeselemes szimulációval számítható, vagy kimérhető.

A lövedék gyorsuló mozgásából is adódnak járulékos, a gyorsító nyomástól függő komponensek. Ezek a tömegerőkből, valamint hátulról megfúrt, ún. szoknyás lövedékek esetében a gáznyomás szétfeszítő hatásából származnak. Ezek a hatások a statikus komponensre szuperponálódnak. A 2. ábra szerinti lövedékmodell egy hengeres, két vezetőgyűrűvel ellátott lövedéket egyszerűsít. Amennyiben a lövedék vezetőgyűrűkkel rendelkezik, a kontakt felületre írható, hogy

$$A_{pal} = n_{gy} \cdot n_{huz} \cdot b_{huz} \cdot l_{huz}, \qquad 1–57$$

ahol:

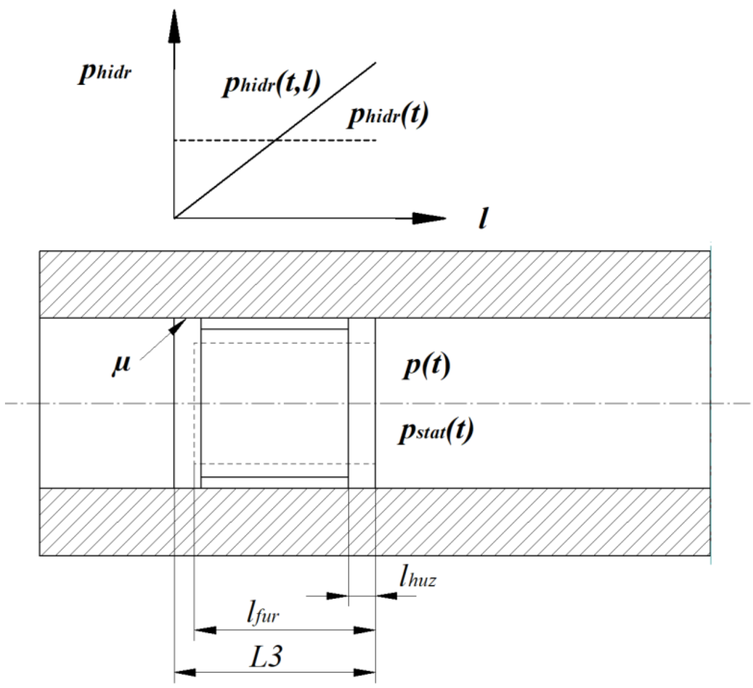
A_{pal} a lövedék kontakt palástfelülete, mértékegysége: m^2,

n_{gy} a lövedék vezetőgyűrűinek darabszáma, mértékegysége: nincs,

n_{huz} a fegyvercső huzagprofiljainak darabszáma, mértékegysége: nincs,

b_{huz} a huzagprofil (az ormózat) szélessége, mértékegysége: m,

l_{huz} a lövedék vezetőgyűrűjének szélessége, mértékegysége: m.



2. ábra: A lövedéksúrlódás dinamikus összetevői.

Az ábra szerinti elrendezésben a lövedék jobbról balra gyorsul. A diagramon a kialakuló kétváltozós hidrosztatikai nyomás, valamint ennek egyváltozós átlagértéke látható. Élve azzal a közelítéssel, hogy a cső merevtest, valamint a hidrosztatikai nyomást az átlagértéke reprezentálja és kiszámításánál a súrlódóerő hatását elhanyagoljuk, írhatjuk, hogy

$$p_{hidr}(t) = \varrho_{löv} \cdot \frac{A_{cso} \cdot \left(p(t) - p_{din}(t)\right)}{2\varphi \cdot m_{löv}} \cdot L_3, \tag{1–58}$$

$$F_s(t) = F_{s0} + A_{pal} \cdot p_{hidr}(t), \tag{1–59}$$

ahol:

$p_{hidr}(t)$ a lövedékben kialakuló egyváltozós hidrosztatikai nyomás az idő függvényében, mértékegysége: Pa,

$\varrho_{löv}$ a lövedék sűrűsége, mértékegysége: $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$,

$F_s(t)$ a lövedék és csőfal közötti súrlódóerő az idő függvényében, mértékegysége: N,

F_{s0} a lövedék és csőfal közötti súrlódóerő statikus értéke, mértékegysége: N.

Szoknyás lövedék esetében, ha a lövedék falvastagsága megfelelően kicsi[5], úgy írhatjuk, hogy

$$F_s(t) = F_{s0} + A_{pal} \cdot \left(p_{hidr}(t) + p(t) - p_{din}(t)\right), \tag{1–60}$$

mivel a lövedék külső palástjának radiális feszültsége lényegében azonos a belső nyomással.

Ezzel a lövedék tényleges gyorsulása[6]:

$$\frac{d}{dt} v(t) = \frac{A_{cso} \cdot \left(p(t) - p_{din}(t)\right) - F_s(t)}{\varphi \cdot m_{löv}}. \tag{1–61}$$

Mindezeket figyelembevéve most már négy szakaszra bontjuk a lövésfolyamatot, amelyek utolsó szakasza a csőnyomás lecsengése, azaz a lecsengési szakasz. Ez a politropikus expanzió azon szakasza, amikor a lövedék már kilépett a fegyvercsőből, de a fegyvercső nyomása még nem egyenlítődött ki a környezet nyomásával. Ebben a szakaszban is egyszerűek az egyenletek, mivel sem lőporégés, sem lövedékmozgás nincs. Van viszont egy negatív forrásként jelentkező csőtorkolat.

---

[5] Ha a külső és a belső átmérő viszonyszáma nem nagyobb, mint 1,7.

[6] Számításaim és további levezetéseim során ezt a formulát nem használom, mivel a súrlódóerő függvény meghatározásához a lövedékkonstrukció pontos ismerete szükséges.

1.5.5 EGYENLETEK A PIROSTATIKUS SZAKASZBAN

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{f \cdot \omega(t)}{W_0 - \frac{\Omega - \omega(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t)}\right), \quad 1\text{–}62$$

$$\frac{d}{dt}\omega(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\Omega \cdot \varrho_{lp}}{\omega_1} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \quad 1\text{–}63$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1 \cdot p(t). \quad 1\text{–}2$$

1.5.6 EGYENLETEK A PIRODINAMIKUS SZAKASZBAN

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{f \cdot \omega(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{W_0 - \frac{\Omega - \omega(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t) + A_{cső} \cdot l(t)}\right), \quad 1\text{–}64$$

$$\frac{d}{dt}\omega(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\Omega \cdot \varrho_{lp}}{\omega_1} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \quad 1\text{–}63$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1 \cdot p(t), \quad 1\text{–}2$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cso} \cdot \left(p(t) - p_{din}(t)\right) - F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \quad 1\text{–}52$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t). \quad 1\text{–}42$$

1.5.7 EGYENLETEK A POLITROPIKUS SZAKASZBAN, FORRÁS (NYELŐ) NÉLKÜL

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{f \cdot \Omega - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{W_0 - \alpha \cdot \Omega + A_{cső} \cdot l(t)}\right), \quad 1\text{–}65$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cso} \cdot \left(p(t) - p_{din}(t)\right) - F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \quad 1\text{–}52$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t). \quad 1\text{–}42$$

1.5.8 EGYENLETEK A POLITROPIKUS SZAKASZBAN, FORRÁSSAL (KISMÉRETŰ PALÁSTFURAT A FEGYVERCSÖVÖN)

Vezessük be a fegyvercsőben lévő lőporgázhányadot:

$$\Psi_{gáz\_cső}(t) = \frac{\Omega - m_{gáz\_furat}(t)}{\Omega}. \quad 1\text{–}66$$

Ezzel a szakasz egyenletei:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\left(f \cdot \Omega - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2\right) \cdot \Psi_{gáz\_cső}(t)}{W_0 - \alpha \cdot \Omega \cdot \Psi_{gáz\_cső}(t) + A_{cső} \cdot l(t)}\right), \quad 1\text{–}67$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_furat}(t) = \eta_{furat} \cdot A_{furat} \cdot \varrho_{gáz\_krit}(t) \cdot u_{krit}(t), \quad 1\text{–}68$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cso} \cdot \left(p(t) - p_{din}(t)\right) - F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \quad 1\text{–}52$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t). \quad 1\text{–}42$$

Ahol:

η_{furat} a furaton keresztüli kiáramlás izentrópikus viszonyaira jellemző hatásfok, mértékegysége: nincs,

A_{furat} a furat keresztmetszete, mértékegysége: m^2.

1.5.9 EGYENLETEK A LECSENGŐ SZAKASZBAN, PALÁSTFURAT NÉLKÜL

A fegyvercsőben lévő lőporgázhányad és a fegyvercsőfurat térfogata:

$$\Psi_{gáz\_cső}(t) = \frac{\Omega - m_{gáz\_csőszáj}(t)}{\Omega}. \quad 1\text{–}69$$

$$W_{cső} = A_{cső} \cdot L_{cső}. \quad 1\text{–}70$$

Ezzel a szakasz egyenletei:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\left(f \cdot \Omega - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot {v_0}^2\right) \cdot \Psi_{gáz\_cső}(t)}{W_0 + W_{cső} - \alpha \cdot \Omega \cdot \Psi_{gáz\_cső}(t)}\right), \quad 1\text{–}71$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_csőszáj}(t) = \eta_{csőszáj} \cdot A_{cső} \cdot \varrho_{gáz\_krit}(t) \cdot u_{krit}(t). \quad 1\text{–}72$$

Ahol:

$\eta_{csőszáj}$ a csőszáji kiáramlás izentrópikus viszonyaira jellemző hatásfok, mértékegysége: nincs,

$W_{cső}$ a cső ballisztikai hosszával jellemzett csőfurat-térfogat, mértékegysége: m^3.

1.5.10 EGYENLETEK A LECSENGŐ SZAKASZBAN, PALÁSTFURATTAL

A fegyvercsőben lévő lőporgázhányad:

$$\Psi_{gáz\_cső}(t) = \frac{\Omega - m_{gáz\_csőszáj}(t) - m_{gáz\_furat}(t)}{\Omega}. \qquad 1–73$$

Ezzel a szakasz egyenletei[7]:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\left(f \cdot \Omega - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot {v_0}^2\right) \cdot \Psi_{gáz\_cső}(t)}{W_0 + W_{cső} - \alpha \cdot \Omega \cdot \Psi_{gáz\_cső}(t)}\right), \qquad 1–71$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_csőszáj}(t) = \eta_{csőszáj} \cdot A_{cső} \cdot \varrho_{gáz\_krit}(t) \cdot u_{krit}(t), \qquad 1–72$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_furat}(t) = \eta_{furat} \cdot A_{furat} \cdot \varrho_{gáz\_krit}(t) \cdot u_{krit}(t). \qquad 1–68$$

1.6 KÖVETKEZTETÉSEK, ELVÉGZETT FELADATOK

Elemeztem a klasszikus belső ballisztikai modellt, a lőporégés, gázfejlesztés lövedékmozgás szempontjából.

Kimutattam, hogy a klasszikus belső ballisztikai modell alkalmazásával a lövedék mozgását jól le tudjuk írni, de fegyverkonstrukciós számításokhoz csak korlátozottan használható.

Kiegészítettem klasszikus modellt a lecsengő gáznyomás egyenleteivel, valamint a forráson áramló gázok hatásával.

Alkalmassá tettem a klasszikus modellt a további bonyolítások beépítésére, felkészítve egyben az elosztott paraméterű modell alapjául.

---

[7] A gáznyomás differenciálegyenlete csak formálisan azonos, mert a $\Psi_{gáz\_cső}(t)$ belső függvény nem az.

2 KETTŐS MŰKÖDÉSRE KÉPES AUTOMATIKÁK SZÁMÍTÁSAI

2.1 A KETTŐS MŰKÖDÉS MEGVALÓSÍTÁSÁNAK ELVI LEHETŐSÉGEI

A kettős működés megvalósítására két műszaki megoldás képzelhető el, a kötöttségek figyelembevételével. Ezek a megszorítások a következők:

1 A fegyver egyazon töltény alkalmazása mellett legyen képes biztosítani mindkét üzemállapotot.

2 A fegyvert egy üzemállapotváltó mechanikus kapcsoló működtetésével lehessen az egyik állapotból a másikba kapcsolni.

3 Az automatika rendszer mindkét állapotban biztosítsa a fegyver sorozatlövő (vagy félautomata, ha eredetileg is az volt) képességét.

4 A csökkentett energiaszintű üzemállapotban kilőtt a lövedék torkolati energiája legalább egy nagyságrenddel kisebb legyen, mint a normál üzemállapotban kilőtt lövedéké.

5 A fegyver ne két eszköz összeépítése legyen.

Mindezekből látható, hogy a kezdősebességek különbözősége csak és kizárólag a fegyvercső (a ballisztikai egyenletekből kiszámítható helyen) zárható/nyitható megréselésével lehetséges, mivel a lőszer azonos, valamint a fegyver két csövet nem tartalmazhat.

A fegyvercső zárható megréselésével a feladat könnyen megoldható, de a sorozatlövés biztosítására új típusú automatikarendszerek megalkotása szükséges.

Két, alapjaiban eltérő automatika rendszer létezik, az egyik a lőporenergiát közvetlenül hasznosítók – ezek hasznos energiával működnek –, a másik a lőporenergiát közvetetten használják, azaz hulladék energiával működnek. Míg az első esetben tervezési szinten aktívan tudunk beavatkozni a kinyert energia mennyiségére vonatkozóan, addig a másodikban nem, mert ebben az esetben – kis egyszerűsítéssel –, a lövedék impulzusa fogja meghatározni az automatika kezdeti mozgásmennyiségét. Ebből az is következik, hogy az automatika-rendszer, egy nagyságrendnyi lövedék energia különbség esetén, már nem fog működni a normál üzemállapothoz rendelt helyretoló szerkezet mellett.

Látni kell azt is, hogy az ilyen jellegű fegyverek a közelharc eszközei, ezért megvalósításuknak csak pisztolylőszerek alkalmazása mellett van értelme és létjogosultsága. A perspektivikusan kifejlesztendő eszközök tehát vagy pisztolyok, vagy géppisztolyok.

Az egyik lehetséges koncepció a speciális, kettős működésű gázmotorral ellátott fegyver, az előzőt figyelembe véve géppisztoly. Ekkor a fegyver automatika rendszerét tekintve inkább beszélhetünk egyfajta géppisztoly-gépkarabély hibridről, mint az alkalmazott lőszer szerinti besorolásról, de az alkalmazás szerinti tulajdonságai továbbra is a géppisztoly kategóriába helyezi ezt a megvalósítást.

A gázmotoros rendszerek családja is több műszaki megoldásra osztható, ebből kettőt emelek ki:

- a hosszú gázdugattyú hártasiklásos rendszert, amit **LS rendszernek**[8] rövidítek,
- a rövid gázdugattyú hártasiklásos rendszert, amit **SS rendszernek**[9] rövidítek.

A számítások során két lehetséges konstrukciót vizsgálok:

- a normál és csökkentett energiaszintű üzemállapotban egyaránt hosszú gázdugattyú hártasiklásos rendszert alkalmazó fegyvert, ezt **LS/LS rendszernek** rövidítem,
- a normál üzemállapotban hosszú, csökkentett energiaszintű üzemállapotban pedig rövid gázdugattyú hártasiklásos rendszert alkalmazó fegyvert, ezt **LS/SS rendszernek** rövidítem.

Egy másik lehetséges megoldás a kettős működésű, változtatható reteszelési rendszerű fegyver, amely kétállapotú automatika rendszerrel ellátott, de konstrukciós szempontból a kétállapotú automatika rendszer egy szerkezeti egységet képez. Számításaim során a fegyver normál üzemállapotban reteszelt, rövid csőhátrasiklásos, csökkentett energiaszintű üzemállapotban pedig reteszeletlen, szabad tömegzáras. A továbbiakban ezt a konstrukciót **VR rendszerű** rövidítéssel jelölöm. A VR rendszerű fegyver műszaki megvalósítása bonyolult, de megoldható mérnöki feladat, amely megoldások részletezése nem a disszertáció témája, de számításai igen.

Látható, hogy mindkét elvi megvalósítás esetén új konstrukciók szükségesek, amelyek egyenleteit és számításait az első hipotézisem igazolására elkészítettem,

---

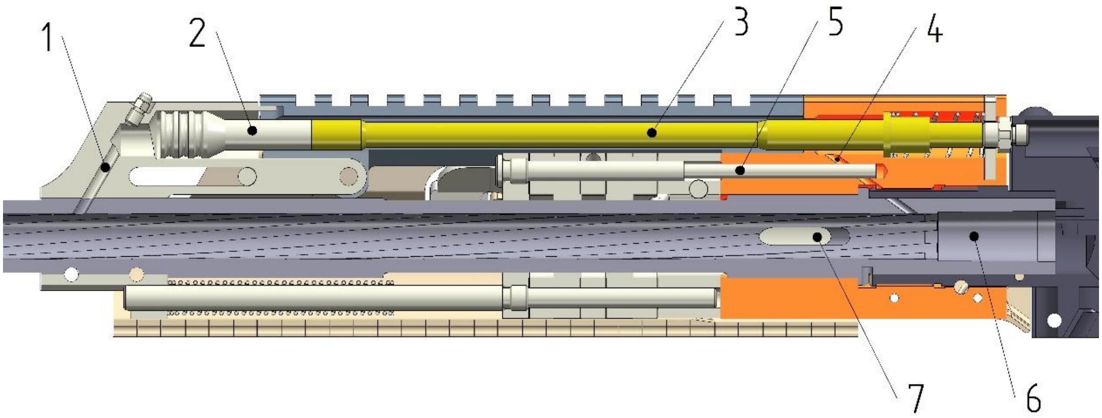
[8] Long Stroke System

[9] Short Stroke System

elvégeztem.

2.1.1 Egy SS/SS gázcsapda nélküli konstrukció felépítése

Vegyük például a 3. ábra szerinti SS/SS gázcsapda nélküli elrendezést, és nézzük összefoglalóan az üzemállapotonkénti működést.



3. ábra: Egy SS/SS gázcsapda nélküli konstrukció jellegrajza. (1: mellső gázhenger, 2: mellső gázdugattyú, 3: hátsó gázdugattyú, 4: hátsó gázhenger, 5: zárótüske, 6: fegyvercső, 7: csúszótömb jobb.)

A 7 csúszótömb hátsó állása mellett a 4 hátsó gázhenger gázátömlő furatát az 5 zárótüske elzárja, valamint a 7 csúszótömb nyúlványa eltakarja a 6 fegyvercső réseléseit is. Ekkor a fegyver normál üzemállapotban van, az automatika gerjesztését az 1 mellső gázhengerbe áramló lőporgázok biztosítják, a 2 mellső gázdugattyú gyorsításával.

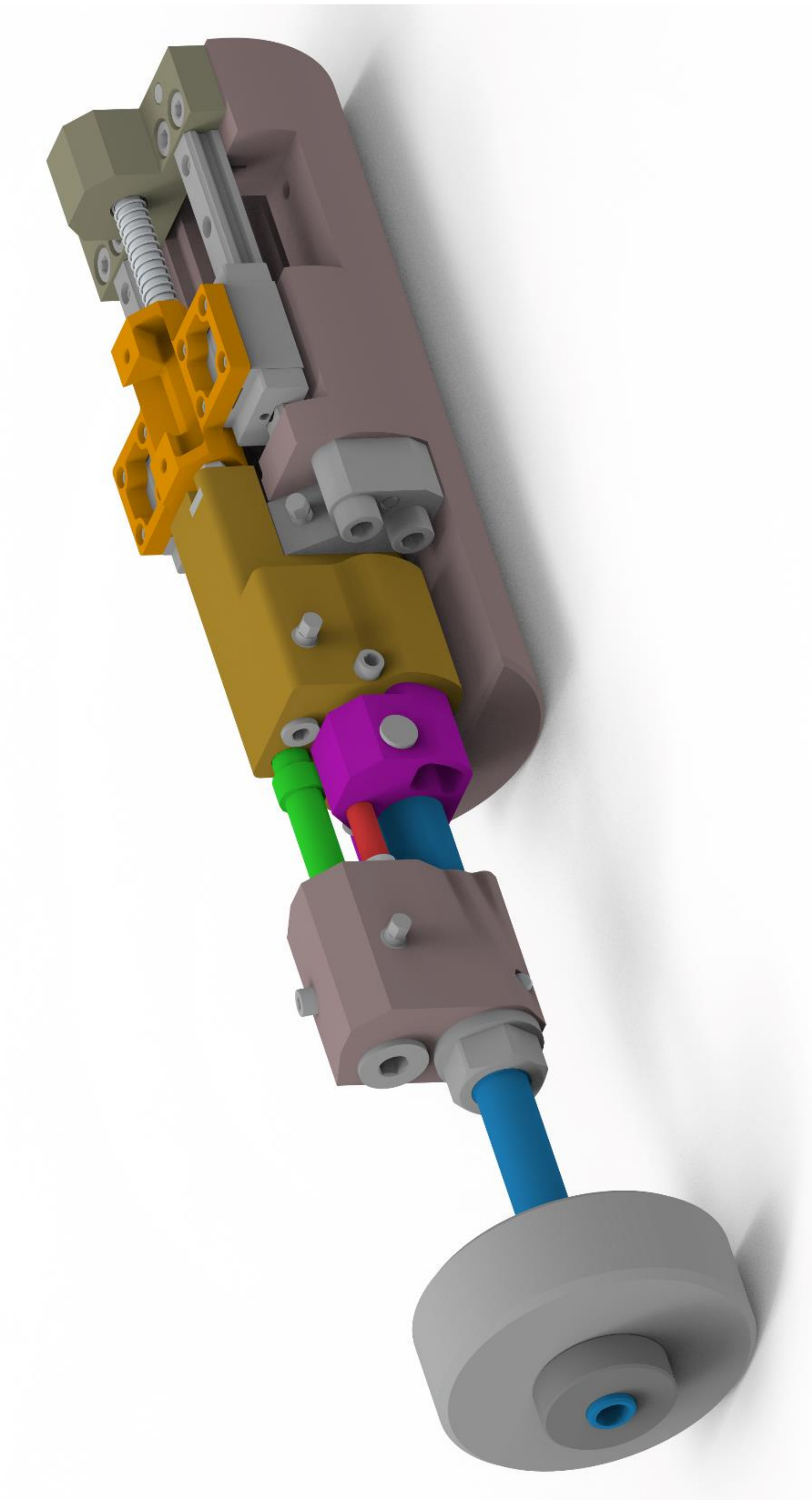
A 7 csúszótömb mellső állása mellett a 4 hátsó gázhenger gázátömlő furatából az 5 zárótüske kimozog, szabaddá téve a lőporral keveredett lőporgázok áramlását a 4 hátsó gázhenger terébe. Ekkor a fegyver csökkentett energiaszintű üzemállapotban van, az automatika gerjesztését a 4 hátsó gázhengerbe áramló lőporgázok biztosítják, a 3 hátsó gázdugattyú gyorsításával. A gázok a gyorsítást a mellső és a hátsó dugattyúátmérőkkel meghatározott körgyűrűfelületen közvetítik, ezzel biztosítva az automatika rendszer gerjesztését. A lövedék elérve a réseléseket azokat nyitja, így megkezdődik a lőporgázok lepuffanása. Megfelelően nagy résélés esetében a csőnyomás csökken és kiegyenlítődik, ezért a lövedéket gyorsító erő is csökken majd megszűnik, így a lövedék a mindvégig fellépő száraz súrlódás miatt lassuló mozgással hagyja el a fegyvercsövet.

2.1.2 Egy SS/SS gázcsapdával ellátott konstrukció felépítése

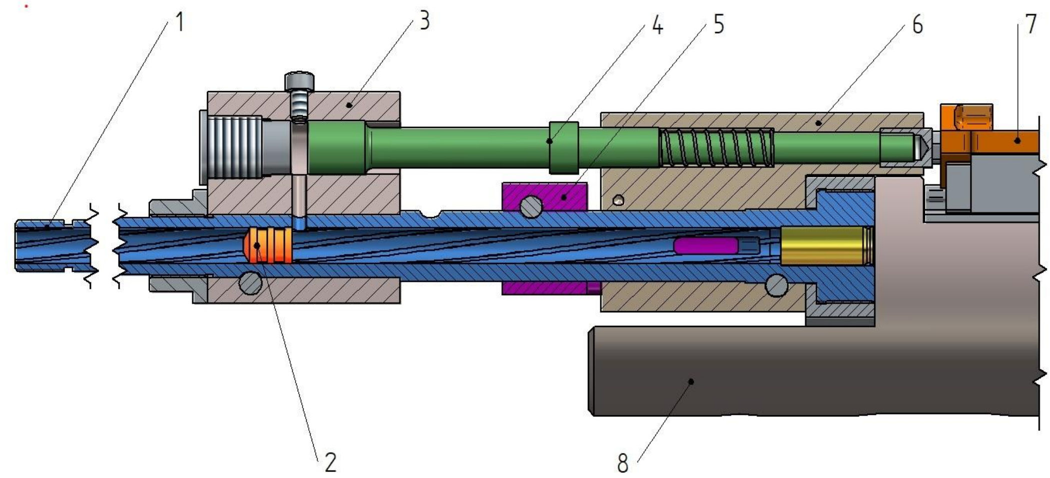
Az alábbiakban egy valós fejlesztési folyamat keretein belül általam tervezett technológiai demonstrátoron[10] mutatom be egy SS/SS gázcsapdával ellátott konstrukció működését úgy normál, mint csökkentett energiaszintű állapotában.

A mérőeszközként is funkcionáló technológiai demonstrátor axonometrikus képe a 4. ábrán látható, normál üzemállapot esetén a technológiai demonstrátor működését az 5. ábra szemlélteti. Az 5 csúszótömb hátsó állása mellett a 6 csökkentett gázhenger gázátömlő furatát a 9 vezérlőtüske elzárja (lásd 6. ábra), valamint az 5 csúszótömb nyúlványi az 1 fegyvercső réseléseit takarják. Ekkor az eszköz normál üzemállapotban van, az automatika gerjesztését a 3 normál gázhengerbe áramló lőporgázok biztosítják a 4 normál gázdugattyú gyorsításával. A mozgás kezdetén a 4 normál gázdugattyú és a 7 szerelt zárkeret hézag nélkül csatlakozik.

[10] A „technológiai demonstrátor” olyan, a [21] szerinti laboratóriumi vagy kísérleti minta, amely a prototípus technológiai megoldásainak működőképességét hivatott igazolni, de nem feladata annak üzemeltetési (pl. kezelőszemélyzet száma), felhasználási (jelen esetben a laboratóriumi minta nem fegyver, hanem ipari mérőeszköz) és fizikai (pl. tömeg) sajátosságaival rendelkeznie. Feladata mindösszesen annyi, hogy a prototípus műszaki megoldásainak működőképességét igazolja.

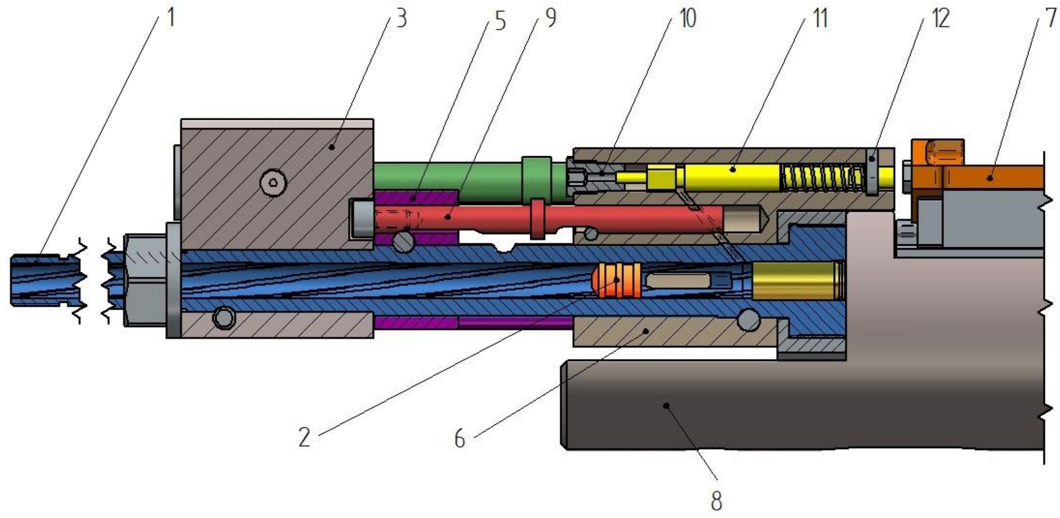


4. ábra: Egy SS/SS gázcsapdával ellátott technológiai demonstrátor CAD reprezentációja.



5. ábra: A technológiai demonstrátor normál üzemállapotban. (1: fegyvercső, 2: lövedék, 3: normál gázhenger, 4: normál gázdugattyú, 5: csúszótömb, 6: csökkentett gázhenger, 7: szerelt zárkeret, 8: UZS tokszerkezet.)

A csökkentett energiaszintű üzemállapotba kapcsolt a technológiai demonstrátor működését a 6. ábra mutatja. Az 5 csúszótömb hátsó állása mellett a 6 csökkentett gázhenger gázátömlő keresztmetszetével a hátra mozgó 9 vezérlőtüske áttörete fedésbe kerül, szabaddá téve a lőporral keveredett lőporgázok áramlását a 6 csökkentett gázhenger terébe. Az 5 csúszótömb hátsó állása mellett az 1 fegyvercső réseléseit az 5 csúszótömb nyúlványa nem takarja, így a réseket megnyitó 2 lövedék mögötti lőporgázok a réselésen és az 5 csúszórömb csatornáján a környezetbe tudnak távozni, megkezdődik a lőporgázok lepuffanása. Ekkor az automatika gerjesztését a 6 csökkentett gázhengerbe áramló lőpor-lőporgáz biztosítja, a 11 csökkentett gázdugattyú gyorsításával. A 11 csökkentett gázdugattyú és a 7 szerelt zárkeret között hézag található, amely hézag megszűntéig a lőporgázok nyomása csak a 11 csökkentett gázdugattyút gyorsítja. A hézag megszűntekor a 11 csökkentett gázdugattyú vezérlőéle a gázátömlő áttöretet elzárja, ezzel csapdába ejtve a hengertérben lévő lőport és lőporgázt. Ezzel közel egyidőben a lőporgázok lepuffanása befejeződik, a 2 lövedék pedig az 1 fegyvercsőben lassulva halad a csőtorkolat felé. A 11 csökkentett gázdugattyú további mozgása (a kontakt tartományon belül) a 7 szerelt zárkerettel közös, a 6 csökkentett gázhenger terében lőporégéssel egybekötött expanzió van. A kontakt tartomány végét elérő 11 csökkentett gázdugattyú hátsó nyúlványa a 10 csökkentett gázhengercsavar furatát megnyitja, biztosítva ezzel a 6 csökkentett gázhenger lepuffanását, vagyis a gerjesztés megszűntetését.



6. ábra: A technológiai demonstrátor csökkentett energiaszintű üzemállapotban. (1: fegyvercső, 2: lövedék, 3: normál gázhenger, 5: csúszó tömb, 6: csökkentett gázhenger, 7: szerelt zárkeret, 8: UZS tokszerkezet, 9: vezérlőtüske, 10: csökkentett gázhengercsavar, 11: csökkentett gázdugattyú, 12: csökkentett reteszlap.)

2.2 KETTŐS MŰKÖDÉSŰ GÁZMOTOROS KONSTRUKCIÓ

A következőben a folyamatok leíró egyenleteit mutatom be mindkét üzemállapotban, egy **hosszú gázdugattyú hátrasiklásos** (LS rendszer), egy **rövid gázdugattyú hátrasiklásos** (SS rendszer) kialakításon.

2.2.1 MŰKÖDÉS NORMÁL ÜZEMÁLLAPOTBAN (LS/LS RENDSZER)

Ez az üzemállapot az AMM gépkarabély és klónjainak működésére jellemző. Ennek részletesebb kifejtése a [3] könyvfejezetben található.

A fegyvert egy ballisztikai gerjesztéssel működésbe hozott lengőrendszernek kell tekintenünk, amelyeket alrendszerek építenek fel. Az alrendszerek felépülésére nem térek ki, az megtalálható a *Gázdugattyús automatikák számításai – normál üzemállapot esetén* című publikációban.

A működést nem csak a számunkra kiemelten fontos ballisztikai gerjesztés végéig vizsgálom, azaz a csőnyomás lecsengéséig, mert a fegyver üzemállapotonkénti tűzütemét is számítom. A működési tartományt nyolc részre osztom, amelyekben másmás egyenletrendszerek írják le a folyamatokat.

2.2.1.1 A tartományok leírása és határaik (LS/LS rendszer)

1. tartomány: Tart a lőportöltet begyulladásától a lövedék megindulásáig, expanzió és munkavégzés nélkül. A tartomány azonos a 1.5.5 részben tárgyalt pirostatikus szakasszal. A tartományban csak a redukált csőfurat rendszer érintett. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **zöld**.

2. tartomány: Tart a lövedék megindulásától a lőportöltet elégéséig. A tartomány azonos a 1.5.6 részben ismertetett pirodinamikus szakasszal. A tartományban csak a redukált csőfurat rendszer érintett. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **piros**.

3. tartomány: Tart a lőportöltet elégésétől a gázátömlőfuratig. A tartomány azonos a 1.5.7 részben ismertetett forrásmentes politropikus szakasszal. A tartományban csak a redukált csőfurat rendszer érintett. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **kék**.

4. tartomány: Tart a gázátömlőfurattól a gázmotor feltöltődéséig. A tartomány hasonló a 1.5.8 részben ismertetett forrásos politropikus szakasszal, de itt a főrendszerhez kapcsolt ballisztikai alrendszer a gázmotor, amelynek a gázdugattyúnál jelen lévő illesztési rése valódi forrásként jelentkezik. A tartományban valamennyi, azaz a redukált csőfurat rendszer, a redukált gázhenger rendszer és a redukált zárszerkezet rendszer érintett.

A négy alrendszer ebben a szakaszban összekapcsolt állapotban van, az összeköttetést a gázátömlőfurat, a gázhengerfurat, valamint a gázdugattyú biztosítja. A gázáramlás a csőfuratból a gázhenger irányába halad, mindvégig a csőfuratban lévő gáz pillanatnyi állapotjelzőivel meghatározott kritikus jellemzőkkel, a redukált zárszerkezet rendszer pedig a gázdugattyú közvetítésével hátrafelé kezd mozogni, növelve ezzel a gázhenger térfogatát. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **a gázmotor bíbor, a fegyvercső ciánkék**.

5. tartomány: Tart a gázmotor feltöltődésétől a lövedék kirepüléséig. A tartomány azonos a 1.5.8 részben ismertetett forrásos politropikus szakasszal, valós ballisztikai alrendszer nélkül.

A három alrendszer ebben a tartományban is összekapcsolt állapotban van, az összeköttetés az előző pont szerinti. A gázáramlás a gázhengerből a csőfurat irányába halad közel egyensúlyi feltételek mellett. Kritikus állapot nem alakul ki, mivel a csőfuratban lévő gáz nyomásváltozási-sebessége kicsi. A gázhenger a csőfurat kiterjesztett tartományának tekinthető, az ott uralkodó intenzív állapotjelzőket azonosnak veszem a csőfuratban lévőkkel. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **világoskék**.

6. tartomány: Tart a lövedék kirepülésétől a gázmotor és a csőfurat egyidejű lepuffanásáig. A tartomány azonos a 1.5.9 részben ismertetett egyforrású lecsengő szakasszal, mind a három alrendszerrel, de valós ballisztikai alrendszer nélkül. A két ballisztikai alrendszer viselkedése megegyezik az 5. tartományban ismertetettekkel, azzal a különbséggel, hogy rendszert a lövedék már elhagyta. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **fekete**.

7. tartomány: Tart a csőfurat lepuffanásától a zár felütközéséig vagy megállásáig. A zár, mint mechanikai lengőrendszer végzi csillapított, gerjesztetlen lengését. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **barna**.

8. tartomány: Tart a zár hátsó pozícióból való megindulásától annak felütközéséig a csőfaron. A zár, mint mechanikai lengőrendszer végzi csillapított, gerjesztetlen lengését. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **arany**.

2.2.1.2 Egyenletek az 1. tartományban (LS/LS rendszer)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{f \cdot \omega(t)}{W_0 - \frac{\Omega - \omega(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t)}\right), \qquad 1–62$$

$$\frac{d}{dt}\omega(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\Omega \cdot \varrho_{lp}}{\omega_1} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \qquad 1–63$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1 \cdot p(t). \qquad 1–2$$

2.2.1.3 Egyenletek a 2. tartományban (LS/LS rendszer)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{f \cdot \omega(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{W_0 - \frac{\Omega - \omega(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t) + A_{cső} \cdot l(t)}\right), \qquad 1–64$$

$$\frac{d}{dt}\omega(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\Omega \cdot \varrho_{lp}}{\omega_1} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \qquad 1–63$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1 \cdot p(t), \qquad 1–2$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cso} \cdot \left(p(t) - p_{din}(t)\right) - F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \qquad 1–52$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t). \qquad 1–42$$

2.2.1.4 Egyenletek a 3. tartományban (LS/LS rendszer)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{f \cdot \Omega - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{W_0 - \alpha \cdot \Omega + A_{cső} \cdot l(t)}\right), \qquad 1–65$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cso} \cdot \left(p(t) - p_{din}(t)\right) - F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \qquad 1–52$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t). \qquad 1–42$$

2.2.1.5 Egyenletek a 4. tartományban (LS/LS rendszer)

Az alrendszerekben lévő gázmennyiség leírásához bevezetem a lőporgázhányadokat úgy a csőfuratra, mint a gázmotorra. Ezek egységre normált, mértékegység nélküli függvények, használatukkal áttekinthetőbbek a ballisztikai egyenletek:

$$\Psi_{gáz\_cső}(t) = \frac{\Omega - m_{gáz\_gm}(t)}{\Omega}, \tag{2–1}$$

$$\Psi_{gáz\_gm}(t) = \frac{m_{gáz\_gm}(t) - m_{gáz\_héz}(t)}{m_{gáz\_gm}(t)}. \tag{2–2}$$

A tömegáramok meghatározásához szükség van a kritikus állapotjelzőkre úgy a fegyvercsőben, mint a gázmotorban:

$$\varrho_{gáz}(t) = \frac{\Omega - m_{gáz\_gm}(t)}{W_0 - \alpha \cdot \Omega \cdot \Psi_{gáz\_cső}(t) + A_{cső} \cdot l(t)}, \tag{2–3}$$

$$\varrho_{gáz\_gm}(t) = \frac{m_{gáz\_gm}(t) - m_{gáz\_héz}(t)}{W_{gm} - \alpha \cdot m_{gáz\_gm}(t) \cdot \Psi_{gáz\_gm}(t) + A_{gm} \cdot l_{zár}(t)}, \tag{2–4}$$

$$\varrho_{gáz\_krit}(t) = \varrho_{gáz}(t) \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{1}{\kappa - 1}}, \tag{1–46}$$

$$\varrho_{gáz\_krit\_gm}(t) = \varrho_{gáz\_gm}(t) \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{1}{\kappa - 1}}, \tag{2–5}$$

$$T_{krit}(t) = \frac{p(t)}{\varrho_{gáz}(t) \cdot R_{spec}} \cdot \frac{2}{\kappa + 1}, \tag{2–6}$$

$$T_{krit\_gm}(t) = \frac{p_{gm}(t)}{\varrho_{gáz\_gm}(t) \cdot R_{spec}} \cdot \frac{2}{\kappa + 1}, \tag{2–7}$$

$$u_{krit}(t) = \sqrt{\kappa \cdot R_{spec} \cdot T_{krit}(t)}, \tag{2–8}$$

$$u_{krit\_gm}(t) = \sqrt{\kappa \cdot R_{spec} \cdot T_{krit\_gm}(t)}. \tag{2–9}$$

A gázmotorba belépő lőporgázok által képviselt mindenkori energia:

$$E_{gm}(t) = \left(f \cdot \Omega - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{lov} \cdot v(t)^2\right) \cdot \left(1 - \Psi_{gáz_{cső}}(t)\right). \tag{2–10}$$

Mind ezekkel a felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt} p_{gm}(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\left(E_{gm}(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi_{zár} \cdot m_{zár} \cdot v_{zár}(t)^2\right) \cdot \Psi_{gáz\_gm}(t)}{W_{gm} - \alpha \cdot m_{gáz\_gm}(t) \cdot \Psi_{gáz\_gm}(t) + A_{gm} \cdot l_{zár}(t)}\right), \tag{2–11}$$

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\left(f \cdot \Omega - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2\right) \cdot \Psi_{gáz\_cső}(t)}{W_0 - \alpha \cdot \Omega \cdot \Psi_{gáz\_cső}(t) + A_{cső} \cdot l(t)}\right), \quad 1\text{–}67$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_gm}(t) = \eta_{gáf} \cdot A_{gáf} \cdot \varrho_{gáz\_krit}(t) \cdot u_{krit}(t), \quad 2\text{–}12$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t) = \eta_{héz} \cdot A_{héz} \cdot \varrho_{krit\_gm}(t) \cdot u_{krit\_gm}(t), \quad 2\text{–}13$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cso} \cdot \left(p(t) - p_{din}(t)\right) - F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \quad 1\text{–}52$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t), \quad 1\text{–}42$$

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{A_{gm} \cdot p_{gm}(t) - c_r \cdot l_{zár}(t) - F_r - F_{s\_zár}}{\varphi_{zár} \cdot m_{zár}} - k_r \cdot \frac{d}{dt}l_{zár}(t), \quad 2\text{–}14$$ [11]

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \quad 2\text{–}15$$

Jelölések:

$m_{gáz\_gm}(t)$ a gázmotorba átáramlott lőporgáztömeg az idő függvényében, mértékegysége: kg,

$\varrho_{gáz}(t)$ a fegyvercsőben lévő lőporgáz sűrűsége az idő függvényében, mértékegysége: $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^3}}$,

$\varrho_{gáz\_krit}(t)$ a fegyvercső palástfuratánál kialakuló kritikus állapothoz tartozó lőporgázsűrűség az idő függvényében, mértékegysége: $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^3}}$,

$T_{krit}(t)$ a fegyvercső palástfuratánál kialakuló kritikus állapothoz tartozó lőporgázhőmérséklet az idő függvényében, mértékegysége: K,

$u_{krit}(t)$ a fegyvercső palástfuratánál kialakuló kritikus állapothoz tartozó adiabatikus hangsebesség az idő függvényében, mértékegysége: $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$,

$\varrho_{gáz\_gm}(t)$ a gázmotorban lévő lőporgáz sűrűsége az idő függvényében, mértékegysége: $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m^3}}$,

$m_{gáz\_héz}(t)$ a gázmotorból a környezetbe áramlott lőporgáztömeg az idő függvényében, mértékegysége: kg,

[11] A dinamikus nyomás hatása elhanyagolhatóan kicsi, ezért nem veszem figyelembe.

$\varrho_{gáz\_krit\_gm}(t)$ a gázhenger-gázdugattyú illeszkedésénél kialakuló kritikus állapothoz tartozó lőporgázsűrűség az idő függvényében, mértékegysége: $\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$,

$T_{krit\_gm}(t)$ a gázhenger-gázdugattyú illeszkedésénél kialakuló kritikus állapothoz tartozó lőporgázhőmérséklet az idő függvényében, mértékegysége: K,

$u_{krit\_gm}(t)$ a gázhenger-gázdugattyú illeszkedésénél kialakuló kritikus állapothoz tartozó adiabatikus hangsebesség az idő függvényében, mértékegysége: $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$,

$\varphi_{zár}$ a zárkeret fiktív tömeg együtthatója, mértékegysége: nincs,

$m_{zár}$ a szerelt zár tömege[12], mértékegysége: kg,

c_r a helyretoló rugó rugómerevsége, mértékegysége: $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$,

k_r a helyretoló rugó viszkózus csillapítási tényezője, mértékegysége: $\frac{1}{\mathrm{s}}$,

F_r a helyretoló rugó előfeszítési ereje, mértékegysége: N.

$F_{s\_zár}$ a zárkeret-tokszerkezet Coulomb-féle súrlódási ereje, mértékegysége: N.

$l_{zár}(t)$ a zárkeret elmozdulása az idő függvényében, mértékegysége: m,

$v_{zár}(t)$ a zárkeret sebessége az idő függvényében, mértékegysége: $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

2.2.1.6 Egyenletek az 5. tartományban (LS/LS rendszer)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{f \cdot \Omega - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot (\varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2 + \varphi_{zár} \cdot m_{zár} \cdot v_{zár}(t)^2)}{W_0 + W_{gm} - \alpha \cdot \Omega + A_{cső} \cdot l(t) + A_{gm} \cdot l_{zár}(t)}\right), \quad 2–16$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cso} \cdot \big(p(t) - p_{din}(t)\big) - F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \quad 1–52$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t), \quad 1–42$$

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{A_{gm} \cdot p(t) - c_r \cdot l_{zár}(t) - F_r - F_{s\_zár}}{\varphi_{zár} \cdot m_{zár}} - k_r \cdot \frac{d}{dt}l_{zár}(t), \quad 2–17$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \quad 2–15$$

---

[12] Pontosabban a „zár teljes” azon gépelemeinek redukált tömege, amelyek érintettek a mozgásban.

2.2.1.7 Egyenletek a 6. tartományban (LS/LS rendszer)

A felírható differenciálegyenletek a segédfüggvényekkel:

$$\Psi_{gáz\_cső}(t)=\frac{\Omega-m_{gáz\_csőszáj}(t)}{\Omega}, \qquad 1\text{–}69$$

$$\rho_{gáz}(t)=\frac{\Omega\cdot\Psi_{gáz\_cső}(t)}{W_0+W_{cső}+W_{gm}-\alpha\cdot\Omega\cdot\Psi_{gáz\_cső}(t)+A_{gm}\cdot l_{zár}(t)}, \qquad 2\text{–}18$$

$$\frac{d}{dt}p(t)=$$

$$=\frac{d}{dt}\left(\frac{\left(f\cdot\Omega-\frac{(\kappa-1)}{2}\cdot\left(\varphi\cdot m_{löv}\cdot {v_0}^2+\varphi_{zár}\cdot m_{zár}\cdot v_{zár}(t)^2\right)\right)\cdot\Psi_{gáz\_cső}(t)}{W_0+W_{cső}+W_{gm}-\alpha\cdot\Omega\cdot\Psi_{gáz\_cső}(t)+A_{gm}\cdot l_{zár}(t)}\right), \qquad 2\text{–}19$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_csőszáj}(t)=\eta_{csőszáj}\cdot A_{cső}\cdot\varrho_{gáz\_krit}(t)\cdot u_{krit}(t). \qquad 1\text{–}72$$

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t)=\frac{A_{gm}\cdot p(t)-c_r\cdot l_{zár}(t)-F_r-F_{s\_zár}}{\varphi_{zár}\cdot m_{zár}}-k_r\cdot\frac{d}{dt}l_{zár}, \qquad 2\text{–}17$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t)=v_{zár}(t). \qquad 2\text{–}15$$

2.2.1.8 Egyenletek a 7. tartományban (LS/LS rendszer)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t)=\frac{-c_r\cdot l_{zár}(t)-F_r-F_{s\_zár}}{\varphi_{zár}\cdot m_{zár}}-k_r\cdot\frac{d}{dt}l_{zár}, \qquad 2\text{–}20$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t)=v_{zár}(t). \qquad 2\text{–}15$$

2.2.1.9 Egyenletek a 8. tartományban (LS/LS rendszer)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t)=\frac{-c_r\cdot l_{zár}(t)-F_r+F_{s\_zár}}{\varphi_{zár}\cdot m_{zár}}-k_r\cdot\frac{d}{dt}l_{zár}, \qquad 2\text{–}21$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t)=v_{zár}(t). \qquad 2\text{–}15$$

2.2.2 MŰKÖDÉS CSÖKKENTETT ENERGIASZINTŰ ÜZEMÁLLAPOTBAN (LS/LS RENDSZER)

A lövedék réselés utáni sebességét itt a koncentrált paraméterű rendszer egyenleteivel számítom, amely nagyobb sebességet eredményez, mint a valóságos. A rendszer működést a lövedék kirepüléséig vizsgálom, ui a kirepülésig bekövetkezik a csőnyomás lecsengése is. A működési tartományt itt is nyolc részre osztom, amelyekben más-más egyenletrendszerek írják le a folyamatokat.

2.2.2.1 A tartományok leírása és határaik (LS/LS rendszer, csökkentett energiaszint)

1. tartomány: Tart a lőportöltet begyulladásától a lövedék megindulásáig, expanzió és munkavégzés nélkül. A tartomány azonos a 1.5.5 részben tárgyalt pirostatikus szakasszal. A tartományban csak a redukált csőfurat rendszer érintett. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **zöld**.

2. tartomány: Tart a lövedék megindulásától a gázátömlőfurat elégéséig. A tartomány azonos a 1.5.6 részben ismertetett pirodinamikus szakasszal. A tartományban csak a redukált csőfurat rendszer érintett. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **piros**.

3. tartomány: Tart a gázátömlőfurattól a gázmotor feltöltődéséig. A tartomány forrásos pirodinamikus szakasz, kapcsolt ballisztikai alrendszerrel. A tartományban valamennyi, azaz a redukált csőfurat rendszer, a redukált gázhenger rendszer és a redukált zárszerkezet rendszer érintett. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **a gázmotor bíbor, a fegyvercső ciánkék**.

4. tartomány: Tart a gázmotor feltöltődésétől a réselésig. A tartomány azonos a 1.5.6 részben ismertetett pirodinamikus szakasszal, valós ballisztikai alrendszer nélkül. A három alrendszer ebben a szakaszban is összekapcsolt állapotban van, az összeköttetést a gázátömlőfurat, a gázhengerfurat, valamint a gázdugattyú biztosítja. A gázáramlás a csőfuratból a gázhenger irányába halad, közel egyensúlyi feltételek mellett. Kritikus állapot nem alakul ki, mivel a csőfuratban lévő gáz nyomásváltozási-sebessége kicsi. A gázhenger a csőfurat kiterjesztett részének tekinthető, az ott uralkodó intenzív állapotjelzőket azonosnak veszem a csőfuratban lévőkkel. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **sötétpiros**.

5. tartomány: Tart a réseléstől a gázmotor és a csőfurat egyidejű lepuffanásáig. A tartomány forrásos pirodinamikus szakasz, valós ballisztikai alrendszer nélkül.

A három alrendszer ebben a szakaszban is összekapcsolt állapotban van, az összeköttetés az előző pont szerinti. A gázáramlás a gázhengerből a csőfurat irányába halad közel egyensúlyi feltételek mellett, kritikus állapot nem alakul ki, az előző szerint. A gázhenger a csőfurat kiterjesztett részének tekinthető, az ott uralkodó intenzív állapotjelzőket azonosnak veszem a csőfuratban lévőkkel. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **fekete**.

6. tartomány: Tart a gáznyomás lecsengésétől a lövedék kirepüléséig. Ballisztikai gerjesztés nincs, a lövedék a súrlódás hatására lassuló mozgást végez. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **sárgászöld**.

7. tartomány: Tart a lövedék kirepülésétől a zár felütközéséig vagy megállásáig. A zár, mint mechanikai lengőrendszer végzi csillapított, gerjesztetlen lengését. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **barna**.

8. tartomány: Tart a zár hátsó pozícióból való megindulásától annak felütközéséig a csőfaron. A zár, mint mechanikai lengőrendszer végzi csillapított, gerjesztetlen lengését. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **arany**.

2.2.2.2 Egyenletek az 1. tartományban (LS/LS rendszer, csökkentett energiaszint)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{f \cdot \omega(t)}{W_0 - \frac{\Omega - \omega(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t)}\right), \quad 1\text{–}62$$

$$\frac{d}{dt}\omega(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\Omega \cdot \varrho_{lp}}{\omega_1} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \quad 1\text{–}63$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1 \cdot p(t). \quad 1\text{–}2$$

2.2.2.3 Egyenletek a 2. tartományban (LS/LS rendszer, csökkentett energiaszint)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{f \cdot \omega(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2}{W_0 - \frac{\Omega - \omega(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t) + A_{cső} \cdot l(t)}\right), \quad 1\text{–}64$$

$$\frac{d}{dt}\omega(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\Omega \cdot \varrho_{lp}}{\omega_1} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \quad 1\text{–}63$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1 \cdot p(t), \quad 1\text{–}2$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cso} \cdot \left(p(t) - p_{din}(t)\right) - F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \quad 1\text{–}52$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t). \quad 1\text{–}42$$

2.2.2.4 Egyenletek a 3. tartományban (LS/LS rendszer, csökkentett energiaszint)

A modell alapján a gázhengerben a lőporégés sebességét a csőnyomás határozza meg. Ezzel a kikötéssel biztosíthatjuk, hogy a lőportöltet egyszerre égjen el, és az egyenletek kezelhetők maradjanak. Ebben tartományban lőporszemcse csak a gázhenger és a gázdugattyú illesztési hézagján keresztül hagyja el a rendszert. Meg kell határozni úgy a csőben, mint a gázhenger terében lévő szemcseszám függvényt. A csőből a gázhenger terébe átlépő lőporgázok áramlásuk során magukkal ragadnak lőporszemcséket, ezért felvetődik a kérdés, hogy milyen modell alapján tudjuk meghatározni a megszökő gázokban lévő lőportömeg arányt?

Azzal a feltételezéssel élek, hogy a lőporszemcsék egyenletesen oszlanak el a fegyvercső gázzal kitöltött terében, és ezt az eloszlást folytonos függvényként kezelem. További feltételezésem, hogy az időegység alatt eltávozó lőportömeg és a lőporgáztömeg aránya (a tömegáramok aránya) minden időpillanatban egyenlő a fegyvercső gázterében lévő lőportömeg és lőporgáztömeg arányával. Meg kell különböztetni a fegyvercsőben és a gázhengerben keletkezett gázokat, ezzel:

$$\frac{\frac{d}{dt}m_{lp\_gm}(t)}{\frac{d}{dt}m_{gáz\_gm}(t)} = \frac{\Omega - \omega_{cső}(t) - m_{lp\_gm}(t)}{\omega_{cső}(t) - m_{gáz\_gm}(t)}, \quad (2\text{–}22)$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_gm}(t) = \eta_{gáf} \cdot A_{gáf} \cdot \varrho_{krit}(t) \cdot u_{krit}(t), \quad (2\text{–}12)$$

$$\frac{d}{dt}m_{lp\_gm}(t) = \frac{\left(\Omega - \omega_{cső}(t) - m_{lp\_gm}(t)\right) \cdot \frac{d}{dt}m_{gáz\_gm}(t)}{\omega_{cső}(t) - m_{gáz\_gm}(t)} \quad (2\text{–}23)$$

$$w_{kezd\_lp} = a_3 \cdot {e_1}^3 + a_2 \cdot {e_1}^2 + a_1 \cdot e_1, \quad (2\text{–}24)$$

$$w_{eé\_lp}(t) = a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t), \quad (2\text{–}25)$$

$$\omega_{1\_lp}(t) = \varrho_{lp} \cdot \left(w_{kezd\_lp} - w_{eé\_lp}(t)\right). \quad (2\text{–}26)$$

A 2–12 tömegáram egyenlet felírásához szükséges a kritikus sűrűségre és az adiabatikus hangsebességre:

$$\varrho_{gáz}(t) = \frac{\omega_{cső}(t) - m_{gáz\_gm}(t)}{W_0 - \frac{N_{lp\_cső}(t) \cdot \omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega_{cső}(t) \cdot \Psi_{gáz\_cső/cső}(t) + A_{cső} \cdot l(t)}, \quad (2\text{–}27)$$

$$\varrho_{gáz\_krit}(t) = \varrho_{gáz}(t) \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{1}{\kappa - 1}}, \quad (1\text{–}46)$$

$$T_{krit}(t) = \frac{p(t)}{\varrho_{gáz}(t) \cdot R_{spec}} \cdot \frac{2}{\kappa + 1}, \quad (2\text{–}6)$$

$$u_{krit}(t) = \sqrt{\kappa \cdot R_{spec} \cdot T_{krit}(t)}, \quad (2\text{–}8)$$

Jelölések:

w_{kezd_lp} a lőporszemcse kezdeti térfogata, mértékegysége: m^3,

$w_{eé\_lp}(t)$ a lőporszemcse elégett térfogata az idő függvényében, mértékegysége: m^3,

$\omega_{1\_lp}(t)$ a lőporszemcse elégett tömege az idő függvényében, mértékegysége: kg,

$\omega_{cső}(t)$ a fegyvercsőben lévő lőporgáztömeg az idő függvényében, mértékegysége: kg,

$m_{lp\_gm}(t)$ a gázmotorba átáramlott lőportömeg az idő függvényében, mértékegysége: kg.

A fegyvercsőben égő lőpor folytonos darabszám függvénye:

$$N_{lp\_cső}(t) = \frac{\Omega - \omega_{cső}(t) - m_{lp\_gm}(t)}{\omega_{1\_lp}(t)}. \tag{2–28}$$

Jelen esetben a rendszer valódi forrással is rendelkezik, mivel ebben tartományban lőporszemcse és lőporgáz hagyja el a rendszert, a gázhenger és a gázdugattyú illesztési hézagján. Az illesztési hézagon keresztül a környezetbe távozó lőporgázra és lőporra alkalmazom az előzőt:

$$\frac{\frac{d}{dt} m_{lp\_héz}(t)}{\frac{d}{dt} m_{gáz\_héz}(t)} = \frac{m_{lp\_gm}(t) - \omega_{gm}(t) - m_{lp\_héz}(t)}{m_{gáz\_gm}(t) + \omega_{gm}(t) - m_{gáz\_héz}(t)}, \tag{2–29}$$

$$\frac{d}{dt} m_{gáz\_héz}(t) = \eta_{héz} \cdot A_{héz} \cdot \varrho_{gáz\_krit\_gm}(t) \cdot u_{krit\_gm}(t), \tag{2–13}$$

$$\frac{d}{dt} m_{lp\_héz}(t) = \frac{\left(m_{lp\_gm}(t) - \omega_{gm}(t) - m_{lp\_héz}(t)\right) \cdot \frac{d}{dt} m_{gáz\_héz}(t)}{m_{gáz\_gm}(t) + \omega_{gm}(t) - m_{gáz\_héz}(t)}. \tag{2–30}$$

A 2–13 tömegáram egyenlet felírásához szükséges a kritikus sűrűség és az adiabatikus hangsebesség:

$$\varrho_{gáz\_gm}(t) = \\ = \frac{\omega_{gm}(t) + m_{gáz\_gm}(t) - m_{gáz\_héz}(t)}{W_{gm} - \frac{N_{lp\_gm}(t) \cdot \omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \left(\omega_{gm}(t) + m_{gáz\_gm}(t) - m_{gáz\_héz}(t)\right) + A_{gm} \cdot l_{zár}(t)}, \tag{2–31}$$

$$\varrho_{gáz\_krit\_gm}(t) = \varrho_{gáz\_gm}(t) \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{1}{\kappa - 1}}, \tag{2–5}$$

$$T_{krit\_gm}(t) = \frac{p_{gm}(t)}{\varrho_{gáz\_gm}(t) \cdot R_{spec}} \cdot \frac{2}{\kappa + 1}, \tag{2–7}$$

$$u_{krit\_gm}(t) = \sqrt{\kappa \cdot R_{spec} \cdot T_{krit\_gm}(t)}, \tag{2–9}$$

ahol:

$m_{lp\_héz}(t)$ a gázmotorból a környezetbe áramlott lőportömeg az idő függvényében, mértékegysége: kg.

A gázmotorban égő lőpor folytonos darabszám függvénye:

$$N_{lp\_gm}(t) = \frac{m_{lp\_gm}(t) - \omega_{gm}(t) - m_{lp\_héz}(t)}{\omega_{1\_lp}(t)}. \tag{2–32}$$

A darabszám-függvények segítségével meghatározható a fegyvercső és a gázhenger gázfejlesztési függvénye:

$$\frac{d}{dt}\omega_{cső}(t) = \frac{d}{dt}\left(N_{lp\_cső}(t) \cdot \varrho_{lp} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \tag{2–33}$$

$$\frac{d}{dt}\omega_{gm}(t) = \frac{d}{dt}\left(N_{lp\_gm}(t) \cdot \varrho_{lp} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right). \tag{2–34}$$

Szükség lesz a gázhengerben lévő lőporgázhányadra, amelyet a fegyvercsőben kelet- kezett gázokra vonatkoztatunk, valamint a csőben maradó lőporgáz részarányára:

$$\Psi_{gáz\_cső/cső}(t) = \frac{\omega_{cső}(t) - m_{gáz\_gm}(t)}{\omega_{cső}(t)}, \tag{2–35}$$

$$\Psi_{gáz\_gm/cső}(t) = \frac{m_{gáz\_gm}(t)}{\omega_{cső}(t)}. \tag{2–36}$$

A fegyvercsőben és a gázhengerben lévő lőporhányadra nincs szükség, az égő darab- számfüggvények ezeket reprezentálják.

A gázhengerben lévő lőporgázhányad:

$$\Psi_{gáz\_gm}(t) = \frac{m_{gáz\_gm}(t) + \omega_{gm}(t) - m_{gáz\_héz}(t)}{m_{gáz\_gm}(t) + \omega_{gm}(t)}. \tag{2–37}$$

A gázhengerben lévő lőporgázok energiafüggvényére írható, hogy:

$$E_{gm}(t) = f \cdot \left(\omega_{gm}(t) + m_{gáz\_gm}(t)\right) - \Psi_{gáz\_gm/cső}(t) \cdot \left(\frac{(\kappa-1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2\right), \tag{2–38}$$

Ebből a gázhenger nyomására adódik, hogy:

$$p_{gm}(t) = \frac{\left(E_{gm}(t) - \frac{(\kappa-1)}{2} \cdot \varphi_{zár} \cdot m_{zár} \cdot v_{zár}(t)^2\right) \cdot \Psi_{gáz\_gm}(t)}{W_{gm} - \frac{N_{lp\_gm}(t) \cdot \omega_{1_{lp}}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \left(m_{gáz\_gm}(t) + \omega_{gm}(t)\right) + A_{gm} \cdot l_{zár}(t)}. \tag{2–39}$$

A fegyvercső nyomása:

$$p(t) = \frac{\left(f \cdot \omega_{cső}(t) - \frac{(\kappa-1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2\right) \cdot \Psi_{gáz\_cső/cső}(t)}{W_0 - \frac{N_{lp\_cső}(t) \cdot \omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega_{cső}(t) \cdot \Psi_{gáz\_cső/cső}(t) + A_{cső} \cdot l(t)}. \tag{2–40}$$

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t) =$$

$$= \frac{d}{dt}\left(\frac{\left(f \cdot \omega_{cső}(t) - \frac{(\kappa-1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2\right) \cdot \Psi_{gáz\_cső/cső}(t)}{W_0 - \frac{N_{lp\_cső}(t) \cdot \omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega_{cső}(t) \cdot \Psi_{gáz\_cső/cső}(t) + A_{cső} \cdot l(t)}\right), \tag{2–41}$$

$$\frac{d}{dt}p_{gm}(t) =$$

$$= \frac{d}{dt}\left(\frac{\left(E_{gm}(t) - \frac{(\kappa-1)}{2}\cdot\varphi_{zár}\cdot m_{zár}\cdot v_{zár}(t)^2\right)\cdot\Psi_{gáz\_gm}(t)}{W_{gm} - \frac{N_{lp\_gm}(t)\cdot\omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha\cdot\left(m_{gáz\_gm}(t) + \omega_{gm}(t)\right) + A_{gm}\cdot l_{zár}(t)}\right), \qquad 2\text{–}42$$

$$\frac{d}{dt}\omega_{cső}(t) = \frac{d}{dt}\left(N_{lp\_cső}(t)\cdot\varrho_{lp}\cdot\left(a_3\cdot e(t)^3 + a_2\cdot e(t)^2 + a_1\cdot e(t)\right)\right), \qquad 2\text{–}33$$

$$\frac{d}{dt}\omega_{gm}(t) = \frac{d}{dt}\left(N_{lp\_gm}(t)\cdot\varrho_{lp}\cdot\left(a_3\cdot e(t)^3 + a_2\cdot e(t)^2 + a_1\cdot e(t)\right)\right), \qquad 2\text{–}34$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_gm}(t) = \eta_{gáf}\cdot A_{gáf}\cdot\varrho_{krit}(t)\cdot u_{krit}(t), \qquad 2\text{–}12$$

$$\frac{d}{dt}m_{lp\_gm}(t) = \frac{\left(\Omega - \omega_{cső}(t) - m_{lp\_gm}(t)\right)\cdot\frac{d}{dt}m_{gáz\_gm}(t)}{\omega_{cső}(t) - m_{gáz\_gm}(t)}, \qquad 2\text{–}23$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t) = \eta_{héz}\cdot A_{héz}\cdot\varrho_{krit\_gm}(t)\cdot u_{krit\_gm}(t), \qquad 2\text{–}13$$

$$\frac{d}{dt}m_{lp\_héz}(t) = \frac{\left(m_{lp\_gm}(t) - \omega_{gm}(t) - m_{lp\_héz}(t)\right)\cdot\frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t)}{m_{gáz\_gm}(t) + \omega_{gm}(t) - m_{gáz\_héz}(t)}, \qquad 2\text{–}30$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1\cdot p(t), \qquad 1\text{–}2$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cso}\cdot\left(p(t) - p_{din}(t)\right) - F_s}{\varphi\cdot m_{löv}}, \qquad 1\text{–}52$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t), \qquad 1\text{–}42$$

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{A_{gm}\cdot p_{gm}(t) - c_r\cdot l_{zár}(t) - F_r - F_{s\_zár}}{\varphi_{zár}\cdot m_{zár}} - k_r\cdot\frac{d}{dt}l_{zár}(t), \qquad 2\text{–}14$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \qquad 2\text{–}15$$

2.2.2.5 Egyenletek a 4. tartományban (LS/LS rendszer, csökkentett energiaszint)

Ebben a tartományban a gázmegszökés hatását szintén figyelembe veszem, a különbség annyi az előző ponthoz képest, hogy a gázhenger és a fegyvercső egy ballisztikai rendszert képez.

Az arányosság feltételezésével:

$$\frac{\frac{d}{dt}m_{lp\_héz}(t)}{\frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t)} = \frac{\Omega - \omega(t) - m_{lp\_héz}(t)}{\omega(t) - m_{gáz\_héz}(t)}, \qquad 2\text{–}43$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t) = \eta_{héz} \cdot A_{héz} \cdot \varrho_{krit}(t) \cdot u_{krit}(t), \quad 2\text{–}44$$

$$\frac{d}{dt}m_{lp\_héz}(t) = \frac{\left(\Omega - \omega(t) - m_{lp\_héz}(t)\right) \cdot \frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t)}{\omega(t) - m_{gáz\_héz}(t)}, \quad 2\text{–}45$$

A 2–44 tömegáram egyenlet felírásához szükséges a kritikus sűrűség és adiabatikus hangsebesség:

$$\varrho_{gáz}(t) = \frac{\omega(t) - m_{gáz\_héz}(t)}{W_0 + W_{gm} - \frac{N_{lp}(t) \cdot \omega_{1_{lp}}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \left(\omega(t) - m_{gáz\_héz}(t)\right) + A_{cső} \cdot l(t) + A_{gm} \cdot l_{zát}(t)}, \quad 2\text{–}46$$

$$\varrho_{gáz\_krit}(t) = \varrho_{gáz}(t) \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{1}{\kappa - 1}}, \quad 1\text{–}46$$

$$T_{krit}(t) = \frac{p(t)}{\varrho_{gáz}(t) \cdot R_{spec}} \cdot \frac{2}{\kappa + 1}, \quad 2\text{–}6$$

$$u_{krit}(t) = \sqrt{\kappa \cdot R_{spec} \cdot T_{krit}(t)}, \quad 2\text{–}8$$

A fegyvercsőben égő lőpor folytonos darabszám függvénye:

$$N_{lp}(t) = \frac{\Omega - \omega(t) - m_{lp\_héz}(t)}{\omega_{1\_lp}(t)}. \quad 2\text{–}47$$

A darabszám-függvény segítségével meghatározható a gázfejlesztési függvény:

$$\frac{d}{dt}\omega(t) = \frac{d}{dt}\left(N_{lp}(t) \cdot \varrho_{lp} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right). \quad 2\text{–}48$$

A rendszerben lévő lőporgázhányad:

$$\Psi_{gáz}(t) = \frac{\omega(t) - m_{gáz\_héz}(t)}{\omega(t)}. \quad 2\text{–}49$$

Ezekkel a fegyvercső nyomása:

$$p(t) = \frac{\left(f \cdot \omega(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot (\varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2 + \varphi_{zár} \cdot m_{zár} \cdot v_{zár}(t)^2)\right) \cdot \Psi_{gáz}(t)}{W_0 + W_{gm} - \frac{N_{lp}(t) \cdot \omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t) \cdot \Psi_{gáz}(t) + A_{cső} \cdot l(t) + A_{gm} \cdot l_{zát}(t)}. \quad 2\text{–}50$$

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\left(f \cdot \omega(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot (\varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2 + \varphi_{zár} \cdot m_{zár} \cdot v_{zár}(t)^2)\right) \cdot \Psi_{gáz}(t)}{W_0 + W_{gm} - \frac{N_{lp}(t) \cdot \omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t) \cdot \Psi_{gáz}(t) + A_{cső} \cdot l(t) + A_{gm} \cdot l_{zát}(t)}\right), \quad 2\text{–}51$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t) = \eta_{héz} \cdot A_{héz} \cdot \varrho_{krit}(t) \cdot u_{krit}(t), \quad 2\text{–}44$$

$$\frac{d}{dt}m_{lp\_héz}(t) = \frac{\left(\Omega - \omega(t) - m_{lp\_héz}(t)\right) \cdot \frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t)}{\omega(t) - m_{gáz\_héz}(t)}, \qquad 2–45$$

$$\frac{d}{dt}\omega(t) = \frac{d}{dt}\left(N_{lp}(t) \cdot \varrho_{lp} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \qquad 2–48$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1 \cdot p(t), \qquad 1–2$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cso} \cdot \left(p(t) - p_{din}(t)\right) - F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \qquad 1–52$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t), \qquad 1–42$$

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{A_{gm} \cdot p(t) - c_r \cdot l_{zár}(t) - F_r - F_{s\_zár}}{\varphi_{zár} \cdot m_{zár}} - k_r \cdot \frac{d}{dt}l_{zár}(t), \qquad 2–17$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \qquad 2–15$$

2.2.2.6 Egyenletek az 5. tartományban (LS/LS rendszer, csökkentett energiaszint)

A fegyvercső réselésének a lehetőségekhez mérten nagynak kell lennie, a hatékony gázleeresztés megvalósítása érdekében. Ha a réselés keresztmetszete nagyobb, mint a fegyvercső furatának területe, akkor a kiáramlást a fegyvercső keresztmetszete fogja meghatározni. Mivel a gázhenger és a gázdugattyú illesztési hézagjával meghatározott áramlási keresztmetszet több nagyságrenddel kisebb, mint a réselés vagy a csőfurat áramlási keresztmetszete, ezért ebben a tartományban a hatását elhanyagolom. A lövedéket a csőnyomásnál kisebb nyomás gyorsítja, mert most a csőnyomás a helynek is a függvénye, de ezt a koncentrált paraméterű modellel nem lehet figyelembe venni, ezért úgy kezelem, hogy lövedéket is a cső nyomása gyorsítja, ezzel magasabb kezdősebesség várható, mint a valóságos.

Most nem kell megkülönböztetni a fegyvercsőben és a gázhengerben keletkezett gázokat, mert a modell szerint a gázhenger rendszer a fegyvercsőfurat része.

Az előzők szerint a rendszer egy darab forrással rendelkezik, ezért az égő darabszám folytonos függvénye:

$$N_{lp}(t) = \frac{\Omega - \omega(t) - m_{lp\_rés}(t)}{\omega_{1\_lp}(t)}. \qquad 2–52$$

Az arányosság feltételezésével:

$$\frac{\frac{d}{dt}m_{lp\_rés}(t)}{\frac{d}{dt}m_{gáz\_rés}(t)}=\frac{\Omega-\omega(t)-m_{lp\_rés}(t)}{\omega(t)-m_{gáz\_rés}(t)}, \qquad 2\text{–}53$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_rés}(t)=A_{cső}\cdot\varrho_{krit}(t)\cdot u_{krit}(t), \qquad 2\text{–}54$$

$$\frac{d}{dt}m_{lp\_rés}(t)=\frac{\left(\Omega-\omega(t)-m_{lp\_rés}(t)\right)\cdot\frac{d}{dt}m_{gáz\_rés}(t)}{\omega(t)-m_{gáz\_rés}(t)}, \qquad 2\text{–}55$$

ahol:

$m_{gáz\_rés}(t)$ a réselésen kiáramló lőporgáztömeg az idő függvényében, mértékegysége: kg,

$m_{lp\_rés}(t)$ a réselésen kiáramló lőportömeg az idő függvényében, mértékegysége: kg.

A 2–54 tömegáram egyenlet felírásához szükséges a kritikus sűrűség és adiabatikus hangsebesség:

$$\varrho_{gáz}(t)=$$
$$=\frac{\omega(t)-m_{gáz\_rés}(t)}{W_0+W_{gm}-\frac{N_{lp}(t)\cdot\omega_{1_{lp}}(t)}{\varrho_{lp}}-\alpha\cdot\left(\omega(t)-m_{gáz\_rés}(t)\right)+A_{cső}\cdot l(t)+A_{gm}\cdot l_{zát}(t)}, \qquad 2\text{–}56$$

$$\varrho_{gáz\_krit}(t)=\varrho_{gáz}(t)\cdot\left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}, \qquad 1\text{–}46$$

$$T_{krit}(t)=\frac{p(t)}{\varrho_{gáz}(t)\cdot R_{spec}}\cdot\frac{2}{\kappa+1}, \qquad 2\text{–}6$$

$$u_{krit}(t)=\sqrt{\kappa\cdot R_{spec}\cdot T_{krit}(t)}, \qquad 2\text{–}8$$

A fegyvercsőben égő lőpor folytonos darabszám függvénye:

$$N_{lp}(t)=\frac{\Omega-\omega(t)-m_{lp\_rés}(t)}{\omega_{1\_lp}(t)}. \qquad 2\text{–}57$$

A rendszerben lévő lőporgázhányad:

$$\Psi_{gáz}(t)=\frac{\omega(t)-m_{gáz\_rés}(t)}{\omega(t)}. \qquad 2\text{–}58$$

A darabszám-függvény segítségével meghatározható a gázfejlesztési függvény:

$$\frac{d}{dt}\omega(t)=\frac{d}{dt}\left(N_{lp}(t)\cdot\varrho_{lp}\cdot\left(a_3\cdot e(t)^3+a_2\cdot e(t)^2+a_1\cdot e(t)\right)\right). \qquad 2\text{–}59$$

Ezekkel a fegyvercső nyomása:

$$p(t)=\frac{\left(f\cdot\omega(t)-\frac{(\kappa-1)}{2}\cdot\left(\varphi\cdot m_{löv}\cdot v(t)^2+\varphi_{zár}\cdot m_{zár}\cdot v_{zár}(t)^2\right)\right)\cdot\Psi_{gáz}(t)}{W_0+W_{gm}-\frac{N_{lp}(t)\cdot\omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}}-\alpha\cdot\omega(t)\cdot\Psi_{gáz}(t)+A_{cső}\cdot l(t)+A_{gm}\cdot l_{zát}(t)}. \qquad 2\text{–}60$$

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t)=$$

$$=\frac{d}{dt}\left(\frac{\left(f\cdot\omega(t)-\frac{(\kappa-1)}{2}\cdot\left(\varphi\cdot m_{löv}\cdot v(t)^2+\varphi_{zár}\cdot m_{zár}\cdot v_{zár}(t)^2\right)\right)\cdot\Psi_{gáz}(t)}{W_0+W_{gm}-\frac{N_{lp}(t)\cdot\omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}}-\alpha\cdot\omega(t)\cdot\Psi_{gáz}(t)+A_{cső}\cdot l(t)+A_{gm}\cdot l_{zát}(t)}\right), \qquad 2\text{–}61$$

$$\frac{d}{dt}\omega(t)=\frac{d}{dt}\left(N_{lp}(t)\cdot\varrho_{lp}\cdot\left(a_3\cdot e(t)^3+a_2\cdot e(t)^2+a_1\cdot e(t)\right)\right), \qquad 2\text{–}59$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_rés}(t)=A_{cső}\cdot\varrho_{krit}(t)\cdot u_{krit}(t), \qquad 2\text{–}54$$

$$\frac{d}{dt}m_{lp\_rés}(t)=\frac{\left(\Omega-\omega(t)-m_{lp\_rés}(t)\right)\cdot\frac{d}{dt}m_{gáz\_rés}(t)}{\omega(t)-m_{gáz\_rés}(t)} \qquad 2\text{–}55$$

$$\frac{d}{dt}e(t)=u_1\cdot p(t), \qquad 1\text{–}2$$

$$\frac{d}{dt}v(t)=\frac{A_{cso}\cdot\left(p(t)-p_{din}(t)\right)-F_s}{\varphi\cdot m_{löv}}, \qquad 1\text{–}52$$

$$\frac{d}{dt}l(t)=v(t), \qquad 1\text{–}42$$

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t)=\frac{A_{gm}\cdot p(t)-c_r\cdot l_{zár}(t)-F_r-F_{s\_zár}}{\varphi_{zár}\cdot m_{zár}}-k_r\cdot\frac{d}{dt}l_{zár}(t), \qquad 2\text{–}17$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t)=v_{zár}(t). \qquad 2\text{–}15$$

2.2.2.7 Egyenletek a 6. tartományban (LS/LS rendszer, csökkentett energiaszint)

Nincs ballisztikai gerjesztés, ezért a felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}v(t)=\frac{-F_s}{\varphi\cdot m_{löv}}, \qquad 2\text{–}62$$

$$\frac{d}{dt}l(t)=v(t), \qquad 1\text{–}42$$

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t)=\frac{-c_r\cdot l_{zár}(t)-F_r-F_{s\_zár}}{\varphi_{zár}\cdot m_{zár}}-k_r\cdot\frac{d}{dt}l_{zár}(t), \qquad 2\text{–}20$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t)=v_{zár}(t). \qquad 2\text{–}15$$

2.2.2.8 Egyenletek a 7. tartományban (LS/LS rendszer, csökkentett energiaszint)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{-c_r \cdot l_{zár}(t) - F_r - F_{s\_zár}}{\varphi_{zár} \cdot m_{zár}} - k_r \cdot \frac{d}{dt}l_{zár}(t), \qquad 2\text{–}20$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \qquad 2\text{–}15$$

2.2.2.9 Egyenletek a 8. tartományban (LS/LS rendszer, csökkentett energiaszint)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{-c_r \cdot l_{zár}(t) - F_r + F_{s\_zár}}{\varphi_{zár} \cdot m_{zár}} - k_r \cdot \frac{d}{dt}l_{zár}, \qquad 2\text{–}21$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \qquad 2\text{–}15$$

2.2.3 MŰKÖDÉS CSÖKKENTETT ENERGIASZINTŰ ÜZEMÁLLAPOTBAN (LS/SS RENDSZER GÁZCSAPDÁVAL)

A működést a teljes lövésfolyamatra vizsgálom. A lövedék kirepüléséig bekövetkezik a csőnyomás lecsengése is. A működési tartományt 8+2 részre osztom, amelyekben más-más egyenletrendszerek írják le a folyamatokat. A gázcsapda bezáródása után a hátsó gázhenger külön ballisztikai rendszert képez, így lesz az összes tartomány száma 10.

2.2.3.1 A tartományok leírása és határaik (LS/SS rendszer gázcsapdával, csökkentett energiaszint)

1. tartomány: Tart a lőportöltet begyulladásától a lövedék megindulásáig, expanzió és munkavégzés nélkül. A tartomány fizikai folyamatai azonosak a 2.2.2.1 szakaszban ismertetettekkel. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **zöld**.

2. tartomány: Tart a lövedék megindulásától a gázátömlőfurat elégéséig. A tartomány fizikai folyamatai azonosak a 2.2.2.1 szakaszban ismertetettekkel. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **piros**.

3. tartomány: Tart a gázátömlőfurattól a gázmotor feltöltődéséig. Ebben a tartományban kezd el gyorsulni a gázdugattyú, lényegesen nagyobb értékkel, mint a hosszú gázdugattyús rendszer szerelt dugattyúja. A nagyobb gyorsulás miatt az elmozdulása is nagyobb lesz, jelentékenyen növelve ezzel a gázhenger kezdeti térfogatát, amelybe így több égő szemcse tud beáramlani, mint szerelt dugattyús rendszer alkalmazása esetén. A tartomány fizikai folyamatai azonosak a 2.2.2.1 szakaszban ismertetettekkel. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **a gázmotor bíbor, a fegyvercső ciánkék**.

4. tartomány: Tart a gázmotor feltöltődésétől a réselés kezdetéig, amikor a gázmotor résvezérlése egyben elzárja[13] a gázátömlő nyílását[14], szétkapcsolva a ballisztikai rendszereket egymástól. A tartomány fizikai folyamatai azonosak a 2.2.2.1 szakaszban ismertetettekkel. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **sötétpiros**.

5. tartomány – lövedék: Tart a réseléstől a csőfurat lepuffanásáig. A tartomány forrásos pirodinamikus szakasz, ballisztikai alrendszer nélkül. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **fekete**.

50. tartomány[15] – zár: Tart a gázmotor zárásától a gázdugattyú zárkereten való felütközéséig. A tartomány forrásos pirodinamikus szakasz, ballisztikai főrendszer nélkül. Az alkalmazott modell szerint a gázdugattyú tökéletesen rugalmatlan ütközéssel csapódik a zárkeretnek, az ütközés utáni sebességük azonos lesz. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **szürke**.

6. tartomány – lövedék: Tart a gáznyomás lecsengésétől a lövedék kirepüléséig. A tartomány fizikai folyamatai azonosak a 2.2.2.1 szakaszban ismertetettekkel. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **olívaszürke**.

60. tartomány – zár: Tart a gázdugattyú-zárkeret csatlakozásától, a gázdugattyú megállásáig, a zárkeretről való lecsatlakozásáig. A tartomány forrásos pirodinamikus szakasz, ballisztikai főrendszer nélkül. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **sárgászöld**.

7. tartomány: Tart a gázdugattyú-zárkeret szétkapcsolódásától a zár

---

[13] A tartományok számának minimalizálása érdekében célszerű ezzel a közelítéssel élni. Valós tervezési feladat esetén a gázátömlő lezárása időben némileg meg kell előzze a fegyvercső réselésének nyitási időpillanatát, mert a késői zárás jelentősen rontja a gázmotor nyomásimpulzusát.

[14] Ebben az esetben ez nem furat, hanem pl. reteszfészek alakú rés, a lehető legrövidebb elmozdulás miatti elzárhatóság érdekében.

[15] A szimultán végbemenő folyamatok esetében a zárra vonatkozó sorszámozás 10-zel szoroztam, a jobb áttekinthetőség érdekében.

felütközéséig vagy megállásáig. A tartomány fizikai folyamatai azonosak a 2.2.2.1 szakaszban ismertetettekkel. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **barna**.

8. tartomány: Tart a zár hátsó pozícióból való megindulásától annak felütközéséig a csőfaron. A tartomány fizikai folyamatai azonosak a 2.2.2.1 szakaszban ismertetettekkel. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **arany**.

2.2.3.2 Egyenletek az 1. tartományban (LS/SS rendszer gázcsapdával, csökkentett energiaszint)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t)=\frac{d}{dt}\left(\frac{f\cdot\omega(t)}{W_0-\frac{\Omega-\omega(t)}{\varrho_{lp}}-\alpha\cdot\omega(t)}\right), \qquad 1\text{–}62$$

$$\frac{d}{dt}\omega(t)=\frac{d}{dt}\left(\frac{\Omega\cdot\varrho_{lp}}{\omega_1}\cdot\left(a_3\cdot e(t)^3+a_2\cdot e(t)^2+a_1\cdot e(t)\right)\right), \qquad 1\text{–}63$$

$$\frac{d}{dt}e(t)=u_1\cdot p(t). \qquad 1\text{–}2$$

2.2.3.3 Egyenletek a 2. tartományban (LS/SS rendszer gázcsapdával, csökkentett energiaszint)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t)=\frac{d}{dt}\left(\frac{f\cdot\omega(t)-\frac{(\kappa-1)}{2}\cdot\varphi\cdot m_{löv}\cdot v(t)^2}{W_0-\frac{\Omega-\omega(t)}{\varrho_{lp}}-\alpha\cdot\omega(t)+A_{cső}\cdot l(t)}\right), \qquad 1\text{–}64$$

$$\frac{d}{dt}\omega(t)=\frac{d}{dt}\left(\frac{\Omega\cdot\varrho_{lp}}{\omega_1}\cdot\left(a_3\cdot e(t)^3+a_2\cdot e(t)^2+a_1\cdot e(t)\right)\right), \qquad 1\text{–}63$$

$$\frac{d}{dt}e(t)=u_1\cdot p(t), \qquad 1\text{–}2$$

$$\frac{d}{dt}v(t)=\frac{A_{cso}\cdot\left(p(t)-p_{din}(t)\right)-F_s}{\varphi\cdot m_{löv}}, \qquad 1\text{–}52$$

$$\frac{d}{dt}l(t)=v(t). \qquad 1\text{–}42$$

2.2.3.4 Egyenletek a 3. tartományban (LS/SS rendszer gázcsapdával, csökkentett energiaszint)

A tartomány fizikai folyamatai, egyenletei lényegében azonosak a 2.2.2.4 részben ismertetett tartománnyal, a különbség annyi, hogy a zárra vonatkozó paramétereket (rugójellemzők, másodlagos munka koefficiens, tömeg) ki kell cseréljük az ebben a tartományban mozgást végző gázdugattyú és az ahhoz tartozó rugó paramétereire.

A felírható segédfüggvények:

$$w_{kezd\_lp} = a_3 \cdot {e_1}^3 + a_2 \cdot {e_1}^2 + a_1 \cdot e_1, \tag{2–24}$$

$$w_{eé\_lp}(t) = a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t), \tag{2–25}$$

$$\omega_{1\_lp}(t) = \varrho_{lp} \cdot \left(w_{kezd\_lp} - w_{eé\_lp}(t)\right), \tag{2–26}$$

$$\varrho_{gáz}(t) = \\ = \frac{\omega_{cső}(t) - m_{gáz\_gm}(t)}{W_0 - \frac{N_{lp\_cső}(t) \cdot \omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega_{cső}(t) \cdot \Psi_{gáz\_cső/cső}(t) + A_{cső} \cdot l(t)}, \tag{2–27}$$

$$p_{din}(t) = \frac{\rho_{gáz}(t) \cdot v(t)^2}{2}, \tag{1–51}$$

$$\varrho_{gáz\_krit}(t) = \varrho_{gáz}(t) \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{1}{\kappa - 1}}, \tag{1–46}$$

$$T_{krit}(t) = \frac{p(t)}{\varrho_{gáz}(t) \cdot R_{spec}} \cdot \frac{2}{\kappa + 1}, \tag{2–6}$$

$$u_{krit}(t) = \sqrt{\kappa \cdot R_{spec} \cdot T_{krit}(t)}, \tag{2–8}$$

$$N_{lp\_cső}(t) = \frac{\Omega - \omega_{cső}(t) - m_{lp\_gm}(t)}{\omega_{1\_lp}(t)}, \tag{2–28}$$

$$\varrho_{gáz\_gm}(t) = \\ = \frac{\omega_{gm}(t) + m_{gáz\_gm}(t) - m_{gáz\_héz}(t)}{W_{gm} - \frac{N_{lp\_gm}(t) \cdot \omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \left(\omega_{gm}(t) + m_{gáz\_gm}(t) - m_{gáz\_héz}(t)\right) + A_{gm} \cdot l_{zár}(t)}, \tag{2–31}$$

$$\varrho_{gáz\_krit\_gm}(t) = \varrho_{gáz\_gm}(t) \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{1}{\kappa - 1}}, \tag{2–5}$$

$$T_{krit\_gm}(t) = \frac{p_{gm}(t)}{\varrho_{gáz\_gm}(t) \cdot R_{spec}} \cdot \frac{2}{\kappa + 1}, \tag{2–7}$$

$$u_{krit\_gm}(t) = \sqrt{\kappa \cdot R_{spec} \cdot T_{krit\_gm}(t)}, \tag{2–9}$$

$$\Psi_{gáz\_cső/cső}(t) = \frac{\omega_{cső}(t) - m_{gáz\_gm}(t)}{\omega_{cső}(t)}, \tag{2–35}$$

$$\Psi_{gáz\_gm/cső}(t) = \frac{m_{gáz\_gm}(t)}{\omega_{cső}(t)}, \tag{2–36}$$

$$\Psi_{gáz\_gm}(t) = \frac{m_{gáz\_gm}(t) + \omega_{gm}(t) - m_{gáz\_héz}(t)}{m_{gáz\_gm}(t) + \omega_{gm}(t)}. \quad 2–37$$

$$E_{gm}(t) = f \cdot \left(\omega_{gm}(t) + m_{gáz\_gm}(t)\right) - \Psi_{gáz\_gm/cső}(t) \cdot \left(\frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2\right), \quad 2–38$$

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t) =$$

$$= \frac{d}{dt}\left(\frac{\left(f \cdot \omega_{cső}(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2\right) \cdot \Psi_{gáz\_cső/cső}(t)}{W_0 - \frac{N_{lp\_cső}(t) \cdot \omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega_{cső}(t) \cdot \Psi_{gáz\_cső/cső}(t) + A_{cső} \cdot l(t)}\right), \quad 2–41$$

$$\frac{d}{dt}p_{gm}(t) =$$

$$= \frac{d}{dt}\left(\frac{E_{gm}(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi_{gd} \cdot m_{gd} \cdot v_{gd}(t)^2}{W_{gm} - \frac{N_{lp\_gm}(t) \cdot \omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \left(m_{gáz\_gm}(t) + \omega_{gm}(t)\right) + A_{gm} \cdot l_{gd}(t)}\right), \quad 2–63$$

$$\frac{d}{dt}\omega_{cső}(t) = \frac{d}{dt}\left(N_{lp\_cső}(t) \cdot \varrho_{lp} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \quad 2–33$$

$$\frac{d}{dt}\omega_{gm}(t) = \frac{d}{dt}\left(N_{lp\_gm}(t) \cdot \varrho_{lp} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \quad 2–34$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_gm}(t) = \eta_{gáf} \cdot A_{gáf} \cdot \varrho_{krit}(t) \cdot u_{krit}(t), \quad 2–12$$

$$\frac{d}{dt}m_{lp\_gm}(t) = \frac{\left(\Omega - \omega_{cső}(t) - m_{lp\_gm}(t)\right) \cdot \frac{d}{dt}m_{gáz\_gm}(t)}{\omega_{cső}(t) - m_{gáz\_gm}(t)}, \quad 2–23$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t) = \eta_{héz} \cdot A_{héz} \cdot \varrho_{krit\_gm}(t) \cdot u_{krit\_gm}(t), \quad 2–13$$

$$\frac{d}{dt}m_{lp\_héz}(t) = \frac{\left(m_{lp\_gm}(t) - \omega_{gm}(t) - m_{lp\_héz}(t)\right) \cdot \frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t)}{m_{gáz\_gm}(t) + \omega_{gm}(t) - m_{gáz\_héz}(t)}, \quad 2–30$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1 \cdot p(t), \quad 1–2$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cso} \cdot \left(p(t) - p_{din}(t)\right) - F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \quad 1–52$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t), \quad 1–42$$

$$\frac{d}{dt}v_{gd}(t) = \frac{A_{gm} \cdot p_{gm}(t) - c_{r\_gd} \cdot l_{gd}(t) - F_{r\_gd} - F_{s\_gd}}{\varphi_{gd} \cdot m_{gd}} - k_{r\_gd} \cdot \frac{d}{dt}l_{gd}(t), \quad 2–64$$

$$\frac{d}{dt}l_{gd}(t) = v_{gd}(t). \quad 2–65$$

Jelölések:

φ_{gd} a gázdugattyú fiktív tömeg együtthatója, mértékegysége: nincs,

m_{gd} a gázdugattyú tömege, mértékegysége: kg,

c_{r_gd} a gázdugattyú rugójának rugómerevsége, mértékegysége: $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$,

k_{r_gd} a gázdugattyú rugójának viszkózus csillapítási tényezője, mértékegysége: $\frac{1}{\mathrm{s}}$,

F_{r_gd} a gázdugattyú rugójának előfeszítési ereje, mértékegysége: N,

F_{s_gd} a gázdugattyú Coulomb-féle súrlódási ereje, mértékegysége: N,

$l_{gd}(t)$ a gázdugattyú elmozdulása az idő függvényében, mértékegysége: m,

$v_{gd}(t)$ a gázdugattyú sebessége az idő függvényében, mértékegysége: $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

2.2.3.5 Egyenletek a 4. tartományban (LS/SS rendszer gázcsapdával, csökkentett energiaszint)

A tartomány fizikai folyamatai, egyenletei lényegében azonosak a 2.2.2.5 részben ismertetett tartománnyal, a különbség itt is csak annyi, hogy a zárra vonatkozó paramétereket (rugójellemzők, másodlagos munka koefficiens, tömeg) ki kell cseréljük az ebben a tartományban mozgást végző gázdugattyú és az ahhoz tartozó rugó paramétereire.

A felírható segédfüggvények:

$$w_{kezd\_lp} = a_3 \cdot {e_1}^3 + a_2 \cdot {e_1}^2 + a_1 \cdot e_1, \tag{2–24}$$

$$w_{eé\_lp}(t) = a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t), \tag{2–25}$$

$$\omega_{1\_lp}(t) = \varrho_{lp} \cdot \left(w_{kezd\_lp} - w_{eé\_lp}(t)\right), \tag{2–26}$$

$$\varrho_{gáz}(t) =$$

$$= \frac{\omega_{cső}(t) - m_{gáz\_gm}(t)}{W_0 - \frac{N_{lp\_cső}(t) \cdot \omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega_{cső}(t) \cdot \Psi_{gáz\_cső/cső}(t) + A_{cső} \cdot l(t)}, \tag{2–27}$$

$$p_{din}(t) = \frac{\rho_{gáz}(t) \cdot v(t)^2}{2}, \tag{1–51}$$

$$\varrho_{gáz\_krit}(t) = \varrho_{gáz}(t) \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{1}{\kappa - 1}}, \tag{1–46}$$

$$T_{krit}(t) = \frac{p(t)}{\varrho_{gáz}(t) \cdot R_{spec}} \cdot \frac{2}{\kappa + 1}, \tag{2–6}$$

$$u_{krit}(t) = \sqrt{\kappa \cdot R_{spec} \cdot T_{krit}(t)}, \tag{2–8}$$

$$N_{lp}(t) = \frac{\Omega - \omega(t) - m_{lp\_héz}(t)}{\omega_{1\_lp}(t)}, \tag{2–47}$$

$$\varrho_{gáz}(t) = \\ = \frac{\omega(t) - m_{gáz\_héz}(t)}{W_0 + W_{gm} - \frac{N_{lp}(t) \cdot \omega_{1_{lp}}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \left(\omega(t) - m_{gáz\_héz}(t)\right) + A_{cső} \cdot l(t) + A_{gm} \cdot l_{zát}(t)}, \tag{2–46}$$

$$\varrho_{gáz\_krit\_gm}(t) = \varrho_{gáz\_gm}(t) \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1}\right)^{\frac{1}{\kappa - 1}}, \tag{2–5}$$

$$T_{krit\_gm}(t) = \frac{p_{gm}(t)}{\varrho_{gáz\_gm}(t) \cdot R_{spec}} \cdot \frac{2}{\kappa + 1}, \tag{2–7}$$

$$u_{krit\_gm}(t) = \sqrt{\kappa \cdot R_{spec} \cdot T_{krit\_gm}(t)}, \tag{2–9}$$

$$\Psi_{gáz}(t) = \frac{\omega(t) - m_{gáz\_héz}(t)}{\omega(t)}. \tag{2–49}$$

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\left(f \cdot \omega(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \left(\varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2 + \varphi_{gd} \cdot m_{gd} \cdot v_{gd}(t)^2\right)\right) \cdot \Psi_{gáz}(t)}{W_0 + W_{gm} - \frac{N_{lp}(t) \cdot \omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t) \cdot \Psi_{gáz}(t) + A_{cső} \cdot l(t) + A_{gm} \cdot l_{gd}(t)}\right), \tag{2–66}$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t) = \eta_{héz} \cdot A_{héz} \cdot \varrho_{krit}(t) \cdot u_{krit}(t), \tag{2–44}$$

$$\frac{d}{dt}m_{lp\_héz}(t) = \frac{\left(\Omega - \omega(t) - m_{lp\_héz}(t)\right) \cdot \frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t)}{\omega(t) - m_{gáz\_héz}(t)}, \tag{2–45}$$

$$\frac{d}{dt}\omega(t) = \frac{d}{dt}\left(N_{lp}(t) \cdot \varrho_{lp} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \tag{2–48}$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1 \cdot p(t), \tag{1–2}$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cso} \cdot \left(p(t) - p_{din}(t)\right) - F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \tag{1–52}$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t), \tag{1–42}$$

$$\frac{d}{dt}v_{gd}(t) = \frac{A_{gm} \cdot p_{gm}(t) - c_{r\_gd} \cdot l_{gd}(t) - F_{r\_gd} - F_{s\_gd}}{\varphi_{gd} \cdot m_{gd}} - k_{r\_gd} \cdot \frac{d}{dt}l_{gd}(t), \tag{2–64}$$

$$\frac{d}{dt}l_{gd}(t) = v_{gd}(t). \tag{2–65}$$

2.2.3.6 Egyenletek az 5. tartományban (LS/SS rendszer gázcsapdával, csökkentett energiaszint)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\left(f \cdot \omega(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2\right) \cdot \Psi_{gáz}(t)}{W_0 - \frac{N_{lp}(t) \cdot \omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t) \cdot \Psi_{gáz}(t) + A_{cső} \cdot l(t)}\right), \quad 2\text{–}67$$

$$\frac{d}{dt}\omega(t) = \frac{d}{dt}\left(N_{lp}(t) \cdot \varrho_{lp} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \quad 2\text{–}59$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_rés}(t) = A_{cső} \cdot \varrho_{krit}(t) \cdot u_{krit}(t), \quad 2\text{–}54$$

$$\frac{d}{dt}m_{lp\_rés}(t) = \frac{\left(\Omega - \omega(t) - m_{lp\_rés}(t)\right) \cdot \frac{d}{dt}m_{gáz\_rés}(t)}{\omega(t) - m_{gáz\_rés}(t)}, \quad 2\text{–}55$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1 \cdot p(t), \quad 1\text{–}2$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cso} \cdot \left(p(t) - p_{din}(t)\right) - F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \quad 1\text{–}52$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t). \quad 1\text{–}42$$

2.2.3.7 Egyenletek az 50. tartományban (LS/SS rendszer gázcsapdával, csökkentett energiaszint)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p_{gm}(t) =$$

$$= \frac{d}{dt}\left(\frac{\left(f \cdot \omega_{gm}(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi_{gd} \cdot m_{gd} \cdot v_{gd}(t)^2\right) \cdot \Psi_{gáz}(t)}{W_{gm} - \frac{N_{lp}(t) \cdot \omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega_{gm}(t) \cdot \Psi_{gáz}(t) + A_{gm} \cdot l_{gd}(t)}\right), \quad 2\text{–}68$$

$$\frac{d}{dt}\omega_{gm}(t) = \frac{d}{dt}\left(N_{lp}(t) \cdot \varrho_{lp} \cdot \left(a_3 \cdot e_{gm}(t)^3 + a_2 \cdot e_{gm}(t)^2 + a_1 \cdot e_{gm}(t)\right)\right), \quad 2\text{–}69$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t) = A_{héz} \cdot \varrho_{krit}(t) \cdot u_{krit}(t), \quad 2\text{–}70$$

$$\frac{d}{dt}m_{lp\_héz}(t) = \frac{\left(\Omega - \omega_{gm}(t) - m_{lp\_héz}(t)\right) \cdot \frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t)}{\omega_{gm}(t) - m_{gáz\_héz}(t)}, \quad 2\text{–}71$$

$$\frac{d}{dt}e_{gm}(t) = u_1 \cdot p_{gm}(t), \quad 2\text{–}72$$

$$\frac{d}{dt}v_{gd}(t) = \frac{A_{gm} \cdot p_{gm}(t) - c_{r\_gd} \cdot l_{gd}(t) - F_{r\_gd} - F_{s\_gd}}{\varphi_{gd} \cdot m_{gd}} - k_{r\_gd} \cdot \frac{d}{dt}l_{gd}(t), \qquad 2–64$$

$$\frac{d}{dt}l_{gd}(t) = v_{gd}(t). \qquad 2–65$$

Jelölések:

$A_{héz}$ a gázdugattyú illesztési hézagjának keresztmetszete, mértékegysége: m^2,

$\omega_{gm}(t)$ a gázmotorba korábban bejutott és a már ott keletkezett lőporgázok tömegének függvénye, mértékegysége: kg,

$m_{gáz\_héz}$ a gázdugattyú illesztési hézagján elszökött lőporgáz tömegének függvénye, mértékegysége: kg,

$m_{lp\_héz}$ a gázdugattyú illesztési hézagján elszökött lőpor tömegének függvénye, mértékegysége: kg.

2.2.3.8 Egyenletek a 6. tartományban (LS/SS rendszer gázcsapdával, csökkentett energiaszint)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{-F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \qquad 2–62$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t). \qquad 1–42$$

2.2.3.9 Egyenletek az 60. tartományban (LS/SS rendszer gázcsapdával, csökkentett energiaszint)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p_{gm}(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\left(f \cdot \omega_{gm}(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \varphi_{zár} \cdot m_{\Sigma} \cdot v_{zár}(t)^2\right) \cdot \Psi_{gáz}(t)}{W_{gm\_60} - \frac{N_{lp}(t) \cdot \omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega_{gm}(t) \cdot \Psi_{gáz}(t) + A_{gm} \cdot l_{zár}(t)}\right), \qquad 2–73^{16}$$

$$\frac{d}{dt}\omega_{gm}(t) = \frac{d}{dt}\left(N_{lp}(t) \cdot \varrho_{lp} \cdot \left(a_3 \cdot e_{gm}(t)^3 + a_2 \cdot e_{gm}(t)^2 + a_1 \cdot e_{gm}(t)\right)\right), \qquad 2–69$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t) = A_{héz} \cdot \varrho_{krit}(t) \cdot u_{krit}(t), \qquad 2–70$$

$$\frac{d}{dt}m_{lp\_héz}(t) = \frac{\left(\Omega - \omega_{gm}(t) - m_{lp\_héz}(t)\right) \cdot \frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t)}{\omega_{gm}(t) - m_{gáz\_héz}(t)}, \qquad 2–71$$

---

[16] Az összekapcsolt tömegek másodlagos munkatényezőjét helyettesítettem a zár munkatényezőjével, mivel a zártömeg több, mint egy nagyságrenddel nagyobb a gázdugattyú tömegénél, ezért az a meghatározó.

$$\frac{d}{dt}e_{gm}(t) = u_1 \cdot p_{gm}(t), \qquad 2\text{–}72$$

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{A_{gm} \cdot p_{gm}(t) - c_{r\_\Sigma} \cdot l_{zár}(t) - F_{r\_\Sigma} - F_{s\_\Sigma}}{\varphi_{zár} \cdot m_\Sigma} - k_{r\_\Sigma} \cdot \frac{d}{dt}l_{zár}(t), \qquad 2\text{–}74$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \qquad 2\text{–}15$$

Jelölések:

W_{gm_60} a gázdugattyú térfogata a 60. tartomány kezdetén, mértékegysége: m^3,

m_Σ a zár és a gázdugattyú együttes tömege, mértékegysége: kg,

c_{r_Σ} a helyretolórugó és a gázdugattyú rugójának összegzett rugómerevsége, mértékegysége: $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$,

k_{r_Σ} a helyretolórugó és a gázdugattyú rugójának összegzett viszkózus csillapítási tényezője, mértékegysége: $\frac{1}{\mathrm{s}}$,

F_{r_Σ} a helyretolórugó és a gázdugattyú rugójának a 60. tartomány kezdetén vett előfeszítési erejének összegzett értéke, mértékegysége: N,

F_{s_Σ} a zár és a gázdugattyú összegzett Coulomb-féle súrlódási ereje, mértékegysége: N,

$l_{gd}(t)$ a gázdugattyú elmozdulása az idő függvényében, mértékegysége: m.

2.2.3.10 Egyenletek a 7. tartományban (LS/SS rendszer gázcsappával, csökkentett energiaszint)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{-c_r \cdot l_{zár}(t) - F_r - F_{s\_zár}}{\varphi_{zár} \cdot m_{zár}} - k_r \cdot \frac{d}{dt}l_{zár}(t), \qquad 2\text{–}20$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \qquad 2\text{–}15$$

2.2.3.11 Egyenletek a 8. tartományban (LS/SS rendszer gázcsappával, csökkentett energiaszint)

A felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{-c_r \cdot l_{zár}(t) - F_r + F_{s\_zár}}{\varphi_{zár} \cdot m_{zár}} - k_r \cdot \frac{d}{dt}l_{zár}, \qquad 2\text{–}21$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \qquad 2\text{–}15$$

2.2.4 Szimulációs eredmények egy .50AE kaliberű, kettős mű-ködésű, gázmotoros géppisztolyra (LS/LS rendszer)

A szimulációkat saját, Maple környezetben írt programokkal végeztem el, mindkét üzemállapotra, a előzőkben közölt differenciálegyenlet-rendszerek numerikus megoldásával. Az általam választott numerikus módszer a Maple saját megoldója, amely 4-ed 5-öd rendű Runge–Kutta-Fehlberg módszer – rkf45.

Az itt bemutatott ábrákkal igazolom, hogy lényegesen eltérő gáznyomásgörbék és lövedéksebességek esetén is tervezhető olyan automatikarendszer, amely azonos energiaszinten üzemel.

2.2.4.1 A szimuláció bemenő adatai (LS/LS rendszer)

A fegyver, lövedék és lőpor adatokat az 1. táblázatban foglalom össze.

szimulációs adatok (LS/LS rendszer)			
megnevezés	**jelölés**	**érték**	**mérték-egység**
lőpor sűrűség	ϱ_{lp}	1600	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$
lőpor égéshő	Qe_{lp}	3600	$\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$
lőporgázok fajhőviszonya	κ	1,22	egység
betöltött lőportömeg	Ω	1,00	g
lőportárcsa vastagsága	c	0,10	mm
lőportárcsa sugara	r	0,75	mm
porozitási faktor [6]	u_p	1,7	egység
bevonat relatív vastagsága	e_b	0,2	egység
bevonat relatív égési sebessége	u_b	0,6	egység
átmeneti réteg relatív vastagsága a bevont rétegre vonatkoztatva	$e_{ár}$	0,1	egység
hüvely szabad térfogata	W_0	1,2	cm^3
cső ballisztikai hossza	$L_{cső}$	380	mm
csőátmérő	$d_{cső}$	12,7	mm

szimulációs adatok (LS/LS rendszer)			
megnevezés	**jelölés**	**érték**	**mérték-egység**
univerzális lövegállandó	φ_0	1,05	nincs
súrlódási erő	F_s	100	N
lövedéktömeg	$m_{löv}$	10,00	g
zártömeg	$m_{zár}$	400	g
csőszáj hatásfok	$\eta_{csőszáj}$	0,9	nincs
kakas működési ideje	T_{kakas}	10	ms
csappantyú késedelem	T_{csapp}	2	ms
gázmotor dugattyúátmérője normál üzemállapotban	D_{gm_norm}	14	mm
gázmotor dugattyúátmérője csökkentett üzemállapotban	D_{gm_cs}	30	mm
gázdugattyú és a gázhengerek közötti hézag mindkét üzemállapotban	Δ_{gm}	0,05	mm
gázátömlő furat átmérője normál üzemállapotban	$d_{gáf\_norm}$	5,0	mm
gázátömlő furat átmérője csökkentett üzemállapotban	$d_{gáf\_cs}$	5,0	mm
gázátömlő furat helye normál üzemállapotban	$L_{gáf\_norm}$	135	mm
gázátömlő furat helye csökkentett üzemállapotban	$L_{gáf\_cs}$	2	mm
zár hátrasiklási hossza	$L_{zár\_út}$	70	mm
gázmotor kezdeti térfogata normál üzemállapotban	W_{gm_norm}	0,5	cm^3

szimulációs adatok (LS/LS rendszer)			
megnevezés	**jelölés**	**érték**	**mérték-egység**
gázmotor kezdeti térfogata csökkentett üzemállapotban	W_{gm_cs}	0,5	cm^3
gázátömlő furat hatásfok	$\eta_{gáf}$	0,99	nincs
réselés helye	$L_{rés}$	8	mm
helyretoló rugó előfeszítési ereje	F_r	20	N
helyretoló rugó ereje a hátsó zárpozícióban	F_{r_h}	30	N
helyretoló rugó viszkózus csillapítási tényezője	k_r	2	$\frac{1}{\mathrm{s}}$
zár súrlódási ereje hátramozgáskor	$F_{s\_zár}$	5	N
zár súrlódási ereje előremozgáskor	$F_{s\_zár\_e}$	5	N
zár másodlagos munkatényezője hátramenetben	$\varphi_{zár}$	1,1	nincs
zár másodlagos munkatényezője előremenetben	$\varphi_{zár\_e}$	1,3	nincs
zár rugalmas ütközésének hatásfoka	$\eta_{zár}$	-0,2	nincs
iniciáló nyomás	p_{ini}	100	bar
besajtoló nyomás	p_{bes}	150	bar
lepuffanó nyomás	p_{le}	10	bar

1. táblázat: A szimuláció bemenő adatai, egy gázmotoros kettős működésű rendszerre (LS/LS rendszer).

Látható, hogy a szimuláció bemenő adatai részletesebbek, mint azt az előzőkben kifejtettem, például a lőporégés esetében. A szimuláció során bevonatolt, erősen porózus lőporral számolok, de ennek ismertetése nem a disszertációm témája. (A szimulációs programok az … számú mellékletben megtalálhatók.)

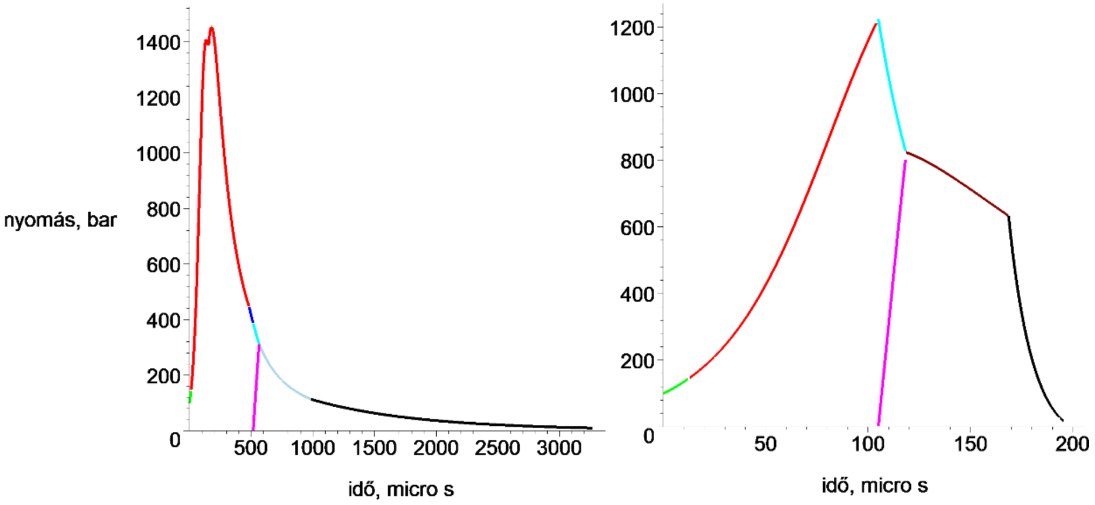
2.2.4.2 A szimuláció eredményei (LS/LS rendszer)

A szimuláció lényegesebb eredményeit az 2. táblázatban foglalom össze.

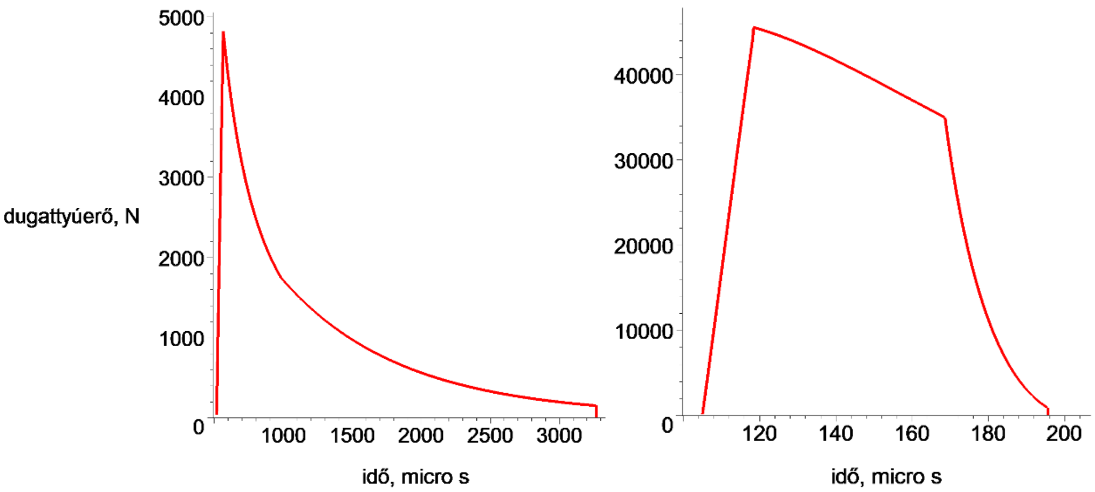
szimulációs eredmények (LS/LS rendszer)			
megnevezés	**érték normál üzemállapotban**	**érték csökkent üzemállapotban**	**mértékegység**
lövedék kezdősebessége	556	97	$\frac{m}{s}$
lövedék kezdeti impulzusa	5,56	0,97	$\frac{kg\,m}{s}$
lövedék kezdőenergiája	1546	47	J
zár maximális sebességhez tartozó időintervallum hossza	3268	196	µs
zár maximális sebességhez tartozó elmozdulás	12,52	0,32	mm
zár maximális sebessége	**6,09**	**6,05**	$\mathbf{\frac{m}{s}}$
zár maximális energiája	**7,42**	**7,32**	**J**
elméleti tűzütem	**940**	**941**	$\mathbf{\frac{lövés}{perc}}$

2. táblázat: A szimuláció eredményei egy gázmotoros kettős működésű rendszerre (LS/LS rendszer).

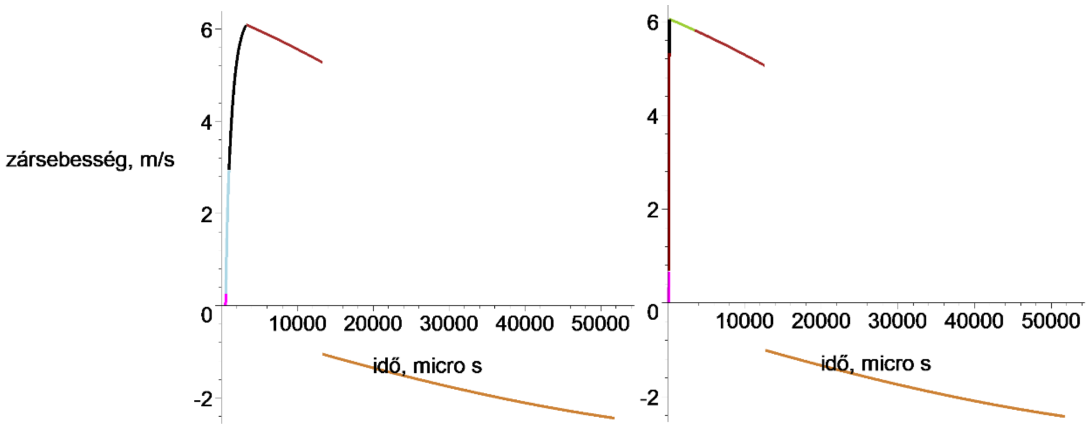
Az egyesített gáznyomásgörbék, zársebességek, zárelmozdulások és csökkentett energiaszintű üzemállapot esetében a lövedéksebesség diagramjait az alábbiakban közlöm.



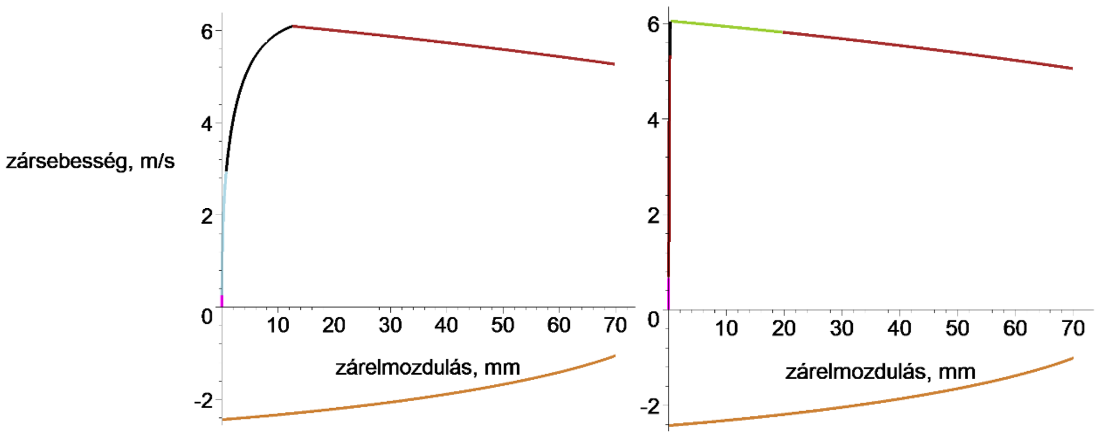
7. ábra: Az egyesített gáznyomásgörbék, balra a normál, jobbra a csökkentett üzemállapot (LS/LS rendszer).



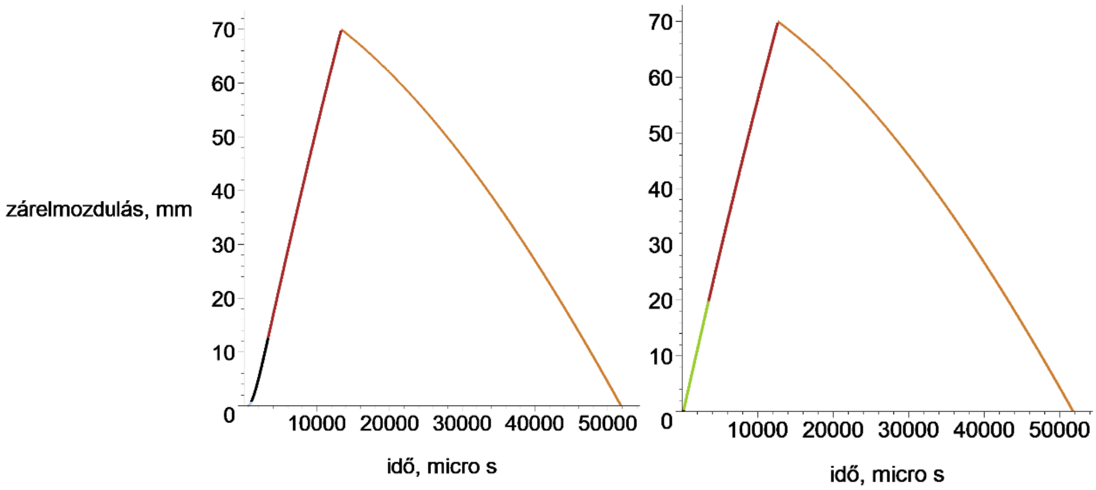
8. ábra: A dugattyúerők diagramjai, balra a normál, jobbra a csökkentett üzemállapot (LS/LS rendszer).



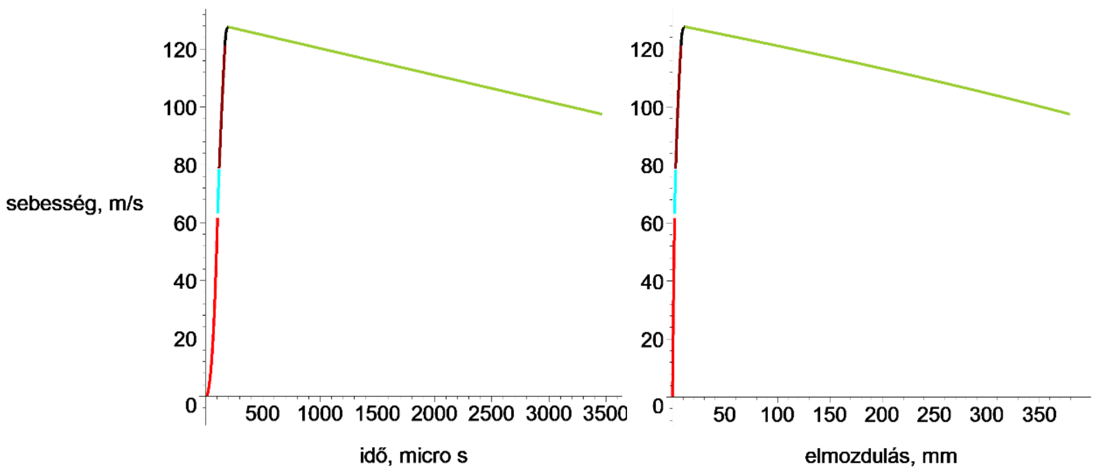
9. ábra: Az egyesített zársebesség-idő diagram, balra a normál, jobbra a csökkentett üzemállapot (LS/LS rendszer).



10. ábra: A zársebesség-zárelmozdulás diagramok, balra a normál, jobbra a csökkentett üzemállapot (LS/LS rendszer).



11. ábra: A zárelmozdulás-idő diagramok, balra a normál, jobbra a csökkentett üzemállapot (LS/LS rendszer).



12. ábra: A lövedéksebesség diagramjai csökkentett üzemállapotban (LS/LS rendszer).

2.2.5 Szimulációs eredmények egy .50AE kaliberű, kettős működésű, gázmotoros géppisztolyra (LS/SS rendszer)

A szimulációkat itt is saját, Maple környezetben írt programokkal végeztem el, mindkét üzemállapotra, a előzőkben közölt differenciálegyenlet-rendszerek numerikus megoldásával.

Az elképzelt konstrukció egy normál üzemállapotban hosszú gázdugattyú hátrasiklásos (LS rendszerű), valamint csökkentett energiaszintű üzemállapotban rövid gázdugattyú hátrasiklásos (SS rendszerű) automatikát használó kettős működésű fegyver.

Az itt bemutatott ábrákkal igazolom, hogy a normál üzemállapotban LS rendszerű, valamint csökkentett energiaszintű üzemállapotban SS rendszerű automatikát használó kettős működésű fegyver megtervezhető.

2.2.5.1 A szimuláció bemenő adatai (LS/SS rendszer)

A fegyver, lövedék és lőpor adatokat az 3. táblázatban foglalom össze.

szimulációs adatok (LS/SS rendszer)			
megnevezés	**jelölés**	**érték**	**mérték-egység**
lőpor sűrűség	ϱ_{lp}	1600	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$
lőpor égéshő	Qe_{lp}	3600	$\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$
lőporgázok fajhőviszonya	κ	1,22	egység
betöltött lőportömeg	Ω	1.00	g
lőportárcsa vastagsága	c	0,10	mm
lőportárcsa sugara	r	0,75	mm
porozitási faktor	u_p	1,7	egység
bevonat relatív vastagsága	e_b	0,2	egység
bevonat relatív égési sebessége	u_b	0,6	egység
átmeneti réteg relatív vastagsága a bevont rétegre vonatkoztatva	$e_{ár}$	0,1	egység
hüvely szabad térfogata	W_0	1,2	cm^3

szimulációs adatok (LS/SS rendszer)			
megnevezés	**jelölés**	**érték**	**mérték-egység**
cső ballisztikai hossza	$L_{cső}$	380	mm
csőátmérő	$d_{cső}$	12,7	mm
univerzális lövegállandó	φ_0	1,05	nincs
súrlódási erő	F_s	100	N
lövedéktömeg	$m_{löv}$	10,00	g
zártömeg	$m_{zár}$	400	g
osztott dugattyú tömege	m_{gd}	20	g
csőszáj hatásfok	$\eta_{csőszáj}$	0,9	nincs
kakas működési ideje	T_{kakas}	10	ms
csappantyú késedelem	T_{csapp}	2	ms
gázmotor dugattyúátmérője normál üzemállapotban	D_{gm_norm}	17	mm
osztott dugattyú átmérője	D_{gm_cs}	8	mm
gázdugattyú és a gázhengerek közötti hézag normál üzemállapotban	Δ_{gm_norm}	0,05	mm
gázdugattyú és a gázhengerek közötti hézag csökkentett üzemállapotban	Δ_{gm_cs}	0,16	mm
gázátömlő furat átmérője normál üzemállapotban	$d_{gáf\_norm}$	4,5	mm
gázátömlő furat átmérője csökkentett üzemállapotban	$d_{gáf\_cs}$	4,5	mm
gázátömlő furat helye normál üzemállapotban	$L_{gáf\_norm}$	125	mm
gázátömlő furat helye csökkentett üzemállapotban	$L_{gáf\_cs}$	2	mm

szimulációs adatok (LS/SS rendszer)			
megnevezés	**jelölés**	**érték**	**mértékegység**
osztott gázdugattyú hátrasiklásának teljes hossza	$L_{gd\_út}$	6	mm
osztott gázdugattyú zárkereten való felütközéséhez tartozó elmozdulás	Δ_{gd}	2	mm
zár hátrasiklási hossza	$L_{zár\_út}$	70	mm
gázmotor kezdeti térfogata normál üzemállapotban	W_{gm_norm}	0,5	cm^3
gázmotor kezdeti térfogata csökkentett üzemállapotban	W_{gm_cs}	1,0	cm^3
gázátömlő furat hatásfok	$\eta_{gáf}$	0,99	nincs
réselés helye	$L_{rés}$	8	mm
helyretoló rugó előfeszítési ereje	F_r	40	N
helyretoló rugó ereje a hátsó zárpozícióban	F_{r_h}	45	N
helyretoló rugó viszkózus csillapítási tényezője	k_r	2	$\frac{1}{\mathrm{s}}$
osztott gázdugattyú rugó előfeszítési ereje	F_r	10	N
osztott gázdugattyú rugó ereje a szétkapcsolási pozícióban	F_{r_h}	12	N
osztott gázdugattyú rugó viszkózus csillapítási tényezője	k_r	0,5	$\frac{1}{\mathrm{s}}$
osztott gázdugattyú súrlódási ereje hátramozgáskor	F_{s_gd}	1	N
osztott gázdugattyú másodlagos munkatényezője hátramenetben	φ_{gd}	1,05	nincs

szimulációs adatok (LS/SS rendszer)			
megnevezés	**jelölés**	**érték**	**mérték-egység**
zár súrlódási ereje hátramozgáskor	$F_{s\_zár}$	5	N
zár súrlódási ereje előremozgáskor	$F_{s\_zár\_e}$	5	N
zár másodlagos munkatényezője hátramenetben	$\varphi_{zár}$	1,1	nincs
zár másodlagos munkatényezője előremenetben	$\varphi_{zár\_e}$	1,3	nincs
zár rugalmas ütközésének hatás-foka	$\eta_{zár}$	-0,2	nincs
iniciáló nyomás	p_{ini}	100	bar
besajtoló nyomás	p_{bes}	150	bar
lepuffanó nyomás	p_{le}	10	bar

3. táblázat: A szimuláció bemenő adatai, egy gázmotoros kettős működésű rendszerre (LS/SS rendszer).

Látható, hogy a szimuláció bemenő adatai részletesebbek, mint azt az előzőkben kifejtettem, például a lőporégés esetében. A szimuláció során bevonatolt, erősen porózus lőporral számolok, de ennek ismertetése nem a disszertációm témája. (A szimulációs programok az … számú mellékletben megtalálhatók.)

2.2.5.2 A szimuláció eredményei (LS/SS rendszer)

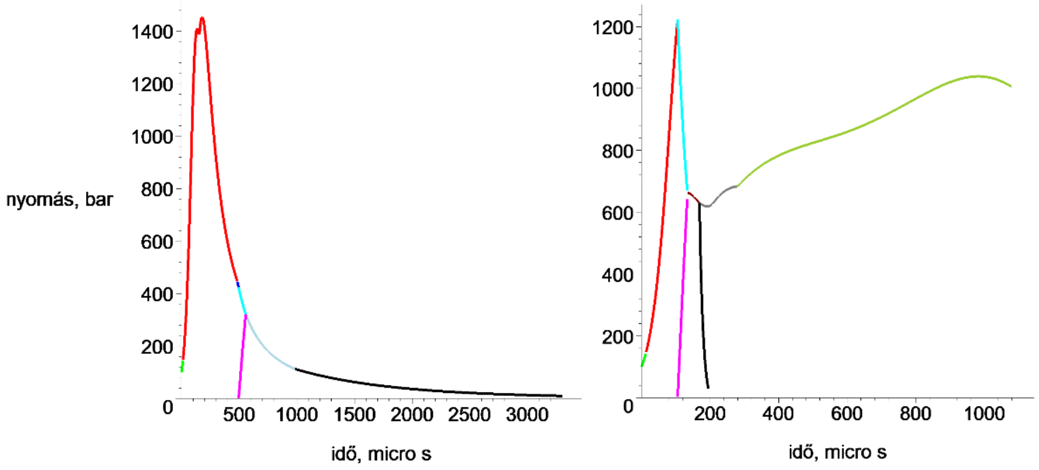
A szimuláció lényegesebb eredményeit az 2. táblázatban foglalom össze.

szimulációs eredmények (LS/SS rendszer)			
megnevezés	**érték normál üzemállapot-ban**	**érték csök-kent üzemál-lapotban**	**mérték-egység**
lövedék kezdősebessége	556	95	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$
lövedék kezdeti impulzusa	5,56	0,95	$\frac{\mathrm{kg\,m}}{\mathrm{s}}$

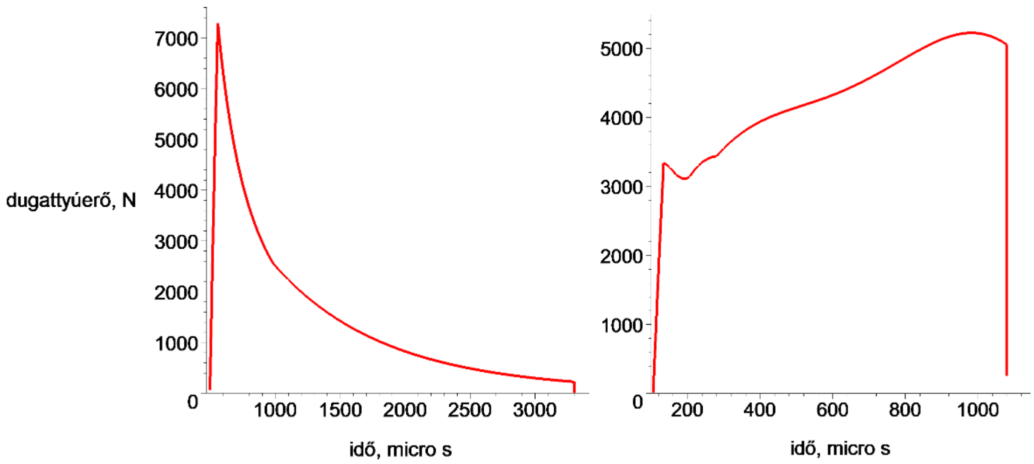
szimulációs eredmények (LS/SS rendszer)			
megnevezés	**érték normál üzemállapotban**	**érték csökkent üzemállapotban**	**mértékegység**
lövedék kezdőenergiája	1546	45	J
zár maximális sebességhez tartozó időintervallum hossza	3300	1080	μs
zár maximális sebességhez tartozó elmozdulás	19,26	3,84	mm
zár maximális sebessége	**9,15**	**8,92**	$\mathbf{\frac{m}{s}}$
zár maximális energiája	**16,74**	**15,91**	**J**
elméleti tűzütem	**1256**	**1248**	$\mathbf{\frac{lövés}{perc}}$

4. táblázat: A szimuláció eredményei egy gázmotoros kettős működésű rendszerre (LS/SS rendszer).

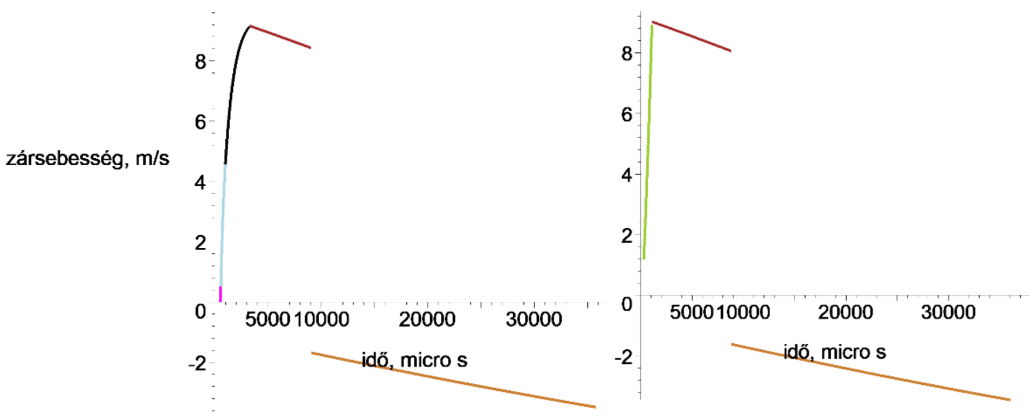
Az egyesített gáznyomásgörbék, zársebességek, zárelmozdulások és csökkentett energiaszintű üzemállapot esetében a lövedéksebesség diagramjait az alábbiakban közlöm.



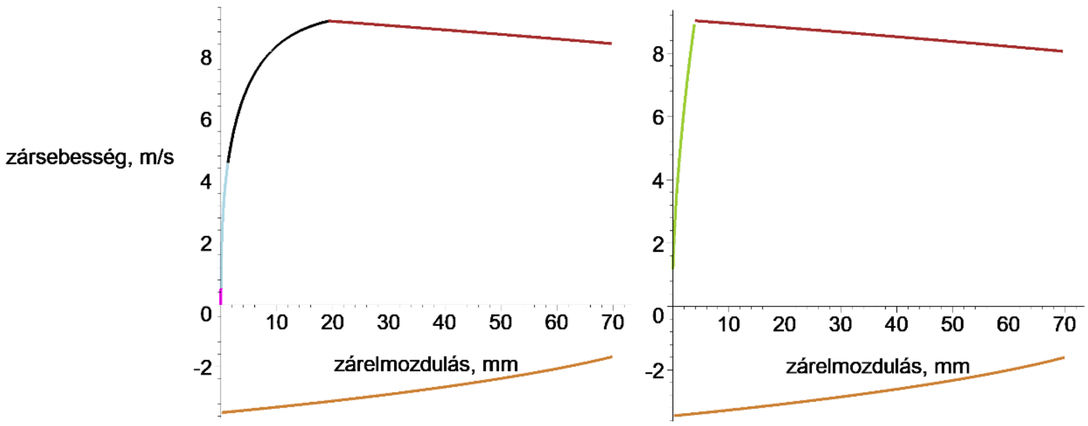
13. ábra: Az egyesített gáznyomásgörbék, balra a normál, jobbra a csökkentett üzemállapot (LS/SS rendszer).



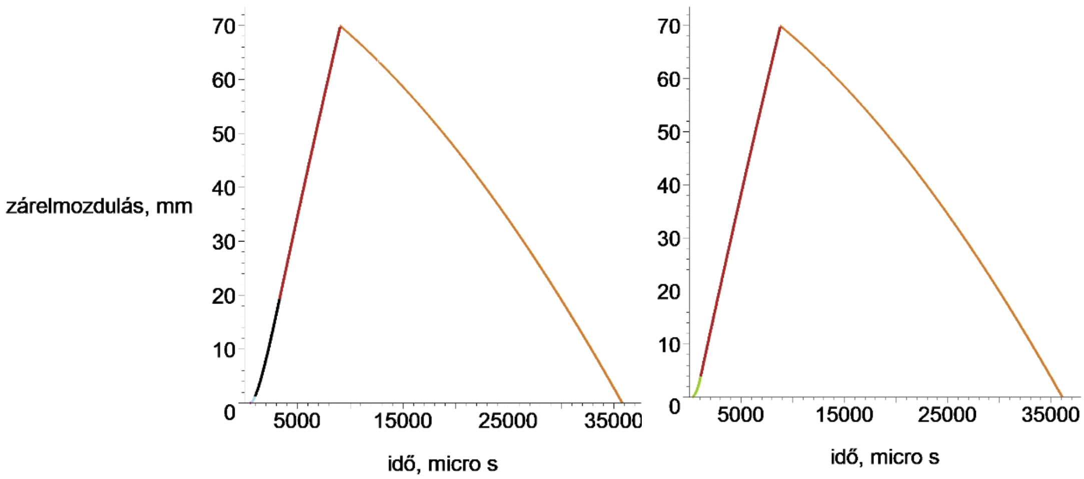
14. ábra: A dugattyúerők diagramjai, balra a normál, jobbra a csökkentett üzemállapot (LS/SS rendszer).



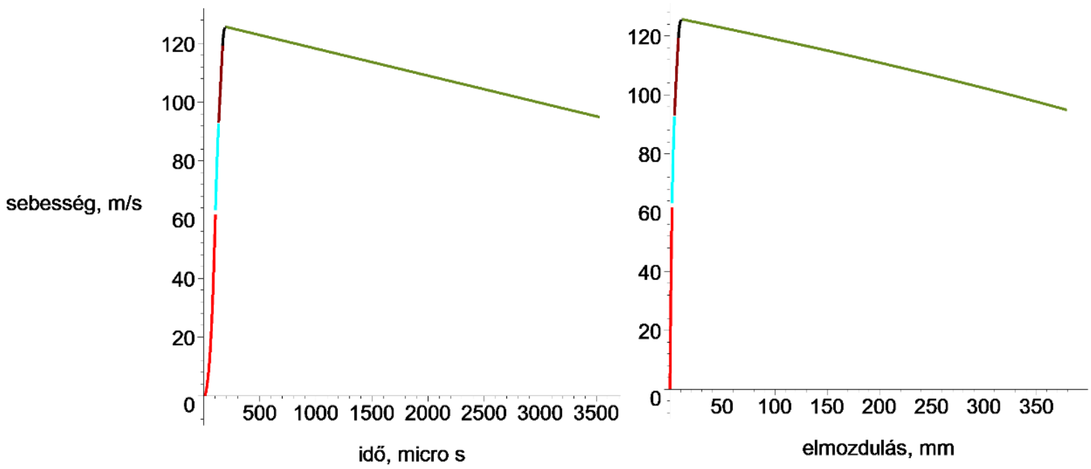
15. ábra: Az egyesített zársebesség-idő diagram, balra a normál, jobbra a csökkentett üzemállapot (LS/SS rendszer).



16. ábra: A zársebesség-zárelmozdulás diagramok, balra a normál, jobbra a csökkentett üzemállapot (LS/SS rendszer).



17. ábra: A zárelmozdulás-idő diagramok, balra a normál, jobbra a csökkentett üzemállapot (LS/SS rendszer).



18. ábra: A lövedéksebesség diagramjai csökkentett üzemállapotban (LS/SS rendszer).

2.3 VÁLTOZTATHATÓ RETESZELÉSI RENDSZERŰ KONSTRUKCIÓ

Ebben a részben bemutatom egy olyan lehetséges műszaki megvalósítás elméleti összefüggéseit, ahol az üzemállapotonkénti zárenergiát nem tartjuk állandó szinten, hanem a fegyver automatika rendszerét „igazítjuk" a megváltozó gerjesztéshez. Ennek megvalósítására is több megoldás jöhet szóba, ebből az egyik a fegyver reteszelési rendszerének üzemállapotonkénti megváltoztatása.

Mint azt az előzőben bemutattam, normál üzemállapotban a példa szerinti konfiguráció jelentős lövedékimpulzussal rendelkezik, így célszerű reteszelt, rövid cső-hátrasiklásos megoldásban gondolkozni, amely viszont a csökkentett energia szint mellett nem fog működni. Megoldás lehet, hogy az üzemállapotváltó mechanizmus funkcióját kiegészítjük azzal, hogy a zár és a cső reteszelését is oldja, csökkentett energia szint mellett. Ekkor a cső a lövésfolyamat során állni fog, a zár pedig „csak" szabad tömegzárként fog viselkedni, így a közel azonos hátrasiklási sebességeket (megfelelő tömegeket és tömegarányokat választva), biztosítani lehet. A szabad tömegzárak számításainak részletes ismertetését a [4] tanulmányomban közlöm.

2.3.1 A TÖMEGEK ELŐSZÁMÍTÁSA

Az előszámítás során a 2. táblázat eredményeiből indulok ki a lövedék mozgásmennyiségeinek meghatározásához. A zár tömegét a csökkentett energiaszint melletti lövedéksebességből lehet megbecsülni, egy nagyon egyszerű, csak az impulzusmegmaradás elvét használó modellel.

A példában a lövedék impulzusa közel egység, így az elvárt $4\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ zársebességhez hozzárendelek $8\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ előtervezési sebességet[17]. Ebből hozzávetőlegesen $m_{zár} = 120$ g zártömeg adódik. Ez a zártömeg meglehetősen kicsi, de még a .50AE kaliber esetében is tartható, acél alapanyag használata mellett.

Következő lépésben a cső minimális tömegét határozom meg a normál üzemű sebességből. Ekkor a zársebességet a cső és a zár együttes tömege határozza meg, ebből a

[17] Az egyszerű modell a súrlódásokkal nem számol, így nagyobb sebességgel kell számolnunk, hogy az előtervezett tömeg ne álljon messze a valóságban szükségestől.

szükséges csőtömeg közelítően $m_{cső} = 800$ g, amely bőven az elfogadható tartományban van, kézi lőfegyver esetén.
Látható, hogy a feladat közelítő megoldása ergonómiai szempontból megfelelő, ezért a részletes számítást az alábbiakban közlöm.

2.3.2 MŰKÖDÉS NORMÁL ÜZEMÁLLAPOTBAN – RÖVID CSŐHÁTRASIKLÁSOS RENDSZER

A lövésfolyamat 7 tartományra osztható, amelyekre a következőben a leíró egyenletrendszereket megadom.

2.3.2.1 A tartományok leírása és határaik:

1. tartomány: Tart a lőportöltet begyulladásától a lövedék megindulásáig, expanzió és munkavégzés nélkül. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **zöld**.

2. tartomány: Tart a lövedék megindulásától a lőportöltet elégéséig. A lövedék megindulásával az összekapcsolt cső-zár rendszer is megkezdi mozgását, mintegy ellentömegként. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **piros**.

3. tartomány: Tart a lőportöltet elégésétől a csőszájig. A lövedék és a cső-zár rendszer tovább gyorsul a lőporgázok feszítő erejének hatására. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **kék**.

4. tartomány: Tart a lövedék kirepülésétől a csőfurat lepuffanásáig. A lövedék elhagyja a vizsgált rendszerünket, de a cső-zár rendszer tovább is hátrafelé gyorsul. A zárszerkezet legnagyobb sebessége itt alakul ki. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **fekete**.

5. tartomány: Tart a csőfurat lepuffanásától a cső-zár rendszer szétreteszelődéséig. A a cső-zár rendszer csillapított szabadlengést végez. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **sárgászöld**.

6. tartomány: Tart a cső-zár rendszer szétreteszelődésétől a zár felütközéséig, vagy megállásáig. A cső a saját helyretoló szerkezete segítségével mellső állapotába indul – számításai itt érdektelenek. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **barna**.

7. tartomány: Tart a zár hátsó pozícióból való megindulásától annak – bereteszeléssel egybekötött – felütközéséig. A zár, mint mechanikai lengőrendszer végzi csillapított, gerjesztetlen lengését. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **arany**.

2.3.2.2 Egyenletek az 1. tartományban (VR rendszer, normál üzemállapot)

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{f \cdot \omega(t)}{W_0 - \frac{\Omega - \omega(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t)}\right), \quad 1\text{–}62$$

$$\frac{d}{dt}\omega(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\Omega \cdot \varrho_{lp}}{\omega_1} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \quad 1\text{–}63$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1 \cdot p(t). \quad 1\text{–}2$$

2.3.2.3 Egyenletek a 2. tartományban (VR rendszer, normál üzemállapot)

$$\frac{d}{dt}p(t) =$$

$$= \frac{d}{dt}\left(\frac{f \cdot \omega(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \left(\varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2 + \varphi_\Sigma \cdot m_\Sigma \cdot v_{zár}(t)^2\right)}{W_0 - \frac{\Omega - \omega(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t) + A_{cső} \cdot \left(l(t) + l_{zár}(t)\right)}\right), \quad 2\text{–}75$$ [18]

$$\frac{d}{dt}\omega(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\Omega \cdot \varrho_{lp}}{\omega_1} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \quad 1\text{–}63$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1 \cdot p(t), \quad 1\text{–}2$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cso} \cdot \left(p(t) - p_{din}(t)\right) - F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \quad 1\text{–}52$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t), \quad 1\text{–}42$$

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{A_{cso} \cdot p(t) - c_\Sigma \cdot l_{zár}(t) - F_\Sigma - F_{s\_zár}}{\varphi_\Sigma \cdot m_\Sigma} - k_r \cdot \frac{d}{dt}l_{zár}, \quad 2\text{–}76$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \quad 2\text{–}15$$

Jelölések:

φ_Σ az összekapcsolt cső-zár rendszer fiktív tömeg együtthatója, mértékegysége: nincs,

m_Σ az összekapcsolt cső-zár rendszer tömege, mértékegysége: kg,

---

[18] Az összekapcsolt cső-zár rendszert gyorsító gáznyomás $A_{cső}$ eredő keresztmetszeten hat, függetlenül a hüvely geometriai kialakításától.

c_Σ a párhuzamosan kapcsolt cső, illetve zár helyretoló rugók eredő rugómerevsége, mértékegysége: $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$,

F_Σ a helyretoló rugók eredő előfeszítési ereje, mértékegysége: N.

2.3.2.4 Egyenletek a 3. tartományban (VR rendszer, normál üzemállapot)

$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{f\cdot\Omega - \frac{(\kappa-1)}{2}\cdot\left(\varphi\cdot m_{löv}\cdot v(t)^2 + \varphi_\Sigma\cdot m_\Sigma\cdot v_{zár}(t)^2\right)}{W_0 - \alpha\cdot\Omega + A_{cső}\cdot\left(l(t)+l_{zár}(t)\right)}\right), \qquad 2\text{–}77$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cso}\cdot\left(p(t)-p_{din}(t)\right) - F_s}{\varphi\cdot m_{löv}}, \qquad 1\text{–}52$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t), \qquad 1\text{–}42$$

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{A_{cso}\cdot p(t) - c_\Sigma\cdot l_{zár}(t) - F_\Sigma - F_{s\_zár}}{\varphi_\Sigma\cdot m_\Sigma} - k_r\cdot\frac{d}{dt}l_{zár}, \qquad 2\text{–}76$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \qquad 2\text{–}15$$

2.3.2.5 Egyenletek a 4. tartományban (VR rendszer, normál üzemállapot)

$$\Psi_{gáz\_cső}(t) = \frac{\Omega - m_{gáz\_csőszáj}(t)}{\Omega}, \qquad 1\text{–}69$$

$$\rho_{gáz}(t) = \frac{\Omega\cdot\Psi_{gáz\_cső}(t)}{W_0 + W_{cső} - \alpha\cdot\Omega\cdot\Psi_{gáz\_cső}(t)}, \qquad 2\text{–}78$$

$$\frac{d}{dt}p(t) = \\ = \frac{d}{dt}\left(\frac{\left(f\cdot\Omega - \frac{(\kappa-1)}{2}\cdot\left(\varphi\cdot m_{löv}\cdot {v_0}^2 + \varphi_\Sigma\cdot m_\Sigma\cdot v_{zár}(t)^2\right)\right)\cdot\Psi_{gáz\_cső}(t)}{W_0 + W_{cső} - \alpha\cdot\Omega\cdot\Psi_{gáz\_cső}(t)}\right), \qquad 2\text{–}79$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_csőszáj}(t) = \eta_{csőszáj}\cdot A_{cső}\cdot\varrho_{gáz\_krit}(t)\cdot u_{krit}(t). \qquad 1\text{–}72$$

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{A_{cso}\cdot p(t) - c_\Sigma\cdot l_{zár}(t) - F_\Sigma - F_{s\_zár}}{\varphi_\Sigma\cdot m_\Sigma} - k_r\cdot\frac{d}{dt}l_{zár}, \qquad 2\text{–}76$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \qquad 2\text{–}15$$

2.3.2.6 Egyenletek az 5. tartományban (VR rendszer, normál üzem-állapot)

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{-c_\Sigma \cdot l_{zár}(t) - F_\Sigma - F_{s\_zár}}{\varphi_\Sigma \cdot m_\Sigma} - k_r \cdot \frac{d}{dt}l_{zár}, \tag{2–80}$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \tag{2–15}$$

2.3.2.7 Egyenletek a 6. tartományban (VR rendszer, normál üzem-állapot)

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{-c_{r\_zár} \cdot l_{zár}(t) - F_{zár} - F_{s\_zár}}{\varphi_{zár} \cdot m_{zár}} - k_r \cdot \frac{d}{dt}l_{zár}, \tag{2–81}$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \tag{2–15}$$

Jelölések:

$\varphi_{zár}$ a szétkapcsolt zár fiktív tömegének együtthatója, mértékegysége: nincs,

$c_{r\_zár}$ a zár helyretoló rugó rugómerevsége, mértékegysége: $\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$,

$F_{zár}$ a zár helyretoló rugó előfeszítési ereje, mértékegysége: N.

2.3.2.8 Egyenletek a 7. tartományban (VR rendszer, normál üzem-állapot)

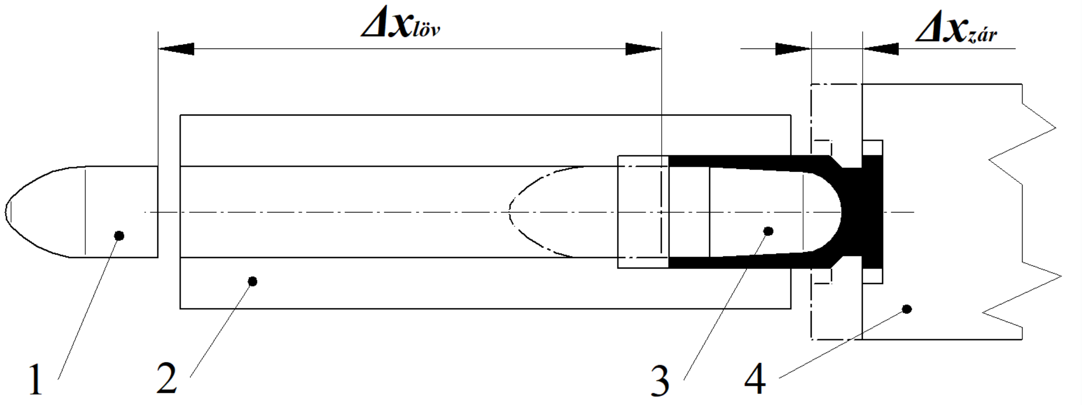
$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{-c_{r_{zár}} \cdot l_{zár}(t) - F_{zár} + F_{s\_zár}}{\varphi_{zár} \cdot m_{zár}} - k_r \cdot \frac{d}{dt}l_{zár}, \tag{2–82}$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \tag{2–15}$$

2.3.3 MŰKÖDÉS CSÖKKENTETT ENERGIASZINTŰ ÜZEMÁLLAPOTBAN – SZABAD TÖMEGZÁRAS RENDSZER

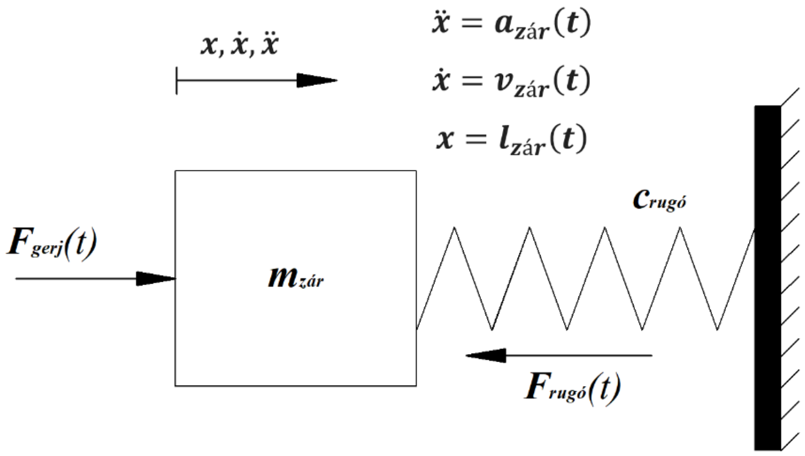
A konstrukció vázlatát a 19. ábra szemlélteti[19].

[19] A nem ábrázolt rendszerelem a helyretoló rugó, a többi rendszerelem részletesebb megjelenítése érdekében.



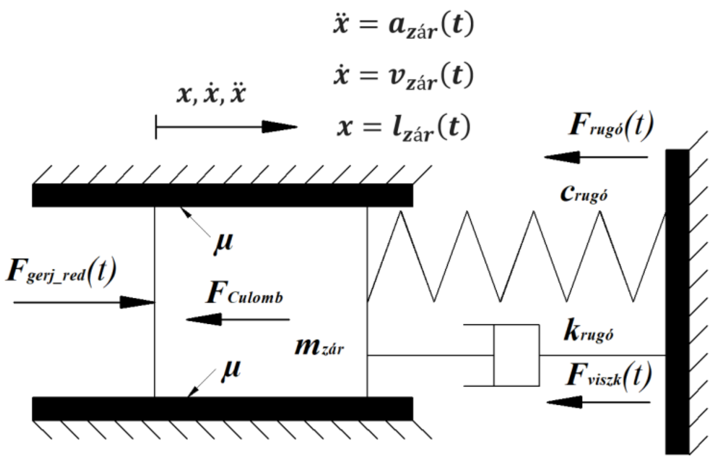
19. ábra: A szabad tömegzár jellegrajza és a kizárolás végértékei. 1; lövedék, 2; álló fegyvercső, 3; töltényhüvely, 4; tömegzár.

A rendszer egy meglehetősen egyszerű modelljét a 20. ábra szemlélteti. Az előszámítás során ennek az egyszerű modellnek a még jobban leegyszerűsített változatával számoltam, ahol a rendszerelemek között csak a zártömeg található.



20. ábra: A szabad tömegzár egyszerű dinamikai modellje, mint erőgerjesztésű, egyszabadságfokú, csillapítatlan lengőrendszer.

A csökkentett energiaszintű üzemállapot számításához ettől összetettebb modellt állítottam, a rendszer disszipatív elemeinek lehető legpontosabb modellezése érdekében. A hátramozgás lengőrendszerének általam felállított és a számítások során használt lengéstani modelljét a 21. ábra mutatja.



21. ábra: A szabad tömegzár dinamikai modellje a zár hátramozgásakor.

A zár maximális sebességének meghatározásához a 21. ábra szerinti lengőrendszert gerjesztettem meg, az elkövetkezőkben ismertetett ballisztikai összefüggésekből kiszámított gerjesztőerővel.

A lövésfolyamat 6 tartományra osztható, amelyekre a következőben a leíró egyenletrendszereket megadom.

2.3.3.1 A tartományok leírása és határaik:

1. tartomány: Tart a lőportöltet begyulladásától a lövedék megindulásáig, expanzió és munkavégzés nélkül. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **zöld**.

2. tartomány: Tart a lövedék megindulásától a réselés elégéséig. A lövedék megindulásával a hüvely és a vele folyamatos kontaktusban lévő zár is megkezdi hátrafelé irányuló mozgását. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **piros**.

3. tartomány: Tart a réseléstől a csőnyomás lepuffanásáig. A lövedék és a zár ballisztikai gerjesztésének utolsó szakasza, a zár legnagyobb sebessége itt alakul ki. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **fekete**.

4. tartomány: Tart a csőnyomás lepuffanásától a lövedék kirepüléséig. A lövedék a csőfuratban lassul, a zár megkezdi csillapított szabadlengését. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **sárgászöld**.

5. tartomány: Tart a lövedék kirepülésétől a zár felütközéséig vagy megállásáig, a zár az előző szerint mozog. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **barna**.

6. tartomány: Tart a zár hátsó pozícióból való megindulásától annak felütközéséig. A zár, mint mechanikai lengőrendszer végzi csillapított, gerjesztetlen lengését. **A tartomány színjelzése** a grafikonokon: **arany**.

2.3.3.2 Egyenletek az 1. tartományban (VR rendszer, csökkentett üzemállapot)

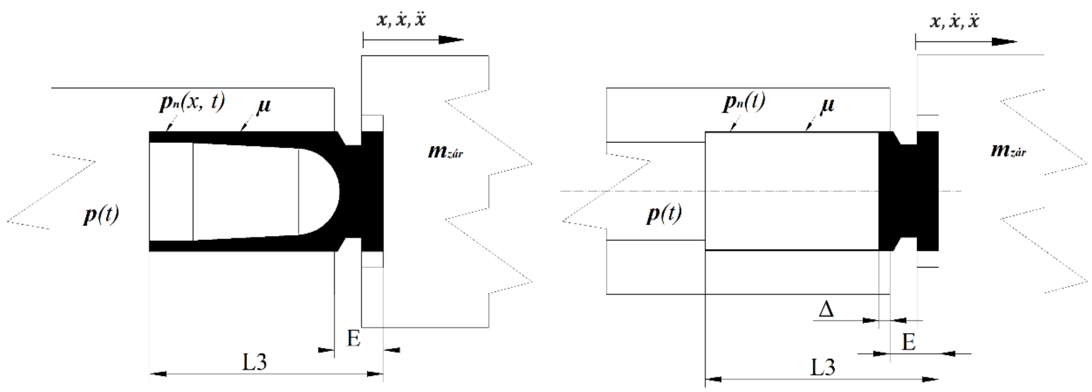
$$\frac{d}{dt}p(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{f \cdot \omega(t)}{W_0 - \frac{\Omega - \omega(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t)}\right), \qquad 1\text{–}62$$

$$\frac{d}{dt}\omega(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\Omega \cdot \varrho_{lp}}{\omega_1} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \qquad 1\text{–}63$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1 \cdot p(t). \qquad 1\text{–}2$$

2.3.3.3 Egyenletek a 2. tartományban (VR rendszer, csökkentett üzemállapot)

A leíró egyenletrendszer megadásához szükség van az $F_{gerj\_red}(t)$ redukált gerjesztőerő függvényének meghatározására. Ennek előállítására a vékonyfalú hengeres hüvelyt a 22. ábra szerint modelleztem.



22. ábra: A hüvely kétváltozós és egyszerűsített modellje.

A 22. ábra bal oldalán látható, hogy az időben változó gáznyomás a hüvely palástja mentén időben és helyben változó felületi nyomást generál, amelyből a paláston ébredő Coulomb-féle súrlódóerő-függvény már kiszámítható. A kialakuló felületi nyomás a hüvelyfenék felé haladva folyamatosan csökken, ui. a hüvely falvastagsága ebben az irányban folyamatosan növekszik. A kialakuló kétváltozós felületi nyomás függvénye elvben (egyensúlyi körülmények mellett), kiszámítható, de az egyszerűsödő formulák miatt a kétváltozós modellt a 22. ábra jobb oldalán lévő egyváltozós modellre redukáltam.

A hüvelypalástot egy erőmentesen deformálódni képes, és egy merev, deformációra nem képes részre osztottam. A hüvely deformálódni képes $L_3 - E$ szakaszában a hüvelyfal vastagságát, valamint a töltényűr és a hüvelypalást közötti hézagot egyaránt zérusnak vettem, ekkor a felületeket összeszorító nyomás független a helytől, és értéke a mindenkori gáznyomással egyenlő.

A szabadon hátramozgó zárat a gáznyomás a hüvelytalpon keresztül gyorsítja, ezért a zárút függvénye azonos a hüvely elmozdulásának függvényével mindaddig, amíg a hüvelyt a gáznyomás éri, ebből a megadható a mindenkori kontakt palástfelület.

A lövés kezdetén a kontakt palástfelület:

$$A_{palást\_0} = (L_3 - E - \Delta) \cdot d_{hüvely} \cdot \pi, \quad 2\text{–}83$$

ahol $d_{hüvely}$ a hengeres hüvely külső átmérője, mértékegysége: m.

Ezzel a mindenkori kontakt palástfelület:

$$A_{palást}(t) = \begin{cases} A_{palást_0}, & t < t_\Delta \\ A_{palást_0} - l_{zár}(t) \cdot d_{hüvely} \cdot \pi, & t \geq t_\Delta \text{ és } t \leq t_{L3}, \\ 0, & egyébként \end{cases} \quad 2\text{–}84$$

ahol t_Δ az $l_{zár}(t) = \Delta$ feltételhez, t_{L3} pedig az $l_{zár}(t) = L_3 - E$ feltételhez tartozó időpillanat, mértékegysége: s.

A kontakt palástfelület-függvény ismeretében a paláston ébredő súrlódóerő-függvény:

$$F_{Coul\_palást}(t) = p(t) \cdot A_{palást}(t) \cdot \mu_{hüv}, \quad 2\text{–}85$$

ahol μ a hüvely és a töltényűr közötti csúszási súrlódási együttható, mértékegysége: egység.

Ezekből a lengőrendszer gerjesztő összetett erőfüggvénye:

$$F_{gerj\_red}(t) = p(t) \cdot A_{hüvely\_belső} - F_{Coul\_palást}(t), \quad 2\text{–}86$$

ahol $A_{hüvely\_belső}$ a lövedékátmérővel meghatározott hüvelykeresztmetszet, mértékegysége: m^2.

Ezzel a felírható differenciálegyenletek:

$$\frac{d}{dt}p(t) =$$

$$= \frac{d}{dt}\left(\frac{f \cdot \omega(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot (\varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2 + \varphi_{zár} \cdot m_{zár} \cdot v_{zár}(t)^2)}{W_0 - \frac{\Omega - \omega(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t) + A_{cső} \cdot l(t) + A_{hüv} \cdot l_{zár}(t)}\right), \quad 2\text{–}87$$

$$\frac{d}{dt}\omega(t) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\Omega \cdot \varrho_{lp}}{\omega_1} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right), \quad 1\text{–}63$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1 \cdot p(t), \qquad \text{1–2}$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cso} \cdot \left(p(t) - p_{din}(t)\right) - F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \qquad \text{1–52}$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t), \qquad \text{1–42}$$

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{F_{gerj\_red}(t) - c_{zár} \cdot l_{zár}(t) - F_{zár} - F_{s\_zár}}{\varphi_{zár} \cdot m_{zár}} - k_r \cdot \frac{d}{dt}l_{zár}, \qquad \text{2–88}$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \qquad \text{2–15}$$

2.3.3.4 Egyenletek a 3. tartományban (VR rendszer, csökkentett üzemállapot)

A leíró egyenletrendszer nagyon hasonló a 2.2.2.6 részben ismertetett egyenletrendszerrel, változás csak a gáztér függvényében van – nyomásfüggvény nevezője –, és a zár gyorsulásfüggvényében van.

A felírható egyenletek:

$$N_{lp}(t) = \frac{\Omega - \omega(t) - m_{lp\_rés}(t)}{\omega_{1\_lp}(t)}, \qquad \text{2–52}$$

$$\Psi_{gáz}(t) = \frac{\omega(t) - m_{gáz\_rés}(t)}{\omega(t)}, \qquad \text{2–58}$$

$$\frac{d}{dt}p(t) = \\ = \frac{d}{dt}\left(\frac{\left(f \cdot \omega(t) - \frac{(\kappa - 1)}{2} \cdot \left(\varphi \cdot m_{löv} \cdot v(t)^2 + \varphi_{zár} \cdot m_{zár} \cdot v_{zár}(t)^2\right)\right) \cdot \Psi_{gáz}(t)}{W_0 - \frac{N_{lp}(t) \cdot \omega_{1\_lp}(t)}{\varrho_{lp}} - \alpha \cdot \omega(t) \cdot \Psi_{gáz}(t) + A_{cső} \cdot l(t) + A_{hüv} \cdot l_{zár}(t)}\right), \qquad \text{2–89}$$

$$\frac{d}{dt}\omega(t) = \frac{d}{dt}\left(N_{lp}(t) \cdot \varrho_{lp} \cdot \left(a_3 \cdot e(t)^3 + a_2 \cdot e(t)^2 + a_1 \cdot e(t)\right)\right). \qquad \text{2–59}$$

$$\frac{d}{dt}m_{gáz\_rés}(t) = A_{cső} \cdot \varrho_{krit}(t) \cdot u_{krit}(t), \qquad \text{2–54}$$

$$\frac{d}{dt}m_{lp\_rés}(t) = \frac{\left(\Omega - \omega(t) - m_{lp\_rés}(t)\right) \cdot \frac{d}{dt}m_{gáz\_rés}(t)}{\omega(t) - m_{gáz\_rés}(t)}, \qquad \text{2–55}$$

$$\frac{d}{dt}e(t) = u_1 \cdot p(t), \qquad \text{1–2}$$

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{A_{cso} \cdot \left(p(t) - p_{din}(t)\right) - F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \qquad \text{1–52}$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t), \qquad 1\text{–}42$$

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{F_{gerj\_red}(t) - c_{zár} \cdot l_{zár}(t) - F_{zár} - F_{s\_zár}}{\varphi_{zár} \cdot m_{zár}} - k_r \cdot \frac{d}{dt}l_{zár}, \qquad 2\text{–}88$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \qquad 2\text{–}15$$

Ahol $A_{hüv} = \frac{d_{hüvely}{}^2 \cdot \pi}{4}$ a hüvely külső átmérőjével meghatározott keresztmetszet, mértékegysége: m^2.

2.3.3.5 Egyenletek a 4. tartományban (VR rendszer, csökkentett üzemállapot)

$$\frac{d}{dt}v(t) = \frac{-F_s}{\varphi \cdot m_{löv}}, \qquad 2\text{–}62$$

$$\frac{d}{dt}l(t) = v(t), \qquad 1\text{–}42$$

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{F_{gerj\_red}(t) - c_{zár} \cdot l_{zár}(t) - F_{zár} - F_{s\_zár}}{\varphi_{zár} \cdot m_{zár}} - k_r \cdot \frac{d}{dt}l_{zár}, \qquad 2\text{–}88$$ [20]

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \qquad 2\text{–}15$$

2.3.3.6 Egyenletek az 5. tartományban (VR rendszer, csökkentett üzemállapot)

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{F_{gerj\_red}(t) - c_{zár} \cdot l_{zár}(t) - F_{zár} - F_{s\_zár}}{\varphi_{zár} \cdot m_{zár}} - k_r \cdot \frac{d}{dt}l_{zár}, \qquad 2\text{–}88$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \qquad 2\text{–}15$$

2.3.3.7 Egyenletek az 6. tartományban (VR rendszer, csökkentett üzemállapot)

$$\frac{d}{dt}v_{zár}(t) = \frac{F_{gerj\_red}(t) - c_{zár} \cdot l_{zár}(t) - F_{zár} + F_{s\_zár}}{\varphi_{zár} \cdot m_{zár}} - k_r \cdot \frac{d}{dt}l_{zár}, \qquad 2\text{–}90$$

$$\frac{d}{dt}l_{zár}(t) = v_{zár}(t). \qquad 2\text{–}15$$

---

[20] Az $F_{gerj\_red}(t)$ redukált gerjesztőfüggvény ebben a tartományban zérus, ezért az egyenlet formailag nem változik.

2.3.4 Szimulációs eredmények egy .50AE kaliberű, kettős mű-ködésű, változtatható reteszelésű géppisztolyra

A szimulációkat itt is saját, Maple környezetben írt programokkal végeztem el, mindkét üzemállapotra, a előzőkben közölt differenciálegyenlet-rendszerek numerikus megoldásával. Az általam választott numerikus módszer, a Maple saját megoldója, amely 4-ed 5-öd rendű Runge–Kutta-Fehlberg módszer (rkf45).

Az itt bemutatott ábrákkal igazolom, hogy lényegesen eltérő gáznyomásgörbék és lövedéksebességek esetén is tervezhető olyan automatikarendszer, amely azonos energiaszinten üzemel.

2.3.4.1 A szimuláció bemenő adatai (VR rendszer)

A fegyver, lövedék és lőpor adatokat az 5. táblázatban foglalom össze.

szimulációs adatok (VR rendszer)			
megnevezés	**jelölés**	**érték**	**mérték-egység**
lőpor sűrűség	ϱ_{lp}	1600	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$
lőpor égéshő	Qe_{lp}	3600	$\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$
lőporgázok fajhőviszonya	κ	1,22	egység
betöltött lőportömeg	Ω	1,00	g
lőportárcsa vastagsága	c	0,10	mm
lőportárcsa sugara	r	0,75	mm
porozitási faktor	u_p	1,7	egység
bevonat relatív vastagsága	e_b	0,2	egység
bevonat relatív égési sebessége	u_b	0,6	egység
átmeneti réteg relatív vastagsága a bevont rétegre vonatkoztatva	$e_{ár}$	0,1	egység
hüvely szabad térfogata	W_0	1,2	cm^3
cső ballisztikai hossza	$L_{cső}$	280	mm
csőátmérő	$d_{cső}$	12,7	mm

szimulációs adatok (VR rendszer)			
megnevezés	**jelölés**	**érték**	**mérték-egység**
univerzális lövegállandó	φ_0	1,05	nincs
súrlódási erő	F_s	100	N
lövedéktömeg	$m_{löv}$	10,00	g
zártömeg	$m_{zár}$	150	g
csőtömeg	$m_{cső}$	950	g
csőszáj hatásfok	$\eta_{csőszáj}$	0,9	nincs
kakas működési ideje	T_{kakas}	10	ms
csappantyú késedelem	T_{csapp}	2	ms
a zár hátrasiklási hossza	$L_{zár\_út}$	70	mm
szétreteszelési hossz	L_{ret}	10,0	mm
réselés helye	$L_{rés}$	5	mm
cső helyretoló rugójának előfeszí-tési ereje	$F_{r\_cső}$	200	N
a cső helyretoló rugójának ereje szétreteszelési pozícióban	$F_{r\_h\_cső}$	250	N
cső helyretoló rugójának viszkózus csillapítási tényezője	$k_{r\_cső}$	10	$\frac{1}{s}$
zár helyretoló rugójának előfeszí-tési ereje	$F_{r\_zár}$	20	N
zár helyretoló rugójának ereje hátsó pozícióban	$F_{r\_h\_zár}$	25	N
zár helyretoló rugójának viszkózus csillapítási tényezője	$k_{r\_zár}$	2	$\frac{1}{s}$
cső súrlódási ereje hátramozgáskor	$F_{s\_cső\_e}$	10	N
zár súrlódási ereje hátramozgáskor	$F_{s\_zár\_h}$	5	N

szimulációs adatok (VR rendszer)			
megnevezés	**jelölés**	**érték**	**mérték-egység**
zár súrlódási ereje előremozgáskor	$F_{s\_zár\_e}$	5	N
zár másodlagos munkatényezője hátramenetben	$\varphi_{zár}$	1,1	nincs
zár másodlagos munkatényezője előremenetben	$\varphi_{zár\_e}$	1,3	nincs
cső-zár rendszer másodlagos munkatényezője	φ_{Σ}	1,05	nincs
zár rugalmas ütközésének hatásfoka	$\eta_{zár}$	-0,2	nincs
iniciáló nyomás	p_{ini}	100	bar
besajtoló nyomás	p_{bes}	150	bar
lepuffanó nyomás	p_{le}	30	bar

5. táblázat: A szimuláció bemenő adatai, egy változtatható reteszelési rendszerű, kettős működésű koncepcióra.

2.3.4.2 A szimuláció eredményei (VR rendszer)

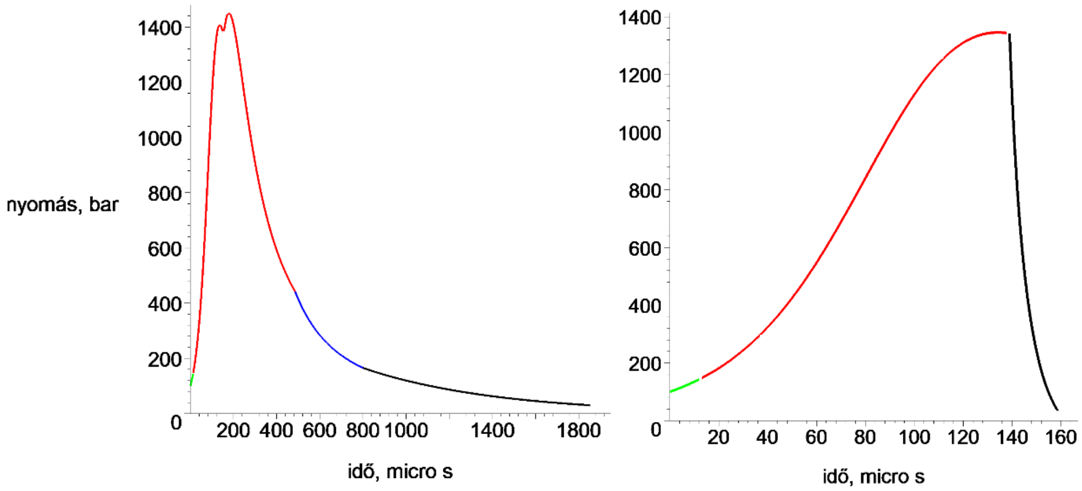
A szimuláció lényegesebb eredményeit az 6. táblázatban foglalom össze.

szimulációs eredmények (VR rendszer)			
megnevezés	**érték normál üzemállapotban**	**érték csökkent üzemállapotban**	**mérték-egység**
lövedék kezdősebessége	537	100	$\frac{m}{s}$
lövedék kezdeti impulzusa	5,37	1,00	$\frac{kg\,m}{s}$
lövedék kezdőenergiája	1442	50	J
zár maximális sebessége	**5,93**	**5,80**	$\mathbf{\frac{m}{s}}$

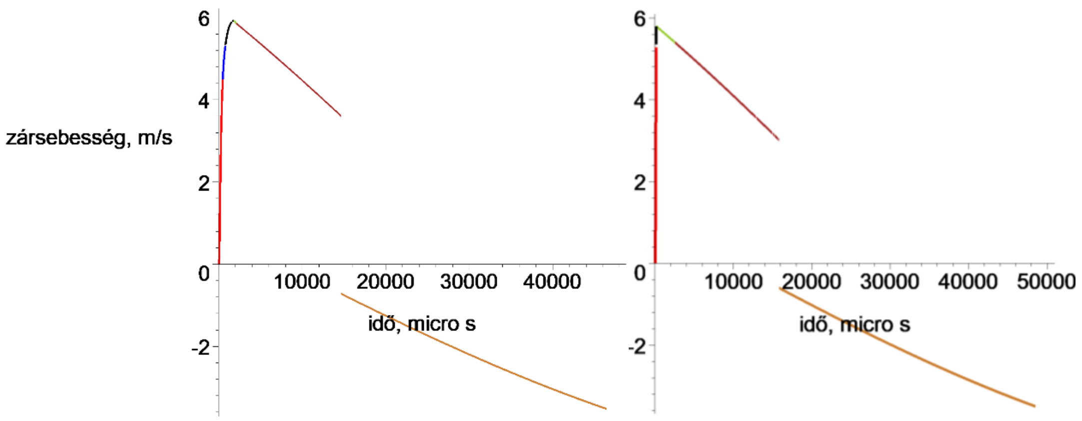
szimulációs eredmények (VR rendszer)			
megnevezés	**érték normál üzemállapotban**	**érték csökkent üzemállapotban**	**mértékegység**
zár maximális energiája	**2,64**	**2,52**	**J**
elméleti tűzütem	**1027**	**990**	$\frac{\textbf{lövés}}{\textbf{perc}}$

6. táblázat: A szimuláció eredményei egy változtatható reteszelési rendszerű, kettős működésű koncepcióra.

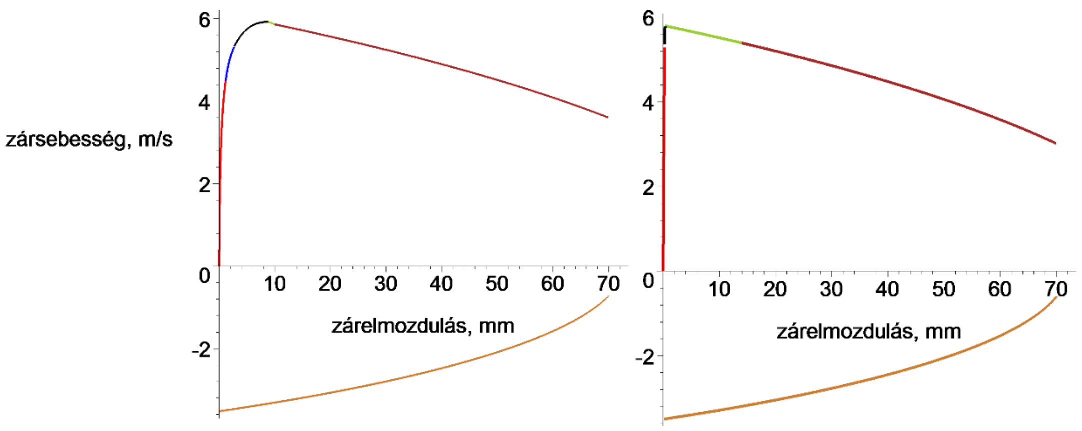
Az egyesített gáznyomásgörbék, zársebességek, zárelmozdulások és csökkentett energiaszintű üzemállapot esetében a lövedéksebesség diagramjait az alábbiakban közlöm.



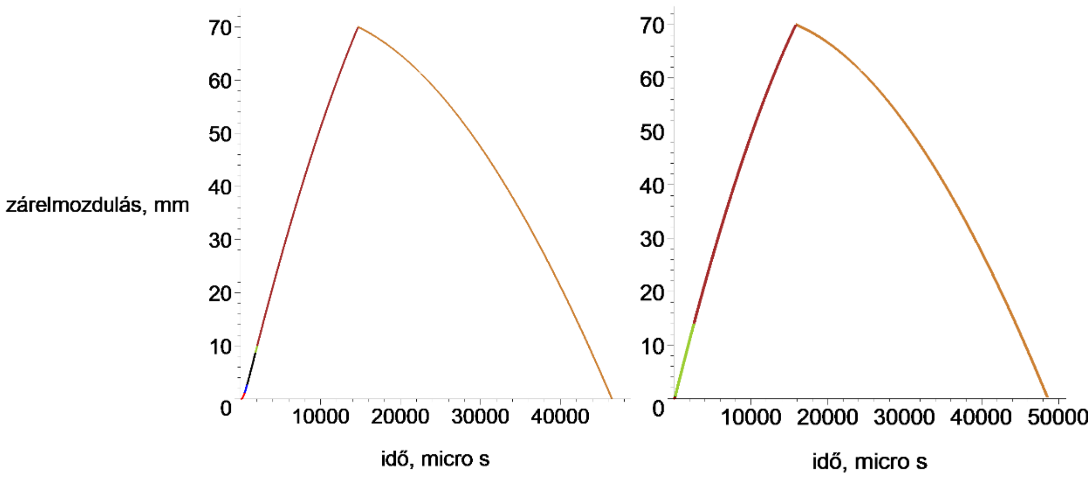
23. ábra: Az egyesített gáznyomásgörbék, balra a normál, jobbra a csökkentett üzemállapot (VR rendszer).



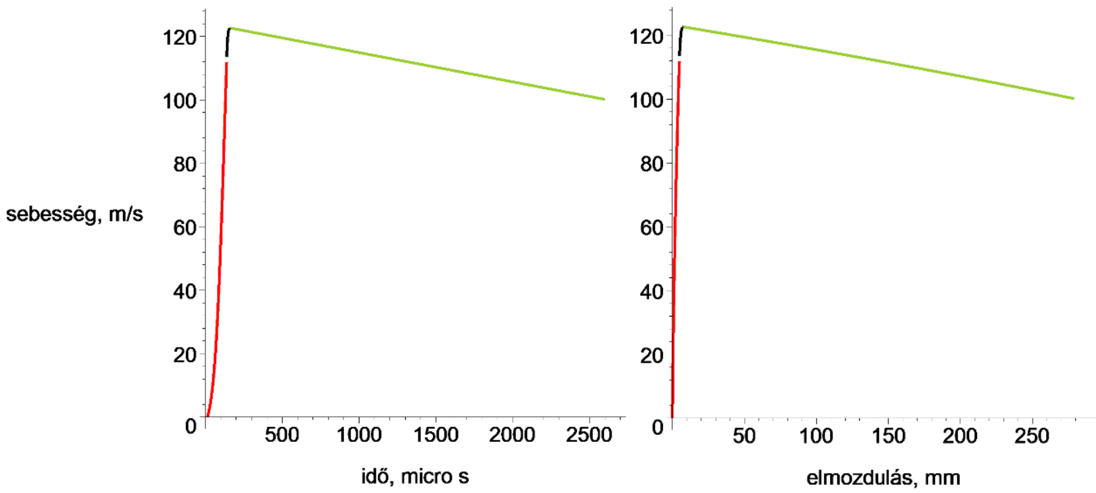
24. ábra: A zársebesség-idő diagramok, balra a normál, jobbra a csökkentett üzemállapot (VR rendszer).



25. ábra: A zársebesség-zárelmozdulás diagramok, balra a normál, jobbra a csökkentett üzemállapot (VR rendszer).



26. ábra: A zárelmozdulás-idő diagramok, balra a normál, jobbra a csökkentett üzemállapot (VR rendszer).



27. ábra: A lövedéksebesség diagramjai csökkentett üzemállapotban (VR rendszer).

2.4 KÖVETKEZTETÉSEK, ELVÉGZETT FELADATOK

Szimulációs számításokkal igazoltam a két műszaki megoldás elméleti megvalósíthatóságát, amelyeket ketté bontva, részletesen értékelek. **Egyetlen, általánosan igaz következtetést lehet levonni valamennyi rendszer esetében:**

A csőfal és a lövedék palástja között ébredő súrlódóerő disszipatív munkája döntő és meghatározó a lövedék sebességének csökkentésében. Ez a jelenség adottság, amely a huzagolás meglétének következménye. Amennyiben a fegyver konstrukciós kialakítása során eltekintünk a forgásstabilizálástól, akkor a súrlódási munka gyakorlatilag megszűnik a csőfal és a lövedékpalást között. Vegyük például a 27. ábrát, ahol a rövidebb csövű – $L_{cső} = 350\ \mathrm{mm}$ – változat csökkentett üzemállapotú lövedéksebesség grafikonjai láthatók. Ha a lövedéket simacsőből lőjük ki, akkor a 27. ábra grafikonjainak utolsó (barna) szakaszai vízszintes egyenesek lesznek. Ekkor a lövedék a maximális, közel $120\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ sebességgel hagyja el a csövet, így energiatöbblete a megnyert súrlódási munka lesz. Mivel az általam használt modell szerint a súrlódási erő konstans (jó közelítéssel a valóságban is az), így a súrlódási munka annak homogén lineáris leképezése. Az egyszerű modell szerint a súrlódási munka csak a csőhosszúságtól, a súrlódási együtthatótól és a lövedék vezetőgyűrűjének és a huzagolás átfedésének értékétől függ. Mindezekből következik, hogy a súrlódás kiemelt fontossága miatt, az ilyen fegyverek esetében a huzagolás nem elhagyható, bár eredeti funkciója (a lövedék stabilizálása) okafogyott, ui. a fegyver alkalmazási területe nem a céllövészet, valamint $5 - 15$ m-es lőtávolság esetén a lövedék stabilizálása általában indokolatlan is.

Egy, valamennyi gázmotoros rendszerű automatikára általánosan igaz következtetést lehet levonni:

A gázmotoros automatikával megvalósított kettős működésű fegyverek kifejezetten érzékenyek a lőpor minőségére (szemcse-, égéshő-, bevonat- töltettömeg homogenitás), ezért megbízható működésükhöz emelt minőségű erősen bevonatolt lőporok alkalmazása és növelt lőszergyártási fegyelem szükséges.

Összességében a kettős működésre képes fegyverek esetében a csősúrlódás meghatározóan fontos jelenség, értékét nem minimalizálni, hanem optimalizálni kell. Pontos leírására, kiszámítására komplikáltabb, részletesebb modellek felállítása indokolt.

2.4.1 Következtetések gázmotoros LS/LS rendszerre

A diagramokból több jelenség is látható, amelyek nagyban befolyásolják, meghatározzák az LS/LS típusú gázmotoros konstrukciók sajátosságait, lehetséges kialakítását. Az eredményekből az alábbi következtetéseket vonom le:

1 Látható, hogy a lövedék az általam kritikusnak tartott[21] $100\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ maximális sebességét már igen korán, mozgásának első 10 mm-es szakaszában eléri, a hátsó gázmotor kis pufferkapacitása – $W_{gm} = 0{,}5\ \mathrm{cm}^3$ – miatt, amely nem növelhető a gázmotor nyomásimpulzusának drasztikus csökkenése miatt. Ez sok problémát okoz valós tervezési feladat esetén, mert ezt az értéket is csak erősen bevonatolt, nagy porozitású lőpor alkalmazásával lehet ennyire elnyújtani, hagyományos lőporok alkalmazása mellett. Kimondható, hogy a lövedék kezdeti gyorsításának mérséklése kívánatos, de a betöltött lőpor tulajdonságainak változtatásával az elvárt hatás nem, vagy csak részben valósítható meg.

2 A gázmotoros konstrukció egyesített nyomásgörbéjén (7. ábra) látható a gázhenger jelentős pufferhatása, amely a felül futó nyomásgörbe alatti területet jelentősen csökkenti. Figyelembe véve, hogy a lövedéksebesség igen jó közelítéssel ennek a görbének az integrálterületével arányos, így kimondható, hogy a kívánt lövedéksebesség elérésének időbeli – és ebből következően lövedékút szempontjából értelmezett – elnyújtásának hatékony módja a pufferkamraként is működő gázmotor alkalmazása. Látható azonban (1. táblázat), hogy a gázátömlő furatot így is az átmeneti kúpba kellett helyezni, amely számos problémát okoz, mert ekkor a gázelvétel a tranziens jelenségek zónájába kerül, amely kezelésére az analitikus módszer csak korlátozottan alkalmas. A legnagyobb bizonytalanságot az adja, hogy a lövedék nem pontszerű, hanem véges hosszúságú palástfelülettel bír, így a pirodinamikus szakasz nem zérus lövedéksebesség mellett kezdődik, amely sebesség valódi értékét megmérni nem tudjuk, legalábbis hazai mérőbázison. Mindezektől eltekintve az átmeneti kúp megfúrása, ha nem is szokásos, de létező technikai megoldás, például a .50AE

[21] Korábbi vizsgálataim alapján, ahol bőrös sertés hasalján vizsgáltam a tompa orrú, alacsony sebességű lövedékek hatását. A vizsgálat bemutatása nem célom, nem illeszthető a disszertáció témájának koncepciójába.

kaliberjelzésű Desert Eagle pisztolynál. Ekkor a gázelvétel már a statikus szakaszban elkezdődik, a rendszert még jobban pufferelve. Korábbi előkísérleteimre eredményei szerint, csak önmagában a cső – az átmeneti kúptól viszonylag távoli – réselésével a lövedék kilépő sebessége $50\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ alá csökkenthető, sőt a fegyvercsőbe úgymond „beragasztható”. Ugyanakkor a lövedék megállása a fegyvercső furatában megengedhetetlen jelenség, mert ennek elhárítása alkalmazás közben lehetetlen, valamint a jelenség balesetveszélyes is lehet, és a rálövés a fegyvercsövet is károsíthatja. Mindezekből következik, hogy az átmeneti kúpban megfúrt és utána réselt fegyvercső működőképes konstrukciót biztosít, különösen a házhenger pufferhatása miatt.

3 A pufferhatás tovább növelhető additív statikus pufferkamrákkal, de ez a gázmotoros konstrukcióknál felesleges, valamint káros is, mivel ez a gázhengertér nyomásimpulzusát csökkenti. A gázhenger pufferhatása a 7. ábra jobb oldalán jól látható, a gázhenger kezdeti térfogatának növelésével – W_{gm} –, a ciánkék szakasz időben kitolható, azaz a kék plató tartománya szűkül és az kisebb nyomáson fut le, csökkentve ezzel a lövedéket gyorsító gáznyomást. Hátránya ennek a megoldásnak, hogy a gázmotor nyomásimpulzusát drasztikusan csökkenti, amely kompenzálásához a gázdugattyú átmérőjét kell növelni, vagy a befogott lőporgázokat kell csapdába ejteni, speciális, résvezérelt konstrukció alkalmazásával.

4 Látható, hogy csökkentett energiaszintű üzemállapotban a gázdugattyút igen rövid idejű, de annál intenzívebb erőhatás éri (2. táblázat). Ekkor a gázdugattyú átmerője is a megszokotthoz képest jóval nagyobb, amely részben a konstrukció sajátosságából, részben a szerény nyomásimpulzusból adódik. A gerjesztés igen rövid ideje alatt a zár tizedmilliméteres nagyságrendű elmozdulást végez, így speciális, a befogott lőporgázokat csapdába ejtő, résvezérelt konstrukciók nem jöhetnek szóba hosszú gázdugattyú hátrasiklásos rendszer esetén. Erre kínál megoldást a rövid gázdugattyú hátrasiklásos rendszer speciális gázmotorral.

5 Belátható, hogy csökkentett energiaszintű üzemállapotban a gázmotor pufferhatása csak a lövedék sebességére gyakorol számunkra kedvező hatást, a zársebességre nézve azonban nincs hatása, mert leürülése a nagy gázátömlőfurat hatására pillanatszerű. Ezért a lőportöltet inhomogenitása miatt kialakuló

nyomásimpulzus bizonytalanság döntően fogja a gázmotor által szolgáltatott energiát is bizonytalanná tenni, amely a fegyver automatikájának megbízhatatlan működését okozza. A megbízhatatlan működést az is elősegíti, hogy az LS/LS automatika ebben az elrendezésben meglehetősen alacsony energiát szolgáltat. A 2. táblázat eredményeiből látható, hogy az LS/LS rendszer zárenergiái $10\,\mathrm{J}$ alattiak, amely kifejezetten alacsony érték. Tapasztalataim szerint, egy gépkarabély automatikának legalább ennek a kétszeresével kell rendelkezni ahhoz, hogy a kisebb szennyeződések miatt megnövekedő disszipatív munkák ne okozzanak fennakadást a működésben.

6 Összességében kijelenthető, hogy a feladat megoldható LS/LS rendszerű automatika használatával, de ennek a műszaki megoldásnak korlátjai vannak, amelyek megléte adottság, és emiatt ez a megoldás, ha nem is elvetendő, de közel sem optimális.

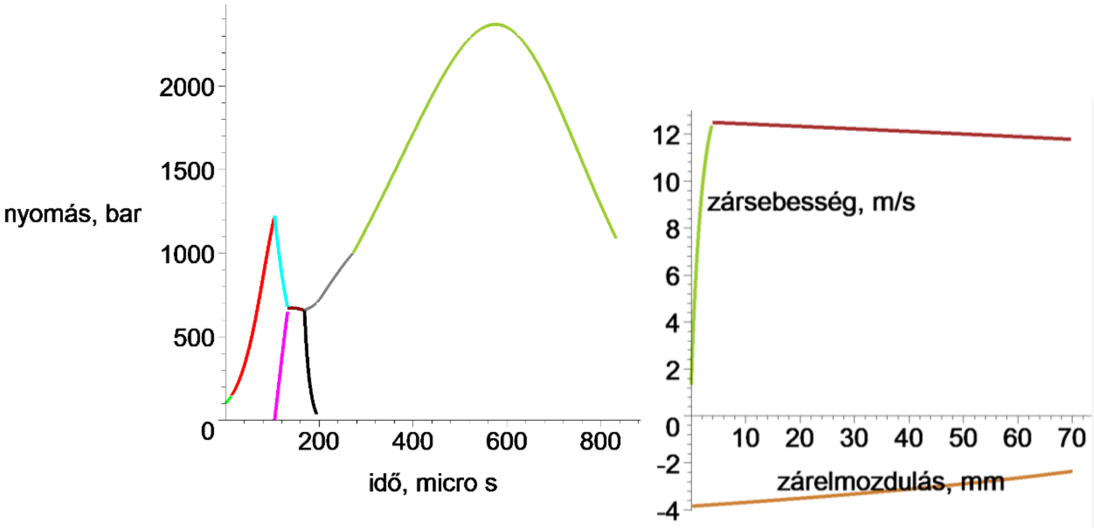
2.4.2 Következtetések gázmotoros LS/SS rendszerre

A diagramokból – az előzőben megismerteken kívül – több új jelenség is látható, amelyek lényegi eltérést mutatnak az LS/LS megoldáshoz képest. Az LS/SS megoldás csökkentett üzemállapotú működését vizsgálva, az eredményekből az alábbi következtetéseket vonom le.

1 A hátsó gázmotor most jelentős – $W_{gm} = 1{,}0\ \mathrm{cm}^3$ – kezdeti térfogattal rendelkezik, amely szükség szerint növelhető. Ez a pufferkapacitás a gázátömlőfurat pozíciójától – $L_{gáf} = 2\ \mathrm{mm}$ – kezdve érezteti a lövedéksebességre értelmezett kedvező hatását, de a gázmotor nyomásimpulzusára is kedvezően hat. A kedvező hatást a kezdeti térfogatba beáramlott égő szemcsék biztosítják, amelyeket a résvezérelt elzárással csapdába ejtünk. Bár a gázmotorba beáramló közeg átlagos nyomása jóval alacsonyabb a kisebb kezdeti térfogattal ellátott társánál, a bent rekedt égő szemcsék révén a gázhengertérbe juttatott potenciálisan felhasználható lőporenergia ténylegesen is felhasználhatóvá válik. A gázmotorban forrásos pirodinamikus folyamat alakul ki, amelyet a beáramló lőpor- és lőporgáz tömeg, az osztott gázdugattyú tömege és az illesztési hézag mérete jellemez.

2 Az illesztési hézag most egy kiemelten fontos tervezési paraméter, értékét a tervezés során nem minimalizálni, hanem optimalizálni kell. Az illesztési

hézag mérete a gázmotor legfontosabb negatív visszacsatolása, helytelen megválasztása esetén a fegyver automatikája csökkentett üzemállapotban vagy nem fog megfelelően működni, vagy szétveri a hátsó ütközőbetétet, vagy hátsó gázhengere az első lövés alkalmával felrobban, és/vagy a gázdugattyú eltörik/kihajlik. Egy nem kellően nagy illesztési hézaggal – $\Delta_{gm\_cs} = 0{,}10$ mm – szerelt gázdugattyú szimulációja a 28. ábrán, egy túlterhelés következtében tönkrement gázdugattyú pedig a 29. ábrán látható.



28. ábra: A túl kicsi illesztési hézag hatása a gázhenger nyomására és a zár sebességére, csökkentett üzemállapotban (SS rendszer).

29. ábra: A gyári állapotú és egy túlterhelés következtében tönkrement gázdugattyú.

3 A gázmotor kezdeti térfogatának növelésével a réselés helye a csőszáj irányába tolható, amely jelenős könnyebbséget jelent a konstrukció elemeinek elrendezését tekintve.

4 Látható, hogy csökkentett energiaszintű üzemállapotban a gázdugattyút hoszszan tartó, és szabályozható átlagos nyomású terhelés éri (4. táblázat). Ebből következően a gázdugattyú átmerője szabadabban választható, összehangolva azt a gázdugattyú mozgástartományával és a gázhenger kezdeti térfogatával.

5 A gázátömlő furat átmérőjét viszonylag nagyra kell választani, de ekkor azt elzárni csak jelentős dugattyú elmozdulással lehet. Az elzárás pillanatszerűvé tételéhez a gázátömlő áramlási keresztmetszetét kell alapul venni, ezért a kör keresztmetszetű palásfurat alkalmazása ennél a konstrukciónál nem alkalmazható, azt ki kell váltani tangenciális réseléssel, amely a műszaki megoldást gyártástechnológiai szempontból bonyolulttá teszi. Továbbá a résvezérlés megvalósításához szükség van a gázdugattyú szögpozícionálására, és egy visszatérítő rugó beépítésére. Mindezekből látható, hogy a megoldás, bár számos előnnyel rendelkezik, műszaki szempontból bonyolult.

6 Összességében kijelenthető, hogy a feladat megoldható LS/SS rendszerű automatika használatával. Ez a megoldás nagy szabadságot ad a tervezőnek, a kívánt zár- és lövedéksebesség könnyen biztosítható, kis konstrukciós méretek mellett. A megoldás hátrányaként fel lehet hozni annak komplexitását és gyártástechnológiai nehézségeit.

2.4.3 KÖVETKEZTETÉSEK VÁLTOZTATHATÓ RETESZELÉSŰ RENDSZERRE

Az előszámítások során becsült, és a szimulációnál pontosított tömegadatokból, valamint a diagramokból és a számítási eredményekből az alábbi következtetéseket vonom le.

1 A hulladékenergia felhasználásával működő automatika rendszerek sajátossága, hogy gerjesztő energiáik nem változtathatók, ezért a vázolt koncepcióban a zártömeget a csökkentett üzemállapot jellegzetességei fogják meghatározni. A kis gerjesztés végi sebességű lövedékhez tartozó gáznyomásgörbe nyomásimpulzusa csekély, ezért a zártömegnek is a szokásoshoz képest kicsinek kell lenni, de ennek a tömegnek van alsó korlátja, amelyet az alkalmazott lőszer kalibere és a fegyver egyéb sajátosságai határoznak meg. Ezt a tömeget

tapasztalataim alapján, a számítások során $m_{zár} = 150$ g - ra vettem fel. Ehhez a tömeghez a .50AE kaliberű $m_{löv} = 10$ g és $\Omega = 1$ g lövedék és lőportöltet tömeg mellett kevesebb, mint 3 J zárenergia adódott. Ez a zárenergia nagyon kevésnek mondható, valamint a megfelelő helyretoló rugó is a megszokottnál jóval lágyabb, amely szintén számos probléma forrása. A zárenergia a zártömeg csökkentésével – négyzetesen – növelhető, így $m_{zár} = 100$ g esetén $E_{zár} \approx 6$ J várható, amely érték továbbra is csekély.

2 A csökkentett energiaszint melletti szabad tömegzáras rendszer automatikát legjobban befolyásoló disszipatív munkája a hüvely és a töltényűr közötti súrlódás. Ezt az értéket csökkentve lehetséges a rendszer zárenergiáját maximalizálni. Erre léteznek bevált műszaki megoldások, például a töltényűr ellátása ún. Revelli-csatornákkal[22], amelyek alkalmazásával a fegyvercső gázait részben a töltényűr és a hüvely külső fala közé tereljük, így tehermentesítve a hüvelyt, csökkentve a Culonb-féle disszipatív munkát. Számításaim során erre nem tértem ki, hatása viszonylag könnyen beépíthető az egyenletekbe.

3 A csökkentett üzemállapot ennél a műszaki megoldásnál megköveteli a szabad tömegzáras rendszert, amely viszont különleges kialakítású pisztolylőszert – de legalábbis hüvelyt – feltételez. Ez a rendszer kifejezetten érzékeny a hüvely-töltényűr rendszer paramétereire, különösen a súrlódási viszonyokra. Mindezekből adódóan a felhasználó szakszerűségére.

4 A csökkentett üzemállapot ebben az elrendezésben nincs ellátva pufferkamrával, amely miatt annak a lövedéksebességre gyakorolt, számunkra jótékony hatása sem érvényesül. Ezzel, vagy kisméretű lepuffanó furattal a rendszer ellátható ugyan, de úgy a puffert, mint a lefúvó furatot el kell tudni zárni normál üzem esetén, amely komplikálttá teszi a fegyvert, mert a fegyvercső normál üzem esetén lineáris mozgást végez.

5 További megoldás lehet még csökkentett üzemállapot a zársebesség növelésére egy additív SS rendszerű gázmotor beépítése, mint hátralökés erősítő, bár ekkor a fegyver jobban fog hasonlítani egy rövid csőhátrasiklásos – reteszeletlen SS rendszerű hibridhez, mint értelmes műszaki megoldáshoz, de a lehetőséget

---

[22] Lásd: Heckler und Koch G3 automata puska.

nem szabad figyelmen kívül hagyni.

6 Összességében kijelenthető, hogy a feladat megoldható változtatható reteszelési rendszerű automatika használatával. Ennek a megoldásnak az életképessége számomra kétséges. Mindazonáltal a megoldás további elemzést érdemel, vizsgálatait legalább technológiai demonstrátor szintig elvitt fejlesztés keretében érdemes elvégezni.

2.4.4 A 4. FEJEZET ELVÉGZETT FELADATAI

Megalkottam az általam életképes műszaki megoldásoknak tartott, kettős működésre képes fegyverek fizikai modelljeit.

Elkészítettem a modellszámításokhoz alkalmas matematikai modellt számító szoftvereket.

Modellszámításokkal igazoltam az általam lehetségesnek vélt megoldások elméleti működőképességét.

Bebizonyítottam, hogy kettős működésre képes lőfegyver speciális LS/LS rendszerű gázmotor alkalmazása mellett megvalósítható.

Bebizonyítottam, hogy kettős működésre képes lőfegyver speciális LS/SS rendszerű gázmotor alkalmazása mellett megvalósítható.

Bebizonyítottam, hogy kettős működésre képes lőfegyver változtatható reteszelési rendszer alkalmazása mellett megvalósítható.

Igazoltam 1. tézisem, miszerint: *„Tervezhető olyan hagyományos lőszert tüzelő automata kézilőfegyver, amely normál „halálos” és – egy üzemállapotváltó-kapcsoló működtetésével – mintegy egy nagyságrenddel kisebb energiaszintű lövedéket lő ki, mindezt úgy, hogy az automatika mindkét üzemállapotban rendeltetésszerűen működik.”*

3 AZ ELÉRHETŐ LEGKISEBB LÖVEDÉKSEBESSÉG VÁRHATÓ ÉRTÉKE

Az előzőkben nyilvánvalóvá vált, hogy a csőfurat és a lövedékköpeny közötti súrlódásból származó disszipatív munka nagyságrendileg azonos a lövedék mozgási energiájával. Az egyszerű modellből az is következett, hogy a súrlódási munkát a lövedék elmozdulás homogén lineáris transzformációjával számíthatjuk ki, konstans súrlódóerőt feltételezve. Ebből az is következik, hogy a súrlódási munka független a lövedéksebességtől, így elméletileg a csőszáji sebesség bármely nullánál nagyobb pozitív értéket felvehet. Úgy a fegyvercső furatának, mint a lőszer paramétereinek gyártási szóródási miatt azonban belátható, hogy a lövedék csőtorkolati sebessége valószínűségi változó, amely több, fegyver- és lőszerparaméter összegzett bizonytalanságából számítható. Ha nem engedjük meg a lövedék fegyvercső furatba való megszorulását, de a lehető legkisebb lövedéksebesség beállítása a célunk, akkor meg kell tudnunk adni a lövedéksebesség, mint valószínűségi változó sűrűségfüggvényét. Ehhez fel kell tárni az egyes bizonytalansággal bíró paraméterek lövedéksebességre vonatkozó átviteli függvényét.

Belátható az is – szintén a gyártási szóródások következtében –, hogy a súrlódási munka értéke is valószínűségi változó, amely a csőfurat és a lövedék átmérőjének bizonytalanságából származó, összegzett sűrűséggel jellemezhető. Az átfedés bizonytalanságának nem lineáris átviteli függvényét részben a vastagfalú csövek szilárdságtani egyensúlyi egyenletei írják le, részben pedig a képlékeny alakváltozás után megmaradó feszültségi állapot.

Ezzel a megközelítéssel a súrlódóerő konstans értékét feltételező ballisztikai modellünket is kiegészíthetjük az egyváltozós függvénnyé átalakított súrlódóerővel, megvizsgálva annak hatását a mindenkori gáznyomásgörbe alakulására (lásd: 1.5.4 szakaszt). Mivel a lövedék itteni számításainkat érintő gerjesztetlen mozgása során (a gáznyomás megszűntétől a csőszáj eléréséig) a lövedéket szétfeszítő gáznyomás nem növeli a fali súrlódást, így a súrlódóerő ebben a szakaszban konstans, de bizonytalansági összetevővel terhelt konstans és bizonytalansága csak az átfedés bizonytalanságának függvénye.

Feladatom feltárni és meghatározni valamennyi számottevő bizonytalansággal rendelkező paramétert és azok átviteli függvényét a lövedéksebességre, és ezek összegzett hatását megállapítani a lövedéksebességre. Ennek az összegzett valószínűségsűrűség-függvénynek az ismeretében megadható az a legkisebb minimális lövedéksebesség várható érték, amely biztosítása esetén a fegyver csövébe egyetlen lövedék sem fog beragadni, ezért a fegyver csökkentett energiaszint mellett is hiba nélkül fog működni.

A számításokat elvégeztem a zársebesség bizonytalanságára is, mert a kiváltó egyedi hatások azonosak, és bár kritikus hibát nem okoz a zárszerkezet nem 100%-os üzembiztonsága, de tervezési szintek elengedhetetlen a zársebesség maximuma középértékének és sűrűségének ismerete, hogy a zárszerkezet – mint lengőrendszer – statikus paramétereit meg tudjuk határozni.

A bizonytalansági változók hatását megvizsgáltam normál üzemállapot esetén is, majd összevetettem a csökkentett energiaszintű rendszerre jellemző hatással. Ebből következtetéseket vontam le arra nézve, hogy az ilyen típusú rendszerek konstrukciós tervezésénél miért és miben kell másképp gondolkodni, úgy fegyver-, mint lőszer-, mint lőportervezés szempontjából.

A számításaimat az általam legperspektivikusnak tartott LS/SS rendszerű konstrukcióra végeztem el, annak SS rendszerű csökkentett energiaszintű üzemállapotára, a 3. táblázat adataival.

3.1 A TORKOLATI LÖVEDÉKSEBESSÉG ÉS A ZÁRSEBESSÉG BIZONYTALANSÁGI VÁLTOZÓI

Az ebben a fejezetben tárgyalt bizonytalansági változók részletesebb ismertetése a [7] és a [8] tanulmányomban található.

A torkolati lövedéksebesség bizonytalansága az azt befolyásoló paraméterek bizonytalanságából származik. Ezeket a paramétereket három részre oszthatjuk:

1. a lőszerelemek paraméterei,
2. a fegyver paraméterei,
3. környezeti paraméterek.

Mindezekből a legtöbb bizonytalansági változót a lőszerelemek paraméterei jelentik, de a környezeti hatások is a lőszer, pontosabban a betöltött lőpor égési jellemzőit változtatják.

Környezeti hatásnak tekinthető a lőszer gyártása óta eltelt idő is, de a legfontosabb a lőportöltet hőmérséklete. Látni kell azonban, hogy a környezeti hatások önmagukban nem kezelhetők bizonytalansággal bíró paramétereknek, mert szigorúan véve nem azok. Egyértelműen létezik és stabil a valós értékük, de a mérésük bizonytalansága miatt akként kezelhetők. A számítások során ezért nem is vettem a bizonytalansággal bíró paraméternek a lőportöltet hőmérsékletét, azt elég az alkalmazási hőmérséklet minimumával helyettesíteni, és a számításokat ezen égési jellemzőkkel elvégezni. A lejárt szavatosságú lőszerek alkalmazását pedig eleve kizárom[23].

3.1.1 A FEGYVERBŐL SZÁRMAZÓ BIZONYTALANSÁGI ÖSSZETEVŐK

Ebben a részben azokat a fegyverparamétereket vizsgálom, amelyek jellemezhetők a várható értékükkel és szórásukkal, valamint a torkolati sebességre, vagy a zársebességre gyakorolt hatásuk jelentősebb. Ezeknek a mennyiségeknek a szórásai, egyedi ingadozásai a gyártási folyamat törvényszerű egyenetlenségeiből adódnak, amelyek közül a legfontosabbak rendre a következők:

- a fegyvercsőfurat belső szelvényéből számított keresztmetszete,
- a fegyvercsőfurat ormózat átmérője,
- a gázdugattyú illesztési hézagja,
- a gázhenger belső térfogata.

A fentiek hatásai a következők:

A fegyvercsőfurat belső szelvényéből számított keresztmetszete:

A belső ballisztika egyenleteit vizsgálva látható, hogy növekedésével a gáznyomás csökken, ui. a lövedék által nyitott tér növekszik. A növekvő keresztmetszet miatt azonban az adott tömegű lövedéket nagyobb erővel gyorsítjuk. Ennek ellenére a szimulációs számításokból látható, hogy növekedésével a torkolati sebesség csökken.

A fegyvercsőfurat ormózat átmérője:

Hatása a lövedéket radiálisan összeszorító feszültségre van, ami lényegében azonos a fegyvercső és a lövedékpalást között kialakuló felületi nyomással. Ebből a felületi nyomásból származik a lövedék és a csőfal között fellépő súrlódóerő, amely a

---

[23] Bár egyes fegyveres szervezeteknél bevett gyakorlat a lejárt szavatosságú lőszerek szavatossági idejének önhatalmú „kiterjesztése”.

legegyszerűbb modell esetében csak a felületi nyomás lineáris transzformációja. Az ormózatátmérő csökkenésével a súrlódóerő növekszik, így a torkolati sebesség csökken[24].

Látható, hogy ebben a felosztásban a disszipatív munkára csak az ormózatátmérő gyakorol hatást. **A disszipatív munka bizonytalanságait külön kezeljük, egyik egy összetevőjét azonosítva.**

A gázdugattyú és a gázhenger illesztési hézagja:

Növekedése esetén úgy a torkolati lövedéksebesség, mint a zársebesség maximuma csökken a rendszerből munkavégzés nélkül távozó gázok és lőporszemcsék megnövekedő aránya miatt. Jelentős hatása a zársebességre van, a torkolati lövedéksebességre gyengébben hat. A csökkentett energiaszintű üzemállapot esetén az egyik legfontosabb paraméter, amelyet optimalizálni és nem minimalizálni kell.

A gázhenger kezdeti térfogata:

Amennyiben a gázhenger terébe égő lőporszemcse nem, vagy elhanyagolható mennyiségben kerül – **normál üzemállapot** –, úgy növekedése esetén úgy a torkolati lövedéksebesség, mint a zársebesség maximuma csökken, a megnövekvő pufferhatás miatt. Jelentős hatása a zársebességre van, a torkolati lövedéksebességre ekkor csak elméletileg hat, befolyása kimérhetetlen.

Amennyiben a gázhenger terébe jelentős mennyiségű égő lőporszemcse kerül – **csökkentett üzemállapot** –, úgy növekedése esetén torkolati lövedéksebesség erősen csökken, valamint a zársebesség maximuma drasztikusan növekszik. A torkolati lövedéksebesség a megnövekvő pufferhatás miatt lesz kisebb, a zársebesség maximumát pedig a csapdába ejtett nagyobb mennyiségű égő lőporszemcse megnövekedett gázfejlesztő hatása idézi elő.

Csökkentett energiaszintű üzemállapotban hatása jelentős a zársebességre és a torkolati lövedéksebességre is, ezért a hátsó gázmotor legfontosabb paramétere. Tervezésnél az értékéhez kell illeszteni a gázdugattyú és a gázhenger között kialakuló rést méretét.

---

[24] Azzal a megkötéssel, hogy az ormózatátmérő változása nem befolyásolja a csőszelvény keresztmetszetét.

3.1.2 A LŐSZERBŐL SZÁRMAZÓ BIZONYTALANSÁGI ÖSSZETEVŐK

Ebben a részben vizsgálat alá veszem azokat a lőszerparamétereket, amelyek jellemezhetők a várható értékükkel és szórásukkal, valamint a torkolati sebességre, vagy a zársebességre gyakorolt hatásuk jelentősebb. Ezeknek a mennyiségeknek a szórásai, egyedi ingadozásai a gyártási folyamat törvényszerű egyenetlenségeiből adódnak, amelyek közül a legfontosabbak rendre a következők:

- lövedéktömeg,
- lőportöltet-tömeg,
- hüvely belső térfogata,
- lövedék beültetési mélysége,
- lövedék hüvelyből való kihúzási ereje,
- lövedék átmérője,
- lőportöltet inhomogenitása,
- a gázdugattyú illesztési hézagja,
- a gázhenger belső térfogata.

A fentiek hatásai a következők:

A lövedéktömeg

Növekedésével, bár a maximális gáznyomás, a gáznyomásgörbe munkaterülete és a lövés hatásfoka is nő, de a lövedék kezdősebessége csökken, mivel a fegyver kalorikus hatásfoka csak kis mértékben növeli az energiamérlegbők adódó kezdeti lövedékenergiát, így szinte változatlan lövedékenergiához kisebb lövedéksebesség kell tartozzon. A lövedéktömeg növekedésével a zársebesség általában növekszik, de ez nagyban függ a gázátömlő furat pozíciójától, ugyanis a nagyobb lövedéktömeg hatására a lőpor élénkebben viselkedik, azaz a gáznyomás maximuma időben korábban alakul ki és magasabb lesz, de a politropikus szakasz kisebb nyomáson fut le. A pontos hatást szimulációs futtatásokkal lehet felderíteni, adott konstrukciós elrendezés mellett.

A lőportöltet-tömeg

Növekedése esetén a maximális gáznyomás és a gáznyomásgörbe munkaterülete növekszik, ezért a lövedék kezdősebessége és a zársebesség egyaránt növekszik. Lényegében a rendszerbe több energiát viszünk be, ezért növekszik a hasznos munka is. Hatása mindazonáltal kettős, mert a pirodinamikus szakasz kezdetén a lőportöltet tömegének ingadozása kovarianciában áll a hüvely kezdeti térfogatával, mint valószínűségi komponenssel. A sebességnövelő hatása ekkor inkább abban mutatkozik, hogy csökkenti a hüvely pufferhatását. Mindazonáltal a korreláció nem jelentős, számításaim során függetlenségüket kikötöm.

A hüvely belső térfogata

Növekedése esetén a gáznyomásgörbe kezdeti statikus szakasza elnyújtottabbá válik, a gyújtás bizonytalanabb lesz. Komolyabb hatása a lövedék kezdősebességére van, mivel számértéke a belballisztikai gáznyomásegyenlet nevezőjében szerepel, ezért belátható, hogy növekedésével a maximális gáznyomásérték és a gáznyomásgörbe munkaterülete csökken, azaz a lövés termikus hatásfoka romlik, ebből következően a lövedék kezdősebessége is csökken. Jelentős a hatása a zársebességre is. A gázelvételi furat pozíciójától függően azt vagy növeli, vagy csökkenti. Növeli, ha a gázátömlő furat a gáznyomásgörbe degresszív szakaszában van (normál üzemállapot),

A lövedék beültetési mélysége

Gyakorlatilag a hüvely kezdeti belső térfogatát csökkenti, a gyújtásra nézve az előzőben leírtak szerint hat. A tranziens jelenségek időtartamára is hatással van. Hatását a hüvely belső térfogatának bizonytalansági tartományának növelésével tudjuk figyelembe venni.

A lövedék hüvelyből való kihúzási ereje

Csökkenése esetén az égés időben elnyújtottabbá és bizonytalanabbá válik, a bizonytalan begyújtás miatt. A lövedék kezdősebességét kis mértékben csökkenti, Hatása nehezen számítható, de jó minőségű lőszer esetén a kihúzóerő értéke egyenletes, ezért az általa okozott bizonytalanság is csekély. Figyelembe venni a besjtolási nyomás bizonytalansági tartományának növelésével tudjuk figyelembe venni.

A lövedék átmérője

Növekedése esetén növekszik a besajtolódás erőszükséglete, valamint a lövedék és csőfal közötti súrlódás. A kezdeti gázfejlődést felgyorsítja, amely akár veszélyes mértékben is megnövelheti a maximális gáznyomást. **A gáznyomásgörbe alatti terület növekszik, ezért a lövésünk termikus hatásfoka javul, így a lövedék maximális sebessége is nagyobb lesz. Ezt a hatását azonban ellensúlyozza a megnövekedő súrlódási munka.** Normál üzemállapot esetén a súrlódási munka növekménye elhanyagolható lenne, de csökkentett üzemállapot esetén a fő és a disszipatív munka összemérhető. **A pontos hatását úgy a torkolati sebességre mint a zársebességre, szimulációs számítások eredményeiből lehet meghatározni.**

A lőportöltet inhomogenitása

Döntő mértékben a lőszergyártási technológiára vezethető vissza. A lőportöltet betöltését a hüvelytérbe általában rezgő adagoló végzi. A betöltést megelőzően a rezgő adagoló egy előre beállított térrészbe juttatja a kívánt térfogatú lőport, azonban ezen műszaki megoldás mindenképpen inhomogenitást okoz. Mindez az egyedi lőporszemcsék eltérő geometriai méretei miatt van, amely kizárólag a lőporgyártási technológiára vezethető vissza. (Az eltérő geometriai méretek a gyártási méretszórás miatt keletkeznek. A geometriai méretek szórásán kívül a geometriai alak szórását is meg kell említeni, amely szintén a lőporgyártási technológiákra vezethető vissza.) A betöltés során a lőport egy kisebb – pár kg lőpor befogadására képes – tartályban helyezik el, amelyet a felboltozódás elkerülése, és az azonos ömlesztett sűrűség elérése érdekében vibrálnak. Ennek a vibrációnak káros mellékhatásaként megindul az eredetileg közel homogén eloszlású lőporszemcsékből álló halmaz frakciókra bomlása, azaz a kisebb szemcsék alulra, a nagyobbak felülre „úsznak”. Ez a jelenség kétféleképpen gyakorol hatást a lőportöltetre. Egyrészről a túlnyomóan kisebb szemcsékből álló töltetek ömlesztett sűrűsége, így tömegük is nagyobb lesz, ezzel természetesen energiatartalmuk is nő. Másrészről a kisebb szemcsék túlsúlya miatt a kezdeti égési felület megnövekszik, amely gáznyomásnövekedéssel és termikus hatásfok növekedéssel jár. A hatás tehát rendkívül összetett, előre nehezen megjósolható. Mértéke a lőporszemcsék geometriai méretszórásának a csökkenésével korlátozható. **Hatását a lőportárcsák vastagsági méretei-**[25] **és a porozitási faktor ingadozásának figyelembevételével számítom.**
Ezek voltak a lőszer egyedi eltéréseiből adódó, torkolati sebességre nézve jelentősebb véletlen hibák forrásai.
Látható, hogy nem minden bizonytalansági összetevő esetében biztosított a teljes függetlenség. Mivel a részleges korreláció csak néhány esetben igazolható (pl. az ormózatátmérő és a cső keresztmetszete között), valamint mértéke sem túl nagy, ezért az elkövetkezőkben feltételezem a korrelálatlanságot, amely feltételezéssel a számítások hatékonyabban elvégezhetők.

[25] A gyártási technológiából következik, hogy a lőportárcsák átmérőszórása legalább egy nagyságrenddel kisebb, mint a vastagsági méret szórása, így élek azzal az egyszerűsítéssel, hogy az átmérő szóródását elhanyagolom.

3.2 A BIZONYTALANSÁGI VÁLTOZÓK EGYEDI ELOSZLÁSTÍPUSAI

Az összegzett bizonytalanságot a szakirodalom egységesen Gauss- vagy más néven normál eloszlással közelíti. De általában véve az egyes valószínűségi változók (pl. lövedéktömeg) eloszlását is azzal. Míg az összegzett hatás számításaihoz általában elfogadható a centrális határeloszlás tétel alkalmazása, addig a komponensek sűrűségfüggvényeinek jellemzésére, finoman fogalmazva is kérdéseket vet fel. A Gauss-eloszlással való közelítéshez négy feltételnek kell egyszerre teljesülnie [9, p. 98]:

1 Az összegzett bizonytalansághoz hozzájáruló valószínűségi változók száma megfelelően nagy legyen.

2 Az egyes összetevők egymástól függetlenek legyenek, vagy csak kismértékben függjenek.

3 Az egyes összetevők hatása csak kis mértékben befolyásolja a összeg bizonytalanságát.

4 A bizonytalanságok összeadódjanak, és ne szorzódjanak.

Esetünkben az összeg bizonytalanság vizsgálatánál csak a második és az utolsó pont fog teljesülni, a harmadikról – a lőszerelemek gyártási folyamatának pontos ismerete nélkül –, nem tudunk mondani semmit, az elsőt pedig meg kell vizsgálni.

Az egyes bizonytalansággal terhelt paraméterek valószínűségsűrűségeiről kijelenthető, hogy a gyártás és gyártóeszközök ismerete nélkül mindennemű feltételezés puszta spekuláció, a normál eloszlás feltételezése különösen. A mérnöki gyakorlatban általában igaz (általában igaznak kellene lenni), hogy ha nincsenek információink valamiről, akkor arról nem mondunk semmit. Az egyes változók eloszlástípusait tehát nem tudjuk egzakt módon kezelni, ezért a legsemlegesebb állítást alkalmaztam, miszerint a valószínűségkísérlet kimenetelére nem írható fel szabály. Ezt az állítást csak a valószínűségi változók **egyenletes eloszlása** elégíti ki, ezért számításaim során mindvégig ezzel dolgoztam.

3.3 A TORKOLATI LÖVEDÉKSEBESSÉG ÉS A MAXIMÁLIS ZÁRSEBESSÉG VALÓSZÍNŰSÉGI VÁLTOZÓINAK ÖSSZEGZETT HATÁSA

Ebben a részben meghatározom az egyes bizonytalansági összetevőkkel rendelkező paraméterek hatását a lövedék- és a zársebesség ingadozására az átviteli függvényeik meghatározásával, majd a transzformált eloszlásokból konvolúciós eljárással meghatározom a lövedéksebesség összeg-valószínűségsűrűség függvényét.

3.3.1 A BIZONYTALANSÁGI VÁLTOZÓK EGYEDI HATÁSAI

A fentiekből következik, hogy egy valószínűségi változó eloszlását saját dimenziójában kell értelmezni, például a lövedéktömeg esetén tömeg, a besajtolási nyomás esetén nyomás dimenzióban. A bizonytalansággal bíró változók egyidőben befolyásolják a lövedék sebességét. Ezeket a hatásokat összegezni kell, de könnyen belátható, hogy a nyomás és a térfogat dimenzió eleve nem összeegyeztethető, valamint azt sem nehéz felismerni, hogy a lőportöltet, illetve a lövedék tömegének bizonytalanságát sem lehet egyszerűen összegezni, – habár a dimenziók azonosak –, mert a lövedéksebességére gyakorolt hatásaik – a mögöttük lévő teljesen más fizikai hatások miatt – eltérők. A tömeg, a nyomás, a térfogat stb. dimenziókban értelmezett hatásokat első lépésben át kell transzformálni a lövedéksebesség sebesség dimenziójában ható bizonytalanságra. Ennek módja, hogy a korábban ismertetett ballisztikai egyenletrendszert megoldjuk, a vizsgált bizonytalansággal terhelt paraméter saját ingadozási tartományában felvett ekvidisztáns értékeivel, és a kapott lövedéksebesség értékeket összepárosítjuk a hozzá tartozó a paraméter értékkel. Ezután a kapott pontpárosokra valamely jól illeszkedő regressziós függvényt határozunk meg. Ez a függvény lesz az adott paraméter bizonytalanságát áttranszformáló átviteli függvény, az átviteli függvény parciális deriváltfüggvénye pedig az adott paraméter erősítési tényező függvénye.

Az elkövetkezőkben ki fogom mutatni, hogy a bizonytalansággal rendelkező paraméterek szokásos gyártástechnológiai eljárások melletti ingadozása esetén az átviteli függvény linearizálható, ebből következően az adott paraméter erősítési tényezője konstans függvény.

Megmutatom azt is, hogy az erősítési tényezők és az ingadozási intervallumok elemzésével meg lehet határozni az összegzett hatást igen kevéssé befolyásoló paramétereket, amelyek elhanyagolásával a számítások felgyorsíthatók.

3.3.1.1 A bizonytalansági változók és ingadozásaik szimulációs bemenő értékei, valamint a szimuláció eredményei, csökkentett energiaszintű üzemállapotra

Az összegzett sűrűségfüggvény meghatározásához szükségünk van az ingadozó paraméterek bizonytalansági tartományain belül felvett, egyedi értékekkel meghatározott szimulációs futtatások eredményeire. A 11 bizonytalansággal terhelt paraméterre önkényesen[26] felvett tartományokat a 7. táblázatban foglaltam össze.

paraméterek és bizonytalansági tartományaik csökkentett energiaszintű üzemállapotban				
megnevezés	**jelölés**	**várható érték**	**ingadozási tartomány**	**mérték-egység**
lőportöltet-tömeg	Ω	1,000	$\pm 0{,}010$	g
lőportárcsa vastagsága	$c2$	0,100	$\pm 0{,}002$	mm
porozitási faktor	u_{fakt}	1,70	$\pm 0{,}02$	$-$
hüvely belső térfogata	W_0	1,20	$\pm 0{,}05$	cm^3
besajtolódási nyomás	p_{bes}	150	± 40	bar
lövedéktömeg	$m_{löv}$	10,00	$\pm 0{,}10$	g
fegyvercsőfurat átmérő	$d_{cső}$	12,700	$\pm 0{,}015$	mm
súrlódóerő (csőfurat)[27]	F_s	100	± 15	N
súrlódóerő (lövedék)	F_s	100	± 30	N
a gázdugattyú illesztési hézagja	Δ_{gd}	0,120	$\pm 0{,}020$	mm
a gázhenger belső térfogata	W_{gm}	1,00	$\pm 0{,}05$	cm^3

7. táblázat: A bizonytalansági változók és ingadozási tartományaik csökkentett energiaszintű üzemállapotban.

---

[26] Önkényesen, de gyártástechnológiai és tervezői tapasztalataim alapján.

[27] Súrlódóerő természetesen egy van a lövedék és a csőfal között, de bizonytalansága két részből adódik. Azt reprezentálják a zárójelbe írt kiegészítések, hogy az adott ingadozás melyik tétel bizonytalanságából származik.

A szimulációs számításokat a 7. táblázat adataival futtattam, a bizonytalansági változók ingadozási tartományon belül felvett 9 darab ekvidisztáns érték mellett[28]. A futtatás eredményeit a tartomány határaira a 8. táblázat tartalmazza.

paraméterek határértékei mellett kialakuló torkolati lövedéksebességek csökkentett energiaszintű üzemállapotban, $\frac{m}{s}$				
valószínűségi változó megnevezése	**jelölés**	**v_0 az alsó határértéken**	**v_0 a felső határértéken**	**megjegyzés**
lőportöltet-tömeg	OMEGA	90,57	95,24	
lőportárcsa vastagsága	C2	95,81	89,88	
porozitási faktor	UFAKT	91,00	94,85	
hüvely belső térfogata	W0	99,43	86,85	
besajtolódási nyomás	PBES	86,97	97,89	
lövedéktömeg	MLOV	92,71	93,00	gyenge paraméter, hatása elhanyagolható
fegyvercső-furat átmérő	DCSO	92,79	92,91	gyenge paraméter, hatása elhanyagolható
súrlódóerő (csőfurat)[29]	**FSCSO**	**98,13**	**87,06**	**domináns paraméter**

[28] Az első és az utolsó felvett érték a tartomány határa, a középső az adott bizonytalansággal terhelt paraméter mediánja. A szimulációk száma így $11 \cdot 9 - 10 = 89$.

[29] Súrlódóerő természetesen egy van, a lövedék és a csőfal között. Bizonytalansága azonban két részből adódik. Azt reprezentálják a zárójelbe írt kiegészítések, hogy az adott ingadozás melyik tétel bizonytalanságából származik.

paraméterek határértékei mellett kialakuló torkolati lövedéksebességek csökkentett energiaszintű üzemállapotban, $\frac{m}{s}$				
valószínűségi változó megnevezése	**jelölés**	**v_0 az alsó határértéken**	**v_0 a felső határértéken**	**megjegyzés**
súrlódóerő (lövedék)	**FSLOV**	**103,30**	**81,29**	**domináns paraméter**
a gázdugattyú illesztési hézagja	ΔGD	93,23	92,48	gyenge paraméter
a gázhenger belső térfogata	WGM	93,57	92,34	gyenge paraméter

8. táblázat: A paraméterek határértékei mellett kialakuló torkolati lövedéksebességek, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.

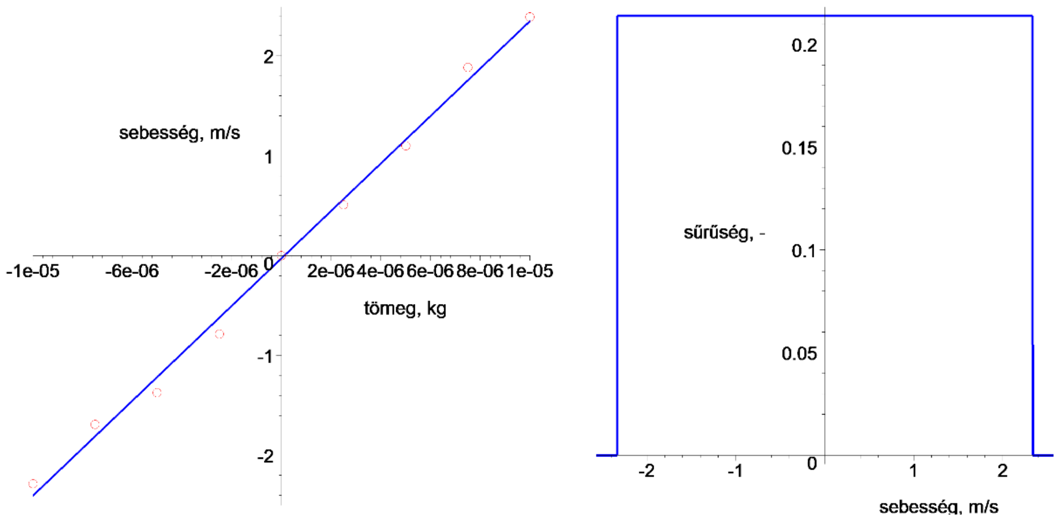
A zársebesség maximumára lefuttatott szimulációs számítások eredményeit a 9. táblázat foglalja össze.

paraméterek határértékei mellett kialakuló maximális zársebességek, csökkentett energiaszintű üzemállapotban, $\frac{m}{s}$				
megnevezés	**jelölés**	**$v_{zár\_max}$ az alsó határértéken**	**$v_{zár\_max}$ a felső határértéken**	**megjegyzés**
lőportöltet-tömeg	OMEGA	10,31	11,10	
lőportárcsa vastagsága	C2	11,60	9,80	
porozitási faktor	UFAKT	10,16	11,20	
hüvely belső térfogata	W0	11,48	9,96	
besajtolódási nyomás	PBES	10,04	11,26	

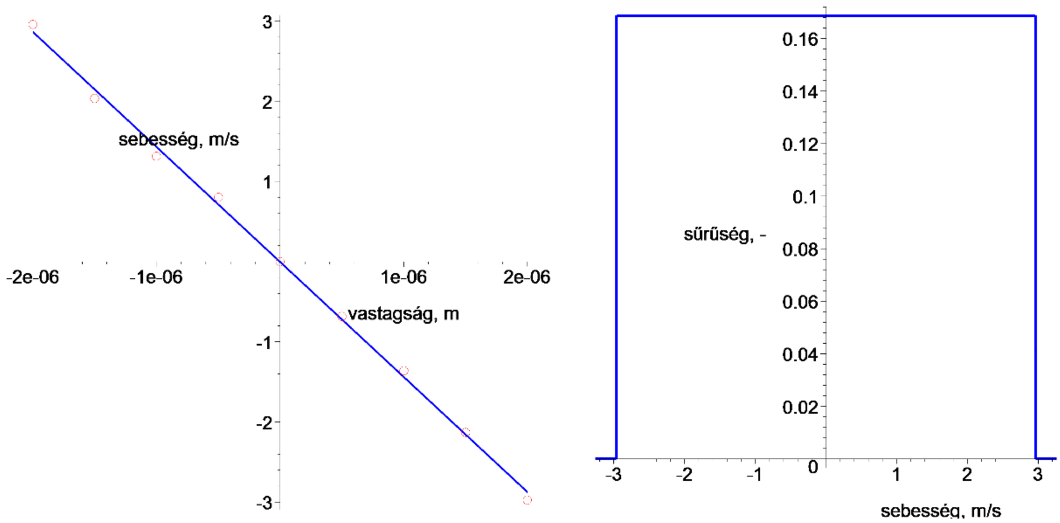
paraméterek határértékei mellett kialakuló maximális zársebességek, csökkentett energiaszintű üzemállapotban, $\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s}}$				
megnevezés	**jelölés**	$v_{zár\_max}$ **az alsó határértéken**	$v_{zár\_max}$ **a felső határértéken**	**megjegyzés**
lövedéktömeg	MLOV	10,59	10,84	gyenge paraméter
fegyvercsőfurat átmérő	DCSO	10,73	10,62	gyenge paraméter, hatása elhanyagolható
súrlódóerő (csőfurat)	FSCSO	10,72	10,76	gyenge paraméter, hatása elhanyagolható
súrlódóerő (lövedék)	FSLOV	10,66	10,78	gyenge paraméter, hatása elhanyagolható
a gázdugattyú illesztési hézagja	**ΔGD**	**13,17**	**7,24**	**domináns paraméter**
a gázhenger belső térfogata	WGM	10,10	11,25	

9. táblázat: A paraméterek határértékei mellett kialakuló zársebesség maximumok, csökkentett energiaszintű üzemállapotban

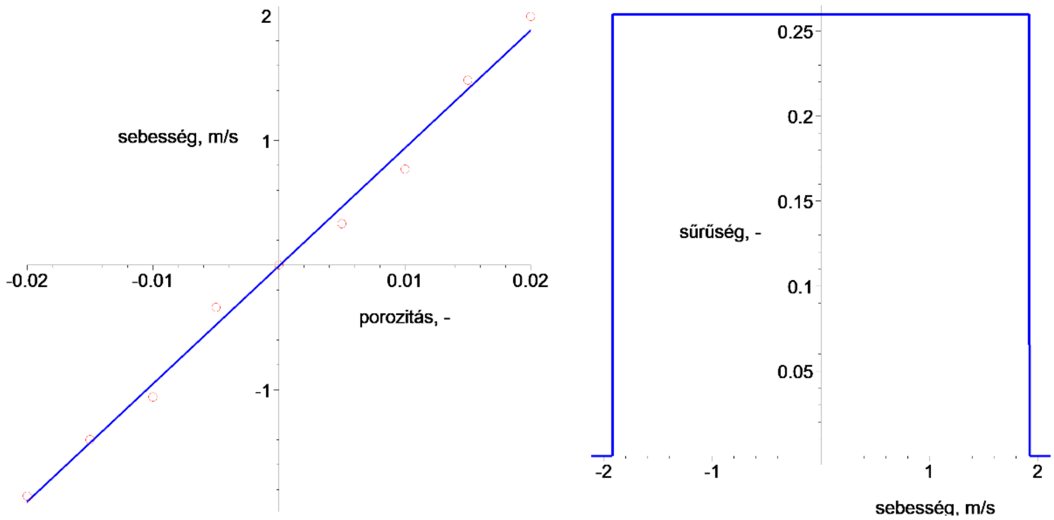
Az egyes valószínűségi változók torkolati lövedéksebességre és maximális zársebességre gyakorolt hatásait, valamint a lövedéksebesség dimenziójába transzformált sűrűségfüggvényeiket az alábbi ábrák szemléltetik, ahol az egyedi átviteli függvényüket regressziós egyenessel illesztettem. A szimmetria megtartása érdekében a regressziós egyenesek függőleges eltolódását megszüntettem.



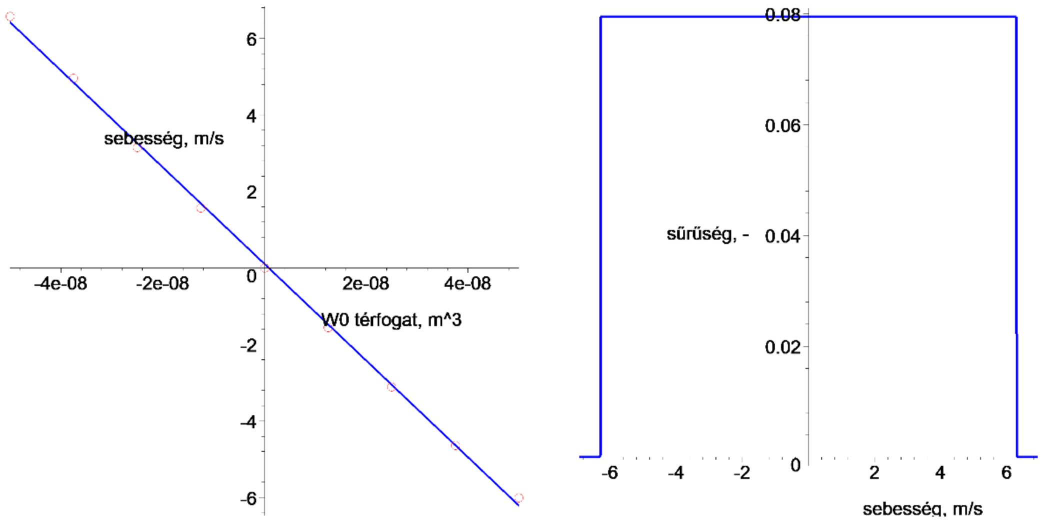
30. ábra: A betöltött lőportömeg regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a lövedéksebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



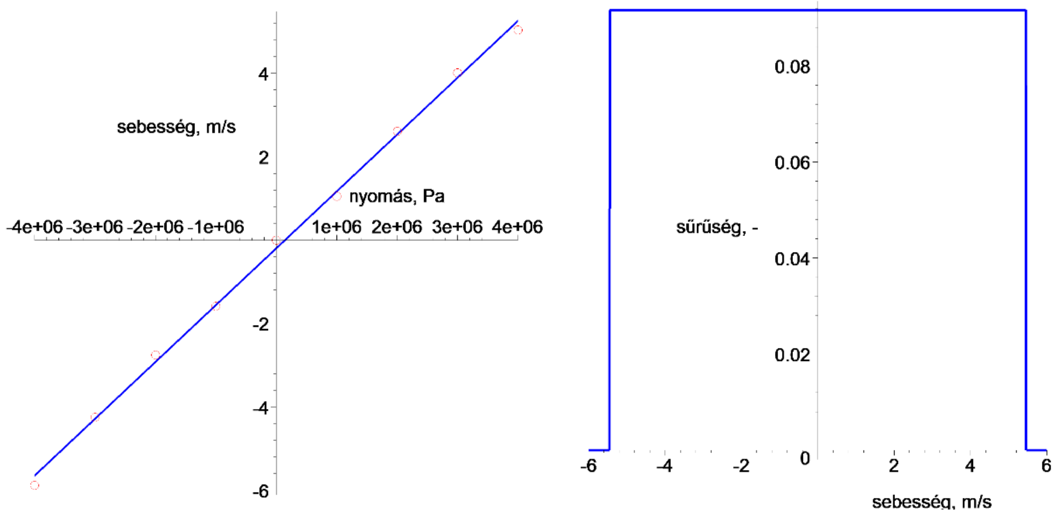
31. ábra: A lőporvastagság regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a lövedéksebesség dimenziójába, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



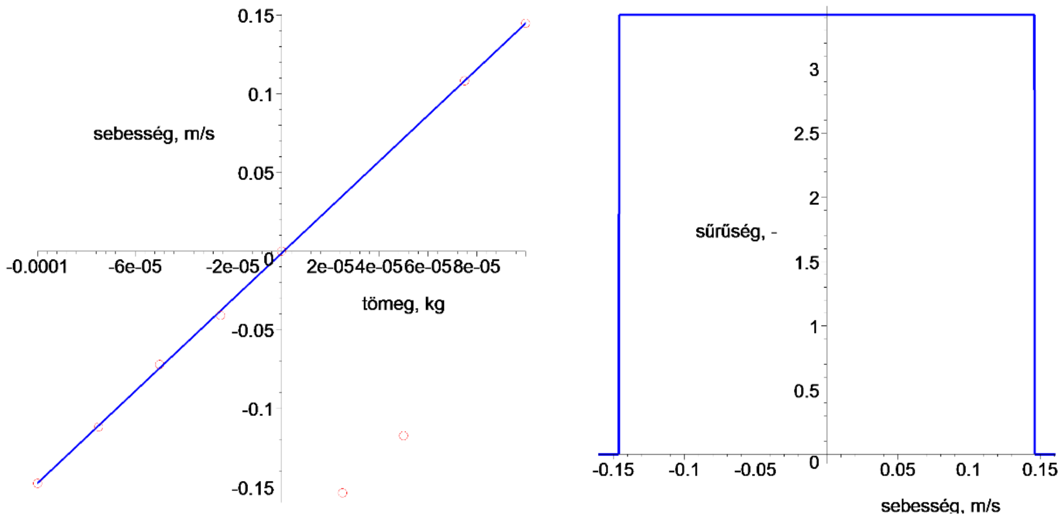
32. ábra: A porozitási faktor regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a lövedéksebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



33. ábra: A kezdeti égési térfogat regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a lövedéksebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



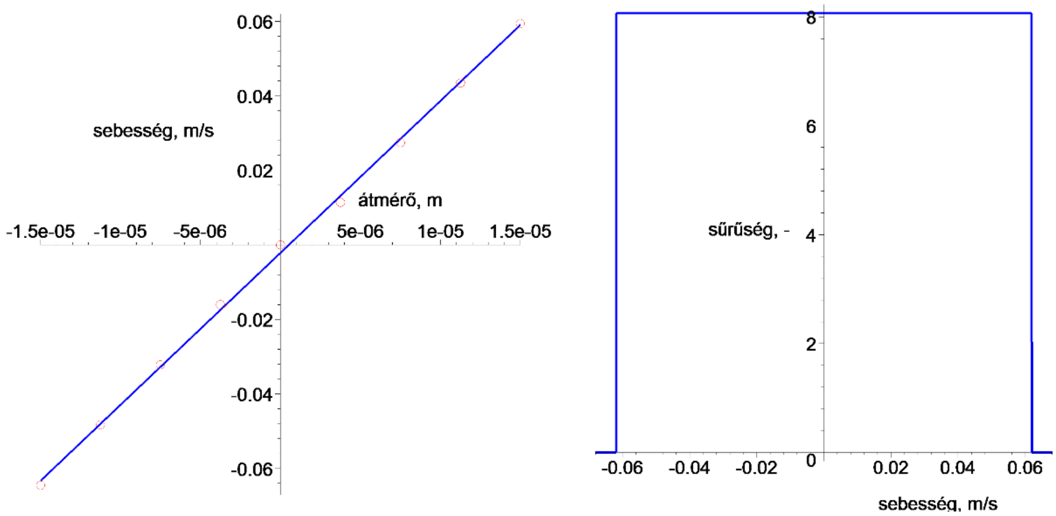
34. ábra: A besajtolódási nyomás regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a lövedéksebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



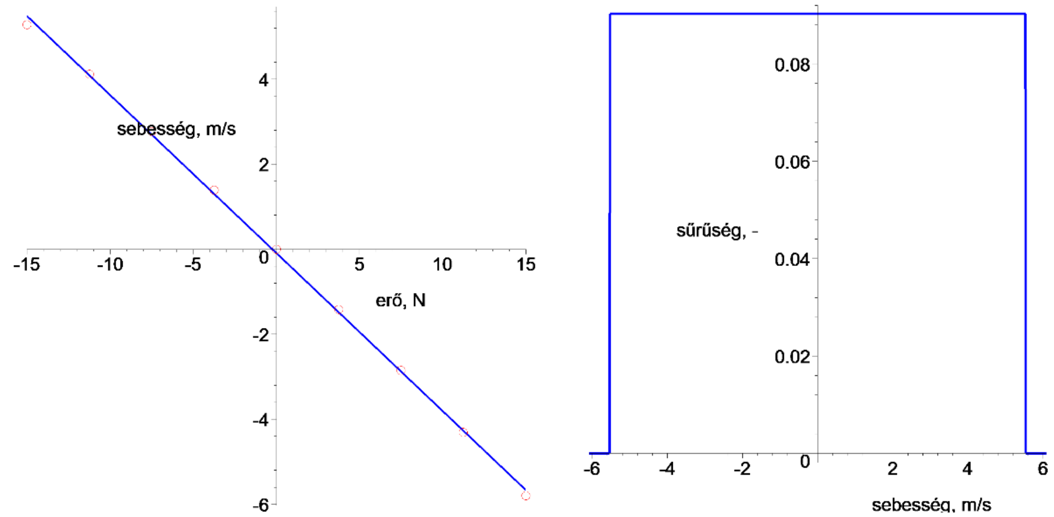
35. ábra[30]: A lövedéktömeg regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a lövedéksebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.

---

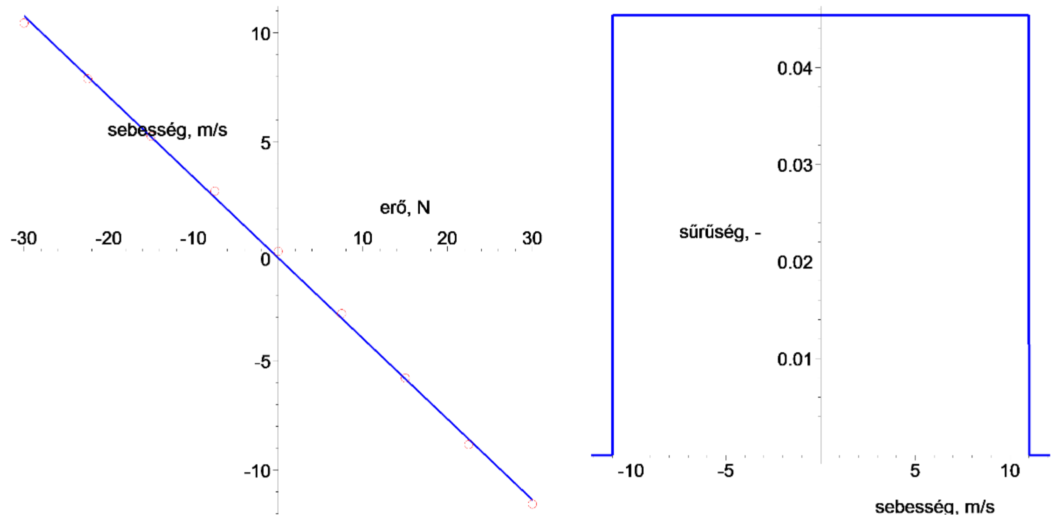
[30] Látható, hogy két szimulációs pont jelentősen eltér a trendtől. Ez feltehetően a Maple dsolve() megoldófüggvényének a hibája, mert a két paraméterérték csekély változtatása esetén a számított sebességek már jó illeszkedést mutatnak. A regressziós egyenes kiszámításánál ezeket a pontokat nem vettem figyelembe.



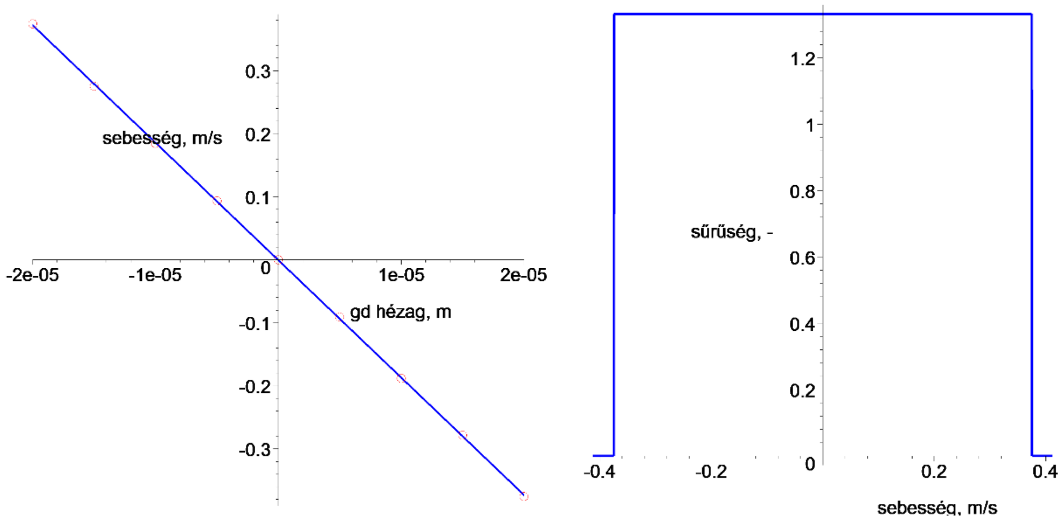
36. ábra: A csőfurat átmérőjének regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a lövedéksebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



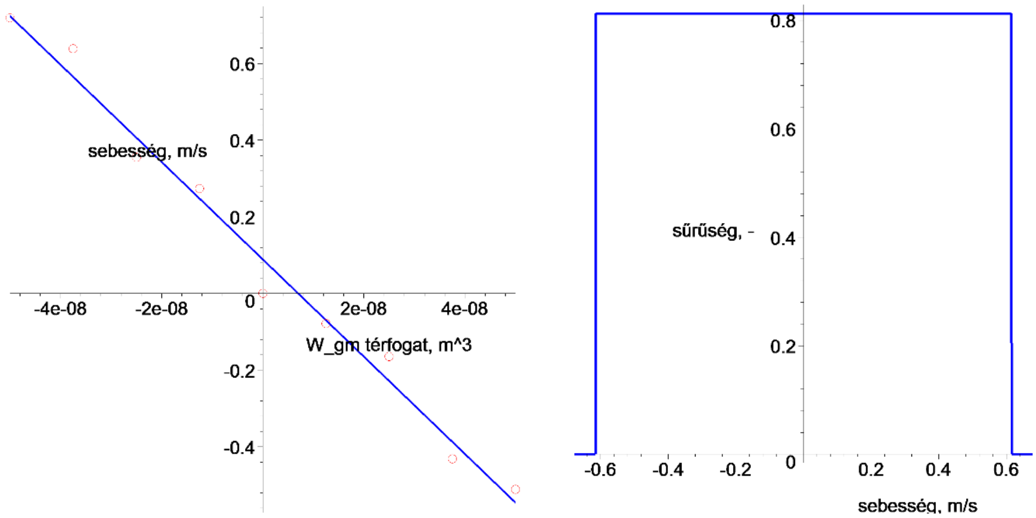
37. ábra: A súrlódóéról fegyverből származó bizonytalanságának regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a lövedéksebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



38. ábra: A súrlódóéról lövedékből származó bizonytalanságának regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a lövedéksebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



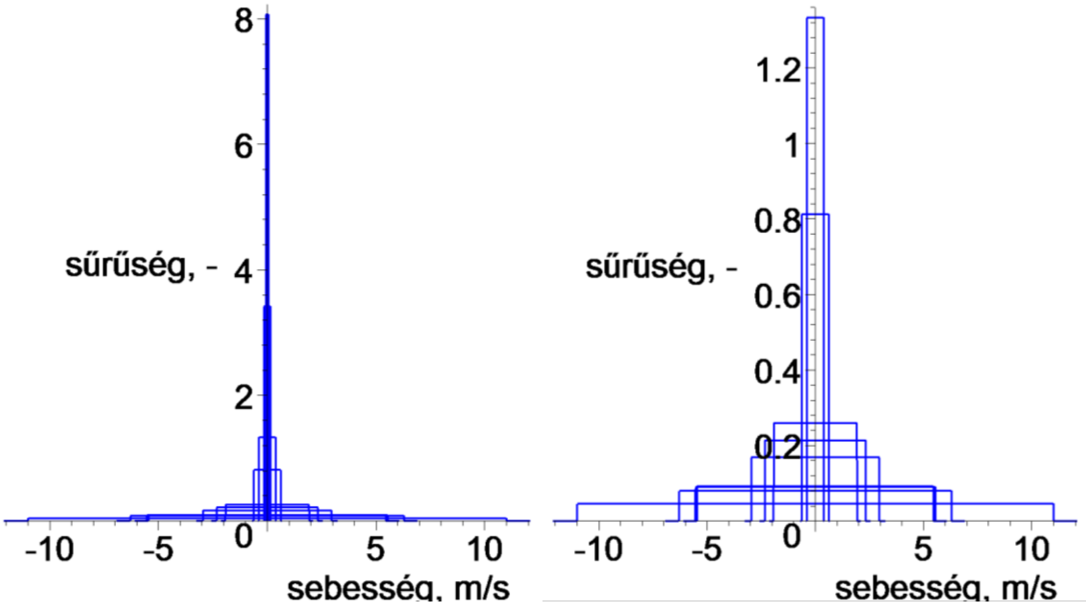
39. ábra: A gázdugattyú és a gázhenger közötti hézag bizonytalanságának regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a lövedéksebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



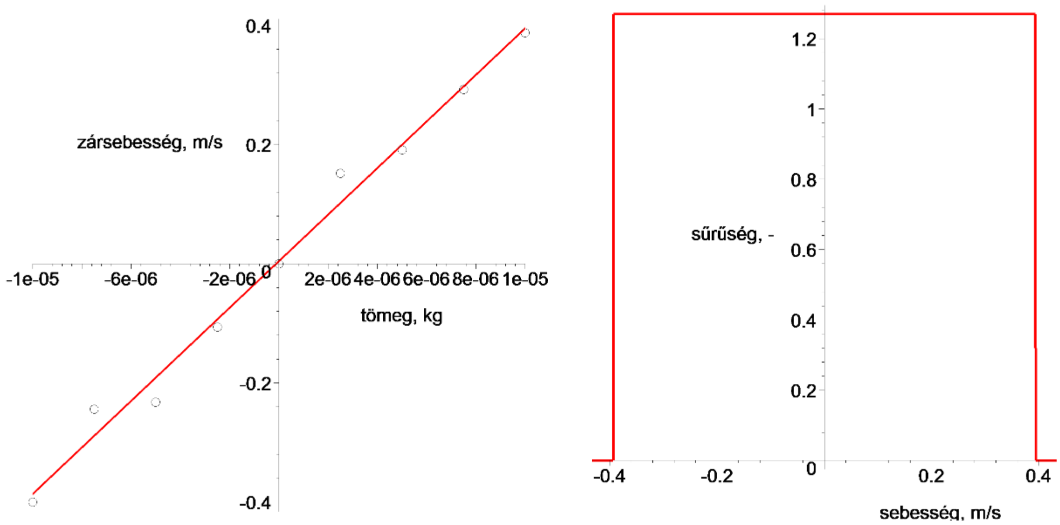
40. ábra: A gázhenger kezdeti térfogat bizonytalanságának regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a lövedéksebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.

Látható, hogy a lövedéktömeg és a csőfurat átmérőjének [31]a bizonytalansága az összegzett hatás szempontjából elenyésző. Ezt látványosan illusztrálja a 41. ábra bal oldali grafikonja, ahol az egyedi eloszlásokat egy diagramon ábrázolva, a jelentéktelen hatású változólat tűszerű sűrűségfüggvények reprezentálják. Az igen gyenge hatású összetevőket elhanyagolva a kilenc darab sűrűségfüggvény a 41. ábra jobb oldali grafikonján látható.

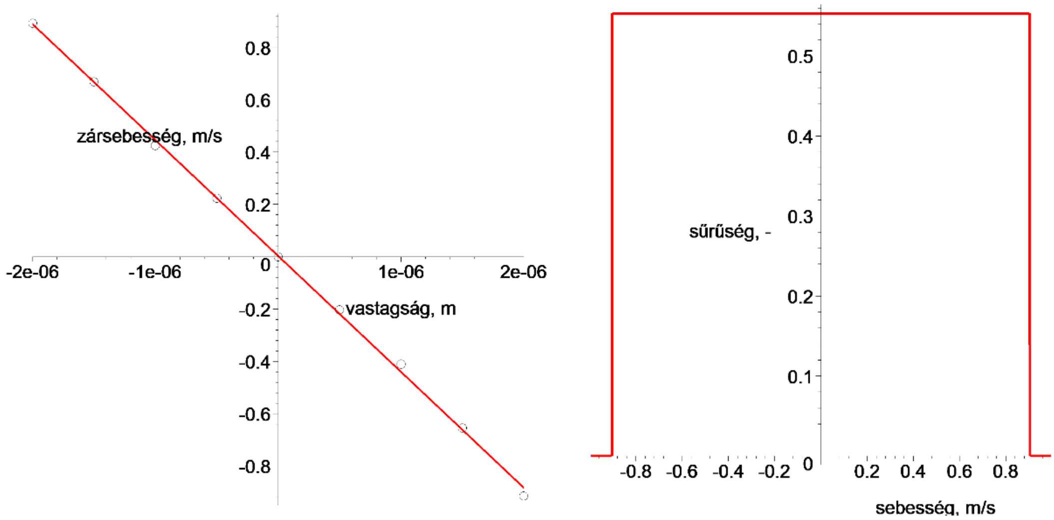
[31] A lövedéket gyorsító felület szempontjából, és nem a fali súrlódást vizsgálva.



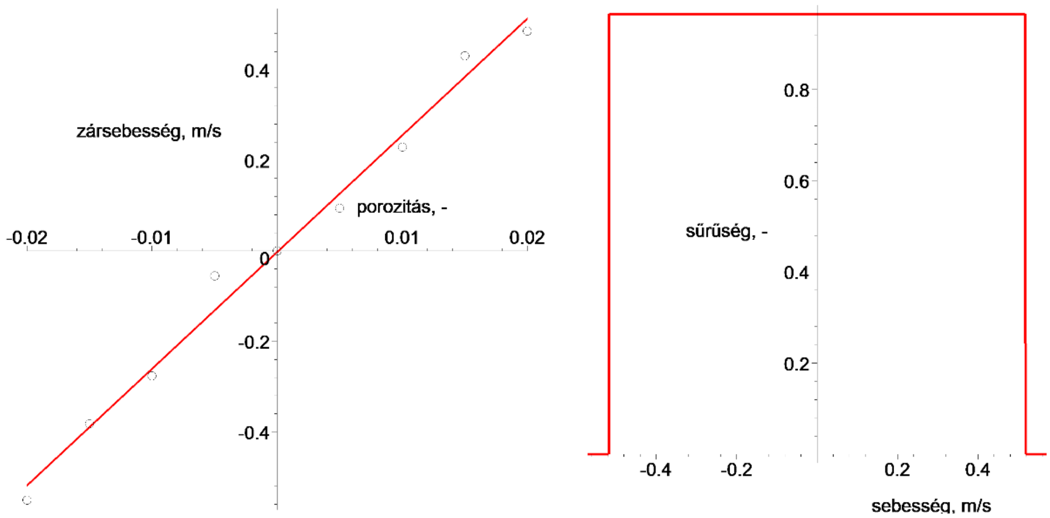
41. ábra: A bizonytalansággal rendelkező valamennyi paraméter, (bal oldal, 11 db.) és a releváns paraméterek (jobb oldal, 9 db.) sűrűségfüggvényei a lövedéksebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



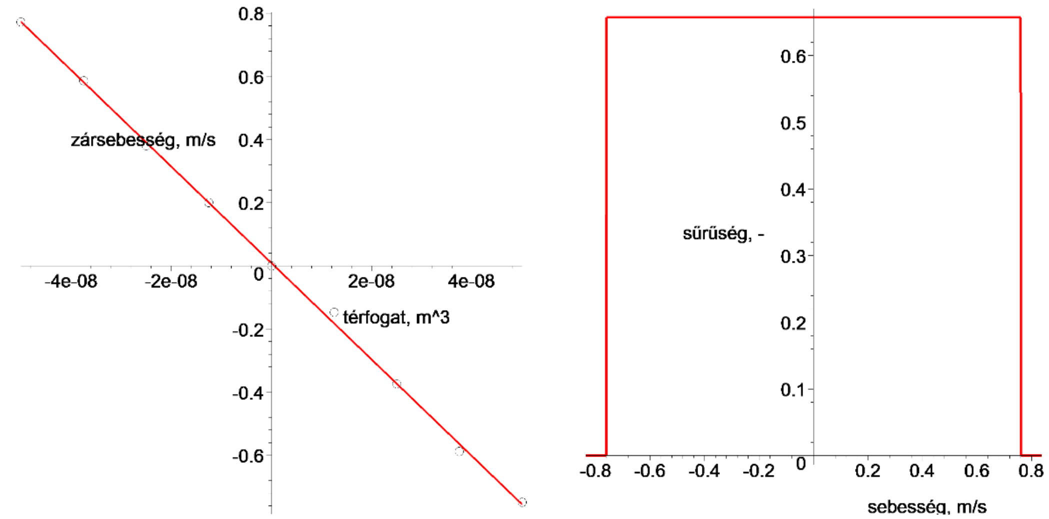
42. ábra: A betöltött lőportömeg regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a zársebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



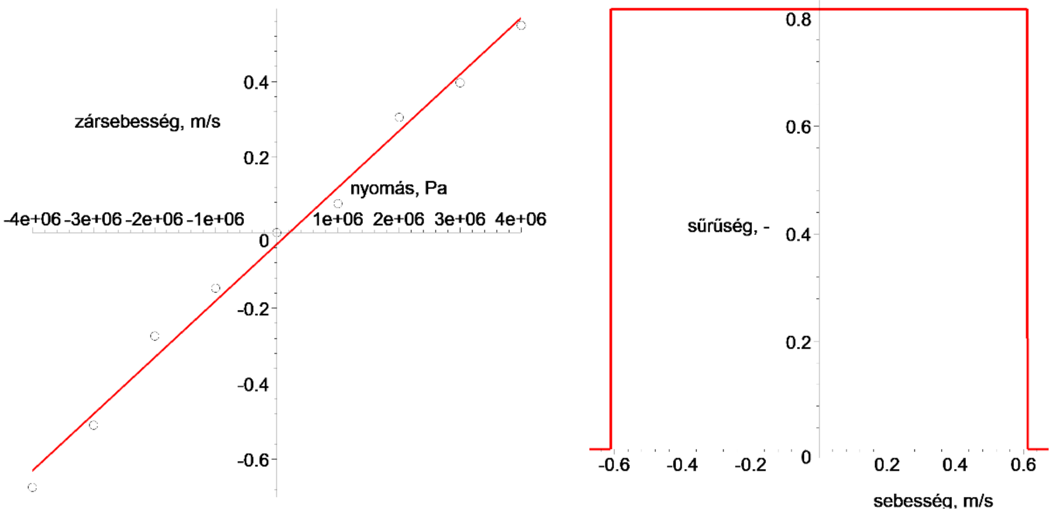
43. ábra: A lőporvastagság regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a zársebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



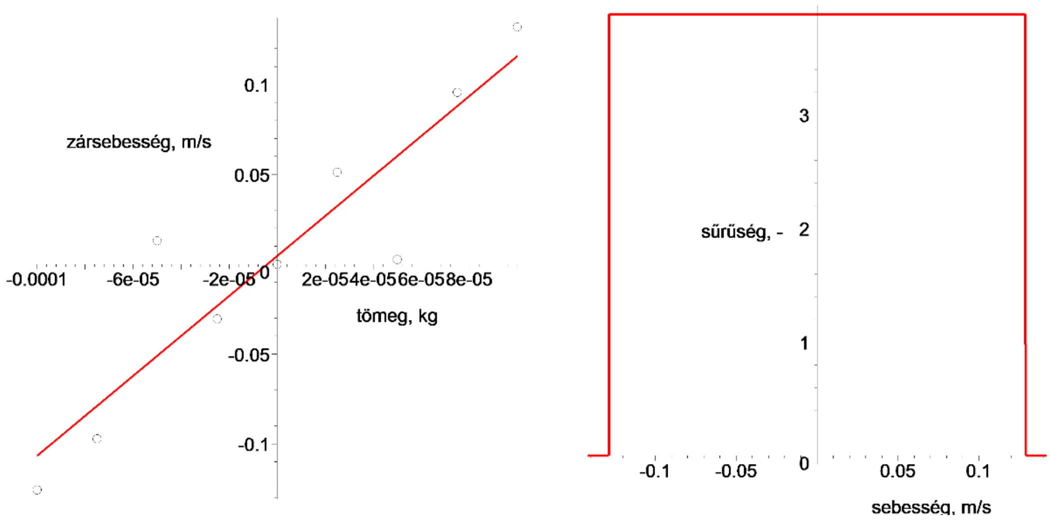
44. ábra: A porozitási faktor regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a zársebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



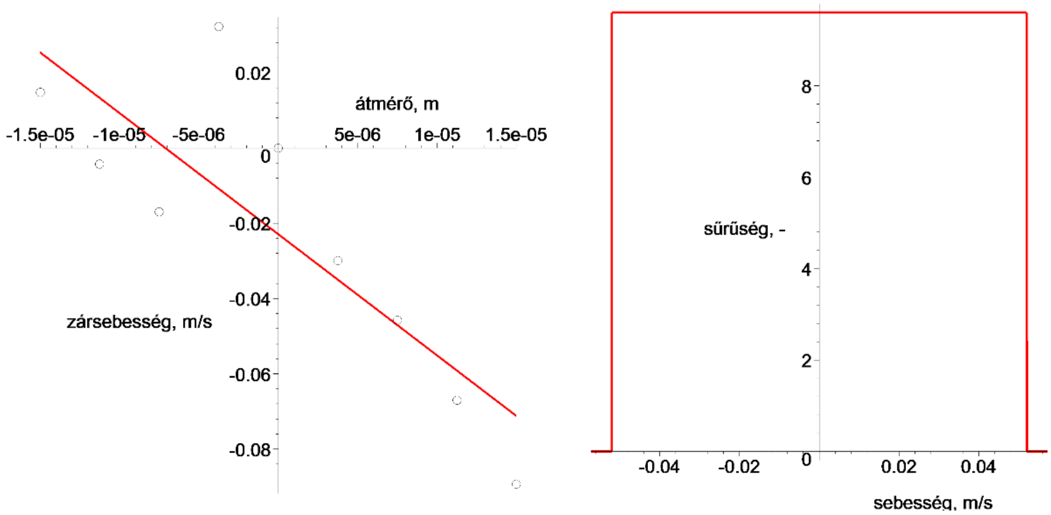
45. ábra: A kezdeti égési térfogat regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a zársebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



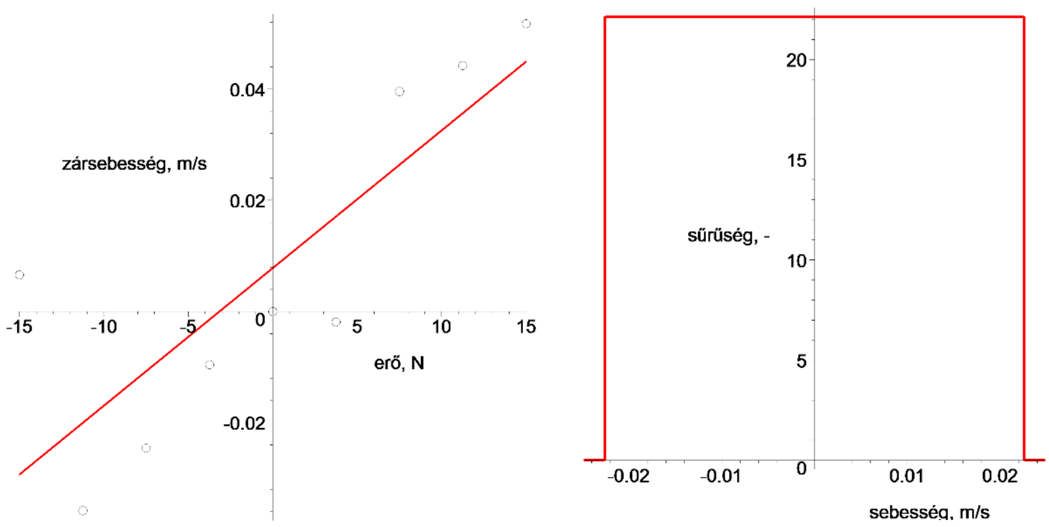
46. ábra: A besajtolódási nyomás regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a zársebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



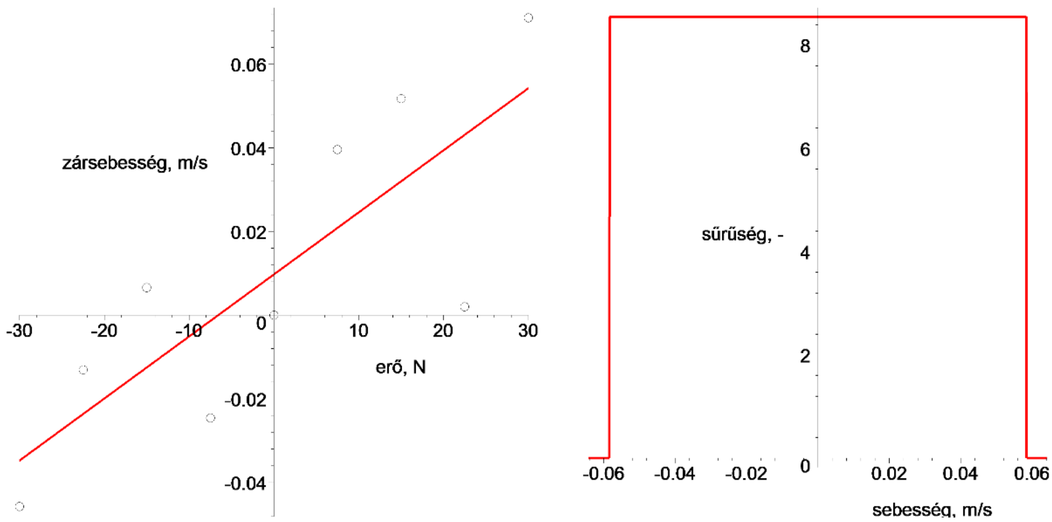
47. ábra: A lövedéktömeg regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a zársebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



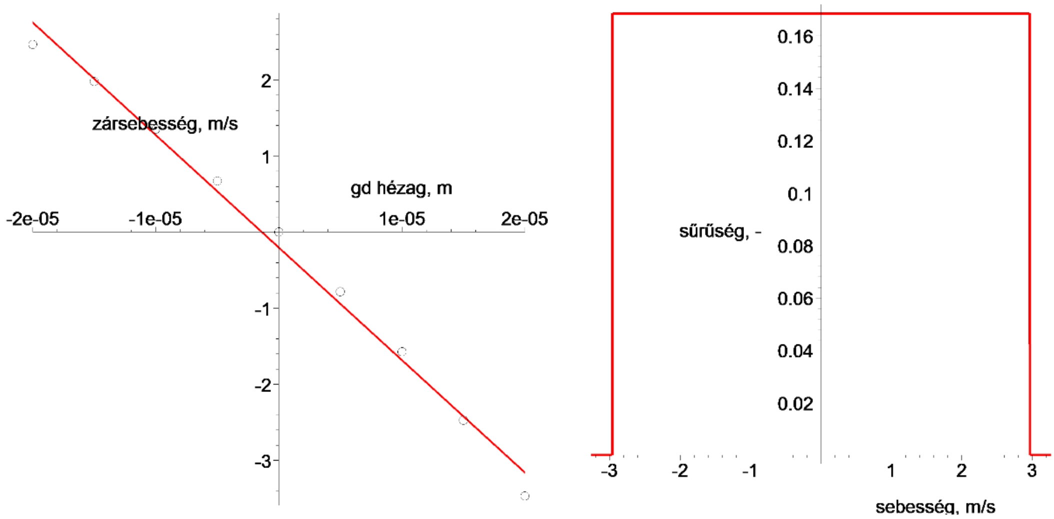
48. ábra: A csőfurat átmérőjének regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a zársebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



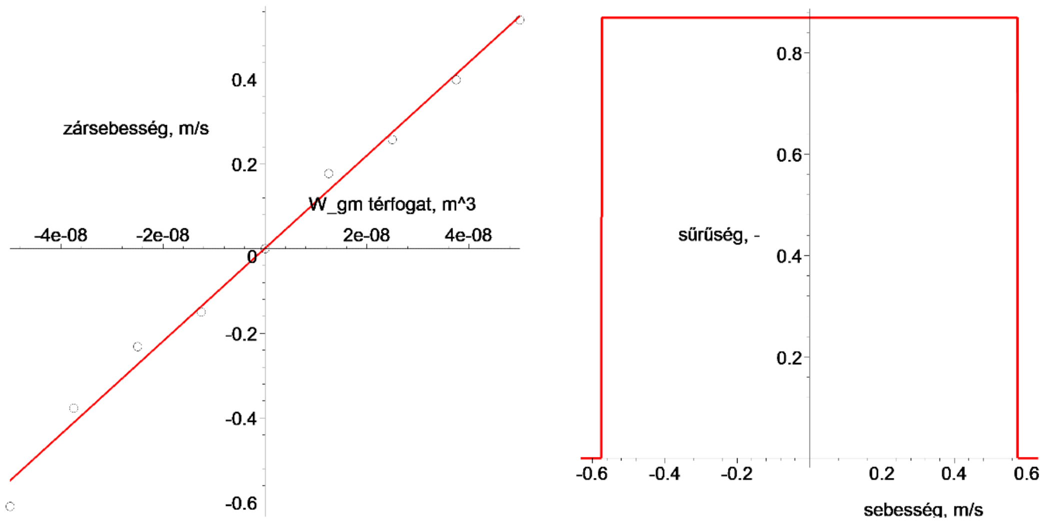
49. ábra: A súrlódóéról fegyverből származó bizonytalanságának regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a zársebesség dimenziójában, csökkentett energia-szintű üzemállapotban.



50. ábra: A súrlódóéról lövedékből származó bizonytalanságának regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a zársebesség dimenziójában, csökkentett energia-szintű üzemállapotban.

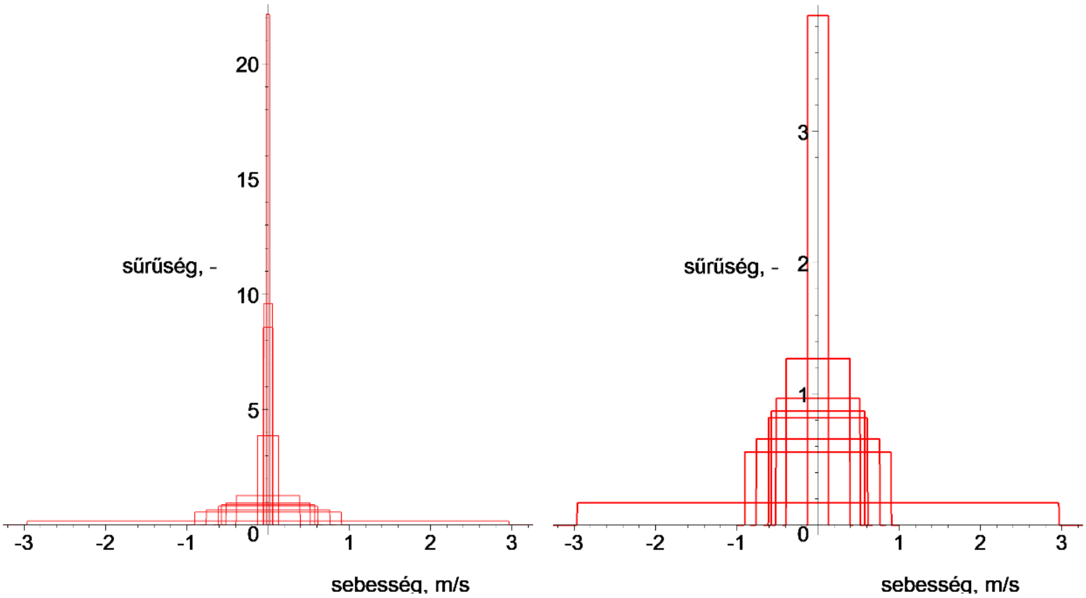


51. ábra: A gázdugattyú és a gázhenger közötti hézag bizonytalanságának regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a maximális dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.



52. ábra: A gázhenger kezdeti térfogat bizonytalanságának regressziós átviteli függvénye és sűrűségfüggvénye a zársebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.

Látható, hogy a súrlódási erő és a csőfurat átmérőjének a bizonytalansága az összegzett hatás szempontjából elenyésző. Ezek az 53. ábra bal oldali grafikonjának tűszerű diagramjai. Az igen gyenge hatású összetevőket (FSCSO, FSLOV, DCSO) elhanyagolva a nyolc darab sűrűségfüggvény az 53. ábra jobb oldali grafikonján látható.



53. ábra: A bizonytalansággal rendelkező valamennyi paraméter (bal oldal) és a releváns paraméterek (jobb oldal) sűrűségfüggvényei a maximális zársebesség dimenziójában, csökkentett energiaszintű üzemállapotban.

3.3.1.2 A bizonytalansági változók és ingadozásaik szimulációs bemenő értékei, valamint a szimuláció eredményei, normál üzemállapotra

Hasonlóan az előzőhöz, az összegzett sűrűségfüggvény meghatározásához most is szükségünk van az ingadozó paraméterek bizonytalansági tartományain belül felvett, egyedi értékekkel meghatározott szimulációs futtatások eredményeire. A bizonytalansággal terhelt gázmotorparaméterek változnak, a lőszerparaméterek nem, hiszen a lőszer ugyan az, mindkét üzemállapot esetén. A felvett tartományokat a 10. táblázatban foglaltam össze.

paraméterek és bizonytalansági tartományaik, normál üzemállapotban				
megnevezés	**jelölés**	**várható érték**	**ingadozási tartomány**	**mérték-egység**
lőportöltet-tömeg	Ω	1,000	$\pm 0{,}010$	g
lőportárcsa vastagsága	$c2$	0,100	$\pm 0{,}002$	mm
porozitási faktor	u_{fakt}	1,70	$\pm 0{,}02$	$-$
hüvely belső térfogata	W_0	1,20	$\pm 0{,}05$	cm^3

paraméterek és bizonytalansági tartományaik, normál üzemállapotban				
megnevezés	**jelölés**	**várható érték**	**ingadozási tartomány**	**mérték-egység**
besajtolódási nyomás	p_{bes}	150	± 40	bar
lövedéktömeg	$m_{löv}$	10,00	$\pm 0{,}10$	g
fegyvercsőfurat átmérő	$d_{cső}$	12,700	$\pm 0{,}015$	mm
súrlódóerő (csőfurat)[32]	F_s	100	± 15	N
súrlódóerő (lövedék)	F_s	100	± 30	N
a gázdugattyú illesztési hézagja	Δ_{gd}	0,050	$\pm 0{,}020$	mm
a gázhenger belső térfogata	W_{gm}	0,50	$\pm 0{,}05$	cm^3

10. táblázat: A bizonytalansági változók és ingadozási tartományaik, normál üzemállapotban.

A szimulációs számításokat a 7. táblázat adataival futtattam, a bizonytalansági változók ingadozási tartományon belül felvett 9 darab ekvidisztáns értékei mellett. A futtatás eredményeit a tartomány határaira a 11. táblázat tartalmazza.

paraméterek határértékei mellett kialakuló torkolati lövedéksebességek normál üzemállapotban, $\frac{m}{s}$				
megnevezés	**jelölés**	**v_0 az alsó határértéken**	**v_0 a felső határértéken**	**megjegyzés**
lőportöltet-tömeg	OMEGA	566,51	575,61	
lőportárcsa vastagsága	C2	576,36	565,69	

---

[32] Súrlódóerő természetesen egy van a lövedék és a csőfal között, de bizonytalansága két részből adódik. Azt reprezentálják a zárójelbe írt kiegészítések, hogy az adott ingadozás melyik tétel bizonytalanságából származik.

paraméterek határértékei mellett kialakuló torkolati lövedéksebességek normál üzemállapotban, $\frac{m}{s}$				
megnevezés	**jelölés**	**v_0 az alsó határértéken**	**v_0 a felső határértéken**	**megjegyzés**
porozitási faktor	UFAKT	567,89	574,12	
hüvely belső térfogata	W0	576,70	565,94	
besajtolódási nyomás	PBES	568,06	574,05	
lövedéktömeg	MLOV	572,32	570,02	gyenge paraméter
fegyvercsőfurat átmérő	DCSO	571,68	570,72	gyenge paraméter
súrlódóerő (csőfurat)	FSCSO	571,61	570,67	
súrlódóerő (lövedék)	FSLOV	572,08	570,19	
a gázdugattyú illesztési hézagja	ΔGD	571,33	570,96	gyenge paraméter
a gázhenger belső térfogata	WGM	571,20	571,09	gyenge paraméter, hatása elhanyagolható

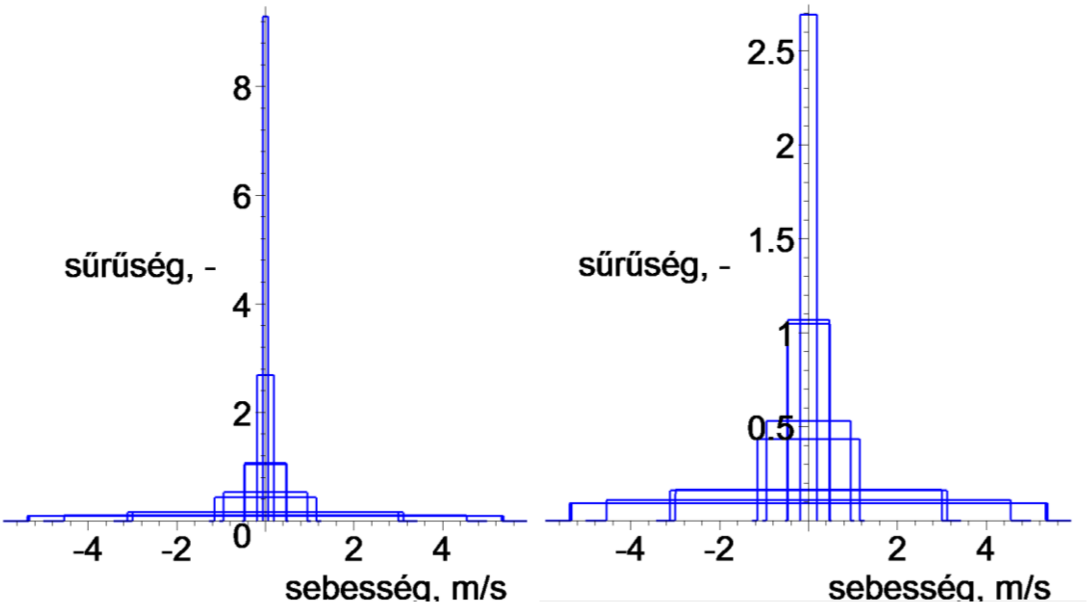
11. táblázat: A paraméterek határértékei mellett kialakuló torkolati lövedéksebességek, normál üzemállapotban.

A zársebesség maximumára lefuttatott szimulációs számítások eredményeit a 12. táblázat foglalja össze.

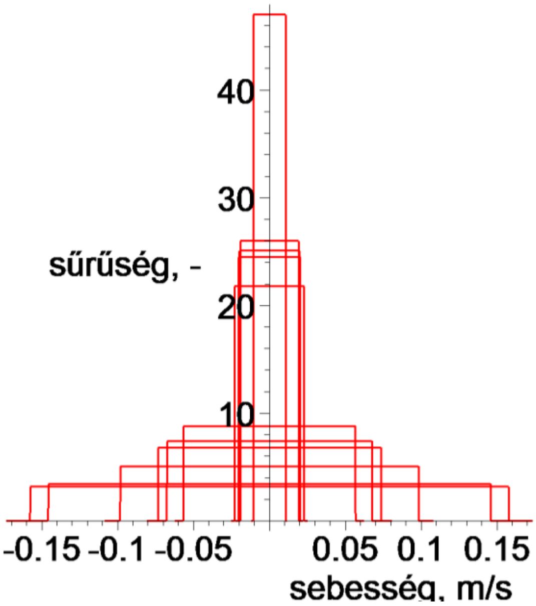
paraméterek határértékei mellett kialakuló maximális zársebességek, normál üzemállapotban, $\frac{m}{s}$				
megnevezés	**jelölés**	$v_{zár\_max}$ **az alsó határértéken**	$v_{zár\_max}$ **a felső határértéken**	**megjegyzés**
lőportöltet-tömeg	OMEGA	9,27	9,31	gyenge paraméter
lőportárcsa vastagsága	C2	9,16	9,46	erős paraméter
porozitási faktor	UFAKT	9,39	9,19	
hüvely belső térfogata	W0	9,13	9,44	erős paraméter
besajtolódási nyomás	PBES	9,38	9,23	
lövedéktömeg	MLOV	9,32	9,28	gyenge paraméter
fegyvercsőfurat átmérő	DCSO	9,31	9,30	gyenge paraméter
súrlódóerő (csőfurat)	FSCSO	9,28	9,30	gyenge paraméter
súrlódóerő (lövedék)	FSLOV	9,26	9,31	gyenge paraméter
a gázdugattyú illesztési hézagja	ΔGD	9,35	9,22	domináns paraméter
a gázhenger belső térfogata	WGM	9,35	9,23	

12. táblázat: A paraméterek határértékei mellett kialakuló zársebesség maximumok, normál üzemállapotban

Az egyes valószínűségi változók torkolati lövedéksebességre és maximális zársebességre gyakorolt hatásainak, valamint a lövedéksebesség dimenziójába transzformált sűrűségfüggvényeinek részletes ismertetésétől eltekintek. Az egyes paraméterek egyedi sűrűségfüggvényeit egy-egy diagramban az 54. és az 55. ábra mutatja, a torkolati sebesség és a zársebesség dimenziójában.



54. ábra: A bizonytalansággal rendelkező valamennyi paraméter (bal oldal) és a releváns paraméterek (jobb oldal) sűrűségfüggvényei a lövedéksebesség dimenziójában, normál üzemállapotban.



55. ábra: A bizonytalansággal rendelkező valamennyi paraméter sűrűségfüggvénye a maximális zársebesség dimenziójában, normál üzemállapotban.

3.3.2 A TORKOLATI LÖVEDÉKSEBESSÉG VALÓSZÍNŰSÉGSŰRŰSÉG-FÜGGVÉNYE – CSÖKKENTETT ÜZEMÁLLAPOT

Az összegzett ingadozást leíró sűrűségfüggvényt a releváns valószínűségi változók egyedi eloszlásainak konvolválásával határoztam meg.

A konvolúciós formula általános esetben:

$$h(t) = (g * f)(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau) \cdot f(t-\tau)\, d\tau, \qquad 3\text{–}1$$

ahol:

$g(t)$ az A valószínűségi változó egyedi valószínűségsűrűség-függvénye, amely $g(t)$ függvény a konvolúció súlyfüggvénye,

$f(t)$ a B valószínűségi változó egyedi valószínűségsűrűség-függvénye, amely $f(t)$ függvény a konvolúció adatfüggvénye,

$f(t-\tau)$ a B valószínűségi változó τ-val eltolt egyedi valószínűségsűrűség-függvénye, amely $f(t-\tau)$ függvény a konvolúció eltolt adatfüggvénye,

$h(t)$ az A és a B valószínűségi változó összegzett valószínűségsűrűség-függvénye, amely $h(t)$ függvény a konvolvált valószínűségsűrűség-függvény.

Véges ingadozású A valószínűségi változó esetén a konvolúciós integrál:

$$h(t) = (g * f)(t) = \int_{A_{min}}^{A_{max}} g(\tau) \cdot f(t-\tau)\, d\tau. \qquad 3\text{–}2$$

Igaz továbbá, hogy:

$$h(t) = (g * f)(t) = (f * g)(t), \qquad 3\text{–}3$$

azaz a konvolúciók sorrendje tetszőleges.

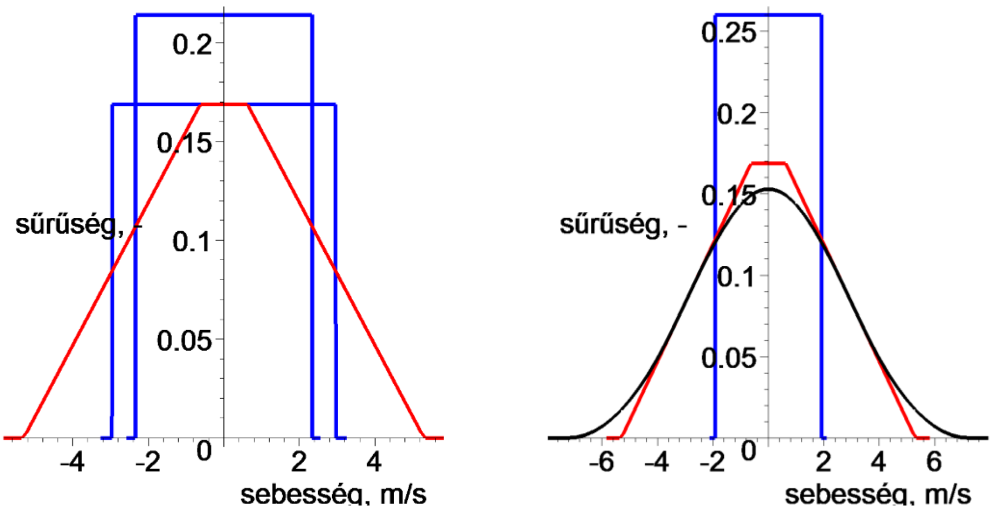
Amennyiben az A és a B valószínűségi változó mediánja azonos és mindkét változó véges ingadozású, akkor igaz, hogy a C összeg valószínűségi változó ingadozási tartománya:

$$C_{min} = A_{min} + B_{min}, \qquad 3\text{–}4$$

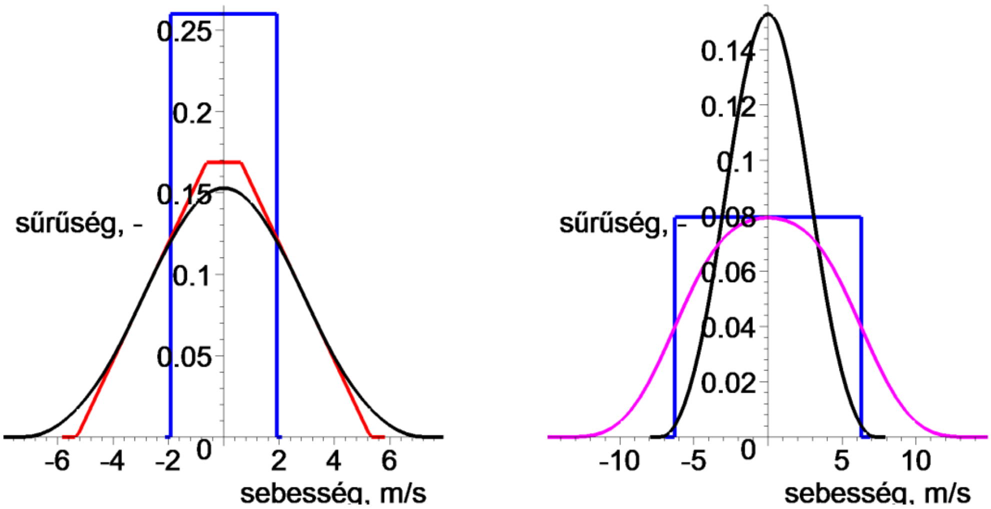
$$C_{max} = A_{max} + B_{max}. \qquad 3\text{–}5$$

Ebből esetünkben már konvolúciós számítások nélkül is meg tudjuk mondani, az összeg ingadozásának a tartományát, a konvolúciós számításokkal pedig az összegzett valószínűségsűrűség-függvény pontos egyenletét.

Az 56. és az 57. ábrák a betöltött lőportömeg (OMEGA), a lőporvastagság (C2), a porozitási faktor (UFAKT) és a hüvelytérfogat (W0) valószínűségi változók konvolúcióját szemléltetik.



56. ábra: Az OMEGA_C2 (balra, piros) és az OMEGA_C2_UFAKT (jobbra, fekete) sűrűségfüggvénye és konstruktorai a torkolati lövedéksebesség dimenziójában (LS/SS rendszer, csökkentett üzemállapot).



57. ábra: Az OMEGA_C2_UFAKT (balra, fekete) és az OMEGA_C2_UFAKT_W0 (jobbra, bíbor) sűrűségfüggvénye és konstruktorai a lövedéksebesség dimenziójában (LS/SS rendszer, csökkentett üzemállapot).

Az OMEGA_C2_UFAKT_W0_ΔGD és a PBES_FSCS_FSLOV_WGM konvolúciók elvégzése után ezt a két összegzett valószínűségsűrűség-függvényt kellett konvolválni, az összeg valószínűségsűrűség-függvény előállításához. A számítások gyorsítása érdekében[33] a két függvényt egy alábbi alakú matematikai[34] célfüggvénnyel, $\mathrm{N} =$ 301[35] kiszámított sűrűségérték mellett regresszáltam:

$$f(t) = \left(\frac{y_{\frac{N+1}{2}}}{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{x_N} t\right) + \frac{y_{\frac{N+1}{2}}}{2}\right) \cdot \sum_{i=0}^{n} a_i t_i, \tag{3–6}$$

ahol:

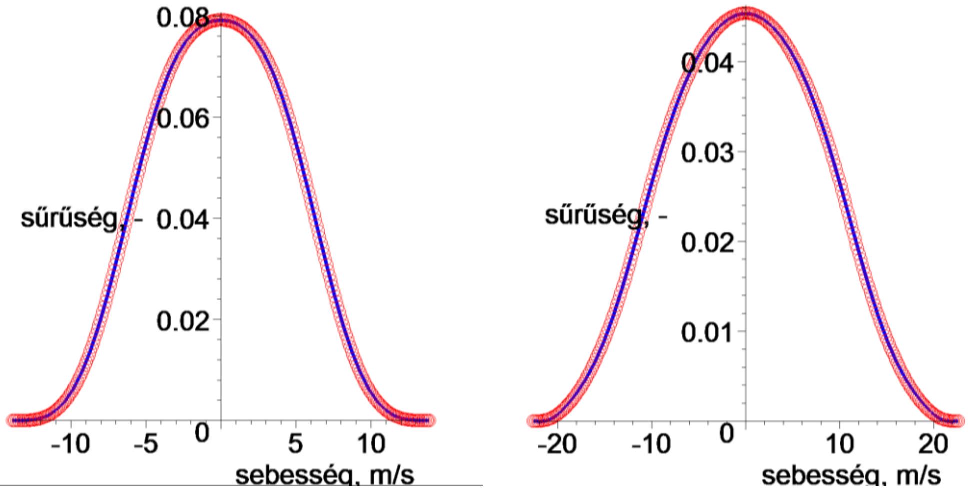
$y_{\frac{N+1}{2}}$ az ordináta érték a mediánnál,

x_N az ekvidisztáns t értékek utolsó eleme, az ingadozási tartomány felső határa,

n a regressziós függvény polinomjának a fokszáma[36],

a_i a regressziós függvény polinomjának i-ik együtthatója.

A súly és az adatfüggvény regresszióit, ill. konstruktorait az 58. ábra mutatja.



58. ábra: A súly (OMEGA_C2_UFAKT_W0_ΔGD, balra) és az adatfüggvény (PBES_FSCS_FSLOV_WGM, jobbra) regressziós közelítése, a regresszált értékpontokkal a lövedéksebesség dimenziójában (LS/SS rendszer, csökkentett üzemállapot).

---

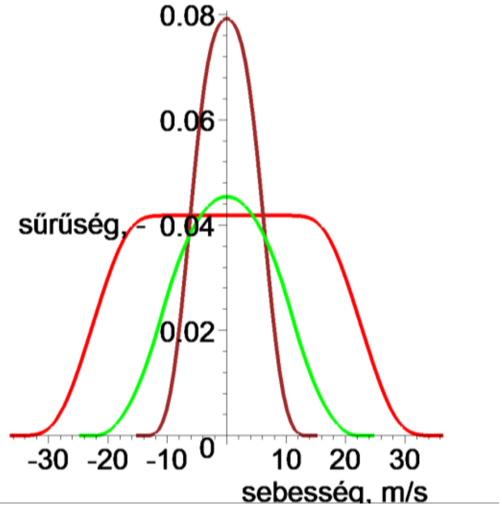
[33] Az OMEGA_C2_UFAKT_W0_ΔGD és a PBES_FSCS_FSLOV_WGM függvények konvolúciója több órás futási időt követelt.

[34] A kettős modellállítás elvének megfelelően leválva most már a fizikai modellről, így annak fizikai tartalmáról is.

[35] A páratlan számú pontok biztosították a függvényértékek szimmetriáját.

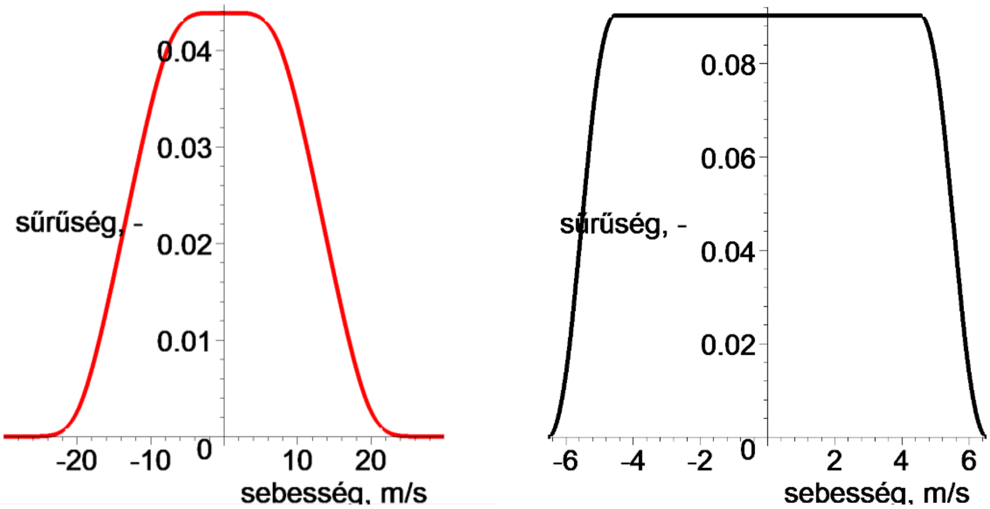
[36] A regresszálandó függvények egyedi sajátosságai szerint a legjobb közelítést adó függvények polinomjainak fokszáma 8 vagy 10 volt, a páratlan fokszámokat szimmetria okokból kizárva.

Az összeg valószínűségsűrűség-függvényt e két regressziós függvény összegzésével nyertem, diagramját az 59. ábra szemlélteti.



59. ábra: Az összeg valószínűségsűrűség (piros), az OMEGA_C2_UFAKT_W0_ΔGD (barna) és a PBES_FSCS_FSLOV_WGM (zöld) regressziós közelítésével a lövedéksebesség dimenziójában (LS/SS rendszer, csökkentett üzemállapot).

Érdemes külön bontani a fegyverből és a lőszerből származó bizonytalanságok összegzett hatását, mert úgy a lőszerre, mint a fegyverre külön-külön kell megállapításokat tenni, tervezési, gyártástechnológiai és konstrukciós szempontból. A 60. ábra bal oldali diagramja a lőszerből (piros), a jobb oldali a fegyverből származó (fekete) összegzett ingadozást illusztrálja.

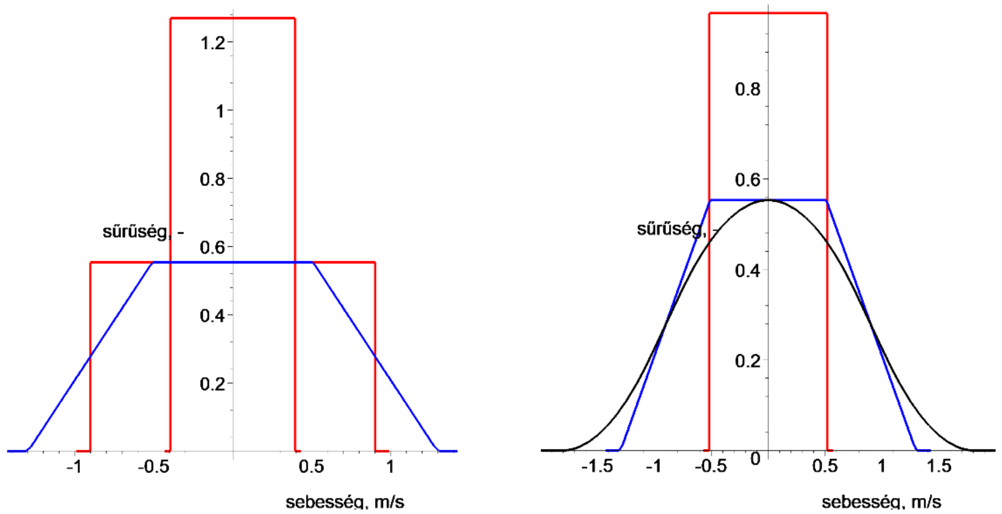


60. ábra: A lőszerből (balra, piros) és a fegyverből (jobbra, fekete) származó hatások összegzett sűrűségfüggvényei a lövedéksebesség dimenziójában (LS/SS rendszer, csökkentett üzemállapot).

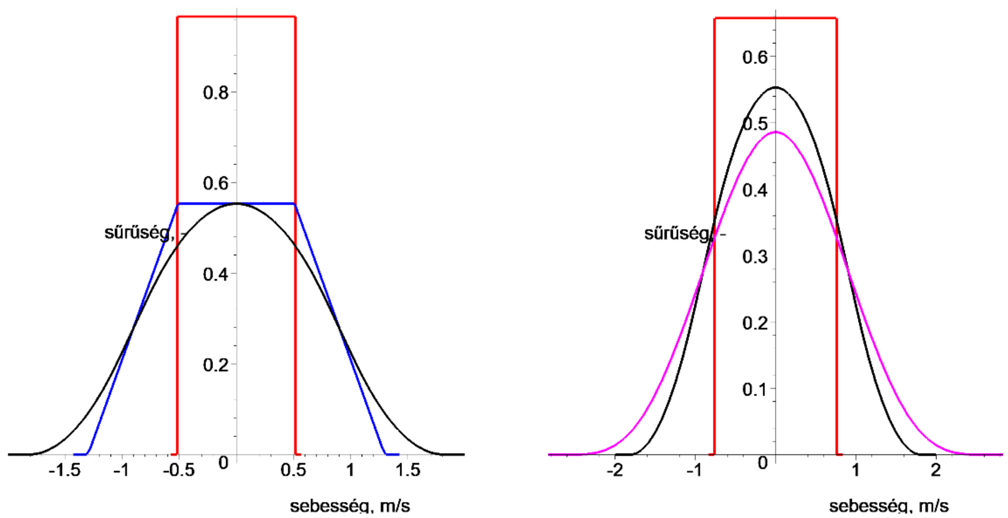
3.3.3 A MAXIMÁLIS ZÁRSEBESSÉG VALÓSZÍNŰSÉGSŰRŰSÉG-FÜGGVÉNYE – CSÖKKENTETT ÜZEMÁLLAPOT

Az összegzett ingadozást leíró sűrűségfüggvényt itt is a releváns valószínűségi változók egyedi eloszlásainak konvolválásával határoztam meg.

A 61. és a 62. ábrák a betöltött lőportömeg (OMEGA), a lőporvastagság (C2), a porozitási faktor (UFAKT) és a hüvelytérfogat (W0) valószínűségi változók konvolúcióját szemléltetik.



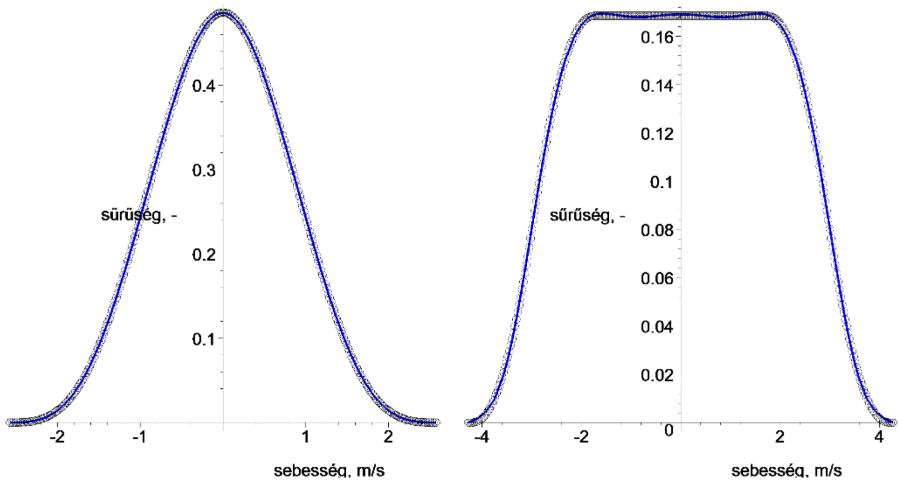
61. ábra: Az OMEGA_C2 (balra, kék) és az OMEGA_C2_UFAKT (jobbra, fekete) sűrűségfüggvénye és konstruktorai a zársebesség dimenziójában (LS/SS rendszer, csökkentett üzemállapot).



62. ábra: Az OMEGA_C2_UFAKT (balra, fekete) és az OMEGA_C2_UFAKT_W0 (jobbra, lila) sűrűségfüggvénye és konstruktorai a zársebesség dimenziójában (LS/SS rendszer, csökkentett üzemállapot).

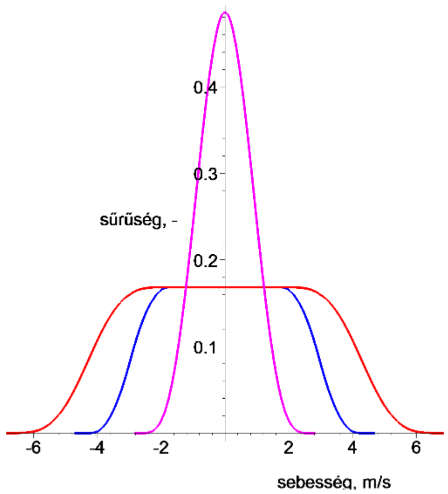
Az OMEGA_C2_UFAKT_W0 és a PBES_MLOV_ΔGD_WGM konvolúciók elvégzése után ezt a két összegzett valószínűségsűrűség-függvényt kellett konvolválni, az összeg valószínűségsűrűség-függvény előállításához. A számítások begyorsítása érdekében itt regressziót alkalmaztam, úgy a súly-, mint az adatfüggvényre. A függvényeket az előzőben ismertetett célfüggvénnyel közelítettem.

A súly- és az adatfüggvény regressziós függvényét és konstruktorait a 63. ábra mutatja.



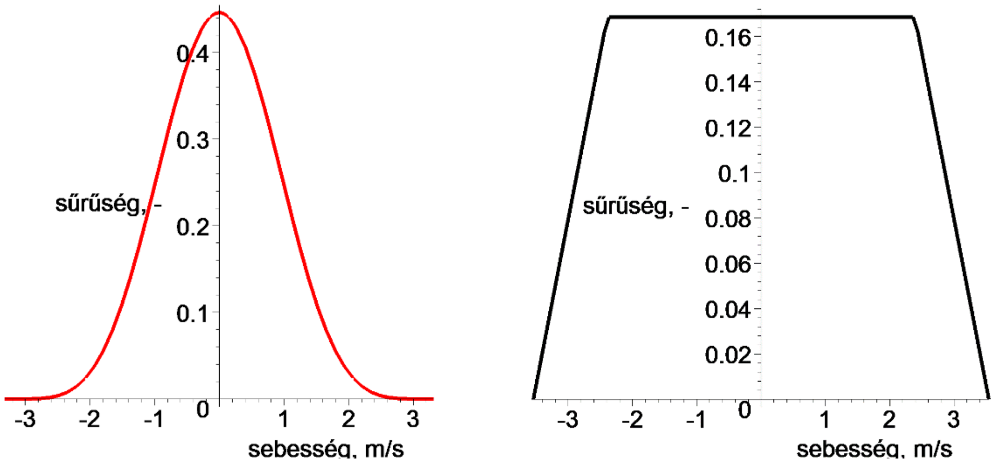
63. ábra: A súly (OMEGA_C2_UFAKT_W0, balra) és az adatfüggvény (PBES_MLOV_ΔGD_WGM, jobbra) regressziós közelítése, az értékpontokkal a zársebesség dimenziójában (LS/SS rendszer, csökkentett üzemállapot).

Az összeg valószínűségsűrűség-függvényt e két regressziós függvény összegzésével nyertem, diagramját a 64. ábra szemlélteti.



64. ábra: Az összeg valószínűségsűrűség (barna), az OMEGA_C2_UFAKT_W0 (piros) és a PBES_MLOV_ΔGD_WGM (zöld) regressziós közelítésével a zársebesség dimenziójában (LS/SS rendszer, csökkentett üzemállapot).

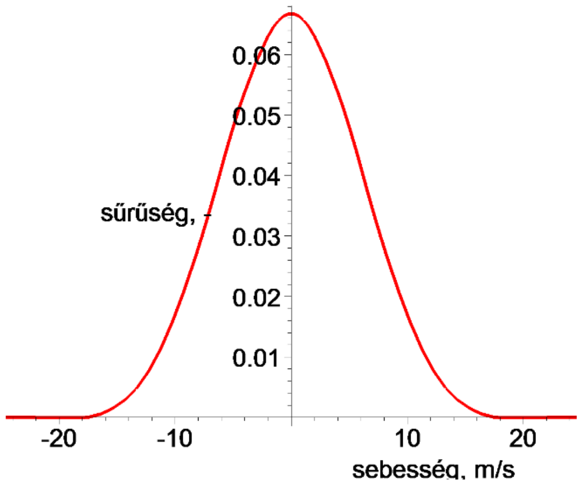
Most is érdemes külön bontani a fegyverből és a lőszerből származó bizonytalanságok összegzett hatását, az előzők alapján. A 65. ábra bal oldali diagramja a lőszerből (piros), a jobb oldali a fegyverből származó (fekete) összegzett ingadozást mutatja.



65. ábra: A lőszerből (balra, piros) és a fegyverből (jobbra, fekete) származó hatások összegzett sűrűségfüggvényei a zársebesség dimenziójában (LS/SS rendszer, csökkentett üzemállapot).

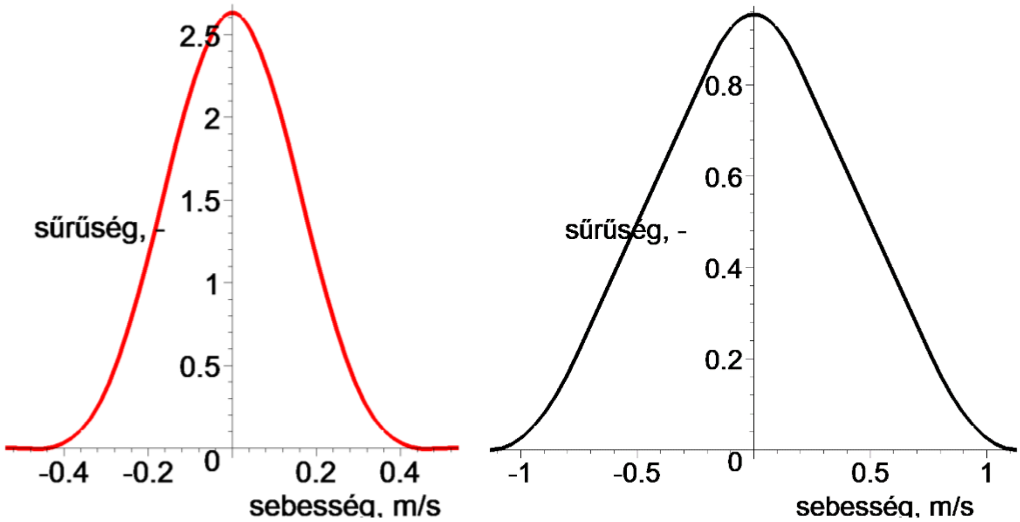
3.3.4 A TORKOLATI LÖVEDÉKSEBESSÉG VALÓSZÍNŰSÉGSŰRŰSÉG-FÜGGVÉNYE – NORMÁL ÜZEMÁLLAPOT

A futtatási eredményekből nyert összegzett valószínűségsűrűség-függvény normál üzemállapot esetén némiképp eltérnek a csökkentett energiaszintű üzemállapotban jelentkezőtől. A diagramokat a következő ábrákon teszem közzé.



66. ábra: Az összeg valószínűségsűrűség, valamennyi valószínűségi változó figyelembe vételével, a lövedéksebesség dimenziójában (LS/SS rendszer, normál üzemállapot).

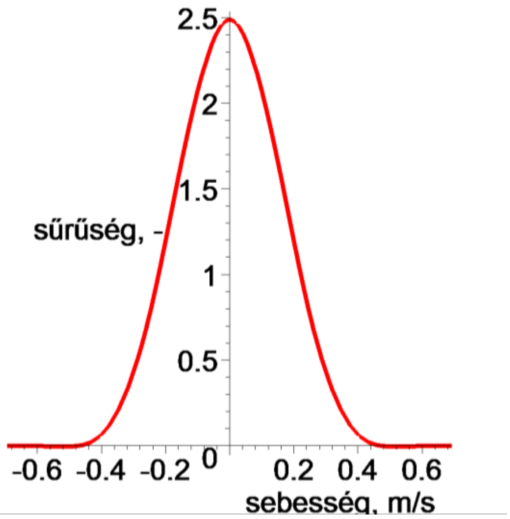
Most is érdemes külön bontani a fegyverből és a lőszerből származó bizonytalanságok összegzett hatását. A 67. ábra bal oldali diagramja a lőszerből (piros), a jobb oldali a fegyverből származó (fekete) összegzett ingadozást mutatja.



67. ábra: A lőszerből (balra, piros) és a fegyverből (jobbra, fekete) származó hatások összegzett sűrűségfüggvényei a lövedéksebesség dimenziójában (LS/SS rendszer, normál üzemállapot).

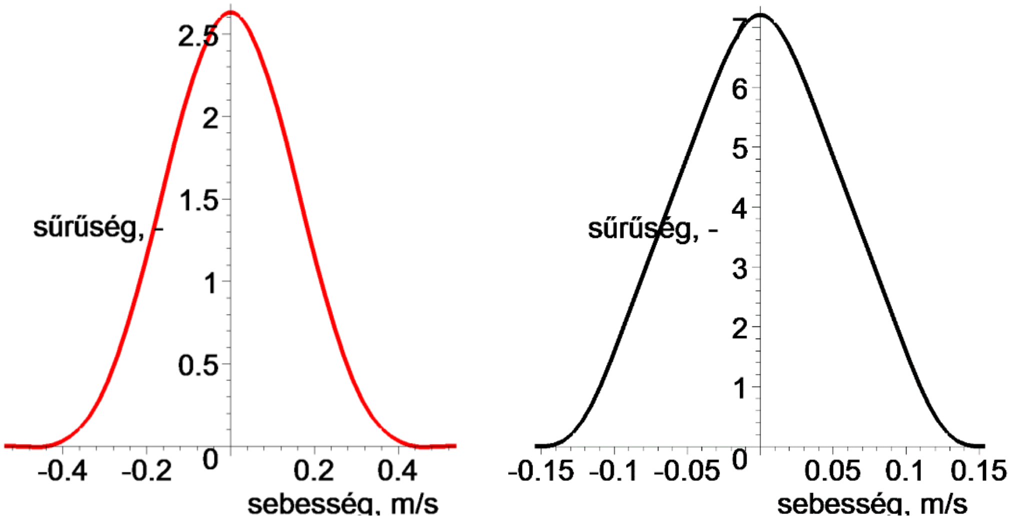
3.3.5 A MAXIMÁLIS ZÁRSEBESSÉG VALÓSZÍNŰSÉGSŰRŰSÉG-FÜGGVÉNYE – NORMÁL ÜZEMÁLLAPOT

Az összegzett ingadozást leíró sűrűségfüggvényt most valamennyi valószínűségi változó egyedi eloszlásának konvolválásával határoztam meg, azok közel azonos hatása miatt. Az eredményeket a következő ábrák illusztrálják.



68. ábra: Az összeg valószínűségsűrűség normál üzemállapotban, a zársebesség dimenziójában (LS/SS rendszer, normál üzemállapot).

A fegyverből és a lőszerből származó bizonytalanságok összegzett hatását itt is külön kell kezelni. A 69. ábra bal oldali diagramja a lőszerből (piros), a jobb oldali a fegyverből származó (fekete) összegzett ingadozást mutatja.



69. ábra: A lőszerből (balra, piros) és a fegyverből (jobbra, fekete) származó hatások összegzett sűrűségfüggvényei a zársebesség dimenziójában (LS/SS rendszer, normál üzemállapot).

3.4 KÖVETKEZTETÉSEK, ELVÉGZETT FELADATOK

A kapott ingadozási tartományok és az összegzett hatás vizsgálatából számos, igen fontos következtetés levonható. A csökkentett energiaszintű üzemállapotot meghatározó paramétereket konstrukciós és gyártástechnológiai szempontok alapján értékeltem, az összegzett hatás számunkra kedvező irányba történő alakítása szerint.

3.4.1 KÖVETKEZTETÉSEK A CSÖKKENTETT ENERGIASZINTŰ TORKOLATI LÖVEDÉKSEBESSÉGRE, LS/SS RENDSZERŰ KONSTRUKCIÓ ESETÉN

1 Látható (59. ábra), hogy a lőszerből és a fegyverből származó bizonytalansági összetevők száma bár nagy (11 db), de az összegzett sűrűség ennek ellenére sem követi a normál eloszlást. A medián környékén kialakuló plató egy a többi változóénál lényegesen erősebb hatású bizonytalansági paraméterre utal. Ez a paraméter ennél a konstrukciónál a lövedéksúrlódás (8. táblázat). Hatása rendkívül fontos, ui. a súrlódás segít visszalassítani a lövedéket a fegyvercsőben, de bizonytalanságával a elérhető legkisebb lövedéksebesség minimumát erőteljesen növeli.

2 A lövedéksúrlódás bizonytalansága egyrészt a lőszerből, másrészt a fegyverből származó összegzett bizonytalanság, amely adott fegyver esetében azonban csak a lőszerből származik. Ekkor szóródása kisebb, de hatása ekkor is meghatározza az összeg sűrűségfüggvényt (60. ábra bal oldali grafikonja), amely továbbra is csak erős megszorításokkal követi a Gauss-eloszlás törvényszerűségeit.

3 Látszólag meglepő módon a csökkentett energiaszintű üzemállapotú LS/SS rendszerű fegyverből kilőtt lövedék torkolati sebessége alig függ a lövedék tömegétől (8. táblázat). Gyengén függ továbbá, a fegyver paramétereitől, kivéve a csősúrlódás fegyvercsőből származó komponensét (8. táblázat és a 60. ábra jobb oldali grafikonja).

4 A torkolati lövedéksebesség lőszerből származó ingadozására – a lövedéksúrlódást és a lövedéktömeget nem ide számítva – a lőszer paraméterek közel azonosan hatnak Ezért az összegzett hatás érdemi csökkentését csak valamennyi paraméter szórásának csökkentésével lehet elérni. Ez a feladathoz optimalizált lőpor-lőszerelem rendszert igényel, a szokásostól eltérő követelményrendszer

felállítása mellett.

5 A lőpor homogenitásának biztosítása kiemelt jelentőséggel bír. A lőpor adagolása során kerülni kell a rezgő adagolók használatát.

6 A lőportöltet tömegének bizonytalansága csak átlagos hatású paraméter, ezért adagoláskor elégséges térfogat szerint kimérni a betöltendő lőpormennyiséget.

7 Az elérhető legkisebb lövedéksebesség mediánja az 59. ábra szerinti összeg sűrűségfüggvény értelmezési intervalluma bal oldali határának abszolút értéke. Az összegzett sűrűségfüggvényt iterációs lépések sorozatán keresztül állítunk elő, az általunk – nulladik közelítésként értelmezhető – előzetesen felvett mediánértékből. Ez alá az érték alá nem állítható be a lövedék torkolati sebességének átlagértéke, a lövedék csőfuratba való beszorulásának valós esélye nélkül.

3.4.2 KÖVETKEZTETÉSEK A CSÖKKENTETT ENERGIASZINTŰ MAXIMÁLIS ZÁRSEBESSÉGRE, LS/SS RENDSZERŰ KONSTRUKCIÓ ESETÉN

1 Hasonlóan, mint a torkolati lövedéksebesség esetén (64. ábra), a lőszerből és a fegyverből származó bizonytalansági összetevők száma nagy, de az összegzett sűrűség nem követi a normál eloszlást. A medián környékén kialakuló plató egy a többi változóénál lényegesen erősebb hatású bizonytalansági paraméterre utal. Ez a paraméter ennél a konstrukciónál a gázhenger és a gázdugattyú közötti hézag (9. táblázat). Hatása döntő a zársebesség szóródásában. Értékének meghatározása optimalizálási feladat, gyártási tűrésének minimalizálása kiemelt fontossággal bír.

2 A lőszerből és a fegyverből származó bizonytalansági ingadozások lényegében azonosak, de míg a lőszerből sok, közel azonos hatású paraméter állítja elő az összegzett hatást, addig a fegyverből gyakorlatilag kettő, amelyek nem azonos súllyal bírnak. Ezért bár a lőszerből származó sűrűségfüggvény jól követi a normál eloszlást, és azzal helyettesíthető lenne, addig a fegyverből adódó nem, így konvolvált összegük sem (65. ábra).

3 Meg kell vizsgálni annak lehetőségét, hogy a konstans áramlási keresztmetszetet biztosító, statikus hézaggal rendelkező gázdugattyún ki lehet-e alakítani olyan, a hátramozgás folyamán változó áramkeresztmetszetű geometriát, amely bizonytalansági hatása kisebb, mint a statikus értékkel rendelkezőnek.

4 A gázdugattyú hézag bizonytalanságának csökkentése érdekében meg kell vizsgálni a válogató párosítás lehetőségét. Meg kell vizsgálni továbbá, hogy a hézag mérete lehet-e beállítási paraméter egy adott fegyverpéldány esetén, ezzel eliminálva, de legalábbis kontrollálva hatását.

5 A csősúrlódási bizonytalanságok – bár a torkolati sebességek kialakulásánál dominánsak voltak –, a zársebesség szóródását lényegében nem befolyásolják.

6 Kisebb hatású, de a fegyver szempontjából fontos bizonytalansági összetevő a gázhenger kezdeti térfogata. Hatásának ismerete azért fontos, mert a fegyver megfelelő működésének beállító paramétere lehet. Fontos azonban megjegyeznem, hogy ha ez a paraméter egyedi illesztési érték, akkor már semmiképpen nem tekinthető bizonytalansági változónak, hiszen értékének kialakulása nem véletlenszerű események láncolatából, hanem célirányos beavatkozás eredményeképpen alakul ki.

7 A maximális zársebesség szórása a mediánértékhez képest nagy, amely egy nagyságrenddel nagyobb, mint a normál üzemállapot során kialakuló (vö. 65. és 67. ábra), ezt figyelembe kell venni tervezésnél. Érdemes a csökkentett energiaszintű üzemállapothoz tartozó elméleti zársebesség értéket magasabbra választani, a megbízhatóbb fegyverműködés érdekében. Figyelembe kell azonban venni, hogy ez csökkentett energiaszintű üzemállapotban magasabb elméleti tűzütemet fog eredményezni.

3.4.3 Az 3. fejezet elvégzett feladatai

Azonosítottam torkolati lövedéksebességet és a maximális zársebességet befolyásoló lőszerből és fegyverből származó valószínűségi változókat.

Meghatároztam a feltárt változók egyedi hatásait úgy a lövedéksebesség, mint a zársebesség dimenziójában.

Módszert mutattam a valószínűségi változók összegzett hatásainak (az összeg valószínűségsűrűség-függvényeknek) kiszámítására, a torkolati lövedéksebesség, valamint a maximális zársebesség vonatkozásában.

Modellszámításokkal meghatároztam adott mediánokkal és ingadozási tartományokkal jellemezhető LS/SS rendszerű fegyver torkolati lövedéksebességre és maximális zársebességre vonatkozó összeg valószínűségsűrűség-függvényeit.

Összevetettem és elemeztem a fellépő valószínűségi változók hatásait a normál és a csökkentett energiaszintű üzemállapotok esetén.

Bebizonyítottam, hogy az összeg valószínűségsűrűség-függvényeknek nem határozhatók meg műszakilag korrekt módon a centrális határeloszlás tétel alkalmazásával.

Bebizonyítottam, hogy adott paramétersereg mellett létezik egy olyan torkolati lövedéksebesség, amely alatt a lövedék csőfuratba szorulásának valószínűsége nem nulla.

Igazoltam 2. tézisem, miszerint: *„Létezik és kiszámítható egy kritikus lövedékenergia, amely a csökkentett energiaszintű üzemmódban a fegyverből kilőtt lövedék legkisebb energiája, ami alá a lövedék energiája nem csökkenthető az üzembiztonság jelentős romlása nélkül.”*

4 ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK

Összegezve az elért eredményeimet kijelenthető, hogy a kettős működésre képes lőfegyverek megvalósításának elvi akadálya nincs. A kettős működés többféle alapelven működő automatika rendszer átalakításával, újra gondolásával is megvalósítható, de leginkább a feladat megvalósítása a gázmotoros rendszerek egy új válfajának kifejlesztésével perspektivikus.

A kettős működésű fegyverek a közelharc eszközei, így nagy kaliberű pisztolylőszert tüzelő fegyverek fejlesztése ésszerű. A megoldás keresése távolharc alakú lövedéket célba juttató fegyverek esetében értelmetlen, kettős működésű puska, karabély kifejlesztése nem indokolható. Szóba jöhető műszaki megoldások a kettős működésű pisztoly és géppisztoly, de azokból is csak a nagy kaliberű – legalább 12 mm űrméretű – lőszereket tüzelő változatok.

A kettős működésű konstrukciók viszonylag bonyolult, sok részegységből öszszeépülő gépek. A lövedék kellő mértékű lassítását (a jelenlegi lőporok alkalmazása esetén), csak a fegyvercső hosszával lehet hatékonyan csökkenteni. A geometriai méretek és a komplexitás miatt, az ilyen fegyverek szükségszerűen géppisztolyok, de hagyományos gépkarabélyra emlékeztető automatika rendszerrel. A kettős működésre képes fegyverek tehát géppisztoly-gépkarabély hibridek kell legyenek, egykezes felhasználást biztosító pisztolyok ilyen irányú fejlődési ága véleményem szerint kizárható.

Disszertációm során szándékosan kerültem a „nem halálos” kifejezést, annak meghatározatlansága miatt. Fontosnak tartom a kinetikus eszközökre kidolgozni a kritérium pontos definícióját, amely önálló multidiszciplináris kutatási feladat. A kutatást a megfelelő tudományterületek képviselőivel mihamarabb meg kell kezdeni, feltéve, ha a kettős működésű fegyvereket valóban ki akarjuk fejleszteni. Fontos még leszögeznem, hogy a kutatás eredménye nem egy túlárazott, semmitmondó tanulmány kell legyen, hanem egy, a nemzetközi térben is helyét megálló nemzeti szabvány. Ennek a szabványnak tartalmaznia kell a fizikai és a matematikai modelleket, a metrológiai összefüggéseket és a mérési módszereket. Ennek hiányában a csökkentett energiaszintű üzemállapotra nem mondhatjuk ki, hogy nem halálos üzemállapot, továbbá az ilyen eszközök jogi státusza is minimum kérdéses.

A speciális lövedék és a hozzá tartozó szintén különleges lőpor esetében fejlesztések elindítása szükséges. Létre kell hozni ezen eszközök speciális lőszereit, amelyek új kaliberek megjelenését kell jelentsék. Ez egyben követeli meg a három ipari szereplő K+F együttműködését. Magyarországon valódi K+F tevékenységgel foglalkozó, a lőpor- a lőszer- és a kézifegyvergyártás területén működő hadiipari szereplő nem létezik, és belátható időn belül (25 év) nem is lesz. Mindezek okán a kettős működésű fegyverek fejlesztésében hazai ipari szereplők legfeljebb fegyver oldalról nézve érdekeltek, minden más lehetséges fejlesztési és kutatási feladatot külföldi, az itt nem létező gyártási kapacitással és fejlesztési ismeretekkel rendelkező partner kell végezze. A téma kutatási részébe azonban bevonhatók a hazai műszaki és természettudományos felsőoktatási intézmények tanszékei, kutatói.

A téma eleddig kutatatlan volt, de legalábbis nyílt források nem álltak rendelkezésre. Ez a disszertáció legfeljebb a téma felszínét érintette, de ezzel számos lehetőséget, további kutatási területet mutatva az ezzel behatóbban foglalkozni kívánó érdekelteknek.

5 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK MEGFOGALMAZÁSA

1 **Modelleket állítottam fel** a kettős működésű fegyverek ballisztikai számításaihoz, amely modellek **egyenleteit** hőtani és dinamikai összefüggések tanulmányozásával **megalkottam**, ezzel megalapoztam a kettős működésű fegyverek tervezéséhez szükséges eljárásokat.

2 **Modellszámításokkal igazoltam**, hogy többféle kettős működésű rendszer is megvalósítható. A modellszámítások segítségével a konstruktőröknek alternatívákat kínáltam különböző műszaki megoldások megvalósítására, a legoptimálisabb megoldás kialakítására.

3 **Tanulmányoztam és azonosítottam** a kettős működésű rendszerek bizonytalansági összetevőit. **Meghatároztam** azok egyedi hatásait a torkolati lövedéksebességre és a zársebesség maximumára, segítséget nyújtva a tervezőknek az egyes szerkezeti egységek legmegfelelőbb kialakításának kidolgozásához.

4 Elemzésekre alapozva **megadtam** a kettős működésű rendszerek bizonytalansági összetevőinek egyedi hatásaiból a torkolati lövedéksebességre és a zársebesség maximumára összegzett analitikus valószínűségsűrűség-függvényt. A kidolgozott módszer segítségével a lövedéksebesség és a zársebesség szélsőértékeit egzakt módon számíthatóvá tettem, ezzel a normál eloszlással való közelítés hibájától a számítási eljárásokat mentesítettem.

5 **Igazoltam**, hogy az összegzett valószínűségsűrűség-függvény kiszámítása a centrális határeloszlás tétel alkalmazásával rossz közelítést adó módszer. A centrális határeloszlás tétel alkalmazása esetén az egyedi hatásokból származó bizonytalansági információk elvesznek, így azok visszacsatolása a K+F folyamatra szintén elveszik. Ez az adatvesztés egyben lehetetlenné is teszi a legmegfelelőbb konstrukciós kialakítás megtalálását, amely a fejlesztési folyamat sikertelenségéhez is vezethet.

6 **Bebizonyítottam**, hogy létezik és a fegyver-, illetve a lőszerparaméterek ismeretében kiszámítható az a legkisebb torkolati lövedéksebesség, amely alatt a lövedék beszorulása a fegyvercső furatába nem nulla valószínűség mellett várható. Ez a lövedéksebesség amellett, hogy a fegyver jogi státuszát is

meghatározza, a konstruktőröknek ad fontos támpontot arra nézve, hogy adott megrendelői igények kielégíthetők-e, vagy a követelményrendszernek megfelelő kettős működésű fegyver már elviekben sem építhető.

6 AJÁNLÁSOK

A disszertáció tudományos eredményeit és következtetéseit ajánlom:

- A volt HTI még élő és már nem élő szakembereinek, különös tekintettel dr. Piroska Györgynek és Egerszegi Jánosnak.
- A BME részéről dr. Horváth Mátyás tanszékvezetőnek, de különös tekintettel dr. Laczik Bálint adjunktusnak.
- A hazai, kézi lőfegyvergyártásban érdekelt hadiipari cégek K+F tevékenységgel foglalkozó szakembereinek.
- A műszaki vagy természettudományos felsőoktatás területén dolgozó, a hadiipari K+F tevékenységekben érdekelt oktatóknak, kutatóknak.

7 GYAKORLATI FELHASZNÁLHATÓSÁG

Disszertációm (erősen leegyszerűsítve) a kettős működésű fegyverek megvalósíthatósági tanulmánya. Megalkotott modelljeim és modellegyenleteim alapján egy lehetséges konstrukció legfontosabb ballisztikai és dinamikai számításai elvégezhetők, azaz a fejlesztéssel foglalkozó szakemberek számára közvetlenül alkalmazhatók.

A mellékletekben szereplő programlistákat a fejlesztők az egyedi számítási algoritmusaik megírásához mintaként közvetlenül használni tudják.

8 TOVÁBBI KUTATÁSI JAVASLATOK

A kettős működésű fegyverek területe mindmáig nem kutatott tartomány, ezért bármely része tartalmaz/tartalmazhat tisztázásra váró részfeladatokat.

Álláspontom szerint a legfontosabb kapcsolódó kutatási terület a nem halálos kinetikus eszközökre vonatkozó nemzeti szabvány megalkotása. Az ehhez szükséges összefüggések feltárása, a vizsgálati módszerek kidolgozása és a jogi aspektusok vizsgálata égetően időszerű.

9 JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Paraméterek, konstansok

jelölés	mértékegység	megnevezés
a_1, a_2, a_3	m^2, m, egység	az elégett lőportérfogat-függvény együtthatói egy szemcsére
$A_{héz}$	m^2	a gázdugattyú illesztési hézagjának keresztmetszete
$A_{hüv}$	m^2	a hüvely külső átmérőjével meghatározott keresztmetszet
$A_{hüvely\_belső}$	m^2	a lövedékátmérővel meghatározott hüvelykeresztmetszet,
$A_{cső}$	m^2	a fegyvercső belső keresztmetszete
A_{furat}	m^2	a furat keresztmetszete
A_{pal}	m^2	a lövedék kontakt palástfelülete
$A_{palást\_0}$	m^3	a hüvely kontakt palástfelülete a lövés kezdetén
E_1	J	a lövedék haladó mozgási energiája
E_{10}	J	a kilépő gázok által képviselt kalorikus energia
E_2	J	a lövedék forgási energiája
E_3	J	a fegyver mozgási energiája
E_4	J	a lőporgázok és a lőporszemcsék kinetikus energiája
E_5	J	a lövedék és a csőfal közti súrlódási munka
E_6	J	a besajtolódási munka
E_7	J	a gázmegszökés által elveszett energia
E_8	J	a lövedék előtt lévő levegőoszlop gyorsítására fordított munka

jelölés	mértékegység	megnevezés
E_9	J	a fegyver szerkezeti elemek, a lövedék és a hüvely felmelegedése révén elvesző hőmennyiség
F_Σ	N	a helyretoló rugók eredő előfeszítési ereje
F_r	N	a helyretoló rugó előfeszítési ereje
F_{r_Σ}	N	a helyretolórugó és a gázdugattyú rugójának a 60. tartomány kezdetén vett előfeszítési erejének összegzett értéke
F_{r_gd}	N	a gázdugattyú rugójának előfeszítési ereje
F_s	N	a csőfurat és a lövedék közötti súrlódóerő
F_{s_Σ}	N	a zár és a gázdugattyú összegzett Coulomb-féle súrlódási ereje
F_{s_gd}	N	a gázdugattyú Coulomb-féle súrlódási ereje
$F_{s\_zár}$	N	a zárkeret-tokszerkezet Coulomb-féle súrlódási ereje
F_{s0}	N	a lövedék és csőfal közötti súrlódóerő statikus értéke
Q_e	$\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}$	lőpor felső fűtőértéke (égéshője)
Q_{lp}	J	a rendszerbe bevitt lőporenergia
R_{spec}	$\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{K}}$	a lőporgáz specifikus (egyedi) gázállandója
T_1	K	az lőporgázok égés végi izochor gázhőmérséklet
W_0	m^3	a lövedékkel lezárt hüvely lőportöltet nélküli belső térfogata
$W_{cső}$	m^3	a cső ballisztikai hosszával jellemzett csőfurat-térfogat
W_{gm_60}	m^3	a gázdugattyú térfogata a 60. tartomány kezdetén

jelölés	mértékegység	megnevezés
b_{huz}	m	a huzagprofil (az ormózat) szélessége
c_{Σ}	$\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$	a párhuzamosan kapcsolt cső, illetve zár helyretoló rugók eredő rugómerevsége
c_p	$\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}\cdot\mathrm{K}}$	a lőporgázok izobár fajhője
c_r	$\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$	a helyretoló rugó rugómerevsége
c_{r_Σ}	$\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$	a helyretolórugó és a gázdugattyú rugójának összegzett rugómerevsége
c_{r_gd}	$\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$	a gázdugattyú rugójának rugómerevsége
c_v	$\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}\cdot\mathrm{K}}$	lőporgázok izochor fajhője
$d_{hüvely}$	m	a hengeres hüvely külső átmérője
e_1	m	a lőporszemcse félfalvastagsága
k_r	$\frac{1}{\mathrm{s}}$	a helyretoló rugó viszkózus csillapítási tényezője
k_{r_Σ}	$\frac{1}{\mathrm{s}}$	a helyretolórugó és a gázdugattyú rugójának összegzett viszkózus csillapítási tényezője
k_{r_gd}	$\frac{1}{\mathrm{s}}$	a gázdugattyú rugójának viszkózus csillapítási tényezője
l_{huz}	m	a lövedék vezetőgyűrűjének szélessége
m_{Σ}	kg	a zár és a gázdugattyú, vagy az összekapcsolt cső-zár rendszer tömege tömege
$m_{gáz\_héz}$	kg	a gázdugattyú illesztési hézagján elszökött lőporgáz tömegének függvénye
m_{gd}	kg	a gázdugattyú tömege
$m_{löv}$	kg	lövedék tömege

jelölés	mértékegység	megnevezés
$m_{lp\_héz}$	kg	a gázdugattyú illesztési hézagján elszökött lőpor tömegének függvénye
$m_{zár}$	kg	a szerelt zár tömege
n_{huz}	nincs	a fegyvercső huzagprofiljainak darabszáma
n_{gy}	nincs	a lövedék vezetőgyűrűinek darabszáma
p_{inic}	Pa	a gyújtó vagy iniciáló nyomás,
t_{Δ}	s	az $l_{zár}(t) = \Delta$ feltételhez tartozó időpillanat
t_{L3}	s	az $l_{zár}(t) = L_3 - E$ feltételhez tartozó időpillanat
u_1	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s} \cdot \mathrm{bar}}$	a lőporszemcse környezeti nyomáson mérhető, felületre merőleges lineáris égési sebessége
w_{kezd_lp}	m^3	a lőporszemcse kezdeti térfogata
Ω_0	kg	a betöltött lőpor tömege
Ω_{fikt}	kg	a gyújtás hatását reprezentáló fiktív lőportömeg
$\eta_{csőszáj}$	nincs	a csőszáji kiáramlás izentrópikus viszonyaira jellemző hatásfok
η_{furat}	nincs	a furaton keresztüli kiáramlás izentrópikus viszonyaira jellemző hatásfok
φ_0	nincs	univerzális lövegállandó
φ_{Σ}	nincs	az összekapcsolt cső-zár rendszer fiktív tömeg együtthatója
φ_{gd}	nincs	a gázdugattyú fiktív tömeg együtthatója
$\varphi_{zár}$	nincs	a zárkeret fiktív tömeg együtthatója
ω_1	kg	egy farab lőporszemcse tömege az égés előtt
$\varrho_{löv}$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$	a lövedék sűrűsége
ϱ_{lp}	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$	a lőpor sűrűsége

jelölés	mértékegység	megnevezés
C2	mm	lőportárcsa vastagsága valószívűségi változója
DCSO	mm	fegyvercsőfurat átmérő valószívűségi változója
FSCSO	N	súrlódóerő (csőfurat) valószívűségi változója
FSLOV	N	súrlódóerő (lövedék) valószívűségi változója
MLOV	g	lövedéktömeg valószívűségi változója
OMEGA	g	lőportöltet-tömeg valószívűségi változója
PBES	bar	besajtolódási nyomás valószívűségi változója
UFAKT	nincs	porozitási faktor valószívűségi változója
W0	cm^3	hüvely belső térfogata valószívűségi változója
WGM	cm^3	a gázhenger belső térfogat valószívűségi változója
ΔGD	mm	a gázdugattyú illesztési hézag valószívűségi változója
C	$\frac{\mathrm{Pa \cdot m}}{s}$	anyagfüggő konstans
f	$\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}$	a lőpor force értéke
v	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	lövedék sebessége
Ω	kg	az egyenértékű lőportömeg
α	$\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{kg}}$	a lőporgázok kovolumene
κ	egység	a lőporgáz adiabatikus vagy politropikus fajhőviszonya
μ	egység	a hüvely és a töltényűr közötti csúszási súrlódási együttható
ν	nincs	nyomásfüggő anyagjellemző
φ	egység	fiktív lövedéktömeg együtthatója

függvények

jelölés	mértékegység	megnevezés
$\dot{m}_{gáz\_krit}(t)$	$\frac{kg}{s}$	a nyelő kritikus tömegárama az idő függvényében
$A_{palást}(t)$	m^2	a hüvely kontakt palástfelülete az idő függvényében
$E_{gm}(t)$	J	a gázmotorba belépő lőporgázok által képviselt energia az idő függvényében
$F_{Coul\_palást}(t)$	N	a hüvelypaláston ébredő súrlódóerő az idő függvényében
$F_{gerj\_red}(t)$	N	a lengőrendszert gerjesztő erő az idő függvényében
$F_s(t)$	N	a lövedék és csőfal közötti súrlódóerő az idő függvényében
$N_{lp\_cső}(t)$	egység	fegyvercsőben égő lőpor folytonos darabszáma az idő függvényében
$N_{lp\_gm}(t)$	egység	a gázmotorban égő lőpor folytonos darabszáma az idő függvényében
$T_{krit}(t)$	K	a nyelő kritikus gázhőmérséklete az idő függvényében
$T_{krit\_gm}(t)$	K	a gázhenger-gázdugattyú illeszkedésénél kialakuló kritikus állapothoz tartozó lőporgázhőmérséklet az idő függvényében
$\frac{d}{dt}e_{gm}(t)$	$\frac{m}{s}$	a gázmotorban égő lőporszemcse lineáris égési sebessége az idő függvényében
$\frac{d}{dt}l_{gd}(t)$	$\frac{m}{s}$	a gázdugattyú sebessége az idő függvényében
$\frac{d}{dt}l_{zár}(t)$	$\frac{m}{s}$	a zár sebessége az idő függvényében

jelölés	mértékegység	megnevezés
$\frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t)$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$	a gázmotorból a környezetbe távozó lőporgázok tömegárama az idő függvényében
$\frac{d}{dt}m_{gáz\_héz}(t)$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$	a gázmotorból a környezetbe áramlott lőporgáz tömegárama az idő függvényében
$\frac{d}{dt}m_{gáz\_csőszáj}(t)$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$	a csőszáj tömegárama az idő függvényében
$\frac{d}{dt}m_{gáz\_furat}(t)$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$	a palástfurat tömegárama az idő függvényében
$\frac{d}{dt}m_{gáz\_gm}(t)$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$	a gázmotorba belépő lőporgázok tömegárama az idő függvényében
$\frac{d}{dt}m_{gáz\_gm}(t)$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$	a gázmotorba átáramlott lőporgáz tömegárama az idő függvényében
$\frac{d}{dt}m_{gáz\_ki}(t)$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$	a nyelő tömegárama az idő függvényében
$\frac{d}{dt}m_{gáz\_rés}(t)$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$	a réselésen kiáramló lőporgáz tömegárama az idő függvényében
$\frac{d}{dt}m_{lp\_héz}(t)$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$	a gázmotorból a környezetbe áramlott lőpor tömegárama az idő függvényében
$\frac{d}{dt}m_{lp\_gm}(t)$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$	a gázmotorba átáramlott lőpor tömegárama az idő függvényében
$\frac{d}{dt}m_{lp\_rés}(t)$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$	a réselésen kiáramló lőpor tömegárama az idő függvényében
$\frac{d}{dt}p_{gm}(t)$	$\frac{\mathrm{Pa}}{\mathrm{s}}$	a gázhengertér nyomásváltozásának sebessége az idő függvényében
$\frac{d}{dt}v_{gd}(t)$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$	a gázdugattyú gyorsulása az idő függvényében
$\frac{d}{dt}v_{zár}(t)$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$	a zár gyorsulása az idő függvényében
$\frac{d}{dt}\omega_{cső}(t)$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}$	a fegyvercső gázfejlesztése az idő függvényében

jelölés	mértékegység	megnevezés
$\frac{d}{dt}\omega_{gm}(t)$	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	a gázhengertér gázfejlesztése az idő függvényében
$\frac{d}{dt}l(t)$	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	a lövedék sebessége az idő függvényében
$\frac{d}{dt}p(t)$	$\frac{\text{Pa}}{\text{s}}$	a gáznyomásváltozás sebessége az idő függvényében
$\frac{d}{dt}v(t)$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	a lövedék gyorsulása az idő függvényében
$\frac{d}{dt}w(e)$	$\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	a lőporszemcse térfogatváltozási sebessége az égőréteg függvényében
$\frac{d}{dt}\omega(e)$	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	a lőporszemcse gázfejlesztési sebesség az égőréteg függvényében
$\frac{d}{dt}\omega(t)$	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	a gázfejlesztési sebesség az idő függvényében
$\frac{de(t)}{dt}$	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	lineáris égési sebesség az idő függvényében
$e_{gm}(t)$	m	a gázmotorban égő lőporszemcse felületére merőleges irányban leégett rétegvastagság az idő függvényében
$l_{gd}(t)$	m	a gázdugattyú elmozdulása az idő függvényében
$l_{zár}(t)$	m	a zárkeret elmozdulása az idő függvényében
$m_{gáz\_héz}(t)$	kg	a gázmotorból a környezetbe áramlott lőporgáztömeg az idő függvényében
$m_{gáz\_gm}(t)$	kg	a gázmotorba átáramlott lőporgáztömeg az idő függvényében
$m_{gáz\_rés}(t)$	kg	a réselésen kiáramló lőporgáztömeg az idő függvényében
$m_{lp\_héz}(t)$	kg	a gázmotorból a környezetbe áramlott lőportömeg az idő függvényében

jelölés	mértékegység	megnevezés
$m_{lp\_gm}(t)$	kg	a gázmotorba átáramlott lőportömeg az idő függvényében
$m_{lp\_rés}(t)$	kg	a réselésen kiáramló lőportömeg az idő függvényében
$p_{hidr}(t)$	Pa	a lövedékben kialakuló egyváltozós hidrosztatikai nyomás az idő függvényében
$p_{din}(t)$	Pa	az áramló lőporgáz dinamikus nyomása az idő függvényében
$p_{gm}(t)$	Pa	a gázhengertér nyomása az idő függvényében
$p_{krit}(t)$	Pa	a nyelő kritikus nyomása az idő függvényében
$u_{krit}(t)$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	a nyelő kritikus áramlásisebessége az idő függvényében
$u_{krit\_gm}(t)$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	a gázhenger-gázdugattyú illeszkedésénél kialakuló kritikus állapothoz tartozó adiabatikus hangsebesség az idő függvényében
$v_{gd}(t)$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	a gázdugattyú sebesség az idő függvényében
$v_{zár}(t)$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	a zárkeret sebesség az idő függvényében
$w_{eé\_lp}(t)$	m^3	a lőporszemcse elégett térfogata az idő függvényében
$\Psi_{gáz\_cső}(t)$	egység	a fegyvercsőben lévő lőporgázhányad az idő függvényében
$\Psi_{gáz\_cső/cső}(t)$	egység	a fegyvercsőben keletkezett gázokra vonatkoztatott, fegyvercsőben lévő lőporgázhányad az idő függvényében
$\Psi_{gáz\_gm}(t)$	egység	a gázmotorban lévő lőporgázhányad az idő függvényében

jelölés	mértékegység	megnevezés
$\Psi_{gáz\_gm/cső}(t)$	egység	a fegyvercsőben keletkezett gázokra vonatkoztatott, gázhengerben lévő lőporgázhányad az idő függvényében
$\omega_{1\_lp}(t)$	kg	a lőporszemcse elégett tömege az idő függvényében
$\omega_{cső}(t)$	kg	a fegyvercsőben lévő lőporgáztömeg az idő függvényében
$\omega_{gm}(t)$	kg	a gázmotorba korábban bejutott és a már ott keletkezett lőporgázok tömege az idő függvényében
$\omega_{gm}(t)$	kg	a gázmotorban elégett lőportömeg az idő függvényében
$\varrho_{gáz}(t)$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$	a fegyvercsőben lévő lőporgáz sűrűsége az idő függvényében,
$\varrho_{gáz\_gm}(t)$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$	a gázmotorban lévő lőporgáz sűrűsége az idő függvényében
$\varrho_{gáz\_krit}(t)$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$	a nyelő kritikus gázsűrűsége az idő függvényében
$\varrho_{gáz\_krit}(t)$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$	a fegyvercső palástfuratánál kialakuló kritikus állapothoz tartozó lőporgázsűrűség az idő függvényében
$\varrho_{gáz\_krit\_gm}(t)$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$	a gázhenger-gázdugattyú illeszkedésénél kialakuló kritikus állapothoz tartozó lőporgázsűrűség az idő függvényében
$L(t)$	J	a rendszeren végzett munka az idő függvényében
$Q(t)$	J	a rendszerben felszabaduló hőmennyiség az idő függvényében

jelölés	**mértékegység**	**megnevezés**
$T(t)$	K	a rendszer gázainak hőmérséklete az idő függvényében
$U(t)$	J	a rendszer gázainak belső energiája az idő függvényében
$W(t)$	m^3	a rendszer térfogata az idő függvényében
$a(t)$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	a fegyvercsőben lévő állapotokkal meghatározott hangsebesség az idő függvényében
$e(t)$	m	a felületre merőleges irányban leégett rétegvastagság az idő függvényében
$l(t)$	m	a lövedék elmozdulása az idő függvényében
$p(t)$	Pa	a lőporgázok nyomása az idő függvényében
$v(t)$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	a lövedéksebesség az idő függvényében
$w(e)$	m^3	az elégett lőporszemcsetérfogat az égőréteg függvényében
$\omega(e)$	kg	az elégett lőportöltettömeg az égőréteg függvényében
$\omega(t)$	kg	az elégett lőportömeg az idő függvényében

10 PUBLIKÁCIÓS JEGYZÉK

A publikáció		A folyóirat/kiadvány minden kötelező forrás-adata
szerzője, címe, megjelenés ideje	**nyelve**	
Vozsech István: 40x46 LV gránát rakéta-póthajtással – egy meg nem valósult fejlesztés I. rész 2019	magyar	Haditechnika LIII. évf. 2019/1, 51-55. old.
Vozsech István: 40x46 LV gránát rakéta-póthajtással – egy meg nem valósult fejlesztés II. rész 2019	magyar	Haditechnika LIII. évf. 2019/2, 47-51. old.
Vozsech István: 40x46 LV gránát rakéta-póthajtással – egy meg nem valósult fejlesztés III. rész 2019	magyar	Haditechnika LIII. évf. 2019/3, 43-46. old.
Vozsech István: A „Longest Kill 2017” matematikai elemzése I. rész 2019	magyar	Haditechnika LIII. évf. 2019/6, 7-11. old.
Vozsech István: A „Longest Kill 2017” matematikai elemzése II. rész 2020	magyar	Haditechnika LIV. évf. 2020/1, 11-15. old.
Hlavicka-Laczák Lili Eszter, Hlavicka Viktor, Károlyi György, Hajdú Ferenc, Nehme Salem Georges, Vozsech István: Betonszerkezetek károsodása lövedékbecsapódás hatására I. rész. 2021	magyar	Haditechnika LV. évf. 2021/5, 65-70. old.
Hlavicka-Laczák Lili Eszter, Hlavicka Viktor, Károlyi György, Hajdú Ferenc, Nehme Salem Georges, Vozsech István: Betonszerkezetek károsodása lövedékbecsapódás hatására II. rész. 2021	magyar	Haditechnika LV. évf. 2021/6, 56-59. old.
Vozsech István: A Föld forgásának hatása a lövedékmozgásra I. rész 2022	magyar	Haditechnika LVI. évf. 2022/3, 15-20. old.
Vozsech István: A Föld forgásának hatása a lövedékmozgásra II. rész 2022	magyar	Haditechnika LVI. évf. 2022/4, 20-25. old.

Vozsech István: Gázdugattyús automatikák számításai - normál üzemállapot esetén	magyar	Húsz év a katonai műszaki tudományok szolgálatában Budapest, Ludovika Egyetemi Kiadó, 2023, pp. 257-292.
Vozsech István: Forgózárak kényszerpályái I	magyar	Haditechnika LVIII. évf. 2024/4, 12-18. old.
Vozsech István: Forgózárak kényszerpályái II	magyar	Haditechnika LVIII. évf. 2024/5, 13-16. old.
Vozsech István: Hevederléptető kényszerpályák	magyar	Haditechnika LVIII. évf. 2024/6, 7-12. old.
Vozsech István: Calculations of blowback system guns	angol	Hadmérnök XIX. évf. 2024/3, 29-48. old.

11 HIVATKOZÁSOK

[1] Z. dr. Kovács és I. Nagy, *Kézi lőfegyverek típuskönyv,* Zrínyi Katonai Kiadó, 1986.

[2] T. dr. Bartha, *A nem halálos fegyverek és alkalmazásuk lehetőségei a Magyar Honvédség egyes nem háborús katonai műveleteiben, Doktori (PhD) értekezés,* 2005.

[3] I. Vozsech, „Gázdugattyús automatikák számításai - normál üzemállapot esetén," in *Húsz év a katonai műsza-ki tudományok szolgálatában*, Budapest, Ludovika Egyetemi Kiadó, 2023, pp. 257-292.

[4] I. Vozsech, „Calculations of blowback system guns," *Hadmérnök,* 2025/1.

[5] V. M. Kirillov, *Teorija i raszcset avtomaticseszkovo oruzsija,* Penza: PVAIU, 1973.

[6] G. dr. Piroska, *A belballisztika fő feladatának numerikus megoldására alapuló modell megalkotása porózus lőporokra (doktori értekezés),* 2005.

[7] I. Vozsech, „A "Longest Kill 2017" matematikai elemzése I," *Haditechnika*, pp. 7-11, 2019/6.

[8] I. Vozsech, „A "Longest Kill 2017" matematikai elemzése II," *Haditechnika*, pp. 11-15, 2020/1.

[9] J. Reimann és J. Tóth, *Valószínűségszámítás és matematikai statisztika,* Budapest.

[10] BIPM, *GUM 1995,* 2008.

[11] G. Stépán és G. Csernák, *Rezgéstan,* Budapest: Akadémiai Kiadó, 2019.

[12] G. K. Sellier, *Wound Ballistics and the scientific background*, 1994.

[13] A. Heck, *Bevezetés a Maple használatába,* 1999.

[14] I. Fazekas, *Valószínűségszámítás, egyetemi jegyzet,* 1996.

[15] Nemzeti Akkreditáló Testület, *NAR-EA 4/02*, 2003.

[16] Magyar Szabványügyi Testület,, *MSZ EN ISO/IEC 17025:2005.*

[17] E. D. Carlucci, *Ballistics: theory and design and ammunation,* Boca Raton: CRC Press, 2018.

[18] M. G. Chinn, *The machine gun, (volume 1-5),* Washington D. C.: U. S. Government Printing Office, 1951.

[19] S. dr. Kemény, *Mérési eredmények kiértékelése,* Budapest, 1978.

[20] B. dr Író és F. dr Zsenák, Műszaki áramlástan II (kompresszibilis közegek), 2013.

[21] MN HTI, *A haditechnikai K+F egységes metodikája,* Budapest, 1989.

12 ÁBRAJEGYZÉK

13 TÁBLÁZATJEGYZÉK

14 MELLÉKLETEK