

**Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem
Bolyai János Katonai Műszaki Kar
Katonai Műszaki Doktori Iskola**

PhD ÉRTEKEZÉS

Piroska György

**A belballisztika fő feladatának numerikus megoldására
alapuló modell megalkotása porózus lőporokra**

Tudományos témavezető:

Prof. emeritus Dr. Ungvár Gyula
nyá. okl. mk. vezérőrnagy,
egyetemi tanár DSc

- 2005 -

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	3
Jelölések.....	7
1. FEJEZET A FEGYVERBEN LEZAJLÓ BELBALLISZTIKAI FOLYAMATOK ELEMZÉSE	8
1.1. A löporégés jellemzőinek elemzése.....	8
1.2. A löporszemcse égési folyamatának elemzése.....	9
1.3. A lövés folyamat belballisztikai modelljeinek elemzése.....	15
1.3.1. A klasszikus belballisztikai modell.....	15
1.3.2. A módosított belballisztikai modell.....	19
1.4. A fejezetből levont következtetések, elvégzett feladatok.....	23
2. FEJEZET AZ ALKALMAZHATÓ MATEMATIKAI ÉS SZÁMÍTÁSTECHNIKAI MÓDSZEREK ELEMZÉSE	24
2.1. Az analitikus megoldhatóság elemzése.....	24
2.2. A numerikus megoldhatóságra használható módszerek elemzése.....	24
2.3. A fejezetből levont következtetések, elvégzett feladatok.....	25
3. FEJEZET A LŐPOR POROZITÁSÁT KEZELŐ BELBALLISZTIKAI MODELL MEGALKOTÁSA	27
3.1. A porózus modell.....	27
3.2. A porozitás fizikai és kémiai jelenségének vizsgálata.....	28
3.3. A porózus löporok gyártási módszerei.....	31
3.4. A porózus löpor égésének modellezése.....	33
3.5. A közelítés szintjei.....	34
3.6. A geometriai égéstörvény általánosítása.....	35
3.7. A porozitást leíró matematikai modell feltárása.....	37
3.8. A porózus löpor belballisztikai modellje.....	42
3.9. A porózus löpor modell számítógépes programja.....	44
3.10. A fejezetből levont következtetések, megoldott feladatok.....	45
4. FEJEZET KÍSÉRLETI BALLISZTIKAI ELLENŐRZÉS	46
4.1. Az ellenőrzés problémái.....	46
4.2. Ellenőrzés bomba vizsgálattal.....	46
4.2.1. Kísérleti terv készítése a végrehajtandó vizsgálatokról.....	46
4.2.2. A bombavizsgálat végrehajtása.....	48
4.3. A fejezetből levont következtetések, elvégzett feladatok.....	63
ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK	64
TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	66
AJÁNLÁSOK	66
Mellékletek.....	68
Az alkalmazható numerikus integrálási módszerek áttekintése:.....	79
Hivatkozott és tanulmányozott irodalom.....	106
Publikációs jegyzék.....	108

A fegyver- és löszertechnika a kódös feltevések tudománya, ami azon vitatható adatokra támaszkodik, amelyek kérdéses pontosságú eszközökkel, kétes megbízhatóságú és gyanús gondolkodásmódú személyek által végzett, rendszerint sikertelen kísérletek eredményei...

(Dr. Kovács Zoltán)

Bevezetés

A Magyar Honvédségben, és ugyanígy világszerte a különféle hadseregekben és fegyveres erőknél végbemenő szervezeti és technikai átalakulás ellenére a csöves lőfegyverek továbbra is az alapvető fegyverzeti eszközök maradtak.

A haditechnika megannyi csúcscsökkentése mellett az évszázadok óta alkalmazott lőpor jelentősége azonban nem csökken. A világ valamennyi hadseregében – a Magyar Honvédséget is beleértve - megvalósult technikai fejlesztések és szervezeti átalakítások ellenére a csöves lőfegyverek mindmáig meghatározó fontosságú eszközök maradtak. A legfrissebb szakirodalmak adatai alapján úgy tűnik, az újabb elveket hasznosítani próbáló tüzéségi és gyalogsági – pl. folyékony töltetű, elektromos lövedékgyorsítású, stb. – fegyverek belátható időn belül nem váltják fel a hagyományos működésű konstrukciókat.

Az évszázadok óta változatlan lövedékgyorsítási alapelv mellett a lőporokkal szembeni követelmények azonban jelentősen megváltoztak. A klasszikus katonai szempontok (nagyobb mechanikai teljesítmény, a fegyver kisebb hőterhelése, fokozott kémiai stabilitás, stb.) mellett megnőtt a gyártás gazdaságossági és környezetvédelmi kérdéseinek jelentősége – jóllehet a megváltozott világpolitikai helyzet nyomán erősen lecsökkent a lőpor iránti mennyiségi igény.

A lőporokkal szemben támasztott egyik legfontosabb elvárás az optimális – vagy ahhoz mindinkább közelítő – teljesítmény. A növelt teljesítményű lőpor tervezéséhez, a lőpor működésének modellezésére használható újabb módszerek mellett kiemelt jelentőséggel bír a gyártástechnológiák fejlesztése.

Elsődlegesen a rövidebb csövű gyalogsági fegyverek (pisztolyok, revolverek), a polgári (pl. sörétes) vadászfegyverek löszereinél, továbbá az ipari töltényeknél és vaklöszereknél a porózus lőporok a fajlagos teljesítmény növelés egy sajátos, új le-

hetőségét kínálják. Az elmúlt kb. 50 év – napjainkra különösen meggyérült – hazai, s az e tárgykörben külföldön sem bővelkedő szakirodalmát alapos áttanulmányozva nem találtam a porózus lőporok égését leíró modellt.

A fentiek figyelembevételével az alábbi tudományos célokat tűztem magam elé:

- PhD értekezésemben egy új lőpor modellezési eljárás tudományos elemzésének elvégzése.
- A *porózus* lőporszemek égését modellező eljárás kidolgozása.

A PhD értekezésemben kitűzött tudományos célok elérése érdekében az alábbi módszereket alkalmaztam:

- A nemzetközi és a hazai szakirodalom tanulmányozása, a kutatási témához kapcsolódó tudományos munkák elemzése;
- a lőpor égés folyamatának deduktív elemzése;
- A kutatási témához kapcsolódó önálló kutatás, azon belül modell alkotás;
- a modellel leírt folyamat kísérleti ellenőrzése;
- a kísérleti és modell eredmények összehasonlító vizsgálata;
- A kutatási területen elért részeredmények publikálása.

Irodalomkutatással feldolgoztam a lőpor égés modellezés különféle módszereit. Elvégeztem a módszerek összehasonlító elemzését. Dedukciós módszerrel meghatároztam a porózus lőporok égési sajátosságait és elkészítettem ezen lőporszemek égését leíró modellt és annak számítógépes programját. Számítógépes és laboratóriumi kísérleteket végeztem. Értékeltem és elemeztem ezek eredményeit. Kidolgoztam a modell alkalmazásához szükséges követelményrendszert. Javaslatot tettem a megalkotott modell alkalmazására.

A tudományos kutatómunkám során létrehozott értekezésem négy fejezetből áll:

Az **első fejezetben** elemzem a lőporégés fizikai-kémiai folyamatát, a lőpor-szemcse átalakulását lőpor égéstermék gázzá, valamint a fegyverben lezajló folyamatot feltáró belballisztikai modellt. Meghatározom azokat az alapvető matematikai összefüggéseket, amelyekkel leírható jó közelítéssel a kérdéses folyamat. Az elemzés során különös súlyt fektetek az égés szempontjából kritikus szakaszok vizsgálatára.

A **második fejezetben** a modell megalkotásához szükséges matematikai módszereket elemzem, és kiválasztom azokat az eljárásokat, amelyekkel kellő megbízhatósággal és pontossággal oldható meg a matematikai feladat.

A **harmadik fejezetben** foglalom össze a lőpor-szemek égését leíró matematikai – fizikai modellt. Rámutatok azokra a pontokra, ahol az általános modelltől eltér a porózus lőpor-szemek égését leíró modell.

A **negyedik fejezetben** ismertetem a modell ellenőrzésére végzett számítógépes kísérletek tapasztalatait. Bemutatom az elvégzett ballisztikai laboratóriumi vizsgálatokat, és a vizsgálati eredményeket összehasonlítom a matematikai modell eredményeivel.

A kutatómunkámat nehezítette:

Az értekezésem megírásának időszakában zajlott le a Magyar Honvédség stratégiai felülvizsgálata. Ennek következtében a beszerzési programoknál tapasztalható mennyiségi és minőségi lőszer igény csökkenés következtében a hazai lőporgyártás iránti igény is jelentősen lecsökkent. A lőszer és így a lőpor fejlesztés is háttérbe szorult. Munkám gyakorlatba történő átültetése így valószínűleg néhány évet vár magára.

A kutatómunkámat könnyítette:

- Tudományos témavezetőm és Nitrokémia Rt vezetésének és kollektívájának segítségével tanulmányaim, kutatómunkám során. Különös hálával gondolok Bárány István mérnök ezredesre, aki első témavezetőmként, valamint több évtizedes közös munkánkban sokat segített abban, hogy jelen értekezés elkészüljön.
- Munkahelyem a HM Technológia Hivatal vezetésének és kollégáimnak támogatása, hogy lehetővé tették számomra a felkészülés és a kutatómunka zavartalan folytatását.

Az értekezés kérdéseinek kidolgozása során a fejlesztő mérnöki megközelítést választottam.

A témával kapcsolatos kutatásokat 2004. november hónapban zártam le.

Az értekezés megírásával **az volt a célom**, hogy az olvasó elé tárt tudományos eredményeimmel hozzájáruljak ahhoz, hogy a Magyar Honvédség megfeleljen a biztonságpolitikai alapelvekben megfogalmazott és a NATO szövetségi rendszerben vele szemben támasztott követelményeknek, továbbá hogy elméleti alapokat adjak a hazai lőporgyártás továbbfejlesztéséhez.

Jelölések

a_i	a lőporszem térfogat függvény együtthatói	[m]
c_v	a lőpor égéstermék gázok állandó térfogaton vett közepes fajhője	[kJ/(kg*K)]
$e(t)$	a lőporszem pillanatnyi égőréteg vastagsága	[m]
e_1	a lőporszem égőrétegének vastagsága	[m]
E_0	torkolati energia	[Nm]
f	„lőporerő” a lőpor égéstermék gáz fajlagos energia tartalma	[kJ/kg]
I_l	lövés teljes impulzusa	[Ns]
I_v	teljes nyomás impulzus	[Ns]
k_i	az „energia arány” mutatója	[1]
$l(t)$	a lövedék pillanatnyi helyzete a fegyvercsőben	[m]
n	a lőporszemben lévő üregek száma	[1]
$p(t)$	a fegyvercsőben kialakuló pillanatnyi lőpor égéstermék gáz nyomás	[MPa]
p_b	gyullasztó nyomás	[MPa]
$p_{év}$	gáznyomás a lőpor elézésekor	[MPa]
p_k	közepes gáznyomás	[MPa]
p_{max}	maximális gáznyomás	[MPa]
q	a lövedék tömege	[kg]
$Q_é$	a lőpor fajlagos égéshője	[kJ/kg]
R	az égéstermék gáz gázállandója	[kJ/(kg*K)]
S	a lövegcső keresztmetszete	[m ²]
$s(t)$	a lőporszem felszíne	[m ²]
T	a lőpor égési hőmérséklete	[K]
$T_{év}$	idő a lőpor elézésekor	[s]
$u(t)$	a lőpor pillanatnyi égési sebessége	[m/s]
u_1	a lőpor fajlagos égési sebessége	[m/s/MPa]
u_{1eff}	a lőpor effektív fajlagos égési sebessége	[m/s/MPa]
u_{eff}	a lőpor effektív égési sebesség	[m/s]
$v(t)$	a lövedék pillanatnyi sebessége a fegyvercsőben	[m/s]
$V(t)$	a lőporszem leégett térfogata	[m ³]
$W(t)$	a fegyver égésterének változása az idő függvényében	[m ³]
W_0	a fegyver töltényürének térfogata, kezdeti égéster	[m ³]
z	a lőporszemcse fajlagos égőrétege	[1]
α	„kovolumen” a lőpor égéstermék gáz molekulák által közvetlenül kitöltött térrész nagysága	[m ³ /kg]
Γ	a lőporszem dinamikus élénksége	[1/(MPa*s)]
γ, λ, μ	a lőporszemcse alaktényezői	[1]
δ	a lőporszem sűrűsége	[kg/m ³]
δ_{eff}	a lőporszem effektív sűrűsége	[kg/m ³]
κ	a lőpor égéstermék gáz átlagos fajhőviszonya	[1]
$\Lambda(e)$	az elégett lőpor térfogata az égés adott pontjában	[1]
v	a lőporégés tapasztalati kitevője	[1]
σ	a lőporszemcse fajlagos felszíne	[1]
φ	a másodlagos munkák együtthatója	[1]
Ψ	töltethányad	[1]
Ψ_0	indulási töltethányad	[1]
$\omega(t)$	a lőpor égéstermék gáz pillanatnyi tömege	[kg]
ω_0	a lőportöltet tömege	[kg]
ω_1	egy lőporszem tömege	[kg]
$\omega_g(t)$	a lőpor égéstermék gáz tömege	[kg]

1. FEJEZET

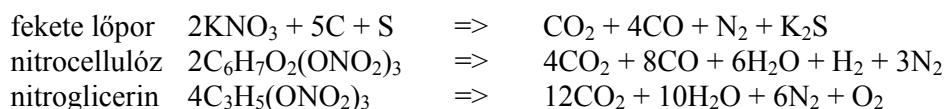
A fegyverben lezajló belballisztikai folyamatok elemzése

”a belballisztika fő feladata – megadni mi történik a fegyverben, és hogyan”

1.1. A lőporégés jellemzőinek elemzése

A lőpor égése során a lőpor anyagában kémiai kötések formájában tárolt energia alakul át a termikus folyamatokon keresztül lőpor égéstermék gázok munkavégző képességévé.

A lőpor égése a gyullasztást követően indul. A **gyullasztás módja** jelentős mértékben befolyásolja az égési folyamatot, de ennek elemzése túl nyúlik az általam kitűzött célokra. A lőporszemcsék égése során a lőpor anyaga átalakul forró „lőporgázzá”. Ez a folyamat a tapasztalatok szerint úgy játszódik le, hogy az égéstermék gáz keletkezésének üteme függ a lőpor égéstermék gázok pillanatnyi nyomásától. Növekvő nyomáson rohamosan nő a gázképződés üteme. A **folyamat jellegét tekintve azonosan** játszódik le a nitrocellulóz származék füstnélküli lőpornál és az alapvetően szén, kén és kálium-nitrát keverékből álló **füstös vagy fekete lőpornál**.



Az égés során zömében gáz állapotú égéstermékek keletkeznek, amelyek kelően nagy nyomásuk révén biztosítják azt a munkavégző képességet, ami szükséges a lövedék fegyvercsőben történő felgyorsításához.

A lőportöltetet szilárd halmazállapotú lőporszemekből alakítják ki. A lőporszemek geometriai méretének és darabszámának meghatározása alapvető fontosságú, mert a gázzá történő átalakulásuk menete, azaz a gáztermelés - idő függvény ismeretében lehet meghatározni a fegyverrendszer lövés közbeni mozgását, például a lövedék gyorsulás – idő függvényt. A **gáztermelés időbeli menetét leíró összefüggést égési törvénynek nevezi a szakirodalom**.

*A értekezésben, a továbbiakban **modellnek** nevezem azt a **matematikai - fizikai összefüggést, vagy összekapcsolt összefüggések rendszerét, amely idő függvényében leírja – a tapasztalatokkal összevethető módon – a rendszerben lejátszódó összetett folyamatot.***

A modell alapvető eleme **az égés időbeli sebességét leíró függvény**, ennek egyik változata a következő formában írható fel¹:

$$u(t) = \frac{de}{dt} = u_1 p(t)^{\nu} \quad (1.)$$

ahol

- $u(t)$ a lőpor égés sebessége az idő függvényében [m/s]
- e a lőporszem égőréteg vastagsága [m]
- u_1 a lőpor fajlagos égési sebessége [m/s/MPa]
- ν a lőporégés tapasztalati kitevője [1]
- $p(t)$ a fegyvercsőben kialakuló pillanatnyi lőpor égéstermék gáznyomása [MPa]

1.2. A lőporszemcse égési folyamatának elemzése

a.) A ballisztikai gyakorlatban a lőporszemcse égésének leírására leginkább alkalmazott modell a **geometriai égéstörvény**². E modell szerint a lőporszem a kiindulási alakjával párhuzamos rétegekben ég le. Tehát például a gömb alakú lőporszem az égés végéig gömb alakú marad, csupán a mérete csökken, folyamatosan az égési sebességtől függő módon (1.ábra).

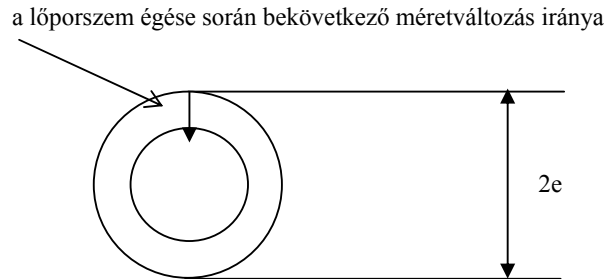
A geometriai égéstörvény modelljéből következik, hogy a lőporszem kiindulási geometriai alakzatának jellegétől függ az égésvégi alakzat, például:

- gömb alakú lőporszem az égés végén pont lesz;
- rúd alakú lőporszem az égés végén vonal lesz;
- téglatest alakú lőporszem az égés végén lap lesz.

¹ Zoltay Ferenc: Ballisztika – Budapesti Műszaki Egyetem Hadmérnöki Kara, Budapest, 1951

² Szerebrjakov M. E. : Vnutrennaja ballisztika – Oborongiz, Moszkva, 1962

Szimmetria okokból következik az a szabály, hogy a geometriai méreteket az aktuális égés középponttól adjuk meg, ezért a test geometriai méretei rendre az aktuális leégési méret kétszerese.



1.ábra A gömb alakú lőporszem méretének változása az égés során a geometriai égéstörvény alapján

Az égés során a következő összefüggés alapján alakul át a lőporszem lőpor égéstermék gázzá:

$$\omega(t) = \delta * V(t) = \delta * [s(t)udt \quad (2.)$$

ahol

- $\omega(t)$ a lőpor tömegváltozása az idő függvényében — a keletkezett égéstermék gáz tömege [kg]
- δ a lőpor sűrűsége [kg/m³]
- $V(t)$ a lőpor térfogat változása az idő függvényében [m³]
- $s(t)$ a lőpor felszín változása az idő függvényében [m²]

Amint az (1.) és (2.) összefüggésekből látható, hogy a keletkezett gáz tömege a geometriára jellemző $s(t)$ -n kívül a „ δ ” és az „ u_1 ” anyagi jellemzőktől függ.

Adott lőpor tömegből adott idő alatt fejlődő gáz mennyisége függ továbbá a lőporszemek méretétől is, ugyanis ha adott tömegből néhány nagy lőporszemet készítünk az égési összfelület „ $s(t)$ ” kisebb mintha ugyanabból a lőportömegből geometriailag hasonló de több kisebb lőporszemet készítünk.

Ugyanis, ha valamilyen

$$V = ae^3 \quad (3.)$$

térfogatú és

$$s = be^2 \quad (4.)$$

felszínű test jellemző geometriai méretét

(ahol „a” és „b” alakjellemzők)

lecsökkentjük k-ad részére, úgy, hogy az össztérfogat ne változzon, vagyis

$$V = a \left(\frac{e}{k} \right)^3 k^3 = ae^3 \quad (5.)$$

a térfogat, ekkor azonban a felszínre

$$s = b \left(\frac{e}{k} \right)^2 k^3 = be^2 k \quad (6.)$$

adódik, vagyis az össz felszín **k**-szorosára nő.

A fegyver és lőszer - azaz a ballisztikai rendszer - tervezése során alapvető fontosságú, hogy a lőpor teljes egészében elégjen, hiszen ellenkező esetben a betáplált energia valamely hányada hasznosítás nélkül ég el a fegyver csöve előtt a torkolat láng nagyságát növelve. Ezen követelmény miatt fontos, hogy a lőporszemcse olyan alapanyagból készüljön, hogy az kellően nagy égési sebességet biztosítson, másrészt a lőporszem égőréteg vastagsága optimális legyen.

b.) Másodlagos munkák, energia viszonyok lövésnél:

A lövés folyamata során lőpor kémiai energia tartalma alakul át más-más energia formákká, és végez munkát, az energia átalakulás során a következő főbb elemeket és arányokat emeli ki a szakmai gyakorlat¹:

E ₁ - a lövedék mozgási energiáját	33%
E ₂ - a lövedék forgási energiáját	0,2%
E ₃ - súrlódási munkát a lövedék és csőfal között	3%
E ₄ - a lőpor, lőporgázok mozgási energiáját	3,5%
E ₅ - a löveg mozgási energiáját	0,1%
E ₆ - a lövedék besajtolás munkáját	2%
E ₇ - a löveg, lövedék felmelegedését	21%
E ₈ - a gázvesztéséget	0,1%
E ₉ - a levegőoszlop mozgási energiáját	0,1%
E ₁₀ - a lőporgázok hőenergia tartalmát	37%

Az energia hányadok egyúttal a **modell egyszerűsítési feltételeit** is meghatározzák. A továbbiakban a modell alkotás során csak a fenti felsorolás szerinti elemek szerinti átalakulást veszem figyelembe.

Az energia hányadok közül E_2, E_3, E_4, E_5 közvetlenül arányos E_1 -el, így adódik²:

$$E_2, E_3, E_4, E_5 \text{ -re } E_i = k_i * \frac{qv^2}{2}$$

ahol:

- $q[\text{kg}]$ – a lövedék tömege
- $\omega_0[\text{kg}]$ – a lőportöltet tömege
- $v[\text{m/s}]$ – a lövedék sebessége
- $k_i[1]$ – az „energia arány” mutatója

legyen $\varphi = \left(\sum_{i=2}^5 k_i \right)$ a másodlagos munkák koefficiense

legyen $\varphi_0 = 1,05 - 1,2$ fegyver és lőszerfüggő tapasztalati tényező¹.

$$\text{legyen } \varphi = \varphi_0 + \frac{1}{3} \frac{\omega_0}{q} \quad (7.)$$

a modell szerinti folyamatok leírásánál a lövedék tömege helyett a megnövelt

φq fiktív tömeggel számolva

egyszerűsítve figyelembe vehetők mindazok a hatások amelyek arányosak a mozgási energiával.

c.) Energia átalakulás menete

A modellezésnél a következő közelítéseket alkalmazom, összhangban a gyakorlattal:

0. A lőpor égése során az egyszerűsített Van der Waals egyenlet (Abel egyenlet) írja le a gázok fizikai viselkedését:

$$p \left(\frac{W_0}{\omega} - \alpha \right) = RT \quad (8.)$$

ahol: - $W_0 [m^3]$ – a fegyver töltényüregnek térfogata
 - $\alpha [m^3/kg]$ – a lőpor égéstermék gáz kövolumene
 - $R [kJ/(kg \cdot K)]$ – az égéstermék gáz gázállandója
 - $T [K]$ – a lőpor égési hőmérséklete

1. A lőporszem elégése a geometriai égéstörvény alapján történik.
2. A lőpor égése az égéstérben egy jellemző közepes nyomáson történik függetlenül a fegyvercsőben kialakuló és térben változó nyomás eloszlástól.
3. A lőpor égéstermékek összetétele nem változik a lövés ideje alatt, az égés során adiabatikusan folyamatok játszódnak le.
4. A lőpor égési sebessége arányos a nyomással.
5. A másodlagos munkák arányosak a főmunkával.
6. A lövedék mozgása akkor kezdődik amikor a töltőűrben a nyomás eléri a kezdeti besajtolási nyomást.
7. A vezetőabroncs besajtolási munkája elhanyagolható.
8. A csőfalak a lövés alatti tágulása, valamint a gázok a réseken történő elillanása elhanyagolható.
9. A csőfalnak történő hőátadás miatti gáz lehűlés elhanyagolható.
10. A lövedékmozgás számítása a lövedékfenéknek a csőtorkolaton történő áthaladásáig történik.
11. A fajhőviszony a lövés ideje alatt nem változik.

A közelítések figyelembe vételével a belballisztikai folyamatok során az energia egyensúlyra a következő összefüggések írhatók fel:

A gázok termikus energia változása a következő a lövés alatt:

$$E_1 - E = c_v (T_1 - T(t)) \omega(t) \quad (9.)$$

ahol

E_1 [kJ] – a lőporgázok energia tartalma

E [kJ] – a lőporgázok energia tartalma t -ben

T_1 [K] – a lőporgázok hőmérséklete

T [k] – a lőporgázok hőmérséklete t -ben

c_v [kJ/(kg*K)] – a lőpor égéstermék gázok állandó térfogaton vett közepes fajhője

A lövedék mozgási energia változása a következő:

$$E_1 - E = \frac{\varphi q v(t)^2}{2} \quad (10.)$$

Az egyensúly következtében:

$$c_v (T_1 - T(t)) \omega(t) = \frac{\varphi q v(t)^2}{2} \quad (11.)$$

átalakítások után:

$$\frac{R}{\kappa - 1} (T_1 - T(t)) \omega(t) = \frac{\varphi q v(t)^2}{2} \quad (12.)$$

ahol

R [kJ/(kg*K)] – az égéstermék gáz gázállandója

κ [1] – a lőpor égéstermék gáz átlagos fajhőviszonya

legyen

$$RT_1 = f - \text{„lőporerő”} \quad (13.)$$

$$RT(t) \omega(t) = pW(t) \quad (14.)$$

ahol

$W(t)$ [m³] – a fegyver égésterének változása az idő függvényében

a (13.) és (14.) figyelembevételével kapjuk

$$\frac{f \omega(t)}{\kappa - 1} - \frac{pW(t)}{\kappa - 1} = \frac{\varphi q v(t)^2}{2} \quad (15.)$$

ebből átrendezéssel adódik:

$$p = \frac{f\omega(t) - \frac{\kappa-1}{2}\varphi qv(t)^2}{W_0 - \frac{1}{\delta}(\omega_0 - \omega(t)) - \alpha\omega(t) + Sl(t)} \quad (16.)$$

ahol

$S [m^2]$ – a lövegcső keresztmetszete
 $l(t) [m]$ – a lövedék helyzete t -ben

1.3. A lövés folyamat belballisztikai modelljeinek elemzése

1.3.1. A klasszikus belballisztikai modell

A belballisztikai folyamatok leírására³, az alábbi differenciál-egyenletrendszert vagy ahhoz tartalmilag hasonlót használja a **nemzetközi szakmai gyakorlat**.

Zárt alakú integrálható megoldás akkor adható az egyenletrendszerre, ha a löporszemcse felszíne az égés során csökken (degresszív) vagy közel állandó (konstans).

Ha a löpor égése során bekövetkező dimenzió nélküli Ψ — tömegváltozást írrom fel a szintén dimenzió nélküli z — leégett löporréteg függvényeként, akkor a szokásos jelölés rendszer alapján a következő összefüggések írhatók fel.

(A löpor égésének kezdetén Ψ és z értéke = 0, és a löporszem leégésekor = 1.)

$$\Psi = \gamma(z + \lambda z^2 + \mu z^3) \quad (17.)$$

$$\frac{d\Psi}{dz} = \gamma(1 + 2\lambda z + 3\mu z^2) \quad (18.)$$

a (17.) és (18.) összefüggésekben γ , λ és μ dimenzió nélküli mutatók, amelyek a löporszem alakját jellemzik.

³ Szerebrjakov M. E.: Vnutrennaja ballisztika – Oborongiz, Moszkva, 1962

Ebben az esetben legyen a **fajlagos felszín** viszony

$$\sigma = 1 + 2\lambda z + 3\mu z^2 \quad (19.)$$

illetve elhanyagolva a „másodrendű” geometria jellemzőt adódik

$$\Psi = \gamma(z + \lambda z^2) \quad (20.)$$

illetve

$$\sigma = 1 + 2\lambda z \quad (21.)$$

az égés megindulásakor $z=0$ és ekkor a kezdeti felszín $\sigma_0=1$

az égés végén pedig $z=1$ és ekkor az égésvégi felszín $\sigma_v=1+2\lambda$

a (20.) és (21.) alapján adott $\Psi(z)$ elégett lőporhányadnál

$$\sigma = \sqrt{1 + 4\frac{\lambda}{\gamma}\Psi(z)} \quad (22.)$$

A modell külön határozza meg a lövedék megindulása előtti *elő periódust*, a lövedék megindulásával kezdődő *első periódust*, és a lőpor elégeése után kezdődő *második periódust*.

Az **elő periódus** (pirosztatikus folyamat) a lőpor begyűjtésétől a lövedék megindulásáig tart.

Ebben a szakaszban a gáznyomás a következőképpen alakul:

$$p_0 = p_b + \frac{f\omega\Psi_0}{W_0 - \frac{\omega}{\delta} - \omega\left(\alpha - \frac{1}{\delta}\right)\Psi_0} \quad (23.)$$

ahol

p_b [MPa] – a lőportöltet gyullasztó nyomása

p_0 [MPa] – a lövedék besajtolási nyomása

Ψ_0 [1] – az első periódusban elégett lőporhányad

a (23.)- at átrendezve az elő periódusban a lőporjellemzőkre adódik

$$\Psi_0 = \frac{(p_0 - p_b) \left(\frac{W_0}{\omega} - \frac{1}{\delta} \right)}{f + (p_0 - p_b) \left(\alpha - \frac{1}{\delta} \right)} \quad (24.)$$

$$\text{illetve} \quad \sigma_0 = \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda}{\gamma} \Psi_0} \quad (25.)$$

$$\text{valamint} \quad z_0 = \frac{\sigma_0 - 1}{2\lambda} = \frac{2\Psi_0}{(\sigma_0 + 1)\gamma} \quad (26.)$$

bevezetve az **indulási térfogat hossza** fogalmát:

$$l_{\Psi_0} = \frac{W_0}{s} \left(1 - \frac{\omega}{W_0 \delta} - \frac{\omega}{W_0} \left(\alpha - \frac{1}{\delta} \right) \Psi_0 \right) \quad (27.)$$

Az **első periódus** számítása az a pirodinamikus folyamat, amely a lövedék megindulásától a lőpor égés végéig tart.

Ebben a szakaszban a jellemző adatok a következőképpen alakulnak.

Legyen a független változó „ x ” úgy, hogy $x = z - z_0$ az elégett lőpor dimenzió nélküli vastagsága a lövedék mozgás kezdetétől. Itt z_0 a (16.) szerint meghatározott, az első periódusban leégett égőréteg vastagság.

$\Psi = \Psi(x)$ azaz a **lőporhányad** a következő képen írható fel:

$$\Psi = \Psi_0 + \gamma \sigma_0 x + \gamma \lambda x^2 \quad (28.)$$

$v = v(x)$ azaz a **lövedék sebessége** a következő:

$$v = \frac{S e_1}{\varphi q u_1} x \quad (29.)$$

ahol

$e_1 [m]$ – a lőporszem égőrétegének vastagsága

$l = l(x)$ azaz a **lövedék elmozdulása** a következő:

bevezetve a **töltési paraméter** fogalmát:

$$B = \frac{S^2 e_1^2}{f \omega \varphi q u_1} \quad (30.)$$

$$\text{továbbá } B_1 = \frac{B(\gamma - 1)}{2} - \gamma \lambda \quad (31.)$$

$$\text{legyen } \ln Z_x = \int_0^x \frac{x dx}{x^2 - \frac{\gamma \sigma_0}{B_1} x - \frac{\Psi_0}{B_1}} \quad (32.)$$

$$l = \frac{\omega}{s} \left(1 - \frac{\omega}{W_0 \delta} - \frac{\omega}{W_0} \left(\alpha - \frac{1}{\delta} \right) \frac{\Psi_0 - \Psi}{2} \right) \left(Z_x^{\frac{B}{B_1}} - 1 \right) \quad (33.)$$

$p = p(x)$ azaz a **gáznyomás** a következő:

$$p = \frac{f \omega}{S} \frac{\Psi_0 + \gamma \sigma_0 - B_1 x^2}{l_{\Psi} + l_{\Psi_k} \left(Z_x^{\frac{B}{B_1}} - 1 \right)} \quad (34.)$$

ahol

$$l_{\Psi} = \frac{W_0}{S} \left(1 - \frac{\omega}{W_0 \delta} - \frac{\omega}{W_0} \left(\alpha - \frac{1}{\delta} \right) \Psi \right) \quad (35.)$$

$$l_{\Psi_k} = \frac{W_0}{S} \left(1 - \frac{\omega}{W_0 \delta} - \frac{\omega}{W_0} \left(\alpha - \frac{1}{\delta} \right) \Psi_k \right) \quad \text{és} \quad (36.)$$

$$\Psi_k = \frac{\Psi_0 + \Psi}{2} \quad (37.)$$

A **második periódus** számítása (pirodinamikus folyamat) a lőpor égés végétől a lövedéknek a csőből való kilépésig tart.

Ebben a szakaszban a jellemző adatok a következőképpen alakulnak, és legyen a független változó „ l ” - a lövedék út.

$p = p(l)$ azaz a gáznyomás a következő:

$$p = p_{ev} \left(\frac{l_1 + l_{ev}}{l_1 + 1} \right)^\kappa \quad (38.)$$

ahol

$$l_1 = \frac{W_0 - \alpha\omega}{S} \quad (39.)$$

$v = v(l)$ azaz a lövedék sebessége a következő:

$$v = v_{id} \sqrt{1 - \left(\frac{l_1 + l_{ev}}{l_1 + 1} \right)^{\kappa-1} \left(1 - \frac{B(\kappa-1)}{2} (1-z_0)^2 \right)} \quad (40.)$$

ahol

$$v_{id}^2 = \frac{2f\omega}{\varphi q(\kappa-1)} \quad (41.)$$

1.3.2. A módosított belballisztikai modell

A belballisztikai folyamatok leírására **megalkottam** egy olyan nemlineáris differenciál-egyenletrendszer (alapegyenletet), amely noha zárt alakban **nem integrálható**, de alkalmas numerikus integrálási módszert választva **megoldható** az egyenletrendszer, és nem kell semmilyen további megkötést tenni a lőporszemcse vonatkozásában.

$$\frac{dp}{dt} = \frac{f \frac{d\omega}{dt} - p(t) \left(\left(\frac{1}{\delta} - \alpha \right) \frac{d\omega}{dt} + S\kappa v(t) \right)}{W_0 - \frac{1}{\delta} (\omega_0 - \omega(t)) - \alpha\omega(t) + Sl(t)} \quad (42.)$$

A (42.) jelű összefüggés határozza meg a gáznyomás változását a fegyverben a lövés alatt.

A **nyomásváltozás** az összefüggés alapján:

- a lőpor anyagi minőségétől (lőporerő, kovolumen⁴, sűrűség, fajhőviszony);
- a lövedék kinematikai jellemzőitől (sebesség, elmozdulás);
- a lőpor égéstermék gáz számára szabad térfogattól;
- a termelődő lőpor égéstermék gáz tömegétől, és nem utolsó sorban;
- a gáznyomástól függ.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{Sp(t)}{\varphi q} \quad (43.)$$

A (43.) jelű összefüggés határozza meg a lövedék sebesség változását a fegyverben a lövés alatt.

A **gyorsulás** az összefüggés alapján:

- a fegyver rendszer mechanikai adataitól (lövedéktömeg, fegyvercső keresztmetszeti terület) és a;
- gáznyomástól függ.

$$\frac{dl}{dt} = v(t) \quad (44.)$$

A (44.) jelű összefüggés határozza meg a lövedék elmozdulás változását a fegyverben a lövés alatt.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega}{\omega_1} \delta \left(3a_3 e(t)^2 + 2a_2 e(t) + a_1 \right) \frac{de}{dt} \quad (45.)$$

⁴ kovolumen: a lőpor anyagi jellemzője, amely megmutatja a lőpor égéstermék gáz molekulák által közvetlenül kitöltött térrész nagyságát. SI mértékegysége [m³/kg]

A (45.) jelű összefüggés határozza meg a képződő lőpor égéstermék gáz mennyiségének változását a fegyverben a lövés alatt. Az alapegyenlet modellezése során a lőpor égését a G. Piobert által megalkotott geometriai égéstörvény alapján végeztém⁵. A geometriai égéstörvény feltételezi, hogy az égés a kezdeti alakkal párhuzamos rétegekben történik.

$$V(t) = a_3 e(t)^3 + a_2 e(t)^2 + a_1 e(t) \quad (46.)$$

Az égés során a leégett lőpor térfogatát egy állandó tagot nem tartalmazó harmadfokú polinom⁶ adja meg.

A **gáztermelés** az összefüggés alapján:

- a fegyverben lévő lőpor mennyiségétől;
- a lőpor töltetet alkotó lőporszemcsék geometriai kialakításától és geometriai méretétől, valamint;
- a lőpor égési sebességétől függ.

$$\frac{de}{dt} = u_1 p(t)^y \quad (47.)$$

És végül a (46.) jelű összefüggés határozza meg a lőpor égési sebességét.

Az **égési sebesség** amint azt az 1.1. pontban tárgyaltam az (1.) összefüggéssel megegyezően:

- a lőpor anyagi minőségétől (fajlagos égési sebesség, égési tényező), valamint;
- gáznyomástól függ.

A differenciálegyenlet-rendszer megoldása esetén, azaz a ballisztikai modell futtatásakor ismerté válnak mindazok a folyamatok, amik a fegyverben játszódnak le, és ellenőrizhetővé válik a fegyver tervezési feltételezések helyessége.

⁵ Dr. Kovács Zoltán: Belső ballisztika, Magyar Kézilőfegyver-vizsgáló Hivatal, Budapest, 1977

⁶ polinom: többtagú algebrai kifejezés

A modell alkalmazása esetén is vannak olyan kérdések, **amelyekre nincs válasz**. Többek között nem írja le a modell:

- a lőpor égés során fellépő tranziens⁷ jelenségeket;
- a lőpor égésénél fellépő kettő- vagy háromdimenziós jelenségeket;
- a lőpor égése közben a lőpor égéstermék gázok áramlási viszonyait a fegyverben;
- a fegyverben tapasztalható hőátadás jellemzőit;

Nem írja le a modell, de nem is célkitűzése leírni azokat a jelenségeket amelyek a lőporszemcsék égése során közvetlenül a szemcse felszínén játszódnak le, amellyel figyelembe lehetne venni a lőporszemcse anyagi struktúrájából adódó jelenségeket, például a különféle bevonatokból és a lőpor porozitásából adódó hatásokat.

Nem írja le a modell azt a tényt, hogy a lőpor paraméterek nem determinisztikus jellegűek, hanem az alapanyagoktól és a gyártási eljárástól függő valószínűségi változók amelyek valamilyen eloszlást követnek adott átlagos mérettel és méret szórással. A lőpor geometria paraméterei függenek a gyártás technológiájától. A lőpor gyártási technológiájából, leginkább a végső fázis érdekes, amikor is a lőpor alakja és végső mérete kialakul. E technológiai lépések során az oldószerrel átítatott lőpor-massza speciális sajtoló extruderen jut keresztül, a sajtolóból kijutó lőporszálat pedig egy késszerkezet darabolja fel az előírt hosszúságúra. A vágást követően a szárítóban nyeri el a lőporszem végső alakját és méretét. A technológiából következően a lőporszem hossza jelentős mértékben függ a késmozgatás vezérlésének egyenletességétől. A lőporszem átmérője alapvetően függ a sajtolószerszám lyukméretétől, a lyuk kopottságától, valamint döntően az oldószer tartalomtól és a technológiai hőmérséklettől, ugyanis a száradás során a lőporszem alakja módosulhat. Mikroszkópos vizsgálatok alapján a lőporszem átmérő méretei jó közelítéssel normális eloszlást követnek, a lőporszem hossza és a lőporszem alakja azonban nem ítéhető meg egyértelműen mert a vágási felület általában nem merőleges a lőporszem tengelyére, a ferdeség

⁷ tranziens: a folyamat lejátszódásához viszonyítva gyorsan, nagy értékváltozással lejátszódó részfolyamat.

azonban nem jelentős és az ebből adódó térfogat változás sem jelentős, így itt is feltételezhető a normalitás.

1.4. A fejezetből levont következtetések, elvégzett feladatok

***Elemeztem** a löporégés fizikai-kémiai folyamatát, a löporszemcse átalakulását löpor égéstermék gázzá, valamint a fegyverben lezajló folyamatot feltáró belballisztikai modellt. **Meghatároztam** azokat az alapvető matematikai összefüggéseket, - és azok fizikai tartalmát – amelyekkel jó közelítéssel leírható a kérdéses folyamat.*

***Megállapítottam**, hogy az integrálható modell segítségével leírható jelenség kör számos kérdésre nem ad választ, részben azért, mert a modellalkotók sem tűzték ki ezt célul, részben azért, mert a modell megoldhatósága vagy méréssel történő ellenőrizhetősége nem megoldott.*

***Megalkottam** egy numerikusan integrálható modellt, amely segítségével szélesebb jelenségkör leírható és válasz adható olyan fontos kérdésekre is, amelyeknek a korszerű mérőműszerekkel történő méréses ellenőrizhetősége megoldott.*

2. FEJEZET

Az alkalmazható matematikai és számítástechnikai módszerek elemzése

2.1. Az analitikus megoldhatóság elemzése

Az analitikus megoldás során a (17.) – (41.) jelölésű összefüggésekből álló modellt kell megoldani:

- a megoldás során a lövés külön vizsgált szakaszaiban más és más jellemző a független változó;
- a felállított egyenletek jelentős mértékű elhanyagolásokat, közelítéseket tartalmaznak, amikor is egyes jellemzőket középértékükkel helyettesítenek be;
- a lövés jelenségének időbeli lefolyása csak áttételes úton határozható meg;
- a legfontosabb probléma az, hogy a (32.) összefüggés

$$\left(\ln Z_x = \int_0^x \frac{xdx}{x^2 - \frac{\kappa\sigma_0}{B_1}x - \frac{\Psi_0}{B_1}} \right)$$

integrálhatósága érdekében fel kell tételezni, hogy az égés során a lőpor égési sebessége egyenesen arányos a lőpor égéstermék gáz pillanatnyi nyomásával.

Ez azt jelenti, hogy az (1.) összefüggésben $(u(t) = \frac{de}{dt} = u_1 p(t)^v)$ a $v = 1$ közelítést kell alkalmazni, ami csak akkor fogadható el, ha a gáznyomás már kellően magas, eléri a 80 [MPa] értéket⁸.

2.2. A numerikus megoldhatóságra használható módszerek elemzése

A numerikus megoldás során a (42.) – (47.) összefüggésekből álló modellt kell megoldani. Ez egy nemlineáris differenciál-egyenletrendszer:

- a megoldás során a lövés folyamatot nem kell külön vizsgált szakaszokra bontani. Az aktuális változók pillanatnyi értékéből következik az, hogy a lövedék

⁸ Szerebrjakov M. E. : Vnutrennaja ballisztika, Oborongiz, Moszkva, 1962

áll vagy már mozog illetve, hogy a lőpor elégett-e már, és így egységes független változó - célszerűen a jelenség időbeli lefutása - alkalmazható;

- a felállított egyenletek noha továbbra is tartalmaznak elhanyagolásokat, közelítéseket, de lényegesen kisebb mértékben és nem kell a jellemzőket középértékükkel behelyettesíteni;
- a lövés jelenségének időbeli lefolyása közvetlenül adódik;
- Az 1. összefüggésben ($u(t) = \frac{de}{dt} = u_1 p(t)^v$) a nem kell alkalmazni a $v = 1$ közelítést, így tetszőleges nyomás tartományra adható megoldás;
- A megoldás számításigénye jelentős, és célszerűen kell kiválasztani a numerikus integrálási eljárást, alapvetően azért, mert a nyomásváltozást leíró (42.) összefüggés megoldása során a derivált érték nagyon magas lehet és nem optimális lépésköz választás esetén a megoldás numerikusan nem stabil.

A Taylor sorfejtés alkalmazásának korlátot szab az a tény, hogy a változók csak implicit módon határozhatók meg és a deriváltak felírása a (42.) – (47.) egyenletrendszerben egyszerűen nem oldható meg.

A Runge – Kutta módszer alkalmazása célszerű a jelen feladatkör megoldására az implicit módon határozható változók és a deriváltak felírása a (42.) – (47.) egyenletrendszerben egyszerűen megoldható. A modell számítási feladatainak megoldására alkalmas módszer. A számítás pontossága, stabilitása és időigénye a „q” célszerű megválasztásával állítható be, jelen feladat megoldása esetén elégséges a $q = 4$ alkalmazása.

2.3. A fejezetből levont következtetések, elvégzett feladatok

Elemeztem a modellt alkotó egyenletek megoldási lehetőségeit, megvizsgáltam a zárt alakban történő megoldás során fellépő közelítések mértékét és elfogadhatóságát. Vizsgáltam a numerikus megoldásra szolgáló eljárásokat és azok alkalmazása során megoldandó feladatokat.

***Megállapítottam**, hogy mivel az általam alkotott modell egy nem lineáris differenciálegyenlet-rendszer, így zárt alakú megoldás nem adható meg csak jelentős mértékű egyszerűsítések árán. A numerikus megoldás végrehajtható. A numerikus megoldásra a Runge-Kutta típusú egyenleteket célszerű felhasználni, azon belül is legalább negyedrendű módszert kell választani.*

3. FEJEZET

A lőpor porozitását kezelő belballisztikai modell megalkotása

3.1. A porózus modell

Az 1. FEJEZET-ben megállapítottam, hogy a fegyver és lőszer azaz a ballisztikai rendszer tervezése során alapvető fontosságú, hogy a lőpor teljes egészében elégjen, hiszen ellenkező esetben a betáplált energia valamely hányada hasznosítás nélkül ég el a fegyver csöve előtt a torkolat láng nagyságát növelve. Ezen követelmény miatt fontos, hogy a lőporszemcse olyan alapanyagból készüljön, hogy az kellően nagy égési sebességet biztosítson, másrészt a lőporszem égőréteg vastagsága optimális legyen.

Alapvető gyártási feladat olyan módszer kidolgozása, amellyel gazdaságosan és megbízhatóan lehet vékony falvastagsággal vagy nagy égési felülettel rendelkező lőporszemcsét gyártani, amelyekből elő lehet állítani, például a pisztolytöltényekben alkalmazható lőpor töltetet. Ugyanis a rövid csövű pisztolyban nem ég el a szokásos módszerekkel előállított lőpor. A töltet jelentős része hasznosítatlanul, elégtelenül, nagy torkolatláng jelenség közepette lép ki a fegyvercsőből.

Ezért új módszert kellett választani a fejlesztőknek. Olyan gyártási módszert kellett megalkotni amely lényegesen megnöveli a lőportöltet égési felületét. **Ez a feladat elvileg két úton oldható meg:**

- **jelentősen le kell csökkenteni** a lőportöltetben lévő lőporszemcsék legalább egy geometriai méretét, és így a sok kisméretű szemcse adja a nagy égési felületet. Ez azt jelenti, hogy nagyon vékony égőrétegű a lőpor. Ekkor azonban az egyes szemcsék mérete és méretszórása nehezen kezelhető és csak nagyon precíz technológiával biztosítható az, hogy az ilyen módon előállított töltettel kilőtt lövedék sebességének szórása ne legyen elfogadhatatlanul nagy.
- **jelentősen meg kell növelni** az egyes lőporszemcsék egyedi felszínét és ezáltal biztosítani a nagy égő felületet. Ez csak úgy biztosítható, ha a lőpor nem tömör, egyszerű geometriai test, hanem szinte „habszerű” gázcellákat tartalmazó

test. Az ilyen test égése során a cellák teljes felületén ég, és a cellák közötti vékony fal biztosítja a kis égőréteget, vagyis a gyors leégést.

Az ilyen habszerűre előállított lőport nevezi a szakmai gyakorlat **porózus lőpornak**.

3.2. A porozitás fizikai és kémiai jelenségének vizsgálata.

A lőporok ballisztikai tulajdonságait befolyásoló tényezők szemléletesen levezethetők néhány ballisztikai alapösszefüggésből.

Az egyszerűbb ballisztikai összefüggések a lőpor égéshőjéből - mely arányos a fajlagos égési sebességgel - az égőréteg vastagságából valamint az alak jellemzőkből indulnak ki.

Az így levezetett égési törvényeket **geometriai égési törvényeknek** nevezik. Ezen törvények csak korrekciók alkalmazásával írják le helyesen a valóságot.

A mai fegyverre szerelhető mérőeszközök, valamint a zárt égésterű ballisztikai bombák számítógépes kiértékeléssel gyors és valósághűbb adatokat adnak - **fizikai égéstörvények** - a lőporok tervezéséhez, értékeléséhez.

A füstnélküli lőporok égési ideje könnyen szabályozható, mert égésük pontos törvényszerűségek szerint történik. Ha az egész töltet egyforma alakú és nagyságú lőpor szemekből áll egy szemcse égési törvényszerűsége alkalmazható az egész töltetre.

A lőpor szemcse a gyullasztó hatására az egész felületén égni kezd és meghatározott, a lőpor összetételétől és az uralkodó nyomástól függő égési sebességgel ég az összes felülektől befelé. Így a lőpor szemcse legkisebb lineáris mérete, a vastagsága a döntő tényező. Ezért a különféle modellek a lőpor szem vastagságát tekintik az égés folyamat leírásához célszerű legfontosabb paraméternek.

Ha a lőport zárt térben – ballisztikai bombában – égetjük és közben mérni tudjuk a nyomást és az égési időt, akkor olyan égési diagrammokat kapunk, amelyeket az jellemez, hogy ugyanazon lőpornak különböző töltési tömeggel felvett diagrammjai

alatti terület – azonos lépték mellett – állandók. Kisebb töltési tömeggel kisebb maximális gáznyomást, de hosszabb égési időt kapunk, mint nagyobb töltettel, de úgy hogy a diagramm alatti terület mindig állandó marad, ugyanis:

$$\text{Az 1. összefüggés alapján közelítően felírható. } \frac{de}{dt} = u_1 * p \quad (48.)$$

$$\text{ebből a teljes lőporszemcse elégésre adódik } \int_0^{e_1} de = u_1 \int_0^{t_v} p dt \quad (49.)$$

$$\text{vagyis } e_1 = u_1 \int_0^{t_v} p dt \text{ legyen} \quad I_v = \int_0^{t_v} p dt \quad (50.)$$

Az (50.) alapján I_v – ami a nyomás diagramm alatti terület - állandó mivel

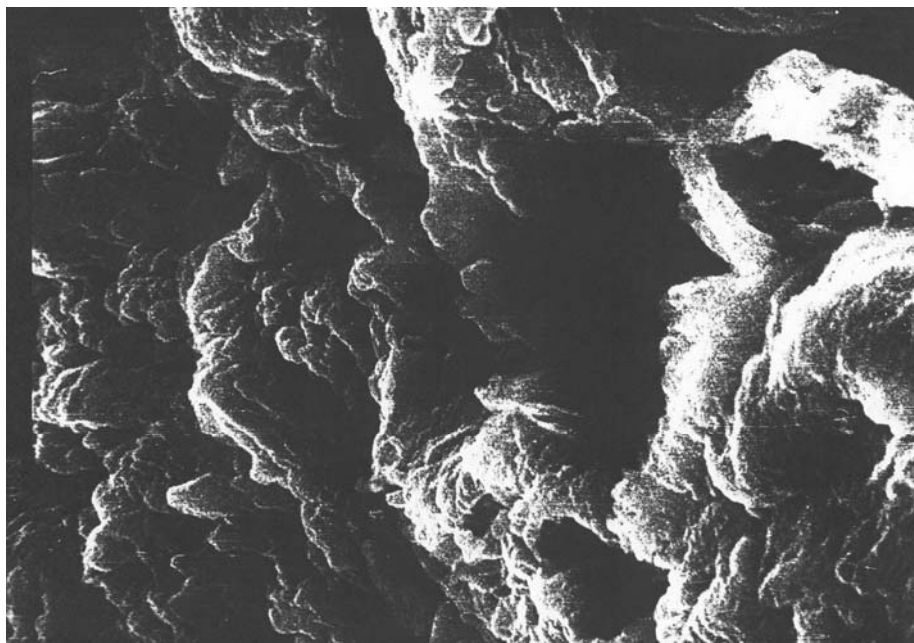
$$I_v = \frac{e_1}{u_1} \quad (51.)$$

csak az e_1 és u_1 anyag jellemző állandóktól függ, és így nem függ a töltet tömegtől. I_v értéke **magában foglalja a lőpor két fő jellemző tulajdonságát a méretet és az összetételt.**

Az I_v alapvető tervezési jellemző, ugyanis ha egy kérdéses fegyverben meghatározható a lövés folyamatra jellemző „ $p = p(t)$ ” függvény, akkor annak integrálásával meghatározható a lövésre jellemző „ I_v ” értéke. A lőpor összetételének ismeretében felvehető a fajlagos égési sebesség „ u_1 ” értéke és ebből egyszerűen számítható a **lőporszemcse falvastagság tervezési értéke:**

$$e_1 = u_1 * I_v \quad (52.)$$

Porózus lőporok leírásához azonban nem elég a geometriai adatokból számított felület illetve elégő égőréteg vastagság. Égés szempontjából sokkal nagyobb felülettel rendelkeznek mint a számítható érték. Valóságban nehezen modellezhető „soklyukú” lőpornak vagy szivacszerűen nagy felületű testnek tekinthetők (1. kép).



1. kép A porózus lőpor felszínének elektronmikroszkópos képe

Az (51.) –ben szereplő „ I_v ” értékét **nem csak a szemcsevastagság hanem a szemcse szerkezete is befolyásolja**. A pórusok mérete, méret eloszlása, össz térfogata, stb. A lőpor ezen belső égő felületét az ipari eljárások során, - például - adalék-ként bevitt KNO_3 - kálium nitrát - adagolásával befolyásolják. A KNO_3 -t szemcseméretével, szemcse eloszlásával, a gyártási technológia során a kioldás körülményeivel (például hőmérséklet, kioldó folyadék koncentrációja, stb) befolyásolható a pórus szerkezet. Az elégszenben a kitüntetett „ e_1 ”-re merőleges irány mellett nagy szerepet játszik a felület minősége. **Minél nagyobb az élek csúcsok száma annál nagyobb hányad ég el oldalirányból az égés befejeződéséig.**

Az **égési sebesség** „ u_1 ” elsősorban NC – nitrocellulóz - függő paraméter. Leginkább a fajlagos égéshőtől azaz a nitrogén tartalomtól függ. De befolyásolja a lőpor-szemcse gél állapota is. A teljesen feloldott NC-ből lassan égő üvegszerű lőpor-szemcse gyártható. A részlegesen oldott NC-ből kapott lőpor szerkezete hasonlít a szálas anyagokkal töltött polimerek szerkezetéhez. Az ilyen lőpor mechanikai tulajdonsága jobb, égése egyenletesebb, égés sebessége nagyobb. Az égési sebesség számértékét, egyenletes szinten tartását elsősorban az NC minősége garantálja. Befolyásolják

azonban a gyártási paraméterek is. Az NC-oldószer arány, visszamaradt KNO_3 , visszamaradt oldószer, sok grafit, nem megfelelő bevonás, stb.

Az eddigiek alapján is **megállapítható, hogy a porózus lőporok tulajdonságait nagyon sok gyártási és anyag paraméter befolyásolhatja.**

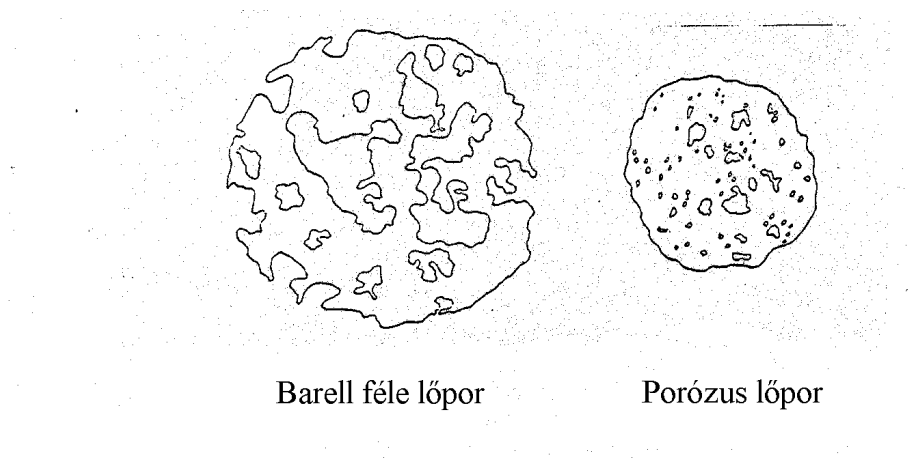
3.3. A porózus lőporok gyártási módszerei

A „porózus lőpor” típusnál a gyártástechnológia révén a lőporszemcsét alkotó masszában zárt vagy nyílt légcellákat „buborékokat” hoznak létre. Ily módon az égés során az égési felszín lényegesen megnő, és az elégendő rétegvastagság lényegesen lecsökken. Ezek következtében a bizonyos pontokon kiegészített meglévő alaptechnológiákkal gyártható lőporszemcsék is képesek lesznek a gyors elégésre vagyis a lőportöltetben lévő energia átadására.

A porózus, azaz az égés számára megnövelt felületű lőporok gyártására eljárásokat a XIX. század végétől dolgoztak ki.

- **Von Freeden** (1891) többé kevésbé porózus lőport állított elő granulálással. Az eljárás során éter-alkohollal zselatinált lőpormasszához vizet kevert. A víz a gélt részlegesen megbontotta.
- **Luck és Crass** (1899) és többen aceton-víz eleggyel állították elő a részlegesen zselatinált lőport. Ezekkel az eljárásokkal előállított lőporok rendkívül élénkek és szabálytalan égésűek voltak.
- **Kniazkowszky és Partyka** (1930) Porózus lőport állítottak elő úgy, hogy az NC – nitrocellulóz –zselatinálásához használt oldószereket (éter-alkohol, aceton-alkohol) még a lágy lőpor szemcséből 45-90 °C-on hirtelen párologtatták el. Az oldószergőz buborékok a lőporszemcsét szivacsossá tették.
- **Nitrokémia** eljárás szerint (1936) a még erősen oldószertartalmú lőpormassza rudakból a présdugattyú sebességével szinkronizált zsilippengék tárcsákat váganak le. A leeső lőporszemek meleg vízbe esnek és így a lőporszemek tovább nem zsugorodnak, és laza lukacsos szerkezetű lőpor áll elő.

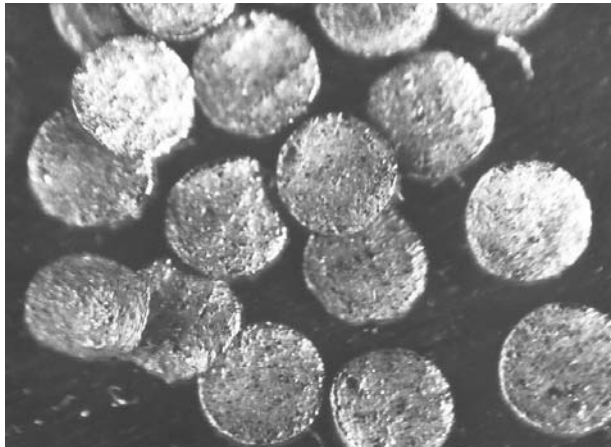
- **Kiterjedt módszer**, hogy a lőpormasszába kristályos anyagokat kevernek be, majd formázás után a szemcséket vízzel vagy más oldószerrel a kristályokat kioldják. Ezt a módszert a XX. század elejétől alkalmazzák. Legáltalánosabban használt kristályos anyag a KNO_3 , amelyet vízzel oldanak ki, de más anyagokat és más oldószereket is javasoltak például $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ –báriumnitrát -ot **Wadsworth** (1908), TNT-t alkohol oldószerrel **Eberlein** (1913), cukrot **du Pont de Nemours** (1941), NaCl -t **Sheldon** (1946).
- **Előállíthatók a porózus lőporok perforáltan** is. Több feltaláló a minőségen kívül a szemcsemérettel is foglalkozik **Regenstein** (1941), **Ball** (1950). **Barell** (1951) olyan porózus lőport tervezett amely nagyobb a szemcsék felületére ki vezető csatornákkal rendelkezett. (2. kép)



2. kép A Barell féle lőpor és a "hagyományos" porózus lőpor összehasonlítása

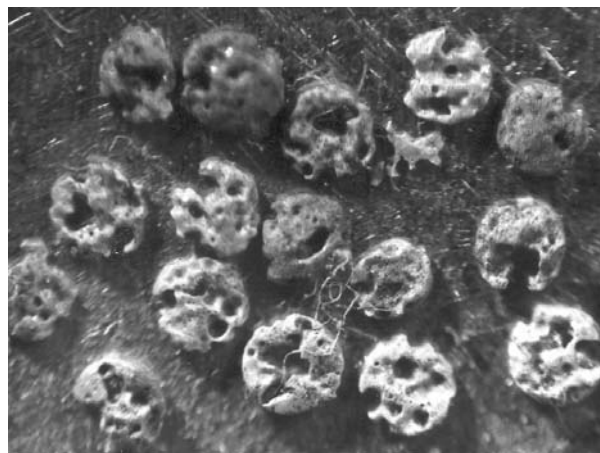
- **Barell** (1950) A porózus lőpor gyártása során laza szerkezetű porózus anyagokat dagaszt be a masszába (keményítő). Ez a lőpor nagyon gyorsan és szabályosan ég.

3.4. A porózus lőpor égésének modellezése



3. kép A porózus lőporszem felszínén a gyártás során különböző méretű üregek képződnek

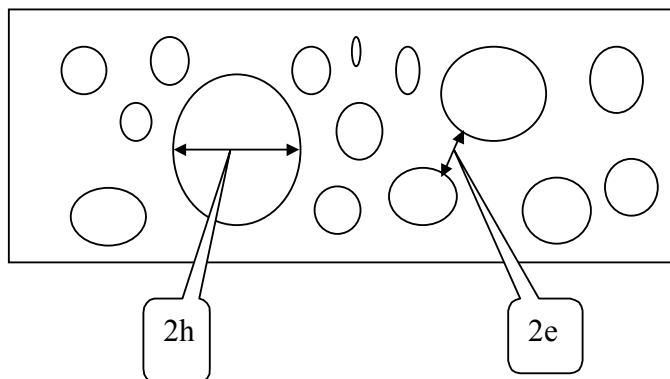
A 3.2. pontban vázolt technológiai elv és a 3.3 pont szerinti gyártás eljárások megvalósítása során, a lőporszemben különféle méretű és alakú üregek képződnek, (1., 2. és 3. kép) amelyek alakja alapvetően felületi feszültségre visszavezethető okok miatt háromtengelyű ellipszoidnak tekinthető. Az égés során a lőporszem a geometriai égéstörvény szerint ég, vagyis amint ha valamelyik üreghez elér az égés, akkor az üreg a teljes belső felületén égni kezd „kifelé”. Ekkor az égési felszín növekedni kezd, (4. kép) így a gáztermelés fokozódik. Ha több üreg összeég, akkor a közrezárt rész egyre csökkenő méretek mellett elég.



4. kép A porózus lőpor felszínén az égés során az üregek mérete jelentősen megnövekszik

3.5. A közelítés szintjei

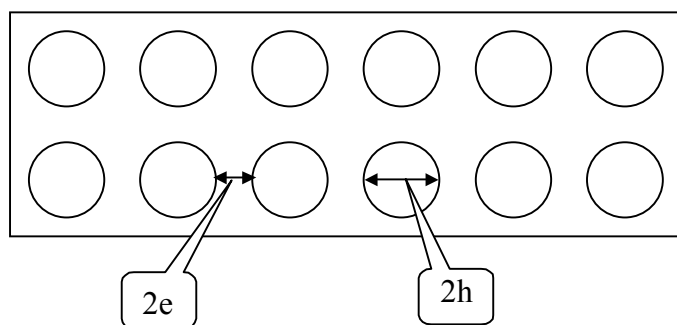
A porózus lőporszem égésének folyamata az üregek mérete és elhelyezkedése miatt (2. ábra) csak sztohasztikus⁹ módszerekkel írható le, de az alapvető folyamat kellő egyszerűsítés után feltárható.



2. ábra A porózus lőporszem természetes véletlenszerű üreg rendszere, ahol $2e$ – az üregek közötti jellemző távolság és $2h$ – az üregek jellemző mérete

A közelítés első szintje:

Az egyszerűbb modell megalkotása során **el kellett vetnem** a véletlenszerű változásokat, (3. ábra) vagyis olyan lőporszemet kellett tekintenem, melyben azonos méretű és homogén elrendeződésű gömb alakú üregek vannak.

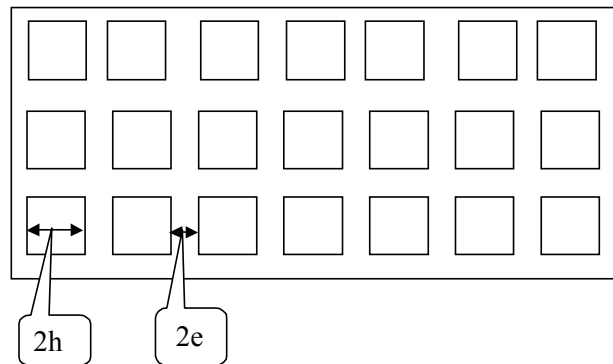


3. ábra A porózus lőporszem első közelítés szerint üreg rendszere, ahol $2e$ – az üregek közötti jellemző *egyenlő* távolság és $2h$ – a *gömb* alakú üregek jellemző mérete

⁹ sztohasztikus: statisztikai valószínűségeen alapuló

A közelítés második szintje:

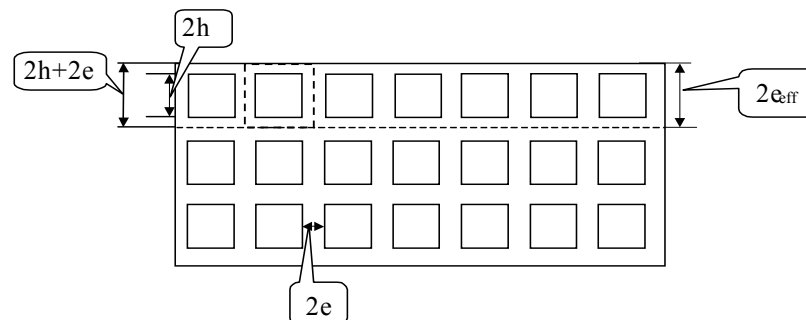
A közelítés következő szintje az volt, hogy eltekintettem a gömb alakú üregek-től, és topológiailag vele ekvivalens alakzatot választottam, úgy, hogy annak égése könnyebben vizsgálható legyen. (4. ábra) A szemléletes tárgyalás miatt a kocka alakzatot választottam.



4. ábra A porózus lőporszem második közelítés szerint üreg rendszere, ahol $2e$ – az üregek közötti jellemző *egyenlő* távolság és $2h$ – a kocka alakú üregek jellemző mérete

3.6. A geometriai égéstörvény általánosítása

A 4. ábra szerinti alakzat égését vizsgálva **további egyszerűsítésként bevezetem** azt a közelítést, hogy a lőpor csak egy oldalán ég. Ez nem lényeges szűkítés, mert a gyakorlatban is alkalmaznak ilyen lőport, például rakétahajtóművekben.



5. ábra

ben ég

Ebben az esetben az 5. ábra segítségével a lőporszem leégését a következő képen írhatom le:

- A lőportestből leég a felső „e” vastagságú réteg.
- A kocka alakú üregek meggyulladnak és leég mind az oldalfalakon, mind a felétrészen „e” vastagságú réteg.
- Ezzel „vissza áll” a kiindulási állapot és indul újra a leégési ciklus.

1. DEFINÍCIÓ:

Az 5. ábra segítségével definiálom a $2e_{\text{eff}}$ „effektív égőréteg” fogalmát. A leégési ciklus során $2e_{\text{eff}} = 2h + 2e$ vastagságú lőpor réteg ég le a lőporszemről. Továbbá, hogy a folyamat $2t_e$ idő alatt játszódik le.

A porózus lőpor égés geometriai modellje

Az eddigiek alapján megalkotható a kibővített modell, amely segítségével leírható a porózus lőporra vonatkozó geometriai égés törvény.

A leégési ciklus során : $2t_e$ idő alatt $2e_{\text{eff}}$ vastagságú lőpor réteg ég le.

2. DEFINÍCIÓ:

Az (53.) összefüggéssel definiálom az u_{eff} „effektív égési sebesség” fogalmát.

$$u_{\text{eff}} = \frac{e_{\text{eff}}}{t_e} \quad (53.)$$

Az égési sebesség mellett meghatározható az a tömeg amely az égési ciklus során elég az e_{eff} réteg leégése során.

3. DEFINÍCIÓ:

Az (54.) összefüggéssel definiálom az δ_{eff} „effektív sűrűség” fogalmát.

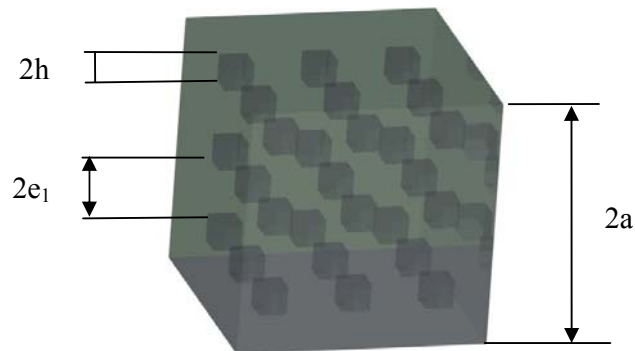
$$\omega_g(t) = \delta * V(t) = \delta * (s(t) * 2e_{\text{eff}} - n * (2h)^3) = \delta_{\text{eff}} s(t) * 2e_{\text{eff}} \quad (54.)$$

Az ily módon definiált három fogalom segítségével a porózus lőporra is könnyen általánosítható a geometriai égéstörvény modellje a következő módon:

$$\omega_g(t) = \delta_{\text{eff}} * \int s(t) u_{\text{eff}} dt \quad (55.)$$

Az (55.) összefüggés alkalmazásánál tekintettel kell lenni arra a tényre, hogy a valóságos lőporszemnél az előbbi közelítések jelentős része **csak korlátozottan** használható. A valóságos lőporszemnél nem beszélhetünk szabályos elrendezésű, azonos méretű, kocka alakú üregekről. A gyakorlatban eltérő méretű, szabálytalan elrendezésű és szabálytalan alakú üregek alakulnak ki a gyártás során a lőporszemekben. Ennek ellenére az alapvető fizikai folyamatokat helyesen írja le az általánosított modell.

3.7. A porozitást leíró matematikai modell feltárása



6. ábra A porózus lőporszem modell szerinti struktúrája

A modell alkalmazásának alapfeltétele a porozitás jellemzők meghatározása, ezért legyen:

- **2a** a kocka alakú lőporszem élhosszúsága [m]
- **2h** a kocka alakú légzárvány „cella” élhosszúsága [m]
- **2e₁** a kocka alakú légzárványok közötti távolság [m]
- **n³** a kocka alakú cellák száma
- **δ** a lőporszem sűrűsége [kg/m³]
- **δ_{eff}** a lőporszem effektív sűrűsége [kg/m³]
- **u** a lőpor égési sebessége [m/s]
- **u_{eff}** a lőpor effektív égési sebessége [m/s]

Az effektív sűrűség δ_{eff} kiszámítása:

$$\text{A lőporszem tömege: } m = (8a^3 - n^3 \cdot 8h^3) \cdot \delta \quad (56.)$$

$$\text{másképpen alkalmazva a } \delta_{\text{eff}} \text{ fogalmát } m = 8a^3 \delta_{\text{eff}} \quad (57.)$$

a (45.) és (46.) alapján

$$\frac{\delta_{\text{eff}}}{\delta} = \frac{(8a^3 - n^3 \cdot 8h^3)}{8a^3} \quad (58.)$$

$$\frac{\delta_{\text{eff}}}{\delta} = 1 - \frac{n^3 h^3}{a^3} = 1 - n^3 \left(\frac{h}{a}\right)^3 \quad (59.)$$

4. DEFINÍCIÓ:

A (60.) összefüggéssel definiálom a **pf** „porozitási faktor” fogalmát.

$$\text{pf} = n \frac{h}{a} \quad (60.)$$

A **porozitási faktor megmutatja** a lőporszemcsében lévő cellák száma „**n**”, a cellák jellemző mérete „**h**” és a lőporszemese jellemző mérete „**a**” közötti viszonyt. A porozitási faktor értéke elvileg 0 és 1 között változhat.

- **0 érték esetén kapjuk** a „tömör lőporszemcsét”, a klasszikus értelemben vett lőpor szemcsét, amely nem tartalmaz cellákat, csak a lőpor alapanyagot.
- **1 érték esetén kapjuk** a „légiés lőporszemcsét”, azt az „elvi lőporszemcsét”, amely nem tartalmaz lőpor alapanyagot, csak cellákat.

A porozitási faktor általánosítva is értelmezhető. Mivel mint nulla és egy között értéket felvevő mutató a geometriai jellemzőktől elvonatkoztatva is jellemzi az adott lőport. A levezetés során használt közelítés sorozat minden esetben megtartotta az eredeti topológiai jellemzőit, ezért a cellák speciális sajátosságainak rögzítése nélkül is jellemezhető segítségével a porozitás.

5. DEFINÍCIÓ:

A porozitási faktor segítségével tovább egyszerűsítve a felírást és megadható a (61.) definiáló összefüggés:

$$\frac{\delta_{\text{eff}}}{\delta} = 1 - pf^3 \quad (61.)$$

Az 5. definíció felhasználásával a geometriai adatok a porózus lőporban lévő cellák darabszáma és mérete alapján meghatározható a mértékadó kockára jellemző „átlagsűrűség”, az ami figyelembe veszi az üregek jelenlétét. **Ezen definíció alapján tetszőleges alakú porózus lőporszemre is megadható a jellemző sűrűség értéke.**

Az effektív égési sebesség u_{eff} kiszámítása :

A lőporszem egy rétegében $2e_1$ elegendő lőpor van, és ezen felül $2h$ cella magasságú lőpor cellafal, vagyis amíg normál lőpornál leég $2e_1$ addig porózus lőpornál leég $2e_1+2h$ réteg. Ezzel

$$\frac{u_{\text{eff}}}{u} = \frac{2e_1 + 2h}{2e_1} = \frac{e_1 + h}{e_1} \quad (62.)$$

$$\text{mivel } 2e_1 = \frac{2a - n * 2h}{n} \Rightarrow e_1 = \frac{a - nh}{n} \quad (63.)$$

további átalakítások után felírhatom:

$$\frac{u_{\text{eff}}}{u} = 1 + \frac{nh}{a - nh} = 1 + \frac{\frac{n}{a}h}{1 - n\frac{h}{a}} = \frac{1}{1 - n\frac{h}{a}} \quad (64.)$$

6. DEFINÍCIÓ:

A porozitási faktor segítségével tovább egyszerűsíthető a felírás és megadható a (65.) definiáló összefüggés:

$$\frac{\mathbf{u}_{\text{eff}}}{\mathbf{u}} = \frac{1}{1 - pf} \quad (65.)$$

A 6. definíció felhasználásával a geometriai adatok a porózus lőporban lévő cellák darabszáma és mérete alapján **meghatározható** mértékadó kockára jellemző „átlagos égési sebesség”, azt ami figyelembe veszi az üregek jelenlétét. **Ezen definíciók alapján tetszőleges alakú porózus lőporszemre is megadható a jellemző égési sebesség értéke.**

A (61.) és (65.) összefüggések a gyakorlati tapasztalatokkal összeegyeztethetők.

- A **lőpor sűrűsége** δ_{eff} a lőpor alapanyag sűrűsége δ , és a $\mathbf{0}$ elvi érték között változhat, δ a tömör lőporszemcse esetén és $\mathbf{0}$ a légies lőporszemcse esetén.
- A **lőpor égési sebessége** \mathbf{u}_{eff} a lőpor alapanyagból adódó égési sebesség \mathbf{u} , és a „végtelen nagy” elvi érték között változhat, \mathbf{u} a tömör lőporszemcse esetén és „végtelen nagy” a légies lőporszemcse esetén.

a
 $\delta_{\text{eff}}/\delta$ pf u_{eff}/u
 összefüggő értékei

$\delta_{\text{eff}}/\delta$	pf	u_{eff}/u	$\delta_{\text{eff}}/\delta$	pf	u_{eff}/u	$\delta_{\text{eff}}/\delta$	pf	u_{eff}/u
1,00	-	1,000	0,66	0,698	3,311	0,33	0,875	8,002
0,99	0,215	1,275	0,65	0,705	3,387	0,32	0,879	8,290
0,98	0,271	1,373	0,64	0,711	3,465	0,31	0,884	8,595
0,97	0,311	1,451	0,63	0,718	3,545	0,30	0,888	8,921
0,96	0,342	1,520	0,62	0,724	3,627	0,29	0,892	9,269
0,95	0,368	1,583	0,61	0,731	3,712	0,28	0,896	9,641
0,94	0,391	1,643	0,60	0,737	3,799	0,27	0,900	10,041
0,93	0,412	1,701	0,59	0,743	3,889	0,26	0,905	10,472
0,92	0,431	1,757	0,58	0,749	3,982	0,25	0,909	10,936
0,91	0,448	1,812	0,57	0,755	4,078	0,24	0,913	11,439
0,90	0,464	1,866	0,56	0,761	4,177	0,23	0,917	11,985
0,89	0,479	1,920	0,55	0,766	4,279	0,22	0,921	12,581
0,88	0,493	1,973	0,54	0,772	4,385	0,21	0,924	13,233
0,87	0,507	2,027	0,53	0,777	4,494	0,20	0,928	13,950
0,86	0,519	2,080	0,52	0,783	4,608	0,19	0,932	14,743
0,85	0,531	2,134	0,51	0,788	4,725	0,18	0,936	15,623
0,84	0,543	2,188	0,50	0,794	4,847	0,17	0,940	16,606
0,83	0,554	2,242	0,49	0,799	4,974	0,16	0,944	17,711
0,82	0,565	2,297	0,48	0,804	5,106	0,15	0,947	18,964
0,81	0,575	2,352	0,47	0,809	5,243	0,14	0,951	20,395
0,80	0,585	2,408	0,46	0,814	5,386	0,13	0,955	22,046
0,79	0,594	2,465	0,45	0,819	5,535	0,12	0,958	23,972
0,78	0,604	2,523	0,44	0,824	5,690	0,11	0,962	26,247
0,77	0,613	2,582	0,43	0,829	5,853	0,10	0,965	28,977
0,76	0,621	2,642	0,42	0,834	6,022	0,09	0,969	32,312
0,75	0,630	2,702	0,41	0,839	6,200	0,08	0,973	36,481
0,74	0,638	2,764	0,40	0,843	6,387	0,07	0,976	41,841
0,73	0,646	2,827	0,39	0,848	6,583	0,06	0,980	48,986
0,72	0,654	2,892	0,38	0,853	6,789	0,05	0,983	58,989
0,71	0,662	2,958	0,37	0,857	7,006	0,04	0,986	73,991
0,70	0,669	3,025	0,36	0,862	7,235	0,03	0,990	98,993
0,69	0,677	3,094	0,35	0,866	7,476	0,02	0,993	148,996
0,68	0,684	3,164	0,34	0,871	7,731	0,01	0,997	298,998
0,67	0,691	3,237						

1. táblázat az effektív értékek és porozitási faktor összetartozó értékei

A **gyakorlati alkalmazás** során δ_{eff} paraméter értéke a szokásos fizikai-kémiai laboratóriumi mérőeszközökkel meghatározható. A lőporszemcse befoglaló geometriai adatai megfelelő preparálást követően mérő mikroszkóppal meghatározhatók. A lőporszemcse tömege pedig laboratóriumi mérleggel megmérhető. A geometriai adatokból a lőporszemcse befoglaló térfogata számítható. A befoglaló térfogat és a tömeg ismeretében a δ_{eff} értéke számítható.

A δ_{eff} és δ ismeretében a (60.) összefüggés felhasználásával a porozitási faktor számítható.

A porozitási faktor és a lőpor alapanyag összetételének ismeretében a (65.) összefüggés felhasználásával az u_{eff} számítható.

A gyakorlati alkalmazás során természetesen az „ u_{eff} ” és „ δ_{eff} ” paraméterek nem egyeznek meg pontosan az 1. táblázat értékeivel egyrészt mert az alkalmazott geometriai égéstörvény nem pontosan írja le az égés folyamatát, másrészt pedig „ u_{eff} ” és „ δ_{eff} ” paramétereket valószínűségi változónak kell tekinteni adott várható értékkel és szórással. Konkrét gyártmánynál lehet további vizsgálódás tárgya, hogy milyen típusúak e valószínűségi változók. A gyártási technológia alapján - első közelítésként - feltételezhető, hogy e változók normális eloszlású valószínűségi változók adott várható értékkel és szórással.

3.8. A porózus lőpor belballisztikai modellje

A klasszikus lőporra vonatkozóan az 1.3.2. pontban ismertettem az általam kidolgozott belballisztikai modellt, e modellnek az ismertetteken túlmenően további előnye, hogy egyszerűen figyelembe vehetők, bevezethetők azok a módosítások amelyekkel a porózus lőporszemcséből álló lőportöltet miatt szükségesek. Ezek figyelembe vételével a következő modell írható fel:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{f \frac{d\omega}{dt} - p(t) \left(\left(\frac{1}{\delta_{\text{eff}}} - \alpha \right) \frac{d\omega}{dt} + S_{\text{KV}}(t) \right)}{W_0 - \frac{1}{\delta_{\text{eff}}} (\omega_0 - \omega(t)) - \alpha \omega(t) + S_I(t)} \quad (\text{módosított 42.}) \quad (66.)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{Sp(t)}{\varphi q} \quad (43.) \quad (67.)$$

$$\frac{dl}{dt} = v(t) \quad (44.) \quad (68.)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega}{\omega_1} \delta_{\text{eff}} \left(3a_3 e(t)^2 + 2a_2 e(t) + a_1 \right) \frac{de}{dt} \quad (\text{módosított 45.}) \quad (69.)$$

$$\frac{de}{dt} = u_{1\text{eff}} p(t)^v \quad (\text{módosított 47.}) \quad (70.)$$

A (módosított 42.) (66.) jelű összefüggés határozza meg a gáz nyomás változását a fegyverben a lövés alatt. A módosítás arra terjed ki, hogy a tömör lőpor sűrűségét megadó δ helyett a porózus lőport jellemző δ_{eff} –et kell megadni.

A (43.) (67.) jelű összefüggés módosítás nélkül határozza meg a lövedék sebesség változását a fegyverben a lövés alatt.

A (44.) (68.) jelű összefüggés módosítás nélkül határozza meg a lövedék elmozdulás változását a fegyverben a lövés alatt.

A (módosított 45.) (69.) jelű összefüggés határozza meg a képződő lőpor égéstermék gáz mennyiségének változását a fegyverben a lövés alatt. A módosítás arra terjed ki, hogy a tömör lőpor sűrűségét megadó δ helyett a porózus lőport jellemző δ_{eff} –et kell megadni. **Azaz porózus lőpor esetén is a lőpor szemcse befoglaló méretei segítségével határozhatók meg az alakfüggvény tényezői.**

A (módosított 47.) (70.) jelű összefüggés határozza meg a lőpor égési sebességét.

A lőpor égési sebessége az (1.) összefüggés alapján:

$$u = u_1 p^v \text{ ezért felírható, hogy } u_{\text{eff}} = u_{1\text{eff}} p^v \quad (71.)$$

A módosítás arra terjed ki, hogy a (71.) összefüggés alapján a lőpor anyagösszetételétől függő u_1 helyett a porózus lőport jellemző $u_{1\text{eff}}$ –et kell megadni. **Azaz po-**

rózus lópor esetén is a lópor anyagi összetétele segítségével határozható meg a lópor szemre jellemző fajlagos égési sebesség.

3.9. A porózus lópor modell számítógépes programja

A számítógépes program elkészítése során célul tűztem ki, hogy olyan programot hozzak létre, amely felhasználásával egyszerűen könnyen lehet nem csak a kezdeti adatokat, hanem a program struktúráját is módosítani. Több korszerű és klasszikus programnyelv jöhetett számításba, például a „Maple” és a „BASIC” különféle változatai. Mivel a program elkészítésénél nem tűztem ki célul az általános felhasználó felé való kereskedelmi célú terjesztést, ezért a ki- és bemeneti felületeket a lehető legegyszerűbbre kívántam megválasztani, és alapvetően a fizikai- kémiai- jelenségek leíró differenciál egyenletrendszer megoldására koncentráltam.

A programot QB 4.5 programnyelven készítettem el MS Windows környezetben. A program több változatban is elkészült.

- Készült olyan változata, amely csak a **klasszikus belballisztikai modell** szerinti számításra volt képes, de a teljes lövési folyamatot végig követte. Ez a változat felhasználásra került többek között a 12,7 mm-es GEPÁRD mesterlövész puska ballisztikai tervezési feladatai során.
- Készült olyan változata, amely a **klasszikus belballisztikai modell** szerinti számításra volt képes, de figyelembe vette a **bemenő adatok sztohasztikus jellegét**, és a teljes lövési folyamat kellően sokszori lefuttatását követően meghatározta a **kimenő (főbb) adatok sztohasztikus jellemzőit**.
- Végül elkészült jelen értekezés szerinti változata, amely a korábbi klasszikus modellen túlmenően a **porózus lóporok belballisztikai modellje** szerinti számításra képes, állandó térfogaton ballisztikai bomba vizsgálatok ellenőrzése céljából, de a teljes lövési folyamat végigkövetésére is alkalmassá tehető.

Az elkészített program a futása során az adatbevitelt követően végrehajtja a modellnek megfelelő számításokat. A bemenő adatokat egy adattömbbe menti le. A differenciál egyenletrendszert negyedrendű Runge-Kutta módszerrel oldja meg alapve-

tően az idő függvényében. A program a számítás során ciklusonként lementi egy adat tömbbe a nyomást, és a többi főbb lőpor adatot olyan módon, hogy a modell szerinti számításokat követően egyszerűen elemezhető legyenek az adatok. A program több leállási feltétellel rendelkezik. A számítási feladat közben képernyőn megjeleníti a nyomás – idő függvény diagrammja. A program számítási feladat befejeztével az adat tömböt további felhasználásra (MS Excel, MS Word) alkalmas módon lementi. A program az alapvető kimenő eredményeket adatlapra nyomtatja ki. Formázott kimenő adatok azonban a lementett adattömb felhasználásával készíthetők az igényeknek megfelelően az MS Excel vagy MS Word esetleg más alkalmas szoftver segítségével.

3.10. A fejezetből levont következtetések, megoldott feladatok.

***Elemeztem** a porózus lőpor alkalmazásának szükségességét. **Megvizsgáltam** az elvi gyártási technológiákat és indokoltam a porózus lőpor gyártásának megvalósíthatóságát. **Elemeztem** lőporgyártás fizikai-kémiai folyamatát.*

*Irodalmi források alapján **elemeztem** a porózus lőpor gyártására kidolgozott technológiákat kronológiai sorrendben.*

***Megalkottam** a porózus lőpor geometriai és belballisztikai modelljét. **Definiáltam** az effektivitás fogalmát és definíciókat adtam az effektív égőréteg, az effektív égési sebesség, az effektív sűrűség és a porozitási faktor fogalmára.*

***Elkészítettem** a porózus lőpor modelljét megvalósító számítógépes programot.*

4. FEJEZET

Kísérleti ballisztikai ellenőrzés

4.1. Az ellenőrzés problémái

A modell ellenőrzéséhez meg kell mérni a vizsgálatra kiválasztott porózus lőpornál a lőporszemen belüli üregek eloszlását és méreteit. Erre számos mérési eljárást kidolgoztak és használnak mind a laboratóriumi mind az ipari gyakorlatban.¹⁰ Ez alapján lehet becslést adni az „ $u_{1\text{eff}}$ ” és „ δ_{eff} ” paraméterek várható értékére és szórására. Azonban ez a mérés csak nagy nehézségekkel hajtható végre. Nyílt cellás lőporszemnél még csak van vizsgálati labor metodika, de zárt cellás lőporszemre csak nehezen végrehajtható és tájékoztató jellegű mérésre van lehetőség. Ezért az a módszer kínálkozik, hogy előzetes becslést téve a paraméterekre, ballisztikai számítást és mérést végzünk a becsült adatokkal, és összevetjük a becsléssel kapott adatokat a méréssel. Kellő egyezés esetén elfogadjuk a becsült paramétereket és a továbbiakban, ezt használjuk fel.

4.2. Ellenőrzés bomba vizsgálattal

Ballisztikai bomba vizsgálatot végezve, fel kell venni a gáznyomás – idő függvényt, úgy, hogy a begyűjtési feltételek a homogén gyulladás szempontjából optimálisak legyenek. A kapott adatokat össze kell vetni a ballisztikai bomba matematikai modelljén végrehajtott számítással. Eltérés esetén alapvetően az „ $u_{1\text{eff}}$ ” és „ δ_{eff} ” paramétereket megváltoztatva és újra számítva közelíthetők a számított és mért adatok. Ha az eltérés „kellően” kicsi akkor elfogadható a további számítások alapjául és beilleszthető a modellbe.

4.2.1. Kísérleti terv készítése a végrehajtandó vizsgálatokról.

A kísérlet célja:

A kísérlet során mérni és rögzíteni kell a kiválasztott lőportípusok belballisztikai alapjellemezőit és további feldolgozásra alkalmas módon rögzíteni kell a mért jellemzőket.

¹⁰ Madarász Géza: Porózus lőporok (Rex) tulajdonságait befolyásoló tényezők, Nitrokémia Balatonfüzfő-Gyártelep, 1991,(kézirat)

A kísérlet menete:

A lőpor kiválasztása: A vállalat gyártási profiljában lévő különböző élénkségű¹¹ lőporok kijelölése, a figyelembe vehető lőporok közül az alábbiakat választottam ki (csökkenő élénkségi sorrendben):



REX 24g, REX 28g, REX 32g, REX 36g, REX IV

A lőpor töltet tömeg kiválasztása:

A kijelölt Ballisztika Bomba (5. kép) térfogata 25 cm³,



5. kép AVL B180 T típusú ballisztikai bomba

a bemért lőportömeg: 4,12 g (minden töltettel két párhuzamos mérés sorozat végrehajtása).

A mérés menete:

A ballisztikai bomba záródugóján lévő elektromos gyullasztóra fel kell erősíteni a lőpor töltetet, és azt be kell csavarni a bombába. A kísérletet külön gyullasztó lőpor

¹¹ dinamikus élénkség: képletben - $\Gamma = \frac{1}{p} * \frac{d\Psi}{dt}$ avagy $\Gamma = \frac{1}{p_{max}} * \frac{1 dp}{p dt}$ a nyomás változás sebességének és a nyomásnak az aránya. A lőpor szem elégségének gyorsaságára jellemző mutató.

alkalmazása nélkül kell végrehajtani. A vizsgált lőport közvetlenül az elektromos gyújtó indítja. A nyomás érzékelését a piezoelektromos jeladó végzi. A ballisztikai analizátor rögzíti a mért adatokat, és azokat továbbítja a mérő számítógépre. A kapott adatokból a számítógépes program elkészíti a mérési jegyzőkönyvet.

A kísérlet helye: NITROKÉMIA Rt. Ballisztikai Laboratórium

A kísérlet ideje: 2001.10.04 – 12.

A kísérleten részt vett: Piroska György és a NITROKÉMIA Rt. Ballisztikai Laboratórium kijelölt munkatársai

A kísérleten használt eszközök és anyagok:

1. AVL B180 T típusú ballisztikai bomba
2. HP 9836 számítógép
3. HP 9872 C plotter
4. HP 2631 B printer
5. BDP PASII Ballisztikai analizátor
6. BDP Closed Vessel Analysis program
7. BDP B173 Proputer system
8. 5QP6000M piezo mérő jeladó
9. Különféle lőporok

4.2.2. A bombavizsgálat végrehajtása

A 4.2.1. vizsgálati terv szerinti program végrehajtását követően a 2. táblázat szerinti mérési eredményeket kaptam. A mérési jegyzőkönyveket a 2. melléklet tartalmazza.

Rex IV.		Rex 36g		Rex 32g		Rex 28g		Rex 24g	
Rex IV		Rex III		Rex II		Rex I		Rex 0	
ms	bar	ms	bar	ms	bar	ms	bar	ms	bar
0,735	88	0,829	87	0,911	88	0,969	89	1,009	89
1,203	175	1,185	174	1,201	176	1,205	177	1,201	177
1,421	263	1,339	262	1,329	265	1,297	267	1,271	268
1,549	350	1,429	347	1,403	352	1,351	354	1,317	354
1,645	440	1,499	435	1,459	441	1,393	443	1,357	446
1,713	525	1,553	521	1,503	528	1,429	534	1,387	532
1,769	613	1,599	609	1,541	617	1,459	622	1,413	621
1,817	701	1,639	697	1,573	702	1,487	713	1,435	709
1,859	790	1,673	782	1,603	792	1,511	799	1,455	802
1,893	875	1,705	869	1,631	882	1,535	892	1,473	893
1,923	963	1,735	957	1,657	970	1,555	975	1,489	979
1,949	1050	1,763	1041	1,681	1054	1,575	1063	1,505	1066
1,975	1142	1,791	1127	1,705	1140	1,595	1155	1,521	1153
1,999	1229	1,821	1219	1,731	1233	1,615	1247	1,539	1248
2,023	1313	1,849	1302	1,755	1317	1,633	1328	1,555	1328
2,051	1404	1,881	1391	1,783	1407	1,655	1421	1,575	1419
2,081	1490	1,915	1474	1,813	1492	1,679	1510	1,597	1506
2,117	1575	1,961	1563	1,851	1580	1,707	1594	1,625	1598
2,169	1663	2,029	1648	1,907	1668	1,749	1681	1,659	1682
2,395	1750	2,425	1734	2,122	1754	1,933	1769	1,914	1770
Térfogat tömeg [g/l]	607	Térfogat tömeg [g/l]	504	Térfogat tömeg [g/l]	485	Térfogat tömeg [g/l]	487	Térfogat tömeg [g/l]	449
Nedv. [%]	0,98	Nedv. [%]	1,14	Nedv. [%]	1,16	Nedv. [%]	1,15	Nedv. [%]	1,13
Égéshő [kJ/kg]	3834	Égéshő [kJ/kg]	3753	Égéshő [kJ/kg]	3883	Égéshő [kJ/kg]	4016	Égéshő [kJ/kg]	4035
szemcse magas. [mm]	0,2676	szemcse magas. [mm]	0,2124	szemcse magas. [mm]	0,2273	szemcse magas. [mm]	0,21	szemcse magas. [mm]	0,182
szemcse sugár [mm]	0,784	szemcse sugár [mm]	0,762	szemcse sugár [mm]	0,775	szemcse sugár [mm]	0,7785	szemcse sugár [mm]	0,7685

2. táblázat Mérési eredmények a vizsgálatba bevont lőpor típusokra

4.3. A kísérleti eredmények kiértékelése.

A kísérleti eredmények feldolgozása során megállapítottam, hogy a kapott párhuzamos mérési eredmények szignifikánsan nem különböznek egymástól. Így elegendőnek ítélttem csak az egyik mérési sorozat feldolgozását.

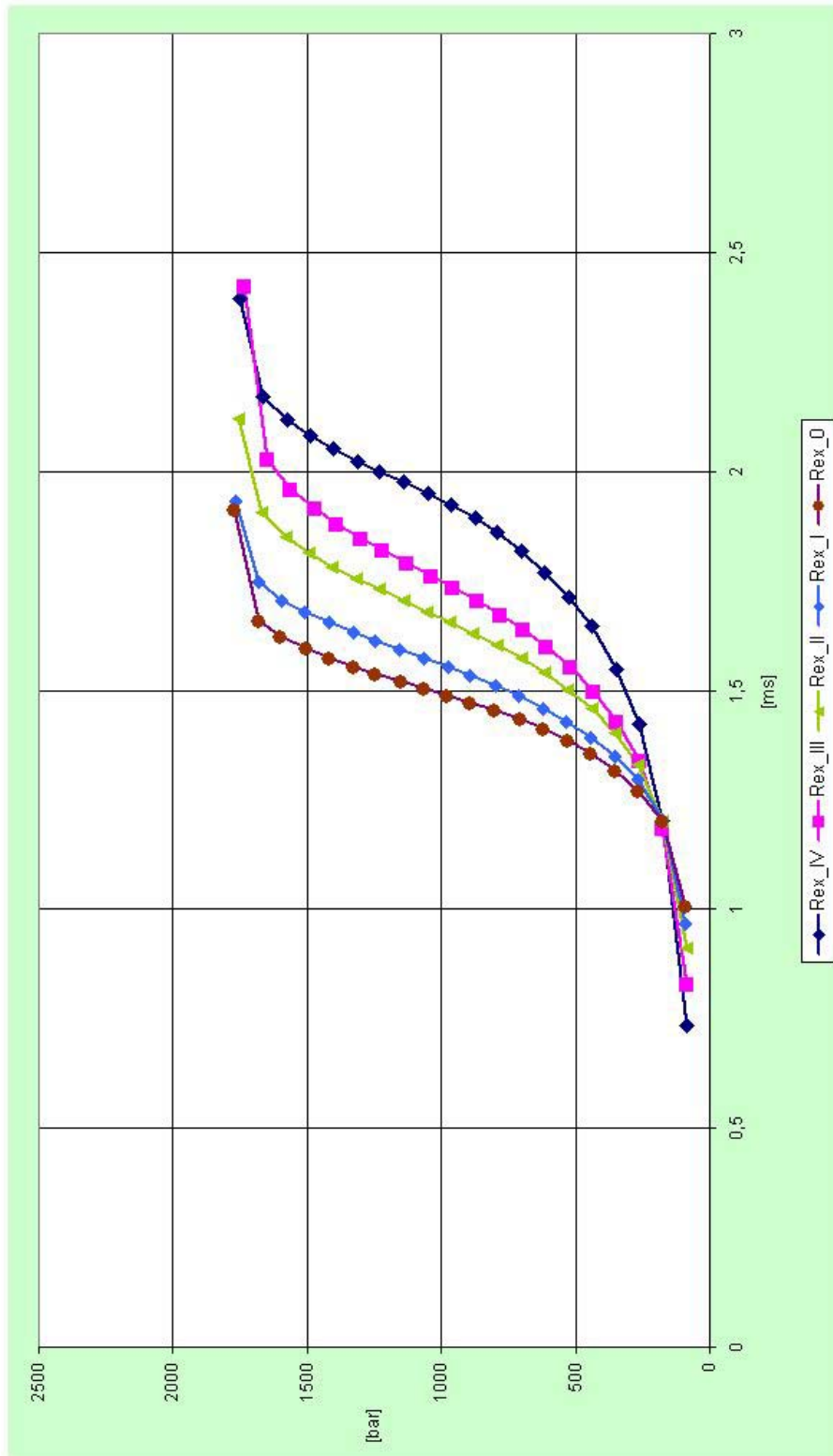
A kiértékelés során elsődlegesen ábrázoltam a nyers mérési adatokat, ezeket a 7. ábra mutatja.

A mérési adatok alkalmasak a további feldolgozásra, mivel nem tartalmaznak sem kiugró adatokat, sem szakadásokat, és a görbék menete is megfelel a ballisztikai modell által jóslott várakozásomnak.

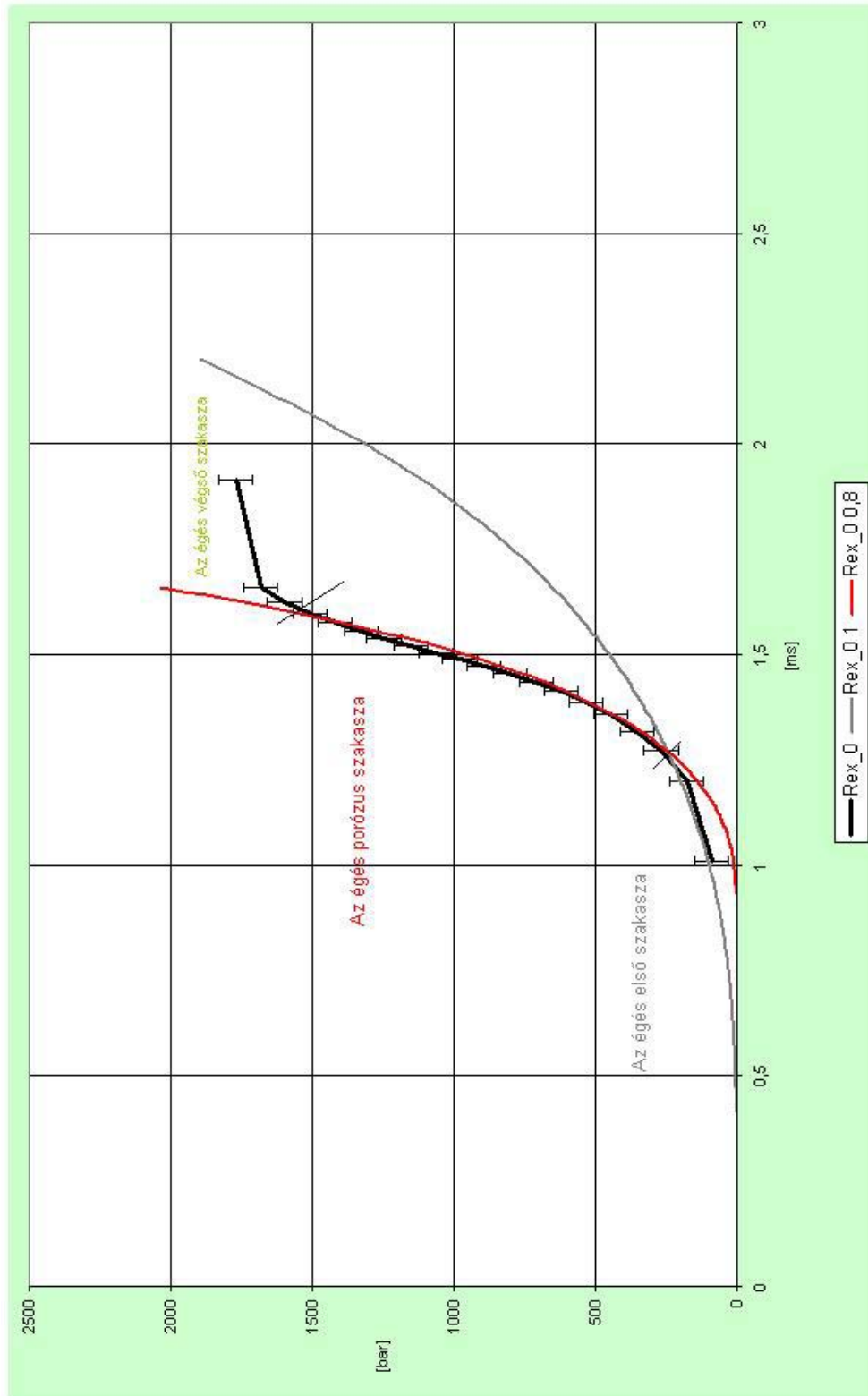
A **7. ábra alapján megállapítottam**, hogy a mérési eredmények egyeznek a gyártási adatokból következő várakozásokkal, miszerint a **Rex_0** lőpor a legélénkebb és a **Rex_IV** lőpor a legkevésbé élénk.

A mérési adatok elsődleges kiértékelése után elvégeztem legfontosabb feladatomat a mérési eredmények és az általam kidolgozott a porózus lőporokra vonatkozó modell eredményeinek összehasonlítását. Az összehasonlításnál azt a módszert választottam, hogy a mérésnél beállított lőpor és térfogat adatokkal meghatároztam a modellel az égés időbeli lefolyását, meghatároztam a nyomás – idő diagrammot. A kapott adatokat közös diagrammon ábrázoltam a mért nyomás - idő adatokkal. Az ábrázolás követően elemeztem a két görbe kölcsönös helyzetét, és megítéltem egyezésük mértékét. A modell szerinti számított adatok és a mért adatok illeszkedését akkor fogadtam el, ha az a 30 bar nagyságú **mérési hiba kétszeresével** összevethető, vagyis az érvényes intervallumban ± 60 bar pontossággal illeszkedik.

A kapott számítási adatokat a 3. melléklet tartalmazza.



7. ábra mérési eredmények a Rex_0 – Rex_IV lőporokra



8. ábra a Rex_0 lőpor mérésének modellezése

A **modell számításnál megállapítottam**, a fizikai folyamattal való egyezés érdekében legalább három szakaszra kell bontani a modell szerinti folyamatot.

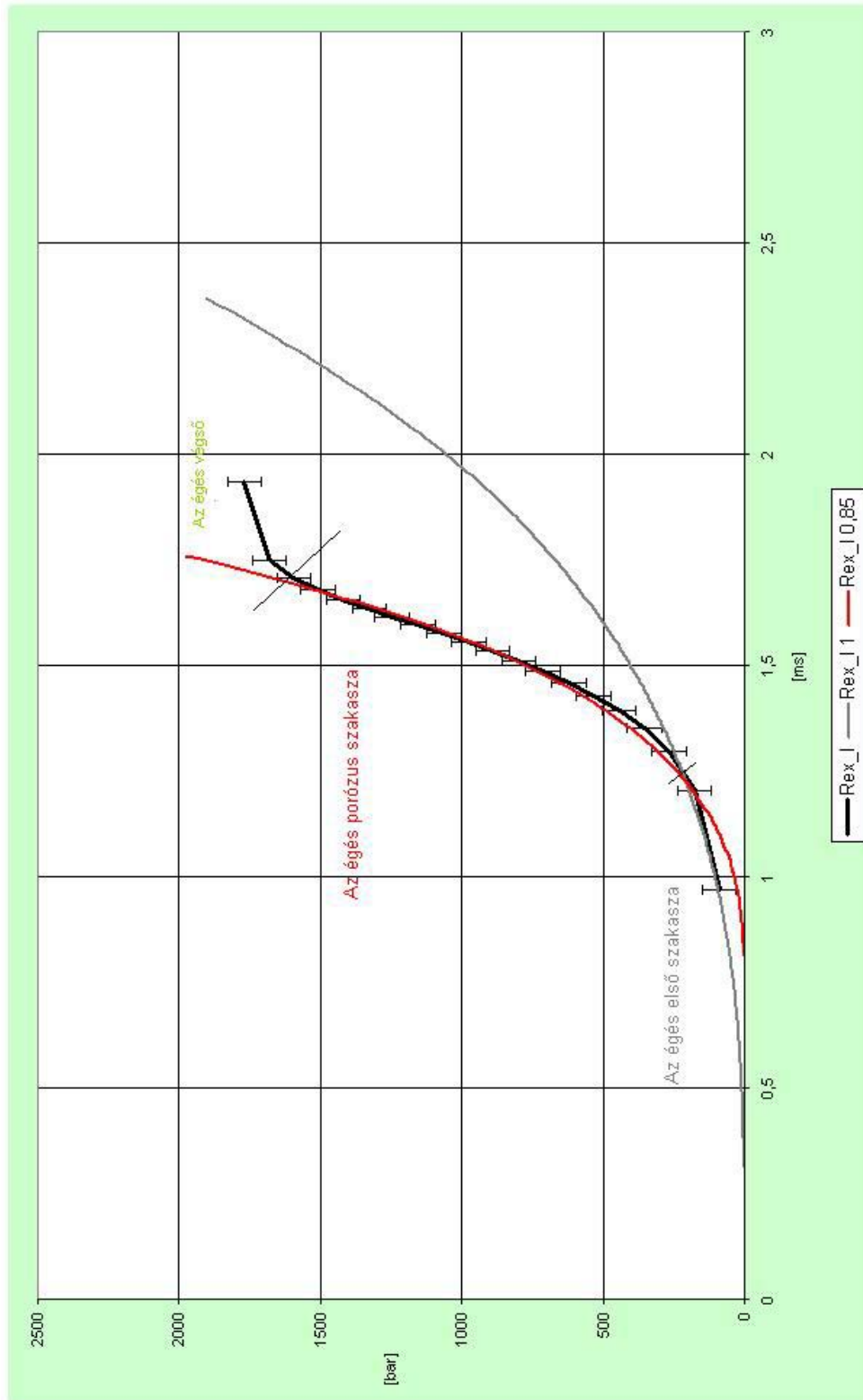
1. *Első szakaszban* mint nem porózus lőpor ég a töltet a reá vonatkozó égési sebességgel. Az első szakaszban történik a lőpor elégésének 15%-a.

2. A kezdeti leégését követően a *porózus égés* szakaszában az akkor érvényes geometria alakzatként ég tovább a lőpor és itt már érvényesül a porozitás, változik az égési sebesség és a „sűrűség”. A modell szerinti görbe, tehát két szakaszból illeszthető össze. A modellezett folyamat valósághoz való illeszkedését támasztja alá az a tény is, hogy a görbék csatlakozási pontjában a két egymástól függetlenül kiszámított leégett égőrétegek közel megegyeznek egymással, amint az a vonatkozó nyomás impulzusok egyezéséből következik. A második szakasz égését a modell leírja a lőpor elégésének 85%-áig.

3. Az ezt követő *végző égésre* nem illeszkedik a modell, de ekkor a valóságban sem minden porózus lőporszem ég, hanem annak széttöredezett maradéka, illetve az egyenlőtlen begyújtás miatt az a lőporszem hányad, amelynek az égése később kezdődött.

A modell szerinti számított adatok és a mért adatok az érvényes intervallumban ± 60 bar pontossággal illeszkedik.

A fizikai folyamathoz történő illeszkedés csupán a görbék időtengely menti eltolását igényli (0,4[ms] illetve 0,92[ms]). Egyezően azzal a ténnyel, hogy a gyújtás jellege miatt (nincs gyullasztó lőpor) a lőpor felszíne csak viszonylag lassan gyullad meg.



9. ábra a Rex_I lőpor mérésének modellezése

A **modell számításnál megállapítottam**, a fizikai folyamattal való egyezés érdekében legalább három szakaszra kell bontani a modell szerinti folyamatot.

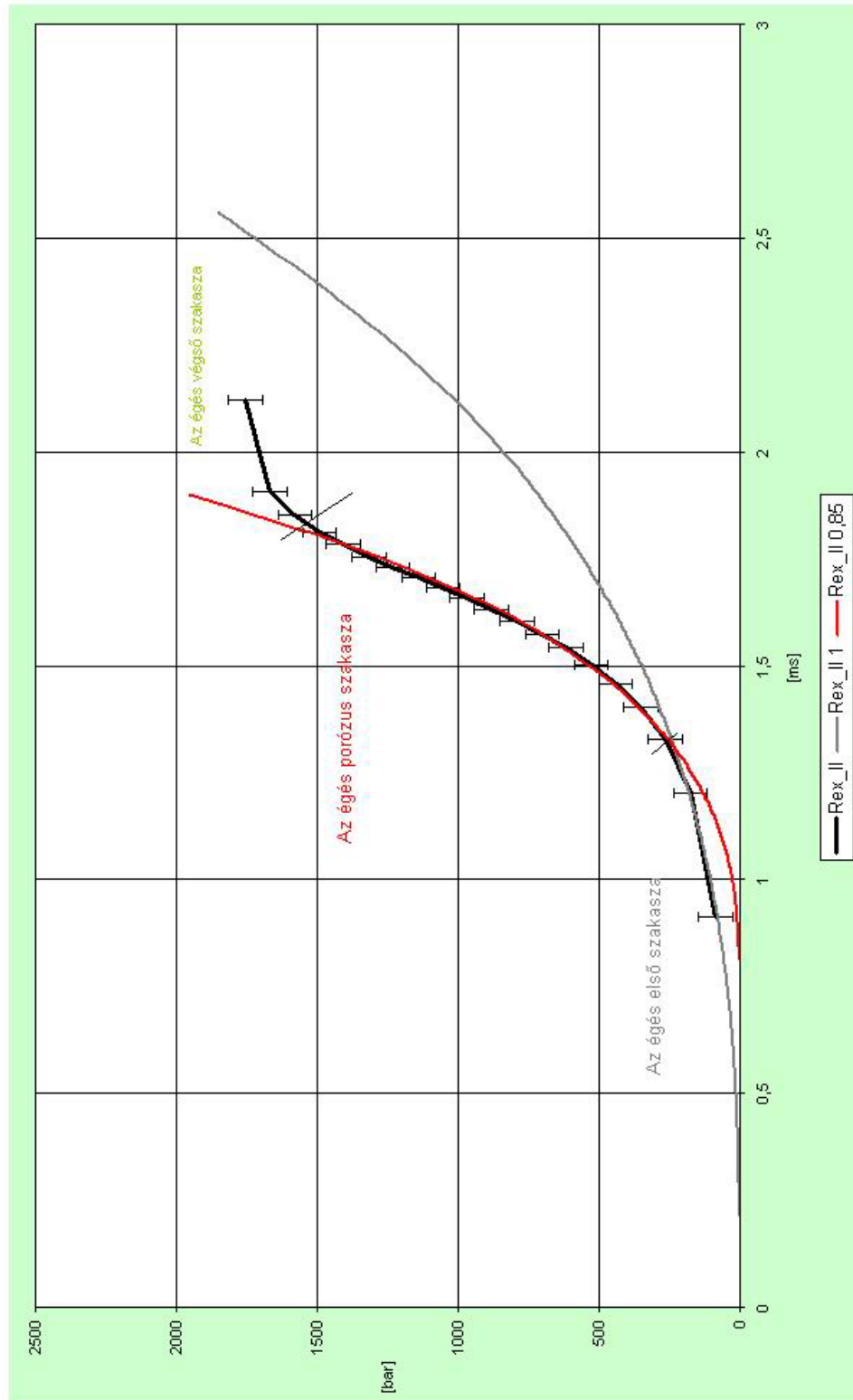
1. *Első szakaszban* mint nem porózus lőpor ég a töltet a reá vonatkozó égési sebességgel. Az első szakaszban történik a lőpor elégésének 15%-a.

2. A kezdeti leégését követően a *porózus égés* szakaszában az akkor érvényes geometria alakzatként ég tovább a lőpor és itt már érvényesül a porozitás, változik az égési sebesség és a „sűrűség”. A modell szerinti görbe, tehát két szakaszból illeszthető össze. A modellezett folyamat valósághoz való illeszkedését támasztja alá az a tény is, hogy a görbék csatlakozási pontjában a két egymástól függetlenül kiszámított leégett égőrétegek közel megegyeznek egymással, amint az a vonatkozó nyomás impulzusok egyezéséből következik. A második szakasz égését a modell leírja a lőpor elégésének 90%-áig.

3. Az ezt követő *végző égésre* nem illeszkedik a modell, de ekkor a valóságban sem minden porózus lőporszem ég, hanem annak széttöredezett maradéka, illetve az egyenlőtlen begyújtás miatt a az a lőporszem hányad, amelynek az égése később kezdődött.

A modell szerinti számított adatok és a mért adatok az érvényes intervallumban ± 60 bar pontossággal illeszkedik.

A fizikai folyamathoz történő illeszkedés csupán a görbék időtengely menti eltolását igényli (0,3[ms] illetve 0,80[ms]). Egyezően azzal a ténnyel, hogy a gyújtás jellege miatt (nincs gyullasztó lőpor) a lőpor felszíne csak viszonylag lassan gyullad meg.



10.ábra a Rex_II lőpor mérésének modellezése

A **modell számításnál megállapítottam**, a fizikai folyamattal való egyezés érdekében legalább három szakaszra kell bontani a modell szerinti folyamatot.

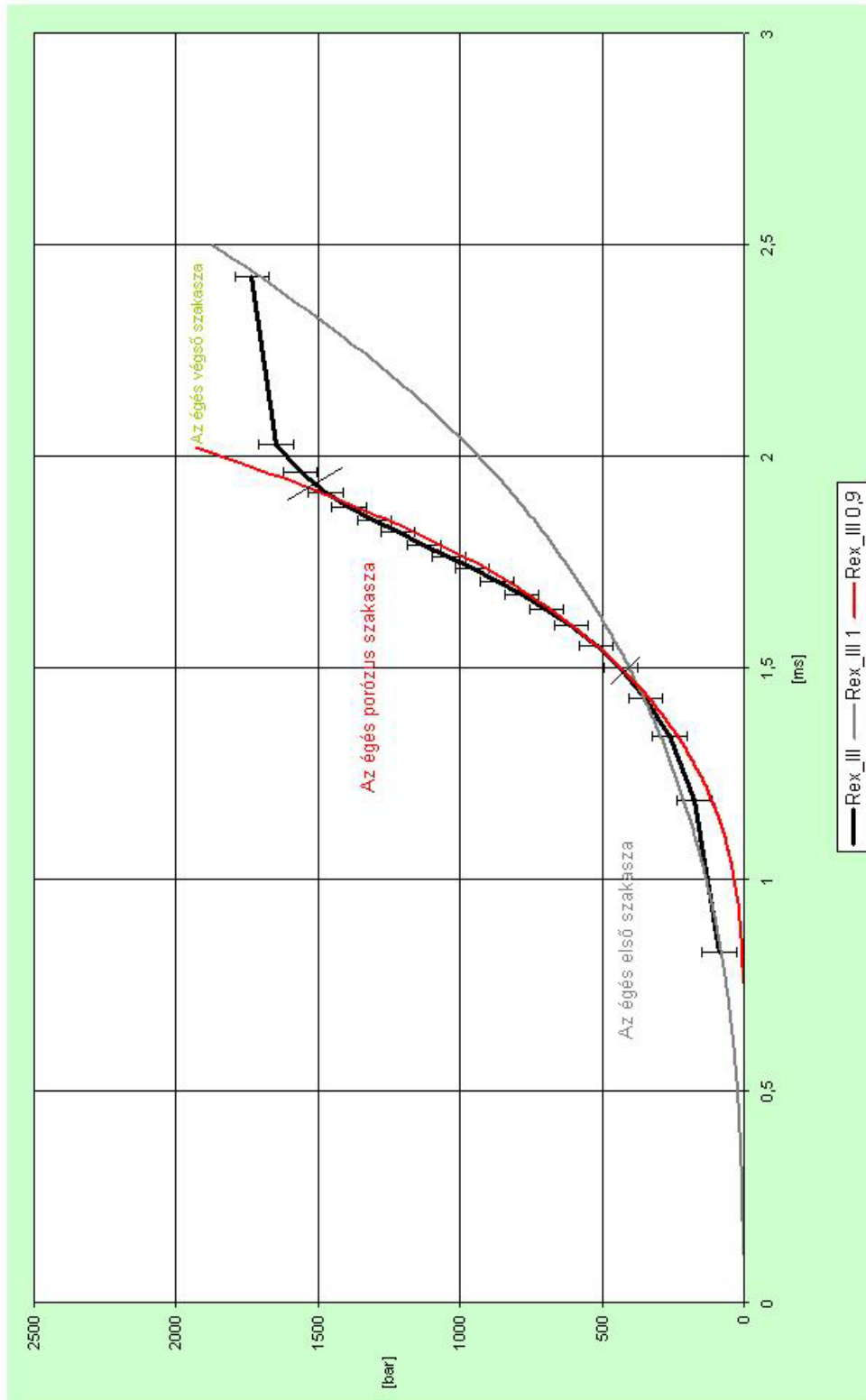
1. *Első szakaszban* mint nem porózus lőpor ég a töltet a reá vonatkozó égési sebességgel. Az első szakaszban történik a lőpor elégésének 15%-a.

2. A kezdeti leégését követően a *porózus égés* szakaszában az akkor érvényes geometria alakzatként ég tovább a lőpor és itt már érvényesül a porozitás, változik az égési sebesség és a „sűrűség”. A modell szerinti görbe, tehát két szakaszból illeszthető össze. A modellezett folyamat valósághoz való illeszkedését támasztja alá az a tény is, hogy a görbék csatlakozási pontjában a két egymástól függetlenül kiszámított leégett égőrétegek közel megegyeznek egymással, amint az a vonatkozó nyomás impulzusok egyezéséből következik. A második szakasz égését a modell leírja a lőpor elégésének 80%-áig.

3. Az ezt követő *végző égésre* nem illeszkedik a modell, de ekkor a valóságban sem a porózus lőporszem ég, hanem annak széttöredezett maradéka, illetve az egyenlőtlen begyújtás miatt a az a lőporszem hányad, amelynek az égése később kezdődött.

A modell szerinti számított adatok és a mért adatok az érvényes intervallumban ± 60 bar pontossággal illeszkedik.

A fizikai folyamathoz történő illeszkedés csupán a görbék időtengely menti eltolását igényli (0,2[ms] illetve 0,80[ms]). Egyezően azzal a ténnyel, hogy a gyújtás jellege miatt (nincs gyullasztó lőpor) a lőpor felszíne csak viszonylag lassan gyullad meg.



11.ábra a Rex_III lőpor mérésének modellezése

A **modell számításnál megállapítottam**, a fizikai folyamattal való egyezés érdekében legalább három szakaszra kell bontani a modell szerinti folyamatot.

1. *Első szakaszban* mint nem porózus lőpor ég a töltet a reá vonatkozó égési sebességgel. A töltetben a valóságnak megfelelően a lőporon lévő bevonat által flegmatizált¹² porózus lőpor ég. Az első szakaszban történik a lőpor elégésének 25%-a.

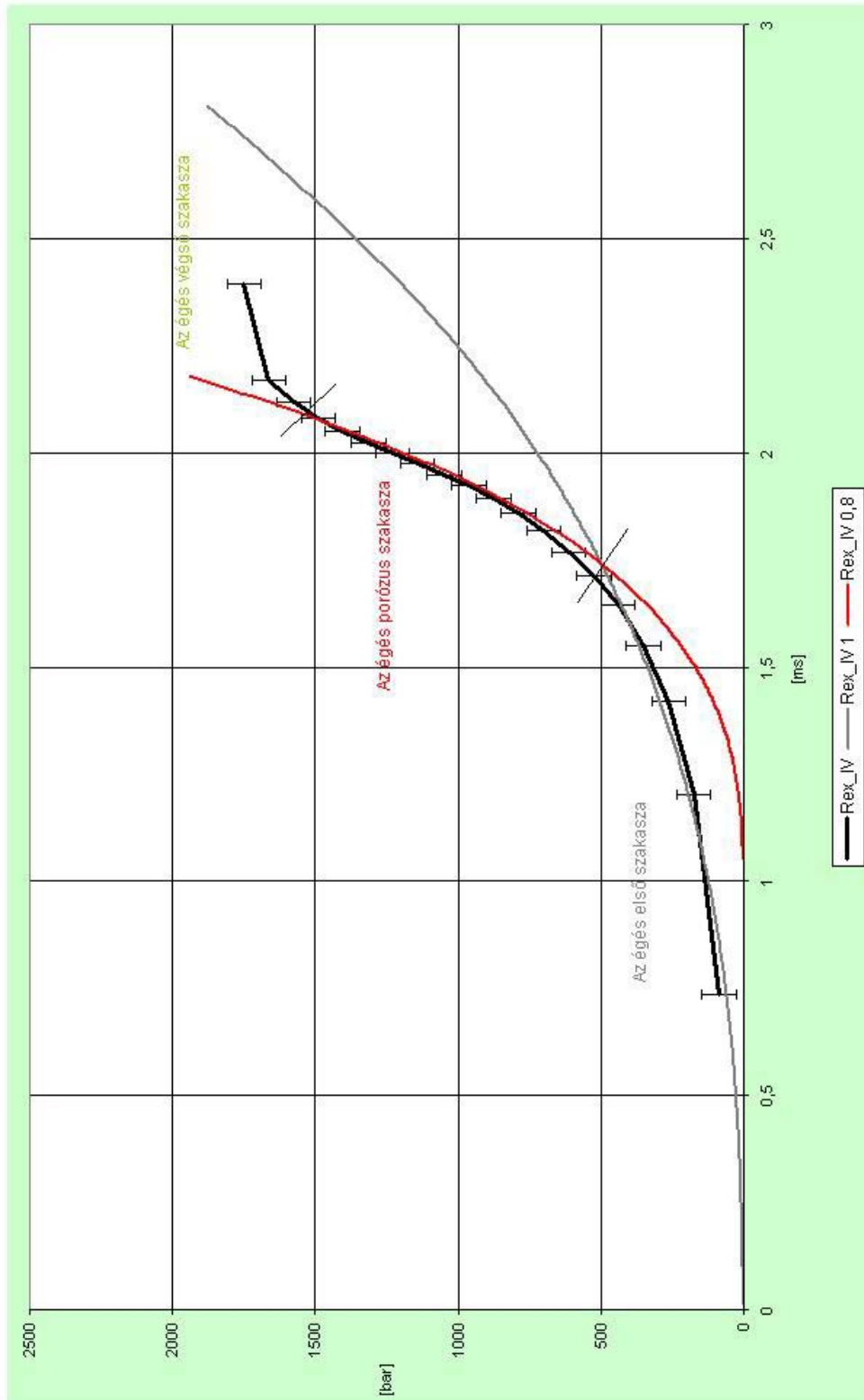
2. A kezdeti leégését követően a *porózus égés* szakaszában az akkor érvényes geometria alakzatként ég tovább a lőpor és itt már érvényesül a porozitás, változik az égési sebesség és a „sűrűség”. A modell szerinti görbe, tehát két szakaszból illeszthető össze. A modellezett folyamat valósághoz való illeszkedését támasztja alá az a tény is, hogy a görbék csatlakozási pontjában a két egymástól függetlenül kiszámított leégett égőrétegek közel megegyeznek egymással, amint az a vonatkozó nyomás impulzusok egyezéséből következik. A második szakasz égését a modell leírja a lőpor elégésének 80%-áig.

3. Az ezt követő *végző égésre* nem illeszkedik a modell, de ekkor a valóságban sem minden porózus lőporszem ég, hanem annak széttöredezett maradéka, illetve az egyenlőtlen begyűjtés miatt a az a lőporszem hányad, amelynek az égése később kezdődött.

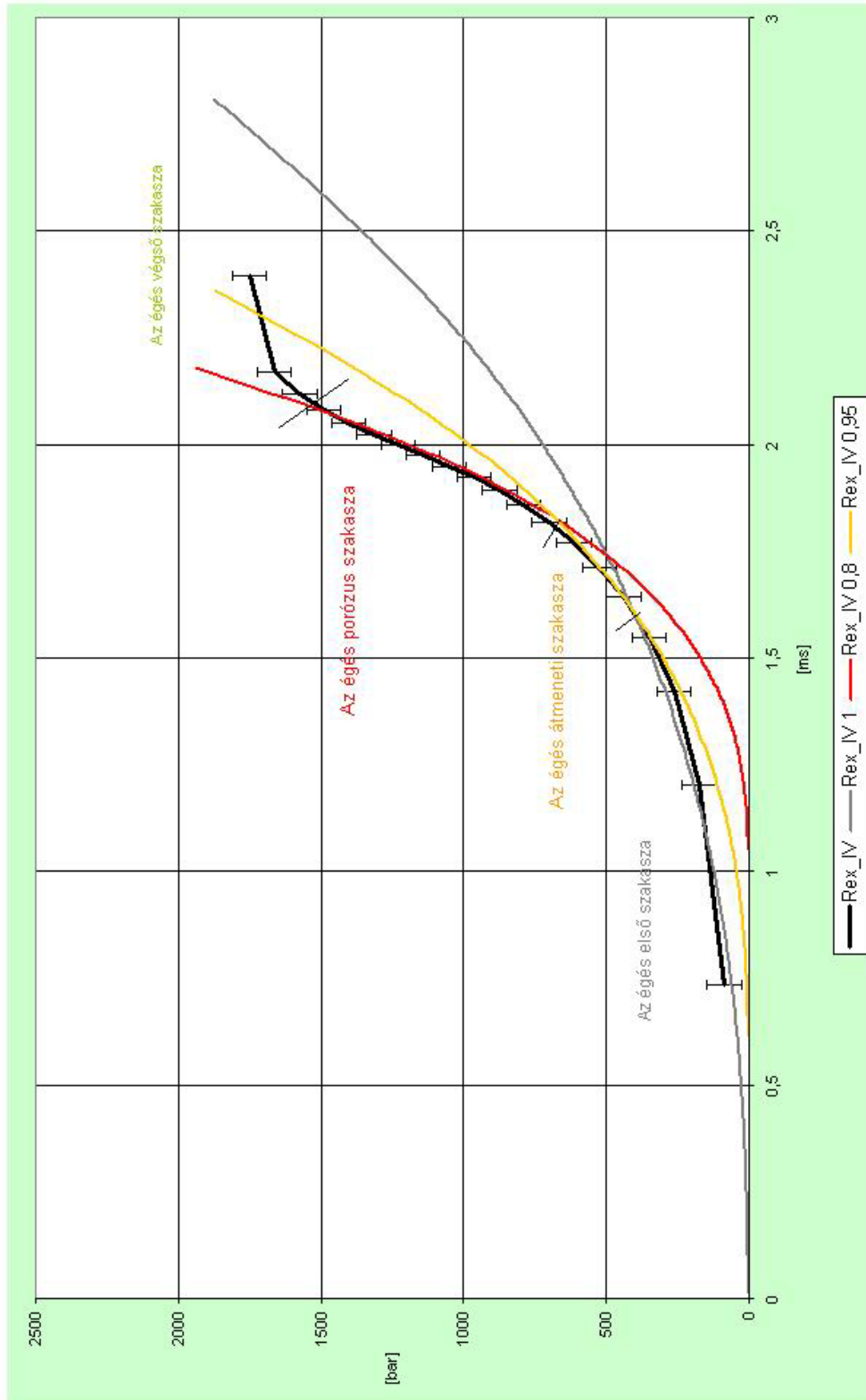
A modell szerinti számított adatok és a mért adatok az érvényes intervallumban ± 60 bar pontossággal illeszkedik.

A fizikai folyamathoz történő illeszkedés csupán a görbék időtengely menti eltolását igényli (0,1[ms] illetve 0,74[ms]). Egyezően azzal a ténnyel, hogy a gyűjtés jellege miatt (nincs gyullasztó lőpor) a lőpor felszíne csak viszonylag lassan gyullad meg.

¹² flegmatizálás: a lőporszemek gyártása során olyan adalékot adnak a félkész termékhez, ami csökkenti a lőpor felületi rétegeinek fajlagos energia tartalmát, és ennek következtében a fajlagos égési sebességét is.



12.ábra a Rex_IV lőpor mérésének modellezése (1)



13. ábra a Rex_IV lőpor mérésének modellezése (2)

A **modell számításnál megállapítottam**, a fizikai folyamattal való egyezés érdekében nem elegendő három szakaszra kell bontani a modell szerinti folyamatot (12. ábra), mivel az eltérés a modell szerinti görbéhez képest meghaladja a pontossági követelményként kitűzött **60 bar** eltérést. A fizikai folyamattal egyező viselkedés leírása érdekében módon legalább négy szakaszra kell bontani a modell szerinti folyamatot.

1. *Első szakaszban* mint nem porózus lőpor ég a töltet a reá vonatkozó égési sebességgel. A töltetben a valóságnak megfelelően a lőporon lévő bevonat által flegmatizált porózus lőpor ég. Az első szakaszban történik a lőpor elégésének 20%-a.

2. A kezdeti leégését követően a *porózus átmeneti égés* szakaszában az akkor érvényes geometria alakzatként ég tovább a lőpor és itt már érvényesül a porozitás, változik az égési sebesség és a „sűrűség”. A bevonat leégését követően egy átmeneti jellemzőkkel bíró lőporként ég tovább a rendszer az akkor érvényes geometria alakzatként, és itt már bizonyos mértékben érvényesül a porozitás. A második szakasz elégését a modell leírja a lőpor elégésének 40%-áig.

3. A „bevonat teljes leégését követően” az akkor érvényes geometria alakzatként *porózus égés* szakaszában ég tovább a lőpor és itt már érvényesül a porozitás. A modell szerinti görbe, tehát három szakaszból illeszthető össze. A modellezett folyamat valósághoz való illeszkedését támasztja alá az a tény is, hogy a görbék csatlakozási pontjában a két egymástól függetlenül kiszámított leégett égőrétegek közel megegyeznek egymással, amint az a vonatkozó nyomás impulzusok egyezéséből következik. A harmadik szakasz követi a lőpor elégését annak 85%-áig.

4. Az ezt követő *végző égésre* nem illeszkedik a modell, de ekkor a valóságban sem minden porózus lőporszem ég, hanem annak széttöredezett maradéka, illetve az egyenlőtlen begyújtás miatt a az a lőporszem hányad amelynek az égése később kezdődött.

A modell szerinti számított adatok és a mért adatok az érvényes intervallumban ± 60 bar pontossággal illeszkedik.

A fizikai folyamathoz történő illeszkedés csupán a görbék időtengely menti eltolását igényli (0[ms], 0,6[ms] illetve 1,04[ms]). Egyezően azzal a ténnyel, hogy a gyújtás jellege miatt (nincs gyullasztó lőpor) a lőpor felszíne csak viszonylag lassan gyullad meg. Az égés végső szakaszát a modell nem írja le.

4.3. A fejezetből levont következtetések, elvégzett feladatok.

Az elkészített matematikai modell ellenőrzése céljából kísérletet hajtottam végre. Az elvégzett mérések eredményeit összehasonlítottam a modell szolgáltatata eredményekkel.

***Megállapítottam,** hogy a modell segítségével a mérési eredmények reprodukálhatók a lőportípusok viszonylag széles választékánál. Az általam bevezetett porozitási faktor az adott lőpora felvett értékével jól leírható a lőpor égés jelensége.*

Összegzett következtetések

A Magyar Köztársaság NATO csatlakozása után a hadiipari tevékenységek új megvilágításba kerültek. Ezek egyike a lőporgyártás. Az újonnan keletkező alkalmazói igények kielégítése során új töltények, és ezekhez új lőportöltetek kifejlesztése szükséges. Értekezésem célja egy ezt elősegítő módszer tudományos kidolgozása volt.

Értekezésemben az általam kitűzött célok alapján:

***Elemeztem** a lőporégés fizikai-kémiai folyamatát, a lőporszemcse átalakulását lőpor égéstermék gázzá, valamint a fegyverben lezajló folyamatot feltáró belballisztikai modellt.*

***Meghatároztam** azokat az alapvető matematikai összefüggéseket, - és azok fizikai tartalmát – amelyekkel jó közelítéssel leírható a kérdéses folyamat.*

***Megállapítottam**, hogy az integrálható modell segítségével leírható jelenség kör számos kérdésre nem ad választ, részben azért, mert a modellalkotók sem tűzték ki ezt célul, részben azért, mert a modell megoldhatósága vagy méréssel történő ellenőrizhetősége nem megoldott.*

***Megalkottam** egy numerikusan integrálható modellt, amely segítségével szélesebb jelenségkör leírható és válasz adható olyan fontos kérdésekre is, amelyeknek a korszerű mérőműszerekkel történő méréses ellenőrizhetősége megoldott.*

***Elemeztem** a modellt alkotó egyenletek megoldási lehetőségeit, **megvizsgáltam** a zárt alakban történő megoldás során fellépő közelítések mértékét és elfogadhatóságát. **Vizsgáltam** a numerikus megoldásra szolgáló eljárásokat és azok alkalmazása során megoldandó feladatokat.*

***Megállapítottam**, hogy mivel az általam alkotott modell egy nem lineáris differenciálegyenlet-rendszer. A zárt alakú megoldás nem oldható meg csak jelentős mértékű egyszerűsítések árán. A numerikus megoldás végrehajtható. A numerikus meg-*

oldásra a Runge-Kutta típusú egyenleteket célszerű felhasználni, azon belül is legalább negyedrendű módszert kell választani.

Elemeztem a porózus lőpor alkalmazásának szükségességét. Megvizsgáltam az elvi gyártási technológiákat és **indokoltam** a porózus lőpor gyártásának megvalósíthatóságát. **Elemeztem** lőporgyártás fizikai-kémiai folyamatát.

Irodalmi források alapján **elemeztem** a porózus lőpor gyártására kidolgozott technológiákat kronológiai sorrendben.

Megalkottam a porózus lőpor geometriai és belballisztikai modelljét. **Definiáltam** az effektivitás fogalmát és definíciókat adtam az effektív égőréteg, az effektív égési sebesség, az effektív sűrűség és a porozitási faktor fogalmára.

Elkészítettem a porózus lőpor modelljét megvalósító számítógépes programot.

Az elkészített matematikai modell ellenőrzése céljából **kísérletet hajtottam végre**. Az elvégzett mérések eredményeit **összehasonlítottam** a modell szolgáltatta eredményekkel.

Megállapítottam, hogy a modell segítségével a mérési eredmények reprodukálhatók lőportípusok viszonylag széles választékánál. Az általam bevezetett porozitási faktor adott lőpora felvett értékével jól leírható a lőpor égés jelensége.

Összefoglalva:

- Elvégeztem egy új lőpor modellezési eljárás tudományos elemzését.
- Kidolgoztam a **porózus** lőporszemek égését modellező eljárást, és az azt reprezentáló számítógépes programot elkészítettem.

Tudományos eredmények

1. *A belballisztikai folyamat modellezésére szolgáló differenciál egyenlet rendszer felállítása.*
2. *A porózus lőpor belballisztikai sajátosságait tükröző geometriai modell megalkotása.*
3. *A porózus lőpor égésének a klasszikus modell történő modellezését lehetővé tevő „porozitási faktor” fogalmának definiálása, amely lehetővé teszi, hogy a porózus lőpora alkalmazható legyen a normál lőpor modell.*
4. *A „porozitási faktor” anyagjellemzők mérési adataiból történő meghatározására szolgáló módszer kidolgozása.*

Ajánlások

A PhD értekezésemben megfogalmazott tények alapján javaslom:

- az általam kidolgozott lőpor modell alapján olyan tervező program elkészítését, amely lehetővé teszi a fegyverek megbízható ballisztikai előtervezését porózus lőporok alkalmazása esetén is.
- a modell alapján lőpor gyártás ellenőrző program és mérőrendszer készítése, amely lehetővé teszi a gyors és pontos beavatkozást a lőporgyártási folyamatba.

Megítélésem szerint értekezésem hozzájárul a Magyar Honvédségnél a NATO integráció keretében zajló technikai átalakítás sikeréhez. A hadiipari alkalmazások egyikénél a lőporgyártásnál az általam kidolgozott műszaki eljárások mind új termékek kifejlesztése, mind a jelenlegi termékek gyártása esetén alkalmazhatók.

Eredményeim felhasználhatók a szakterület oktatásában és alkalmazói továbbképzésekben.

Megítélésem szerint több mint 30 éves műszaki fejlesztői tapasztalatomat, a PhD képzés alatt szerzett ismereteimet sikeresen beépítettem az értekezésembbe, amely ezzel hozzájárul a hazai hadiipar szakmai fejlődéséhez.

Budapest 2005. május „ ”

Piroska György
HM Technológiai Hivatal
Gépészeti Mérnöki Iroda
kutató

Mellékletek

1. melléklet

A belballisztikai modell
 „ballisztikai bomba” számító
 programja QBASIC program nyelven

```

***BOMBA1 PHD.BAS***
                                ' szubrutin deklarációs mező
DECLARE SUB typosok ()
DECLARE SUB Lkiirb (p, v, l, T)
DECLARE SUB kiirb (p, v, l, T)
DECLARE SUB kite ()
DECLARE SUB halob ()
DECLARE SUB szunb (a$)
DECLARE FUNCTION vagb$ (ertek!, tized!, hossz!)
DECLARE FUNCTION bevitel! (adat$, adat)
:
                                ' konstans deklarációs mező
CONST pi = 3.141593, z = .001, ikonst = .000005, tkonst =
.01, gkonst = .000001
                                ' deklarációs mező
DIM e(1200, 5), T(10), Qe(10), om(10), f(10), al(10),
u0(10), u1(10), u2(10)
DIM rk(10), rb(10), ck(10), a1(10), a2(10), a3(10),
re(10), eh(10), l3(10)
DIM l7(10), tind(10), lind(10), W(10), ek(10), dr(10),
ckb(10), rkb(10), ok0(10)
DIM rbb(10), ekb(10), rv(10), uv(10), rok(10), rit(10),
sr(10), tid(10), u(4)
DIM SHARED fel$, le$, ymi, yma, rajz$, xma

:
SCREEN 12: WIDTH 80, 60
lsza = 1
                                ' adat beállítások
'Lópor Rex_0          REX_I    Rex_II   Rex_III  Rex_IV
wba = .000025      'm3
pba = .1           'MPa
p0a = 1E+30        'MPa
roa = 1600         'kg/m3
kaa = 1.2          ' -
dta = 10           'us
:
om(1) = .00412     'kg
Qe(1) = 4035       '4016      3883      3753      3834
kJ/kg
lind(1) = 0        'm

```

```

tid(1) = 0      'us
W(1) = 0      'm3
rv(1) = .8      ' .85      .85      .85      .8
.95      -
uv(1) = 2.41    '2.134    2.134    2.134    2.41
1.583      -
:
tk(1) = 3      ' -
rkb(1) = .7685 ' .7785    .775    .762    .784
mm
ckb(1) = .182  ' .21      .2273   .2124   .2676
mm
uj:
CLS

```

'adatkivitel kezelés

```

cim$ = "C:\Enyémek\Sajat\PHD\Dissz\bomba.txt"
OPEN cim$ FOR OUTPUT AS #1
LOCATE 1, 26: PRINT "BELSO (BOMBA) BALLISZTIKA"
INPUT "azonosító"; azon$: IF azon$ = "" THEN azon$ =
"proba"
PRINT "ÁLTALÁNOS ADATOK A RENDSZERRŐL"
INPUT "Lőporok száma:"; lsz$: lsza = bevitel(lsz$, lsza):
lsz = lsza
INPUT "W0 [m^3]:"; ne$: wba = bevitel(ne$, wba): w0 = wba
INPUT "Pb [MPa]:"; Pb$: pba = bevitel(Pb$, pba): pe = pba
* 1000000!
P0 = p0a * 1000000!
INPUT "ro [kg/m^3]:"; ro$: roa = bevitel(ro$, roa): ro =
roa
INPUT "kappa:"; ka$: kaa = bevitel(ka$, kaa): ka = kaa
WRITE #1, lsza
WRITE #1, wba
WRITE #1, pba
WRITE #1, p0a
WRITE #1, roa
WRITE #1, kaa
WRITE #1, dta
:
GOSUB lopor
PRINT "SZÁMITÁS ADATAI"
INPUT "delta t (µs):"; dt$: dta = bevitel(dt$, dta): dt =
dta * .000001
INPUT "rajz kell (f(t)=t/n)"; rajz$
IF rajz$ = "t" THEN CALL halob
:
LOCATE 1, 26: PRINT " BELSŐ (BOMBA) BALLISZTIKA"
LPRINT , , , , DATE$: ido$ = TIME$
LPRINT , , , , ido$
LPRINT , , , , azon$: LPRINT

```

```

LPRINT "ÁLTALÁNOS ADATOK A RENDSZERRŐL"
LPRINT "      W0[m"; fel$; "3"; le$; " ]      :"; vagb$(wba,
6, 8)
LPRINT "      Pb[MPa]      :"; vagb$(pba, 3, 8)
LPRINT "      P0[MPa]      :"; vagb$(p0a, 3, 8)
LPRINT "      ro[kg/m"; fel$; "3"; le$; " ] :"; vagb$(roa,
1, 8)
LPRINT "      kappa      :"; vagb$(kaa, 1, 8)
LPRINT "      lőporok sz:"; vagb$(lsza, 0, 8)
LPRINT "LŐPOR ADATOK"
FOR k = 1 TO lsz
  GOSUB LoporLprint
NEXT k
LPRINT
LPRINT "SZÁMITÁS ADATA      delta t (µs):"; dta: LPRINT
:
                                'kezdeti érték beállítások
ve = 0: le = 0: x = 0
e(1, 4) = 0: e(1, 5) = 0: e(0, 0) = Pb
dp = 0: dv = 0: dl = 0: epsz = 1E-10
impulzus = 0: gamma = 0
:
                                'számítás
GOSUB RungeKutta
:
                                'adatkivitel
l1 = 0: l2 = 0: l4 = 0:
CLS : COLOR 15
FOR i = 1 TO x
WRITE #1, i, e(i, 0), e(i, 1), e(i, 2), e(i, 3), e(i, 4),
e(i, 5)
NEXT i
:
                                'ismétlés
GOTO ujfeladat
:
ujfeladat:
PRINT "VAN-E UJ FELADAT (i/n)"
u: a$ = INKEY$: IF a$ = "" THEN GOTO u
LPRINT CHR$(12);
IF a$ = "i" THEN GOTO uj
CLOSE : END
:
                                'negyedrendű Runge-Kutta modul
RungeKutta:
ujra:
sp = 0: sv = 0: sl = 0: dom = 0
FOR k = 1 TO lsz:
  sr(k) = 0: dr(k) = 0

```

```

NEXT k
FOR r = 1 TO 4
  SELECT CASE r
    CASE 1
      q = 0: o = 1
    CASE 2
      q = .5: o = 2
    CASE 3
      q = .5: o = 2
    CASE 4
      q = 1: o = 1
  END SELECT

'a belballisztikai modell

FOR k = 1 TO lsz
  rit(k) = re(k) + q * dr(k)
NEXT k
pit = pe + q * dp
vit = ve + q * dv
lit = le + q * dl
okk = 0: dfk = 0: alk = 0: domk = 0
FOR k = 1 TO lsz
  IF tind(k) > x * dt THEN EXIT FOR
  IF ABS(rit(k)) < epsz THEN
    om0 = om0 + om(k)
    alk = alk * (om0 - om(k)) / om0 + al(k) * om(k) /
om0
    alfa = 1 / ro - alk
    w0 = w0 + W(k) - om(k) / rok(k)
  END IF
  IF l3(k) = 1 THEN GOTO lopormarnemeg
  s0 = 1: s1 = u0(k)
  IF pit > 3E+07 AND pit <= 7E+07 THEN s0 = .79: s1 =
u1(k)
  IF pit <= 3E+07 THEN s0 = .68: s1 = u2(k)
'égő réteg kiszámítása
  dr(k) = s1 * pit ^ s0 * dt
  dom = eh(k) * (3 * a3(k) * rit(k) ^ 2 + 2 * a2(k) *
rit(k) + al(k)) * dr(k) / dt
  dfk = dfk + f(k) * dom: domk = domk + dom
lopormarnemeg:
  ok = eh(k) * (a3(k) * rit(k) ^ 3 + a2 * rit(k) ^ 2 +
al(k) * rit(k)) + ok0(k)
  okk = okk + ok
NEXT k

'a gáznyomás egyenlet
  dp = (dfk - pit * (vit * fe * ka + alfa * domk)) / (w0
+ alfa * okk + fe * lit) * dt
allas:
  FOR k = 1 TO lsz

```

```

    sr(k) = sr(k) + o * dr(k)
  NEXT k
  sp = sp + o * dp
  u(r) = dp
NEXT r
FOR k = 1 TO lsz
  re(k) = re(k) + sr(k) / 6
NEXT k
IF x > 0 THEN impulzus = impulzus + (sp / 12 * dt)
IF x * dt > tind(1) THEN gamma = 1 / (pe + sp / 6) / om0
* dom / dt
IF gamma < 0 THEN gamma = 0
pe = pe + sp / 6
x = x + 1
e(x, 0) = pe / 100000!
e(x, 1) = re(1) * 1000
e(x, 2) = gamma
e(x, 3) = x * dt * 1000

```

'diagramm rajzoló

```

IF rajz$ = "t" THEN
  COLOR 2: PSET (e(i, 3), e(i, 1) / ikonst)
  COLOR 14: PSET (e(i, 3), e(i, 2) / gkonst)
  COLOR 12: PSET (e(i, 3), e(i, 0))
END IF
:
FOR k = 1 TO lsz
  IF tind(k) > x * dt THEN EXIT FOR
  IF l3(k) = 0 THEN GOSUB egveg
NEXT k
i = x
IF x < 1199 THEN GOTO ujra
RETURN
:

```

'lőpor égés kezelő

```

egveg:
  IF re(k) < ek(k) THEN RETURN
  GOSUB vonal
  IF l7(k) = 0 THEN GOTO nemhet
  ok0(k) = eh(k) * (a3(k) * ek(k) ^ 3 + a2(k) * ek(k) ^ 2
+ a1(k) * ek(k))
  rk(k) = .5773 * (rb(k) + ek(k))
  ck(k) = 2 * (ck(k) - ek(k))
  e(x, 5) = e(x, 5) + 2 ^ k
  GOSUB Rud
  eh(k) = (om(k) - ok0(k)) / vi: re(k) = 0: l7(k) = 0:
RETURN
nemhet:
  re(k) = ek(k): l3(k) = 1: e(x, 4) = e(x, 4) + 2 ^ k
RETURN

```


:

'lópor adat kezelő

```

lopör:
FOR k = 1 TO lsz
  PRINT k; "sz.lópor adatai"
  INPUT "omega [kg]:"; ne$: om(k) = bevitel(ne$, om(k))
  INPUT "éges hő [kJ/kg]:"; ne$: Qe(k) = bevitel(ne$,
Qe(k))
  INPUT "T ind [us]:"; ne$: tid(k) = bevitel(ne$, tid(k))
  tind(k) = tid(k) * .000001
  INPUT "ro'/ro [ ]:"; ne$: rv(k) = bevitel(ne$, rv(k))
  INPUT "u'/u [ ]:"; ne$: uv(k) = bevitel(ne$, uv(k))
  f(k) = 98.1 * (6546 + .8123 * Qe(k))
  al(k) = .000001 * (1456 - .1251 * Qe(k))
  u0(k) = 1.02E-11 * (.04275 * Qe(k) - 76.6)
  u0(k) = u0(k) * uv(k): rok(k) = ro * rv(k)
  u1(k) = u0(k) * 7E+07 ^ .21
  u2(k) = u1(k) * 3E+07 ^ .11
  l3(k) = 0: l7(k) = 0: re(k) = 0: ok0(k) = 0
  IF k = 1 THEN
    CALL typosok
  END IF
  INPUT "Tipus "; ne$: tk(k) = bevitel(ne$, tk(k))
  IF tk(k) = 1 THEN
    INPUT "Rk [mm]="; ne$: rkb(k) = bevitel(ne$, rkb(k)):
rk(k) = rkb(k)
    INPUT "Rb [mm]="; ne$: rbb(k) = bevitel(ne$, rbb(k)):
rb(k) = rbb(k)
    INPUT "2c [mm]="; ne$: ckb(k) = bevitel(ne$, ckb(k)):
ck(k) = ckb(k)
  END IF
  IF tk(k) = 2 THEN
    INPUT "Rk [mm]="; ne$: rkb(k) = bevitel(ne$, rkb(k)):
rk(k) = rkb(k)
    INPUT "Rb [mm]="; ne$: rbb(k) = bevitel(ne$, rbb(k)):
rb(k) = rbb(k)
    INPUT "2c [mm]="; ne$: ckb(k) = bevitel(ne$, ckb(k)):
ck(k) = ckb(k)
  END IF
  IF tk(k) = 3 THEN
    INPUT "Rk [mm]="; ne$: rkb(k) = bevitel(ne$, rkb(k)):
rk(k) = rkb(k)
    INPUT "2c [mm]="; ne$: ckb(k) = bevitel(ne$, ckb(k)):
ck(k) = ckb(k)
  END IF
  IF tk(k) = 4 OR tk(k) = 5 THEN
    INPUT "2a [mm]="; ne$: rkb(k) = bevitel(ne$, rkb(k)):
rk(k) = rkb(k)

```

```

        INPUT "2b [mm]="; ne$: rbb(k) = bevitel(ne$, rbb(k)):
rb(k) = rbb(k)
        INPUT "2c [mm]="; ne$: ckb(k) = bevitel(ne$, ckb(k)):
ck(k) = ckb(k)
    END IF
    IF tk(k) = 6 THEN
        INPUT "a3 [ ]="; ne$: rkb(k) = bevitel(ne$, rkb(k)):
rk(k) = rkb(k)
        INPUT "a2 [mm]="; ne$: rbb(k) = bevitel(ne$, rbb(k)):
rb(k) = rbb(k)
        INPUT "a1 [mm^2]="; ne$: ckb(k) = bevitel(ne$,
ckb(k)): ck(k) = ckb(k)
        INPUT "e [mm]="; ne$: ekb(k) = bevitel(ne$, ekb(k)):
ek(k) = ekb(k)
    END IF
NEXT k
RETURN
:
vonal:
    COLOR (lsz + 1): LINE (e(i, 3), ymi)-(e(i, 3), yma):
COLOR 15
RETURN
:
Rud:
    vi = rk(k) ^ 2 * pi * ck(k): ck(k) = ck(k) / 2
    a3(k) = 2 * pi
    a2(k) = -2 * pi * (2 * rk(k) + ck(k))
    a1(k) = 2 * pi * (2 * rk(k) * ck(k) + rk(k) ^ 2)
    eh(k) = om(k) / vi: ek(k) = rk(k)
    IF ck(k) < ek(k) THEN ek(k) = ck(k)
RETURN
:
LoporLprint:
LPRINT "        lópor száma:"; vagb$(k, 0, 8)
LPRINT "        omega[kg]      ":"; vagb$(om(k), 3, 8)
LPRINT "        Qe[kJ/kg]       ":"; vagb$(Qe(k), 1, 8)
LPRINT "        T ind.[µs]      ":"; vagb$(tid(k), 1, 8)
LPRINT "        ro'/ro          ":"; vagb$(rv(k), 3, 8)
LPRINT "        u'/u            ":"; vagb$(uv(k), 3, 8)
WRITE #1, k
WRITE #1, om(k)
WRITE #1, Qe(k)
WRITE #1, tid(k)
WRITE #1, rv(k)
WRITE #1, uv(k)
SELECT CASE tk(k)
    CASE 1
        LPRINT "        Rk[mm]:"; vagb$(rk(k), 3, 8)
        LPRINT "        Rb[mm]:"; vagb$(rb(k), 3, 8)

```

```

LPRINT "      2c[mm]:"; vagb$(ck(k), 3, 8)
LPRINT "      Lőportípus:Cső"
LPRINT "      -- 0 --"
WRITE #1, rk(k)
WRITE #1, rb(k)
WRITE #1, ck(k)
WRITE #1, "Cső"
      rk(k) = rk(k) * z: rb(k) = rb(k) * z: ck(k) = ck(k) *
z
      vi = (rk(k) ^ 2 - rb(k) ^ 2) * pi * ck(k): ck(k) =
ck(k) / 2
      a3(k) = 0
      a2(k) = -4 * pi * (rk(k) + rb(k))
      a1(k) = 2 * pi * (rk(k) ^ 2 - rb(k) ^ 2 + 2 * ck(k) *
(rk(k) + rb(k)))
      eh(k) = om(k) / vi: ek(k) = (rk(k) - rb(k)) / 2
      IF ck(k) < ek(k) THEN ek(k) = ck(k)

CASE 2
LPRINT "      Rk[mm]:"; vagb$(rk(k), 3, 8)
LPRINT "      Rb[mm]:"; vagb$(rb(k), 3, 8)
LPRINT "      2c[mm]:"; vagb$(ck(k), 3, 8)
LPRINT "      Lőportípus:Hétlukú cső"
LPRINT "      -- 0 --"
WRITE #1, rk(k)
WRITE #1, rb(k)
WRITE #1, ck(k)
WRITE #1, "Hétlukú Cső"
      rk(k) = rk(k) * z: rb(k) = rb(k) * z: ck(k) = ck(k) * z
      vi = (rk(k) ^ 2 - 7 * rb(k) ^ 2) * pi * ck(k): ck(k) =
ck(k) / 2
      a3(k) = -12 * pi
      a2(k) = -4 * pi * (rk(k) + 7 * rb(k) - 3 * ck(k))
      a1(k) = 2 * pi * (rk(k) ^ 2 - 7 * rb(k) ^ 2 + 2 * ck(k)
* (rk(k) + 7 * rb(k)))
      ek(k) = (rk(k) - 3 * rb(k)) / 4
      l7(k) = (a3(k) * ek(k) ^ 3 + a2(k) * ek(k) ^ 2 + a1(k)
* ek(k)) / vi
      eh(k) = om(k) / vi
      IF ck(k) < ek(k) THEN ek(k) = ck(k): eh(k) = om(k) /
vi: l7(k) = 0

CASE 3
LPRINT "      Rk[mm]:"; vagb$(rk(k), 0, 8)
LPRINT "      2c[mm]:"; vagb$(ck(k), 3, 8)
LPRINT
LPRINT "      Lőportípus:Rúd"
LPRINT "      -- 0 --"
WRITE #1, rk(k)

```

```

WRITE #1, ck(k)
WRITE #1, "n/a"
WRITE #1, "Rúd"
rk(k) = rk(k) * z: rb(k) = rb(k) * z: ck(k) = ck(k) * z
GOSUB Rud

CASE 4 OR 5
LPRINT "      2a[mm]:"; vagb$(rk(k), 0, 8)
LPRINT "      2b[mm]:"; vagb$(rb(k), 0, 8)
LPRINT "      2c[mm]:"; vagb$(ck(k), 3, 8)
WRITE #1, rk(k)
WRITE #1, rb(k)
WRITE #1, ck(k)
LPRINT
IF tk(k) = 4 THEN
LPRINT "      Lőportípus:Hasáb": kb = 8
WRITE #1, "Hasáb"
ELSE
LPRINT "      Lőportípus:Ellipszoid": kb = 4 * pi / 3
WRITE #1, "Ellipszoid"
END IF
LPRINT "      -- 0 --"
rk(k) = rk(k) * z / 2: rb(k) = rb(k) * z / 2: ck(k) =
ck(k) * z / 2
vi = kb * rk(k) * rb(k) * ck(k)
a3(k) = kb
a2(k) = -kb * (rk(k) + rb(k) + ck(k))
a1(k) = kb * (rk(k) * rb(k) + rk(k) * ck(k) + rb(k) *
ck(k))
eh(k) = om(k) / vi: ek(k) = rk(k)

CASE 6
LPRINT "      a3[ ]  :"; vagb$(rk(k), 2, 8)
LPRINT "      a2[mm] :"; vagb$(rb(k), 2, 8)
LPRINT "      a1[mm"; fel$; "2"; le$; "]:";
vagg$(ck(k), 2, 8)
LPRINT "      e[mm]  :"; vag$(ek(k), 2, 8)
LPRINT
LPRINT "      Lőportípus:Egyéb"
WRITE #1, rk(k)
WRITE #1, rb(k)
WRITE #1, ck(k)
WRITE #1, ek(k)
WRITE #1, "Egyéb"
LPRINT "      -- 0 --"
rk(k) = rk(k) * z: rb(k) = rb(k) * z: ck(k) = ck(k) * z
a3(k) = rk(k)
a2(k) = rb(k)
a1(k) = ck(k)

```

```

    vi = a3(k) * ek(k) ^ 3 + a2(k) * ek(k) ^ 2 + a1(k) *
ek(k)
    eh(k) = om(k) / vi
END SELECT
RETURN

```

```

:
FUNCTION bevitel (adat$, adat)
IF adat$ <> "" THEN
    bevitel = VAL(adat$)
ELSE
    bevitel = adat
END IF
END FUNCTION

```

'diagramm mező

```

SUB halob
xmia = 0
dixa = .1
xmaa = 1.5
ymia = 0
diya = 500
ymaa = 5000
xma$ = "ms"
yma$ = "MPa"
INPUT "T min"; xmi$: xmia = bevitel(xmi$, xmia)
INPUT "dT"; dix$: dixa = bevitel(dix$, dixa)
INPUT "T mert"; xm$: IF xm$ = "" THEN xm$ = xma$
INPUT "T max"; xma$: xmaa = bevitel(xma$, xmaa)
PRINT
INPUT "P min"; ymi$: ymia = bevitel(ymi$, ymia)
INPUT "dP"; diy$: diya = bevitel(diy$, diya)
INPUT "P mert"; ym$: IF ym$ = "" THEN ym$ = yma$
INPUT "P max"; yma$: ymaa = bevitel(yma$, ymaa)
xmi = xmia: dix = dixa: xma = xmaa: ymi = ymia: diy =
diya: yma = ymaa
lx = (xma - (xmi - dix)) / 80: ly = ((yma + diy) - (ymi -
diy)) / 60
WINDOW (xmi - dix, ymi - diy)-(xma, yma + diy)
CLS
FOR x = xmi TO xma STEP dix
LINE (x, ymi)-(x, yma)
LOCATE INT((yma + diy) / ly) + 2, INT((x + dix) / lx)
IF x <> xma THEN PRINT USING "##.##"; x
NEXT x
FOR y = ymi TO yma STEP diy
COLOR 15: LINE (xmi, y)-(xma, y)
LOCATE INT(((yma + diy) - y) / ly) + 1, 1
COLOR 15: PRINT USING "####"; y
NEXT y
COLOR 15

```

```

LOCATE INT((yma + diy) / ly) + 3, INT(xma / lx) + 1:
PRINT "["; xm$; "]"
LOCATE INT(diy / ly), 1: PRINT "["; ym$; "]"
END SUB

```

'adatkezelés

```

SUB kiirb (p, v, l, T)
f1$ = vagb$(p, 0, 11): f2$ = vagb$(v, 0, 11): f3$ =
vagn$(l, 3, 11)
f4$ = vagb$(T, 3, 11)
PRINT f1$; f2$; f3$; f4$
END SUB

```

```

SUB kite
fel$ = CHR$(27) + "F" + CHR$(27) + "S" + CHR$(0) +
CHR$(15)
le$ = CHR$(27) + "T" + CHR$(18)
END SUB

```

```

SUB Lkiirb (p, v, l, T)
f1$ = vagb$(p, 0, 11): f2$ = vagb$(v, 0, 11): f3$ =
vagn$(l, 3, 11)
f4$ = vagb$(T, 3, 11)
LPRINT f1$; f2$; f3$; f4$
END SUB

```

```

SUB szunb (a$) STATIC
1 a$ = INKEY$: IF a$ = "" THEN GOTO 1
END SUB

```

```

SUB tipusok
LINE (465, 0)-(580, 80), , B
LOCATE 2, 60: PRINT "Lopor tipusok"
LOCATE 4, 60: PRINT "Cso          :1"
LOCATE 5, 60: PRINT "Hetluku cso:2"
LOCATE 6, 60: PRINT "Rud          :3"
LOCATE 7, 60: PRINT "Hasab        :4"
LOCATE 8, 60: PRINT "Ellipszoid  :5"
LOCATE 9, 60: PRINT "Egyeb       :6"
LOCATE 21, 1: PRINT
END SUB

```

```

FUNCTION vagb$ (ertek, tized, hossz)
luk$ = SPACE$(hossz): tized = EXP(tized * LOG(10))
vagn$ = RIGHT$(luk$ + STR$(INT(ertek * tized + .5) / ti-
zed), hossz)
END FUNCTION

```

Az alkalmazható numerikus integrálási módszerek áttekintése¹³:

Elsőrendű differenciál egyenletek:

M.1. Taylor sorfejtés:

Feladat az

$$y' = f(x, y) \quad (M1.)$$

differenciál egyenlet olyan megoldásának meghatározása, amely kielégíti

$$\text{az } y(x_0) = y_0 \quad (M2.)$$

kezdeti feltételt. Az $y(x)$ megoldás $y(x_k) = y_k$

numerikus értékeit kell kiszámítani az ekvidisztáns

$$x_k = x_0 + kh$$

pontokban, ahol k természetes számot, h egy megfelelően választott alaptávolságot jelent.

Ha a keresett megoldásról feltesszük, hogy x_0 elég kis környezetében konvergens Taylor sorba fejthető, akkor ennek a sornak együtthatóit a (M1.) és (M2.) egyenletek meghatározzák. A (M3.) egyenletből

$$y'(x_0) = f(x_0, y_0).$$

A (23.) egyenletből „ $y(x)$ ” második deriváltját kiszámítva az x_0 helyen, figyelembe véve, hogy y függvénye x -nek:

$$y_0'' = y''(x_0) = \left[\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} y' \right]_0$$

A harmadik derivált:

¹³ Obádovocs J. Gyula: Gyakorlati számítási eljárások – Gondolat kiadó, Budapest, 1972.

$$y_0''' = y_0'''(x_0) = \left[\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} y' + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} y'^2 + \frac{\partial f}{\partial y} y'' \right]_0$$

és így tovább. Így pl. öt tagot figyelembe véve akkor

$$y_1 = y(x_0 + h) = y_0 + y_0' h + y_0'' \frac{h^2}{2} + y_0''' \frac{h^3}{6} + y_0^{(4)} \frac{h^4}{24} + R \quad (\text{M4.})$$

az elkövetett hiba

$$R = y^{(5)}(t) \frac{h^5}{120} \text{ ahol } x_0 < t < x_0 + h$$

A Taylor sorfejtés alkalmazásának korlátot szab az a tény, hogy a változók csak implicit módon határozhatók meg és a deriváltak felírása a (42.) – (47.) egyenletrendszerben egyszerűen nem oldható meg.

M.2. Euler - Cauchy módszer

Taylor sor alapján az

$$x_k = x_0 + kh$$

pont környezetében

$$y_{k+1} = y(x_k + h) = y_k + h y'(x_k) + \frac{h^2}{2} y''(x_k) + K$$

az első két tag alapján

$$y_{k+1} \approx y_k + h f(x_k, y_k) = y_k + h a_k \quad (\text{M5.})$$

$$\text{ahol } a_k = f(x_k, y_k)$$

Az eljárás hasonló a 2.2.1. alatti eljáráshoz azonban a számítás hibája nagy lehet.

M.3. Heun módszer

legyen $y' = f(x, y)$ amely kielégíti az

$y(x_0) = y_0$ kezdeti feltételt kielégíti

integrálva kapjuk

$$\int_{x_0}^{x_0+h} y'(x) dx = \int_{x_0}^{x_0+h} f(x, y) dx$$

kiszámítva a két oldalt

$$y(x_0 + h) - y(x_0) = \int_{x_0}^{x_0+h} f(x, y) dx$$

a jobb oldal trapéz szabály alapján

$$y(x_0 + h) - y(x_0) = \frac{h}{2} (f(x_0, y_0) + f(x_1, y_1))$$

ahol $x_1 = x_0 + h$ és $y_1 = y(x_1)$

ha a jobb oldal ismert lenne, akkor

$$y(x_0 + h) = y_1$$

számítható volna. Ennek érdekében lineáris előzetes közelítéssel. Így

$y_1 \approx y_0 + hy'_0$ legyen, ezzel

$$f_1 = f(x_1, y_1) \approx f(x_1, y_0 + hy'_0) \approx f(x_1, y_0 + hf_0) = f_1^*$$

kapjuk

$$y_1 \approx y_0 + \frac{h}{2} [f_0 + f_1^*]$$

általános tagra kapjuk

$$y_{k+1} \approx y_k + \frac{h}{2} [f_k + f_{k+1}^*] \quad (\text{M6.})$$

Legyen *prediktor* (előzetes közelítés)

$$y_{k+1}^* = y_k + hf_k \text{ és ezzel} \quad (\text{M7.})$$

legyen *korrektor* (javított közelítés)

$$y_{k+1} = y_k + \frac{h}{2} [f_k + f_{k+1}^*] \quad (\text{M8.})$$

A módszer célszerűen alkalmazható csupán az implicit függvények kezelése nehézséges.

M.4. Runge-Kutta módszer

legyen az alaptávolság $\frac{h}{2}$ ekkor a prediktor

$$y\left(x_k + \frac{h}{2}\right) \approx y_k + \frac{h}{2} a_k$$

ezzel az „első” korrektor

$$y_{k+1} \approx y_k + hf\left(x_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{h}{2} a_k\right) = y_k + hb_k$$

ezzel a „második” korrektor

$$y_{k+1} \approx y_k + hf\left(x_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{h}{2} b_k\right) = y_k + hc_k$$

ezzel a „harmadik” korrektor

$$y_{k+1} \approx y_k + hf(x_{k+1}, y_k + hc_k) = y_k + hd_k$$

végeredményül kapjuk súlyozott átlagként

$$y_{k+1} \approx y_k + \frac{h}{6}(a_k + 2b_k + 2c_k + d_k) \quad (\text{M9.})$$

a módszer számításigényes, a hiba „ellenőrzése” újra számítás fele akkora alap-
távolsággal.

ÁLTALÁNOSAN¹⁴

A számítás során rögzíteni kell bizonyos számokat:

$$\alpha_2, K, \alpha_q \quad p_1, K, p_q \quad \beta_{ij} \quad 0 < j < i \leq q$$

és ki kell számítani az alábbi értékeket:

$$k_1(h) = hf(x, y)$$

$$k_2(h) = hf(x + \alpha_2 h, y + \beta_{21} k_1(h))$$

.

$$k_q(z) = hf(x + \alpha_q h, y + \beta_{q,1} k_1(h) + \beta_{q,q-1} k_{q-1}(h))$$

és fel kell tételezni, hogy

$$y(x+h) \approx z(h) = y(x) + \sum_{i=1}^q p_i k_i(h)$$

Célszerűen kell az α_i , p_i , β_{ij} paramétereket megválasztani.

$$\text{Jelölés: } \varphi(h) = y(x+h) - z(h)$$

$$\text{Legyen } \varphi(0) = \varphi'(0) = K = \varphi^{(s+1)}(0) = 0$$

Ekkor a Taylor formula alapján

¹⁴ Korn G. A.; Korn T. M.: Matematikai kézikönyv műszakiaknak, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1975.

$$\varphi(h) = \sum_{i=0}^s \frac{\varphi^{(i)}(0)}{i!} h^i + \frac{\varphi^{(s+1)}(\Theta h)}{(s+1)!} h^{s+1} = \frac{\varphi^{(s+1)}(\Theta h)}{(s+1)!} h^{s+1}$$

ahol $0 < \Theta < 1$

itt

$\varphi(h)$ - egy lépésre eső hiba

s - a módszer hibájának nagyságrendje

q=1

$$\varphi(h) = y(x+h) - y - p_1 h f(x, y)$$

$$\varphi(0) = 0$$

$$\varphi'(0) = (y'(x+h) - p_1 f(x, y))|_{h=0} = f(x, y)(1 - p_1)$$

$$\varphi''(h) = y''(x+h)$$

itt $y = y(x)$

$$\varphi'(0) = f(x, y)(1 - p_1) \text{ csak akkor teljesül ha } p_1 = 1$$

ez az Euler módszer

q=2

$$\varphi(h) = y(x+h) - y - p_1 h f(x, y) - p_2 h f(\bar{x}, \bar{y})$$

ahol

$$\bar{x} = x + \alpha_2 h \quad \text{és} \quad \bar{y} = y + \beta_{21} h f(x, y)$$

ezzel

$$\varphi(0) = 0$$

$$\varphi'(0) = f(x, y)(1 - p_1 - p_2)$$

$$\varphi''(h) = (1 - 2p_2\alpha_2)f_x(x, y) + (1 - 2p_2\beta_{21})f_y(x, y)f(x, y)$$

$$\varphi'(0) = 0 \text{ ha minden } f \text{-re } 1 - p_1 - p_2 = 0 \text{ teljesül}$$

$$\varphi''(0) = 0 \text{ ha } 1 - 2p_2\alpha_2 = 0 \text{ és } 1 - 2p_2\beta_{21} = 0$$

így

$\varphi(0) = \varphi'(0) = \varphi''(0) = 0$ minden $f(x, y)$ -re ha teljesül a négy paraméterre a fenti összefüggés. Egy paramétert tetszőlegesen megadva **különböző Runge-Kutta módszerek** adódnak, amelyek hibája h -ban másodrendű.

Ha $p_1 = 1/2$ akkor $p_2 = 1/2$, $\alpha_2 = 1$, $\beta_{21} = 1$ ezzel

$k_1 = f(x, y)h$ és $k_2 = f(x+h, y+k_1)h$ ezzel

$$y_{k+1} = y_k + \frac{1}{2}(k_1 + k_2)$$

Ha $p_1 = 0$ akkor $p_2 = 1$, $\alpha_2 = 1/2$, $\beta_{21} = 1/2$ ezzel

$k_1 = f(x, y)h/2$ és $k_2 = f(x+h/2, y+k_1/2)h$ ezzel

$$y_{k+1} = y_k + k_2$$

bármely $q = 2$ -re $s = 3$ nem létezik.

Szokásos alkalmazásokban $q = 4$ felett és legfeljebb $q = 8$

M.5. Adams módszer

A Taylor sor alapján

$$y_{k+1} = y_k + hy'_k + \frac{h^2}{2}y''_k + \frac{h^3}{6}y'''_k + \frac{h^4}{24}y^{(4)}_k + \frac{h^5}{120}y^{(5)}_k + \frac{h^6}{720}y^{(6)}_k + K \quad (M10.)$$

jelölés: legyen retrográd differencia a következő

$$\nabla_k = \nabla y_k = y_k - y_{k-1}$$

A Taylor sort retrográd differenciákkal felírva

$$\begin{aligned} y_{k+1} = y_k + hf_k + \frac{h}{2} \left\{ \nabla + \frac{\nabla^2}{2} + \frac{\nabla^3}{3} + \frac{\nabla^4}{4} + \frac{\nabla^5}{5} + K \right\} f_k + \\ + \frac{h}{6} \left\{ \nabla^2 + \nabla^3 + \frac{11}{12} \nabla^4 + \frac{5}{6} \nabla^5 + K \right\} f_k + \\ + \frac{h}{24} \left\{ \nabla^3 + \frac{3}{2} \nabla^4 + \frac{7}{4} \nabla^5 + K \right\} f_k + \\ + \frac{h}{120} \left\{ \nabla^4 + 2\nabla^5 + K \right\} f_k + \frac{h}{720} \left\{ \nabla^5 + K \right\} f_k + K \end{aligned}$$

összevonásokat végrehajtva kapjuk

$$y_{k+1} = y_k + h \left\{ 1 + \frac{1}{2} \nabla + \frac{5}{12} \nabla^2 + \frac{3}{8} \nabla^3 + \frac{251}{720} \nabla^4 + \frac{95}{288} \nabla^5 + K \right\} f_k \quad (\text{M11.})$$

az eljárás során az indításhoz egyéb módszert kell alkalmazni pl. **Taylor sort** vagy **Runge-Kutte módszert**.

A differenciál egyenletek áttekintése után, mivel a modell több összefüggő egyenletet tartalmaz át kell tekinteni az egyenletrendszerek megoldására szolgáló eljárásokat is.

M.6. Elsőrendű differenciálegyenlet-rendszerek

Legyen

$$\begin{aligned} x' &= f(t, x, y) \\ y' &= g(t, x, y) \end{aligned} \quad \text{és a megoldások elégítsék ki}$$

az alábbi kezdeti feltételeket

$$x(t_0) = x_0 \quad \text{és} \quad y(t_0) = y_0$$

a megoldás lényegében az előzőekkel azonos

M.7. Runge-Kutta módszer

a fenti egyenletrendszerre felírható

„első”

$$a_k = f(t_k, x_k, y_k)h$$

$$m_k = g(t_k, x_k, y_k)h$$

„második”

$$b_k = f\left(t_k + \frac{h}{2}, x_k + \frac{a_k}{2}, y_k + \frac{m_k}{2}\right)h$$

$$n_k = g\left(t_k + \frac{h}{2}, x_k + \frac{a_k}{2}, y_k + \frac{m_k}{2}\right)h$$

„harmadik”

$$c_k = f\left(t_k + \frac{h}{2}, x_k + \frac{b_k}{2}, y_k + \frac{n_k}{2}\right)h$$

$$p_k = g\left(t_k + \frac{h}{2}, x_k + \frac{b_k}{2}, y_k + \frac{n_k}{2}\right)h$$

„negyedik”

$$d_k = f(t_k + h, x_k + c_k, y_k + p_k)h$$

$$q_k = g(t_k + h, x_k + c_k, y_k + p_k)h$$

ezekkel kapjuk a záró formulákat

$$x_{k+1} = x_k + \frac{1}{6}(a_k + 2b_k + 2c_k + d_k) \quad (\text{M12.})$$

$$y_{k+1} = y_k + \frac{1}{6}(m_k + 2n_k + 2p_k + q_k) \quad (\text{M13.})$$

M.8. Másodrendű differenciálegyenletek

Legyen

$y'' = f(t, y, y')$ és a megoldások elégítsék ki

az alábbi kezdeti feltételeket

$$y(t_0) = y_0 \quad \text{és} \quad y'(t_0) = y'_0$$

M.9. Runge-Kutta módszer

a fenti egyenletrendszerre felírható

„első”

$$a_k = f(t_k, y_k, y'_k)h$$

„második”

$$b_k = f\left(t_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{h}{2}y'_k, y'_k + \frac{a_k}{2}\right)h$$

„harmadik”

$$c_k = f\left(t_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{h}{2}y'_k + \frac{h}{4}a_k, y'_k + \frac{b_k}{2}\right)h$$

„negyedik”

$$d_k = f\left(t_k + h, y_k + hy'_k + \frac{h}{2}b_k, y'_k + c_k\right)h$$

ezekkel kapjuk a záró formulákat

$$y_{k+1} = y_k + hy' + \frac{h}{6}(a_k + b_k + c_k) \quad (\text{M14.})$$

$$y'_{k+1} = y'_k + \frac{1}{6}(a_k + 2b_k + 2c_k + d_k) \quad (\text{M15.})$$

A Runge – Kutta módszer alkalmazása célszerű a jelen feladatkör megoldására az implicit módon határozható változók és a deriváltak felírása a (42.) – (47.) egyenletrendszerben egyszerűen megoldható. A modell számítási feladatainak megoldására alkalmas módszer. A számítás pontossága, stabilitása és időigénye a „q” célszerű megválasztásával állítható be, jelen feladat megoldása esetén elégséges a $q = 4$ alkalmazása.

1. Mérési jegyzőkönyv

NITROKÉMIA		MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV				Dátum : 01.10.08	
Teszt sorszám : TR030							

Lőpor : TR029 REX_0		Bomba térfogat : 25 cm ³		Bomba szám : 920		Standard : Lőpor hőmérséklet : 21 °C	
Bemért lőpor tömege : 4.12 g		Bemért gyújtó lp. töm.: 0.00 g		Töltési sűrűség (Δ) : .165 g/cm ³			

Piezo típus : 6000		Piezo szám : 115		Kalibrációs faktor : 500 bar/V			
P/PM	IDŐ [ms]	NYOMÁS [bar]	∫pdt [bar*ms]	dp/dt [bar/ms]	ÉLÉNKSÉG [1/(bar*ms)]		
.05	1.009	89.0	0.00	243.3	1.5410		
.10	1.201	177.0	23.55	969.5	3.0947		
.15	1.271	268.0	38.94	1635.8	3.4500		
.20	1.317	354.0	53.24	2082.9	3.3262		
.25	1.357	446.0	69.26	2584.9	3.2727		
.30	1.387	532.0	83.97	3138.0	3.3319		
.35	1.413	621.0	99.01	3740.5	3.4022		
.40	1.435	709.0	113.70	4339.6	3.4576		
.45	1.455	802.0	128.89	4891.4	3.4504		
.50	1.473	893.0	144.23	5233.8	3.3260		
.55	1.489	979.0	159.29	5407.0	3.1337		
.60	1.505	1066.0	175.73	5456.8	2.9031		
.65	1.521	1153.0	193.57	5383.2	2.6454		
.70	1.539	1248.0	215.27	5152.9	2.3629		
.75	1.555	1328.0	235.96	4817.1	2.0512		
.80	1.575	1419.0	263.52	4272.6	1.7124		
.85	1.597	1506.0	295.80	3671.1	1.3828		
.90	1.625	1598.0	339.40	2916.8	1.0506		
.95	1.659	1682.0	395.33	2017.6	.6801		
1.00	1.914	1770.0	842.68	0.0	0.0000		

RÉSZ IDŐ [ms]		ÉGÉSI IDŐ [ms]		FŐ ÉLÉNKSÉG [1/(bar*ms)]			ÁTL. GÁZFEJL. [bar/ms]
10-30	30-70	10-80	5-100	30-80	30-70	30-50	30-70
.186	.152	.374	.905	2.8490	3.0763	3.3718	4664.19

ÁLTALÁNOS INFORMÁCIÓK							
Max.nyomás.....= 1770.0		bar		Lőporerő...= 909.42		KJ/Kg	
max.dp/dt...(ψ=0.60)= 5457.3		bar/ms		∫pdt.....= 131.30		bar*ms	
max.élénkség(ψ=0.43)= 3.4720		1/(bar*ms)					
Határ.....:	4.0	V	DC-szint.....:	-2880.000	mV		
Idő/pont...:	1.0	µs	Kurzor helyzete.....:	1200.0	ms		
Offset.....:	22.0	bar	Adatpontok (10%-100%)..:	697.0			
Mérési idő:	10	ms	A mérés időpontja.....:	02:05:01			

2. Mérési jegyzőkönyv

NITROKÉMIA MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV Dátum : 01.10.08
 Teszt sorszám : TR027

Löpor : TR027 REX_I Standard :
 Bomba térfogat : 25 cm³ Bomba szám : 920 Löpor hőmérséklet : 21 °C
 Bemért löpor tömege : 4.12 g Bemért gyújtó lp. töm.: 0.00 g Töltési sűrűség (Δ) : .165 g/cm³

Piezo típus : 6000 Piezo szám : 115 Kalibrációs faktor : 500 bar/V

P/PM [1]	IDŐ [ms]	NYOMÁS [bar]	∫pdt [bar*ms]	dp/dt [bar/ms]	ÉLÉNKSÉG [1/(bar*ms)]
.05	.969	89.0	0.00	201.7	1.2730
.10	1.205	177.0	29.33	693.9	2.2151
.15	1.297	267.0	49.38	1338.4	2.8276
.20	1.351	354.0	66.11	1888.1	3.0150
.25	1.393	443.0	82.85	2342.7	2.9900
.30	1.429	534.0	100.49	2745.2	2.9095
.35	1.459	622.0	117.89	3090.8	2.8123
.40	1.487	713.0	136.65	3426.1	2.7215
.45	1.511	799.0	154.86	3723.7	2.6372
.50	1.535	892.0	175.23	4030.7	2.5604
.55	1.555	975.0	193.97	4293.7	2.4909
.60	1.575	1063.0	214.43	4525.7	2.4088
.65	1.595	1155.0	236.70	4618.2	2.2697
.70	1.615	1247.0	260.82	4564.3	2.0890
.75	1.633	1328.0	284.07	4390.7	1.8723
.80	1.655	1421.0	314.42	4017.3	1.6160
.85	1.679	1510.0	349.71	3408.0	1.3011
.90	1.707	1594.0	393.31	2601.2	.9306
.95	1.749	1681.0	462.32	1593.7	.5380
1.00	1.933	1769.0	783.57	0.0	0.0000

RÉSZ IDŐ [ms]	ÉGÉSI IDŐ [ms]	FŐ ÉLÉNKSÉG [1/(bar*ms)]	ÁTL. GÁZFEJL.[bar/ms]
10-30 30-70 10-80	5-100	30-80 30-70 30-50	30-70
.224 .186 .450	.964	2.3842 2.5378 2.7305	3858.41

ÁLTALÁNOS INFORMÁCIÓK

Max.nyomás.....= 1769.0 bar Löporerő...= 908.91 KJ/Kg
 max.dp/dt...(ψ=0.66)= 4619.4 bar/ms 0'7
 ∫pdt.....= 160.33 bar*ms
 max.élénkség(ψ=0.22)= 3.0238 1/(bar*ms) 0'3

Határ.....: 4.0 V DC-szint.....: -2882.000 mV
 Idő/pont...: 1.0 μs Kurzor helyzete.....: 1200.0 ms
 Offset.....: 30.0 bar Adatpontok (10%-100%): 714.0
 Mérési idő: 10 ms A mérés időpontja.....: 01:17:45

3. Mérési jegyzőkönyv

NITROKÉMIA		MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV			Dátum : 01.10.08		
Teszt sorszám : TR026							

Lőpor : TR926 REX_II		Bomba szám : 920		Standard :			
Bomba térfogat :	25 cm ³	Bemért gyújtó lp. töm.:	0.00 g	Lőpor hőmérséklet :	21 °C		
Bemért lőpor tömege :	4.12 g				Töltési sűrűség (Δ) :	.165 g/cm ³	

Piezo típus : 6000		Piezo szám : 115		Kalibrációs faktor : 500 bar/V			
P/PM [1]	IDŐ [ms]	NYOMÁS [bar]	∫pdt [bar*ms]	dp/dt [bar/ms]	ÉLÉNKÉSÉG [1/(bar*ms)]		
.05	.911	88.0	0.00	198.2	1.2873		
.10	1.201	176.0	35.92	512.1	1.6585		
.15	1.329	265.0	63.59	961.4	2.0608		
.20	1.403	352.0	86.27	1407.1	2.2779		
.25	1.459	441.0	108.46	1798.2	2.3241		
.30	1.503	528.0	129.81	2159.2	2.3316		
.35	1.541	617.0	151.61	2514.4	2.3236		
.40	1.573	702.0	172.77	2838.6	2.3056		
.45	1.603	792.0	195.25	3106.1	2.2385		
.50	1.631	882.0	218.75	3309.9	2.1452		
.55	1.657	970.0	242.90	3459.6	2.0400		
.60	1.681	1054.0	267.27	3563.9	1.9298		
.65	1.705	1140.0	293.68	3603.9	1.8022		
.70	1.731	1233.0	324.63	3538.7	1.6463		
.75	1.755	1317.0	355.32	3378.3	1.4657		
.80	1.783	1407.0	393.56	3069.5	1.2537		
.85	1.813	1492.0	437.17	2606.5	.9994		
.90	1.851	1580.0	495.71	2003.4	.7274		
.95	1.907	1668.0	586.96	1157.4	.4035		
1.00	2.122	1754.0	955.28	0.0	0.0000		

RÉSZ IDŐ [ms]		ÉGÉSI IDŐ [ms]		FŐ ÉLÉNKÉSÉG [1/(bar*ms)]			ÁTL. GÁZFEJL.[bar/ms]
10-30	30-70	10-80	5-100	30-80	30-70	30-50	30-70
.302	.228	.582	1.211	1.9354	2.0717	2.2608	3082.07

ÁLTALÁNOS INFORMÁCIÓK							
Max.nyomás.....= 1754.0 bar		Lőporerő...= 901.20 KJ/Kg					
max.dp/dt...(ψ=0.65)= 3604.3 bar/ms		∫pdt.....= 194.82 bar*ms					
max.élénkesség(ψ=0.30)= 2.3334 1/(bar*ms)							
Határ.....:	4.0 V	DC-szint.....:	-2884.000 mV				
Idő/pont..:	1.0 μs	Kurzor helyzete.....:	1200.0 ms				
Offset....:	30.0 bar	Adatpontok (10%-100%):	901.0				
Mérési idő:	10 ms	A mérés időpontja.....:	00:57:03				

4. Mérési jegyzőkönyv

NITROKÉMIA		MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV			Dátum : 01.10.05		
Teszt sorszám : TR024							
Lőpor : TR024 REX_III		Bomba szám : 920		Standard :			
Bomba térfogat :	25 cm ³	Bemért gyújtó lp. töm.:	0.00 g	Lőpor hőmérséklet :	21 °C		
Bemért lőpor tömege :	4.12 g	Töltési sűrűség (Δ) :			.165 g/cm ³		
Piezo típus : 6000		Piezo szám : 115		Kalibrációs faktor : 500 bar/V			
P/PM	IDŐ [ms]	NYOMÁS [bar]	∫pdt [bar*ms]	dp/dt [bar/ms]	ÉLÉNKSÉG [1/(bar*ms)]		
.05	.829	87.0	0.00	103.5	.6754		
.10	1.185	174.0	44.40	375.8	1.2390		
.15	1.339	262.0	77.18	796.7	1.7487		
.20	1.429	347.0	104.47	1112.4	1.8487		
.25	1.499	435.0	131.83	1423.8	1.8865		
.30	1.553	521.0	157.65	1749.3	1.9359		
.35	1.599	609.0	183.65	2071.4	1.9615		
.40	1.639	697.0	209.82	2361.7	1.9547		
.45	1.673	782.0	235.02	2615.5	1.9295		
.50	1.705	869.0	261.51	2837.7	1.8848		
.55	1.735	957.0	288.98	2981.0	1.8001		
.60	1.763	1041.0	317.03	3055.9	1.6937		
.65	1.791	1127.0	347.48	3073.9	1.5728		
.70	1.821	1219.0	382.77	3023.1	1.4390		
.75	1.849	1302.0	418.15	2889.6	1.2828		
.80	1.881	1391.0	461.35	2633.4	1.1006		
.85	1.915	1474.0	510.16	2239.9	.8767		
.90	1.961	1563.0	580.19	1632.2	.6100		
.95	2.029	1648.0	689.70	908.8	.3206		
1.00	2.425	1734.0	1368.29	0.0	0.0000		
RÉSZ IDŐ [ms]		ÉGÉSI IDŐ [ms]	FŐ ÉLÉNKSÉG [1/(bar*ms)]			ÁTL. GÁZFEJL. [bar/ms]	
10-30	30-70	10-80	5-100	30-80	30-70	30-50	
.368	.268	.696	1.596	1.6681	1.7816	1.9251	2605.54
ÁLTALÁNOS INFORMÁCIÓK							
Max.nyomás.....= 1734.0		bar	Lőporerő...= 890.92		KJ/Kg		
max.dp/dt...(ψ=0.64)= 3074.8		bar/ms	∫pdt.....= 225.12		bar*ms		
max.élénkség(ψ=0.36)= 1.9643		1/(bar*ms)					
Határ.....:	4.0	V	DC-szint.....:	-2880.000 mV			
Idő/pont...:	1.0	µs	Kurzor helyzete.....:	1200.0 ms			
Offset.....:	43.0	bar	Adatpontok (10%-100%):	1188.0			
Mérési idő:	10	ms	A mérés időpontja.....:	01:17:57			

5. Mérési jegyzőkönyv

NITROKÉMIA		MÉRÉSI JEGYZŐKÖNYV			Dátum : 01.10.05	
Teszt sorszám : TR021						

Lőpor : TR021 REX_IV		Bomba szám : 920		Standard :		
Bomba térfogat :	25 cm ³	Bemért gyújtó lp. töm.:	0.00 g	Lőpor hőmérséklet :	21 °C	
Bemért lőpor tömege :	4.12 g	Töltési sűrűség (Δ) :	.165 g/cm ³			

Piezo típus : 6000		Piezo szám : 115		Kalibrációs faktor : 500 bar/V		
P/PM [1]	IDŐ [ms]	NYOMÁS [bar]	∫pdt [bar*ms]	dp/dt [bar/ms]	ÉLÉNKÉSÉG [1/(bar*s)]	
.05	.735	88.0	0.00	121.4	.7844	
.10	1.203	175.0	59.24	284.4	.9287	
.15	1.421	263.0	105.96	562.1	1.2205	
.20	1.549	350.0	145.00	803.6	1.3102	
.25	1.645	440.0	182.78	1095.7	1.4185	
.30	1.713	525.0	215.54	1424.1	1.5494	
.35	1.769	613.0	247.41	1709.0	1.5930	
.40	1.817	701.0	278.98	1965.8	1.6021	
.45	1.859	790.0	310.32	2318.0	1.6739	
.50	1.893	875.0	338.69	2717.2	1.7735	
.55	1.923	963.0	366.33	3153.5	1.8707	
.60	1.949	1050.0	392.57	3464.8	1.8857	
.65	1.975	1142.0	421.15	3607.4	1.8106	
.70	1.999	1229.0	449.68	3589.3	1.6762	
.75	2.023	1313.0	480.27	3427.6	1.4929	
.80	2.051	1404.0	518.43	3069.0	1.2603	
.85	2.081	1490.0	561.96	2631.8	1.0163	
.90	2.117	1575.0	617.28	2090.6	.7583	
.95	2.169	1663.0	701.72	1280.6	.4422	
1.00	2.395	1750.0	1091.85	0.0	0.0000	

RÉSZ IDŐ [ms]	ÉGÉSI IDŐ [ms]	FŐ ÉLÉNKÉSÉG [1/(bar*s)]			ÁTL. GÁZFEJL. [bar/ms]	
10-30 30-70 10-80	5-100	30-80	30-70	30-50	30-70	
.510 .286 .848	1.660	1.6245	1.6974	1.6417	2632.26	

ÁLTALÁNOS INFORMÁCIÓK						
Max.nyomás.....= 1750.0		bar	Lőporerő...= 899.14		KJ/Kg	
max.dp/dt... (ψ=0.67)= 3617.3		bar/ms	∫pdt.....= 234.14		bar*ms	
max.élénkség(ψ=0.58)= 1.8938		1/(bar*s)				
Határ.....:	4.0	V	DC-szint.....:	-2876.000 mV		
Idő/pont...:	1.0	µs	Kurzor helyzete.....:	1200.0 ms		
Offset.....:	45.0	bar	Adatpontok (10%-100%):	1114.0		
Mérési idő:	10	ms	A mérés időpontja.....:	01:06:46		

1. Számítási adatlap

10:19:34

Rex_0 1

BELSŐ (BOMBA) BALLISZTIKA

ÁLTALÁNOS ADATOK A RENDSZERRŐL:

W_0 [m³] :0,00025
 P_b [MPa] :0,1
 δ [kg/m³] :1600
 κ [1] 1,2
 lőporok sz. :1

LŐPOR ADATOK:

lőpor száma :1
 ω [kg] :0.00412
 Q_c [kJ/kg] : 4035
 T_{ind} [μs] :0
 δ_{eff}/δ :1
 u_{1eff}/u :1
 R_k [mm] :0,7685
 $2c$ [mm] :0,182

Lőportípus :Rúd

SZÁMÍTÁS ADATA:

dt [μs] : 10

ÉGÉSVÉGI ADATOK:

$P_{év}$ [MPa] :190
 $T_{év}$ [ms] :1,80

2. Számítási adatlap

10:25:48
Rex_0 0,8

BELSŐ (BOMBA) BALLISZTIKA

ÁLTALÁNOS ADATOK A RENDSZERRŐL:

W_0 [m³] :0,00025
 P_b [MPa] :0,1
 δ [kg/m³] :1600
 κ [1] 1,2
lőporok sz. :1

LŐPOR ADATOK:

lőpor száma :1
 ω [kg] :0.00412
 Q_e [kJ/kg] : 4035
 T_{ind} [μs] :0
 δ_{eff}/δ :0,8
 u_{1eff}/u :2,41
 R_k [mm] :0,7685
 $2c$ [mm] :0,182

Lőportípus :Rúd

SZÁMÍTÁS ADATA:

dt [μs] : 10

ÉGÉSVÉGI ADATOK:

$P_{év}$ [MPa] :204
 $T_{év}$ [ms] :0,74

3. Számítási adatlap

09:00:21

Rex_I 1

BELSŐ (BOMBA) BALLISZTIKA

ÁLTALÁNOS ADATOK A RENDSZERRŐL:

W_0 [m³] :0,00025
 P_b [MPa] :0,1
 δ [kg/m³] :1600
 κ [1] 1,2
 lőporok sz. :1

LŐPOR ADATOK:

lőpor száma :1
 ω [kg] :0.00412
 Q_e [kJ/kg] : 4016
 T_{ind} [μs] :0
 δ_{eff}/δ :1
 u_{1eff}/u :1
 R_k [mm] :0,7785
 $2c$ [mm] :0,21

Lőportípus :Rúd

SZÁMÍTÁS ADATA:

dt [μs] : 10

ÉGÉSVÉGI ADATOK:

$P_{év}$ [MPa] :190
 $T_{év}$ [ms] :2,07

4. Számítási adatlap

09:04:10
Rex_I 0,85

BELSŐ (BOMBA) BALLISZTIKA

ÁLTALÁNOS ADATOK A RENDSZERRŐL:

W_0 [m³] :0,00025
 P_b [MPa] :0,1
 δ [kg/m³] :1600
 κ [1] 1,2
lőporok sz. :1

LŐPOR ADATOK:

lőpor száma :1
 ω [kg] :0.00412
 Q_e [kJ/kg] : 4016
 T_{ind} [μs] :0
 δ_{eff}/δ :0,85
 u_{1eff}/u :2,134
 R_k [mm] :0,7785
 $2c$ [mm] :0,21

Lőportípus :Rúd

SZÁMÍTÁS ADATA:

dt [μs] : 10

ÉGÉSVÉGI ADATOK:

$P_{év}$ [MPa] :198
 $T_{év}$ [ms] :0,96

5. Számítási adatlap

08:44:16

Rex_II 1

BELSŐ (BOMBA) BALLISZTIKA

ÁLTALÁNOS ADATOK A RENDSZERRŐL:

W_0 [m³] :0,00025
 P_b [MPa] :1
 δ [kg/m³] :1600
 κ [1] 1,2
lőporok sz. :1

LŐPOR ADATOK:

lőpor száma :1
 ω [kg] :0.00412
 Q_e [kJ/kg] :3883
 T_{ind} [μs] :0
 δ_{eff}/δ :1
 u_{1eff}/u :1
 R_k [mm] :0,775
 $2c$ [mm] :0,2273

Lőportípus :Rúd

SZÁMÍTÁS ADATA:

dt [μs] : 10

ÉGÉSVÉGI ADATOK:

$P_{év}$ [MPa] :190
 $T_{év}$ [ms] :2,38

6. Számítási adatlap

08:49:13
Rex_II 0,85

BELSŐ (BOMBA) BALLISZTIKA

ÁLTALÁNOS ADATOK A RENDSZERRŐL:

W_0 [m³] :0,00025
 P_b [MPa] :1
 δ [kg/m³] :1600
 κ [1] 1,2
lőporok sz. :1

LŐPOR ADATOK:

lőpor száma :1
 ω [kg] :0.00412
 Q_e [kJ/kg] :3883
 T_{ind} [μs] :0
 δ_{eff}/δ :0,85
 u_{1eff}/u :2,134
 R_k [mm] :0,775
 $2c$ [mm] :0,2273

Lőportípus :Rúd

SZÁMÍTÁS ADATA:

dt [μs] : 10

ÉGÉSVÉGI ADATOK:

$P_{év}$ [MPa] :195
 $T_{év}$ [ms] :1,10

7. Számítási adatlap

08:11:05

Rex_III 1

BELSŐ (BOMBA) BALLISZTIKA

ÁLTALÁNOS ADATOK A RENDSZERRŐL:

 W_0 [m³] :0,00025 P_b [MPa] :1 δ [kg/m³] :1600 κ [1] 1,2

lőporok sz. :1

LŐPOR ADATOK:

lőpor száma :1

 ω [kg] :0.00412 Q_e [kJ/kg] :3753 T_{ind} [μs] :0 δ_{eff}/δ :1 u_{1eff}/u :1 R_k [mm] :0,762 $2c$ [mm] :0,2124

Lőportípus :Rúd

SZÁMÍTÁS ADATA:

 dt [μs] : 10

ÉGÉSVÉGI ADATOK:

 $P_{év}$ [MPa] :187 $T_{év}$ [ms] :2,40

8. Számítási adatlap

08:29:48
Rex_III 0,9

BELSŐ (BOMBA) BALLISZTIKA

ÁLTALÁNOS ADATOK A RENDSZERRŐL:

W_0 [m³] :0,00025
 P_b [MPa] :1
 δ [kg/m³] :1600
 κ [1] 1,2
lőporok sz. :1

LŐPOR ADATOK:

lőpor száma :1
 ω [kg] :0.00412
 Q_e [kJ/kg] :3753
 T_{ind} [μs] :0
 δ_{eff}/δ :0,9
 u_{1eff}/u :1,866
 R_k [mm] :0,762
 $2c$ [mm] :0,2124

Lőportípus :Rúd

SZÁMÍTÁS ADATA:

dt [μs] : 10

ÉGÉSVÉGI ADATOK:

$P_{év}$ [MPa] :193
 $T_{év}$ [ms] :1,28

9. Számítási adatlap

06:21:03

Rex_IV 1

BELSŐ (BOMBA) BALLISZTIKA

ÁLTALÁNOS ADATOK A RENDSZERRŐL:

 $W_0[\text{m}^3]$:0,00025 $P_b[\text{MPa}]$:1 $\delta[\text{kg}/\text{m}^3]$:1600 $\kappa [1]$ 1,2

lőporok sz. :1

LŐPOR ADATOK:

lőpor száma :1

 $\omega [\text{kg}]$:0.00412 $Q_e[\text{kJ}/\text{kg}]$:3834 $T_{\text{ind}} [\mu\text{s}]$:0 $\delta_{\text{eff}}/\delta$:1 $u_{1\text{eff}}/u$:1 $R_k [\text{mm}]$:0,784 $2c [\text{mm}]$:0,2676

Lőportípus :Rúd

SZÁMÍTÁS ADATA:

 $dt [\mu\text{s}]$: 10

ÉGÉSVÉGI ADATOK:

 $P_{\text{év}}[\text{MPa}]$:188 $T_{\text{év}} [\text{ms}]$:2,81

10. Számítási adatlap

07:46:23
Rex_IV 0,8

BELSŐ (BOMBA) BALLISZTIKA

ÁLTALÁNOS ADATOK A RENDSZERRŐL:

W_0 [m³] :0,00025
 P_b [MPa] :1
 δ [kg/m³] :1600
 κ [1] 1,2
lőporok sz. :1

LŐPOR ADATOK:

lőpor száma :1
 ω [kg] :0.00412
 Q_e [kJ/kg] :3834
 T_{ind} [μs] :0
 δ_{eff}/δ :0,8
 u_{1eff}/u :2,41
 R_k [mm] :0,784
 $2c$ [mm] :0,2676

Lőportípus :Rúd

SZÁMÍTÁS ADATA:

dt [μs] : 10

ÉGÉSVÉGI ADATOK:

$P_{év}$ [MPa] :194
 $T_{év}$ [ms] :1,14

11. Számítási adatlap

06:20:22
Rex_IV 0,95

BELSŐ (BOMBA) BALLISZTIKA

ÁLTALÁNOS ADATOK A RENDSZERRŐL:

W_0 [m³] :0,00025
 P_b [MPa] :1
 δ [kg/m³] :1600
 κ [1] 1,2
lőporok sz. :1

LŐPOR ADATOK:

lőpor száma :1
 ω [kg] :0.00412
 Q_e [kJ/kg] :3834
 T_{ind} [μs] :0
 δ_{eff}/δ :0,95
 u_{1eff}/u :1,583
 R_k [mm] :0,784
 $2c$ [mm] :0,2676

Lőportípus :Rúd

SZÁMÍTÁS ADATA:

dt [μs] : 10

ÉGÉSVÉGI ADATOK:

$P_{év}$ [MPa] :190
 $T_{év}$ [ms] :1,77

Hivatkozott és tanulmányozott irodalom

1. Cranz Dr. C.: Lehrbuch der Ballistik, Julius Springer Verlag, Berlin 1926
2. Harmos Zoltán: Tüzérlövésstan, M. Kir. Honvédelmi Minisztérium, Budapest, 1937
3. Harmos Zoltán: Gyakorlati ballisztika, A szerző kiadása, Budapest, 1941
4. Marcell Béla: Belső ballisztika, Haditechnikai Intézet, Műszaki Egyetemek és Főiskolák Hadmérnöki Tagozatainak Parancsnoksága, Budapest, 1950
5. Corner PhD M. A.: Theory of the Interior Ballistics of Guns, John Wiley & Sons, London, 1950
6. Dr. Kunz Alfons: Lőporok, Budapesti Műszaki Egyetem Hadmérnöki Kara, Budapest, 1951
7. Zoltay Ferenc: Ballisztika, Budapesti Műszaki Egyetem Hadmérnöki Kara, Budapest, 1951
8. Hunt F.R. W.: Internal ballistics, Ministry of supply, London, 1951
9. Dr. Kunz Alfons: Lőpor nyersanyagok, Budapesti Műszaki Egyetem Hadmérnöki Kara, Budapest, 1953
10. Gallwitz U.: Tüzérségi lőporok és töltetek, Nehézipari könyv- és folyóirat kiadó vállalat, 1954
11. Dr. Kunz Alfons: Füstnélküli lőporok, Budapesti Műszaki Egyetem Hadmérnöki Kara, Budapest, 1955
12. Szerebrjakov M. E. :Vnutrennaja ballisztika, Oborongiz, Moszkva, 1962
13. Vincze István: Matematikai statisztika ipari alkalmazásokkal, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1968.
14. Obádovocs J. Gyula: Gyakorlati számítási eljárások – Gondolat kiadó, Budapest, 1972.
15. Korn G. A.; Korn T. M.: Matematikai kézikönyv műszakiaknak, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1975.
16. Dr. Kováts Zoltán: Belső ballisztika, Magyar Kézilőfegyver-vizsgáló Hivatal, Budapest, 1977
17. Gorst A. G. :Pulver und Sprengstoffe, Militärverlag, Berlin, 1977
18. Krier H.: Interior Ballistics of Guns, AIAA, Washington, 1979
19. Bowen J R : Dynamics of flames and reactive systems, AIAA, Washington, 1984
20. Stiefel L.: Gun Propulsion Technology, AIAA, Washington, 1988
21. Madarász Géza: Porózus lőporok (Rex) tulajdonságait befolyásoló tényezők, Nitrokémia, Balatonfüzfő-Gyártelep, 1991,(kézirat)

22. STANAG 4367 Thermodynamic Interior Ballistic Modell with Global Parameters, 4. kiadás , 1992
23. Piroska György: Csöves lőfegyverek, Egyetemi jegyzet, Budapesti Műszaki Egyetem, www.manuf.bme.hu, Budapest, 1995
24. STANAG 4115 Definition and Determination of Ballistic Properties of Gun Propellants, 2. kiadás, 1997
25. Laney C B: Computational Gasdinamics, Cambridge University Press, New York, 1998
26. Titica V, etc.: The fundamental problem solving of interior ballistics using phisical law of povder burning, AARMS, Budapest, 2004/3

Publikációs jegyzék

Publikációk:

1. Piroska György: Páncélozott szállító harcjármű + hajóágyú = kísérő jármű, Haditechnika 1980/1
2. Tanulmány a tábori tüzérségi lövedékek lőtávolságának növelési lehetőségéről, TD05113/HTI sz., 1980
3. Piroska György: A 122 mm-es önjáró tarack, Haditechnika 1981/3
4. Tanulmány az osztályparancsnoki figyelőműszer valamint az ET-78 távmérő és a PAB-2A tüzér tájoló műszer beépíthetőségéről, TD05393/HTI sz., 1982
5. Algoritmus leírás a passzív mozgású tüzérségi lövedék mozgását meghatározó programhoz, Nyt 4709/HTI sz., 1982
6. Piroska György: Az MT-12 szovjet páncéltörő ágyú, Haditechnika 1983/2
7. Tanulmány a MN Haditechnikai Intézet kísérleti osztály mérés technológiájának modernizálásáról, 0319/1983/HTI sz., 1983
8. Tanulmány a lőszer lőtávolságának meghatározásáról, TD006376/HTI sz., 1984
9. Ismertető az ÁRPÁD II. ballisztikai program eredményeiről, 0858/1989/HTI sz., 1989
10. Piroska György: Csöves lőfegyverek, Egyetemi jegyzet, Budapesti Műszaki Egyetem, www.manuf.bme.hu, Budapest, 1995
11. Piroska György: A lőpor geometriai méret változás hatásának sztohasztikus szimulációja a belballisztikai folyamatokban, ZMNE, 2000
12. Piroska György: A belső ballisztikai folyamatok modellezése, Haditechnika 2001/3
13. Lőpor porozitási jellemzők elemzése ballisztikai bomba mérések alapján, ZMNA Haditechnika 2002 szimpózium külökiadvány
14. Porózus éghető anyagok égésméleti modellezésének néhány kérdése ZMNA Haditechnika 2002 szimpózium külökiadvány
15. Piroska György, Dr. Szabó Tibor: Az M139Y MOD-1 izraeli közelségi gyűjtővel végrehajtott kísérleti-ellenőrző lövészet tapasztalatai, Haditechnika 2003/2 (50%)
16. Bevonatolt lőpor égésméleti modellezésének néhány kérdése ZMNA Haditechnika 2004 szimpózium külökiadvány
17. Dr. Szabó Tibor, Dr. Erdélyi Sándor, Piroska György: Tüzérség, Haditechnikai Füzetek 2004/2 (40%)
18. Dr. Szabó Tibor, Petrovics Mihály, Piroska György: A NATO STANAG meteorológiai és ballisztikai jelentések átalakításának és számítógépes feldolgozásának lehetőségei a Magyar Honvédségben, ZMNE Tudományos Könyvtár, 2004 (20%)

19. Piroska György: Belső ballisztika, Egyetemi jegyzet, Budapesti Műszaki Egyetem, www.manuf.bme.hu, Budapest, 2004
20. Piroska György: Külső ballisztika, Egyetemi jegyzet, Budapesti Műszaki Egyetem, www.manuf.bme.hu, Budapest, 2004

Előadások:

1. The concept of ordnance equipment's development and our achievements in field during the period of Hungary's accession to NATO (Előadás, Varsó Fegyverzeti HTI 1999. Időtartam 20 perc)
2. Lőpor porozitási jellemzők elemzése ballisztikai bomba mérések alapján (Előadás, Budapest ZMNA Haditechnika 2002 szimpózium, Időtartam 20 perc)
3. Porózus éghető anyagok égésméleti modellezésének néhány kérdése (Előadás, Budapest ZMNA Haditechnika 2002 szimpózium, Időtartam 20 perc)
4. Bevonatolt lőpor égésméleti modellezésének néhány kérdése (Előadás, Budapest ZMNA Haditechnika 2004 szimpózium, Időtartam 20 perc)

Szabadalmak:

1. Eljárás és vezérlő berendezések tüzérségi tűzvezető rendszerek automatizálására (Szabadalom 1988, lajstrom szám: 195.715, 5%)
2. Megvezető szerkezet zárszerkezettel ellátott csőhátrasiklásos kézfegyverekhez (Szabadalom 1990, lajstrom szám: 207.156, 10%)