

37. Országos Tudományos Diákköri Konferencia

Had- és Rendészettudományi Szekció

Budapest, 2025. április 22-24.

Nemzeti Közzolgálati Egyetem

Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar

Következő Generációs, .50-es Kaliberű Hangtompító Fejlesztése

Jelige: Armis et litteris

Pályamunka lezárásának időpontja: 2024. november

2025.

Tartalomjegyzék

Előszó	I
Abstract	I
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	II
NYILATKOZAT	II
Jelölések jegyzéke	III
1 Bevezetés	1
1.1 Célkitűzések	1
1.2 Tartalmi áttekintés	1
2 Irodalmi áttekintés	2
2.1 A hang fizikája	2
2.2 A lövés zajának összetevői	3
2.3 Akusztikai határértékek, szabványok, és mérési eljárások	3
2.3.1 MIL-STD-1474E	3
2.3.2 AEP-4785	5
2.4 Hangtompítók	7
2.4.1 Történelmi áttekintés – Hangtompítók akkor, és most	7
2.4.2 Rendelkezésre álló információk hiánya	12
2.4.3 Hangtompítók hatása a csőszájnál észlelhető fényhatásokra	12
2.4.4 Hangtompítók hatása a lövedék külső ballisztikai kezdő paramétereire	12
2.4.5 Hangtompítók hatása a fegyver pontosságára	14
2.4.6 Hangtompítók hatása a visszarúgás-impulzusra	14
2.4.7 Hangtompítók hatása a gázvisszafűvásokra	16
2.4.8 Hangtompítók felépítése, szerkezeti elemei	17
2.4.9 Hazai bejegyzett szabadalmak kutatása	20
3 Lidérc .50 – Saját hangtompító-koncepció	22
3.1 SERO GM-6 „Lynx”	22
3.2 Alelemek, hatásmechanizmusok	23
3.2.1 Expanziós tér	23
3.2.2 Terelőlemezek	24
3.2.3 Helikális csatornák	Hiba! A könyvjelző nem létezik.
3.2.4 Csőszájfék	26
3.2.5 Rögzítés	26
3.3 Méretezés	27

3.3.1	Belső ballisztikai paraméterek.....	28
3.3.2	Az ideális hangtompító.....	29
3.3.3	Szilárdsági ellenőrzés bemenő paraméterei.....	30
3.4	Modellezés, verziók.....	30
3.4.1	Lidérc .50 V1.....	30
3.4.2	Lidérc .50 V2.....	32
3.4.3	Lidérc .50 V3.....	32
3.4.4	WAAM Technológia bemutatása, gyártáshelyes modellezés	33
3.4.5	SLM Technológia bemutatása, gyártáshelyes modellezés	34
4	Szimulációk	35
4.1	Szimulációk	35
4.1.1	Ansys Fluent.....	36
4.1.2	Eredmények.....	36
4.1.3	Ansys Static Structural	38
4.1.4	Eredmények.....	39
4.2	Módosítások a szimulációk eredményei alapján	43
5	Összefoglalás	43
5.1	Kutatási eredmények összefoglalása.....	43
5.2	Fejlesztési és továbblépési lehetőségek	45
6	Summary	47
7	Felhasznált irodalom	49
8	Ábrajegyzék.....	51
9	Táblázatok jegyzéke	52

Mellékletek jegyzéke

1. Melléklet: Ideális hangtompító belső térfogatának meghatározása
2. Melléklet: Szimulációk kezdő paramétereinek meghatározása

Előszó

Több, mint 100 éve alkalmazunk tűzfegyverek csőszájára erősíthető hangtompító csőszájszerelvényeket, amelyekkel nagyságrendekkel lecsökkenthetjük a lövés kiváltással járó hang – és fényjelenségeket. Ezen eszközök jelentősége az elmúlt évtizedekben exponenciálisan megnőtt hadi – és polgári alkalmazásban egyaránt. Polgári oldalról ez az eszközök legalizálásának, katonai oldalról a technológia – és doktrína fejlődésének tudható be.

Jelen kutatás célja a CAX szoftverek, és a fém 3D nyomtatás technológiájának sikeres integrációja egy ún. következő generációs prototípus – „*proof of concept*” - hangtompító fejlesztésébe és gyártásába, azok minden előnyét kiaknázva. Ezek alkalmazásával minden eddiginél könnyebb, kisebb és hatékonyabb hangtompítók fejlesztésére nyílik lehetőség: szimulációk alkalmazásával költséghatékony módon választhatjuk ki a leghatékonyabb konstrukciókat, majd fém 3D nyomtatás segítségével olyan komplex geometriák gyártását végezhetjük, amelyeket konvencionális gyártástechnológiák segítségével nem lehet elkészíteni.

A kutatás tárgyát képező hangtompítóban komplex geometriákat alkalmazva mechanikus elven lassítjuk a csőszájon kiömlő löporgázokat. A hangtompító belsejében kialakított zónák a különböző áramlási sebességeket figyelembe véve kerültek méretezésre, illetve egy, a löporgázok tervszerű áramoltatására kialakított külső nyomástartó komponenssel további funkcionalitást nyerünk.

A kutatás eredményeképpen olyan hangtompító készült, amellyel védjük a felhasználók és honvédeink egészségét, növeljük harctéri hatékonyságukat, illetve csökkentjük a kiképzési területek és lőtereket övező civil területek zajterhelését.

Kulcsszavak: *hangtompító, csőszájszerelvény, ballisztika, additív gyártástechnológia*

Abstract

For well over 100 years, firearm suppressors have been utilized as means of decreasing the muzzle report and muzzle flash, commonly associated with the discharge of a firearm. The relevance of these muzzle devices has increased exponentially in recent decades, both in the world of military, and civilian users. This tendency can be attributed to the recent legalization – in Hungarian legislature - of these devices as well as the advancements in military doctrines and technology.

This research aims to integrate current CAX, and metal 3D printing technologies into the development of a next-generation, prototype, *proof-of-concept*-type suppressor. With the increasing prevalence of said technologies, it's possible to develop smaller, lighter, and better suppressors, than ever before: with the help of simulations and CAD softwares, the most efficient design can be created and chosen in a cost-effective manner. Also, with the help of additive manufacturing processes, such as SLM and WAAM, complex geometries can be manufactured, that no other conventional manufacturing method could ever produce.

The suppressor, developed in context of this research has baffle geometries that slow exiting propellant gases mechanically. With the addition of an external pressure reservoir containing helical channels, the suppressor gains extra functionality regarding backpressure, and the evacuation of propellant gases. The suppressor developed helps preserve the health of the users, helps increase the lethality of our military personnel, and decreases the noise pollution of training areas and adjacent civilian areas.

Keywords: *suppressor, muzzle device, ballistics, additive manufacturing*

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretném megköszönni konzulensem, dr. Kovács Zsolt iránymutatását, illetve egyetemi oktatóim, dr. Nagy Péter, dr. Piros Attila, Csorba Béla tanácsait, Vozsech István segítségét! Köszönettel tartozok Kozák Emesének a szimulációkban nyújtott segítségével, Bognár Adriánnak az SLM technológiába való bevezetésért.

Köszönöm a SERO Kft., és a Büttner Kft. Munkatársainak, rendre Hegedűs Áronnak és Szabó Zoltánnak, hogy szakértelmükkel és segítőkészségükkel hozzájárultak a kutatás elkészüléséhez. Köszönöm továbbá dr. Tikász Gyulának, hogy megtekinthettem a táborfalvai HVKKFILVO referenciagyűjteményében található hangtompítókát és hangtompított kézi tűzfegyvereket. Köszönöm a budapesti Szellemi Tulajdon Nemzeti Hivatala, Frecskay János Szabadalmi Szakkönyvtár munkatársainak, hogy személyesen segítettek eligazodni a műszaki szabadalmak világában!

Végezetül köszönöm családomnak és barátaimnak a támogatást, lelkes érdeklődést és türelmet, amit a kutatás elkészítésének ideje alatt tanúsítottak.

Jelen kutatás a 2024-2.1.1-EKÖP-2024-00008 projekt keretében jött létre. A 2024-2.1.1-EKÖP-2024-00008 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2024-2.1.1-EKÖP pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Kecskemét, 2024. 11. 15.

NYILATKOZAT

Büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Kecskemét, 2024. 11. 15.

Jelölések jegyzéke

A táblázatban a többször előforduló jelölések magyar és *angol* nyelvű elnevezése, valamint a fizikai mennyiségek esetén annak mértékegysége található. Az egyes mennyiségek jelölése – ahol lehetséges – megegyezik hazai és a nemzetközi szakirodalomban elfogadott jelölésekkel. A ritkán alkalmazott jelölések magyarázata első előfordulási helyüknél található.

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
a	A közegre jellemző hangsebesség értéke	m/s
c	A közegre jellemző hangsebesség értéke	m/s
e	Szakadási nyúlás	-
f	„Force”-érték, a löporgázok fajlagos munkavégző képessége a hőveszteségekkel kalkulálva	J/kg
i	Fajlagos entalpia	J/kg
n	Biztonsági tényező	-
p	Nyomás	Pa
t	Idő	s
u	Áramlási sebesség	m/s
v	Sebesség	m/s
A	Felület	m ²
C_p	Izobár fajhő	J/kg K
dB	Szintérték	-
I	Impulzus, mozgásmennyiség	kg m/s
L	Hanghatás energiájának x időintervallumra kivetített egyenértékű energiája	J
Ma	Mach-szám, A közeg áramlásának sebessége az adott közegre vonatkozó hangsebességhez viszonyítva	-
Q_e	A löpor égéshője	kJ/kg
Re_h	Folyáshatár	MPa
R_m	Szakítószilárdság	MPa
R_{spec}	Specifikus gázállandó	J/kg K
T	Hőmérséklet	K
V	Térfogat	m ³

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
κ	Adiabatikus fajhőviszony	-
ε	A löirány, és a lövésdörej hullámfrontján, a szuperszonikus lövedék lökeshullámának érintője között bezárt szög	rad
α	Kovolumen, a löpor gázképző képessége	m ³ /kg
φ	A fiktív lövedéktömeg együtthatója, tűzfegyverek jellemzésére használt együttható	-
σ	Normál feszültség	MPa
Ω	Lőportöltet tömege	kg

Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
0	Kezdeti, és referenciaértékek
1	Végső, referenciaértékek
acél	Acélból készült expanziós tér jellemzői
cső	A csőfurat, és a töltényűr együttes tulajdonságai
dt	Dwell time, a nyomás alatt lévő ballisztikai alrendszer jellemzői
eq8h	Hanghatás energiájának 8 órára kivetített egyenértéke
g	Lőporgázok tulajdonságai
IAeq100ms	Hanghatás energiájának 100 millisecundumra kivetített egyenértéke
ki	Kilépő közeg jellemzői
l	Lövedék tulajdonságai
m	Mechanika (tűzfegyver automatikájának) tulajdonságai
hangtompító	Hangtompító jellemzői
titánium	Titánötvözetből készült expanziós tér jellemzői

Rövidítések, mozaikszavak

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
AHAH	Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans
ARU	Auditory Risk Unit, avagy Halláskárosodási Kockázati Egység
CAD	Computer Assisted Design
CPC	Cooperative Patent Classification, avagy kooperatív Szabadalmi Osztály
CFD	Computational Fluid Dynamics
DED	Direct Energy Deposition
DoD	Department of Defense, avagy Védelmi Minisztérium
DRC	Damage Risk Criteria, avagy Halláskárosodási Kockázati Kritérium
IPC	International Patent Classification, avagy Nemzetközi Szabadalmi Osztály
NATO	Észak-atlanti Szerződés Szervezete
SLM	Selective Laser Melting
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing

1 Bevezetés

A tűzfegyverekből történő lövéskiváltás egyik legközismertebb kísérő jelensége a nagy hanghatás: a tűzfegyver csőszáján kiömlő, a lövedék gyorsítására szolgáló lőporgáztömeg az atmoszférába lépve lökeshullámokat kelt, ami nagyteljesítményű kézi tűzfegyverek esetén akár 175 dB nagyságú fajlagos hangteljesítményt is eredményezhet [1]. Ezen hanghatások korlátozása több szempontból is jelentős előnyökkel járhat:

1. Óvjuk a fegyver felhasználójának, illetve a műveleti egységek más elemeinek – például szolgálati kutyák – hallását, egészségét. Bár napjainkra általános használatot élveznek a hallásvédelmi eszközök, például fül dugók, vagy hagyományos – és elektromos fültokok, ezek nem megfelelő használata, meghibásodása esetén a lövész továbbra is ki van téve a lövéssel járó káros hanghatásoknak [2].
2. Növeljük honvédeink, és más fegyveres egységeink bevetési hatékonyságát, műveleti biztonságát. A lövésdörej hangerejének korlátozása a harctéri felfedezhetőséget csökkenti, illetve könnyebbé teszi a kommunikációt az egységek tagjai között [2] [3].
3. Csökkentjük a kiképzési területeket övező civil övezetek zajterhelését [4].

A lövéskiváltással járó hanghatások csökkentésére szolgáló csőszájszerelvény az úgynevezett hangtompító. Működési elvüket tekintve a hangtompítók egészen napjainkig nagyon hasonlóak maradtak, alkalmazásuk mértéke azonban a fentebb említett okokból, valamint a technológia, és a katonai doktrínák fejlődéséből kifolyólag exponenciálisan nőtt.

Jelen kutatást a hangtompítók egyre szélesebb körben történő alkalmazása mellett a 21. század magasan fejlett technológiai tesztek aktuálissá. Kimondottan a fém 3D nyomtatás technológiájának felhasználásával lehetőség nyílt minden eddiginél hatékonyabb, kisebb, könnyebb hangtompítók fejlesztésére.

1.1 Célkitűzések

A kutatás kiemelt célja, hogy sikeresen integrálja a rendelkezésre álló CAX, és fém 3D nyomtatás technológiáit egy hangtompító fejlesztésébe és gyártásába, azok minden előnyét kiaknázva. Ezáltal egy biztonságos és hatékony hangtompító készül.

1.2 Tartalmi áttekintés

A bevezetést követő fejezet beszámol a hangtompítókkal, akusztikával és releváns fizikai jelenségekkel kapcsolatos részletes irodalmi kutatás eredményéről: ismerteti a

technika jelenlegi állását a hangtompítók terén, illetve a hangtompítókhoz kapcsolódó hivatalos, szabványos mérési eljárásokat. A harmadik fejezet a kutatás keretében készült hangtompító-konceptióról, a dizájn egyes részéről, illetve a választott gyártási technológiákról ad leírást, valamint az ezekre vonatkozó gyártáshelyes CAD modellek elkészítéséről. Továbbá betekintést ad a hangtompítóban fellépő igénybevételekre, és annak méretezési számításaiiba is. Ugyanez a fejezet kitér a hangtompító anyagválasztására is. A negyedik fejezet szimulációk segítségével a hangtompító-konceptió verifikációjáról tárgyal. Ezt követően, a negyedik fejezet a kutatás eredményeinek és továbbfejlesztési lehetőségeinek összefoglalását tartalmazza.

2 Irodalmi áttekintés

Ebben a fejezetben kifejtésre kerül a hangtompítókkal és a releváns akusztikai, fizikai jelenségekkel kapcsolatos részletes irodalmi kutatás eredménye, amely segítségével egy egyéni hangtompító tervezhető. Ezen kívül a hangtompítókkal kapcsolatos szabványos mérési eljárásokról is szó esik.

2.1 A hang fizikája

A hang egyfajta nyomásingadozás, amely az állandó légnyomás periodikus változását jelenti. Mivel az emberi fül által érzékelhető, (20×10^{-6} Pa) és a fájdalomküszöbbel egyenlő nyomásingadozás értéke között (~ 120 dB, azaz 20×10^0 Pa) önmagában hat nagyságrendnyi különbség van, lineáris skála helyett egy ún. logaritmikus skálát, a **decibelt** alkalmazzuk. Ez egy olyan viszonyító skála, amely egy mért, és egy referenciaérték hányadosának tízes alapú logaritmusát jelenti. Az 1. táblázatban láthatók a szintértékek számításához szükséges referenciaértékek [5].

1. táblázat Decibellel jellemezhetünk nyomást, teljesítményt, és intenzitást egyaránt [5]

Megnevezés	Mértékegység	Referenciaérték
Hangnyomás	(Pa)	20×10^{-6}
Hangteljesítmény	(W)	10^{-12}
Hangintenzitás	(W/m ²)	10^{-12}

Hangnyomás és hangteljesítmény esetében a szintértéket az (1)-es összefüggés segítségével határozhatjuk meg.

$$dB = 20 \lg \left(\frac{x}{x_0} \right) \quad (1)$$

Ahol az x a mért érték, az x_0 pedig az 1. táblázatban látható referenciaérték.

2.2 A lövés zajának összetevői

A tűzfegyverekből történő lövés kiváltással járó zajnak három fő összetevője van:

1. A tűzfegyver csőszáján kiömlő, a lövedék gyorsítására szolgáló nagynyomású, forró lőporgázok atmoszférába lépése, amelyek lökeshullámokat keltenek.
2. Az adott közegre vonatkozó hangsebesség értékénél gyorsabb kezdősebességű lövedék által létrehozott hangrobbanás.
3. Az adott – öntöltő – fegyver mechanikájának mozgásából származó zaj. (Például a zárral szerelt zárkeret reteszelt pozícióba érkezése.)

Mivel a hangtompítók hatása a lövedék kezdősebességére nézve elhanyagolható, [6] a hangsebességet meghaladó kezdősebességű lövedékek esetén tapasztalt hangrobbanás jelenségét hangtompítókkal nem tudjuk mérsékelni [1]. Ez a jelenség kizárólag ún. szubszonikus löszerek alkalmazásával küszöbölhető ki.

A tűzfegyver mechanikájából származó zaj mérsékelhető ismétlő – manuálisan működtetett – tűzfegyverek használatával, illetve az öntöltő mechanika átmeneti rögzítésével.

2.3 Akusztikai határértékek, szabványok, és mérési eljárások

A hangtompítók általánosságban véve 15...30 dB közötti értékkel képesek csökkenteni a torkolatdörej zajszintjét [1] [7]. Ez azonban korántsem garantálja, hogy a zajszint értéke biztonságos szintre, vagy az alá csökken, ezért hagyományos – akár többszörös - hallásvédelem használata lövészet közben továbbra is erősen ajánlott, még hangtompítók használata esetén is [1].

Felnőttek esetében 140 dB értékű, és az feletti hanghatások számítanak közvetlen károsnak, míg gyerekek esetében ez az érték mindössze 120 dB [8].

A káros értékek meghatározására, valamint a torkolatdörej hangnyomásszintjének mérésére több katonai szabvány – DRC, *Damage Risk Criteria*, avagy Halláskárosodási Kockázati Kritérium - is létezik, mint például az amerikai MIL-STD-1474D (1997) [9] és a frissebb MIL-STD-1474E (2015) [10], vagy a NATO, AEP-4785 (2021) [3] számú szabványának releváns része (Volume I., Edition B). Ezeket a szabványokat elsősorban katonai felhasználású berendezések, eszközök rendszeresítését megelőző, erősen átfogó műszaki tesztek és felmérések során alkalmazzák.

2.3.1 MIL-STD-1474E

A szabvány „hatály” fejezetének első pontjából:

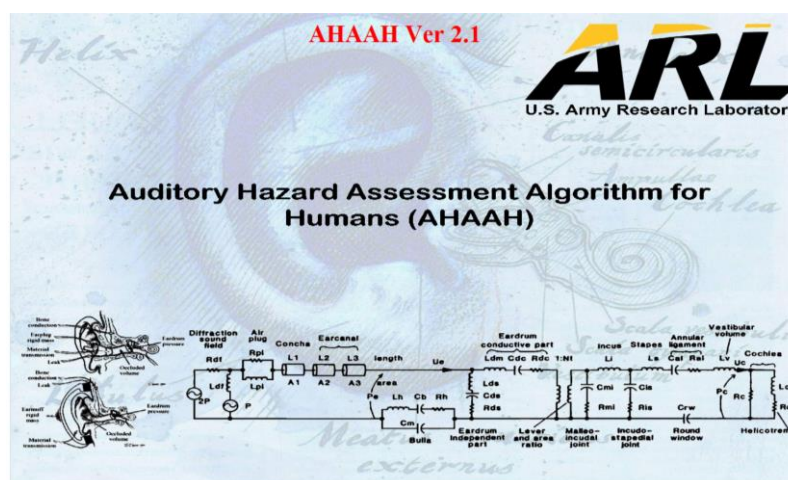
„Jelen szabvány akusztikus zajszint határértékeket állít fel, és mérési procedúrákat, követelményeket ír elő, hogy az ezen előírt értékeknek való megfelelést biztosítsa... A szabvány meghatározza a hangnyomásszint határértékeit és mérési eljárásokat a személyi biztonság, a beszédérthetőség, valamint az akusztikus felderítés megnehezítése érdekében.” [10].

A kutatás értelmében releváns „B”-jelű függelék az **impulzív** zajokra vonatkozik. Civil területek zajterhelésével kapcsolatos méréseket, szabványos értékeket nem ír elő: ezek esetében helyi törvények által rögzített határértékekre hivatkozik.

A szabvány többek között megszabja...

- A mérőeszközök pozícióját.
- A digitalizált adatok mértékegységét, az adatok formátumát, kiterjesztését.
- A tesztkörnyezet felépítését.
- A tesztelt tűzfegyver típusától függően a mért adatok szükséges mennyiségét.
- A tesztelt tűzfegyver pozícióját.
- A leadott lövések minimum mennyiségét.

A szabvány az impulzív hanghatások halláskárosító hatásainak megállapítására egy analitikus és egy numerikus megoldást nyújt. A numerikus megoldás a Windows® operációs rendszerre fejlesztett AHAH (*Auditory Hazard Assessment Algorithm for Humans*) című szoftver, amely úgynevezett ARU, *Auditory Risk Unit*-okban, vagyis Halláskárosodási Kockázati Egységekben fejezi ki az impulzusok hatását az emberi hallásra. A szoftver mindezt egy, az emberi fül elektroakusztikus modelljének segítségével számítja, amely az 1. ábrán látható képernyőkép alsó felében látható:



1. ábra Az AHAH Version 2.1 szoftver kezdőképernyője. [10]

A U.S. Army Research Laboratory weboldaláról ingyenesen letölthető szoftver használatának kellő elsajátítása után lehetőség nyílik a nyers adatok importálása és előkészítése után 11 féle hallásvédelmi eszköz kiválasztására is, amely befolyásolja a kapott ARU-értéket. Ezek lehetnek fültokok, füldugók, illetve ezek kombinációi.

A MIL-STD-1474E szabvány B.5.2.1.1.2 táblázata, illetve a kapott ARU-érték alapján meghatározható, hogy naponta hányszor tehető ki az adott személy a hanghatásnak.

Az analitikus módszer ($L_{IAeq100ms}$) a hanghatás energiájának 100 milliszekundumra kivetített egyenértékű energiájával számol. Az Európai Unió által is alkalmazott L_{eq8h} továbbfejlesztett változata, amely számításba veszi a hallásvédelem jelenlétét is, valamint hosszabb hanghatások esetében pontosabb értékekkel szolgál.

Az $L_{IAeq100ms}$ értéke a (2)-es összefüggést felhasználva számítható:

$$L_{IAeq100ms} = 10 \lg \left\{ \frac{1}{p_0^2 T} \int_0^T p_A^2(t) dt \right\} \quad (2)$$

Ahol $P_0 = 20 \times 10^{-6}$ Pa, a hangnyomásszint referenciaértéke, $T = 100$ ms, a $P_A(t)$ pedig az A-súlyozott hangnyomásérték a t függvényében.

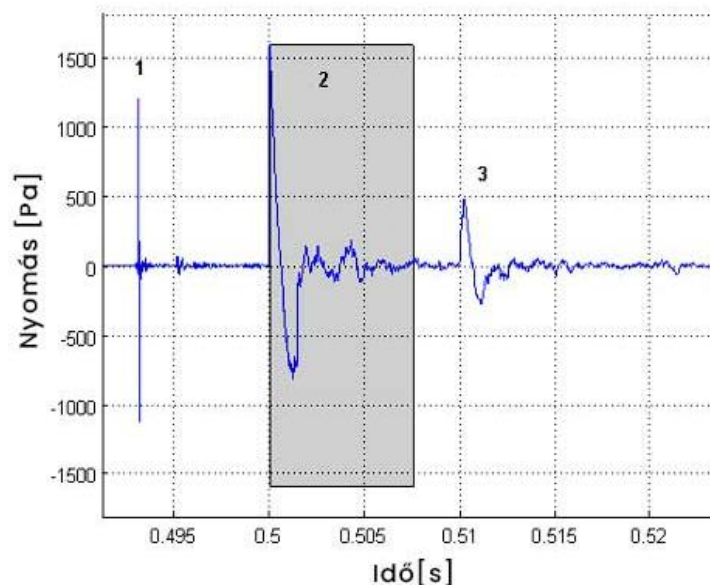
Az AHAH szoftverrel szemben ez a megközelítés jóval egyszerűbb megoldásnak bizonyul, és 160 dB-es zajszintig közelítőleg azonos értékekkel szolgál. Ugyanakkor „Mindkét megközelítés pontosabbnak bizonyul a MIL-STD-1474D-ben felvázoltakénál” [10].

2.3.2 AEP-4785

Jelen kutatás kontextusában a szabvány releváns, *Volume I, Edition B, Version I* részének címe: „*Tesztprotokollok Kézifegyverekre Szerelt Hangtompítók Zajszintjének Mérésére*” [3].

A szabvány ezen része egy különleges mérési eljárásról ad leírást, amely lehetővé teszi a hangtompítók zajcsökkentő hatásának pontos megállapítását úgy, hogy a mért adatokban jól elkülöníthetővé teszi a lövésdörejéből származó, illetve a környező tárgyokról visszaverődő, zavaró hanghullámok nyomásingadozását. A szabványban leírt mérési eljárás így tökéletesen alkalmazható szuperszonikus kezdősebességű lövedékek alkalmazása esetén is. A felhasználó, és a lövészet környezetében jelenlévők hallására a mért zajszint negatív hatásának megállapítására azonban az jelen szabvány a MIL-STD-1474D/E-re hivatkozik.

A 2. ábrán látható egy, a szabvány leírásai alapján végzett mérés nyomás-idő görbéje.

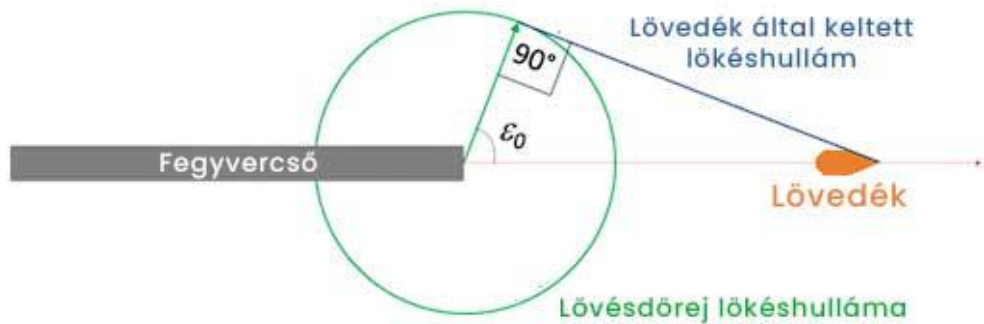


2. ábra Hangtompító nélküli tűzfegyver elsütésekor mért nyomásingadozás-értékek az idő függvényében [3].

A 2. ábrán megfigyelhető az „1”-es számmal jelölt tüimpulzus, amely a szuperszonikus lövedék által keltett lökeshullám nyomásingadozását ábrázolja. A „2”-es számú tartomány a lőporgázok által keltett nyomásingadozásokat tartalmazza, míg a „3”-as számú tartomány a talajról visszaverődő hanghullámok nyomásingadozását ábrázolja.

A szabvány részben titkosított, ezért a dokumentumról jelen kutatás részleteiben nem tárgyal, kizárólag azokról, amelyek a jövőben végzendő mérések szempontjából elengedhetetlen fontossággal bírnak. A dokumentumban leírt méréshez a szabvány részletes leírást ad az elvárt mérési környezetről, eszközökről, a mikrofonok pontos pozíciójáról és műszaki sajátosságairól, számáról, valamint segítséget nyújt a mért adatok értelmezésében.

Kiemelten fontos, hogy a mérés során a mikrofonokat ne olyan szögben helyezzük el a lőirányhoz és a csőszáj síkjához képest, ahol a szuperszonikus lövedék által keltett lökeshullám érintőjét képezi a lövésdőrej lökeshullámának! Ekkor ugyanis a mérési eredmények kiértékelésekor nem tudjuk elkülöníteni a lövésdőrej, illetve a lövedék hangrobbanásának nyomásingadozását. A jelenséget a 3. ábra szemlélteti:



3. ábra Ábra az ε_0 szög értelmezéséhez [3].

Az ε_0 szög megállapítására alkalmas a (3)-as összefüggés:

$$\varepsilon_0 = \arccos\left(\frac{c}{v_0}\right) \quad (3)$$

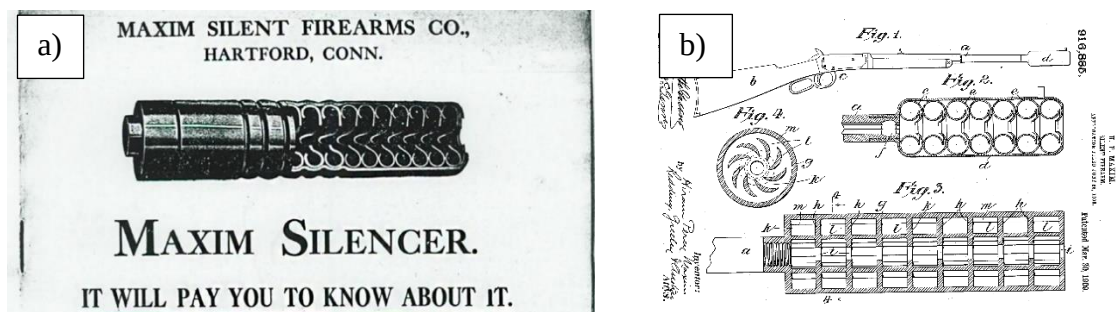
Ahol ε_0 a löirány és az érintő között bezárt szög értéke, c a közegre jellemző hangsebesség értéke, v_0 a lövedék kezdősebessége.

2.4 Hangtompítók

A hang-és fénytompítók olyan csőszájszerelvények, amelyek működése a torkolaton kilépő löporgázok nyomásának csökkentésén alapszik. Ezt úgy érjük el, hogy egy, a csőfurathoz képest nagy térfogatú, terelőlemezekkel ellátott zárt térben tervszerűen áramoltatjuk, hűtjük a lövedék gyorsítására szolgáló nagy nyomású, forró löporgázokat [2] [7] [11] [12]. A kilépő, alacsonyabb energiájú és kisebb nyomású löporgázok így kisebb ingadozásokat keltenek a környező légnyomás értékében a nyomásuk kiegyenlítődése során, vagyis kisebb hanghatást keltenek.

2.4.1 Történelmi áttekintés – Hangtompítók akkor, és most

Történelmünk legelső hangtompítóira vonatkozó szabadalma Hiram Percy Maxim nevéhez fűződik, amit „Silencer” címen jegyezték be 1906-ban. Ez a hangtompító a 4. ábrán látható:



4. ábra a) A Maxim Silencer hirdetése b) a Maxim Silencer szabadalma [6]

Az I. Világháború éveit megelőzően az Egyesült Államok széleskörű teszteknek vetette alá Maxim találmányának továbbfejlesztett verzióit, és hamar rájöttek használatának markáns előnyeire:

„...Nagyban segítette az újoncnak kiadott utasítások megértését lövészet közben. Lényegesen csökkentette a hosszas lövészet hangerejének kimerítő hatását, amely a modern csatában is megfigyelhető - ezzel egy valódi katonai előnyt szolgáltat.” [13]

M1903-as ismétlőpuskák, limitált számban alkalmazták is ezeket a hangtompítókat az I. Világháború csataterén, Franciaországban, azonban a technológia kiforratlansága, és a háború vége tárgyalanná tette a további tesztek és rendszeresítéseket. Újabb áttörést a hangtompítók technikájában és katonai alkalmazásában majd a II. Világháború, és az azokhoz vezető évek hoznak, ahol a legkülönbözőbb tűzfegyverplatformokhoz és kaliberekhez készültek hangtompítók. Az 5. ábra a 2. világháború idején alkalmazott hangtompítók és hangtompított gyalogsági kézi tűzfegyverek közül ábrázol néhányat:

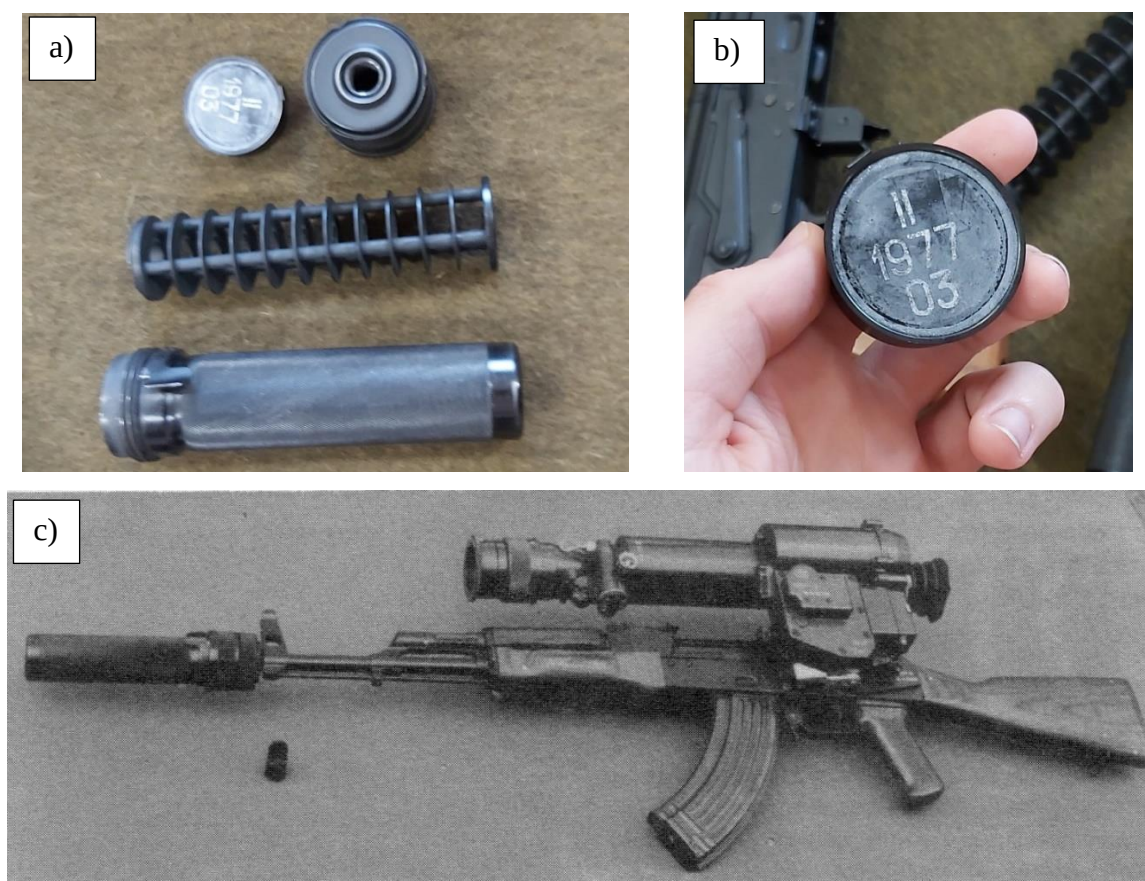


5. ábra a) Sten Mk IIS géppisztoly [14] b) A Moszin-Nagant ismétlőpuska, és a Nagant revolver „Bramit” hangtompítókkal szerelve [15] c) Kar 98k ismétlőpuska L23/L27 hangtompítóval szerelve [16]

Ekkoriban ezek az eszközök presztízssértékűek voltak, amiket többére különleges rendeltetésű egységek katonái kaptak meg: kommandós egységek, mélyfelderítők, mesterlövészek, néha gerillák és partizánok, akiknek a műveleti biztonság, így a rejtőzködés kritikus fontossággal bírt. Az ekkori katonai doktrínák szerint a sorkatonáknak nem volt

különösebb szüksége az egyébként nem túl olcsó, relatíve törékeny, könnyen elhagyható hangtompítókra. Ez a felfogás sokáig elkíserte a világ legnagyobb hadseregeit is.

Az ötvenes-hatvanas-hetvenes években létrejövő gépkarabély kézfegyver-platformokhoz a legkülönbözőbb módokon alakították a hangtompítók technológiáját. Jó példa a hangtompítók még ekkor is nagyon szűk alkalmazási kört betöltő szerepére a szovjet AKM-hez készült hangtompító, a *PBSz-1*, amelyet a 6. ábra képei illusztrálnak:



6. ábra a) a *PBSz-1* hangtompító szétszerelt állapotban, b) A *PBSz-1* hangtompító gumimembránja. c) Éjszakai harcászatra szerelt AKM típusú gépkarabély egy *PBSz-1* hangtompítóval [17]

A nagyon egyszerű, a lövedék sebességvektorának irányára merőleges terelőlemezekkel szerelt hangtompító expanziós terét egy gumi membrán fedte el. A membrán a forró lőporgázok tömítésére szolgált. Bár a hangtompítót – és a kortárs, valamint korábbi hangtompítókat is - kimondottan *szubszonikus* kezdősebességű lövedékek használatához tervezték, ez az alkatrész így is nagyon csekély számú lövés után elkopott, és nem töltötte be elvárt funkcióját. A 2. Világháborúban, a Moszin-Nagant ismétlőpuskához kis szériában gyártott „*Bramit*” hangtompító ugyan ezen az elven működött [18].

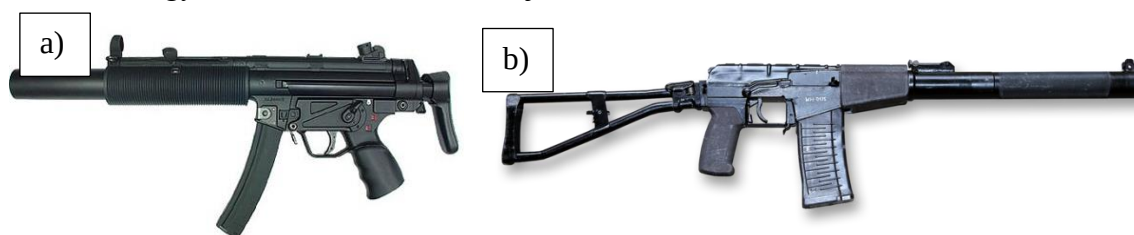
Az Egyesült Államok ekkor az M16 rövidített csövű, XM-177 névre keresztelt variánsához gyártott egy többcélú csőszájszerelvényt, ami a fegyver öntöltő funkciójának

megbízható működésének fenntartása mellett a fény-és hangjelenségek kismértékű mérséklését is végezte. Ezeket a fegyvereket még szintén, többnyire különleges – például mélyfelderítő, „Long-Range Reconnaissance Patrol” - egységek kapták meg. Ezt a gépkarabélyt láthatjuk a 7. ábrán:



7. ábra Amerikai XM-177 gépkarabély [19]

A hetvenes-nyolcvanas években olyan, úgynevezett integrált hangtompítóval szerelt tűzfegyverek láttak napvilágot, mint a német Heckler & Koch MP-5 SD-je (Az SD utótag jelentése „Schalldämpfer” – hangtompító), vagy a szovjet VSS Vintorez/AS VAL. Ezen két kézfegyver-platform azért is kerül megemlítésre, mivel majd központi elemet képeznek az említett, és más nemzetek terrorelhárító egységeinek fegyverarzenáljaiban - tehát a hangtompítók innentől már nem feltétlen csak katonai alkalmazásban voltak jelen! A fent említett tűzfegyvereket a 8. ábra illusztrálja:



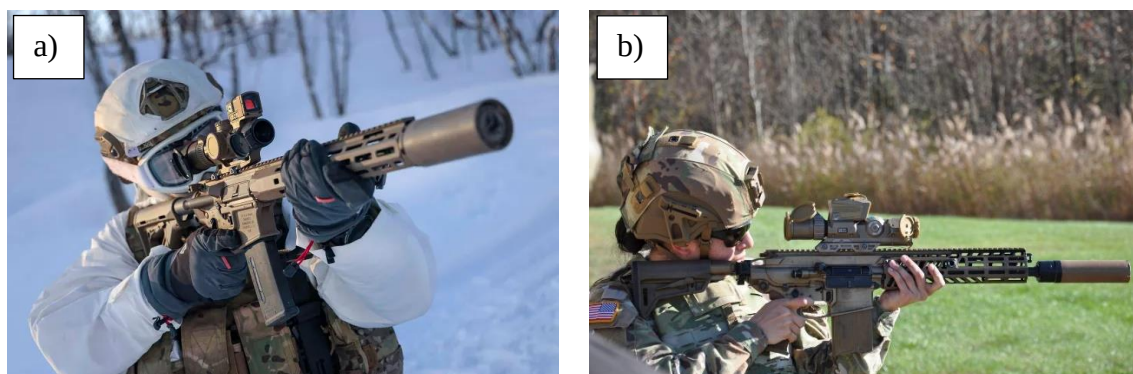
8. ábra a) H&K MP-5 SD géppisztoly [20] b) AS VAL gépkarabély [21]

A kilencvenes és kétezres években az Amerikai Egyesült Államok haderejében a hangtompítók terén a *Knight's Armament Company* töltött be úttörő szerepet. Az ő termékük a 2008-ban rendszeresített M110 SASS, amelynek része volt egy 315 mm-es hosszúságú hangtompító. Továbbá a KAC fejlesztése az NT-4-es hangtompító is, amely 2020-tól az Amerikai Tengerészgyalogság minden lövésének felszerelését képezi. [22] Az eszközöket a 9. ábra illusztrálja:



9. ábra a) KAC M110 SASS csapatámogató fegyver [23] b) KAC NT-4 hangtompító [22]

Napjainkban, főleg Magyarország legnagyobb katonai szövetségeseinek haderejeiben sorra rendszeresítenek modernebbnél modernebb fegyverrendszereket hangtompítókkal együtt, mint például a SigSauer XM-7 és a Knight's L403A1. Ezeket már nem csak különleges rendeltetésű egységek, hanem komplett hadosztályok lövészei is megkapják. Ezek a hangtompítók kimondottan a rendszeresített fegyverhez és annak kaliberéhez kerültek kifejlesztésre, jellemzően gyorscsatlakozóval szerelt, alacsony gázvisszafűvadású kivitelek, amiket a legkülönbözőbb 3D nyomtatási technológiákkal gyártanak. Ami a katonai alkalmazáson kívüli rendszeresítéseket illeti, az Egyesült Államok, Szövetségi Nyomozóirodájának Tűszmentő Műveleti Egysége (*FBI Hostage Rescue Team*) alig 2 éve rendszeresítette a HuxWrx, Flow 556k névre keresztelt, alacsony gázvisszafűvadású, 3D nyomtatott hangtompítóját. A 10. ábra korunk legmodernebb, hangtompítókkal rendszeresített kézfegyvereit illusztrálja:



10. ábra a) Brit KAC L403A1 [24] b) Amerikai SigSauer XM-7 [25]

Napjainkra a hangtompítók alkalmazása a civil lövészportokban és a vadászatban is teljesen mindennapossá vált. Az Egyesült Államokban, bizonyos feltételek mellett mindig is szabadon tartható tárgyaknak számítottak, míg Magyarországon ezt a hangtompítók 2023-as legalizációja tette lehetővé.¹

¹ 253/2004. (VIII. 31.) Korm. rendelet 2023. évi módosítása

Jelen kutatás elkészítése során a fentebb említett kézi tűzfegyverekből és hangtompítókból néhányat személyesen is kézbe vehettem, megvizsgálhattam a táborfalvai Honvéd Vezérkar Képességfejlesztési Iroda Lőkísérleti Vizsgáló Osztály (HVKKFILVO) referenciagyűjteményében. Az ott szerzett tapasztalatok felbecsülhetetlen értékűek voltak az eszközök működésének megértésében, és a kutatás elkészítésében.

2.4.2 Rendelkezésre álló információk hiánya

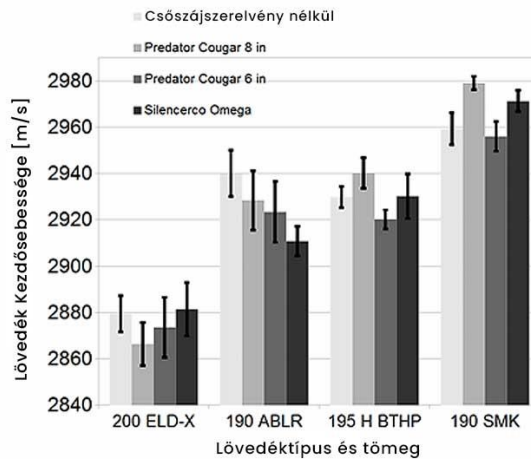
Jelen kutatás elkészítése során kimondottan csekély mennyiségű információ volt fellelhető a hangtompítók felépítéséről, kimondottan magyar nyelven. A belső kialakítások és azok hatásainak összefüggéséről azért nincsenek könnyedén rendelkezésre álló, részletes kutatások és cikkek, mert ezek az információk ipari és nemzetbiztonsági jellegű, katonai titoknak számítanak [11].

2.4.3 Hangtompítók hatása a csőszájnál észlelhető fényhatásokra

Egy lövés leadásakor szabad szemmel, néha fényes nappal is megfigyelhetünk fényjelenségeket lángok formájában: ez a löporgázok még el nem égett összetevőinek és a levegő oxigéntartalmának heves reakciójának köszönhető [26]. A hangtompítóban eltöltött idő alatt a löporgázok összetételében fennmaradó, éghető anyagok javarésze elég, illetve elveszítik az oxigénnel történő reakcióhoz szükséges hőmérsékletüket. Éppen ezért, a hangtompítók a lövéssel járó szabad szemmel látható fényjelenségek megszüntetésére is kiválóan alkalmasak.

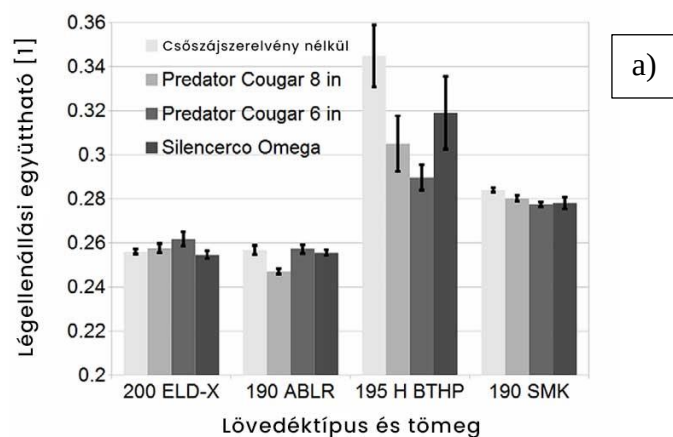
2.4.4 Hangtompítók hatása a lövedék külső ballisztikai kezdő paramétereire

A hangtompítók hatása a lövedék kezdősebességére nagyon kicsi: 6...10 m/s értékkel nőhet egy lövedék kezdősebessége hangtompítók használata során [2]. Ugyanakkor ez nem mondható el általánosan minden hangtompító és lőszertípus kombinációjáról. Van, ahol némi veszteséget észlelhetünk a kezdősebességet tekintve [6], ahogy azt 11. ábra szemlélteti:

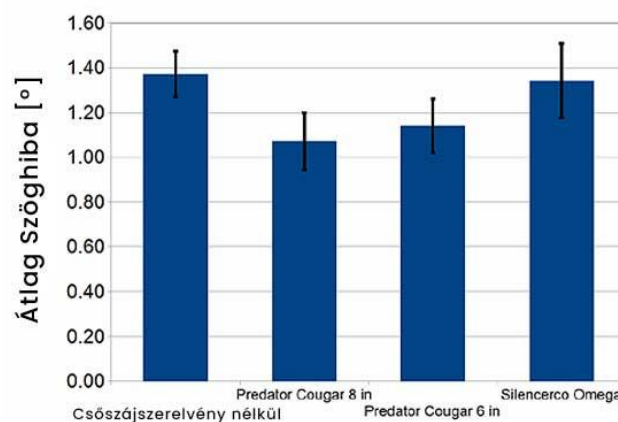


11. ábra Hangtompítók hatása különböző tömegű lövedéktípusok kezdősebességére. [6]

Ugyanakkor a hangtompítók kimondottan jó hatással vannak a lövedék légellenállási együtthatójára, következtetésképp kezdő szöghibájára [6], ahogyan azt a 12. ábra diagramjai szemléltetik:



a)



b)

12. ábra a) Hangtompítók hatása különböző tömegű lövedékek légellenállási együtthatójára. b) Hangtompítók hatása a lövedékek átlag szöghibáira [6]

2.4.5 Hangtompítók hatása a fegyver pontosságára

A cső gyártása során létrejövő geometriai hibák – hengerességi hiba, csőfurat átmérő inhomogenitása a hossz mentén, valamint a töltényűr-átmeneti kúp-csőfurat koncentricitási hibája. stb – gerjesztőforrások a lövés során tapasztalható csőlengéseknek. Ez a csőlengés a lövés pontosságát meghatározó megannyi bizonytalansági összetevők egyike [27].

Egy hangtompító, tömegénél fogva képes ezeket a csőlengéseket csillapítani, ezáltal a fegyver pontosságát is észrevehetően javítja [2].

Általános átmeneti ballisztikai jelenségnek tekinthető, hogy a löporgázok a csőszájon kilépő lövedékre még rövid hosszon perturbáló hatással vannak. A lövedék talpára ható, már nem homogén nyomás némi kezdő szöghibát eredményezhet, részben ebből származik az előző alfejezetben tárgyalt kezdő szöghiba is. A hangtompítók a löporgázokat jóval a torkolatuk előtt lelassítják, így ez a jelenség alkalmazásukkor nem jelentős, ezzel is javítják a pontosságot [27].

2.4.6 Hangtompítók hatása a visszarúgás-impulzusra

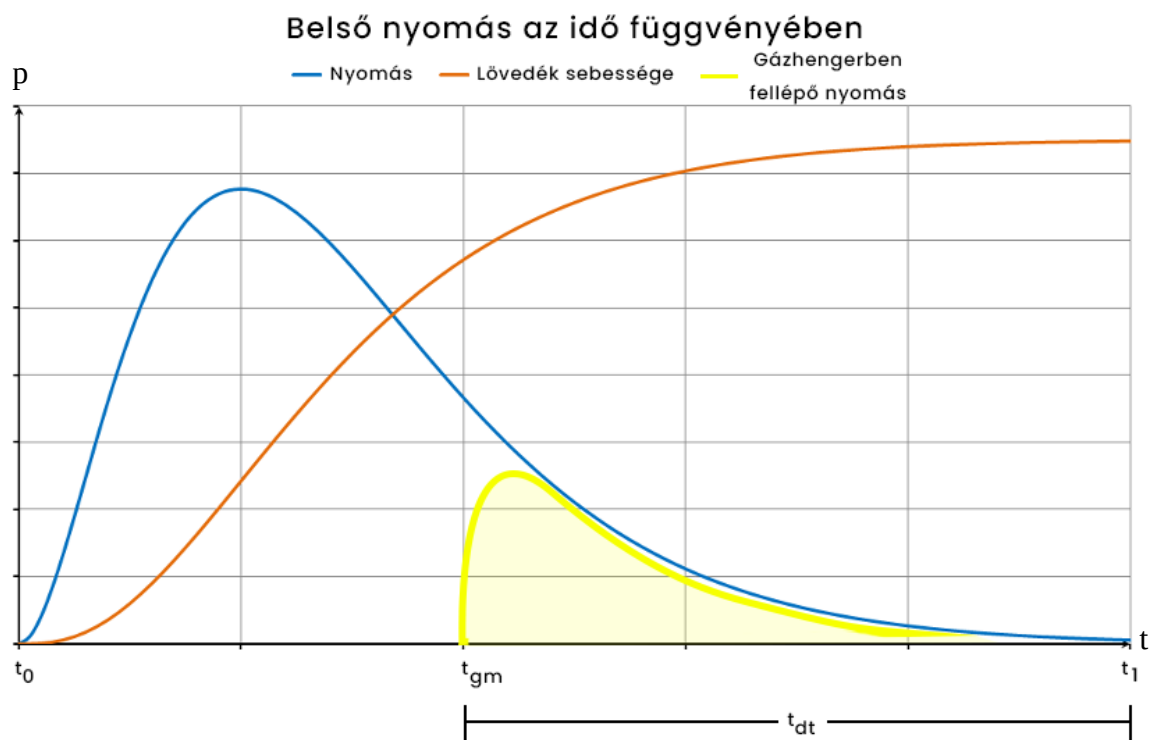
Newton III. axiómájának értelmében a lövedéket, illetve a löporgázokat gyorsító erők eredőjének ébred egy ugyanakkora, de ellentétes irányú párja: ezt nevezzük visszarúgásnak, amelyet a (4)-es összefüggés ír le.

$$I_{\text{visszarúgás}} = m_l \cdot v_l + m_g \cdot v_g + (m_m \cdot v_m) \quad (4)$$

Ahol I a lövés kiváltással járó visszarúgás impulzus, az l alsó-indexű értékek a lövedék tömege, és sebessége, a g alsó-indexű értékek a löporgázok tömege, és sebessége, végül az m alsó-indexű értékek a fegyver öntöltő mechanizmusának tömege, és sebessége. Ezutóbbi kizárólag öntöltő fegyverek esetében van jelen.

Általánosságban elmondható, hogy a hangtompítók csökkentik a tűzfegyverek visszarúgását, mivel működési elvükönél fogva csökkentik a löporgáz rendszerből való kilépésének sebességét [28].

Gázelvételes elven működő, öntöltő tűzfegyverek esetén ez már nem ilyen egyértelmű. Az angolszász terminológiában „*dwelling time*”-ként (t_{dt}) is emlegetett időintervallum az öntöltő fegyver átömlőfuratának megnyílásától, a lövedék csőszájon való kilépéséig, pontosabban a csőfurat-csőszájszerelvény rendszer nyomásának kiegyenlítéséig tart. A 13. ábrán látható gáznyomás-görbe ezt, a t_{dt} intervallumot is ábrázolja:



13. ábra Öntöltő fegyver gáznyomás-görbéje, kiegészítve a lövedék sebességét ábrázoló görbével, és gázhengerben mért nyomás görbéjével

A fenti illusztráció egy öntöltő fegyver belső nyomását ábrázolja az idő függvényében. A t_{gm} időponttól megjelenő görbe az öntöltő fegyver gázhengerét feltöltő gáz nyomása. A görbe alatti területet megadására szolgáló (5)-ös összefüggés dimenziója a következő:

$$\int_{t_{gm}}^{t_1} P(t) dt = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \quad (5)$$

Amennyiben a fegyver gázmotorjának adott, „A” területű gázdugattyújának m^2 dimenziójú homlokfelületével ezt az értéket megszorozzuk, megkapjuk a dugattyú és az általa mozgó öntöltő mechanizmus mozgásmennyiségét, impulzusát. Amennyiben a t_{gm} idő után a lövedék gyorsulását közelítőleg nullának, sebességét állandónak vesszük, úgy a fegyvercső hosszának növekedésével arányosan nő a rendszer nyomás alatt öltött ideje. Ha a hangtompítók lőporgázzal való feltöltődésének időszükségletétől eltekintünk, azok felszerelésével effektíve növeljük a csőhosszt és a t_{dt} időintervallum értékét. Ezzel nő az öntöltő mechanizmus sebessége és a fegyver visszarúgása is! Ráadásul a komponensek megnövekedett sebességének köszönhetően azok nagyobb igénybevételnek vannak kitéve, korábban tönkremehetnek, elkophatnak.

Részben a fentebb ismertetett jelenség kiküszöbölésére a modern öntöltő tűzfegyverek egy, úgynevezett állítható gázhengerrel vannak szerelve, amellyel a felhasználó

szabályozhatja az átömlőfurat átmérőjét, így a gázhengerbe jutó gázmennyiséget. Az állítható gázhengerek gyakran rendelkeznek egy „suppressed” azaz „hangtompított” beállítással. Az alábbi, 14. ábrán egy ilyen gázhengerrel szerelt korszerű csőszerkezet látható:



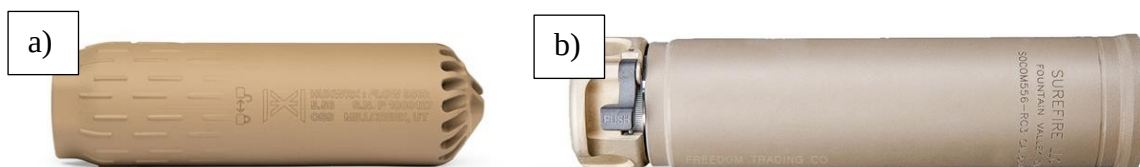
14. ábra Sig Sauer MCX Spear LT típusú sporkarabély 406 milliméteres, állítható gázhengerrel szerelt csőszerkezete [29]

2.4.7 Hangtompítók hatása a gázvisszafúvásokra

Az előző alfejezetben leírt okfejtésből kifolyólag a hangtompítók a fegyver gázelvételes rendszerének, ún. „gázmotorjának” megfelelő szabályozása nélkül képesek gázvisszafúvásokat eredményezni a fegyver felhasználójának irányába. Ehhez hozzájárul még a lövés után a hangtompítókban rekedt gázok leömlésének túlságosan nagy időszükséglete is [27], mivel ekkor a löporgázok egy része a kisebb ellenállást tanúsító úton hagyja el a rendszert, ami esetünkben a csőfurat töltényűr és felhasználó felőli vége.

Ez több okból is kiküszöbölendő: a visszaszökő löporgázok kellemetlenségeket, például a szem és légzőszervek irritációját okozhatják, valamint a löporgázok karcinogéneket és más toxikus összetevőket tartalmaznak [30].

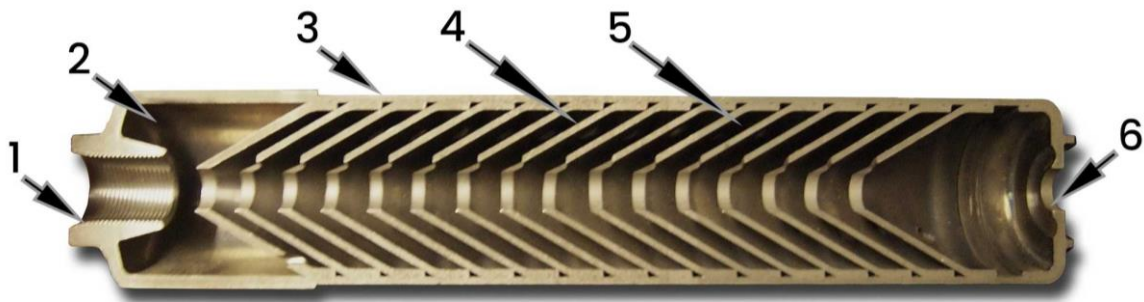
Egyre elterjedtebbek az ún. „low backpressure”, vagy alacsony gázvisszafúvású hangtompítók, amelyek speciális belső geometriákkal érik el a löporgázok gyorsabb kiürülését a megfelelő irányba: a torkolat felé. A 15. ábra ilyen, alacsony gázvisszafúvású hangtompítókat ábrázol:



15. ábra a) HuxWrx Flow 556k [31] b) Surefire RC 3 hangtompító [32]. Mindkét csőszájszerelvény 3D gyártástechnológiai eljárással készült, alacsony gázvisszafúvásos kivitel.

2.4.8 Hangtompítók felépítése, szerkezeti elemei

Az alábbi, 16. ábrán egy hagyományos felépítésű hangtompító metszeti képe látható:



16. ábra Hagyományos felépítésű hangtompító metszete. 1 – Csatlakozás, 2 – Expanziós tér, 3 – Külső burkolat, 4 – Terelőlemez, 5 – Másodlagos tágulási tér, 6 – Torkolat [33]

Hagyományos hangtompítók a legkülönbözőbb méretekben készülnek sok kaliberhez, rengeteg anyagból. Közös jellemzőjük azonban, hogy tartalmaznak egy expanziós teret, terelőlemezeket és másodlagos tágulási kamrákat. Szerelhetők tisztítás céljából, valamint esetenként a bennük lévő terelőlemezek orientációját, sorrendjét variálhatjuk, de hosszukat és hangtompításuk mértékét jelentősen nem. Léteznek olyan, egyébként hagyományos kivitelű hangtompítók is, amelyek elemeit nem oldható kötésekkel illesztették össze. Ide sorolhatók az integrált hangtompítók is, amelyek sajátossága hogy az adott fegyverplatform tervszerű működéséhez elengedhetetlenek, azok „gyárilag” részét képezik a fegyvernek.

Ettől némileg eltérnek a moduláris hangtompítók, amelyek sajátosságai megváltoztathatók a felhasználó igényei szerint, alegységek fel- és leszerelésével. Változtatható például a terelőlemezek mennyisége, – ezzel a hangtompítás mértéke és az eszköz hossza - a csatlakozási mód, vagy a hangtompító homlokfalára szerelhetünk csőszájfékeket, üvegtörőket, stb.

Végül önálló kategóriát alkotnak az úgynevezett monolitikus hangtompítók, amelyek főbb elemei – palást és terelőlemezek, vagy a terelőlemezeket tartalmazó „mag” - egyetlen egységet képeznek kötések, kötőelemek nélkül. Ez a kategória főképp a fém 3D nyomtatásnak köszönhető.

a) Csatlakozások

A hangtompítókat, a fegyverhez való csatlakozásuk módja szerint két csoportba sorolhatjuk: gyorscsatlakozós, („Quick Detach”) és menetes csatlakozású („Direct Thread”) hangtompítók.

A gyorscsatlakozós hangtompítók a fegyverre már felerősített csőszájszerelvényre – például lángréjtőre, kompenzátorra, csőszájfékra - csatlakoznak bajonettzár, vagy csúszóretesz révén. A rendszer előnye, hogy a hangtompítók gyorsan, könnyedén eltávolíthatjuk a fegyverről, ami megkönnyítheti tárolásukat, szállításukat. Valamint, amennyiben a hangtompító nincs a fegyveren, továbbra is élvezzük a csőszájszerelvény nyújtotta előnyöket.

A menetes csatlakozású hangtompítók ezzel ellentétben közvetlenül a csőszájra kialakított menetre kell felcsavarnunk. Előnyük, hogy össztömegük kisebb a relatíve bonyolult gyorscsatlakozós hangtompítókhoz képest.

Létezik továbbá egy olyan csatlakozási mód, amelyet a maroklőfegyverekben nagyon gyakran alkalmazott Browning-féle rövid csőhátrasiklású működési rendszerrelv miatt fejlesztettek ki. Ez az úgynevezett „Nielsen Device”. Jelen kutatás azonban erről a rendszerelvről, illetve maroklőfegyverekről nem tárgyal.

b) Belső geometria

A hangtompítók működését, és teljesítményét elsősorban azok belső térfogata határozza meg, A terelőlemezek mennyisége, pozíciója, geometriája bár másodlagos szerepet töltenek be, bizonyos alkalmazási területeken nagyban javíthatják a hangtompító teljesítményét. Számít ezen kívül az expanziós tér, és az ún. „disztális tágulási tér” kialakítása is, amely a legutolsó terelőlemez és a homlokfal által határolt másodlagos tágulási kamrát jelenti [7].

Az expanziós tér a hangtompító térfogatának azon szakasza, ami a legnagyobb nyomású, hőmérsékletű és áramlási sebességű löporgáznak van kitéve. Feladata, hogy egy relatíve nagy kezdeti térfogatot adjon ezeknek a gázoknak a tágulásra.

Az ezt követő terelőlemezek rendeltetése az, hogy a hangtompító belső térfogatának lehető legnagyobb hányadát hasznosítsák a löporgázok eloszlatásával. Bár a hangtompító belső térfogatából elvesznek, növelik az eszköz által felvehető hőenergia mennyiségét és az eszköz belső felületét. Ugyanakkor a löporgázok kiömlésében akadályt jelentenek, tehát növelik a hangtompítóban lévő reziduális löporgázok nyomáskiegyenlítődének időszükségletét. Míg ez ismétlődő – és félautomata fegyverek esetében nem jelent különösebb gondot, a kimondottan magas (700...1000 1/min) elméleti tűzütemű tűzfegyvereknél méretezési szempont kell, hogy legyen: amennyiben a hangtompítóban lévő nyomás kiegyenlítődének időszükséglete magasabb, mint két lövés között eltelt idő, annyiban a hangtompító nem tudja kifejteni az elvárt hatást.

Elrendezés szempontjából, szuperszonikus lövedékek esetében a legideálisabb az, ha a terelőlemezek relatív távolsága a hangtompító homlokfalához közeledve egyre csökken [7] [34]. A legutolsó másodlagos tágulási kamra minél nagyobb térfogata szintén jelentősen csökkentheti a mért zajszintet [34].

Messze a leggyakoribb terelőlemez-kivitelezés a lövedék sebességvektorának irányára nézve „divergáló” keresztmetszetű csonka körkúp, amelyeket egymás mellé helyezve alakítunk ki másodlagos tágulási kamrákat. A lőporgáz itt a terelőlemezek közé szökik, ott a hangtompító palástfelületének belső falába ütközik és örvényleni kezd. Ezzel mechanikus elven lassítjuk a lőporgázokat. Így minden terelőlemez egy laval-fűvókaként is viselkedik, azaz egyidőben nyomáscsökkentést is végzünk.

A következő, (6)-os egyenlet a keresztmetszet és az áramlás sebességének összefüggését írja le, amelyet a fajlagos entalpia (7) és az izentrópikus energiaegyenlet (8) levezetéséből származtatunk:

$$\frac{dA}{A} = (Ma^2 - 1) \cdot \frac{du}{u} \quad (6)$$

Ahol $\frac{dA}{A}$ a keresztmetszet változása, Ma a közeg áramlásának mach-száma, $\frac{du}{u}$ az áramlás sebességének változása.

$$i = C_p \cdot T \quad (7)$$

$$\frac{u^2}{2} + C_p \cdot T = \text{állandó} \quad (8)$$

Ahol i a fajlagos entalpia, C_p az izobár fajhő, T pedig a hőmérséklet

A Mach-szám, és az adott közeg hangsebességének meghatározásához szükséges (9)-es és (10)-es összefüggések:

$$a = \sqrt{k \cdot R_{\text{spec}} \cdot T_{\text{krit}}} \quad (9)$$

$$Ma = \frac{v}{a} \quad (10)$$

Ahol a az adott közegre vonatkozó hangsebesség, k az adiabatikus fajhőviszony, R_{spec} a közeg egyéni gázállandója, T az adott közeg hőmérséklete, v a vizsgált test sebessége.

Az (6)-os összefüggés arra enged következtetni, hogy amennyiben az áramlási sebesség nem haladja meg az adott közegre vonatkozó hangsebesség értékét ($Ma < 1$), annyiban az áramlás sebességének csökkenését egy növekvő keresztmetszetű csővel érhetjük el (11).

$$Ha... (Ma^2 - 1) < 0$$

$$\frac{dA}{A} = -\frac{du}{u} \quad (11)$$

Viszont ha az áramlásunk sebessége magasabb, mint az adott közegre vonatkozó hangsebesség, ($M_a > 1$), ugyanezt egy csökkenő keresztmetszettel érhetjük el (12).

$$\begin{aligned} &Ha.... (Ma^2 - 1) > 0 \\ &-\frac{dA}{A} = -\frac{du}{u} \end{aligned} \quad (12)$$

Tekintve, hogy a hangtompítóba belépő lőporgázok áramlási sebessége meghaladja az adott közegre – környező és a hangtompítóban lévő levegőre – vonatkozó hangsebesség értékét, ($M_a > 1$) termodinamikai elven is végezhetünk lassítást, amihez a lövedék sebességvektorának irányára nézve konvergáló keresztmetszetű csonka körkúpok kialakítására van szükség. Az alábbi, 17. ábra ilyen kialakítású terelőlemezekkel szerelt hangtompítót ábrázol:



17. ábra Az Oberland Arms KDA Titan ELB hangtompítója, konvergáló keresztmetszetű terelőlemezekkel. [35]

Bár *Bernoulli-egyenlet* értelmében az áramlási sebesség csökkenése a közeg nyomásának növekedésével jár, az áramlási sebesség csökkentésével növelhetjük a lőporgázok, illetve a hangtompító belső komponensei közötti hőcsere mértékét, amely jótékony hatással van a lövésdőrej hangerejének csökkentésére.

A hangtompító belsejében további turbulenciát alakíthatunk ki a terelőlemezekbe vágott, úgynevezett „egérlyukakkal”. Ezek a kivágások a lövedék központi furatainak részét képezik, és legjobban úgy fejtik ki hatásukat, ha azokat minden terelőlemezen aszimmetrikusan, és a hangtompító teljes hosszában egy vonalban helyezjük el. [34] [36]

2.4.9 Hazai bejegyzett szabadalmak kutatása

A szabadalmi vagy használati minták oltalma alatt álló műszaki megoldások felhasználásának elkerülése érdekében jelen kutatás elkészítésének fontos részét képezte a hangtompítókhoz kapcsolható szabadalmak kutatása is. Ez a Szabadalmi Szakkönyvtár

munkatársainak segítségével a Szellemi Tulajdon Nemzeti hivatalának E-kutatás adatbázisában, illetve az Espacenet adatbázisában került kivitelezésre.

A hangtompítók ún. Nemzetközi Szabadalmi Osztálya „IPC” az F41A 21/30, amellyel a „CPC”, vagyis Kooperatív Szabadalmi Osztály megegyezik. Kapcsolódó szabadalmi osztálynak mondható az F41A 01/06, és az F41A 13/08.

Hazai vonatkoztatásban a legrelevánsabb, F41A 21/30-as osztályban hazánkban 8 db bejegyzett szabadalmi és használati minta oltalom található. Különösen a kutatás keretében létrejött hangtompító csőszájszerelvényhez kapcsolható műszaki megoldásokkal kapcsolatos szabadalmakat ezek azonban nem tartalmazzak.

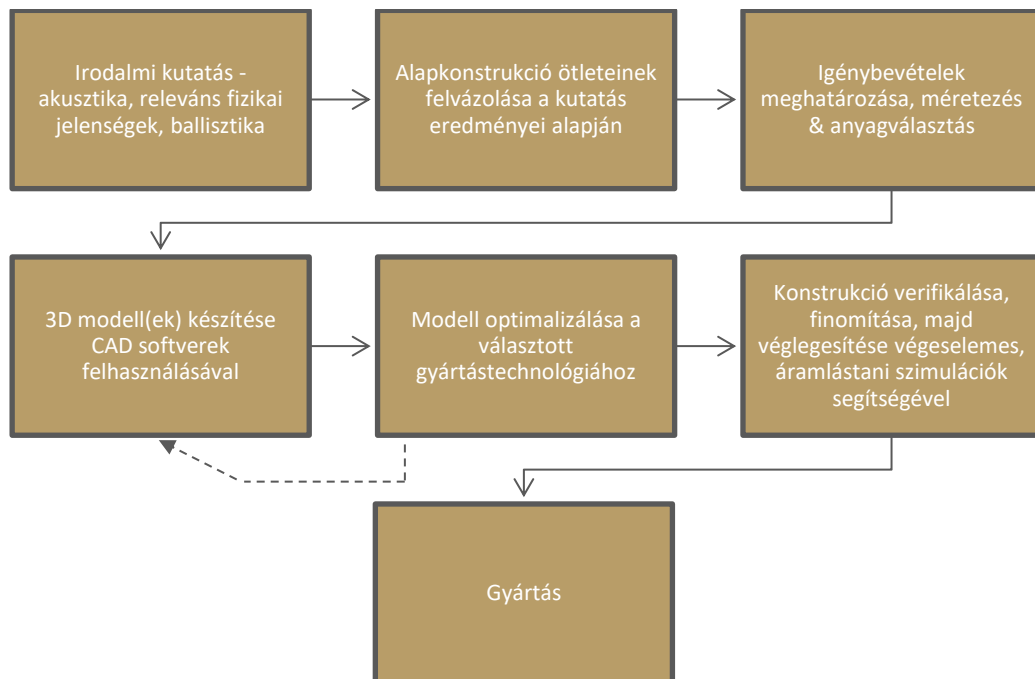
a) Irodalmi kutatás verifikációja

A szabadalmak tanulmányozása az irodalmi kutatás tartalmának verifikálásra is kiváló eszköznek bizonyult: a szabadalmak első szakaszaiban a jelen kutatás irodalmi összefoglalásához hasonló rövid leírásokat találunk, amely a szabadalomban foglaltak alapos megértését segítik elő. A tanulmányozott – hazai és angol nyelvű - szabadalmak leírásai nagyfokú egyezést mutattak az irodalmi kutatás tartalmával.

3 Lidérc .50 – Saját hangtompító-koncepció

A kutatás jelen fejezete leírást ad az egyéni prototípus hangtompító-koncepció fejlesztésének menetéről, a hangtompító részeinek elvi működéséről, illetve a modellezés folyamatáról.

A kutatás felé támasztott elvárás volt, hogy az a fejlesztés alatt végig egy valós K+F folyamat lépéseit kövesse. Ezeket a következő, 18. ábrán látható lépésdiagram ábrázolja:



18. ábra A fejlesztés menetének lépésdiagramja

3.1 SERO GM-6 „Lynx”

A magyarul „Hiúz”-ként is emlegetett GM-6 a gödöllői székhelyű Sero Limited Ltd. által fejlesztett hosszú csőhátrasiklásos, forgózárral szilárdan reteszelt rendszerelvű, 12,7x99 mm NATO kaliberű félautomata rombolópuska. Ez a fegyver képezi a „Lidérc” névre keresztelt hangtompító fejlesztésének alapját, amelyet a 19. ábra illusztrál:



19. ábra A GM-6 „Lynx” rombolópuska

Több jó indok is áll a GM-6 Lynx kiválasztása mellett. Elsősorban a fegyver félautomata mivoltából kifolyólag egy sor egyszerűsítés eszközölhető a hangtompító tervezése, majd méretezése során: a fegyver nem rendelkezik magas elméleti tűzgyorsasággal, mivel minden lövés kiváltásához le kell nyomnunk az elsütőbillentyűt. A két lövés között eltelő relatív nagy időintervallum sokkal kisebb hőterhelést jelent a hangtompítóra nézve, illetve a hangtompítóban rekedő reziduális lőporgázok nyomásának is van ideje a kiegyenlítődéssre a következő lövés bekövetkezéséig. A fegyver hosszú csőhátrasiklásos működési rendszerrelve azonban némileg nehezíti a hangtompító tervezését. Ez a működési elv a cső hosszirányú elmozdulásán alapul, amit a lövés kiváltás visszaható ereje, a visszarúgás impulzus gerjeszt. Amennyiben növeljük az elmozduló test tehetetlenségét – például felszerelünk rá egy hangtompítót – annyiban csökkentjük a cső elmozdulásának mértékét, potenciálisan akadályt okozva a fegyver ürítésében, töltésében. Különösen fontos volt tehát a hangtompító tömegének minimalizálása.

Továbbá az ilyen kategóriába sorolható kézfegyvereken egyébként sem jellemző hang – és fénytompító csőszájszerelvények alkalmazása, így jelen kutatás tárgya extra innovációs értéket nyer.

3.2 Alelemek, hatásmechanizmusok

3.2.1 Expanziós tér

Integrált hangtompítóval szerelt tűzfegyvereken általánosan megfigyelhető, hogy az expanziós tér jóval a csőszáj síkja mögé nyúlik, ezzel maximalizálva a rendelkezésre álló tér kihasználtságát és a hangtompító hatásfokát. A Lynx esetében egy ilyen kialakítással – minden más előny mellett – csökkenthető lenne a fegyver tömegközéppontjának eltolódása, azonban...

- az akadályozná a fegyver üzemszerű működését a csőhátrasiklás hosszának korlátozásával.
- a cső hátsó pozícióban történő rögzítésére szolgáló mechanizmus nem tudná ellátni funkcióját, mivel a rögzítést végző karom, a csőhüvelyen található ellendarabját elfedné a hangtompító.

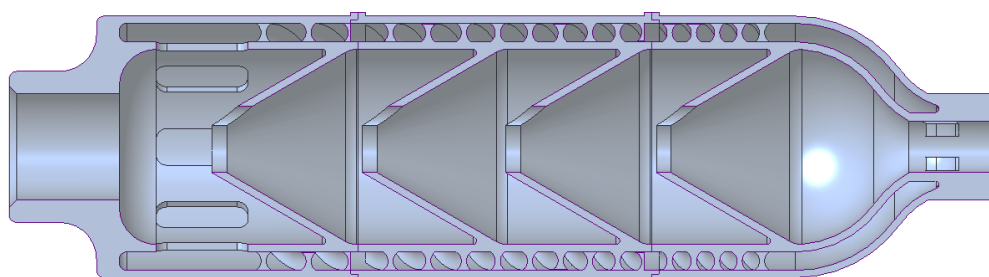
Ezen indokok végett a hangtompító expanziós terének teljes térfogata a 20. ábrán látható csőszájhüvely kijelölt síkja előtt található:



20. ábra A piros nyíllal jelölt felület a rögzítőkarom ellendarabja. A fekete nyíllal jelölt felület az a sík, amely a tokon felütközik a csőhátrasiklás leghátsó pontján.

3.2.2 Terelőlemezek

A hangtompító négy darab, a lövedék sebességvektorának irányára nézve divergáló keresztmetszetű körkúp terelőlemezzel rendelkezik. Falvastagságuk megegyezik a hangtompító más részein mérhető falvastagsággal. A 21. ábrán látható a hangtompító terelőlemezeinek kialakítása:



21. ábra Az SLM gyártástechnológiára optimalizált hangtompító metszeti képe.

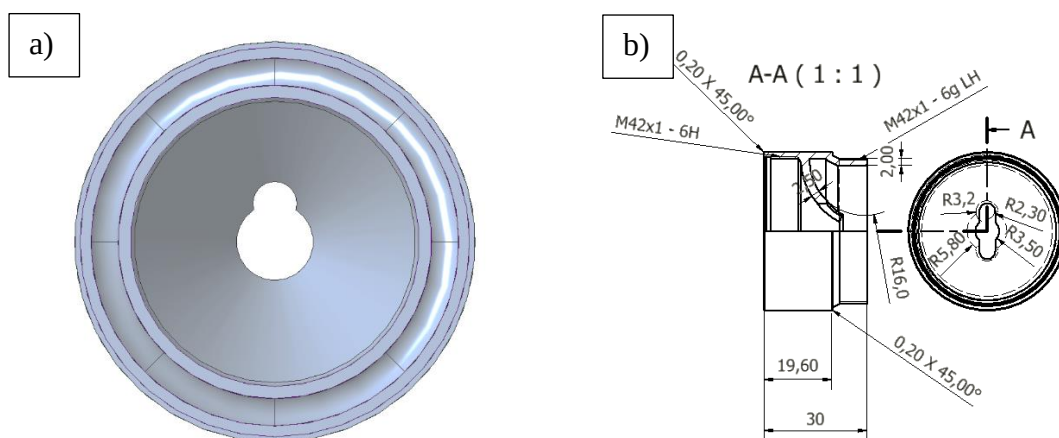
A választás a terelőlemezeket tekintve több okból is egy monolitikus, egy darabban legyártott szerkezetre esett: a fém 3D nyomtatás technológiája lehetővé teszi az ilyen és komplexebb geometriák gyártását egyetlen darabban, így nincsen szükség kötések – pl hegesztés alkalmazására. Csökken tehát az alkatrész legyártásához szükséges idő, valamint az alkatrész hővezetése is egyenletesebb marad az anyag homogenitása végett. Bár a hangtompító szerelhetősége, takarítása így nehezebbnek bizonyul, jelen kutatás a hangtompítók ezen gyakorlati aspektusáról nem tárgyal.

A terelőlemezek részeit képezik a lövedék központi furatát kiegészítő kicsípések, amelyek aszimmetrikusan, a hangtompító teljes hosszában egy vonalban helyezkednek el. Ezek a kicsípések lőporgázok áramlásában extra turbulenciát alakítanak ki, kijutásukat nehezebbé teszik a másodlagos tágulási kamrákból.

a) Visszatekintés

A Brabanti Antal által készített korábbi TDK dolgozat [37], illetve szakdolgozat tárgyát képező hangtompítóban ezek a kivágások bár jelen voltak, de csak a hangtompító egy bizonyos szakaszában, - a homlokfelülethez közelebbi térrészben - és szimmetrikusan elhelyezve. Továbbá, moduláris eszköz révén, a kicsípéssel rendelkező terelőlemezek menetesen illeszkedtek a sorban korábban következő alkatrészhez, amely a kivágások egyvonalba esését is megakadályozta: így a kivágások nem tudják ellátni az elvárt funkciójukat.

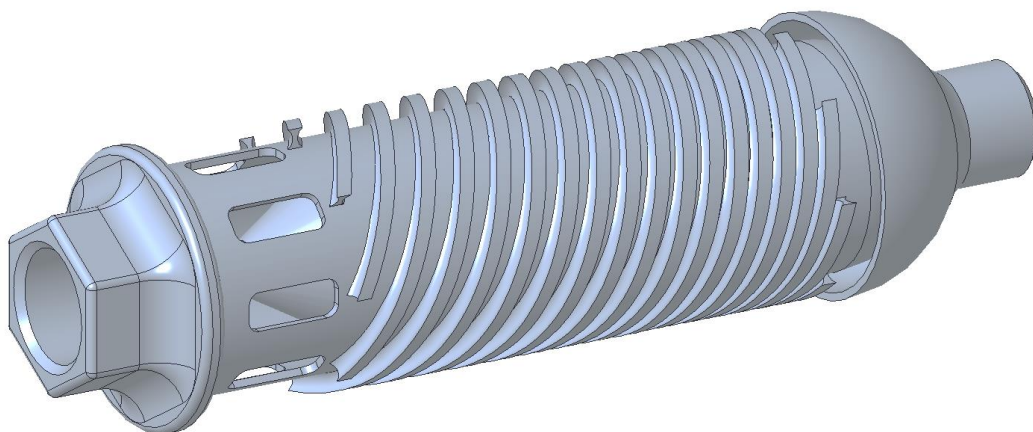
A Lidérc .50 hangtompító terelőlemezeit, és Brabanti Antal hangtompítójának moduláris terelőlemezeit a 22. ábra hasonlítja össze:



22. ábra a) A Lidérc hangtompító egyik terelőlemeze b) Brabanti Antal hangtompítójának egyik moduláris terelőlemeze rajza szimmetrikus kivágásokkal [37].

3.2.3 Helikális-csatornák

A hangtompító palástfelülete alatt és a terelőlemezeken kívül kialakított helikális, változó menetemelkedésű csatornák egy alternatív, kevesebb ellenállást tanúsító útvonalat jelentenek a kilépő lőporgázok számára. Ezzel csökkenthető a hangtompító által okozott, korábban már kifejtett gázvisszafűvés jelensége. Közvetlenül az expanziós térből, nyolc kibontáson át kerül elvezetésre a kilépő lőporgázok egy része, amely röviddel a torkolat előtt visszatér a fő áramlatba. A helikális csatornákat a 23. ábra illusztrálja:



23. ábra A Lidérc külső palástfelület nélkül. Jól láthatók a helikális csatornák.

A csatornák extra felületet, illetve hő elvonására alkalmas anyagmennyiséget vezetnek a rendszerbe, amivel szintén hozzájárulnak a löporgázok hűtéséhez, végső soron a lövésdörög hangerejének csökkentéséhez. A változó menetemelkedés a löporgázok által megtett út maximalizálására szolgál.

További elvárt hatásmechanizmusa a hangtompító ezen elemének, hogy egy – a modern harckocsik ágyúcsövén is megfigyelhető - füstgázelszívó pufferkamraként működjön. Az ebbe a zónába belépő löporgázok magasabb nyomással fognak rendelkezni a fő áramlatba történő visszalépéskor: a leömlő nyílások mögött, a másodlagos tágulási kamrákban rekedt löporgázmaradványokra így a kilépő gáztömeg szívó hatást gyakorol, és azokat a torkolat felé tereli. Ez a megoldás elősegíti, hogy a lövés kiváltást követő kireteszelés következtében a lehető legkevesebb mérgező elemeket tartalmazó löporgáz szökjön a felhasználó irányába.

3.2.4 Csőszájfék

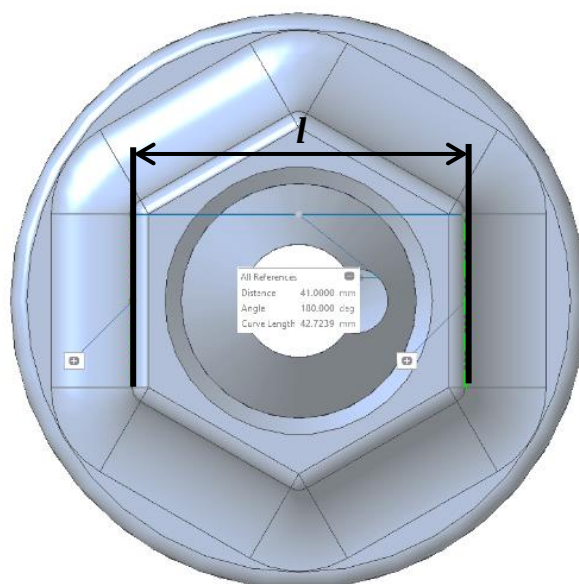
A GM-6 Lynx alapfelszereltségét képező reaktív működési elvű csőszájfék a hangtompító homlokfelületén kialakított menetes szekcióra is felszerelhető. A torkolaton kiömlő löporgázok fennmaradó energiája így a fegyver visszarúgás-impulzusának csökkentésére alkalmazható.

3.2.5 Rögzítés

A hangtompító rögzítése menettel történik a fegyver csőszájához, a fegyveren gyárilag megtalálható csőszájfék-hüvely és csőszájfék közé. Bár a fegyver kialakítása – hátsó pozícióban rögzíthető csövénél fogva – indokolta volna egy gyorscsatlakozó kivitelezését, az tovább növelné az egyébként is relatíve nehéz konstrukció tömegét, ami a fegyver megbízható működésével interferálna. További negatív következménye a hangtompító

megnövekedett tömegének a fegyver tömegközéppontjának távolodása a felhasználótól. A fegyver „ornehézzé” válik.

Megfelelő rögzítését elősegítendő, a hangtompító csőszájhoz rögzített végénél egy szabványos laptávolságú hatszög lelapolás került kialakításra. Így különböző kéziszerszámok segítségével könnyedén, biztonságosan rögzíthetjük és eltávolíthatjuk a hangtompítót. A lelapolásokat a 24. ábra illusztrálja:



24. ábra A hangtompító csőszáj felőli végén kialakított lelapolt szekció.
A laptávolság $l = 41 \text{ mm}$

3.3 Méretezés

A Lidérc .50 méretezése során nem álltak rendelkezésre szabványos méretezési, analitikus avagy numerikusan megoldható összefüggések. Jóval egyszerűbb modellek, mint például a kazán képlet pedig nem érvényesek az összetett geometria és az extrém magas, dinamikus fellépő nyomás és hőmérséklet végett.

Kimondható ugyanakkor, hogy ahhoz, hogy a hangtompító megfelelhessen a korábban leírt tömegkorlátozásnak, és az megfelelően biztonságos maradjon, annak biztonsági tényezője $n > 1,5$ kell, hogy legyen.

Iránymutatást egy hangtompító belső méretének megállapítására a pirodinamika alapegyenletét átalakítva, és más belső ballisztikai összefüggéseket felhasználva előállíthatunk. Ezek az összefüggések a kutatás 1-es számú mellékletében találhatók.

Egy hangtompító használata során a torkolaton kilépő gázok nyomásának minimalizálására törekszünk. Az ideális gázok állapotegyenletének átalakításával a következő, (13)-as összefüggést kapjuk:

$$p = \frac{\Omega \cdot R_{\text{spec}} \cdot T}{V} \quad (13)$$

Ahol p a nyomás, Ω a lőszerbe töltött lőportöltet tömege, R_{spec} a lőporgázok specifikus gázállandója, T a hőmérséklet, V pedig a rendszer térfogata.

Belátható a (13)-as egyenlet alapján, hogy a kilépő lőporgázok nyomásának csökkentése érdekében...

- Csökkentenünk kell a lőszerbe töltött lőportömeget, ezzel a lőporgázok tömegét
- Csökkentenünk kell a kilépő lőporgázok hőmérsékletét
- Növelnünk kell a hangtompító térfogatát.

A lőportömeg csökkentése a Lidérc fejlesztése során nem lehetséges, mivel az a kezdősebesség jelentős romlásával járna. Ezzel a Lynx öntöltő rendszere nem kapná meg a működéséhez szükséges gerjesztést a megfelelő mértékű visszarúgás impulzus formájában.

A lőporgázok hőmérsékletének csökkentését a Lidérc aktívan végzi a beépített terelőlemezekkel, illetve a palástmenti helikális csatornákkal. Ezt a hatást tovább lehetne növelni extra hőelvonó elemek beépítésével, amelyek nagy fajlagos felülettel rendelkeznek, ezzel azonban jelentősen nőne a hangtompító tömege. A hangtompító belső felületének hőkapacitását megnövelhetjük például olajfilm felvitelével is, illetve kevés víz betöltésével, ezek a megoldások azonban erősen átmenetiek, legfeljebb 1...2 lövés erejéig fejtik ki hatásukat.

Végül a térfogat növelése a legkézenfekvőbb megoldás a hangtompító hatásfokának növelésére. A főképp hőelvonásra támaszkodó – sok terelőlemezzel, hőelvonó elemekkel rendelkező – hangtompítókkal szemben a nagy térfogatú hangtompítók nem veszítenek hatásfokukból a belső alkatrészeik hevülése során. Ez főképp magas elméleti tűzütemű, automata tűzfegyverekre szánt hangtompítók méretezése során kell, hogy lényeges tervezési szempont legyen.

3.3.1 Belső ballisztikai paraméterek

Mind az ideális hangtompító térfogatának meghatározásakor, illetve a szimulációk bemenő paramétereinek megállapításakor általános belső ballisztikai értékek és az *M33 Ball* jelű lőszer ballisztikai tulajdonságai kerültek felhasználásra. Ez egy 12,7 x 99 mm NATO kaliberű, fémköpenyes, ólommagvas lövedékkel szerelt lőszer, amelynek további – pontosan csak mérésel megállapítható – adataira következtethetünk a lőpor égéshőjének értékével a következő (14)-es és (15)-ös empirikus összefüggések segítségével:

$$f = (642,2 + 0,07969 \cdot Q_e) \cdot 10^3 \quad (14)$$

$$\alpha = (1456 - 0,1251 \cdot Q_e) \cdot 10^{-6} \quad (15)$$

Ahol f a lőpor „force-értéke”, fajlagos munkavégző képessége, α pedig az úgynevezett kovolumen, Q_e pedig a lőszerbe töltött lőpor égéshője.

3.3.2 Az ideális hangtompító

Az ideális, valóban teljesen csendes hangtompító tervezésekor a célunk az, hogy a torkolaton a kiömlő lőporgázok nyomását a kritikus nyomásra, vagy alá csökkentsük, ugyanis ekkor a hangtompító torkolatánál a kilépő lőporgázok nem alakítanak ki lökéshullámot. A kritikus nyomás meghatározására az (1.2)-es, a legnagyobb megengedhető kilépő nyomás megállapítására az (1.4)-es összefüggés szolgál. Ezt az értéket felhasználva a pirodinamika alapegyenletének, a belső ballisztika politropikus szakaszára értelmezett verziójából (1.1) kifejezett, és a hangtompító térfogatára rendezett (1.6)-os összefüggésben megkapjuk, hogy mekkora belső térfogatú hangtompítóra lenne szükségünk.

$$V_{\text{hangtompító}} = \frac{f \cdot \Omega - \frac{\kappa - 1}{2} \cdot (m_l \cdot \varphi \cdot v_0^2)}{p_{ki}} - V_{\text{cső}} = 50,58 \text{ dm}^3 \quad (16)$$

Ahol $V_{\text{hangtompító}}$ az ideális hangtompító belső térfogata, f a lőpor fajlagos munkavégző képessége, Ω a betöltött lőpor tömege, m_l a lövedék tömege, φ a lövegállandó, v_0 a lövedék kezdősebessége, p_{ki} a kilépő lőporgázok nyomása, $V_{\text{cső}}$ pedig a cső belső térfogata a csőfurattal, és a töltényűrrrel.

A kapott térfogat nagysága elsősorban a modell koncentrált paraméterű mivoltából adódik, amely feltételezi, hogy a hangtompító teljes belső térfogatában ugyan az a nyomás jelentkezik.

Egy ekkora térfogatú hangtompító elkészítése azonban több szempontból is teljesen indokolatlan lenne. A Lidérc tervezése során a cél az volt, hogy a hangtompító mérete praktikus legyen, - az ne zavarja a felhasználót az irányzásban, vagy a fegyvert a működésében - tömege pedig ne akadályozza a GM-6 Lynx öntöltő mechanizmusának működését. Ez nagyjából 2 kg-os maximális tömeget jelent – ekkor a fegyver tömegközéppontja sem tolódik el túlságosan a torkolat irányába. A méret csökkentésére további indok a Lynx rombolópuska alacsony elméleti tűzüteme, ami lehetővé teszi, hogy a kilépő nyomás csökkentését a korábban is említett hőelvonó elemek – terelőlemezek, helikális csatornák - végezzék.

3.3.3 Szilárdsági ellenőrzés bemenő paraméterei

Mivel a hangtompító szilárdsági ellenőrzését igen bonyolult feladat lenne analitikus módszerekkel elvégezni, az a hangtompító CAD modelljein lefuttatott szimulációk eredményeinek elemzésével történt. A szimulációk legfontosabb bemenő paramétereinek számításai megtalálhatók a kutatás 2-es számú mellékletében.

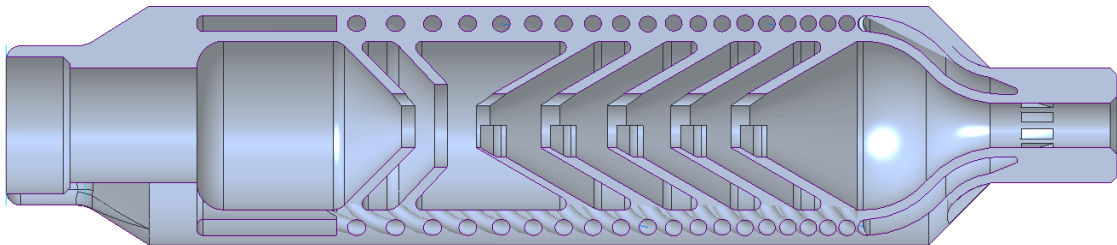
3.4 Modellezés, verziók

Jelen kutatás egyik legfontosabb része a hangtompító gyártáshelyes modellezése, majd a gyártást végző cég visszajelzése, és a szimulációk eredménye alapján a modellek megfelelő módosítása volt. A hangtompító valóságos evolúcióját figyelhetjük meg, ahogy az alapötletek összeállításától eljutunk a gyártásra kész végleges verziókig.

A modellezési munkák során a *Creo Parametric 8.0 CAD/CAM* szoftver került felhasználásra, a C3D Kft. beállítókörnyezetét alkalmazva.

3.4.1 Lidérc .50 V1

A hangtompító első lemodellezett verziója a kész konstrukció alaksajátosságainak bemutatására volt hivatott, illetve a különlegesebb alaksajátosságok modellezésének tesztelésére, valamint a CAD szoftver analitikai funkcióinak használatának elsajátítására szolgált. Ezt a verziót ábrázolja a 25. ábra:



25. ábra Lidérc .50 "V1"

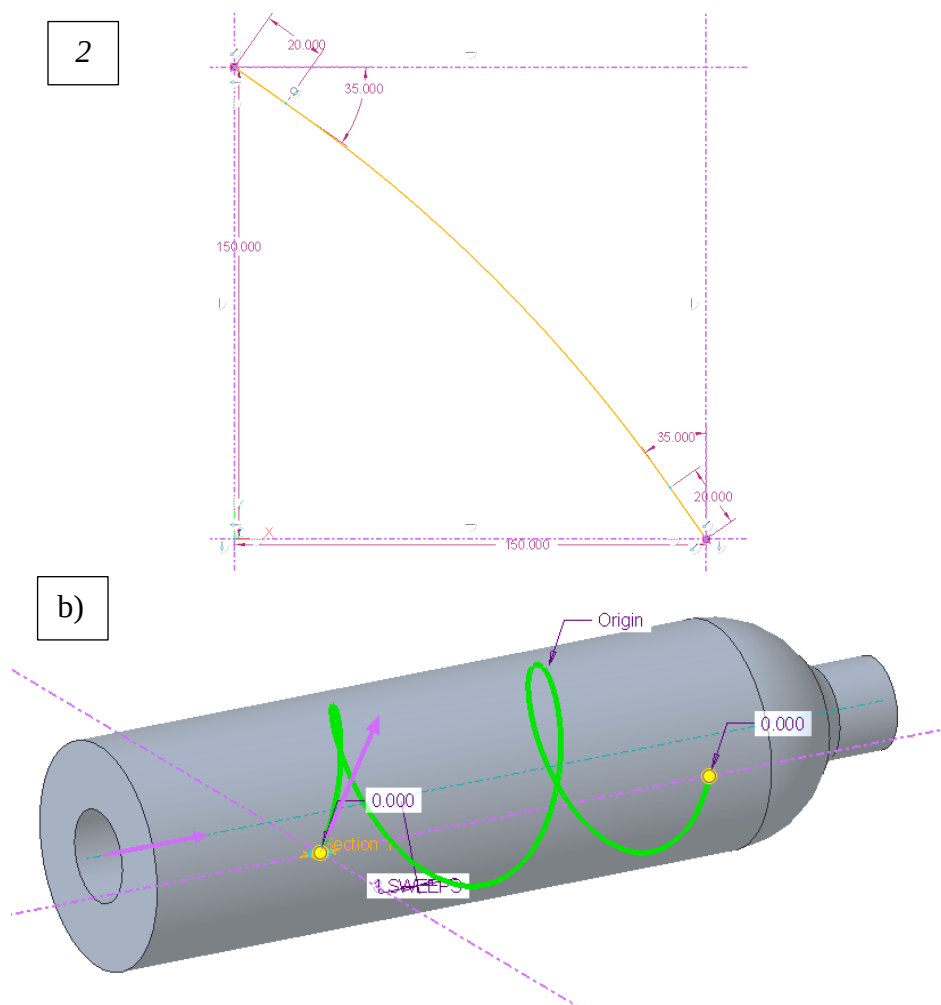
A hangtompító modellezésekor az alapfunkciók – kihúzás, kivágás, forgatás - mellett szükség volt specializált megoldások használatára is. A palástfelület alatt található helikális csatornák kialakításakor egy változó menetemelkedésű vezérgörbe kialakítása volt szükséges a szoftver Datum → Curve eszközével.

A vezérgörbe kialakításának lépései:

- Koordinátarendszer felvétele a vezérgörbe kezdőszakjánál. Fontos, hogy a felvett koordinátarendszer Z-tengelye a vezérgörbe terjedésének irányába nézzen!

- Konstans menetemelkedésű térbeli görbe létrehozása a Curve → Curve from Equation parancs segítségével. Az így létrehozásra kerülő görbét egyenlettel kell leírunk.
- Grafikon létrehozása, amellyel a térgörbe menetemelkedését változtatjuk. Ezt a szoftver “Graph” parancsával tesszük. Egy koordináta-rendszer létrehozása után a függőleges (Y) tengelyen vázlatvonalakkal megadjuk a paraméterekben is meghatározott hosszát a görbének a z-tengelyen. A tengely mellett létrehozott görbe meredeksége határozza meg a menetemelkedést a hossz megadott pontján.
- Görbe paramétereinek kiegészítése, az “evalgraph” függvénnyel, amely a menetemelkedést a létrehozott grafikonnal hozza összefüggésbe.

A vezérgörbe elkészítésének egyes lépéseit a 27. ábra illusztrálja:



27. ábra a) A vezérgörbe elkészítéséhez létrehozott grafikon b) Az elkészített vezérgörbe

A vezérgörbe létrehozása után használható a “Sweep” parancs, amely a kialakított görbe mentén egy előre megrajzolt keresztmetszetet vezet végig. Fontos, hogy a megrajzolt

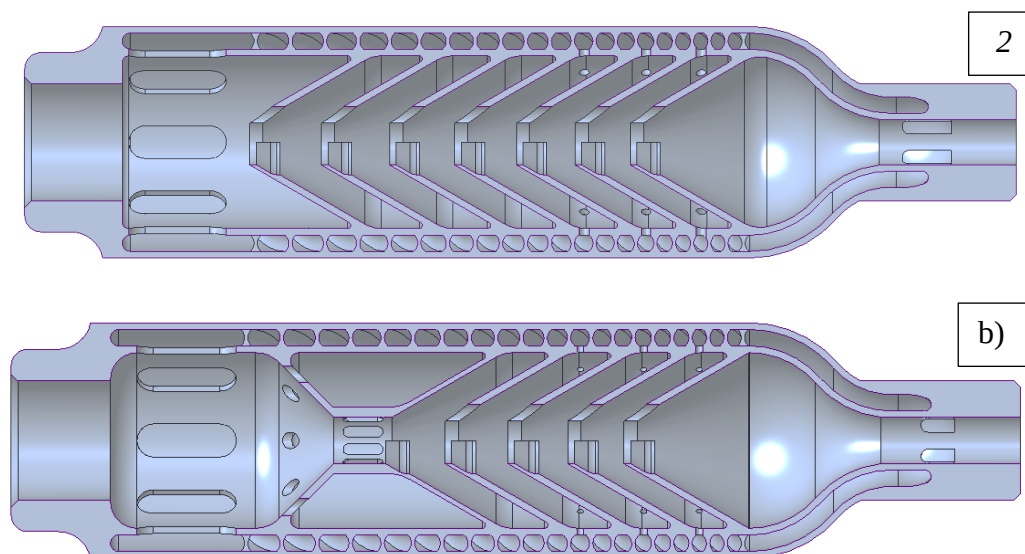
keresztmetszet a görbe teljes hosszán merőleges legyen a palástfelületre. Ezt a Sweep parancs *“Section plane control”* legördülő listájából a *“Normal to Projection”* opció kiválasztásával, illetve a megfelelő referenciatengely kiválasztásával érhetjük el.

3.4.2 Lidérc .50 V2

A hangtompító második verziójában jelentős tömegcsökkentés történt, illetve a végleges konstrukció más elemei (csökkenő terelőlemez-távkozók, kivágások) is megjelentek a modellen.

A hangtompító ezen verziójából kettő készült: az első kizárólag mechanikus elven lassítja a lőporgázokat, míg a másik kivitelben az első terelőlemez a korábban is kifejtett termodinamikus lassítást végezné.

Az utóbbi verzió elvetésre került, mivel egy ilyen terelőlemez kialakításával a rendelkezésre álló térfogat nem hatékonyan kerül kihasználásra, illetve a lőporgázok lassulásából származó nyomásnövekedés veszélyes lehet. A 29. ábrán a második verziós hangtompítók láthatók:



29. ábra a) A Lidérc .50 V2 termodinamikus lassításra szolgáló terelőlemezzel b) A Lidérc .50 V2 mechanikus lassításra szolgáló terelőlemezekkel

3.4.3 Lidérc .50 V3

A hangtompító harmadik és végleges verziója már a Büttner Kft., valamint a SERO Kft. munkatársainak, és a Neumann János Egyetem oktatóinak segítségével készült el. Jelen verzió esetében két modelltől beszélünk, amelyből az egyik a Büttner Kft. által alkalmazott Meltio márkájú, WAAM technológiájú fém 3D nyomtató gyártási irányelvei alapján

készült, míg a másik a Neumann János Egyetem ANIMA márkájú, ORLAS Creator nevű, SLM technológiájú fém 3D nyomtatóval történő gyártásra lett optimalizálva.

Ezen modellek már a csatlakozó felületek megfelelő névleges méreteivel rendelkeznek, amely az előző verziókhoz képest további finomodást jelent alaksajátosságok terén!

3.4.4 WAAM Technológia bemutatása, gyártáshelyes modellezés

A hangtompító egyik kiválasztott gyártástechnológiai eljárása a WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) technológia. A technológia az additív gyártási technológiák DED (Direct Energy Deposition) családjába tartozik. A WAAM technológiával történő gyártáskor egy fémhuzal, elektromos ívvel történő megolvasztásával építjük fel a kívánt geometriát szintenként [38]. A technológia pontossága, a kész munkadarabok részletessége elsősorban a huzal átmértőjétől függ.

A technológia sajátosságai végett a Lidérc hangtompító CAD modelljét a Meltio fém 3D nyomtatójának gyártási irányelvei alapján kellett módosítani. A gyártási irányelvek megtalálhatók a Meltio weboldalon [39]. Legfontosabb, vonatkozó feltételei a hangtompító geometriájára nézve:

- Minimum 2 milliméteres falvastagság
- Maximum 25 °-os félkúpszögű belógások
- Furatok és palástmenti kibontások felső részében az alkotók szintén maximum 25 °-os félkúpszöggel rendelkezhetnek. Így csak csepp alakú kibontásokat, és furatokat kell létrehozni

A 2. táblázat a WAAM technológiás fém 3D nyomtatás során elérhető titánötvözet mechanikai tulajdonságait tartalmazza:

2. táblázat A Meltio WAAM 3D nyomtatójával lehetőségünk van titánötvözet nyomtatására is, amelynek mechanikai tulajdonságai a következők [40]:

Ti-6Al-4V mechanikai tulajdonságai	
Szakítószilárdság (R_m , N/mm ²)	795...809
Folyáshatár (R_{eH} , N/mm ²)	710...744
Szakadási nyúlás (%)	6...8

Bár a WAAM technológiával készült alkatrészek a nyomtatást követően azonnal az alapanyaguk végleges mechanikai tulajdonságaival rendelkeznek, a durva felületminőségek végett a munkadarabokat jellemzően utómunkálatoknak kell alávetni.

A gyártási irányelvek végett a hangtompító egy darabban történő nyomtatása gyakorlatilag nem lehetséges WAAM technológiával. A Büttner Kft. munkatársának segítségével a hangtompító, a gyártáshelyes optimalizációt követően négy alelemre került felosztásra, amelyek külön kerülnek legyártásra, majd összeillesztésre. Az alelemek közé tartozik a terelőlemezeket is tartalmazó „mag”, és a csatlakozó elem a szabványos laptávolságú lelapolásokkal. Továbbá a magra a helikális csatornák külön kerülnek kinyomtatásra, majd ezeket követi az összes elemet egybefoglaló palást, ami egy előre legyártott, 2 milliméteres falvastagságú acélcső.

A gyártáshelyes módosítások során a helikális csatornák leömlő kibontásai is módosításra szorultak, illetve a helikális csatornák kör alkotóval rendelkező falait kellett a mag palástfelületére merőleges alkotóval helyettesíteni.

3.4.5 SLM Technológia bemutatása, gyártáshelyes modellezés

A második kiválasztott fém 3D nyomtatási technológia az SLM, azaz *Selective Laser Melting*. A Neumann János Egyetem ORLAS Creator nevű nyomtatója egy 250 W teljesítményű lézer segítségével, 0,4...0,6 mm szemcseméretű fémporrétegeket olvaszt egymásra.

A technológia hatalmas előnye, hogy roppant részletes geometriák hozhatók létre vele, ugyanis a nyomtatás felbontását nem egy huzal vastagsága, hanem a felhasznált fémpor szemcséinek mérete, így a terített réteg vastagsága szabja meg. További hatalmas előnye a technológiának az, hogy nincs szükség támaszokra belógó alaksajátosságok esetén a rétegek alatt elhelyezkedő porágy végett.

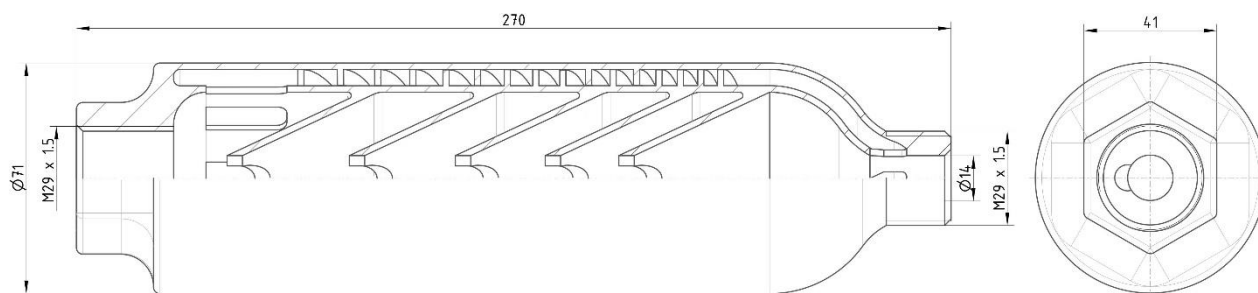
Hátránya, hogy a relatíve alacsony teljesítményű, az olvasztást végző lézer végett a kinyomtatott alkatrészeket szinterelni kell, hogy a porózus keresztmetszetet teljesen homogénné tegyünk, és hogy az elérje a végleges mechanikai tulajdonságait.

A 3. táblázat az SLM technológiás fém 3D nyomtatás során elérhető rozsdamentes acél mechanikai tulajdonságait tartalmazza:

3. táblázat A rendelkezésre álló fémpor a 17-4PH minőségű rozsdamentes acél, amelynek főbb mechanikai tulajdonságai a következők [41]:

17-4PH-A mechanikai tulajdonságai	
Szakítószilárdság (R_m , N/mm ²)	1000...1500
Folyáshatár (R_{eH} , N/mm ²)	1000...1500
Szakadási nyúlás (%)	10...20%

A Lidérc hangtompítót ezzel az eljárással valóban monolitikusan, minimális utómunkákkal le lehetne gyártani, azonban a Neumann János Egyetem nyomtatója egy limitált nyomtatási térrel rendelkezik, amely a modell három részre történő felosztását igényelte. Az alelemek határain 1 milliméteres küszöbök kerültek kialakításra, amelyek mentén az alelemeket autogén hegesztéssel kötik össze. Ezek után már csak a menetek kialakítása van hátra a kész hangtompító elkészítéséhez. A kész hangtompítót a 30. és 31. ábra illusztrálja:



30. ábra A Lidérc .50 (WAAM) Hangtompító főbb méretei



31. ábra A Lidérc .50 felszerelt állapotában

4 Szimulációk

Jelen fejezet a Lidérc .50 hangtompító Creo Parametric szoftverben létrehozott CAD modelljein futtatott szimulációk típusáról, előkészítéséről, majd kiértékeléséről tárgyal, amely a fejlesztés következő lépését jelentette.

4.1 Szimulációk

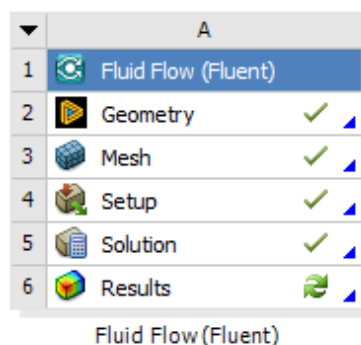
A szimulációk elkészítésére az Ansys szimulációs szoftvercsomag 2024 R2-es verziószámú Student licensze került felhasználásra, amely ingyenesen elérhető az Ansys weboldalán. A szimulációk két modulban készültek: az Ansys Static Structural, illetve az Ansys Fluid Flow (Fluent).

4.1.1 Ansys Fluent

A következő CFD (*Computational Fluid Dynamics*) szimulációk az Ansys Fluent moduljának felhasználásával jöttek létre, amik a hangtompítóban fellépő áramlások irányát, turbulenciák helyét, illetve a lőporgázok nyomását modellezzik.

Kimondottan bonyolult feladat megfelelő pontosságú szimulációkat futtatni egy hangtompítóban lefutó áramlás – és hőtani folyamatokról. Ezen tényállás, és a szoftverrel kapcsolatos korlátozott ismeretek végett a szimulációk eredményei pontatlanok lehetnek.

A szimuláció lefuttatását a modellek gondos előkészítése előzte meg, a *Workbench R2* szoftver használatával. A 32. ábrán látható Ansys Fluid Flow (Fluent) modul kiválasztása után a szoftverben lépésről-lépésre juthatunk el szimulációs eredményekig.



32. ábra Képernyőkép a CFD szimuláció Workbench projektfájlijából

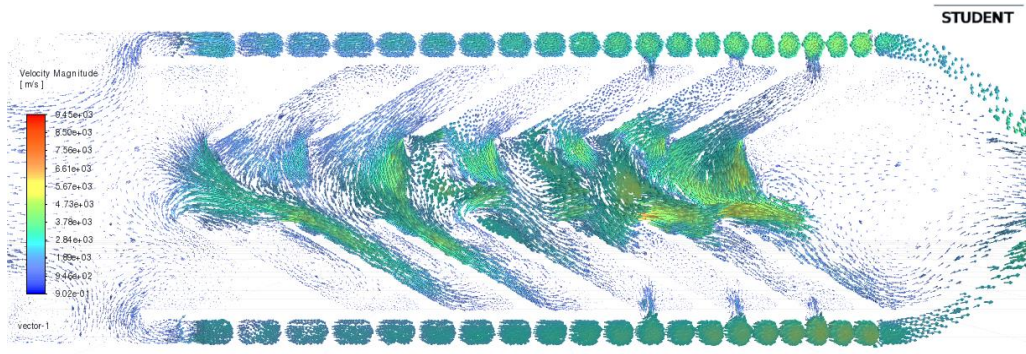
A *Geometry* fül alatt a modellünk alak sajátosságait állíthatjuk be a szimuláció lefuttatásához, a *Mesh* fül alatt pedig a modell hálózását, illetve az áramlást meghatározó felületeket (inlet és outlet), valamint a hangtompító belső falának felületeit adhatjuk meg. Az Ansys Student verzió felhasználása végett, jelen kutatás ezen szakaszában a modell hálózásának elemszáma maximum 10^6 db lehetett. A végleges elemszám – a lehető legpontosabb eredmény elérése érdekében – ezzel, jó közelítéssel megegyezett. A *Setup* fül alatt a 2-es mellékletben már kiszámolt belső ballisztikai összefüggésekből számított értékek kerültek megadásra a hangtompítóban lévő áramlás jellemzésére, a *Mesh* fülben meghatározott inlet felületre.

4.1.2 Eredmények

A CFD szimuláció eredményeinek megjelenítése két grafikus megjelenítési módszerrel történt a *Setup* fül által megnyíló *Parallel Fluent* alkalmazásban. Az alkalmazott eszközök a *Pathlines*, illetve a *Vectors*.

a) Lőporgázok áramlásának iránya

A lőporgázok áramlásának irányát a *Vectors* grafikus megjelenítőeszköz illusztrálja, aminek referenciafelületeként egy előre létrehozott metszősík került megadásra. Az eszköz beállításaiiban meghatározásra került, hogy az az áramló közeg elemeinek sebességvektorát jelenítse meg, illetve lehetőség volt megadni a vektorok sűrűségét, nagyságát. A szimuláció eredményét a 33. ábra illusztrálja:

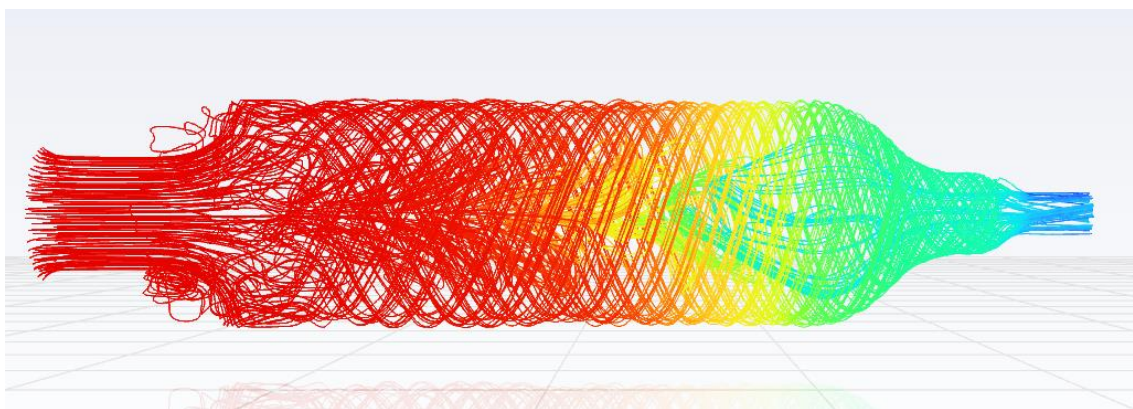


33. ábra Képernyőkép a CFD szimuláció sebességvektorokat ábrázoló eredményéről

Jól látható a sebességvektorok irányán, hogy a terelőlemezek központi furatának kiegészítéseként létrehozott kicsipések valóban működnek, turbulenciákat okoznak, az áramlást eltérítik ez esetben lefelé. Ez a jelenség minden terelőlemeznél megfigyelhető.

b) Áramlás nyomása

A lőporgázok teljes nyomását, illetve a gázok hangtompítóban megtett útját a *Pathlines* grafikus megjelenítőeszköz illusztrálja, aminek képe a 34. ábrán látható. Ebben az esetben csak az áramlás forrásának felületét kellett kiválasztani, mint meghatározó paraméter.



34. ábra Képernyőkép a hangtompítóban áramló lőporgázok teljes nyomását ábrázoló eredményéről

Az eszköz jól bemutatja a helikális csatornában áramló lőporgázok útját, illetve a színskála segítségével az betekintést ad az adott pontokban ébredő teljes nyomásra.

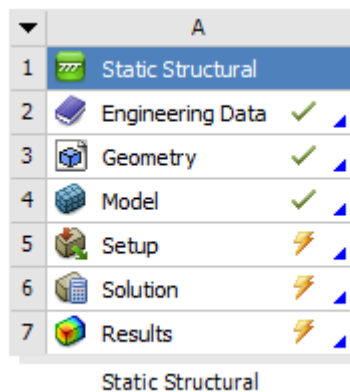
Jól látható, hogy a torkolathoz közelebbi térrészen, a helikális csatornákból kilépő gázközeg a magasabb nyomású, mint a terelőlemezek közül kilépő fő áramlat. Így kijelenthető, hogy a szimuláció a hangtompító füstgáz-elszívó hatásmechanizmusát is verifikálja.

4.1.3 Ansys Static Structural

A hangtompítón végzett következő szimulációk szilárdságtani jellegűek voltak, amik kivitelezése a Static Structural modul segítségével történt. Ezen szimulációk a hangtompító strukturális integritását vizsgálták az anyagok, illetve a hangtompítóban fellépő nyomás függvényében. Ahogyan az a 3.3.3-as alfejezetben olvasható, a hangtompító szilárdságtani ellenőrzéséhez ezekkel a szimulációkkal történt, a 2-es mellékletben számított bemenő értékek megadásával.

A méretezés során a legkritikusabb keresztmetszetnek az expansziós tér és az azt övező zóna bizonyul, ugyanis itt jelentkeznek a legmagasabb nyomásértékek és hőmérsékletek. A további tartományoknál ezek az értékek – ahogyan azt a CFD szimulációk már verifikálták - szükségszerűen alacsonyabbak, tehát amennyiben az expansziós térben jelentkező igénybevételekre méretezzük a hangtompítót, az biztosan megfelelően fog működni, biztonságos lesz.

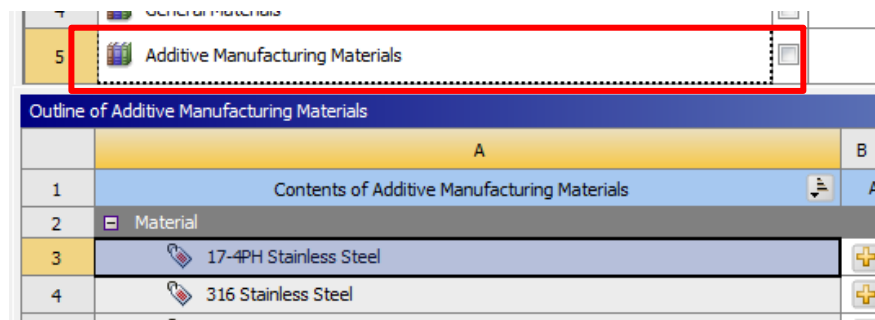
Ezért a méretezés alapjául szolgáló szimuláció csak a hangtompító expansziós terének és első terelőlemezeinek CAD modelljének felhasználásával készült. Ez az egyszerűsítés nagyban gyorsítja a szimulációk lefutását, azok bemenő paramétereinek megadásán, illetve azok előkészítése jelentősen könnyebbé válik. Továbbá, a modell méretének csökkentésével növelhető a hálózás elemszáma úgy, hogy annak értéke továbbra is az Ansys Student licenz által korlátozott – szilárdsági szimulációk esetében - 128 000 db elemszám alatt marad. Ezzel a szimuláció pontossága is nő. Az alábbi, 35. ábra a projekt Static Structural modulját ábrázolja.



35. ábra Képernyőkép a szilárdsági szimuláció Workbench projektfájlijából

A CFD szimulációkkal szemben itt a *Mesh* fül alatt a modell hálózásán kívül szükség volt kényszerek, és a hangtompító felületeire vonatkozó rögzítések, valamint nyomás jellegű igénybevétel létrehozására - a hangtompító megfelelő belső felületein.

Továbbá az *Engineering Data* fül alatt a később kiválasztandó anyagminőségeket kellett a projektbe importálni. Az Ansys rendelkezik egy átfogó anyagkönyvtárral, amelynek egyik kategóriája, az *Additive Manufacturing Materials* rendelkezik mind a WAAM technológiában használatos Ti-6Al-4V minőségű titánötvözet, és az SLM technológiában alkalmazott 17-4PH minőségű rozsdamentes acél tulajdonságaival. Ezek az anyagok közvetlenül a 36. ábrán illusztrált könyvtárból kerültek importálásra:



36. ábra Képernyőkép a projektfájl Engineering Data fül alatt található anyagkönyvtárról

4.1.4 Eredmények

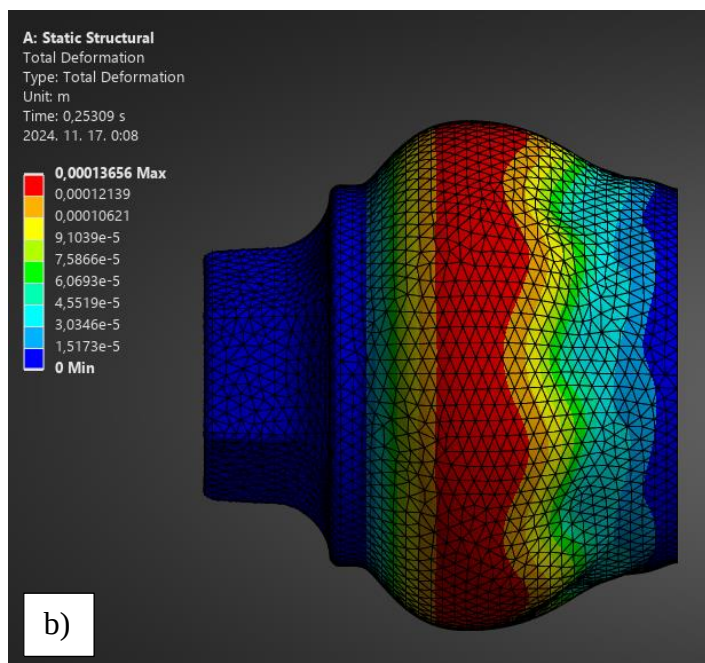
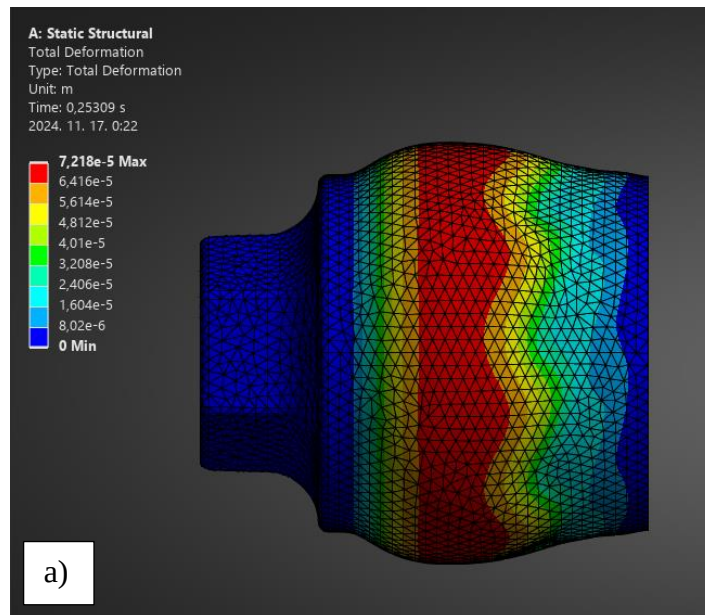
A szilárdságtani szimulációk elkészítése során mind az acél, és titánötvözet anyagú elemek eredményeiből 3 iteráció készült. Ennek célja, hogy megállapítsuk, a limitált elemszám ellenére mennyire pontos a hangtompító palástfelületében ébredő feszültség értéke a nyomás hatására. Ez az elemszámok felezésével történt, 0.01 m, 0,005 m, és 0,0025 m-es elemméretekkel, ahol a generált hálók elemszámai rendre 10244 db, 27589 db és 109 213 db voltak. Az lefutott szimulációk eredményei a 4. táblázatban olvashatók:

4. táblázat A szimulációk eredményei anyagminőségek, elemméretek szerint csoportosítva

17-4PH Acél		
Elemméret (m)	Feszültség (N/mm ²)	Alakváltozás (m)
0,01	460,5	$7,5 \times 10^{-5}$
0,005	438,2	$7,2 \times 10^{-5}$
0,0025	433,8	$7,2 \times 10^{-5}$
Ti-6Al-4V		
0,01	455,6	$1,4 \times 10^{-4}$
0,005	434,3	$1,3 \times 10^{-4}$
0,0025	429,6	$1,3 \times 10^{-4}$

Minden feszültségérték a 0,24 s időintervallumig fennálló, ~95 MPa homogén belső nyomásból ered. Az időintervallum meghatározására a hangtompítók átlag üzemideje szolgált.

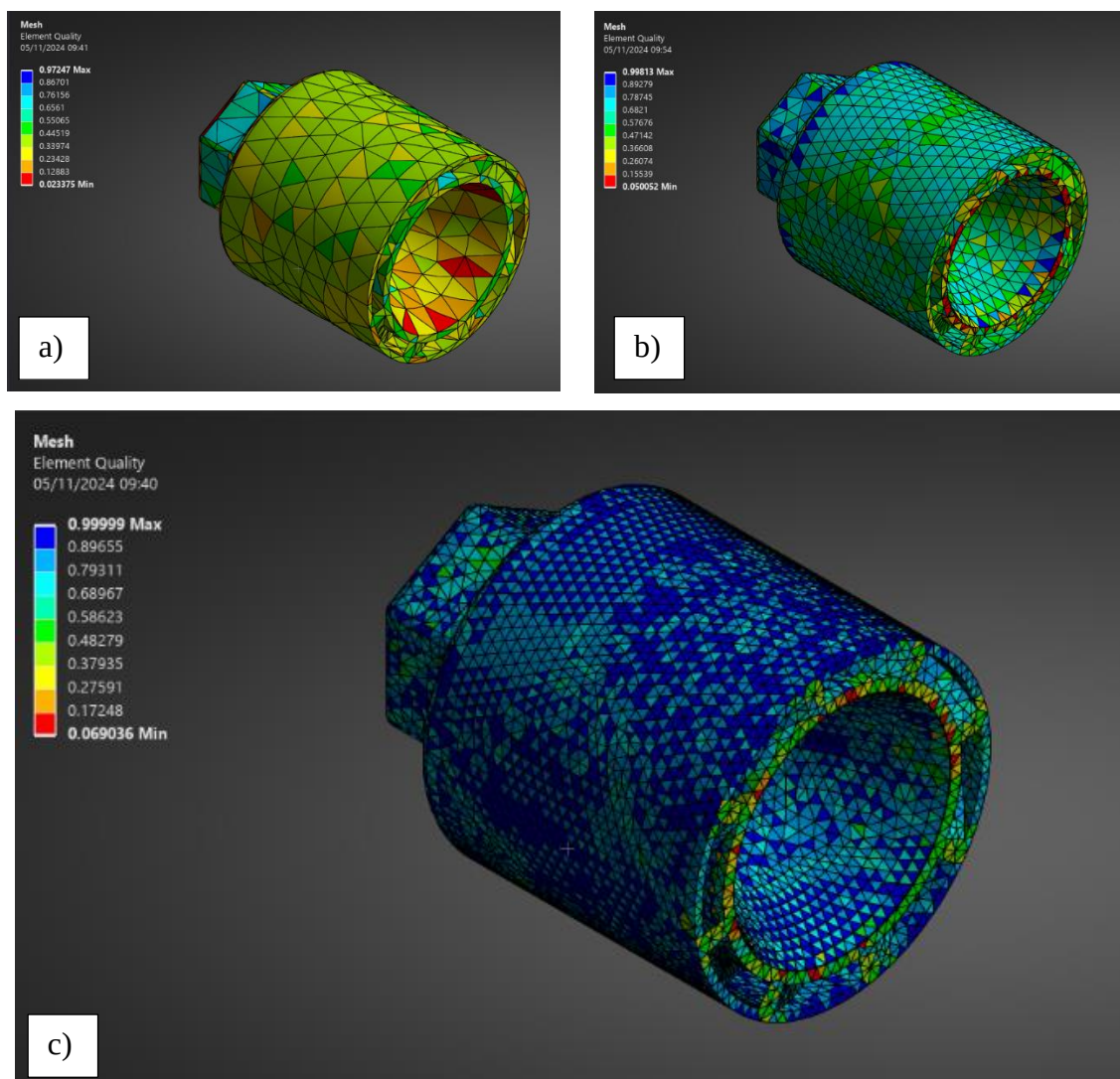
A feszültségek ábrázolása mellett a szoftver képes alakváltozást is illusztrálni, amelyek a 37. ábrán láthatók:



37. ábra a) Acél alapanyagú expanziós tér alakváltozása 100-szoros nagyításban b) Titánium alapanyagú expanziós tér alakváltozása 100-szoros nagyításban

Jól látható a helikális csatornák szilárdságnövelő hatása a maximum alakváltozás övezetétől jobbra. Bár az ottani felületeket is ugyan azt a homogén nyomásérték terheli, az ott ébredő feszültség jelentősen alacsonyabb.

Az elemméret csökkentésével az elemminőségben folyamatos, jelentős javulás volt tapasztalható, amiket a következő, 38. ábrán látható képernyőképek is ábrázolnak:



38. ábra a) 0,01 m-es elemméretű háló elemminősége b) 0,005 m-es elemméretű háló elemminősége c) 0,0025 m-es elemméretű háló elemminősége

A szimuláció futtatása során feltételezésre került, hogy a 0,24 s üzemidő alatt a hangtompító belsejében fellépő nyomás homogén és konstans. Bár ez a feltételezés nem közelíti a valóságot, ha ezeket az eredményeket vesszük alapul a méretezés során azzal a biztonság irányába tévedünk: várhatóan a Lidérc üzemideje jóval alacsonyabb a meghatározott 0,24 s-hoz képest, illetve a fellépő nyomás sem konstans, az impulzusszerűen lép fel, aztán szűnik meg a hangtompítóban.

Az elvégzett szilárdságtani szimulációk alapján, az anyagok folyáshatár-értékeit, illetve a legpontosabb feszültségértékeket felhasználva mindkét alapanyaghoz számítható biztonsági tényező értéke a (17)-es és (18)-as összefüggés alapján:

$$n_{\text{Titánium}} = \frac{R_{eH\text{titánium}}}{\sigma_{\text{titánium}}} = 1,65 \quad (17)$$

$$n_{\text{Acél}} = \frac{R_{\text{eHacél}}}{\sigma_{\text{acél}}} = 2,3 \quad (18)$$

4.2 Módosítások a szimulációk eredményei alapján

Ahogy azt a 4.1.4-es alfejezet tartalmazza, a hangtompító minden belső felületét homogén, konstans nyomás terheli a szimuláció futása alatt. Mivel azonban a valóságban a helikális csatornák átömlő kibontásainál elsősorban csak az expanziós tér felőli felületet fogja nyomás terhelni, ezért ott a keskeny geometriák kihajolhatnak a fellépő nyomás hatására. Ezek vastagsága 2 mm-el nőtt a szimulációk eredményeinek kiértékelését követően.

Ahogy azt a 4.1.4-es fejezetben megadott biztonsági tényezők mutatják, más módosításra nincs szükség a hangtompító geometriáját tekintve.

5 Összefoglalás

5.1 Kutatási eredmények összefoglalása

A tűzfegyverekből való lövés kiváltás legközismertebb kísérő jelensége a nagy hanghatás, amely 140...180 dB nagyságú is lehet. Ezt a hanghatást a tűzfegyver csőfuratából kilépő, magas nyomású és hőmérsékletű lőporgázok nyomáskiegyenlítődése által létrejövő lökéshullámok okozzák.

A hang – és fénytompító csőszájszerelvények egy, a csőfurathoz képest relatív nagy, terelőlemezekkel szerelt térfogatot biztosítanak a kilépő lőporgázok számára, amelyben azok lehűlnek, nyomásuk a torkolaton való kilépés előtt jelentősen csökken: így a lövést kísérő hanghatás is alacsonyabb lesz.

A hangtompító csőszájszerelvények működési elve a feltalálásuk óta nem változott jelentősegteljesen. Bár különböző felhasználási célokra – amely lehet például katonai, avagy rendvédelmi, vadászati, vagy sportlövészeti - más és más belső kialakítás a legideálisabb, a korszerű CAX, és fém additív gyártástechnológiák elterjedésével minden felhasználásra minden eddiginél könnyebb, hatékonyabb, kisebb és biztonságosabb hangtompítók fejlesztésére nyílt lehetőség.

A kutatás első része egy átfogó irodalmi kutatás eredményét fejt ki a hangtompítók múltbéli és jelenlegi technikájáról, az azokhoz kapcsolódó fizikai, ballisztikai jelenségekről, különös figyelmet fordítva a hangtompítókkal kapcsolatos tesztek, szabványok (MIL-STD-1474D és E, NATO AEP-4785) leírására. Ezen információk, illetve az ezt követő fejezetekben jellemzett fém 3D nyomtatási technológiák – az SLM és a WAAM – ismeretében a kutatás következő részeiben egy egyedi hangtompító-konstrukcióról tárgyal.

Ez a konstrukció, amely a SERO Kft. által fejlesztett GM-6 „Lynx” rombolópuskához készült, különösen a felhasználó egészségét hivatott védeni nem csak a lövés kiváltással járó hanghatások csökkentésével, hanem a bizonyítottan toxikus, karcinogén anyagokat tartalmazó lőporgázok tervszerű áramoltatásával a torkolat irányába egy külső, helikális csatornarendszer segítségével. A „Lidérc .50” névre keresztelt Következő-Generációs prototípus hangtompító minden aleleme – például a változó menetemelkedésű helikális csatornák, a terelőlemezek, illetve az azokat tartalmazó kivágások – a csőtorkolatból kilépő lőporgázok hűtését, így nyomásuk csökkentését szolgálja.

A hangtompító modellezése során három fő iteráció készült, amelyek alaksajátosságai iterációról-iterációra egyre kifinomultabbak lettek. A korábban is említett gyártástechnológiák felhasználásához a hangtompító modelljein további módosításokat kellett eszközölni, hogy azok gyártáshelyesek legyenek. Ezek a módosítások előre megszabott gyártási irányelvek alapján készültek el, és míg jelentős geometriai változásokat eredményeztek a hangtompító CAD modelljén, annak tervezett funkcióit nem zavarják.

A kutatás további részei a hangtompító CAD modelljén lefuttatott CFD és szilárdsági szimulációk leírásait tartalmazzák. Ezek a szimulációk az Ansys 2024 R2, Student licenszával készültek, aminek felhasználása jelentős technikai korlátozásokkal járt: a CFD szimulációk során a modell hálózása maximum 10^6 db elemszámmal rendelkezhetett, míg a szilárdsági szimulációk elkészítésekor már csak 128 000 db elem állt rendelkezésre. Mindkét szimuláció esetében a bemenő paraméterek különböző belső ballisztikai összefüggésekkel kerültek megadásra a választott fegyverplatform és az M33 Ball jelű, 12,7x99 mm NATO kaliberű lőszer tulajdonságait ismerve.

A CFD szimulációk elkészítésével az áramlás irányának, illetve teljes nyomásának kiderítése volt a cél. A kapott eredmények a hangtompító alelemeinek – például a terelőlemezek kicsípéseinek és a helikális csatornák - hatásmechanizmusait verifikálták. A szilárdsági szimulációk elkészítésével valójában a modell ellenőrzése történt: ez azért volt kiemelten fontos, mivel a tervezés során nem álltak rendelkezésre összefüggések, vagy alternatív megoldások egy biztonságos, ugyanakkor hatékony hangtompító méretezésére. A CFD szimulációkkal ellentétben a szilárdsági szimulációk során mindössze a hangtompító expanziós terének, illetve első terelőlemezének modellje került felhasználásra. Mindez két megfontolásból fakadóan történt: a szimulációk pontossága egyenesen arányos a modell hálózásának elemszámával. Egy kisebb modellen egy adott elemszám függvényében sokkal sűrűbb hálózás hozható létre. Továbbá, a hangtompítón belül itt, az expanziós térben jelentkeznek a legmagasabb igénybevételek nyomás és hőmérséklet formájában. A

hangtompító működési elvénél fogva ezek az értékek a távolabb eső térrészekben szükségszerűen alacsonyabbak – ezt a CFD szimulációk eredményei is szemléltették. Tehát amennyiben ez az elem megfelel, úgy a hangtompító többi része is megfelelően van méretezve.

A szilárdsági szimulációkból 3 iteráció készült, feleződő elemméretekkel. Ezzel nem csak a hálózás elemszáma növekedett, hanem a hálózás minősége is, ami szintén kulcsfontosságú tényező a szimulációk eredményének pontosságában. Ezen 3 iteráció során is már egy jól látható konvergencia mutatkozik a szimulációs eredményekben. A legpontosabb eredmények - 0,0025 m elemméret esetében - $\sigma_{\text{acél}} = 433,8 \text{ MPa}$, és $\sigma_{\text{titánium}} = 429,6 \text{ MPa}$ voltak. A hangtompító fala minden iteráció során $\sim 95 \text{ MPa}$ homogén, konstans nyomásnak volt kitéve mintegy 0,24 s időtartamig, ami közelítőleg a hangtompítók általános üzemidejével egyenlő. Bár ezek a feltételek nem fedik a valóságot, azokkal a biztonság irányába tévedünk és nagyban könnyítünk a szimulációk előkészítésében.

A korábban meghatározott gyártástechnológiák során felhasznált alapanyagok mechanikai tulajdonságait ismerve kiszámítható mind a titánötvözet és a rozsdamentes acél alapanyagú hangtompító biztonsági tényezője. Ezek rendre: $n_{\text{Titánium}} = 1,65$, és $n_{\text{Acél}} = 2,3$, amelyek megfelelnek a kutatásban kiszabott $n > 1,5$ feltételnek.

5.2 Fejlesztési és továbblépési lehetőségek

A kutatás elkészítése során rengeteg ötlet merült fel, ami a projekt egyfajta hosszútávú céljaként, fejlesztési lehetőségként értelmezhető. Tekintve, hogy a jelen kutatás egy prototípus hangtompító fejlesztésének menetéről tárgyal, fejlesztési iránynak tekinthető a termék végleges, akár forgalomba hozható verziójának kifejlesztése. Ez magában foglalja a hangtompító más szerkezeti elemeinek – például a csatlakozó menetek – ellenőrzését, vagy a hangtompító megjelenésének, látványvilágának továbbfejlesztését. További fejlesztési lehetőségek rejlenek a hangtompító szimulációinak pontosításában: jelen szimulációk elkészítése során egyszerűsítések történtek – alapos megfontolásokat követően, technikai és technológiai limitációk végett. A szimulációk pontosságához hozzájárul a bemenő adatok pontossága is, amiket csak mérésekkel lehet pontosan megállapítani – ez szintén jelen kutatás keretén kívül állt, tehát azok közelítő, koncentrált paraméterű, avagy empirikus összefüggésekből lettek származtatva. Továbbá a szimulációs szoftver komplexitásánál fogva rengeteg, a hangtompító működését befolyásoló paraméter nem került megadásra.

Pontosabb szimulációkkal lehetőség nyílna a terelőlemezek geometriájának optimalizálására, vagy új, eddig nem alkalmazott belső geometriák kipróbálására. Fejlesztésre szorul ezen kívül a hangtompító helikális csatornarendszere, amit szintén, elsősorban pontos szimulációkkal lehetne végezni.

Tekintve, hogy jelen kutatás részletesen tárgyal a hangtompítókkal kapcsolatos mérési eljárásokról és azok tudásanyaga rendelkezésre áll, a legfőbb továbbfejlesztési irányvonalat a hangtompító legyártása, majd széleskörű tesztelése képviselné. Jellemzően az ilyen, úgynevezett „nyúzópróbák” során derülnek ki az eszközök olyan hiányosságai, kvázi hibái, amik a tervezés során elkerülik a fejlesztőmérnökök figyelmét. Összefoglalva, különböző konstrukciók tesztelésével gyakorlati eredmények révén optimalizálhatóvá válna a hangtompító felépítése: így válhatna az a lehető legbiztonságosabb, legkönnyebb és leghatásosabb konstrukcióvá.

6 Summary

A firearm suppressor is a muzzle device that serves the purpose of trapping, and decreasing the pressure of the propellant gases escaping from the bore of said firearm. The very loud (140...180 dB) muzzle report that is associated with the discharge of a firearm is the product of these escaping propellant gases rapidly normalizing, and creating shockwaves in the surrounding air. The human ear perceives this as noise.

By decreasing the pressure of the escaping propellant gases, it is possible to decrease the perceived muzzle report. A suppressor achieves this goal by providing a relatively large volume with so called „baffles” for said gases to expand, and cool in. Considering the presumed purpose of the suppressor – that can be for recreational shooting, hunting, and military, law enforcement applications – the number, and geometry of these baffles, and the internal volume of the suppressor can vary greatly. With the help of modern CAX technologies, and additive manufacturing utilizing metallic materials it is possible to create suppressors more compact, safe, and effective than ever before – all the while doing it faster, and in a more cost-effective manner.

In the first part of the paper, I explored the current state of suppressor technology, and related physical, ballistic phenomena with an added focus on measurement methods related to suppressors, as described by the US DoD (*MIL-STD 1474D and MIL-STD 1474E*), and NATO (*AEP-4785*). This way I was able to devise a „proof of concept” suppressor design that was sufficiently effective while aiming to preserve the auditory and respiratory health of the operator. With the available additive manufacturing technologies – those being WAAM, and SLM – and their printable materials – *Ti-6Al-4V* titanium-alloy and *17-4PH* stainless steel, respectively - at hand, I had definitive guidelines to create proper CAD models of my idea of a flow-through suppressor with added functionality in the following part of the paper.

The host of the resulting „*Lidérc .50*” suppressor is the GM-6 Lynx, a 12.7x99 mm NATO caliber anti-materiel rifle, developed by SERO Kft. based in Gödöllő, Hungary. By choosing said rifle as the host, the suppressor had to conform to a line of prerequisites, including limited weight and size. With the Lynx being a recoil operated firearm, specifically long recoil operated, it was essential not to create a suppressor heavy enough to prevent the rearward motion of the barrel during firing – hence hindering the reliable operation of the firearm.

After iterating through 3 versions of the base idea of the *Lidérc .50*, it was necessary to apply further modifications to the base design, specific to SLM and WAAM technologies: certain shapes had to be modified, and the suppressor had to be divided up to accommodate manufacturing in both cases. These modifications were done in accordance with the manufacturers' guidelines, shared on their websites.

In the following parts of the paper, I verified the structural integrity and functionality of the *Lidérc* by running CFD and Static Structural simulation on the model, using the Student License of Ansys 2024 R2. This was necessary because – due to the secretive nature of the defense industry – I had no analytical or numerical methods to design a safe suppressor. Since simpler models used for the design of bodies such as pressure vessels are not applicable here, the only way of reliable verification is through simulations. While I had limited experience using the software, and the student license posed some technical limitations on the accuracy of both types of simulations, after certain considerations and concurrent simplifications, the results were positive, and had an acceptable level of accuracy. The CFD simulations verified the suppressor's pressure decreasing and „bore evacuator” functionality, and it also showed that the clippings applied to the baffles also had the expected effect of creating extra turbulence between baffles.

The simulations ran using the Static Structural module of Ansys saw the most simplifications applied. With the highly limited (128 000) number of elements/nodes the model's mesh could have, I opted to only simulate the expansion chamber, and the first baffle of the suppressor; this part faces the highest temperature and pressure levels. If this part is structurally sound, the further sections of the suppressor are also safe due to the necessarily lower temperature and pressure levels. Furthermore, by decreasing the size of the simulated object, the relative density of elements could be increased, that is directly proportional to the accuracy of the simulations. To further guarantee the accuracy of the simulations, three iterations were run with element sizes being halved in each iteration. Convergence of stress values was already apparent after 3 iterations of element size. The most accurate stress levels being: $\sigma_{steel} = 433,8 \text{ MPa}$, $\sigma_{titanium} = 429,6 \text{ MPa}$

I calculated the input values for both types of simulations using internal ballistic models, with the available data of *M33 Ball* type, *12.7x99 mm NATO* ammunition.

Even with $\sim 95 \text{ MPa}$ of constant pressure for $\sim 0,24 \text{ s}$ the stress levels measured in the walls of the suppressor were way below the yield strength of the chosen materials. Both in the case of the titanium and steel materials, the safety factor was $n > 1,65$, which conforms to the formerly specified $n > 1.5$ safety factor.

7 Felhasznált irodalom

- [1] W. J. Murphy, G. A. Flamme, A. R. Campbell, E. L. Zechmann, S. M. Tasko, J. E. Lankford, D. K. Meinke, D. S. Finan and M. & Stewart, "The reduction of gunshot noise and auditory risk through the use of firearm suppressors and low-velocity ammunition," *International journal of audiology*, pp. 28-41, 2018.
- [2] Simonyi Ottó, A mesterlövész, Budapest: Belügyi Szemle, 2022, pp. 1577-1580.
- [3] NATO, AEP-4785 Volume I Edition B - Testing Protocol on Acoustic Signature Measurement of Small Arms Suppressors, 2021.
- [4] R. Pääkkönen, "Environmental noise reduction means of weapons," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 123, p. 3822, 2008. 06. 01.
- [5] Siemens, „Sound Pressure, Sound Power, and Sound Intensity: What’s the difference?”,
<https://community.sw.siemens.com/s/article/sound-pressure-sound-power-and-sound-intensity-what-s-the-difference> 2019. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 20.]
- [6] E. Courtney, R. Couvillion, A. Courtney and M. Courtney, Effects of Sound Suppressors on Muzzle Velocity, Bullet Yaw and Drag, 2017.
- [7] A. Kilikevičius, V. Giedraitis, K. Kilikevičienė, J. Matijošius, J. Selech, G. Buckiūnas and M. Rucki, "Performance Analysis of Different Gun Silencers.," *Appl. Sci.*, vol. 4426, 2023.
- [8] WHO, "Strategies for Prevention of Deafness and Hearing Impairment.," 1997.
- [9] U. S. DoD, MIL-STD-1474D DEPARTMENT OF DEFENSE DESIGN CRITERIA STANDARD NOISE LIMITS, 1997.
- [10] U. S. DoD, MIL-STD-1474E - DEPARTMENT OF DEFENSE DESIGN CRITERIA STANDARD NOISE LIMITS, 2015.
- [11] W. A. Openshaw and A. B. Chiples, Multi-Platform Suppressor Design Project, Williams Honors College, Honors Research Projects., 2022, p. 1570.
- [12] Chase S., „How Does a Silencer Work?,” Silencer Shop,
<https://www.silencershop.com/blog/how-does-a-silencer-work>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 10]
- [13] M. Moss, „The Firearm Blog,” 2018.
<https://www.thefirearmblog.com/blog/2018/11/28/us-army-world-war-onesilencers/>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 12.]
- [14] „National Army Museum,” <https://collection.nam.ac.uk> . [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 03.]
- [15] Reddit
https://www.reddit.com/r/GunPorn/comments/ubrkji/1941_wwii_soviet_bramit_silencers_for_rifles/#lightbox. [Hozzáférés dátuma: 2024. 09. 15.]
- [16] D&B Militaria, <https://www.dandbmilitaria.com/deactivated-kar-98-suppressed-sniper-rifle>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 19.]
- [17] A. Rawski, Wikipedia,
https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:AKM%C5%81_NTW_4_92_3.jpg#file. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 01.]
- [18] The Free Library,
<https://www.thefreelibrary.com/THE+HISTORY+OF+SOUND+SUPPRESSORS+>

- IN+THE+USSR+AND+RUSSIA%3A+Part+1%3A...-a0651642316. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 19.]
- [19] P. D. SUNDBERG, Wikipedia, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SEAL_Colt_Commando_v2.jpg. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 01.]
- [20] Wikipedia, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Heckler_Koch_MP5.jpg. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 01.]
- [21] V. Kuzmin, Wikipedia, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AS_Val_%28541-03%29_noBG.png. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 01.]
- [22] M. Moss, The Firearms Blog, 2020. <https://www.thefirearmblog.com/blog/2020/07/27/usmc-adopts-knights-suppressor/>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 10.]
- [23] P. Soldier, Wikipedia, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PEO_M110_SASS_Profile.jpg. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 11.]
- [24] B. Eric, The Firearms Blog, <https://www.thefirearmblog.com/blog/2023/09/07/potd-britains-commandos-1403a1-knights-ks-1/>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 10.]
- [25] Reddit, https://www.reddit.com/r/MilitaryPorn/comments/1bjgola/the_standard_us_army_infantry_rifle_the_xm7_with/. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 10.]
- [26] C. S., „How Does a Flash Hider Work?”, Silencer Shop, <https://www.silencershop.com/blog/how-does-a-flash-hider-work>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 16.]
- [27] Vozsech István, Ballisztika, Kecskemét: NJE GAMF, 2022.
- [28] C. S., „Do Suppressors Reduce Recoil?”, Silencer Shop, 2024. <https://www.silencershop.com/blog/do-suppressors-reduce-recoil>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 11.]
- [29] „SigSauer,” Sig Sauer, <https://www.sigsauer.com/sig-mcx-spear-lt-16-inch-5-56-nato-barrel-and-gas-block-assembly.html>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 09. 17.]
- [30] E. Mariussen, L. Fjellsbø, T. R. Frømyr, I. V. Johnsen, T. E. Karsrud és Ø. A. Voie, „oxic effects of gunshot fumes from different ammunitons for small arms on lung cells exposed at the air liquid interface,” *Toxicology in Vitro*, 2021.
- [31] „Freedom Trading Co.,” HuxWrx, <https://www.freedomtrading.com/huxwrx-flow-556k-kit-w-flash-hider-fde-p/2450.htm>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 09. 15.]
- [32] „Freedom Trading Co.,” SureFire, <https://www.freedomtrading.com/Surefire-SOCOM556-RC3-DE-p/socom556-rc3-de.htm>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 09. 15.]
- [33] Wikipedia, https://nl.wikipedia.org/wiki/Bestand:Cross_section_of_a_suppressor_01_noBG.jpg. [Hozzáférés dátuma: 2024. 09. 14.]
- [34] T. Olander, „How to Build a Suppressor, Part 1: Intro, Parts & Tools,” The Gun Study, <https://web.archive.org/web/20210801043943/https://thegunstudy.com/how-to/how-to-build-a-real-suppressor-with-a-solvent-trap/>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 09. 24.]

- [35] „Oberland Arms,” Oberland Arms, <https://www.oberlandarms.com/oa-kda-suppressors/kda-suppressor/479/oa-kda-titan-elb-3d-fuer.223rem./300blk/308win.-inkl.-mfd-extreme-low-backpressure>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 09. 05.]
- [36] SilencerCo, Youtube, <https://www.youtube.com/watch?v=D9tq2XZU6KM&t=1s>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 26.]
- [37] B. Antal, „Lőfegyver hangtompító tervezése lézeres fémaddíciós technológia alkalmazásával,” NJE GAMF, kecskemét, 2023.
- [38] Meltio, „Wire-Laser Metal 3D Prnting”, <https://meltio3d.com/>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 20.]
- [39] Meltio, „Meltio Design Guidelines", https://meltio3d.com/wp-content/uploads/2024/02/Meltio_Whitepapers_Design-Guidelines.pdf. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 20.]
- [40] Meltio, „Material Datasheet Ti-6Al-4V”, https://meltio3d.com/wp-content/uploads/2024/09/Meltio-_Materials_Datasheets_Ti64_.pdf. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 20.]
- [41] O. Metco, „METCOADD 17-4PH-A,” <https://mymetco-europe.oerlikon.com/en-us/product/metcoadd174pha>. [Hozzáférés dátuma: 2024. 10. 20.]

8 Ábrajegyzék

1. ábra Az AHAAH Version 2.1 szoftver kezdőképernyője. [10]	4
2. ábra Hangtompító nélküli tűzfegyver elsütésekor mért nyomásingadozás-értékek az idő függvényében [3].	6
3. ábra Ábra az ε_0 szög értelmezéséhez [3].	7
4. ábra a) A Maxim Silencer hirdetése b) a Maxim Silencer szabadalma [6]	7
5. ábra a) Sten Mk IIS géppisztoly [14] b) A Moszin-Nagant ismétlőpuska, és a Nagant revolver „Bramit” hangtompítókkal szerelve [15] c) Kar 98k ismétlőpuska L23/L27 hangtompítóval szerelve [16]	8
6. ábra a) a PBSz-1 hangtompító szétszerelt állapotban, b) A PBSz-1 hangtompító gumimembránja. c) Éjszakai harcászatra szerelt AKM típusú gépkarabély egy PBSz-1 hangtompítóval [17]	9
7. ábra Amerikai XM-177 gépkarabély [19]	10
8. ábra a) H&K MP-5 SD géppisztoly [20] b) AS VAL gépkarabély [21]	10
9. ábra a) KAC M110 SASS csapattámogató fegyver [23] b) KAC NT-4 hangtompító [22]	11
10. ábra a) Brit KAC L403A1 [24] b) Amerikai SigSauer XM-7 [25]	11
11. ábra Hangtompítók hatása különböző tömegű lövedéktípusok kezdősebességére. [6]	13
12. ábra a) Hangtompítók hatása különböző tömegű lövedékek légellenállási együtthatójára. b) Hangtompítók hatása a lövedékek átlag szöghibáira [6]	13
13. ábra Öntöltő fegyver gáznyomás-görbéje, kiegészítve a a lövedék sebességét ábrázoló görbével, és gázhengerben mért nyomás görbéjével	15
14. ábra Sig Sauer MCX Spear LT típusú sporkarabély 406 milliméteres, állítható gázhengerrel szerelt csőszervezete [29]	16
15. ábra a) HuxWrx Flow 556k [31] b) Surefire RC 3 hangtompító [32]. Mindkét csőszájszerelvény 3D gyártástechnológiai eljárással készült, alacsony gázvisszafúvásos kivitel.	16

16. ábra Hagyományos felépítésű hangtompító metszete. 1 – Csatlakozás, 2 – Expanziós tér, 3 – Külső burkolat, 4 – Terelőlemez, 5 – Másodlagos tágulási tér, 6 – Torkolat [33].....	17
17. ábra Az Oberland Arms KDA Titan ELB hangtompítója, konvergáló keresztmetszetű terelőlemezekkel. [35]	20
18. ábra A fejlesztés menetének lépésdiagramja.....	22
19. ábra A GM-6 „Lynx” rombolópuska	22
20. ábra A piros nyíllal jelölt felület a rögzítőkarom ellendarabja. A fekete nyíllal jelölt felület az a sík, amely a tokon felülközik a csőhátrasiklás leghátsó pontján.....	24
21. ábra Az SLM gyártástechnológiára optimalizált hangtompító metszeti képe.	24
22. ábra a) A Lidérc hangtompító egyik terelőlemeze b) Brabanti Antal hangtompítójának egyik moduláris terelőlemeze rajza szimmetrikus kivágásokkal [37].	25
23. ábra A Lidérc külső palástfelület nélkül. Jól láthatók a helikális csatornák.	26
24. ábra A hangtompító csőszáj felőli végén kialakított lelapolt szekció. A laptávolság $l = 41$ mm	27
25. ábra Lidérc .50 “V1”	30
27. ábra a) A vezérgörbe elkészítéséhez létrehozott grafikon b) Az elkészített vezérgörbe	31
29. ábra a) A Lidérc .50 V2 termodinamikus lassításra szolgáló terelőlemezzel b) A Lidérc .50 V2 mechanikus lassításra szolgáló terelőlemezekkel	32
30. ábra A Lidérc .50 (WAAM) Hangtompító műhelyrajza	35
31. ábra A Lidérc .50 felszerelt állapotában	35
32. ábra Képernyőkép a CFD szimuláció Workbench projektfájlijából	36
33. ábra Képernyőkép a CFD szimuláció sebességvektorokat ábrázoló eredményéről.....	37
34. ábra Képernyőkép a hangtompítóban áramló löporgázok teljes nyomását ábrázoló eredményéről	37
35. ábra Képernyőkép a szilárdsági szimuláció Workbench projektfájlijából	39
36. ábra Képernyőkép a projektfájl Engineering Data fül alatt található anyagkönyvtárról	39
37. ábra a) Acél alapanyagú expanziós tér alakváltozása 100-szoros nagyításban b) Titánium alapanyagú expanziós tér alakváltozása 100-szoros nagyításban	41
38. ábra a) 0,01 m-es elemméretű háló elemminősége b) 0,005 m-es elemméretű háló elemminősége c) 0,0025 m-es elemméretű háló elemminősége	42

9 Táblázatok jegyzéke

1. táblázat Decibellel jellemezhetünk nyomást, teljesítményt, és intenzitást egyaránt [5] ...	2
2. táblázat A Meltio WAAM 3D nyomtatójával lehetőségünk van titánötvözet nyomtatására is, amelynek mechanikai tulajdonságai a következők [40]:	33
3. táblázat A rendelkezésre álló fémpor a 17-4PH minőségű rozsdamentes acél, amelynek főbb mechanikai tulajdonságai a következők [41]:	34
4. táblázat A szimulációk eredményei anyagminőségek, elemméretek szerint csoportosítva	40

1. Melléklet

Ideális hangtompító belső térfogatának meghatározása

12,7 x 99 mm NATO (.50 BMG) kaliberű, M33 Ball típusú lőszer, és a SERO GM-6 Lynx ballisztikai tulajdonságai:

$$f = 961\,756 \text{ J/kg} \quad m_l = 0,042 \text{ kg} \quad V_h = 29 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \varphi = 1,259 \quad \kappa = 1,2$$

$$\alpha = 9,54 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg} \quad v_0 = 900 \text{ m/s} \quad V_{cs} = 7,97 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad \Omega = 0,014 \text{ kg}$$

Ideális hangtompító térfogatának számítása:

$$p = \frac{f \cdot \Omega - \frac{\kappa - 1}{2} \cdot (m_l \cdot \varphi \cdot v_0^2)}{V_h - \Omega \cdot \alpha + A_{cső} \cdot l(t)} \quad (1.1)$$

$$p_{krit} = p_{ki} \cdot \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (1.2)$$

$$\left(\frac{2}{\kappa - 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} = 0,5645 \quad (1.3)$$

A hangtompító torkolatánál nem alakul ki lökéshullám, ha $p_{krit} \leq p_{körny} = 1 \text{ bar}$

Így amennyiben egyenlőségre számolunk, a legmagasabb megengedhető kilépő nyomás:

$$p_{ki} = \frac{p_{környezeti}}{0,5645} = 1,7945 \text{ bar} \quad (1.4)$$

$$p = \frac{f \cdot \Omega - \frac{\kappa - 1}{2} \cdot (m_l \cdot \varphi \cdot v_0^2)}{V_{hangtompító} + V_{cs}} \quad (1.5)$$

$$V_{hangtompító} = \frac{f \cdot \Omega - \frac{\kappa - 1}{2} \cdot (m_l \cdot \varphi \cdot v_0^2)}{p_{ki}} - (V_{cs} + V_h) = 50,58 \text{ dm}^3 \quad (1.6)$$

Ahol f a löporgázok „force”-értéke, fajlagos munkavégző képessége a hőveszteségekkel, α a lőpor kovolumen értéke, m_l a lövedék tömege, v_0 a lövedék kezdősebessége, V_h a lőszerhüvely üres, belső térfogata, V_{cs} a csőfurat térfogata, $V_{hangtompító}$ a hangtompító belső térfogata, φ az univerzális lövegállandó, κ a löporgázok adiabatikus fajhőviszonya, Ω a lőpor tömege, p_{ki} a löporgáz maximum kilépő nyomása a megszabott feltételek mellett.

2. Melléklet

Szimulációk kezdő paramétereinek meghatározása

12,7 x 99 mm NATO (.50 BMG) kaliberű, M33 Ball típusú lőszer, és a SERO GM-6 Lynx ballisztikai tulajdonságai:

$$f = 961\,756 \text{ J/kg} \quad m_l = 0,042 \text{ kg} \quad V_h = 29 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \varphi_0 = 1,15 \quad \kappa = 1,2$$

$$\alpha = 9,54 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg} \quad v_0 = 900 \text{ m/s} \quad V_{cs} = 7,97 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad \Omega = 0,014 \text{ kg}$$

$$Q_e = 4000 \text{ kJ/kg}$$

$$R_{spec} = 260 \text{ J/kg K}$$

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{\Omega}{3 \cdot m_l} = 1,259 \quad (2.0)$$

$$f = (642,2 + 0,07969 \cdot Q_e) \cdot 10^3 \quad (2.1)$$

$$\alpha = (1456 - 0,1251 \cdot Q_e) \cdot 10^{-6} \quad (2.2)$$

Lőporgázok tulajdonságainak számítása a torkolaton való kilépés pillanatában:

$$\rho = \frac{\Omega}{V_h - \Omega \cdot \alpha + V_{cs}} = 146,71 \text{ kg/m}^3 \quad (1.1)$$

$$p = \frac{f \cdot \Omega - \frac{\kappa - 1}{2} \cdot (m_l \cdot \varphi \cdot v_0^2)}{V_h - \Omega \cdot \alpha + V_{cs}} = 95,2 \text{ MPa} \quad (1.2)$$

$$T_{krit} = \frac{p}{\rho \cdot R_{spec}} \cdot \frac{2}{\kappa + 1} = 2268,93 \text{ K} \quad (1.3)$$

$$u_{ki} = \sqrt{\kappa \cdot R_{spec} \cdot T_{krit}} = 841,37 \text{ m/s}$$

Ahol f a lőporgázok „force”-értéke, fajlagos munkavégző képessége a hőveszteségekkel, α a lőpor kovolumen értéke, m_l a lövedék tömege, v_0 a lövedék kezdősebessége, V_h a lőszerhüvel üres, belső térfogata, V_{cs} a csőfurat térfogata, $V_{hangtompító}$ a hangtompító belső térfogata, φ az univerzális lövegállandó, κ a lőporgázok adiabatikus fajhőviszonya, Ω a lőpor tömege, Q_e a lőpor égéshője, R_{spec} a lőporgázok specifikus gázállandója p a lőporgázok sűrűsége, T_{krit} a lőporgázok hőmérséklete, u_{ki} a lőporgázok kilépő sebessége, p pedig a kilépő lőporgázok nyomása.