



**ZRÍNYI MIKLÓS NEMZETVÉDELMI
EGYETEM
BOLYAI JÁNOS KATONAI MŰSZAKI KAR
Katonai Műszaki Doktori Iskola
Alapítva: 2002 évben – Alapító: Prof. Solymosi József DSc.**

Bugyás József

**A kumulatív hatás modellezése és
számítógépes szimulációja végelem
módszer felhasználásával**

Doktori (PhD) Értekezés

**Témavezető: Dr. Sipos Jenő PhD
ny. mk. ezredes
főiskolai tanár**

2010, Budapest

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	4
A TUDOMÁNYOS PROBLÉMA MEGFOGALMAZÁSA	4
A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSEI	7
KUTATÁSI HIPOTÉZISEK	8
KUTATÁSI MÓDSZEREK	8
AZ ÉRTEKEZÉS TERVEZETT FELÉPÍTÉSE	9
A VÁRHATÓ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	9
I. FEJEZET	10
A KÍSÉRLETI ROBBANTÁS FIZIKAI MODELLJE	10
I.1. A fizikai modellezés folyamata	10
I.2. A kísérleti robbantáshoz használt anyagok és azok elrendezése	14
I.3. A diszkrét modell felállításához használt végeelem program	19
I.4. A diszkrét megoldáshoz alkalmazott végeelem program	20
II. FEJEZET	22
A ROBBANÁSI FOLYAMAT MODELLEZÉSE VÉGESELEM MÓDSZERREL, A FELBONTÁS FINOMSÁGÁNAK HATÁSA	22
II.1. A matematikai modellezés folyamata	23
II.2. A robbanás folyamatának matematikai modellje	24
II.2.1. Brizáns robbanóanyagok detonációja	24
II.2.2. Az állandósult sík-hullám hidrodinamika elmélete, a matematikai modell	25
II.2.3. Jones-Wilkins-Lee állapotegyenlet robbanó töltetű	27
II.3. Állandósult robbanás modellezése [41]	27
II.3.1. A „ .bdf” kiterjesztésű állományban szereplő sorok értelmezése	29
II.3.2. A „ .dat” kiterjesztésű állományban szereplő sorok értelmezése.	31
II.4. Eredmények, következtetések	38
II.4.1. Égési folyamat eredményei	38
II.4.2. Nyomás viszonyok elemzése	41
III. FEJEZET	43
A ROBBANÁSI TERMÉKEK TERJEDÉSE A TÖLTET ALAKJÁNAK FÜGGVÉNYÉBEN	43
III.1. A modell kialakítása	43
III.2. Program értelmezése	47
III.3. Eredmények és következtetések	51
IV. FEJEZET	54
A KUMULATÍV HATÁS MODELLEZÉSE	54
IV.1. A kumulatív hatás	54
IV.2. A kumulatív hatás matematikai modellje [46]	58
IV.3. A végeelem modell	63
IV.3.1. Az Euleri háló	64
IV.3.2. A béléskúp	66
IV.3.3. A robbanóanyag	69
IV.4. A jet kialakulása végeelem módszerrel	69

V. FEJEZET	71
A KUMULATÍV SUGÁR BEHATOLÁSA A CÉLTÁRGYBA	71
V.1. A páncél átütés elve	71
V.2. A gyakorlati kísérlet mérési eredményei	74
V.3. Az áthatolás végeelem modellje	76
V.4. A modellezés eredményei	78
A KUTATÓ MUNKA ÖSSZEGZÉSE, TÉZISEK MEGFOGALMAZÁSA	80
AZ ÉRTEKEZÉS AJÁNLÁSAI	82
FELHASZNÁLT IRODALOM	83
AZ ÉRTEKEZÉSBEN HASZNÁLT JELÖLÉSRENDSZER	87
MELLÉKLETEK	89
M1.-1. A béléskép anyagállandói	89
M2.-1. 216 csomópontot és 125 CHEXA elemre hálózott robbanó töltet .bdf kiterjesztésű állománya	92
M2.-2. Nyomás alakok 125 CHEXA elem esetén	97
M2.-3. Nyomás alakok 3375 CHEXA elem esetén	97
M2.-4. Nyomás alakok 27 000 CHEXA elem esetén	98
M2.-5. Nyomás alakok 125 000 CHEXA elem esetén	98
M4.-1. gyak.dat forrás fájl	99
ÁBRÁK JEGYZÉKE	102
TUDOMÁNYOS ÉS PUBLIKÁCIÓS TEVÉKENYSÉGEK JEGYZÉKE	104
TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE	107

BEVEZETÉS

A TUDOMÁNYOS PROBLÉMA MEGFOGALMAZÁSA

Egy termék fejlesztési, korszerűsítési, optimalizálási folyamatának egyik lehetséges útja az olyan számítógépen alapuló tervezési módszerek és rendszerek kiépítése és alkalmazása, amelyek magukba integrálják az elektronikai, optikai és mechanikai tervezés elemeit, illetve képesek a működés közbeni szimulációra. Így a tervezés első lépéseitől kezdve az analízis is alapvető része az integrációnak.

Egy termék egyik legfontosabb alapszintje a költség és ezzel összefüggésben a jövedelmezőség. A mai piac jellemzője a versenyképesség. Ahhoz, hogy egy termék vagy szolgáltatás versenyképes legyen, a gyártónak a legjobb terméket kell előállítania a legalacsonyabb költséggel. Ez a megállapítás a hadiipari beszállítókra is igaz.

Napjaink vevői elvárása a fenti megállapítás mellett az is, hogy az új termék már megépítése előtt is megjeleníthető legyen, valamint fenntartási és karbantartási költsége is alacsony legyen. Minden túlméretezett szerkezeti elem, vagy olyan alkatrész, ami nem szükséges a berendezés működéséhez, a termék összköltségét növeli úgy, mint nyersanyagköltség, előállítási költség, szállítási költség és termékhez kapcsolódó általános rezszi költség. Ezen túlmenően felesleges súly is keletkezik, ami a felhasználást nehezítheti és korlátozhatja. A fenti tényezők indokolják a termékek optimalizálását, akár polgári, akár haditechnikai eszközről van szó.

A Stockholmi Nemzetközi Békekutató Intézet¹ adatai szerint a fegyverkezésre szánt összeg 2009-ben rekord összeget – 1,572 billió dollár – ért el. [1] Napjainkban a terrorizmus elleni globális harc az, ami a fegyverbeszerzésre fordított összeg növelésére ösztönzi az országokat. Ez jól követhető a SIPRI katonai kiadásokat tartalmazó adatbázisából².

A védelmi kiadások jelentős csökkenése az elkövetkező időszakban sem várható, még abban az esetben sem, ha Washington és szövetségesei az Irakban állomásozó erők csökkentése mellett döntenének, hiszen ebben az esetben valószínűleg növelnék az afganisztáni jelenlétet.

¹ Stockholm International Peace Research Institute = SIPRI

² Az adatbázis országonkénti, régiókénti és katonai tömörülésekként is megjeleníti az adatokat

A növekvő kiadások ellenére megfigyelhető bizonyos ésszerűsítés, takarékoság és hatékonyság növelés. Pl. az USA-ban az ötödik generációs repülőgép, az F-22 Raptor fejlesztése, gyártása, valamint a „Jövő Harci Rendszerei” (The Future Combat Systems) megvalósítása lehet a takarékoság „áldozata”. [2]

A világ tendenciáját a magyar Honvédelmi Minisztérium, ill. Magyarország 2009. évi költségvetése nem követi, elsősorban az ország gazdasági állapota miatt. A NATO tagságból eredő kötelezettségeink miatt és a haderő fejlesztési tervnek megfelelően viszont nőnek a védelmi feladatok. A forrás hiányát a szervezet korszerűsítésével, a személyi jellegű kiadások csökkentésével és a működési költségek részarányainak csökkentésével kell pótolni. A rendelkezésre álló erőforrásokat pedig hatékonyan kell felhasználni. Erre utal a 2008. szeptember 29-én kiadott sajtóközlemény is: „Korszerű, takarékos és átlátható a Honvédelmi Minisztérium 2009. évi költségvetésének tervezete. A hangsúlyt a költséghatékonyság növelésére helyeztük”. [3]

A költséghatékonyság és a versenyképesség a két legfontosabb indok, ami a vállalatokat, fejlesztőket arra kényszeríti, hogy a meglévő gyártmányaikat tovább fejlesszék, megújítsák és bátran alkalmazzanak új technológiákat, szoftvereket.

Kutatásom tárgya a kumulatív hatásmechanizmus feltérképezése, számítógépes megjelenítése és az ezen a hatáson alapuló lőfegyverek továbbfejlesztésére alkalmas módszer kialakítása.

A kumulatív hatáson alapul a harckocsik elleni aknák, a páncélozott célok elleni repeszaknagránátok és kazettás lövedékek működése.

A kumulatív gránátok a II. világháborúban terjedtek el. Napjainkban többféle kézi- és nehézlőfegyverek lőszerének, ill. rakétalövedékének robbanófejréseként alkalmazzák.

A tapasztalatok szerint a kumulatív kézi- és puskagránátok 100-120, a 75-100 mm-es gránátok 250-350, a 100-125 mm-es gránátok 400-560, a felülről ható, kazettás töltetek 100-150, a páncéltörő rakéták 500-600, a harckocsi elleni kumulatív aknák 150-200 mm-es vastagságú páncél átütésére képesek. [4]

A kumulatív hatás nagyban függ a bélésanyagtól. A legtöbb fémet már kipróbálták, kivéve azokat, amelyek ritkák, nagyon drágák vagy mérgezőek. Nagyon sok ötvözetet is próbálkoztak. A tapasztalat szerint a legtöbb tiszta fémből készült bélés kúp hatásában felülmúlja az ötvözeteket. Ugyanolyan bélések közül a finomkristályos szerkezetű

anyagok sokkal jobb hatásúak, mint a durvák. Az ezekkel kapcsolatos összefüggések vizsgálata még napjainkban is folyik.

A mostanság alkalmazott töltetek 38-180 mm közötti átmérőjűek. Megfigyelhető, hogy ezen a tartományon az arányos kicsinyítés vagy nagyítás nem alkalmazható. A kisebb töltetekhez sokkal nagyobb pontosságra van szükség, míg a méret növekedésével nehéz biztosítani a bélésanyag egyenletes metallurgiai tulajdonságait. Minden konstrukció gyakorlatilag egyedi, és csak adott méretben működik a tervezett módon. [5]

A végeelem-módszer katonai műszaki alkalmazása sokrétű, a hadiipar szinte teljes spektrumában jelen van. [6] Az egyik kutatott téma, a tüzérségi és harckocsi réz hüvelyek felújítási technológiájának átalakítása, melynek célja az volt, hogy a felújításon átesett gyártmányokban az idő múltával ne tudjon kialakulni repedés. [7] A probléma úgy jelentkezett, hogy a Magyar Honvédségnél használt sárgaréz (SR63) tüzérségi és harckocsi hüvelyek egy részén a kilövést követő bizonyos tárolási idő után a tőhoronyban körbefutó, illetve a paláston tengelyirányba haladó, szemmel jól látható repedések keletkeztek. Metallográfiai vizsgálatok alapján, és a repedésekről készült csiszolatokat vizsgálva megállapítható, hogy azok interkristalin jellegűek, ami egyértelműen a feszültségkorróziós jelenségre utal. A korróziós vizsgálatok azt bizonyították, hogy a hüvelyekben felhalmozódott belső feszültség nem gyártási eredetű, hanem lövéskor keletkezik az anyagban. Ezen állítást végeelem analízissel bizonyítottuk. A 70-es évek első felében a végeelem-módszer alkalmazásának többsége a szerkezeti analízis területén jelentkezett, mivel az eredeti fejlesztés is innen származik. Ez az oka, hogy több mai végeelem program a szerkezeti analízis felé orientálódik.

A végeelem-módszer nemcsak műszaki jellegű problémák megoldására alkalmazható, hanem szélesebb területen is felhasználható, mint az ABV anyagok terjedésének szimulációja. [8], [9]

A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSEI

A Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem Bólyai János Katonai Műszaki Karán folyik a kumulatív hatásmechanizmus vizsgálata. A 2004-ben jóváhagyott vizsgálati terv szerint végrehajtott kísérletek és vizsgálatok megvalósultak. A vizsgálat célja, az ismert elméletek alátámasztása mellett a hatásmechanizmus további feltérképezése különböző típusú lőszerrel segítségével, és a mérési adatok alapján számítógépes szimuláció elvégzése egy alkalmas szoftver segítségével.

A hatásvizsgálattal kapcsolatos elképzelés szerint a vizsgálatokat egymással kapcsolatban lévő, de egymástól függetlenül is elemezhető folyamatokra lehet bontani.

A vizsgálat célja a rendelkezésre álló különböző típusú kumulatív töltetekkel végrehajtott kísérletek és annak eredményeinek feldolgozása. A kísérlet az ismert szerkezetű, töltet mennyiségű és alakú kumulatív töltetek hatását vizsgálja olyan anyagon, amelynek ismert az anyag- és mechanikai jellemzője.

A kutatásom a kumulatív hatásmechanizmuson alapuló eszközökre koncentrálódik. Célja intelligens matematikai szoftverekkel és a véges elem-módszerrel a hatásmechanizmus modellezése, szimuláció elvégzése és az így kapott eredmények összevetése a gyakorlati eredményekkel.

A modell megalkotása a mérnöki tevékenység egyik legfontosabb és egyben a legnehezebb része. A jól megalkotott modellel lehetőség nyílik a robbanási folyamat szimulálására, amely nagymértékben felhasználható lőfegyverek és a hozzájuk tartozó lőszerrel tervezésében, a meglévő eszközök fejlesztésében és korszerűsítésében. A szimuláció elengedhetetlen része a termék optimalizációjának és analízisének is.

A szimuláció és analízis segítségével előzetes adatokhoz juthatunk a termék megbízhatóságáról különböző környezeti viszonyok mellett. Ezen adatok jól hasznosíthatók az élettartam-tervezés és –vizsgálat során. [10]

A tervezési elveknek és céloknak megfelelően olyan számítógépes szimulációs eljárás kidolgozása szükséges, melynek segítségével a kumulatív hatás modellezhető, és annak eredményeként az egyes paraméterek változtatásának hatása vizsgálható, elemezhető.

A kialakítandó számítógépes programrendszer a tervezés-fejlesztésen túlmenően, alkalmas tárgyi diszciplínák oktatására, megkönnyíti az algoritmusok ellenőrzését és az eszköz bevezetését, ezáltal időt lehet megtakarítani.

KUTATÁSI HIPOTÉZISEK

A kutatási téma vizsgálatánál az alábbi hipotéziseket állítottam fel:

1. Matematikai modellt dolgozok ki a kumulatív hatás modellezésére, amely modell a megfelelően kiválasztott program segítségével alkalmas személyi számítógépen, a gyorsan lejátszódó folyamatoknak a valóságot megközelítő körülmények figyelembevételével történő modellezésére.
2. Kialakítok és programozok olyan paramétereket a végeelem-eljárás alkalmazásában, amelyek időben lerövidítik a program futását, de a kapott eredmények az elfogadott tűréshatáron belül vannak, így alkalmasak a kutatási munkára.
3. Be kívánom bizonyítani, hogy a végeelem programmal kapott eredmények és modellek összhangban vannak a gyakorlati, robbantási és mechanikai vizsgálatokkal, a kísérletek eredményeivel. A megfelelően tervezett kísérletekkel bizonyítom, hogy a modell és a számítási eljárás gyakorlati.

KUTATÁSI MÓDSZEREK

Értekezésemben egyaránt alkalmaztam az általános és a különös kutatási módszereket.

A szakirodalom és az interneten hozzáférhető publikációk feldolgozása során az analízis, a szintézis, az indukció és a dedukció módszerét alkalmaztam.

A választott téma jellegéből következik, hogy az előzetes könyvtári kutatómunka során összegyűjtött szakirodalom feldolgozására az analitikus módszerrel került sor, majd a rendszerezést követően szintetizáltam a rendelkezésemre álló ismereteket.

A hipotézisek felállítására a szakmai irodalom alapos megismerése után került sor, melyek igazolását az értekezés során végeztem el.

Végeselem-módszerrel felállítottam a kumulatív hatás modelljét. Elvégeztem a modell értékelését, összehasonlítottam a gyakorlati megfigyelésekkel, elvégeztem a szükséges korrekciókat és finomításokat.

Részt vettem több – az értekezésem témájához kapcsolódó tudományos konferencián. Kutatási eredményeimet rendszeresen publikáltam szakmai kiadványokban és tudományos előadásokon. (Lásd: Publikációs jegyzék)

AZ ÉRTEKEZÉS TERVEZETT FELÉPÍTÉSE

1. Szakirodalmi kutatás feldolgozása, hasonló témák feltárása, megismerése és feldolgozása.
2. A szakirodalmi feldolgozás alapján hipotézisek felállítása.
3. Hipotézisek bizonyítása végeselem-módszer alkalmazásával.
4. A végeselem modell elméleti, illetve gyakorlati ellenőrzése.
5. Új tudományos eredmények megfogalmazása.

A VÁRHATÓ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Egy valós matematikai és végeselem modell felállításával lehetőség nyílik a kumulatív hatáson működő lőszeres és fegyveres működésének megfigyelésére, elemzésére és ez hatékonyan hozzájárulhat a fegyveres korszerűsítéséhez, fejlesztéséhez, illetve új eszköz tervezéséhez. A létrehozott modell szemléletesen mutatja a különböző hatás mechanizmusokat, így ezek az oktatás területén is jól hasznosíthatók.

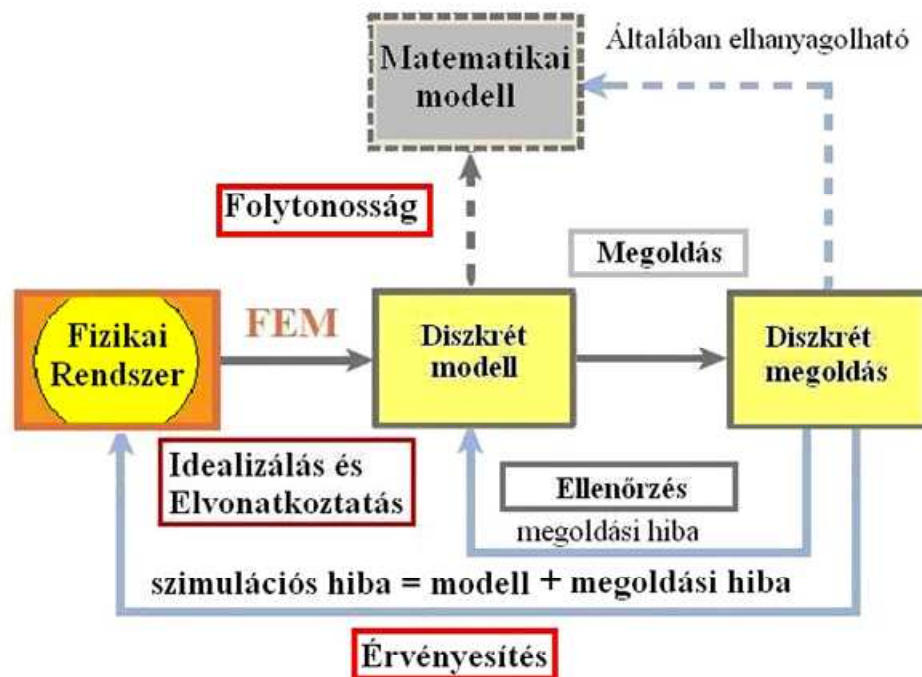
I. FEJEZET

A KÍSÉRLETI ROBBANTÁS FIZIKAI MODELLJE

I.1. A fizikai modellezés folyamata

A mai modern mérnöki gondolkodásmód a rendszerszemléleten alapul. Lényege, hogy a folyamatokat, tevékenységeket összefüggéseikben, a körülményekkel, környezetükkel való kölcsönhatásukban szemléli és jelöli meg a kitűzött cél eléréséhez vezető utat. [11-p.13.]

A valódi rendszerek végtelenül bonyolultak, sokféle hatás lép fel bennük egyidejűleg, ezért a vizsgálatuk során "egyszerűsíteni" kell őket, hogy kezelhetőké váljanak. Ennek az egyszerűsítésnek azonban úgy kell bekövetkeznie, hogy az ily módon elvonatkoztatott, idealizált modell a lényeges tulajdonságokat jól tükrözze, működése jól közelítse a valódiét. [12-p.65.]



I.1-1.ábra. A fizikai FEM modellje [13]

Ezt a folyamatot nevezzük modellezésnek. A modellalkotás tehát a reális valóságból indul ki, amit nevezhetünk probléma felvetésnek is. Az I.1-1. ábrán az úgynevezett fizikai modellezés folyamatát mutatom be. A lényeges tulajdonságokat kiemelve, a kapott ideális elemekből alkotja meg a modellt. A modellezett problémát

végeselem-módszerrel oldja meg, azaz megadja a rendszer viselkedését leíró egyenleteket.

A végeselem-módszer kialakulása

A végeselem nem elvont fogalom, inkább fizikai természetű, ezért különböző formákban már évszázadok óta használják. Az alapelv az volt, hogy egy adott problémát egyszerűbbel helyettesítsünk azért, mert az eredeti feladat vagy nem oldható meg zárt matematikai formában, vagy túl bonyolult, és a megkövetelt pontosság nem igényel nagy pontosságot. Az egyszerűsített vagy idealizált probléma megfogalmazásában szerepet kap a végeselem. Ha az eredeti problémát sikerült egyszerűsíteni, azaz a lényeges tulajdonságait kiemelve a helyes modellt megalkotni, és az egyszerűsített modellel kapott megoldás kielégítő pontossággal visszaadja az igazi megoldást, a végeselem alkalmazása hasznos volt. A végeselem modern formája jóval kifinomultabb, mint amilyenek ezt az ókorban ismerték, de az a módszer, hogy az aktuális problémát egyszerűbbel helyettesítsük, nem változott. [14-p.11.]

A végeselem-módszer ma világszerte az egyik leghatékonyabb numerikus eljárás. Mérnökök, fizikusok, matematikusok és más tudományágak művelői is használják olyan feladatok vizsgálatára, melyeket korábban csak analitikus formában (differenciál vagy integrál-egyenletekkel) tudtak megfogalmazni, és matematikai nehézségek miatt az addig ismert eljárásokkal egyáltalán nem, vagy csak igen durva közelítésekkel tudtak megoldani.

Az eljárás a XX. század második fele tudományának jellegzetes "terméke". Létrejöttéhez elsősorban a mérnöki és a matematikusi gondolkozásmód olyan ötvözetére volt szükség, amire nem volt példa az előző korokban, s még ez sem lett volna elegendő a számítástechnika elképzelhetetlen fejlődése nélkül. A végeselem-módszer minden más eljárásnál szorosabban kötődik a modern számítógépek létehez, és azok fejlődése előreláthatólag tovább segíti a módszer elterjedését és rutinszerű mérnöki alkalmazását.

A végeselem-módszer olyan univerzális számítási modell, amely gyakorlatilag a fizika szinte minden ágában alkalmazható, az esetek többségében minden más módszernél előnyösebben. [15]

A végeselem-módszer lényegi vonása a kettős finitizálás: a vizsgált tartományt véges számú résztartományra osztjuk fel, és az egy elemre vonatkozó vizsgálatot is véges dimenziójú függvénybázisban hajtjuk végre. [16]

A végeselem-módszer megértéséhez szükséges áttekinteni kialakulásának történetét. Ez a módszer együtt fejlődött a matematikával, fizikával és nem utolsósorban a számítástechnikával.

A végeselem, mint módszer, 1960-ban jelent meg Clough [17] egy a sík rugalmasságával foglalkozó tanulmányában. Noha a végeselem-módszer alapjai a 40-es évek alkalmazott matematikájára nyúlnak vissza, a gyökerek a repülőgép tervezésekor felmerült nehézségekből erednek.

Az első probléma, amit meg kellett oldani, hogy minimális súly mellett maximális legyen a biztonság. E kívánalmak kielégítésére a repülőgép-konstruktőrök egyrészt nagy szilárdságú, könnyű ötvözetek kifejlesztését szorgalmazták, másrészt olyan analitikus módszert alakítottak ki, amely a repülőgép szerkezeteknél felmerülő statikus és dinamikus problémák megoldására alkalmas. A rezgési frekvenciák és módusalakok számításához bevezették a mátrixmódszereket.

Újabb nehézséget jelentett, hogy a 1940-es években megjelenő sugárhajtású harci repülőgépek külső formájának kialakításakor tekintetbe kellett venni a megnövekedett repülési sebesség következtében a levegő kompresszibilitását is. A megoldást kereső kutatások vezettek a végeselem-módszerhez.

Az új módszer keresésének első lépései a hagyományos utat követték, ami a rugalmasságtanból fejlődött ki. Azt az általános közelítést használta fel, amely a belső feszültségek számításakor az erők egyensúlyának feltételeiből és az elmozdulások folytonos változásából indul ki. A deformációkat azután egy további számításból nyerhetjük. Ezt a módszert a redundáns erők módszerének, vagy újabban egyszerűen erőmódszernek nevezik.

Ezt a módszert először S. Levy alkalmazta csapott szárnyú repülőgépekre. 1947-ben megjelent cikkében [18] a csapott szárnyat olyan egyszerű szerkezeti elemek összességként vizsgálta, amelyekre az erőmódszer egyenként már alkalmazható volt.

J. H. Argyris és S. Kelsey 1960-ban megjelent [19] munkája a rugalmasságtan energiaelveit és az erőmódszert felhasználva arra is rámutatott, hogy az elmozdulások a szerkezeti probléma kezdeti ismeretlenjeiként sokkal inkább használhatóak, mint az erők. Az ismeretlenek ezen új választása eredményezte a merevségmátrixot.

Az 1950-es évek elején, a delta szárnyszerkezet kapcsán is nehézségek merültek fel. A modellezés során olyan tulajdonságú elemekre volt szükség, amelyekhez a rugalmassági mátrixokat nem sikerült előállítani. Levy a problémát a merevségmátrix segítségével fogalmazta meg. Habár az erőmódszer közelítést csak részben sikerült elkerülnie, mindazonáltal erősen sugalmazta egy más elméleti út keresését. [20]

Ezzel egy időben a Boeing Társaságnál M. J. Turner egy kis csoportot alakított olyan analitikus módszer kidolgozására, amely elég pontosan megadja a szerkezetdinamikai számításokhoz a merevségi adatokat, és emellett olyan analízisbeli eljárást kívánt adni, amely alkalmazható tetszőleges szerkezeti elrendezés esetében is. A háromszög alakú elemekre felírt merevségmátrixnak a feltételezett elmozdulásokon alakuló számítása során megszületett a végeelem fogalmának modern alapja. Az erről szóló cikket [21] tekintik az egyik kulcspontnak a végeelem-módszer kifejlesztésében.

A végeelem-módszer fejlődésének következő nagy lépése a lemezhajlítás problémájának megoldása volt. A hajlítás analízisében lehetséges elemként téglalap és háromszög alakot próbáltak alkalmazni. Téglalap alakú hajlítási elemekkel R. J. Melosh [22], A. Adini és R. W. Clough [23] munkái, míg, a háromszög alakú hajlítás elemmel C. A. Lunder [24], L. L. McMahon [25] és Tocher [26] dolgozatai foglalkoztak.

B. E. Greene, D. R. Strome és R. C. Weikel 1950-es években megjelent cikkében [27] a háromszög alakú lemezelemek egy teljesen más megközelítést találhatjuk. Ez lett az alapja a vékonyháj-problémák első, végeelemek útján történő analízisének.

Ez az elem jelenleg is használatos, miután alkalmas összetett problémák tárgyalására. Ezzel végezhető el a lemezek kihajlásának, rugalmas és képlékeny visszahatásuknak vizsgálata dinamikus terhelések mellett.

Az anyag nemlineáris viselkedése fontos a mérnöki gyakorlatban. A nem rugalmas szerkezeti problémáknak egy megközelítését adta J. L. Swedlow és W. H. Yung. [28] Ez az eljárás az úgynevezett tangens- (érintő-) modulus közelítésen alapuló eljárás.

A kapcsolat a matematika és a végeelem elmélet között megerősödött. Az alapvető elmélet megalkotásának fontos első lépését jelenti C. A. Felippa 1966-ban [29] megjelent cikke. Ez igen széles körű, modern tanulmány volt a végeelemek elméletének alapjairól kétdimenzióban, és az elmélet matematikai megalapozásában a további fejlődés előhírnöke volt. Ezt követték C. A. Felippa és R. W. Clough szerzők

[30] kutatásai a matematikai apparátus kezeléséről és a végeelem-elmélet számítógépes irányairól.

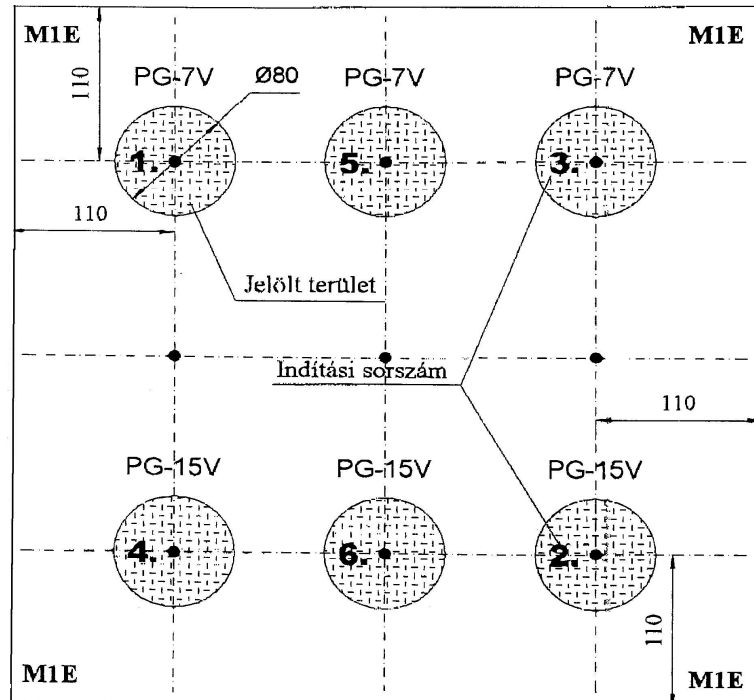
Ahogy a végeelem szerkezeti analízise, mint alkalmazás finomodott, úgy táplálkoztak abból más területek is a 70-es évek végén és a 80-as évek elején. A figyelem a hő és a folyadék felé fordult. Számos tanulmány használta a végeelem-módszert a Navier-Stokes egyenletekhez. [31]

Minden mérnöki terület felhasználhatja a végeelem-módszer analízisének adottságait. Az analitikus technika történetétől kiindulva a legkézenfekvőbb felhasználás a szerkezeti analízis. A polgári és úrkutatással foglalkozó műszaki tudományok nagyon számítanak a végeelem-analízisre a különböző struktúrák elemzésében, az épületektől az űrrepülőgépig. Az analízis magában foglalja a statikus alak- és feszültség állapotok, a saját frekvencia és vibrációs módok meghatározását. A fenti problémákon kívül alkalmazható a szerkezet stabilitás, kifáradás, rázkódás, véletlen vibráció és változó idejű terhelések elemzésére valamint súlyra, erősségre vagy más szempontok szerinti optimalizációra is. [7]

I.2. A kísérleti robbantáshoz használt anyagok és azok elrendezése

A robbantáshoz használt céltárgy

500x500x40-es méretre vágott acéllemezekből 15 darabot egymásra rakva, 60 cm vastag „homogén” páncélt alakítottunk ki, amelyekre a robbanó töltetek merőlegesen helyezkedtek el. [32] Az acél lemezeket azonosító sorszámmal láttam el. A sorszámozás felülről lefelé folyamatosan történt, megjelölve elülső, illetve hátsó oldali jellegét. Az első lemezen bejelölésre került a gránátok elhelyezési helye az IV.2.-1. ábrának megfelelően.

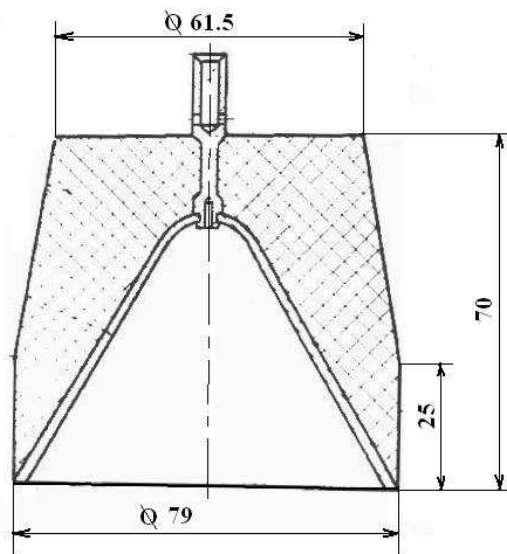


I.2.-1. ábra. Robbanó töltetek elhelyezkedése³

A robbanó töltet

A kísérletsorozatban PG-7V, PG-7VM, PG-15V, 9M14P1 és BP-540-es lőszeret használtam. Dolgozatomban a PG-7V típusú lőszerrel végzett kísérleti eredményekre fókuszáltam. Titokvédelmi okokból az adott típusra adatokat nem kaptam, ezért a modellezéshez és az alapszámítások elvégzéséhez a gránátok szakemberrel történő szétszerelése után egyéni méréseket végeztem. A gránát geometria adatait és alakját a IV.2.-2. ábra mutatja.

³ Az ábra a szerző munkája



I.2.-2. ábra. A gránát főbb méretei

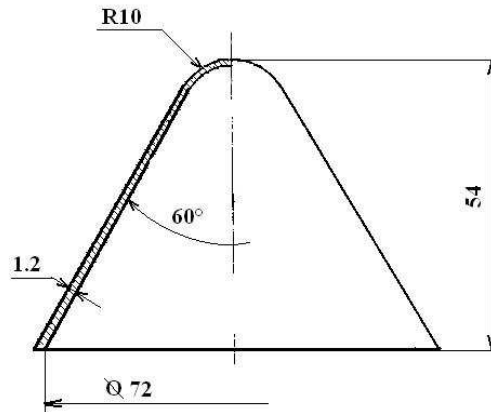
A tömeget OHAUS LS-2000 típusú analitikai mérlegen mértem meg, a térfogat meghatározásához a vízkiszorításos módszert használtam.

Mérési eredmények: A töltet aktív tömege: 3858 gr

A töltet térfogata: 240 cm³

A mért eredmények alapján az aktív töltet sűrűsége: $1,61 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

A robbanásban használt bélésrúp



I.2.-3. ábra. A bélésrúp méretei

Mérési eredmények:

A bélésanyag tömege: 127.6 gr

A bélésanyag térfogata: 14.23 cm³

Sűrűsége: $8.97 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$

A sűrűség alapján, az anyag táblázat szerint, ennek az anyagnak a hidegen megmunkált réz felel meg. [33]

A modellezéshez szükséges anyagállandókat ezen anyagnak megfelelően vettem fel. A jelzett irodalom anyagállandói a M.1-1. mellékletben található.

A robbantás körülményei

A gyakorlati robbantás helyszíne HM TH Lőkísérleti és Vizsgáló Állomásán, Táborfalván volt. A vizsgálat előkészítése során megtervezésre és legyártásra került a lemezeket tartó szerkezet. A lőszer és az acéllemez merőlegességét külön erre a célra kialakított szerkezet biztosítja.

A kísérlet elrendezését a I.2.-4. ábra mutatja.



I.2.-4. ábra. A robbantás gyakorlati elrendezése

A gránát fejet a I.2.-1. ábrának megfelelő robbantási helyre állítottam. A robbantás elvégzése után a lemezköteget szétszereltem úgy, hogy a felső lemeztől haladva az alsó lemezig, minden egyes lemez elülső és hátoldalán az átütési jellemzőket megmértem, és az adatokat folyamatosan dokumentáltam.



I.2.-5. ábra. Helyszíni mérés

A dokumentálást követően a lemezeken elvégezték a szükséges javításokat és pótlásokat, mint sorjátlanítás, egyengetés stb. Ezután a lemezköteget a sorszámzásnak megfelelően ismét összerakattam a következő robbantás végrehajtásához. A dokumentált eredményeket a 4.2.2 pontban ismertetem.

I.3. A diszkrét modell felállításához használt végelem program

A diszkrét modell számítógépes modelljének elkészítéséhez a MSC Patran nevű szoftvert használtam.

A Patran egy professzionális pre- és posztprocesszort magában foglaló, könnyen kezelhető, nyitott MCAE⁴ környezet.

A teljesen menüvezérelt, grafikus felhasználói felületű, könnyen kezelhető MSC Patran az ipar egyik legfejlettebb pre- és posztprocesszási lehetőségét kínálja. A Patran közvetlen hozzáférést biztosít a világ vezető CAD rendszereihez és szabványaihoz.

Az MSC Patran teljes körű kiszolgálásra alkalmas modellezési környezet, amely rendkívül elterjedt. Az MSC Patran lehetőségei a virtuális prototípuskészítés csaknem minden kérdésére választ ad a geometriai modellek előkészítésétől a peremfeltételek megadásán át a hálózason keresztül az eredmények megjelenítéséig.

Összességében az MSC Patran az itt nem említett ezernyi funkció mellett alkalmas:

- CAD adatok importálására STL, STEP, IGES, Parasolid, CATIA, ACIS, UGS, ProE formátumokban,
- NURBS⁵ görbék, felületek és testek definiálására, módosítására és ábrázolására parametrikus, de nem asszociatív módon,
- összetett végelem hálók készítésére parametrikus és Delaunay hálózókkal, különféle transzformációkkal, és az elkészült hálók ellenőrzésére,
- anyagmodellek, perem és kezdeti érték feltételek deklarálására az MD Patranhoz geometriai vagy végelelemes asszociáció alapján,
- a modellezésnél alkalmazott legkülönbözőbb függvények megadására táblázatok vagy formulák segítségével,
- a modellek áttekinthetővé tételére alkalmas hierarchikus halmazok készítésére és a halmazműveletek elvégzésére,

⁴ Mechanical Computer-Aided Engineering

⁵ Non Uniform Bezier Spline

- terhelési esetek és numerikus beállítások, megjegyzések, eredmények rendezett tárolására,
- geometriák és FEM modellek exportjára különféle formátumok szerint,
- eredmények kifinomult megjelenítésére.

A program futtatás eredménye egy „.bdf” kiterjesztésű állomány, amely a modell geometria elrendezését, a végelem hálózat csomópontjait és elemeit tárolja, és egy .dat kiterjesztésű állomány, amely a további feldolgozáshoz szükséges paramétereket és peremfeltételeket tartalmazza.

I.4. A diszkrét megoldáshoz alkalmazott végelem program

Az MSC Dytran egy általános célú explicit végelem szoftver, amely az olyan három-dimenziós, erősen nemlineáris, tranziens dinamikai problémák szimulálására és megoldására alkalmas, amelyek különlegesen nagy szerkezeti alakváltozásokkal, torzulásokkal, vagy szerkezetek és folyadékok közötti kölcsönhatásokkal jellemezhetők. A könnyebb modellezhetőség érdekében a Dytran sajátosságosan ötvözi a végelem módszert és a folyadékok mechanikájának tudományát.

A Dytran explicit FEA megoldó, ennek megfelelően gyorsan lejátszódó tranziens jelenségek Lagrange vagy Euler tartományban történő vizsgálatában hasznos. Ütközés, becsapódás, nemlineáris stabilitásvesztés modellezésére is alkalmazhatjuk. Lehetőség van szilárd testek és folyadékok kölcsönhatásának szimulációjára is. A Dytran számos felhasználási lehetőségei közül kiemelem a konstitutív modelleket, amelyek a legkülönbözőbb anyagtípusokhoz és jelenségekhez, az elasztikustól a hőmérsékletfüggő Johnson-Cook képlékenységi modellekig, a homoktól robbanóanyagokig felhasználhatók és alkalmazhatók.

A „.dat” kiterjesztésű bemeneti állomány MSC Dytran szoftverrel való elemzésekor különböző típusú fájlok generálódnak, amelyeket a I.4.-2. táblázatban foglaltam össze.

I.4.-1. Táblázat**Dytran által generált állományok**

File neve	Állomány típusa	Generált név és kiterjesztés
Input	Bemeneti	file_name.dat
Messages	Üzenet	FILE_SUMMARY.MSG
Output	Kimeneti	file_name.OUT
Archive	Archív	output_file_#.ARC
Time History	Idő történet	output_file_#.THS
Restart	Újra indítás	output_file_#.RST
Warning and Errors	Figyelmeztetések és hibák	ERROR_SUMMARY.MSG
Neutral Input	Semleges kimeneti	file_name.NIF
Job Status	Job státus	JOB.INFO

Az állomány nevek egy része szabadon megválasztható, másik része automatikusan adódik. Ezek a fájlok akkor használhatók, amikor más program hivatkozik rájuk. A tanulmány során a fenti fájlok közül a következőket használtam fel:

INPUT fájl: tartalmazza az összes bemeneti adatot, az analízis futtatásához nélkülözhetetlen. Ez a fájl az előfeldolgozást végző PATRAN program kimeneti állománya.

OUTPUT fájl: nyomtatásra vagy általános szerkesztő programmal megtekinthető alkalmas szöveges állomány. Ez a fájl tartalmazza a Dytran által létrehozott üzeneteket, és a minden időléptékhez tartozó számítások összegzését.

ARCHIVE fájl: az analízis ideje alatt az MSC Dytran tetszőleges számú archív állományt tud létrehozni, amelyek az eredményeket tartalmazzák. Ezek a fájlok binárisak. Teljeskörű leírást adnak az analízis modellek kapcsolataira és geometriájára, valamint a kiírt eredményekre vonatkozóan. Az MSC Patran képes olvasni az archív fájlokat az utófeldolgozáshoz. Az MSC Dytran Explorer is tudja ezeket az állományokat olvasni, és gyors animáció megalkotását is lehetővé teszi.

WARNING AND ERROR fájl: az adat olvasás és az egymást követő adatfeldolgozás során keletkező hibák és figyelmeztetések állománya.

II. FEJEZET

A ROBBANÁSI FOLYAMAT MODELLEZÉSE VÉGESELEM MÓDSZERREL, A FELBONTÁS FINOMSÁGÁNAK HATÁSA

Annak érdekében, hogy az egész fizikai folyamatot élethű módon modellezni tudjuk, kívánatos egy teljesen csatolt módszert alkalmazni, hogy minden részfolyamat egy numerikus modellbe integrálódjon. A gyakorlatban végrehajtott kísérletben számos bonyolult fizikai folyamat zajlik.

Ennek a komplex folyamatnak a kezelésére használható a hagyományos végeelem (FEM) módszer. Az alkalmazása során számos nehézséggel találkozhatunk, különösen a jet áthatolása során, amikor a behatolást követően nagy deformáció lép fel. A nagy alakváltozás a modellezéshez használt hálózat nagy torzulását okozza, ami a számítógép időigényét nagyon megnöveli, eseteként a számolás megszakadását okozza [34-pp.235.-394.]. Sok kutató próbálkozott olyan hibrid módszer alkalmazásával, ami a hagyományos végeelem-módszer és véges különbség módszer előnyeit egyesíti a hálózat torzulás leküzdésére. De ezzel a módszerrel nem könnyű megadni a peremfeltételeket, és nehézkes a háromdimenziós elemzés. A nehézség abból ered, hogy a hálózat egymásra épül. Egyszerre egy háló alkotja az elemeket, vagy a csomópontokat, amelyek a fizikai teret is képviseli, így nem lehet könnyen változtatni.

Ugyancsak nehézséget okoz a vékonyfalú testeken történő jelenségek vizsgálata. Ilyen a jet kialakulásának folyamata. Itt a vékony fal miatt (a többi elemhez viszonyítva) kicsi elem részecskék kellenének, és az időlépték így nagyon kicsi lenne.

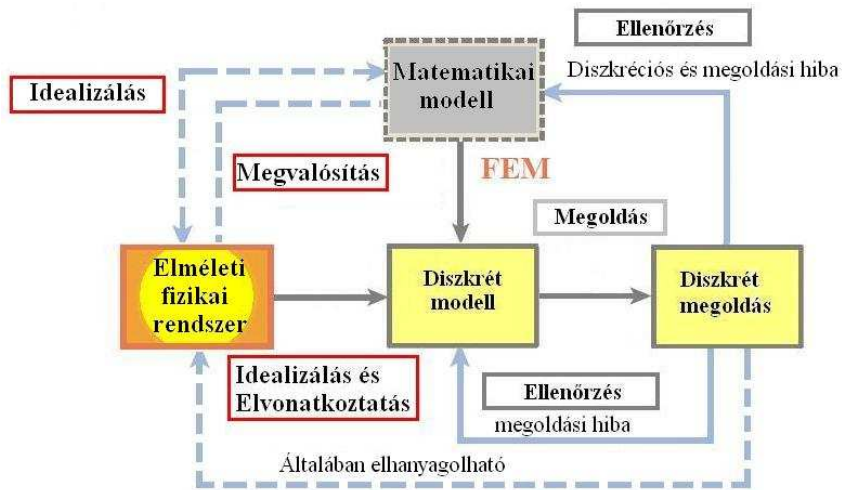
Ezért a végeelem-módszert használva célszerű a folyamatokat részekre bontani. A vizsgált folyamatot három részre bontottam, amelyek külön-külön is elemzésre érdemesek. Ezek a részfolyamatok:

1. A robbanás folyamata
2. A jet kialakulásának folyamata
3. A jet áthatolása szilárd anyagokon keresztül

Célszerű az egyes részfolyamatok végrehajtása és elemzése után kapott eredményeket a következő részfolyamat peremfeltételeként megadni, és a végeredményt ilyen egymásra épülő részfolyamatok összegzéseként értékelni.

II.1. A matematikai modellezés folyamata

A FEM felhasználó módszerek közül a robbanási folyamat modellezéséhez azt a módszert használom fel, amely a matematikát helyezi a középpontba. Ez a módszer a matematikai FEM. A folyamat lépéseit az II.1.-1. ábra mutatja.



II.1.-1 ábra. A matematikai FEM modellje [13]

A folyamat forrása a matematikai modell, amely gyakran egy közönséges vagy parciális differenciálegyenlet a térben és időben. A diszkrét végelem modell a matematikai modell variációs vagy gyenge alakjából származik.

Az ellenőrzés a diszkrét megoldás behelyettesítését jelenti a diszkrét modellbe. Ennek során jelentkező hiba annak mértéke, amennyiben a diszkrét megoldás nem felel meg a diszkrét egyenletnek. Ez a hiba viszonylag jelentéktelen, főként, amikor számítógépet használnak, és különösen a közvetlen lineáris egyenlet megoldási lépései során.

Lényegesebb az ún. diszkréciós hiba, amely annak a mértéke, hogy a diszkrét megoldás mennyire tér el a matematikai modelltől.

Az ideális fizikai rendszerbe történő behelyettesítés elvileg számszerűsíthetné a modellezési hibákat, de a matematikai FEM-ben ezt a behelyettesítést nem végzik el, mivel a valós fizikai rendszer ebben a folyamatban lényegtelen.

II.2. A robbanás folyamatának matematikai modellje

II.2.1. Brizáns robbanóanyagok detonációja

Az emberi társadalom fejlődésében a robbanásnak csak az utóbbi, körülbelül két évszázad alatt jutott jelentős szerep. A robbanóanyagokban rejlő hatalmas energiát széles körben hasznosítják az ipar és a technika különböző területein. Használják többek között ásványi kincsek kitermelésére, építkezésekre és bontásokra, különféle fém-megmunkálási technológiák területén, és természetesen nem elhanyagolható a katonai szerepe, akár csapásmérő eszközként, akár műszaki záruk létesítésére használják.

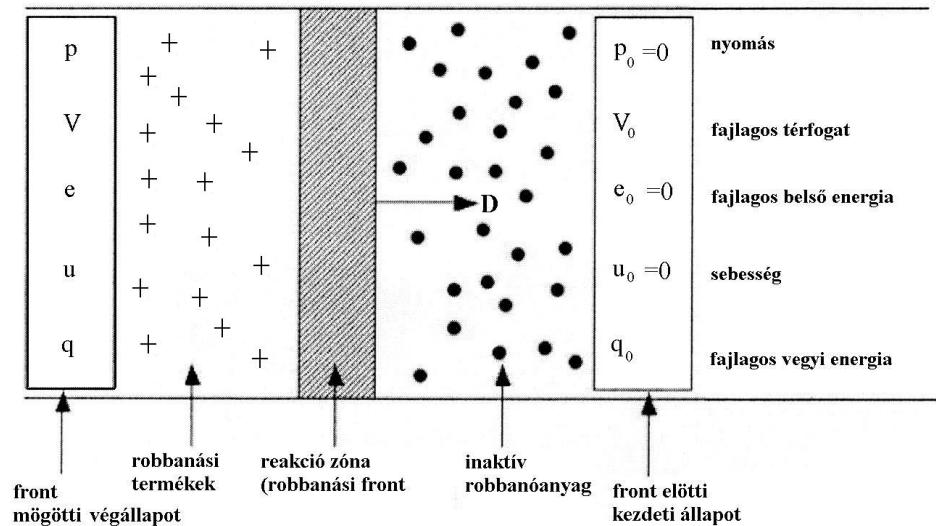
A robbanóanyagok fejlődésében az egyik főszerepet a természettudományok fejlődése, ezen belül is a kémiai ismeretek bővülése jelentette. A természetben található nyersanyagokból nagyhatású robbanóanyag kémiai reakció útján hozható létre. A másik főszerepet pedig az ipar fejlődése jelentette, amely a természetben közvetlenül nem található nyersanyagokat tárt fel.

Tekintettel a robbanási energia nagy költségére, fontos ennek az energiának a hatékony felhasználása akár polgári, akár katonai alkalmazását tekintjük. Ebben segít a számítógépes modellezés és analízis.

A detonáció a robbanóanyagban végmenő rendkívül gyors kémiai reakció, mely detonációs hullám kifejlődésével jár. Az átalakulás során kis térfogatban, rövid idő alatt nagy mennyiségű energia szabadul fel. A detonációs hullámra a nagyon éles és nagy hőmérsékleti- és nyomásgradiens a jellemző. A detonáció során a gáz halmazállapotú égéstermékek és a detonációs hullám azonos irányban haladnak. A kémiai reakció olyan hevesen megy végbe, hogy sebessége egybeesik a robbanóanyagban terjedő mechanikai hullám sebességével, és ennek következtében az energia felszabadulást előidéző kémiai reakció egy keskeny zónában megy végbe. [35] Ez a reakció zóna nagy sebességgel robog át a robbanóanyagon, melynek során átalakítja a szilárd anyagot magas hőmérsékletű, nagy nyomású gázokká. A reakció zóna ekkor a lökéshullámhoz hasonló szakaszos hullám alakú, olyan fizikai tulajdonságokkal, amelyeket kizárólag a hullám mindkét oldalán lévő kiterjedés nélkül, és teljes kölcsönhatásban lévő anyagok tulajdonságai határoznak meg. Ez lehetővé teszi a detonáció hidrodinamikai megközelítésének használatát.

II.2.2. Az állandósult sík-hullám hidrodinamika elmélete, a matematikai modell

A robbanó anyagon konstans „D” sebességgel áthaladó állandósult állapotú reakciózónát megjelenítő sík modelljét a II.2.-1. ábra mutatja.



II.2-1. ábra. Sík reakció zóna állandó sebességű terjedése [36]

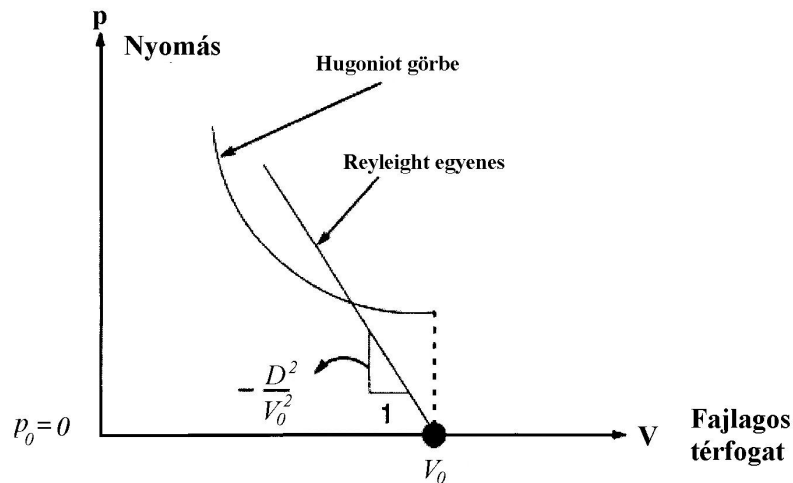
A Rankine-Hugoniot összefüggés, amely kifejezi az impulzus, a tömeg- és energia megmaradást a reakció zónán átfolyó anyagáramlásban, arra használható, hogy megadja a kapcsolatot a hidrodinamikai változók között a reakció zónán át. [36]

A tömeg és impulzus megmaradás:
$$p - p_0 = \frac{D^2}{V_0^2} (V_0 - V) \quad \{\text{II.2.-1.}\}$$

Az energia megmaradás:
$$e - e_0 = \frac{1}{2} (p + p_0) (V_0 - V) + q_0 \quad \{\text{II.2.-2.}\}$$

A {II.2.-1.} egyenlet egy egyenest ír le (Rayleigh egyenes) meghatározva minden olyan lehetséges végállapot (p, V) helyét, amely elérhető a nem folytonos átmeneten át a tömeg és impulzus megmaradással összeférő kezdeti állapotból (p_0, V_0) .

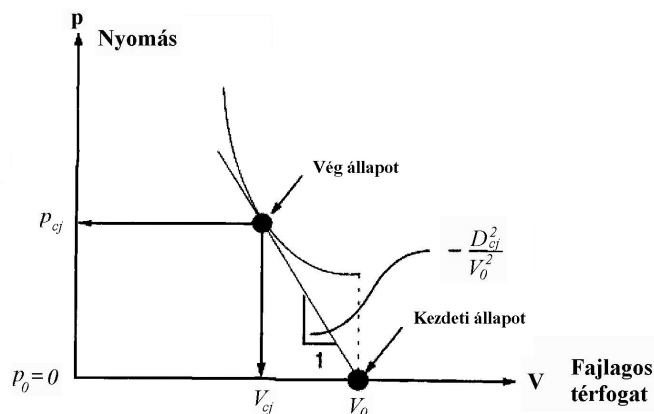
A {II.2.-2.} egyenlet tisztán termodinamikai egyenlet, amelyből az adott robbanási termékre vonatkozó állapot egyenlettel $p=p(V, e)$, az energia szint elhanyagolásával eredményezi a robbanás Hugoniot görbét. A csökkenő konkáv görbe meghatározza az energia egyenlettel összeférő kezdeti állapotból (p_0, V_0) a nem folytonos átmeneten át elérhető minden lehetséges állandósult állapot helyét. (Lásd II.2.-2. ábra)



II.2.-2. ábra Hugoniot görbe és Reyleight egyenes [37]

A Reyleight egyenes és a Hugoniot görbe alakjai olyanok, hogy kölcsönhatásuk megengedi bizonyos D „minimum érték” feletti sebességű detonáció létezését, és minden D érték megegyezik a két lehetséges végállapottal a robbanási termékek tekintetében. Egy további feltétel is szükséges, melyet Chapman és Jouquet adott meg a következő feltétellel a tömeg-, energia és impulzus megmaradáshoz:

A detonáció D sebessége vagy olyan, hogy a Reyleight egyenes érinti a robbanás Hugoniot görbét, vagy olyan minimum értékű, hogy megegyezik a Rankine-Hugoniot összefüggéssel. Ezt a folyamatot mutatja az alábbi, II.2-3. ábra.



II.2-3. ábra Hugoniot görbe és Reyleight egyenes detonáció folyamatban [37]

A fenti megfontolás értelmében, ha az ideális gáz állapot egyenletet (állandó γ fajhő viszonyzámmal) alkalmazzuk a robbanási termék modellezéséhez, az alábbi egyenletek adódnak.

$$p_{cj} = 2(\gamma - 1)q_0\rho_0 \quad \{\text{II.2.-3.}\}$$

$$V_{cj} = \frac{\gamma}{\gamma + 1} V_0 \quad \{\text{II.2.-4.}\}$$

Ezek az összefüggések akkor is alkalmazhatók, amikor a JWL állapot egyenletet (változó γ fajhő viszonyzámmal) használjuk, és a $\gamma_{cj} - t$ a Chapman –Jouquet állapotnál (p_{cj} , V_{cj}) a robbanási front mögött mérjük.

II.2.3. Jones-Wilkens-Lee állapotegyenlet robbanó töltetkez

A Jones-Wilkens-Lee (JWL) állapotegyenlet [38] modellezi azt nyomást, amelyet a vegyi robbanóanyag detonációjából eredő kiterjedés generál. Ezt az egyenletet széles körben használják mérnöki számításokhoz. Az alábbi formában írható fel: [39]

$$p = C_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right) e^{-R_1 v} + C_2 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 v}\right) e^{-R_2 v} + \frac{\omega e}{v} \rho_0 \quad \{\text{II.2.-5}\}$$

ahol v a fajlagos térfogat,

e a fajlagos energia,

ρ_0 a robbanó anyag referencia sűrűsége,

C_1 , C_2 , R_1 , R_2 , ω ismert robbanóanyagok tapasztalati dinamikus tényezői. [40-pp. 2362.-2372.]

II.3. Állandósult robbanás modellezése [41]

A szimuláció célja, hogy az anyag felrobbanását modellezzük, ellenőrizzük a nyomást a robbantási front mögött az elméleti Chapman-Jouquet értékkel szemben, és megfigyeljük a lökő hullámok kialakulását, terjedését.

Az alkalmazott szoftver az ún. „programozott égés” technikáját használja a brizáns anyagok robbanásának modellezéséhez. Ennek a technikának az alapfeltétele, hogy a reakció zóna minden irányban állandó, és a Chapman-Jouquet féle D_{cj} robbanási sebességgel terjed. Amint a reakció zóna eléri, és tovább halad egy elemen, a vegyi energia arányosan fejlődik arra az elemre az „égési idő” alatt. [42]

A diszkrét modell felépítéséhez az I.3. fejezetben ismertetett MCS Patran programot használtam.

Robbanóanyagként 64% RDX és 36% TNT összetételű COMPOSITION B nevű anyagot vettem. Ez az anyag közelíti meg sűrűségét tekintve a kísérleti robbantásban használt robbanóanyagot, és későbbiekben ez az anyag szerepel referenciaként.

A robbanóanyag paramétereit a II.3.-1. táblázatban foglaltam össze.

II.3-1. Táblázat A modellezéshez használt robbanóanyag JWL paramétereit [39]

	C_1 (10^{11} Pa)	C_2 (10^9 Pa)	R_1	R_2	ω	e (MJ kg^{-1})	VOD ($m s^{-1}$)	ρ_0 ($kg m^{-3}$)
COMP.B	5.242	7.678	4.2	1.1	0.34	4.969	8030	1713

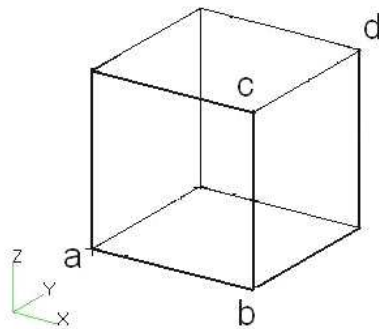
C_1 , C_2 , R_1 , R_2 , ω a robbanó anyag tapasztalati dinamikus tényezői

e a fajlagos energia;

VOD a C-J robbanási sebesség

ρ_0 a robbanó anyag referencia sűrűsége,

A robbanás modellezéséhez létrehoztam egy 15 mm élhosszúságú kocka alakú robbanó anyagot.



II.3.-1. ábra. A robbanó töltet jelölései

Az II.3.-1. ábrán⁶ jelölt csomópontok a vizsgálat elsődleges csomópontjai, mert a további analíziseim a robbanóanyaggal, felülettel érintkező testekre is ki fognak terjedni. Vizsgáltam a jelölt csomópontokban az égés időbeli lefolyását és a nyomás időbeli alakulását, valamint vizsgáltam az 'a-b' pontok közötti csomópontokban, az „ab”, „bc” és „cd” szakaszokon is a nyomás alakulását

egy időpontokban.

A robbanó töltetet négyféle módon osztottam fel az oldalélek mentén. Az osztásköz:

1. esetben 3 [mm] így 216 csomópont és 125 CHEXA típusú elem keletkezett.
2. esetben 1 [mm] így 4096 csomópont és 3375 CHEXA típusú elem keletkezett.

⁶ Az ábra a szerző munkája

3. esetben 0.5 [mm] így 29791 csomópont és 27000 CHEXA típusú elem keletkezett.
4. esetben 0.3 [mm] így 132651 csomópont és 125000 CHEXA típusú elem keletkezett.

Az osztásköz további csökkentése, és ezáltal az elemszám tovább növelését a PC memória kapacitása nem tette lehetővé.

A MSC Patran előfeldolgozó program a fenti változatokat .bdf kiterjesztésű állományokban mentette. Az első eset teljes állománya a M2.-1. mellékletben található.

II.3.1. A „.bdf” kiterjesztésű állományban szereplő sorok értelmezése

A csomópontok definiálása GRID paranccsal történik.

```
GRID,1,, .00000, .00000, .00000
```

Az 1-es azonosítóval ellátott csomópont x,y,z koordinátái.

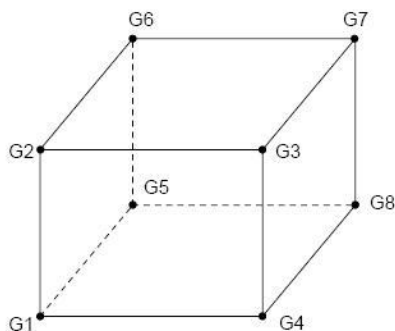
A végelemek meghatározása CHEXA utasítással történik. CHEXA egyben a végelem típusa is. Az elem felépítését és pontjainak elhelyezkedését a II.3.-2. ábrán mutatom be.

Az utasítás felépítése:

CHEXA	EID	PID	G1	G2	G3	G4	G5	G6	+
	Az elem egyedi azonosítója	PEULER utasítás azonosítója							
+	G7	G8							

G1-G8 az elem sarokpontjának GRID azonosítói.

A PEULER utasítás részletes ismertetése később történik, az elem tulajdonságát határozza meg.



II.3.-2. ábra CHEXA elem sarokpont azonosítói

A „CHEXA,1,1,1,2,8,7,37,38,+A000001

+A000001,44,43” parancssor jelentése:

Az egyes sorszámot viselő CHEXA típusú elem olyan tulajdonságú, amelyet az 1-es azonosítóval ellátott PEULER parancsban határozok meg, és az elem helyzetét a 1, 2, 8, 7, 37, 38, 44, 43 sorszámokkal ellátott csomópontok határozzák meg.

A bemutatásra került elem sarokpontjainak koordinátáit a II.3.2. táblázatban foglaltam össze.

II.3.-2. Táblázat		1.CHEXA elem sarokpontjainak koordinátái		
Az elem 4.2.-2. ábra szerinti sarokpontok	GRID azonosítói	.bdf kiterjesztésű állományban meghatározott xyz koordináták		
G1	1	.00000,	.00000,	.00000
G2	2	.0030000,	.00000,	.00000
G3	8	.0030000,	.0030000,	.00000
G4	7	.00000,	.0030000,	.00000
G5	37	.00000,	.00000,	.0030000
G6	38	.0030000,	.00000,	.0030000
G7	44	.0030000,	.00000,	.0030000
G8	43	.00000,	.0030000,	.0030000

Mind a négy vizsgálati esetre a program futtatáskor az alábbi paramétereket, illetve követelményeket használtam:

- a vizsgálat ideje $5 \cdot 10^{-6}$ [sec] (ENDTIME),
- a megjelölt adat típusok $1 \cdot 10^{-7}$ [sec] időközönként íródnak ki (TIMES),

- az analízis minimális és maximális lépésközei $1 \cdot 10^{-8}$ [sec] ill. $1 \cdot 10^{-7}$ [sec] (PARAM,MINSTEP; PARAM,MAXSTEP),
- a robbanó töltet elemeihez hidrodinamikai törvényeket rendeltem. (PEULER,1,1,Hydro),
- a detonáció kiinduló pontja a töltet „a” pontja (0,0,0) koordinátával.

A geometriai elrendezést, a végelem-hálózatot, az anyagtulajdonságokat, a kezdeti feltételeket és az értékeléshez szükséges követelményeket a MSC Patran programban adtam meg, és azokkal futtattam végig. Az MSC Patran program az MSC Dytran részére a következő fejezetben ismertetésre kerülő „.dat” kiterjesztésű fájlt generálta.

II.3.2. A „.dat” kiterjesztésű állományban szereplő sorok értelmezése.

1. CEND
2. ENDTIME=5e-6
3. ENDSTEP=9999999
4. CHECK=NO
5. TITLE= Jobname is: D_1
6. TLOAD=1
7. TIC=1
8. SPC=1
- \$ Output result for request: D1
9. TYPE (D1) = ARCHIVE
10. ELEMENTS (D1) = 1
11. SET 1 = 1 THRU 125
12. ELOUT (D1) = XVEL YVEL ZVEL DENSITY SIE PRESSURE ENERGY FMAT
SSPD FBURN
13. TIMES (D1) = 0 THRU END BY 1e-7
14. SAVE (D1) = 10000
- \$----- Parameter Section -----
15. PARAM,CONTACT,THICK,0.0
16. PARAM,INISTEP,1e-7
17. PARAM,MAXSTEP,1e-7
18. PARAM,MINSTEP,1e-8

```

$----- BULK DATA SECTION -----
19. BEGIN BULK
20. INCLUDE D_1.bdf
$
$ ===== PROPERTY SETS =====
$
$      * HE *
$
21. PEULER,1,1, HYDRO
$
$ ===== MATERIAL DEFINITIONS =====
$
$ ----- Material LAN_comp_B id =1
22. DMAT,1,1717,1
23. EOSJWL,1,5.24229e+011,7.678e+009,4.2,1.1,0.34
$
$ ===== Load Cases =====
$
$ ----- Spherical Detonation Wave: point_1 -----
24. DETSPH,5,1,0,0,0,7980,0
$
$ ----- TICEL BC kezd_energia -----
25. SET1,2,1,THRU,125
26. TICEL,1,2,DENSITY,1717,SIE,4.95e+006
$
27. ENDDATA

```

A program paraméter sorait sorszámokkal láttam el, a könnyebb hivatkozás érdekében. A '\$' jelű sorok csak tájékoztató jellegűek, a programfutásban, illetve értelmezésében nincs szerepük.

1. START: Az elsődleges analízist jelzi. Ebben az esetben elhagyható, mert a program alapértelmezése szerint is ezzel fut.

2. CEND: A vezérlő rész végrehajtásának a végét és az egyedi eset vezérlőrész kezdetét jelöli. A fenti programban vezérlés nem történt, ezért az eset vizsgálat kezdetét jelzi.

A 3. – 5. sorok program utasításai az analízis vezérlésére vonatkoznak.

3. ENDTIME: Meghatározza az analízis befejezésének idejét. Jelen esetben 5 μ s.
4. ENDSTEP: Meghatározza az analízis végének időlépték számát. Az ENDTIME és az ENDSTEP (3. és 4. sor) az a két lehetőség, amellyel megadható az analízis befejezése. Az egyik parancs kiválasztása kötelező. A nem kiválasztott parancs automatikusan nagyon széles tartományúra generálódik. Esetemben, mivel az ENDTIME = $5e^{-6}$ mp értéket választottam, az ENDSTEP parancs paraméterének az értéke automatikusan az ENDSTEP=9999999 értéket vette fel.
5. CHECK: Az adatellenőrzés opció beállítása. Két választás lehetséges: igen, nem (yes, no). „YES” beírásával az adat ellenőrzés végrehajtódik a következő lépések szerint:
- bejövő adatok beolvasása,
 - hiba ellenőrzés,
 - nyomtatott kimenet előállítása,
 - két időlépték lefuttatása,
 - modell adatainak megírása a kimeneti állományba.
- „NO” Az analízis elvégzése az adatok beírása és ellenőrzése után.
6. TITLE: A kimenet megnevezése az elemzéshez. Az itt adott név beíródik az elemzés utáni feldolgozásra alkalmas kimeneti állományba.

A 7.- 9. sorok az adatok szelekciójára vonatkoznak

7. TLOAD: Az alkalmazott tranziens terhelés kiválasztása. TLOAD=1 azt jelenti, hogy a terhelési bemenet száma 1.
8. TIC: A használt tranziens kezdeti feltételek száma utalás a program 27. sorára
9. SPC: Kiválasztja az alkalmazott kényszerek egyedi pontjait, utalás a használt SPC bemenet számaira, jelen esetben SPC=1.

A következő szakasz programsorai a kimenet eredményeinek követelményeit határozzák meg:

10. TYPE: A kimeneti állomány típusa. A használt alkalmazásba a TYPE (D1) = ARCHIVE, jelentése, hogy a „D1” nevű kimeneti állomány archív fájl lesz ('arc' kiterjesztéssel) a meghatározott időlépték eredményeinek tárolására. Jelentősége a posztprocesszálskor van, mert az alkalmazott Patran program képes az ilyen típusú állományok beolvasására és feldolgozására.

11. ELEMENTS: Azokat az elemeket határozza meg, amelyek eredményei egy kimeneti állományba íródnak. Kapcsolódik a következő programsorhoz, ugyanis a ELEMENTS (D1) = 1 azt jelenti, hogy melyik sorszámú SET parancs által meghatározott elemsorozat eredményei kerülnek a kimeneti fájlba.

12. SET 1 = 1 THRU 125: A kimenet számára megkövetelt elemek meghatározása. Az 1. jelű elemtől végig a 125. jelű elemig. Az elemek a „.bdf” kiterjesztésű állományban vannak definiálva.

13. ELOUT: A kimeneti állományba íródó elem eredmények kijelölése.

A „ELOUT (D1) = XVEL YVEL ZVEL DENSITY SIE PRESSURE ENERGY FMAT SSPD FBURN” programsor értelmezése: a D1 kimeneti fájlba a SET1 által meghatározott elemeknek az alábbiakban ismertetett tulajdonságai kerülnek kiírásra:

XVEL = X tengely irányú sebesség

YVEL = Y tengely irányú sebesség

ZVEL = Z tengely irányú sebesség

DENSITY = az 1. anyag sűrűsége

SIE = 1. anyag fajlagos belső energiája

PRESSURE = nyomás

ENERGY = 1. anyag összes energiája (belső+kinetikus)

FMAT = 1. anyag szakadása

SSPD = a hang terjedési sebesség

FBURN = égési részlet

14. TIMES: A kimeneti állományba íródó adatok idejét határozza meg. Beállításomban az adatok mintavételezése 0-tól az analízis végéig 0.1 μ s-onként történik, így összesen 50 időpontban íródnak ki az eredmények a 'D1' állományba.

15. SAVE: Meghatározza, hogy a kimeneti állományhoz bezárási és mentési adatához milyen időközi egység adata íródjon hozzá, vagyis egy kimeneti állomány nagyságát határozza meg.
16. – 19. programsorok „PARAM” parancsok az analízis alatt használt paraméterek meghatározására szolgál.
16. PARAM,CONTACT,THICK,0.0: Az alapértelmezett vastagság beállítása.
17. PARAM,INISTEP,1e-7: Az analízis kezdeti lépéshosszának meghatározása.
18. PARAM,MAXSTEP,1e-7 : A megengedhető legnagyobb időlépték beállítása.
19. PARAM,MINSTEP,1e-8 : A megengedhető legkisebb időlépték beállítása. Ha az analízis során eléri ezt az időléptéket, a program befejeződik, egyébként a program futtatás az ENDTIME vagy ENDSTEP parancsban beállított idő vagy lépésszám után áll meg.
20. BEGIN BULK: A bemeneti állományban jelöli az egyedi eset vezérlés végét és tömegre vonatkozó adatok bevitelének kezdetét.
21. INCLUDE D_1.bdf: A „D_1.bdf” nevű bemeneti adatállomány beolvasását írja elő. Az állomány M2.-1.sz. mellékletben található. Ebben az állományban van definiálva az II.3.-2. ábrán bemutatott modell 1. esetre vonatkozó felosztásának megfelelő 216 csomópontjának (GRID) koordinátái, illetve a 125 elemet egyenként meghatározó azonosító csomópontjai. Amint a jelölt állomány adatai beolvasásra kerültek a program folyamat azonnal visszatér az eredeti fájl „INCLUDE” parancs utáni részéhez.
22. PEULER,1,1, HYDRO: Az Euleri elemek tulajdonsága kerül meghatározásra. Ebben az esetben „HYDRO”, azaz nyíró szilárdság nélküli hidrodinamikusan anyag és légüres tér.
23. DMAT: A „DMAT” egy általános anyag modell, amely nagyfokú rugalmasságot tesz lehetővé az anyag viselkedésének meghatározásában. A DMAT modell alapja az anyag tulajdonságai, amelyek kombinációjából meghatározhatók az állapotegyenlet, nyúlás modell, nyírás modell, tönkremeneteli modell és hasadási modellek. Ezeket külön függvények a saját bemenetükkel határozzák meg. A

DMAT bemeneten az egyetlen definiált paraméter a referencia sűrűség, esetünkben $1717 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$.

A DMAT bemeneten minden típusú anyagviselkedést meg lehet határozni, kezdve a nagyon egyszerű lineáris állapotegyenletű anyagoktól az összetett nyúlási és folyási tulajdonságú, valamint különböző tönkremenetelű anyagokig.

A szükséges bemenet a referencia sűrűség, és az „EOSJWL” parancs (ld. 24. sor), amely az állapotegyenletet határozza meg, így az anyag tömeg viselkedését is. Ez lehet egy algebrai egyenlet, gamma törvényű gáz egyenlet, vagy egy robbanási egyenlet.

A további anyag tulajdonság meghatározások opcionálisak. Ha YLDXXX bemenetre hivatkozunk, a parancs az alábbiak közül egyet választ ki: hidrodinamikusan válasz (nulla nyúlási feszültség), von Mises feltétel, amely bilineáris rugalmasan képlékeny viselkedést nyújt, vagy a Johnson-Cook nyúlási modell, ahol a nyúlás feszültség a képlékeny alakváltozás, az alakváltozási ráta és a hőmérséklet függvénye.

A FAILXXX bemenet utalhat az anyag tönkremeneteli modelljére. Ha nincs a FAILXXX bemenetre utalás, az anyagnak nincs meghibásodása, mint esetünkben is.

24. EOSJWL: Meghatározza a {II.2.-5} állapotegyenlet alkalmazásához szükséges állandókat. Az állandók a II.2-1. táblázatban vannak feltüntetve, ennek megfelelően a programsor: EOSJWL,1,5.24229e+011,7.678e+009,4.2,1.1,0.34, vagyis a COMPOSITION B anyagnak megfelelően:

$$C_1 = 5.24229 \cdot 10^{11} (\text{Pa}); \quad C_2 = 7.678 \cdot 10^9 (\text{Pa}); \quad R_1 = 4.2; \quad R_2 = 1.1; \quad \omega = 0.34$$

Az állapot egyenletben használt további paraméterek a 27. programsorokban adhatóak meg.

25. DETSPH: A gyújtási pont meghatározás, ahonnan a gömbszerű robbanási hullámok indulnak reakciót okozva a brizáns robbanóanyagban. DETSPH,5,1,0,0,0,7980, parancssorban szereplő adatok jelentése: 5 – az egyedi robbantási szám azonosítója. Esetemben egy pont van, a számot a program automatikusan generálta.

1 – a robbanó anyag azonosítója (COMP B), anyagtulajdonságai a 23. és 24. program sorba vannak megadva.

0,0,0 a detonáció kezdőpontjának a koordinátái

7980 – a detonációs hullám sebessége $\left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$

26. SET1: A más bemenetek számára használt elemek meghatározása. Az 1. jelű elemtől végig a 125. jelű elemig. Az elemek a „.bdf „ kiterjesztésű állományban vannak definiálva. A vizsgált esetben ezek az elemek megegyeznek a 12. sorban definiált, kimeneti állomány számára előírt elemekkel.

27. TICEL: Tranziens kezdeti feltételek megadása az elemek számára. Az állapotegyenlet hiányzó paramétereinek megadása. A program sor értelmezése, hogy az előző 26. sorban meghatározott elemek sűrűsége: (DENSITY) $1717 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

belső energiája: (SIE) $4.95 \cdot 10^6 \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right)$

28. ENDDATA: Bemeneti adatok végét jelöli.

Ez a forrásprogram mind a négy vizsgálati esetben azonos. Eltérés a „.bdf ” kiterjesztésű fájlban van, ahol a felosztásnak megfelelően más csomópontok és elemek szerepelnek. Ennek megfelelően azok a program sorok is különbözőek, amelyek az elemekre, illetve a kimeneti állományra vonatkoznak. Az eltéréseket az alábbi II.3.-3.sz. táblázatban foglaltam össze.

II.3.-3. Táblázat Az osztásváltózással járó programsor változatok

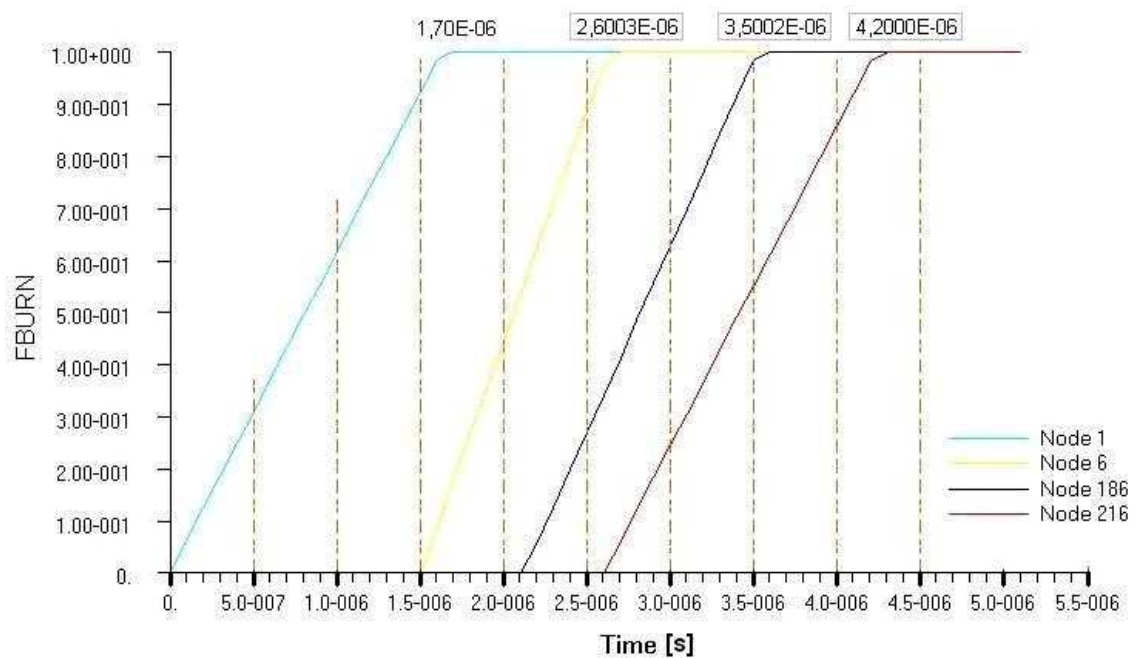
Programsor száma és az utasítás neve	Érték			
	V1	V2	V3	V4
6.TITLE = Jobname is:	D_1	D_2	D_3	D_5
12. SET 1 =	1 THRU 125	1 THRU 3375	1 THRU 27000	1 THRU 125000
21.INCLUDE	D_1.bdf	D_2.bdf	D_3.bdf	D_5.bdf
26. SET1	2, 1,THRU, 125	2, 1 THRU, 3375	2, 1, THRU, 27000	2, 1,THRU, 125000

II.4. Eredmények, következtetések

II.4.1. Égési folyamat eredményei

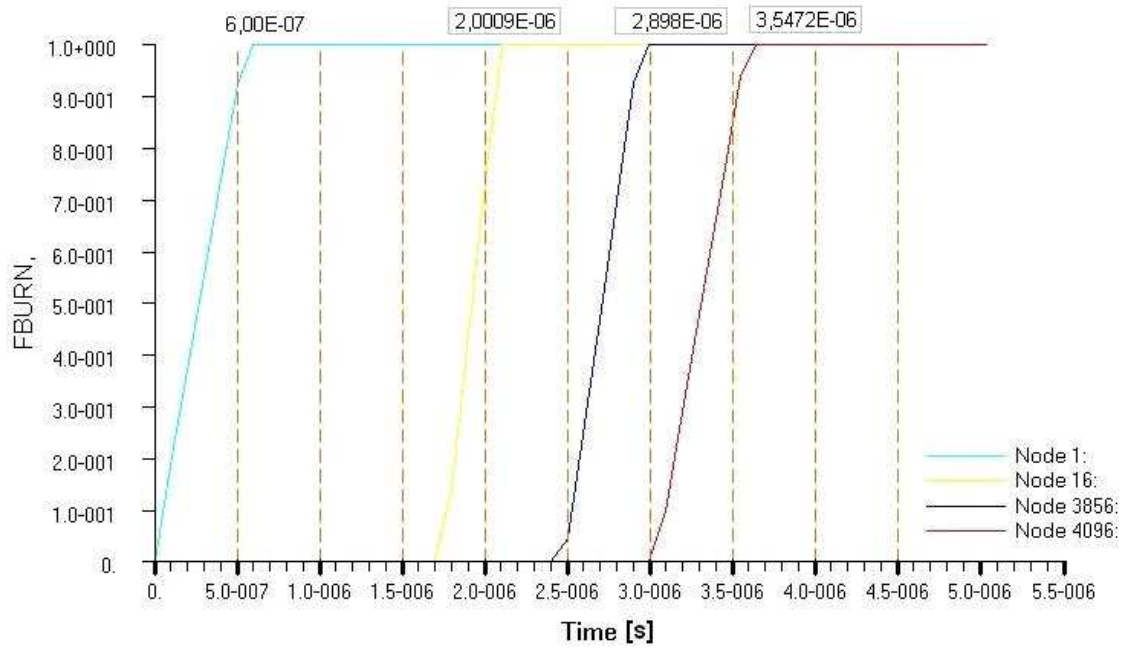
A diszkrét modell elkészítése után az MSC Dytran programmal elvégeztem a diszkrét modell megoldását. Az eredmény „.arc” kiterjesztésű állományban jelent meg. Az eredmények megjelenítésére, a szimuláció és analízis elvégzésére újból az MSC Patran programot használtam.

Az égési folyamatot bemutató ábrák⁷:

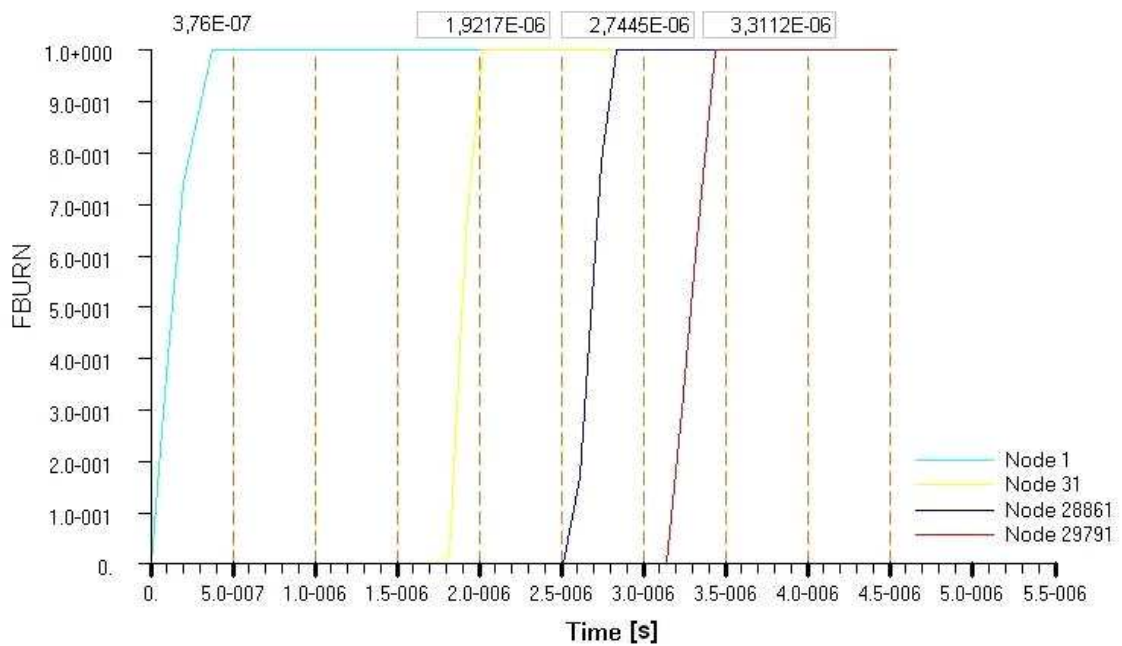


II.4.-1. ábra. Kiemelt csomópontok égési folyamata 125 CHEXA elem esetén

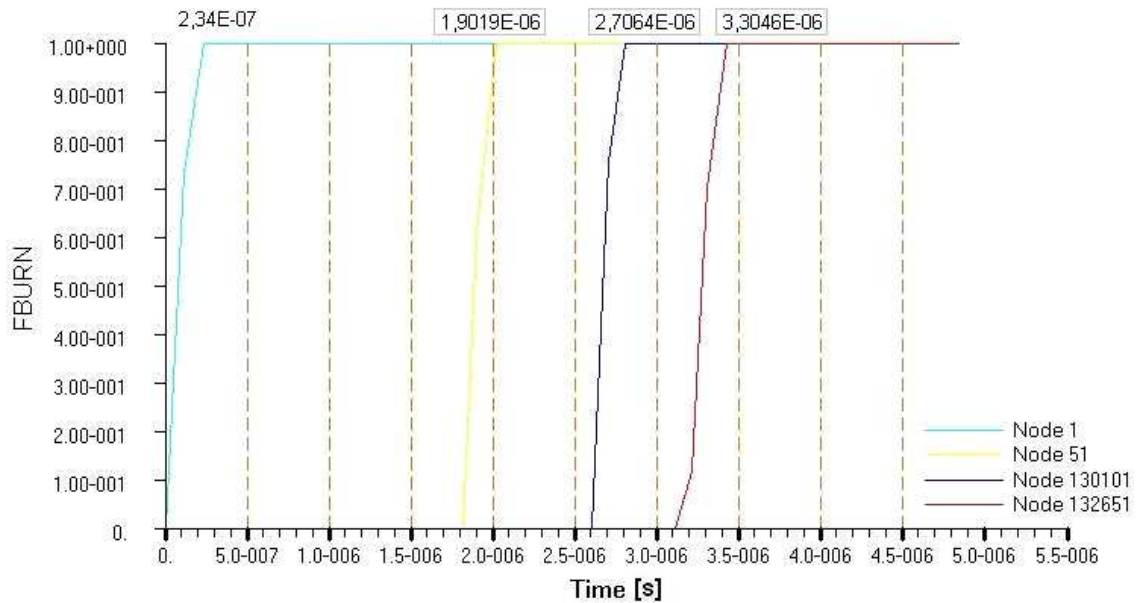
⁷ A II.4.-1.-től a II.4.-5.-ig és a M2.-2-től M2.-5-ig számozott ábrák a szerző munkái



II.4.-2. ábra. Kiemelt csomópontok égési folyamata 3375 CHEXA elem esetén



II.4.-3. ábra. Kiemelt csomópontok égési folyamata 27000 CHEXA elem esetén



II.4.-4. ábra. Kiemelt csomópontok égési folyamata 125 000 CHEXA elem esetén

A kapott adatokból az égési sebességek alakulását vizsgáltam és hasonlítottam össze az elméleti $8030 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$ –es sebességgel.

Az adatokat és a belőlük nyert eredményeket a II.1.-1. táblázatban foglaltam össze.

II.4.-1. Táblázat Égési sebességek

		a-b távolság	a-c távolság	a-d távolság
		0.015[m]	0.0212132[m]	0.0259807[m]
1.eset	A teljes égéshez szükséges idő [10^{-6} s]	2,600280	3,500219	4,200000
	Égési sebesség [m/s]	5768,610359	6060,535819	6185,895594
	Referenciához viszonyítva [%]	71,83	75,46	77,03
2.eset	A teljes égéshez szükséges idő [10^{-6} s]	2,000885	2,897841	3,547241
	Égési sebesség [m/s]	7496,682397	7320,346986	7324,217622
	Referenciához viszonyítva [%]	93,34	91,16	91,21
3.eset	A teljes égéshez szükséges idő [10^{-6} s]	1,921741	2,744498	3,311228
	Égési sebesség [m/s]	7805,421096	7729,355126	7846,261034
	Referenciához viszonyítva [%]	97,19	96,25	97,71
4.eset	A teljes égéshez szükséges idő [10^{-6} s]	1,901888	2,706447	3,304630
	Égési sebesség [m/s]	7886,898639	7838,026208	7861,927456
	Referenciához viszonyítva [%]	98,22	98,21	97,89

Az eredmények elemzéséből az alábbi következtetéseket vontam le:

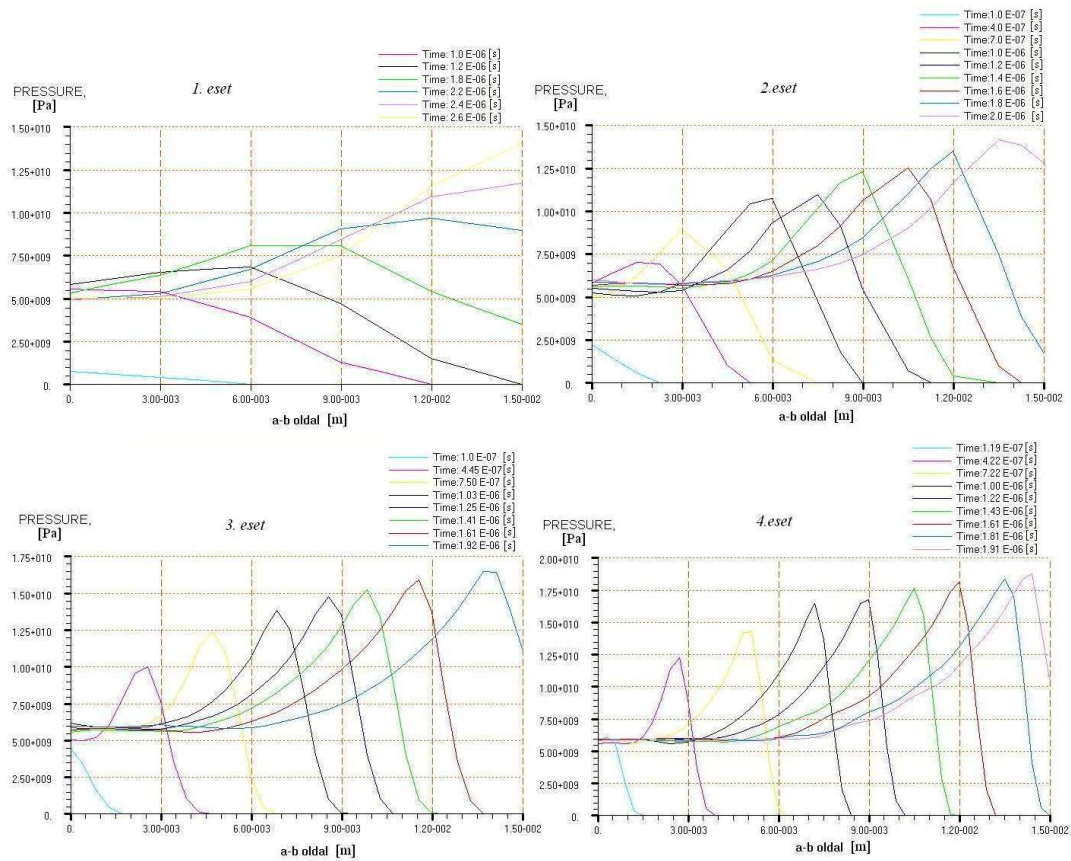
1. A kiválasztott program a beállított paraméterekkel alkalmas a folyamat személyi számítógépen történő bemutatására és elemzésére.
2. A végeelem hálózat finomításával jól megközelíthető az elméleti érték. Az első és a második eset összehasonlításából jól látszik, hogy az osztásköz harmadolásával több, mint 20 %-os pontosság javulást értem el.
3. Meghatározható az a hálózat finomsági fokozat, amely lehetővé teszi a tudományos vizsgálatot, amely elegendő pontosságú, és személyi számítógépen is alkalmazható.

II.4.2. Nyomás viszonyok elemzése

A vizsgálatot az 'a-b' oldal mentén vizsgáltam. A II.4.-5. ábrán összetettem a különböző felosztású esetek grafikonjait. Az eredeti képek az [M2.-1], [M2.-2], [M2.-3], [M2.-4] mellékletben találhatóak. Az összetett képen a nyomás viszonyok jobban összehasonlíthatók. Megállapítottam, hogy az elemszámok növelésével tisztulnak az állandósult sík hullámok csúcs profiljai, és az értékek is közelítik az elméleti értéket. Az állandósult állapotú sík robbanás hidrodinamika elméletéből következik, hogy ez a nyomás érték a {II.2.-3.}képlettel számítható.

$$p_{cj} = 2(\gamma_{cj} - 1)q_0\rho_0$$

Esetünkben $\gamma_{cj} = 2,76$ – el [36.– p.40.] számolva $p_{cj} = 2.991 \cdot 10^{10}$ Pa adódik.



II.4.-5. ábra. Nyomáscsúcs alakok

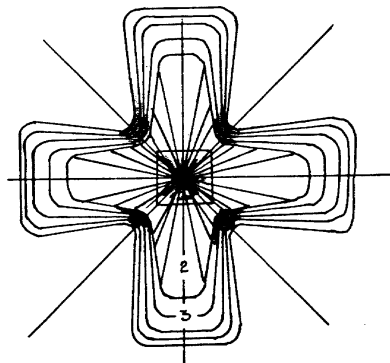
Az elemzés adathalmazából a 3. és 4. eset érdemes közlésre. A 3. esetben, amikor a csúcs nyomás 30 elemen megy keresztül a program $1,84 \cdot 10^{10}$ Pa értéket számít, ami az elméleti érték 56%-a, a negyedik esetben, 50 elem esetében $1,64 \cdot 10^{10}$ Pa, az elméleti érték 64%-a adódik. Szakirodalmi kutatások szerint az elméleti érték 85%-hoz minimum 60 elem szükséges. Ezt az elvégzett szimuláció is igazolja.

III. FEJEZET

A ROBBANÁSI TERMÉKEK TERJEDÉSE A TÖLTET ALAKJÁNAK FÜGGVÉNYÉBEN

A robbanóanyagokból képzett töltetek robbanása során felszabaduló energia jelentős része elvész a környező közegben. [43] A hatás nemcsak a felrobbantandó objektumra fejtődik ki, hanem a töltet alakjától függően a környezetre is.

Egy kocka alakú összpontosított töltet robbanásakor kereszt formájú (III.-1.ábra) robbanási termék és lökőhullám alakzat alakul ki. A legintenzívebben és a távolodás arányában a legkisebb csökkenéssel az oldalakra merőlegesen történik, ugyanakkor a sarkok felé közeledve az intenzitás jelentősen csökken. Ezt a jelenséget a végeelem módszerrel meg tudtam jeleníteni. Ez a példa is mutatja a robbanási energia irányíthatóságát.



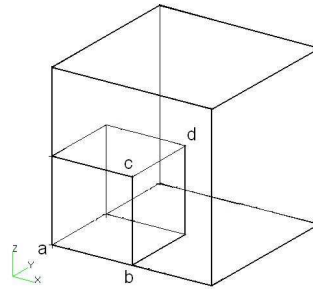
III.-1. ábra. [43]

Robbanási termékek és a lökőhullám kialakulása
1 - töltet; 2 - robbanási termék; 3 - lökőhullám

III.1. A modell kialakítása

A robbanás modellezéséhez létrehoztam egy 30 mm hosszúságú kocka alakú „légüres teret”, amelyet 1 mm-es osztásközzel behálóztam. Így a vizsgálathoz létrejött egy 27 000 chexa típusú elemből és 29 791 csomópontból álló hálózat. E „légüres tér” egyik sarkába helyeztem el a 15 mm élhosszúságú, szintén kocka alakú robbanó anyagot. (III.1.-1. ábra)

A III.1.-1. ábra „a” pontjába tettem a robbanás kezdőpontját. Az elrendezésből következik, hogy a vizsgálat a teljes töltet nyolcadára terjed ki. A szimmetria miatt ez a vizsgálat elegendő. Mivel csak a nyomásviszony alakulását, illetve jellegét mutatom be, a robbanó töltet anyaga, amely azonos az I.3. fejezetben használt Composition B–vel, és a végelem hálózat finomsága, amely a nyomásértékekre van hatással, valójában lényegtelen.



III.1.-1. ábra. A robbanótöltet elhelyezkedése a légüres térben⁸

A diszkrét modell megalkotásához az I. fejezetben ismertetett MSC Patran programot használtam. A generált „.dat” kiterjesztésű fájl a következő:

1. START
2. CEND
3. ENDTIME=6.3e-6
4. ENDSTEP=9999999
5. CHECK=NO
6. TITLE= Jobname is: JWL_kocka_Ap
7. TLOAD=1
8. TIC=1
9. SPC=1
- \$ Output result for request: eul-expl
10. TYPE (eul-expl) = ARCHIVE
11. ELEMENTS (eul-expl) = 1
12. SET 1 = 1 THRU 27000
13. ELOUT (eul-expl) = XVEL YVEL ZVEL DENSITY SIE PRESSURE ENERGY
FMAT FBURN
14. TIMES (eul-expl) = 0 THRU END BY 2e-7

⁸ Az ábra a szerző munkája

```

15. SAVE (eul-expl) = 10000
    $----- Parameter Section -----
16. PARAM,INISTEP,2e-11
17. PARAM,MINSTEP,2e-12
18. PARAM,VELMAX,25000
    $----- BULK DATA SECTION -----
19. BEGIN BULK
20. INCLUDE JWL_kocka_Ap.bdf
    $
    $ ===== PROPERTY SETS =====
    $      * euler *
    $
21. PEULER1,1,, HYDRO,35
    $
    $      * pdummy *
    $
22. PSHELL1,2,, DUMMY
    $
    $ ===== MATERIAL DEFINITIONS =====
    $
    $ ----- Material explosive id =1
23. DMAT,1,1712,1
24. EOSJWL,1,5.242e+011,7.678e+009,4.2,1.1,0.34
    $
    $ ===== Load Cases =====
    $
    $ ----- TICVAL BC ticval_expl -----
25. TICVAL,32,,DENSITY,1712,SIE,4.969e+006
    $
    $ ----- Spherical Detonation Wave: detsph -----
26. DETSPH,34,1,0,0,0,7980,0
    $
    $ ----- TICEUL BC ticeul -----

```

27. TICEUL,35,,,,,,+A000001

+A000001,ELEM,2,,,1,,,+A000002

+A000002,SURF,26,1,32,2,,,

28. SET1,2,26576,THRU,27000,25995,THRU,26575,25414,+A000003

+A000003,THRU,25994,24833,THRU,25413,24252,THRU,24832,+A00
0004

+A000004,23671,THRU,24251,23090,THRU,23670,22509,THRU,+A00
0005

+A000005,23089,21928,THRU,22508,21347,THRU,21927,20766,+A00
0006

+A000006,THRU,21346,20185,THRU,20765,19604,THRU,20184,+A00
0007

+A000007,19023,THRU,19603,18442,THRU,19022,17861,THRU,+A00
0008

+A000008,18441,17280,THRU,17860,16699,THRU,17279,16118,+A00
0009

+A000009,THRU,16698,15537,THRU,16117,14956,THRU,15536,+A00
0010

+A000010,14375,THRU,14955,13794,THRU,14374,13213,THRU,+A00
0011

+A000011,13793,12632,THRU,13212,12051,THRU,12631,11470,+A00
0012

+A000012,THRU,12050,10889,THRU,11469,10308,THRU,10888,+A00
0013

+A000013,9727,THRU,10307,9146,THRU,9726,8565,THRU,+A000014

+A000014,9145,7984,THRU,8564,7403,THRU,7983,6822,+A000015

+A000015,THRU,7402,6241,THRU,6821,5660,THRU,6240,+A000016

+A000016,5079,THRU,5659,4498,THRU,5078,3917,THRU,+A000017

+A000017,4497,3336,THRU,3916,2755,THRU,3335,2174,+A000018

+A000018,THRU,2754,1593,THRU,2173,1012,THRU,1592,+A000019

+A000019,431,THRU,1011,1,THRU,430

\$

\$ ----- Shape/Surface kiskocka -----

29. MATINI,26,1,INSIDE,ON,ON

\$

30. SURFACE,1,,ELEM,3

31. SET1,3,27001,THRU,27150

\$

32. ENDDATA

III.2. Program értelmezése

A II.3.2. fejezetben ismertetett forrásprogram parancssorai közül csak azokat részletezem, amelyek a megváltozott vizsgálati körülmények miatt módosulnak, illetve új elemként jelentkeznek.

3. ENDTIME=6.3e-6: Az analízis befejezésének idejét megnöveltem, hogy a robbanás hatása a légüres térben is kimutatható legyen.

12. SET 1 = 1 THRU 27000: A kimeneti állomány számára megkövetelt elemek száma megnövekedett.

14. TIMES (eul-expl) = 0 THRU END BY 2e-7: Az „eul-expl.arc” kimeneti fájlba íródó adatok időléptékét megnöveltem az előző érték kétszeresére. Ennek egyrészt az a magyarázata, hogy a megnövekedett elemszám miatt a program futás ideje ne növekedjen jelentősen, másrészt ebben a fejezetben a lökő hullám terjedési alakja a vizsgálat tárgya, így az eredmények pontos értéke releváns.

18. PARAM,VELMAX,25000: Az Euleri közegben megengedett maximális sebesség beállítása. Célja az analízis futási idejének korlátok között tartása, illetve a program túlcsoordulásának megakadályozása.

21. PEULER1,1,, HYDRO,35: Euleri elemek tulajdonságainak meghatározása, „HYDRO”, azaz nyírószilárdság nélküli hidrodinamikus anyag és légüres tér. Ezeknek az elemeknek a kezdeti feltételei a geometriai szakaszban vannak meghatározva. 35 utal a program 27. sorában megjelenő TICEUL parancsra.

22. PSHELL1,2,, DUMMY Héj elemek tulajdonságainak meghatározása, DUMMY, azaz üres, látszólagos.

25. TICVAL: Egy Euleri geometriai szakaszra vonatkozó kezdeti értékek meghatározása. A program sor értelmezése, hogy az előző 24. sorban meghatározott elemek sűrűsége: (DENSITY) $1717 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$;

belső energiája: (SIE) $4.95 \cdot 10^6 \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right)$.

27. TICEUL: Az Euleri tartomány számára beállított kezdeti értékek meghatározása. Az Euleri tartományok geometriai alakokkal vannak meghatározva. A „TICEUL,35,,,,,,+A000001
+A000001,ELEM,2,,,1,,,+A000002
+A000002,SURF,26,1,32,2,,,”

A program sor értelmezése: 35 - A parancs egyedi azonosítója, a program 21. sora erre a számra hivatkozik; ELEM,2,,,1 - A tartomány elemenkénti felsorolása. Az elemek a 2-es azonosítóval ellátott SET1 parancsban vannak. (Ld. program 28. sora) A parancssor végén található 1-es ennek az anyagnak és a kezdeti feltételnek szint jelzése.

SURF,26,1,32,2,, - Belső tartományt jelöl a régió belül, ez a tartomány a MATINI26 (program 29. sora) utasítással van megadva. 1 – A „DMAT” egyedi azonosítója (23. sor), 32 – TICVAL egyedi azonosítója (25. sor), 2 – szint indikátor.

28. SET1,2: 2-es egyedi azonosítóval ellátott tartomány kijelölése. A „JWL_kocka_Ap.bdf” fájlban meghatározott elemek, gyakorlatilag a 9. ábrán bemutatott nagy kocka elemei.

29. MATINI: Annak a felületnek a meghatározására szolgál, amelyet az Euleri tér egy tartományának a felhasználó által meghatározott indulási állapot beállítására szolgál.

MATINI,26,1,INSIDE,ON,ON jelentése: 26 – az utasítás egyedi azonosítója, erre hivatkozik a TICEUL SURF,26,1,32,2,, (27. programsor); 1 – SURFACE utasítás azonosítója, amely meghatározza a kezdő felületet, INSIDE – A kezdeti felülettel bezárt Euleri elemeknek az a része, amelyek felülethez tartozó indulási állapotot fogják kapni. ON – Ha szükséges a MATINI felület elemeinek normális vektorai automatikusan megfordulnak, hogy mindegyik pont

ugyanabba a fő irányba nézzen, és a bezárt térfogat pozitív legyen.

ON – Az előző követelmény ellenőrzésének bekapcsolása.

30. SURFACE,1,,ELEM,3: Az utasítás jelentése: Az 1-es azonosítóval ellátott SURFACE parancs meghatározza a 3-as azonosítóval ellátott SET1 parancs (31.sor) által meghatározott elemeket.

31. SET1,3,27001,THRU,27150

A III.1. fejezetben ismertetett modell kialakításnak megfelelő geometriát leíró elrendezés „.bdf” kiterjesztésű állományban van rögzítve. A végeelem hálózat kialakításával 29 943 csomópont jött létre és 27 150 elem, amelyek közül 27 000 CHEXA típusú, a programsor 21. sorában definiált tulajdonságokkal, és 150 CQUAD4 típusú shell elem, a programsor 22. sorában meghatározott tulajdonságokkal.

A CQUAD4 típusú elemek felépítése, csomópontjainak elrendezése és megnevezése a III.2.-1. ábrán láthatók.

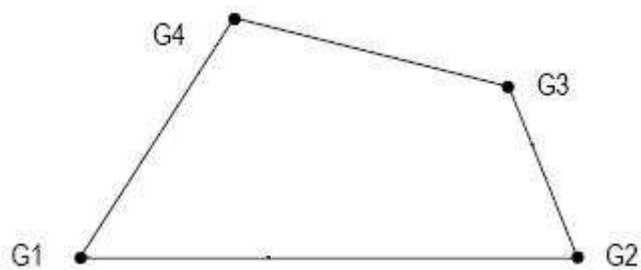
A CQUAD4 típusú elemek parancssorának értelmezése:

CQUAD4	EID	PID	G1	G2	G3	G4	THETA	+	
	Az elem egyedi azonosítója	PSHELL1 parancs azonosítója	A csomópontok azonosítói				GRID		
+			T1	T2	T3	T4			

THETA, T1, T2, T3, T4 cellák ebben az esetben nincsenek értelmezve, mert ezek inhomogén anyagtulajdonságú és változó vastagságú héjelem esetén használandók.

A „CQUAD4 ,27001,2,29792,29793,29799,29798” parancssor értelmezése:

A 27001 egyedi azonosítóval ellátott elem a 2-es tulajdonságú és csomópontjainak azonosítói az alábbi ábra szerinti sorrendben vannak meghatározva.

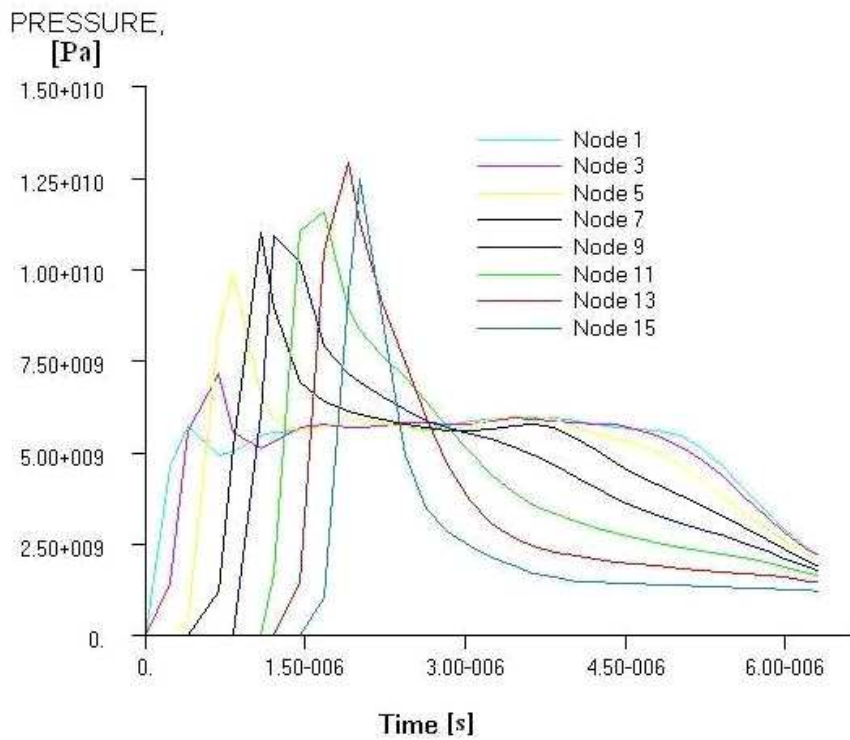


III.2-1. ábra. CQUAD4 típusú elem csomópontjainak értelmezése

Ábra szerinti sarokpont	III.2.-1 Táblázat GRID azonosító	A27001 –es CQUAD4 elem koordinátái „.bdf” állományban meghatározott koordináták
G1	29792	.00000, .00000, .00000
G2	29793	.00000, .0030000, .00000
G3	29799	.0030000, .0030000, .00000
G4	29798	.00000, .00000, .0030000

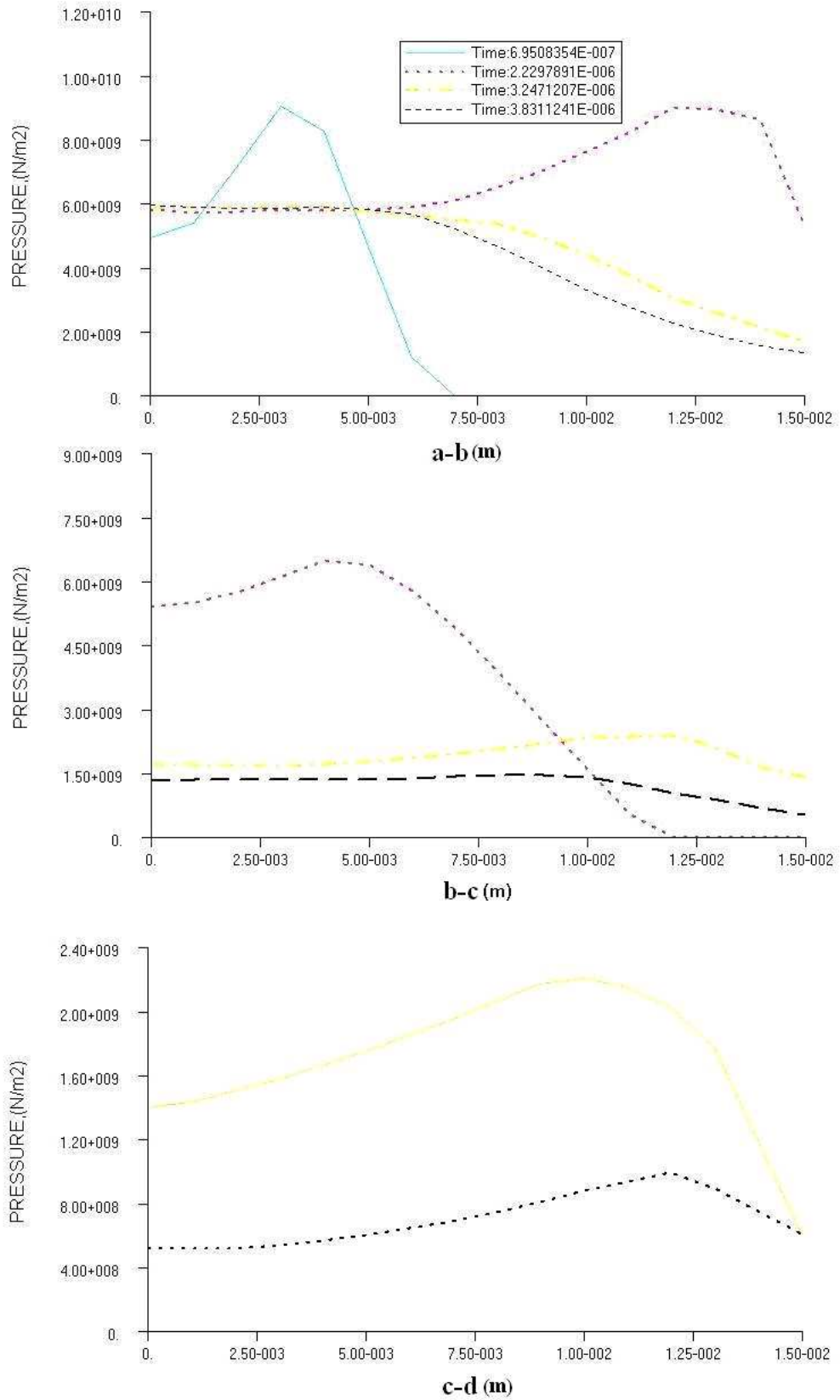
A III.1.-1. ábrán jelölt „b”, „c”, „d” csomópontok a vizsgálat elsődleges csomópontjai, mert a további analíziseinkben ezek más felületekkel is érintkező pontjai lesznek. Vizsgáltam a nyomás időbeli alakulását az „a-b” pontok közötti csomópontokban, az „ab”, „bc” és „cd” szakaszokon, illetve a nyomás alakulását egyes időpontokban a III.1.-1. ábrán jelölt csomópontokban is.

III.3. Eredmények és következtetések

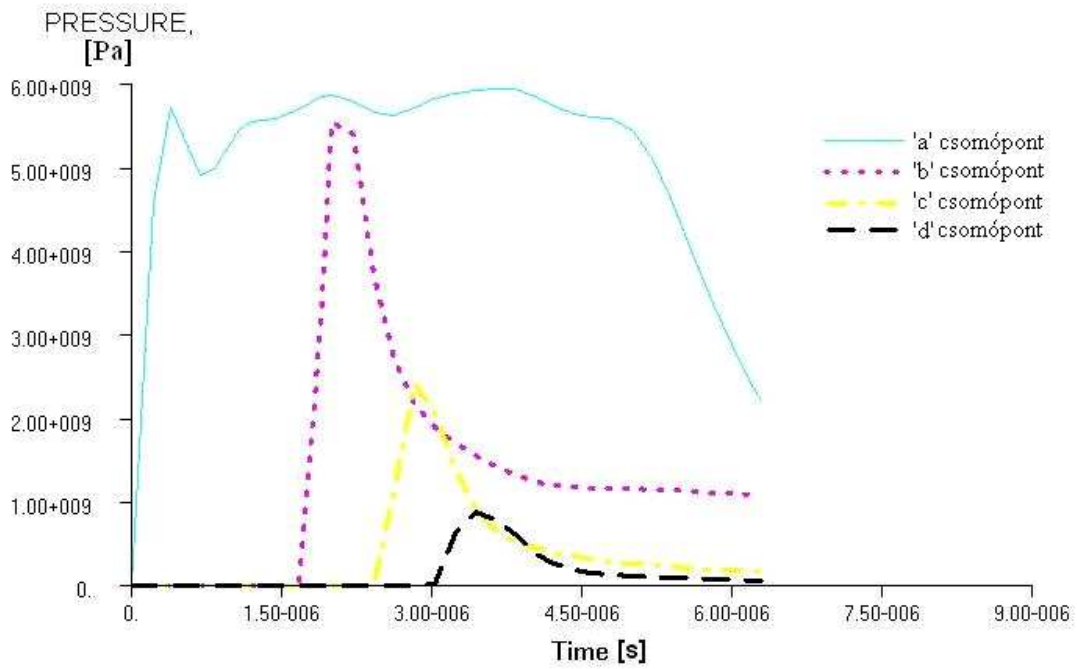


III.3.-1. ábra. Az „a-b” pontok közötti csomópontok nyomás alakulása az idő függvényében

A III.3.-1. ábrán a vizsgált anyagok „a-b” oldali csomópontjaiban keletkező feszültségek időbeli eloszlása látható. Érdekes jelenség, hogy a nyomás értéke a robbanóanyag utolsó csomópontjában a kezdeti csomópont értékhez közeli értékre esik, illetve egy jellemző időponttól a nyomás értékek állandósulnak.



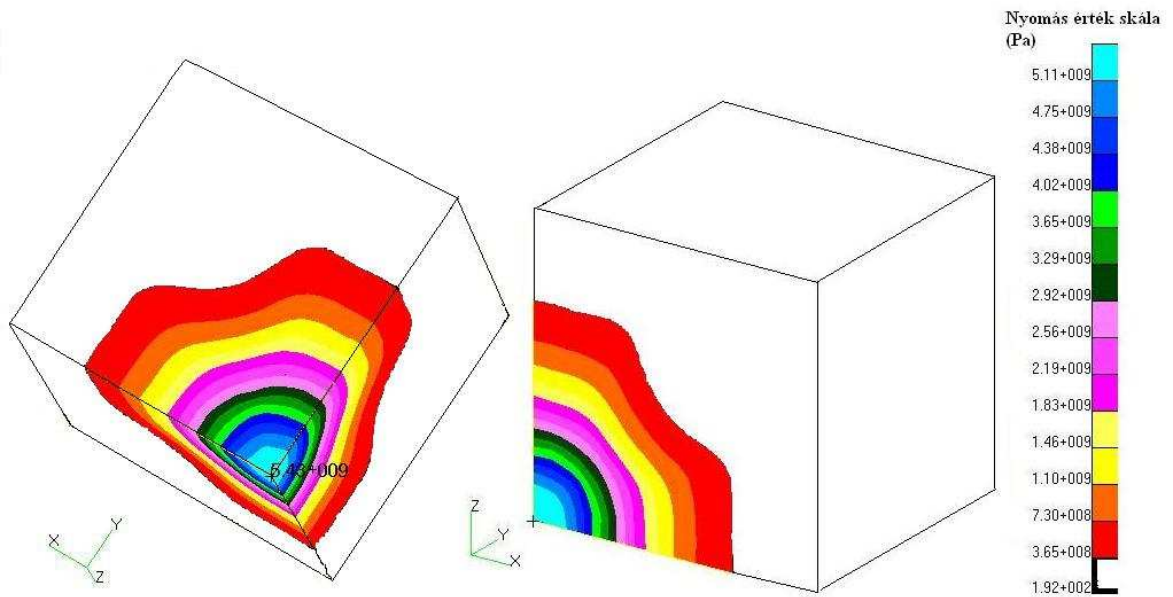
III.3.-2. ábra. Élek menti nyomás eloszlás



III.3.-3. ábra A jelölt csomópontok feszültség eloszlása

III.3.-1. Táblázat. Legnagyobb nyomásértékei és időpontjai

		'a'. csomópont	'b'. csomópont	'c'. csomópont	'd'. csomópont
COMP.B	idő (s)	3,6479E-06	2,0135E-06	2,8397E-06	3,4521E-06
	nyomás (Pa)	5,9382E+09	5,5454E+09	2,4062E+09	8,7490E+08



III.3.-4. ábra. A lökő hullám kialakulása

IV. FEJEZET

A KUMULATÍV HATÁS MODELLEZÉSE

IV.1. A kumulatív hatás

A kumulatív hatás, kumuláció (a latin Cumulatio felhalmozás szóból) a robbanás hatásának meghatározott irányba való felerősítését jelenti, amelyet a robbanóanyagban az erősítés irányába néző oldalában kialakított bemélyedéssel érnek el. [4]

Robbanásnak egy anyagi rendszer (robbanóanyag) nagyon gyors átalakulását nevezzük, amely során nagy energia szabadul fel. A kémiai robbanásnál az energia a gyorsan lefolyó vegyi reakció eredménye. [35] A kumulatív hatás szempontjából a kémiai robbanásnak van jelentősége, ezért a továbbiakban csak ezt vizsgálom.

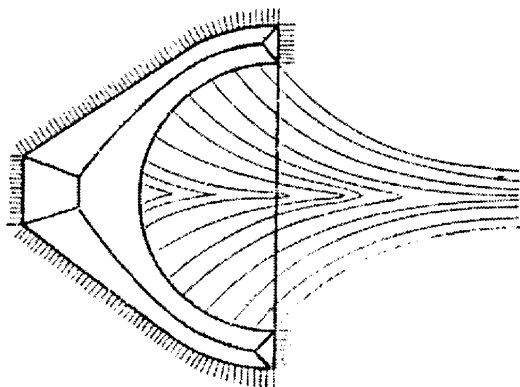
A robbanás valójában egy időben nagyon gyors lefolyású kémiai reakció, egy égési (oxidációs) folyamat. A reakciósebesség kumulatív töltetknél 10 km/s sebességnél is nagyobb lehet. Mivel ez gyorsan végbemenő változás, az átalakuláshoz szükséges oxigént a robbanóanyagban kell tartalmaznia. Az oxigén rendszerint a nitrogénhez kapcsolódik. A végbemenő vegyi robbanás során, amelyet gyors reakció idő miatt a szakirodalom detonációnak nevez, a nagy hatóerejű, brizáns robbanóanyag kémiai összetétele megváltozik.

A detonáció fő jellemzői: [44]

- sebessége a robbanóanyagra jellemző állandó,
- a lökéshullám által terjed, vagyis a reakció önfenntartó,
- terjedési sebessége megegyezik a lökéshullámmal,
- a reakció termékek a front mögött a front mozgásával azonos irányban haladnak,
- a nyomás emelkedés a lökéshullám frontján 10^{10} Pa is lehet.

A kémiai reakció során gázok (szénmonoxid, széndioxid, nitrogén monoxid, nitrogéndioxid) és víz, illetve a magas hőmérséklet miatt gőz keletkezik, valamint hő szabadul fel. A felszabaduló gáztermékek a magas, mintegy 2400 °C, hatására hirtelen felmelegsznek, kitágulnak, és nagy nyomást fejtenek ki a környezetükre.

A kumulatív hatás megismeréséhez elsőként Ch. E. Munroe⁹ megfigyelése járult hozzá a XIX. század végén. Szilárd löporgyapotot robbantott fémllemezen, és azt tapasztalta, hogy a présbe belenyomott számok és betűk lenyomata megjelent a lemezen. További kísérletekkel bizonyították, hogy a robbanóanyag helyi hatása növekszik az üregek irányában [45]. A szakirodalom egy részében a kumulatív hatást Munroe-effektusnak is nevezik. A Munroe-effektus lényege, hogy ha a robbanóanyagba üreget, mélyedést készítenek, a töltet robbanása során a robbanási gáztermékek összetartó áramlása következik be (IV.1.-1. ábra). A gáztermékek sűrűsége az összetartás függvényében növekszik, és ezzel együtt a romboló hatás is, bizonyos feltételek teljesülése esetén. Ilyen kritérium, hogy a környező közeg sűrűsége jelentősen kisebb legyen, mint a robbanási gáztermékek sűrűsége, és az összetartó sugár kialakulásakor ne legyen semmilyen akadály.



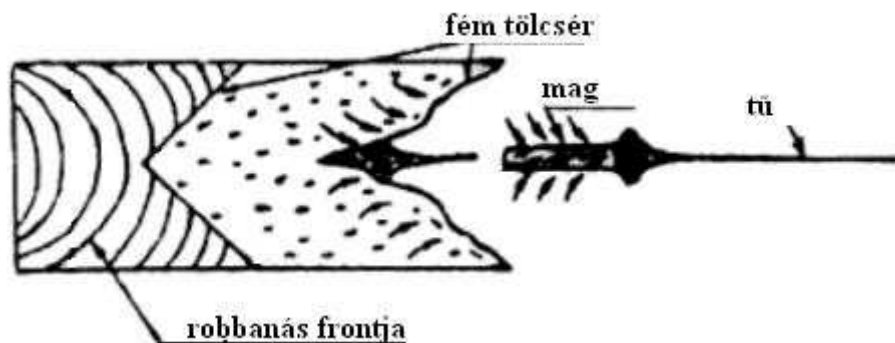
IV.1.-1.ábra.

Robbanási termékek áramlása bélés nélküli kumulatív töltet esetén [46-p.71,3.1.2.ábra]

A homloklfelületen üregesen kiképzett, és az ellenkező végén iniciált töltetek hatását E. Neumann, német kutató tisztázta a XX. sz. elején. F .R. Thomanek pedig arra a következtetésre jutott, hogy az irányított hatás növelhető ha az üreg belsejét fém béléssel borítják [43]. További rombolás fokozás érhető el, ha a töltetet a robbantandó tárgytól az un. fókusztávolságra helyezik el.

⁹ Charles Edward Munroe (egyres helyeken Monroe) 1849-1938, amerikai kémikus. 1871-ben diplomázott a Harvard Egyetem Lawrence Természettudományi Karán, és 1874-ig ott dolgozott, mint Gibbs professzor segédje. Ezután Annapolisban az USA Tengerészeti Akadémiájának , majd a USA Torpedó alakulatának kémiai vezetője. Itt fedezte fel 1886-ban a róla elnevezett Munroe-hatást, amely az alakos töltetek robbanás mechanizmusának az alapja lett. 1904 és 1919 között a Colombiai Egyetem Kémia tanszékének vezetője. 1900-ban a Svéd Akadémia Nobel-díj jelölő bizottságának tagja. Elnöke volt a Amerikai Kémiai Társaságnak, tanácsadója az Egyesült Államok Földmérő Hivatalának és a USA Bányászati Hivatalának. Tudományos munkáinak száma több, mint száz, és "Notes on the Literature of Explosives," művét folyamatosan újra kiadják, jelenleg a tizenötödik kiadása van forgalomban.

A fentiek alapján összefoglalva: a kumulatív hatás koncentráltan halmozott, irányított romboló hatás, amelyet fém betéttel ellátott üreges töltettel valósítanak meg. A robbanáskor keletkező energia a kúpos felületre merőleges irányban koncentráltan halmozódik. Ennek hatására a fémhalmaz plazma halmazállapotba kerül, az így kialakult tömör gáz-fém sugár az erőteljes ütés hatására mozgásba lendülve kiválik cseppformából, és mintegy tűt alkotva, nagy sebességgel (12-15 km/s-ig) és nagy nyomással repül, mint folyékony fémsugár lövedék üti át a páncélt (IV.1.-2. ábra)



IV.1.-2. ábra. A jet kialakulása [47]

A kumulatív sugár energiája átmegy nyomási energiába, ami 1-2 millió Pa -al egyenlő, aminek következtében a páncélzat féme megfolyik anélkül, hogy az olvadáspontig melegedne (a kumulatív sugár hőmérséklete 200-500 C°).

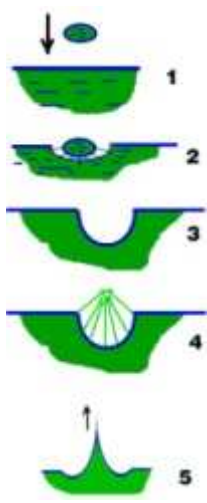
A kumulatív sugár képlékeny, nagy sebességű anyagfolyam, amelynek sebességirányú mérete jóval nagyobb, mint a sebességirányra merőleges mérete. A páncéltörő eszközöknél a kumulatív sugár szinte kizárólag forgástest alakú.

A forgástest alakú üreges töltetből kilépő kumulatív sugár a következő főbb tulajdonsággal rendelkezik:

- viszonylag nagy a sűrűsége ($2000-8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$);
- nagy a haladási sebessége ($2-6 \frac{\text{km}}{\text{s}}$);
- viszonylag nagy a hossza (400-1200 mm);
- kicsi az átmérője (5-30 mm);
- nagy a páncéltűtő képessége (200-1500 mm homogén páncél);
- kicsi a stabilitása.

A kumulatív hatásnak a fizikája nincs teljesen kimunkálva [47]. Nincs egyértelmű felelet arra sem mit foglal magába a kumulatív sugár. Szakemberek sora állítja, hogy a magas nyomáson és hőmérsékleten a robbanás helyén átmegy plazma állapotba, és ez magyarázza a hatalmas mozgási energiát. Mások abban látják az igazságot, hogy energia nem gyűlik sehonnan, bár lehet, hogy egyik formából átmegy a másikba. Az adott mennyiségű robbanóanyag potenciális energiája pedig nem elegendő az anyag plazma állapotba való átmenetéhez. Ettől függetlenül maga a jelenség létezik.

Van egy feltételezés, amely bár nem magyarázza meg teljes egészében a kumulációt, de megfelelően illusztrálja azt. Az életünkben mindannyian elégszer láttunk már esőt, láttuk az esőcseppeket a tócsába esni. Láttuk, hogy a tócsából a cseppek beesése helyén vízszugarak ugrálnak felfelé, és ahogy ezek elválnak, a cseppecskéktől folytatják mozgásukat felfelé. Úgy tűnik, hogy az esőcsepp tócsába esésekor ez a csepp egyszerűen behatol a víz mélyébe és széteszik az eredeti közegében.



F. Killing kutató nagy sebességű kamerával felvételt készített arról a jelenségről, amikor a csepp a víz felületére hullott, és felfedezte a kumulációnak mindazon jelenségeit, amelyek a kumulatív lőszer robbanásakor fellépnek, csak ellenkező előjellel. Annak a megállapítása, hogy mi megy végbe a lőszer robbanásakor számos technikai ok miatt nem lehetséges. A folyamat áttekintése, ahogyan a csepp a vízbe esik nagyon egyszerű.

Első időszak: a csepp közeledik a felülethez. Itt az az érdekesség, hogy a csepp a repülése során nem csepp formát vesz fel, mint ahogy gondoljuk (ez csak az elszakadás pillanatában jellemző), hanem elnyújtott tárcsa formát.

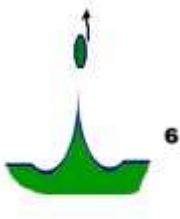
Második időszak: a csepp behatol a víz felületébe. Megkezdődik a tölcsér kialakulásának folyamata.

Harmadik időszak: látjuk a parabolaformájú tölcsért. A tölcsért körülölelő víz nyomása jelentősen felülmúlja a környezetében lévő víz nyomását. Ezt a pillanatot lehet egyezőnek venni a robbanóanyag robbanásának pillanatával, vagyis a jelenség ezen pillanata, ami végbemegy a lőszerben és a vízben, azonos.

Negyedik időszak: a víz apró cseppecskéi a nyomás hatására a parabola geometriai középpontjába törekednek. Ez a kumuláció fókusza. A lőszer robbanásakor ezen a helyen lesz a nyomás maximális.

Ötödik időszak: a cseppecskék összeállnak egy sugárba és nagy sebességgel megindulnak felfelé. Ez itt a kumulatív sugár. A lőszer robbanásakor ugyanilyen a sugár, és ez üti át a páncélt.

Hatodik időszak: azok a mikrocseppecskék, amelyek sugár elülső részén találhatóak, és elég nagy mozgási energiát kaptak, a felszíntől igyekeznek gyorsan eltávolodni. Megkezdődik az ütő mag kialakulása. Megfigyelve a vízcsepp vízbe esését, ebben a pillanatban azt látjuk, hogy ezek a cseppek elég messze felugranak az esőcsepp beesési helyétől.



Hetedik időszak: a befejező. Az ütő mag folytatja mozgását, a többi vízcseppcske felhasználva saját energiáját, megkezdte visszatérését a vízbe.



Itt elég világosan megfogalmazott, hogy a kumulatív sugár rövid ideig létezik, és hamar szétesik. Ezért, ha a lövedék útjába védőernyőt helyezünk, a kumulatív sugár, amely a lövedék ernyővel való

IV.1.-4 ábra[47] találkozásakor alakul ki, már sérül a páncélig vezető úton, az ütő mag kialakulásához pedig nem elegendő a távolság. Ha e mögött az ernyő mögött nincs akadály, vagy a lőszer elég nagy távolságon robban a védőernyőtől, akkor kialakulhat az ütő mag, amely nagy mozgási energiájával könnyen átüti a védőernyőt és a páncélt is.

IV.2. A kumulatív hatás matematikai modellje [46]

A kumulatív hatás elméletének kidolgozásában M.J. Szuharevszkij, E.I. Zababahin G.I. Pokrovszkij F.A. Bauman és még sokan mások vettek részt.[47] A fent említetteken kívül külön kiemelem M. A. Lavrentyev¹⁰ munkásságát, aki a kumulatív

¹⁰ Mihail Alekszevich Lavrentyev (1900. november 19, Kazany – 1980. október 15, Moszkva) kiemelkedő szovjet matematikus és hydrodynamikus.

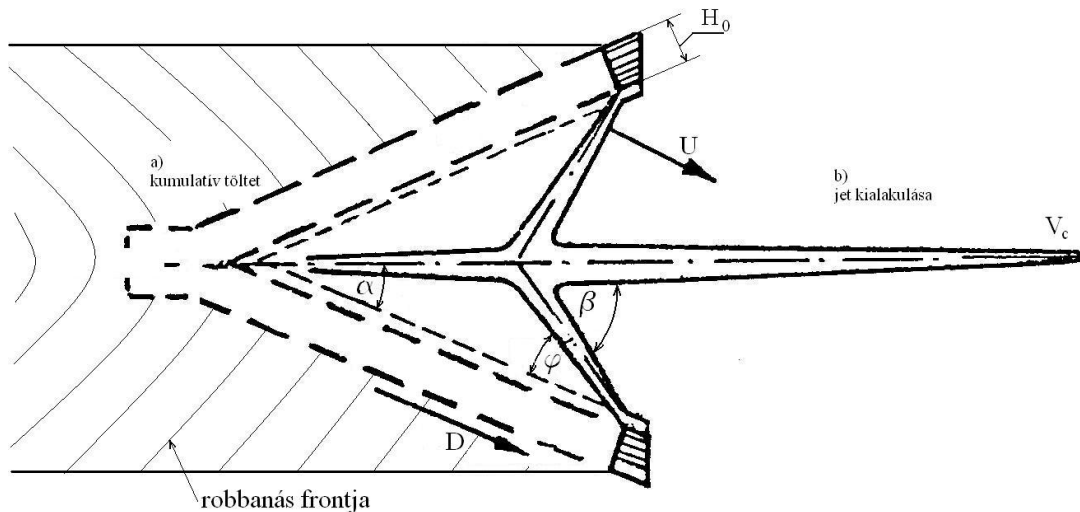
Tanulmányait a kazáni egyetemen kezdte, majd a Moszkvai Egyetemen Fizikai és Matematikai tanszékén folytatta. 1922-ben szerzett diplomát, majd Nikolai Luzin tanítványaként folytatta tanulmányait. 1927-ben Franciaországban együttműködött francia matematikusokkal, majd visszatérve a Steklov Intézet tagja lett. Munkásságával nagyban hozzájárult a konform leképezésekhez és parciális differenciálegyenletekhez. Lavrentiev egyik tudományos kutatási területe a robbanási folyamatok fizikája volt, amely része volt, a második világháború védelmi kutatásainak.

töltetek hidrodinamikai elméletét dolgozta ki. A bélés anyagát összenyomhatatlan folyadéknak tekintette.

Számításai szerint hengersizmetrikus kúpos üregű töltetek esetén a jet legnagyobb sebessége az alábbi képlettel számítható: [43]

$$v_{\max} = \frac{0.41 \cdot D}{\sqrt{\frac{m_0}{m_{\text{ta}}} + \frac{1}{3}}} \cdot \left(1 + \operatorname{tg} \frac{\Pi - 2 \cdot \alpha}{4}\right) \quad \{\text{IV.2.-1}\}$$

Ahol D – a robbanóanyag detonáció sebessége
 m_0 – a bélésanyag tömege
 m_{ta} – a töltet aktív tömege
 α – a béléskúp félszöge

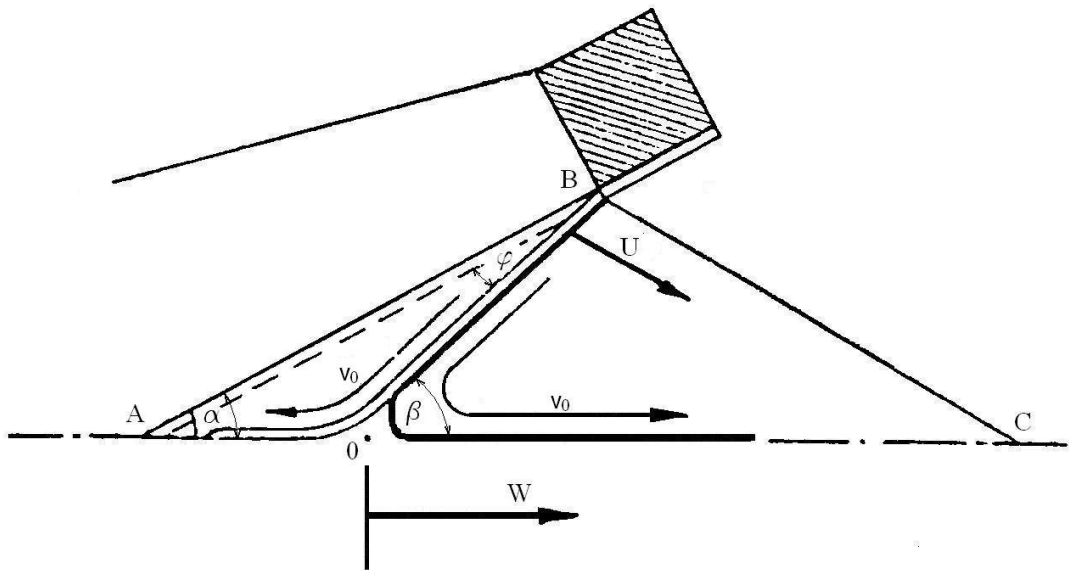


IV.2.-1. ábra A jet kialakulásának vázlatja [46-p.76. 3.2.2 ábra.]

A detonációs hullám hatására, melynek sebességét a IV.2.-1. ábrán D_0 –al jelöltem, a béléskúp falai 'U' sebességgel elmozdulnak. α a béléskúp félszöge. Az elmozduló falak találkozási pontjától balra alakul a mag rész a béléskúp külső részeiből, jobbra pedig a kúp belső részéből a jet képződik.

A kialakuló fémsugár sebességének megállapításához felvettem egy mozgó koordináta rendszert a IV.2.-2. ábrán látható módon.

Mihail Lavrentiev volt az egyik fő szervezője az Orosz Tudományos Akadémia szibériai körzetének, és 1957 és 1970 között az első elnöke is volt. Ő az egyik alapítója a hidrodinamikai osztálynak, amely 1980 óta az ő nevét viseli. Több világhírű akadémia tiszteletbeli tagja.



IV.2.-2.ábra. A mozgó koordináta rendszer [46 p.77. 3.2.3 ábra]

A koordináta rendszer kezdőpontja az elmozduló falak találkozási pontja. Az „AC” tengelyhez „ β ” szögben közeledik a bélésanyagból kialakuló fémsugár. A találkozási pont előtt igen kis távolságra, de azt el nem érve szétválik. A kisebbik rész jobbra halad a „C” pont irányában, a nagyobbik pedig balra, az „A” ponthoz.

A kétirányú áramlásra felírom az anyag-, az impulzus és energia megmaradási egyenleteket.

$$m_0 = m_1 + m_2 \quad \{\text{IV.2.-1.}\}$$

'0' index az összes tömeg,

'1' –es a jet,

'2' –es a mag jelölése

$$m_0 \cdot v_0 \cdot \cos \beta = m_2 \cdot v_2 - m_1 \cdot v_1 \quad \{\text{IV.2.-2.}\}$$

$$\frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot v_0^2 = \frac{1}{2} \cdot m_1 \cdot v_1^2 + \frac{1}{2} \cdot m_2 \cdot v_2^2 \quad \{\text{IV.2.-3.}\}$$

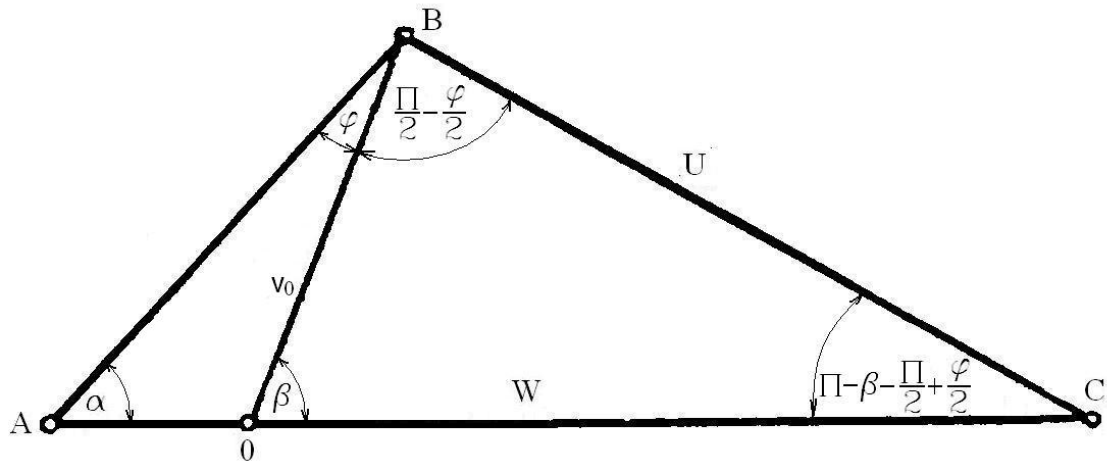
A kapott egyenletrendszer megoldva az alábbi eredményeket kapjuk:

$$v_1 = v_2 = v_0 \quad \{\text{IV.2.-4.}\} \quad \text{vagyis az áramlási sebességek egyenlők}$$

$$\frac{m_1}{m_0} = \sin^2 \frac{\beta}{2} \quad \{\text{III.2.-5.}\}$$

$$\frac{m_2}{m_0} = \cos^2 \frac{\beta}{2} \quad \{\text{IV.2.-6.}\}$$

A mozdulatlan koordináta rendszerhez viszonyítva a '0' találkozási pont 'W' sebességgel mozdul el a detonáció irányában.



IV.2.-3. ábra A mozdulatlan koordináta rendszer [46 p-77. 3.2.4. ábra]

Így a mozdulatlan koordináta rendszerben a jet sebessége

$$v_1 = W + v_0 \quad \{\text{IV.2.-7.}\}$$

lesz. A mag sebessége ebben a rendszerben jobbra fog elmozdulni, de a jet sebességénél kisebb mértékben

$$v_2 = W - v_0 \quad \{\text{IV.2.-8.}\}$$

A IV.2.-3. ábra alapján felírom a bélésanyag „0” találkozási ponthoz való v_0 sebességét és a „0” pont „C” pont irányú „W” sebességét a bélésanyag B-C irányú mozgásának „U” sebességével.

$$v_0 = \frac{U}{\cos\left(\frac{\Pi}{2} - \frac{\varphi}{2}\right)} \quad \{\text{IV.2.-9.}\}$$

$$W = \frac{U}{\cos\left(\frac{\Pi}{2} - \beta + \frac{\varphi}{2}\right)} \quad \{\text{IV.2.-10.}\}$$

Adott egységnyi idő (t) alatt a betétanyag hosszából $v_0 \cdot t$ -ed rész használódik fel a jet és a mag kialakulására. Ez idő alatt a betétanyag „B” pontja a „C” pontba helyeződik, illetve a „0” pont is áthelyeződik a „C” pontba „W” sebességgel.

A kúp betétanyaga a detonációs hullámmal való találkozási pillanatában a tengelyhez viszonyítva egy „ α ” félszöget zár be és ekkor „U” sebessége zérus. A következő pillanatban „ φ ” szögben elfordul, és felveszi „U” sebességet. Az elmozduló béléanyag és az „U” sebesség által bezárt szög: $\frac{\Pi}{2} - \frac{\varphi}{2}$

A IV.2.-3. ábrán az OBC háromszögre alkalmazom a szinusztételt.

$$\frac{W}{\sin\left(\frac{\Pi}{2} - \frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{v_0}{\sin\left(\frac{\Pi}{2} - \beta + \frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{u}{\sin\beta} \quad \{\text{IV.2.-11.}\}$$

A {IV.2.-7.} – {IV.2.-10.} egyenletek felhasználásával és a szükséges átalakítások elvégzése után, a kumulatív sugár sebességére:

$$v_1 = U \cdot \frac{\cos\frac{\alpha}{2}}{\sin\frac{\beta}{2}} \quad \{\text{IV.2.-12.}\}$$

A mag sebessége:

$$v_2 = U \cdot \frac{\sin\frac{\alpha}{2}}{\cos\frac{\beta}{2}} \quad \{\text{IV.2.-13.}\}$$

A jet, illetve a mag tömegére vonatkozó {IV.2.-5.} - {IV.2.-6.} képletek és sebességre vonatkozó {IV.2.-12.} és {IV.2.-13.} képletek azt bizonyítják, hogy $\beta < \frac{\Pi}{2}$ esetben a béléanyag többsége a magba kerül, viszont a jet sebessége jelentősen meghaladja a mag sebességét.

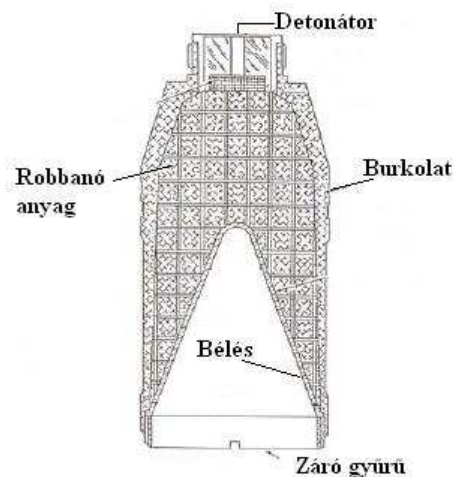
Ha „ α ” szög értéke csökken, közelít az elméleti nullához, a jet sebessége elérheti a detonáció sebességének kétszeresét is. Így ha a detonáció sebessége elegendően nagy (a gyakorlatban használt robbanó anyagok detonációs sebessége $7.5-8.5 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$ a kialakuló jet sebessége olyan nagy lesz, hogy az akadályba való ütközés következtében

több százezer MPa nyomás alakul ki. Ilyen nyomás esetén a szilárd fémek megfolynak. Ez a felismerés volt Lavrentyev elméletének alapja, amelyben a jetnek a fémekre gyakorolt hatását hidrodinamikai egyenletekkel írta fel.

Ezen egyenletek felhasználhatók a jetnek a fémekre gyakorolt hatásának számításakor.

IV.3. A végeelem modell

A modellezés alapjának egy a IV.3.-1. ábrán bemutatott, jellegzetes alakos töltetet vettem.

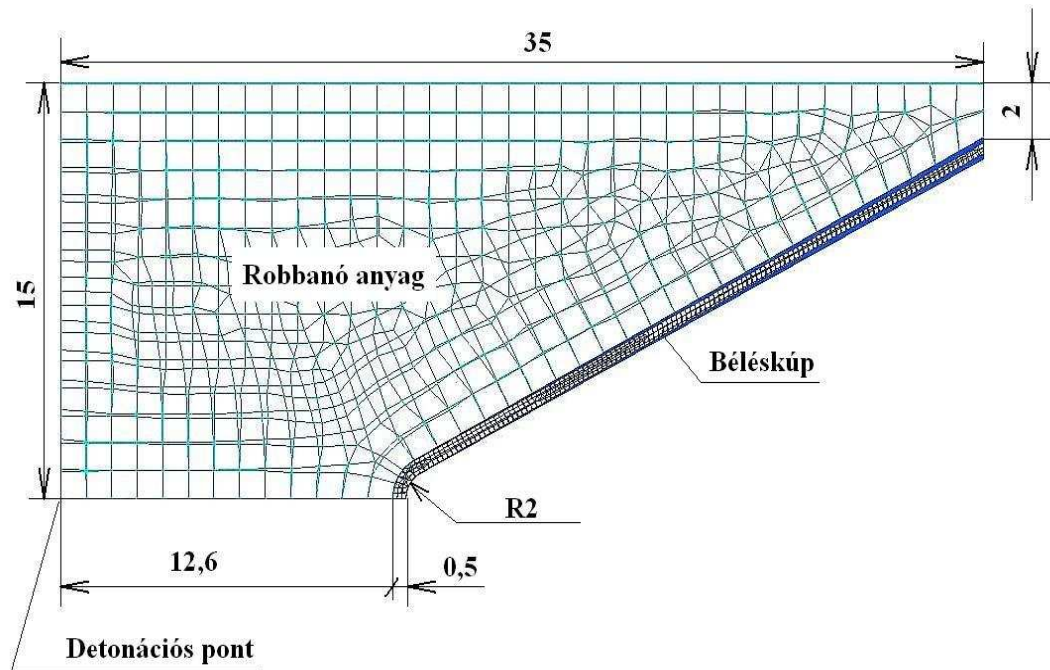


IV.3.-1. ábra. Robbanó töltet

A bélés-kúpot és a robbanóanyagot egyszerű tengely-szimmetrikus modellnek tekintem, amelyet véges térfogatú Euler hálóval alkotok meg. A robbanóanyag robbanásának kezdő pontját a szimmetria tengely, robbanóanyag felőli végére tettem. A szimuláció elsődleges célja, hogy bemutassam a jet kialakulását és az eredményeket összevegyem az elméleti értékekkel.

A tipikus töltet tengely-szimmetrikus. A látvány tekintetében a teljes 3D megjelenítés lenne kívánatos, de bizonyos egyszerűsítések bevezetésével elkerülhető a túlzott kísérleti munka, amely a program futási idejét és a számítógép memória kapacitását indokolatlanul megnöveli.

Az egyszerűsített modell a IV.3.-2. ábrán látható.



IV.3.-2. ábra. A robbanó töltet véges elem hálózata¹¹

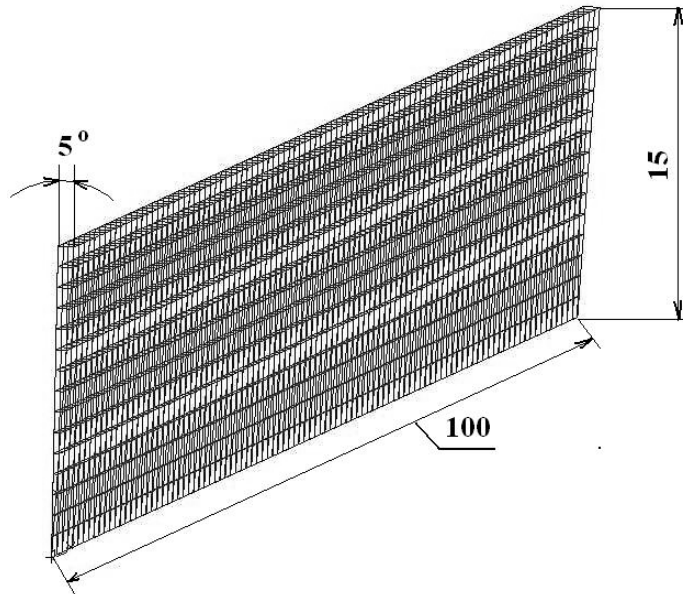
A IV.3.-2. ábrán a végelem analízishez szükséges hálózat is látható. A robbanóanyag burkolatát merev testtel helyettesíttem. A robbanás a detonációs pontból indul.

IV.3.1. Az Euleri háló

Háromszög alapú hasábot használok a véges térfogatú Euleri környezet modellezéséhez. A környezet elrendezése a IV.3.-3. ábrán látható. A nyílás szög 5° – os. A környezet magassága megegyezik a robbanó töltet magasságával (15 mm), a hosszát 100 mm–re választottam, hogy a jet kialakulását és viselkedését kellő hosszúságban és időben tanulmányozhassam.

Az Euleri tér véges elem hálózatát 1 500 CHEXA típusú elem alkotja. A modell geometriája a csomópontokkal és az elemek meghatározásával a „gyak2.bdf” fájlban van definiálva.

¹¹ Az ábra a szerző munkája



IV.3.-3. ábra. Az Euleri tér véges elem hálózata¹²

Az elem tulajdonságainak paraméterei a „gyak.dat” forrás fájlban rögzítettem. A teljes bemeneti állomány a [M4-1] mellékletben található. A dolgozat további részében a bemeneti állománynak csak a tárgyalt témára vonatkozó részletét ismertetem.

Az Euleri teret jellemző paraméterek leíró program sor:

```
$ ===== PROPERTY SETS =====
$      * p-eul *
PEULER1,1,, ,7
```

Az 1-es azonosítóval ellátott „PEULER1” utasítás ”MMSTREN” tulajdonságot ír elő, ami azt jelenti, hogy szerkezetében többféle, szakítási szilárdsággal megadott anyag található légüres térben. A program sorban található szám (7) a TICEUL utasítás azonosítójára utal.

```
$ ----- TICEUL BC ticeul -----
TICEUL,7,,,,,,+A000002
+A000002,ELEM,4,,,1,,,+A000003
+A000003,SURF,4,5,6,2,,,+A000004
+A000004,SURF,3,8,5,3,,
SET1,4,1,THRU,1500
```

¹² Az ábra a szerző munkája

Az alapértelmezett Euleri környezet kezdeti feltételeit a IV.3.-3. ábra szerint kialakított, zárt felülettel határolt tér belsejében adtam meg.

IV.3.2. A bélés kúp

A bélés kúpot az IV.3.1 fejezetben ismertetett térbe helyezem. Finomabb végeelem hálózati felosztást használlok, hogy helyesen szimuláljam a bélés kúp viselkedését, és helyes képet kapjak a jet kialakulásáról.

A bélésanyag nyomás és sűrűség viszonyát az „EOSPOL” modell képezi.

Az EOSPOL modell egy több tagból álló állapotegyenletet, amelyben a nyomás az alábbi harmadfokú egyenlettel határozható meg.

Az állapotegyenlet nyomáskor ($\mu > 0$):

$$p = a_1 \cdot \mu + a_2 \cdot \mu^2 + a_3 \cdot \mu^3 + (b_0 + b_1 \cdot \mu + b_2 \cdot \mu^2 + b_3 \cdot \mu^3) \cdot \rho_0 \cdot e \quad \{\text{IV.3.-1.}\}$$

Húzáskor ($\mu \leq 0$):

$$p = a_1 \cdot \mu + (b_0 + b_1 \cdot \mu) \cdot \rho_0 \cdot e \quad \{\text{IV.3.-2.}\}$$

ahol $\mu = \eta - 1$

$$\eta = \frac{\rho}{\rho_0}$$

ρ = átlagos anyagsűrűség

ρ_0 = referencia sűrűség

e = tömegegységre vonatkozó fajlagos belső energia

A bélés kúp anyaga réz az alábbi konstansokkal:

IV.3. -1. Táblázat			A bélés kúp anyagállandói		
a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3
1.43e+011 Pa	8.39e+010 Pa	2.16e+009 Pa	0	0	0

Az anyag folyáshatárát a Johnson-Cook folyás modell alapján határozom meg.

A Johnson-Cook modellben [48] a folyáshatár feszültség függvénye a képlékeny alakváltozásnak, az alakváltozási sebességnek és a hőmérsékletnek. A fent említett tagok közötti összefüggés az alábbi képlettel írható le:

$$\sigma_y = (A + B \cdot \varepsilon_p^n) \left(1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) (1 - T^{*n}) \quad \{\text{IV.3.-3.}\}$$

$$\text{ahol } T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$$

ε_p = tényleges képlékeny alakváltozás

$\dot{\varepsilon}$ = tényleges alakváltozási sebesség

$\dot{\varepsilon}_0$ = referencia alakváltozási sebesség

T = hőmérséklet

T_r = szobahőmérséklet

T_m = olvadási hőmérséklet

A, B, n, C, m konstansok

A	1.2e+008	Pa
B	1.43e+009	Pa
C	0.0	
n	0.5	
m	1.0	
ε_0	1.0	
T_{melt}	1356	K
T_{room}	293	K
C_v	399.0	J/kg

A többi anyagjellemző:

Sűrűség (ρ): $8960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ „DMAT” utasításban megadva

Nyírómodulusz (G): $4.77e^{10}$ Pa SHREL utasításban megadva

Hasadási modell állandó: $-2.15e^{10}$ Pa PMINC utasításban megadva

A „PMINC” utasítás definiálja a konstans hasadási nyomás értéket. A hasadási modell a hasadás előtti minimális nyomást határozza meg, amely jelen modell esetén egy állandó. Ezt az állandót úgy kell meghatározni, hogy értéke kisebb vagy egyenlő legyen, mint zérus. Kompresszió alatt a nyomás értékét pozitívnak tekintjük. Ha egy elemben a nyomás a beállított minimális érték alá esik, az elem széthasad, a nyomás és a folyáshatár feszültsége nullára áll be. Ilyenkor az anyag folyadékként viselkedik. Ezt követően a nyomás pozitív lesz, az anyag már nincs hasadt állapotban. A nyomás ezután újból csökkenhet a meghatározott minimum értékig, mielőtt a hasadás újból megtörténik.

A bélés anyag paramétereit megadó bemeneti fájl részlet:

```
$ ----- Material Cu-mat id =5
$           $\rho$ 
DMAT,5, 8960, 5,5,5,,5
$           $a_1$            $a_2$            $a_3$ 
EOSPOL,5, 1.43e+011, 8.39e+010, 2.16e+009,,,,
$          G
SHREL,5, 4.77e+010
$          A          B          n          C          m           $\epsilon_0$            $C_v$ 
YLDJC ,5, 1.2e+008, 1.43e+009 ,0.5, 0, 1, 1, 399,+A000001
$           $T_{melt}$            $T_{room}$ 
+A000001,1356, 293
PMINC,5,-2.15e+010,
```

A bélésanyag alakja és helyzete a geometriai terület módszerével könnyen megadható, amikor a bélésanyag kezdeti feltételeit meghatározom.

```
$ ----- TICVAL BC ticval-kup -----
TICVAL,6,
SET1,6,2318,THRU,4467
```

IV.3.3. A robbanóanyag

A robbanást a Jones-Wilkens-Lee (JWL) állapotegyenlettel modellezem. A robbanóanyag paraméterei, az előző fejezetekben megadottakhoz hasonlóan az „EOSJWL” és „TICVAL” utasításokban vannak meghatározva.

```
$ ----- Material explosive id =8  
DMAT,8,1630,8,8,8  
EOSJWL,8,5.24229e+011,7.678e+009,4.2,1.1,0.34
```

```
$ ----- TICVAL BC ticval-explosive -----  
TICVAL,5,,DENSITY,1630,SIE,4.95e+006
```

A robbanóanyag alakját és helyzetét a béléspanyagnál alkalmazott geometriai terület módszerével adom meg.

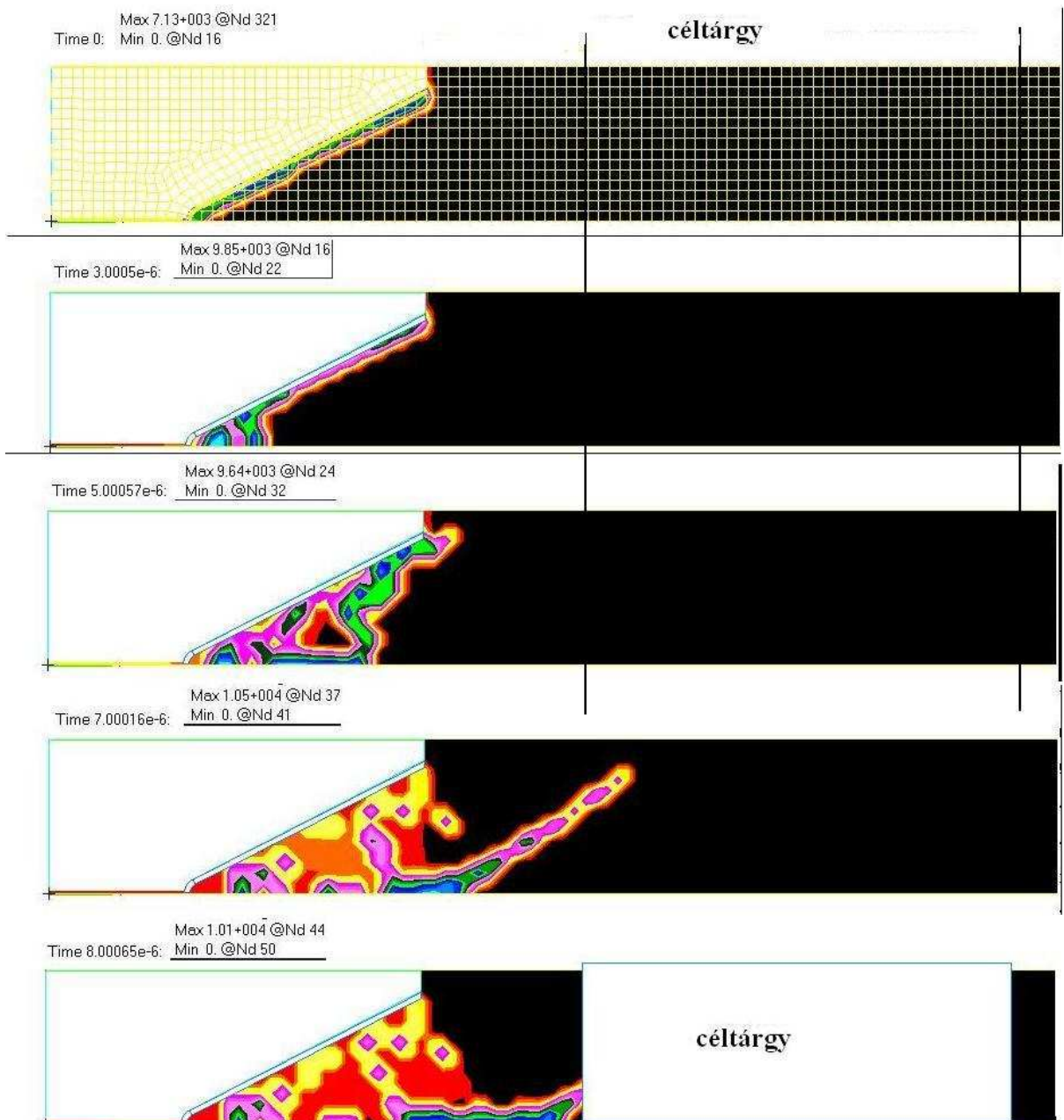
```
SET1,5,1501,THRU,2317
```

IV.4. A jet kialakulása végeelem módszerrel

A jet kialakulása a IV.4.-1. ábrán látható képsorozaton látható. A megjelenítéshez a folyamatban részt vevő anyagok sűrűségét választottam paraméternek.

Az első kép a kiindulási állapotot jeleníti meg. A további képeken a jelenség alakulása, illetve a sűrűségi viszonyok láthatóak 3, 5, 7 és 8 mikro szekundum elteltével.

Megfigyelhető, hogy a jet már 8 μ s elteltével kialakult a céltárgy előtt. Észrevehető a kumulatív sugarat térben megelőző, a béléskúpából leváló anyag áramlat, amely a jet kialakulásában nem vesz részt, hanem a céltárgy felületéhez csapódik. Ez a jelenség a IV. fejezetben tárgyalt gyakorlati megfigyeléseken is tetten érhető. A I.2.-5. ábrán látható átütési lyukat körülvevő anyagváltozás a fent említett jelenséggel magyarázható.



IV.4.-1. ábra A jet kialakulása véges elem szimulációval¹³

¹³ Az ábra a szerző munkája

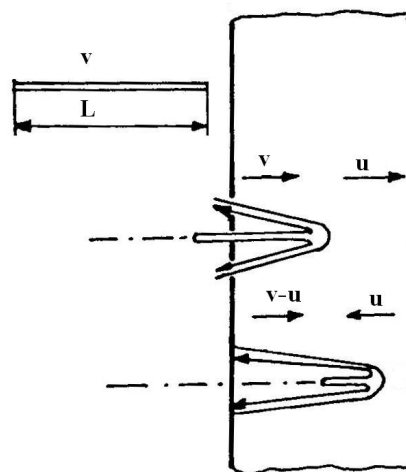
V. FEJEZET

A KUMULATÍV SUGÁR BEHATOLÁSA A CÉLTÁRGYBA

V.1. A páncél átütés elve

A {IV.2.-7.} {IV.2.-8.} képletek szerint a mag sebessége kisebb, mint a jet sebessége, ezért a kumulatív sugárban húzó feszültség lép fel, ami a sugár szétszakadásához vezet. A kumulatív sugár kialakulása és a szétszakadás közötti idő a szétszakadási idő. A szétszakadt kumulatív sugár nem képez folytonos anyagfolyamot, ezért páncélátütő képessége csökken. A szétszakadási idő alatt megtett út a stabilitási út. Abban az esetben, ha a kumulatív sugár a páncéltól a stabilitási útnál rövidebb távolságra alakul ki, az áthatolási képesség közel maximális lesz. [49]

A stabil kumulatív sugárban az anyagrészecskék közel állandó sebességgel érkeznek. Az érkező sugár tömegének mozgási energiája a páncélba ütközve hővé és alakváltozási munkává alakul át. A páncél felület a becsapódás környezetében felhevül, képlékennyé válik, az alakváltozási munka következtében pedig a penetrációs üregből kiáramlik. Az üregbe folyamatosan érkező kumulatív sugár folyamatos kiáramlást hoz létre, ezzel növelve a behatolás mélységét. Ez a folyamat a mag és jet szétszakadásáig tart. Mivel a kumulatív sugár mozgási energiája nemcsak alakváltozási munkára fordítódik, ezért a penetrációs mélység növekedésének sebessége kisebb, mint a jet sebessége.



V.1.-1. ábra. A kumulatív sugár behatolása [46- p.96. 3.5.1 ábra]

A jet, amelynek sűrűsége „ ρ_j ”, hossza „ L ”, „ v ” sebességgel mozog, és éri el a „ ρ_m ” sűrűségű célyanyagot. A két anyag találkozási az úgynevezett lökéspont, amely „ u ” sebességgel halad befelé a célyanyagba, amíg a jet fel nem használódik.

Mind a kumulatív sugarat, mind a célyanyagot a képlékeny alakváltozás miatt folyadéknak és a folyadékot összenyomhatatlannak tekintve felírhatjuk a Bernoulli-egyenletet. A penetrációs felület mindkét oldalán a nyomást azonosnak tekintve az alábbi egyenlet írható fel:

$$\frac{1}{2} \cdot \rho_j (v - u)^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho_m \cdot u^2 \quad \{V.1.-1\}$$

A {IV.1.-1} egyenletet egyszerűsítve és átrendezve az alábbi összefüggést kapom:

$$\frac{\rho_j}{\rho_m} = \frac{u^2}{(v - u)^2} \quad \{V.1.-2\}$$

A jet behatolása a célyanyagba adja a „ P ” perforálási mélységet. Ez a mélység a jet hatás ideje alatt alakul ki, azaz amíg el nem fogy. A V.1.-1. ábra alapján ez az idő

$$t = \frac{L}{v - u} \quad \{V.1.-3\} \quad \text{összefüggéssel írható fel.}$$

$$\text{A perforáció mélysége: } L = u \cdot t \quad \{V.1.-4\}$$

A {V.1.-3} egyenletbe behelyettesítve a {V.1.-2} összefüggést, illetve a {V.1.-1}) egyenlet felhasználásával:

$$p = u \cdot \frac{L}{v - u} = L \cdot \frac{u}{v - u} = L \cdot \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_m}} \quad \{V.1.-4\} \quad \text{képletet kapom.}$$

Ez az összefüggés ideális kumulatív sugár és kis sűrűségű és szilárdságú céltárgy esetén áll fenn. A szakirodalom [50-p99-114] a sugárban fellépő húzófeszültség miatt egy ' $\lambda < 1$ ' csökkentő tényezővel veszi figyelembe a {V.1.-1} Bernoulli-egyenletet.

$$\lambda \cdot \rho_j (v - u)^2 = \rho_m \cdot u^2 \quad \{V.1.-5\}$$

A megfigyelések szerint a kumulatív sugárnak nagy szilárdságú és keménységű anyagon való áthaladásakor a céltárgy szilárdsága és keménysége visszahat a sugárra, erősebben fékezi, ezért Eichelberg [49] a {IV.1.-1} képletet az alábbiak szerint veszi figyelembe:

$$\lambda \cdot \rho_j (v - u)^2 = \rho_m \cdot u^2 + \sigma \quad \{\text{V.1.-6}\}$$

ahol $\sigma = \sigma_m - \sigma_j$, azaz a céltárgy ellenállásának és a jet ellenállásának különbsége a plasztikus deformációval szemben.

A valóságot jól megközelítő penetrációs mélységet adó összefüggést Pack-Evans [50] szerint:

$$P = L \cdot \sqrt{\frac{\rho_j}{\rho_m}} \cdot \left(1 - \frac{\alpha \cdot \sigma}{\rho_j \cdot v^2} \right) \quad \{\text{V.1.-7}\}$$

A $\frac{\alpha \cdot \sigma}{\rho_j \cdot v^2}$ a kumulatív sugár és a céltárgy tulajdonságaitól függő anyagállandó. A

nemzetközi szakirodalomban erre vonatkozó adatokat nem találtam, csak említést, hogy acél esetén kb. 0.3. [49]

A Bernoulli egyenletből következik még, hogy a jet behatolási sebessége a céltárgyba

$$v = \frac{u}{\sqrt{\frac{\rho_m}{\rho_j} + 1}} \quad \{\text{V.1.-8}\} \quad [12]$$

A találkozási pontban levő nyomás

$$p = \frac{\rho_m v^2}{2 \left[\sqrt{\left(\frac{\rho_m}{\rho_j} \right) + 1} \right]^2} \quad \{\text{V.1.-9}\}$$

A vizsgálat során, a hidrodinamikai elmélet alapján feltéteztük, hogy megfelelően nagy sebességű jet behatolása a céltárgyba, azonos módon történik, mint a folyadéksugár behatolása a folyadékba. De ehhez a feltevéshez biztosítani kell, hogy a jet sebessége meghaladjon egy kritikus értéket, amely a jet és a céltárgy anyagától függ.

Néhány céltárgy és a jet anyagára vonatkozó kritikus sebességet mutatja a V.1.-1. táblázat.

V.1.-1. Táblázat A kumulatív jet kritikus sebességei [43]

A céltárgy anyaga	Brinell keménysége	A jet anyaga	A jet kritikus sebessége $v_{jk} \left[\frac{m}{s} \right]$
Duraluminium	115	Duraluminium	2900
Acél	125	Duraluminium	3300
Acél	125	Acél	2050
Edzett acél	R=50	Acél	2200

Így a perforálási mélység csak akkor igaz, ha $v \geq v_{jk}$

A valóságos mélységet az a tény is befolyásolja, hogy a kumulatív sugár sebessége folyamatosan csökken, és az átmérője kis mértékben növekszik. Továbbá figyelembe kell venni a kumulatív töltet fókusz távolságát, azaz a legmélyebb perforációt adó töltet-akadály távolságát. A jet mozgás közben megnyílik, és ekkor hossza kisebb, mint a képződő kúp kezdeti hossza. A legnagyobb perforálási mélységet akkor kapjuk, ha az akadály bizonyos távolságra van a kumulatív töltet alsó szájától. Ekkor a jetnek van ideje, hogy megnyúljon, de a távolság további növelésével elveszti stabilitását, szétszakadozik, kiszélesedik, ezáltal perforáló hatása jelentősen csökken.

A következő fejezetben a fenti összefüggések alátámasztására végeztem gyakorlati kísérleteket.

V.2. A gyakorlati kísérlet mérési eredményei

V.2.-1. Táblázat A robbantási mérési eredményei

A céltárgy lemezeinek azonosítói	Robbantási sorozat sorszáma		
	1	2.	3.
	Céltárgyon mért értékek		
M1-E0°-D (mm)	23x20,5	21x21,5	19,5x21
M1-E0°-M (mm)	6,00	4,00	2,00
M1-H0°-D (mm)	20x20	19x19	19x19,5
M1-H0°-M (mm)	3,00	2,00	3,00
M2-E0°-D (mm)	20x20	19x19	19x19
M2-E0°-M (mm)	-4,00	-4,00	-4,00

M2-H0°-D (mm)	17,5x17,5	17,5x18	16x15,5
M2-H0°-M (mm)	2,5	3,00	4,00
M3-E0°-D (mm)	16,5x16,5	16,5x16,5	16,5x16
M3-E0°-M (mm)	-3,5	-3,50	-3,00
M3-H0°-D (mm)	14x14	14x14	12x13
M3-H0°-M (mm)	2,00	1,5	2,00
M4-E0°-D (mm)	13,5x14	15x14,5	14x14
M4-E0°-M (mm)	-2,00	-3,00	-3,00
M4-H0°-D (mm)	12x12	10x11	12,5x11,5
M4-H0°-M (mm)	2,00	1,5	1,00
M5-E0°-D (mm)	12x11	12x12	12x11
M5-E0°-M (mm)	-2,00	-3,00	-3,00
M5-H0°-D (mm)	9x10	9x9	10x10
M5-H0°-M (mm)	1,00	1,5	1,00
M6-E0°-D (mm)	9x9,5	11x10,5	10,5x10
M6-E0°-M (mm)	-1,00	0,00	0,00
M6-H0°-D (mm)	8,5x8,5	8,5x9	9,5x8,5
M6-H0°-M (mm)	1,00	1,00	0,5
M7-E0°-D (mm)	8x8	9x8,5	9x9
M7-E0°-M (mm)	-1,00	0,00	0,00
M7-H0°-D (mm)	7x7	10x9	9x7
M7-H0°-M (mm)	1,00	1,00	1,00
M8-E0°-D (mm)	10x9,5	9x9	8,5x7,5
M8-E0°-M (mm)	0,00	0,00	-2,00
M8-H0°-D (mm)	10x8,5	10,5x10	13x13,5
M8-H0°-M (mm)	1,00	1,5	1,00
M9-E0°-D (mm)	11,5x11,5	9x8	11,5x11,5
M9-E0°-M (mm)	-2,00	0,00	-2,00
M9-H0°-D (mm)	nincs	0 (pont átért a jet)	nincs
M9-H0°-M (mm)	nincs	nincs	nincs

A táblázatban használt jelölések értelmezése:

A céanyag mért eredményei oszlopban az Mx a lemez sorszámát jelöli. A sorszámozás felülről lefelé történt, tehát az 1-es sorszám a töltetkez legközelebbi lemezt jelöli.

E a lemez töltet felöli oldalát,

H a hátoldalra utal,

0° a töltet és a céltárgy merőlegestől való eltérését mutatja,

-D a bemenő lyuk legnagyobb és legkisebb értékét mutatja mm-es nagyságrendben.

A fémsugár által okozott átütési lyuk nem szabályos kör,

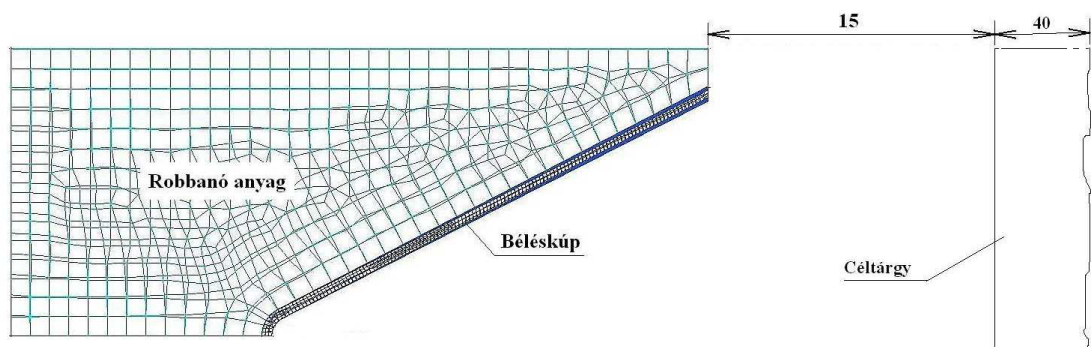
-M a felületből kiálló illetve besüllyedt anyag a felület síkjától mért értéket jelöli mm-ben.

Kutatásom a jet átütési mélységére koncentrált, ezért az eredményekből csak az erre vonatkozó értékeket veszem figyelembe.

A V.2.-1. táblázat eredményeiből kitűnik, hogy a jet a második sorozatban 9 lemezen hatolt át, ami 36 cm vastagságnak felel meg.

V.3. Az áthatolás végeelem modellje

A IV.3.1. fejezetben ismertetett euleri térben elhelyezett és modellezett robbanó töltet elé az V.3.-1. ábrán látható módon, ugyancsak euleri térben helyeztem el a céltárgyat.



V.3.-1. ábra. Az átütési modell végeelem elrendezése¹⁴

A céltárgyat acélként kezelve, tulajdonságait az következő programrészlettel határoztam meg.¹⁵

¹⁴ Az ábra a szerző munkája

¹⁵ A teljes program a M5.-1. mellékletben található

\$ ----- Material Steel-01 id =6

DMAT,6,7830,6,6,6,,6

EOSPOL,6,1.64e+011,,,,,,

SHREL,6,8.18e+010

YLDVM,6,1.4e+009

PMINC,6,-3.8e+009,

	egyedi azonosító	sűrűség	EOSPOL	SHREL	YLDVM	PMINC
			egyedi azonosítókra történő utalás			
DMAT	6	7830	6	6	6	6

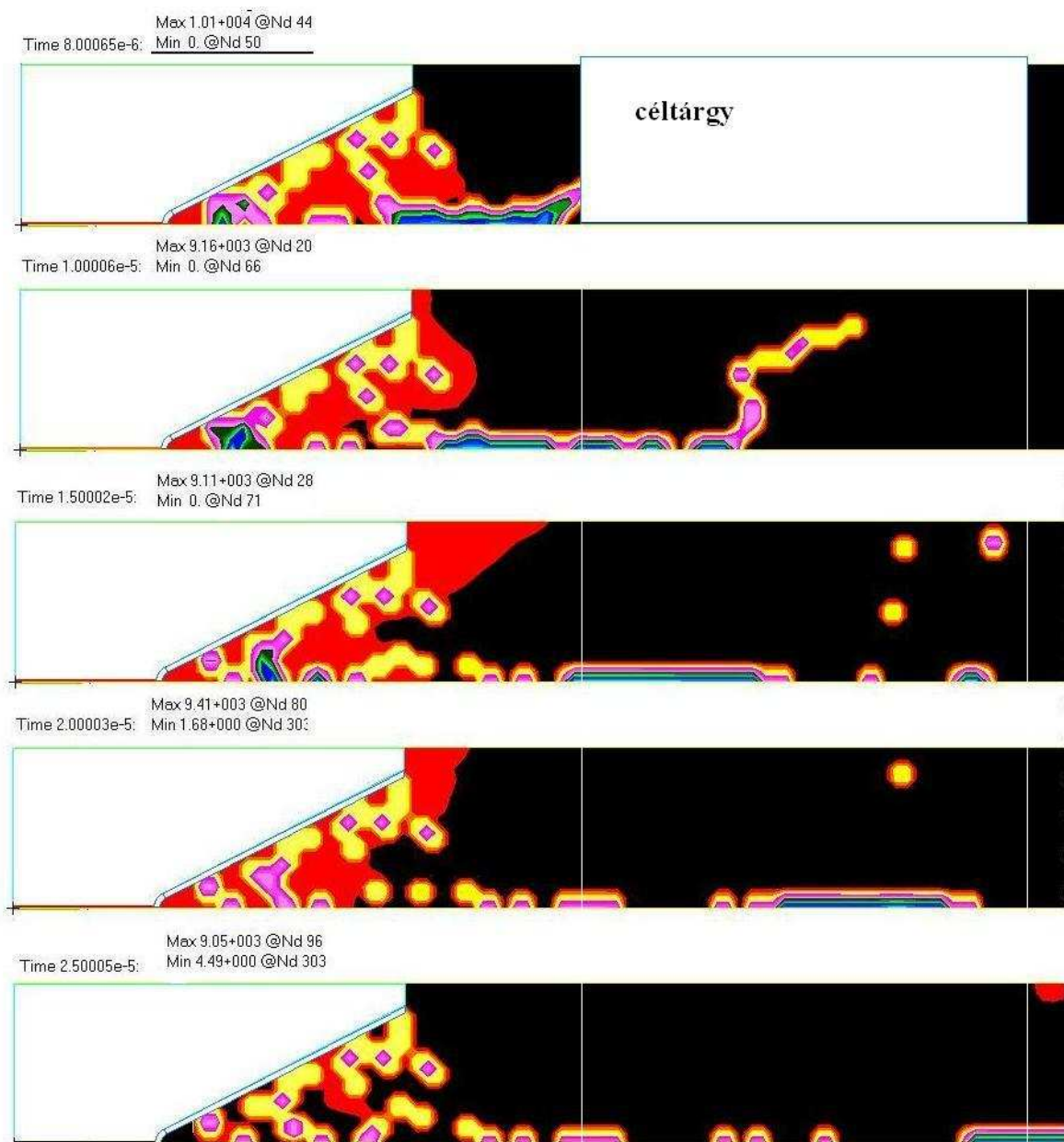
A 6-os azonosítóval ellátott EOSPOL parancs definiálja: a {IV.3.-1.}és {IV.3.-2.} egyenlet a_1 konstansát, ami jelen esetben a Bulk modulussal azonos,

SHREL utasítás: a G, nyírási modulus $8.18e+010$ Pa értékét definiálja,

YLDVM utasítás: a von Mises-féle folyáshatár $1.4e^9$ Pa értékét azonosítja,

PMINC parancs: pedig a $-3.8e^9$ Pa hasadási értéket.

V.4. A modellezés eredményei



V.4.-1. ábra. A szimuláció eredménye

V.5. Az eredmény értékelése

Az elvégzett szimuláció eredményét a V.4.-1. ábrán látható képsorozat mutatja. A megjelenítéshez a folyamatban részt vevő anyagok sűrűségét választottam paraméternek.

Az első kép azonos a IV.4.-1. ábrán látható képsorozat utolsó képével, azaz a kialakult jet közvetlenül a céltárgyba hatolás előtti pillanatát mutatja. A képsorozat bizonyítja, hogy a gyakorlati eredménynek megfelelően a kumulatív sugár áthatol a 40 cm vastag céltárgyon. Az áthatolás a robbanás kezdetétől számítva 25 μ s múlva megtörténik. Ilyen jellegű megfigyeléseket a gyakorlatban nem lehetséges elvégezni.

A kísérleti robbantás és a modellezett eredmény között eltérés tapasztalható. A valóságban a kumulatív sugár 36 és 40 cm között megállt. A szimulációban a 40 cm után is egyben maradt, ami további lemez áthatolási képességre utal.

Ennek magyarázata abban található, hogy a gyakorlatban a 40 cm-es céltárgy 5 cm-es lemezekből áll össze, a szimulációban pedig homogén testként modelleztem. Így feltételezhető, hogy a lemez között „kifújás” van, ami energia veszteséggel jár.

A másik magyarázat, hogy a kísérletben használt robbanó töltetről nincs információ. Adatvédelmi okok miatt nem ismertem sem a pontos típusát, így anyag- és robbanási jellemzőit, sem a gyártás idejét. Ezért a modellezésben szimulált robbanóanyag és a valóságos között eltérés van, ami az eredményben látható.

A KUTATÓ MUNKA ÖSSZEGZÉSE, TÉZISEK MEGFOGALMAZÁSA

Az értekezés záró fejezete a kutatás célkitűzéseivel összhangban elvégzett munka eredményeit és azok hasznosíthatóságát foglalja össze.

A bevezetésben megfogalmazott kutatási célok elérése érdekében az alábbi tevékenységeket hajtottam végre:

Az első fejezetben bemutattam a kumulatív hatás gyakorlatban megvalósított kísérleti elrendezését és az alkalmazott anyagokat. Ez az elrendezés felel meg a fizikai FEM modellezési folyamat alaprendszerének, amelyből a lényeges tulajdonságok elvonatkoztatásával állítom fel a diszkrét modellt. Ebben a fejezetben áttekintettem a végeselem-módszer kialakulásának és fejlődésének főbb állomásait, valamint bemutattam a diszkrét modell létrehozásához és megoldásához szükséges szoftvereket.

Mivel a gyakorlatban végrehajtott kísérletben számos bonyolult fizikai folyamat zajlott, ezért ezt részekre bontottam.

A második fejezetben a robbanás folyamatát modelleztem. A szakirodalom feldolgozása alapján felállítottam a folyamat matematikai modelljét, és a választott programmal elkészítettem a végeselem modellt. A megoldást különböző osztásfinomsággal végeztem el, majd végrehajtottam a számítógépes szimulációkat. A kapott eredményeket összevettem egymással és az elméleti eredményekkel.

Az eredmények elemzéséből megállapítottam, hogy a kiválasztott program alkalmas a folyamat számítógépen történő szimulálására. A véges elem hálózat finomításával jól megközelíthető az elméleti érték. Az adott számítógép teljesítményét figyelembe véve meghatároztam a hálózat finomsági fokozatát, amellyel elvégezhető a tudományos vizsgálat, és elegendő pontosságú a tudományos munkához.

A harmadik fejezetben a robbanási termékek és lökő hullámok terjedését vizsgáltam az alak függvényében. Légüres térbe helyezett robbanótölteten elvégzett szimuláció eredményeként megállapítottam, hogy a robbanási lökőhullám jellege megegyezik a szakirodalomban megadottal.

A negyedik fejezetben a szakirodalom alapján összefoglaltam a kumulatív hatás jelenségének főbb jellemzőit. Ismertettem a kumulatív hatás megismeréséhez hozzájáruló elméleteket és a hozzájuk tartozó egyenleteket. Ezek alapján felállítottam a matematikai modellt, majd az elkészített végeelem modell megoldásaként bemutattam a jet kialakulását.

Az ötödik fejezetben áttekintettem a páncélatütés elvét, és összefoglaltam a tapasztalati képleteket. A kísérleti körülményeket figyelembe véve felállítottam a számítógépes modellt, és az elvégzett szimuláció eredményeit összevetettem a kísérleti eredményekkel.

Mindezek alapján a kumulatív hatáson alapuló haditechnikai eszközök és rendszerek fejlesztésére vonatkozó kutatási munkám során elért tudományos értékű eredményeim (téziseim) az alábbiak:

1. Kísérletek végrehajtásával matematikai modellt dolgoztam ki a kumulatív hatás modellezésére, mely modell alkalmas volt gyorsan lejátszódó folyamatoknak a valóságot megközelítő körülmények figyelembevételével történő modellezésére.
2. Kialakítottam és programoztam olyan paramétereket a végeelem eljárás alkalmazásában, amelyek időben lerövidítették a program futását, de a kapott eredmények az elfogadott tűrésen belül maradtak, így alkalmasak a korrekt kutatási munka végzésére.
3. Bebizonyítottam, hogy a végeelem-programmal kapott eredmények és modellek összhangban vannak a gyakorlati, robbantási és mechanikai vizsgálatokkal, a kísérletek eredményeivel. A megfelelően tervezett kísérletekkel bizonyítom, hogy a modell és a számítási eljárás gyakorlati tervezések során alkalmazható.

AZ ÉRTEKEZÉS AJÁNLÁSAI

Értekezésemben elvégeztem egy brizáns robbanási folyamat és egy a kumulatív hatáson alapuló páncél áttörés szimulációját. Az elért eredmények lehetővé teszik, hogy a kutatások több irányban is folytatódjanak.

A technika fejlődésével a nagyobb teljesítményű számítógépeken a paraméterek finomításával még pontosabb eredményeket kaphatunk.

Lehetőség nyílik a nagyon gyorsan lejátszódó jelenségek és folyamatok teljes megismerésére, és így a bennük rejlő, eddig feltáratlan erőforrások hasznosítására, a véghatás javítására.

A vizsgált szoftver alkalmazható már meglévő eszközök tovább fejlesztésére, illetve új eszközök kialakítására. A program segítségével optimalizálhatóak a fejlesztések, a költségek, az idő és a személyi erőforrások tekintetében.

A program látványos képi megjelenése lehetővé teszi alkalmazását az oktatásban és különféle prezentációk elkészítéshez.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] <http://www.sipri.org/yearbook/2010/files/SIPRIYB201005-AB.pdf>
Letöltve:2010.10.31.
- [2] http://www.honvedelem.hu/cikk/0/15417/hatalmas_osszegeket_emeszt_fel_a_fegyverkezes.html Letöltve:2009.06.20.
- [3] http://www.hm.gov.hu/hirek/kozlemenyek/2009._evi_koltsegvetes_terv_sajtokozlemeney Letöltve:2009.06.20.
- [4] Hadtudományi lexikon Magyar Hadtudományi Társaság 1995
- [5] Hatala András: Üreges töltetek II. rész Haditechnika 2010/3 pp. 61.-64.
- [6] Sipos Jenő - Bugyás József: A végeelem-módszer kialakulása és katonai műszaki alkalmazása, Bolyai Szemle, 20005/2, pp.77.-92. ISSN:1416.-1443.
- [7] Sipos Jenő: Lövéskor fellépő igénybevételek hatása a tüzérségi és harckocsi rézhüvelyek meghibásodására Repüléstudományi Közlemények, különszám 2002 pp. 49.-54.
- [8] J. Csurgai- J. Zelenák- T. Lajos- I. Goricsán-L. Halász- Á. Vincze- J. Solymosi: Numerical simulation of transmission of NBC materials AARMS 5. köt. 3. szám pp.417.-434. 2006
- [9] Ács B.- Csók L.- Csurgai L.- Halász L.: ABV anyagok terjedésének numerikus, számítógépes szimulációja Haditechnika, 2005 (1) pp.13.-19.
- [10] Lendvay M. – Zsigmond Gy.: Komplex villamos rendszerek megbízhatóság-elemzési módszerei, Hadtudomány, 2004 /2. pp. 110.-116. ISSN 1215-4121
- [11] Petrik Olivér- Huba Antal- Szász Gábor. Rendszertechnika Tankönyvkiadó, Budapest, 1986

- [12] Petrik Olivér: Finommechanika Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974
ISBN 963 10 0454 6
- [13] C.A Felippa: Introduction of Advanced applications of FEM
<http://www.colorado.edu/engineering/cas/courses.d/IFEM.d/IFEM.Ch01.d/IFEM.Ch01.Slides.d/IFEM.Ch01.Slides.pdf> Letöltve: 2008.01.31.
- [14] H.C. Martin – G.F. Carrey: Bevezetés a végeselem analízisbe, Műszaki Könyvkiadó, 1976 ISBN 963 10 1301 4
- [15] Bojtár Imre – Gáspár Zsolt: Tartók statikája IV. Műegyetem kiadó 2002
- [16] Kurutzné Kovács Márta- Scharle Péter: A végeselem-módszer egyszerű elemei és elemcsaládjai, Műszaki Könyvkiadó, 1985 ISBN 963 10 5995 2
- [17] Clough, R.W., „The finite element method in Plane Stress Analysis” Proseding of 2nd ASCE Conference on Electronic Computation, Pittsburg , 1960 szept.
- [18] Levy, S., "Computation of Influence Coefficients for Aircraft Structures with Discontinuities and Sweepback", J. Aeron. Sci., 14. köt., 10. sz., pp. 547.-560. 1947 október.
- [19] Argyris, J.H.-Kelsey, S. "Energy Theorems and Structural Analysis" Butterworth, London 1960
- [20] Levy, S., " Structural Analysis and Influence Coefficients for Delta Wings", J. Aeron Sci. 20. köt., 7. sz. pp. 449.-457. 1953. július
- [21] Turner, M.J., Clough, R.W., Martin, H.C., and Topp, L.P., "Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures," J. Aeronautical Science, 23. köt., 9. sz. pp. 805.-824. 1956
- [22] Melosh, R.J., A Stiffness Matrix for the Analysis of Thin Plates in Bending Aeronautical Science, 28. köt. 1. sz. pp. 34.-42. 1961. január
- [23] Adini, A.-Clough, R.W., "Analysis of Plate Bending by the Finite Element Method", Repct. to Natl.Sci. Found., G7337. eng sz. 1961

- [24] Lunder, C. A.: "Derivation of a Stiffness Matrix for a Right Triangular Plate in Bending and Subjected to Initial Stresses," masters of science disszertáció, Department of Aeronautics and Astronautics, University of Washington, 1962. Seattle.
- [25] McMahan, L. L.: "Development and Application of the Direct Stiffness Method for Out-of-Plane Bending Using a Triangular Plate Element," masters of science disszertáció, Department of Aeronautics and Astronautics, University of Washington, 1962. Seattle.
- [26] Tocher, J. L.: "Analysis of Plate Bending Using Triangular Elements," doktori disszertáció, Civil Engineering Department, University of California, 1962. Berkeley.
- [27] Greene, B. E.-Strome, D. R.-Weikel, R. C.: Application of the Stiffness Method to the Analysis of Shell Structures, Am. Soc. Mech. Engr. paper 61-AV-58, 1961.
- [28] Swedlos, J. L.-Yang, W. H.: Stiffness Analysis of Elastic-Plastic Plates, Grad. Aeron. Lab., Calif. Inst. Technol. SM 65-10, 1965.
- [29] Felippa, C. A.: Refined Finite Element Analysis of Linear and Nonlinear Two-Dimensional Structures, Civil Engr. Dept., Univ. of Calif. Berkeley Rept. 66-22. sz., 1966.
- [30] Felippa, C. A. Clough, R. W.: The Finite Element Method in Solid Mechanics, elhangzott a "Numerical soln. Field Probl. Continuum Mech." szimpóziumon Durham, N. C., 1968. április.
- [31] Edward R. Champion Jr.: Finite element analysis in manufacturing engineering, McGraw-Hill, Inc. 1992 ISBN 0 07 010510 3
- [32] Barna József: A kumulatív hatás. Elmélet és gyakorlat. IVth International Symposium on Defence Technology, 2006, Budapest
- [33] <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ca486cc7cefa44d98ee67d2f5eb7d21f> Letöltve: 2008.01.31.

- [34] Benson DJ. Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes. Comput Methods Appl Mech Eng 1992; 99:p235-394
- [35] Varga József: Robbantás és műszaki zárás (Tansegédlet) 1983 ZMKA
- [36] Mader Ch.L., Numerical modeling of explosives and propellants, 2nd edition, CRC Press ISBN 0-8493-3149-8
- [37] Jardin, S. C., and Hoffman, R., "Simulation of Explosive Processes in PISCES-1DL," 1972, Physics International Company.
- [38] Lee EL, Hornig HC, Kury 3W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products, UCRL-50422.: Lawrence Radiation Laboratory, University of California; 1968.
- [39] Yong Lu-Zhongqi Wang-KarenChong: A comparative study of buried structure in soil subjected to blast load using 2D and 3D numerical simulation. Soil dynamics and earthquake engineering, Vol 25. Issue 4 2005 p275-288 ISSN 0267-7261
- [40] Lee, E.L. and Tarver, C.M., "Phenomenological Model of Shock Initiation in Heterogeneous Explosives," Physics of Fluids 23 (12), December 1980,
- [41] Bugyjas József: Számítógépes szimulációval végrehajtott robbanási folyamat modellezése és elemzése, Elektronikai technológia, mikrotechnika 48.évf. 1-2.sz. pp.. 3.-9. HU ISSN 0236-8676 2009
- [42] Bugyjas József:: Effects of the modeling results of increasing finite element numbers, Hadmérnök V.évf. 2.szám pp. 65-72 2010 június ISSN 17885-1919
- [43] Lukács László: A kumulatív hatás és a kumulatív töltetek méretezése. Egyetemi Jegyzet a Szárazföldi Haderőnemi Fakultás műszaki hallgatói számára, ZMKA 1992
- [44] Robbantómesterek kézikönyve, Országos Magyar Bányászati és Kohászati Egyesület, Budapest,1986

- [45] Charles E. Munroe: Modern explosives, Scribner's Magazine, Vol. III. p. 574., 1888.
- [46] T. M. Szalamahin: Asznovi modeliroványija i bajevájá efektyivnosztyi zárjádov raszrusényijá I.rész Kujbisev Katonai- Műszaki Akadémia, 1984. Moszkva
- [47] Pintér Gábor: A kumulatív hatás 2006
http://bop.agria.hu/index.php?option=com_content&task=view&id=225&Itemid=33 Letöltve: 2008. május. 20.
- [48] Johnson, G., Cook, W.: A constitutive model and data for metal subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In Proceedings 7 th International Symposium on Ballistics. The Hague (The Netherlands), 1983, pp. 541.–547.
- [49] Diószegi Imre: Harckocsi védelmének új eszköze: a reaktív páncél,
<http://www.haditechnika.hu/ARCHIVUM/199003/900302.htm> Letöltve: 2007. november 04.
- [50] Chou,P.C.-Flis, W.J.:Recent developments in shaped charge technology. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1986.11. k.4.sz

AZ ÉRTEKEZÉSBEN HASZNÁLT JELÖLÉSRENDSZER

Irodalom, irodalom hivatkozások

Az értekezésem elkészítése során hivatkozott irodalmakat a „Hivatkozott irodalom” című, nem sorszámozott fejezetben adom meg. Minden hivatkozott irodalmat szögletes zárójelek közé zárt sorszámmal jelölök, például [1]. Oldalszám szerinti hivatkozásnál szintén a szögletes zárójeleket alkalmazom, de a zárójelben a feltüntetett irodalom sorszáma mellé kiegészítő információkat is teszek, melyeket kötőjellel választok el. Például az [1 – p.45] hivatkozás azt jelenti, hogy az [1] irodalom 45. oldalán található a hivatkozott tartalom. Abban az esetben, ha az adott oldalon egy bekezdésre teszek

hivatkozást, azt az oldalszámot követő „/” jelet követő számmal adom meg. Jogszabályi hivatkozásoknál az oldalszám helyett a paragrafusszámot jelzem, például [2 - §4].

Matematikai összefüggések, levezetések

Minden matematikai kifejezést, képletet, összefüggést kapcsos zárójelek közé zárt számmal jelölök. A számozás annak a fejezetnek (alfejezetnek) a sorszámával kezdődik, melyben az összefüggés definiált. A számozás második tagja futó sorszám, mely kötőjellel kapcsolódik az első taghoz. Például a {2.3. - 2.} a 2.3. alfejezetben a 2. összefüggés jelölésére szolgál. Az összefüggésekre a hivatkozásokat szintén ugyanezen formában teszem meg.

Ábrák és táblázatok

Az értekezésben szereplő ábrák és táblázatok sorszámot kaptak. A sorszám itt is két tagból áll. Az első tag a fejezet, vagy alfejezet sorszáma, míg a második tag az adott fejezetben folyamatosan növekvő futó sorszám. A két tag szintén kötőjellel kapcsolódik. A sorszámot az „ábra” vagy a „táblázat” felirat követi. Az ábrák és a táblázatok külön, egymástól szeparáltan számozódnak. Az ábrák és sorszámok összefoglalását az „Ábrák jegyzéke”, Táblázatok jegyzéke” sorszámozatlan fejezetben adom meg. Ugyanezen összefoglalóban tüntettem fel az ábrák és a táblázatok forrását is.

Melléletek, melléklet hivatkozások

Az értekezésben MSC Patran és MSC Dytran programokat használtam. A belőlük nyert ábrák és adatok nagyrészt a mellékletben kaptak helyet azért, hogy ezek ne zavarják az értekezés olvashatóságát. Csak azok kerülnek közvetlenül a dolgozatba, amelyek az adott helyen szükséges levezetésekhez vagy magyarázatokhoz szükségesek. A mellékletre hivatkozást szintén szögletes zárójelben teszem meg, de a sorszámot „M”-el egészítettem ki. A melléklet azonosító szám a következőképpen épül fel: [M fejezet szám – futó sorszám]. Például az [M2 - 1] azt jelenti, hogy a második fejezethez tartozó első melléklet.

MELLÉKLETEK

M1.-1. A béléskúp anyagállandói

Copper, Cu; Cold-Worked		
Categories:	Metal; Nonferrous Metal; Copper Alloy; Pure Element	
Material Notes:	<p>Cold-worked applies only to tensile and/or hardness values; other property values are typical of the element. This entry is for pure Cu, MatWeb also has entries for many alloys.</p> <p>In general, copper alloys exhibit good to excellent corrosion resistance and high thermal conductivity and very high electrical conductivity. Pure copper's electrical conductivity is so high that many metals are measured against it in the form of the IACS (International Annealed Copper Standard). Applications include architectural uses, coinage, condenser/heat exchangers, plumbing, radiator cores, musical instruments, locks, fasteners, hinges, ammunition components, and electrical connectors. Small amounts of alloying elements are often added to copper to improve certain characteristics. Alloying can increase or reduce the strength, hardness, electrical and thermal conductivity, corrosion resistance, or change the color. Common primary alloying elements include tin (resulting in bronze) or zinc (resulting in brass).</p>	
Vendors:	No vendors are listed for this material. Please click here if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.	
Physical Properties	Metric	English
Density	7.94 g/cc	0.287 lb/in ³
	8.96 g/cc	0.324 lb/in ³
	7.764 g/cc @Temperature 1300 °C	0.2805 lb/in ³ @Temperature 2370 °F
	7.846 g/cc @Temperature 1200 °C	0.2835 lb/in ³ @Temperature 2190 °F
	7.924 g/cc @Temperature 1100 °C	0.2863 lb/in ³ @Temperature 2010 °F
	8.93 g/cc @Temperature 20.0 °C	0.323 lb/in ³ @Temperature 68.0 °F
Chemical Properties	Metric	English
Atomic Number	29	29
Thermal Neutron Cross Section	3.80 barns/atom	3.80 barns/atom
X-ray Absorption Edge	1.38 Å	1.38 Å
	11.269 Å	11.269 Å
	12.994 Å	12.994 Å

	13.2578 Å	13.2578 Å
Electrode Potential	-0.520 V	-0.520 V
	-0.340 V	-0.340 V
Electronegativity	1.90	1.90
Ionic Radius	0.720 Å	0.720 Å
	0.960 Å	0.960 Å
Electrochemi-cal Equivalent	1.185 g/A/h	1.185 g/A/h
	2.38 g/A/h	2.38 g/A/h
Mechanical Properties	Metric	English
Hardness, Brinell	89	89
Hardness, Rockwell A	35	35
Hardness, Rockwell B	51	51
Hardness, Vickers	100	100
Modulus of Elasticity	110 GPa	16000 ksi
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi
Poissons Ratio	0.350	0.350
Shear Modulus	46.0 GPa	6670 ksi
Electrical Properties	Metric	English
Electrical Resistivity	0.00000170 ohm-cm	0.00000170 ohm-cm
Magnetic Susceptibility	-8.00e-8	-8.00e-8
Thermal Properties	Metric	English
Heat of Fusion	204.8 J/g	88.10 BTU/lb
Heat of Vaporization	5234 J/g	2252 BTU/lb
CTE, linear	16.4 μm/m-°C @Temperature 20.0 - 100 °C	9.11 μin/in-°F @Temperature 68.0 - 212 °F
	18.5 μm/m-°C @Temperature 250 °C	10.3 μin/in-°F @Temperature 482 °F
	20.2 μm/m-°C @Temperature 500 °C	11.2 μin/in-°F @Temperature 932 °F

	24.8 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$ @Temperature 925 $^{\circ}\text{C}$	13.8 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^{\circ}\text{F}$ @Temperature 1700 $^{\circ}\text{F}$
Specific Heat Capacity	0.385 $\text{J}/\text{g}\cdot^{\circ}\text{C}$	0.0920 $\text{BTU}/\text{lb}\cdot^{\circ}\text{F}$
Thermal Conductivity	385 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	2670 $\text{BTU}\cdot\text{in}/\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^{\circ}\text{F}$
	357 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ @Temperature 727 $^{\circ}\text{C}$	2480 $\text{BTU}\cdot\text{in}/\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^{\circ}\text{F}$ @Temperature 1340 $^{\circ}\text{F}$
	398 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ @Temperature 27.0 $^{\circ}\text{C}$	2760 $\text{BTU}\cdot\text{in}/\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^{\circ}\text{F}$ @Temperature 80.6 $^{\circ}\text{F}$
	401 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ @Temperature 0.000 $^{\circ}\text{C}$	2780 $\text{BTU}\cdot\text{in}/\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^{\circ}\text{F}$ @Temperature 32.0 $^{\circ}\text{F}$
	483 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ @Temperature -173 $^{\circ}\text{C}$	3350 $\text{BTU}\cdot\text{in}/\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^{\circ}\text{F}$ @Temperature -279 $^{\circ}\text{F}$
	10500 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ @Temperature -253 $^{\circ}\text{C}$	72900 $\text{BTU}\cdot\text{in}/\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^{\circ}\text{F}$ @Temperature -423 $^{\circ}\text{F}$
	19600 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ @Temperature -263 $^{\circ}\text{C}$	136000 $\text{BTU}\cdot\text{in}/\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^{\circ}\text{F}$ @Temperature -441 $^{\circ}\text{F}$
Melting Point	1083.2 - 1083.6 $^{\circ}\text{C}$	1981.8 - 1982.5 $^{\circ}\text{F}$
Optical Properties	Metric	English
Emissivity (0-1)	0.150	0.150
Reflection Coefficient, Visible (0-1)	0.630	0.630
Component Elements Properties	Metric	English
Copper, Cu	100 %	100 %
CAS Number	7440-50-8	

M2.-1. 216 csomópontot és 125 CHEXA elemre hálózott robbanó töltet D1_1.bdf kiterjesztésű állománya

```
$
$ --- Define 216 grid points ---
$
GRID,1,, .00000, .00000, .00000
GRID,2,,.0030000, .00000, .00000
GRID,3,,.0060000, .00000, .00000
GRID,4,,.0090000, .00000, .00000
GRID,5,,.0120000, .00000, .00000
GRID,6,,.0150000, .00000, .00000
GRID,7,, .00000,.0030000, .00000
GRID,8,,.0030000,.0030000, .00000
GRID,9,,.0060000,.0030000, .00000
GRID,10,,.0090000,.0030000, .00000
GRID,11,,.0120000,.0030000, .00000
GRID,12,,.0150000,.0030000, .00000
GRID,13,, .00000,.0060000, .00000
GRID,14,,.0030000,.0060000, .00000
GRID,15,,.0060000,.0060000, .00000
GRID,16,,.0090000,.0060000, .00000
GRID,17,,.0120000,.0060000, .00000
GRID,18,,.0150000,.0060000, .00000
GRID,19,, .00000,.0090000, .00000
GRID,20,,.0030000,.0090000, .00000
GRID,21,,.0060000,.0090000, .00000
GRID,22,,.0090000,.0090000, .00000
GRID,23,,.0120000,.0090000, .00000
GRID,24,,.0150000,.0090000, .00000
GRID,25,, .00000,.0120000, .00000
GRID,26,,.0030000,.0120000, .00000
GRID,27,,.0060000,.0120000, .00000
GRID,28,,.0090000,.0120000, .00000
GRID,29,,.0120000,.0120000, .00000
GRID,30,,.0150000,.0120000, .00000
GRID,31,, .00000,.0150000, .00000
GRID,32,,.0030000,.0150000, .00000
GRID,33,,.0060000,.0150000, .00000
GRID,34,,.0090000,.0150000, .00000
GRID,35,,.0120000,.0150000, .00000
GRID,36,,.0150000,.0150000, .00000
GRID,37,, .00000, .00000,.0030000
GRID,38,,.0030000, .00000,.0030000
GRID,39,,.0060000, .00000,.0030000
GRID,40,,.0090000, .00000,.0030000
GRID,41,,.0120000, .00000,.0030000
GRID,42,,.0150000, .00000,.0030000
GRID,43,, .00000,.0030000,.0030000
GRID,44,,.0030000,.0030000,.0030000
GRID,45,,.0060000,.0030000,.0030000
GRID,46,,.0090000,.0030000,.0030000
GRID,47,,.0120000,.0030000,.0030000
GRID,48,,.0150000,.0030000,.0030000
GRID,49,, .00000,.0060000,.0030000
GRID,50,,.0030000,.0060000,.0030000
GRID,51,,.0060000,.0060000,.0030000
GRID,52,,.0090000,.0060000,.0030000
GRID,53,,.0120000,.0060000,.0030000
GRID,54,,.0150000,.0060000,.0030000
GRID,55,, .00000,.0090000,.0030000
GRID,56,,.0030000,.0090000,.0030000
GRID,57,,.0060000,.0090000,.0030000
GRID,58,,.0090000,.0090000,.0030000
GRID,59,,.0120000,.0090000,.0030000
GRID,60,,.0150000,.0090000,.0030000
GRID,61,, .00000,.0120000,.0030000
GRID,62,,.0030000,.0120000,.0030000
GRID,63,,.0060000,.0120000,.0030000
GRID,64,,.0090000,.0120000,.0030000
GRID,65,,.0120000,.0120000,.0030000
GRID,66,,.0150000,.0120000,.0030000
GRID,67,, .00000,.0150000,.0030000
GRID,68,,.0030000,.0150000,.0030000
GRID,69,,.0060000,.0150000,.0030000
GRID,70,,.0090000,.0150000,.0030000
GRID,71,,.0120000,.0150000,.0030000
GRID,72,,.0150000,.0150000,.0030000
GRID,73,, .00000, .00000,.0060000
GRID,74,,.0030000, .00000,.0060000
GRID,75,,.0060000, .00000,.0060000
GRID,76,,.0090000, .00000,.0060000
GRID,77,,.0120000, .00000,.0060000
GRID,78,,.0150000, .00000,.0060000
GRID,79,, .00000,.0030000,.0060000
GRID,80,,.0030000,.0030000,.0060000
GRID,81,,.0060000,.0030000,.0060000
GRID,82,,.0090000,.0030000,.0060000
GRID,83,,.0120000,.0030000,.0060000
GRID,84,,.0150000,.0030000,.0060000
GRID,85,, .00000,.0060000,.0060000
GRID,86,,.0030000,.0060000,.0060000
GRID,87,,.0060000,.0060000,.0060000
GRID,88,,.0090000,.0060000,.0060000
GRID,89,,.0120000,.0060000,.0060000
GRID,90,,.0150000,.0060000,.0060000
GRID,91,, .00000,.0090000,.0060000
GRID,92,,.0030000,.0090000,.0060000
GRID,93,,.0060000,.0090000,.0060000
GRID,94,,.0090000,.0090000,.0060000
GRID,95,,.0120000,.0090000,.0060000
GRID,96,,.0150000,.0090000,.0060000
GRID,97,, .00000,.0120000,.0060000
GRID,98,,.0030000,.0120000,.0060000
GRID,99,,.0060000,.0120000,.0060000
GRID,100,,.0090000,.0120000,.0060000
GRID,101,,.0120000,.0120000,.0060000
GRID,102,,.0150000,.0120000,.0060000
GRID,103,, .00000,.0150000,.0060000
GRID,104,,.0030000,.0150000,.0060000
GRID,105,,.0060000,.0150000,.0060000
GRID,106,,.0090000,.0150000,.0060000
GRID,107,,.0120000,.0150000,.0060000
GRID,108,,.0150000,.0150000,.0060000
GRID,109,, .00000, .00000,.0090000
GRID,110,,.0030000, .00000,.0090000
GRID,111,,.0060000, .00000,.0090000
```

GRID,112,,.0090000,.00000,.0090000
 GRID,113,,.0120000,.00000,.0090000
 GRID,114,,.0150000,.00000,.0090000
 GRID,115,,.00000,.0030000,.0090000
 GRID,116,,.0030000,.0030000,.0090000
 GRID,117,,.0060000,.0030000,.0090000
 GRID,118,,.0090000,.0030000,.0090000
 GRID,119,,.0120000,.0030000,.0090000
 GRID,120,,.0150000,.0030000,.0090000
 GRID,121,,.00000,.0060000,.0090000
 GRID,122,,.0030000,.0060000,.0090000
 GRID,123,,.0060000,.0060000,.0090000
 GRID,124,,.0090000,.0060000,.0090000
 GRID,125,,.0120000,.0060000,.0090000
 GRID,126,,.0150000,.0060000,.0090000
 GRID,127,,.00000,.0090000,.0090000
 GRID,128,,.0030000,.0090000,.0090000
 GRID,129,,.0060000,.0090000,.0090000
 GRID,130,,.0090000,.0090000,.0090000
 GRID,131,,.0120000,.0090000,.0090000
 GRID,132,,.0150000,.0090000,.0090000
 GRID,133,,.00000,.0120000,.0090000
 GRID,134,,.0030000,.0120000,.0090000
 GRID,135,,.0060000,.0120000,.0090000
 GRID,136,,.0090000,.0120000,.0090000
 GRID,137,,.0120000,.0120000,.0090000
 GRID,138,,.0150000,.0120000,.0090000
 GRID,139,,.00000,.0150000,.0090000
 GRID,140,,.0030000,.0150000,.0090000
 GRID,141,,.0060000,.0150000,.0090000
 GRID,142,,.0090000,.0150000,.0090000
 GRID,143,,.0120000,.0150000,.0090000
 GRID,144,,.0150000,.0150000,.0090000
 GRID,145,,.00000,.00000,.0120000
 GRID,146,,.0030000,.00000,.0120000
 GRID,147,,.0060000,.00000,.0120000
 GRID,148,,.0090000,.00000,.0120000
 GRID,149,,.0120000,.00000,.0120000
 GRID,150,,.0150000,.00000,.0120000
 GRID,151,,.00000,.0030000,.0120000
 GRID,152,,.0030000,.0030000,.0120000
 GRID,153,,.0060000,.0030000,.0120000
 GRID,154,,.0090000,.0030000,.0120000
 GRID,155,,.0120000,.0030000,.0120000
 GRID,156,,.0150000,.0030000,.0120000
 GRID,157,,.00000,.0060000,.0120000
 GRID,158,,.0030000,.0060000,.0120000
 GRID,159,,.0060000,.0060000,.0120000
 GRID,160,,.0090000,.0060000,.0120000
 GRID,161,,.0120000,.0060000,.0120000
 GRID,162,,.0150000,.0060000,.0120000
 GRID,163,,.00000,.0090000,.0120000
 GRID,164,,.0030000,.0090000,.0120000
 GRID,165,,.0060000,.0090000,.0120000
 GRID,166,,.0090000,.0090000,.0120000
 GRID,167,,.0120000,.0090000,.0120000
 GRID,168,,.0150000,.0090000,.0120000
 GRID,169,,.00000,.0120000,.0120000
 GRID,170,,.0030000,.0120000,.0120000
 GRID,171,,.0060000,.0120000,.0120000

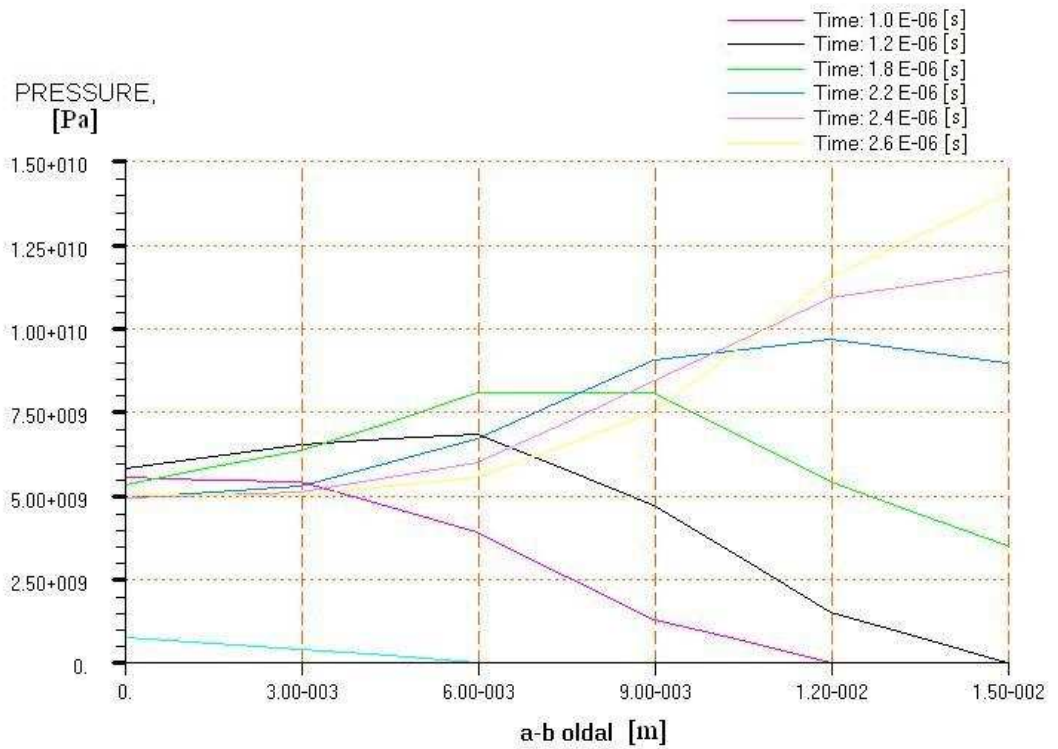
GRID,172,,.0090000,.0120000,.0120000
 GRID,173,,.0120000,.0120000,.0120000
 GRID,174,,.0150000,.0120000,.0120000
 GRID,175,,.00000,.0150000,.0120000
 GRID,176,,.0030000,.0150000,.0120000
 GRID,177,,.0060000,.0150000,.0120000
 GRID,178,,.0090000,.0150000,.0120000
 GRID,179,,.0120000,.0150000,.0120000
 GRID,180,,.0150000,.0150000,.0120000
 GRID,181,,.00000,.00000,.0150000
 GRID,182,,.0030000,.00000,.0150000
 GRID,183,,.0060000,.00000,.0150000
 GRID,184,,.0090000,.00000,.0150000
 GRID,185,,.0120000,.00000,.0150000
 GRID,186,,.0150000,.00000,.0150000
 GRID,187,,.00000,.0030000,.0150000
 GRID,188,,.0030000,.0030000,.0150000
 GRID,189,,.0060000,.0030000,.0150000
 GRID,190,,.0090000,.0030000,.0150000
 GRID,191,,.0120000,.0030000,.0150000
 GRID,192,,.0150000,.0030000,.0150000
 GRID,193,,.00000,.0060000,.0150000
 GRID,194,,.0030000,.0060000,.0150000
 GRID,195,,.0060000,.0060000,.0150000
 GRID,196,,.0090000,.0060000,.0150000
 GRID,197,,.0120000,.0060000,.0150000
 GRID,198,,.0150000,.0060000,.0150000
 GRID,199,,.00000,.0090000,.0150000
 GRID,200,,.0030000,.0090000,.0150000
 GRID,201,,.0060000,.0090000,.0150000
 GRID,202,,.0090000,.0090000,.0150000
 GRID,203,,.0120000,.0090000,.0150000
 GRID,204,,.0150000,.0090000,.0150000
 GRID,205,,.00000,.0120000,.0150000
 GRID,206,,.0030000,.0120000,.0150000
 GRID,207,,.0060000,.0120000,.0150000
 GRID,208,,.0090000,.0120000,.0150000
 GRID,209,,.0120000,.0120000,.0150000
 GRID,210,,.0150000,.0120000,.0150000
 GRID,211,,.00000,.0150000,.0150000
 GRID,212,,.0030000,.0150000,.0150000
 GRID,213,,.0060000,.0150000,.0150000
 GRID,214,,.0090000,.0150000,.0150000
 GRID,215,,.0120000,.0150000,.0150000
 GRID,216,,.0150000,.0150000,.0150000
 \$
 \$ --- Define 125 elements
 \$
 \$ ----- property set HE -----
 CHEXA,1,1,1,2,8,7,37,38,+A000001
 +A000001,44,43
 CHEXA,2,1,2,3,9,8,38,39,+A000002
 +A000002,45,44
 CHEXA,3,1,3,4,10,9,39,40,+A000003
 +A000003,46,45
 CHEXA,4,1,4,5,11,10,40,41,+A000004
 +A000004,47,46
 CHEXA,5,1,5,6,12,11,41,42,+A000005
 +A000005,48,47
 CHEXA,6,1,7,8,14,13,43,44,+A000006

+A000006,50,49
 CHEXA,7,1,8,9,15,14,44,45,+A000007
 +A000007,51,50
 CHEXA,8,1,9,10,16,15,45,46,+A000008
 +A000008,52,51
 CHEXA,9,1,10,11,17,16,46,47,+A000009
 +A000009,53,52
 CHEXA,10,1,11,12,18,17,47,48,+A000010
 +A000010,54,53
 CHEXA,11,1,13,14,20,19,49,50,+A000011
 +A000011,56,55
 CHEXA,12,1,14,15,21,20,50,51,+A000012
 +A000012,57,56
 CHEXA,13,1,15,16,22,21,51,52,+A000013
 +A000013,58,57
 CHEXA,14,1,16,17,23,22,52,53,+A000014
 +A000014,59,58
 CHEXA,15,1,17,18,24,23,53,54,+A000015
 +A000015,60,59
 CHEXA,16,1,19,20,26,25,55,56,+A000016
 +A000016,62,61
 CHEXA,17,1,20,21,27,26,56,57,+A000017
 +A000017,63,62
 CHEXA,18,1,21,22,28,27,57,58,+A000018
 +A000018,64,63
 CHEXA,19,1,22,23,29,28,58,59,+A000019
 +A000019,65,64
 CHEXA,20,1,23,24,30,29,59,60,+A000020
 +A000020,66,65
 CHEXA,21,1,25,26,32,31,61,62,+A000021
 +A000021,68,67
 CHEXA,22,1,26,27,33,32,62,63,+A000022
 +A000022,69,68
 CHEXA,23,1,27,28,34,33,63,64,+A000023
 +A000023,70,69
 CHEXA,24,1,28,29,35,34,64,65,+A000024
 +A000024,71,70
 CHEXA,25,1,29,30,36,35,65,66,+A000025
 +A000025,72,71
 CHEXA,26,1,37,38,44,43,73,74,+A000026
 +A000026,80,79
 CHEXA,27,1,38,39,45,44,74,75,+A000027
 +A000027,81,80
 CHEXA,28,1,39,40,46,45,75,76,+A000028
 +A000028,82,81
 CHEXA,29,1,40,41,47,46,76,77,+A000029
 +A000029,83,82
 CHEXA,30,1,41,42,48,47,77,78,+A000030
 +A000030,84,83
 CHEXA,31,1,43,44,50,49,79,80,+A000031
 +A000031,86,85
 CHEXA,32,1,44,45,51,50,80,81,+A000032
 +A000032,87,86
 CHEXA,33,1,45,46,52,51,81,82,+A000033
 +A000033,88,87
 CHEXA,34,1,46,47,53,52,82,83,+A000034
 +A000034,89,88
 CHEXA,35,1,47,48,54,53,83,84,+A000035
 +A000035,90,89
 CHEXA,36,1,49,50,56,55,85,86,+A000036
 +A000036,92,91
 CHEXA,37,1,50,51,57,56,86,87,+A000037
 +A000037,93,92
 CHEXA,38,1,51,52,58,57,87,88,+A000038
 +A000038,94,93
 CHEXA,39,1,52,53,59,58,88,89,+A000039
 +A000039,95,94
 CHEXA,40,1,53,54,60,59,89,90,+A000040
 +A000040,96,95
 CHEXA,41,1,55,56,62,61,91,92,+A000041
 +A000041,98,97
 CHEXA,42,1,56,57,63,62,92,93,+A000042
 +A000042,99,98
 CHEXA,43,1,57,58,64,63,93,94,+A000043
 +A000043,100,99
 CHEXA,44,1,58,59,65,64,94,95,+A000044
 +A000044,101,100
 CHEXA,45,1,59,60,66,65,95,96,+A000045
 +A000045,102,101
 CHEXA,46,1,61,62,68,67,97,98,+A000046
 +A000046,104,103
 CHEXA,47,1,62,63,69,68,98,99,+A000047
 +A000047,105,104
 CHEXA,48,1,63,64,70,69,99,100,+A000048
 +A000048,106,105
 CHEXA,49,1,64,65,71,70,100,101,+A000049
 +A000049,107,106
 CHEXA,50,1,65,66,72,71,101,102,+A000050
 +A000050,108,107
 CHEXA,51,1,73,74,80,79,109,110,+A000051
 +A000051,116,115
 CHEXA,52,1,74,75,81,80,110,111,+A000052
 +A000052,117,116
 CHEXA,53,1,75,76,82,81,111,112,+A000053
 +A000053,118,117
 CHEXA,54,1,76,77,83,82,112,113,+A000054
 +A000054,119,118
 CHEXA,55,1,77,78,84,83,113,114,+A000055
 +A000055,120,119
 CHEXA,56,1,79,80,86,85,115,116,+A000056
 +A000056,122,121
 CHEXA,57,1,80,81,87,86,116,117,+A000057
 +A000057,123,122
 CHEXA,58,1,81,82,88,87,117,118,+A000058
 +A000058,124,123
 CHEXA,59,1,82,83,89,88,118,119,+A000059
 +A000059,125,124
 CHEXA,60,1,83,84,90,89,119,120,+A000060
 +A000060,126,125
 CHEXA,61,1,85,86,92,91,121,122,+A000061
 +A000061,128,127
 CHEXA,62,1,86,87,93,92,122,123,+A000062
 +A000062,129,128
 CHEXA,63,1,87,88,94,93,123,124,+A000063
 +A000063,130,129
 CHEXA,64,1,88,89,95,94,124,125,+A000064
 +A000064,131,130
 CHEXA,65,1,89,90,96,95,125,126,+A000065
 +A000065,132,131
 CHEXA,66,1,91,92,98,97,127,128,+A000066

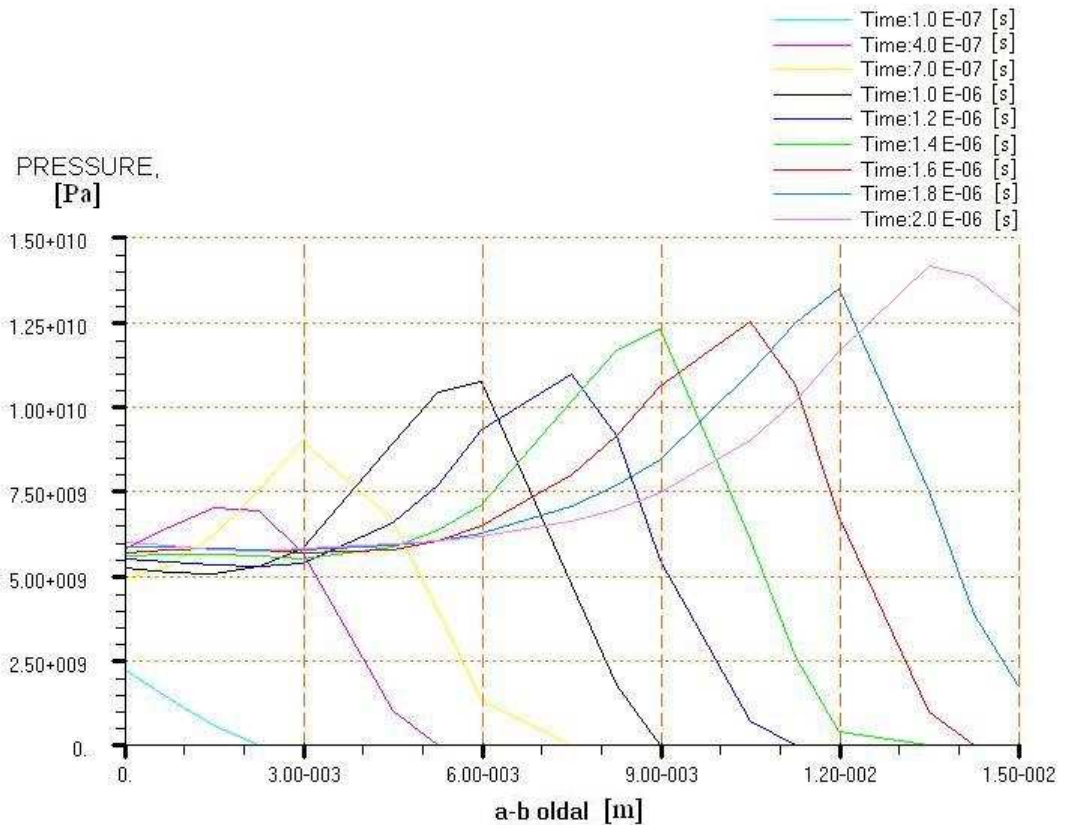
+A000066,134,133
 CHEXA,67,1,92,93,99,98,128,129,+A000067
 +A000067,135,134
 CHEXA,68,1,93,94,100,99,129,130,+A000068
 +A000068,136,135
 CHEXA,69,1,94,95,101,100,130,131,+A000069
 +A000069,137,136
 CHEXA,70,1,95,96,102,101,131,132,+A000070
 +A000070,138,137
 CHEXA,71,1,97,98,104,103,133,134,+A000071
 +A000071,140,139
 CHEXA,72,1,98,99,105,104,134,135,+A000072
 +A000072,141,140
 CHEXA,73,1,99,100,106,105,135,136,+A000073
 +A000073,142,141
 CHEXA,74,1,100,101,107,106,136,137,+A000074
 +A000074,143,142
 CHEXA,75,1,101,102,108,107,137,138,+A000075
 +A000075,144,143
 CHEXA,76,1,109,110,116,115,145,146,+A000076
 +A000076,152,151
 CHEXA,77,1,110,111,117,116,146,147,+A000077
 +A000077,153,152
 CHEXA,78,1,111,112,118,117,147,148,+A000078
 +A000078,154,153
 CHEXA,79,1,112,113,119,118,148,149,+A000079
 +A000079,155,154
 CHEXA,80,1,113,114,120,119,149,150,+A000080
 +A000080,156,155
 CHEXA,81,1,115,116,122,121,151,152,+A000081
 +A000081,158,157
 CHEXA,82,1,116,117,123,122,152,153,+A000082
 +A000082,159,158
 CHEXA,83,1,117,118,124,123,153,154,+A000083
 +A000083,160,159
 CHEXA,84,1,118,119,125,124,154,155,+A000084
 +A000084,161,160
 CHEXA,85,1,119,120,126,125,155,156,+A000085
 +A000085,162,161
 CHEXA,86,1,121,122,128,127,157,158,+A000086
 +A000086,164,163
 CHEXA,87,1,122,123,129,128,158,159,+A000087
 +A000087,165,164
 CHEXA,88,1,123,124,130,129,159,160,+A000088
 +A000088,166,165
 CHEXA,89,1,124,125,131,130,160,161,+A000089
 +A000089,167,166
 CHEXA,90,1,125,126,132,131,161,162,+A000090
 +A000090,168,167
 CHEXA,91,1,127,128,134,133,163,164,+A000091
 +A000091,170,169
 CHEXA,92,1,128,129,135,134,164,165,+A000092
 +A000092,171,170
 CHEXA,93,1,129,130,136,135,165,166,+A000093
 +A000093,172,171
 CHEXA,94,1,130,131,137,136,166,167,+A000094
 +A000094,173,172
 CHEXA,95,1,131,132,138,137,167,168,+A000095
 +A000095,174,173
 CHEXA,96,1,133,134,140,139,169,170,+A000096
 +A000096,176,175
 CHEXA,97,1,134,135,141,140,170,171,+A000097
 +A000097,177,176
 CHEXA,98,1,135,136,142,141,171,172,+A000098
 +A000098,178,177
 CHEXA,99,1,136,137,143,142,172,173,+A000099
 +A000099,179,178
 CHEXA,100,1,137,138,144,143,173,174,+A000100
 +A000100,180,179
 CHEXA,101,1,145,146,152,151,181,182,+A000101
 +A000101,188,187
 CHEXA,102,1,146,147,153,152,182,183,+A000102
 +A000102,189,188
 CHEXA,103,1,147,148,154,153,183,184,+A000103
 +A000103,190,189
 CHEXA,104,1,148,149,155,154,184,185,+A000104
 +A000104,191,190
 CHEXA,105,1,149,150,156,155,185,186,+A000105
 +A000105,192,191
 CHEXA,106,1,151,152,158,157,187,188,+A000106
 +A000106,194,193
 CHEXA,107,1,152,153,159,158,188,189,+A000107
 +A000107,195,194
 CHEXA,108,1,153,154,160,159,189,190,+A000108

+A000108,196,195	+A000117,207,206
CHEXA,109,1,154,155,161,160,190,191,+A000	CHEXA,118,1,165,166,172,171,201,202,+A000
109	118
+A000109,197,196	+A000118,208,207
CHEXA,110,1,155,156,162,161,191,192,+A000	CHEXA,119,1,166,167,173,172,202,203,+A000
110	119
+A000110,198,197	+A000119,209,208
CHEXA,111,1,157,158,164,163,193,194,+A000	CHEXA,120,1,167,168,174,173,203,204,+A000
111	120
+A000111,200,199	+A000120,210,209
CHEXA,112,1,158,159,165,164,194,195,+A000	CHEXA,121,1,169,170,176,175,205,206,+A000
112	121
+A000112,201,200	+A000121,212,211
CHEXA,113,1,159,160,166,165,195,196,+A000	CHEXA,122,1,170,171,177,176,206,207,+A000
113	122
+A000113,202,201	+A000122,213,212
CHEXA,114,1,160,161,167,166,196,197,+A000	CHEXA,123,1,171,172,178,177,207,208,+A000
114	123
+A000114,203,202	+A000123,214,213
CHEXA,115,1,161,162,168,167,197,198,+A000	CHEXA,124,1,172,173,179,178,208,209,+A000
115	124
+A000115,204,203	+A000124,215,214
CHEXA,116,1,163,164,170,169,199,200,+A000	CHEXA,125,1,173,174,180,179,209,210,+A000
116	125
+A000116,206,205	+A000125,216,215
CHEXA,117,1,164,165,171,170,200,201,+A000	
117	

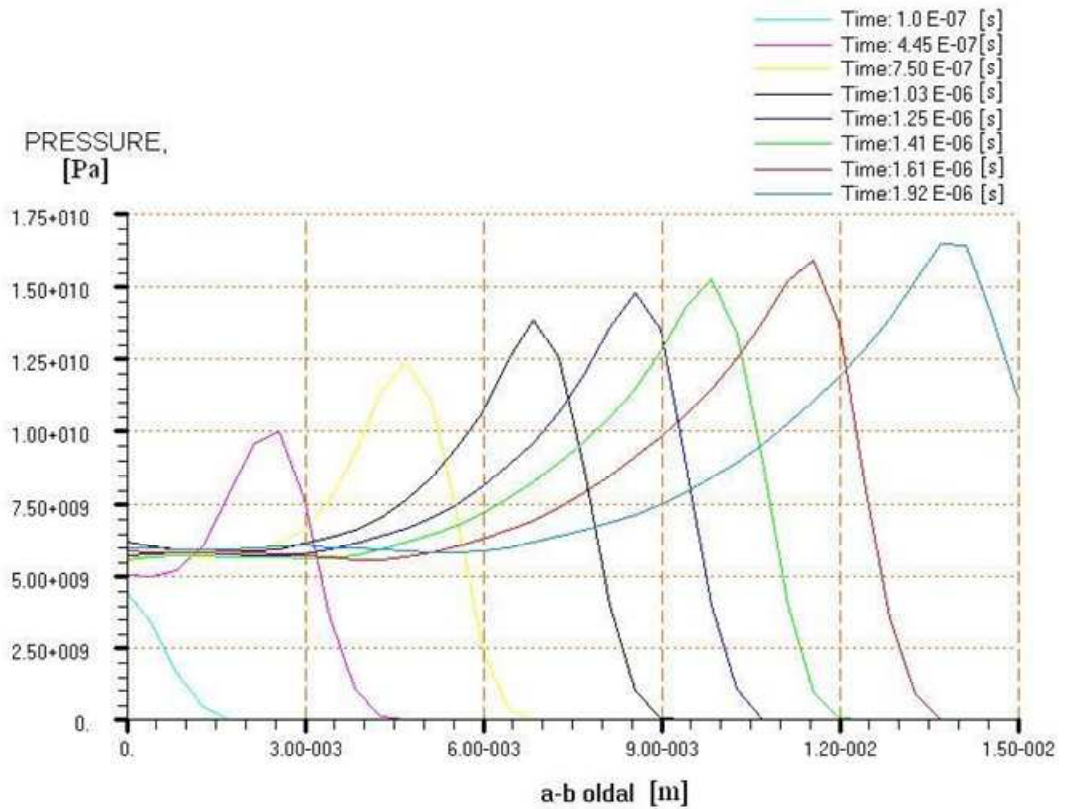
M2.-2. Nyomás alakok 125 CHEXA elem esetén



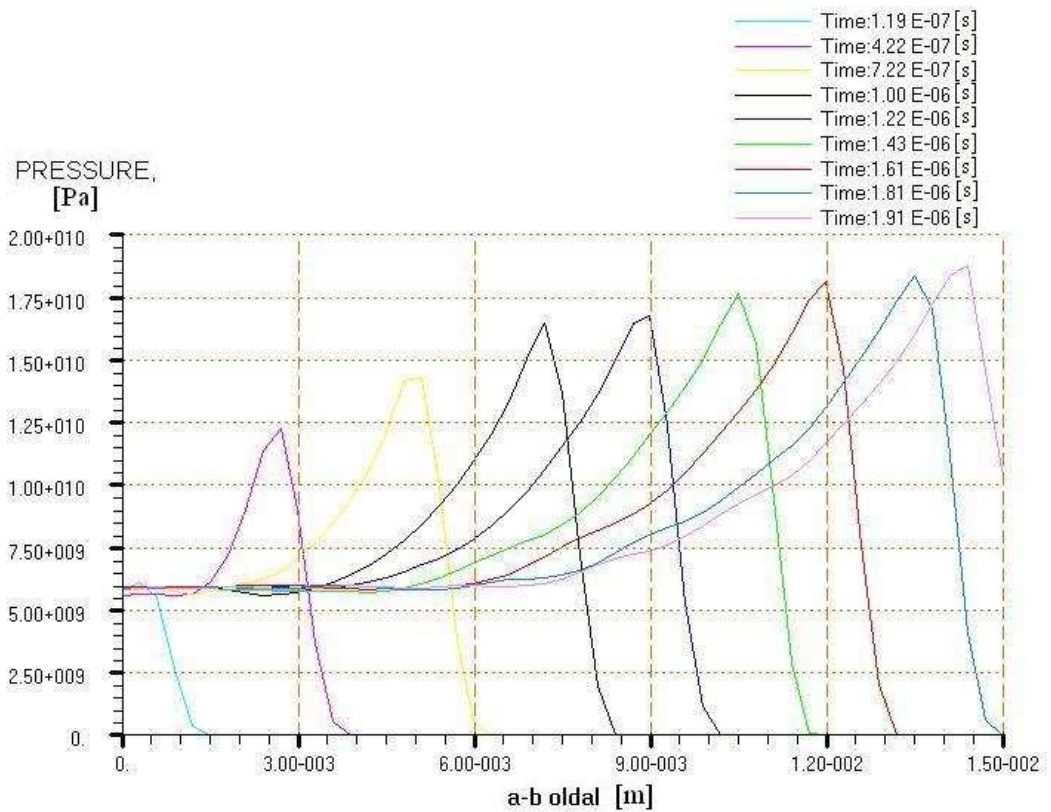
M2.-3. Nyomás alakok 3375 CHEXA elem esetén



M2.-4. Nyomás alakok 27 000 CHEXA elem esetén



M2.-5. Nyomás alakok 125 000 CHEXA elem esetén



M4.-1. gyak.dat forrás fájl

```
START
CEND
ENDTIME=6e-5
ENDSTEP=9999999
CHECK=NO
TITLE= Jobname is: gyak2
TLOAD=1
TIC=1
SPC=1
$
$ Output result for request: elemek
TYPE (elemek) = ARCHIVE
ELEMENTS (elemek) = 1
SET 1 = 1 THRU 1500
ELOUT (elemek) = XVEL YVEL ZVEL DENSITY SIE PRESSURE ENERGY
                FBURN ,
                EFFSTS EFFPLS FMAT8 FMAT5
TIMES (elemek) = 0 THRU END BY 2e-7
SAVE (elemek) = 10000
$
$ Output result for request: elemek-1
TYPE (elemek-1) = TIMEHIS
ELEMENTS (elemek-1) = 2
SET 2 = 1 THRU 1500
ELOUT (elemek-1) = XVEL YVEL ZVEL DENSITY SIE PRESSURE FMAT
                  FBURN TDET ,
                  EFFSTS EFFPLS
TIMES (elemek-1) = 0 THRU END BY 2e-7
SAVE (elemek-1) = 10000
$
$ Output result for request: mat-1
TYPE (mat-1) = TIMEHIS
MATS (mat-1) = 3
SET 3 = 5 6 8
MATOUT (mat-1) = EKIN EINT VOLUME MASS
TIMES (mat-1) = 0 THRU END BY 2e-7
SAVE (mat-1) = 10000
$
$ Output result for request: rst
TYPE (rst) = RESTART
TIMES (rst) = END
SAVE (rst) = 1
$----- Parameter Section -----
PARAM,INISTEP,1e-12
PARAM,MINSTEP,1e-13
PARAM,VELMAX,20000
```

```

$----- BULK DATA SECTION -----
BEGIN BULK
INCLUDE gyak2.bdf
$
$ ===== PROPERTY SETS =====
$
$      * p-eul *
$
PEULER1,1,, MMSTREN,7
$
$      * p-dummy *
$
PSHELL1,2,, DUMMY
$
$
$ ===== MATERIAL DEFINITIONS =====
$
$
$ ----- Material Cu-mat id =5
DMAT,5,8960,5,5,5,,5
EOSPOL,5,1.43e+011,8.39e+010,2.16e+009,,,,
SHREL,5,4.77e+010
YLDJC ,5,1.2e+008,1.43e+009,0.5,0,1,1,399,+A000001
+A000001,1356,293
PMINC,5,-2.15e+010,
$
$ ----- Material Steel-01 id =6
DMAT,6,7830,6,6,6,,6
EOSPOL,6,1.64e+011,,,,,
SHREL,6,8.18e+010
YLDVM,6,1.4e+009
PMINC,6,-3.8e+009,
$
$ ----- Material explosive id =8
DMAT,8,1630,8,8,8
EOSJWL,8,5.24229e+011,7.678e+009,4.2,1.1,0.34
SHREL,8,3e+009
YLDVM,8,2e+008
$
$ ===== Load Cases =====
$
$
$ ----- Spherical Detonation Wave: detsph -----
DETSPH,1,8,0,0,0,7980,0
$
$ ----- TICVAL BC ticval-explosive -----
TICVAL,5,,DENSITY,1630,SIE,4.95e+006
$
$ ----- TICVAL BC ticval-kup -----
TICVAL,6,

```

```
$
$ ----- TICEUL BC ticeul -----
TICEUL,7,,,,,,,,+A000002
+A000002,ELEM,4,,,1,,,+A000003
+A000003,SURF,4,5,6,2,,,,+A000004
+A000004,SURF,3,8,5,3,,,
SET1,4,1,THRU,1500
$
$ ----- Shape/Surface ss-explosive -----
MATINI,3,1,INSIDE,ON,ON
$
SURFACE,1,,ELEM,5
SET1,5,1501,THRU,2317
$
$ ----- Shape/Surface ss-kup -----
MATINI,4,2,INSIDE,ON,ON
$
SURFACE,2,,ELEM,6
SET1,6,2318,THRU,4467
$
$
ENDDATA
```

ÁBRÁK JEGYZÉKE

I.1.-1. ábra. A fizikai FEM modellje.....	10
I.2.-1. ábra. Robbanó töltetek elhelyezkedése	15
I.2.-2. ábra. A gránát főbb méretei.....	16
I.2.-3. ábra. A béléskúp méretei.....	17
I.2.-4. ábra. A robbantás gyakorlati elrendezése.....	18
I.2.-5. ábra. Helyszíni mérés	18
II.1.-1. ábra. A matematikai FEM modellje.....	23
II.2.-1. ábra. Sík reakció zóna állandó sebességű terjedése	25
II.2.-2. ábra. Hugoniot görbe és Reyleight egyenes.....	26
II.2.-3. ábra. Hugoniot görbe és Reyleight egyenes detonáció folyamatban	26
II.3.-1. ábra. A robbanó töltet jelölései	28
II.3.-2. ábra. CHEXA elem sarokpont azonosítói.....	30
II.4.-1. ábra. A kiemelt csomópontok égési folyamatai 125 CHEXA elem esetén ...	38
II.4.-2. ábra. A kiemelt csomópontok égési folyamatai 3 375 CHEXA elem esetén	39
II.4.-3. ábra. A kiemelt csomópontok égési folyamatai 27 000 CHEXA elem esetén	39
II.4.-4. ábra. A kiemelt csomópontok égési folyamatai 125 000 CHEXA elem esetén	39
II.4.-5. ábra. Nyomáscsúcs alakok.....	42
III.-1. ábra. Robbantási termékek és a lökőhullám kialakulása	43
III.1.-1. ábra. A robbanótöltet elhelyezkedése a légüres térben	44
III.2.-1. ábra. CQUAD4 típusú elem csomópontjainak értelmezése	50
III.3.-1. ábra. Az „a-b” pontok közötti csomópontok nyomás alakulása az idő függvényében.....	51
III.3.-2. ábra. Élek menti nyomás eloszlás.....	52
III.3.-3. ábra. A jelölt csomópontok feszültség eloszlása	53
III.3.-4. ábra. A lökőhullám kialakulása	53
IV.1.-1. ábra. Robbanási termékek áramlása bélés nélküli kumulatív töltet esetén ..	55
IV.1.-2. ábra. A jet kialakulása	56
IV.1.-3. ábra.	57

IV.1.-4. ábra.	58
IV.2.-1. ábra. A jet kialakulásának vázlata	59
IV.2.-2. ábra. A mozgó koordináta rendszer	60
IV.2.-3. ábra. A mozdulatlan koordináta rendszer.....	61
IV.3.-1. ábra. Robbanó töltet	63
IV.3.-2. ábra. A robbanó töltet véges elem hálózata.....	64
IV.3.-3. ábra. Az Euleri tér véges elem hálózata	65
IV.4.-1. ábra. A jet kialakulása véges elem szimulációval	70
V.1.-1. ábra. A kumulatív sugár behatolása.....	71
V.3.-1. ábra. Az átütési modell végeelem elrendezése.....	76
V.4.-1. ábra. A szimuláció eredménye.....	78
M2.-2. Nyomás alakok 125 CHEXA elem esetén	97
M2.-3. Nyomás alakok 3 375 CHEXA elem esetén	97
M2.-4. Nyomás alakok 27 000 CHEXA elem esetén	98
M2.-5. Nyomás alakok 125 000 CHEXA elem esetén	98

TUDOMÁNYOS ÉS PUBLIKÁCIÓS TEVÉKENYSÉGEK JEGYZÉKE

Hazai megjelenésű jegyzetek

- Bugyjás József: Oktatási segédlet a „Minőségbiztosítás” c. tárgy gyakorlataihoz
Kandó Kálmán Műszaki Főiskola, MTI Bp, 1997
- Bugyjás József: Általános Műszaki Ismeretek I. rész
Távoktatási jegyzet, 136/2001 I. Bp, 2001 BMF
- Bugyjás József: Általános Műszaki Ismeretek II. rész
Távoktatási jegyzet, 194/2001 II. Bp, 2001 BMF
- Bugyjás József: Elektromechanikus szerkezetek elemei
Főiskolai jegyzet, BMF KVK – 2019 Bp, 2003
- Bugyjás József: Mérnöki alapismeretek
Főiskolai jegyzet BMF-KVK - 2045 Bp. 2007.

Lektorált hazai cikkek

Wenzelné – Huba – Bugyjás – Gálfi – Szarka:

Felületek spektrális reflexió szerinti osztályozása sávszűrőzött felvételek segítségével, fekete-fehér fényképszeti eljárások alkalmazásával.

Finommechanika-Mikrotechnika, 19. évf. 1980/7. pp. 217.-223.

Wenzel Gottfriedné – Bugyjás József – Gálfi István – Szarka Károly:

Sávszűrőzött hamis-színes felvételek szelektáló képességének fokozása

Finommechanika-Mikrotechnika 20. évf. 1981. pp. 208.-213.

Sipos Jenő – Bugyjás József: A végeelem-módszer kialakulása és katonai műszaki alkalmazása, Bolyai Szemle 20005/2 pp. 77.-92. ISSN:1416-1443

Bugyjás József: Számítógépes szimulációval végrehajtott robbanási folyamat
modellezése és elemzése
Elektronikai technológia, mikrotechnika 48. évf. 1-2. sz. pp. 3.-9.
HU ISSN 0236-8676 2009

Lektorált idegen nyelvű cikkek

Bugyjás József: Effects of the modeling results of increasing finite element numbers
Hadmérnök V. évf. 2. szám, pp. 65.-72. 2010. június, ISSN 17885-1919

Konferencia kiadványok

Bugyjás József: Autóipari beszállítók minőségirányítási rendszerei
Kandó Konferencia 2002 ISBN 963 7158 03 0

Bugyjás József – Kupás-Deák Béla: Egy új típusú napóra elve és megvalósítása
Regionális Konferencia 2004, Tudományos főirányok az EU-ban
Székesfehérvár 2004. nov. 8. ISBN 963 7154 33 7

Bugyjás József: Kumulatív hatású lőszer hatásmechanismusának vizsgálata
„New Challenges in the field of military sciences 2005” 2005.10.18-19

Bugyjás József: Quality management recommendations for suppliers to NATO
XXIII. Kandó konferencia 2006, Budapest, 2006. január 12-13
ISBN 963 7154 426 (CD)

Bugyjás József: A kommutatív jelenség modellezése
II. Tudományos Szimpózium 2007 ISBN 978-963-7154-61-4

Bugyjás József – Gröller György: A polimer elektronika új eredményei
II. Tudományos Szimpózium 2007 ISBN 978-963-7154-61-4

Bugyjás József: Számítógépes szimulációval végrehajtott robbanási folyamat
modellezése és elemzése

Bugyjas József: A robbanási folyamat modellezésének problémái

„New Challenges in the field of military sciences 2009”

2009.11.18-19. ISBN 978-963-87706-4-6

Egyéb tudományos tevékenység

Bugyjas – Gálfi – Szarka: Távérzékelés fekete-fehér felvétel segítségével

BME Tudományos Diákköri Konferencia 1980

Turmezei Péter – Bugyjas József: Elektronikai eszközök minőségbiztosítása

Előadás a „Minőségügy oktatásának fejlesztése” c. konferencián

Kandó Kálmán Műszaki Főiskola Bp, 1998

Bugyjas József – Hargitay Gábor: Alsó és felső megvilágítás fényűrűségének beállítása

$\pm 3\%$ -os egyenletességgel

Vállalati újítás – Híradástechnika Szövetkezet, 1988

Bugyjas József: A végeelem-módszer és analízis alkalmazásának lehetőségei a

műszaki tudományok területén

Nyári Egyetem Bp. 2005.08.07

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

I.4.-1. Táblázat	Dytran által generált állományok
II.3.-1. Táblázat	A modellezéshez használt robbanóanyag JWL paraméterei
II.3.-2. Táblázat	1. CHEXA elem sarokpontjainak koordinátái
II.3.-3. Táblázat	Az osztásváltozással járó programsor változatok
II.4.-1. Táblázat	Égési sebességek
III.2.-1. Táblázat	A27001 –es CQUAD4 elem koordinátái
III.3.-1. Táblázat	Legnagyobb nyomásértékei és időpontjai
IV.3.-1. Táblázat	A béléskúp anyagállandói
V.1.-1. Táblázat	A kumulatív jet kritikus sebességei
V.2.-1. Táblázat	A robbantási mérési eredményei