

Óbudai Egyetem

Doktori (PhD) értekezés



SVBIED támadások elemzése, és a valószínűségi módszerek alkalmazása a védekezéssel kapcsolatos méretezési eljárásokban

Román Zsolt

Témavezető: Prof. Dr. Lukács László

Biztonságtudományi Doktori Iskola

Budapest, 2016

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK	1
Bevezetés.....	5
A tudományos probléma megfogalmazása	6
Célkitűzés.....	7
A téma kutatásának hipotézisei	8
Kutatási módszerek	9
1. AZ INFRASTRUKTÚRA VESZÉLYEZTETETTSÉGE	10
1.1. KRITIKUS INFRASTRUKTÚRA.....	10
1.1.1. Természettudományos analógia	10
1.1.2. Infrastrukturális halmazok.....	12
1.1.3. Biztonsági intézkedések	13
1.1.4. Az infrastruktúrát fenyegető veszélyforrások	17
1.2. SVBIED ROBBANTÁSOS CSELEKMÉNYEK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA MEGTÖRTÉNT TÁMADÁSOK ELEMZÉSE ALAPJÁN (ESETTANULMÁNYOK).....	20
1.2.1. A támadások háttere	20
1.2.2. Az autóbomba (VBIED) összeállítása.....	22
1.2.3. Az SVBIED robbantások elkövetési módjai	26
1.2.4. A terrorista robbantások hatásai	30
1.2.4.1. Robbanási típusok	30
1.2.4.2. Épületek és környezetük károsodása a robbanás hatására	31
1.2.4.3. Emberekre gyakorolt hatások.....	38
1.3. RÉSZKÖVETKEZTETÉSEK	41
2. MÉRETEZÉSI SZABVÁNYOK, SZABVÁNYOS ELJÁRÁSOK	42
2.1. A SZABVÁNYOK VIZSGÁLATA ROBBANTÁSVÉDELMI SZEMPONTBÓL	42
2.1.1. A szabványok jogi háttere	42
2.1.2. Szabványosítási hiányosságok a robbantásvédelem területén.....	43
2.1.3. A meglévő szabványok, előírások áttekintése.....	45
2.1.4. Hazai előírások és gyakorlat.....	49
2.2. MÉRETEZÉSELMÉLETI ALAPOK	51
2.2.1. A determinisztikus eljárás	52

2.2.2.	Fél-valószínűségi (parciális tényezős) eljárás	52
2.2.3.	Valószínűségi módszerek	53
2.2.3.1.	FOSM analízis	54
2.2.3.2.	FORM analízis	55
2.2.3.3.	Monte Carlo szimuláció	57
2.2.4.	Az optimális kockázat	59
2.3.	RÉSZKÖVETKEZTETÉSEK	61
3.	TERVEZÉS ROBBANÁSTERHERRE	62
3.1.	A ROBBANÁSI HATÁSOK LEÍRÁSA	62
3.1.1.	A robbanás és robbanóanyag fogalma	62
3.1.2.	Kísérleti robbantások.....	63
3.1.3.	A robbanás nyomásgörbéje	65
3.1.4.	Töltettényező	66
3.1.5.	Arányítási törvény	68
3.1.6.	Robbanási paraméterek meghatározása.....	70
3.2.	LÖKÉSHULLÁMOK MODELLEZÉSE	72
3.2.1.	A lökeshullámok kialakulása.....	72
3.2.2.	Rankine-Hugoniot feltétel	72
3.2.3.	A TNT állapotegyenlete	73
3.2.4.	Mach visszaverődés.....	75
3.2.5.	Kapcsolódás a numerikus áramlástanhoz.....	76
3.3.	ELVÉGZETT CFD SZÁMÍTÁSOK.....	77
3.3.1.	Védőfallal körbevett épület robbanásterhe.....	78
3.3.2.	Lökeshullám homlokzati szétterjedésének vizsgálata.....	78
3.3.3.	Kumulatív hatás vizsgálata.....	79
3.3.4.	Az ablakok hatása az utcán terjedő lökeshullámra.....	80
3.4.	LÖKÉSSZERŰ TERHEK TERVEZÉSI SAJÁTOSSÁGAI.....	81
3.4.1.	Határállapotok	81
3.4.2.	Anyagszilárdságok változása	82
3.5.	DINAMIKAI MÉRETEZÉS	83
3.5.1.	SDOF rendszer	83
3.5.2.	Az átlaggyorsulások módszere.....	84
3.5.3.	Az energiaegyensúlyi egyenlet.....	87
3.5.4.	A nyírási teherbírás ellenőrzése	88

3.5.5.	A P-I diagram	88
3.5.6.	A módszerek validálása	90
3.6.	RÉSZÖSSZEGZÉS	91
4.	VALÓSZÍNŰSÉGALAPÚ TERVEZÉS ROBBANÁSI HATÁSOKRA	92
4.1.	A SZÁMÍTÁS MENETE AZ ÁLTALÁNOS SZABVÁNYOS GYAKORLAT SZERINT	92
4.2.	A JAVASOLT, OBJEKTÍV BIZTONSÁGOT SZÁMÍTÓ ELJÁRÁS	94
4.3.	A ROBBANÁSI HATÁS STATISZTIKAI VIZSGÁLATA	96
4.3.1.	A robbanási paraméterek szórása	97
4.3.2.	A számítási modellek szórása	99
4.3.3.	Az ellenállás oldali szórások	102
4.3.4.	Korrelált változók.....	103
4.4.	VALÓSZÍNŰSÉGI MÓDSZEREK VIZSGÁLATA ROBBANÁSI TERHEK ESETÉN.....	104
4.4.1.	A valószínűségi modell és dinamikai modell párosításai.....	105
4.4.2.	Részösszegzés	110
4.4.3.	A valószínűségi módszerek összehasonlítása.....	110
4.5.	MINTAPÉLDA AZ OBJEKTÍV BIZTONSÁG KIMUTATÁSÁRA	112
4.5.1.	A $P(VBIED)_T$ valószínűség előállítása.....	112
4.5.2.	A $p(w VBIED)$ függvény előállítása	117
4.5.3.	A törékenységi görbék előállítása	119
4.5.4.	A feladatok megoldása	120
4.6.	RÉSZÖSSZEGZÉS	122
	ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK	123
	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	125
	AJÁNLÁSOK	126
	A TÉMAKÖRBEN KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓIM	127
	IRODALOMJEGYZÉK.....	129
	RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK	138
	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	139
	MELLÉKLETEK ÉS FÜGGELÉKEK	140

*„Ő változtatja meg az időket és a korokat, ő taszít le és
emel fel királyokat. Bölcsességet ad a bölcseknek, és
tudományt azoknak, akik megértik.”*

Dániel könyve 2.21

Az épületek ellen elkövetett robbantásos cselekmények rendszerint a terrorizmus kategóriájába sorolhatók, és bár a robbanóanyagok terrorista célokra történő felhasználása századokkal ezelőtt kezdődött [135], mégis a XX. században, a II. világháború után kerültek előtérbe a célzottan épületek elleni merényletek. A robbantásos merényleteket alkalmazó „harcmódor” megjelenésének okaként említhetjük többek közt a világpolitikai helyzetet, és a technikai fejlődést. A XX. század második felére új, kétpólusú világrend alakult ki, ahol a birodalmakból kimaradt térségek – így a Közel-Kelet is – gazdasági javaiért és politikai érdekszférába sorolásáért egymással küzdöttek az új birodalmak. Szintén erre az időszakra tehető Izrael állam megalapítása, és a gyarmati rendszert követő nyugati politikai-gazdasági befolyás megjelenése a térség államaiban. Ezek a tényezők azóta is feszültséget keltenek a térségben, és táptalajt biztosítanak az arab államokban felnövekvő szélsőséges ideológiáknak. A Szovjetunió felbomlása is több tűzfészket hagyott hátra (pl. Jugoszlávia), de a világban mind a mai napig sok helyen vannak etnikailag vegyes területek. Az arab világ szétesése után is maradtak olyan síita-szunnita vagy más népcsoportbeli megosztottsággal küzdő államok, mint Irak vagy Szíria, de meg lehet említeni a gyarmatosítók kivonulása utáni állapotokat Afrikában is, ahol szintén gyökeret tudott verni a terrorizmus.

A terrorizmus „*az erőszak szándékos és módszeres használata, ... félelem keltése ... amelyet a terroristák céljaik megvalósításának érdekében alkalmaznak ..., közvetve vagy közvetlen személyek ellen.*”¹ A technikai fejlődés elősegítette azt, hogy kis népcsoportok, szervezetek, vagy magánszemélyek erőszakot tudnak alkalmazni, félelmet, zavart tudnak kelteni. Az elektronikai eszközök, a mobiltelefonok, az internet mind egyszerűbbé, könnyebbé tették a merényletekhez szükséges alapanyagok és tudás megszerzését. Az átalakuló államokban a közrend hiánya miatt sok hadianyag került ellenőrizetlen kezekbe, de a robbanóanyagok házi készítése is valós veszéllyé vált.

Ezzel egy időben végbement a fejlett világ információs társadalommá alakulása, ezáltal nőtt a sebezhetősége is. A biztonság új dimenziói jelentek meg az egészségügyi biztonságtól kezdve, a környezetbiztonságon át egészen az információs biztonságig terjedően. Ezek fenntartása érdekében szükségessé vált az infrastruktúrák, és azon belül a kritikus infrastruktúrák védelme.

A II. világháború vérontása után a nyugati világban a hadsereg szerepe megváltozott: a hadsereg szolgálta a politikát és nem fordítva. Az erőszak alkalmazása a békefenntartásra, béke megteremtésére szorítkozik. Megjelenik a hadseregben a civil kontroll intézménye, a hadsereg az államot szolgálja. Az emberi élet felértékelődött, civilé és katonáé egyaránt. Ennek szellemében **a védelmi szempontok előtérbe kerültek**. A megannyi katonai védelmi fejlesztés közül egy apró, de önálló szegmenst képeznek **a robbantások hatásai ellen való védekezés eszközei**. A civil-katonai együttműködés rendszerében a nyugati világban a védelmi kutatásokban oroszán szerepet vállal a civil szféra, ahol a kutató mérnökök komoly piacként tekintenek a hadsereg és a védelmi iparra. Napjainkban minden adott ahhoz, hogy a fegyveres szervek is alkalmazza-

¹ *Idézet: Biztonságpolitikai Szemle – Corvinák: Terrorizmus p. 1 [1]*

nak olyan tudományos elméleteket, amelyek a civil szférában már bizonyították eredményességüket, ilyenek pl. a döntéstámogató módszerek, kockázatelemzés és a teljes valószínűségi módszerek.

A TUDOMÁNYOS PROBLÉMA MEGFOGALMAZÁSA

Az objektív² biztonság meghatározása

A jelenleg hatályos magyar jogszabályok³ az infrastruktúra védelem területén előírják az üzemeltetőknek a kockázatelemzés elvégzését, melyet a következőképpen definiálnak: „*fenyegetettségi és kockázati tényezők vizsgálata a rendszerelemek sebezhetőségének, valamint a megzavarásuk vagy megsemmisítésük által okozott következmények értékelése céljából*”. Ez a jogi megfogalmazás egy olyan feladat elvégzését takarja, amelyet az üzemeltető vállalatok – a szükséges szaktudás hiányában – nem feltétlenül tudnak elvégezni. A szakirodalom több lehetséges módszert is megemlít, a kockázatelemzés elvégzése egy adott cég specifikus részegységére vonatkozóan egyáltalán nem magától értetődő feladat.

A kockázatelemzés során az R kockázatot a P_F tönkremeneteli valószínűség és a C következmény szorzataként definiálják:

$$R = P_F \cdot C$$

A következmény nehezen számszerűsíthető (ld. emberéletek elvesztése), a tönkremeneteli valószínűség számításához pedig nem állnak rendelkezésre hasonló múltbéli események adatai, így a kockázatszámítás szubjektív szempontok alapján, kvalitatív módszerrel történik. Ezekben a számításokban fiktív mérőszámokat rendelnek olyan jellemzőkhöz, mint pl. a célpont vonzósága, értéke, sebezhetősége. Más fiktív skálákon értékelik a célpont sérülése esetén a keletkező anyagi kárt és az áldozatok számát. A kapott értékek alapján a célpont besorolható különböző kockázati osztályokba, ami alapján eldönthető, hogy megfelel-e az elvárásoknak. Szükség esetén valamilyen fejlesztéssel javítható az eredmény, például csökkenthető a sebezhetőségi indexe egy álcázással, vagy csökkenthető a kár a szerkezet megerősítésével.

Ilyen módszert alkalmaz több amerikai segédlet is, pl. a UFC 4-020-01 [2] és a JFOB Force Protection Handbook [134]. A módszer előnye, hogy a klasszikus valószínűségszámítással nem kezelhető problémákat is áthidalja, de a pontozási rendszer kialakítása meghatározó lehet, és kihangsúlyozandó, hogy **a kvalitatív pontozással inkább egymáshoz képest, vagy egy szubjektív skálán lehet a különböző objektumokat⁴ értékelni, nem egy abszolút skálán.**

A hatás meghatározása

A mérnöki tervezés (tartószerkezeti méretezés) két alappillére: a hatás és az ellenállás. A szerkezetek tervezése során az azt érő hatásokkal szemben ellenállás lép fel, mely egy nem kívánatos tönkremeneteli állapot bekövetkezte ellen dolgozik. A hatás ismerete nélkül relativizálódik

² Objektív biztonság: egy bizonyos modellterben számolt, biztonságot véges számértékkel jellemző mennyiség.

³ 65/2013. (III. 8.) Korm. rendelet a létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről szóló 2012. évi CLXVI. törvény végrehajtásáról. 1.§ és 2. sz. melléklet, 1.3. f) [130]

⁴ A továbbiakban az „objektum” kifejezés jelentése: fegyveres támadás által veszélyeztetett létesítmény, műtárgy.

az ellenállás, mint ahogyan az ellenállás ismerete nélkül sem használható a hatás értéke önmagában. A VBIED támadások tekintetében szükséges tehát ismerni a W robbanóanyag mennyiségét, ez az adat azonban jelenleg nem áll kellő részletességgel rendelkezésre, hiánya tudományos problémaként vethető fel. A W mennyiség meghatározási módszerei szintén behatároltak, ezért tudományos problémának számít egy eredményes meghatározási módszer hiánya is.

A méretezés elvégzése

A szabályos körülmények között való robbantások paramétereinek leírása már kellő részletességgel megtörtént. A szabálytalanságok (formált töltetek, komplex környezeti geometria) kezelésének elméleti háttere készen áll, a numerikus áramlástan segítségével megoldható a robbanási paraméterek számítása. Azonban a megannyi különböző szabálytalanság hatása mind a mai napig kutatási téma, **így a VBIED töltetek formájának hatása még körüljáratlan tudományos probléma.**

Az egy adott (determinisztikus) robbanási hatással szemben fellépő ellenállás meghatározására a mérnöki szakma már kidolgozta a különböző pontosságú számítási modelleket (energiaegyen-súlyi egyenlet, átlaggyorsulások módszere). Ezek a számítások általános dinamikai ismeretek birtokában elvégezhetők. Szintén rendelkezésre állnak a bonyolult és kifinomult problémák megoldására a számítógéppel támogatott végeselemes módszerre épülő eljárások (explicit tranziens végeselem módszer).

Szintén kidolgozásra kerültek már a hatást és ellenállást valószínűségi változóként kezelő megbízhatósági méretezési módszerek (FORM, Monte Carlo). **Jelenleg is kutatás alatt lévő – Magyarországon pedig mindeddig nem vizsgált – terület azonban a robbanási méretezési eljárások adaptációja az említett valószínűségi módszerekbe.**

A következő tudományos kérdés vethető fel: **mekkora teherre kell tervezni az adott típusú robbanás ellen védett szerkezetet, és hogyan mutatható ki az elvárt biztonsági szint a dinamikai és méretezésméleti módszerek segítségével?**

CÉLKITŰZÉS

Az értekezés terjedelmi korlátja, valamint a problémakörben azonosított megoldatlan és kevésbé kutatott problémák miatt az értekezésben csak a gépjárműben elhelyezett robbanóanyagokkal elkövetett támadásokkal foglalkozok.

Az értekezés nem terjed ki a lőfegyverek hatásaira, tűzhatásra, hadianyagok klasszikus értelemben vett használata esetén fellépő hatásokra (pl.: rakéta becsapódás, aknavető támadás, nehéz-tűzérség támadása). Nem foglalkozik továbbá a katonai táborok védelmének kialakítási szabályaival, az alkalmazott termékekkel és az erre vonatkozó katonai alkalmazási segédletek [134] előírásaival.

Munkám során:

- tanulmányozom a múltbeli támadásokat bemutató videofelvételeket a felhasználható információk érdekében,
- becslést teszek a hatás forrásaként szolgáló robbanóanyag mennyiségre vonatkozóan,

- vázlatosan bemutatom a robbanási hatások meghatározásának módjait, és az így kapott dinamikai terhekre történő méretezési eljárásokat,
- bemutatom a jelenleg elterjedt valószínűségelméleti méretezési eljárásokat, és megvizsgálom alkalmazhatóságukat a különböző számítási modellek esetében,
- megvizsgálom, milyen paraméterekkel vehetők fel a hatás és ellenállás oldali valószínűségi változók,
- ahol lehetséges, ott a szakirodalmi adatokat az általam elvégzett (felügyelt) kísérleti robbantások adataival vetem össze,
- numerikus áramlástani számításokat végzek a komplex lökéshullám terjedés vizsgálatára, ezen belül megvizsgálom a VBIED-k töltetalakjának hatását,
- megvizsgálom a különböző szintű dinamikai és méretezéselméleti módszerek párosíthatóságát,
- bemutatok egy kvantitatív eljárást, ahol objektív szempontok alapján dönthető el, hogy az adott szerkezeti elem megfelel, vagy sem. Az eljárás nem a kockázatelemzés előbbi pontban említett módszerével él, hanem sokkal inkább a mérnöki tervezés metodikáját alkalmazza, ahol a **P_F tönkremeneteli valószínűséget a keletkező kár alapján meghatározott elfogadható tönkremeneteli valószínűséggel** (ld. 2.2.4. fejezet) **vetjük össze.**
- A tervezési folyamatot egy mintapéldán mutatom be, ahol a vizsgált objektum egy közel-keleti katonai létesítmény, amely a magyar védelmi infrastruktúra egyik eleme,
- a használt eljárások alkalmazására és a tervezési szituáció megoldására **programokat írok (Mathcad környezetben)**, amelyek a későbbiekben alapul szolgálhatnak a rendfenntartó, katonai szervek védelmi képességeinek fokozásában,
- a kidolgozott módszereket, programokat katonai-mérnöki felhasználásra szánom, tehát egy átlagos felsőfokú végzettséggel rendelkező számára érthetőnek és alkalmazhatónak, továbbá a probléma megoldására általánosan érvényesnek kell lenniük.

A TÉMA KUTATÁSÁNAK HIPOTÉZISEI

A téma kutatásával kapcsolatban – és azt megelőzően – az alábbi hipotéziseket teszem:

- a terrorista robbantásokat elkövető merénylők propaganda felvételei hasznos információkkal szolgálhatnak a robbantások elleni védekezésre vonatkozóan,
- feltételezhető, hogy a kritikus infrastruktúra elemeknél a jövőben a fizikai védelem során vizsgálni kell a robbantások hatásait is,
- feltételezem, hogy kialakítható egy olyan eljárás, amivel kvantitatív módon a jelenleg szabványosan előírt biztonság kimutatható robbantásos cselekmények esetén,
- feltételezem, hogy ez az eljárás használható a létfontosságú infrastruktúra elemek védelmének kialakítása során is.

- Dedukció: „a gondolkodás a megfigyelés felé halad” – a már megismert számítási elméletek összekapcsolásával új elméletet állítok fel.
- Naturális kísérletek (kísérleti lőtéri robbantások) és mesterséges kísérletek (számítógépes modellezések) – a legmeghatározóbb kutatási módszer, mely magába foglalja: a megfigyelést, a tárgyi analízist és szintézist, valamint a mérést.
- Összehasonlítás: elméleti-logikai módszer, a különböző eljárások összevetése során a különbségek és hasonlóságok kerülnek feltárára.
- Megfigyelés: a háborús övezetekben készült videofelvételek elemzése.
- Fentiek tükrében az elvégzett kutatás elsősorban **primer** kutatásnak minősül.

Az írott források (nyomtatott és elektronikus egyaránt) tekintetében az elsődleges forrásokat (kutatási jelentéseket), és másodlagos forrásokat (ezekre épülő tankönyveket) használtam. Több műszaki szabvány és gyakorlati útmutató is szerepel a felhasznált anyagok között, ezek közt van korlátozott hozzáférésű anyag is.

Az esettanulmányok forrásai olyan videofelvételek melyek egyrészt támaszpontok biztonsági kameráinak felvételei, média felvételek, másrészt – és nagyobb részt – a terrorista csoportok saját készítésű, interneten közzétett propaganda felvételei.

2012-2013-ban részt vettem a „*TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások*” elnevezésű projekt "Építmények védelme, megerősítése robbantásos cselekmények ellen" című kiemelt kutatási terület munkájában. A kutatás során alkalmam nyílt részt venni a kor színvonalának megfelelő robbanássterhekkel foglalkozó konferenciákon, numerikus modellezési oktatáson, illetve az egyik legnagyobb, amerikai robbanásvédelmi statikus iroda is fogadott egy egy hetes oktatáson. Ezek a teljesség igénye nélkül a következők:

- 22th International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock (MABS22), Bourges, France, 2012. november 4-9.;
- Baker Engineering and Risk Consultants: Design of Blast Resistant Structures Course, Washington, USA, 2013. március 11-15.;
- ANSYS explicit modellezési eljárások ANSYS (5 napos oktatás) eCon Engineering Kft.

Szintén a kutatás során nyílt alkalom a következőkre:

- Látogatás és konzultáció 2002-ben a NATO Counter IED Kiválósági Központjában: (NATO C-IED COE), Madrid, Spanyolország, 2012. augusztus 01-04.
- International Conference on Military Technologies, ICMT 2013 – Csehország, Brno
- Counter Terror Expo (Olympia, London) kiállítás és Workshop, 2013. április 24-25.

A kutatás során személyes hatásköröm volt a TÜV InterCert Hungary Kft. – kutatásba bevont szakértő – által kivitelezett kísérleti robbantások megtervezése, lebonyolítása, és az eredmények kiértékelése.

1. AZ INFRASTRUKTÚRA VESZÉLYEZTETETTSÉGE

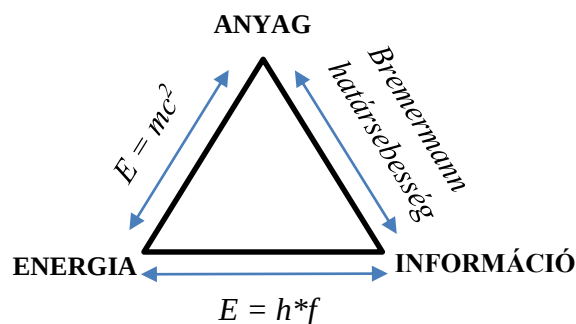
Napjainkban a védelmi igazgatás és a terrorizmus elleni védekezés kapcsán egyre jobban előtérbe kerül az infrastruktúra védelem. A közelmúlt számos eseménye világított rá arra, hogy a fegyveres konfliktusok által (is) sújtott infrastruktúra közvetlen és közvetett módon hatást gyakorol a társadalomra. Az infrastruktúra védelme tehát nemcsak összekapcsolódik, hanem – a jövőbeni szabályozásoktól függően – magába is olvaszthatja a robbantások elleni védekezést.

Ebben a fejezetben vázlatosan áttekintem, mit nevezünk infrastruktúrának, és mi a jelentősége a modern társadalomban. Kitérek a veszélyforrásokra, részletesen megvizsgálva a katonai célpontok ellen elkövetett robbantásokat, és megemlítem, hol áll hazánk a védekezési felkészülés elméletében és gyakorlatában.

1.1. KRITIKUS INFRASTRUKTÚRA⁵

1.1.1. TERMÉSZETTUDOMÁNYOS ANALÓGIA

Az ember alkotta infrastruktúra és a társadalom kapcsolatát érdemes egy természettudományos analógiával szemléltetni. A modern fizika talán legnagyobb, korszakalkotó megállapítása a világ alkotóelemeinek anyag-energia-információként való meghatározása volt. Ezek közül kiemelt szerepe van a legutóbb felismert információnak. Mára szinte minden elméleti fizikus e három alkotóelem alapvetéséből indul ki. A három alkotóelem közötti kapcsolat a tudomány mai állása szerint [3] tömören összefoglalva a következő (1. ábra):



1. ábra – A három alkotóelem közti fizikai kapcsolat [3]

- A legismertebb összefüggés Einstein relativitáselmélete, ($E = mc^2$) eszerint az anyag nem más, mint összesűrített energia. Nem lehetséges a c fénysebességnél gyorsabb haladás.
- Max Planck 1900 körül felismerte, hogy az elektromágneses energia nem kontinuumként szabadul fel, hanem „csomagokban”, amelyek energiája a sugárzás frekvenciájával arányos. $E = hf$, ahol h a Planck állandó. Planck tételéből vezette le Heisenberg 1930-ban a kísérleti mérések precizítására vonatkozó korlátozó tételét, miszerint a szubatomi-kus részecskék vizsgálatakor a mérési pontosság véges, és a Planck állandóval áll kapcsolatban.

⁵ A magyar terminológiában a „kritikus” kifejezés helyett a „létfontosságú” került bevezetésre. Véleményem szerint a két kifejezés egyező tartalmú, és nem félreérthető, tehát mindkettő használatát elfogadhatónak tartom.

- Szilárd Leó 1929-es tétele tekinthető az energia és az információ közötti kapcsolatnak. Tételének lényege, hogy a Maxwell-démonnak⁶ információra van szüksége a részecskék rendezéséhez.
- Bremermann 1962-ben közölte a Bremermann-határsebességként ismert tételét, amely kimondja, hogy – egy fotont egy bitnek értelmezve – az anyag által végzett információfeldolgozás sebessége nem lehet több 10^{47} bit/gramm/sec-nál. Tétele a kódolás tudományában jelentős.

A XX. század második felében a kutatók egy részének figyelme a három alap-szubsztanciának a társadalomban és élő rendszerekben betöltött szerepe felé fordult. A társadalom az ókortól kezdve, az ipari forradalmon keresztül, a jelen és jövő korba érve mintegy végigjárta az anyag-, energia-, és végezetül az információalapú társadalom állomásait. Amikor információs társadalomról beszélünk, akkor úgy lehet a legjobban rámutatni a társadalom jellegére, ha az információs sebezhetőséget világítjuk meg. Ennek bevezetésére érdemes áttekinteni az imént említett tételektől jóval régebbi törvényeken nyugvó természettudományos analógiát.

Clausius 1865-ös energiamegmaradási törvényének értelmében egy zárt rendszer energiája állandó. Bármilyen folyamat játszódik le a rendszeren belül, az energia megjelenési formája ugyan változhat, de a mennyisége nem változik. Példaként említhető a mozgó autó fékezése, amikor a kinetikus energia hő-, és hangenergiává változik.

Clausius entrópiának nevezte a gázmolekulák rendezetlenségi fokát. Értelmezésében a nagyobb hőmérséklet (nagyobb molekulasebesség) nagyobb rendezettséget jelent. Az I. főtételt kiegészíti a II. főtétel, miszerint egy tetszőleges zárt rendszer entrópiája sohasem csökkenhet, vagyis télen az ablakot kinyitva nem a kinti néhány °C hőmérséklet jön be a meleg szobába, hanem a melegebb helyről áramlik az energia a hidegebb hely felé. De az entrópia fogalmára igaz a tétel egy közérthetőbb, szinte filozófiai felfogása is: egy esztergályos munkadarab megmunkálása-kor úgy tűnhet, hogy a rendszer rendezettebb lett, tehát az entrópiája csökkent, de a munkába bevont energiát is figyelembe véve a teljes rendszer entrópiája nő. Ennek a bizonyítását végezte el Szilárd Leó, amikor 1929-es dolgozatában⁷ azt mutatta ki, hogy a Maxwell-démon a részecskék sebességének mérésével több entrópiát termel, mint amennyi entrópiát a részecskék rendezésével a rendszer veszít.

Ha a rendszer entrópiája nem csökkenhet, akkor csak nőhet, vagy változatlan maradhat. Felvethető a kérdés, hogy mi szükséges ahhoz, hogy egy rendszer entrópiája ne változzon? A válasz Boltzmann 1894-ben megfogalmazott tétele, miszerint **ha egy zárt rendszer kívülről nem kap további anyagot, energiát, és információt, akkor elkezd felélni saját tartalékait, majd teljesítménye csökken, integritása megszűnik, és a rendszer káoszba dőlve összeomlik**⁸.

⁶ A Maxwell-démon egy Maxwell által kitalált fiktív lény, aki egy kétüregű kamrában a kamrák közt lévő kisajtot kezelve talán ellent tudna mondani a termodinamika II. főtételének oly módon, hogy információt gyűjt az éppen az ajtónál lévő molekuláról, és csak akkor nyitja ki az ajtót, ha olyan molekula jut át, ami a rendszer entrópiájának csökkenését okozza.

⁷ Leo Szilard: Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen. Zeitschrift für Physik (1929) [4]

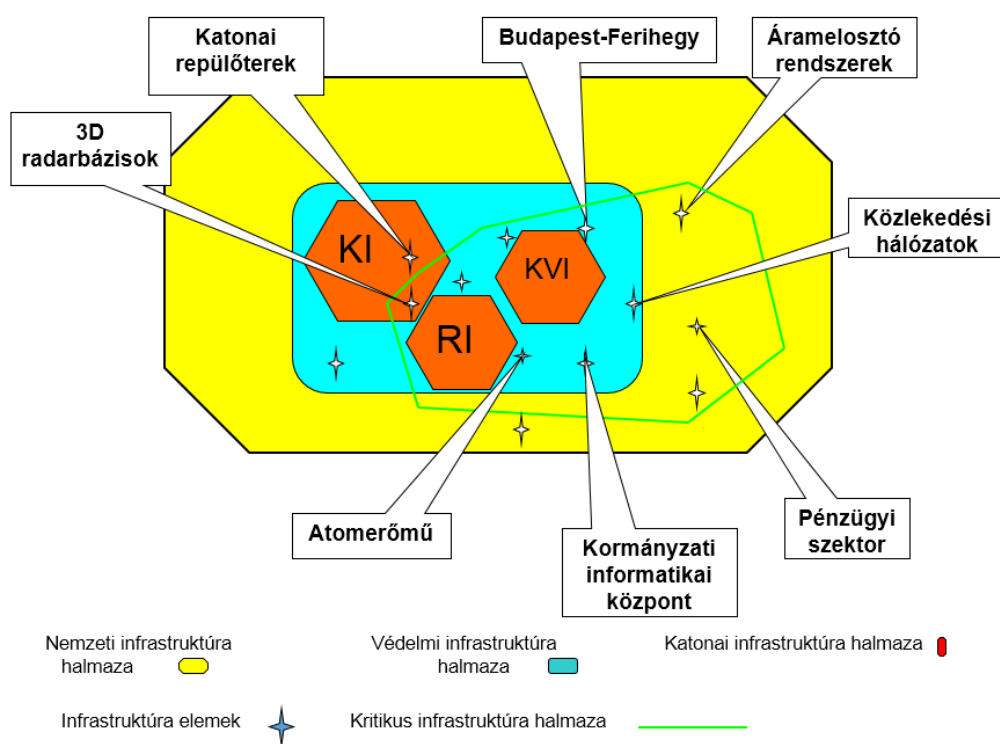
⁸ Haig Zs., Várkonyi I.: Hadviselés az információs hadszíntéren. p. 16 [5]

Boltzmann ezt a megállapítást gázok vizsgálatakor tette, de már első olvasatra láthatjuk benne az analógiát az információs társadalom sebezhetőségével: **ha a mai információs társadalom nem kap elég anyagot, energiát, vagy megszűnik az ezek rendezéséhez szükséges információs, telekommunikációs csatorna, akkor a társadalom rendje megbomlik, és a rendszer a káosz felé tart.**

Látható tehát, hogy a természetben leírható jelenség az információhiány miatti káosz. Azért fontos ezt ismerni, mert mi, élő szervezetek, és az általunk alkotott társadalom nem tud az anyagi világtól függetlenül működni. A párhuzam szükségszerű az evolucionista nézet szerint, hisz az ember a természetből „nőtt ki”, de a párhuzam következik a kreacionista nézet szerint is, hisz az ember és a természet egyazon Teremtőtől származik.

1.1.2. INFRASTRUKTURÁLIS HALMAZOK

Infrastruktúrának (magyarul: alapszerkezetnek) nevezzük a termeléshez kapcsolódó azon eszközök és intézmények összességét, amelyek nem részei a közvetlen termelési folyamatnak, viszont annak nélkülözhetetlen feltételei. Ebbe az értelmezésbe bele tartoznak a különböző ágazatokhoz tartozó módszerek is. Az infrastruktúra ágazatok kötődhetnek anyagi szolgáltatásokhoz (kereskedelem, logisztika, hírközlés), és nem anyagi szolgáltatásokhoz (egészségügy, K+F, **honvédelem**)⁹.



2. ábra – Infrastrukturális halmazok [6]

Az infrastruktúrák legfőbb jellemzői:

- Az infrastrukturális beruházások haszna más ágazatokban jelentkezik, ezért a máshol képződött profit megadóztatásából kell fedezni az újabb és újabb ilyen beruházásokat.

⁹ Dr. Kovács Ferenc: A kritikus infrastruktúra védelmének európai és hazai elvei [6]

- Kapacitással jellemezhetők.
- Előállítási költségük mellett fenntartási költségük is van. Hosszú távon a fenntartási költségek jóval nagyobbak lehetnek, mint az előállítási, illetve megépítési költségek (az igénybevétel függvényében).
- Egymástól függenek.

A kritikus infrastruktúra (továbbiakban: KI) fogalma Dr. Kovács Ferenc szerint:

„A nemzeti, szövetségi és uniós infrastruktúra azon létfontosságú elemei, melyek jelentős károsodása, üzemzavara vagy megsemmisülése súlyos következményekkel járna a nemzet vagy a nemzetek biztonságára, a gazdaságra, a környezetre és közegészségre, illetve az egyes kormányok, az állam hatékony működésére.”[6]

A védelmi infrastruktúra fogalma Dr. Halász Péter szerint:

„A védelmi infrastruktúra a nemzeti infrastruktúra azon része, amely az állami szervek működéséhez és a védelmi erők feladatainak, a védelmi feladatok ellátásához, illetve minősített időszakban a nemzetgazdaság működéséhez, a lakosság ellátásához alapvetően szükséges. Tárgyszerűen ingatlanok, létesítmények, hálózatok, eszközök, módszerek és eljárások összessége, melyhez hozzátartozik az irányítói és az üzemeltető állomány is. A védelmi infrastruktúra részét képezi a katonai infrastruktúra is.”¹⁰

A védelmi infrastruktúrák működésük során:

- Biztosítják a nélkülözhetetlen javak előállítását, szállítását és a létfontosságú szolgáltatások folyamatos elérhetőségét,
- biztosítják az ország védelmének irányításához szükséges összeköttetést és az együttműködés képességét,
- hozzájárulnak az ország belső és **külső biztonságának megteremtéséhez.**

Az infrastruktúrák halmazai nem különülnek el, szövevényesen egymásba vannak ágyazva (2. ábra). Az infrastruktúrák hálózati felépítésűek, határokon átível(het)nek. Az egymástól való függésük (interdependencia) az infrastruktúra védelem egyik kiemelt vizsgálati pontja. Az infrastruktúrák fogalmának a közelmúltban és napjainkban zajló elméleti kutatása, meghatározása segít jobban megismerni az általunk teremtett rendszert, és azt egészében látva könnyebben tudunk védelmi és optimalizáló stratégiákat kidolgozni.

1.1.3. BIZTONSÁGI INTÉZKEDÉSEK

A biztonság olyan terület, ahol kevésbé érzékelhető a befektetett pénz és energia. Csak a katasztrófák, vészhelyzetek során derül ki igazán, hogy egy ország mennyit költ a biztonságára. Egészen addig, amíg rendkívüli helyzetek nem lépnek fel, a befektetések nem szembetűnőek. Ugyanezen okból kifolyólag spórolni is ezen a területen lehet a legkönnyebben, hiszen – egészen a baj bekövetkeztéig – a kormánynak megbízást adó lakosság nem érzékel semmit a megszorításokból.

¹⁰ Halász Péter: A védelmi infrastruktúra főbb alkotó elemeinek kölcsönhatása (Phd értekezés). p. 22 [7]

Az Európai Bizottság 2005-ben adta ki a Kritikus Infrastruktúrák védelméről szóló „Zöld könyv”-et [8]. Ez előírta az EPCIP¹¹ irányelvet, amely a tagállamok részére előírja:

- EPCIP kapcsolati pont kijelölése
- ECI¹² azonosítása és kijelölése
- Szektoronkénti sebezhetőség, veszély, kockázatelemzés
- SLO/OSP (ld. alább) megfelelőségének ellenőrzése
- Jelentés az Európai Bizottságnak

Az EPCIP szerint az üzemeltető kötelezettségei:

- Biztonsági Összekötő Tisztviselő (SLO) kijelölése
- Üzemeltetői Biztonsági Terv (OSP) készítése

A KIF veszélyeztetettségének kezelésében három fő irányvonal létezik:

- Minden veszélyre kiterjedő felfogás
- **Minden veszélyre kiterjedő felfogás, középpontban a terrorizmussal (EU által adoptált stratégia)**
- A terrorizmus veszélyére összpontosító felfogás

Az EU KI kezelésének a célja: (aláhúzással jelölve azok a pontok, amelyek teljesítéséhez hozzájárulhat a KI elemek passzív, épületszerkezeti megerősítéssel történő védelme)

- A KI működési zavarai:
 - rövidek és ritkán előfordulók legyenek,
 - kezelhető legyen a probléma,
 - földrajzilag lokalizálható legyen,
 - a lakosságot minél kisebb mértékben érintse,
- csökkenteni kell a meghibásodások lehetőségét,
- gyors és ellenőrzött helyreállítási eljárások legyenek kidolgozva,
- megnövekedett biztonsági beruházási igény visszahat a piacképességre: gazdasági negatív hatások csökkentése.

Magyarországon jelenleg hatályos a **létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről** szóló 2012. évi CLXVI. törvény [124], illetve ennek a végrehajtásáról szóló 65/2013. (III. 8.) Korm. rendelet [130]. Az ezekben foglalt intézkedéseket hazánk az EU jogharmonizáció keretében hajtotta végre. Általánosságban elmondható, hogy – politikai oldaltól függetlenül – hazánkra igaz a már említett viselkedésmód, miszerint a biztonságon spórolunk. A törvény bevezetése, és a benne foglalt kötelezettségeink teljesítése során világossá vált, hogy a magyar fél a KI kijelölését és védelmét nem veszi kellően komolyan¹³. Ezt alátámasztja a civil szférában való személyes tapasztalatom is. Egy KI területen dolgozó multinacionális cégnél tett látogatásom során érdeklődtem a vállalat azonosítási eljárásának folytatásáról. A magas beosztású munkatárs a kérdésben járatlan volt, majd közölte, hogy a

¹¹ EPCIP – European Programme for Critical Infrastructure Protection – Európai Létfontosságú Infrastruktúra Védelmi Program

¹² ECI – European Critical Infrastructure – Európai Létfontosságú Infrastruktúra

¹³ A kijelölt ECI elemek listáját határidőre kellett benyújtani az EU számára. A határidő közelsége miatt a magyar fél úgy oldotta meg a problémát, hogy azt jelentette, vizsgálatai során nem talált ECI elemet Magyarországon.

vállalat ügyvédje a felelős. Ez az eset rávilágít arra a sajnálatos jelenségre, hogy a KI témája jogi kérdésként van kezelve, és a döntéshozóktól a végrehajtókig jogászok kapnak olyan hatásköröket, amelyek szakértelmet és specifikus felkészülést kívánnak.

Bár a kormányrendelet jól összegzi azokat a tennivalókat, amelyek szükségesek az ország infrastruktúrájának integrált védelméhez, meg kell jegyezni, hogy a kockázatelemzéstől az azonosítási jelentésig mindent az üzemeltető hatáskörébe helyez. Jelenleg tisztázatlan, hogy az üzemeltetőknek honnan lesz kapacitása és megfelelő szaktudása a felmerülő műszaki problémák megoldására.

A vállalati szektor megjelenő igényeire már több hazai cég is kínál megoldásokat. Azonosítási jelentés és ÜBT készítését vállalja pl. a Profes Kft., az Imsys Kft., és a Generisk Kft. A felsorolt cégek egyikét megkerestem azzal a kérdéssel, hogy felmerült-e már valamelyik munkájukban robbantásos cselekmény, mint veszélyforrás, és ha igen, hogyan kezelték. A válasz szerint nem fordult még elő, hogy ilyen veszélyforrással dolgozzanak.

A vonatkozó KI irányelvek meghatározzák a KI-vá nyilvánítás kritériumait (mekkora területet érintsen, mekkora anyagi kárt okozzon), de nem ad tájékoztatást arról, hogy a kijelölt objektumok számára mi az elérendő biztonság (mi a cél kockázat), és milyen műszaki megoldásokkal javasolt azt elérni. Előre láthatóan ezen a téren a szakhatóságok fognak előírást készíteni, de jelenleg az itthoni KI védelem bevezetése még nem tart ebben a szakaszban.

Az alkalmazásra kerülő rendszerrel szemben az itthoni szakmai életben már meg is fogalmazódtak az aggodalmak [39]:

- félő, hogy az üzemeltető nem fogja teljes körűen elvégezni saját maga felmérését, és az alkalmazott javító intézkedések is csekély anyagi ráfordításúak lesznek,
- a jogszabály szerint az azonosításkor figyelembe vett kritériumot a vizsgált rendszerem biztos tönkremenetelére kell megnézni (következmény-alapú vizsgálat). Ez egy általánosított vizsgálat, ami növeli a vizsgálandó elemek számát, ez pedig érzékeny a meghúzott kritériumokra. Ha a veszélyeztetettség is figyelembe van véve a vizsgálatkor, akkor realisabb kép kapható a valódi kritikus infrastruktúra elemekről (ilyen azonosítási rendszert használnak az USA-ban), ehhez azonban több és bonyolultabb számítást kellene végezni.

Az USA-ban alkalmazott azonosítási folyamat tulajdonképpen nem más, mint a már korábban említett szubjektív kockázatelemzés. Véleményem szerint ennek a módszernek bár vannak hátrányai, **de eredményesen lehetne használni az azonosítási folyamatban. Ezekkel éppen a kiválasztást segítő, egymáshoz képest való pontosítás lenne megoldható a KI elemek között. Az objektív biztonság kimutatására csak később, a védelem kialakításakor van szükség.**

Magyarországon az alábbi területek lettek a KI tárgykörébe sorolva (az ezeken a területeken lévő elemeket, szereplőket kell megvizsgálni, és dönteni, hogy KI elemmé jelöljük-e):

- Informatikai és kommunikációs rendszerek,
- Távközlés,
- Energiatermelés és elosztás,
- Vízellátás-közművek,
- Szállítás és közlekedés,

- Közegészségügy,
- Élelmiszer-ellátás,
- Bank- és pénzügyi szektor,
- Katasztrófavédelem,
- Honvédelem-védelmi ipar,
- Rendészeti szektor.

Az EU mellett a NATO is aktív a KI védelme területén. A NATO a KI kérdését polgári veszélyhelyzeti tervezés keretében kezeli (CEP), a tervezésben és a felkészítésben segíti a nemzeteket. A NATO a tevékenységében:

- kiemelten foglalkozik a KI kutatásával és a védelmi tevékenységgel,
- felmérést, feltérképezést sürget,
- katonai követelményeket érvényesít,
- nemzetközi együttműködést ösztönöz.

A NATO eredményei a KI védelme terén¹⁴:

- figyelemfelhívás 2001-től,
- kutatás és fogalom meghatározás,
- civil és katonai együttműködés fejlesztése,
- KI védelmével kapcsolatos információ gyűjtés és áramlás segítése,
- eltérő felkészültség kiegyensúlyozása,
- alapvető közösségi szolgáltatások meghatározása (még csak cél),
- **kutatás fejlesztés, KI kockázatkezelés elméleti megalapozása (kutatásom ehhez a területhez kapcsolódik),**
- közös szakértői háttér megteremtése.

A NATO 2007-es jelentése [10] alapján a kockázatkezelés elméletén a NATO is a disszertáció elején a tudományos probléma felvetésében vázolt eljárást követi, ami szubjektív, összehasonlító jellegű kockázatelemzést tesz lehetővé.

A NATO jelentés szerint az alkalmazott biztonsági intézkedések lehetnek:

- fizikai intézkedések,
- elektronikus (kiber) intézkedések,
- emberi (személyi) intézkedések,
- szervezeti intézkedések,
- a felsoroltakon belül pedig rövid-, vagy hosszú távú intézkedések.

A kutatásom során bemutatásra kerülő módszerrel a fizikai intézkedéseket lehet számítani és optimalizálni. Az alkalmazási időtartam bemeneti paraméter a számítási eljárásban, tehát szabadon változtatható.

A kockázatelemzés egyik nemzetközileg elismert szaktekintélye David Lacey, aki bár elsősorban az információ biztonság területén aktív, a kockázatkezeléssel kapcsolatos meglátásai általános érvényűek [11]. Felhívja a figyelmet arra az egyébként a mérnöktársadalomban is meg-

¹⁴ Dr. Kovács Ferenc: A kritikus infrastruktúra védelme I. [9]

lévő veszélyre, hogy a számítást végző ember túlságosan hisz a számoknak, és a bonyolult eljárásoknak. Hangsúlyozza, hogy a „*kockázatelemzés egy mérőszalag, nem pedig óvintézkedés*”¹⁵, az emberi tényező jelentősége nagyobb, mint azt hinnénk. **Nem a kifinomult modellezések ellen szól**, de hangsúlyozza, hogy a bemenő paraméterek megbízhatóságára hangsúlyt kell fektetni, és a tervezőnek a veszélyeztetettséget mindig szubjektív módon is mérlegelnie kell.

A biztonsági beruházások rendkívül költségesek, a biztonsági szint emelése visszahat a gazdaság teljesítményére. Ezt nevezhetjük globálisan értelmezett visszahatásnak. Ugyanakkor mikro szinten is érzékelhető a biztonsági szint növelésének hatása: az aktív biztonsági intézkedések **lassítják** a folyamatokat (átvilágító kapuk, vírusirtók), a munkavégzők pedig pszichés nyomás alá kerülnek az állandó akadályok, és veszélyre emlékeztető elemek miatt. Ezen hatások miatt a lassulás mellett az elvégzett **munka minősége is csökkenhet**, ami szintén hozzájárul közvetetten a gazdaságra gyakorolt visszahúzó hatáshoz¹⁶. A döntéshozóknak tehát mindig mérlegelniük kell a foganatosítandó biztonsági intézkedés által hozott biztonsági szint növekedést, és annak hátrányos következményeit. Vannak ugyanakkor – bizonyos veszélytípusok esetén – olyan passzív védelmi megoldások, amelyek nem jelentenek semmilyen hátrányt a védett elemek működésére vonatkozóan. Ide sorolhatók a robbantások elleni szerkezeti megerősítések, statikai kialakítások.

A robbantások elleni építményvédelem területén rengeteg új fejlesztésű, védelmi képességeket fokozó termék található. Ezek többnyire anyagtechnológiai K+F eredményekre épülnek, az épületvédelemben a nagy szilárdságú, nagy duktilitású anyagok használhatók fel. Ezeknek ismertetésére egyrészt helyhiány miatt nem térek ki, másrészt a magyar viszonyokat tekintve nem tartom reális megoldásnak az alkalmazásukat a nagyon magas árak miatt. Egy brit cég termék-bemutatóján jutottam hozzá egyik termékük árához: objektumok határainak kültéri védelmére járműveket megállító, ülőfelülettel szerelt betontömböket gyártanak [12], melyeknek ára 3000 font/db (1.200.000 Ft). Összehasonlításképpen megjegyzendő, hogy egy m³ beton ára kb. 15.000 Ft. Ha a védelmi ipar egy ilyen egyszerű terméknel is ekkora árrésszel dolgozik, akkor a hazai objektumvédelem reális eszköztára a klasszikus építőanyagokkal kialakított, de dinamikai hatásra megerősített szerkezetekben kell, hogy kimerüljön. Tekintve a hazai katonai költségvetés szűkösségét, nem valószínű, hogy hazánk megengedheti magának a modern, K+F tevékenységgel fejlesztett védelmi eszközöket.

1.1.4. AZ INFRASTRUKTÚRÁT FENYEGETŐ VESZÉLYFORRÁSOK

Az infrastruktúra védelem problémakörének szerteágazó jellegét leginkább a veszélyforrások sokrétűsége határozza meg. A következőkben vázlatosan felsorolásra kerülnek az általános veszélyforrások, kihangsúlyozva a védelmi infrastruktúrára veszélyes elemeket.

- Természeti katasztrófák (földrengés, árvizek, szélviharok, napkitörés stb.)
- Infrastruktúrák teljesítőképességének kimerülése
- Ipari és nukleáris balesetek
- Háborúk, fegyveres konfliktusok

¹⁵ David Lacey: Managing the Human Factor in Information Security p. 132. [11]

¹⁶ Elhangzott David Lacey előadásán. Counter Terror EXPO, London, 2013

- Bár az infrastruktúra védelem egy viszonylag új tudományág (széleskörűen csak a XXI. században kezdtek el vele foglalkozni), a sebezhetőségük felismerése és következtetésképpen a támadásuk nem volt ismeretlen a múltbéli háborúk során. Elég, ha az orosz cár „felégetett föld” taktikájára gondolunk, de ide sorolhatóak Zrínyi és Napóleon tábori étkeztetésben bevezetett reformjai is, melyek az ellátás gördülékenyebbé tételét célozták. A II. világháborúnak pedig számos fejezete írható az infrastrukturális hadműveletekhez: partizántevékenység, repülőterek és vasútállomások bombázása, sőt, még a lakosságot mérszázról drezdai bombázás hivatalos indoklásában is a város közlekedési-ipari csomópont jellege szerepelt¹⁷.

A mai fegyveres konfliktusok összemosisodnak a terrorizmussal, az összetűzések területén a polgári lakosság a legkritikább esetben vonhatja ki magát azok hatása alól. Az esettanulmányokban (1.2. fejezet) bemutatásra kerül az öngyilkos robbantások során megrongálódott közművezeték, magasfeszültségi vezeték. Ezek jó példái annak, hogyan rongálódik az infrastruktúra, még akkor is, ha nem az a célpont. Az útmenti robbantások során gyakran vízát ereszték használnak a robbanóeszköz rejtékhelyéül, Irakban pedig az ún. Iszlám Állam elfoglalta a moszuli gátat, ezáltal okozva potenciális vízellátási és árvízi veszélyt a régióknak.¹⁸

- Terrorizmus

- Ide sorolhatók azon esetek, amikor a terroristák közvetlenül az infrastruktúrát támadják meg. A társadalom nagyon sebezhető az infrastrukturális oldalról, a zavar-keltésnek, gyilkolásnak megannyi módja lehetséges az infrastruktúrák támadásával. Elég, ha a vízbázisok megmérgezésére, áramforrások támadására, vagy az internetkapcsolat ellehetetlenítésére gondolunk. Bár nem tartjuk gyakorinak az infrastruktúrák elleni terrortámadásokat, az adatbázisokban, nyilvántartásokban elég sok esemény visszakereshető, ezekből néhány kiemelkedő eset kerül most bemutatásra [15]:
 - 1972. február – Bombatámadás egy német transzformátor telep és egy holland gázüzem ellen. A Fekete Szeptember vállalta a felelősséget.
 - 1998 Arizona – Egy 12 éves számítógépes hacker feltörte a Rooseveltt gát informatikai rendszerét, és megszerezte a teljes irányítást a létesítmény felett.
 - 1999 Zambia – Egy terrorista robbantás teljesen üzemképtelenné tette a 3 millió lakosú Lusaka fő víznyomó csövét.
 - 2000 Ausztrália – A queenslandi rendőrség letartóztatott egy férfit, aki a Marroochy Shire szennyvíztelep felett próbálta átvenni az irányítást egy vezeték nélküli kommunikációs eszközzel és egy számítógéppel. A férfi azt tervezte, hogy szennyvizet enged a parkokba, folyókba.
 - 2001. október 4. – Alaszkában egy ittas helyi lakos a 338-as puskájával átlőtt egy 25 éves olajvezeték. A lövés következtében több mint egymillió liter nyersolaj ömlött ki, és a Transzalaszkai Vezeték 3 napra üzemben kívül kellett helyezni.
 - 2002 – Rómában négy marokkóit vesznek őrizetbe, akik a város ivóvízkészletét készültek megmérgezni cián alapú vegyszerekkel.
 - 2002 – Kolumbiában a felkelők megrongálták a bogotai vízhálózat egyik fő szelepét.
 - 2003 – Az Al-Kaida az amerikai ivóvízkészletek elleni támadással fenyegetőzik.
 - 2003 – Bagdadban szabotázsakciót követnek el a fő vízvezeték ellen.

¹⁷ USAF: Historical Analysis of the 14-15 February 1945 bombing of Dresden. p. 4. II. fejezet [13]

¹⁸ Az esetet megelőzően a fallúdszai gátat is elfoglalták, itt meg is történt a környék elárasztása. [14]

- 2003. július 16. – Kolumbiai illetékesek jelentése szerint a helyi ELN vagy FARC terroristacsoportok egyike felel a Cano Limon – Covenas olajvezeték felrobbantásáért.
- 2003. október 22. – Wasco, Oregon – Két magasfeszültségű vezeték tartószerkezetében találtak a rendőrök hiányzó csavarokat.
- 2003. október 30. – Sacramento, Kalifornia – A helyi hatóságok jelentése szerint a szemtanúk látták, amint egy személy csavarokat távolít el egy magasfeszültségű vezeték tartószerkezetéből.
- 2004. június 15. – Ismeretlen terroristák felrobbantottak egy olajvezeték Irak déli részén.
- 2004. augusztus 4. – Athénban házi készítésű robbanószerkezet robbant fel egy transzformátor közelében. A transzformátorban nem keletkezett kár.
- 2004. augusztus 10. – Fél órán belül két bomba is robbant egy Isztanbuli olajfinomító mellett. Anyagi kár keletkezett, áldozatok nem voltak.
- 2004. december 3. – Madrid környékén 5 olajfinomítónál történt robbantás. A robbantásokat az ETA követte el.
- 2004. december 7. – Dagesztánban terroristák robbantottak fel egy fő olajvezeték. A támadás egy támadássorozat része, amelyet megelőzően a csecsen terroristák bejelentést tettek, hogy az oroszországi infrastruktúrát veszik célba.
- 2004. december 19. – Az Al-Kaida Szaúd-Arábiai ága felhívást tett közzé „minden mudzsahed számára”, hogy támadják meg azokat az olajipari létesítményeket „amelyek nem az iszlám népét szolgálják”.
- 2005. február 26. – Szabotázsakció egy észak-iraki olajvezeték ellen.
- 2006. május 20. – A kolumbiai kikötőváros, Buenaventura áramellátás nélkül maradt, miután a FARC terrorista csoport támadást intézett az áramellátó telep ellen.
- 2006. október 23. – A Hezbollah fenyegetést tett közzé, miszerint amerikai érdekeltségű olajipari létesítményeket fog megtámadni Dél-Amerikában.
- 2013. június – A dunai árvíz idején Németországban fenyegető leveleket kapott a minisztérium, amikben a gátak tönkretételével fenyegetőztek ismeretlenek [16]
- 2015. november – Ukrán szélsőségesek felrobbantották a Krím-félsziget áramellátását biztosító magasfeszültségű kábelek tartóoszlopait. Több, mint 2 millió ember maradt áramellátás nélkül. Az orosz vezetés terrorcselekménynek minősítette a támadást. [125]

1.2. SVBIED¹⁹ ROBBANTÁSOS CSELEKMÉNYEK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA MEGTÖRTÉNT TÁMADÁSOK ELEMZÉSE ALAPJÁN (ESETTANULMÁNYOK) ²⁰

A robbantásos cselekmények jellemzőit hosszú időn keresztül csak a pusztítás utólagos elemzésével vizsgálhattuk. Az internet használatával az elkövetők egy új vizsgálati módszert adnak a kezünkbe. Az elkövetők által a robbantásos merényletről készített, és a közösségi hálón közzétett propaganda felvételek lehetőséget adnak a robbanás során bekövetkező folyamatok elemzésére, melyek új információkat hordozhatnak a védelmi feladatokat ellátó szakemberek számára. Az alfejezetben ennek bizonyításaként ilyen videók segítségével mutatom be, milyen segítséget kaphatunk az említett videók vizsgálata révén a létesítmények elleni SVBIED merényletek sajátosságairól, jellemzőiről.

1.2.1. A TÁMADÁSOK HÁTTERE

Az első öngyilkos merényletek még jóval 2001. szeptember 11-e előtt megjelentek a történelemben [17], azonban gyakorivá válásuk az iszlám szélsőségekkel küzdő térségek 21. századi jelensége lett. Gépjárművekbe rejtett bombával már az IRA is hajtott végre támadásokat, ám ezek nem öngyilkos merényletek voltak. Volt eset, hogy telefonon értesítették a hatóságokat a robbantásról, hogy legyen idő a környék evakuálására²¹. Ebben a **kivételes** esetben csak az anyagi károkozás, a figyelemkeltés, és a brit kormány tekintélyének gyengítése volt a cél. Ettől eltérően az iszlám szélsőségesek támadásai egyértelműen az áldozatokra összpontosítanak, melyet jól kifejez a 9/11-es támadások egyik résztvevőjének, Wail al-Shihri-nek a kijelentése:

„... és mikor elkezdtünk azután kutatni ... hogy mi gyengíti őket a legjobban, és mivel húzhatjuk át számításait, úgy találtuk, hogy az öngyilkos merénylettel tudjuk a legjobban terrorizálni az ellenséget, és a legnagyobb csapást mérni rájuk. Különösen akkor, amikor a hagyományos támadások már nem kivitelezhetők.” [19]

Az emberi áldozatokon belül a védtelen, ártatlan civil áldozatok is rendszeresek. Ez nem véletlen, nem „szükségyszerű velejárója” a támadásaiknak, hanem elejétől fogva szándékukban is áll az elkövetőknek. Ezt mi sem bizonyítja jobban, mint a propaganda anyagaikban erre buzdító ideológiai felbujtók megnyilatkozásai. Ahhoz, hogy komolyan vegyük a fenyegetést a polgári, államigazgatási objektumok esetén is, elég egy pillantást vetni pl. Osama Bin-Laden egyik 2006-ban elhangzott „tanmeséjére”:

„És akkor azt kérdezték Antarahtól: Hogy éred el, hogy az emberek félnek tőled? Így válaszolt: Belenézek a szemükbe, és aki gyengének látszik, azzal kezdem és fejét veszem, mert ez könnyű. Majd ezt követően kiontott vérük láttán az erősek is megrémülnek.” [19]

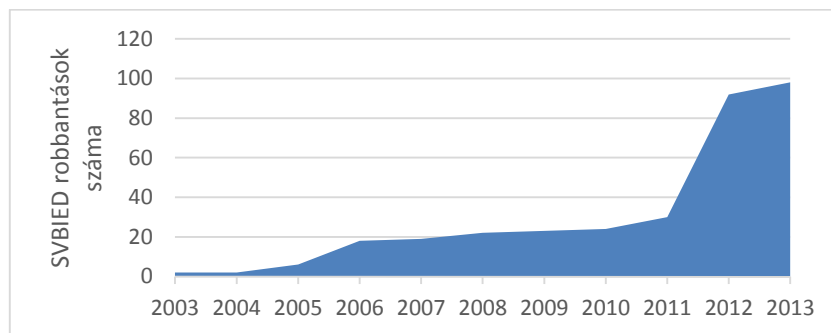
A 80-as, 90-es években történt nagy robbantásos merényletekért az Al-Kaida (1993 WTC, 1998 Nairobi) és más, siíta szervezetek (1983 Bejrút, 1996 Khobar) voltak a felelősök. Míg a siíta

¹⁹ SVBIED – Suicide Vehicle-Borne Improvised Explosive Device – öngyilkos merénylető által vezetett járműbe szerelt rögtönzött robbanószerkezet

²⁰ A fejezetben az értekezés DVD mellékletén található video felvételekre hivatkozok. Ez megegyezik a „TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások” kutatási jelentésében [63] található video melléklettel. A hivatkozott felvételek sorszáma () - zárójelben, pirossal szerepel. (ld. még „E” melléklet.)

²¹ 1996 manchesteri robbantás [18]

szervezetek ilyen stílusú támadásai megszűntek, az afganisztáni hadszíntér 2001-es megnyitása óta a tálib felkelők, és a szomszédos, törzsi területeken rejtőző Al-Kaida egymással karöltve nagyszabású öngyilkos merényletek sorozatát követte már el, és a támadások száma folyamatosan növekszik (3. ábra). A szélsőségesek többször is hangot adtak annak a meggyőződésüknek, hogy az öngyilkos merényletek alkalmazásával az ellenséges hadsereg légitámadásaival „egyenrangú” fegyver van kezükben [19]. Az elkövetők motivációja alapvetően az ideológiai fanatizmusban gyökerezik, ennek megfelelően gyakran készítenek felvételeket, melyeknek céljai a toborzás és a propaganda.



3. ábra - Az afganisztáni öngyilkos merényletek száma 2003-2013 (szerzői ábra)²²

Irakban a háború megkezdése után a megdöntött rezsím hívei alkották az ellenség magvát, majd ez 2005-től, az Al-Kaida beszivárgásával megváltozott. A háború legintenzívebb időszakában – néhány éven keresztül – Irakban két különböző ideológiát valló irányzat harcolt a szövetséges erők ellen. Egyik a „nemzetinek” hívott vonal, amely mérsékeltebb, magát hazafiaknak tituláló csoportokat ölelt fel, a másik a többnyire külföldi Al-Kaida tagokból álló, a nemzetközi terror-szervezethez köthető csoportok összessége. Míg előbbiek igyekeztek fenntartani magukról azt a képet, hogy ők nem gyilkolnak ártatlanokat, addig az Al-Kaida erőszakkal szerzett lakossági „támogatást” magának, alapvetően a terrort használta eszközként mind a lakosság, mind a szövetséges erők ellen. Az Al-Kaida támadásai rendszerint polgári áldozatokkal jártak, és gyakran alkalmaztak öngyilkos merénylőket, míg a „nemzetinek” hívott csoportok részéről efféle nagyszabású robbantásos merénylet nem volt tapasztalható. Az évek elteltével az Al-Kaida háttérbe szorult, és a belőle kinőtt ún. Iszlám Állam (IÁ) veszi át a helyét, az SVBIED-k használatát illetően nincs különbség a két szervezet között.

Az algériai merényleteket szintén egy olyan csoport (GSPC) követi el, amely az algériai polgárháborút követően szövetségre lépett az Al-Kaidával, és a támadások módja, valamint minden körülmény jelentős hasonlóságot mutat a más térségekben elkövetett Al-Kaida merényletekkel [21].

Összességében megállapítható, hogy az öngyilkos merényletek háttérében ma szinte kizárólag az Al-Kaidához, vagy az IÁ-hoz köthető vallási fanatizmus jegyében támadó személyek vannak, akik kifejezetten halálos áldozatokat akarnak okozni. Meg lehet különböztetni általános terror céllal elkövetett támadást (2004 Madrid, 2010 Moszkva) és katonai erők ellen elkövetett

²² Forrás: Global Terrorism Database [20]

támadást, de az építmények védelmét, és a robbanások hatását illetően nincs különbség a merényletek között.

1.2.2. AZ AUTÓBOMBA (VBIED²³) ÖSSZEÁLLÍTÁSA

Az IED és VBIED eszközök jellemzőit részletesen elemezte Daruka Norbert PhD értekezésében [24], ezért erre nem térek ki részletesen, csak néhány, a vizsgált téma szempontjából fontos sajátosságot vizsgállok. Mind a három felsorolt térségben a háborúkat megelőző időszakban a szovjet haditechnika volt elterjedt, így a háború megindulásakor ezek a hadianyagok váltak a merénylők számára elérhetővé. Az aknagránátok és tüzérségi löszerek mellett házilag készített robbanóanyagok is alkalmazásra kerülnek. A házi készítésű robbanóanyagot ritkán ugyan, de használják teljes egészében töltetként (05-43-54), ám inkább a hadianyag bombává alakításában játszik szerepet. Az aknagránátokból kiszerelik a gyújtót és az indítótöltetet, majd furatot készítenek a robbanóanyagba. A furatba robbanó gyújtózsínort helyeznek, majd a meglévő ürt a házi készítésű robbanóanyaggal töltik ki (4-5. ábrák), (02-03-04-74). Az így elkészített aknagránátokat a robbanó gyújtózsínórral sorba kötve tetszőleges tömegű robbanószerkezet alakítható ki, mely önmagában is komoly repeszhatást tud kifejteni.



4. ábra - Tüzérségi lövedékek és gázpalackok átalakítása IED-vé - Irak²⁴



5. ábra - Átalakított, sorba kötött aknagránátok - Afganisztán

²³ VBIED – Vehicle Borne-Improvised Explosive Device – járműbe szerelt rögtönzött robbanószerkezet

²⁴ Az 1.2. fejezetben szereplő képek hivatkozás nélkül szerepelnek. A képek (vagy video felvételek) olyan islamista fórumokról származnak, amelyek egyrészt megszűntek, elköltöztek, másrészt közlésük biztonsági szempontból nem szokványos.

Az átalakított robbanófejek nagy mennyiségben elhelyezhetők egy autóban (03), de néhány darab még motoron is elrejtethető (6. ábra) (07). Teherautók esetében (7-8. ábrák) (10-12-44-54-61) már nehezebb a plató/billencs tartalmának elrejtése, tehát könnyebben ki is szűrhető egy esetleges idő előtti igazoltatás vagy ellenőrzés alkalmával. Szintén megtalálható a könnyen elkészíthető ANFO is az autóbombákban (7-8. ábrák) (06-39-43), valamint előfordul a páncélozott járművek elleni alkalmazásra gyártott akna is, de ezt inkább útmenti robbantások során (IED) alkalmazzák.



6. ábra - Átalakított, sorba kötött aknagránátok - Afganisztán



7. ábra - ANFO hordók, és gázpalackok a teherautó platóján



8. ábra - ANFO zsákok, és kannák kisteherautók rakterében - Afganisztán, Irak

A terroristák célja a minél nagyobb pusztítás elérése, ezért gyakran helyeznek el gázpalackokat, gyúlékony anyagokat a járműben (7. ábra) (10-11-38), amitől a robbanás környezetében növekszik a tűzveszély. A robbanóanyag detonálása előre elkészített elektromos kapcsolóval történik (9. ábra) (09-28), ami a robbanó gyújtózsínőn keresztül közel egyszerre hozza működésbe az elkülönített, sorba kötött tölteteket.



9. ábra - VBIED-t detonáló elektromos kapcsoló az utastérben - Afganisztán, Irak

A mellékelt felvételek alapján becslést lehet tenni a különböző kategóriájú VBIED-k robbanóanyag mennyiségére vonatkozóan. A robbanóanyag mennyiség videofelvételek alapján való becsléséhez az 1. táblázat adataira támaszkodok, mely néhány elterjedtebb szovjet lőszer-, és gránát típus főbb adatait tartalmazza. Az így kapott W mennyiségeket foglalja össze a 2. táblázat. Ezen adatok statisztikai kiértékelését az 4.5.2. fejezet tartalmazza.

Tüzérségi lövedékek					
Űrméret	Típusjelzés	Töltet tömege [kg]	Robbanóanyag		Hossza [mm]
122mm	OF462	3.68	TNT	Amatol 40/60	560
	OF471H	3.8	TNT		
	OF471	3.6	TNT		
152mm	OF530	6.86	TNT		650
	OF550	7.00	TNT		
	OF551	6.53	TNT		
	F533 (régi)	8.00	TNT		
	OF540	6.25	TNT		
	F542(régi)	5.86	TNT		
Aknagránátok					
Űrméret	Típusjelzés	Töltet tömege [kg]	Robbanóanyag		Hossza [mm]
82mm	O832	0.4	TNT	Schneiderite	313
	O832DU	0.435	TNT	Dinitronaftalin	330
120mm	OF843	2.67(TNT)/1.58(Amatol)	TNT	Amatol 40/60	656
	OF843B	1.4	TNT	Dinitronaftalin	668
	F843	3.9	TNT		750

1. táblázat - Tüzérségi lövedékek és aknagránátok adatai²⁵

²⁵ Szerző által készített táblázat a [22] [23] források alapján.

A felvételek alapján becsült robbanóanyag mennyiségek:

Motorkerékpár:

(07) kb. 4 82mm-es aknagranát $4 \times 0.4 = 1.6$ kg

Személygépjármű:

(03) kb. 120 db 120mm-es aknagranát - $120 \times 3.9 = 468$ kg

(04) 1 láda, kb. 40 82mm-es aknagranát, 2 láda esetén: $2 \times 0.4 \times 40 = 32$ kg

(05) 2 kisebb zsák, maximum 40 kg

(09) kb. 30 db tüzéségi lövedék - $30 \times 3.8 = 114$ kg

(11) 3 gázpalack, kevés (nem látható) robbanóanyag

(74) kb. 100 db 82mm-es aknagranát + 20 db 120mm-es - $100 \times 0.4 + 20 \times 3.9 = 110$ kg

Mikrobusz:

(06) kb. 8 db tüzéségi lövedék, 6 db ANFO hordó, $8 \times 7 + 6 \times 170 = 1076$ kg

(22) kb. 10 db 1 méteres 250-es cső, és két darab nagyobb cső - kb. 500kg ANFO

(39) kb. 3-4 ANFO hordó, $3 \times 170 = 510$ kg (jelentések szerint 400kg TNT egyenérték)

(83) 7db 1.8m-es 300-as cső: kb. 750 kg ANFO

Teherautó:

(10) 4 ANFO hordó, kb. 15 gázpalack, kb. 20 db tüzéségi lőszer $4 \times 170 + 20 \times 7 = 820$ kg

(12) Láthatóan a teljes platót kitölti a robbanóanyag, tömege nehezen becsülhető, a robbanás ereje alapján amerikai becslések szerint 700kg volt [25]

(43) 40 db 20 literes ANFO kanna + 3-4 zsák = 600 kg

(54) kb. 50-60 zsák ANFO (kb. 15 kg/zsák) = 750 kg

	Aknagranát	Tüzéségi lövedék	ANFO, egyéb	Gázpalack	Összesen (kg)
Motorkerékpár	4				1.6
Személygépjármű	120				468
	80				32
			2 zsák		40
		30			114
				3	-
	120				110
Mikrobusz		8	6 hordó		1076
			csövek		500
			4 hordó		510
			csövek		750
Teherautó		20	4	15	820
			40 kanna		600
			50 zsák		750

2. táblázat - A felvételek alapján megállapított hozzávetőleges robbanóanyag mennyiség (szerző által szerkesztett táblázat)

A 80. ábrán láthatók a szakirodalomban elérhető javaslatok a *W* értékére. A személygépjármű kategóriában a 400-450 kg-mal szemben 100 kg körüli értékek fordulnak elő, eltekintve egy kivételtől. A mikrobusz kategóriában az 1800 kg-mal szemben 500-1000 kg a tapasztalt mennyiség, ami már jelentősebb különbség. Meglepő módon a teherautó kategóriában is hasonló, 500-1000 kg közötti értékek szerepelnek szemben a javasolt 4500 (vagy több) kg-mal.

Természetesen előfordulhat a 80. ábra szerinti mértékadó mennyiség a valóságban, ám szükséges rámutatni, hogy az **esetek döntő többségében** ettől **elmaradnak a tapasztalt értékek**, és megalapozottabb, ha a tervezésben ezt figyelembe vesszük (lásd a 4.5. fejezetben).

1.2.3. AZ SVBIED ROBBANTÁSOK ELKÖVETÉSI MÓDJAI

A merényletek kivitelezése a célponttól távolabb lévő helyről indul, ahol a VBIED összeszerelése is történik. A járművet egyedül az öngyilkos merénylő vezeti. Több felvételen is látható, hogy lőfegyvert tart magánál **(11-52-67)**, tehát ha a járművet útközben feltartóztatják, a merénylő veszélyeztetve láthatja a támadás sikerét, és számolni kell a fegyveres ellenállás veszélyével.

A konvojok elleni támadásoknál is használt elkövetési mód az út szélére leparkolt jármű, melyet a célpont közeledtével robbantanak fel **(08-29-30-74)**(10. ábra).



10. ábra - Mozgó célpont ellen elkövetett öngyilkos merénylet - Afganisztán

Ezek a támadások más kategóriába esnek, mint a mozgó járművel megtámadott álló célpontok, mert itt éppen fordított a helyzet: a célpont mozog, és közelíti meg a mozdulatlan járművet, melyet megfelelő pillanatban felrobbantanak. Az ilyen támadások az útmenti IED robbantások kategóriájába tartoznak, ahol járműbe rejtik a robbanószerkezetet. Ennek megfelelően ezekre az esetekre a járművek védelmének szabályai érvényesek.

Más esetekben – főleg épületek elleni támadás során – közös jellemzője mindegyik támadásnak, hogy a támadó a járművet a saját lábán a célpont közelébe igyekszik juttatni, majd ott detonálni azt. Ez történhet a meglepetés erejével, figyelem eltereléssel, lassan és gyorsan is. A felvételekből kitűnik, hogy a védett objektum környezetének kellő védelme és lezárása életbevágóan fontos.



11. ábra - Védetlen ellenőrzőpont ellen elkövetett SVBIED támadás – Irak

Mi sem támasztja ezt jobban alá, mint azok a felvételek **(13-14-15-16-23-25)**, melyeken a támadó kihasználva az objektum védtelenségét, a meglepetés erejével, nagy sebességgel közelít, és szinte közvetlen közelségből detonál (11. ábra). Bár az esetekről konkrét beszámolók nem állnak rendelkezésemre, a robbanás közelségének jelentőségét ismerve, – és szemléletből is – vélelmezhető, hogy a szükséges védelem kialakításának elmulasztása az épületben és a járműtoronyban tartózkodók életét követelte.

A támadók alkalmazkodóképességét, módszereik „tökéletesedését” mutatja, hogy utóbbi időben több olyan támadás történt, ahol a járművet házilag páncélozottá tették. Így védekeznek az objektumot védők lövéseivel szemben.



12. ábra – Házilag készített SVBIED páncélzatok
a, Támadásra induló páncélozott SVBIED – Szíria (2012)
b, Páncélozott bányászati billencs – Szíria (2015)

A 12/a. ábra egy páncélozott teherautót mutat, ahol az utasteret vastag páncélzattal borították, és egy akadálytörő bakkal szerelték fel a jármű elejét. Ha a célpont védelme nem rombolókaliberekkel van ellátva, akkor a jármű páncélzata megvédi a támadót a jármű célba juttatásáig. A másik képen (12/b ábra) egy nagy méretű bányászati billencs van hasonlóképpen átalakítva. Ez a jármű a nagy kerékátmérő miatt az útakadályokon is könnyebben át tud jutni.

Előfordul, hogy a támadók két járművet is indítanak a célpont ellen **(17-19-24-38-59-61-73)**. Ekkor, még ha az első járművet fel is tartóztatják, robbanása után a másodiknak már esélye van közelebb kerülni az objektumhoz. Az első jármű egyfajta „faltörő kosként” is működhet, ami áttöri a védelmet **(18)**. Amennyiben mindkét robbanás az épület közelében történik, az nagyságrendekkel növeli a rombolást. A szerkezeti elemeknél még a robbanás elleni tervezés során is csak a mértékadó teher egyszeri előfordulásával számolnak. Ismétlődő mértékadó teherre kérdéses a szerkezet állékonysága.

Találhatunk rá példát, amikor az objektum védelme hatásosnak bizonyul, és a terrorista elakad, mielőtt közel kerülne **(19-22-24)** (14. ábra). Ezekben az esetekben a támadás célpontjául szolgáló létesítmény lényegesen kisebb károkat szenved. Más esetekben megfigyelhető a merénylet jól megtervezett jellege: a merényletnek társai vannak, akik segítik az objektumhoz való közelebb jutását. Ez történhet az imént említett módon, egy „faltörő kosként” előre küldött autóval **(18)**, vagy úgy, hogy az úton elhelyezett barikádot kézi erővel távolítják el **(20-21)** (13/a. ábra). Ha a védelmi rendszer kialakítására nem fordítottak elég időt és energiát, akkor szükség esetén az nem látja el feladatát, és a támadó akár segítség nélkül is át tud rajta hatolni a gépjárművel **(31-32-33-39)** (13/b ábra).



13. ábra - A merénylő áttöri a védelmi vonalat
a, fegyveres segítők nyitják ki a kaput, emelik fel a sorompót – Afganisztán
b, védelmi sáncon áthajtó gépjármű – Irak



14. ábra - Támaszpont kapujánál elakadt merénylő

Szintén jellemző a szervezett támadásokra az öngyilkos merénylő fedezőtűzzel való támogatása (15. ábra). Tucatnyi fegyveres egy vagy több pontról kézi fegyverekkel tűz alá veszi az objektumot, így terelve el az azt védő fegyveresek figyelmét (06-26-27-28-40-55). Bizonyos esetekben már ez a fedezőtűz is komoly károkkal járhat. Ha figyelembe vesszük, hogy van, amikor a 7.62-es karabélyok és géppuskák mellett 14.5-es nehézgéppuskát is alkalmaznak (06) akkor a fedezőtűz áldozatokat is követelhet. Másik módja a támadás elkövetésének hogy az objektum kézi fegyverekkel való tűz alá helyezése nemcsak a robbantás előtt, hanem utána is történik (28-55).



15. ábra - A megtámadott épület fedezőtűz alatt tartása

Bár kicsi a valószínűsége, hogy a lövedékek a robbantást követő mozdulatlan, vagy sérült embereket eltalálják, mégis veszélyt jelenthetnek, például a gyúlékony anyagok, gázok szikrával történő belobbantása által.

Az eddig említett módszerek vegyes alkalmazása történt 2009-ben az Iraki Hadsereg egyik épülete ellen (16. ábra) (44). A támadónak sikerült a teherautót leparkolni a támaszpont előtt, és épségben távozott, majd a többi támadó a kézfegyverekkel indított támadással menekülésre kényszerítette a bent tartózkodókat, és távirányítással robbantották fel a teherautót.



16. ábra - Célpont mellé parkolt VBIED-vel elkövetett támadás - Irak

Kiemelendő példa a robbantás utáni fegyveres támadásra a 12-es felvétel. Az eset 2012 június 1-én történt az Afganisztán és Pakisztán határán fekvő Salerno támaszponton (17. ábra). A tálib fegyveres csoport külön erre a támadásra lett felkészítve, és szervezeten, tucatnyi fegyveressel hatoltak be a bázis területére a robbantás után. A támaszponton lévő katonák lélekjelenlétének köszönhetően a kibontakozó heves tűzharcban végül végeztek a támadókkal. A támadás azzal került be a médiába, hogy az első jelentések a támadás áldozatok nélküli visszaveréséről szóltak, majd a jelentést később kettő halottra, valamint több tucatnyi sebesülte változtatták [25].



17. ábra - A salerno támaszpont ellen elkövetett robbantás, jobbra a romok mellett behatolni készülő fegyveresek

1.2.4. A TERRORISTA ROBBANTÁSOK HATÁSAI

1.2.4.1. Robbanási típusok

A töltetek elhelyezése és a sorba kötés eredményeképpen az autóbomba nem viselkedik tökéletesen központosan detonált töltetként. A felvételek alapján nem lehetséges arra vonatkozó megállapításokat tenni, hogy a lökeshullám terjedése mennyi aszimmetriát mutat. A VBIED töltet alakjának hatása jelenleg még tudományosan nem körüljárt kérdés (ld. 3.3.3. fejezet).

Különböző típusú robbanóanyagok különböző hatásokat fejthetnek ki. Leginkább a gyúlékony anyagokat, gázpalackokat tartalmazó robbanásoknál szükséges tekintettel lenni a robbanást követő tűzhatásokra. A gáz halmazállapotú robbanóanyagok robbanási paramétereit nehéz megállapítani, mert nagyban függnék az oxigénnel való vegyítéstől, azonban szakértői vizsgálatok támasztják alá, hogy a gázpalackok fizikai robbanása, és az esetlegesen azt követő deflagráció jóval kisebb erejű, mint a hasonló tömegű TNT [26].

Ezekben az esetekben a lökeshullám által kiváltott hatások kisebbek, a legtöbb kárt a tűz okozza, és az emberekre is külön veszélyt jelent a megégés (34). Az ilyen robbanások jellemzője a kis lökeshullám, és a robbanást követő látványos lángok (18. ábra).



18. ábra - Gyúlékony anyagokkal szerelt SVBIED-k robbanásai

Bár a robbanóanyagok kémiai reakciója során is keletkeznek lángok, az ilyen robbanásokat jellemző nagy lángcsóvák ezzel nem összetéveszthetők, a nagy láng egyértelműen az éghető anyagok belobbanását jelzi. (11-34-35-36-37-38) Megjegyzendő, hogy a jármű tankjában mindig van üzemanyag, ami lángra kap a robbanáskor, de ez elhanyagolható a sok külön elhelyezett éghető anyag belobbanásához képest. Épületeink védelme során figyelmet kell tehát szentelni a robbanás elleni tervezés mellett a tűzvédelmi szempontoknak is.

A robbanás látványából hozzávetőlegesen következtetni lehet a felhasznált robbanóanyag összetételére is. A negatív oxigénegyenlegű robbanóanyagok (tipikusan a TNT ilyen) fekete füsttel robbannak (51), míg a házilag készített robbanóanyagok (ANFO, HMX, TATP) fehér füstöt produkálnak a robbanás során (75) (19. ábra). A fehér füst oka, hogy a közel 0 értékű oxigénegyenleg miatt nem marad el nem égett szén a robbanás során.



19. ábra - TNT, ANFO, és házilag készített robbanóanyagok különböző füstszínű robbanásai

Némely robbantásnál megfigyelhető a félgömbszerűen haladó lökeshullám, mintegy pillanatokig megjelenő felhő **(31-40-51)** (20. ábra). Ez a hatás bizonyos légköri körülmények között jön létre (magas páratartalom esetén), magyarázata pedig az, hogy a lökeshullám először hirtelen megemeli a közeg nyomását, majd amikor továbbhalad, mögötte hirtelen leesik a nyomás, és a hirtelen nyomásesés a hőmérséklet esésével a vízpára kicsapódását okozza. Tehát a jelenség nem egy speciális robbanóanyagra, vagy hatásra utal, mindössze a lökeshullám általános jellegének egy érdekes megjelenése, amelyet bizonyos légköri körülmények lehetővé tesznek.



20. ábra - A lökeshullám félgömbszerű terjedését mutató pillanatnyi párafelhő

1.2.4.2. Épületek és környezetük károsodása a robbanás hatására

Az épületek romosodását egyértelműen a robbanás közelsége befolyásolja leginkább. Minél közelebb történik a robbanás az épülethez, annál nagyobb rombolást tud véghezvinni. Emberéletet és anyagi károkat tekintve is katasztrófát okoz, ha a merénylőnek sikerül a SVBIED-t az objektum belsejébe juttatnia **(33-39)**. Támaszpont esetén ez az udvart jelenti, épület esetén a falakkal körbezárt belső teret. Ebben az esetben a lökeshullám akármelyik terjedési irányát vizsgáljuk, mindenfelé visszaverődik, és rombol, míg a célpont melletti, vagy tőle távolabbi robbanások esetében csak az egyik irányba való terjedése okoz károkat. A robbanás közelségének fontosságát érzékelteti a **41-es** felvétel is, ahol egy üresen álló épületet – kevés töltettel – belülről robbantanak fel.

A **33-as** felvétel az Algéria északi partjainál fekvő Dellys városában 2007. szeptember 8-án történt támadást mutatja be (21. ábra). A támadás célpontja a parti őrség volt. A felvételen jól

kivehető, hogy az objektumot mindössze egy gyengén zárt kapu védte a támadótól, amit a gépjármű könnyedén át is szakított. A felvételen látható, hogy a kisméretű könnyűszerkezetes építmények darabokra szakadva repülnek a levegőbe. A támadás – amelyhez házi készítésű robbanóanyagot és egy gáztartályt használtak fel – 30 halálos áldozatot és 47 sebesültet hagyott hátra. Az áldozatok magas száma mutatja, hogy a robbanás közelsége még egy gyengébb robbanószerkezet hatását is jelentősen megnöveli.



21. ábra - A dellysi kikötőben történt robbantás és a maradványok

A 39-es felvétel a 2009. augusztus 17-én történt támadást mutatja be, ahol az Ingusföld központjának számító Nazran város rendőrsége ellen követtek el öngyilkos merényletet (22. ábra). A rendőrség védelme több ponton is elégtelennek bizonyult. A kapu gyengesége miatt a támadó gond nélkül tudott a rendőrség udvarára kerülni, majd a robbanás hatását tovább erősítette, hogy a rendőrség – nem kellő biztonsággal tárolt – robbanóanyag is detonált a robbanás hatására. A támadást bemutató felvételeken a járműben hordók láthatók, ezért valószínűsíthető, hogy ANFO-t használtak a támadás során. A hatósági vizsgálat szerint 400 kg TNT egyenértékű robbanóanyagot használtak fel [27]. Ez nem számít nagy mennyiségnek, de ismét kiemelendő, hogy a robbanás közelsége miatt nagyszámú áldozatot követelt. A robbanásban a rendőrség tetőszerkezete teljesen megsemmisült, és a nyílászárók is beszakadtak. Szintén betörték a környező épületek ablakai, valószínűleg ez is hozzájárult a sérültek nagy számához. Ugyanakkor a rendőrség épületében a felvételek és fényképek alapján komoly szerkezeti kár nem történt. A támadásban 25-en veszítették életüket, és 164-en sebesültek meg. Szintén érdemes rámutatni, hogy a felvétel végén látható, hogy a robbanás a téglából épült védőfalat teljesen lerombolta, annak védelmi képessége elhanyagolható.



22. ábra - A nazrani rendőrség romjai a merénylet után - Oroszország

Számos felvétel tanúskodik arról, hogy az épületek a robbanás hatására az ún. közvetett összeomlás (progressive collapse) folyamatával mennek tönkre. Ez azt jelenti, hogy a robbanás nem globálisan az egész épületet – és annak merevítő rendszerét – terheli túl, hanem a robbanáshoz közel eső függőleges teherhordó szerkezeti elemeket teszi tönkre. Akár egy teherhordó elem hiánya is elég lehet ahhoz, hogy a megmaradt statikai váz az önsúlya alatt elveszítse állékonyságát. Jellemzően a falazott szerkezetek hajlamosak teljesen tönkremenni, és ezzel elindítani a követett összeomlás folyamatát. Több támadás esetében is látható a romokról készült felvételeken a falazat darabjai, ebből következtethetni lehet az épület eredeti építőanyagára.



23. ábra - Közvetett módon összeomlott épületek - Afganisztán, Irak

A **40-es** felvétel egy 2007-ben Irakban történt támadást mutat be, célpont az iraki hadsereg egyik támaszpontja. A támadást fedezőtűzzel biztosították. Az objektum belsejében történő robbanás messziről ugyan nem tűnik úgy, hogy súlyos károkat okozna (a robbanáskor egy leomló falszakaszt látni homályosan), de a felvétel végén láthatóak a maradványok, amik a közvetett összeomlásra utalnak. Erre a hatásra lehet következtetni a **06-os** felvétel végén látható romokból, és a **18-as** támadás maradványaiból is (23. ábra).

Hasonló a helyzet a **42-es** felvételnél, ahol a nagy távolságból csak a füstöt és a lángokat látni, de a robbanás súlyos hatását a későbbi fényképek alapján fel lehet mérni. Az épületek szerkezete globális értelemben nem rombolódott, nem dőlt össze, azonban a belső terek láthatóan teljesen el lettek pusztítva, a másodlagos teherviselő elemek megsemmisültek. Tekintélyes repeszhatásnak volt kitéve a belső tér, ami meg is mutatkozik az áldozatok nagy számában. A képek szerint a kráter közel van az épületekhez (29. ábra), illetve az is látszik, hogy a robbanás

mellett a HESCO védőfal is megsemmisült. Ilyen közeli és nagy erejű robbanásnál gyakorlatilag lehetetlen robbanásbiztos ablakokat alkalmazni, tehát elkerülhetetlenek az áldozatok. Amennyiben az ablakok, ajtók nem szakadnának be, akkor az épület szerkezetére jutna nagyobb teher a visszaverődő lökéshullám miatt.

Szintén hasonló a helyzet a **43-44-45-46**-osban, ahol a romokról készült felvételeken látszik, hogy a falazott szerkezet teljesen összeomlott, és itt is megfigyelhető a közvetett összeomlás, a tetőszerkezetek, épületszárnyak összedőlése a megfelelő támasz eltűnése miatt. A **31**-es támadásnál is látható az épületen némi szerkezeti károsodás, a robbanásra merőleges visszaverő falfelület láthatóan tönkrement, a lökéshullám a repeszekkel együtt akadály nélkül folytathatta útját az épület belsejében, ez pedig potenciális veszélyt jelent az épületben tartózkodókra. A falazott szerkezetek, és a bázis épületeinek számottevő károsodását mutatják a **28-63**-as felvételek azon rövid részei, amelyek a robbanás utáni állapotokat mutatják be.

A **40-42-43-44-45-46**-os felvételek tanulságosak lehetnek a többi olyan felvétel vizsgálatakor is, amikor kívülről nehezen megállapítható az okozott kár, és nem áll rendelkezésre a végállapotot bemutató anyag (**47-48-49-50-51-52-53-54-55-56-57-58-83-84-87**).



24. ábra - A támadás során a kráterben a közművek is megrongálódhatnak a, 2009 Iraki Igazságügyi Minisztérium²⁶ b, 2015 július, kairói német konzulátus²⁷

A nagy erejű robbanásoknál tekintélyes méretű kráterképződés figyelhető meg, amely lakott környezetben a közművek mélységét is meghaladhatja. Az **44-59**-es támadások során a vízzel telt kráter utalhat a közmű vezetékek tönkremenetelére is. 2009-ben az Al-Kaida iraki szárnya két lopott rendszámmal hivatalosnak álcázott kisbusszal kettős öngyilkos merényletet követett el az Iraki Igazságügyi Minisztérium ellen. A robbanásoknak a közművek is áldozatul estek [28] (24. ábra).

Kettő, hidak ellen elkövetett támadás is bemutatja a közvetlen közel történő robbantások romboló hatását. A **60**-as felvételen a teherautó a hídfőnél elhelyezett ellenőrzőpont alatt, vagy mellett robbant fel, ami a felvételek alapján az ellenőrzőpont könnyűszerkezetes építményeit is lerombolta, de a híd első fesztávjának főtartóját is ledöntötte. A **61**-es támadás észak-Irakban, Moszul térségében történt a Tigris folyó felett átívelő hídon Al-Ruhaiya mellett (25. ábra). A

²⁶ Forrás: Reuters

²⁷ Forrás: AFP

nagy erejű első robbanás olyan tönkremeneteleket okozott a hídszerkezetben, ami pár másodperc alatt továbbgyűrűzött, és még a robbanás utáni pillanatokban látható, hogy több feszítávja is ledőlt a hídnak. A második támadás a hídfőnél felállított ellenőrzőponton történt, kihasználva az ellenőrzőpont személyzetének zavartságát és meglepettségét. A támadás utáni fotón látható hogy a kereszttartók milyen deformációkat szenvedtek a rendkívüli erejű lefelé ható nyomás hatására.



25. ábra - A Moszul térségében lévő Tigris hídon történt robbantás

Nem csak az épületben, hanem az udvaron álló gépjárművekre gyakorolt hatásra is figyelemmel kell lenni. A SVBIED támadás nem hasonlítható az aknára futás, vagy IED támadás hatásaihoz, mert más a térbeli helyzete a járműhöz képest, de az igazi veszély a lökéshullám hatása mellett a kiegészítés.



26. ábra - Robbanás közvetlen közelében lévő kiégett, megrongálódott páncélozott járművek

A **62**-es felvételen egy páncélozott járművek melletti hatalmas robbantás látható, a 26. ábra pedig egy másik támadásnak a maradványait mutatja, ahol az udvaron lévő páncélozott gépjárművek megsemmisültek, míg az épület tartószerkezete egészben maradt. Szintén egy robbanásban megsemmisült és kieggett Humvee látható az előbb említett **61**-es támadásban.

Külön érdemes kiemelni a **63**-as támadást a robbanásvédő fal tönkremenetele miatt. Már a **39**-es, nazrani támadásnál is rámutattam a téglából készült védőfal tönkremenetelére: valószínűleg nem is robbanásvédő szerepet látott el a téglafal, hanem általános elkerítő szerepe volt. A **63**-as felvételen egy 2008-ban történt, iraki támaszpont elleni támadás látható, amelynek vasbeton panelekből (a képek alapján T-Wall vagy Alaska barrier típusúak) felállított védőfala többek közt robbanásvédő szerepet is hivatott ellátni. A felvételeken a támadók és a támaszpont felvételei is láthatók. A támaszpont biztonsági kamerájának felvételén (27. ábra) látszik a legjobban, hogy a fal megsemmisül a robbanás következtében, nem lát el lökéshullámot eltérítő szerepet, sőt, a darabjai komoly repeszhatást jelentenek a bázis területén. A háttöltés nélküli védőfalaknak erre a veszélyére a vonatkozó katonai útmutató is felhívja a figyelmet [128].



27. ábra - T-Wall típusú vasbeton védőfal tönkremenetele (**63**) – Irak

A betonfalak mellett népszerű védőfal rendszer a HESCO bástya is, általában jobban teljesít, mint a merev betonfalak. A HESCO rendszer tönkremenetelére is láthatunk példát, például a **44**-es felvétel végén, ahol a fal hosszabb szakaszon tönkrement, és az általa védett épület is összedőlt, de ugyanez történt a **06**-os felvételen is (28. ábra).



28. ábra – Tönkrement HESCO bástyák robbantás után – Irak

A HESCO bástyák helytállóságát bizonyítja azonban a **42-es** felvétel, ahol igen nagy erejű robbanás történt, amit a képeken a kráter mérete is mutat (29. ábra), és a robbanás közelében lévő HESCO bástyák kisebb károsodással állva maradtak, bár a robbanás nagysága miatt nem tudtak védelmet nyújtani az objektum és a benne tartózkodók számára. Az előző példákban nagy erejű robbanásokat vizsgáltunk az objektumok közvetlen közelében, és rámutattunk a károsodásokra, amelyek nem mindig láthatóak azonnal a felvételen. A következő felvételek a kisebb erejű robbanások, nagyobb távolságok, vagy erősebb szerkezetek esetét mutatja be, amikor többé-kevésbé megállapítható a felvételtől, hogy a szerkezet nem károsodott.



29. ábra - Robbantás után állva maradt vasbeton épületek - Irak

Természetesen itt is számolni kell a lökéshullám pusztító hatásával, és az áldozatok magas száma rendszerint megerősíti azt, hogy a halálos áldozatokért nem csak a szerkezetek összedőlése a felelős, hanem a repeszhatás, a tűz, vagy maga a túlnyomás.

A **64-es** afganisztáni támadásban a beton őrtoronyhoz közel történt a robbanás, de látható, hogy a szerkezet állva maradt. Ez nem jelenti azt, hogy a belsejébe hatoló lökéshullám ne okozna halálos sérüléseket. Hasonló megállapításokat tehetünk a **65-66-67-68** felvételek alapján, ezek mindegyikében az objektumhoz viszonylag közel történik a robbanás, de a felvétel alapján olyan nagy szerkezeti károsodás nem vélelmezhető, mint az előzőekben vizsgált eseteknél. Némely esetben annyira gyengének, vagy távolinak tűnik a robbanás, hogy akár nevezhetnénk megghiúsult merényletnek is (**20-34-38-85**). Ugyanakkor a lökéshullám jelenlétének, és kisebb hatásának a jelei esetenként fellelhetők, például a konzolos attikafalak ledőlésében (**70-72**), szabadtetők burkolatának felszakadásában (**71**), vagy elektromos kisülésben (**20-69**). A **70-es** felvételen látható falnak a ledőlését okozhatta a robbanás által kiváltott szeizmikus hatás is, amely a talajon át az épületet rezgésbe hozta, így a kötetlen, vagy gyengén kötött falazat elvesztette integritását. A **63-as** támadás azt mutatja, hogy a négy oldalú megtámasztással nem rendelkező falfelületek még inkább érzékenyek a robbanásokkal szemben. Az utolsó biztonsági kamerás felvételen látható a robbanás előtt a kis udvari épület előfalának ép, majd a robbanás után a leomlott állapota (30. ábra).



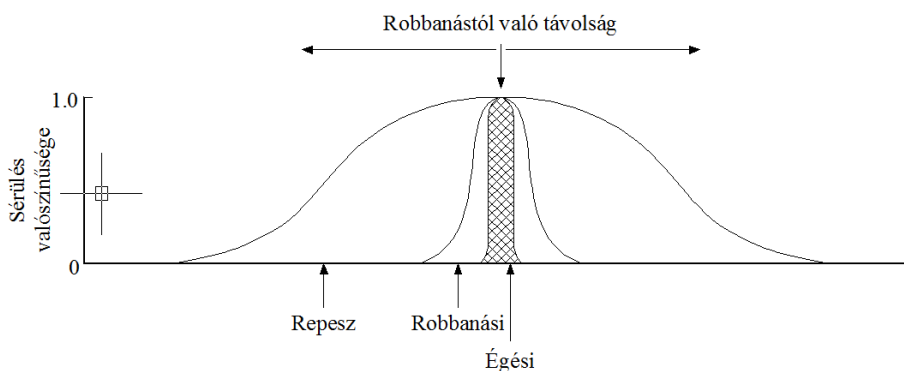
30. ábra - Támaszponti épület előfalának leomlása a robbanás következtében (63) - Irak

Az egyik Szíriában történt támadásból (86) is az a következtetés vonható le, hogy a masszívabb szerkezeti elemek (négy oldalon támasztott, leterhelt falazatok, betonfalak) épek maradtak, jellemzően a robbanás közelében lévő könnyű falazatok, gépjárművek, és az épületek nyílászárói mentek tönkre. A felvételen a robbanásnak egy enyhe hatása is megfigyelhető: az utcán lévő bádog előtetők rezgésbe jönnek, de nem károsodnak.

Külön figyelmet érdemel a látványossága miatt a 73-as támadás, ahol jól kivehető, hogy a robbanástól néhány utcányira lévő ablakok mennyire érzékenyek a lökészerű terhelésre, és könnyen betörnek. Megfigyelhető, hogy az első robbanásnál az üvegszilánkok kifelé hullnak, mely alátámasztja azt az általános megfigyelést, hogy az ablaküveg vagy a robbanás szívó szakaszában törik ki, vagy ha a pozitív szakaszban törik be, akkor a szilánkjait a negatív szakasz szippantja ki. Emiatt a hatás miatt az utcán külön veszélyt jelentenek az épület mellett lehulló üvegdarabok. Az ablakok robbanásállóságának jelentőségére rendszerint emlékeztet az üvegszilánkok repeszsérültjeinek magas száma.

1.2.4.3. Emberekre gyakorolt hatások²⁸

Az embereket több veszély is fenyegeti a nagyszabású robbantások során: a távolság függvényében égési, lökéshullám által kiváltott sérülések, valamint repeszsérülések léphetnek fel.



31. ábra - Sérülési típusok valószínűsége a távolság függvényében [29]

²⁸ Dr. Hernád Mária: A robbanás és a robbanóanyagok emberi szervezetre gyakorolt hatásai és megelőzésének lehetőségei c. PhD értekezésében [33] részletesen bemutatta a robbanás okozta lehetséges sérüléseket. Az alfejezetben nem törekszem ilyen részletes elemzésre, csak egy általános összefoglalóban érzékeltetem a fenyegetés főbb jellemzőit.

A robbanás közvetlen közelében egyszerre lép fel mind a három hatás, majd kis távolságon belül már az égési sérülések valószínűsége jelentősen csökken. Még távolabb haladva a lökeshullám által kiváltott sérülések valószínűsége is csökken, és a repeszhatás az, ami még jelentős távolságból is komoly sérülésveszélyt jelent (31. ábra).

A 31. ábrán jelzett égési veszély közvetlenül a robbanás folyamatából fakadó égésre utal, erre lehet példa az 32/a. ábrán látható sérülés. Ez a katona egy tőle alig néhány méterre felrobbant 105 mm-es aknagránát miatt vesztette életét. A sérülésen egyaránt megfigyelhető a repeszek okozta roncsolás, és égés nyoma is. Másféle hatásból származik, de a gyúlékony anyagokat tartalmazó robbanásoknál is komoly veszélyt jelent a megégés, még akkor is, ha a robbanás kisebb, vagy a robbanástól távolabb helyezkedik el az áldozat. Jó példa erre a 34-es felvétel, ahol a tetőn lévő katonát eléri a lángcsóva, és a ruhája lángra kap. Nem épületek elleni támadást, hanem járőrök elleni útmenti robbantásokat mutatnak be a 81-82-es felvételek, de a gyúlékony anyagok által jelentett veszély ezekben az esetekben is jól megmutatkozik (32/b. ábra).

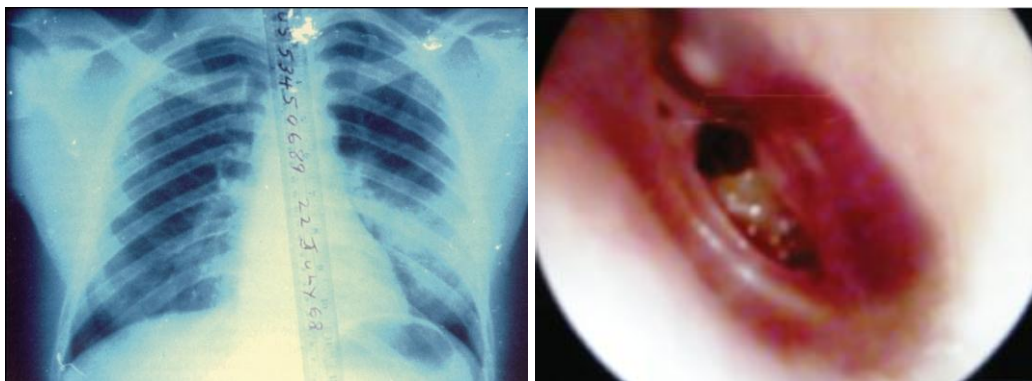


32. ábra – Robbanással kapcsolatos égési sérülések
a, Robbanás közeléből származó égési, roncsolásos sérülés [29]
b, Súlyos égési sérüléseket szenvedett katona²⁹ – Irak 2005 [30]

Mindkét esetben a jármű a robbanást követően lángba borul, valószínűsíthetően a jármű tankjában lévő üzemanyag kap lángra, de lehet, hogy a robbanószerkezet mellé tett gyúlékony anyag felelős a lángokért. A robbanást túlélő katona még ki is tud szállni a lángba borult járműből, de mire égő ruházatát leveszi, valószínűleg komoly égési sérüléseket szenvedett.

A második fő sérülési csoport a lökeshullám által kiváltott hatásokat foglalja magában. Ez jelenthet tüdőkárosodást, dobhártyaszakadást (33. ábra), de a lökeshullám hatása érvényesülhet a végtagok roncsolásában is. A dobhártyát és tüdőt ért sérülések az esetek egy részében magától begyógyulhatnak. Jellemzőek a különböző bevérzési típusok, ödémák. Másodlagos hatásként az épületek összedőlése is áldozatokat szedhet, a romok alá temetett emberek kis valószínűséggel élnek csak túl a merényletet (a 46-ik felvételen látható egy romok alá szorult holttest).

²⁹ Srg. Merlin German „miracle marine (a csodás tengerészgyalogos)” néven híressé vált. Teste 97%-nak megégése után évekig életben maradt, de végül belehalt a szövődményekbe.



33. ábra - Robbanási sérült kétoldali tüdőbevérzése [29] és átszakadt dobhártya közeli képe [31]³⁰

A pakisztáni elnökjelölt, Benazir Bhutto ellen elkövetett merényletben (34. ábra) a politikus halálát egy jelentés szerint [32] a robbanás által a fejre mért ütés és belső bevérzés okozta³¹. Ilyenkor az ember a lökéshullám hatására általában meggörnyedve a földre esik (**76-77-78-79**), nem igazán tapasztalható a filmekből ismert „repülés”, ám ha az ember a töltet fölött áll, akkor a kiemelkedő földtömeg és a kezdeti fázisban lévő expandáló gázok képesek elemelni a földtől az emberi testet (**80**).



34. ábra - Áldozatok a robbanás közvetlen közeléből - Benazir Bhutto elleni merénylet, 2007 december

A legnagyobb veszélyt a repeszhatás jelenti. Repeszek keletkeznek az aknagránátok acél házálásából, a gépjárműből, a roncsolódó falakból, ablakokból. A repesz veszélyessége annak fizikai tulajdonságaitól és az áldozat testrészeinek védelmétől függ. Míg a lökéshullám kevesebb embert érint, de súlyosabb hatású, sőt halálos, a repesz sokkal több embert érint, sokkal többen kerülnek egészségügyi ellátásra, és hatása a jelentéktelentől a súlyos-halálosig terjed (35. ábra). A **75**-ös felvételen látható, amint a robbanástól viszonylag távol lévő katona összeesik, a sérüléseit valószínűleg repeszek okozták.

³⁰ Forrás: Gene Liu, MD, Cedars-Sinai Medical Center

³¹ Az orvosi terminológiában ezt a hatást nevezik „coup-contrecoup” sérülésnek, amikor az agy a koponyacsontnak csapódik [33].



35. ábra – Robbanástól távoli és ahhoz közeli repeszszérültek. Moszkvai metrórobbantás, 2010 március

1.3. RÉSZKÖVETKEZTETÉSEK

Napjaink fejlett társadalmi információs társadalmak, amelyek nagymértékben függenek az ellátórendszertől, az infrastruktúrától. Ezen veszélyeztetettség realizálásából adódóan megkülönböztetett figyelmet igényel a kritikus infrastruktúra. Az infrastruktúrán belül a védelmi infrastruktúra részét képezik a katonai létesítmények is.

Vázlatosan áttekintettem az EU és a NATO KI-politikáját, eddigi eredményeiket. Az infrastruktúrát veszélyeztető fenyegetések közül a terrorizmussal foglalkoztam részletesen. A vizsgálatokhoz egy egyéni módszert mutattam be, a merénylők oldaláról származó propaganda felvételek vizsgálatával vontam le következtetéseket, igazoltam az eddigi katonai műszaki-védelmi álláspontot. Több támadás esetén sikerült a felvételhez párosítani olyan képeket vagy felvételeket, amik a támadást megelőző készüléket, vagy a támadás utáni állapotokat ábrázolják.

A KI veszélyeztetettsége és a terrorista robbantások kapcsán a következtetéseim:

- A jövőben várhatóan szükségessé válik az épületek egyes szerkezeti elemeinek, vagy infrastruktúrák szerkezeti elemeinek a robbanási hatásokkal szembeni tervezése.
- A szubjektív kockázatelemzési gyakorlat a KI elemek kijelölésére alkalmas.
- Magyarországon jelenleg minimális a terrorfenyegetettség (a VBIED támadások esetében különösen), de nemzetközi katonai szerepvállalásaink során valós veszély a katonai objektumaink elleni támadás.
- A terroristák oldaláról származó propaganda felvételek vizsgálata hasznos információkkal szolgál a védekezésre való felkészülésben, például a használt robbanóanyag mennyiség becslése kapcsán.
- A (nyílt) szakirodalmi ajánlások a robbanóanyag mennyiségre vonatkozóan nagyobb értékeket javasolnak, mint amit a saját vizsgálataim alapján számoltam.
- A védőtávolságok, és a táborok kerületi védelme kiemelt fontosságú. A merénylők részéről megjelent az SVBIED házi páncélozása, erre felkészülve a támaszpont védelmét megfelelő romboló kaliberekkel érdemes biztosítani.
- A hagyományos falazott épületek, és a könnyűszerkezetes épületek kiemelten sérülékenyek a robbanási hatásokkal szemben.
- A vasbeton vázas épületeknél az elsődleges tartószerkezet többnyire állékony marad, a védelmet a kapcsolódó szerkezeti elemek szintjén kell megvalósítani.
- Nincs általános védelmet adó termék, az egyik legjobbnak tartott HESCO bástya tönkremenetelére is van példa. A létesítmények biztonságosnak minősítése csak a szerkezetek mérnöki számításokkal való ellenőrzése során lehetséges.

2. MÉRETEZÉSI SZABVÁNYOK, SZABVÁNYOS ELJÁRÁSOK

Az előző fejezetben bemutatásra került az infrastruktúra fogalma, jellemzői, és az azt fenyegető veszélyforrások közül az SVBIED robbantások. Ha a létesítmény ki lett jelölve a védelem megerősítésére, és a rá veszélyt jelentő hatás is adott, akkor a konkrét méretezési, tervezési eljárás lefolytatása a következő lépés. A műszaki problémák egységes kezelésének eszközei a szabványok.

Ebben a fejezetben hazai és nemzetközi kontextusban vizsgálom meg a szabványok hátterét, jellemzőit valamint általánosíthatóságát. **Kitérek a robbantásvédelem lefedettségére annak a számítási módszernek tükrében, ami a 4. fejezetben kerül bemutatásra.** Bemutatom a témában jelenleg elérhető szabványokat és kitérek a hiányosságokra is. Megvizsgálom azokat a számítási alapelveket, amelyekre a méretezési szabványok épülnek.

2.1. A SZABVÁNYOK VIZSGÁLATA ROBBANTÁSVÉDELMI SZEMPONTBÓL

2.1.1. A SZABVÁNYOK JOGI HÁTTERE

Az 1995. évi XXVIII. törvény a következőképp határozza meg a szabvány fogalmát:

„A szabvány elismert szervezet által alkotott vagy jóváhagyott, közmegegyezéssel elfogadott, olyan műszaki (technikai) dokumentum, amely tevékenységre vagy azok eredményére vonatkozik, és olyan általános és ismételten alkalmazható szabályokat, útmutatókat vagy jellemzőket tartalmaz, amelyek alkalmazásával a rendező hatás az adott feltételek között a legkedvezőbb.”³²

Magyarországon 2001 előtt a mindenkor hatályos szabvány használata kötelező volt, mára azonban az EU jogharmonizáció következtében, az Eurocode szabványsorozat bevezetésével az önkéntes szabványhasználat gyakorlata is bevezetésre került³³. Kötelező, minden esetben alkalmazandó előírásokat kizárólag jogszabályok írhatnak elő. A törvényekben, rendeletekben előírt követelmények nem műszakiak, nagyon általános megfogalmazások. Az építőmérnöki gyakorlatban a szabványtól el lehet térni, de igazolni kell, hogy az egyéni tervezés legalább az Eurocode által előírt biztonsági szintet nyújtja.³⁴ A szabványok jelentősége a bírósági ügyekben jelentkezik nagy hangsúllyal, mert jogszabályi előírások híján a szabványok által képviselt műszaki-tudományos színvonal tervezés során való teljesítését vizsgálják. Tehát az Eurocode szabványsorozat 2010-es végleges bevezetése tulajdonképpen nem más, mint annak a törvény által tudományosan naprakésznek való elismerése, egyfajta mérceként való beállítása.

A szabvány főbb jellemzői:

- általános érvényű szabályokat, útmutatókat tartalmaz,
- használatával optimális megoldás biztosított az alábbi területeken:
 - élet-, és vagyonbiztonság,

³² 1995. évi XXVIII törvény 4. § (1) [34]

³³ 2001. évi CXII. törvény 4.§ (1) 5.§ (1) b), (2) c) és 7.§ (2) [43]

³⁴ 45/1997. (XII. 29.) KTM rendelet 2.§ (4) [35]

- környezetvédelem,
- gazdaságosság,
- közmegegyezéssel készül,
- illetékes szerv jóváhagyja, közzéteszi.

A szabványok fogalma és jogállása függ a bevezető állam jogrendszerétől. Észak-Amerikában az állami hatáskörben van annak eldöntése, hogy melyik szakterületre melyik szabványt fogadják el hatályosnak.

2.1.2. SZABVÁNYOSÍTÁSI HIÁNYOSSÁGOK A ROBBANTÁSVÉDELEM TERÜLETÉN

Jelenleg sem nemzetközi szinten, sem Magyarországon nincs érvényben olyan szabvány, ami jogilag hatályos, és egyben kezeli a robbantásokkal szembeni védekezés összes aspektusát. Ismerve a szerteágazó területeket, melyet a robbantásokkal szembeni védekezés érint, nem is feltétlenül várható el, hogy minden előírás egyazon tartalmi egységbe foglalasson. A robbantások elleni védekezés módszerei, eljárásai a két atomhatalomtól, az USA-tól és a Szovjetuniótól erednek. Mára az USA-ból származó irodalmi anyagok és eljárások sokkal elterjedtebbek, könnyebben hozzáférhetőek. A mai orosz előírások – ha vannak – nem közismertek, katonai együttműködés hiányában pedig Magyarországról nem is feltétlenül elérhetőek. Ennek megfelelően a továbbiakban az USA-ból származó anyagokra támaszkodom. A szabványos háttér hiányosságainak megértéséhez az amerikai mérnöki kultúra két tulajdonságát kell kiemelni:

- A mérnöki előírások pragmatikusak, egyszerűek,
- a különböző szakterületeknek (magasépítés, hídépítés) saját szabványaik vannak.

Míg Európában mára általánosan elfogadott, bevezetett, és jogerőre emelt lett az Eurocode szabványsorozat, addig az USA-ban a különféle területekre külön előírások találhatók. A megrendelők, üzemeltetők saját szabványokkal, előírásokkal rendelkeznek. A robbanásterhek általánosítása, szabványosítása igen komplex feladat, rengeteg szubjektív tényezőt kellene a szabvány uniformizáló hatásának alávetni. A megvizsgált előírások alapján ezzel még egyik ország mérnökei sem tudtak megbirkózni, és az USA-ban sincs egységes álláspont ebben az ügyben. Példának okáért az USA-ban mind a mai napig zavart okoz a mérnökök között az osztott biztonsági tényező eljárás használata. Bizonyos szabványok (pl. AREMA – Amerikai Vasúti Szabvány) még mindig a megengedett feszültségek módszeréhez kötik a tervezést, amelyről már régen kialakult az az álláspont, miszerint gazdaságtalan és mérnökileg nem kellően precíz.

Más bizottságok állítják össze a különböző építményekre vonatkozó szabványokat, így történhet meg az példának okáért, hogy a kanadai szabványok más képletet adnak egy acélgerenda vizsgálatára híd vizsgálata vagy épület vizsgálata esetén. Gyakori jelenség, hogy az állam a civil szférával együttműködik a K+F tevékenységben, de ez nem egy központosított, irányított rendszerben történik, hanem az állam (és a hadsereg) mint egy piaci szereplő száll be civil K+F életbe, és hajt végre kutatást, publikál eredményt, de leginkább megrendel és vásárol a többi szereplőtől.

Ezt követően az összegyűjtött tudásanyagból kialakítja a saját elvárásainak megfelelő követelményrendszert, és előáll az a helyzet, hogy az amerikai állami hivatalokra más szabvány vonatkozik, mint a hadsereg által üzemeltett létesítményekre, és ugyancsak külön szabvány érvényes a kritikus infrastruktúrának számító energiaszektorra. Mindegyik előírás ugyanarra az

esetre ír elő ugyanolyan típusú feltételeket, csak mindegyik szereplő a saját maga által validált eredményekben bíz. Ez egyben rá is mutat arra, hogy még mindig nagy a bizonytalanság a robbanás hatásainak pontos leírásában, a következmények becslésében.

Ki kell még emelni az amerikai gyakorlatból azt, hogy a tudományos életet (és ezen belül a katonai műszaki tudományt) „liberalizálta”. Ez alatt azt kell érteni, hogy rengeteg olyan régi kutatási anyag került titkosítás alól való feloldásra, és nyílt (internetes) közzétételre, amely már nem számít state-of-the-art³⁵ technológiának, de erős alapot szolgáltat a feltörekvő K+F tevékenységnek. A hullámfizika analitikus megoldásaitól a kísérleti atomrobbantás mérési jegyzőkönyvéig számos tudományos kutatási jelentés érhető el szinte percek alatt, ingyenesen, névtelenül. Vannak olyan állami kutatóintézetek³⁶, akik ingyenesen tesznek közzé naprakész kutatási információkat, elméleti összefoglalókat. Ennek az alsószintű tudományos anyagok titkosítását nélkülöző gyakorlatnak a háttérén elmélkedve nehéz más indokot megnevezni, mint azt, hogy **ez a háttér katalizátorként szolgál az ország K+F életében**, és több a hozadéka, mint a nyílt hozzáférés által jelentett kockázati hátrányok.

A szabványokban megjelenő számítási elméletek és képletek mindig a tudományos kutatások átemelt eredményei, de míg az Eurocode-ban erre való utalás nem található, addig az amerikai szabványokban nem ritka, hogy a szabvány kihivatkozik bővebb információért külsős szerző könyvére, vagy tudományos publikációjára. Utóbbi gyakorlat – saját mérnöki tapasztalatom alapján – elősegíti a konzekvens mérnöki tervezést.

Eddigi kutatásom, és észak-amerikai piacon való mérnöki gyakorlatom alapján **az alábbi tényezőket látom a robbantások elleni méretezés szabványszintre emelkedésének gátjaként:**

- Egy széles körben alkalmazható szabvány, ha a tervezés minden aspektusára kiter, túl bonyolult lenne a többi, megszokott amerikai szabványhoz képest.
- Kevés a visszacsatolás az életből, a módszerek validációja jobb esetben is csak kísérletek által igazolt. A világhírű robbanások elleni tervezéssel foglalkozó cég, a BakerRisk vezető munkatársa személyes kérdésemre, miszerint ért-e már támadás olyan épületet, amit ők terveztek, egyértelmű „nem”-mel felelt.
- Ez egy szűk mérnöki terület, érthető módon ezek a mérnökök nem érdekeltek a tudásuk közzétételében. A nehezebb tervezési feladatok megoldásához nincs meg a szabványba foglaláshoz szükséges, imént említett mérnök-társadalmi közmegegyezés. Különösen igaz ez, ha az USA-ban meglévő szabvány-rendezetlenségi állapotokat tekintjük.
- A teherfelvétel alapjául szolgáló figyelembe veendő robbanóanyag mennyiség nehezen meghatározható. Az elérhető adatok inkább csak tájékoztató jellegűek, és egy ilyen pontatlan bemenő paraméter esetén nehéz a biztonság szintjét meghatározni. Némely előírásban meg van határozva a figyelembe veendő mennyiség, de ezek az előírások titkosítottak. A titkosítással kapcsolatos előnytelen helyzetet jól érzékelteti a madridi NATO Counter-IED központban kapott információ: NATO szinten már dolgoznak egy átfogó IED esemény-adatbázison, de nem ez lesz az első, az USA-nak már van egy nagyon fejlett és részletes IED adatbázisa, ám az a NATO számára nem hozzáférhető. Ilyen „bizalmi” viszonyok mellett nehéz szabványosítási eredményeket várni a szövetségi rendszeren belül.

³⁵ A kor színvonalának megfelelő, fejlett.

³⁶ Pl.: Sandia National Laboratories - <http://www.sandia.gov/>

- Hiányzik a széles körű igény a szabványra. Annyira marginális a szakterület, hogy egyértelműen körülírható a felhasználók köre. A hadsereg, az államvédelmi szereplők és a kőolajipar résztvevői hatalmas szervek, vállalatok, saját mérnök részlegük van, és inkább egyéni tervezési követelményeket állítanak. A robbantások elleni tervezés legnagyobb résztvevőiként nem tartanak igényt egy általános szabványra. Előbbiekből következik, hogy nincs meg a mindenki által elfogadott hitelesítő szerv sem.

2.1.3. A MEGLÉVŐ SZABVÁNYOK, ELŐÍRÁSOK ÁTTEKINTÉSE

A mérnöki tervezés folyamatához szükséges lépések vannak a 3. táblázatban felsorolva. A klasszikus mérnöki tervezéshez az Eurocode és sok más szabvány többé-kevésbé a felsorolt öt lépéshez szolgáltat információt. A két kiemelt pont (1-3) jelzi a problémát a meglévő gyakorlattal. Ennek értelmében nincs valószínűségi alapon történő méretezés, hiányzik a biztonság definíciója. Determinisztikus szinten azonban egy jól leírt metodika áll a mérnök rendelkezésére. A következőkben összegzem a témához kapcsolódó fő előírásokat.

Hagyományos szabványok tartalmi elemei		Robbantási hatásokkal foglalkozó előírások (VBIED tekintetében)
1	a terhet kiváltó (meteorológiai) hatás statisztikai kiértékelés útján nyert mérőszáma	<u>nem létezik ilyen statisztikai kiértékelés</u>
2	a hatás teherre alakításának módja, a szerkezet geometriájának figyelembe vételével	rendelkezésre állnak
3	biztonsági tényezők, teherkombinációk összeállítása, biztonsági célérték meghatározása	<u>a terhet determinisztikus változóként kezelik, nincs biztonsági tényező</u>
4	igénybevételek és ellenállások számítási módja	rendelkezésre állnak
5	szerkesztési szabályok	rendelkezésre állnak

Jelölések: ✓ tartalmazza, szól róla x nem tartalmazza
 ✓? tartalmazhatja, de titkosított ✓ tartalmazza, de hiányos
 ? kérdéses, mert nincs rendelkezésre álló példány

Szabvány megnevezése	1	2	3	4	5
UFC	x	✓	✓	✓	✓
ISC és VA	✓	✓?	✓?	✓?	✓?
ASCE	x	✓	✓	✓	✓
ACI	x	✓	?	✓	✓
CSA S850-12	x	?	?	?	?
NATO STANAG	✓	x	x	x	x
USAF	✓	x	x	x	x
ATF	✓	x	x	x	x
MH – Régi orosz előírások	x	✓	✓	✓	x
Probabilistic Model Code	x	x	✓	x	x
Eurocode	x	x	x	x	x

3. táblázat – A szabványok szükséges tartalmi elemei robbantások elleni tervezéshez ³⁷

³⁷ Szerző által szerkesztett táblázat. Az itt rövidítésként szereplő elemek a táblázat után részletesen bemutatásra kerülnek.

Az UFC szabványsorozat az Amerikai Honvédelmi Minisztérium (DoD) által készített, elfogadott és megkövetelt szabvány. Kötelezően alkalmazandó minden Amerikai Honvédelmi Minisztérium tulajdonába tartozó épület tervezésekor, amennyiben az terrorizmus veszélyének van kitéve. Széles skálát ölel fel a témája, a szennyvízkezeléstől a geotechnikán át egészen a biztonsági beléptető rendszerig terjed.

Építőmérnöki (szerkezet tervezési) szempontból fontos kötetek az UFC-4-023-03 a progresszív összeomlás elleni tervezésről, illetve az UFC-4-010-01 a javasolt alaprajzi védőtávolságokról. Utóbbinak részletesebb változata a titkosított UFC-4-010-02, ami megadja a figyelembe veendő robbanóanyag mennyiséget is³⁸. A két legfontosabb fejezet azonban az UFC-3-340-01 és UFC-3-340-02, amelyek több belső kiadást, felújítást éltek meg, míg végül az UFC szabvány részévé lettek.

A legelfogadottabb előírás a UFC-3-340-02³⁹ „Structures to resist the effects of accidental explosions” című gyakorlati útmutató [37]. Ez nem szabvány, csak egy Technical Manual, tehát gyakorlati útmutató. 1990-ben rendelték el titkosítás alól való feloldását. A közel 2000 oldalas **kiadvány adja a szakirodalommal foglalkozó egyéb útmutatók, könyvek segédletek döntő többségének az alapját**. Jelen állapotban, – a gyakorlat ezt mutatja – megkerülhetetlen a témával foglalkozó mérnök számára. Az UFC-ben való új kiadás digitálisan jelent meg, ami a grafikonok felhasználhatósága szempontjából jelentős javulás.

A kiadvány célja a baleset jellegű robbanások elleni védekezés. Azokkal a robbanásokkal foglalkozik, amelyek nem a klasszikus hadviselés támadófegyvereitől származnak. Ennek megfelelően hadianyagraktárakat, baleset jellegű robbanásokat, de az VBIED robbantást is lefedi. Előnye a gyakorlati használhatósága, részletessége, hátránya, hogy csak a kézi számításokról ír, emiatt bizonyos tekintetben elavult.

A kiadvány párja a még mindig részleges titkosítás alatt lévő UFC-3-340-01, régebbi nevén DAHS-CWE [38], melynek jelentése: Design of Hardened Structures for Conventional Weapons Effects - Védett létesítmények tervezése hagyományos fegyverek hatásai ellen. A kiadvány jogállása: „USA védelmi szervei és azok alvállalkozói számára, valamint a NATO tagországok védelmi szervei számára nyílt és ingyenes”.

A szabvány alapvetően átfogó jellegű, rendszer szemléletű. Kimondottan a védett létesítmények megtervezésére szolgál, a kezdeti előtervezéstől egészen az apróbb részletekig. Tervezési koncepciója, hogy az építmény minden elemét azonos védelmi szinten kell megvalósítani („balanced survivability”).

Míg a UFC 3-340-02 az első sorokban rögzíti, hogy nem célja tervezési kritériumok felállítása, addig a DAHS-CWE inkább releváns forrásként tünteti fel magát, egyértelmű útmutatást igyekszik adni határozottabb hangnemben. A két szabvány közt elsősorban témabeli különbség van, mindazonáltal nagyon sok az átfedés, hiszen a robbanás hatásai hasonlóak, hasonló a dinamikai

³⁸ A titkosított anyag tartalma a BakerRisk előadásában volt megemlítve.[36]

³⁹ Régebbi kódja: TM-5-1300

számítás, hasonló a szerkezetek teherbírásának meghatározása is. A DAHS-CWE természetesen több információt nyújt a védett létesítmény alaprajzával, álcázásával, berendezésével, gépészetével, vegyi támadások elleni védelmével kapcsolatban, míg a UFC 3-340-02 ezekről egyáltalán nem szól. A két szabvány közti különbségek egy részéért a köztük eltelt 8 év is felelős lehet.

Érdemes megemlíteni, hogy a DAHS-CWE kiadása idején 1998-ban a számítástechnika lényegesen magasabb színvonalon járt, mint 1990-ben, és a végelem módszert már valós alternatívaként kínálja a szabvány, sőt vázlatos elméleti összefoglalást is ad róla, és még a különböző földbe ágyazott szerkezetek modellezési lehetőségeire is kitér. Átfogó listát közöl az akkor piacon lévő explicit és implicit végelem szoftverekről, és az általuk használt JWL féle TNT anyagmodellről is szól (ld. 3.2.3. fejezet). A UFC 3-340-02 nem említi a JWL egyenletet, holott azt már 1973-ban publikálták. A robbanási paraméterek szórásával csak igen szűkszavúan foglalkozik mindkét szabvány (ld. 4.1. és 4.2. fejezetek).

ISC – PHYSICAL SECURITY CRITERIA FOR FEDERAL FACILITIES ÉS

VETERAN AFFAIRS – PHYSICAL SECURITY DESIGN MANUAL FOR VA FACILITIES

Amerikában általában az állami, de nem a Honvédelmi Minisztérium alá tartozó épületeknél, valamint a DoVA (a veteránügyekkel foglalkozó minisztérium) hatáskörébe tartozó épületeknél alkalmazandó szabvány. Robbantások elleni tervezést segítő kötetek, az épülettel szemben támasztott követelményeket foglalja össze. Az anyaghoz nincs hozzáférésünk, így keveset lehet tudni róla, de az kiemelendő, hogy **közöl értékeket a figyelembe veendő robbanóanyag mennyiségre vonatkozóan.**

RÉGI OROSZ ELŐÍRÁSOK

A 70-es, 80-as évek vonatkozó orosz szakirodalmába a Magyar Honvédség hivatalos magyar fordítású füzetek⁴⁰ nyújtanak betekintést. Ez a kiadvány az elsősorban nukleáris robbanások ellen tervezett védett létesítmények tervezéséről szól. Kiemelendő a 9. füzet, ami vázlatosan ugyanazokon a főbb pontokon keresztül mutatja be a robbanási paraméterek, és az épületterhek felvételét, mint az amerikai előírások. A létesítmények speciális jellegéből adódóan szó esik a vágatokban haladó lökéshullám jellemzőkről is.

Szintén kiemelendő a 11. füzet, ami a vasbeton szerkezetű létesítmények dinamikus méretezésével foglalkozik. Az útmutató a méretezésméleti alapok tisztázásával kezdi a módszer bemutatását, felhívja a figyelmet a robbanási teher statisztikai kiértékelésére. Ezt követően néhány alap szerkezettípuson mutatja be a méretezési lépéseket, először dinamikai, majd vasbeton szilárdságtani szempontból. Az USA előírásokhoz hasonlóan kezeli a dinamikus szilárdságnövekedést és képlékeny tervezést ír elő. Speciális jellegéből adódóan olyan kérdésekkel is foglalkozik, ami a UFC előírásokból hiányzik, ilyen például a repedéstágassági követelmények. Ko-

⁴⁰ A HM Beruházási és Fenntartási Főnökség 1986-ban kiadott 25 kötetes anyaga csak részleteiben állt rendelkezésre, ezekből 3 füzet volt témába vágó. [44]

rának megfelelően magas színvonalú, ám kidolgozottságában inkább összegző jellegű az útmutató. Külön megemlítendő, hogy már említést tesz a terjedőben lévő tranziens végeselem módszer alkalmazásáról.

Összességében elmondható, hogy a régebbi orosz szakirodalom alapján ugyanúgy lehetőség van egy mai, VBIED támadással szemben tervezett épület méretezésére, mint az USA előírások alapján. Az útmutatók szűkszavúsága miatt azonban bizonyos korlátozásokkal kell számolni, (pl.: csak vasbeton szerkezetéről szól, körülményesebb dinamikai módszerek).

ASCE – DESIGN OF BLAST-RESISTANT BUILDINGS IN PETROCHEMICAL FACILITIES [47]

Az ASCE (Amerikai Építőmérnökök Szövetsége) által kiadott útmutató, amely a kőolaj-ipar részére tervezett épületek robbanások elleni tervezési segédleteként lett elkészítve. Bár a robbanási hatás alapjául a gázrobbanásokat veszi, az azt követő méretezési eljárás használható más robbanási hatások esetén is. A második kiadás szót ejt a modern számítógépes számításokról, azok alkalmazhatóságáról. Bizonyos tekintetben (pl. alapozások) több és hasznosabb információt közöl, mint a UFC 3-340-02.

ACI - REPORT FOR THE DESIGN OF CONCRETE STRUCTURES FOR BLAST EFFECTS [48]

Az ACI 370R-14 jelű kutatási jelentése a betonszerkezetekkel foglalkozó amerikai szabványok sorába illik. Jól összefoglalja a robbantások elleni tervezés lépéseit, de a méretezéselméletről nem esik szó, tehát csak az adott teherre történő méretezésről ír.

CSA S850-12

A robbantások elleni méretezést taglaló kanadai szabványhoz nincs hozzáférésem, így tartalmát illetően csak azzal a feltételezéssel élek, hogy az ASCE-hez, illetve ACI-hoz hasonló. A szabvány hiányosságait azonban előre vetíti a publikus előszavában az a kitétel, miszerint „egy robbanás nagysága és súlyossága nem adható meg pontosan”.

EUROCODE

Az Eurocode egy 9 fejezetből álló, nagyon jól és egységesen szerkesztett szabvány, ami a méretezéselmélettől a különböző építőanyagok méretezéséig számtalan mérnöki problémára megoldást nyújt. Az EC-1 foglalkozik a baleset jellegű terhek meghatározásával, azonban a robbanásoknál csak a beltéri gáz-, és porrobbanások vannak taglalva⁴¹. A rendkívüli hatások teherkombinációjában a hatás egyedi értékű, nincs biztonsági tényező alkalmazva. Bevetett módszerként említi meg és megengedi a valószínűségi módszerek alkalmazását. Bár nem közöl robbantási adatokat, méretezési eljárásokat, mégis az Eurocode a legletisztultabb méretezési szabvány, és a méretezéselméleti kereteibe beilleszthető egy új típusú vizsgálat, ezért jelen értekezés során is az Eurocode alapjai lesznek figyelembe véve.

⁴¹ EN 1991-1-7: General actions – Accidental actions. Section 5., Annex D [49]

A Dániai Műszaki Egyetemen fejlesztett, ingyenesen hozzáférhető szabvány, ami csak a terhek felvételének valószínűségelméleti megközelítésével foglalkozik. A szabvány nem foglalkozik a robbanásterhekkel.

SPIRIT [89]

Érdemes megemlíteni a SPIRIT nevű kutatási projektet, amelyet az EU támogatásával több neves, patinás mérnökiroda (pl. ARUP, Fraunhofer Institut) fejlesztett 2010 és 2013 között. Ez nem egy szabvány, hanem egy olyan szoftver, amely az épületek terrorista támadásokkal szembeni kockázatelemzését végzi el. A bevitt adatok az épület kialakítása, méretei, értéke, tartózkodási helyeken lévő emberek száma, stb. A robbanás paramétereiből számítja a következmények mérőszámát, majd ezt szorozza a támadás valószínűségével. A mérőszámok kvalitatív jellegűek, 0-1 skálán mozognak. Az eredmények alapján látható, hol a gyenge pontja az épületnek, és a szoftver adatbázisában számos kockázatsökkentő műszaki megoldásból választhat a felhasználó. Ebbe az adatbázisba a fejlesztők várják a gyártók regisztrációját. A rendszer jelenleg is fejlesztés alatt áll, és sok eleme titkosított. Bár nem teljesen ismertek az alapjai, feltételezhető, hogy egyszerű módon meghatározza a robbanási paramétereket, majd az okozott károkat az érintett szerkezetek táblázatos teherbírási adatai alapján számolja (a programban tehát valószínűleg nincsen statikai motor, de a használt teherbírási táblázatok előállításához fejlett modellezési technikákat használtak). A mérőszámok relatív volta miatt nem deklarálnak az elért biztonsági szint, viszont a szubjektív mérlegelést pénzügyi kárfelméréssel és áldozatok várható számával támogatja a szoftver. A zárójelentésben megemlítik, hogy a projekt részeként előremutató javaslatokat fogalmaztak meg az EU számára egy jövőbeli, biztonságalapú épületvédelmi előírás megalkotásához.

EGYEBEK

- Exxon Blast Technology Manual EE.123E.98 TMEE065 January, 1999 – Az Exxon olajóriás belső használatra szánt útmutatója (nem hozzáférhető)
- NATO Stanag 2280 – Katonai táborok védelmi kialakításához figyelembe vehető VBIED robbanóanyag mennyiségeket szolgáltat. [127]
- USAF Handbook 10-2401 VB Mitigation guide – Védett létesítmény kialakításához figyelembe vehető VBIED robbanóanyag mennyiségeket szolgáltat. [128]
- ATF (Amerikában az alkohol, dohány, fegyver és robbanóanyagok felügyeleti szerve) – van egy kiadott táblázatuk az általában figyelembe vehető VBIED robbanóanyag mennyiségekről. [129]

2.1.4. HAZAI ELŐÍRÁSOK ÉS GYAKORLAT

Az építési jog több helyen kitér a védelmi célú létesítményekre. Az OTÉK-ben⁴² lévő, ide vonatkozó rész igen szűkszavú, azt az elvet fogalmazza meg, hogy a védett létesítményeket óvóhelyként is használhatónak kell tenni.

⁴² 253/1997. (XII. 20.) Korm. rendelet (Országos Településrendezési és Építési Követelmények) 106. § [40]

A 40/2002-es kormányrendelet kijelöli [41] a katonai építeshatóságot, mint a védett létesítmények építtetésének engedélyezési folyamatáért felelős szervet. Hasonlóan más építeshatósághoz, a Katonai Építeshatóság illetékességi területére is érvényes a 45/1997. (XII. 29.) KTM rendelet az építeszeti-műszaki tervdokumentációk tartalmi követelményeiről. Eszerint

„a tervdokumentációban az Étv. 31. § (2) bekezdés c)-h) pontjaiban meghatározott követelmények teljesítését a vonatkozó nemzeti szabványok vagy azokkal legalább egyenértékű műszaki megoldás alkalmazásával kell biztosítani.”⁴³

A vonatkozó nemzeti szabvány Magyarországon az Eurocode szabványcsoport, tehát a tervezést ez alapján ajánlott elvégezni, de a törvény alapján a védett létesítményeknél is dönthet úgy a tervező, hogy saját felelősségére egy egyenértékű szabványt használ (ld. 2.1.1. fejezet). Mivel az Eurocode nem foglalkozik a robbantások elleni védekezéssel, ezen a területen **szükséges egy másik szabvány alkalmazása.**

A 2.1.3. fejezetben bemutatott orosz előírásokon kívül meg kell említeni még a kor kihívásainak megfelelően a másik fontos magyar előírást [133], amely az óvóhelyek tervezésével foglalkozik. Ez a föld alá épült szerkezetre vonatkozik, ennek megfelelően a föld feletti lökéshullámokat nagyon leegyszerűsítve, egy konstans nyomásértékkel jellemzi, amit az óvóhely besorolási osztályához köt. Az előírás ilyen mértékű egyszerűsítéssel nem felhasználható napjaink kihívásainak megoldására.

A hazai szakirodalomban meg kell említeni Dr. Goschy Béla munkásságát, aki több művében [45][46] is foglalkozik a robbanások elleni méretezéssel. Mint műegyetemi oktató, munkássága csak a vasbeton elemek dinamikai méretezésére terjed ki, azonban különbözik a UFC 3-340-02-ben használt elmélettől.

Kutatásom során igyekeztem feltárni a meglévő hazai gyakorlatot a robbantások elleni tervezés területén. A munkát nehezítette a probléma ritkasága és a szakmai résztvevők – érthető – elzárkózása. Az ilyen típusú munkáknál felmerülő cégekkel hivatalos úton, illetve közvetlen ismertség által léptem kapcsolatba. A feltett kérdés így szól: *„Volt-e a cég szakmai gyakorlatában robbanási lökéshullámok hatásaira való tervezés, és ha igen, milyen szabványok előírása szerint jártak el?”* A diszkréció érdekében az adott válaszokat nem kötöm közvetlenül név szerint a cégekhez.

A megkérdezett generál-tervező cégek:

- Unitef Zrt.
- Főmterv Zrt.
- Pöyry Erőterv Zrt.
- Uvaterv Zrt.
- OT Industries Zrt. (volt Olajterv Zrt.)
- ÉPTI Kft.

⁴³ 45/1997. (XII. 29.) KTM rend. 2. § (4) [42]

Összességében elmondható, hogy a cégek nem találkoztak még ilyen jellegű problémával, illetve azon kivételes esetekben, amikor felmerült, külső szakértőt vontak be a feladat megoldására (és ezek az öreg statikusok már nincsenek az élők sorában). Volt olyan cég, amelyik egyáltalán nem szolgáltat válasszal. A tapasztalataim alapján még a szakmai körökben is, ha a robbanások elleni tervezésről van szó, a robbanás fogalmát kulcsfontosságúnak tartva a robbantásokkal foglalkozó szakemberek kerülnek előtérbe. Ennek megfelelően az egyik említett cég egy elismert ipari-bányászati robbantástechnikai szaktekintélyt kért fel az egyik kiemelt fontosságú hazai középület tervezéséhez. A nemzetközi gyakorlat és a szakirodalom fejlődése is azt mutatja azonban, hogy a robbantások elleni tervezés témaköre alapvetően építőmérnöki feladat, a teherfelvételhez és a tervezéshez döntő többségben statikai, dinamikai ismeretekre van szükség.

A budapesti metrókat polgári védelmi létesítményeknek is tervezték⁴⁴. Idős mérnökök elbeszéléseiből tudható, hogy a vészhelyzet esetén alagutat lezáró acélszerkezetet lökéshullámok hatására is kellett tervezni, amit az akkori orosz nyelvű előírások szabályoztak.

A mai gyakorlatban azonban nem ismert, milyen előírások alapján kell dolgozni, és mint azt az imént említett példák mutatják, a tervezendő műtárgyak elenyésző száma miatt nincs szakmai gyakorlat. Ennek tisztázása érdekében megkerestem a Katonai Építési Hatóságot is, ahol szintén nem tudtak felvilágosítást adni arról, hogy milyen szabvány szerint kell elvégezni egy kiemelten védett objektum robbantások elleni tervezését. Tájékoztatásuk szerint erre vonatkozó előírás nincs, a döntés a tervező mérnöké.

Véleményem szerint azonban a figyelembe veendő robbanóanyag mennyiség előírása a megrendelő feladata, nem a mérnöké. Az USA-ban terjedőben van a „performance based design”⁴⁵, ami egy olyan tervezési módszer, ahol a megrendelő a mérnök által készített számítások alapján választani tud, hogy mekkora kockázatot és ezzel járó költségeket vállal. Ezt a tervezést alkalmazva megosztható a felelősség a megrendelő és a mérnök között.

2.2. MÉRETEZÉSELMÉLETI ALAPOK

Az objektív biztonság számításához elengedhetetlenek a méretezéselméleti módszerek. Az előbbiekben felsorolás szinten bemutatásra kerültek a szabványok hiányosságai. Most röviden bemutatom a szabványok által is tartalmazott, elterjedt méretezéselméleti módszereket. A későbbiekben ezeknek megvizsgálásra kerül a robbanási méretezésben való alkalmazhatósága.

A még ma is használatban lévő méretezési módszerek közül három kiemelendő módszer létezik. Az egy biztonsági tényezőt használó eljárásnál (megengedett feszültségek módszere) determinisztikus, tehát egzaktul meghatározhatónak feltételezett a hatás. Ezt egyre inkább leváltja az 1960-as évektől terjedő osztott biztonsági tényezős eljárás, ahol a kétoldali biztonság mellett a fő különbség az eljárás valószínűségelméleti háttere. Különleges feladatoknál kerülnek alkalmazásra a valószínűségi módszerek (EC szerinti Level II és III), és azok jelenleg is kutatás alatt álló módszerei.

⁴⁴ A 2-es és a 3-as metró védett szakaszai III. kategóriájú polgári óvóhelyek.

⁴⁵ PBD – Performance Based Design – teljesítmény alapú tervezés

2.2.1. A DETERMINISZTIKUS ELJÁRÁS

Az R ellenállást és E hatást tekintve a determinisztikus megközelítés szerint a megfelelőség igazolása a

$$\varphi \cdot R_{min} > E_{max}$$

képlettel írható le, ahol φ egy tapasztalati, konszenzus alapján megválasztott biztonsági tényező. Az eljárás nem tudja figyelembe venni a paraméterek minimális és maximális értékeit, a modellek bizonytalanságait, és a kivitelezési hibákat. Főleg nem tudja figyelembe venni azt, hogy egy azonos teherértékű állandó és esetleges teher nem ugyanolyan valószínűséggel teszi tönkre a szerkezetet (az esetleges teher gyakoriságából adódóan). Ez a módszer él még tovább ma az amerikai mérnöki gyakorlatban, és több helyen a geotechnikában.

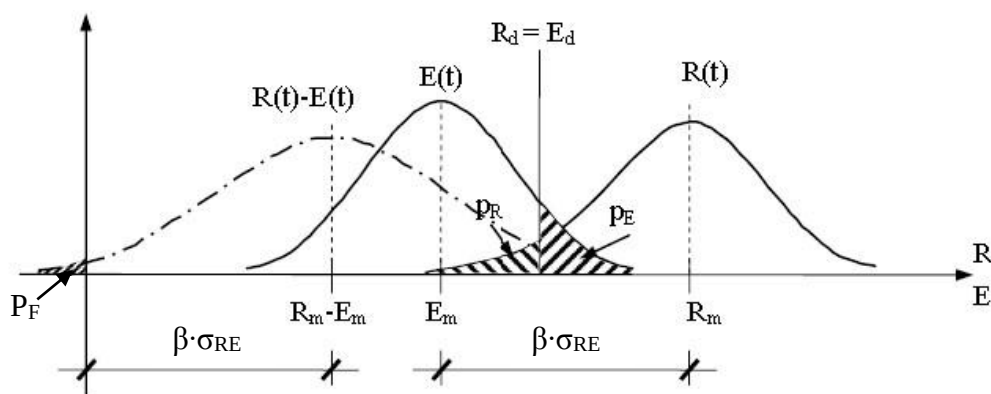
2.2.2. FÉL-VALÓSZÍNŰSÉGI (PARCIÁLIS TÉNYEZŐS) ELJÁRÁS

Ez az eljárás átmenet a biztonsági tényezős és a teljes valószínűségi eljárás között. Közvetett módon figyelembe veszi a hatások és ellenállások statisztikai jellemzőit, így küszöbölhetők ki az imént felsorolt tervezési problémák. Az alap összefüggés

$$\gamma_R R_k > \gamma_E E_k$$

ahol R_k és E_k karakterisztikus értékek, γ pedig a parciális biztonsági tényező. A szabványban a túllépési és alulmaradási valószínűségek úgy vannak megválasztva, – és ezekhez a parciális biztonsági tényezők kalibrálva – hogy az így végzett méretezés egy optimális tönkremeneteli kockázatot eredményezzen, de ez **az optimális kockázat** nincs számszerűsítve, és **közvetlenül nem szerepel az eljárásban**.

A parciális biztonsági tényezős eljárásnál tehát a biztonsági tényezőkön keresztül van biztosítva, hogy az R ellenállás kellően nagy β megbízhatósággal nagyobb legyen a E hatásnál. Az eljárás a szórásokat adott értéként kezeli (a biztonság javára közelítve), így a valóságban (kisebb szórások esetén) az elvártnál nagyobb biztonságot is eredményezhet.



36. ábra – A megbízhatóság és a tönkremeneteli kockázat értelmezése [51]

A 36. ábra mutatja a hatás és teherbírás oldali sűrűségfüggvényeket. Az esetleges hatások sűrűségfüggvénye adott referencia időszakra vonatkozik (tervezési élettartam).

A figyelembe veendő élettartamokat és vonatkozó karakterisztikus értékeket a szabvány határozza meg⁴⁶. Az egyedi hatások ~98%-os kvantiliséhez tartozó tervezési értékből a teherkombinációk alkalmazásával jutunk a tehercsoportok által képviselt ~99%-os kvantilishez (ez egy reprezentatív érték, amely inkább az elmélet alapját illusztrálja, de a gyakorlatban sokszor más értékre adódik). A parciális tényezőket valószínűségi módszerekkel határozták meg, az addigi bevett mérnöki gyakorlatot, és megvalósult szerkezeteket alapul véve.

2.2.3. VALÓSZÍNŰSÉGI MÓDSZEREK

Az Eurocode-ban Level II és III kategóriába sorolt valószínűségi méretezési eljárások során a nem kívánt állapot bekövetkezésének kockázatát (vagy a szerkezet megbízhatóságát) közvetlenül mutatják ki és hasonlítják össze annak vállalható mértékével. A szerkezet megfelelésének igazolása a

$$P[R(X)_T \leq E(Y)_T] < P_{opt_T}$$

összefüggés alapján történik, ahol X és Y valószínűségi változók, P a valószínűség, P_{opt} az optimális kockázat, T pedig a tervezési élettartam. A tönkremeneteli kockázat a 36. ábrán látható P_F jelöléssel. Ez közvetlen összefüggésben áll a β megbízhatósági indexszel, az alábbi összefüggés szerint:

$$P_F = 1 - \Phi(\beta)$$

ahol Φ a standard normális eloszlásfüggvény. A 36. ábra jelöléseit felhasználva a β geometriai interpretációja az R_m és E_m várható értékek különbségének és az σ_{RE} eredő szórásnak a hányadosa:

$$\beta = \frac{R_m - E_m}{\sigma_{RE}}$$

A β értékét abban az esetben lehet ilyen egyszerűen számítani, ha az $R_m - E_m$ függvény lineáris, és az őket alkotó valószínűségi változók mind normál eloszlásúak. Ez a gyakorlatban szinte soha nem fordul elő, tehát más eljárások használata szükséges.

A valószínűségi módszerek vizsgálatához be kell vezetni a határállapot-függvény fogalmát. A határállapot-függvény egy olyan matematikai összefüggés, amely 0-ra rendezve a tönkremenetel feltételének teljesülését írja le. Általánosított formában:

$$G(X, Y) = E(Y) - R(X)$$

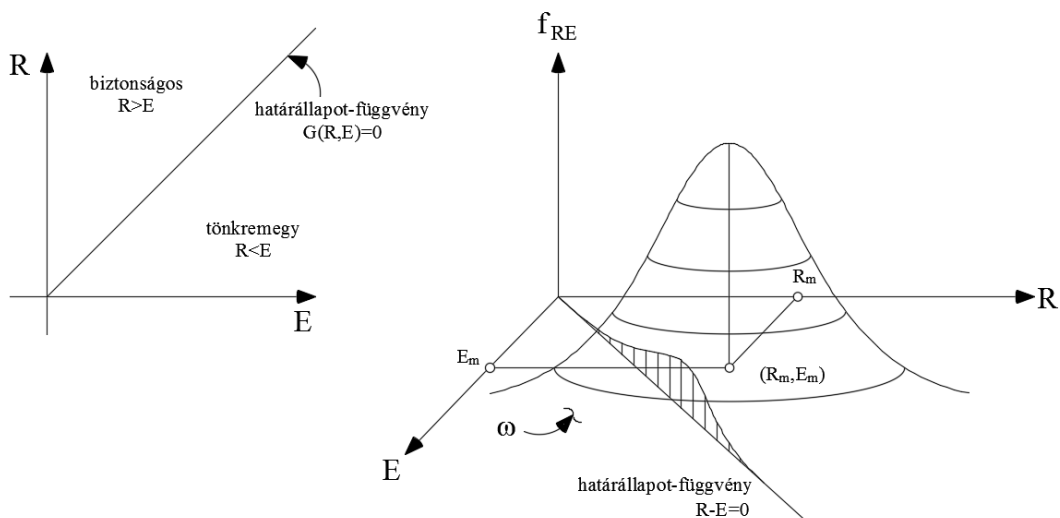
ahol G a határállapot-függvény általános jelölése, X és Y valószínűségi változók, R az ellenállás, E pedig a hatás.

A határállapot-függvény a valószínűségi változók által kifeszített többdimenziós teret egy „biztonságos” és egy „tönkremegy” (ω) zónára osztja (37. ábra).

⁴⁶ EN1990 4.1.2.

Szemlélet útján is könnyen belátható, hogy a R ellenállás és E hatások síkján értelmezett $f(R,E)$ kétváltozós sűrűségfüggvényt a ω tartományon integrálva számítható a P_F tönkremeneteli valószínűség.

$$P_F = \iint_{\omega} f(R,E) dR dE$$



37. ábra – A valószínűségi változók által kifeszített teret a G függvény „megfelel” és „nem felel meg” részre osztja [52][53]

A P_F integrál közvetlen kiszámítása a változók számának növekedésével egyre nehezebbé és gyakorlatilag lehetetlenné válik, így numerikus közelítő módszerekkel kell megoldani a problémát. Ezek a módszerek a β megbízhatósági indexet szolgáltatják eredményül, az értekezésben a FOSM, a FORM és a Monte Carlo kerül bemutatásra.

2.2.3.1. FOSM analízis

Az eljárás neve a First Order Second Moment szavakból ered. Elsőrendű, mert a határállapot-függvényt egy hipersíkkal közelíti, másodfokú, mert a statisztikai változók két momentumát használja fel, a várható értéket és a szórást.

A FOSM analízis a $G(X,Y)$ függvényt a várható értékeknél felvett pontban linearizálja. Következésképpen az eredő szórások meghatározásánál minden tényezőt súlyoz a parciális deriváltjával:

$$\sigma_E = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\left(\frac{\partial E}{\partial Y_i} \right)_{E_i=E_m} \cdot \sigma_{Y_i} \right)^2} \quad \sigma_R = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\left(\frac{\partial R}{\partial X_i} \right)_{R_i=R_m} \cdot \sigma_{X_i} \right)^2}$$

A FOSM analízis előnyei:

- egyszerű, gyors a használata (nem igényel iteratív megoldást),
- nem szükséges hozzá ismerni az eloszlás függvényeket.

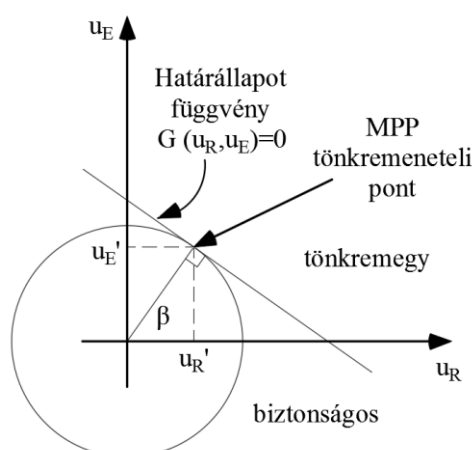
A FOSM analízis hátrányai:

- a normáloszlástól lényegesen eltérő eloszlások esetén pontatlan az eredmény,
- a megoldás nem konzisztens, az $R-E=0$ és az $R/E=1$ típusú határfüggvények esetén más eredményt ad, holott ugyanarról a problémáról van szó.

A módszert – amit a magyar szakirodalomban egyébként ritkán neveznek FOSM analízisnek – lényegében leváltotta a 70-es években megjelenő FORM módszer, de ez a hazai mérnöki oktatásban nem terjedt el. A hazai szakirodalom 2008-as kiadású kötete [51] is lényegében 70-es évek előtti irodalmakat jelöl meg hivatkozásként, tehát döntően a FOSM-re koncentrál.

2.2.3.2. FORM analízis

A FORM (First Order Reliability Method) a Budapesti Műszaki Egyetem Építőmérnöki karán 2013-ban történt átalakítások során került be az MSc képzésen oktatott Méretezéselmélet⁴⁷ című tantárgyba. A FORM alap ötletét Hasofer és Lind publikálta 1973-ban [54]. Az ő megoldásuk volt az első konzisztens megoldás, amely a határfüggvény definiálásának matematikai módjától függetlenül ugyanazt az eredményt adta. A Hasofer-Lind módszerben a valószínűségi változókat standard normál térbe kell redukálni.



38. ábra – A β index értelmezése Hasofer és Lind szerint [52]

Az új változók:

$$u_i = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i}$$

ahol μ és σ az x valószínűségi változó várható értéke és szórása.

A R ellenállással és E hatással felírt $R-E=0$ határállapot-függvény a transzformáció után:

$$G(R, E) = (\mu_R - u_R \sigma_R) - (\mu_S - u_S \sigma_S) = 0$$

A FORM analízis lényege, hogy a legnagyobb valószínűségű tönkremeneteli pontban (MPP – Most Probable Point) linearizálja a határállapot-függvényt (38. ábra). A standard normál térben

⁴⁷ http://www.hsz.bme.hu/hsz/htdocs/oktatas/tantargy.php?tantargy_azon=BMEEOHSMST5
(Elérés: 2015. 09. 02)

a tönkremeneteli pont a G függvény origóhoz legközelebb eső pontja. A standard normál térben az MPP-t u^* -nak jelöljük, ennek minden transzformált valószínűségi változó tengelyére van vetülete. Ezeket az u vektorokat

$$u_i^* = \alpha_i \beta$$

formában írjuk fel, ahol α egységvektor, melyet érzékenységi tényezőnek nevezünk. Minél nagyobb az egyik tengelyhez tartozó α értéke, annál nagyobb a befolyása az ahhoz a tengelyhez tartozó változónak. A tönkremeneteli valószínűség számításához a legkisebb β távolságot kell kiszámolni. Ez egy nemlineáris célfüggvénnyel végzett feltételes optimálási feladat. Ang és Tang⁴⁸ a határállapot-függvény MPP pontnál való Taylor sorba fejtésével adta meg a feladat elsőrendű megoldását:

$$\beta = \frac{-\sum_{i=1}^n u_i^* \left(\frac{\partial G(u)}{\partial u_i} \right) \Big|_{u=u^*}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial G(u)}{\partial u_i} \right)^2 \Big|_{u=u^*}}}$$

A FORM analízisnek sok módosítása, kiegészítése született, többek között a korrelált, vagy nem normál eloszlású változók esetére. A módszer előnye, hogy gyorsan futtatható, az érzékenységi tényezőkkel többlet információt szolgáltat más módszerekhez képest, azonban hátránya, hogy iteratív megoldást igényel (ami megnehezíti a megoldást, ha nincs hozzáférésünk a már megírt FORM programkódokhoz).

A Hasofer-Lind elmélet lényegében csak a megbízhatósági index fogalmát definiálta, mint a standard normál térben vett legrövidebb távolságot a G felületre. A számítási módszert, amivel ez megkereshető, szabadon lehet megválasztani.

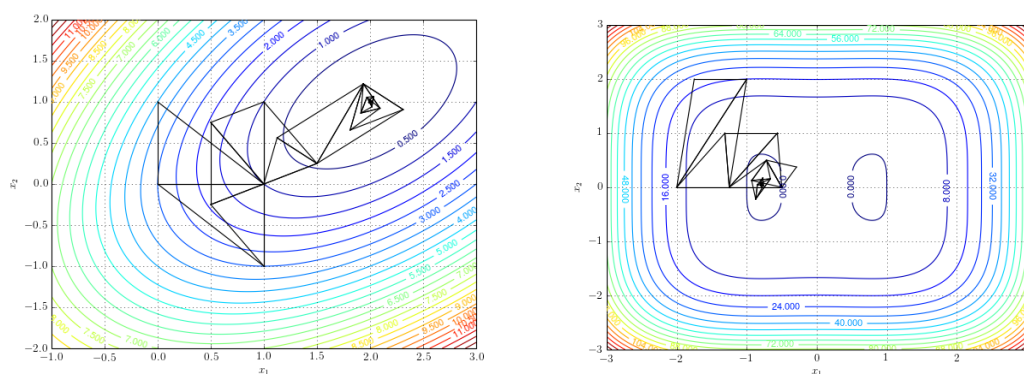
A fentebb bemutatott módszer az ún. gradiens alapú módszerek közé tartozik, melyek a G függvény differenciálásával dolgoznak, ezek közül is egy egyszerűbb módszer, ami bonyolultabb feladatoknál nem feltétlenül konvergál. Ez az algoritmus megköveteli, hogy a határfüggvény folytonos és deriválható legyen. A robbantási méretezésben azonban számos szakaszosan definiált összefüggés van, amelyek nem teszik lehetővé a G függvény differenciálását (ezek a 4.4. fejezetben kifejtésre kerülnek). Megjegyzendő, hogy elég lehet az is, ha a G felület csak a tervezési pont (MPP) környezetében differenciálható. **Programozási és szoftverismereti korlátaim miatt csak ezt a módszert fogom megvizsgálni. A robusztusabb FORM megoldó algoritmusokra említés szintjén térek ki.** Ezekre általánosan érvényes, hogy olyan programkörnyezetben vannak leprogramozva, ami kívül esik az értekezés hatáskörén, vagy nincs elérhető leprogramozott verzió belőlük.

Az iHLRF (improved Hasofer-Lind-Rackwitz-Fiessler) az egyik fejlett FORM algoritmus, ami az összetettebb problémákkal is megbirkózik. A Matlab-hoz elérhető FERUM megbízhatósági számítási csomagban ez van leprogramozva.

⁴⁸ Ang, Tang: Probability Concepts in Engineering Planning and Design – Vol. II. p. 345 [54]

A G határfüggvény azon túl, hogy nem differenciálható, néha nem is áll rendelkezésre zárt képlettel. Az ilyen esetekben a gradienst numerikusan is elő lehet állítani, vagy lehet használni a nem gradiens alapú optimalizáló algoritmusokat. Az egyik elterjedt módszer a Nelder-Mead simplex módszer [55]. Ez eredetileg egy feltétel nélküli optimalizációs eljárás, de néhány módosítással használható feltételekkel is [56]. Az algoritmus egy n változós függvény esetén $n+1$ csúcsszámú poligonokkal dolgozik és közelít a minimum pont felé. A tetszőlegesen felvett első poligon pontjai alapján érzékelhető a felület lejtése, és ennek megfelelően geometriai transzformációkkal (nyújtás, összenyomás, tükrözés, zsugorítás) a kisebb pont felé mozgatja a következő lépés poligonját. Kétváltozós függvények esetében szintvonalas ábrázolásban érzékeltethető a módszer lényege, ezt mutatja a 39. ábra.

Másik ismert feltételes optimalizáló algoritmus a COBYLA [57], amely lineáris közelítéssel dolgozik, a módszert megalkotó Powell által közzétett programkód Fortranban íródott.



39. ábra – Nelder-Mead algoritmus szemléltetése egy, illetve két minimummal bíró felületen [55]

2.2.3.3. Monte Carlo szimuláció

A Monte Carlo szimuláció során az adott matematikai probléma nagyszámú mintagenerálással való egymás utáni, ismétlődő determinisztikus jellegű megoldására kerül sor, majd az eredményhalmaz kiértékelése során olvasható ki a megoldás. A módszert ma már a tudomány számos területén használják (mérnöki tervezés, pénzügyi elemzések, atomfizika), de a módszer eredete a 40-es évekig, az atombombák fejlesztéséig nyúlik vissza. Az elgondolás Stanislaw Ulamtól ered, a gyakorlati megvalósítása, és első programozása pedig Neumann János nevéhez fűződik. Mindketten a Manhattan projekten dolgoztak, amikor ezt a módszert megalkották.

Ahhoz, hogy előállítsák a valószínűségi változó adott eloszlás szerint vett mintáit, egy véletlen szám generáló algoritmusra volt szükség. Matematikai értelemben a véletlen számok lehetnek:

- valós véletlen számok,
- pszeudo (ál) véletlen számok.

A valós véletlen számok között nem lehet kimutatni ismétlődést, szabályszerűséget. Ilyen jegeket mutatnak a π számjegyei, de ilyet eredményez bizonyos szűrőfeltételek alkalmazásával

egy rulett is, amelynek használatával a világ első valós véletlen szám gyűjteményét⁴⁹ is készítették.

Valós véletlen számokat nehéz előállítani, és főleg nehéz bizonyítani, hogy valóban véletlen számok. Könnyebb bebizonyítani egy számsorról, hogy valamilyen rendezettség van benne. A valós véletlen számok jelentősége főleg a titkosítási műveletekben jelentős. A mérnöki alkalmazásokhoz a Monte Carlo szimulációban elegendő az ál véletlen számokat használni.

Az ál véletlen szám generáló algoritmusok egy kezdőszámmal (seed) indulnak, a generált számsor később újra legenerálható ugyanerről a seedről. Az első ilyen módszer a Neumann által készített közép-négyzet módszer. A módszer lényege, hogy a seed értékét négyzetre emelve a középső n számjegyet vesszük ki eredményül, és emeljük újra négyzetre, és így folytatjuk a sort. Egy példán bemutatva ($n=2$ -re):

$$\underline{65} \text{ (seed)} \rightarrow 65^2 = 4\underline{22}5 \rightarrow 22^2 = 0\underline{48}4$$

A módszer kezdetlegességét mutatja, hogy bizonyos számokat elérve (vagy azokat seednek választva) megakad, és önmagát reprodukálja. Ilyen például $n=4$ esetben a 7600. A ma használatos programozási nyelvek szinte mindegyike nyújt ál véletlen szám generálási lehetőséget. Az alkalmazott algoritmusok nem mindig nyíltak, de sokkal megbízhatóbbak, mint a kezdetben használt egyszerű kézi számítások.

A Monte Carlo módszert akkor használják, amikor a G függvény zárt képlettel nem felírható, túl nagy egyszerűsítések árán írható csak fel, ha sok lokális minimuma van, vagy ha más módszereket kell ellenőrizni, és a számítási idő nem szempont. A szimuláció előnye tehát az univerzális használhatóság, bármilyen G függvény, bármilyen eloszlású változókkal könnyen megoldható vele (bár a változók nem lineáris korrelációja okozhat nehézségeket a mintagenerálásban).

Nem csak kutatási célokra használják, a hétköznapi tervezési gyakorlatban is akad példa a használatára, pl. a GeoStudio Slope/W szoftver rézsúállékonysági számításoknál nyújt lehetőséget Monte Carlo szimulációra is.

A módszer egyértelmű hátránya a számítási kapacitás igénye. Minden szimulált esemény más generált értékekkel fut le, tehát N szimulált eseményre N különböző eredmény adódik. Ezeknek a relatív szórását a pontosság érdekében minél alacsonyabban érdemes tartani, ehhez N értékét növelni kell. Az eredményként kapott tönkremeneteli valószínűségek szórása és az események száma között az alábbi összefüggés mutatható ki⁵⁰:

$$N = \frac{1 - P_{\text{valós}}}{v_p^2 \cdot P_{\text{valós}}}$$

⁴⁹ A RAND Corporation 1955-ben adta ki a 100.000 valós véletlen számot tartalmazó kiadványát [83], melyet a tudományos élet résztvevői szívesen használtak statisztikai problémák megoldása során.

⁵⁰ Nowak, Collins: Reliability of structures. p. 78 [53]

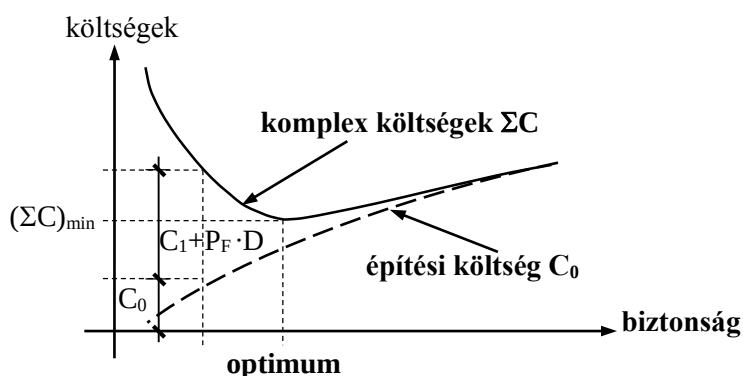
ahol $P_{valós}$ a pontosnak tekintett valószínűség, v_p az eredmények relatív szórása, nevezhetjük becslés hibájának is. Ha egy 2%-os tönkremeneteli valószínűséget akarunk becsülni, akkor kiszámítható, hogy az 1%-os relatív szóráshoz $5 \cdot 10^5$ számú eseményt kell szimulálni. A magasépítési szerkezetekre általánosan használt 3-4 értékű β kiszámításához olyan nagyságrendű ($\sim 10^7$) szimuláció szükséges, aminek elvégzése még a mai korszerű számítógépekkel is időigényes feladat lehet. Továbbá a módszer nem szolgáltat információt az érzékenységi tényezőkről, bár ez bizonyos feladatok esetében nem is szükséges.

A nyers Monte Carlo szimuláció (crude Monte Carlo) nem egy kifinomult módszer, mérnökiileg nem túl elegáns. Ugyanakkor az általános érvényűsége és használhatósága nagy előny, ami miatt érdemes megvizsgálni a robbantásvédelmi alkalmazását. A módszer továbbfejlesztett változata az „importance sampling” amikor a tervezési pont (MPP) környezetére összpontosulnak a generált változók, ez lényegesen csökkenti a szükséges mintaszámot, de ismerni kell hozzá az MPP-t, ami csak más eljárással számítható ki előre. Több más szimulációs eljárás is létezik, pl. a hiperkocka módszer, ám ezek témája kívül esik az értekezés témakörén.

2.2.4. AZ OPTIMÁLIS KOCKÁZAT

A méretezéselméletben a leginkább szubjektív kérdés az optimális kockázat meghatározása. A következményeknél az épületekben keletkezett anyagi kár nem hasonlítható össze az emberi áldozatok számával, így a vállalható kockázatot is másképpen lehet számolni.

A költségek esetében a kárhányad függvényében írjuk fel a megbízhatóságot. Az C_0 építési költségek monoton nőnek a megbízhatósággal, de a kár okozta D költségeknek minimuma van, tehát van egy olyan megbízhatósági szint, amittől akár nagyobb, akár kisebb biztonságot alkalmazunk, a költségek növekedni fognak. A C_I fenntartási költséget is bevezetve ezt az összefüggést magyarázza a 40. ábra.



40. ábra – A vállalható kockázat értelmezése a költségek tekintetében [51]

A komplex költségek minimumához tartozó P_{opt} vállalható kockázat Mistéth Endre és Kármán Tamás szerint [51]:

$$\frac{1}{P_{opt}} = \frac{2.3}{b_1} \cdot \left(\frac{D}{C_0} + 1.5 \right) \qquad P_{opt} = \frac{1}{80 \cdot \frac{D}{C_0}}$$

ahol b_1 a választott építőanyag szilárdságának szórásától függő tényező, értéke 0.03 – 0.1 között változik. A D kárköltségekbe bele tartozik az elmaradt haszn és a ki nem elégített igényekből

származó kár is, így a D/C_0 kárhányad értéke akár 100 körüli értéket is felvehet. Belátható, hogy mindkét képlet 10^{-3} - 10^{-4} nagyságrendű eredményt ad. Ez a 4. táblázatnak megfelelően 3.0-3.8 közötti β értéknek felel meg.

P_F tönkremeneteli valószínűség	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}
1- P_F megbízhatóság	0.9	0.99	0.999	0.9999	0.99999	0.999999	0.999999
β megbízhatósági index	1.282	2.326	3.09	3.719	4.265	4.753	5.2

4. táblázat – A tönkremeneteli valószínűség és a megbízhatósági index összefüggése [59]

Az emberi áldozatok számát figyelembe vevő optimális kockázat az ISO 2394 [58] szabványban található. A téma szubjektív volta miatt a szabvány is azzal a módszerrel él, hogy a statisztikákban fellelhető, áldozatot követelő balesetek valószínűségét veszi alapul, így a „legalább rosszabb ne legyen, mint ami a valóság” elvet követi.

A szabvány egy áldozat esetére 10^{-6} értékű elfogadható kockázatot ír elő⁵¹, de ha N ember élete van veszélyben, akkor

$$P_{opt} = A \cdot N^{-\alpha}$$

ahol $\alpha=2$ és $0.01 < A < 0.1$ értékekkel vehetők fel a konstansok. Ez a képlet 1000 fő esetén már 10^{-7} - 10^{-8} /év nagyságrendű megengedett kockázatot ad.

A szabványok ezt úgy veszik figyelembe, hogy a tömegbefogadásra alkalmas létesítményeknél magasabb, míg lakatlan (pl. mezőgazdasági) létesítményeknél kisebb megbízhatóságot írnak elő (5. táblázat).

Megbízhatósági osztály	A β minimális értékei	
	1 éves referencia időszak	50 éves referencia időszak
RC3	5,2	4,3
RC2	4,7	3,8
RC1	4,2	3,3

5. táblázat – β index ajánlott értékei az EC0 szerint [59]

A tervezési élettartam (T) a hazánkban érvényes Eurocode szerint általános felhasználású magaspépítési szerkezetekre 50 év [11], ennyi idő alatt az adott hatásra csak előírtan kicsi valószínűséggel mehet tönkre a szerkezet. Hidak esetén $T=100$ év, ideiglenes szerkezeteknél pedig $T<50$ év, de ez a funkciótól is függ. Például egy meghatározott időre telepített katonai támaszpont épületei $T=5$ év vagy $T=10$ hónap tervezési élettartammal is bírhatnak, és elképzelhetők olyan szituációk is, ahol hetekben mérhető a vizsgálandó időszak.

A $T=50$ évre megszabott β érték, – azzal a feltételezéssel, hogy az éves tönkremeneteli események páronként függetlenek – az alábbi összefüggésből számítható át $T=1$ évre⁵²:

$$\Phi(\beta_n) = [\Phi(\beta_1)]^n$$

⁵¹ ISO 2394 E.4.1. [58]

⁵² EN 1990 Annex C 6. [59]

Az általános tervezési eset az EC-ben az RC2 jelölésű megbízhatósági osztály. A tervezési élettartamra vonatkozó megbízhatóság itt 3.8. Ugyanerre az esetre az amerikai AISC szabvány 3-at ír elő, a kanadai szabványok 3.5-öt, míg a skandináv államokban 4.3 az előírt érték⁵³. Kiemelendő, hogy földrengésterhekre (mint rendkívüli teherre) a szabványok kisebb megbízhatóságot írnak elő, az AISC-ben 1.75-ös értéket is találunk [60]. A földrengésterhekre alkalmazott β_{opt} általános értéke 2.0-3.0 között mozog. Japánban volt olyan felmérés, ahol az ingatlantulajdonosok véleményét is kikérdezték a földrengés esetén kívánt megbízhatóság kérdésében, az adott válaszok alapján $\beta=2.4$ értéket javasoltak [61]. A $\beta_{50}=2$ -t átszámolva a fentebb ismertetett módon: $\beta_I=3.3$ Ez az 1 évre kiszámolt cél megbízhatóság lesz felhasználva a 4. fejezet számításai során.

Összehasonlításképpen a 6. táblázatban a különböző területeken, az oda vonatkozó T élettartamon belül alkalmazott elfogadható (és gyakorlatban vállalt) kockázatok láthatók.

Szerkezet típus	Vállalt kockázat	Megjegyzés
Öntözési szerkezetek és belvízelvezető rendszerek	$0,1 < P_F < 0,3$	(használhatósági tervezés)
Vízellátó és szennyvízkezelő rendszerek	$0,01 < P_F < 0,1$	(használhatósági tervezés)
Épületek	$10^{-4} < P_F < 10^{-3}$	(teherbírasi kockázat)
Nukleáris erőművek	$10^{-6} < P_F < 10^{-5}$	(teherbírasi kockázat)
Baleset az utcán	$P_F < 10^{-6}$	(maximum az általános mérnöki tervezésben)

6. táblázat – Különböző területeken alkalmazott kockázati határértékek [62]

2.3. RÉSZKÖVETKEZTETÉSEK

Magyarországon az Eurocode bevezetése óta a szabványválasztás a mérnökök számára önkéntes, az adaptált Eurocode csupán ajánlott. Mivel az Eurocode nem rendelkezik a robbantások elleni tervezés módjáról, a jogszabályban biztosított lehetőséggel élve tetszőleges előírást vehet figyelembe a tervező. A számba vehető előírásokat megvizsgáltam, és kijelenthető, hogy az elérhető előírásokból hiányzik a robbanóanyag mennyiség statisztikai kiértékelése. Nem találtam jelét annak, hogy a hazai gyakorlatban a robbantások elleni tervezésnek aktív jelene lenne.

A „performance based design” tervezési eljárás lehetőséget ad arra, hogy a megrendelő és a mérnök megossza a felelősséget egymás között. A jövőben megfontolandó lehet a módszer alapelveit alkalmazni, mert azzal, hogy a megengedett romosodást és kockázatot megegyezés tárgyává tesszük, áthidalható a W meghatározásának felelősségvállalási kérdése is.

A méretezési elméletekből a valószínűségi módszereket használva lehet kvantitatív módon biztonságot kimutatni. A bemutatott módszerek közül a FOSM egy gyors, zárt képletű összefüggést igénylő, de bizonyos esetekben pontatlan eljárás. A FORM analízissel az érzékenységi tényezők is kiszámolhatók, a módszer pontosabb, mint a FOSM, de megoldási módszerei matematikailag bonyolultabbak. A Monte Carlo szimuláció általánosan használható, nem igényel zárt képletű összefüggést, de nagy az erőforrás igénye.

A megengedett kockázatot a tervezett élettartamra kell értelmezni. Az építőmérnöki gyakorlatban a rendkívüli terhekre $\beta_{50}=2.0$. Ezt értéket 1 évre átszámolva $\beta_I=3.3$ érték adódik.

⁵³ Galambos: Engineering Safety (edited by David Blockley) p. 67 [60]

3. TERVEZÉS ROBBANÁSTEHERRE

Az előző részekben bemutatásra került a robbantások elleni tervezés indokoltsága, tárgya, körülményei és a szerkezetet érő hatások. Következő lépcső a folyamatban a tervezés módszere. Szó esik azokról a módszerekről, hogy hogyan lehet a robbanóanyag mennyiséget szerkezetet érő teherre alakítani, és arról, hogyan lehet a szerkezeteket erre a teherre dinamikailag méretezni. Mindkét témában bemutatom az egyszerű, és a kifinomult számítási módszereket is, hogy levonhassam a következtetést a méretezéselméleti párosíthatósággal kapcsolatban.

Először a robbanási teherfelvétel alapvető fogalmaival foglalkozom, majd ezeket összevetem a kísérleti robbantásainkban tapasztalt adatokkal. Erre azért van szükség, mert **a kísérleti robbantásokra alapozok néhány – statisztikai – tervezési paramétert**. Továbbá a kísérleti robbantások során a klasszikus robbanási elméletek, alaptételek ellenőrizhetők, és ezzel a kísérletek validációja is megtörténik. Ilyen típusú robbanási mérések hazai elvégzésére eddig nem került sor. Tekintve a szűkös anyagi keretet, amely rendelkezésre állt, a kiértékelhető adatok már önmagukban sikernek számítanak (pl. néhány robbanóanyag típus nyomás-, és impulzusfüggvénye).

Ezután rátérek a lökeshullámok numerikus leírására, amivel a komplex környezetben való terjedésüket lehet modellezni. A valós életben sokszor nehéz érvényes egyszerűsítő feltételeket tenni a modellezésben, szükség van a kifinomultabb módszerekre is. Bemutatom az ebben a témában végzett kutatásaim eredményeit, és kifejttem gondolataimat azok méretezéselméleti kapcsolhatóságáról.

Összességében a fejezet vázlatos elméleti összefoglalója a dinamikai méretezési módszereknek, amelyek alapját adják a vizsgált szerkezeti elem objektív biztonsági számításának.

3.1. A ROBBANÁSI HATÁSOK LEÍRÁSA

3.1.1. A ROBBANÁS ÉS ROBBANÓANYAG FOGALMA

Robbanóanyagoknak azokat a vegyületeket vagy keverékeket nevezzük, melyek meghatározott külső behatásokra gyors kémiai átalakulásra képesek, miközben nagy mennyiségű és nagy nyomású gázok képződnek, mely gázok kiterjedésük közben mechanikai munkát fejtenek ki.⁵⁴ Fizikai robbanások közé tartozik a felforrósodó palackok robbanása, míg e példánál maradva, kémiai robbanásnak számít a palackból kiszabadult gáz elégésével járó robbanás, vagy más néven VCE⁵⁵.

A hirtelen állapotváltozás a térben egy hullámot indít el. Ennek a hullámnak a terjedési sebessége meghatározza a lökeshullám jellegét. A kémiai robbanásokban a molekuláris szintű különböző összetevők (szén, nitrogén, és hidrogén) oxidációja történik meg. Az oxidáció égés során megy végbe, az égés pedig egy reakciózóna formájában terjed a térben. Ha a reakciózóna

⁵⁴ Magyar Honvédség: Robbantási Utasítás (1971) [64]

⁵⁵ VCE – Vapour Cloud Explosion – gázfelhő robbanására használt rövidítés

szuperszonikus, a kialakuló lökéshullám sebessége is meghaladja a hangsebességet, ekkor beszélünk **detonációról**.

A hangsebesség alatti terjedési sebesség még nem robbanás, ezt **deflagrációnak** hívják. Az éghető gáznemű anyagok csak speciális körülmények közt robbannak (megfelelő oxigén arány, a tér határoltsága), inkább jellemző eset a deflagráció. Ugyanazon robbanásra képes közeg deflagráció által kisebb hatást fejt ki a környezetére, mint detonáció esetén.

A reakciózóna sebességének változásával a deflagráció képes átváltozni detonációvá. A DDT⁵⁶-nek hívott jelenségnek az az oka, hogy a reakciózóna akadályokba ütközése a zóna sebességének növekedését okozza. Minél sűrűbb az akadályok jelenléte a térben, annál jobban felgyorsul a rajta áthaladó reakciózóna. Ennek az olajfinomító és vegyipari telepeken történő gázrobbanások vizsgálatában van jelentősége, amikor a sűrűn beépített ipari környezet hatására a belobbanó gázfelhő könnyen robbanásba mehet át.

A szilárd robbanóanyagokat a katonai terminológia három fő csoportra osztja [132]:

- iniciáló (behatásokra érzékeny, de kevés gázfejlődéssel járó robbanóanyagok)
- brizáns (másik robbanóanyag robbanásával detonálható robbanóanyagok, amelyek jelentős mennyiségű gázképződéssel járnak, katonai vagy ipari felhasználásúak lehetnek)
- tolóhatású (kis égési sebességű (detonációt el nem érő) anyagok, pl. lőpor)

A hatásukat tekintve az iniciáló és brizáns robbanóanyagok paraméterei és modellezése a tudományosan legjobban körbejárt témakör. A robbanóanyagokat jellemzi detonációs sebességük, robbanáshőjük, robbanási hőmérsékletük, fajlagos gáztérfogatuk, de jellemezhetők a különböző behatásokkal szembeni érzékenyséjük, vagy kémiai szempontból oxigénegyenlegük alapján is [131]. Jellemzőik meghatározzák az általuk kifejtett lökéshullámok karakterisztikáját is, például vannak robbanóanyagok, melyek kisebb túlnyomást okoznak, de időben jobban elnyújtva, és vannak, amik nagyon hirtelen adják le teljes energiatartalmukat. Előbbieket használják pl. plattírozásra (robbantásos fémmegmunkálás), utóbbiaknak haditechnikai felhasználása jelentős.

3.1.2. KÍSÉRLETI ROBBANTÁSOK

A robbanások paramétereinek leírását kísérleti robbantások során ellenőriztem. A kísérletekre a TÁMOP-4.2.1. B-11/2/KMR „Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások” című, EU által finanszírozott pályázat keretein belül került sor. Több különböző robbanóanyag-típus szabad légterű és komplex térbe helyezett robbanásai voltak a vizsgálat tárgyai. A lökéshullámok időbeni lefutásának rögzítése 2 db PCB 137A21 típusú külső nyomásmérő szondával (41. ábra), és 1 db PCB 134A22 típusú, reflexiós tourmalin nyomásmérő szenzorral történt. A kísérlet körülményeit a TÜV Rheinland InterCert Kft. kísérleti jegyzőkönyve tartalmazza.

A kísérletsorozat kiemelt célja volt a szabad légterű robbanás paramétereinek az összehasonlítása a numerikus és szakirodalmi adatokkal, valamint annak a megvizsgálása, hogy a komplex

⁵⁶ DDT – Deflagration Detonation Transition – deflagráció-detonáció átmenet

térben való lökéshullám terjedés megfelel-e a numerikus modellekben tapasztaltaknak. A kísérletek során csak a pozitív fázis mérése lett célul kitűzve. A felhasznált robbanóanyagok:

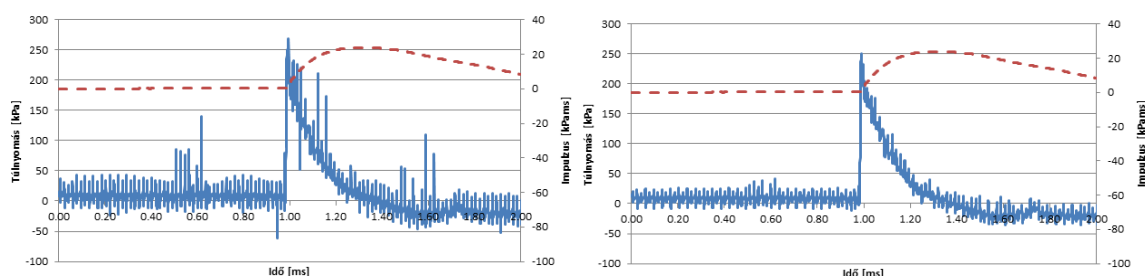


41. ábra – Kísérleti robbantás elrendezései (szerzői fénykép)

- ANDO-ÉV – plastikus ammóniumnitrát bázisú ipari robbanóanyag
- HEXOGÉN (RDX) – parafinnal flegmatizált hexogén
- TNT pellet – pikkelyes TNT granulátum

A nyomásmérő szondák és a töltet közötti távolság cm pontossággal került beállításra. A beállási szögek szemre lettek beállítva, 1-5° közötti szögeltéréssel. Technikai okok miatt a jelkondicionálóból jeleket közvetíteni hivatott kábel nagyobb zajt szedett fel, mint ami ideális esetben elfogadható lenne. Ez a zaj a mérési pontosságot negatívan befolyásolta. A zaj mértéke a légköri nyomásnak volt megfelelő, ami a kisebb töltetek esetén kiértékelhetetlenné tette a mérést. A kísérletsorozat néhány elemén emiatt módosítást kellett végrehajtani, a tölteteket közelebb kellett vinni a mérőszondákhoz, hogy nagyobb legyen a túlnyomás, melyhez képest a zaj mértéke már elenyészőbb. A nagy zaj közvetlenül a túlnyomási csúcsértékek leolvasási pontosságára volt kihatással, de az impulzusmennyiség numerikus integrálásába is bizonytalanságot vitt.

A mérőszondák által közvetített, rendkívül nagy mintavételezési frekvenciával rögzített adatsort nyomás-idő adatsorokká konvertáltuk a nyomásszondák gyártója által szolgáltatott kalibrációs tanúsítvány alapján. A mérések többségénél a nyomás-idő függvényeken zajszűrést kellett végezni. A leggyakrabban használt eljárás a Fourier transzformáció [65], de jelen esetben egy egyszerűbb eljárás került alkalmazásra.



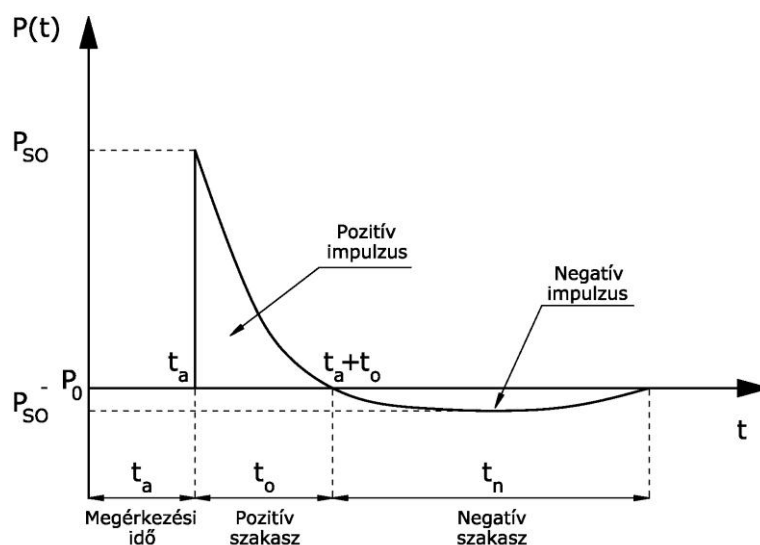
42. ábra - Eredeti és zajszűrés utáni nyomásfüggvény (szerzői ábra)

A zajszűrést 12 tagú súlyozott mozgóátlag módszerrel végeztem, ahol a súlyszámok a Gauss görbének megfelelően lettek megválasztva. Ennek eredményeképpen a zajcsökkentés nem járt

számottevő csúcserték leépüléssel (42. ábra). További részletek a kísérleti robbantásokról a kutatás zárójelentésében található [63].

3.1.3. A ROBBANÁS NYOMÁSGÖRBÉJE

A robbanóanyag belsejében a detonáció során több száz kilobar nyomású gázok fejlődnek. A nyomáskiegyenlítődés miatt a nagy nyomású gáz tágulni kezd, és kiszorítja a levegőt az elfoglalt térfogathból. Ennek következményeként megjelenik a kiterjedő gázok előtt egy összetömörödött levegőréteg, amit lökeshullámnak nevezünk. Ez tartalmazza a robbanóanyag felszabadult energiájának döntő többségét. A tér egy adott pontját vizsgálva a lökeshullám áthaladása során leírható általános nyomás-idő történet a 43. ábrán látható alakot veszi fel. Az ábrán sematikus mutatott karakterisztikát visszaadták a kísérleti robbantások során mért adatok is (44. ábra).



43. ábra – Lökeshullám által kifejtett nyomás-idő történet [66]

A vizsgált ponton a robbanást követően t_a megérkezési idő eltelte után hirtelen kialakul a P_{so} túlnyomási csúcserték, melyet a P_0 légköri nyomás fölötti előjeles értéként értelmezzük. A túlnyomás egy exponenciális karakterisztikát követve t_a idő alatt lecseng. Ezután kialakul a vákuummal járó P_{so-} negatív túlnyomás, majd t_n idő eltelte után visszaáll a normál légköri nyomás.

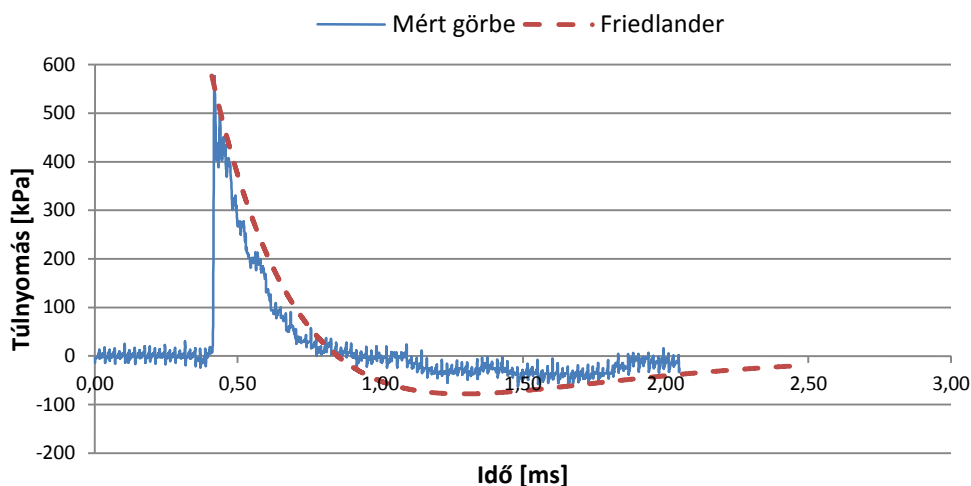
A lökeshullám impulzusa fejezi ki a vizsgált ponton való munkavégző képességet, (a lökeshullám energiatartalmát). Definíció szerint:

$$I^+ = \int_{t_a}^{t_a+t_a} P(t)dt$$

a lökeshullám pozitív impulzusa, és hasonló módon számítható a negatív impulzus is. A gyakorlatban a nyomás-idő görbét idealizálják, vagy ritkább esetben a konkrét $P(t)$ függvénnyel számolnak. A $P(t)$ függvény általános leírása Friedlander nevéhez fűződik [67]:

$$P = P_{SO} e^{-\frac{t}{t^+}} \left(1 - \frac{t}{t^+}\right)$$

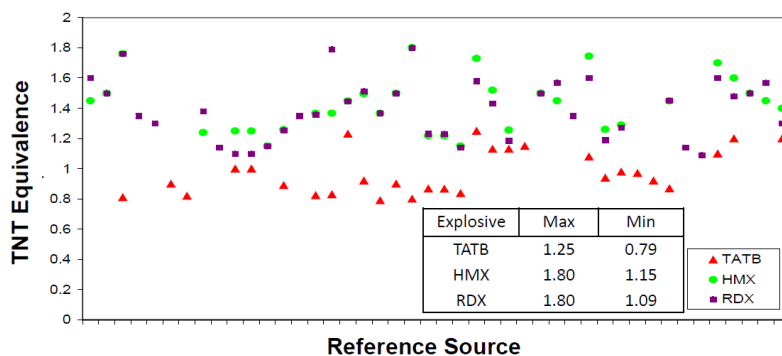
A módosított Friedlander képletben van a kitevőben egy paraméter, amivel a görbe alakja illeszthető. Az elvégzett kísérleti robbantások során összevettem a mért nyomásgörbe karakterisztikát a Friedlander függvényvel. Az ANDO-ÉV és TNT pellet jó egyezést mutattak (0.98-as korreláció, 44. ábra), a hexogén jobban eltért a Friedlander görbétől (korrelációja 0.86 volt).



44. ábra – ANDO-ÉV lökeshullámának görbéje és a Friedlander képlet (korreláció: 0.98) (szerzői ábra)

3.1.4. TÖLTETTÉNYEZŐ

A különböző robbanóanyagok eltérő robbanási jellemzőit a szakirodalom az ún. töltettényező segítségével kezeli. Minden robbanóanyaghoz rendelhető egy töltettényező, amellyel trotil-egyenértékre számítható vissza a tömege. Kézenfekvő, hogy a TNT legyen az általánosan elfogadott, egyenértékűsítés alapjául szolgáló robbanóanyag, mert ezzel végezték eddig a legtöbb kísérleti robbantást, és sok kiértékelhető adat áll rendelkezésre. Az eltérő robbanási karakterisztikák miatt több TNT egyenértékűsítési elmélet is született, ezek közül a túlnyomás alapú elmélet lett általánosan elterjedt.

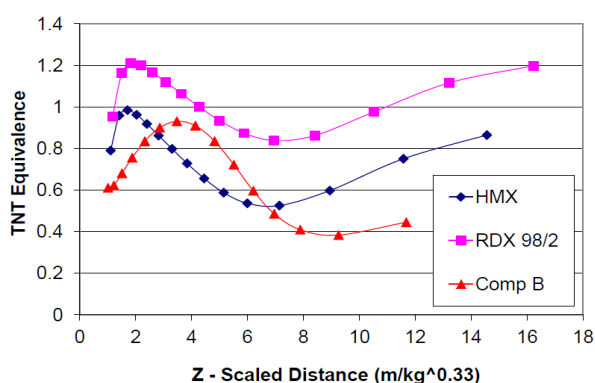


45. ábra - Néhány robbanóanyag különböző forrásokban publikált töltettényezője [68]

A töltettényezők használata során tekintettel kell lenni arra, hogy értékük becslésnek tekintendő, mert:

- a szakirodalom által közölt értékek nem mindig egyértelműsítik, hogy az adott robbanóanyag milyen altípusáról van szó,
- a nyomás és impulzus töltettényezője különbözik, de nem minden dinamikai elméletben alkalmazhatók szétválasztva,
- a töltettényező függ a töltet tömegétől és a mérési pont távolságától is (46. ábra).

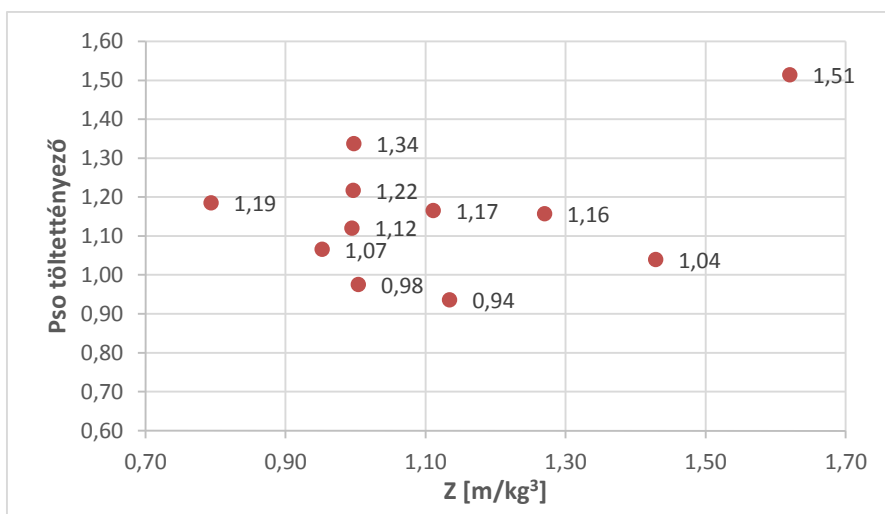
A publikált és elérhető adatok tekintélyes szórása is TNT egyenértékben rejlő bizonytalanságokat mutatja. A 45. ábrán szembevetendő az ugyanazon robbanóanyagra publikált töltettényezők nagy szórása (ráadásul 1-nél kisebb és nagyobb értékek is szerepelnek.)



46. ábra – A TNT egyenérték és az arányosítási távolság összefüggése [37]

Hexogén töltettényezője saját méréseink alapján

A hexogén töltetek esetén a túlnyomási töltettényezők két vizsgálat kivételével mind 1-nél nagyobb értékűre adódtak. A vizsgált Z tartományban a töltetek többsége 1.1 és 1.3 körüli töltettényezőt eredményezett, ami megfelel a várakozásainknak, mert a hexogén köztudottan erősebb robbanóanyag, mint a TNT. Amint az látható a 47. ábrán, Z = 1 távolságot négy különböző W-R értékpár alkotta, ezek azonban mind más eredményeket adtak. Ezen eredmények összeállításaként legalább négy mintavételezéssel készültek, tehát elég megbízhatóak ahhoz, hogy kijelenthessük, a túlnyomási töltettényező a Z érték számításában szereplő W töltettömegnek is a függvénye.



47. ábra – A hexogén túlnyomási töltettényezője a kísérleti robbantások alapján (szerzői ábra)

TNT pellet töltettényezője saját méréseink alapján

A TNT pellet tölteteknél csak $Z=1$ körüli értékekkel történtek vizsgálatok („A” melléklet). A túlnyomás alapú töltettényező 0.2 és 0.3 körüli értékeket vesz fel, míg az impulzus alapú töltettényező 0.3 és 0.4 között mozog. A számokban megmutatkozik a kis halmazsűrűségű robbanóanyag gyenge mivolta. Ugyanakkor megfigyelhető, hogy az impulzus alapú tényező nagyobb értéket vesz fel. A hexogénhez hasonlóan itt is megfigyelhető, hogy a töltettényező még azonos Z értéknél is nő a töltet tömegével.

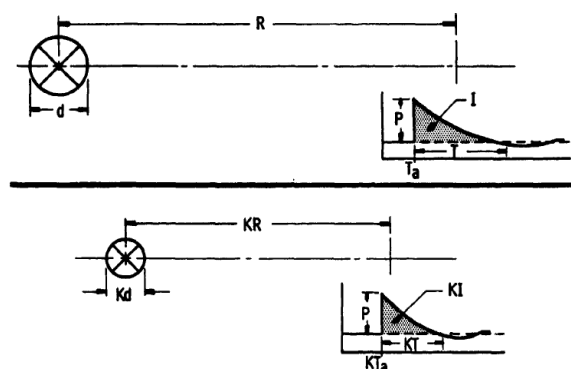
3.1.5. ARÁNYOSÍTÁSI TÖRVÉNY

Ahhoz, hogy tetszőleges W tömegű és R távolságú robbanás paramétereit is meg lehessen határozni egy arányosítási szabályt kell találni. Ha az R_1 távolságban felrobbantott D_1 töltet jellemzői és az R_2 távolságban robbantott D_2 töltet jellemzői ismeretesek, hogyan következtethetünk az R_3 , D_3 paraméterű robbanási jellemzőkre?

A választ először Hopkinson fogalmazta meg 1915-ben [69], ő abból indult ki, hogy olyan távolság-tömeg arányt kell felállítson, aminél egy bizonyos paraméter kvázi konstansnak vehető. Legkézenfekvőbb választás a túlnyomási csúcsérték volt. Hopkinson úgy találta, hogy a

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}}$$

arányosított távolság alkalmazásával teljesül ez a feltétel. A 48. ábrán látható hipotézise, miszerint a töltet átmérőjét és a távolságot konstans-szorosra növelve azonos túlnyomást tapasztalhatunk, ám az egyéb paraméterek is konstans-szorosra nőnek. Ebből következően a túlnyomás a távolság és a tömeg köbgyökös arányának válik függő változójává. A többi paraméterhez az arányosítás során úgy juthatunk, ha az arányosítástól „megtisztítjuk”, tehát a tömeg köbgyökével kell szorozni.



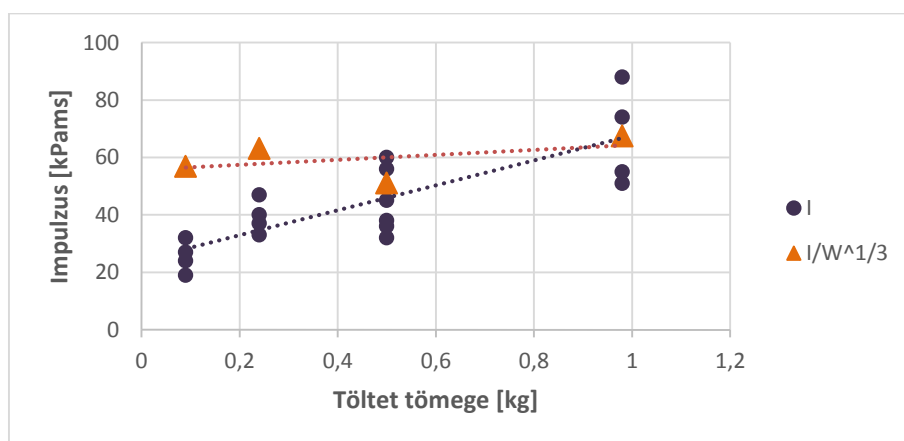
48. ábra - Hopkinson arányosítási hipotézise [69]

Hipotézisét azóta kísérleti robbantások sora bizonyította, és bár létrehoztak más eljárásokat is (Sachs, Sedov) [70], a róla elnevezett köbgyökös arányosítás maradandóan a robbanásteknikai szakma egyik alapkövévé lett. Elméletének fontos következménye, hogy a kétváltozós robbanási paramétereket egy egyváltozós függvényként lehet meghatározni és kezelni ($P(Z)$, $I/W^{1/3}(Z)$, $t/W^{1/3}(Z)$, ...).

Megemlítenő ugyanakkor, hogy kutatások kimutatták, hogy ez az arányosítási szabály sem teljesül tökéletesen. A kísérleti robbantásokban erre vonatkozó vizsgálatokat is végeztem. Az elméletet a kísérleti robbantások során úgy vizsgáltam, hogy különböző $R-W$ adatpárokkal állítottam elő ugyanazt a Z értéket, és mértem a kifejtett nyomást, melynek a Hopkinson hipotézis szerint konstansnak kell lennie. Az „A” mellékletben található ábrák mutatják a $Z=1$ értékű hexogén és TNT pellet töltetek túlnyomás és impulzus eredményeit.

Megfigyelhető, hogy az eredmények átlagértékei a töltet tömegével növekvő tendenciát mutatnak, amit a regressziós egyenes is mutat, holott a Hopkinson hipotézis szerint itt egy vízszintes egyenes kellene adódjon.

A túlnyomási értékek nem igazolják Hopkinson elméletét. A vizsgált Z tartományban azonos Z értékek esetén nem állandó a túlnyomás, hanem Z -vel növekszik. Ha megvizsgáljuk, hogy milyen összefüggés van a különböző tömegű, de azonos Z értékű robbantások eredményei között, akkor azt kapjuk, hogy az impulzus a Hopkinson elméletének megfelelően köbösen növekszik, és szemmel is látható, hogy az impulzus növekedése a tömeggel jelentősebb, mint a túlnyomásé (amelynek állandónak kellene lennie).



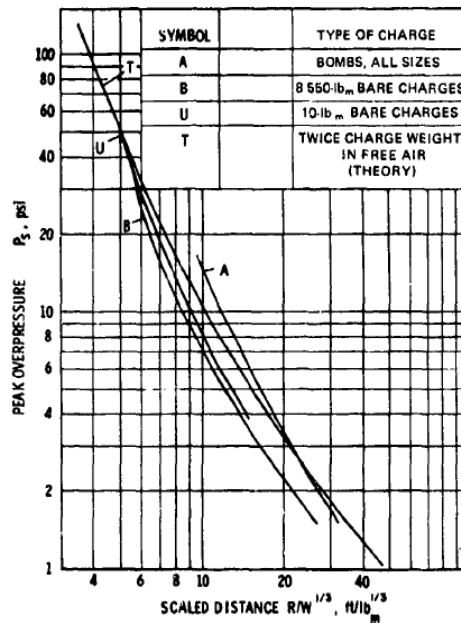
49. ábra - $Z=1$ értékű TNT pellet töltetek impulzus eredményei (szerzői ábra)

Hopkinson elméletéből az is levezethető, hogy azonos Z értékeknél az impulzus arányosítási tényezővel való osztása adja azt a mennyiséget, aminek állandónak kell lennie. Kiszámítva az $I/W^{1/3}$ értékeket, ez vissza is kapható, az adatok TNT pellet esetén közel azonosak, mérési pontosságon belülnek vehetők, ezt a regressziós egyenes meredeksége is mutatja (49. ábra). Hexogén esetében az értékek szintén közel azonosnak adódtak. Tehát a köbgyökös arányosítás elvét a kísérleti impulzus értékek igazolják.

A robbantások száma nem elég nagy ahhoz, hogy egy széles körben elismert elmélet érvényességét megkérdőjelezhessük, ugyanakkor egy figyelemreméltó jelzés arra vonatkozóan, hogy bár a Hopkinson szabály alapelve a gyakorlati számítások esetében jól használható, de elméletileg az érvényessége nem univerzális. Ennek vizsgálata részletesebb, célirányosabb kísérleteket igényel.

3.1.6. ROBBANÁSI PARAMÉTEREK MEGHATÁROZÁSA

Az empirikus meghatározás folyamata a robbantási kísérletekkel kezdődött. Ezen kísérletek nagy részét még a XX. század első felében végezték el (50. ábra). A Hopkinson arányosítást követve különböző arányosított távolságú tölteteket robbantottak, és a mért paramétereket ábrázolták, majd a pontokra görbét illesztettek. Következésképpen, a túlnyomási csúcsérték meghatározására alkalmas képletek rendszerint valamilyen regressziós függvény alakját veszik fel.



50. ábra - Robbantási teszteredmények a II. világháború idejéből [70]

Ilyen például amerikai oldalról a Mills [71] által nyújtott képlet:

$$P_{so} = \frac{1772}{Z^3} + \frac{114}{Z^2} + \frac{108}{Z}$$

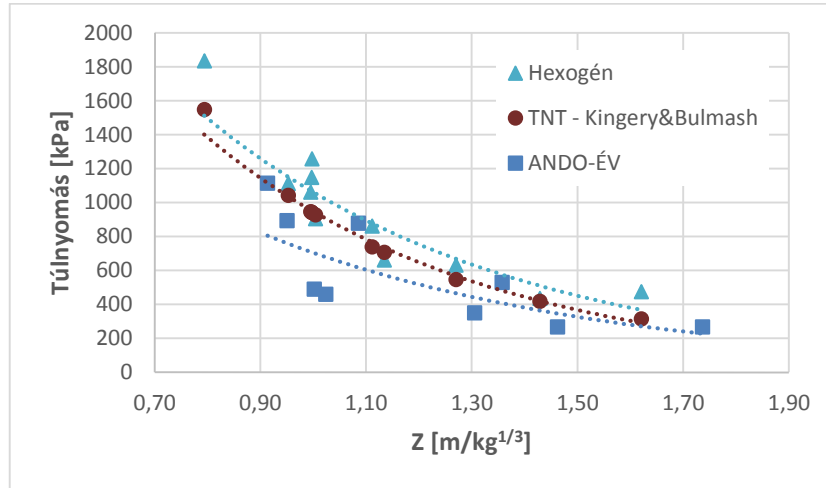
vagy az orosz irodalomban fellelhető képlet⁵⁷ [72]:

$$\Delta_{p\Phi} = 0.084 \frac{\sqrt[3]{W}}{R} + 0.27 \frac{\sqrt[3]{W^2}}{R^2} + 0.7 \frac{W}{R^3}$$

Sok kísérletnél hiányzik a kísérleti körülmények (hőmérséklet, légköri nyomás) pontos leírása. Szintén tisztázatlan, hogy melyik vizsgálatot milyen alakú töltettel végezték, mert a vizsgálatok elvégzésének idején még nem volt ismeretes az, hogy a lökéshullám terjedésére és paramétereire egyáltalán hatással van (és ha igen, milyennel) a töltet alakja. **A gyakorlatban széles körben elterjedt és használt Kingery és Bulmash képlete** [73], ami az iménti képleteknél magasabb fokszámú illesztés. Munkájukban a XX. században elvégzett számtalan robbantási eredményt összesítették.

⁵⁷ A [44]-ben közölt orosz képletek hasonló formájúak, de a konstansok különböznek.

A kísérleti robbantások kiértékelése során felírtam a vizsgált robbanóanyagokra a robbanási jellemzőket leíró regressziós képletet. Az ehhez szükséges változó Z értékű adatsorok ANDO-ÉV-ből és hexogénből álltak rendelkezésre (51. ábra, „A” melléklet). A lefedett Z tartomány kicsi, de elegendő ahhoz, hogy túlnyomás és impulzus görbéket lehessen készíteni. A kb. 20%-os relatív szórású (ld. „B” melléklet) adatsorra exponenciális regressziót alkalmazok.



51. ábra – A vizsgált robbanóanyagok túlnyomás függvényei (szerzői ábra)

A hibanégyzetek a lineáris regresszió esetén adódnak a legkisebbre. Mivel a szakirodalomban a robbanási paraméterek meghatározására szolgáló empirikus képletek általában harmadfokú polinomok, indokoltabbnak ítélem valamilyen nemlineáris regresszió alkalmazását. A bemutatásra kerülő nyomás, és impulzus függvények csak az adott Z tartományon belül érvényesek, az extrapoláció nem javasolt.

Összegezve a nyomás és impulzus függvényeket, az alábbi képletek érvényesek a vizsgált robbanóanyagokra:

ANDO-ÉV:

$$P_{SO} [kPa] = 3289.7 \cdot e^{-1.541Z} \quad 0.9 < Z \left[\frac{m}{kg^{1/3}} \right] < 1.8$$

$$I \left[\frac{kPams}{W^{1/3}} \right] = 225.49 \cdot e^{-0.591Z} \quad 0.9 < Z \left[\frac{m}{kg^{1/3}} \right] < 1.8$$

Hexogén:

$$P_{SO} [kPa] = 5893.1 \cdot e^{-1.714Z} \quad 0.9 < Z \left[\frac{m}{kg^{1/3}} \right] < 1.7$$

$$I \left[\frac{kPams}{W^{1/3}} \right] = 367.31 \cdot e^{-0.703Z} \quad 0.9 < Z \left[\frac{m}{kg^{1/3}} \right] < 1.7$$

3.2. LÖKÉSHULLÁMOK MODELLEZÉSE

A robbanási lökeshullámok modellezése ma már számítógépekkel megoldható feladat. Alternatív megoldás a robbanási paraméterek meghatározására az empirikus alapú módszerekkel szemben (3.1.6. fejezet). A modellezési eljárásokkal bizonyos esetekben kiválthatóvá válnak a költséges robbantási kísérletek, kiszámíthatók komplex környezet esetén is a lökeshullám által kifejtett hatások. Mindehhez számítási idő és erőforrás szükséges, valamint – ahogy a kifinomult számítási módszereknél megszokott – a téma elméletét behatóan ismerő szakembernek kell végeznie a számítást. Az alábbiakban vázlatosan áttekintem a lökeshullámok és modellezésük elméletét.

3.2.1. A LÖKÉSHULLÁMOK KIALAKULÁSA

A lökeshullám egy olyan térben mozgó, elemien vékony réteg, amelyben a nyomás és a hőmérséklet hirtelen és drasztikus mértékben megváltozik. A lökeshullámok fizikai viselkedésének leírásához nincs szükség a robbanási folyamat kémiai vonatkozásának leírására, attól elkülönítve vizsgálható.

Jó példa erre a repülő hangrobbanása: a hangsebességet elérő tárgy a saját maga keltette hangokat utoléri, melyek előtte egy nyomásfalat képeznek, és amint a repülő tovább gyorsul, ezt megtöri, és előáll a hangrobbanás jelensége.

3.2.2. RANKINE-HUGONIOT FELTÉTEL

A lökeshullámok leírásával elsők között próbálkozó Riemann azért nem tudott pontos megoldást adni [76], mert izentropikus folyamatként próbálta meg leírni a jelenséget, holott a lökeshullámban uralkodó hőáramlási és viszkozitási viszonyok miatt termodinamikai szempontból ez egy vissza nem fordítható folyamat. Az elemek rendezetlenségét mérő entrópia Clausius II. főtételeként értelmében azokban gázokban is nő, amelyeken áthalad a lökeshullám.

Az áttörést Rankine és Hugoniot hozta, ők a lökeshullámot nem izentropikusnak tételezték fel, hanem egy energiaelnyelő térként. Munkájuk azért volt eredményes, mert sikerrel tudták leírni a lökeshullámban lejátszódó termodinamikai folyamatok közötti összefüggéseket. A róluk elnevezett Rankine-Hugoniot feltétel a lökeshullámot nem kontinuumként, hanem szingularitásként kezeli.

A feltétel leírja a lökeshullám belsejében a tömeg-, lendület-, és energia megmaradás törvényét. A jelenség egy dimenziós Lagrange féle leírása a következő (a levezetés mellőzésével): egy összenyomható közegben P a nyomás, u a részecskék sebessége, ρ a sűrűség, V a térfogat, E az energia, U a lökeshullám sebessége, a 0 index a kezdeti, az 1 a megváltozott állapotot. A kezdeti sebesség zérus, a kezdeti nyomás a légköri nyomás.

A tömegmegmaradás felírása: a lökeshullám által érintett tömeg a hatás előtt és után megegyezik.

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{U - u_0}{U - u_1} = \frac{V_0}{V_1}$$

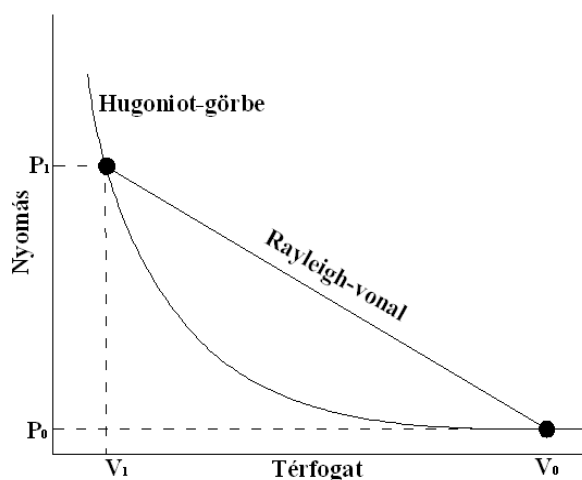
A lendületmegmaradás felírása: a lendületváltozás mértéke megegyezik a rendszerre ható erővel (a P nyomással).

$$(P_1 - P_0) = \rho_0 u_1 U$$

Az energiamegmaradás felírása: a lökeshullám által érintett tömeg belső energiaváltozása annyi, amennyi munkát végez rajta a lökeshullám.

$$E_1 - E_0 = \frac{1}{2} (P_1 + P_0) (V_0 - V_1)$$

Ez három egyenlet öt ismeretlennel. A továbbiakban szükség van két kiegészítő feltételre, az egyik a közeg állapotegyenlete, a másik egy peremfeltétel, amit kísérleti mérések szolgáltatnak.



52. ábra - A fizikailag lehetséges p - V állapotok Hugoniot görbéje, és Rayleigh vonal (szerzői ábra)

Mivel a Hugoniot görbe jelenti a közeg egyensúlyi állapotának lehetséges p - V értékeit, az ennek két egzakt pontját összekötő egyenes a szinguláris ugrási feltételt írja le (52. ábra). Ez az egyenes a Rayleigh egyenes, az általa leírt állapotváltozás a hőmérséklet megváltozása nélkül megy végbe, tehát adiabatikus folyamat.

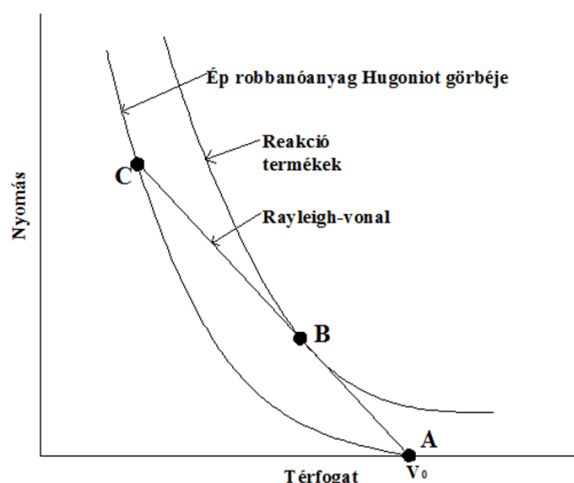
Ha kezdeti feltételként ismerjük egy lökeshullám utáni és az azt megelőző p - V állapotot, akkor ki lehet számítani a lökeshullám terjedési sebességét. Ha a kiindulási p - V értékeket tudjuk, és a lökeshullám sebességét, akkor meghatározható a lökeshullám által érintett pont p - V értéke.

3.2.3. A TNT ÁLLAPOTEGYENLETE

A robbanások modellezéséhez a kémiai átalakuláson átmenő anyagban is fel kell írni a Rankine-Hugoniot feltételt. A kémiai reakciót tartalmazó réteget a lökeshullámban végtelen kicsinek tételezte fel Chapman és Jouguet, innen a róluk elnevezett CJ elmélet. Később ezt a 40-es években módosította Zeldovich, Neumann és Döring, innen a róluk elnevezett ZND elmélet, ők a kémiai reakciót egy véges szélességű tartományban tételezték fel [77]. Ezen feltételezésekkel a robbanóanyagok detonációjának folyamata egy lökeshullám terjedéseként írható le. A lökeshullám frontja és a kémiai reakció azonos sebességgel halad a robbanóanyagban, ez a D detonációs sebesség.

A Rankine-Hugoniot feltétel ugrási feltételének grafikus ábrázolása robbanóanyagok esetén az 53. ábrán látható. Itt két Hugoniot görbe van, a reakcióba lépett, és a még nem detonált anyag Hugoniot görbéje.

A diszkontinuitásban nem csak fizikai, hanem kémiai állapotváltozás is történik. Az ábrán az „A” pont a nyugalomban lévő, nem detonált állapot. Erről a pontról akar az anyag a „C” pontra ugrani a lökéshullámban. A „B” pont pedig a már reakcióba lépett termékek Hugoniot görbéjén van, és az „A-B” Rayleigh vonalon is rajta van. A CJ elmélet szerint az anyag „nem ér el” a „C” pontba, hanem a „B” pont-beli állapotra fog átugrani.



53. ábra - Robbanóanyagok és reakciótermékük Hugoniot görbéi (szerzői ábra)

Chapman és Jouguet a 19. század fordulóján azt a korszakalkotó hipotézist állította fel, miszerint a Rayleigh vonal a reakciótermékek Hugoniot görbéjének az érintőjét adja a „B” pontban.

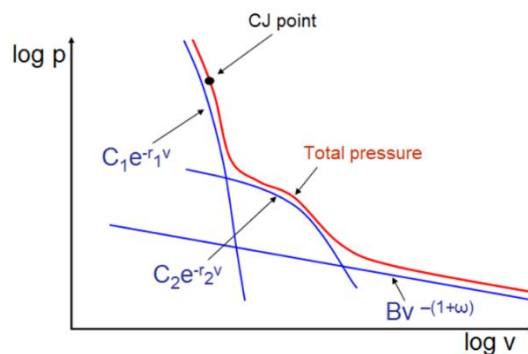
A TNT állapotegyenletét az 50-es évektől intenzíven kutatták. A kihívás az volt, hogy ismertté váljon, mi történik a robbanási reakciótermékekkel a CJ pontra kerülésük után. A reakciótermékek nagy hőmérséklete miatt az entrópia változás elhanyagolható, gyakorlatilag adiabatikus expanzióba kezdenek a termékek. A TNT állapotegyenlete tehát nem más, mint a CJ pont utáni adiabatikus expanziót leíró adiabaták serege (54. ábra). A legmaradandóbb felírás az 1968-ban kialakult [78] Jones-Wilkins-Lee féle állapotegyenlet:

$$P(V) = C_1 \left(1 - \frac{\omega}{r_1 V}\right) e^{-r_1 V} + C_2 \left(1 - \frac{\omega}{r_2 V}\right) e^{-r_2 V} + \frac{\omega E}{V}$$

ahol E a TNT fajlagos energiamennyisége, C_1 , C_2 , r_1 , r_2 , és ω kísérletekből megállapított konstansok, melyeknek értékei a 7. táblázatban találhatók.

Energia [kJ/kg]	Sűrűség [kg/m ³]	Detonációs sebesség [km/s]	Detonációs nyomás [GPa]	A [10 ¹¹ Pa]	B [10 ⁹ Pa]	C [10 ¹⁴ Pa]	R ₁	R ₂	ω
4870	1580	8,5	21	3,73	3,74	7,34	4,15	0,90	0,35

7. táblázat - TNT állapotegyenletének paraméterei [79]



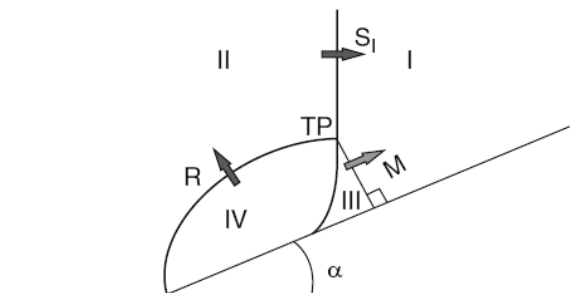
54. ábra - A TNT Jones-Wilkins-Lee féle állapotegyenletének adiabatái [79]

3.2.4. MACH VISSZAZERŐDÉS

Annak függvényében, hogy a robbanás a föld felszínétől mérve milyen magasan történik, lökeshullám terjedési típusokat lehet megkülönböztetni. A különböző típusok kialakulása a lökeshullámok hullámszerű terjedése miatt van. A felületekkel ütközve visszazerődéseket szenvednek el, és ez megnehezíti, bonyolultabb geometria esetén lehetetlenné teszi annak kézi meghatározását, hogy hol és mikor fog felerősödve hatást kifejteni, illetve elgyengülni a lökeshullám. A szabad légterű robbanások esetén zavartalan, gömbszerű terjedés tapasztalható, a földközeli robbanás esetén félgömb alakban terjed a hullám.

A hullámok által az épületre kifejtett hatás azon alapszik, hogy a lökeshullám visszazerődik az útjában álló akadályról. A visszazerődést okozó felületeken nagyobb túlnyomás mérhető, mint a P_{so} túlnyomási csúcserő. A szuperszonikus lökeshullámok visszazerődése a gázdinamika külön fejezete. A jelenséget először Ernst Mach figyelte meg. A róla elnevezett Mach visszazerődésnek ma már számos fajtája ismeretes. A lökeshullámok sík falakra kifejtett megnövekedett terhelését a következő alaptípus által leírt jelenség okozza.

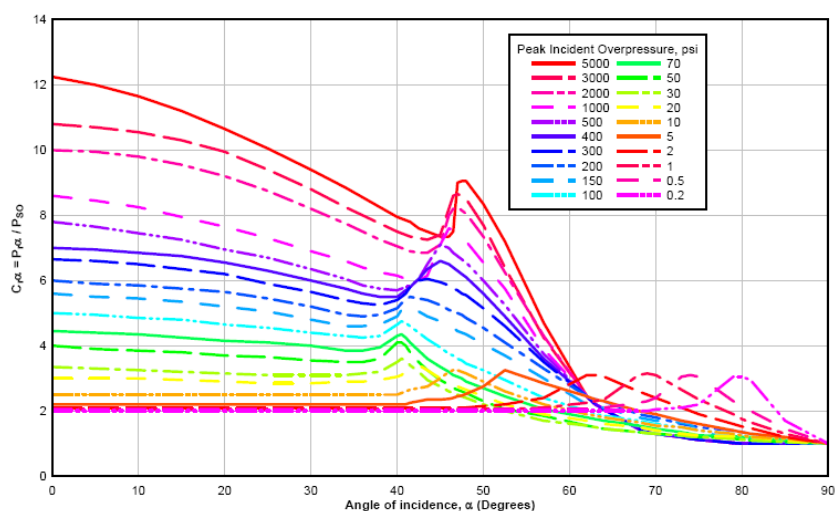
Az 55. ábrán látható az „ S_I ” jelű kezdeti lökeshullám, amely a haladási irányától α szöggel eltérő felületen visszazerődést szenved el. A visszazerődött hullám „ R ” izobár vonala összemetsz a kezdeti hullám izobár vonalával. Ez a metszéspont (TP – triple point) 2 dimenziós vizsgálat esetén időben egy vonalat ír le, amelyet szakadási felületnek nevezünk. A szakadási felület alatt kialakuló térfogatban sűrűség-koncentráció alakul ki (III). A felület mentén kialakuló „ M ” hullámfrontot a nemzetközi szakirodalom Mach-zárnak hívja, a hazai gázdinamika [80] az erős hullám kifejezéssel él.



55. ábra – Általános Mach visszazerődés [77]

A Mach-szár általában a peremfeltételektől függően egyenes, vagy kissé görbült, de az érintője a visszaverő felületre merőleges. Az ábrán jelölt „III” térfogatban tehát megnő a sűrűség, és a nyomás. Ez az összetett jelenség a visszavert túlnyomás, mely függ a beesési szögtől és a kezdeti lökeshullám túlnyomásától. A lökeshullámot irányváltásra kényszerítő felületen többszörös is lehet a mérhető túlnyomás, ezért fontos figyelembe venni a tervezés során. A növekedést a Mach szárban lévő túlnyomás és a kezdeti lökeshullám túlnyomásának arányában felírva az 56. ábrán látható összefüggés adódik.

Az ábra kísérleti eredmények alapján lett megalkotva, a témában nemzetközi szaktekintélynek számító Gabi Ben Dor professzor szerint „*annak ellenére, hogy kísérleti úton intenzíven körbejárt kérdésről van szó, a jelenség analitikus leírása még nem történt meg.*”⁵⁸



56. ábra - Lökeshullámok visszaverődési tényezői a beesési szög függvényében [37]

Találni arra is feljegyzést⁵⁹, hogy 1944 szeptemberében Neumann János elméleti alapon felhívta a jelenségre az atombomba fejlesztőinek figyelmét. Ő mutatott rá annak jelentőségére, hogy milyen magasan robban fel a bomba.

Neumann arra az 56. ábrán is látható jelenségre mutatott rá, hogy a visszaverődési tényező 90°-nál kisebb beesési szögek esetében nagyobb lehet, mint 90° esetén, így tudták az első atombombák rombolási sugarát megnövelni azzal, hogy a robbantási magasságot kb. 500-1000 m magasra tették.

3.2.5. KAPCSOLÓDÁS A NUMERIKUS ÁRAMLÁSTANHOZ

Az iménti pontokban ismertetett elméleti alapok a CFD⁶⁰ számítások során használhatók fel. Az első ilyen jellegű számítások egyikét Brode végezte el 1955-ben. [74] A FEM és FVM⁶¹ technológiákkal párosítva több szoftveres környezetet is kifejlesztettek a lökeshullámok modellezésére. Az ANSYS által felvásárolt LS-Dyna a legelterjedtebb explicit megoldó, mellette az Autodyn [79] is népszerű. Emellett van még néhány általános célú végeselem szoftver, amik

⁵⁸ G. Ben Dor: Shock Wave Reflection Phenomena. p. 297 [81]

⁵⁹ L. Hoddeson, W. Henriksen – CRITICAL ASSEMBLY p. 184 [82]

⁶⁰ CFD – Computational Fluid Dynamics – Numerikus Áramlástan

⁶¹ FEM, FVM – Finite Element és Finite Volume Method – Végeselem módszer és Véges térfogatok módszere

támogatják a robbanások modellezését, pl. ABAQUS, NASTRAN. Ezek a szoftverek teljes körű megoldásokat kínálnak, egy-, és kétirányú kapcsolással a szilárd és gáz közegek közt. Az egyszerűbb programok csak áramlástanival rendelkezők, pl. a Sharc, illetve a ProSAir.

A modellezés alapja a 3D-ben felírt Euler egyenletek megoldása: (ρ : sűrűség, u,v,w : 3 dimenziós koordináták, v : sebesség, e : energia, p : nyomás, t : idő)

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = 0$$

$$U_t + F(U)_x + G(U)_y + H(U)_z = 0$$

ahol $U = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho(e + \frac{v^2}{2}) \end{Bmatrix}$ konzervatív mennyiségek (tömeg, lendület, energia)

$$F = \begin{Bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho uv \\ \rho uw \\ \rho u(e + \frac{v^2}{2}) + pu \end{Bmatrix} \quad G = \begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho vu \\ \rho v^2 + p \\ \rho vw \\ \rho v(e + \frac{v^2}{2}) + pv \end{Bmatrix} \quad H = \begin{Bmatrix} \rho w \\ \rho wu \\ \rho wv \\ \rho w^2 + p \\ \rho w(e + \frac{v^2}{2}) + pw \end{Bmatrix}$$

fluxusok vektorai

Ezekbe az egyenletekbe a fluxusok vektorának ötödik eleménél lehet beilleszteni a JWLL állapotegyenletet. A számítás során kapott eredmények a következők:

- hullámfront x,y,z irányú sebessége,
- túlnyomás,
- hőmérséklet,
- sűrűség,
- energia.

Ebből gyakorlati jelentősége a túlnyomásnak és a sebességnek van. Előbbi a terhek felvételéhez és megannyi más vizsgálat kiindulási adataként szükséges, utóbbit a repeszhatás vizsgálatánál lehet felhasználni.

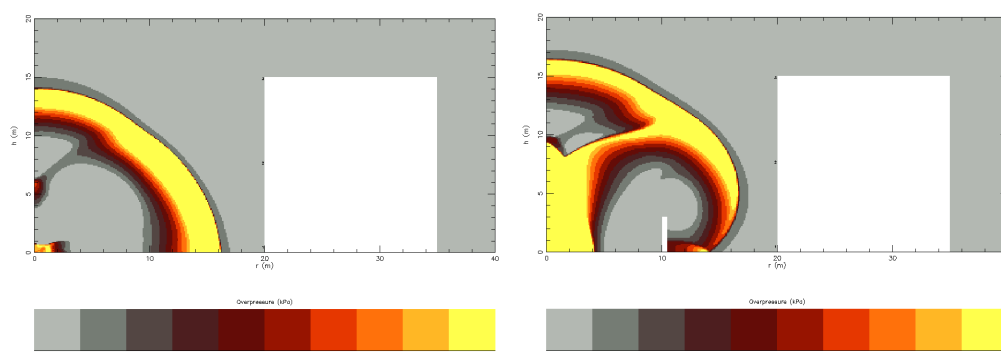
3.3. ELVÉGZETT CFD SZÁMÍTÁSOK

A CFD számításokkal a kutatásom során többféle problémát is megvizsgáltam, melyek hasznos és értékes információkat szolgáltatottak a lökeshullámok visszaverődését és komplex térben való terjedését illetően. Ezek a számítások az időigényességük miatt elsősorban kutatások során kerülnek alkalmazásra. Speciális feladatoknál, ha van rá anyagi-, és időkeret, szokták alkalmazni a tervezés során is. A gyakran előforduló tervezési problémáknál parametrizált CFD futtatásokat szokás alkalmazni, ezek használatával egyszerűbb képletekben is megfogalmazható a kívánt

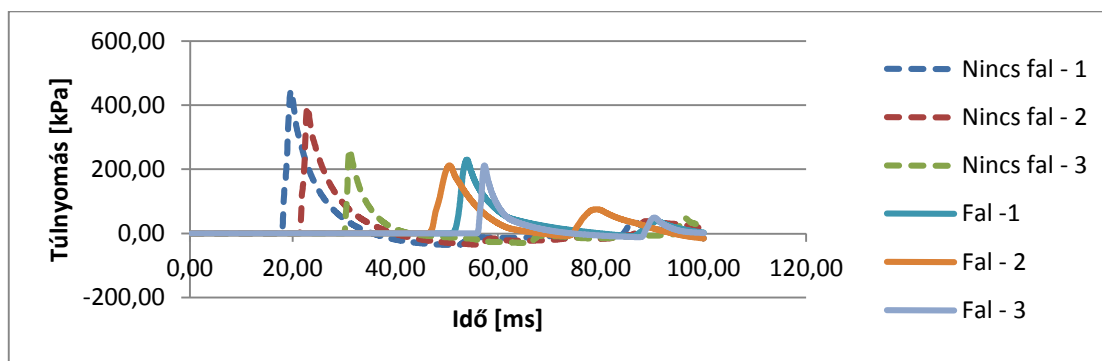
eredmény. Bár parametrizált futtatásokat helyhiány miatt nem végeztem, az eredmények így is választ adnak bizonyos kérdésekre, és előremutatnak a problémák további vizsgálatát illetően.

3.3.1. VÉDŐFALLAL KÖRBEVETT ÉPÜLET ROBBANÁSTERHE⁶²

A vizsgálat tárgya, hogy egy általános geometriájú épület homlokzati robbanásterhén (400 kg TNT) mit változtat az épülettől 10 m-re elhelyezett, 3 m magas robbanásvédő fal. Feltételezzük, hogy a fal nem semmisül meg a robbanás hatására. Az 57. ábrán látható a fal nélküli és a fallal körülvett változat esetén a lökeshullám terjedésének egy pillanata. A falon „átbukva” a lökeshullám továbbra is gömbszerűen igyekszik terjedni, a földet elérve visszaverődik, és így halad tovább az épület felé.



57. ábra - Fal nélküli és fallal védett épület vizsgálata (szerzői ábra) [84]



58. ábra - Fal nélküli és fallal védett elrendezés esetén a fal nyomásgörbéi (szerzői ábra)

A homlokzaton felvett 3 monitorozási pont nyomásgörbét vizsgálva kitűnik (58. ábra), hogy a fal az épület alján és közepén közel felére csökkenti a túlnyomást, míg a tetején már kevésbé jelentős a csökkenés. Hasonló módon, az alsó két ponton az impulzus értéke 60%-ra csökken, a felső ponton ez az érték mindössze 80%.

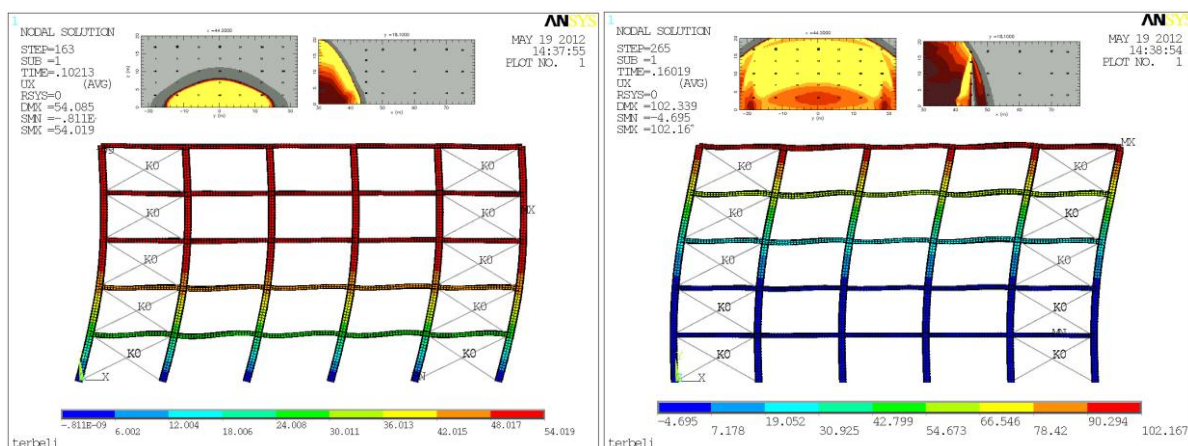
3.3.2. LÖKÉSHULLÁM HOMLOKZATI SZÉTTERTJEDÉSÉNEK VIZSGÁLATA⁶³

A homlokzati széttérjedés hatása egy acélszerkezetű, X-rácsozással merevített irodaház keretállásain lett megvizsgálva. A 8000 kg TNT 45 m-re történő robbanása esetén empirikus, illetve

⁶² Román Zs., Nagy R.: Áramlástan megközelítés alkalmazása a robbantások elleni védekezésben. [84]

⁶³ A számítás részletesebb leírása megtalálható: Román Zs.: Acélszerkezetű épület pontosított vizsgálata külső robbanásterherre. MSc Diplomamunka [85]

CFD teherfelvétel mellett lett elvégezve a számítás. A fő különbség az, hogy míg az empirikus teher a sík hullámok feltételezésének megfelelően egyben nyomja meg az egész homlokzatot, addig az áramlástani vizsgálat figyelembe veszi, hogy a lökeshullám időben szétterjed a homlokzaton, nem egyszerre fejt rá ki az erőt (59. ábra).



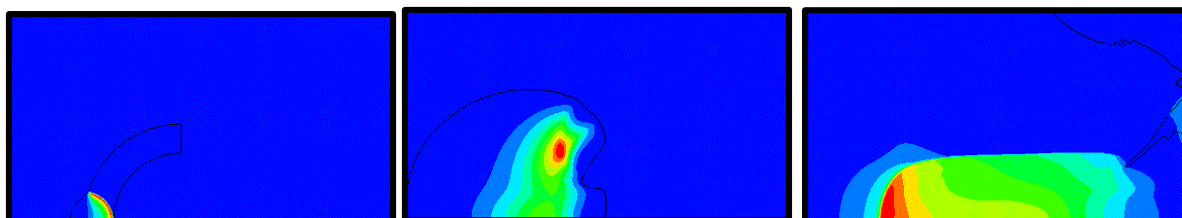
59. ábra - A szerkezet elmozdulása a CFD terhelés kezdeti és későbbi fázisában (szerzői ábra) [85]

Az 59. ábrán látható, hogy a terhelés elején más rezgésalakot gerjeszt a lökeshullám, mint a végén, amikor már az egész homlokzatot terheli. Ebből következik, hogy nem lehet egyszabad-ságfokú rendszerként pontosan modellezni az épületet. A számítások nem kerülnek részletezésre, de az eredmények közzlése fontos tanulsággal bír: az empirikus számításban a maximális tetőponti eltolódás 163 mm volt, míg a CFD terhelés esetén mindössze 102 mm. Ez a 40%-os csökkenés egyértelműen mutatja az áramlástani teherfelvétel kifinomultabb jellegét.

3.3.3. KUMULATÍV HATÁS VIZSGÁLATA⁶⁴

A CFD számítás egyik előnye, hogy a töltet alakjának a hatása is modellezhető. Az oklahomai robbantásnál a mérénlyő olyan alakban helyezte el a hordókat a raktérben, hogy azok kumulatív hatást okozzanak (61. ábra). Ennek megvizsgálására három, azonos W tömegű modell lett megvizsgálva: az első esetben tökéletes gömbtöltetként, a másodikban geometriailag szabályos kumulatív töltetként (60. ábra), a harmadikban a mérénlyő által alkalmazott, elkülönített hordós elrendezésként volt felvéve a robbanóanyag.

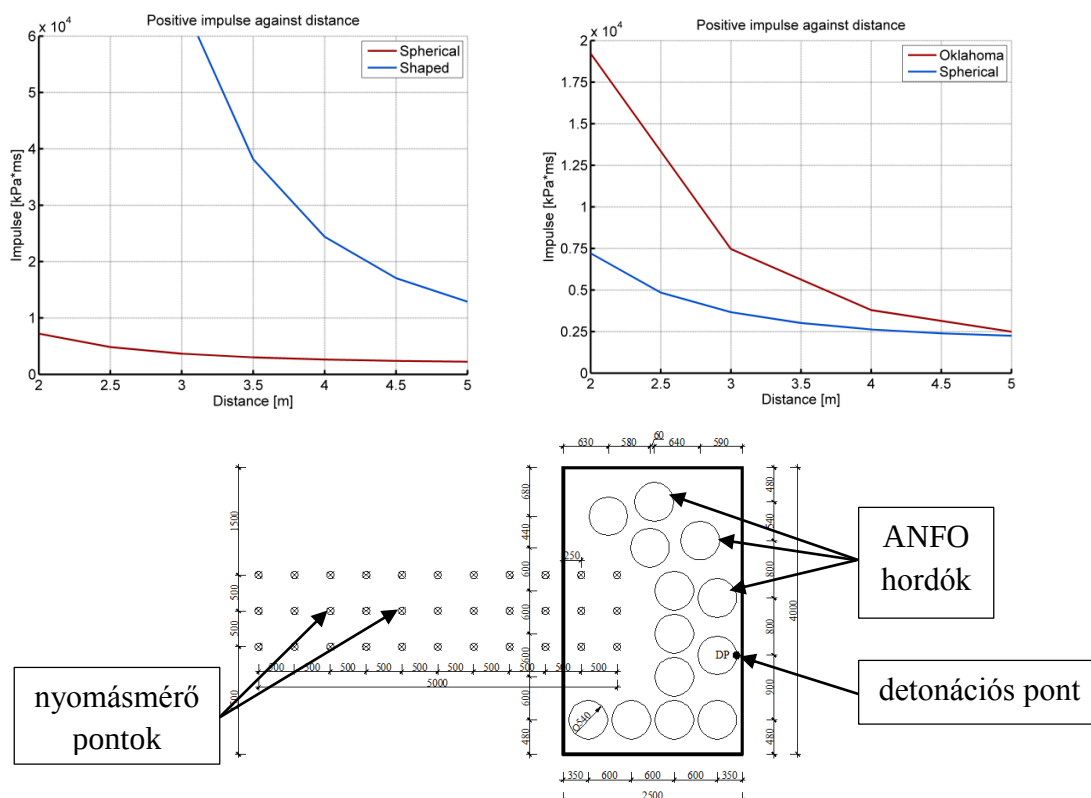
Detonációs pontként első esetben a töltet közepe, a másik két esetben a töltetek hátsó-középső pontja lett megadva. A számítások a JWL állapotegyenletet használva, Autodyn-ben történtek.



60. ábra – Szimmetrikus kumulatív töltet detonációjának CFD modellezése (szerzői ábra) [86]

⁶⁴ A számítás részletesebb leírása megtalálható: Román Zs., Nagy R.: Cumulative effect of shaped, vehicle born improvised explosive charges. [86]

A két kumulatív töltetet a gömbtöltettel összehasonlítva azt kapjuk, hogy a szimmetrikus töltetnél az impulzus 3-10-szeres növekedést mutat, míg a rendezetlen töltetnél maximum 3-szorosa a számított érték a gömbtöltethez képest (61. ábra). **A vizsgálat alapján a VBIED-be rendezetlenül pakolt töltetek nem képesek jelentős kumulatív hatás létrehozására még akkor sem, ha alakilag megközelítik a kumulatív geometriát.** A kumulatív hatás létrejöttéhez tökéletes geometria szükséges, különben az egymással szemben haladó lökeshullámok nem felerősítik, hanem kioltják vagy gyengítik egymást.



61. ábra – VBIED-be szerelt „kumulatív” töltet, és a kiértékelési pontokon mért túlnyomás és impulzus növekedése a gömbtöltethez képest (szerzői ábra) [86]

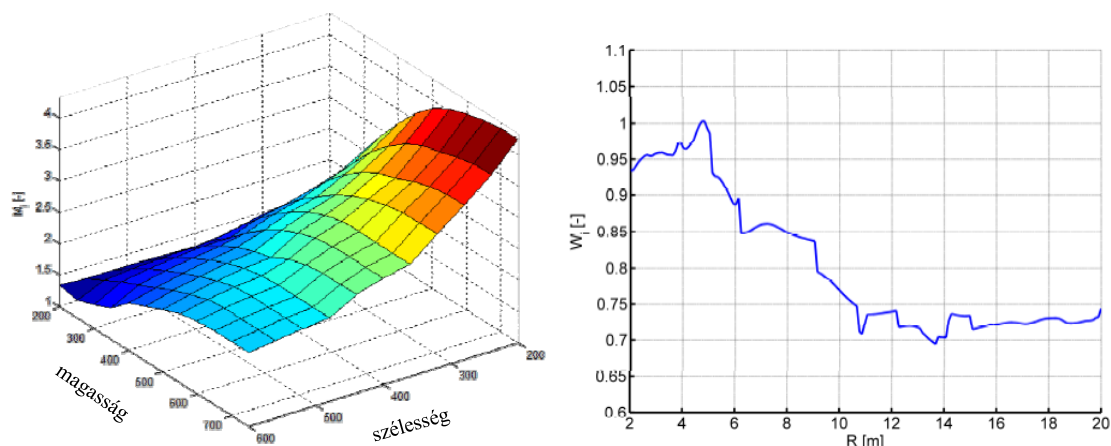
3.3.4. AZ ABLAKOK HATÁSA AZ UTCÁN TERJEDŐ LÖKÉSHULLÁMRA⁶⁵

A lökeshullámot az utca két oldalán lévő épületek falai az egyirányú terjedéshez hasonló viselkedésre kényszerítik. Az épületek magasságát is figyelembe véve a lökeshullám energiája így kettő irányba összpontosul. A számítás során az került megvizsgálásra, hogy az utca szélességének és a házak magasságának függvényében hogyan nő a túlnyomás a szabad légterű, félgömbszerű robbanáshoz képest. A 62/a. ábra mutatja a 10 kg-os töltettől 17 m-re lévő vizsgált pont esetében az impulzus növelő tényezőjét az utca szélességének és magasságának függvényében. A legmagasabb érték 4.5-re adódott.

Az épületek homlokzatának egy részét fedő nyílászárók a terhelés hatására betörnek, és a lökeshullám bekerül az épületbe, ezáltal csökken az utcán haladó hullámfront ereje. A számítás során a Magyarországon átlagos belvárosi ablakméretek és távolságok lettek feltételezve. A

⁶⁵ A számítás részletesebb leírása megtalálható: Nagy R., Román Zs.: Channelling and attenuating effects of blast parameters in urban street geometry with glazing [87]

számítások azt mutatják, hogy a lökéshullám csökkentő tényezője független az ablakok méretétől. A robbanástól 15 m távolságban a túlnyomás 15%, míg az impulzus 25% csökkenést mutat az ablak nélküli utca modell eredményeihez képest (62/b. ábra).



**62. ábra – a, impulzus növelő tényezője az utcageometria figyelembe vételével ($W=10$ kg, $R=17$ m)
b, impulzus csökkentő tényezője az utcageometria és az ablakok figyelembe vételével (szerzői ábrák)**

3.4. LÖKÉSSZERŰ TERHEK TERVEZÉSI SAJÁTOSSÁGAI

3.4.1. HATÁRÁLLAPOTOK

Mint minden tervezési feladatnál, a robbanásra történő tervezésben is definiálni kell a határállapotokat. Ez az alapja a klasszikus, szabványok által szabályozott mérnöki tervezésnek. Ettől eltérő módszer a „performance based design”, ahol a számítás leköveti a romosodási szinteket, és bizonyos megfontolások alapján a megrendelő választja ki a kívánt védettségi szintet. Erre a módszerre az értekezésben részletesen nem térek ki, a továbbiakban a klasszikus, határállapot központú módszerrel foglalkozok.

A gazdaságos tervezés érdekében ki kell használni a szerkezet képlékeny alakváltozási képességét. A képlékeny tartományban a határállapotok definiálása nem annyira egzakt, mint rugalmas tartományban, a mérnöki szubjektivitás is megjelenik tényezőként. A képlékenyedés mértékét korlátozni kell, hogy az adott elem ne érjen el olyan állapotot, ami állékonyságvesztést okozna a szerkezetben.

Ezt a szilárdsági szempontból értelmezett határállapotot acélszerkezeteknél a rugalmas és képlékeny alakváltozás hányadosa szabja meg (duktilitási tényező), míg vasbeton-, és falazott szerkezeteknél a csomóponti elfordulások a meghatározók. A szilárdsági megközelítés mellett globális értelemben a geometriai nemlinearitás is figyelmet követel. A túlzott alakváltozás következtében felerősödhetnek a másodrendű hatások, és ez romosodási láncreakciót indíthat be. A szakirodalomban fellelhető határértékek esettanulmányokból, utólagos szemlékből, tapasztalati úton lettek megalkotva⁶⁶. Nincsen publikálva megfelelően, hogy a táblázatok készítői mit neveznek „mérésékelt”, illetve „súlyos” romosodási szintnek. Például ha a tetőponti eltolódás,

⁶⁶ A BakerRisk Consultants által szervezett „Design of Blast Resistant Buildings” oktatáson szóban elhangzott információ (2013 március) [36].

vagy egy oszlop csomóponti elfordulását a $p-\Delta$ hatás miatt korlátozták, de az analízisben másodrendű számítást végzünk, akkor ezen határállapotok betartása nem kell, hogy kötelező legyen, hiszen a konvergált megoldás és az oszlopok szilárdsági megfelelése bizonyíthatja, hogy a vizsgált szerkezet megfelel.

Mutalib és Hao egyik munkájában [88] egy új típusú határállapot kerül bemutatásra. Ez a határállapot nem empirikus alapon nyugszik, hanem valós fizikai jelentése van, a megterhelt oszlop reziduális (terhelés után megmaradó) kapacitását méri. A tönkremenetel mérőszáma:

$$D = 1 - \frac{P_{residual}}{P_{design}}$$

$P_{residual}$ a végeelem modellben a dinamikus teher után alkalmazott tengelyirányú teherrel szembeni teherbírás (ami az oszlop teljes tönkremenetelét jelenti). P_{design} az oszlop keresztmetszetének teljes teherbírása a klasszikus vasbetonelmélet szerint. Míg a csomóponti elfordulások korlátozása jellemzően a hajlítási alakkal válaszoló oszlopokra van kidolgozva, ez a módszer figyelembe veszi a nyírási alakkal válaszoló oszlopok tönkremenetelét is. További előnye a módszernek, hogy figyelembe vehető pontosan az oszlopra jutó normálerő értéke, és ehhez igazítható a tönkremeneteli szint súlyosságának megítélése.

A szakirodalomban számos határállapot táblázat található, ezekből néhány a „C” mellékletben kerül bemutatásra.

3.4.2. ANYAGSZILÁRDSÁGOK VÁLTOZÁSA

Dinamikus terhelésnél az anyagok másképp viselkednek, mint statikus terhelésnél. Fémeknél a fémszerkezet kristályaiban lévő hibák, diszlokációk a hirtelen alakváltozás során máshogy rendeződnek el: kisimulhatnak, felhalmozódhatnak, összehúzódnak, ami bizonyos mechanikai jellemzők növekedését okozza. A belső súrlódás miatt az alakváltozás nem tudja követni a feszültségnövekményt, így bizonyos anyagoknál a duktilitás csökken, ridegebbé válik az anyag.

Acélnál a folyási-, és szakítószilárdság változik, betonnál a szilárdsági értékekkel együtt a rugalmassági modulus is. Az összehasonlítás alapja az ϵ nyúlássebesség (strain rate). A terhelés frekvenciája a vizsgált szerkezeti elem alakváltozásából és az ennek folyamán történő acélmegfolyásig eltelt időtartamból számítható, vagyis a megnyúlás idő szerint vett deriváltja, mértékegysége $1/s$ (Hz). Tipikus terhelési frekvenciák: földrengés esetén 10^{-1} Hz, ütközéseknél 10^1 Hz, robbanásoknál 10^3 Hz. A szilárdsági értékek növekedését figyelembe vevő szorzótényező (DIF)⁶⁷ értéke az adott igénybevétel (húzás, nyomás, hajlítás, nyírás) típusától is függ, de konzervatív megközelítésként 10% körüli növekedést lehet feltételezni.

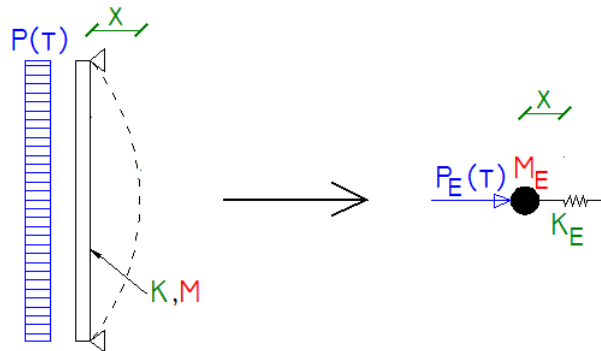
A $DIF(\epsilon)$ függvény az adott anyagon elvégzett kísérleti adatsorokból vehető fel. A tervezés során iteratívvá válik a számítás, mert a terhelési frekvencia a szerkezet adott dinamikai választól függ, ez pedig a folyáshatár függvénye is. A fejlettebb módszereknél alkalmazott anyagmodellekben figyelembe van véve a terhelési frekvencia, ilyen pl. a Johnson-Cook féle anyagmodell [79]. A kézi számításokban használható DIF értékeket a „C” melléklet tartalmazza.

⁶⁷ DIF – Dynamic Increase Factor – Dinamikus szilárdságnövelő tényező

3.5. DINAMIKAI MÉRETEZÉS

3.5.1. SDOF RENDSZER

A dinamikai számítási módszerek lehetnek kontinuum modellek, egyszabadságfokú, vagy többszabadságfokú diszkrétizált modellek. A gyakorlatban leginkább használt eljárás a rezgő rendszer SDOF (egyszabadságfokú) rendszerré történő konvertálása (63. ábra).



63. ábra – Az oszlop egyszabadságfokú rendszerré konvertálása (szerzői ábra)

Az ekvivalens rezgőrendszer kinetikus energiája meg kell, hogy egyezzen a vizsgált szerkezet adott alakváltozáshoz tartozó kinetikus energiájával. Ezt a feltételt egy K_M ekvivalens tömeg szorzóval szokás teljesíteni. A tartónak más a lehajlása rugalmas és képlékeny tartományban, tehát más a vonatkozó tömegtényező is a rugalmas és képlékeny esetben.

A teher redukálásának alapja az, hogy a redukált teher által az ekvivalens rezgőrendszeren végzett külső munka legyen egyenlő a ható teher vizsgált elem feltételezett alakváltozása során végzett külső munkájával. Ezt a feltételt egy K_L ekvivalens teher szorzóval szokás teljesíteni.

A gyakorlatban K_L és K_M értékei a típustartókra elkészített táblázatból vehetők fel.

A számítástechnika által támogatott komplex rendszerszámítási módszerek előrehaladtával is az egyszabadságfokú módszerek megkerülhetetlenek a szakirodalom számára. Az eljárás kidolgozója John M. Biggs⁶⁸, aki 1964-ben így fogalmaz fő művében: „*az SDOF rendszerű számítási eljárást nem szabad durva közelítésnek felfogni, amely elnagyolt és közelítő számításokra alkalmazható, és nem szabad olyan módszernek sem tekinteni, amely csak olyan mérnököknek szól, akiknek hiányzik a képzettségük vagy a tudásuk a kifinomultabb és pontosabb számítások elvégzésére. A szerkezetek dinamikája során felmerülő feladatokban jelentős bizonytalanságok vannak, főleg a terhek karakterisztikájának tekintetében. Azon számításokat használni, melyeknek a pontossága meghaladja az analízis bemenő adatainak pontosságát nem más, mint merő időpocséklás.*”⁶⁹

A Magyarországon megjelent csekély számú idevágó szakirodalom is közli [91] a Biggs által készített nomogramos megoldásokat. Az SDOF eljárás kevés bemenő paraméterrel bír, gyorsan

⁶⁸ A Massachusetts Institute of Technology dinamika professzora, több kiemelten védett objektum projektjének szaktanácsadója. †2000

⁶⁹ J. M. Biggs: Introduction to structural dynamics. p. 201 [90]

kivitelezhető, alkalmas nagyszámú vizsgálat elvégzésére, részletesebb vizsgálatok ellenőrzésére. Természetesen ennek a módszernek is meg vannak az alkalmazhatósági határai, nem tud megfelelő eredményekkel szolgálni például a következő esetekben:

- Ha nagy valószínűséggel lokális tönkremeneteli formák jelennek meg, pl. acélgerendák övhorpadása, gerinchorpadása, betontakarás lepattogzása. Ezek visszahatnak a rendszer kapacitásgörbéjére, amit az SDOF számítás nem tud figyelembe venni.
- Ha nem lehet tudni, hogy milyen tönkremeneteli mechanizmusra számítunk.
- Ha a szerkezetre időben és térben is szétszttva működik a teher, tehát a valójában többszabadságfokú rendszer tömegcsomópontjaira nem egyszerre hat és nem ugyanaz a teherfüggvény, és így az SDOF konverzió nem lehetséges.
- Ha a vizsgált elem egy teherhordó oszlop vagy fal, akkor a másodrendű hatások csak nehézkesen vehetők figyelembe.
- Ha a teher külpontosan, vagy két tengely irányából is hat.
- Ha a vizsgált elem nyírási alakváltozásai jelentősek.
- Ha a teherfüggvény nagy túlnyomással, de nagyon kicsi ideig hat. Így a mozgásba jövő effektív tömeg nem „éri át a keresztmetszet mélységét”, így a lengő rendszer statikai váza is megváltozik, mert a nem lengő tömeg „nekicsapódik” a tehetetlensége miatt álló hátsó tömegnek.

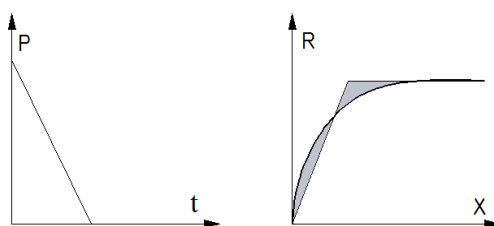
Az SDOF módszer jelentősen a biztonság javára közelít. Kísérletekkel való összehasonlítások kimutatták, hogy a kéttámaszú tartók elmozdulásai akár 70%-kal, reakcióerői átlagosan 25%-kal adódtak nagyobbra az SDOF számítással, mint a valós, mért eredmény [36]. Az SDOF módszer tehát bizonyítottan megfelelő tervezési célokra, de nem alkalmas kiértékelésre, pontos viselkedés előrejelzésére.

3.5.2. AZ ÁTLAGGYORSULÁSOK MÓDSZERE

A SDOF rendszer gerjesztett rezgését leíró

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + R(x) = P(t)$$

nemlineáris, gerjesztett differenciál egyenletet többféle módon is meg lehet numerikusan oldani. Az egyenletben a nemlineáris tagok a rugómerevséget képviselő $R(x)$ teherbírásfüggvény, illetve az $P(t)$ teherfüggvény (64. ábra). Az ábrán a teherbírásfüggvény idealizálása is fel van tüntetve, a bilinearizálás alapja a görbe alatti és görbe fölötti területek egyenlősége. A módszer alkalmazható nem idealizált teherbírásfüggvénnyel is, ekkor az algoritmust úgy kell megírni, hogy minden időlépcsőben számítja a görbe szerint érvényes teherbírást.



64. ábra – Tipikus teherfüggvény és teherbírásfüggvény (szerzői ábra)

A rezgésegyenlet numerikus megoldásának előnye, hogy nem érvényes rá korlátozás, bármilyen bemenő adatokkal megoldható. Bár az UFC 3-340-02 [37] és a [92] mintapéldái szerint is

leellenőrzésre kerül, hogy a t_m/t_d hányados 0.1-3 között van-e, mert ebben a dinamikusnak hívtartományban érvényes ez az eljárás. (t_m az alakváltozáshoz szükséges időtartam). Ez azonban tisztán mechanikai alapokon cáfolható, az átlaggyorsulások módszere a lehető legpontosabb SDOF megoldás (a csillapítás hatásától eltekintve), nincs miért megkötéseket tenni.

Ezt támasztja alá az 1. Függelék is, ahol bemutatásra kerül, hogy ez a számítási módszer a $t_m/t_d > 3$ tartományban is hasonló eredményt ad, mint az oda érvényesnek mondott másik eljárás.

Az átlaggyorsulások módszere egy egyszerű numerikus megoldási algoritmus. A módszer azzal a megközelítéssel él, miszerint a t és $t+1$ időpont közötti gyorsulás átlagosan konstansnak vehető. Ekkor a rendszer sebessége és elmozdulása az alábbi módon alakul:

$$v_t = v_{t-1} + \frac{1}{2}(a_t + a_{t-1})\Delta t$$

$$x_t = x_{t-1} + \frac{1}{2}(v_t + v_{t-1})\Delta t$$

A rendszer gyorsulása t időpontban:

$$a_t = \frac{1}{m + \frac{c\Delta t}{2}} \left[F - R - c \left(v_{t-1} + \frac{\Delta t a_{t-1}}{2} \right) \right]$$

A megoldási algoritmus:

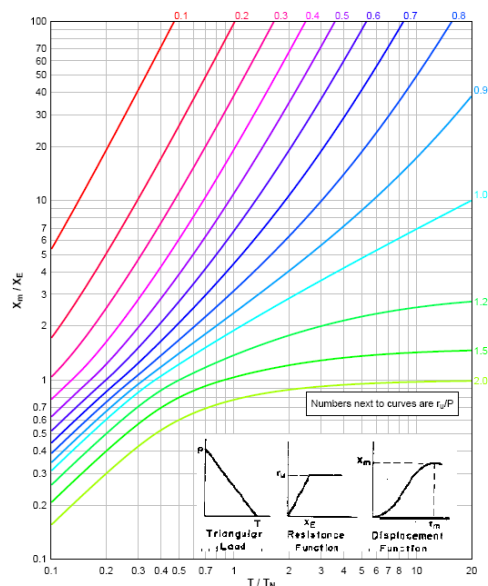
1. $t = 0$ kezdeti feltételek értékeinek meghatározása
2. Következő időlépés: $t = t + \Delta t$
3. $t = t + \Delta t$ időpontban $a_t = a_{t-1}$ ($t - 1 = 0$, a kezdeti feltétel)
4. v és x meghatározása a fenti képletek szerint
5. R meghatározása x függvényében
6. a_t meghatározása a fenti összefüggés szerint
7. ismétlés a 4. lépéstől

A numerikus megoldásokat Biggs dimenzió nélküli változók szerint nomogramok formájában foglalta össze. A félháromszög alakú lecsengő teher és bilineáris teherbírásfüggvény esetén a 65. ábra mutatja a megoldásokat. Bemeneti adat a lecsengési idő és lengésidő hányadosa, valamint a teher csúcserőértékének és a teherbírásfüggvény maximumának hányadosa. Eredményként a rendszer rugalmas és képlékeny alakváltozásának hányadosa (duktilitása) olvasható le.

A módszer programozása

Az általam írt, átlaggyorsulások módszerére épülő programot a 2-3. Függelékek mutatják be.

A megoldó algoritmus alapja Ian Ward munkájából [94] lett átvéve. Ő az átlaggyorsulások módszerét Craig [95] munkája alapján programozta le, ebben a változatban az R teherbírás függvény csak bilineáris lehet. A robbanási paraméterek a Kingery-Bulmarsh képletek egy egyszerűsített változata alapján vannak számítva [93].



65. ábra - SDOF gerjesztett rezgésének nomogramos megoldása [37]

A visszavert túlnyomás és impulzus számítása a beesési szög és a túlnyomási csúcserték függvényében, kettős interpoláció alkalmazásával történik a „C” mellékletben közölt nomogramok alapján. A teherfüggvény alakjának változtatása is lehetséges: háromszögteher, vagy Friedlander képlet közül lehet választani. A program eredményül szolgáltatja az elmozdulás, sebesség, gyorsulás és rugóerő adatsorokat. A numerikus megoldási algoritmust két módon bővítettem:

- az algoritmus megkeresi a maximum elmozdulás helyét és idejét,
- a ciklusok többszöri futtatásával, és a szilárdsági értékek módosításával **iteratív módon képes az acél és/vagy beton dinamikus szilárdságnövekedését figyelembe venni** (66. ábra). A kiindulási szilárdsági érték nincs DIF tényezővel szorozva, az alakváltozási időtartamból számolt terhelési frekvencia függvényében kiszámolásra kerül egy DIF érték, majd ezzel módosítva az acél szilárdságát, következik az újabb iteráció.

Az SDOF konverziós tényezők a csuklós-csuklós, képlékeny vázra érvényes értékekkel lettek felvéve. A Ward által leprogramozott algoritmus nem veszi figyelembe az SDOF tényezőket, így ezeket a megfelelő változóknál alkalmazni kellett. A HEA szelvények keresztmetszeti jellemzői olyanok, hogy a képlékeny állapotba kerülő oszlop nyírási kapacitásának ellenőrzéséhez szükség lehet a végeknél gerinchizlaló lemez alkalmazására, ez beállítható a programban.

A vasbeton modul csak húzott vasalással ellátott tartókra lett leprogramozva, mert a kétszeresen vasalt keresztmetszetek megoldása, és az ellenállás függvényének előállítása lényegesen összetettebb feladat, erre egy másik módszer kerül majd bemutatásra.

A program írása során a vasbeton keresztmetszet teherbírása tekintetében a szakmai gyakorlatban is használt kanadai szabványt⁷⁰ vettem alapul. Az acél változatban, a klasszikus szilárdságtani összefüggések kerülnek felhasználásra, ez szabványtól független. A bemenő adatokat, betonminőséget, beton és acél típusokat a hazai kínálat alapján vettem fel.

⁷⁰ CAN-CSA A23.3-14 Design of concrete structures. [96]

```

U_MAX := for j ∈ 1..5
|
| result ← response( ( p, Δt, yield_force, Mass, f_n, ξ )
|                    ( N, sec,      N,      kg,  Hz,  )
|
| U ← result1,1 · m
|
| MAX ← g ← 2
|
|   while ( Ug+1 / Ug ) > 1
|   |
|   |   g ← g + 1
|   |   ( Ug-1 / mm, g · Δt / s )
|   |
|   t_E ← MAX1,2 · s
|
|   ε ← Fy / ( E · t_E )
|
|   DIFF ← DIF( ε )
|
|   yield_force ← KR · R · DIFF
|
|   umax,j ← ( MAX1,1 / MESDOF )
|
|   ( umax )
|   ( DIFF )

```

66. ábra – Maximum pont keresés és dinamikus szilárdságnövekedés programozási kódja (részlet)

Ezek a programkódok a parciális biztonsági tényezők használatával vannak megírva. A tervezést a rendkívüli teherkombinációt feltételezve hajtjuk végre, de az egyetlen ható teher maga a robbanásteher, tehát nem függőleges teherhordó elemként van az oszlop kezelve. Az ellenállási parciális tényezők a rendkívüli kombinációnak lettek felvéve, a teher oldalon pedig előírt növelő tényezőt lehet figyelembe venni (ld. 4.1. fejezet). A programban egy konstans értékű SDOF modell hibáját korrigáló tényezőt is alkalmazok (ld. 4.3.2. fejezet).

3.5.3. AZ ENERGIAEGYENSÚLYI EGYENLET

Az általam írt, energiaegyensúlyi egyenletre épülő programot a 4. Függelék mutatja be.

Ha a szerkezet lengésidejéhez képest egyre kisebb lecsengési idejű terhet vizsgálunk, akkor az figyelhető meg, hogy a teherfüggvény alakja egyre kevésbé fogja befolyásolni a szerkezet válaszát, ehelyett a teher impulzusa lesz domináns. Ehhez teljesülnie kell egy érvényességi feltételnek. Chopra [97] javaslata lineáris rendszerekre a t_d lecsengési idő és a T_n lengésidő hányadosát korlátozza 0.25 alá. Az UFC 3-340-02 [37] javaslata a képlékeny rendszerre használható:

$$\frac{t_m}{t_d} > 3$$

ahol t_m az alakváltozáshoz szükséges időtartam.

Az egyenlet megoldásához egyszabadságfokú rendszerré konvertálás, illetve a teherbírás függvény felírása szükséges. A módszer alap feltétele az, hogy a külső teher által kiváltott kinetikus energia legyen egyenlő a tartó belső, X_m lehajlásig kialakuló alakváltozási energiájával. Az alakváltozási energia a teherbírásfüggvény alatti terület.

Egy kezdetileg nyugalomban lévő rendszert a rá működtetett impulzus

$$\dot{x}_0 = \frac{I}{M}$$

sebességre gyorsít. Ebből a rendszerbe bevitt külső kinetikus energia:

$$KE = \frac{1}{2} M \dot{x}_0^2 = \frac{I^2}{2M}$$

ahol M a lengésbe jövő szerkezeti tömeg, x_0 az elmozdulás, I a ható impulzus.

A mozgási energiát bal oldalra, az alakváltozási energiát jobb oldalra rendezve az energia-egyensúlyi egyenlet:

$$\frac{(K_L I)^2}{2K_M M} = \int_0^x K_L R(x) dx$$

Ezt az egyenletet x -re megoldva számítható a maximális elmozdulás. Az érvényességi feltételt az acéloszlopok általában nem teljesítik, míg a vasbeton elemeknél jellemzően teljesül.

3.5.4. A NYÍRÁSI TEHERBÍRÁS ELLENŐRZÉSE

A kialakult gyakorlat szerint a nyírás nem disszipatív terület, tehát nem is úgy tervezendő, mint a hajlítási teherbírás (ami energiát hivatott elnyelni). A maximális nyíróerő számításához a dinamikus reakcióerőkre van szükség. Biggs [90] módszere szerint a tartó fele tehetetlenségi nyomatékának figyelembevételével lehet számolni a dinamikus reakcióerőt. Ez időben változik, a maximumát a tartó rugalmas alakváltozásának végén éri el, mert innentől az R ellenállása konstans, a P teher pedig csak csökken. A dinamikus reakcióerőt nem az SDOF rendszerben, hanem a kontinuum modellből számítjuk. Konzervatív közelítésként használható a függvényértékek maximumával alkalmazott képlet (képlékeny alakváltozás esetén):

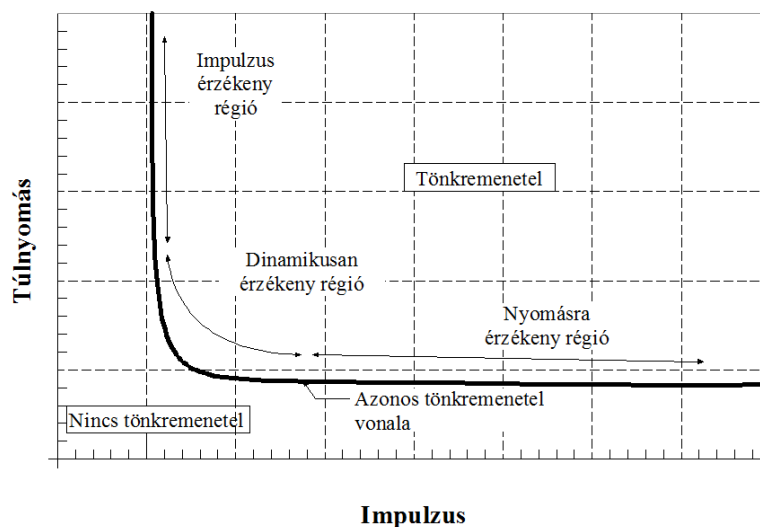
$$V_d = 0.39R + 0.11P$$

Használatos ezen kívül az R teherbírás statikai váznak megfelelő reakcióerő számítása is, (tehát csuklós-csuklós esetben $0.5R$), de ez a módszer még inkább a biztonság javára közelít.

3.5.5. A P-I DIAGRAM

Az általam írt, P - I (Pressure - Impulse) görbét használó programot az 5. Függelék tartalmazza.

Ha a teherbírásfüggvény adott egy elemre, és van egy automatizált, rezgésegyenletet megoldó algoritmus, akkor a vizsgálat számos P túlnyomás és I impulzus értékre elvégezhető. A tönkremeneteli feltételt ismerve megalkotható a szerkezet terhelhetőségi karakterisztikáját leíró görbe. A gyakorlatban ez úgy történik, hogy felvesszünk egy P - I síkot, ahol az egyik tengely az impulzus, a másik tengely a túlnyomási csúcserték. A síkra merőleges harmadik tengely a vizsgált elem maximális elmozdulása. A P - I síkon egy hálórács vehető fel tetszőleges P és I beosztással. Az összes P - I értékpárra el kell végezni a számítást, majd a kapott maximális elmozdulás értéket a harmadik tengelyen jelölni. Így előáll egy kétváltozós elmozdulásfüggvény.



67. ábra - Tipikus $P-I$ görbe a jellemző régiók jelöléseivel [36]

Ezt a térbeli függvényt a tönkremeneteli feltétel megengedett X_m értékénél egy vízszintes metszősíkka elvágva adódik egy hiperbola alakú vonal. Ezt a vonalat hívják $P-I$ görbének (67. ábra).

Ez a görbe választja el a $P-I$ síkon a „tönkremegy” és a „megfelel” tartományokat. Ezt a görbét tekintve azonnal eldönthető a teherfüggvény $P-I$ értékeinek ismeretében, hogy az adott elem megfelel-e a terhelésre, vagy sem. A görbén megkülönböztethető impulzusra érzékeny, túlnyomásra érzékeny és dinamikailag érzékeny rész.

$P-I$ diagramot lehet rajzolni bármilyen dinamikus méretezési eljárás segítségével. Mivel ezen módszerek valószínűségi számításokban való alkalmazhatósága külön megvizsgálásra kerül, a $P-I$ diagrammal kombinált felhasználásuk jelen esetben nem indokolt. Olyan probléma esetén, amit az eddigi módszerekkel nehezebben lehet kezelni (pl. kétszeresen vasalt vasbeton keresztmetszet), megvizsgálható a $P-I$ diagramok alternatív módon való elkészítése és valószínűségi számításokban való felhasználhatósága.

Az egyik „alternatív” eljárás a $P-I$ diagram elkészítésére a célszoftver (pl. RCblast [101]) használata. A másik lehetőség a zárt képlettel való felírás, a megírt programban is ezt a módszert alkalmazom. A $P-I$ diagramok zárt képlettel való felírására több módszert is közöl a szakirodalom [98][99][100], de ezek SDOF alapúak. A legfrissebb kutatások fejlett, 3D végeselemes vizsgálatok kiértékelésére alapszanak. Kiemelkedő jelentőségű Mutalib és Hao munkája [88], amiben a vasbeton keresztmetszet jellemzőinek függvényében kapható meg a $P-I$ görbe. Ez a zárt képlet a kétszeresen vasalt vasbeton keresztmetszetekre van felírva, de egy paraméterrel bővítve a szénszálas erősítés (FRP) is figyelembe vehető. Ebben a módszerben a dinamikus szilárdságnövekedés eleve benne van, mert a fejlett végeselem modellben az explicit anyagmodell tartalmazza a strain rate hatást. A $P-I$ diagram analitikus képlete Mutalib és Hao szerint:

$$(P - P_0)(I - I_0) = 12 \left(\frac{P_0}{2} + \frac{I_0}{2} \right)^{1.5}$$

ahol P_0 és I_0 a túlnyomás és impulzus aszimptoták. Ezek az aszimptoták lettek a numerikus vizsgálatok eredményei alapján többváltozós regresszióval felírva (itt csak a 0.8-as romosodási indexhez tartozó görbe van figyelembe véve):

$$P_0[kPa] = 11f_{cu} + 3.465d - 0.268H - 1.552b + 14753.44\rho + 8924.068\rho_s + 851.9 + \alpha_5$$

$$I_0[kPams] = 59f_{cu} + 13.16d - 0.43H - 0.26b + 1091.78\rho + 489.97\rho_s - 3302.33 + \alpha_6$$

ahol f_{cu} [MPa]: a beton nyomószilárdsága, d [mm]: oszlop keresztmetszet magassága

b [mm]: oszlop szélessége H [mm]: oszlop magassága

ρ : hosszvasalási hányad ρ_s : nyírási vashányad

α : az FRP erősítést figyelembe vevő tényező

3.5.6. A MÓDSZEREK VALIDÁLÁSA

Az átlaggyorsulások módszere és az energiaegyensúlyi egyenlet általam írt programjainak validálása az 1. Függelékben található. A P - I diagramoknál tárgyalt módszerek validálását maguk a fejlesztők végezték el, ennek részletei a hivatkozásokban fellelhetők [101][88].

A gerjesztett rezgés differenciálegyenletének a megoldása pontosabb módszer az oszlop dinamikai vizsgálatára, mint az energiaegyensúlyi egyenlet. A Biggs által készített válasznomogramok a numerikus SDOF megoldásoknak a grafikai ábrázolásai. Ezekkel összevetve a saját eredményeket lehetővé válik a programozott eljárás validálása. Az összehasonlítást egy szakirodalomban közölt mintapélda⁷¹ alapján végeztem el. A nomogramos megoldás, és az átlaggyorsulások módszere 66.14 mm-t és 66.2 mm-t adtak eredményül, tehát szinte tökéletes az egyezés, az általam alkalmazott SDOF numerikus megoldó algoritmus tehát megfelelően működik.

Ez a mintapélda nem teljesíti az energiaegyensúlyi egyenlet érvényességi feltételét, és az elvégzett számítás is megmutatta, hogy nagyságrendileg más eredményt ad az energiaegyensúlyi módszer (270 mm). A bemenő adatok módosítása után teljesül az érvényességi feltétel, így az energiaegyensúlyi egyenlettel számolt elmozdulás már 10%-nál kisebb hibával közelíti az átlaggyorsulások módszerének eredményét.

⁷¹ Mays, Smith: Blast effects of buildings. Design Example 3 - p. 91 [92]

3.6. RÉSZÖSSZEGZÉS

A robbanási hatások leírásában használt fogalmak jellemzői igazolásra kerültek a kísérleti robbantások eredményei által. Bemutatásra került a lökeshullám alakja, a töltettényező, az arányosított távolság. A vizsgált robbanóanyagokra vonatkozóan közöltem a regressziós képletet a túlnyomás és impulzus meghatározására. A lökeshullámok modellezése számítógépes kereskedelmi mérnöki szoftverekkel megoldható, tetszőleges ponton kiszámíthatók a komplex környezetben terjedő lökeshullám jellemzői. Ezt felhasználva több problémát is numerikus vizsgálatoknak vettem alá, az eredményekből kiemelendőnek tartom a lökeshullám **homlokzati szétterjedésének hatását**, a **kumulatív VBIED töltetek geometriára való érzékenységet**, és az utca geometriában az **ablakok lökeshullámot gyengítő hatásának mértékét**.

A gazdaságos tervezés érdekében az alábbi általános szempontok szerint érdemes elvégezni a méretezést:

- tervezési szituációnak megfelelő romosodási szint, mint tönkremeneteli feltétel,
- dinamikus szilárdságnövelő tényező (DIF) alkalmazása,
- SDOF modell használata, ha az alkalmazási feltételek teljesülnek.

A vizsgált dinamikai számítási módszerek összegzése:

- Az **átlaggyorsulások módszere** (a gerjesztett rezgőmozgás differenciálegyenletének numerikus megoldása) pontos és megbízható módszer, nincs alkalmazhatósági korlátja. A Mathcad-ben programozott algoritmust egy maximumpont kereséssel és a dinamikus szilárdságnövekedés iteratív leprogramozásával egészítettem ki, mind acél, mind egyenesen vasalt vasbeton keresztmetszetek esetére. A módszer előnye a pontosság, általános alkalmazhatóság, de csak számítógéppel végezhető el a számítás.
- Az **energiaegyensúlyi egyenlet** csak impulzív terhelésnél alkalmazható, érvényességi feltétele van. Zárt képlettel leírt, egyszerű összefüggés, ami gyorsan számítható, akár kézi számítással is.
- A módszerek validálása alapján kijelenthető, hogy az SDOF numerikus megoldó algoritmus pontos, az energiaegyensúlyi egyenlet pedig valóban csak az érvényességi feltétel teljesülésekor ad jó eredményt, de akkor is néhány %-os eltéréssel.
- A számítás eredményeit $P-I$ értékpárok sokaságára összegezve felrajzolható egy adott tönkremeneteli szinthez tartozó **$P-I$ diagram**, ami a $P-I$ síkot egy „megfelel” és „nem felel meg” részre osztja. Ezt a görbét automatizálva is lehet készíteni, akár szoftveresen, akár a friss kutatási eredményeket felhasználva, végeselemes analíziseken alapuló regressziós görbékkel.

Összességében azt a megállapítást lehet tenni, hogy bár a fejlett számítási módszerek (CFD, FEM) széles körű problémamegoldó képességgel rendelkeznek, alkalmazásuk időigényes és komoly szakmai tudást igényel. Leghatékonyabb **alkalmazásuk nem az egyes projekteknél felmerülő problémák megoldása**, hanem bizonyos bonyolult **mérnöki összefüggések paraméteres megoldása**, amelynek kiértékeléséből egyszerűbb, gyorsabb, **kézi számításra alkalmas képletek születnek**.

Erre tökéletes **példa a $P-I$ diagram többváltozós képlete, amely FEM futtatások eredményeként állt elő**. De hasonló eredmény lehetne az ablakos utcafronton terjedő lökeshullámra alkalmazható csökkentő tényező, amit a Kingery-Bulmarsh képleteknél lehetne alkalmazni, elkerülve így a CFD futtatást egy hasonló probléma esetén.

4. VALÓSZÍNŰSÉGALAPÚ TERVEZÉS ROBBANÁSI HATÁSOKRA

Az előző fejezetben bemutatott azokat a teherfelvételi és dinamikai számításokat, amelyeket használni kívánok az objektív biztonság kimutatásában. Ebben a fejezetben kapcsolom össze a méretezéselmélet (ld. 2.2. fejezet) és a dinamikai számítások (ld. 3. fejezet) különböző megoldásait.

Előbb az egy adott robbanás terhére történő méretezés hagyományos, Eurocode-ra épülő eszköztárát mutatom be, amihez – pontosabb számítás híján – folyamodni lehetne. Ezután bemutatom az egy adott robbanás elleni tervezés néhány lehetséges valószínűségi módszerét. Végezetül az általam írt programok segítségével bemutatásra kerül a javasolt, robbanás valószínűségét is figyelembe vevő valószínűségi eljárás, amely kvantitatív módon jellemzi a vizsgált elem biztonságát.

4.1. A SZÁMÍTÁS MENETE AZ ÁLTALÁNOS SZABVÁNYOS GYAKORLAT SZERINT

Az Eurocode⁷² azt írja elő, hogy az A_D rendkívüli hatás értékét minden projekt esetén egyedileg kell megválasztani, majd az alábbi teherkombinációt alkalmazni:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ or } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

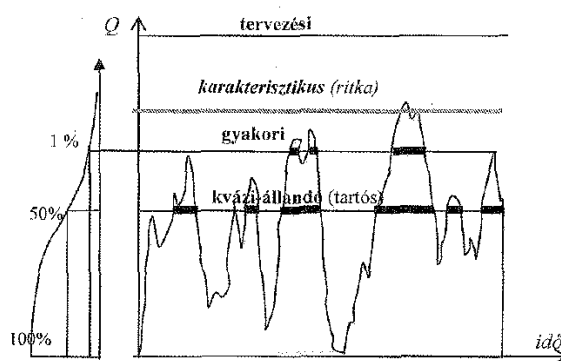
Ez nem jelenti azt, hogy A_D -t ne lehetne statisztikai változóként kezelni, csak jelenleg nem állnak rendelkezésre elfogadott, feldolgozott adatbázisok és kutatási munkák, amelyek alapul szolgálhatnak.

Az EC rendkívüli tehereseteknél csökkenti az ellenállás oldali parciális tényezőket⁷³. A betonra 1.5 helyett csak 1.2, betonacélra 1.15 helyett csak 1.0 van előírva. A szabvány ezzel azt éri el, hogy az így számolt szerkezetek β megbízhatósága kisebb lesz, közelebb kerülve a rendkívüli terhek esetén megszokott 2 körüli értékhez (de önmagában a parciális tényezőkkel ez még nem biztosítható, függ a terhelés statisztikai jellemzőitől is). Hasonló megfontolásból ír elő más parciális tényezőt a szerkezeti acélra az UFC 3-340-02 [37]. A „strength increase factor” (SIF – szilárdságnövelő tényező) a névleges szilárdságot növeli egy olyan kvantilisnek megfelelően, ami kisebb β értéket fog eredményezni. Szerepét tekintve ez megfelel az imént említett módosított parciális biztonsági tényezőknek. Hasonló javaslatot tesz a régi orosz előírás is [44], amely már a bevezetésben megemlíti, hogy robbanástéher esetén érdemes a szilárdsági változók várható értékével számolni.

Az esetleges terheket az EC úgy kezeli, hogy megállapodás szerint a karakterisztikus érték a referencia időtartamon belül egy bizonyos gyakoriságú előforduláshoz tartozik (pl. 2% túllépési valószínűség/év) (68. ábra), és ez a teherszint van egy szórással jellemezve.

⁷² EN1990-2002 4.1.2. (8) [59]

⁷³ EN1992-2005 Table 2.1N. [117]



68. ábra – Esetleges terhek karakterisztikus értékének értelmezése a gyakoriság tekintetében [118]

Jelen tervezési problémában a W robbanóanyag mennyiség a rendkívüli hatást jelképező mennyiség. A W mennyiségnél azért nem tudjuk a karakterisztikus értéket meghatározni, mert a 68. ábrán látható statisztikai kiértékelés nem létezik a robbantásokra. Hiába jellemezzük szórással a W mennyiséget, a karakterisztikus értéket a nem létező W -idő adatsorból kellene előállítani. Célszerűbb tehát más módszerhez folyamodni.

Az aktuális EC előírás szerint a W mennyiség valamilyen táblázatból (pl. 80. ábra), egy kategória kiválasztása útján felvett érték. **Az UFC 3-340-02 [37] egy 1.2-es biztonsági tényezőt javasol a W mennyiségre**, bár nem az EC előírása, de az UFC-t figyelembe lehet venni, hisz a méretezés nagy része is az alapján történik.

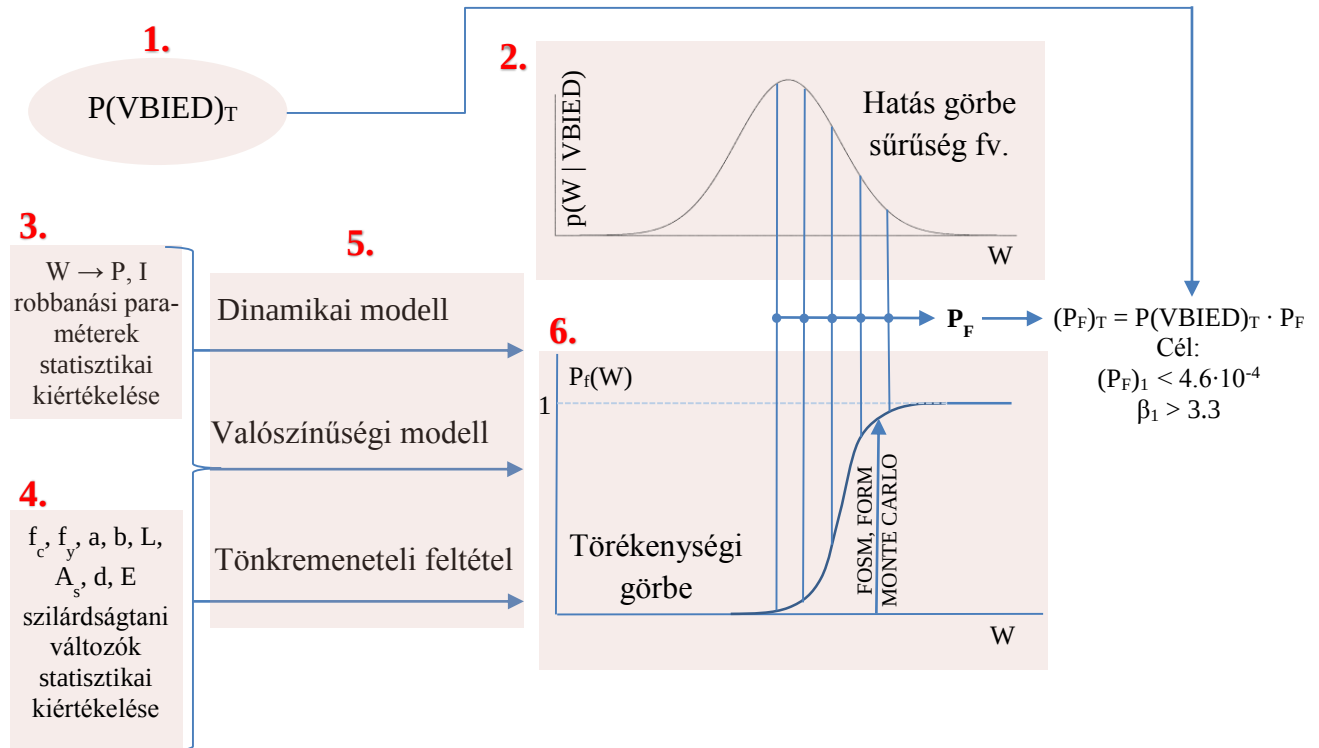
Alternatív megoldásként írtam egy programot (ld. 15. Függelék), amely a W , és R mennyiségeket valószínűségi változóként kezeli, és Monte Carlo szimulációt végezve kiszámítja a kívánt túllépési valószínűséghez tartozó túlnyomás és impulzus értékét, majd ebből a használandó parciális tényezőt. **Ezzel önmagában még nem végezhető el a parciális tényezők kalibrálása**, mert a szerkezet megbízhatósága nem csak a szilárdság alulmaradási valószínűségéből adódik. Ha azonban a túllépési valószínűséget közelítő jelleggel felvesszük 1%-ra, akkor számítható egy ehhez rendelhető parciális tényező. A parciális tényezők β értékhez való kalibrálása további kutatások szükségességét vetíti előre.

A számítások során az UFC-ben előírt 1.2-es szorzótényezőt alkalmazom a W mennyiségnél. (A kalibrációs program számítása alapján ez az érték nagyobbra, 1.5-re adódna.)

Továbbá megjegyzendő, hogy az EC-ben alkalmazott parciális tényezőkkel az RC2 tervezési osztály 50 éves tervezési élettartamára tervezünk, $\beta=3.8$ értékre, sőt, vizsgálatok szerint több mint 20%-os túlméretezés is van a módszerben [119]. **A szabvány viszont nem közli, hogy a rendkívüli teherkombináció használatával (és a kapcsolódó csökkentett parciális tényezőkkel) milyen β értéket céloz meg.** Ez az érték egyébként nem feltétlenül egy kiszámított, valamilyen megfontolás alapján kitűzött érték, a parciális tényezős eljárás kidolgozásakor a meglévő, régebbi terveket vették alapul, és azok alapján kalibrálták a tényezőket.

4.2. A JAVASOLT, OBJEKTÍV BIZTONSÁGOT SZÁMÍTÓ ELJÁRÁS

Az itt bemutatásra kerülő eljárásban a hatás oldalon nincs szükség egy kötött gyakorisághoz tartozó karakterisztikus érték meghatározására, mégis az előfordulási valószínűség is figyelembe van véve.



69. ábra – Az objektív biztonság számításának folyamatábrája (szerzői ábra) (pirossal a modulok sorszámai)

A mérnöki tervezésben olyan különleges esetekben használják, mint pl. a nukleáris létesítményekben fellépő baleset jellegű hatások elleni védekezés. A módszer a ritkán bekövetkező hatások valószínűségi leírásán alapszik, és a vizsgált rendszer tervezési élettartam alatt értelmezett biztonságát (tönkremeneteli valószínűségét) adja eredményül. A módszer robbanási terhekre történő alkalmazására is van példa. Stewart és Netherton megemlítik a módszert a robbanásvédezt ablakokkal foglalkozó munkájukban [120], de itthon is született már a módszernek robbanási hatásokra való adaptációja [123], bár ez az általam alkalmazott módszerektől eltérő megoldásokat használ.

A 69. ábrán látható a javasolt számítás folyamatábrája. A számítási módszer moduláris felépítésű: a különböző számítási részegységek megkötött bemenő és kimenő paraméterekkel bírnak, de ezt figyelembe véve a modulok egyéni számítási módszerei tetszőlegesen módosíthatók.

A következő jelölésrendszert vezetjük be:

$P(\text{EXP})_T$ – robbantásos merénylet bekövetkezési valószínűsége T időtartam alatt

$P(\text{VBIED} | \text{EXP})$ – annak a valószínűsége, hogy egy adott robbantást VBIED-vel, a vizsgált körülmények között követnek el

$P(\text{VBIED})_T$ – VBIED robbantásos merénylet bekövetkezési valószínűsége T időtartam alatt

$p(W | \text{VBIED})$ – egy VBIED támadás során használt töltet tömegének sűrűségfüggvénye

$P_f(W)$ – szerkezet W függvényében vett tönkremeneteli valószínűségét leíró törékenységi görbe, vagy emberi sérülések esetén sérülékenységi görbe

P_F – szerkezet tönkremeneteli valószínűsége, ha biztos van robbanás

$(P_F)_T$ – szerkezet tönkremeneteli valószínűsége a T élettartam alatt

A méretezés folyamata:

1. modul A merényleteket feldolgozó adatbázis alapján a $P(\text{VBIED})_T$ valószínűség számítása. Ha szükséges, az adatok szűrésével kell előállítani:

$$P(\text{VBIED})_T = \sum_i P(\text{EXP})_{T_i} \cdot [1 - (1 - P(\text{VBIED} | \text{EXP}))^i]$$

2. modul A merényleteket feldolgozó adatbázis alapján a $p(W | \text{VBIED})$ sűrűségfüggvény számítása.
3. modul A robbanási paraméterek statisztikai jellemzőinek felvétele.
4. modul A szilárdságtani jellemzők statisztikai jellemzőinek felvétele.
5. modul A számítási módszer kiválasztása, ami egy dinamikai modellből, valószínűségi modellből és a hozzájuk kapcsolt tönkremeneteli feltételből áll.
6. modul A szerkezet tönkremeneteli valószínűségét leíró törékenységi függvény $P_f(W)$ előállítása valószínűségi módszerek alkalmazásával (alternatív megoldásként empirikus alapon felvett görbe is használható, pl.: emberi sérülések, ablakok tönkremenetele esetén)

A teljes valószínűség tételét felhasználva számítható, mekkora valószínűséggel megy tönkre a szerkezet **egy biztosan bekövetkező** robbanás esetén:

$$P_F = \int_0^{W_{max}} p(W | \text{VBIED}) \cdot P_f(W) dW$$

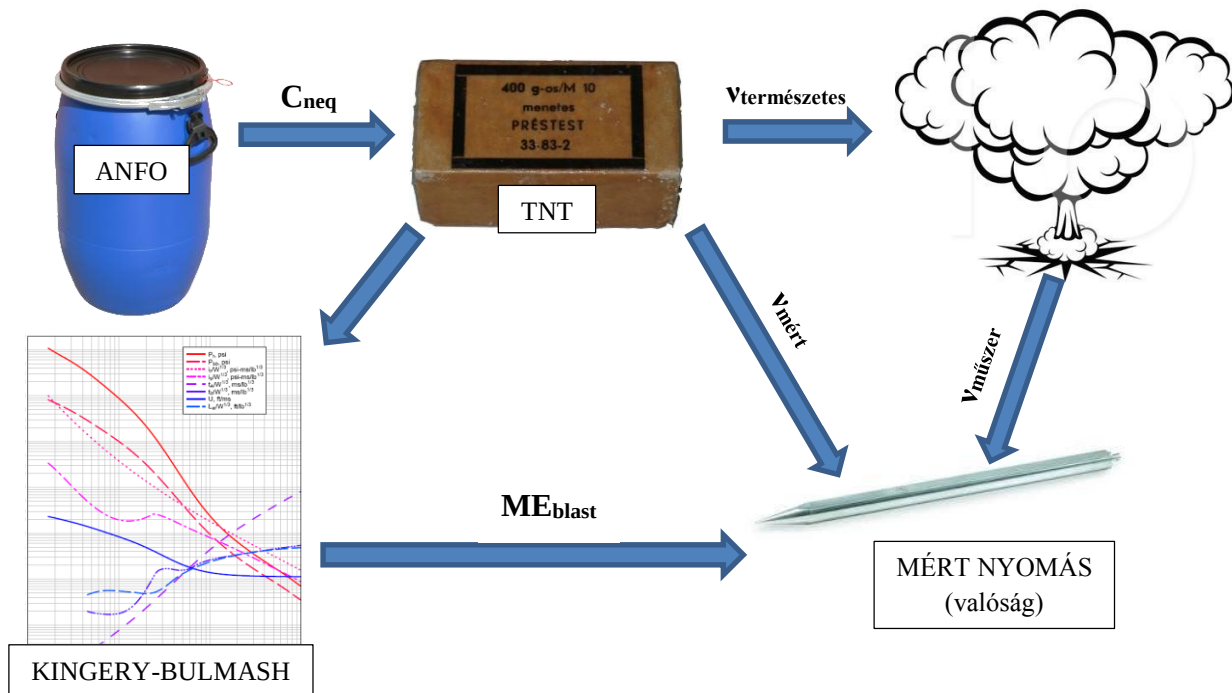
A szerkezet **T időtartam alatti tönkremeneteli valószínűsége** a robbanás T időtartam alatt való előfordulási valószínűségének, és a szerkezet biztos robbanásra számolt P_F értékének szorzataként számítható:

$$P_{F,T} = P_F \cdot P(\text{VBIED})_T$$

4.3. A ROBBANÁSI HATÁS STATISZTIKAI VIZSGÁLATA

A modern méretezési elméletek alapját a méretezésben szereplő változók statisztikai jellemzői alkotják. A hagyományos és a földrengéstehernek rendelkezésre áll a statisztikai kiértékelése, ez mára beépült a szabványokba. A robbanóanyagokból származó hatások statisztikai kiértékelése bár már régebben is téma volt [102], de még ma is aktív kutatási terület. A robbanási hatások statisztikai leírása nélkülözhetetlen a robbanások elleni valószínűség alapú tervezéshez.

A 70. ábrán láthatóak vázlatosan a robbanási hatás vizsgálatakor figyelembe vehető bizonytalanságok.



70. ábra – A robbanási hatás statisztikai kiértékelésének változói (szerzői ábra)

A robbanási paraméterek szórásával foglalkozó szakirodalom [102][103][108] az alábbi bizonytalanságokat értelmezi egy földközeli robbanás számításánál:

- szórással jellemezhető paraméterek
 - a gyártás során előállhat az előírt robbanóanyag mennyiségtől (W_{nom}) való eltérés ($C_{gyártás} = W_{gyártás} / W_{nom}$),
 - C_{neq} – (net equivalence quantity coefficient) a töltettényező,
 - az R távolság (és következésképpen a beesési szög),
 - légköri hőmérséklet és a normál légköri nyomás,
- természetes (*inherent*) szórás (egy szituáció nem csökkenthető, eleve meglévő szórása),
- a számítási modell szórása (ME_{blast}),
- mérőműszerek mérési szórása.

4.3.1. A ROBBANÁSI PARAMÉTEREK SZÓRÁSA

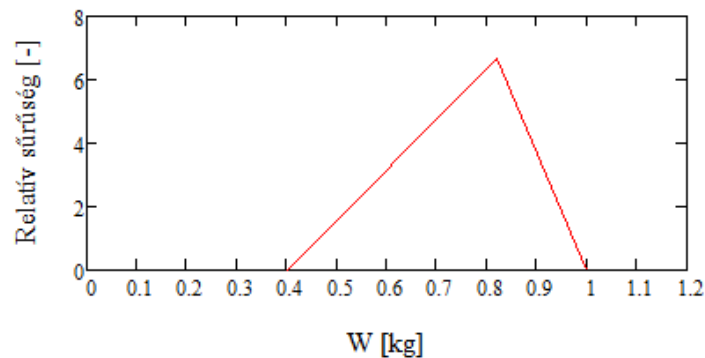
A számítás során használandó robbanóanyag mennyiség:

$$W_{use} = W_{nom} \cdot C_{gyártás} \cdot C_{neq}$$

SVBIED robbantások esetén a $C_{gyártás}$ 1-nek vehető fel. Nincs értelme a W_{nom} értéktől való eltérésnek, mert a mennyiségek már a véglegesen autóba került anyagok alapján lettek kiszámolva, másrészt nem is ismeretes olyan $C_{gyártás}$ statisztikai mennyiség, ami a VBIED-készítők pontatlanságát venné figyelembe.

A C_{neq} töltettényező értékére a szakirodalomban többféle értéket is közölnek, amerikai források közül a 0.82-es érték a legmegbízhatóbb [104], míg orosz oldalon [105] a 0.75-ös értéket közlik. Az ANFO robbanási paramétereit több körülmény befolyásolja, mint a lényegesen egyszerűbb TNT-ét. Az ammónium-nitrát és a gázolaj aránya meghatározza a robbanási energiát, mérések szerint 6% gázolaj tartalomnál van az ANFO robbanási hőjének maximuma [106]. Ezen kívül vannak olyan jelentések, amelyek az egyben detonálni képes minimum ANFO tömeget 450 kg-ban határozzák meg [107], de van arról is jelentés [103], miszerint a nagyobb tömegű ANFO töltetek nem tudnak teljesen detonálni, és lesz fel nem robbant anyag is, tehát a töltettényező az adott robbanásra csökkenhet.

Netherton és Stewart szerint ezen hatásoknak egy lehetséges kezelési módja, ha a C_{neq} értékére felvett sűrűségfüggvény 0.82-nél veszi fel a maximumát, 0-ban és 1-ben zérus értékű, a pontok között pedig lineáris függvényt tételeznek fel. Azzal veszik figyelembe a sikertelen támadást, hogy a sűrűségfüggvény a 0-ban is értelmezve van. Véleményem szerint a meghiúsult támadásokat nem itt, hanem a $P(VBIED)_T$ valószínűség szintjén érdemes figyelembe venni. A töltettényező sűrűségfüggvényének alsó értékére mérnöki becsléssel 0.4-et tartok ésszerűnek felvenni (71. ábra).



71. ábra – A töltettényező (W_{neq}) feltételezett sűrűségfüggvénye (szerzői ábra)

A feltételezett lineáris sűrűségfüggvény esetén, a korrelált változók generálásánál (ld. 4.3.4. fejezet) a copula függvények használata lenne szükséges. A copula függvényekkel oldható meg, hogy a különböző peremeloszlásokkal rendelkező változók a korrelációt figyelembe vevő mintagenerálás után mind ugyanazon eloszlásúak maradjanak. A copula függvények használata túlmutat a disszertáció határain, így emiatt (és azért, mert a töltettényező eloszlása nagymértékű

becslésre alapul) nem fogom figyelembe venni a töltettényező eloszlását, hanem konstans értékkel fog szerepelni a számításokban. Értékét célszerű a javasolt 0.82-nek venni, és elhanyagolni az eloszlását.

Amint azt az arányosított távolság képlete is mutatja, az R robbanási távolság nagy hatással van a robbanási paraméterekre. Értéke azonban meglehetősen bizonytalan, tekintetbe véve az SVBIED támadások körülményeit. Egy katonai felhasználású, irányított bomba esetén konkrétan kezelhető a probléma, hiszen a célmegjelölés, célba találás mérhető értékek, ezek statisztikailag kiértékelhetők, kísérleteket is lehet rá végezni. Egy SVBIED támadás esetén ezekre nincs lehetőség. A célpont kiválasztása előzetesen történik, itt nem lehet bizonytalanságot feltételezni, és az SVBIED célba juttatása is egy végig ellenőrzött folyamat. Abban az esetben robban fel máshol az SVBIED, ha a támaszpont védelme megzavarja az elkövetőt, vagy egyéb esemény (izgalom, baleset, műszaki meghibásodás) következik be. Az általam javasolt valószínűségi megközelítés a következő:

1. Feltételezzük, hogy az elkövető tudja, hogy melyik a kiszemelt célpont számára mértékadó terhet jelentő pozíció (a lehető legközelebb viszi a VBIED-t).
2. A távolságot úgy vesszük normál eloszlással alapul, hogy a várható érték a mértékadó pontnál legyen, és a szóba jöhető legkisebb valószínűségű pont legyen $2-3\sigma$ távolságra a mértékadó ponttól, innen kiszámítható R szórása.

Több egyéb paraméter szórása is elhanyagolásra kerül, vagy azért, mert az egyszerűsített robbanási paraméter számításban nem szerepelnek, vagy azért, mert nem áll rendelkezésre kutatási jelentés. Ilyen paraméterek például: a légköri nyomás, a légköri hőmérséklet, a töltetek alakja, a detonálási pont helyzete, a töltetek burkolata, a visszaverődési tényező, stb...

A természetes (inherent) szórás

A robbanási esemény paramétereinek természetes szórása megegyezik a műszerek által rögzített adatok szórásával, de ebben benne van a műszerek mérési szórása is, tehát:

$$v_{\text{természetes}} = \sqrt{v_{\text{mért}}^2 - v_{\text{műszer}}^2}$$

Netherton és Stewart [103] azonos körülmények között végzett (azonos W és Z értékű) robbantásokat vizsgált, ezek jegyzőkönyveit felhasználva a 8. táblázatban található értékeket közölték a három vizsgált paraméterre (P_r , I , t_d). Az eredmények 1%-os természetes szórást mutatnak, ami rendkívül kicsi érték, tulajdonképpen el is hanyagolható.

	P_r	I_r	t_d
$v_{\text{mért}}$	0.051	0.057	0.111
$v_{\text{műszer}}$	0.050	0.050	0.050
$v_{\text{természetes}}$	0.010	0.010	0.010

8. táblázat – A robbanási jellemzők rögzített és természetes szórásai [103]

A $v_{\text{mért}}$ értékeit a saját kísérleti robbantásainkban is feljegyeztem, de ez csak tájékoztató jellegű adat, az azonos Z értékű robbantásokból a legnagyobb ismétlésszám 6 volt, de leginkább 4-5,

tehát statisztikailag nem kellően részletes a vizsgálat⁷⁴. A „B” mellékletben szereplő v értékek terjedelme 4-36%, nagyságrendileg megfelelnek az előző táblázatnak. A kísérletek során felhasznált mérőszondák mérési pontosságának relatív szórását nem adta meg a gyártó, így a $v_{természetes}$ értékét a saját méréseink alapján nem tudtam kimutatni.

4.3.2. A SZÁMÍTÁSI MODELLEK SZÓRÁSA

A Kingery-Bulmash modell hibája

A számítási modell bizonytalanságának figyelembe vételére a ME_{blast} (blast model error) tényező szolgál. Ez alapvetően a teszteredmények és a modell közt fennálló $ME_{T/M}$ teszt-modell hibából, valamint a műszerhibából, és természetes (inherent) hibából adódik össze.

$$ME_{T/M} = \frac{\text{Rögzített eredmény}}{\text{Modell eredmény}}$$

A rögzített teszteredményben már benne van a műszerek szórása és a természetes szórás, tehát a ME_{blast} számítási modell az alábbi valószínűségi változókkal jellemezhető:

$$\begin{aligned} \text{mean}(ME_{blast}) &= \text{mean}(ME_{T/M}) \\ v_{(ME_{blast})} &= \sqrt{v_{ME_{T/M}}^2 - v_{természetes}^2 - v_{műszer}^2} \end{aligned}$$

Az impulzus modellszórása kis arányosított távolságnál Z-nek is függvénye, és ugyanez érvényes a pozitív fázis lecsengési idejére is. A lecsengési időt azonban nem szükséges figyelembe venni, mert az közvetett módon már az impulzusban megjelenik, a robbanás leírásához pedig elég a túlnyomás és az impulzus. Továbbá a lecsengési idő kiértékelése nehezebb, bizonytalanabb feladat, mely komoly felszereltségű kutatóintézeti háttér meglétét igényelné. A kísérletekben [103] feljegyezték, hogy a mérés során fellépő zaj miatt nehéz megállapítani, hol is van pontosan a vízszintes tengely és a nyomásgörbe metszéspontja. Ez saját kísérleti robbantásaink alapján is alátámasztható: mivel a szondák nyomáskülönbséget mértek, a kapott függvény egy relatív függőleges skálán volt elhelyezve, aminek a 0 értéke szintén a zaj miatt nem volt egyértelműen beállítható.

	mean(ME_{blast})	$v_{ME_{blast}}$	Eloszlás
Visszavert túlnyomás (P_r)	1.03	0.069	Normál
Visszavert impulzus (I_r)			
$0.59 \text{ m/kg}^{1/3} \leq Z \leq 6.0 \text{ m/kg}^{1/3}$	0.99	$0.178-0.0237Z$	Normál
$6.0 \text{ m/kg}^{1/3} < Z < 40.0 \text{ m/kg}^{1/3}$	0.99	0.036	Normál

9. táblázat – A Kingery-Bulmash képletek modellhibájának valószínűségi paraméterei [103]

⁷⁴ A pályázat által biztosított pénzügyi keretek miatt nem állt módunkban nagyobb számú kísérletsorozat elvégzése, ezt a kutatás egy későbbi szakaszában, újabb pályázati források birtokában terveztük elvégezni (egyben felhasználva a már elvégzett kísérletek eredményeit, tapasztalatait is), de ez még nem valósult meg.

A 9. táblázat a Netherton és Stewart által 2010-ben közreadott eredményeket mutatja, amik 10% alatti relatív szórást adnak meg P -re és I -re. Ez jelentősen kisebb érték a régebbi jelentésekben foglaltaknál. Bogosian [108] 2002-es eredményeit mutatja a 10. táblázat. A 2-sigma értékeket átszámítva rendre 20%, 22%, 27% és 33% relatív szórások adódnak a $v(ME_{T/M})$ értékeire. Ezek az értékek nagyobbak, mint a Netherton által publikált eredmények, és az átlagértékek is nagyobb skálán mozognak, mint a 9. táblázat esetében.

Metric	Results of Statistical Analysis	
	Mean	Two-sigma
Reflected positive pressure	1.06	0.48
Incident positive pressure	1.19	0.66
Incident positive impulse	0.86	0.36
Reflected negative pressure	1.03	0.68

10. táblázat - Kingery-Bulmash képletek modellhibájának valószínűségi paraméterei [108]

A US Air Force megbízásából egy kutatócsoport a 1993-as kiadású jelentésében [102] tűzérési lövedékeket és aknagránátokat vizsgált. A 11. táblázatban szereplő adatokat közölték a robbantási jellemzők teszt/modell arányára vonatkozóan. Mint látható, a számítási modell relatív szórása itt is 20-30%-os értékeket vesz fel.

Parameter	Group	Prediction Error Ratio, ξ		
		Mean	Coefficient of Variation	p-value for H_0 : Mean = 1
Pressure	I	0.973	0.289	0.372
	II	1.049	0.298	0.058
	III	1.005	0.490	0.984
	IV	1.220	0.288	0.0001
	I, III	0.974	0.300	0.409
	II, IV	1.114	0.303	0.0001
	I - IV	1.075	0.308	0.0001
Impulse	I	1.130	0.241	0.0001
	II	1.199	0.198	0.0001
	III	1.291	0.184	0.018
	IV	1.142	0.236	0.0001
	I, III	1.142	0.238	0.0001
	II, IV	1.178	0.213	0.0001
	I - IV	1.168	0.220	0.0001

11. táblázat - Teszt/modell arányok tűzérési lövedékek robbanásainak vizsgálata alapján [102]

A [102] és [108] forrásokban nincsen arra vonatkozó adat, hogy a műszerek szórása és a természetes szórás ki van-e vonva a teszt/modell értékekből, de még ha ki is lenne vonva az ennek megfelelő kb. 5%-os érték, akkor is nagyobb szórások adódnak, mint a 9. táblázatban közöltek.

A vizsgált három forrás közül **Netherton és Stewart adatait fogom felhasználni**, mert bár ezek adják a legkisebb értékeket, de **ezek a legfrissebb kutatási eredmények** is egyben. A másik két forrás közül Bogosian értékei elfogadhatóak, a US Air Force által adott értékek azért kevésbé relevánsak, mert tűzérési lövedékekre, tehát burkolattal ellátott robbanóanyagokra vonatkoznak. A gyakorlatban a biztonság javára érdemesebb lehet 10-20% relatív szórást figyelembe venni.

A DAHS-CWE-ben [38] található egy táblázat, ahol a túlnyomásra és impulzusra alkalmazandó biztonsági tényező van megadva annak függvényében, hogy mekkora alulmaradási valószínűséget kíván használni a tervező. Ebből elméletileg vissza lehetne számolni az adatsorok szórását, de csak akkor, ha ismerjük az eloszlás típusát. Normál eloszlást feltételezve minden értékpár más-más szórást adott eredményül, így ez a táblázat nem szolgált felhasználható eredménnyel.

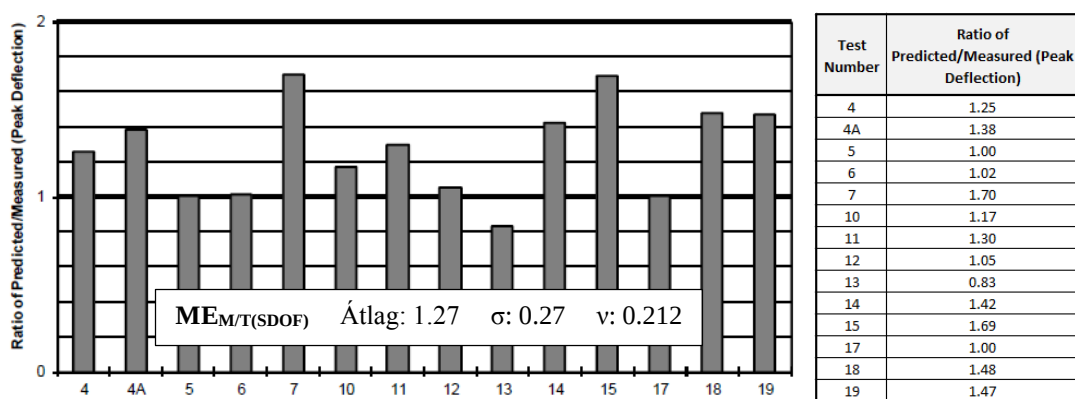
A statikus teherbírési modell hibája

Mivel az SDOF módszerek hajlítási alakkal reagáló tartókra vannak kidolgozva, a hajlítási teherbírás statikus modelljének hibáját nem szükséges figyelembe venni, mert ez a bizonytalanság megjelenik a következő pontban számolt SDOF modellhibában. Ha mégis figyelembe kell venni, akkor a vasbeton elemek hajlítási teherbírására⁷⁵ 1.0 átlagértéket és 6%-os relatív modellszórást lehet feltételezni. Az acélelemeknél az egyértelmű szilárdságtani leírás miatt nem szükséges számítási modellhibát feltételezni.

Az acélelemek nyírási teherbírásának is mechanikailag tökéletesen leírt modellje van, itt sem szükséges szórást figyelembe venni. Ezzel szemben a vasbeton tervezés talán legbizonytalanabb területének számít a nyírási teherbírás. Számos kutatás foglalkozik a vasbeton nyírási teherbírásának modellszórásával. Míg az acélszerkezeteknél lényegében mindenhol ugyanaz a képlet érvényes a nyírási teherbírásra, vasbeton esetében a különböző szabványok más-más képleteket adnak, bár jellemzően a ferde betonrácsrúd modellre támaszkodnak. Az általam használt kanadai szabvány nyírási képletéről összefoglaló analízist ad az észak-amerikai szabványokat összehasonlító kutatás⁷⁶. Ebben a nem feszített vasbeton esetében a nyírási teherbírás teszt/szabvány hányadosa 1.19-es átlagértékkel és 0.218-as relatív szórással szerepel.

Az SDOF modell hibája

A 72. ábrán látható egy SDOF számítások eredményét (maximum képlékeny elmozdulás) és a megfelelő kísérleti eredményeket összevető táblázat. A 14 kísérlet kéttámaszú acélgerendákon lett elvégezve.



72. ábra – Acélszelemeneken végzett kísérleti eredmények összevetése az SDOF modellel [36]

⁷⁵ Nowak, Collins: Reliability of structures. p. 195. [53]

⁷⁶ D. A. Kuchma: Simplified shear provisions of the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Table 1. [109]

Többségében elmondható, hogy a kísérleti eredmények kisebb elmozdulásokat adnak, tehát az arányszámot, mint valószínűségi változót kezelve figyelembe vehető az SDOF számítás modellhibája. Tekintettel kell arra lenni, hogy a hányadosok szórásában benne van a Kingery-Bulmash robbanási paraméterek számításának modellhibája is. Tehát az SDOF modellhiba valószínűségi paraméterei:

$$mean(ME_{SDOF}) = mean(ME_{M/T(SDOF)}) / mean(ME_{blast}) = 1.27 / 1.03 = 1.233$$

$$\nu_{ME_{SDOF}} = \nu_{M/T(SDOF)} - \nu_{ME_{blast}} = \sqrt{0.212^2 - 0.069^2} = 0.2$$

A ME_{blast} értékek túlnyomásra és impulzusra is értelmezhetők, ahhoz hogy a megfelelőt használjuk, ismernünk kellene az SDOF kísérletet végzők számítási eljárását, ennek hiányában a túlnyomáshoz tartó $mean$ és ν értékek lettek figyelembe véve. Megjegyzendő, hogy az adatsor acél elemekre érvényes, vasbeton elemeknél ez a hatás valószínűleg nagyobb. Azzal a feltételezéssel élve, hogy az acél statikus hajlítási teherbírásának modellszórása 0, azt a közelítést lehet tenni, hogy a vasbeton elemeknél az imént kiszámolt értékeket a vasbeton statikus hajlítási teherbírásának modellszórásával összevonjuk:

$$mean(ME_{SDOF}) = 1.233$$

$$\nu_{ME_{SDOF}} = \sqrt{0.06^2 + 0.2^2} = 0.209$$

A nyírási teherbírásnál nem veszünk figyelembe SDOF modell hibát, mert nem SDOF modellből számoljuk, hanem statikus, hagyományos módon.

4.3.3. AZ ELLENÁLLÁS OLDALI SZÓRÁSOK

A figyelembe vett statisztikai jellemzőket az 12-13. táblázatok tartalmazzák.

Mennyiség neve	Jele	Statisztikai jellemzők	Eloszlás típusa	Hivatkozás	Megjegyzés
Acél sűrűség	ρ_s	2%	normál	[110]	
		1%	normál	[50]	
Acél szilárdság	f_y	$\mu=452\text{MPa}$ $\nu=5\%$	lognormál	[115]	S355 acélminőség alapján
Acél rugalmassági modulus	E_s	$\nu=3\%$	normál	[50]	
Acél keresztmetszeti magasság	h	0.44%	normál	[112]	A kutatási jelentésben szereplő adatokból számolva.
Acél övszélesség	b	1.01%	normál		
Acél övvastagság	t_f	4.43%	normál		
Acél gerincvastagság	t_w	4%	normál		

12. táblázat – Szerkezeti acél statisztikai paraméterei ⁷⁷

⁷⁷ Szerző által szerkesztett táblázat.

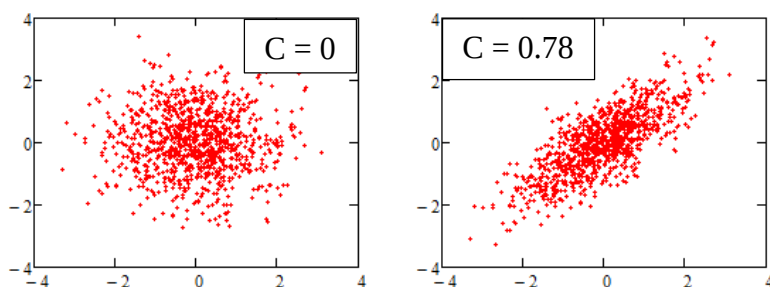
Mennyiség neve	Jele	Statisztikai jellemzők	Eloszlás típusa	Hivatkozás	Megjegyzés
Beton sűrűség	ρ_c	1.50%	normál	[111]	
		4%	normál	[50]	
Beton szilárdság	f_c	$\mu=f_{ck}+8 \text{ MPa}$ $v=15\%$	normál	[59][53]	A szórásra 5-15% közötti értékeket ad a szakirodalom
Betonacél szilárdság	f_y	$\mu=f_{yk}/(1-1.645v)$ $v=6\%$	normál	[59]	
Vasbeton km. méret	a,b	$\mu=1.5\text{mm}$ $\sigma=6.4\text{mm}$	normál	[53]	
		$v=1\%$	normál	[113]	
Betonacél km. terület	A_s	$v=2\%$	normál	[50]	
Vasak helyzete	d	$\mu=6\text{mm}$ $\sigma=10\text{mm}$	normál	[50]	$\mu=10\text{mm}$ -t ad meg a forrás, de a hangsúlyozott közelítő jelleg miatt módosítva lett az érték

13. táblázat - Vasbeton statisztikai paraméterei ⁷⁸

Adott esetben a további változókat is lehetne statisztikailag jellemezni, mint pl. az oszlopok hossza, osztásköze, vagy a betonfedés, de jelenleg ettől eltekintünk, ezek a változók determinisztikusként lesznek kezelve.

4.3.4. KORRELÁLT VÁLTOZÓK

A disszertációban csak a Pearson korrelációt alkalmazom annak egyszerű mivolta, valamint terjedelmi okok miatt. A Pearson korreláció változók közötti lineáris (sztochasztikus) összefüggést ír le. A független adatsorok korrelációja 0, míg az 1 és -1 korreláció egzakt lineáris összefüggést jelent, a két adatsor együtt mozog a korreláció előjelének megfelelően. A korreláció hatását ábrázolja az 73. ábra, ahol a vízszintes és függőleges tengely adatsora előbb független, majd 0.78-as korrelációval van generálva. A korreláció átló irányban „összenyomja” az eloszlásfüggvényt, $C=1$ korreláció esetén az összes pont egy egyenesre esne (de az egyenes mereksége nem következik a $C=1$ értékből, hasonló módon a $C=0$ feltétel is fennállhat nem független adatsorok esetén is).



73. ábra – Két adatsor korrelációjának szemléltetése (szerzői ábra)

⁷⁸ Szerző által szerkesztett táblázat.

A független változók korrelálásának beállítása (korrelált változók generálása) több módon is történhet, itt a korrelációs mátrix Cholesky féle felbontását alkalmazom [53]. Korrelációs mátrixnak hívjuk azt a szimmetrikus $n \times n$ mátrixot, amiben a n számú változó egymással felvett korrelációs együtthatója szerepel. Az a, b, c változókra felvett korrelációs mátrix:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & C_{ab} & C_{ac} \\ C_{ab} & 1 & C_{bc} \\ C_{ac} & C_{bc} & 1 \end{bmatrix}$$

A korrelált változók generálásához az az U mátrix szükséges, amire igaz, hogy:

$$U^T U = C$$

Az U háromszög mátrix előállításának egyik módja a Cholesky féle felbontás, amely a matematikai programokban beépített függvényként meghívható.

Ha felveszünk egy $X(a, b, c)$ vektort, amiben a, b, c korrelálatlan változók, akkor az $X_C (a', b', c')$ korrelált változókat tartalmazó vektor:

$$X_C = X \cdot U$$

Tehát a korrelált változók a korrelációs mátrix Cholesky féle felbontásának szorzatával állíthatók elő (ha a változók normál eloszlásúak), ez a művelet jelenik meg mind a FORM analízisben, mind a Monte Carlo szimulációban.

A kísérleti robbantásaink mérési jegyzőkönyveiből [63] tartalmaz egy oldalt a „D” melléklet, ahol a túlnyomás és impulzus értékek korrelációja is fel lett tüntetve. **A méréseim alapján a túlnyomás és impulzus között erős, 0.92-es korreláció áll fent.**

4.4. VALÓSZÍNŰSÉGI MÓDSZEREK VIZSGÁLATA ROBBANÁSI TERHEK ESETÉN

A vizsgálatok elvégzéséhez párosítani kell egy valószínűségi és egy dinamikai modellt. A vizsgálandó párosításokat a 14. táblázat mutatja. A módszerek elemzése előtt érdemes kiemelni azokat a számítási lépéseket, amik szakaszosan értelmezett függvényeket tartalmaznak és szakadást okoznának a határállapot-függvényben:

- A Kingery-Bulmash $P(Z)$ és $I(Z)$ összefüggések szakaszosan értelmezett függvények (három Z szakasz van megkülönböztetve)
- A visszaverődési tényező és visszavert impulzus számítása kettős interpolációval történik (nem is áll rendelkezésre zárt képletként az összefüggés).
- A DIF értékek számítása egyrészt iteratív, másrészt minden iterációs lépésben szakaszosan értelmezett függvényként megadott érték a vasbeton esetében. Az acélra érvényes DIF érték interpolációval számítható.
- Vasbeton keresztmetszeteknél a vasak képlékenységi állapotát ellenőrző lépés kimarad a teherbírás folytonos függvényre alakításakor, ez különösen a kétszeresen vasalt keresztmetszeteknél vinne nagy bizonytalanságot a számításba. Szintén több feltételes kifejezés szerepel a vasbeton elemek nyírási vizsgálatában.

Módszertől függetlenül, az ellenőrzéshez először meg kell állapítani a megengedett határállapotot. Ez az az állapot, ami a cél β meghatározásánál a kárhányad számításában is figyelembe lett véve. Mivel a kárhányadnál az épület tönkremenetele, összeomlása lett figyelembe véve,

így a határállapot is a táblázatokban szereplő „súlyos” vagy „katasztrofális” állapot kell, hogy legyen. Mérnöki megfontolás kérdése, hogy az oszlop funkciójának megfelelően melyik határállapot számít súlyosnak. Egy függőleges terhet is viselő oszlop kisebb deformációnál is okozhat súlyos tönkremenetelt. Sajnos a határállapot táblázatok nem térnek ki arra, hogy a vizsgált elem nyomott-hajlított elem-e. A programokban súlyos határállapotnak a „C” melléklet szerint a 15-ös duktilitást, és a 6°-os támaszelfordulást veszem, valamint $D=0.8$ értéket a Mutalib és Hao módszerével ellenőrzött oszlopokon.

Mindegyik módszer ugyanazon a helyszínrajzon és épületen van értelmezve, amiről a dokumentációkban (6. 7. 8. 9. 10. Függelékek) ábrák is találhatók. Az összes megoldásban a távolság konstansnak tekintett, egyrészt azért, mert oszlop méretezése esetén feltételezhető, hogy akárhol robban a VBIED, **valamelyik** oszlopra úgyis közel merőleges a lökéshullám, tehát az R_x távolság 0-nak vehető. Az R_0 távolság a helyszínrajzi kötöttség miatt konstans.

	FOSM	FORM ⁷⁹	Monte Carlo
Átlaggyorsulások módszere	1	4	7
Energiaegyensúlyi egyenlet	2	5	8
P-I (Nyomás - Impulzus) görbe	3	6	9

14. táblázat – Párosítható dinamikai és valószínűségi módszerek (zölddel a választott párosítások)⁸⁰

4.4.1. A VALÓSZÍNŰSÉGI MODELL ÉS DINAMIKAI MODELL PÁROSÍTÁSAI

1. FOSM analízis – Átlaggyorsulások módszere

Az átlaggyorsulások módszere nem zárt képletű, továbbá iteratív, tehát nem írható fel a FOSM analízishez szükséges határállapot-függvény.

2. FOSM analízis – Energiaegyensúlyi egyenlet (6. Függelék)

Az energiaegyensúlyi egyenlet felírható zárt képlettel, tehát alkalmas a FOSM analízis elvégzésére. Az érvényességi feltétel a gyakorlatban acéltartók esetén nem teljesül, tehát csak (egyszeresen vasalt) vasbeton változatra lett elkészítve a számítás. Mivel a FOSM analízis gyorsan fut, lehet közvetlenül tervezésre használni, sokszor változtatni az értékeket, és egyből ellenőrizni az eredményt. A FOSM analízis akkor ad 2-3 közötti β értéket, ha a parciális tényezős számításban a nyomatéki és nyírási kihasználtságok 60-80%-ra adódnak.

A szórásokat az 4.3.3. fejezetnek megfelelően vettem fel, a kedvezőtlen vaselmozdulás a hasznos magasság valószínűségi változójával van figyelembe véve. A teherparamétereknél a Kington-Bulmash modellhibát alkalmaztam.

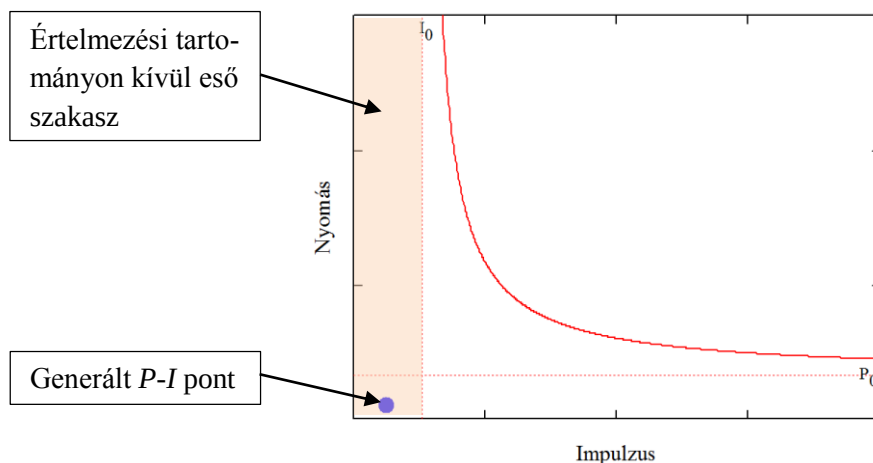
Ennél a módszernél nem lehetne figyelembe venni a távolság szórását, mert a túlnyomás és impulzus adatok kettős interpolációval vannak számolva, ami nem vihető át a zárt képletbe.

⁷⁹ A FORM analízis csak egy típusú megoldó algoritmussal volt alkalmazva, a következtetések erre a (gradiens alapú) algoritmusra vonatkoznak, nem általánosságban a FORM analízisre (ld. 2.2.3.2. fejezet).

⁸⁰ Szerző által szerkesztett táblázat.

3. FOSM analízis – P - I görbe

A P - I görbe értelmezési tartománya definíció szerint nem tartalmaz egy olyan szakaszt a vízszintes (I) tengelyen, ahová eshet P - I értékpár által kitűzött pont (74. ábra). Tehát nem írható fel a határállapot-függvény, mert a jelölt szakaszon nem értelmezhető a P - I görbe.



74. ábra – A P - I görbe értelmezési tartományán kívül eső rész (szerzői ábra)

4.-5.-6. FORM analízis – Átlaggyorsulások módszere, Energiaegyensúlyi egyenlet, P - I görbe

Mint az a 2.2.3.2. fejezetben a FORM analízis ismertetésénél kifejtésre került, a határállapot-függvény folytonos, zárt képlettel való felírása nem feltétlenül szükséges, de sokat egyszerűsít a FORM analízis elvégzésén. Az átlaggyorsulások módszere nem zárt képletű, és iteratív megoldás, tehát nem írható fel a határállapot-függvény. Szintén nem írható fel a határállapot-függvény a P - I görbe esetén, mert annak az értelmezési tartomány korlátja gátat szab (74. ábra).

Az átlaggyorsulások módszerét és a P - I görbét olyan FORM optimalizációs eljárásokkal lehetne párosítani, melyek kívül esnek ezen értekezés hatáskörén (pl. COBYLA), leginkább azért, mert használatuk túlmutat az általam ismert és használt Mathcad programnyelv keretein.

Az volt a feltételezésem, hogy az energiaegyensúlyi egyenlettel felírható határállapot-függvényt használva megoldható lesz a feladat. Munkám során egy, a szakirodalomban [53] is jegyzett gradiens alapú optimalizációs eljárást használtam. Az említett optimalizációs eljárással nyert tapasztalatok vegyes képet adnak annak alkalmazhatóságáról a robbanásterhekre történő méretezés során.

A módszer jól teljesít egyszerű mintapéldák esetén, az eredmények összevethetők más módszerek eredményeivel. A 14. Függelékben található egy – fiktív – acéloszlop méretezése, amelynél a számítás stabilan konvergál, bármely bemenő paramétert változtatva vizsgálható a megbízhatósági index alakulása.

Ugyanezt a feladatot vasbeton keresztmetszet ellenőrzésére átírva bonyolultabbá válik a határállapot-függvény. A számítás akkor konvergál legnagyobb eséllyel a valós eredményhez, ha a legnagyobb érzékenységgű változóval van a kiértékelési pont „rákényszerítve” a G felületre. Ennél a számításnál nem talál konvergenciát az algoritmus, annak ellenére, hogy a G felületre való „rákényszerítést” több változóval is megkísértem. A bemenő adatok módosítása sem hozott

változást, a vasbeton oszlop esetén nem konvergált a számítás, így a FORM analízis ezzel a megoldási algoritmussal eredménytelen lett.

Szót kell ejteni még a FORM analízis egy olyan jellemzőjéről, ami független az alkalmazott optimalizáló algoritmustól. A G függvény igen komplex alakot is ölthet, amelynek több minimuma is létezik. Ha az alkalmazott algoritmus konvergál, akkor sem lehetünk biztosak benne, hogy jó helyre konvergált, és más kiinduló adatokkal is meg kell ismételni a számítást. Az általam alkalmazott mátrix formájú gradiens alapú algoritmus egyik hibája, hogy gyakran nem konvergál, vagy rossz helyre konvergál.⁸¹ Ezt a problémát szintén a fejlettebb algoritmusok tudják csak kiküszöbölni.

Tapasztalatom alapján tehát a FORM megvizsgált megoldó algoritmusa nem alkalmas egy bonyolultabb G felületen való optimalizálásra. **Ez nem a FORM analízis alkalmatlanságát mutatja, hanem az adott megoldó algoritmusét.**

7. Monte Carlo szimuláció – Átlaggyorsulások módszere (7. 8. Függelékek)

A Monte Carlo szimulációval egyszerűbben kezelhetők az olyan problémák, amik az előző módszereknél felmerültek. A szakaszosan értelmezett függvények mind leprogramozhatóak, a határállapot-függvénynek nem kell zárt képlettel rendelkezésre állnia. Lényegtelen, hogy hány lokális minimum pontja van a G függvénynek, és minden változónak tetszés szerinti lehet az eloszlásfüggvény típusa. A különböző peremeloszlású korrelált változók generálása azonban már bonyolultabb feladat, ez a módszer hátrányának tekinthető.

Új szerkezet tervezése esetén (amikor vannak kötetlen paraméterek) a Monte Carlo szimulációk időigényessége miatt szükség van arra, hogy csak olyan bemenő paraméter-összeállítással futtassuk a szimulációt, ami nagyságrendileg jó β értéket ad. Ennek a megbecsüléséhez – mintegy előtervezésként – használható a Monte Carlo szimulációt nélkülöző, csak a dinamikai megoldást tartalmazó program (2. és 3. Függelékek). Teszt futtatások alapján az ajánlható, hogy a duktilitási (nyomatéki) kihasználtság 50% körül legyen. Ebben az esetben, hasonló paramétereket használva, a Monte Carlo szimuláció nagyságrendileg 2 körüli β értéket szolgáltat.

A dinamikai megoldó algoritmusban megadható, hogy milyen időintervallumban számítsa ki a rezgőmozgás eredményét. Ezt a szimuláció futtatását megelőző alapmodellben érdemes úgy felvenni, hogy ne legyen a maximális elmozduláshoz tartozó időnél sokkal hosszabb, mert ez feleslegesen nyújtja a számítási időt. Ugyanakkor tekintettel kell lenni a változók szórására is, a túl rövid megoldási időtartam hibát okozhat, mert előfordulhat, hogy a program nem talál maximumot a függvényben. A programban jelenleg a P és I normál eloszlású változók vannak korreláltnak tekintve.

A számítás pontos, stabil, tetszőlegesen változtathatók a bemeneti adatok. A dinamikai megoldó algoritmus minden szimulációban numerikusan megoldja a rezgés differenciálegyenletet,

⁸¹ Megjegyzendő, hogy hasonló hibát lehet találni hivatalos szoftverben is. Egy szakirodalomból [113] származó mintapéldát megoldva a 2R Rel nevű szoftver [116] FORM modulja rossz eredményt ad (valószínűleg nem a legkisebb minimum helyre konvergál).

emiatt tekintélyes futási ideje van a programnak. A programba bele lett írva a számítási idő mérése, a végén írja ki, hogy mennyi időbe telt a futtatás. 100-1000 szimuláció esetén érdemes megmérni, hogy mennyire gyors, ezt követően lehet kiszámolni, a 10^5 - 10^6 számú szimuláció mennyi ideig tart. Becslésem szerint egy 10^5 számú szimuláció 4-10 órát igényel (hardver függő), a 10^6 -os szimuláció 2 napot is igénybe vehet. Ebből is látszik a jelentősége az előtervezésnek, a Monte Carlo szimulációnak ezt a változatát nem érdemes próbálgatás jelleggel alkalmazni.

A számítás gyorsításának egyik lehetősége lenne a több magos processzorok kihasználása, ám ezt a Mathcad 15-ös verziója még nem támogatja. Más programnyelvek gyorsabbak is lehetnek a Mathcad-nél, és általában véve igaz, hogy programozói tudással gyorsíthatók az algoritmusok, de ez jelen értekezésben nem volt kitűzött cél. Lehetőség van több számítógép egyidejű futtatásával csökkenteni a számítási időt. Amennyiben a külön futtatások egymástól függetlenek, az eredményeik szuperponálhatók, így a számítási idő a gépek számával lineárisan csökkenthető, n számítógépen N/n számú szimulációt kell futtatni. A számítások függetlensége érdekében a seed-et minden gépen más számra kell állítani, vagy előre legenerált számsort kell fel-, és szétosztani a gépek között.

8. Monte Carlo szimuláció – Energiaegyensúlyi egyenlet (9. Függelék)

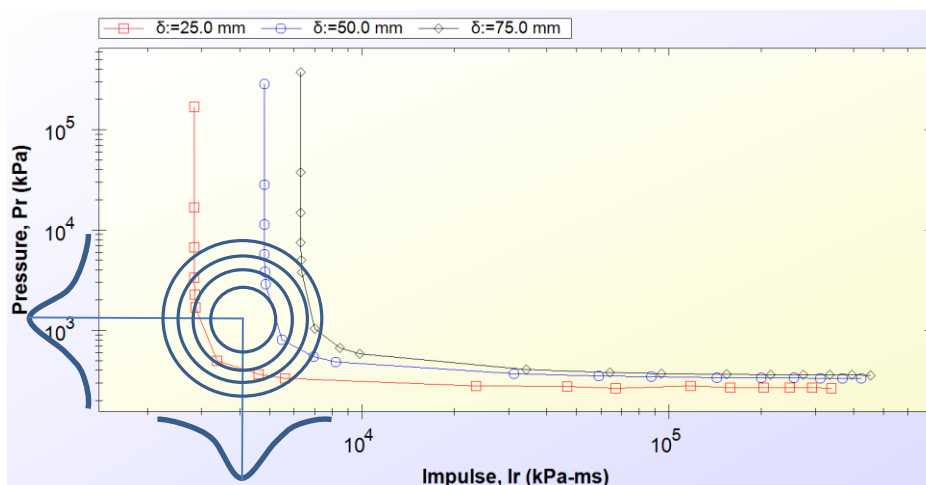
Ez egy gyorsan futó párosítás, hátránya azonban, hogy az érvényességi feltétel teljesülését még a vasbeton oszlopok esetén is figyelemmel kell kísérni. Az algoritmusba beleírtam a feltétel vizsgálatát, és a nem érvényes szimulációkat nem számítja bele a tönkremeneteli valószínűségbe a program.

Az energiaegyensúlyi egyenlet nem alkalmas a pontos alakváltozási idő kiszámítására, így a DIF értékek iterációja sem indokolt, hisz nem lenne kellően pontos. Ehelyett az UFC 3-340-02-ben javasolt általános érvényű DIF szorzókat veszem alapul, amik egy konzervatív becslésen alapszanak.

9. Monte Carlo szimuláció – P-I diagram (10. Függelék)

A módszer hatékonysága függ a P-I diagram előállítási módjától. Akkor éri meg a Monte Carlo szimulációt használni, ha a P-I diagramot nem az előzőekben bemutatott módszerekkel számítjuk, hanem egy külsős forrásból, „kész terméként” vesszük át.

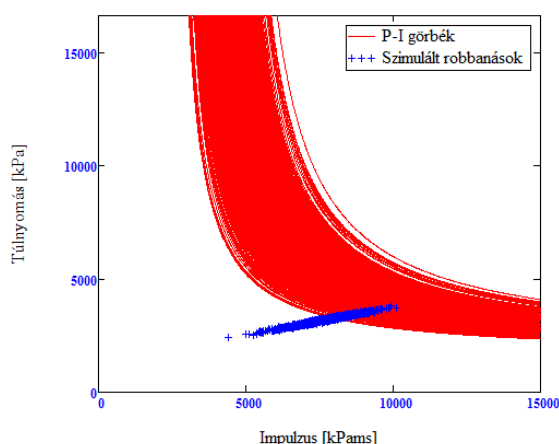
Ezzel a megbízhatósági módszer klasszikus, kétváltozós mintapéldája adódik, ahol a P-I görbe a határállapot-függvény, ami fölé berajzolható az egyesített eloszlásfüggvény. Szimulációval elő kell állítani a P-I pontpárokat, és a tönkremeneteli valószínűség meghatározható a nem megfelelő pontok számából.



75. ábra – A robbanási hatás eloszlásfüggvénye és a $P-I$ diagram, mint határfüggvény (szerzői ábra)

Olyan előállítási módot kell választani, amelynek eredményeként a $P-I$ görbe nem konstans, hanem szimulációnként változik, tehát a valószínűségi változóknak a függvénye (anyag-szilárdság, geometria, stb). Erre a $P-I$ görbék előállítása kapcsán már említett RCBlast [101] szoftver nem képes, de a Mutalib és Hao [88] által közreadott képlet megfelel ennek a feltételnek. A $P-I$ görbe képletét használva a görbe minden szimulációs lépcsőben újra generálásra kerül, és az aktuális $P-I$ pontpár ellenőrzése az abban a szimulációban érvényes görbén kerül ellenőrzésre.

Az analízis eredményét ábrázolja grafikusan a 76. ábra. Látható egy sűrű, piros sáv, amit a $P-I$ görbék alkotnak. A kék pontok mutatják a generált $P-I$ értékeket, a ponthalmaz alakjából jól látható a korreláció hatása. A $P-I$ görbe regressziós képlete bizonyos mértékű hibát hordoz magában a regresszió miatt. A szerzők közlése alapján ennek közelítő értéke a P_0 aszimptotánál 1%, az I_0 aszimptotánál 5% értékkel vehető fel. Az eltérés minden megadott pontban az analitikus képlet javára közelít (az analitikus eredmény kisebb biztonságot ad), ebből kifolyólag a regresszió modellhibáját elhanyagolom.



76. ábra – Szimulációnként változó $P-I$ diagram és a szimulált robbanások $P-I$ értékpárjai (szerzői ábra)

A módszer gyorsan fut, és ezzel együtt nagyon pontos is, mert a $P-I$ görbe mögött álló számítás:

- többszabadságfokú modellt alkalmaz, így olyan tönkremeneteli módokat is kezel, amik az SDOF rendszerben nem jönnek elő (nyírási alak),

- kezeli a dinamikus szilárdságnövekedést (térbeli modellen pontosabban figyelembe vehető, hogy a tartó mely szakaszán milyen a terhelési sebesség),
- a határállapot a maradó teherbírási tartalékon alapszik (nem tapasztalati értékek, mint a többi módszerénél),
- a módszerben további lehetőségek rejlenek: nem szabályos oszlop kialakítás, kapcsolt lökéshullám modellezés is lehetséges a térbeli explicit modellen, így ezek a hatások is megjeleníthetők lennének a $P-I$ görbén.

4.4.2. RÉSZÖSSZEGZÉS

A felvázolt 9 modellpárosításból 4 esetében sikerült működő módszert előállítani. Ezek a módszerek sokban különböznek, és jellegükből adódóan nem lehetséges ugyanazokkal a feltételekkel lefuttatni őket, így az eredmények egymással való összehasonlítását nem végeztem el. Összességében elmondható, hogy a FOSM-FORM-Monte Carlo irányban nő a modellek pontossága. A dinamikai módszerek közül az energiaegyensúlyi egyenlet közelítő számításnak nevezhető, SDOF szinten az átlaggyorsulások módszere pontosabb, több részlet figyelembe vételét teszi lehetővé. A $P-I$ görbék pontossága attól függ, milyen elmélettel számolták ki. Az itt bemutatott és alkalmazott $P-I$ görbe a fejlett, végeselemes háttér miatt a legpontosabbnak számít.

Az általam vizsgált gradiens alapú FORM algoritmus nem bizonyult használhatónak a konvergencia problémák miatt. **Ez nem a FORM analízis alkalmatlanságát mutatja, hanem az adott megoldó algoritmusét.** Más megoldási eljárások pontos eredménnyel szolgálhatnának. A FORM analízis gyakran használt valószínűségi módszer, és képességeit tekintve alkalmas a robbanásterek vizsgálatára. Ehhez azonban megfelelő megoldó algoritmust kell választani hozzá. Olyan algoritmusokkal, mint a Nelder-Mead, vagy a COBYLA, gyorsan meg lehetne oldani a problémát, és az eredményben jelentkező érzékenységi tényezők a parciális tényezők kalibrálásában is felhasználhatók lennének. Ezek vizsgálatától eltekintek az értekezés keretein kívül eső programozási igény vagy programnyelv miatt.

A FOSM analízissel vizsgálható az energiaegyensúlyi egyenlet, gyorsan lefut, alkalmas előtervezésre, közelítő valószínűségi számítás elvégzésére. A szakaszonként értelmezett függvények gondot jelentenek a FOSM analízisnél, de a Monte Carlo szimulációban lehet alkalmazni őket. Az átlaggyorsulások módszerére épülő szimulációk érezhetően lassan futnak (minden egyes szimulációban meg kell numerikusan oldani a rezgés differenciálegyenletet).

4.4.3. A VALÓSZÍNŰSÉGI MÓDSZEREK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A leprogramozott eljárásokat felhasználva összehasonlítások végezhetők a valószínűségi számítás, és a hagyományos, parciális tényező számítás között. Bár a vizsgált oszlop minden esetben ugyanazokkal a paraméterekkel bír, a valószínűségi módszerek egymással való összehasonlítása csak hozzávetőlegesen lehetséges, mert a jellegükből adódóan nem lehetett minden körülményt ugyanúgy figyelembe venni (pl. a tartó megtámasztási viszonya, ami a $P-I$ diagramnál befogott, a többi modellben csuklós).

Minden esetben olyan paraméterekkel vettem fel a modelleket, hogy a hagyományos tervezés alapján közel 90-100% legyen a kihasználtságuk. Így lehetséges bemutatni azt, hogy mekkora különbség van az eredményekben valószínűségi módszerek használata esetén. A 15. táblázat összesíti a futtatások eredményeit.

	FOSM - Energiaegyensúlyi egyenlet	Monte Carlo - Energiaegyensú- lyi egyenlet	Monte Carlo - Átlaggyorsulások módszere	Monte Carlo - Átlaggyorsulások módszere (Acél)	Monte Carlo - <i>P-I</i> diagram
Hagyomá- nyos, parciá- lis tényezős számítás	98% (hajlítás) 99% (nyírás)		92% (hajlítás) 97% (nyírás)	95 % (hajlítás) 96 % (nyírás)	96%
Valószínűségi számítás	$\beta = 1.848$ (hajlítás) $\beta = 0.814$ (nyírás)	$\beta = 0.57$ (hajlítás) $\beta = 1.00$ (nyírás)	$\beta = 0.759$ (hajlítás) $\beta = 1.626$ (nyírás)	$\beta = 0.448$ (hajlítás) $\beta = 0.782$ (nyírás)	$\beta = 1.574$

15. táblázat – A valószínűségi és a parciális biztonsági tényezős számítások összehasonlítása⁸²

Mint látható, futtatások során a valószínűségi analízis 2-nél kisebb β értékeket adott, tehát jóval elmaradnak a 2.2.4. fejezetben a rendkívüli tervezési állapotra kitűzött $\beta_{opt}=3.3$ értéktől.

Ez tulajdonképpen azt jelenti, hogy a hagyományos számításban alkalmazott parciális biztonsági tényezők nincsenek jól kalibrálva, a szórások túl nagy bizonytalanságot rejtenek magukban. Mivel az ellenállás oldali szórások a szakmában bevett, és jól körüljárt értékek, csak a teheroldalon alkalmazott biztonsági tényezők kalibrálásával lehetne összhangba hozni a két számítási eljárást.

Az FOSM-mel és *P-I* diagrammal végzett számítás a többivel ellentétben magasabb, $\beta=1.5$ -2 értékeket adott a 96-99%-os kihasználtság mellett. Ezek is elmaradnak a $\beta=3.3$ értéktől, de a többi módszerhez képest jelentősen nagyobb a biztonság. Minden módszerben ugyanazokat a szórási paramétereket alkalmaztam, a tekintélyes különbség a számítás mögött álló mechanikai és valószínűségelméleti összefüggésekben keresendő. Kimutatható, hogy pl. az energiaegyensúlyi egyenletben – mivel az impulzus négyzetesen szerepel – az impulzus szórásának nagy a jelentősége, szinte fordított arányban nő β a szórás változásával. Ezzel szemben a *P-I* diagram méretezési módszerében máshogy szerepel az impulzus, és ez megmutatkozik a szórás és a β összefüggésében is, például a szórást felére csökkentve β értéke csak 15%-kal nőne. Az FOSM analízis eltérő eredményét magyarázhatják a módszer korlátoltságából eredő egyszerűsítések, de további vizsgálatok szükségesek a különbségek okainak feltárására. Általánosságban az FOSM-től pontosabb a Monte Carlo módszer, tehát kétséges, hogy az FOSM által szolgáltatott nagyobb biztonság megbízható eredmény-e.

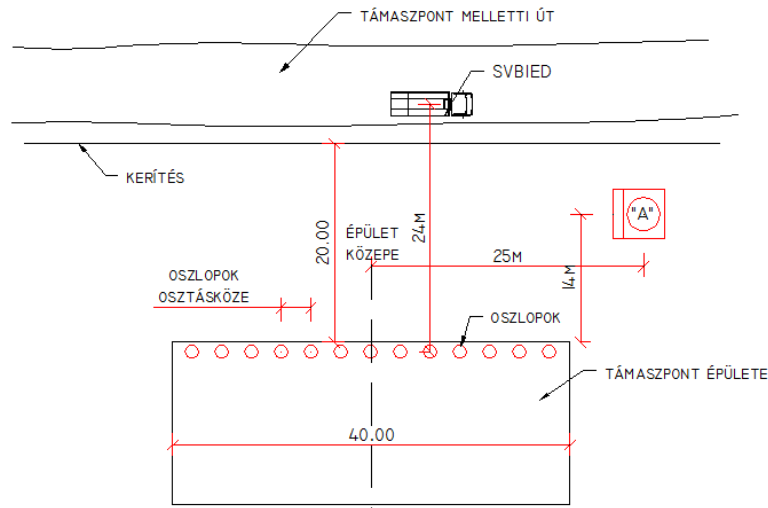
A fentiek tükrében kijelenthető, hogy a méretezési módszerek különböző eredményeket szolgáltathatnak azonos bemenő paraméterek esetén, ez természetes velejárójuk. Párosítva őket egy valószínűségi módszerrel, és ugyanazokat a statisztikai jellemzőket alkalmazva a bemenő paramétereken az elért biztonsági szintek különbözőek lesznek, másképpen fogalmazva a **különböző módszerekben más-más érzékenységi tényező tartozik a változókhhoz**. Ennek mélyebb vizsgálata kívül esik ezen értekezés hatáskörén, de a témát tüzetesebb vizsgálatra érdemesnek tartom, pl. FORM analízis elvégzésével.

⁸² Szerző által szerkesztett táblázat.

4.5. MINTAPÉLDA AZ OBJEKTÍV BIZTONSÁG KIMUTATÁSÁRA

A javasolt méretezési módszert az általam írt program segítségével, a következő mintapéldán mutatom be:

Adott egy dél-afganisztáni magyar támaszpont. A támaszpont helyszínrajzát a 77. ábra mutatja. Előreláthatólag a magyar csapatok még 1 évig használják a létesítményt. A térségben 20 hasonló paraméterekkel rendelkező objektum van.



77. ábra – A mintapéldában szereplő támaszpont helyszínrajza (szerzői ábra)

1. Milyen típusú oszlopokkal kell megerősíteni a környező útra néző falat ahhoz, hogy a vállalt kockázat ne legyen nagyobb a rendkívüli terhekre mérnöki elfogadott értékénél?
2. Mekkora valószínűséggel fog az udvaron jelölt „A” ponton őrt álló katona dobhártyasérülést szenvedni VBIED támadástól az elkövetkező 1 hét során?

A számítás elkezdése előtt meg kell határozni az elfogadható kockázat értékét. A rendkívüli terhekre vonatkozó, építőmérnöki szakmában elfogadott tönkremeneteli valószínűséget $\beta = 3.3$ értékkel veszem fel (ld. 2.2.4. fejezet), amely a feladatban megadott 1 év tervezési élettartamra van értelmezve.

4.5.1. A $P(VBIED)_T$ VALÓSZÍNŰSÉG ELŐÁLLÍTÁSA

A robbanásterhek paraméterei földrajzilag és időben is változóak. A robbantásos események emberi szándékosság eredményei, emiatt a klasszikus eloszlásfüggvényekkel nehezen közelíthetők. Több szerző is kihangsúlyozza [120], hogy a robbantási kockázatelemzés csak időben pillanatnyilag tekinthető érvényesnek, bármikor megváltozhat a környezet, és a kockázatelemzés paramétereinek frissítése válhat szükségessé.

Ha az építmény élete alatt a körülmények megváltoznak, akkor új kockázatelemzést kell végezni. A továbbiakban **feltételezem, hogy a hatásokat leíró statisztikai jellemzők teljesítik az elvárt időbeli, földrajzi, politikai stb. folytonos hátteret.**

A témakör valószínűségelméleti háttérét részletesen vizsgálók azt az alaptételt is megkérdőjelezték már, hogy a merényletek egymástól független eseményeknek tekinthetők-e [121]. Az idézett tanulmányban a szerzők a nagy terrortámadásokat függetlennek találták, de a kis támadások esetében egymástól függőnek írják le az eseményeket. A támaszpontok elleni SVBIED-eket közepes méretű merényletnek tekintem, és feltételezem, hogy **érvényes a valószínűségelmélet azon egyszerűsítő feltétele, miszerint az események egymástól függetlenek.**

Összességében elmondható, hogy amilyen robbanási események hatással lehetnek a mértezendő szerkezetre, azon események időbeni eloszlását kell meghatározni a támadás módjára, környezetére, eszközére, helyére, céljára való tekintettel.

Egyes információk szerint világszerte 700 IED robban fel minden hónapban⁸³. Más források szerint az USA területén hetente, a világban naponta történik egy robbanás (baleset és szándékos együttvéve)⁸⁴. A VBIED támadások időbeni eloszlását a merényleteket feldolgozó adatbázisokból lehet felvenni. Ezen adatbázisok alapvetően három csoportba sorolhatók:

- Nyilvánosan elérhető adatbázis:
 - ilyen a főként sajtóhírekre támaszkodó „Global Terrorism Database (GTD)” [20],
 - vagy szakmai folyóiratok, melyek forrásai hivatalosak is lehetnek, példaként említhető a Long War Journal [122].
- Olyan hivatalos adatbázis, amely nem nyilvános, valamilyen szervezet vagy hatóság készíti, de a NATO tagságunkból eredően Magyarországnak hozzáférése van. Ilyen a NATO Madrid mellett felállított IED kiválósági központja (C-IED COE), melynek létrehozásában hazánk is szerepet vállalt. A kiválósági központ saját, azonnal frissülő adatbázist épít a világban elkövetett robbantásos merényletekről.
- Olyan adatbázisok, melyeket az adott ország vagy szervezet kizárólag saját felhasználásra készített, és magyar félnek nincs hozzáférése. Ilyen adatbázist tart fent az USA, ehhez a NATO-nak nincs hozzáférése.

Az elérhető nyilvános adatbázisok sajnos nem szolgáltatnak elég információt ahhoz, hogy valós SVBIED veszélyhelyzetre használni lehessen őket. Az esetek csekély részében kerül rögzítésre a felhasznált robbanóanyag tömege, a robbantás módja vagy eszköze. Ez természetesen nem az adatbázis készítőinek hibája, a hiányzó információk utólag nehezen határozhatók meg, és a forrásokban sem szerepelnek. A GTD adatbázisa egy jó keret, ami megfelelő feltöltöttség mellett hasznos eszköz lehetne a veszélyforrások felmérésében, előrejelzésében. Alkalmas a földrajzi, időbeli és az elkövetés módja szerinti szűrésre, az adatbázis interneten elérhető és letölthető. A 78. ábra a Közel-Keleten 2001 és 2007 között történt robbanóanyaggal elkövetett merényletek listájának egy részletét mutatja.

⁸³ A madridi C-IED COE-n tett tanulmányút során szóban elhangzott információ (2012 augusztus).

⁸⁴ A BakerRisk által szervezett „Design of Blast Resistant Buildings” oktatáson szóban elhangzott információ (2013 március) [36].

GTD ID	DATE	COUNTRY	CITY	PERPETRATOR	FATALITIES	INJURED	TARGET TYPE
200712260007	2007-12-26	Algeria	Lakhdaria	Al-Qa'ida in the Lands of the Islamic Maghreb (AQLIM)	2	0	Police
200712260006	2007-12-26	Algeria	Lakhdaria	Al-Qa'ida in the Lands of the Islamic Maghreb (AQLIM)	0	2	Military
200712260003	2007-12-26	Algeria	Thenia	Al-Qa'ida in the Lands of the Islamic Maghreb (AQLIM)	2	2	Police
200712260002	2007-12-26	Algeria	Ahnif	Al-Qa'ida in the Lands of the Islamic Maghreb (AQLIM)	0	0	Transportation
200712250002	2007-12-25	Iraq	Bajji	Unknown	20	80	Military, Military, Terrorists
200712250001	2007-12-25	Iraq	Baqubah	Unknown	5	20	Private Citizens & Property
200712230006	2007-12-23	Algeria	Tébessa	Algerian Islamic Extremists	0	3	Military
200712150013	2007-12-15	Iraq	Baghdad	Unknown	0	4	Police, Private Citizens & Property

78. ábra – Bejegyzések a GTD adatbázisban [20]

A nehezen hozzáférhető adatbázisok, hiányos információk, idő-, és helyhiány miatt a $P(EXP)_T$ valószínűség alapjául szolgáló **valós adatsorok felvétele kívül esik ezen értekezés hatáskörén**. A számítási módszer bemutatásához használt, adatbázisokból nyert adatok nem tekinthetők pontosnak, közelítéseket és feltételezéseket tartalmaznak.

1. adatsor

A GTD adatbázisában az alábbi szűrők kerülnek beállításra:

- Időpont: 2001 utáni
- Használt fegyver: robbanóanyag
- Használt eszköz: gépjármű

Így 3500 rekord marad az adatbázisban, de ezek között még mindig sok olyan van, ahol gépjárműbe rejtett bombával végeztek egy áldozattal, vagy az öngyilkos merénylő konvojba hajtott. Nincs egyértelműen tisztázva, az adott VBIED álló vagy mozgó VBIED volt, célpontja konvoj, vagy épület volt, milyen környezetben történt, stb. Az adatbázis nem teszi lehetővé az épületek ellen elkövetett merényletek kiválasztását, erre az esetlegesen megadott szöveges leírásból lehet következtetni.

A $P(VBIED | EXP)$ valószínűség az adatbázis különböző szűrés szerinti lekérdezéseiből, majd a rekordok egyenkénti vizsgálatával becsülhető. Egy elvégzett tanulmány szerint a GTD adatbázisában földrajzi szűrés nélkül, általánosságban a robbanóanyaggal elkövetett támadások 17%-a volt VBIED [123]. Ez az adat azonban még mindig nem szűri ki a kizárólag épületek, bázisok ellen elkövetett merényleteket. Ennek érdekében a vizsgált adatsort egyénileg vizsgáltam és szűkítettem. Ha a helyszínt Afganisztánhoz kötjük, akkor az előző 3500 rekordból csupán 336 marad meg. Ezekből kiszűrve a piacok, közösségi helyek, konvojok, személyek elleni támadásokat 130 rekord marad meg.

$$P(VBIED | EXP) = 130/336 = 38.69\%$$

Természetesen más időszakokat, más térségeket vizsgálva eltéréseket mutathat ugyanez az arányszám. A továbbiakban ezt az arányszámot általánosságban helyesnek veszem.

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	Σ
Gépjárművel kapcsolatos robbantások száma (EXP)	2	2	6	18	19	22	23	24	30	92	98	336
Ebből támaszpontok, épületek elleni SVBIED támadások	1	0	2	5	5	12	12	8	15	37	33	130

16. táblázat – VBIED-vel elkövetett robbantások, és azon belül az épületek elleni robbantások számának alakulása 2003-2013 között Afganisztánban [20]⁸⁵

Az 16. táblázat mutatja az 1. adatsort. 11 év adatai alapján 130 hasonló merénylet történt, amelyeket VBIED-vel követtek el épületek ellen. A $P(VBIED)_T$ valószínűség számítása során feltetelezem, hogy az események függetlenek és az adatsor a diszkrét Poisson eloszlással jellemezhető.

$$\text{Poisson eloszlás paramétere: } \lambda_1 := \frac{336}{11} = 30.545 \quad [P(VBIED|EXP)] := \frac{130}{336} = 38.69\%$$

Annak a valószínűsége, hogy az elkövetkező 1 évben legalább 1 támadás történik:

$$P_{1,EXP} := \left(1 - \frac{\lambda_1^0}{0!} \cdot e^{-\lambda_1} \right) = 99.999999999946\%$$

$$P_{1,VBIED} := \sum_{i=1}^{100} \left[\left[1 - (1 - [P(VBIED|EXP)])^i \right] \cdot \left(\frac{\lambda_1^i}{i!} \cdot e^{-\lambda_1} \right) \right] = 0.9999926307$$

Annak a valószínűsége, hogy az elkövetkező 1 hónapban legalább egy támadás történik:

$$x := \frac{1}{12} \quad \lambda_x := x \cdot \lambda_1 \quad P_{x,EXP} := 1 - \frac{\lambda_x^0}{0!} \cdot e^{-\lambda_x} = 92.16\%$$

$$P_{x,VBIED} := \sum_{i=1}^{100} \left[\left[1 - (1 - [P(VBIED|EXP)])^i \right] \cdot \left(\frac{\lambda_x^i}{i!} \cdot e^{-\lambda_x} \right) \right] = 62.65\%$$

Az előző számítást le lehet ellenőrizni, ha a számítás közvetlenül az épületek elleni VBIED támadások adatsorával történik, ebben az esetben nem kell használni az általánosított $P(VBIED | EXP)$ valószínűséget.

⁸⁵ Szerző által szerkesztett táblázat a GTD alapján [20].

Poisson eloszlás paramétere: $\lambda_1 := \frac{130}{11} = 11.818$

Annak a valószínűsége, hogy az elkövetkező 1 évben legalább 1 támadás történik:

$$P_{1.VBIED} := \left(1 - \frac{\lambda_1^0}{0!} \cdot e^{-\lambda_1} \right) = 99.9992630655653\%$$

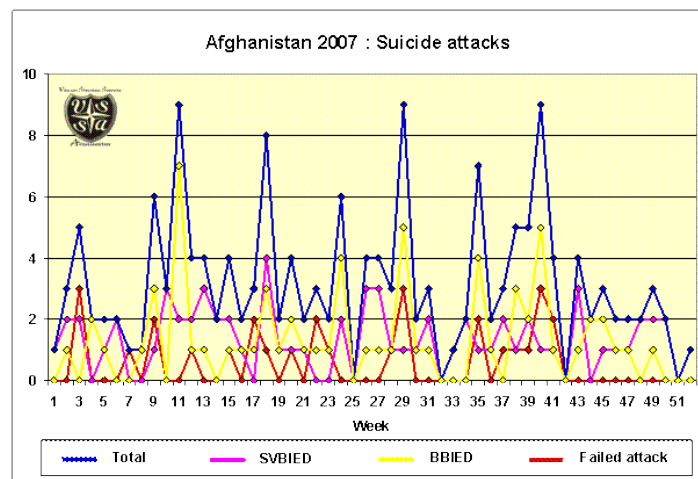
Annak a valószínűsége, hogy az elkövetkező 1 hónapban legalább egy támadás történik:

$$x := \frac{1}{12} \quad \lambda_x := x \cdot \lambda_1 \quad P_{x.VBIED} := 1 - \frac{\lambda_x^0}{0!} \cdot e^{-(\lambda_x)} = 62.65\%$$

Látható, hogy a két számítás eredménye megegyezik. Az egy évben belüli előfordulás valószínűsége közel 100%. Ez a minták gyakorisága alapján nem meglepő. A konstans paraméterű Poisson eloszlás alkalmazásával nem lett figyelembe véve az események évekkal növekvő száma. Ez a növekvő tendencia növelné az előfordulási valószínűséget is.

2. adatsor

Egy másik forrásból származó adatsor az Afganisztánban 2007-ben elkövetett öngyilkos robbantásokat összesíti heti lebontásban (79. ábra). Az adatbázisok ellentmondásait mutatja, hogy itt összesen 69 esetet hoz csak az SVBIED támadásokra. Ehhez képest a GTD adatbázis az összes VBIED jellegű támadásra 2007-ben 19 esetet hozott. A most vizsgált adatsor nem mutat növekvő tendenciát, itt helytállóbb a Poisson eloszlás használata.



79. ábra – Különböző típusú robbantások gyakoriságai 2007-ben Afganisztánban [122]

Ebből az adatbázisból is a $P(VBIED)_T$ valószínűsége van szükség. Azzal a feltételezéssel élek, hogy az SVBIED esetek az épületek elleni SVBIED támadásokat jelentik, így tehát az adatsor közvetlenül használható. Az eloszlás paramétere: $69/52=1.327$.

A számítás az 1. adatsorhoz hasonlóan történik, eredménye a 17. táblázatban található.

Azonos célpontok

A robbanástéher abból a szempontból is különleges a többi teherhez képest, hogy egyszerre csak egy épületre hat. Ezzel szemben a hagyományos terhek (szél, hó, földrengés) minden épületet egyaránt terhelnek. Több azonos paraméterű célpont esetén, és figyelembe véve, hogy nem csak egy, hanem több támadás is történhet, a tervezés alapjául szolgáló célpontra érvényes valószínűség még tovább csökken. Az $P_{VBIED}(i)$ diszkrét Poisson eloszlást használva a

$$\sum_{i=1}^{\infty} \left[P_{VBIED}(i) \cdot \left[1 - \left(\frac{n-1}{n} \right)^i \right] \right]$$

képlettel határozható meg az éppen vizsgált épületre értelmezett bekövetkezési valószínűség (ahol n az azonos célpontok száma, i az események száma).

Az azonos célpontok vizsgálatánál szempont lehet az is, hogy az azonos célpontok ugyanahhoz, vagy más üzemeltetőhöz tartoznak. Az anyagi felelősséget vállaló oldal ilyen szempontú megközelítése más megvilágításba helyezheti a kockázat csökkentésének kérdését (azonos fenntartású létesítményeknél is kell-e csökkenteni a valószínűséget?). A probléma vizsgálata mélyebb kutatást igényel, a disszertáció keretein belül nincs mód részletesebb vizsgálatra, a továbbiakban **az azonos célpontok esetén a bekövetkezési valószínűség csökkentésével számolok.**

Eredmények összesítése

Az 1. és 2. adatsorok alapján számolt, különböző tervezési időtartamok esetén várható bekövetkezési valószínűségeket mutatja a 17. táblázat.

		1. adatsor		2. adatsor	
Azonos célpontok száma		1	20	1	20
Épületek elleni VBIED támadás valószínűsége az elkövetkező időtartamban	1 nap	3.19%	0.16%	17.27%	0.94%
	1 hét	20.33%	1.13%	73.47%	6.42%
	1 hónap	62.65%	4.80%	99.50%	23.31%
	1 év	99.99926%	44.62%	100.00%	97.03%

17. táblázat – Bekövetkezési valószínűségek összesítése ⁸⁶

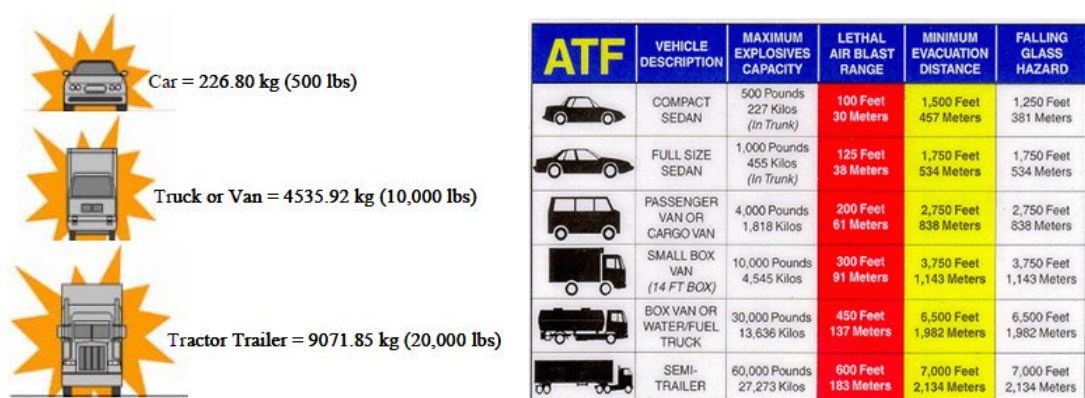
4.5.2. A $p(w | VBIED)$ FÜGGVÉNY ELŐÁLLÍTÁSA

A GTD adatbázis hátránya, hogy – információ hiányában – nem jegyzi fel a robbanás hatását befolyásoló két tényezőt: a célponttól mért távolságot és a robbanóanyag mennyiségét. Megközelítőleg a rekordok 1%-ában van feljegyezve robbanóanyag mennyiségre vonatkozó adat [123]. A szakirodalomban fellelhető adatok a VBIED támadások W mennyiségére vonatkozóan igen szűkszavúak, és jellemzően csak tájékoztató jellegűek, nem adnak statisztikai adatokat. A W mennyiség meghatározása az alábbi módokon történhet:

⁸⁶ Szerző által szerkesztett táblázat (a mintapéldához szükséges értékek kékkel jelölve).

- megakadályozott merénylet esetén a VBIED átvizsgálásával (titkosított adatok),
- utólagos vizsgálatokkal, pl. a kráter alapján (pontatlan adatok),
- a raktérfogat alapján lehetséges maximum érték feltételezése (túlzó adatok)⁸⁷.

A 80. ábrán szereplő szakirodalmi adatok a harctéri megfigyelésekből, jelentésekből szerzett információkra támaszkodnak, a mennyiséget, mint tájékoztató adatot közlik, a gyakoriságról nem tesznek említést. A legnagyobb *W* érték az USAF szerint 9000 kg, a NATO Stanag szerint 4000+ kg, míg az ATF szerint 27.000 kg. Utóbbi kimagaslóan nagy érték, amit a videofelvételek nem támasztottak alá, ettől még természetesen előfordulhat, de a rendkívül nagy érték miatt fontos lenne egy gyakorisági érték is a gazdaságos tervezéshez. Ilyen méretű VBIED-ről számoltak be 2013-ban Afganisztánban, bár ez a VBIED nem robbant fel, mert a járművet sikerült a hatóságoknak lefoglalniuk és hatástalanítaniuk [126].



	A Small / medium calibre projectiles	B Shoulder launched weapons / Rifle grenades	C Battlefield rockets, Artillery and Mortars	D Small / Personnel- borne IEDs	E VBIEDs
5	Automatic cannon 30 mm APDS	Advanced ASM Anti Structure Munition	155 mm artillery 122 mm rocket	Bag / Suitcase 20 kg TNT	Heavy truck / similar > 4000 kg TNT
4	Heavy machine gun 12.7 – 14.5 mm AP	Anti-tank Shaped charge	120 mm mortar 107 mm rocket	Body-borne device 9 kg TNT, fragments	Medium truck 4000 kg TNT
3	Assault / Sniper rifle 7.62 mm AP WC	Anti-personnel Thermobaric charge < 2.5 kg / Conventional	82 mm mortar	Large briefcase 9 kg TNT	Van 1500 kg TNT
2	Assault rifle 5.56 – 7.62 mm AP	40 mm Rifle grenade Shaped charge	60 mm mortar	Package 1.5 kg TNT	Passenger vehicle 400 kg TNT
1	Assault rifle 5.56 – 7.62 mm Ball	(Reserved)	Hand grenade	Letter bomb 0.125 kg TNT	Motorbike 50 kg TNT

80. ábra - Szakirodalmi adatok a figyelembe vehető *W* mennyiségre vonatkozóan [127][128][129]

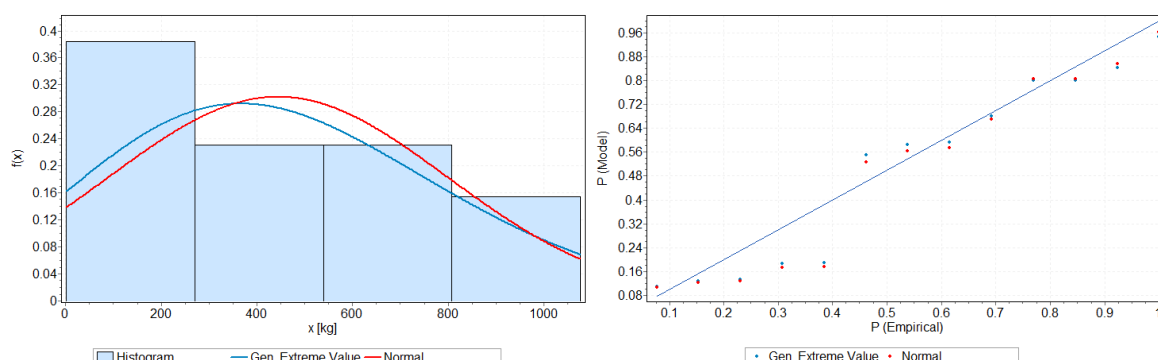
VBIED töltet értékek [kg]												
1,6	468	32	40	114	110	1076	500	510	750	820	600	750
Szórás: 354,7 Átlag: 443,97 Medián: 500												

18. táblázat – Az esettanulmányok alapján felvett *W* értékek

⁸⁷ Az egyik útmutató táblázatában megjegyzésként szerepel, hogy a mennyiségek a raktérfogaton alapulnak [136].

A számítás elvégzéséhez az esettanulmányok (1.2.2. fejezet) robbanóanyag mennyiségeit használom fel (18. táblázat). A minta kisszámú, de valósághű forrásból származik, és alkalmas a számítás bemutatására. A W mennyiség eloszlására kutatásom alapján jelenleg nincs publikált és hozzáférhető információ, de a számítás bemutatása érdekében szükség van rá, hogy valamilyen eloszlást illesszünk a mintákra. Az eloszlástípus illesztését az Mathwave EF szoftverrel végzem el.

A kisszámú minta miatt nem releváns eloszlástípusok is adódhatnak, ezek kiszűrésére feltételt kell szabni: az eloszlásnak elég hosszú farok résszel kell rendelkeznie ahhoz, hogy a minta maximumánál (1076 kg) jóval nagyobb W értékekre is adjon valószínűséget. Nagyságrendileg az 5000 kg-ot tartom még szükségesnek lefedni a sűrűségfüggvénnyel. A mintára illesztett sűrűségfüggvények megfelelőségének mérésére az Anderson-Darling illeszkedési jóságot vettem alapul. Az előzőleg tett feltételnek nem megfelelő eloszlásokat (pl. pareto) figyelmen kívül hagyva a 2 legjobban illeszkedő típus az extrémérték eloszlás, és a normál eloszlás. Illeszkedési jóságuknak mérőszáma lényegében megegyezik: 0.4804 és 0.482. A 2 eloszlástípus a 81. ábrán látható.



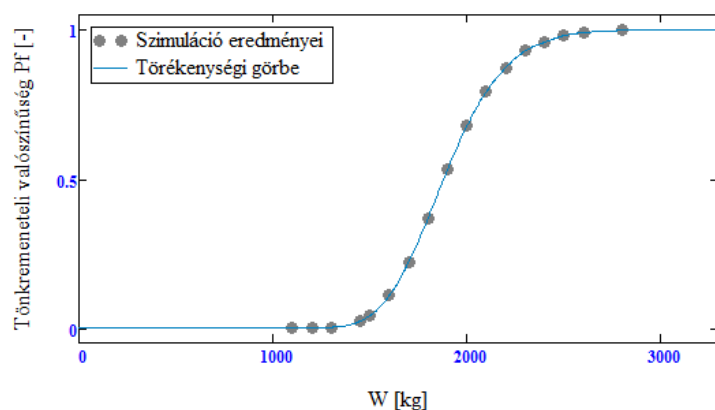
**81. ábra – a, W hisztogramja és az illesztett sűrűségfüggvények (18. táblázat alapján)
b, az illesztett eloszlástípusok P-P diagramja**

A továbbiakban a normál eloszlást fogom használni. A mintának jelentős szórása van a várható értékhez képest, tehát indokolt a csonkolt normál eloszlást használni. A végső számítást elvégző programot a 12. Függelék tartalmazza.

4.5.3. A TÖRÉKENYSÉGI GÖRBÉK ELŐÁLLÍTÁSA

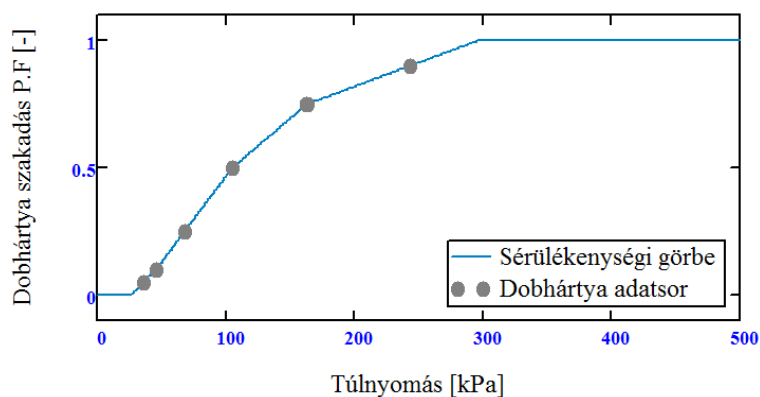
Az 1. feladat esetében a törékenységi görbét valószínűségi módszerrel elő kell állítani. Ehhez a módszer gyorsasága, és mechanikai pontossága miatt a $P-I$ diagram – Monte Carlo szimuláció analízispárosítását választom. A számítás megköveteli, hogy az összes W értéknél ugyanazt a módszert alkalmazzuk. Figyelemmel kell lenni arra, hogy minél nagyobb a β érték, annál több szimuláció szükséges a kimutatásához.

A vizsgált oszlop adatai: 500x500-as keresztmetszetű, C35/40-es betonminőség, 1% hosszvasalással. A törékenységi görbe előállításához a 10. Függelékben bemutatott programot használtam. A szimulációval előállított pontokra cubic spline interpolációt alkalmazva folytonos függvényt illeszthető, ezt mutatja a 82. ábra.



82. ábra – A törékenységi görbe a szimulációval kapott pontokra illesztett függvénnyel (szerzői ábra)

Az egészségügyi károsodások, vagy ablaküvegek betörésének vizsgálatakor felhasználhatók empirikus táblázatok, ahol adatsorként megadták, hogy mekkora hatáznál mekkora a valószínűsége a dobhártya szakadásnak, tüdőkárosodásnak, üvegtörésnek, stb. Ezekre a pontokra lineáris interpolációt alkalmazva kerül előállításra a törékenységi (sérülékenységi) görbe.



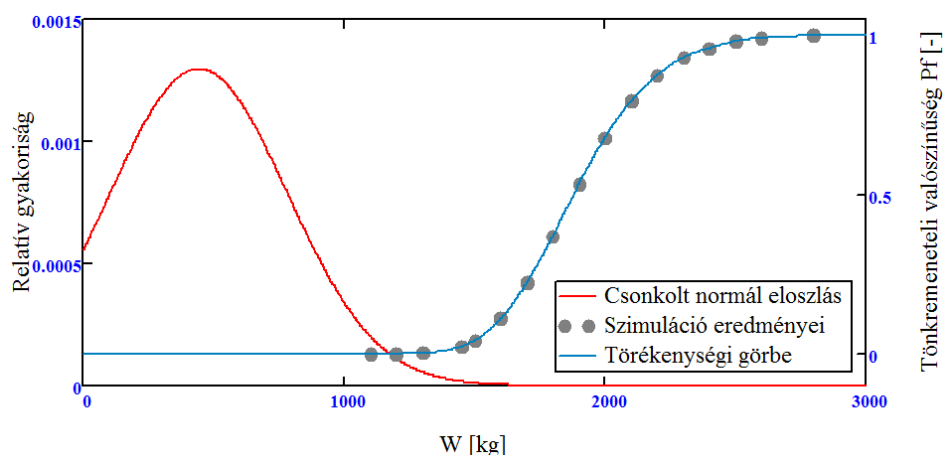
83. ábra – A dobhártyaszakadásra figyelembe vett sérülékenységi görbe (szerzői ábra) [92]

Ezek a táblázatok általában a túlnyomás vagy az impulzus függvényében adják meg a sérülés valószínűségét. Ezzel szemben a felvett hatásgörbe a W függvényében van felírva. A W eloszlását közvetlenül bele lehet írni a programba, minden szimulációs lépcsőben mintát kell generálni a W csonkolt normál eloszlása alapján, majd ezt kiértékelve meghatározni a túlnyomási sűrűségfüggvényt.

4.5.4. A FELADATOK MEGOLDÁSA

Az 1. feladat esetén a célbiztonság 2-nek vehető fel, $T=50$ év esetén. Ezt átszámolva a feladatban adott $T=1$ év élettartamra a cél megbízhatóság: $\beta_{opt}=3.3$ $P_F = 4.6 \cdot 10^{-4}$ (ld. 2.2.4. fejezet).

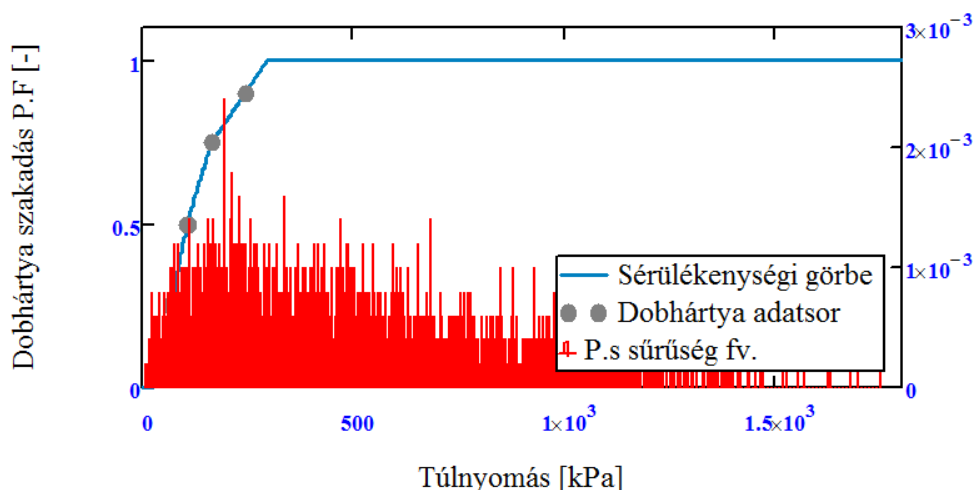
A VBIED támadás előfordulási valószínűsége a tervezési időperiódus alatt: 44.64% (17. táblázat). A számítást a 12. Függelék tartalmazza.



84. ábra – A vizsgált oszlop törékenységi görbéje és a hatásgörbe (szerzői ábra)

Az oszlop az elkövetkező egy évben $\beta = 3.754$ ($P_F = 8.7 \cdot 10^{-5}$) megbízhatósággal megfelel.

A 2. feladat esetén a VBIED támadás előfordulási valószínűsége a tervezési időperiódus alatt 6.42%. A W mennyiséget a csonkolt normál eloszlással vettem figyelembe, a távolságok a 77. ábrának megfelelően. Az R_x távolság szórását a 4.3.1. fejezetben említett módszerrel vettem fel. Az 85. ábra mutatja az analízis eredményét.



85. ábra – A szimulált túlnyomási sűrűségfüggvény és a dobhártyaszakadás sérülékenységi görbéje (szerzői ábra)

Emberek esetén a tönkremeneteli (sérülési) valószínűség a használhatóbb eredmény, a β inkább csak tájékoztató jellegű. Ebben a feladatban nem lehet kimondani, hogy elfogadható-e a kockázat, csupán az lett kimutatva, hogy egy hét alatt mekkora a valószínűsége az adott ponton szolgálatot teljesítő katona dobhártya szakadásának. Miután nem emberéletéről vagy anyagi kárról van szó, nem áll rendelkezésre szakirodalmi adat arra vonatkozóan, hogy mekkora az elfogadható kockázat.

Az adott ponton szolgálatot teljesítő katona az elkövetkező egy hét alatt 5.49% valószínűséggel fog SVBIED támadástól dobhártyaszakadást szenvedni.

4.6. RÉSZÖSSZEGZÉS

A szakirodalmat és saját kísérleti robbantásaink eredményeit felhasználva összegyűjtöttem, melyik paramétert milyen statisztikai jellemzőkkel lehet figyelembe venni egy valószínűségi számítás során. Figyelmet fordítottam ezen kívül a számítási modellek hibáira is. A 9 megvizsgált valószínűségi modell és dinamikai modell párosításból 4 bizonyult használhatónak a célkitűzésben tett feltételek teljesülése mellett. Felsoroltam a módszerek előnyeit, hátrányait, ezek alapján a $P-I$ diagram Monte Carlo analízissel való párosítását találtam a legoptimálisabbnak. Minden módszerhez készült egy parciális biztonsági tényezős megoldás is, így lehetőség nyílt ezeknek a valószínűségi modellekkel való összehasonlítására. Az összehasonlítások során szembe tűnt, hogy az alkalmazásra került módszerben a determinisztikus változókkal végzett számítással való összehasonlítás lényegesen eltérő eredményt ad, mint a többi módszernél. Ennek egyik magyarázata az lehet, hogy más paraméterek érzékenysége a különböző számítási módszerekben, de a különbség hátterét illetően további kutatás javasolt.

Az bemutatott számítási eljárásban külön határoztam meg a robbanási esemény T időtartam alatti előfordulási valószínűségét, és külön a robbanások esetén fellépő W mennyiséget. A W mennyiség eloszlását csonkolt normál eloszlással vettem figyelembe. Az emberi sérülékenységi görbe nem W függvényében van megadva, a W -t is valószínűségi változóként kezelve lehetett megoldani a feladatot. A teljes számítási idő a törékenységi görbe előállítását is figyelembe véve kb. 30 perc. Ennek alapján elmondható, hogy sikeresen, és elfogadható futási idővel megválaszolható volt a mintapélda két kérdése, **tehát a bemutatott módszer és a Mathcad szoftverkörnyezet alkalmas az objektív biztonság kimutatására a robbantások elleni tervezés során.**

ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK

- A katonai táborok védelmét a vonatkozó NATO előírásoknak megfelelően kell megszervezni, kitüntetett figyelemmel a védőtávolságokra, útakadályokra, beengedési pontokra. A támaszpont védelmét romboló kaliberű fegyverzettel kell ellátni, hogy az újabban alkalmazott páncélozott SVBIED-k esetében is kilőhető legyen a merénylet. A bázis védelme hiába felel meg az előírásoknak, hiába van a mérnöki tervezés, továbbra is fontos tényező az emberi éberség, és a reális helyzetértékelés.
- A KI elemek kijelölése folyamatában eredményesen lehetne használni a szubjektív kockázatelemzési eljárásokat. Ezek egymáshoz képest pontoszák be a vizsgált elemeket, így lehetővé válna csak a legfontosabb KI elemek kijelölése. Az objektív biztonság kimutatásával elég a védelem kialakítása során foglalkozni. A jelenlegi, következményalapú vizsgálat érzékeny a meghúzott kritériumokra. (Vagy túl sok elem kerül bele a listába, vagy olyanok maradnak ki a listából, akiknek ott lenne a helyük.)
- A terrortámadások videofelvételeinek elemzése hasznos információkkal szolgál. A megvizsgált felvételek visszaigazolták a Force Protection-ben már ismert alapelveket (kerületi védelem szerepe, távolság szerepe). A vizsgálat során nyert W mennyiségre vonatkozó adatokat felhasználtam a később bemutatott számításban.
- A robbanások elleni tervezés szabványosításának akadályaként a következő szempontokat azonosítottam: az érdekelt szereplők csekély száma, a különleges szaktudásra való féltékenység, a szereplők által elismert hitelesítő szerv hiánya, és a szereplők általános szabványra való igényének a hiánya.
- Meglátásom szerint Magyarországon a műszaki problémák egy része csak jogi, adminisztratív szinten van kezelve. Ide sorolható a KI védelem terén tapasztalható szabályozás, ahol jogszabályi szinten meghatározzák a szereplőket és azok kötelességeit, de mindennek a gyakorlatban valós és műszaki tartalommal kell megtelnie. Ennek teljesülésében fontos szerepe van az oktatásnak, a továbbképzésnek, és a műszaki hozzáállásnak.

Robbanásteher esetében a szerkezeti tervezést elkészítő, befogadó, hitelesítő adminisztrációs hierarchiának még a csúcán sincs kellő szakértelmű személy, aki megítélhetné, ki képes hitelt érdemlően elvégezni a tervezést. A mérnöki felelősségvállalás hatványosan érvényesül egy olyan helyzetben, ahol nincs „teherpróba” és kötelezően használandó szabvány sem. A magyar beruházások esetében fellépő robbantásvédelmi tervezések során megfontolandónak tartom egy néhány fős bizottság létrehozását, ami hivatott lenne dönten arról, hogy a tervezést végző személy alkalmas-e az adott műszaki problémát a kor színvonalának megfelelően megoldani.
- Kísérleti robbantások során mértem a töltetek által kifejtett lökeshullámok fizikai jellemzőit. Az eredményekkel több szakirodalomban található jelenséget és értéket igazoltam (Hopkinson arányosítási törvény, töltettényezők, Friedlander képlet).
- A CFD futtatások során a következő jelenségekre mutattam rá:
 - egy többszintes épület nagy homlokzatát érő lökeshullám esetén az egyszabadságfokú modell túlméretezéshez vezet, mert bár az épület első rezgésalakja az SDOF rendszernek megfelelő, a lökeshullám a homlokzati szétterjedése miatt egy másik rezgésalakot is gerjeszt,

- az oklahomai robbantásban is használt, kumulatív elrendezése a tölteteknek nem jelent jelentős nyomásnövekedést a lökeshullámban, melynek oka a nem perfekt geometria. A kumulatív hatás sokkal érzékenyebb a geometriai pontosságra, minthogy azt hordók raktérben való elhelyezésével el lehessen érni,
 - egy utcában haladó lökeshullám túlnyomását és impulzusát a betörő ablakokon keresztül történő „ventilláció” 15-30%-kal tudja csökkenteni.
- Használható formában elkészítettem annak a két dinamikai méretezési eljárásnak a programját, amelyet a szakirodalom leginkább elismer, és a robbanási hatásokkal foglalkozó múltbeli magyar szakirodalomban nem-, vagy csak korlátozottan voltak megemlítve. Az átlaggyorsulások módszerét kiegészítettem a dinamikus szilárdságnövekedés iteratív figyelembevételével, ezt az opciót még célirányos szoftverek sem nyújtják (RCBlast). A programok második lépcsőjeként elkészítettem a valószínűségi modellekkel való párosításokat is.
- A méretezéselméleti módszereket a célkitűzésem figyelembe vételével dolgoztam be a programokba, eszerint az elkészített számítási eljárás és program legyen érthető és adaptálható egy átlagos mérnöki végzettséggel, vagy esetleg betanított szinten általános műszaki végzettséggel. További kritérium volt, hogy a problémák széles spektrumát lefedje, általánosan alkalmazható legyen. Ezeknek a szempontoknak a FOSM és az általam használt FORM algoritmus nem feleltek meg, a nyers Monte Carlo analízis bizonyos esetekben ugyan a túlzott erőforrás igénye miatt előnytelené válik, de a P-I diagramokkal együtt egy gyors és eredményes módszert alkotnak.
- Az élettartam alatti biztonság kimutatása szerkezeti elemekre és emberi egészségkárosodásra is be lett mutatva. A vizsgált példában a W eloszlástípusának nem volt nagy jelentősége. Az azonos típusú célpontok száma jelentősen befolyásolja a veszélyeztetettséget, és ezáltal a biztonságot. A rendszer moduláris felépítésű, bármely lépését külön helyettesíteni lehet egy pontosabb rész-eljárással. A legfontosabb adatot, a jelenleg a szabályozásból hiányzó figyelembe veendő robbanóanyag mennyiséget saját kutatási munkám alapján állapítottam meg.

ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

- Bemutattam a robbantásos cselekményeknek egy új típusú vizsgálatát, a merénylők által készített propaganda felvételek elemzését, ami eredményes módszer a W mennyiség becslésében.
- Az általam koordinált kísérletben Magyarországon elsőként mértünk magas frekvenciás nyomásshordókkal robbantási paramétereket. Közreadtam a vizsgált hexogén és TNT pellet robbanóanyagok $P(Z)$ és $I(Z)$ képleteit.
- Magyarországon elsőként végeztem el kutatási munkám során a lökéshullámok épületekkel való interakciójának numerikus áramlástanal történő modellezését. Megállapításra került, hogy a VBIED kumulatív hatása elhanyagolható.
- A nemzetközi mérnöki gyakorlatnak megfelelő programokat írtam az egyszerű tartók robbanási hatásokra való tervezésére, valamint ezeknek a különböző valószínűségi modellekkel való párosítására. A $P-I$ diagramok és Monte Carlo módszer párosításával egy általánosan használható, és gyorsan futó módszert alkottam.
- Robbanásterhekre adaptáltam egy – az építőmérnöki szakmában katasztrófhelyzetekre használt – komplex tervezési eljárást, amellyel kvantitatív módon kimutatható a vizsgált szerkezet biztonsága tetszőleges élettartam alatt.

Kutatás lezárva: 2016. február 10.

Román Zsolt

AJÁNLÁSOK

- A mérnöki szakterületen dolgozók számára ajánlom az általam megírt, dinamikai méretezést elvégző programokat (2. 3. 4. 5. Függelékek), amelyekkel az egyszerű tartószerkezeteket a nemzetközi szakmai gyakorlatnak megfelelő színvonalon lehet robbanásterre méretezni.
- A biztonságtechnikai, honvédelmi szakterületen dolgozóknak és a fegyveres, rendfenntartó szervek számára ajánlom az általam megírt teljes valószínűségi módszert használó programokat (10. 11. 12. Függelékek), amelyekkel objektív módon kiszámítható egy szerkezet, vagy ember biztonsága, sérülékenysége.
- Különösen ajánlom a bemutatott módszer felhasználhatóságának vizsgálatát és alkalmazását az Erbilbe telepített magyar csapatok támaszpontjainak kialakítása során.
- További kutatásra érdemesnek tartom a videofelvételek (és rendfenntartó szervek jelentései) alapján történő VBIED robbanóanyag mennyiség statisztikai kiértékelését.
- További kutatásra érdemesnek tartom a FORM analízis kifinomultabb megoldási eljárásait, azok robbantási dinamikai modellekkel való párosításának vizsgálatát.
- További kutatásra érdemesnek tartom a $P-I$ diagramok és FOSM módszerek használatakor – más módszerekkel szemben – tapasztalt nagyobb β érték okait.

A TÉMAKÖRBEN KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓIM

Lektorált folyóiratban megjelent cikkek:

Magyar folyóirat, idegen nyelven

Nagy, R., Román, Zs.: Channelling and attenuating effects of blast parameters in urban street geometry with glazing. Műszaki Katonai Közlöny, XXIII. évf. 2. szám, pp. 38-46. ISSN 2063-4986

Román, Zs.: Convergence study of 1-D CFD cell size for shockwave parameters using Autodyn hydrocode. AARMS Vol. 12, No. 2. 2013 pp. 213-220. ISSN: 1588 8789

Magyar folyóirat, magyar nyelven

Román, Zs.: Acélszerkezetű irodaépület külső robbanásteherre történő tervezése. ACÉLSZERKEZETEK 8:(2) Magész pp. 76-83. 2011 ISSN: 1785-4822

Román, Zs.: A robbantásos merényletek elleni védekezés során felmerülő kérdések, számítási módszerek, és alkalmazásuk: A problémakör múltja és jelene. Műszaki Katonai Közlöny XX. évf. 1-4: pp. 273-308. 2010 ISSN: 1219-4166

Román, Zs., Nagy, R.: Áramlástani megközelítés alkalmazása a robbantások elleni védekezésben. Műszaki Katonai Közlöny on-line folyóirat, XXII. évfolyam, TÁMOP Különszám, 2012. november, pp. 45-56. ISSN 2063-4986

Román, Zs. Nagy, R.: Nagyszabású robbantásos merényletek jellemzői a közel-keleti hadszínterek alapján. Repüléstudományi Közlemények XXV. évfolyam, 2013. 2. szám pp. 144-164. HU ISSN 1789-770X

Román, Zs.: A védett létesítmények tervezésével kapcsolatos számítási eljárásokról a DSWA DAHS-CWE tükrében. Műszaki Katonai Közlöny, XXIII. évf. 2. szám, pp. 222-234. ISSN 2063-4986

Román, Zs.: Teljes valószínűségi módszerek használata a kritikus infrastruktúra védelemben. Műszaki Katonai Közlöny, XXV. évf. 2. szám, pp. 131-142. ISSN 2063-4986

Konferencia kiadványban megjelent előadás:

Külföldi konferencia, idegen nyelven

Román, Zs., Nagy, R.: Design of an airport office building for exterior blast loading: Odolnost' ocel'ových budov na výbuch. In: Ing Mikuláš Beránek (szerk.) Blasting Techniques 2012: TRHACIA TECHNIKA. pp. 148-163. ISBN: 978-80-970265-4-7

Román, Zs.: Properties of SVBIED attacks and related building damages based on middle east conflicts. Proceedings of the International Conference on Military Technologies 2013

(ICMT'13), Published by: University of Defence, Brno, 2013. ISBN: 978-80-7231-917-6 Printed Proceeding, ISBV 978-80-7231-918-3 Proceedings on CD, pp. 271-282.

Nagy, R., Román, Zs.: Cumulative effect of shaped, vehicle born improvised explosive charges. Proceedings of the International Conference on Military Technologies 2013 (ICMT'13), Published by: University of Defence, Brno, 2013. ISBN: 978-80-7231-917-6 Printed Proceeding, ISBV 978-80-7231-918-3 Proceeding on CD, pp. 319-328.

Nagy, R., Román, Zs.: Vlastnosti rázovej vlny-porovnanie parametrov získaných empirickými výsledkami s numerickými modelmi - Shock wave properties - a parametric comparison of empirical results and numerical simulations. Conference Proceedings from the International Conference Blasting Techniques 2013. - Slovakian Society for Blasting and Drilling Works, ISBN: 978 – 80 - 970265 – 5 – 4, Stara Lesna, 2013. 05. 23-24. pp. 312-322.

Román, Zs., Nagy, R.: Porovnanie hodnôt výšky trojného bodu získaných empiricky s hodnotami podľa výpočtu - Comparison of empirical and CFD calculated height of triple point (HOTP) values. Conference Proceedings from the International Conference Blasting Techniques 2013. - Slovakian Society for Blasting and Drilling Works, ISBN: 978 – 80 - 970265 – 5 – 4, Stara Lesna, 2013. 05. 23-24. pp. 204-212.

Magyar konferencia, magyar nyelven

Román, Zs., Nagy, R.: Áramlástani megközelítés alkalmazása a robbantások elleni védekezésben. Robbantástechnika 2012, a „Fúrás-robbantástechnika 2012” Nemzetközi Konferencia, Balatonkenese, 2012. szeptember 19-21. konferencia kiadványa, pp. 68-79. HU ISSN 1788-5671

Kutatási jelentés:

TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások” elnevezésű projekt "Építmények védelme, megerősítése robbantásos cselekmények ellen" ZÁRÓ JELENTÉS (Elérhető: Óbudai Egyetem)

5. fejezet: Román, Zs., Nagy, R.: Lökéshullámok modellezése, és komplex térben való terjedésük vizsgálata

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Biztonságpolitikai Szemle – Corvinák – Terrorizmus – 2. Új típusú biztonsági kihívások. Corvinus Külügyi és Kulturális Egyesület http://biztpol.corvinusembassy.com/?module=corvinak&module_id=4&cid=32 Elérés: 2015. 08. 29.
- [2] UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC 4-020-01) – DoD Security Engineering Facilities Planning Manual. US Department of Defense 2008
- [3] Umpleby, S. A.: Physical Relationships among Matter, Energy and Information. Systems Research and Behavioral Science Vol. 24, No. 3, 2007, pp. 369-372.
- [4] Szilard, L.: Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen. Zeitschrift für Physik 1929; 53: pp. 840-856. Springer-Verlag, Berlin (Habilitációs dolgozat)
- [5] Haig, Zs., Várkonyi, I.: Hadviselés az információs hadszíntéren. Zrínyi Kiadó 2010 Budapest ISBN: 9633273919
- [6] Dr. Kovács, F.: A kritikus infrastruktúra védelmének európai és hazai elvei. Előadásdiák 2013 Nemzeti Közszerolálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola
- [7] Halász, P.: A védelmi infrastruktúra főbb alkotó elemeinek kölcsönhatása továbbá közös fejlesztésük lehetőségei. (PhD értekezés) ZMNE, Budapest, 2006.
- [8] Green Paper on an European programme for critical infrastructure protection – COM (2006) 786 final
- [9] Dr. Kovács, F.: A kritikus infrastruktúra védelme I. Előadásdiák 2013 Nemzeti Közszerolálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola
- [10] NATO 162 CDS 07 E rev. 1 – The Protection of Critical Infrastructures (Committee Report) 2007
- [11] Lacey, D.: Managing the Human Factor in Information Security. Wiley 2009 ISBN: 978-0-470-72199-5
- [12] CT Block termékismertető - Townscape Products termékkatalógus <http://www.townscapeproducts.co.uk/all-products/vehicle-defence/ct-block-square-edge-corners> Elérés: 2015. 08. 29.
- [13] Historical Analysis of the 14-15 February 1945 bombing of Dresden. US Air Force Historical Division. 1945
- [14] Arango, T.: Jihadists Rout Kurds in North and Seize Strategic Iraqi Dam. The New York Times 2014. 08. 07. http://www.nytimes.com/2014/08/08/world/middleeast/isis-forces-in-iraq.html?smid=tw-share&_r=1 Elérés: 2014. 08. 17.
- [15] Sullivant, J.: Strategies for Protecting National Critical Infrastructure Assets. Wiley 2007. ISBN: 978-0-471-79926-9

- [16] Thousands evacuated as Elbe bursts dam in German floods. The Guardian 2013. 06. 09. <http://www.theguardian.com/world/2013/jun/09/german-floods-elbe-thousands-evacuated> Elérés: 2015. 07. 07
- [17] Dr. Lukács, L.: Épületek elleni robbantásos cselekmények és jellemzőik. Műszaki Katonai Közlöny XXII. évfolyam, 2012 különszám ISSN: 2063-4986
- [18] Wikipedia: The Manchester Bombing. https://en.wikipedia.org/wiki/1996_Manchester_bombing Elérés: 2015. 08. 30.
- [19] As-Sahab Media: The Manhattan Raid (iszlamista propagandafilm) 2006 szeptember
- [20] National Consortium for the Study of Terrorism and Responses to Terrorism (START). (2013). Global Terrorism Database [Data file]. <http://www.start.umd.edu/gtd> Elérés: 2014. 04. 09.
- [21] Kohlmann, E. F.: Two decades of Jihad in Algeria: the GIA, the GSPC and Al-Qaida. The NEFA Foundation, May 2007
- [22] Shirokorad A. B.: A szovjet tüzérség enciklopédiája (Широкоград А. Б. Энциклопедия отечественной артиллерии.), Харвест, 2000 ISBN: 985-433-703-0
- [23] Hatala, A., Kelemen, F.: Jegyzet a katonai robbanótestek szerkezetének és működésének megismeréséhez és megértéséhez. Budapest, 2003 Vitaliq Bt.
- [24] Daruka, N.: A bűnös célú/terror jellegű robbantások és az ellenük való védekezés lehetőségei, különös tekintettel a tűzszerész feladatok ellátására. Phd értekezés. Nemzeti Közzolgálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola 2013 Budapest
- [25] Partlow, J., Whitlock C.: Attack on U.S. outpost in Afghanistan worse than originally reported. The Washington Post, 2012. 06. 16. http://www.washingtonpost.com/world/national-security/attack-on-us-outpost-in-afghanistan-worse-than-originally-reported/2012/06/16/gJQAlyaihV_story.html Elérés: 2013. 01. 02.
- [26] Compressed Gas Cylinders as Components of IEDs. US Department Of Homeland Security & Federal Bureau of Investigation DHS-FBI Information Bulletin Sep. 10, 2004⁸⁸
- [27] Medvedev urges swift action on bomb attack in S. Russia. Ria Novosti, 2009-08-18 <http://en.rian.ru/russia/20090818/155848718.html> (Elérés: 2012.08.28.)
- [28] Baghdad Bombings October 25, 2009 Counterterrorism Bureau New York City Police Department <http://fieldcommand.org/wp-content/uploads/2013/05/Baghdad-Bombings-on-October-25-2009.pdf> Elérés: 2014. 05. 01.
- [29] Bellamy, Zajtchuk: Pathology of Blast and Impact Injuries. US Army Department of Surgery

⁸⁸ For Official Use Only (FOUO) – Korlátozott hozzáférésű anyag

- [30] Stewart, D. J.: President Bush Jokes About War in Iraq! http://www.jesus-is-savior.com/Evils%20in%20Government/bush_jokes.htm Elérés: 2014. 05. 01.
- [31] Lenhardt, M. K. Phd (Editor): Combat Casualty Care (Lessons learned from OEF and OIF). Office of the Surgeon General, Department of the Army, USA.
- [32] Schmitt E., Masood S.: Head Injury Killed Bhutto, Report Said to Find. The New York Times, 2008. 02. 08. http://www.nytimes.com/2008/02/08/world/asia/08bhutto.html?_r=1 Elérés: 2014. 09. 02
- [33] Dr. Hernád, M.: A robbanás és a robbanóanyagok emberi szervezetre gyakorolt hatásai és megelőzésének lehetőségei. Doktori Értekezés. Nemzeti Közsolgálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola. 2013 Budapest
- [34] 1995. évi XXVIII. törvény a nemzeti szabványosításról
- [35] 45/1997. (XII. 29.) KTM rendelet az építészeti-műszaki tervdokumentációk tartalmi követelményeiről
- [36] BakerRisk – Design of Blast Resistant Structures. Course Notes 2013
- [37] UFC-3-340-02 Structures to resist the effects of accidental explosions US Army DoD 2008
- [38] Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects (DAHS CWE Manual). Defense Special Weapons Agency, USA 1998 ⁸⁹
- [39] dr. Pocsikai, Á.: Gondolatok a kritikus infrastruktúrák terrortámadással szembeni védelmének szabályozásáról. (T)error & Elhárítás. 2012/I.
- [40] 253/1997. (XII. 20.) Korm. rend. az országos településrendezési és építési követelményekről (OTÉK)
- [41] 40/2002. (III. 21). Korm. rend. a sajátos építményfajták körébe tartozó honvédelmi és katonai célú építményekre vonatkozó építésügyi hatósági engedélyezési eljárások szabályairól.
- [42] 45/1997. (XII. 29.) KTM rend. az építészeti-műszaki tervdokumentációk tartalmi követelményeiről
- [43] 2001. évi CXII. törvény a mérésügyről szóló 1991. évi XLV. törvény és a nemzeti szabványosításról szóló 1995. évi XXVIII. törvény módosításáról
- [44] HM MN Beruházási és Fenntartási Főnökség Fejlesztési Osztály 1986 ⁸⁹
9. ea. A léglökés hullámok által keltett dinamikus terhek hatása a létesítményekre, és azok szerkezeteire. Nyt. szám: 4/026
11. ea. Speciális erődítési létesítmények vasbeton szerkezeteinek méretezése nukleáris

⁸⁹ For Official Use Only (FOUO) – Korlátozott hozzáférésű anyag

- robbanás mechanikai és hagyományos fegyverek általános hatásaira. Nyt. szám: 4/031
18. ea. Bejáratok szerkesztése és méretezése. Nyt. szám: 4/068
- [45] Dr. Goschy, B.: Építmények tervezése rendkívüli terhekre és hatásokra. Műszaki Könyvkiadó Budapest, 1984 ISBN: 963 10 5845 X
 - [46] Dr. Goschy, B.: Rendkívüli hatások és terhek figyelembevétele építmények tervezésénél. BME Mérnöki Továbbképző Intézet Budapest 1982 ISBN: 963 431 3515
 - [47] Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities. American Society of Civil Engineers ISBN: 0-7844-0265-5
 - [48] Report for the Design of Concrete Structures for Blast Effects (ACI 370R-14) American Concrete Institute Committee 370 2014 ISBN: 978-0-87031-898-6
 - [49] Eurocode 1 – Actions on structures – Part 1-7: General actions – Accidental actions (July 2006) CEN
 - [50] JCSS-OSTL/DIA/VROU – Probabilistic Model Code 12th draft. 2001 ISBN 978-3-909386-79-6
 - [51] Farkas, Huszár, Kovács, Szalai: Betonszerkezetek méretezése az Eurocode alapján. TERC, Budapest, 2006. ISBN: 963 9535 46 X
 - [52] Robinson, D. G.: A Survey of Probabilistic Methods Used in Reliability, Risk and Uncertainty Analysis: Analytical Techniques I. Sandia National Laboratories – Sandia Report SAND98-1189 – June 1998
 - [53] Nowak, A. S., Collins, K. R.: Reliability of structures. McGraw Hill 2010. ISBN: 0-07-048163-6
 - [54] Ang, A., Tang, W. H., 1984, “Probability Concepts in Engineering Planning and Design –Volume II: Decision, Risk and Reliability,” Wiley and Sons, New York
 - [55] Jakub Konka: Unconstrained nonlinear programming: Nelder-Mead Simplex algorithm. <http://www.jakubkonka.com/2013/10/22/nelder-mead-simplex.html>
Elérés: 2015. 09. 02.
 - [56] Luersen, Riche, Guyon: A constrained, globalized, and bounded Nelder–Mead method for engineering optimization. Structural and Multidisciplinary Optimization Vol 27, May 2004 Issue 1 pp. 43-53.
 - [57] Powell, M. J. D.: A Direct Search Optimization Method That Models the Objective and Constraint Functions by Linear Interpolation. Advances in Optimization and Numerical Analysis Vol 275 in: Mathematics and Its Applications. pp. 51-67.
 - [58] ISO 2394:2012 General principles on reliability for structures.
 - [59] EN 1990:2002 Eurocode – Basis of structural design. CEN April 2002

- [60] Blockley, D. (editor): Engineering Safety. Chapter 3 Design Codes (by T.V. Galambos) McGraw Hill 1992 ISBN: 0-07-707593-5
- [61] Hirata, Ishikawa: Probabilistic evaluation of desirable target seismic level derived from requirements of users. 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No. 219.
- [62] Budapesti Műszaki Egyetem – Hidak és Szerkezetek Tanszék – Méretezéselmélet tantárgy jegyzet.
- [63] TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások” kutatási zárójelentés. Óbudai Egyetem 2013
- [64] Magyar Honvédség: Robbantási Utasítás (1971)
- [65] Gottlieb, J. J., Ritzel, D. V. and Miskew, I. A.: Signal Processing of Shock-wave overpressure records. Defence Research Establishment: Ralston: Alberta. August 1981
- [66] Román, Zs.: Épületen kívüli robbanások modellezése és vázas épületen esetén való alkalmazása. BSc Diplomamunka BME Építőmérnöki Kar Hidak és Szerkezetek Tanszéke 2009/2010 I.
- [67] Friedlander, F. G., 1946, The diffraction of sound pulses. I. Diffraction by a semi-infinite plate, Proc. Roy. Soc. Lond. A, 186, pp. 322-344.
- [68] Cooper, P. W.: Comments on TNT equivalence. 20th International Pyrotechnics Seminar
- [69] Hopkinson, B.: British Ordnance Minutes; Report No. 13563; British Ordnance Office, 1915.
- [70] AMCP 706-181 Engineering Design Handbook. Explosions in Air Part One. Army Materiel Command, Alexandria, Virginia. July, 1974
- [71] Mills, C.A.: First International Conference on "Concrete for Hazard Protection" Edinburgh 1987
- [72] Györgyi, J.: Szerkezetek Dinamikája. Műegyetemi Kiadó, Budapest 2006 ISBN: 9634208681
- [73] Kingery, C. N., Bulmash, G.: Airblast Parameters From TNT Spherical Air Bursts and Hemispherical Surface Bursts, ARBRL-TR-02555, April 1984. Colorado Springs, Colorado July 24-29, 1994
- [74] Brode, H. L.: Numerical Solution of Spherical Blast Waves. Journal of Applied Physics 1955
- [75] Cooper, P. W.: Explosives Engineering. Wiley 1996 ISBN: 0-471-18636-8
- [76] Nagy, R.: History of the basic models of shock and detonation waves. Hadmérnök VII. évfolyam 2. szám 2012

- [77] Krehl, P.: History of Shock Waves Explosions and Impact. Springer 2009 ISBN: 978-3-540-20678-1
- [78] Lee, E. L.: Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products University of California 1968
- [79] ANSYS Inc. Autodyn, 2012. User Manual Version 13.
- [80] Gruber, J. ifj., Szentmártonyi, T.: Gázdinamika. Tankönyvkiadó Budapest 1953
- [81] Dor, G. B.: Shock Wave Reflection Phenomena. Springer ISBN: 978-3-540-71381-4
- [82] Hoddeson, L., Henriksen, W.: Critical Assembly. A technical History of Los Alamos during the Oppenheimer Years. 1943-1945 Cambridge University Press 1993 ISBN: 0-521-44132-3
- [83] The RAND Corporation: A Million Random Digits with 100,000 Normal Deviates. 1955 ISBN: 978-0833030474
- [84] Román, Zs., Nagy, R.: Áramlástan megközelítés alkalmazása a robbantások elleni védekezésben. Fúrás-Robbantástechnika 2012 Konferencia, Balatonkenese. HU ISSN: 1788-5671
- [85] Román, Zs.: „Acélszerkezetű épület pontosított vizsgálata külső robbanásteherre” MSc Diplomamunka BME Építőmérnöki Kar Hidak és Szerkezetek Tanszéke 2011/2012 II.
- [86] Román, Zs., Nagy, R.: Cumulative effect of shaped, vehicle born improvised explosive charges. Proceedings of the International Conference on Military Technologies 2013 (ICMT'13), Published by: University of Defence, Brno, 2013. ISBN:978-80-7231-917-6 Printed Proceeding, ISBV 978-80-7231-918-3 Proceeding on CD, pp. 319-328.
- [87] Nagy, R., Román, Zs.: Channelling and attenuating effects of blast parameters in urban street geometry with glazing. Műszaki Katonai Közlöny, XXIII. évf. 2. szám, pp. 38-46. ISSN 2063-4986
- [88] Mutalib, Hao: Development of P-I diagrams for FRP strengthened RC columns. International Journal of Impact Engineering Vol. 38 2011. pp. 290-304.
- [89] Safety and Protection of built Infrastructure to Resist Integral Threats (SPIRIT) Project reference: 242319 [FP7-SECURITY]
http://cordis.europa.eu/project/rcn/95261_en.html Elérés 2016. 01. 31.
- [90] Biggs, J. B.: Introduction to structural dynamics. McGraw Hill 1966 ISBN: 07-0052557
- [91] Hunyadi, Lukács, Mueller: A robbantások elleni védekezés feladatai. BME Mérnökto-vábbképző Intézet 1993
- [92] Mays G. C., Smith, P. D.: Blast effects on buildings. Thomas Telford 1995 ISBN: 0 7277 2030 9

- [93] Swisdak M.: Simplified Kingery Airblast Calculations. Indian Head Division/Naval Surface Warfare Center – 1994.
- [94] Ward, I., 2014, DynamAssist – a structural dynamics handbook for Mathcad, Version 6.2, www.dynamassist.com Elérés: 2014. 05. 20.
- [95] Craig, R. R. Jr.: Structural Dynamics – An introduction to computer methods. Wiley 1981. ISBN: 0-471-04499-7
- [96] CAN-CSA A23.3-14 Design of concrete structures.
- [97] Chopra A. K.: Dynamics of Structures. Pearson Prentice Hall 1995 ISBN: 013156174X
- [98] Smith, Hetherington: Blast and ballistic loading of structures. Butterworth-Heinemann 1994. ISBN: 0-7506-2024-2
- [99] Syed et al: Concrete damage assessment for blast load using pressure-impulse diagrams. Earthquake Engineering in Australia, Canberra, 24-26 November 2006.
- [100] Nwankwo et al: Pressure-Impulse Diagrams for Blast Loaded Continuous Beams Based on Dimensional Analysis. Journal of Applied Mechanics 80(5), 051011 (Jul 12, 2013)
- [101] Jacques, E.: 2012. RCBLAST (Version 0.5.1) [Computer program] <http://www.rcblast.ca/> Elérés: 2013. 12. 23.
- [102] Twisdale, Sues, Lavelle: Reliability-based analysis and design methods for reinforced concrete protective structures. Applied Research Associates Final Report 1993 April
- [103] Netherton, Stewart: Blast Load Variability and Accuracy of Blast Load Prediction Models. International Journal of Protective Structures Vol. 1, Number 4 December 2010
- [104] CONWEP. (1991). Conventional Weapons Effects Program. Prepared by D.W. Hyde, US Waterways Experimental Station
- [105] Gelfand, B., Silnikov, M.: Blast Effects Caused By Explosions (translated from russian) European Research Office of the US Army, 2004 Contract Number N62558-04-M-0004
- [106] Hustrulid, W. A.: Blasting Principles for Open Pit Mining CRC 1999 ISBN: 9789054104582
- [107] Petes, J. and Tempo, K.: ANFO detonation and blast characteristics of 600ton unconfined charges. Proceedings of the 12th International Symposium of Explosives and Pyrotechnics, 1984 pp. 99–110.
- [108] Bogosian: Measuring uncertainty and conservatism in simplified blast models. 30th Explosives Safety Seminar, August 2002, Atlanta, Georgia.
- [109] Kuchma, D. A.: Simplified shear provisions of the AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. PCI Journal May-June 2008 ISSN: 08879672

- [110] Ballio, Federico: Theory and Design of Steel Structures. Chapman and Hall 1983. ISBN: 0-412-23660-5
- [111] Dr. Ujhelyi, J.: A beton szilárdsági szórásának és a szilárdság valószínű eloszlásának a vizsgálata. Építéstudományi Intézet Kutatási Jelentés, 1978. december
- [112] Kala, J., Kala, Z.: Influence of Yield Strength Variability over Cross-Section to Steel Beam Load-Carrying Capacity. Nonlinear Analysis: Modelling and Control, 2005, Vol. 10, No. 2, pp. 151–160.
- [113] Dr. Szalai, K.: Kéttámaszú vasbeton gerenda megfelelőségének ellenőrzése I. szintű valószínűségi méretezés alapján. (Vasbetonelmélet c. tantárgyi segédlet, BME Hidak és Szerkezetek TSZ, 2009)
- [114] ACI 117-10 - Specification for Tolerances for Concrete Construction and Materials
- [115] Karmazínová, Melchner: Influence of Steel Yield Strength Value on Structural Reliability. Recent Researches in Environmental and Geological Sciences. ISBN: 978-1-61804-110-4
- [116] „2R Soft” Reliability and Risk Analysis software
<http://risk-reliability.uniandes.edu.co/wiki/wiki2/doku.php?id=start>
 Elérés: 2014. 05. 03.
- [117] EN1992-1-1-2005 Design of concrete structures. CEN
- [118] Deák, Erdélyi, Fernezelyi, Kollár, Visnovitz: Terhek és hatások. BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék 2006. HU-ISBN: 963-86129-5-9
- [119] Rajcic, Kirkegaard: Robustness analysis of big span glulam truss structure. 2010 Structures and Architecture ISBN 978-0-415-49249-2
- [120] Stewart, M.G., Netherton, M. D., Rosowsky, D. V.: Terrorism Risks and Blast Damage to Built Infrastructure. Natural Hazards Review ASCE August 2006 ISSN: 1527-6988
- [121] Telesca, Lovallo: Are global terrorist attacks time-correlated? Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. Instituto di Metodologie per l’Analisi Ambientale. Tito, Italy. 2005
- [122] Roggio, B.: Afghanistan: Charting the violence in 2007. Long War Journal January 13, 2008 http://www.longwarjournal.org/archives/2008/01/afghanistan_charting.php
 Elérés: 2015. 04. 04.
- [123] Fischer, A.: Szándékos bombatámadás kockázata egy európai épület esetén. TDK dolgozat 2013 Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar
- [124] 2012. évi CLXVI. törvény a létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről

- [125] The Crimean Energy Blockade: What You Need to Know. Sputnik News 2015 Nov. 22. <http://sputniknews.com/europe/20151122/1030550351/ukraine-crimea-energy-blockade.html> Elérés: 2015. 12. 10.
- [126] Web Desk: Pakistani was driving world's largest truck bomb near Af-Pak border: Report. The Express Tribune November 14, 2013 <http://tribune.com.pk/story/631967/pakistani-was-driving-worlds-largest-truck-bomb-near-af-pak-border-report/> Elérés: 2015. 07. 25.
- [127] NATO STANAG 2280 MC MILENG (EDITION 1) – Design Threat Levels and Handover Procedures for Temporary Protective Structures. 2008
- [128] US Air Force Handbook 10-2401: Vehicle Bomb Mitigation Guide. 2006 ⁹⁰
- [129] http://www.nationalhomelandsecurityknowledgebase.com/Research/International_Articles/VBIED_Terrorist_Weapon_of_Choice.html Elérés: 2015. 08. 06
- [130] 65/2013. (III. 8.) Korm. rendelet a létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről szóló 2012. évi CLXVI. törvény végrehajtásáról
- [131] Bohus, Horváth, Papp: Ipari robbantástechnika. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983. ISBN: 963-10-4810-1
- [132] Dr. Lukács, L.: Bombafenyegetés – A robbanóanyagok története. Repüléstudományi Közlemények XXIV. évfolyam 2012 2. szám pp. 409-430. ISSN: 1789-770X
- [133] A III. _ IV. _ V. osztályú védőképességű óvóhelyek tervezése és méretezése. Polgári Védelem Országos Parancsnokság, 1970 Nytsz.: 394
- [134] US Army: Joint Forward Operations Base (JFOB) Force Protection Handbook. (JFOB QRT), November 2005 ⁹⁰
- [135] Dr. Kovács, Z.: Terrorista robbantások – a kezdetek. Robbantástechnika, 2009. 1. szám, pp. 53-59. HU ISSN 1788-5671
- [136] IED Safe Standoff Distance Cheat Sheet. National Ground Intelligence Center (NGIC) <https://info.publicintelligence.net/ied-standoff-cheat-sheet.pdf> Elérés: 2016. 02. 08.
- [137] Dr. Hanka, L.: Kockázat becslése numerikus módszerekkel a Matlab alkalmazásával, folytonos eloszlások diszkretizálása. XXII. évfolyam, 2012. 3. szám pp. 55-69. ISSN 2063-4986
- [138] Dr. Hanka, L., Balogh, Zs.: Bayes Analízis alkalmazása a kockázatelemzésben. A fűrés-robbantástechnika 2012 c. konferencia kiadványa. OMBKE Robbantástechnikai Szakbizottság, 2012. pp. 188-202.

⁹⁰ For Official Use Only (FOUO) – Korlátozott hozzáférésű anyag

RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

KI	kritikus infrastruktúra
EPCIP	Európai Kritikus Infrastruktúra Védelmi Program
SLO	biztonsági összekötő tisztviselő
OSP	üzemeltetői biztonsági terv
ATF	Amerikai Alkohol, Dohány, Fegyver és Robbanóanyag Felügyelet
DoD	Amerikai Honvédelmi Minisztérium
IED	rögtönzött, ház készítésű robbanószerkezet
VBIED	gépjárműbe helyezett házi készítésű robbanószerkezet
SVBIED	öngyilkos merénylő által vezetett VBIED
ANFO	ammónium nitrát és gázolaj keveréke
DDT	deflagráció-detonáció átmenet
VCE	gázfelhő robbanás
EC	Eurocode
ASCE	Amerikai Építőmérnökök Egyesülete
AISC	Amerikai Acélszerkezeti Intézet
P, P _{SO}	oldalirányú túlnyomás
P _R	visszavert túlnyomás
I	impulzus
I _R	visszavert impulzus
t _d	pozitív fázis lecsengési ideje
t _m	maximális alakváltozáshoz szükséges időtartam
t _n	negatív fázis lecsengési ideje
W	robbanóanyag mennyiség
DIF	dinamikus szilárdságnövelő tényező
P _F , P _f	tönkremeneteli valószínűség
T	tervezési élettartam
mean()	várható érték, átlagérték
σ	szórás
v()	relatív szórás
β_T	T élettartamra vonatkozó megbízhatósági index
$\Phi(x)$	standard normál eloszlásfüggvény
TP	hármaspont, szakadási felület
CFD	numerikus áramlástan
FEM, FVM	végelem módszer és véges térfogatok módszere
SDOF	egyszabadságfokú (rezgőrendszer)
MDOF	többszabadságfokú (rezgőrendszer)
K _L	egyszabadságfokú tehertényező
K _M	egyszabadságfokú tömegtenyező
FOSM	elsőrendű, két momentumot használó valószínűségi módszer
FORM	elsőrendű megbízhatósági módszer
DIF	dinamikus szilárdságnövelő tényező
SIF	szilárdságnövelő tényező

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Munkámat hasznos tanácsaikkal segítették:

Bocskai Zoltán

Nagy Róbert

Rózsás Árpád

Dr. Hanka László

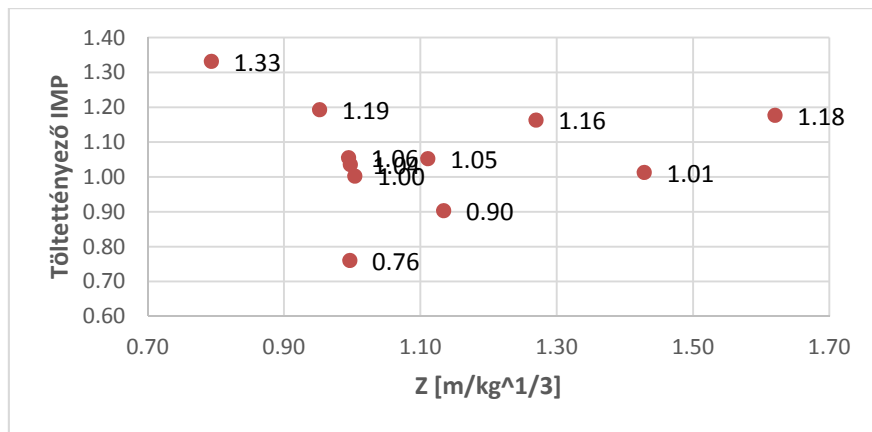
Munkámat türelmükkel segítették:

Csilla és Eszter

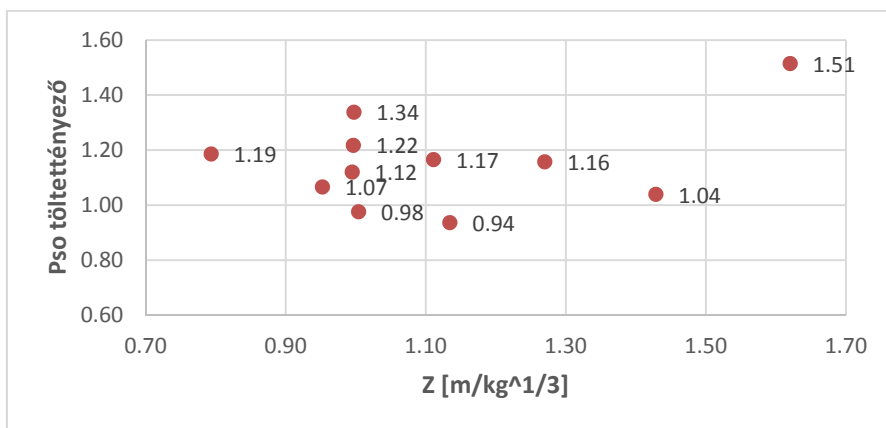
Ezúton is köszönöm nekik az általuk nyújtott segítséget.

„A” MELLÉKLET

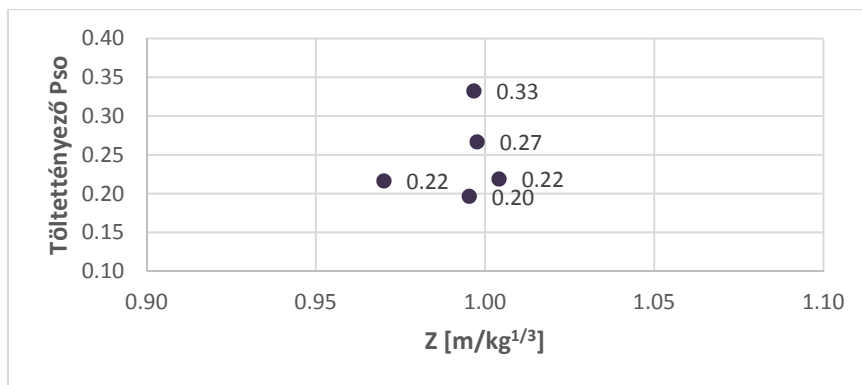
**Kísérleti robbantások kiértékelése
Töltettényezők, túlnyomás-, és impulzusfüggvények**



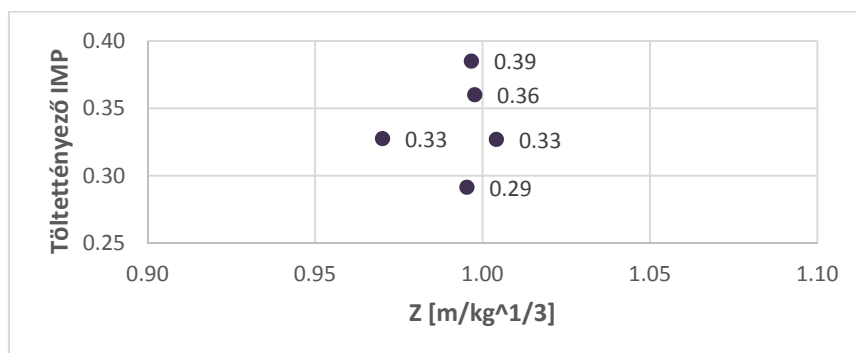
A hexogén impulzus töltetényezője a kísérleti robbantások alapján



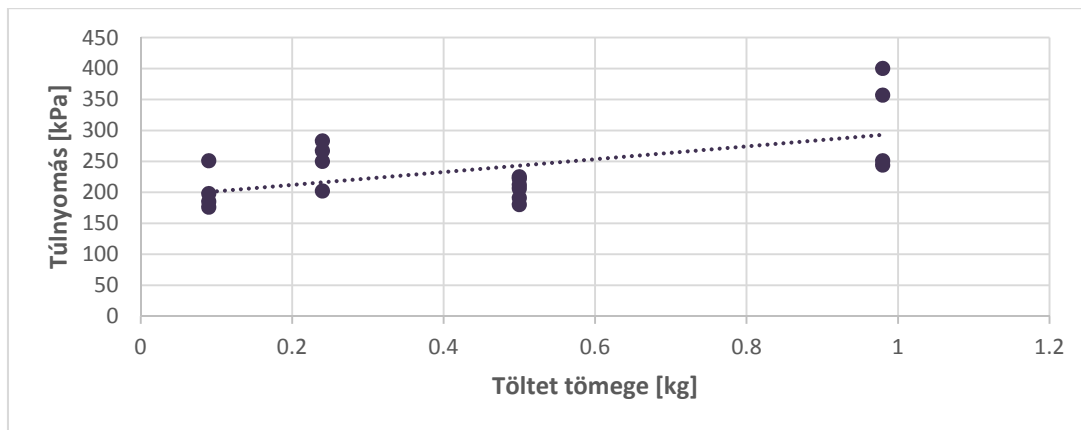
A hexogén túlnyomási töltetényezője a kísérleti robbantások alapján



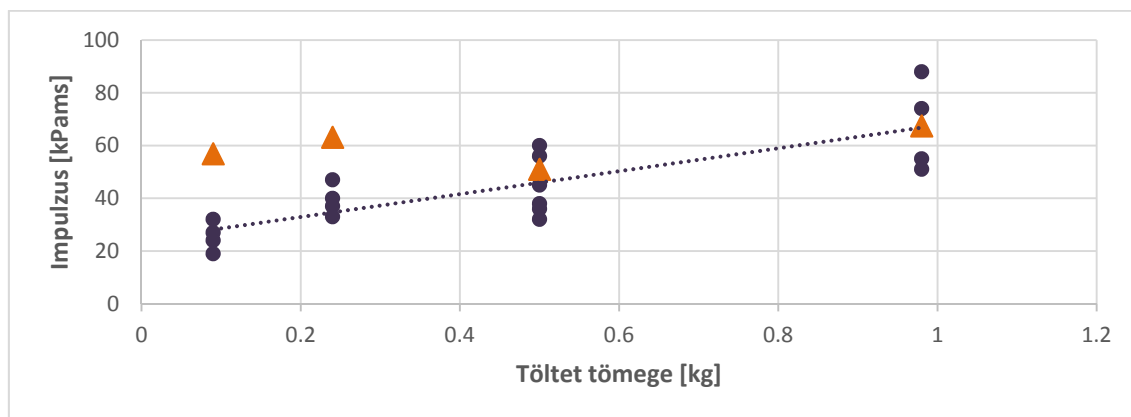
TNT pellet túlnyomási töltetényezője a kísérleti robbantások alapján



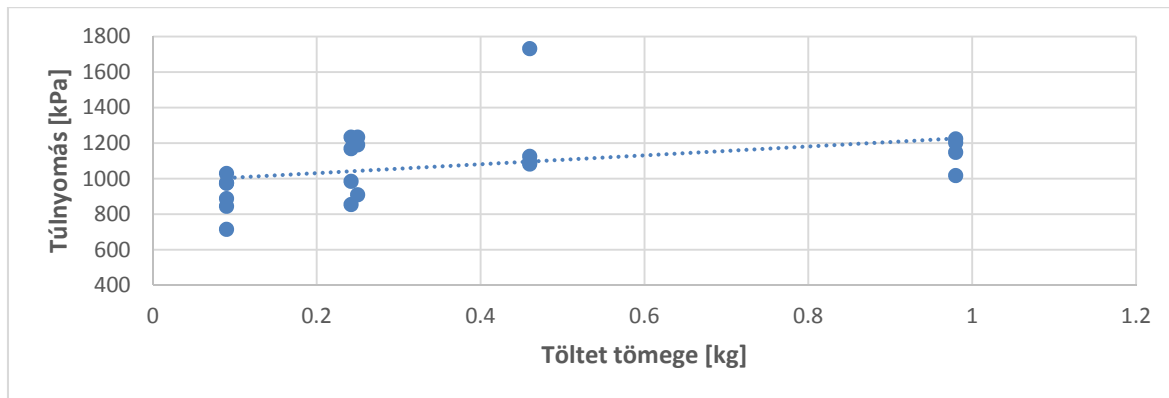
TNT pellet impulzus töltetényezője a kísérleti robbantások alapján



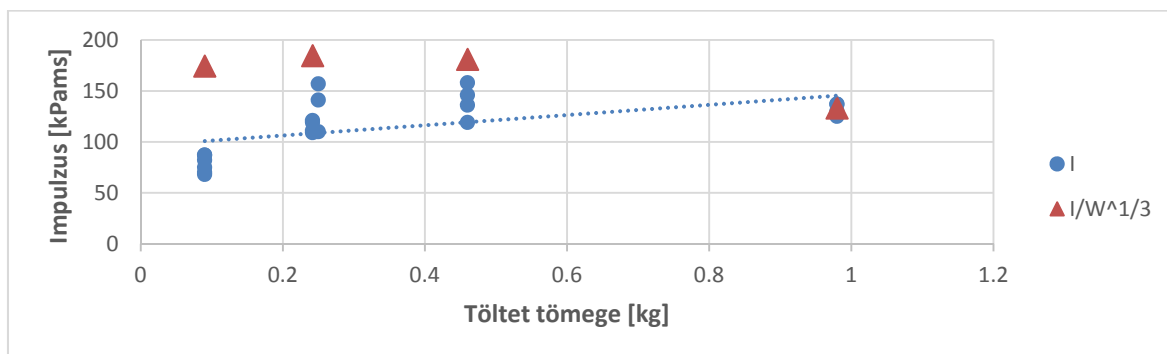
Z=1 értékű TNT pellet töltetek túlnyomás eredményei



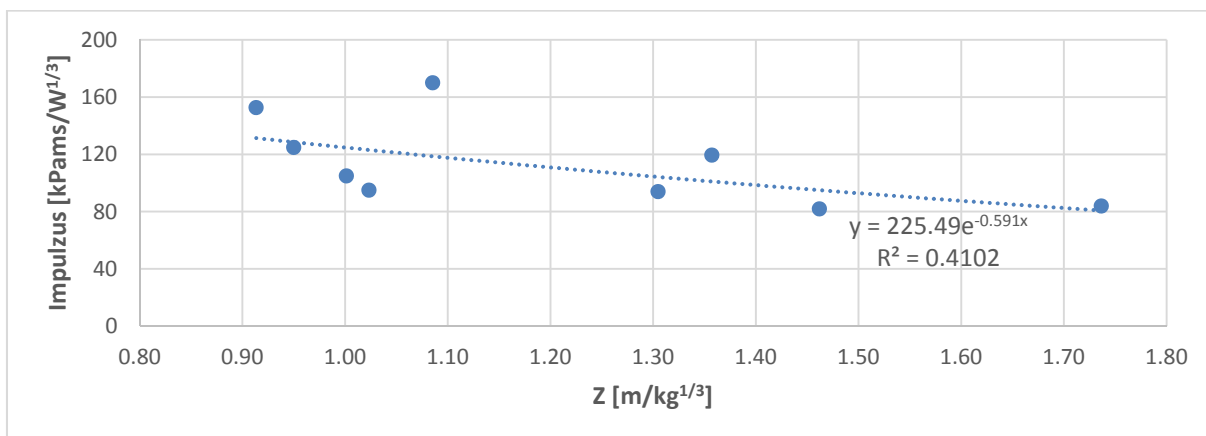
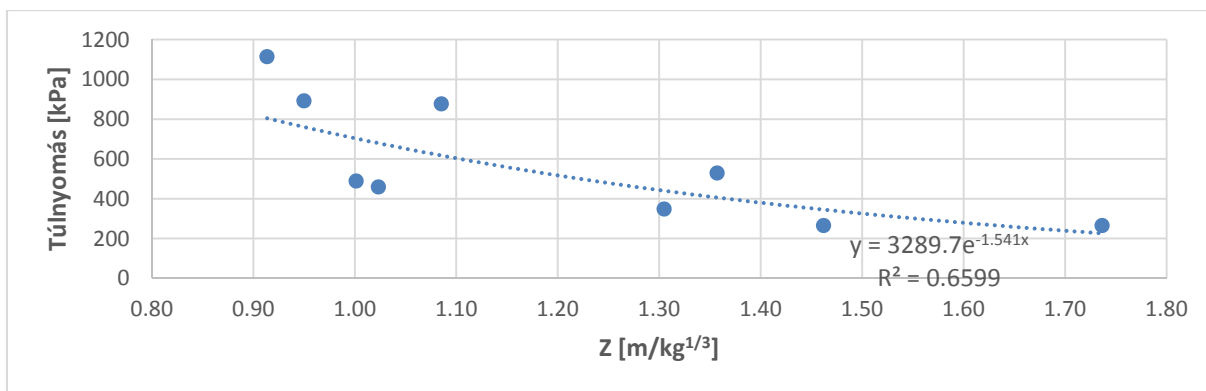
Z=1 értékű TNT pellet töltetek impulzus eredményei



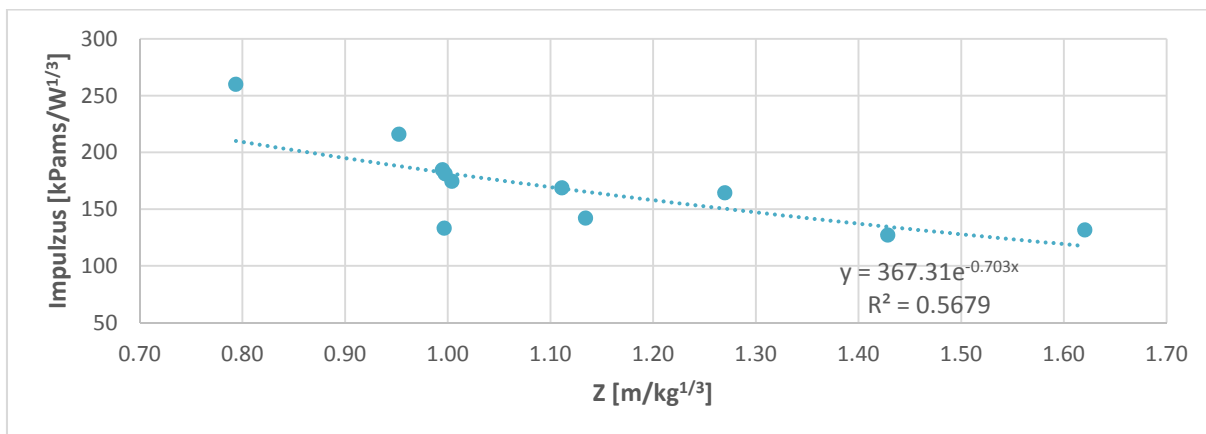
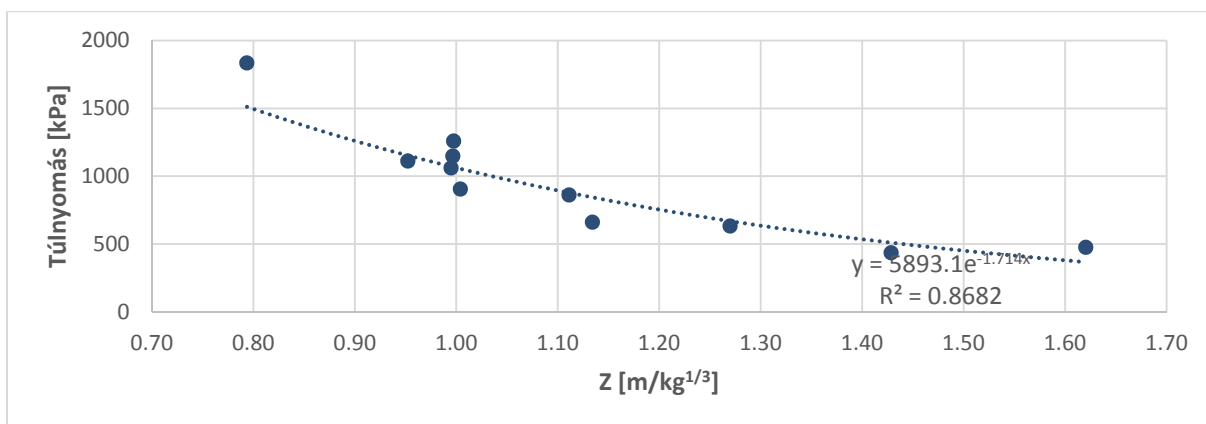
Z=1 értékű hexogén töltetek túlnyomás eredményei



Z=1 értékű hexogén töltetek impulzus eredményei



ANDO-ÉV túlnyomás és impulzus függvényei



Hexogén túlnyomás és impulzus függvényei

„B” MELLÉKLET

Kísérleti robbantások kiértékelése Túlnyomás és impulzus relatív szórás számítása

Töltet	R [m]	W [kg]	Z	Túlnyomás [kPa]				Impulzus [kPams]			
				mérések	átlag	szórás	COV	mérések	átlag	szórás	COV
H85_02 Pr	1	0.235	1.62	1223	1363	156	11.4%	210	213	8	3.8%
H85_03 Pr				1323				210			
H85_04 Pr				1616				227			
H85_05 Pr				1396				209			
H85_06 Pr				1259				208			
H85_02 PS1	0.7		1.13	365	660	196	29.7%	75	88	8	9.2%
H85_03 PS1				626				84			
H85_04 PS1				835				93			
H85_05 PS1				845				94			
H85_06 PS1				629				92			
H85_02 PS2	1		1.62	774	474	169	35.7%	98	81	9	11.7%
H85_03 PS2				386				77			
H85_04 PS2				407				78			
H85_05 PS2				373				75			
H85_06 PS2				430				78			
H60_01C PS1	0.45	0.09	1.00	1028	904	114	12.6%	87	78	8	10.7%
H60_01C PS2				974				75			
H60_01R PS1*				887				87			
H60_01R PS2*				974				68			
H60_02C PS1				714				82			
H60_02C PS2				844				70			
H85_01 PS1	0.62	0.242	0.99	1168	1060	173	16.3%	121	115	6	5.1%
H85_01 PS2				984				111			
H85_02 PS1				854				109			
H85_02 PS2				1233				119			
H140_02 PS1	0.77	0.46	1.00	1082	1258	316	25.1%	119	140	17	11.8%
H140_02 PS2				1125				146			
H140_03 PS1				1731				158			
H140_03 PS2				1092				136			
H180_01 PS1	0.99	0.98	1.00	1147	1147	92	8.1%	137	132	6	4.4%
H180_01 PS2				1017				137			
H180_02 PS1				1201				130			
H180_02 PS2				1223				125			
H85z_02 PS1	0.5	0.25	0.79	1763	1835	90	4.9%	125	164	31	18.7%
H85z_02 PS2				1766				193			
H85z_03 PS1				1953				154			
H85z_03 PS2				1856				183			
H85z_04 PS2	0.6	0.25	0.95	1190	1111	176	15.8%	141	136	24	17.6%
H85z_05 PS1				1233				110			
H85z_05 PS2				909				157			
H85z_06 PS1	0.7	0.25	1.11	833	860	38	4.4%	90	106	21	19.4%
H85z_06 PS2				887				112			
H85z_07 PS1				898				90			
H85z_07 PS2				822				133			
H85z_08 PS1	0.8	0.25	1.27	697	631	45	7.2%	87	104	25	23.7%
H85z_08 PS2				595				125			
H85z_09 PS1				619				78			
H85z_09 PS2				612				124			

T60_01 PS1	0.45	0.09	1.00	251	203	34	16.6%	24	26	5	21.4%
T60_01 PS2				176				32			
T60_02 PS1				185				19			
T60_02 PS2				198				27			
T85_02 PS1	0.62	0.24	1.00	250	251	35	14.0%	37	39	6	15.1%
T85_02 PS2				267				40			
T85_03 PS1				202				33			
T85_03 PS2				283				47			
T180_01 PS1	0.99	0.98	1.00	400	313	78	24.8%	55	67	17	25.7%
T180_01 PS2				357				88			
T180_02 PS1				244				51			
T180_02 PS2				251				74			
T140_01 PS1	0.77	0.5	0.97	206	216	9	4.1%	32	47	14	29.3%
T140_01 PS2				212				60			
T140_02 PS1				222				38			
T140_02 PS2				225				56			

„C” MELLÉKLET

A számítások során felhasznált, és egyéb táblázatok, grafikonok

Figure 2-15 Positive Phase Shock Wave Parameters for a Hemispherical TNT Explosion on the Surface at Sea Level

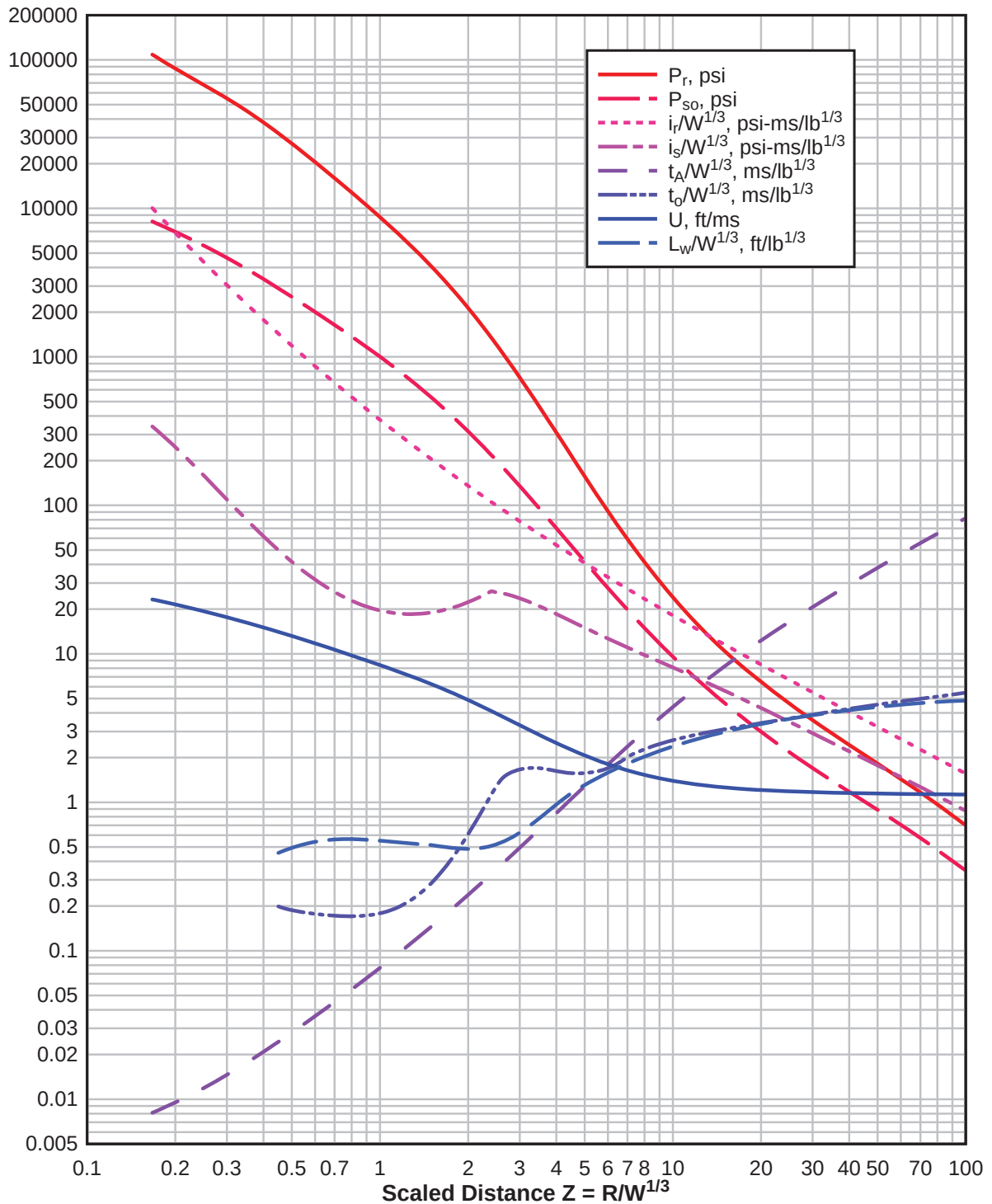


Figure 2-193 Reflected Pressure Coefficient versus Angle of Incidence

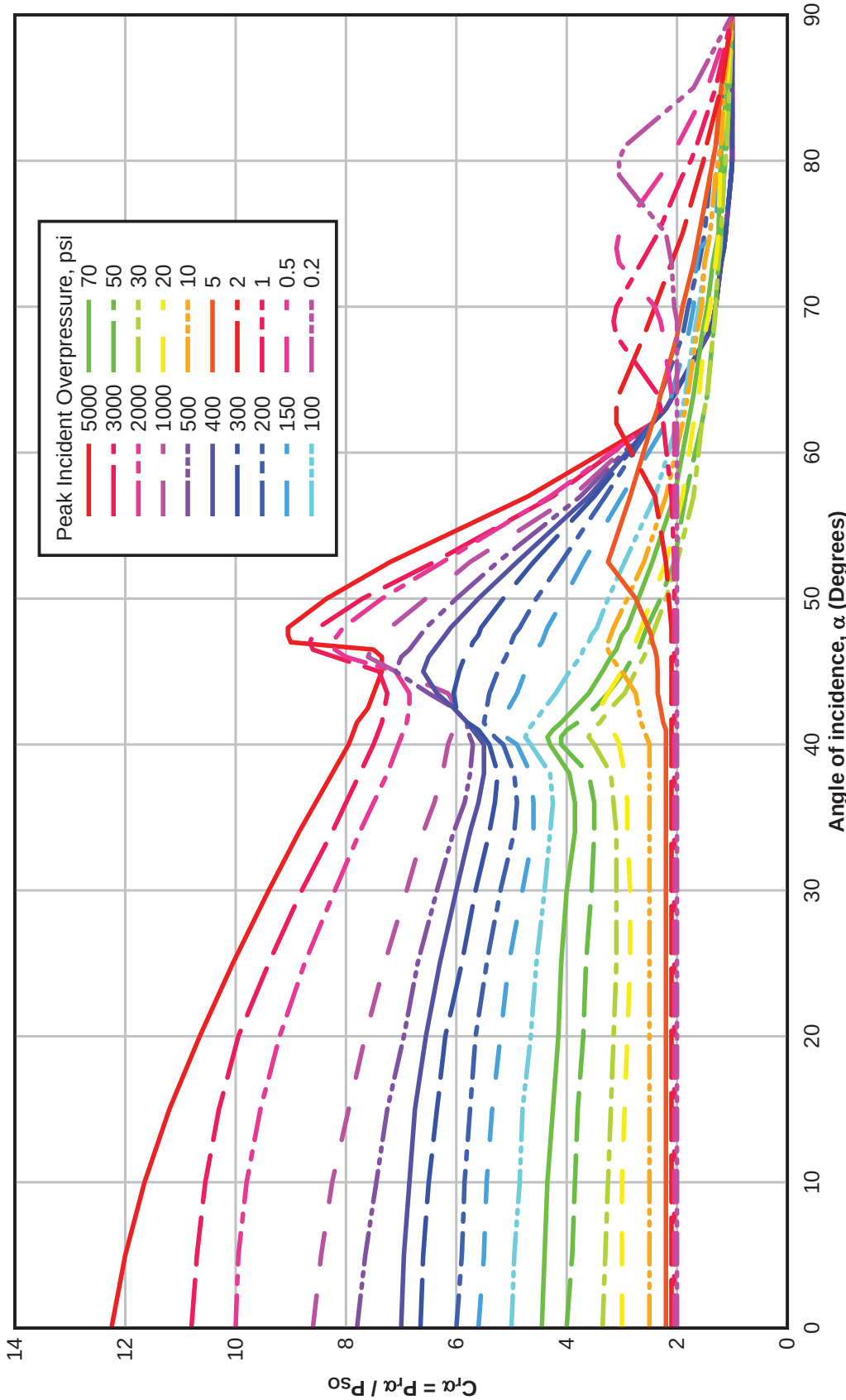


Figure 2-194 (a) Reflected Scaled Impulse versus Angle of Incidence

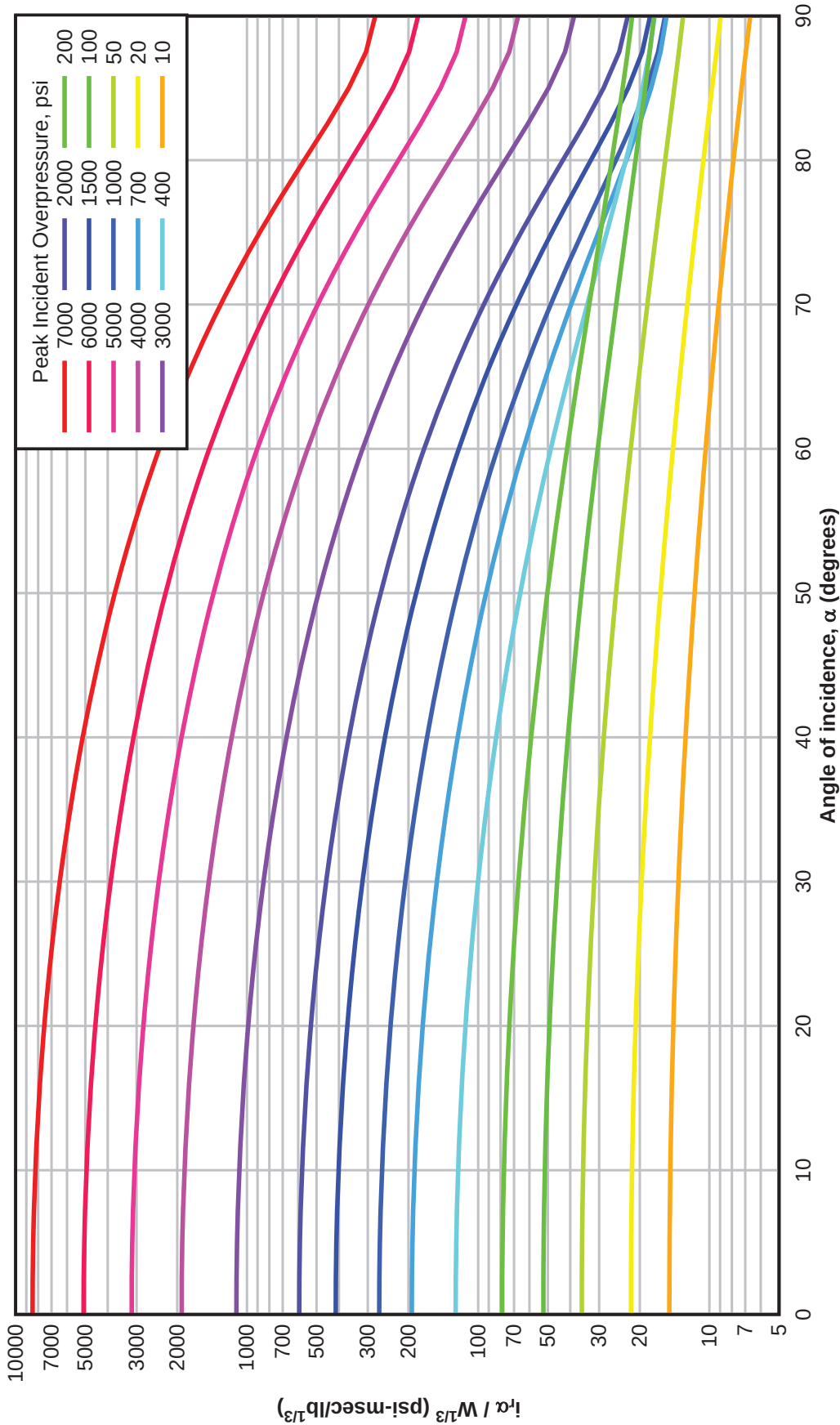


Figure 2-194 (b) Reflected Scaled Impulse versus Angle of Incidence

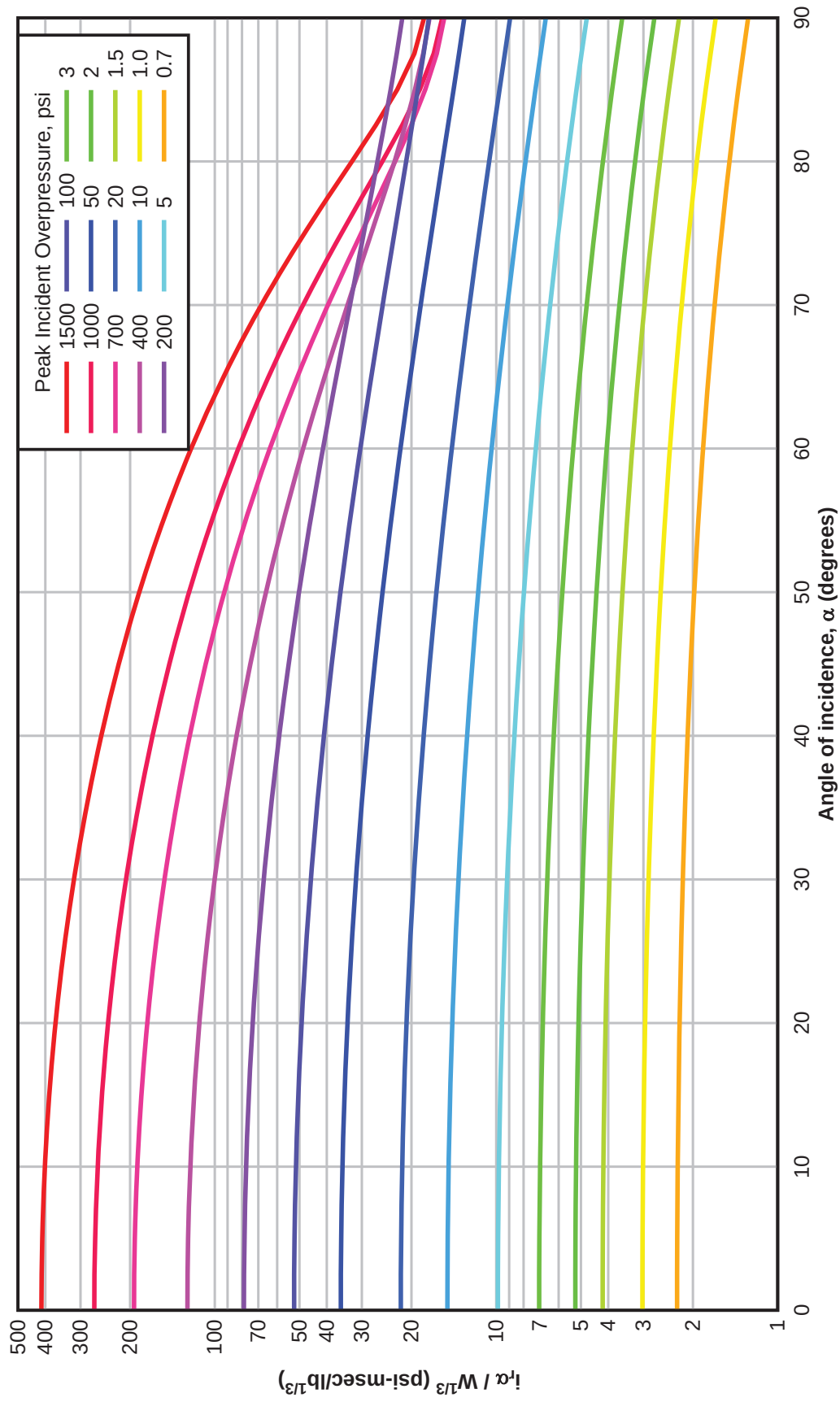


Figure 3-54 Maximum Deflection of Elasto-Plastic, One-Degree-of-Freedom System for Triangular Load

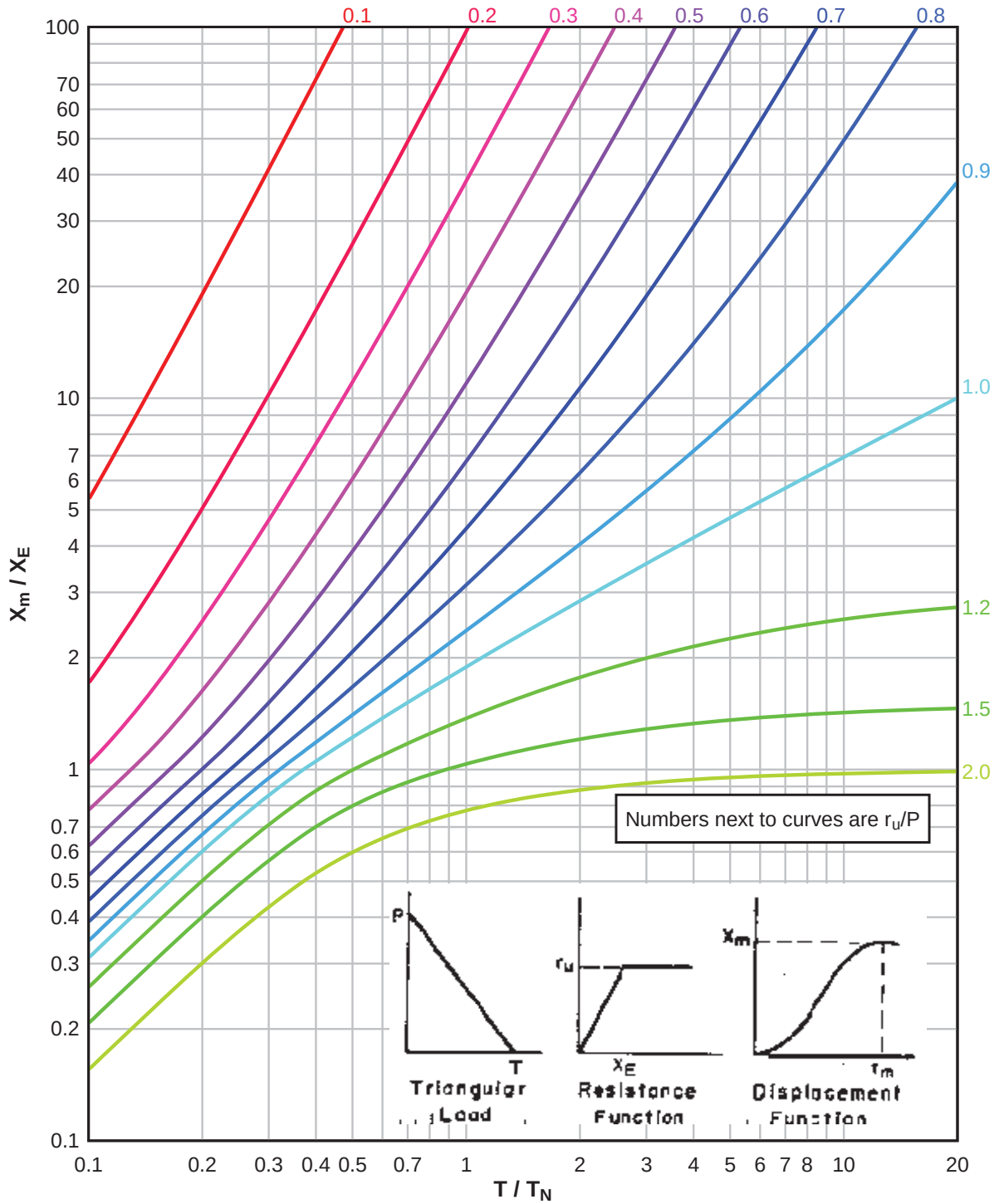


Figure 3-55 Maximum Response Time of Elasto-Plastic, One-Degree-of-Freedom System for Triangular Load

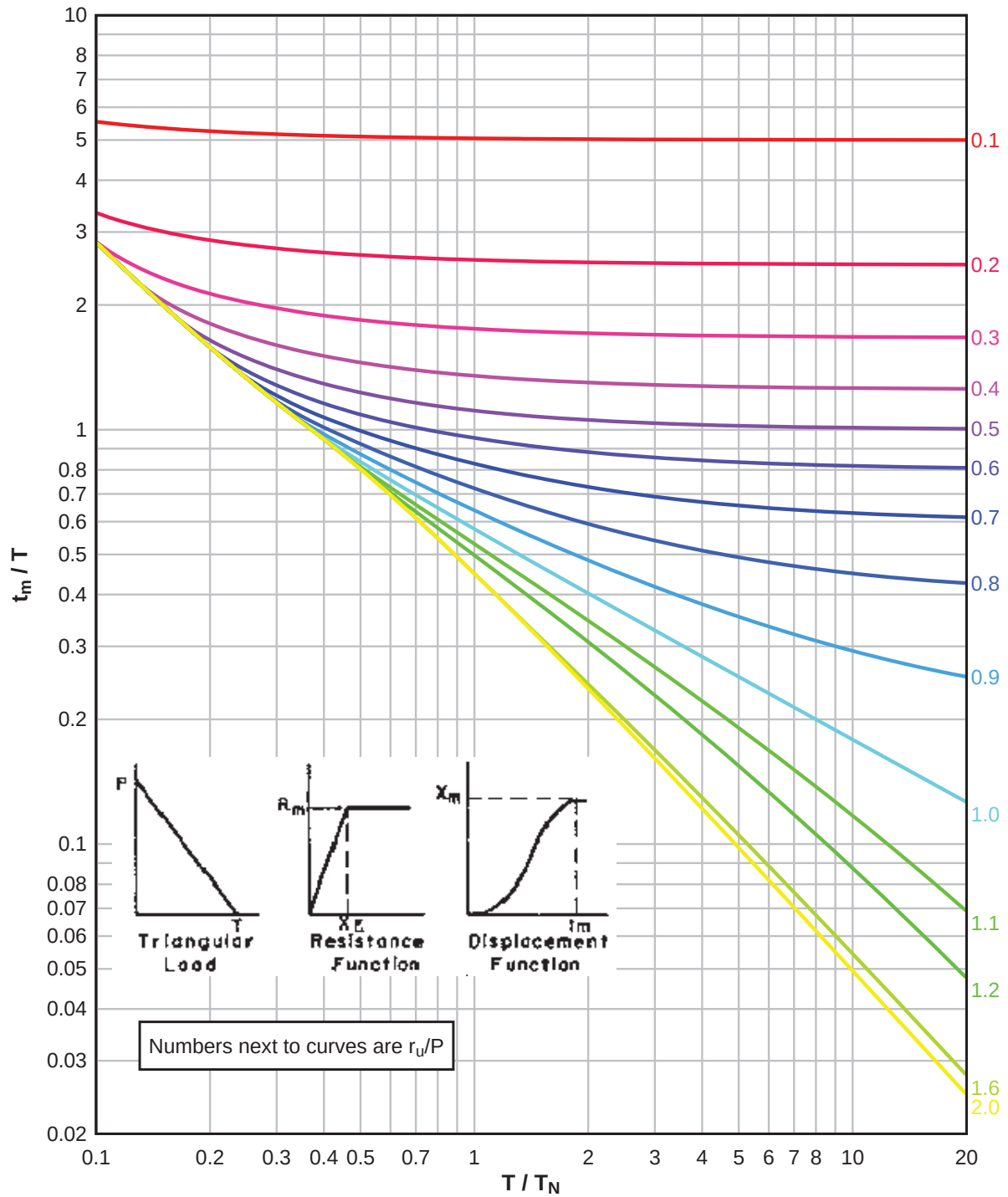


Table 4-2 Dynamic Design Stresses for Design of Reinforced Concrete Elements

TYPE OF STRESS	TYPE OF REINFORCEMENT	MAXIMUM SUPPORT ROTATION, Θ_m (DEGREES)	DYNAMIC DESIGN STRESS	
			REINFORCEMENT, f_{ds}	CONCRETE, f_{dc}
Bending	Tension and Compression	$0 < \Theta_m \leq 2$	f_{dy} (1)	f'_{dc}
		$2 < \Theta_m \leq 6$	$f_{dy} + (f_{du} - f_{dy})/4$	(2)
		$6 < \Theta_m \leq 12$	$(f_{dy} + f_{du})/2$	(2)
Diagonal Tension	Stirrups	$0 < \Theta_m \leq 2$	f_{dy}	f'_{dc}
		$2 < \Theta_m \leq 6$	f_{dy}	f'_{dc}
		$6 < \Theta_m \leq 12$	f_{dy}	f'_{dc}
Diagonal Tension	Lacing	$0 < \Theta_m \leq 2$	f_{dy}	f'_{dc}
		$2 < \Theta_m \leq 6$	$f_{dy} + (f_{du} - f_{dy})/4$	f'_{dc}
		$6 < \Theta_m \leq 12$	$(f_{dy} + f_{du})/2$	f'_{dc}
Direct Shear	Diagonal Bars	$0 < \Theta_m \leq 2$	f_{dy}	f'_{dc}
		$2 < \Theta_m \leq 6$	$f_{dy} + (f_{du} - f_{dy})/4$	(3)
		$6 < \Theta_m \leq 12$	$(f_{dy} + f_{du})/2$	(3)
Compression	Column	(4)	f_{dy}	f'_{dc}

- (1) Tension reinforcement only.
- (2) Concrete crushed and not effective in resisting moment.
- (3) Concrete is considered not effective and shear is resisted by the reinforcement only.
- (4) Capacity is not a function of support rotation.

Figure 4-10 Design curve for dynamic increase factor (DIF) for yield stress of ASTM A 615 Grade 60 reinforcing steel

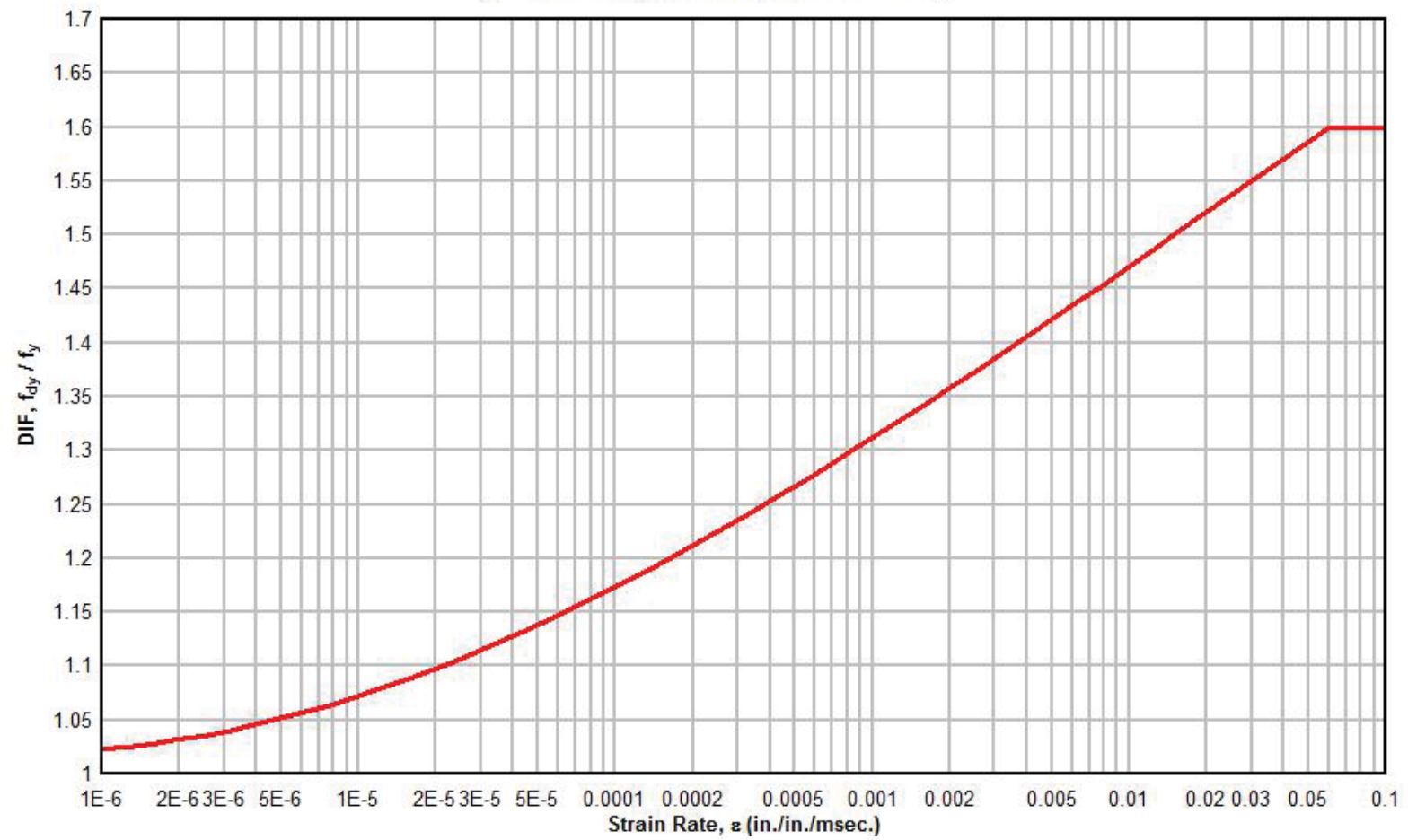


Figure 5-2 Dynamic Increase Factors for Yield Stresses At Various Strain Rates for ASTM A-36 and A-514 Steels

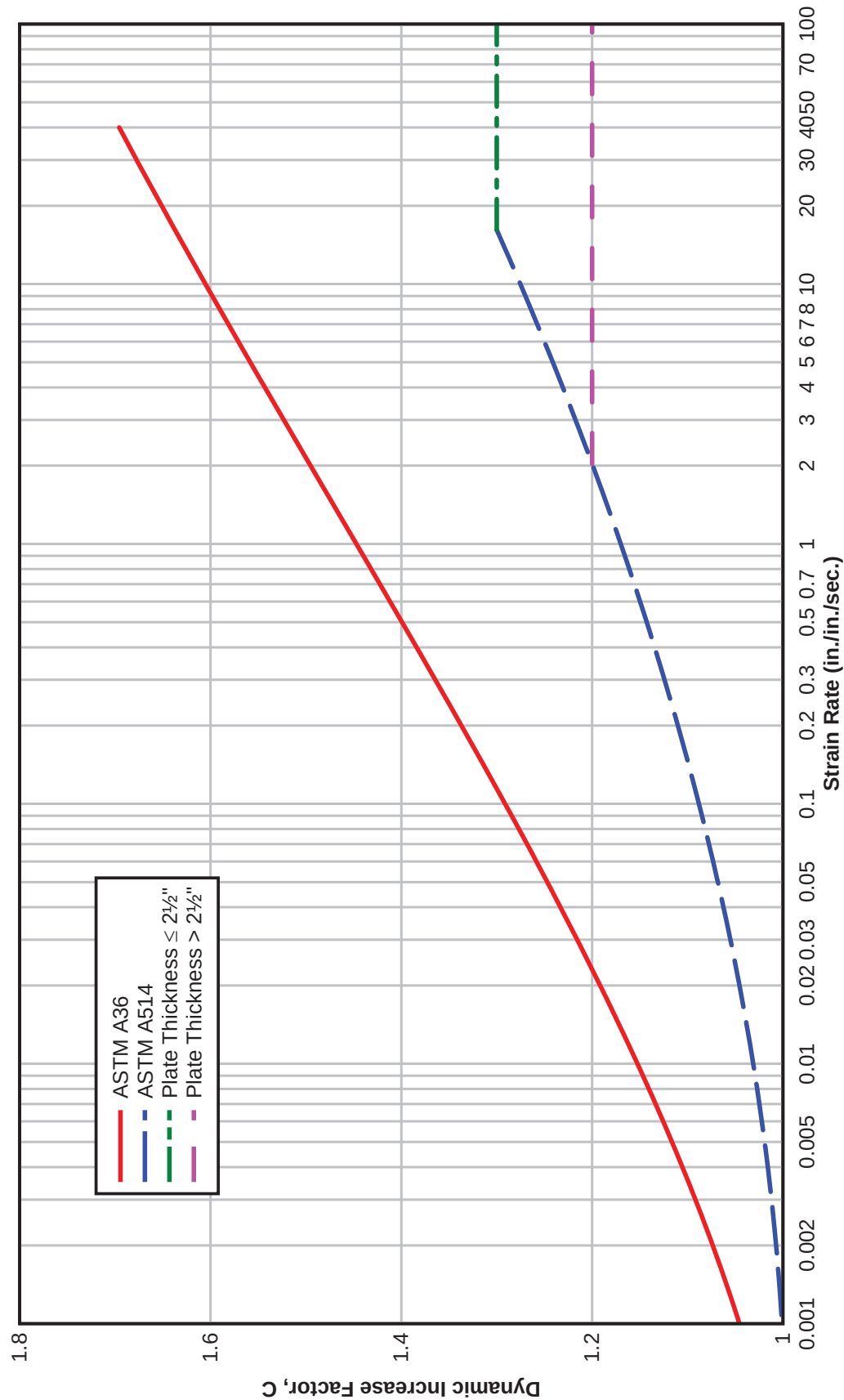


Table 4-1 Dynamic Increase Factor (*DIF*) for Design of Reinforced Concrete Elements

TYPE OF STRESS	FAR DESIGN RANGE			CLOSE-IN DESIGN RANGE		
	Reinforcing Bars		Concrete	Reinforcing Bars		Concrete
	f_{dy}/f_y	f_{du}/f_u	f'_{dc}/f'_c	f_{dy}/f_y	f_{du}/f_u	f'_{dc}/f'_c
Bending	1.17	1.05	1.19	1.23	1.05	1.25
Diagonal Tension	1.00	-----	1.00	1.10	1.00	1.00
Direct Shear	1.10	1.00	1.10	1.10	1.00	1.10
Bond	1.17	1.05	1.00	1.23	1.05	1.00
Compression	1.10	-----	1.12	1.13	-----	1.16

Element Type	Expected Element Damage							
	Superficial		Moderate		Heavy		Hazardous	
	$\mu_{\max}$	$\theta_{\max}$	$\mu_{\max}$	$\theta_{\max}$	$\mu_{\max}$	$\theta_{\max}$	$\mu_{\max}$	$\theta_{\max}$
Reinforced Concrete								
Single-Reinforced Slab or Beam	1	–	–	2°	–	5°		10°
Double-Reinforced Slab or Beam without Shear Reinforcement ^b	1	–	–	2°	–	5°	–	10°
Double-Reinforced Slab or Beam with Shear Reinforcement ^b	1	–	–	4°	–	6°	–	10°
Slab or Beam with Tension Membrane ^c (Normal Proportions ^d)	1	–	–	6°	–	12°	–	20°
Slab or Beam with Tension Membrane ^c (Deep Elements ^d)	1	–	–	6°	–	7°	–	12°
Prestressed Concrete ^e								
Slab or Beam with $\omega_p > 0.30$	0.7	–	0.8	–	0.9	–	1	–
Slab or Beam with $0.15 \leq \omega_p \leq 0.30$	0.8	–	$0.25/\omega_p$	1°	$0.29/\omega_p$	1.5°	$0.33/\omega_p$	2°
Slab or Beam with $\omega_p \leq 0.15$ and Shear Reinforcement ^b	0.8	–	$0.25/\omega_p$	1°	$0.29/\omega_p$	1.5°	$0.33/\omega_p$	2°
Slab or Beam with $\omega_p < 0.15$ and Shear Reinforcement ^b	1	–	–	1°	–	2°	–	3°
Slab or Beam with Tension Membrane ^{c,f} (Normal Proportions ^d)	1	–	–	1°	–	6°	–	10°
Masonry								
Unreinforced ^g	1	–	–	1.5°	–	4°	–	8°
Reinforced	1	–	–	2°	–	8°	–	15°
Structural Steel (Hot-Rolled)								
Beam with Compact Section ^h	1	–	3	3°	12	10°	25	20°
Beam with Noncompact Section ^h	0.7	–	0.85	3°	1	10°	1.2	20°
Plate Bent about Weak Axis	4	1°	8	2°	20	6°	40	12°

ASCE Response Limits for Reinforced Concrete Elements

Component	Low Response		Medium Response		High Response	
	μ_a	θ_a	μ_a	θ_a	μ_a	θ_a
R/C Beams, Slabs, & Wall Panels (no shear reinforcement)		1		2		5
R/C Beams, Slabs, & Wall Panels (compression face steel reinforcement and shear reinforcement in maximum moment areas)		2		4		6
Reinforced Masonry		1		2		5
R/C Walls, Slabs, and Columns (in flexure & axial compression load) ²		1		2 ⁴		2 ⁴
R/C and R/M Shear Walls & Diaphragms	3		3		3	
R/C and R/M Components (shear control, without shear)	1.3		1.3		1.3	
R/C and R/M Components (shear control, with shear reinforcement)	1.6		1.6		1.6	
Prestressed Concrete ($w_p \leq 0.15$) ³	1			1		2
Prestressed Concrete ($0.15 < w_p < 0.3$) ³	1		0.25/ w_p	1	0.29/ w_p	1.5

Ref: ASCE, "Design of Blast Resistance Petrochemical Facilities," Table 5.B.3, p. 5-24



USACE PDC R/C Response Criteria

Member		B1		B2		B3		B4	
		μ	θ	μ	θ	μ	θ	μ	θ
Flexure	No shear reinforcing/ without tension membrane	1	-	-	2°	-	5°	-	10°
	With compression face steel reinforcement and shear reinforcing/without tension membrane ²	1	-	-	4°	-	6°	-	10°
	With tension membrane ($L/h \geq 5$) ^{3,4}	1	-	-	6°	-	12°	-	20°
Combined Flexure & Compression ⁵	No shear reinforcing/ without tension membrane	1	-	-	2°	-	2°	-	2°
	With compression face steel reinforcement and shear reinforcing/without tension membrane ²	1	-	-	4°	-	4°	-	4°
Compression ^{5,6}	Walls & Seismic Columns	0.9	-	1	-	2	-	3	-
	Non-Seismic Columns	0.7	-	0.8	-	0.9	-	1	-
Tension or Combined Flexure & Tension		No response limits in this report, see SBEDS Methodology Manual							

Ref: PDC-TR 06-08, Table 4-1, p. 4-2



Comparison of Response Criteria for Steel Components

Component	UFC 3-340-02		ASCE Medium Response		ASCE High Response	
	μ	θ	μ	θ	μ	θ
Steel Beams	10	2				
Steel beam (secondary)			10	6	20	12
Steel beam (primary)			3	2	6	4
Steel beam (primary with significant compression)			2	1.5	3	2
Cold-formed beam			3	3	12	10
Steel Plate	10	2	10	6	20	12
Open Web Steel Joists	4	2	2	1.5 (3)	4	2 (6)
Cold-Formed Panels	6	4	3	2	6	4
Steel Frame Components	10	2	2	1.5	3	2
Frame Sway (1-2 story frames)		H/25		H/35		H/25

- UFC 3-340-02 criteria are understood to be relatively conservative
- UFC 3-340-02 criteria are approximately comparable to ASCE Medium Response
- Twice UFC 3-340-02 criteria is comparable to ASCE High Response



„D” MELLÉKLET

**Kísérleti robbantások kiértékelése
Túlnyomás és impulzus korreláció számítása**

Töltet	R	W	Z	Túlnyomás	Impulzus	Korreláció
				mérések	mérések	
A85_04 Pr	1	0.32	1.46	554	112	0.92
A85_05 Pr				573	137	
A85_05 PS1	0.7	0.32	1.02	459	65	
A85_05 PS2	1	0.32	1.46	265	56	
A110_01 Pr	1	0.4	1.36	1228	228	
A110_01 PS1	1		1.36	529	88	
A110_01 PS2	0.7		0.95	892	92	
A110_02 Pr	1	0.45	1.30	984	140	
A110_02 PS1	1		1.30	348	72	
A110_02 PS2	0.7		0.91	1114	117	
A120_01 Pr	1	0.33	1.45	1536	227	
A120_03 Pr				854	168	
A120_01 PS1	0.75	0.33	1.09	909	129	
A120_03 PS1				844	106	
A120_01 PS2	1.2	0.33	1.74	280	59	
A120_03 PS2				250	57	
AD60_01 Pr	1	0.33	1.45	1590	201	
AD60_03 Pr				1223	204	
AD60_01 PS1	0.75	0.33	1.09	995	105	
AD60_03 PS1				570	93	
AD60_01 PS2	1.2	0.33	1.74	241	50	
AD60_03 PS2				227	53	
AD60L_03x Pr	1	1	1.00	5459	792	
AD60L_03x PS2	1.2	1	1.20	413	75	
AD60L_05 PS2				334	88	
AD60L_06x PS2				411	115	
AZ60_01 PS1	0.52	0.14	1.00	387	45	
AZ60_01 PS2				591	64	
H85_02 Pr	1	0.235	1.62	1223	210	
H85_03 Pr				1323	210	
H85_04 Pr				1616	227	
H85_05 Pr				1396	209	
H85_06 Pr				1259	208	
H85_02 PS1	0.7		1.13	365	75	
H85_03 PS1				626	84	
H85_04 PS1				835	93	
H85_05 PS1				845	94	
H85_06 PS1				629	92	
H85_02 PS2	1		1.62	774	98	
H85_03 PS2				386	77	
H85_04 PS2				407	78	
H85_05 PS2				373	75	
H85_06 PS2				430	78	
H60_01C PS1	0.45	0.09	1.00	1028	87	
H60_01C PS2		0.09		974	75	
H60_01R PS1*		0.09		887	87	
H60_01R PS2*		0.09		974	68	
H60_02C PS1		0.09		714	82	

H60_02C PS2		0.09		844	70
H85_01 PS1	0.62	0.242	0.99	1168	121
H85_01 PS2		0.242		984	111
H85_02 PS1		0.242		854	109
H85_02 PS2		0.242		1233	119
H140_02 PS1	0.77	0.46	1.00	1082	119
H140_02 PS2		0.46		1125	146
H140_03 PS1		0.46		1731	158
H140_03 PS2		0.46		1092	136
H180_01 PS1	0.99	0.98	1.00	1147	137
H180_01 PS2		0.98		1017	137
H180_02 PS1		0.98		1201	130
H180_02 PS2		0.98		1223	125
H85z_02 PS1	0.5	0.25	0.79	1763	125
H85z_02 PS2				1766	193
H85z_03 PS1				1953	154
H85z_03 PS2				1856	183
H85z_04 PS2	0.6	0.25	0.95	1190	141
H85z_05 PS1		0.25		1233	110
H85z_05 PS2		0.25		909	157
H85z_06 PS1	0.7	0.25	1.11	833	90
H85z_06 PS2				887	112
H85z_07 PS1				898	90
H85z_07 PS2				822	133
H85z_08 PS1	0.8	0.25	1.27	697	87
H85z_08 PS2				595	125
H85z_09 PS1				619	78
H85z_09 PS2				612	124
H85z_10 PS1	0.9	0.25	1.43	439	63
H85z_10 PS2				428	97
T60_01 PS1	0.45	0.09	1.00	251	24
T60_01 PS2		0.09		176	32
T60_02 PS1		0.09		185	19
T60_02 PS2		0.09		198	27
T85_02 PS1	0.62	0.24	1.00	250	37
T85_02 PS2		0.24		267	40
T85_03 PS1		0.24		202	33
T85_03 PS2		0.24		283	47
T140_01 PS1	0.79	0.5	1.00	191	36
T140_01 PS2		0.5		180	45
T180_01 PS1	0.99	0.98	1.00	400	55
T180_01 PS2		0.98		357	88
T180_02 PS1		0.98		244	51
T180_02 PS2		0.98		251	74
T140_01 PS1	0.77	0.5	0.97	206	32
T140_01 PS2		0.5		212	60
T140_02 PS1		0.5		222	38
T140_02 PS2		0.5		225	56

„E” MELLÉKLET

A DVD melléklet felvételeinek listája

Az autóbomba összeállítása

- 01 - Robbanószerkezet gyártása házilag készített robbanóanyagból - Afganisztán
- 02 - Tüzérségi lövedékek és gázpalackok átalakítása - Irak
- 03 - Aknagránátok átalakítása, járműben való elhelyezése - Afganisztán
- 04 - Aknagránátok átalakítása - Afganisztán
- 05 - Házi készítésű robbanóanyag előállítás és autóba helyezése
- 06 - Mikrobusz kategóriájú SVBIED - Irak, Szamarra, 2007
- 07 - Motorkerékpárra szerelt átalakított aknagránátok - Afganisztán
- 08 - Tüzérségi lövedékek elhelyezése a járműben - Irak, 2005
- 09 - Átalakított, sorba kötött tüzérségi lövedékek, és detonáló szerkezet - Irak
- 10 - Teherautó kategóriájú SVBIED összeállítása és detonátora - Irak
- 11 - Személygépkocsi SVBIED gázpalackokkal - Irak
- 12 - Rejtett robbanóanyag a teherautó platóján - Afganisztán 2012
- 22 - Tartályokba töltött ANFO a raktérben - Irak
- 33 - Gáztartály bombává alakítása - Algéria
- 39 - ANFO hordók a raktérben - Ingusföld (Oroszország)
- 43 - ANFO kannák és zsákok a SVBIED-ben - Irak, Moszul, 2008
- 74 - Aknagránátok és gázpalackok - Afganisztán
- 83 - Kisteherautóval elkövetett merénylet - Szíria 2012

Az SVBIED robbantások elkövetési módjai

- 06 - SVBIED támadásának fedezőtűzzel való támogatása - Irak
- 08 - Útmentén leparkolt VBIED támadás mozgó konvoj ellen - Irak
- 11 - Fegyvert viselő öngyilkos merénylet - Irak
- 12 - Fegyveres támadás a támaszpont ellen a robbantás után - Afganisztán 2012
- 13 - Védelem nélküli közúti ellenőrzőpont lerohanása - Irak
- 14 - Védelem nélküli őrállás lerohanása - Irak
- 15 - Konvoj közé férkőző támadás - Irak
- 16 - Védelem nélküli ellenőrzőpont lerohanása - Irak
- 17 - Támaszpont támadása egymást követő SVBIED-ek - Irak
- 18 - Egymást követő SVBIED-k törnek át a robbantás előtt a hotel sorompóját - Pakisztán
- 19 - Egymást követő SVBIED-k Bagdad belvárosában (A Kamaz elakad). - Irak
- 20 - SVBIED támadásának elősegítése az utcai akadályok eltávolításával - Irak
- 21 - SVBIED támadásának elősegítése a sorompó kinyitásával - Pakisztán
- 22 - Az SVBIED nem tud bejutni az objektum területére, falon kívül robban - Irak
- 23 - Védelem nélküli közúti ellenőrzőpont lerohanása - Irak
- 24 - Egymást követő SVBIED-k támadása, egyik sem jut át a kapun - Irak
- 25 - Támaszpont előtt lévő rendőrök lerohanása - Irak
- 26 - SVBIED támadásának fedezőtűzzel való támogatása - Irak
- 27 - SVBIED támadásának fedezőtűzzel való támogatása - Irak
- 28 - SVBIED támadásának fedezőtűzzel való támogatása a robbantás előtt és után - Irak
- 29 - Útmentén leparkolt VBIED támadás mozgó konvoj ellen - Afganisztán
- 30 - Mozgó rendőrautó elleni VBIED támadás - Irak
- 31 - Rosszul elhelyezett utcai akadályt küzd le a SVBIED robbantás előtt - Irak
- 32 - Védtelen ellenőrzőponton jut át a SVBIED, a fegyveres védelem nem elég - Irak
- 33 - Gyenge kapun behatoló SVBIED - Algéria
- 39 - Gyenge kapun behatoló SVBIED - Ingusföld, Nazran
- 40 - SVBIED támadásának fedezőtűzzel való támogatása - Irak, 2008
- 44 - SVBIED leparkolása, majd a robbantás fedezőtűzzel való előkészítése - Irak, 2007
- 52 - Fegyvert viselő öngyilkos merénylet - Irak
- 55 - SVBIED támadásának fedezőtűzzel való támogatása - Irak, 2007
- 59 - Kettős öngyilkos merénylet az Iraki Igazságügyi Minisztérium ellen - Irak, 2009
- 61 - Kettős öngyilkos merénylet a Moszul térségében lévő Tigris hídon - Irak
- 67 - Fegyvert viselő öngyilkos merénylet - Irak
- 73 - Kettős öngyilkos merénylet - Algéria
- 74 - Humvee járőr mellett felrobbantott VBIED - Afganisztán

A terrorista robbantások hatása

- 06 - Mikrobuszos SVBIED támadás - Irak, Szamarra, 2007
- 11 - Gyúlékony anyagokkal elkövetett merénylet, fegyvert viselő merénylet - Irak
- 18 - A peshawari Pearl Continental Hotel ellen elkövetett merénylet, Pakisztán, 2009
- 20 - A biztonsági távolság biztosítva maradt, nincs súlyos következmény - Irak
- 28 - Kisebbségi szerkezeti károkat okozó SVBIED támadás - Irak
- 31 - Lökéshullámot visszaverő falat lebontó robbantás - Irak
- 33 - A könnyűszerkezetes épületekből álló támaszpont teljesen megsemmisül - Algéria
- 34 - Kis lökéshullámot okozó, de hatalmas lángokba boruló tartálykocsis robbantás - Irak
- 35 - Gyúlékony anyagokkal való támadás - Irak
- 36 - Gyúlékony anyagokkal való támadás - Irak
- 37 - Gyúlékony anyagokkal való támadás - Irak
- 38 - Gyúlékony anyagokkal való támadás - Irak
- 39 - A nazrani rendőrség ellen elkövetett merénylet
- 40 - Támaszpont belsejében elkövetett robbantás - Irak
- 41 - Elhagyott épület felrobbantása kis töltetekkel belülről - Irak
- 42 - Hatalmas SVBIED robbantás - Irak
- 43 - Közvetett épület összeomlást okozó öngyilkos merénylet - Irak, Moszul
- 44 - Támaszpont mellé parkolt VBIED támadás, HESCO bástyák tönkremenetele - Irak
- 45 - Rendőrség ellen elkövetett SVBIED támadás, épület közvetett összeomlása - Irak
- 46 - Rendőrség ellen elkövetett SVBIED támadás, épület közvetett összeomlása - Irak
- 47 - SVBIED támadás támaszpont ellen - Afganisztán
- 48 - SVBIED támadás támaszpont ellen - Csecsenföld
- 49 - SVBIED támadás támaszpont ellen - Irak
- 50 - SVBIED támadás támaszpont ellen - Afganisztán
- 51 - SVBIED támadás támaszpont ellen, félgömb alakú ködfelhő - Afganisztán
- 52 - SVBIED támadás támaszpont ellen, fegyvert viselő merénylet - Irak
- 53 - SVBIED támadás támaszpont ellen - Afganisztán
- 54 - SVBIED támadás támaszpont ellen - Afganisztán
- 55 - SVBIED támadás támaszpont ellen, félgömb alakú ködfelhő - Afganisztán
- 56 - SVBIED támadás támaszpont ellen - Csecsenföld
- 57 - SVBIED támadás - Irak
- 58 - SVBIED támadás támaszpont ellen - Irak, Moszul
- 59 - Az Iraki Igazságügyi Minisztérium elleni kettős öngyilkos merénylet
- 60 - Hid főtartóját ledöntő robbantás - Irak
- 61 - Hid leszakadását okozó kettős öngyilkos merénylet - Irak, Moszul
- 62 - SVBIED támadás támaszpont ellen - Irak
- 63 - SVBIED támadás támaszpont ellen, vasbeton robbanásvédő falak tönkremenetele - Irak
- 64 - SVBIED támadás támaszpont ellen - Margha, Afganisztán
- 65 - SVBIED támadás támaszpont ellen - Irak
- 66 - SVBIED támadás támaszpont ellen - Irak
- 67 - SVBIED támadás támaszpont ellen, fegyvert viselő merénylet - Irak
- 68 - SVBIED támadás támaszpont ellen - Irak
- 69 - Távvezetékek rövidzárlatát okozó robbantás - Irak
- 70 - Attikafal leomlását okozó robbantás - Irak
- 71 - Könnyűfémtestet felszakító robbantás - Irak
- 72 - Attikafalat (is) ledöntő SVBIED támadás - Irak
- 73 - Utcákkal távolabbi ablakok betörését okozó kettős SVBIED támadás - Algéria
- 75 - Repeszhatású útmenti IED támadás gyalogos járőr ellen - Algéria
- 76 - IED támadás gyalogos járőrök ellen - Irak
- 77 - Katona összeesését okozó közeli IED robbantás - Irak
- 78 - Rendőr összeesését okozó közeli IED robbantás - Irak
- 79 - Katonák összeesését okozó közeli IED robbantás - Irak
- 80 - Gyalogos járőrt a levegőbe emelő IED támadás - Afganisztán
- 81 - Jármű kigyulladását okozó IED - Irak
- 82 - Jármű kigyulladását okozó IED, lángra kapott ruhájú katona - Irak
- 83 - SVBIED támadás támaszpont ellen - Szíria, 2012
- 84 - SVBIED támadás támaszpont ellen - Szíria, 2012
- 85 - kis hatású SVBIED támadás ellenőrzőpont ellen - Szíria, 2012
- 86 - Fő szerkezetben kárt nem okozó SVBIED támadás - Szíria, 2012
- 87 - SVBIED támadás támaszpont ellen - Szíria, 2012

FÜGGELÉKEK

Az általam írt programok forráskódjai és dokumentációi

(A felhasznált Mathcad szoftverben a forráskód és a dokumentáció nincs elkülönítve, az egész egy formázott egységben jelenik meg.)

Dinamikus számítási módszerek összehasonlítása, validálása



Mintapélda: Mays, Smith: Blast effects of buildings. Design Example 3 - p. 91 [92]

A bemenő adatok:

Lecsengési idő: $t_d := 40 \text{ ms}$

Visszavert túlnyomás: $P_R := 50 \text{ kPa}$

Impulzus: $I_R := \frac{1}{2} \cdot P_R \cdot t_d = 1 \times 10^3 \cdot \text{kPa} \cdot \text{ms}$

Gerenda hossza: $L := 5.2 \text{ m}$

Gerendák osztásköze: $sp := 1.4 \text{ m}$

Acél rugalmassági modulusa: $E := 210 \text{ GPa}$

Gerenda önsúlya: $M_g := 83 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$

Acél folyási szilárdsága: $F_y := 363 \text{ MPa}$

Másodrendű inercianyomaték: $I_x := 100.87 \cdot 10^6 \cdot \text{mm}^4$

Keresztmetszeti modulus: $W_{pl} := 0.654 \cdot 10^6 \cdot \text{mm}^3$

Keresztmetszet nyomatéki ellenállása: $M_p := W_{pl} \cdot F_y = 237.402 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

Gerenda teherbírása: $R := \frac{8 \cdot M_p}{L^2} \cdot L = 365.234 \cdot \text{kN}$

A hajlított rúdelem merevsége: $K_E := \frac{384 E \cdot I_x}{5 \cdot L^4} \cdot L = 1.157 \times 10^7 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$

A rugalmas elmozdulás: $X_E := \frac{R}{K_E} = 0.032 \text{ m}$

Ekvivalens tömeg tényező: $K_M := 0.33$

Ekvivalens teher tényező: $K_L := 0.5$

Ekvivalens ellenállás tényező: $K_D := K_T$

$$K_{LM} := \frac{K_M}{K_L} = 0.66$$

A gerjesztett rezgőmozgás differenciálegyenletének numerikus megoldása

Craig [95] munkája alapján. Az algoritmus alapja Ward-tól [94] lett átvéve.

Az ekvivalens ellenállástényező
alkalmazása:

$$\text{yield_force} := K_R \cdot R$$

Az ekvivalens tömegtényező
alkalmazása:

$$\text{Mass} := M_g \cdot L \cdot K_M = 142.428 \text{ kg}$$

A hajlított rúdelem frekvenciája:

$$f_n := \frac{\sqrt{\frac{(K_R \cdot K_E)}{\text{Mass}}}}{2\pi} = 32.076 \frac{1}{s} \quad T := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\text{Mass}}{K_R \cdot K_E}} = 31.176 \cdot \text{ms}$$

Az ekvivalens teher-tényező
alkalmazása:

$$F_{\max} := P_R \cdot \text{sp} \cdot L \cdot K_L = 182 \cdot \text{kN}$$

Megoldás vezérlés:

Csillapítás:

$$\xi := 1\%$$

Szerkezet válaszána vizsgált
időtartama:

$$t_{\max} := 100 \cdot \text{ms}$$

Időlépcső:

$$\Delta t := .002 \cdot \text{ms}$$

Lépések száma:

$$N_o := \text{round}\left(\frac{t_{\max}}{\Delta t}\right) = 50000 \quad i := 1 \dots N_o$$

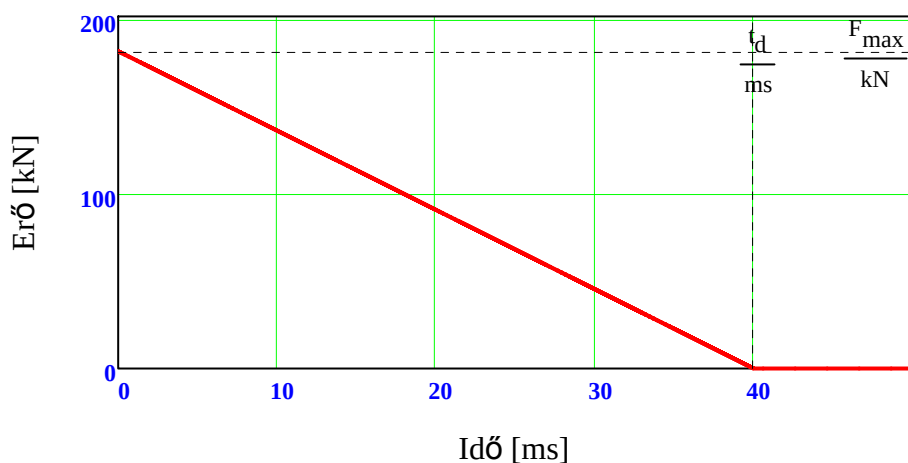
Kiértékelési időpontok:

$$t_i := \Delta t \cdot i$$

Teherfüggvények előállítása:

$$p_i := \begin{cases} F_{\max} \cdot \left(1 - \frac{t_i}{t_d}\right) & \text{if } t_i < t_d \\ 0 \cdot \text{N} & \text{if } t_i \geq t_d \end{cases}$$

Teherfüggvény





$$\text{response}\left(\frac{p}{N}, \frac{\Delta t}{\text{sec}}, \frac{\text{yield_force}}{N}, \frac{\text{Mass}}{\text{kg}}, \frac{f_n}{\text{Hz}}, \xi\right) = \dots$$

$$\text{stiffness} \leftarrow (2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot \text{mass}$$

$$d_{\text{yield}} \leftarrow \frac{p_{\text{yield}}}{\text{stiffness}}$$

$$C1 \leftarrow 4 \cdot \frac{\text{mass}}{\Delta t} + 2 \cdot (2 \cdot \text{mass} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \xi)$$

$$C2 \leftarrow C1 \cdot \Delta t^{-1}$$

$$nv \leftarrow \text{length}(p)$$

$$\begin{pmatrix} \text{set}_1 \\ \text{diff}_1 \\ \text{maxdiff}_1 \\ k_1 \\ u_1 \\ v_1 \\ a_1 \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \text{stiffness} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{p_1}{\text{mass}} \end{pmatrix}$$

$$\text{for } i \in 1..nv - 1$$

$$\Delta p_i \leftarrow \begin{cases} (p_i - p_{i-1}) & \text{if } i > 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} \text{set}_{i+1} \\ \text{diff}_{i+1} \\ \text{maxdiff}_{i+1} \\ k_{i+1} \\ u_{i+1} \\ v_{i+1} \\ a_{i+1} \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} |u_i - \text{set}_i| \\ \text{if} \left[\maxdiff_i > \text{diff}_i, \maxdiff_i \cdot (k_i \neq 0), \text{diff}_i \right] \\ \text{stiffness} \cdot (\text{diff}_i < d_{\text{yield}}) \\ u_i + \frac{\Delta p_i + C1 \cdot v_i + 2 \cdot \text{mass} \cdot a_i}{k_i + C2} \\ v_i + \frac{2}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta p_i + C1 \cdot v_i + 2 \cdot \text{mass} \cdot a_i}{k_i + C2} - 2 \cdot v_i \\ a_i + \frac{4}{\Delta t^2} \cdot \left(\frac{\Delta p_i + C1 \cdot v_i + 2 \cdot \text{mass} \cdot a_i}{k_i + C2} - v_i \cdot \Delta t \right) - 2 \cdot a_i \end{pmatrix}$$

$$u$$

$$(u \ v \ a \ k)$$

$$\text{result} := \text{response} \left(\frac{p}{\text{N}}, \frac{\Delta t}{\text{sec}}, \frac{\text{yield_force}}{\text{N}}, \frac{\text{Mass}}{\text{kg}}, \frac{f_n}{\text{Hz}}, \xi \right)$$

Eredmények vektora: elmozdulás: $u2 := \text{result}_{1,1} \cdot \text{m}$

sebesség: $v2 := \text{result}_{1,2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$

gyorsulás: $a2 := \text{result}_{1,3} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

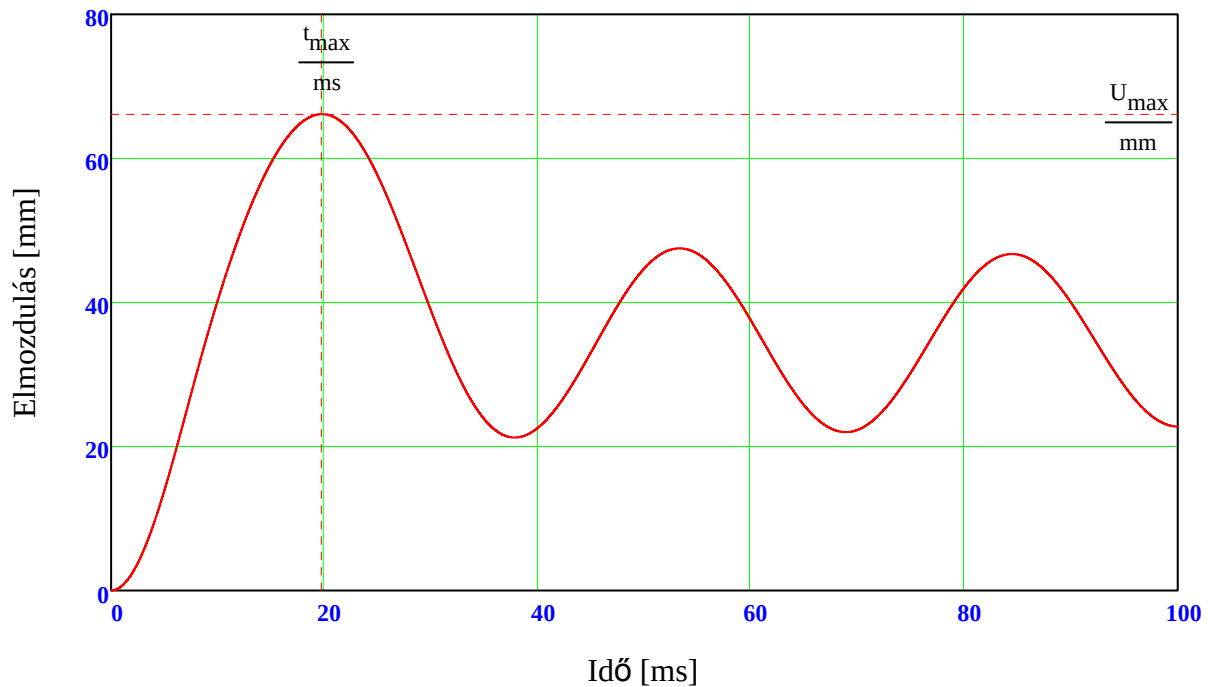
A maximum elmozdulás megkeresése:

```
MAX :=
  U ← result1,1 · m
  g ← 2
  while  $\frac{U_{g+1}}{U_g} > 1$ 
    g ← g + 1
     $\left( \frac{U_{g-1}}{\text{mm}}, \frac{g \cdot \Delta t}{\text{s}} \right)$ 
```

A maximális elmozdulás: $U_{\max} := \text{MAX}_{1,1} \cdot \text{mm} = 66.14 \cdot \text{mm}$

A maximális elmozdulásig eltelt idő: $t_{\max} := \text{MAX}_{1,2} \cdot \text{s} = 19.78 \cdot \text{ms}$

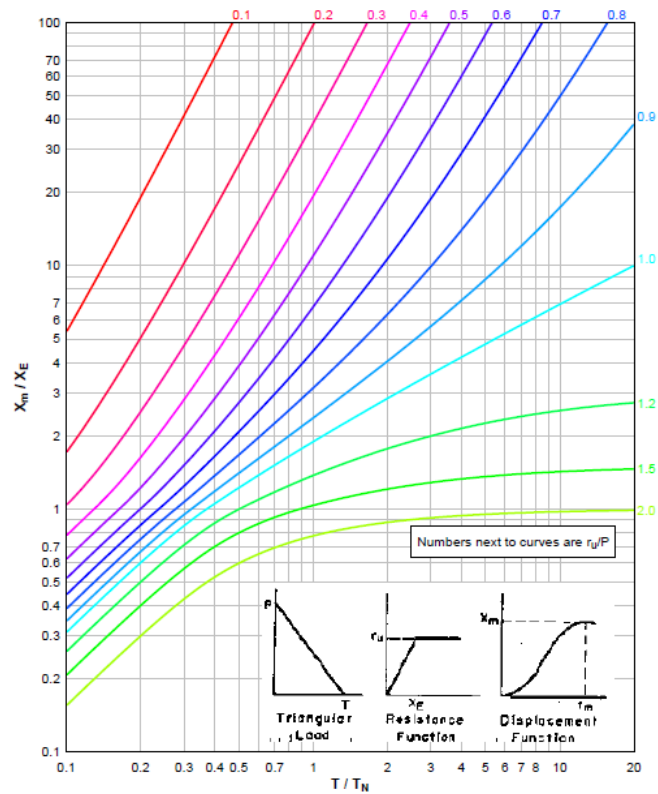
SDOF elmozdulás - idő függvény



A gerjesztett rezgőmozgás differenciálegyenletének nomogramos megoldása
Biggs [90] munkája alapján.

A hivatkozott mintapélda [92]-ben a nomogramos, grafikus megoldással lett megoldva.

$$\frac{r_u}{P} = 1 \qquad \frac{t_d}{T} = 1.23$$



A nomogramot leolvassva:

$$\frac{X_m}{X_E} = \mu = 2.1$$

$$X_m = X_E \cdot 2.1 = 66.2 \text{ mm}$$

A gerjesztett rezgőmozgás megoldása energiaegyensúlyi egyenlettel

UFC 3-340-02 [37] alapján.

Ez az eljárás csak az érvényességi feltétel teljesülése mellett használható. Az UFC 3-340-02 szerint $t_m/t_d > 3$ feltételnek kell teljesülnie. A maximális elmozduláshoz szükséges időtartamot a pontos, numerikus megoldásból átvéve:

$$\frac{t_{\max}}{t_d} = 0.494 < 3$$

Nem teljesül.

Az egyenletet mégis megoldva:

$$\text{Given} \quad X_m := 1 \text{ mm}$$

$$\frac{(I_R \cdot sp \cdot L \cdot K_L)^2}{2 \cdot \text{Mass}} = K_R \cdot \left[\frac{X_E \cdot R}{2} + R \cdot (X_m - X_E) \right]$$

$$\text{Find}(X_m) = 270.488 \cdot \text{mm}$$

Tehát nagyságrendileg rossz eredményt ad a képlet.

Módosítsuk úgy a bemenő paramétereket, hogy a t_m/t_d hányados 3-nál nagyobbra adódjon, és ismételjük meg az összehasonlítást!

A gerjesztett rezgőmozgás differenciálegyenletének numerikus megoldása

Módosított bemenő paraméterekkel

Az új bemenő adatok:

$$\text{Lecsengési idő:} \quad t_d := 20 \text{ ms}$$

$$\text{Túlnyomási csúcsérték:} \quad P_R := 100 \text{ kPa}$$

$$\text{Gerenda önsúlya:} \quad M_g := 400 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

$$\text{Gerenda fesztáv:} \quad L := 7 \text{ m}$$

$$\text{Gerenda osztásköz:} \quad sp := 2.5 \text{ m}$$

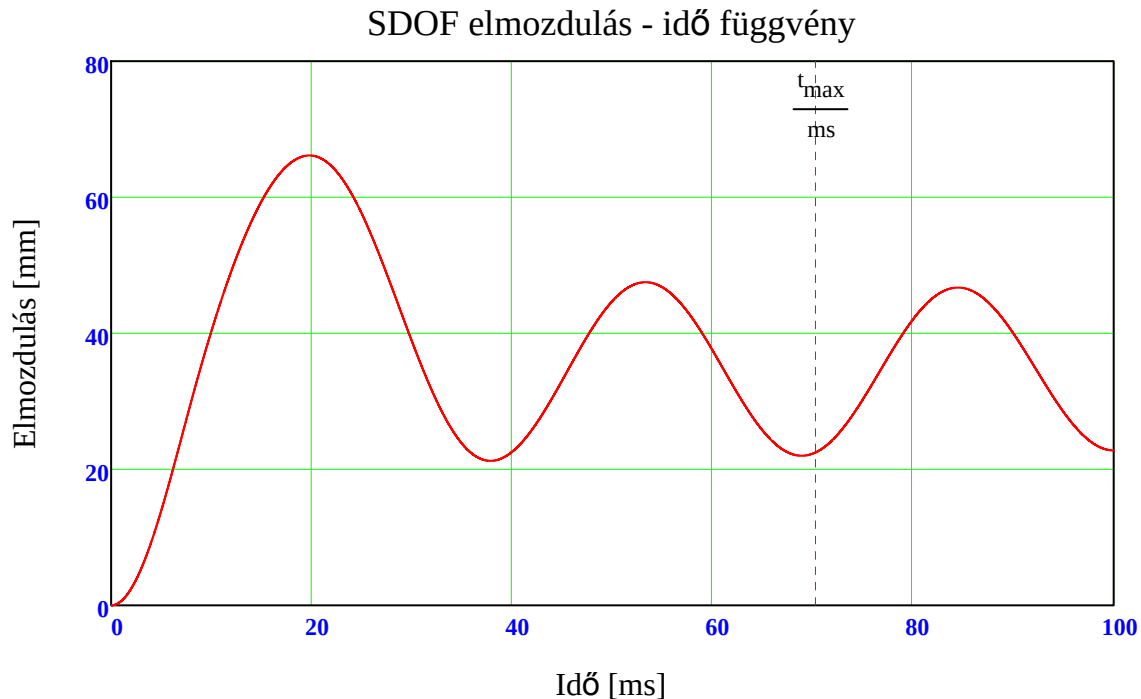


$$\text{result} := \text{response}\left(\frac{p}{N}, \frac{\Delta t}{\text{sec}}, \frac{\text{yield_force}}{N}, \frac{\text{Mass}}{\text{kg}}, \frac{f_n}{\text{Hz}}, \xi\right)$$

$$\text{MAX} := \begin{cases} U \leftarrow \text{result}_{1,1} \cdot m \\ g \leftarrow 2 \\ \text{while } \frac{U_{g+1}}{U_g} > 1 \\ \quad g \leftarrow g + 1 \\ \quad \left(\frac{U_{g-1}}{\text{mm}}, \frac{g \cdot \Delta t}{s} \right) \end{cases}$$

A maximális elmozdulásig eltelt idő: $t_{\max} := \text{MAX}_{1,2} \cdot s = 70.43 \cdot \text{ms}$

A maximális elmozdulás: $U_{\max} := \text{MAX}_{1,1} \cdot \text{mm} = 304.236 \cdot \text{mm}$



A gerjesztett rezgőmozgás megoldása energiaegyensúlyi egyenlettel *Módosított bemenő paraméterekkel*

Ismét megvizsgálva az érvényességi feltételeket, azt kapjuk, hogy:

$$\frac{t_{\max}}{t_d} = 3.521 > 3 \quad \underline{\text{Teljesül.}}$$

$$\begin{matrix} \text{Given} \\ X_m := 1 \text{ mm} \end{matrix} \quad \frac{(I_R \cdot \text{sp} \cdot L \cdot K_L)^2}{2 \cdot \text{Mass}} = K_R \cdot \left[\frac{X_E \cdot R}{2} + R \cdot (X_m - X_E) \right]$$

Tehát az eredmények összevetve:

Energia egyensúlyi egyenlet:

$$X := (\text{Find}(X_m)) = 334.001 \cdot \text{mm}$$

Numerikus megoldás:

$$U_{\max} = 304.236 \cdot \text{mm}$$

$$\frac{X}{U_{\max}} - 1 = 9.78\%$$

Tehát kb. 10%-al ad nagyobb eredményt az energiaegyensúlyi egyenlet.

Acél oszlop SDOF megoldása az átlaggyorsulások módszerével



VBIED robbanóanyag mennyisége:

W := 200 kg

Töltettényező:

C_{neq} := 0.82

VBIED távolsága:

R₀ := 11 mR_x := 0 m

$$R := \sqrt{R_0^2 + R_x^2} = 11 \text{ m}$$

Acél szelvény:

Beesési (visszaverődési) szög:

$$\alpha := \arctan\left(\frac{R_x}{R_0}\right) = 0^\circ$$

Nyomásfüggvény típusa:

Háromszög
Friedlander

Acélminőség:

S235
S355

HEA100
HEA120
HEA140
HEA160
HEA180
HEA200
HEA220
HEA240
HEA260
HEA280
HEA300
HEA320
HEA340
HEA360
HEA400
HEA450
HEA500
HEA550

Duktilitási limit:

μ := 15

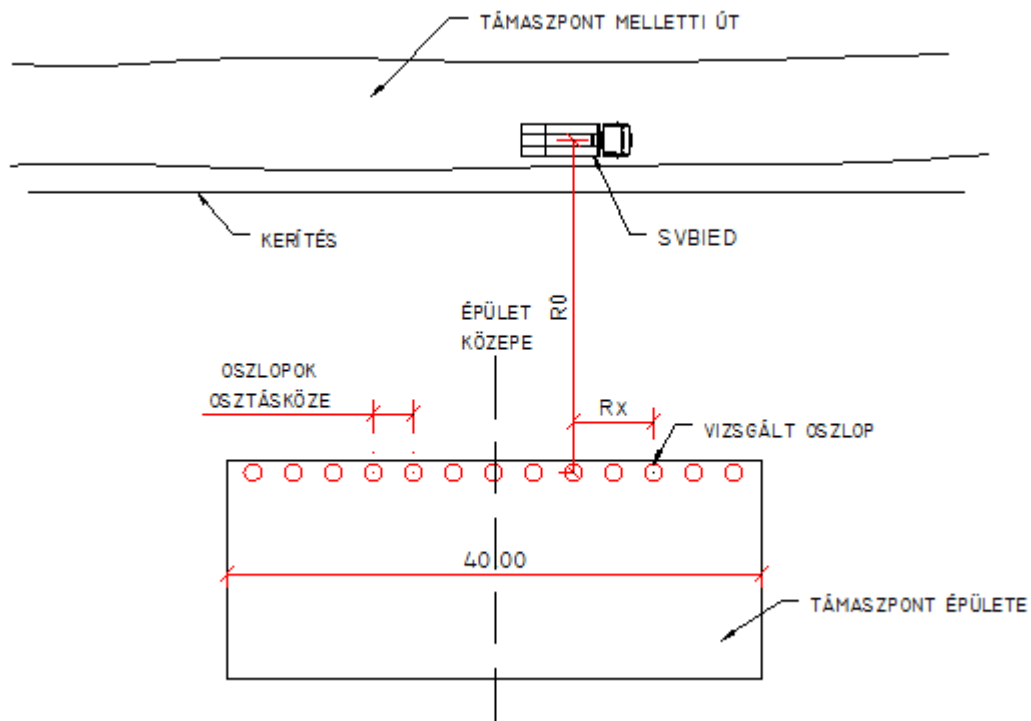
Oszlopok magassága:

L := 2.6 m

Oszlopok osztásköze:

sp := 3 m

Gerinchízalás:

t_{w.add} := 11 mm

Robbanóanyag mennyiség biztonsági tényezője: $\alpha_W := 1.2$

Acél parciális biztonsági tényezője (SIF)
(rendkívüli tervezési állapot): $\phi_S := 1.1$

Detonáló TNT egyenértékű robbanóanyag: $W := \alpha_W \cdot W \cdot C_{\text{neq}} = 196.8 \text{ kg}$

Arányosított távolság: $Z := \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{\text{kg}^{\frac{1}{3}}}{\text{m}} = 1.891$

► Keresztmetszeti adatok

A túlnyomási csúcsérték meghatározása:

$\text{sor}_p := \begin{cases} 1 & \text{if } 0.2 \leq Z < 2.9 \\ 2 & \text{if } 2.9 \leq Z < 23.8 \\ 3 & \text{if } 23.8 \leq Z < 198.5 \end{cases}$

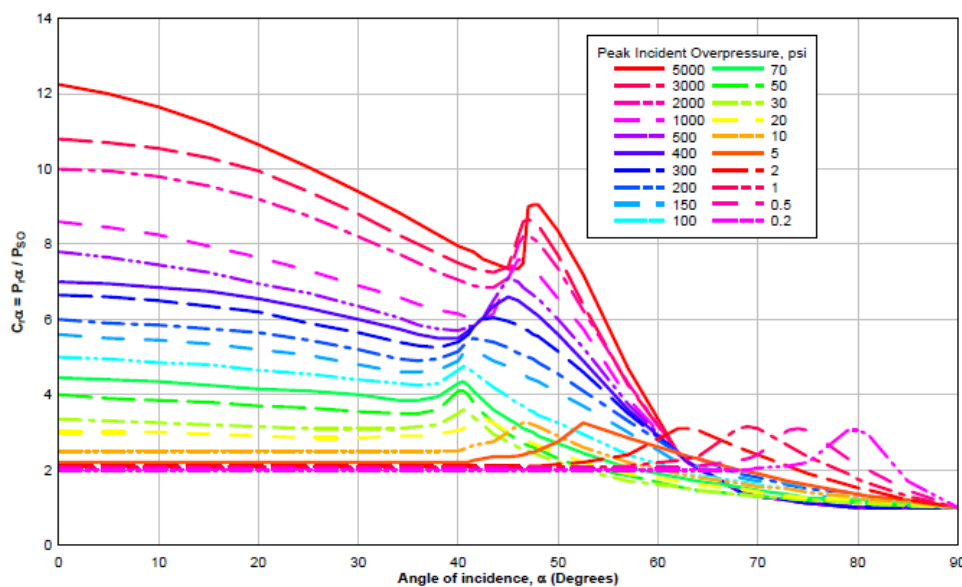
A regressziós együtthatók:

$A_p := \begin{pmatrix} 7.2106 \\ 7.5938 \\ 6.0536 \end{pmatrix} \quad B_p := \begin{pmatrix} -2.1069 \\ -3.0523 \\ -1.4066 \end{pmatrix} \quad C_p := \begin{pmatrix} -0.3229 \\ 0.40977 \\ 0 \end{pmatrix} \quad D_p := \begin{pmatrix} 0.1117 \\ 0.0261 \\ 0 \end{pmatrix} \quad E_p := \begin{pmatrix} 0.0685 \\ -0.01267 \\ 0 \end{pmatrix}$

A túlnyomási csúcsérték:

$P_{SO} := e^{\left(A_{p_{\text{sor}_p}} + B_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z) + C_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z)^2 + D_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z)^3 + E_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z)^4 \right)} \cdot \text{kPa} \quad P_{SO} = 322.87 \cdot \text{kPa}$

Visszaverődési adatok számítása



Túlnyomás visszaverődési tényezője a beesési szög függvényében [37]

A diagram görbéinek beolvasása:

raw := 02_193.xlsx $P_{row} :=$ 02_193.xlsx $\alpha_{row} :=$ 02_193.xlsx

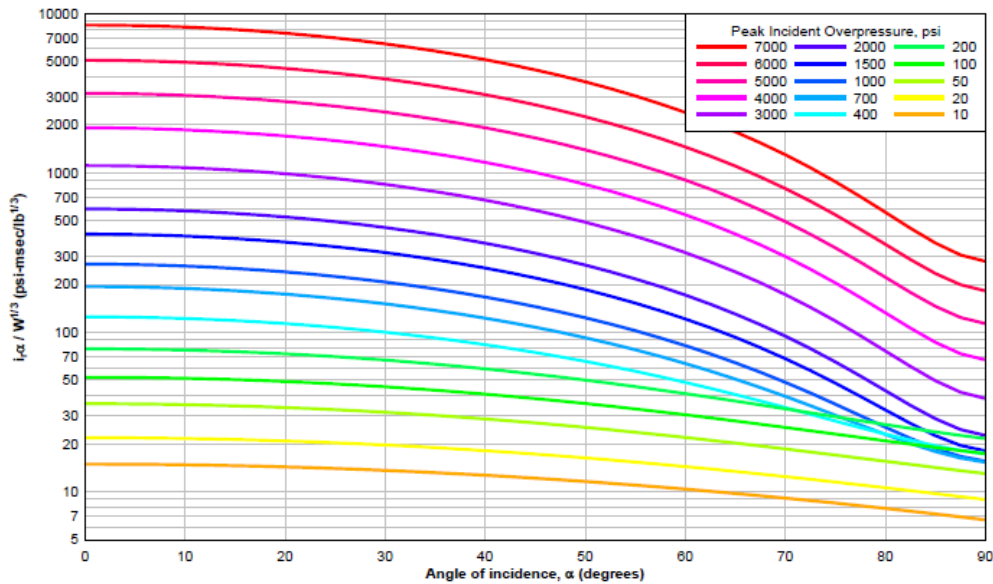
Kettős interpoláció alkalmazása a fenti diagramon:

$$i := 1 \dots \text{length}(P_{row}^T)$$

$$A_i := \text{linterp}(\alpha_{row}^{\circ}, \text{raw}^{(i)}, \alpha)$$

$$C_{r\alpha} := \text{linterp}(\text{reverse}(P_{row}^T) \cdot \text{psi}, \text{reverse}(A), P_{SO}) = 3.897$$

Visszavert túlnyomás számítása: $P_R := C_{r\alpha} \cdot P_{SO} = 1.258 \times 10^3 \cdot \text{kPa}$



Túlnyomás visszaverődési tényezője a beesési szög függvényében [37]

A diagram görbéinek beolvasása:

$I_{r_{row}} :=$ 02_194.xlsx $\alpha_{row} :=$ 02_194.xlsx $I_{r_{row}} :=$ 02_194.xlsx

Kettős interpoláció alkalmazása a fenti diagramon:

$$i := 1 \dots \text{length}(I_{r_{row}}^T)$$

$$B_i := \text{linterp}(\alpha_{row}^{\circ}, I_{r_{row}}^{(i)}, \alpha)$$

$$\left[\frac{I_R}{W^{\frac{1}{3}}} \right] := \text{linterp} \left(\text{reverse}(I_{r_{row}}^T) \cdot \text{psi}, \text{reverse}(B) \cdot \frac{\text{psi} \cdot \text{ms}}{\text{lb}^{\frac{1}{3}}}, P_{SO} \right) = 34.217 \cdot \frac{\text{psi} \cdot \text{ms}}{\text{lb}^{\frac{1}{3}}}$$

Visszavert impulzus számítása:

$$I_R := \left[\frac{I_R}{W^{\frac{1}{3}}} \right] \cdot W^{\frac{1}{3}} = 259.035 \cdot \text{psi} \cdot \text{ms}$$

Pozitív fázis lecsengési ideje:

$$t_d := \begin{cases} \frac{2 \cdot I_R}{P_R} & \text{if fuggvenyalak} = 1 \\ \frac{I_R}{0.368 \cdot P_R} & \text{otherwise} \end{cases} \quad t_d = 2.839 \cdot \text{ms}$$

Acéloszlop tulajdonságai

Acél rugalmassági modulusa:

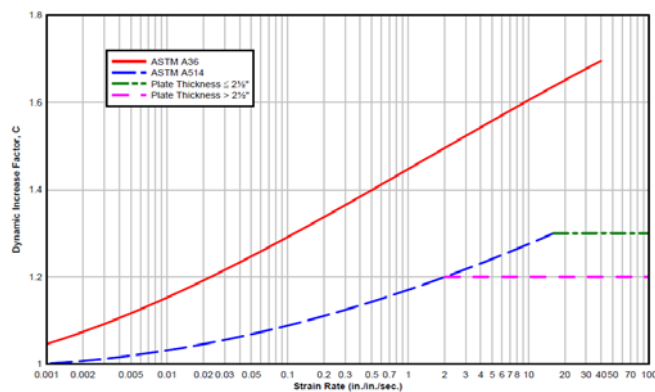
$$E := 210 \text{ GPa}$$

Acél sűrűsége:

$$\rho := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Acél folyási szilárdsága:

$$F_y := f_{yk} \cdot \phi_s = 457.27 \cdot \text{MPa}$$



A szerkezeti acél figyelembe vett DIF-ε összefüggése [37]

Szilárdság növelő tényező számítása (az iteratív számításhoz):

$$raw_{DIF,s} :=$$

05_002.xlsx

$$DIF(\epsilon) := \text{linterp} \left(raw_{DIF,s}^{(1)} \cdot \frac{1}{s}, raw_{DIF,s}^{(2)}, \epsilon \right)$$

SDOF számítás relatív modellszórása:

$$ME_{SDOF} := 1.233$$

Övszélesség: $b = 300 \cdot \text{mm}$

Szelvény magassága: $h = 290 \cdot \text{mm}$

Gerincvastagság: $t_w = 8.5 \cdot \text{mm}$

Övvastagság: $t_f = 14 \cdot \text{mm}$

Nyírási terület: $A_w := (h - 2 \cdot t_f) \cdot (t_w + t_{w,\text{add}}) = 5109 \cdot \text{mm}^2$

Keresztmetszeti terület: $A_{st} := 2 \cdot b \cdot t_f + t_w \cdot (h - 2 \cdot t_f) = 10627 \cdot \text{mm}^2$

Inercianyomaték: $I_x := \frac{1}{12} \cdot [b \cdot h^3 - (b - t_w) \cdot (h - 2 \cdot t_f)^3] = 17285 \cdot \text{cm}^4$

Képlékeny keresztmetszeti modulus: $W_{pl} := \frac{1}{4} \cdot [b \cdot h^2 - (b - t_w) \cdot (h - 2 \cdot t_f)^2] = 1305 \cdot \text{cm}^3$

Ekvivalens tömeg tényező: $K_M := 0.33$

Ekvivalens teher tényező: $K_L := 0.5$

Ekvivalens ellenállás tényező: $K_R := K_L$

Keresztmetszet nyomatéki ellenállása: $M_p := W_{pl} \cdot F_y = 596.769 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$

Oszlop teherbírása: $R := \frac{8 \cdot M_p}{L^2} \cdot L = 1.836 \times 10^3 \cdot \text{kN}$

A hajlított rúdelem merevsége: $K_E := \frac{384 E \cdot I_x}{5 \cdot L^4} \cdot L$

A rugalmas elmozdulás: $X_E := \frac{R}{K_E} = 0.012 \cdot \text{m}$

Az ekvivalens ellenállástényező alkalmazása: $\text{yield_force} := K_R \cdot R$

Az ekvivalens tömegtényező alkalmazása: $\text{Mass} := \rho \cdot A_{st} \cdot L \cdot K_M = 71.576 \cdot \text{kg}$

A hajlított rúdelem frekvenciája: $f_n := \frac{\sqrt{\frac{(K_R \cdot K_E)}{\text{Mass}}}}{2\pi} = 167.526 \frac{1}{\text{s}}$

Megoldás vezérlés

Csillapítás:

$$\xi := 1\%$$

Szerkezet válaszanak vizsgált időtartama:

$$t_{\max} := 20 \cdot \text{ms}$$

Időlépcső:

$$\Delta t := .002 \cdot \text{ms}$$

Lépések száma:

$$N_o := \text{round}\left(\frac{t_{\max}}{\Delta t}\right) = 10000 \quad i := 1 \dots N_o$$

Kiértékelési időpontok:

$$t_i := \Delta t \cdot i$$

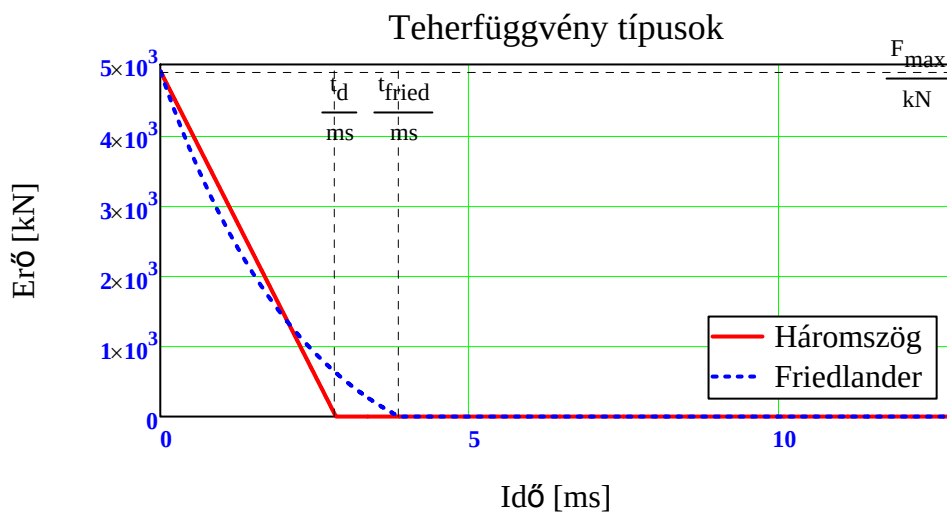
Az ekvivalens teherternyező alkalmazása: $F_{\max} := P_R \cdot s_p \cdot L \cdot K_L = 4.907 \times 10^3 \cdot \text{kN}$

Teherfüggvények előállítása:

$$\text{Háromszög teher:} \quad \text{prampdown}_i := \begin{cases} F_{\max} \cdot \left(1 - \frac{t_i}{t_d}\right) & \text{if } t_i < t_d \\ 0 \cdot \text{N} & \text{if } t_i \geq t_d \end{cases}$$

$$\text{Friedlander teher:} \quad \text{pfriedlander}_i := \begin{cases} F_{\max} \cdot e^{-\frac{t_i}{t_{\text{fried}}}} \cdot \left(1 - \frac{t_i}{t_{\text{fried}}}\right) & \text{if } t_i < t_{\text{fried}} \\ 0 \cdot \text{N} & \text{if } t_i \geq t_{\text{fried}} \end{cases}$$

$$p_i := \begin{cases} \text{prampdown}_i & \text{if } \text{függvényalak} = 1 \\ \text{pfriedlander}_i & \text{otherwise} \end{cases}$$





A rezgésegyenlet numerikus megoldó algoritmusának programozása: [94]

```

response(p, Δt, pyield, mass, f, ξ) = ...

stiffness ← (2 · π · f)2 · mass

dyield ←  $\frac{p_{yield}}{stiffness}$ 

C1 ← 4 ·  $\frac{mass}{\Delta t}$  + 2 · (2 · mass · 2 · π · f · ξ)

C2 ← C1 · Δt-1

nv ← length(p)

 $\begin{pmatrix} set_1 \\ diff_1 \\ maxdiff_1 \\ k_1 \\ u_1 \\ v_1 \\ a_1 \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ stiffness \\ 0 \\ 0 \\ \frac{p_1}{mass} \end{pmatrix}$ 

for i ∈ 1 .. nv - 1
    Δpi ←  $\begin{cases} (p_i - p_{i-1}) & \text{if } i > 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ 

     $\begin{pmatrix} set_{i+1} \\ diff_{i+1} \\ maxdiff_{i+1} \\ k_{i+1} \\ u_{i+1} \\ v_{i+1} \\ a_{i+1} \end{pmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} \left[ \left( \begin{matrix} |u_i - set_i| \\ \text{if } [maxdiff_i > diff_i, maxdiff_i \cdot (k_i \neq 0), diff_i] \\ stiffness \cdot (diff_i < d_{yield}) \\ u_i + \frac{\Delta p_i + C1 \cdot v_i + 2 \cdot mass \cdot a_i}{k_i + C2} \\ v_i + \frac{2}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta p_i + C1 \cdot v_i + 2 \cdot mass \cdot a_i}{k_i + C2} - 2 \cdot v_i \\ a_i + \frac{4}{\Delta t^2} \cdot \left( \frac{\Delta p_i + C1 \cdot v_i + 2 \cdot mass \cdot a_i}{k_i + C2} - v_i \cdot \Delta t \right) - 2 \cdot a_i \end{matrix} \right) \cdot d_{yield}, set_i \right] \end{bmatrix}$ 

    u
    (u v a k)

```

$$\text{result} := \text{response}\left(\frac{p}{N}, \frac{\Delta t}{\text{sec}}, \frac{\text{yield_force}}{N}, \frac{\text{Mass}}{\text{kg}}, \frac{f_n}{\text{Hz}}, \xi\right)$$



A maximum elmozdulás megkeresése:

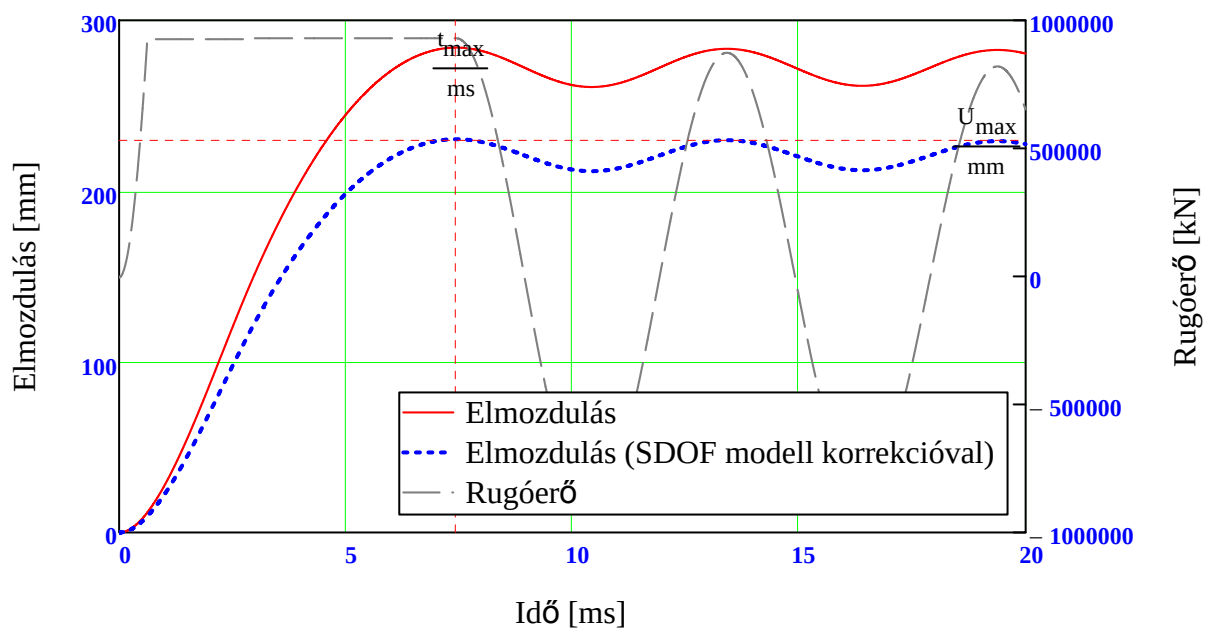
```
MAX :=
  U ← result1,1 · m
  g ← 2
  while  $\frac{U_{g+1}}{U_g} > 1$ 
    g ← g + 1
     $\left( \frac{U_{g-1}}{\text{mm}}, \frac{g \cdot \Delta t}{s} \right)$ 
```

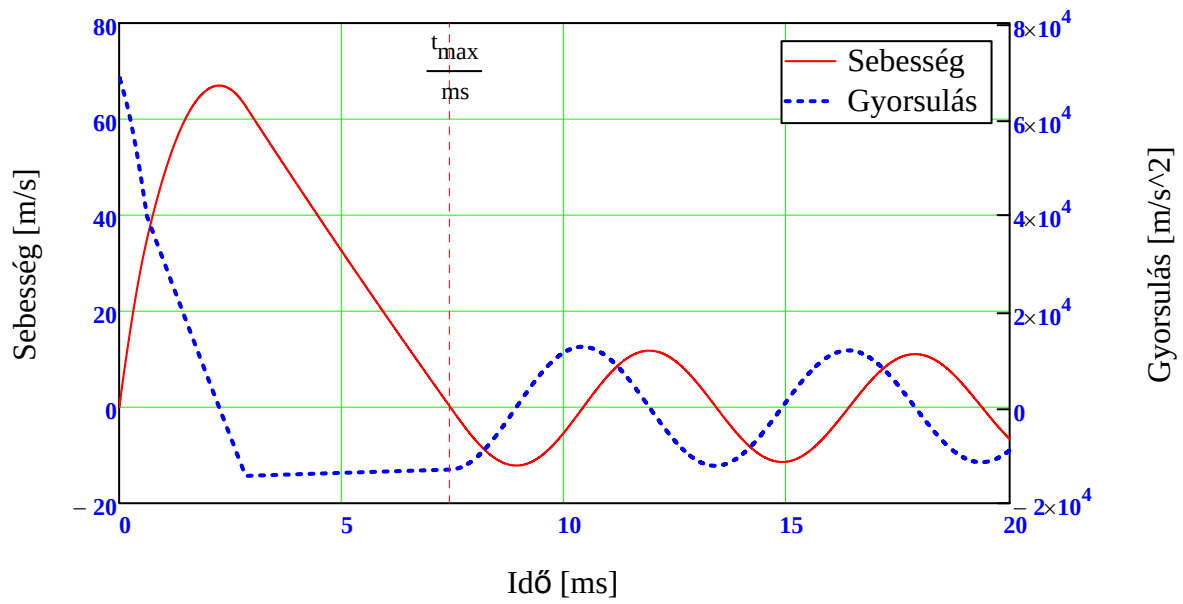
A maximális elmozdulásig eltelt idő:

$$t_{\max} := \text{MAX}_{1,2} \cdot s = 7.438 \cdot \text{ms}$$

A maximális elmozdulás:

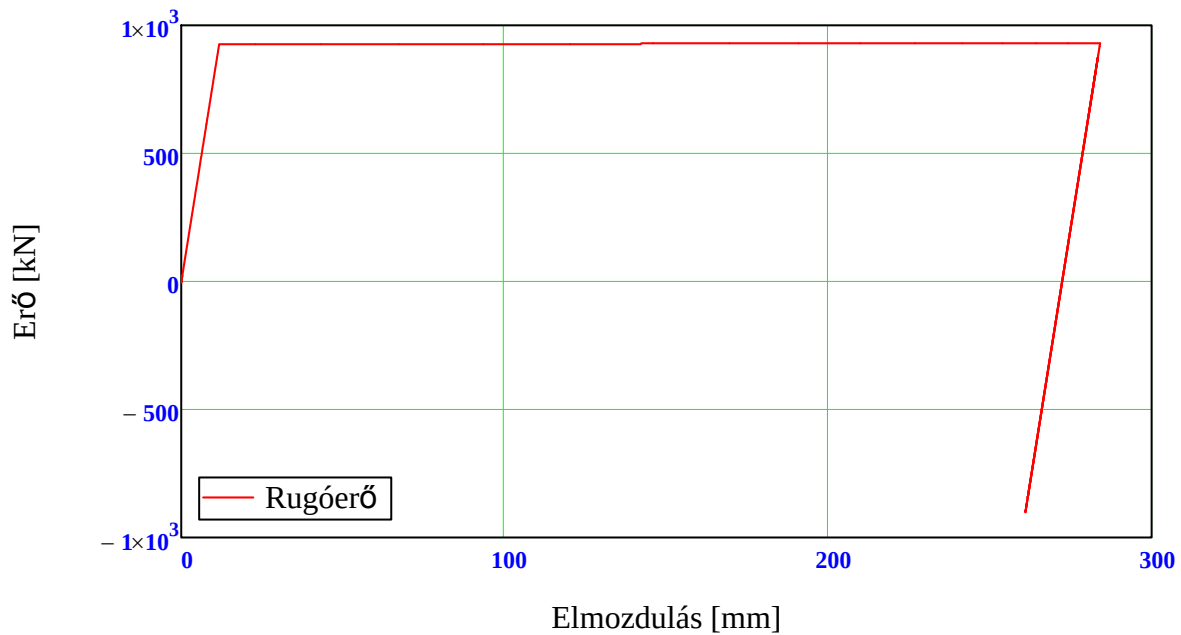
$$U_{\max} := \frac{\text{MAX}_{1,1} \cdot \text{mm}}{ME_{\text{SDOF}}} = 230.353 \cdot \text{mm}$$





A rugóerő számítása:

$$\text{spring}_i := p_i - \text{Mass} \cdot a_{2_i} - 2 \cdot \text{Mass} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot \xi \cdot v_{2_i}$$



A dinamikus szilárdságnövekedés iteratív figyelembevételével a maximális elmozdulás:

$$\begin{aligned}
 U_{MAX} &:= \text{for } j \in 1..5 \\
 &\quad \text{result} \leftarrow \text{response} \left(\frac{p}{N}, \frac{\Delta t}{\text{sec}}, \frac{\text{yield_force}}{N}, \frac{\text{Mass}}{\text{kg}}, \frac{f_n}{\text{Hz}}, \xi \right) \\
 &\quad U \leftarrow \text{result}_{1,1} \cdot \text{m} \\
 &\quad MAX \leftarrow g \leftarrow 2 \\
 &\quad \quad \text{while } \frac{U_{g+1}}{U_g} > 1 \\
 &\quad \quad \quad g \leftarrow g + 1 \\
 &\quad \quad \quad \left(\frac{U_{g-1}}{\text{mm}}, \frac{g \cdot \Delta t}{\text{s}} \right) \\
 &\quad t_E \leftarrow MAX_{1,2} \cdot \text{s} \\
 &\quad \epsilon \leftarrow \frac{F_y}{E \cdot t_E} \\
 &\quad \text{DIFF} \leftarrow \text{DIF}(\epsilon) \\
 &\quad \text{yield_force} \leftarrow K_R \cdot R \cdot \text{DIFF} \\
 &\quad u_{\max_j} \leftarrow \frac{MAX_{1,1}}{ME_{SDOF}} \\
 &\quad \left(\begin{array}{c} u_{\max} \\ \text{DIFF} \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

Az iterációk eredményei:

$$u_{\max} := U_{MAX_1} \cdot \text{mm} = \begin{pmatrix} 230.4 \\ 168.2 \\ 165.7 \\ 165.7 \\ 165.7 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}$$

Maximum elmozdulás

$$u_{\max_5} = 165.7 \cdot \text{mm}$$

Megszabott határérték:

$$\mu \cdot X_E = 173.7 \cdot \text{mm}$$

Kihasználtság:

$$\frac{u_{\max_5}}{(\mu \cdot X_E)} = 95.9\%$$

MEGFELEL

Nyírás ellenőrzése

Nyírási teherbírás:

$$V_r := A_w \cdot \frac{U_{MAX_2} \cdot F_y}{\sqrt{3}} = 1.863 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

A maximális nyíróerő számítása:

$$\text{reakcio}_i := 0.39 \frac{\text{spring}_i}{K_R} + 0.11 \cdot \frac{p_i}{K_L} \quad \max(\text{reakcio}) = 1566 \cdot \text{kN}$$

Konzervatív közelítésként használható a függvényértékek maximumával alkalmazott képlet:

$$V_{df} := 0.39R + 0.11 \cdot \frac{F_{\max}}{K_L} = 1.796 \times 10^3 \cdot \text{kN}$$

$$V_{df} = 1796 \cdot \text{kN}$$

$$V_r = 1863 \cdot \text{kN}$$

Kihasználtság:

$$\frac{V_{df}}{V_r} = 96.393\%$$

MEGFELEL

Vasbeton oszlop SDOF megoldása az átlaggyorsulások módszerével



VBIED robbanóanyag mennyisége:

$$W := 210 \text{ kg}$$

Töltéttényező:

$$C_{\text{neq}} := 0.82$$

VBIED távolsága:

$$R_0 := 14 \text{ m}$$

$$R_x := 0 \text{ m}$$

$$R := \sqrt{R_0^2 + R_x^2} = 14 \text{ m}$$

Beesési (visszaverődési) szög:

$$\alpha := \arctan\left(\frac{R_x}{R_0}\right) = 0^\circ$$

Robbanóanyag mennyiség biztonsági tényezője: $\alpha_W := 1.2$

Nyomásfüggvény típusa:

Háromszög
Friedlander

Rendkívüli tervezési állapot parciális biztonsági tényezői:

$$\phi_s := 1 \quad \phi_c := \frac{1}{1.2}$$

Detonáló TNT ekvivalens robbanóanyag:

$$W := \alpha_W \cdot W \cdot C_{\text{neq}} = 206.64 \text{ kg}$$

Duktilitási limit:

$$\Theta_{\text{all}} := 6^\circ$$

SDOF modell bizonytalansága:

Oszlopok magassága:

$$L := 3 \text{ m}$$

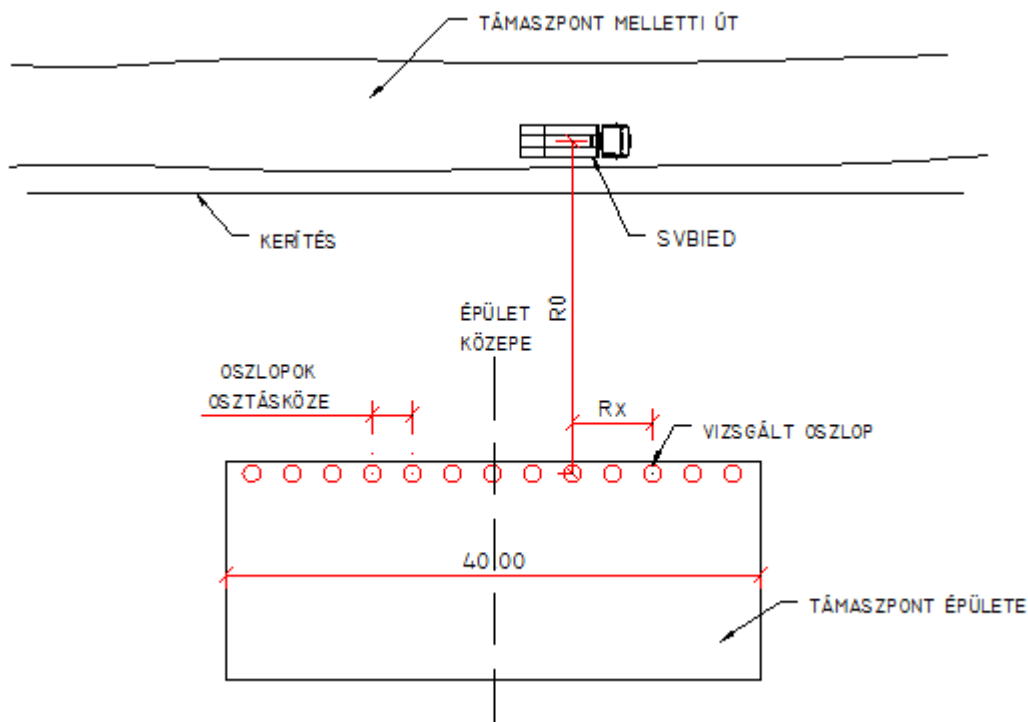
$$ME_{\text{SDOF}} := 1.233$$

Oszlopok osztásköze:

$$sp := 2 \text{ m}$$

Arányosított távolság:

$$Z := \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{\text{kg}^{\frac{1}{3}}}{\text{m}} = 2.368$$



Vasbeton keresztmetszet definiálásaMagasság: $h := 300\text{mm}$ Szélesség: $b := 300\text{mm}$ Betonfedés: $c_{\text{bot}} := 50\text{mm}$ Kengyel átmérő: $D_{\text{shear}} := 18\text{mm}$ Kengyelek távolsága: $s_{\text{shear}} := 160\text{mm}$ Vasak száma: $n_{\text{bot}} := 4$

Betonminőség:

C16/20
C20/25
C25/30
C30/37
C35/45

Vasátmérő:

M10
M12
M16
M18
M20
M25

Betonacél
minőség:

S400B
S500B

Keresztmetszeti adatok

Alsó vasalás hasznos magassága:

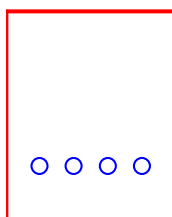
$$d_{\text{bot}} = 223\text{mm}$$

Vasalás keresztmetszeti területe:

$$A_{\text{s.bot}} := \left[n_{\text{bot}} \cdot \frac{(D_{\text{bot}})^2 \cdot \pi}{4} \right] = 1018\text{mm}^2$$

Vasalási hányad:

$$\rho_{\text{bot}} := \frac{A_{\text{s.bot}}}{b \cdot h} = 1.131\%$$



A keresztmetszet vázlatos rajza

A túlnyomási csúcsérték meghatározása:

$$\text{sor}_p := \begin{cases} 1 & \text{if } 0.2 \leq Z < 2.9 \\ 2 & \text{if } 2.9 \leq Z < 23.8 \\ 3 & \text{if } 23.8 \leq Z < 198.5 \end{cases}$$

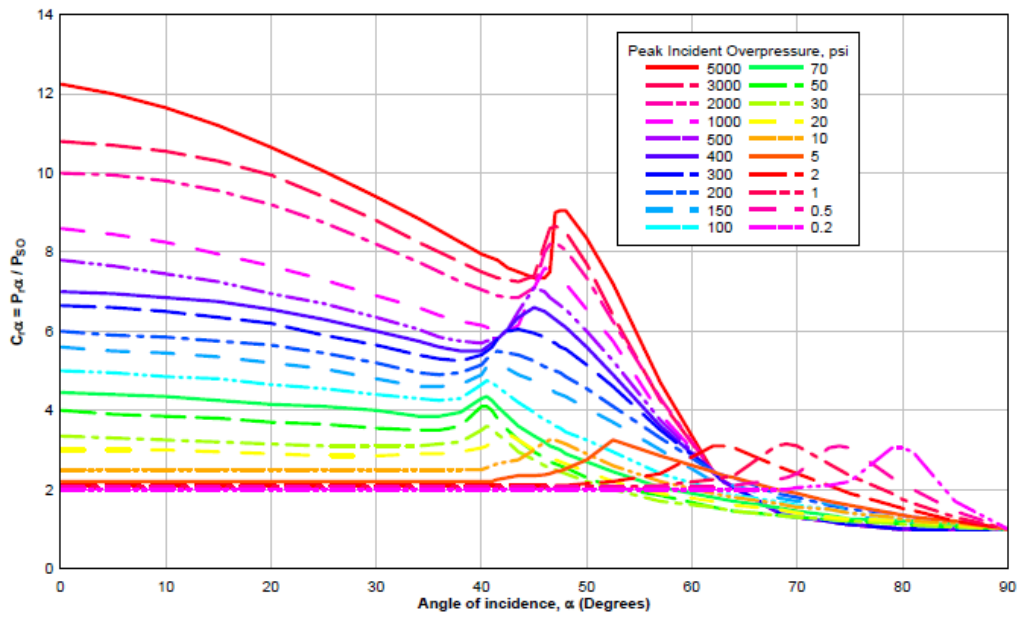
A regressziós együtthatók:

$$A_p := \begin{pmatrix} 7.2106 \\ 7.5938 \\ 6.0536 \end{pmatrix} \quad B_p := \begin{pmatrix} -2.1069 \\ -3.0523 \\ -1.4066 \end{pmatrix} \quad C_p := \begin{pmatrix} -0.3229 \\ 0.40977 \\ 0 \end{pmatrix} \quad D_p := \begin{pmatrix} 0.1117 \\ 0.0261 \\ 0 \end{pmatrix} \quad E_p := \begin{pmatrix} 0.0685 \\ -0.01267 \\ 0 \end{pmatrix}$$

A túlnyomási csúcsérték:

$$P_{\text{SO}} := e^{\left(A_{p_{\text{sor}_p}} + B_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z) + C_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z)^2 + D_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z)^3 + E_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z)^4 \right)} \cdot \text{kPa} \quad P_{\text{SO}} = 193.203\text{kPa}$$

Visszaverődési adatok számítása



Túlnyomás visszaverődési tényezője a beesési szög függvényében [xxx]

A diagram görbéinek beolvasása:

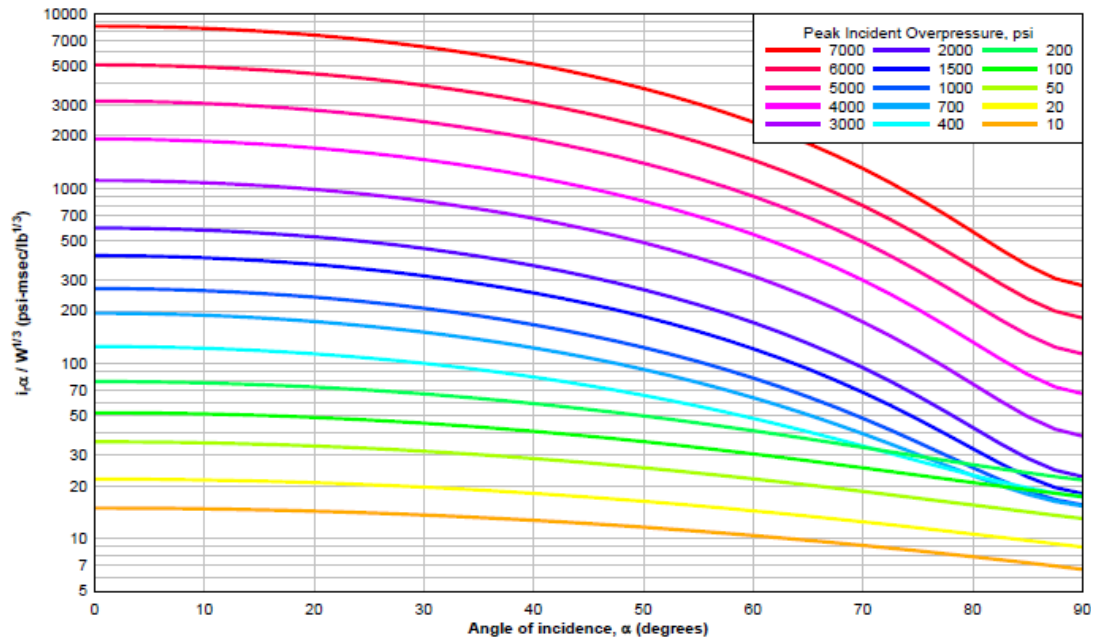
raw := 02_193.xlsx $P_{row} :=$ 02_193.xlsx $\alpha_{row} :=$ 02_193.xlsx

Kettős interpoláció alkalmazása a fenti diagramon:

$$\begin{aligned}
 i &:= 1 \dots \text{length}(P_{row}^T) \\
 A_i &:= \text{linterp}(\alpha_{row}^{\circ}, \text{raw}^{(i)}, \alpha) \\
 C_{r\alpha} &:= \text{linterp}(\text{reverse}(P_{row}^T) \cdot \text{psi}, \text{reverse}(A), P_{SO}) = 3.281
 \end{aligned}$$

Visszavert túlnyomás számítása:

$$P_R := C_{r\alpha} \cdot P_{SO} = 633.854 \cdot \text{kPa}$$



Túlnyomás visszaverődési tényezője a beesési szög függvényében [xxx]

A diagram görbéinek beolvasása:

$$I_{r_{\text{raw}}} := \text{02_194.xlsx} \quad \alpha_{\text{row}} := \text{02_194.xlsx} \quad I_{r_{\text{row}}} := \text{02_194.xlsx}$$

Kettős interpoláció alkalmazása a fenti diagramon:

$$i := 1 \dots \text{length}(I_{r_{\text{row}}}^T) \quad B_i := \text{linterp}(\alpha_{\text{row}}^\circ, I_{r_{\text{row}}}^{\langle i \rangle}, \alpha)$$

$$\left[\frac{I_R}{W^{\frac{1}{3}}} \right] := \text{linterp} \left(\text{reverse}(I_{r_{\text{row}}}^T) \cdot \text{psi}, \text{reverse}(B) \cdot \frac{\text{psi} \cdot \text{ms}}{\text{lb}^{\frac{1}{3}}}, P_{\text{SO}} \right) = 25.541 \cdot \frac{\text{psi} \cdot \text{ms}}{\text{lb}^{\frac{1}{3}}}$$

Visszavert impulzus számítása:

$$I_R := \left[\frac{I_R}{W^{\frac{1}{3}}} \right] \cdot W^{\frac{1}{3}} = 196.524 \cdot \text{psi} \cdot \text{ms}$$

Pozitív fázis lecsengési ideje:

$$t_d := \begin{cases} \frac{2 \cdot I_R}{P_R} & \text{if fuggvenyalak} = 1 \\ \frac{I_R}{0.368 \cdot P_R} & \text{otherwise} \end{cases} \quad t_d = 4.275 \cdot \text{ms}$$

Betonoszlop tulajdonságai

Beton sűrűsége: $\rho_c := 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Acél sűrűsége: $\rho_s := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Betonacél folyáshatár: $f_{sd} := \phi_s \cdot f_{yk} = 500 \cdot \text{MPa}$

Beton nyomószilárdság: $f_{cd} := \phi_c \cdot f_{ck} = 29.167 \cdot \text{MPa}$

Betonacél rugalmassági modulusza: $E_s := 200 \text{ GPa}$

Beton rugalmassági modulusza: $E_c := \left(3000 \cdot \sqrt{\frac{f_{cd}}{\text{MPa}}} + 6900 \right) \cdot \text{MPa} \cdot \left(\frac{\rho_c}{2300 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{1.5} = 24.625 \cdot \text{GPa}$

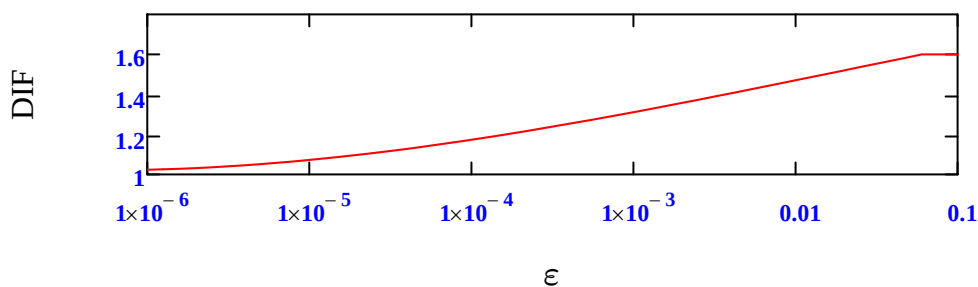
Beton tönkremeneteléhez tartozó összenyomódás: $\epsilon_{cu} := 3.5 \cdot \text{‰}$

Betonacél szilárdság növelő tényező számítása az iteratív számításhoz (UFC 3-340-02 Figure 4-10, 60ksi rebar):

$\text{raw}_{\text{DIF.rb}} :=$

04_010.xlsx

$$\text{DIF}_{\text{rb}}(\epsilon_{\text{rb}}) := \text{linterp} \left(\text{raw}_{\text{DIF.rb}}^{(1)} \cdot \frac{1}{s}, \text{raw}_{\text{DIF.rb}}^{(2)}, \epsilon_{\text{rb}} \right)$$



Beton szilárdság növelő tényező számítása az iteratív számításhoz (Model Code):

$$\epsilon_{c0} := 30 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{s}$$

$$\text{DIF}_c(\epsilon_c) := \begin{cases} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right)^{0.014} & \text{if } \epsilon_c \leq 30 \cdot \frac{1}{s} \\ \left[0.012 \cdot \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} \right)^{\frac{1}{3}} \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

Nyomatéki teherbírás CSA A23.3-04 Section 10

Nyomott betonzóna kitöltöttségét
figyelembe vevő tényezők:

$$\alpha_1 := \max\left(0.85 - 0.0015 \cdot \frac{f_{cd}}{\text{MPa}}, 0.67\right) = 0.806$$

$$\beta_1 := \max\left(0.97 - 0.0025 \cdot \frac{f_{cd}}{\text{MPa}}, 0.67\right) = 0.897$$

Nyomott betonzóna magassága:

$$a := \frac{A_{s,bot} \cdot f_{sd}}{\alpha_1 \cdot f_{cd} \cdot b} = 72.142 \cdot \text{mm}$$

Semleges tengely helyzete:

$$c_o := \frac{a}{\beta_1} = 80.418 \cdot \text{mm}$$

Keresztmetszet nyomatéki ellenállása:

$$M_r := A_{s,bot} \cdot f_{sd} \cdot \left(d_{bot} - \frac{a}{2}\right) = 95.135 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$$

Rugalmassági moduluszok aránya:

$$\alpha_E := \frac{E_s}{E_c} = 8.122$$

Berepedt keresztmetszet inerciája:

$$I_{II} := b \cdot \frac{c_o^3}{3} + A_{s,bot} \cdot \alpha_E \cdot (d_{bot} - c_o)^2$$

$$I_{II} = 2.201 \times 10^4 \cdot \text{cm}^4$$

Inhomogén keresztmetszet rugalmassági
modulusza:

$$E := \frac{E_c \cdot b \cdot c_o + E_s \cdot A_{s,bot}}{b \cdot c_o + A_{s,bot}} = 31.724 \cdot \text{GPa}$$

Ekvivalens tényezők:

$$K_M := 0.33 \quad K_L := 0.5 \quad K_R := K_L$$

tömeg teher ellenállás

Oszlop statikus teherbírása:

$$R := \frac{8 \cdot M_r}{L^2} \cdot L = 253.694 \cdot \text{kN}$$

A hajlított rúdelem merevsége:

$$K_E := \frac{384 E \cdot I_{II}}{5 \cdot L^4} \cdot L$$

A rugalmas elmozdulás:

$$X_E := \frac{R}{K_E} = 12.775 \cdot \text{mm}$$

Acél tömeg:

$$M_{rb} := \left[A_{s,bot} \cdot L + (2b + 2 \cdot h) \cdot \frac{D_{shear}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{L}{s_{shear}} \right] \cdot (\rho_s)$$

Teljes tömeg:

$$\text{Mass} := (\rho_c \cdot b \cdot h \cdot L + M_{rb}) \cdot K_M = 236.582 \cdot \text{kg}$$

Az ekvivalens ellenállástényező
alkalmazása:

$$\text{yield_force} := K_R \cdot R$$

A hajlított rúdelem merevsége: $K_E := \frac{384 E \cdot I_{II}}{5 \cdot L^4} \cdot L$

A rugalmas elmozdulás: $X_E := \frac{R}{K_E} = 12.775 \cdot \text{mm}$

A hajlított rúdelem frekvenciája: $f_n := \frac{\sqrt{\frac{(K_R \cdot K_E)}{\text{Mass}}}}{2\pi} = 32.606 \frac{1}{s}$

Az ekvivalens teherternyező alkalmazása: $F_{\max} := P_R \cdot \text{sp} \cdot L \cdot K_L = 1.902 \times 10^3 \cdot \text{kN}$

Megoldás vezérlés

Csillapítás: $\xi := 1\%$

DIF iterációk száma: $\text{iter}_{\text{DIF}} := 5$

Szerkezet válaszanak vizsgált időtartama: $t_{\max} := 70 \cdot \text{ms}$

Időlépcső: $\Delta t := .002 \cdot \text{ms}$

Lépések száma: $N_o := \text{round}\left(\frac{t_{\max}}{\Delta t}\right) = 35000 \quad i := 1 \dots N_o$

Kiértékelési időpontok: $t_i := \Delta t \cdot i$



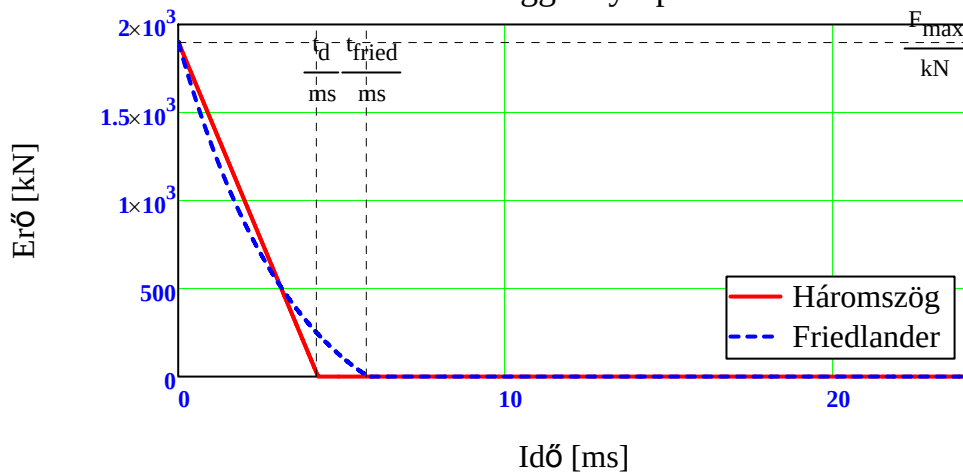
Háromszög teher:

Friedlander teher:

$$\text{prampdown}_i := \begin{cases} F_{\max} \cdot \left(1 - \frac{t_i}{t_d}\right) & \text{if } t_i < t_d \\ 0 \cdot \text{N} & \text{if } t_i \geq t_d \end{cases} \quad \text{pfriedlander}_i := \begin{cases} F_{\max} \cdot e^{-\frac{t_i}{t_{\text{fried}}}} \cdot \left(1 - \frac{t_i}{t_{\text{fried}}}\right) & \text{if } t_i < t_{\text{fried}} \\ 0 \cdot \text{N} & \text{if } t_i \geq t_{\text{fried}} \end{cases}$$

$$p_i := \begin{cases} \text{prampdown}_i & \text{if fuggvenyalak} = 1 \\ \text{pfriedlander}_i & \text{otherwise} \end{cases}$$

Teherfüggvény típusok





A rezgésegyenlet numerikus megoldó algoritmusának programozása: (Ian Ward, DynamAssist):

```

response(p, Δt, pyield, mass, f, ξ) = ...

stiffness ← (2 · π · f)2 · mass

dyield ←  $\frac{p_{\text{yield}}}{\text{stiffness}}$ 

C1 ← 4 ·  $\frac{\text{mass}}{\Delta t}$  + 2 · (2 · mass · 2 · π · f · ξ)

C2 ← C1 · Δt-1

nv ← length(p)

 $\begin{pmatrix} \text{set}_1 \\ \text{diff}_1 \\ \text{maxdiff}_1 \\ k_1 \\ u_1 \\ v_1 \\ a_1 \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \text{stiffness} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{p_1}{\text{mass}} \end{pmatrix}$ 

for i ∈ 1 .. nv - 1
    Δpi ←  $\begin{cases} (p_i - p_{i-1}) & \text{if } i > 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$ 

     $\begin{pmatrix} \text{set}_{i+1} \\ \text{diff}_{i+1} \\ \text{maxdiff}_{i+1} \\ k_{i+1} \\ u_{i+1} \\ v_{i+1} \\ a_{i+1} \end{pmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} \text{if } \left[ (k_i = 0) \cdot (\text{diff}_i < \text{maxdiff}_i), u_i + \text{sign}\left(\frac{\Delta p_i + C1 \cdot v_i + 2 \cdot \text{mass} \cdot a_i}{k_i + C2}\right) \cdot d_{\text{yield}}, \text{set}_i \right] \\ |u_i - \text{set}_i| \\ \text{if } [\text{maxdiff}_i > \text{diff}_i, \text{maxdiff}_i \cdot (k_i \neq 0), \text{diff}_i] \\ \text{stiffness} \cdot (\text{diff}_i < d_{\text{yield}}) \\ u_i + \frac{\Delta p_i + C1 \cdot v_i + 2 \cdot \text{mass} \cdot a_i}{k_i + C2} \\ v_i + \frac{2}{\Delta t} \cdot \frac{\Delta p_i + C1 \cdot v_i + 2 \cdot \text{mass} \cdot a_i}{k_i + C2} - 2 \cdot v_i \\ a_i + \frac{4}{\Delta t^2} \cdot \left( \frac{\Delta p_i + C1 \cdot v_i + 2 \cdot \text{mass} \cdot a_i}{k_i + C2} - v_i \cdot \Delta t \right) - 2 \cdot a_i \end{bmatrix}$ 

    u
    (u v a k)

```

$$\text{result} := \text{response} \left(\frac{p}{N}, \frac{\Delta t}{\text{sec}}, \frac{\text{yield_force}}{N}, \frac{\text{Mass}}{\text{kg}}, \frac{f_n}{\text{Hz}}, \xi \right)$$

A maximum elmozdulás megkeresése:

A maximális elmozdulásig eltelt idő: $t_{\max} := \text{MAX}_{1,2} \cdot s = 31.274 \cdot \text{ms}$

A maximális elmozdulás: $U_{\max} := \text{MAX}_{1,1} \cdot \text{mm} = 249.88 \cdot \text{mm}$

$$\text{MAX} := \begin{array}{|l} U \leftarrow \text{result}_{1,1} \cdot \text{m} \\ g \leftarrow 2 \\ \text{while } \frac{U_{g+1}}{U_g} > 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} g \leftarrow g + 1 \\ \left(\frac{U_{g-1}}{\text{mm}} \quad \frac{g \cdot \Delta t}{s} \right) \end{array} \right. \end{array}$$

A dinamikus szilárdságnövekedés iteratív figyelembevételével a maximális elmozdulás:

$$\begin{array}{|l} \text{RES} := \text{for } j \in 1 \dots \text{iter}_{\text{DIF}} \\ \quad \left| \begin{array}{l} \text{result} \leftarrow \text{response} \left(\frac{p}{N}, \frac{\Delta t}{\text{sec}}, \frac{\text{yield_force}}{N}, \frac{\text{Mass}}{\text{kg}}, \frac{f_n}{\text{Hz}}, \xi \right) \\ U \leftarrow \text{result}_{1,1} \cdot \text{m} \\ \text{MAX} \leftarrow \begin{array}{|l} g \leftarrow 2 \\ \text{while } \frac{U_{g+1}}{U_g} > 1 \\ \quad \left| \begin{array}{l} g \leftarrow g + 1 \\ \left(\frac{U_{g-1}}{\text{mm}} \quad \frac{g \cdot \Delta t}{s} \right) \end{array} \right. \end{array} \\ t_E \leftarrow \text{MAX}_{1,2} \cdot s \\ \epsilon_{cc} \leftarrow \frac{\epsilon_{cu}}{t_E} \\ \epsilon_{rsb} \leftarrow \frac{f_{sd}}{E_s \cdot t_E} \\ \text{DIF}_{cc} \leftarrow \text{DIF}_c(\epsilon_{cc}) \\ \text{DIF}_{rsb} \leftarrow \text{DIF}_{rb}(\epsilon_{rsb}) \\ \text{yield_force} \leftarrow K_R \cdot \text{RR}(\text{DIF}_{cc} \cdot f_{cd}, \text{DIF}_{rsb} \cdot f_{sd}) \\ f_n \leftarrow F_n(\text{DIF}_{cc} \cdot f_{cd}) \\ u_{\max_j} \leftarrow \text{MAX}_{1,1} \\ u2 \leftarrow \text{result}_{1,1} \text{ if } j = \text{iter}_{\text{DIF}} \\ v2 \leftarrow \text{result}_{1,2} \text{ if } j = \text{iter}_{\text{DIF}} \\ a2 \leftarrow \text{result}_{1,3} \text{ if } j = \text{iter}_{\text{DIF}} \\ k2 \leftarrow \text{result}_{1,4} \text{ if } j = \text{iter}_{\text{DIF}} \\ \left(\frac{1}{\text{ME}_{\text{SDOF}}} \cdot u_{\max} \quad \frac{t_E}{s} \quad u2 \quad v2 \quad a2 \quad k2 \quad \frac{u2}{\text{ME}_{\text{SDOF}}} \quad \text{DIF}_{cc} \quad \text{DIF}_{rsb} \right) \end{array} \end{array}$$

Az iterációk eredményei:

$$\text{RES}_{1,1} \cdot \text{mm} = \begin{pmatrix} 202.66 \\ 144.566 \\ 144.395 \\ 144.394 \\ 144.394 \end{pmatrix} \cdot \text{mm}$$

A maximális elmozdulás:

$$U_{\max} := \left(\text{RES}_{1,1} \right)_{\text{iter}_{\text{DIF}}} \cdot \text{mm}$$

A maximális elmozdulásig eltelt idő:

$$t_{\max} := \text{RES}_{1,2} \cdot s = 22.366 \cdot \text{ms}$$

$$u2 := \text{RES}_{1,3} \cdot \text{m}$$

$$v2 := \text{RES}_{1,4} \cdot \frac{\text{m}}{s}$$

$$a2 := \text{RES}_{1,5} \cdot \frac{\text{m}}{s^2}$$

$$k2 := \text{RES}_{1,6} \cdot \frac{N}{\text{m}}$$

$$u2_{\text{corr}} := \text{RES}_{1,7} \cdot \text{m}$$

Maximum elmozdulás

$$U_{\max} = 144.394 \cdot \text{mm}$$

$$\Theta_f := \operatorname{atan}\left(\frac{U_{\max}}{\frac{L}{2}}\right) = 5.^\circ$$

Kihasznátság:

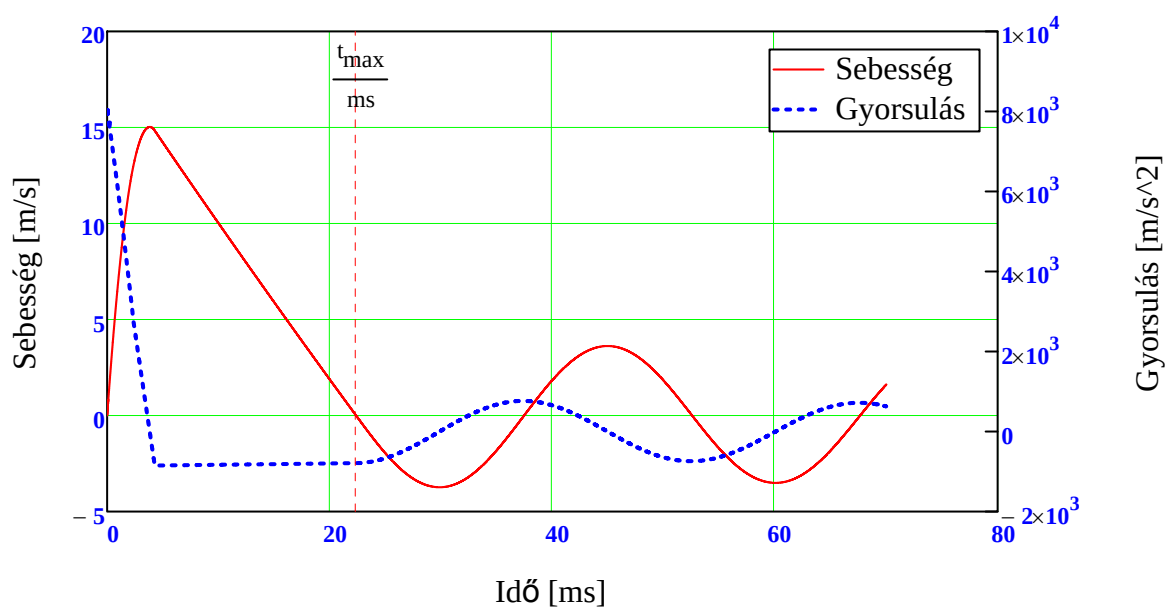
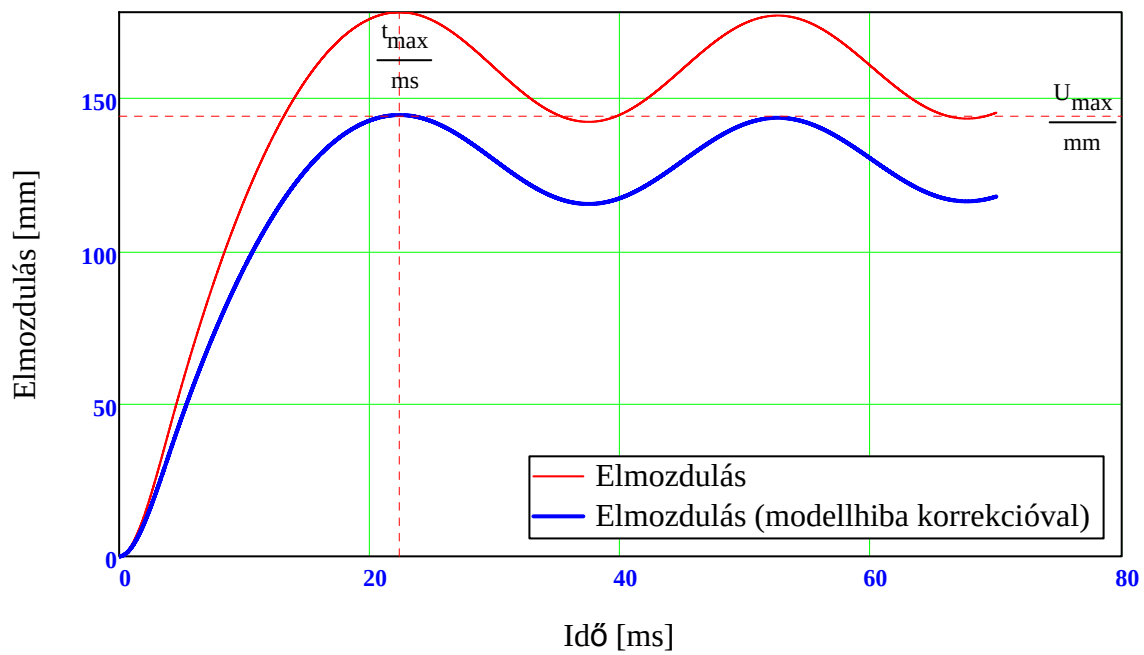
$$\frac{U_{\max}}{\tan(\Theta_{\text{all}}) \cdot \frac{L}{2}} = 92. \%$$

Megszabott határérték:

$$\tan(\Theta_{\text{all}}) \cdot \frac{L}{2} = 157.656 \cdot \text{mm}$$

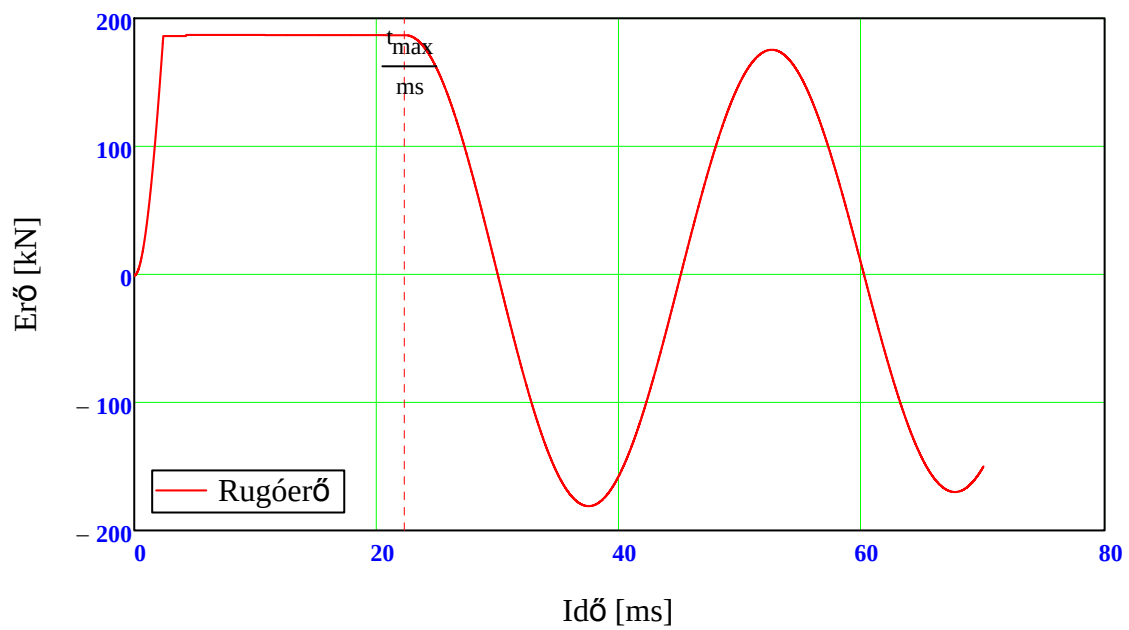
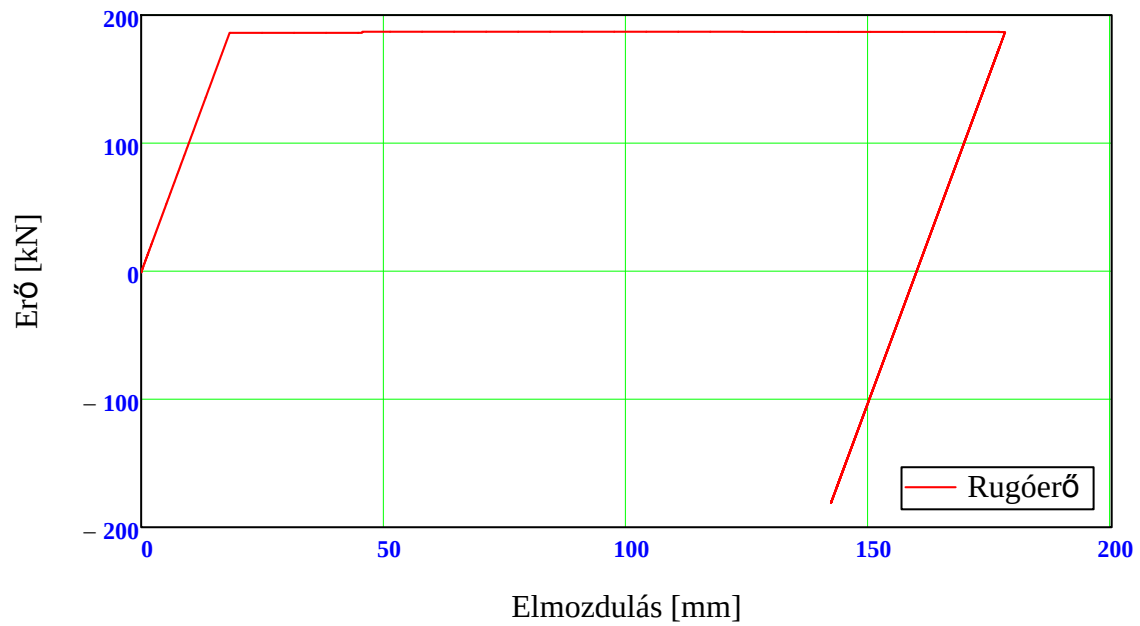
$$\Theta_{\text{all}} = 6.^\circ$$

MEGFELEL



A rugóerő számítása:

$$\text{spring}_i := p_i - \text{Mass} \cdot a_{2_i} - 2 \cdot \text{Mass} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot \xi \cdot v_{2_i}$$



Nyírás ellenőrzése CSA A23.3-04 Section 11

A pontos dinamikus nyíróerő: $\text{reakcio}_i := 0.39 \frac{\text{spring}_i}{K_R} + 0.11 \cdot \frac{p_i}{K_L}$ $\max(\text{reakcio}) = 418 \cdot \text{kN}$

Konzervatív közelítés (a függvényértékek maximumával): $V_{df} := 0.39R + 0.11 \cdot \frac{F_{\max}}{K_L} = 517.284 \cdot \text{kN}$

Minimális nyírási vasmennyiség: $A_{v,\min} := 0.06 \cdot \sqrt{\frac{\text{RES}_{1,8} \cdot f_{cd}}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} \cdot \frac{b \cdot s_{\text{shear}}}{f_{sd}} = 33.028 \cdot \text{mm}^2$

Alkalmazott nyírási vasalás: $A_v := 2 \frac{D_{\text{shear}}^2 \cdot \pi}{4} = 508.938 \cdot \text{mm}^2$

Minimális vasmennyiség ellenőrzése: MEGFELEL

Effektív hasznos magasság: $d_v := \max(0.9 \cdot d_{\text{bot}}, 0.72 \cdot h) = 216 \cdot \text{mm}$

Beton berepedését figyelembe vevő tényező: $\beta := 0.18$

Nyomott betonrácsrúd dőlésszöge: $\Theta := 35^\circ$

Beton nyírási teherbírása: $V_c := \beta \cdot \sqrt{\frac{\text{RES}_{1,8} \cdot f_{cd}}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} \cdot b \cdot d_v = 66.882 \cdot \text{kN}$

Nyírási vasalás teherbírása: $V_s := \frac{A_v \cdot \text{RES}_{1,9} \cdot f_{sd} \cdot d_v \cdot \cot(\Theta)}{s_{\text{shear}}} = 784.986 \cdot \text{kN}$

$$V_{r,\max} := 0.25 \cdot \text{RES}_{1,8} \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d_v = 532.654 \cdot \text{kN}$$

Teljes nyírási teherbírás: $V_r := \min(V_c + V_s, V_{r,\max}) = 532.654 \cdot \text{kN}$

$$V_{df} = 517.284 \cdot \text{kN}$$

$$V_r = 532.654 \cdot \text{kN}$$

Kihasználtság:

$$\frac{V_{df}}{V_r} = 97.115\%$$

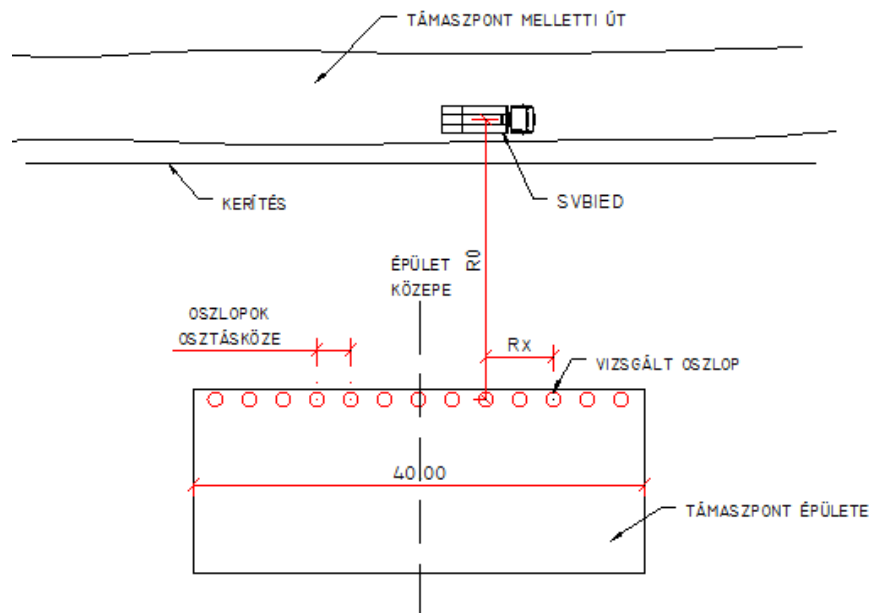
MEGFELEL

Vasbeton oszlop SDOF megoldása az energiaegyensúlyi egyenlettel



VBIED robbanóanyag mennyisége: $W := 210 \text{ kg}$

Töltettényező: $C_{\text{neq}} := 0.82$



Rendkívüli tervezési állapothoz tartozó parciális biztonsági tényezők: $\phi_s := 1$ $\phi_c := \frac{1}{1.2}$

Robbanóanyag mennyiség biztonsági tényezője: $\alpha_W := 1.2$

Detonáló TNT ekvivalens robbanóanyag: $W := \alpha_W \cdot W \cdot C_{\text{neq}} = 206.64 \text{ kg}$

VBIED távolsága: $R_0 := 14 \text{ m}$ $R_x := 0 \text{ m}$ $R := \sqrt{R_0^2 + R_x^2} = 14 \text{ m}$

Beesési (visszaverődési) szög: $\alpha := \text{atan}\left(\frac{R_x}{R_0}\right) = 0^\circ$

Duktilitási
(támaszelfordulási) határ: $\Theta_{\text{all}} := 6^\circ$

Arányosított távolság: $Z := \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{\text{kg}^{\frac{1}{3}}}{\text{m}} = 2.368$

Oszlop magassága: $L := 3 \text{ m}$

Oszlopok osztásköze: $sp := 2 \text{ m}$

SDOF modell bizonytalansága: $ME_{\text{SDOF}} := 1.233$

Vasbeton keresztmetszet definiálásaMagasság: $h := 400 \text{ mm}$ Szélesség: $b := 400 \text{ mm}$ Betonfedés: $c_{\text{bot}} := 50 \text{ mm}$ Vasak száma $n_{\text{bot}} := 3$ Kengyel átmérő: $D_{\text{shear}} := 16 \text{ mm}$ Kengyelek távolsága: $s_{\text{shear}} := 180 \text{ mm}$

Betonminőség:

C16/20
C20/25
C25/30
C30/37
C35/45

Vasátmérő:

M10
M12
M16
M18
M20
M25

Betonacél
minőség:

S400B
S500B

Keresztmetszet adatbázis

Alsó vasalás hasznos magassága:

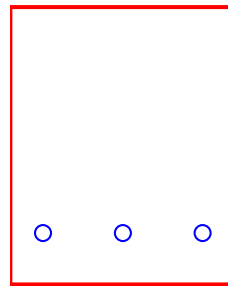
$$d_{\text{bot}} = 326 \text{ mm}$$

Vasalás keresztmetszeti területe:

$$A_{\text{s.bot}} := \left[n_{\text{bot}} \cdot \frac{(D_{\text{bot}})^2 \cdot \pi}{4} \right] = 603 \text{ mm}^2$$

Vasalási hányad:

$$\rho_{\text{bot}} := \frac{A_{\text{s.bot}}}{b \cdot h} = 0.377 \cdot \%$$



A keresztmetszet vázlatos rajza

Robbanási paraméterek számítása

A Kingery-Bulmash képletek alkalmazása:

$$\text{sor}_p := \begin{cases} 1 & \text{if } 0.2 \leq Z < 2.9 \\ 2 & \text{if } 2.9 \leq Z < 23.8 \\ 3 & \text{if } 23.8 \leq Z < 198.5 \end{cases}$$

A regressziós együtthatók:

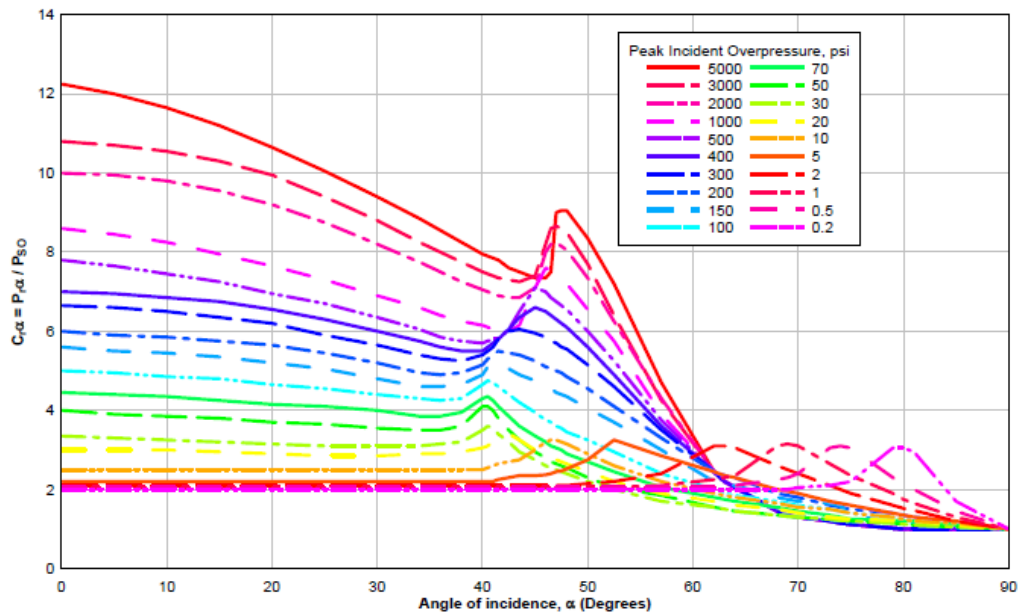
$$A_p := \begin{pmatrix} 7.2106 \\ 7.5938 \\ 6.0536 \end{pmatrix} \quad B_p := \begin{pmatrix} -2.1069 \\ -3.0523 \\ -1.4066 \end{pmatrix} \quad C_p := \begin{pmatrix} -0.3229 \\ 0.40977 \\ 0 \end{pmatrix} \quad D_p := \begin{pmatrix} 0.1117 \\ 0.0261 \\ 0 \end{pmatrix} \quad E_p := \begin{pmatrix} 0.0685 \\ -0.01267 \\ 0 \end{pmatrix}$$

A túlnyomási csúcsérték:

$$P_{SO} := e^{\left(A_{p_{sor_p}} + B_{p_{sor_p}} \cdot \ln(Z) + C_{p_{sor_p}} \cdot \ln(Z)^2 + D_{p_{sor_p}} \cdot \ln(Z)^3 + E_{p_{sor_p}} \cdot \ln(Z)^4 \right)} \cdot \text{kPa}$$

$$P_{SO} = 193.203 \cdot \text{kPa}$$

Visszaverődési adatok számítása



Túlnyomás visszaverődési tényezője a beesési szög függvényében [xxx]

A diagram görbéinek beolvasása:

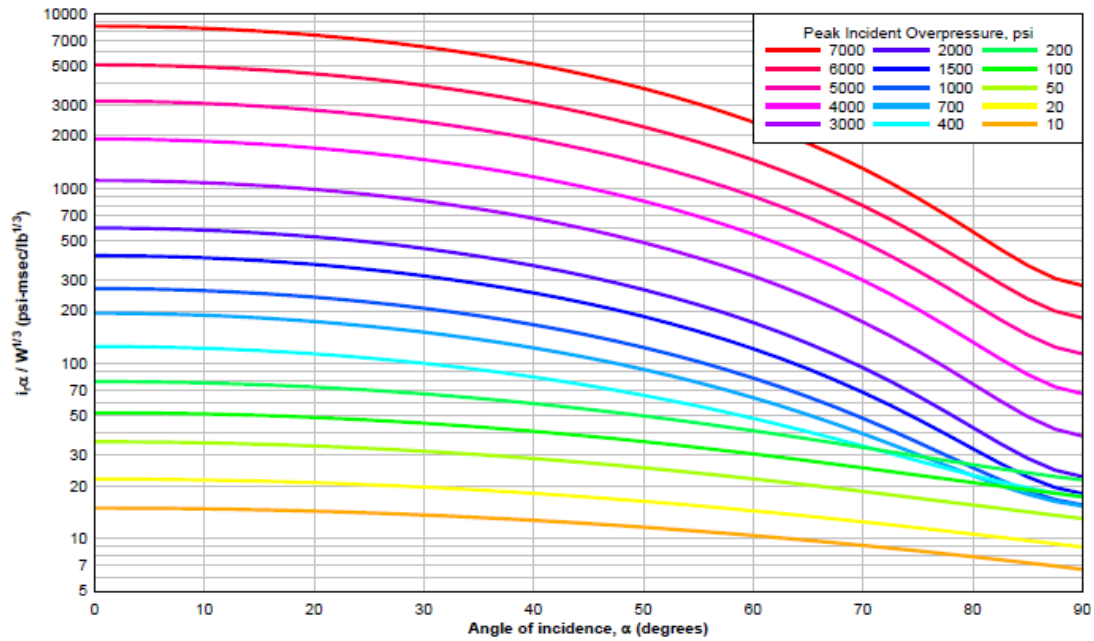
$$\text{raw} := \text{02_193.xlsx} \quad P_{\text{row}} := \text{02_193.xlsx} \quad \alpha_{\text{row}} := \text{02_193.xlsx}$$

Kettős interpoláció alkalmazása a fenti diagramon:

$$\begin{aligned} i &:= 1 \dots \text{length}(P_{\text{row}}^T) \\ A_i &:= \text{linterp}(\alpha_{\text{row}}^{\circ}, \text{raw}^{(i)}, \alpha) \\ C_{\text{r}\alpha} &:= \text{linterp}(\text{reverse}(P_{\text{row}}^T) \cdot \text{psi}, \text{reverse}(A), P_{SO}) = 3.281 \end{aligned}$$

Visszavert túlnyomás számítása:

$$P_R := C_{\text{r}\alpha} \cdot P_{SO} = 633.854 \cdot \text{kPa}$$



Túlnyomás visszaverődési tényezője a beesési szög függvényében [xxx]

A diagram görbéinek beolvasása:

$I_{r_{raw}} :=$ 02_194.xlsx $\alpha_{row} :=$ 02_194.xlsx $I_{r_{row}} :=$ 02_194.xlsx

Kettős interpoláció alkalmazása a fenti diagramon:

$$i := 1 \dots \text{length}(I_{r_{row}}^T) \quad B_i := \text{linterp}(\alpha_{row}^\circ, I_{r_{row}}^{(i)}, \alpha)$$

$$\left[\frac{I_R}{W^{\frac{1}{3}}} \right] := \text{linterp} \left(\text{reverse}(I_{r_{row}}^T) \cdot \text{psi}, \text{reverse}(B) \cdot \frac{\text{psi} \cdot \text{ms}}{\text{lb}^{\frac{1}{3}}}, P_{SO} \right) = 25.541 \cdot \frac{\text{psi} \cdot \text{ms}}{\text{lb}^{\frac{1}{3}}}$$

Visszavert impulzus számítása: $I_R := \left[\frac{I_R}{W^{\frac{1}{3}}} \right] \cdot W^{\frac{1}{3}} = 196.524 \cdot \text{psi} \cdot \text{ms}$

Lecsengési idő: $t_d := \frac{2 \cdot I_R}{P_R} = 4.275 \cdot \text{ms}$

Betonoszlop tulajdonságai

Beton és acél sűrűsége:	$\rho_c := 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\rho_s := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Dinamikus szilárdság növelő tényezők:	$\text{DIF}_{s,b} := 1.17$	$\text{DIF}_{s,s} := 1.1$
	$\text{DIF}_{c,b} := 1.19$	$\text{DIF}_{c,s} := 1.1$
Betonacél folyáshatár:	$f_{sd} := \phi_s \cdot f_{yk} \cdot \text{DIF}_{s,b} = 468 \cdot \text{MPa}$	
Beton nyomószilárdság:	$f_{cd} := \phi_c \cdot f_{ck} \cdot \text{DIF}_{c,b} = 24.792 \cdot \text{MPa}$	
Betonacél rugalmassági modulusza:	$E_s := 200 \text{ GPa}$	
Beton rugalmassági modulusza:	$E_c := \left(3000 \cdot \sqrt{\frac{f_{cd}}{\text{MPa}}} + 6900 \right) \cdot \text{MPa} \cdot \left(\frac{\rho_c}{2300 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{1.5} = 23.3 \cdot \text{GPa}$	

Nyomatéki teherbírás CSA A23.3-04 Section 10

Nyomott betonzóna kitöltöttségét figyelembe vevő tényezők:	$\alpha_1 := \max \left(0.85 - 0.0015 \cdot \frac{f_{cd}}{\text{MPa}}, 0.67 \right) = 0.813$
	$\beta_1 := \max \left(0.97 - 0.0025 \cdot \frac{f_{cd}}{\text{MPa}}, 0.67 \right) = 0.908$
Nyomott betonzóna magassága:	$a := \frac{A_{s,\text{bot}} \cdot f_{sd}}{\alpha_1 \cdot f_{cd} \cdot b} = 35.022 \cdot \text{mm}$
Semleges tengely helyzete:	$c_o := \frac{a}{\beta_1} = 38.57 \cdot \text{mm}$
Keresztmetszet nyomatéki ellenállása:	$M_r := A_{s,\text{bot}} \cdot f_{sd} \cdot \left(d_{\text{bot}} - \frac{a}{2} \right) = 87 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$
Rugalmassági moduluszok aránya:	$\alpha_E := \frac{E_s}{E_c} = 8.592$
Berepedt keresztmetszet inerciája:	$I_{II} := b \cdot \frac{c_o^3}{3} + A_{s,\text{bot}} \cdot \alpha_E \cdot (d_{\text{bot}} - c_o)^2$
	$I_{II} = 4.358 \times 10^4 \cdot \text{cm}^4$

Inhomogén keresztmetszet rugalmassági modulusza:

$$E := \frac{E_C \cdot b \cdot c_O + E_S \cdot A_{S,bot}}{b \cdot c_O + A_{S,bot}} = 29.926 \cdot \text{GPa}$$

Ekvivalens tömeg tényező:

$$K_M := 0.33$$

Ekvivalens teher tényező:

$$K_L := 0.5$$

Ekvivalens ellenállás tényező:

$$K_R := K_L$$

Oszlop statikus teherbírása:

$$R := \frac{8 \cdot M_I}{L^2} \cdot L = 232.223 \cdot \text{kN}$$

A hajlított rúdelem merevsége:

$$K_E := \frac{384 E \cdot I_{II}}{5 \cdot L^4} \cdot L$$

A rugalmas elmozdulás:

$$X_E := \frac{R}{K_E} = 6.26 \cdot \text{mm}$$

Vasalás tömege:

$$M_{Ib} := \left[A_{S,bot} \cdot L + (2b + 2 \cdot h) \cdot \frac{D_{shear}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{L}{s_{shear}} \right] \cdot (\rho_s)$$

Teljes tömeg:

$$\text{Mass} := \rho_C \cdot b \cdot h \cdot L \cdot K_M = 380.16 \cdot \text{kg}$$

Az energiaegyensúlyi egyenlet X_m -re rendezve:

$$X_m := \left[\frac{(I_R \cdot s_p \cdot L \cdot K_L)^2}{2 \cdot \text{Mass} \cdot K_R \cdot R} + \frac{X_E}{2} \right] \cdot \frac{1}{ME_{SDOF}} = 154 \cdot \text{mm}$$

Támaszelfordulás:

$$\Theta_f := \text{atan} \left(\frac{X_m}{\frac{L}{2}} \right) = 6.^\circ \quad \Theta_{all} = 6.^\circ$$

Kihasználtság:

$$\frac{\Theta_f}{\Theta_{all}} = 98. \%$$

MEGFELEL

Maximális alakváltozáshoz szükséges idő:

$$t_m := \frac{I_R \cdot s_p \cdot L}{R} = 35.009 \cdot \text{ms}$$

Érvényességi feltétel ellenőrzése:

$$\frac{t_m}{t_d} = 8.189 > 3$$

TELJESÜL

Nyírás ellenőrzése CSA A23.3-04 Section 11

Betonacél folyáshatár: $f_{sd} := \phi_s \cdot f_{yk} \cdot DIF_{s,s} = 440 \cdot \text{MPa}$

Beton nyomószilárdság: $f_{cd} := \phi_c \cdot f_{ck} \cdot DIF_{c,s} = 22.917 \cdot \text{MPa}$

Minimális nyírási vasalás: $A_{v,min} := 0.06 \cdot \sqrt{\frac{f_{cd}}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} \cdot \frac{b \cdot s_{shear}}{f_{sd}} = 47.001 \cdot \text{mm}^2$

Alkalmazott nyírási vasalás: $A_v := 2 \cdot \frac{D_{shear}^2 \cdot \pi}{4} = 402.124 \cdot \text{mm}^2$

Minimális vasmennyiség ellenőrzése: MEGFELEL

Nyírási hasznos magasság: $d_v := \max(0.9 \cdot d_{bot}, 0.72 \cdot h) = 293.4 \cdot \text{mm}$

Beton berepedését figyelembe vevő tényező: $\beta := 0.18$

Nyomott betonrácsrúd dőlésszöge: $\Theta := 35^\circ$

Beton nyírási teherbírása: $V_c := \beta \cdot \sqrt{\frac{f_{cd}}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} \cdot b \cdot d_v = 101.127 \cdot \text{kN}$

Nyírási vasalás teherbírása: $V_s := \frac{A_v \cdot f_{sd} \cdot d_v \cdot \cot(\Theta)}{s_{shear}} = 411.883 \cdot \text{kN}$

$$V_{r,max} := 0.25 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d_v = 672.375 \cdot \text{kN}$$

Teljes nyírási teherbírás: $V_r := \min(V_c + V_s, V_{r,max}) = 513.01 \cdot \text{kN}$

A dinamikus reakcióerő: $V_{df} := 0.39R + 0.11 \cdot P_R \cdot sp \cdot L = 508.911 \cdot \text{kN}$

$$V_{df} = 508.911 \cdot \text{kN} < V_r = 513.01 \cdot \text{kN}$$

Kihasználtság:

$$\frac{V_{df}}{V_r} = 99.201 \cdot \%$$

MEGFELEL

Vasbeton oszlop ellenőrzése P-I diagram használatával



VBIED robbanóanyag mennyisége:

$$W := 200 \text{ kg}$$

$$C_{\text{neq}} := 0.82$$

VBIED távolsága:

$$R_0 := 15 \text{ m}$$

$$R_x := 0 \text{ m}$$

$$R := \sqrt{R_0^2 + R_x^2} = 15 \text{ m}$$

Beesési (visszaverődési) szög:

$$\alpha := \arctan\left(\frac{R_x}{R_0}\right) = 0^\circ$$

Rendkívüli tervezési állapothoz tartozó parciális biztonsági tényezők:

$$\phi_s := 1$$

$$\phi_c := \frac{1}{1.2}$$

Robbanóanyag mennyiség biztonsági tényezője: $\alpha_W := 1.2$

Detonáló TNT ekvivalens robbanóanyag: $W := \alpha_W \cdot W \cdot C_{\text{neq}} = 196.8 \text{ kg}$

Oszlopok magassága:

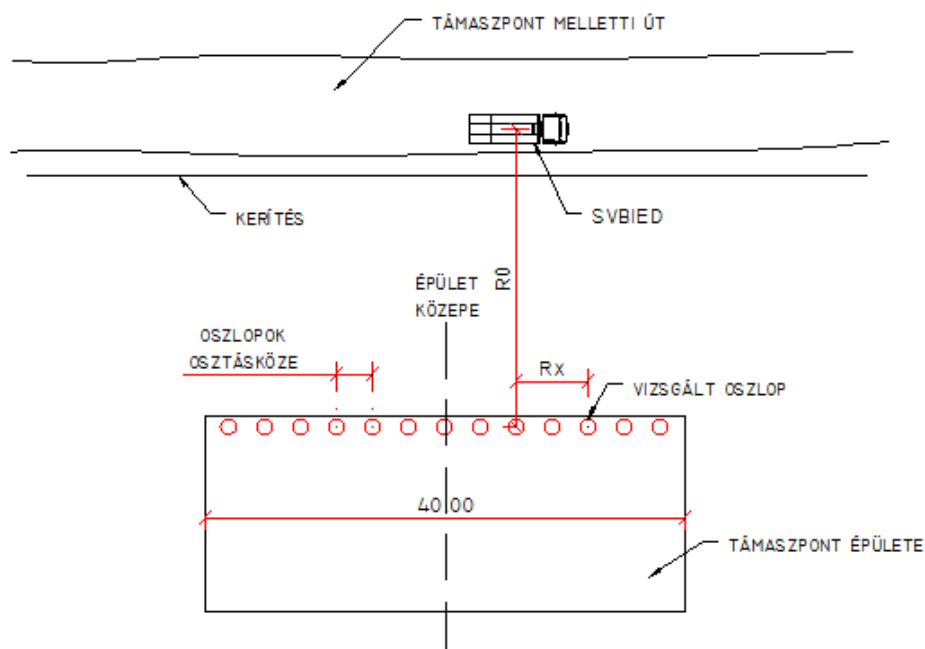
$$L := 2.5 \text{ m}$$

Oszlopok osztásköze:

$$s_p := 2 \text{ m}$$

Arányosított távolság:

$$Z := \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{\text{kg}^{\frac{1}{3}}}{\text{m}} = 2.579$$



Vasbeton keresztmetszet definiálásaMagasság: $h := 500 \text{ mm}$ Szélesség: $b := 300 \text{ mm}$ Betonfedés: $c_{\text{bot}} := 50 \text{ mm}$ Kengyelek távolsága: $s_{\text{shear}} := 300 \text{ mm}$ Vasak száma: $n_b := 4$ $n_h := 2$

Betonminőség:

C16/20
C20/25
C25/30
C30/37
C35/45

Hosszvas átmérő:

M10
M12
M16
M18
M20
M25

Betonacél minőség:

S400B
S500B

Nyírási vasátmérő:

M10
M12
M16
M18
M20
M25

Keresztmetszeti adatok

Betonacél folyáshatár:

$$f_{sd} := \phi_s \cdot f_{yk} = 500 \cdot \text{MPa}$$

Beton nyomószilárdság:

$$f_{cd} := \phi_c \cdot f_{ck} = 25 \cdot \text{MPa}$$

Vasalás hasznos magassága:

$$d_{\text{bot}} = 426 \cdot \text{mm}$$

Vasalás keresztmetszeti területe:

$$A_{s,\text{long}} := (n_b + 2 \cdot n_h) \cdot \frac{(D_{\text{longst}})^2 \cdot \pi}{4}$$

$$A_{s,\text{long}} = 1608 \cdot \text{mm}^2$$

Hosszirányú vasalási hányad:

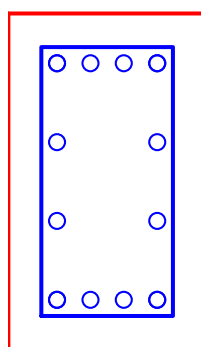
$$\rho_{\text{bot}} := \frac{A_{s,\text{long}}}{b \cdot h} \cdot \frac{f_{sd}}{550 \text{ MPa}} = 0.975 \cdot \%$$

Nyírási vasmennyiség:

$$A_v := 2 \cdot \frac{D_{\text{shear}}^2 \cdot \pi}{4} = 402.124 \cdot \text{mm}^2$$

Nyírási vasalási hányad:

$$\rho_s := \frac{A_v}{s_{\text{shear}} \cdot b} \cdot \frac{f_{sd}}{550 \text{ MPa}} = 0.406 \cdot \%$$



A keresztmetszet vázlatos rajza

Robbanási paraméterek számítása

A túlnyomási csúcsérték meghatározása:

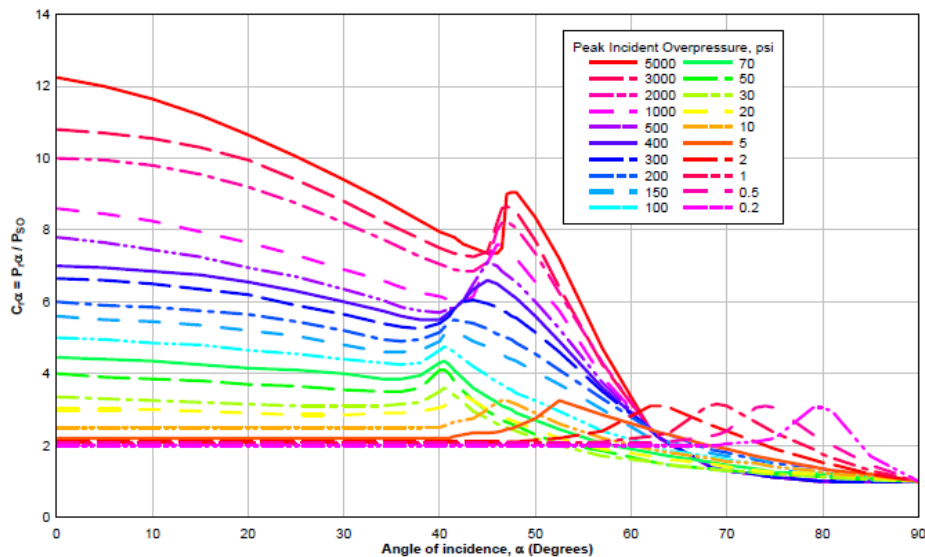
$$\text{sor}_p := \begin{cases} 1 & \text{if } 0.2 \leq Z < 2.9 \\ 2 & \text{if } 2.9 \leq Z < 23.8 \\ 3 & \text{if } 23.8 \leq Z < 198.5 \end{cases}$$

A regressziós együtthatók:

$$A_p := \begin{pmatrix} 7.2106 \\ 7.5938 \\ 6.0536 \end{pmatrix} \quad B_p := \begin{pmatrix} -2.1069 \\ -3.0523 \\ -1.4066 \end{pmatrix} \quad C_p := \begin{pmatrix} -0.3229 \\ 0.40977 \\ 0 \end{pmatrix} \quad D_p := \begin{pmatrix} 0.1117 \\ 0.0261 \\ 0 \end{pmatrix} \quad E_p := \begin{pmatrix} 0.0685 \\ -0.01267 \\ 0 \end{pmatrix}$$

A túlnyomási csúcsérték:

$$P_{SO} := e^{\left(A_{p_{\text{sor}_p}} + B_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z) + C_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z)^2 + D_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z)^3 + E_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z)^4 \right)} \cdot \text{kPa} \quad P_{SO} = 159.979 \cdot \text{kPa}$$



Túlnyomás visszaverődési tényezője a beesési szög függvényében [xxx]

A diagram görbéinek beolvasása:

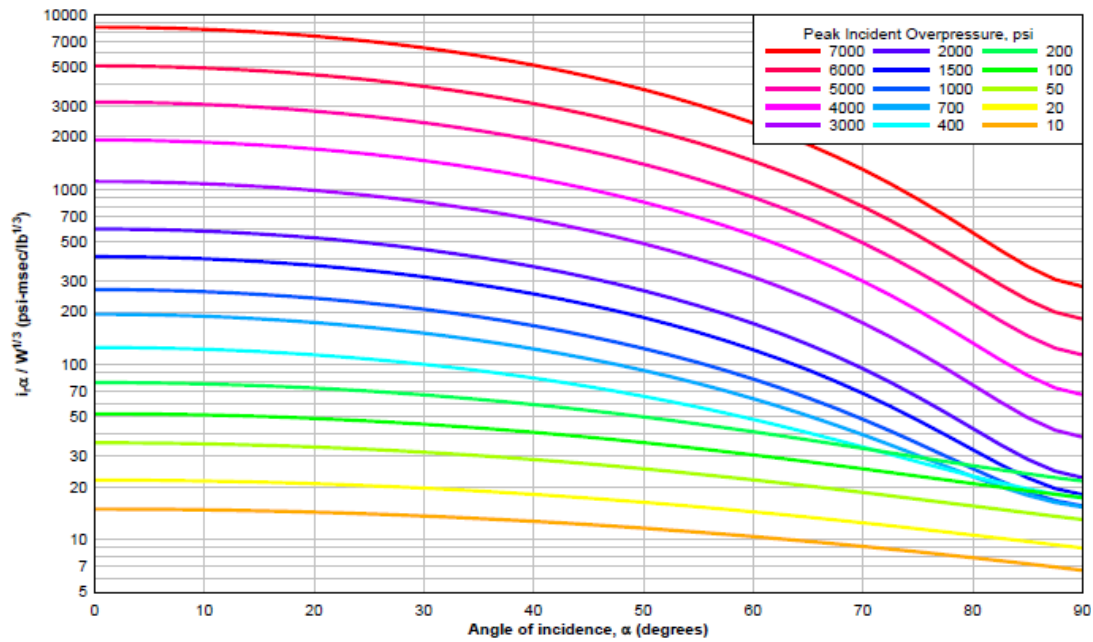
$$\text{raw} := \text{02_193.xlsx} \quad P_{\text{row}} := \text{02_193.xlsx} \quad \alpha_{\text{row}} := \text{02_193.xlsx}$$

Kettős interpoláció alkalmazása a fenti diagramon:

$$i := 1 \dots \text{length}(P_{\text{row}}^T) \\ A_i := \text{linterp}(\alpha_{\text{row}}^{\circ}, \text{raw}^{(i)}, \alpha) \\ C_{r\alpha} := \text{linterp}(\text{reverse}(P_{\text{row}}^T) \cdot \text{psi}, \text{reverse}(A), P_{SO}) = 3.112$$

Visszavert túlnyomás számítása:

$$P_R := C_{r\alpha} \cdot P_{SO} = 497.871 \cdot \text{kPa}$$



Túlnyomás visszaverődési tényezője a beesési szög függvényében [xxx]

A diagram görbéinek beolvasása:

$$I_{r_{\text{raw}}} := \text{02_194.xlsx} \quad \alpha_{\text{row}} := \text{02_194.xlsx} \quad I_{r_{\text{row}}} := \text{02_194.xlsx}$$

Kettős interpoláció alkalmazása a fenti diagramon:

$$i := 1 \dots \text{length}(I_{r_{\text{row}}}^T) \quad B_i := \text{linterp}(\alpha_{\text{row}}^\circ, I_{r_{\text{raw}}}^{\langle i \rangle}, \alpha)$$

$$\left[\frac{I_R}{W^{\frac{1}{3}}} \right] := \text{linterp} \left(\text{reverse}(I_{r_{\text{row}}}^T) \cdot \text{psi}, \text{reverse}(B) \cdot \frac{\text{psi} \cdot \text{ms}}{\text{lb}^{\frac{1}{3}}}, P_{\text{SO}} \right) = 23.318 \cdot \frac{\text{psi} \cdot \text{ms}}{\text{lb}^{\frac{1}{3}}}$$

Visszavert impulzus számítása:

$$I_R := \left[\frac{I_R}{W^{\frac{1}{3}}} \right] \cdot W^{\frac{1}{3}} = 1217.092 \cdot \text{kPa} \cdot \text{ms}$$

A P-I diagram előállítása

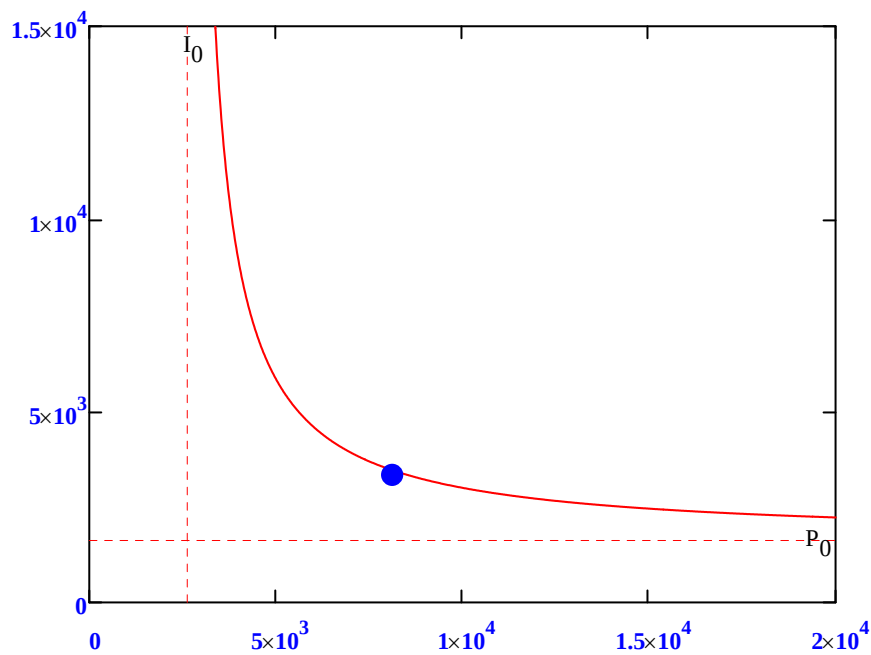
A két aszimptota értéke:

$$P_0 := \left(11 \cdot \frac{f_{cd}}{\text{MPa}} + 3.456 \cdot \frac{d_{bot}}{\text{mm}} - 0.268 \cdot \frac{L}{\text{mm}} - 1.552 \cdot \frac{b}{\text{mm}} + 14753.44 \cdot \rho_{bot} + 8924.068 \cdot \rho_s + 851.9 \right)$$

$$I_0 := \left(59 \cdot \frac{f_{cd}}{\text{MPa}} + 13.16 \cdot \frac{d_{bot}}{\text{mm}} - 0.43 \cdot \frac{L}{\text{mm}} - 0.26 \cdot \frac{b}{\text{mm}} + 1091.78 \cdot \rho_{bot} + 489.97 \cdot \rho_s - 3302.33 \right)$$

$$P(I) := \frac{12 \cdot \left(\frac{P_0}{2} + \frac{I_0}{2} \right)^{1.5} + P_0 \cdot I + P_0 \cdot I_0}{(I - I_0)}$$

A ható teher paraméterei: $I_R := I_R \cdot \frac{SP}{b}$ $P_R := P_R \cdot \frac{SP}{b}$ **kék** ponttal jelölve



Teherbírás ellenőrzése:

MEGFELEL

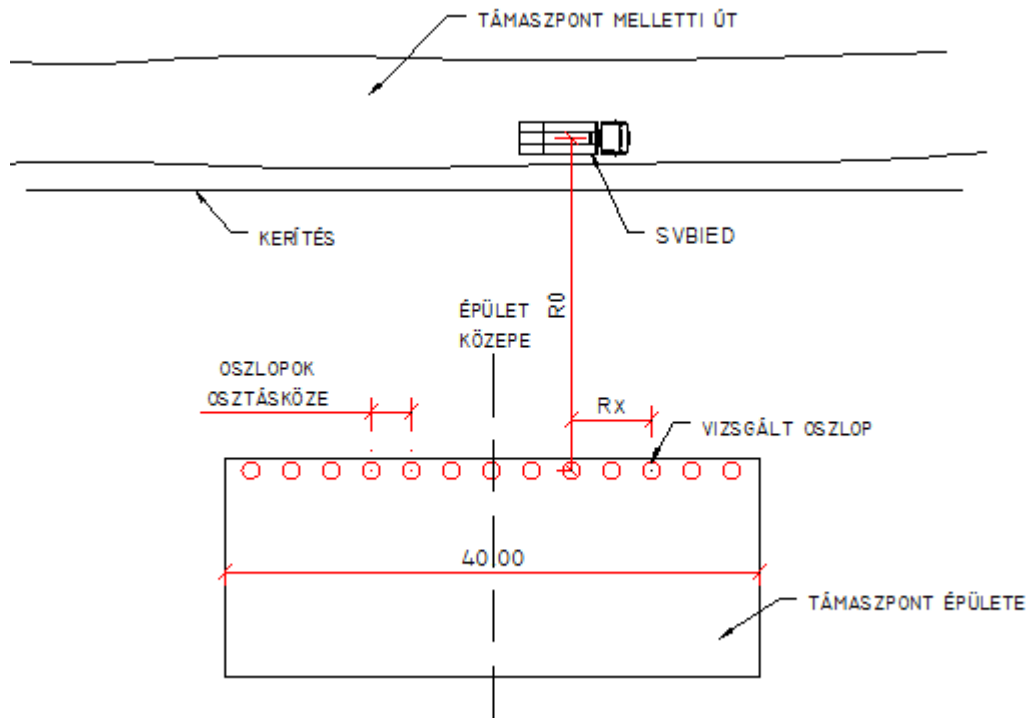
$$\frac{\frac{P_R}{\text{kPa}}}{P\left(\frac{I_R}{\text{kPa} \cdot \text{ms}}\right)} = 96.353\%$$

Vasbeton oszlop FOSM analízise az energiaegyensúlyi egyenlettel



VBIED robbanóanyag mennyisége: $W := 210 \text{ kg}$

Töltetényező: $C_{\text{neq}} := 0.82$



Detonáló TNT ekvivalens robbanóanyag: $W := W \cdot C_{\text{neq}} = 172.2 \text{ kg}$

VBIED távolsága: $R_0 := 14 \text{ m}$ $R_x := 0 \text{ m}$ $R := \sqrt{R_0^2 + R_x^2} = 14 \text{ m}$

Beesési (visszaverődési) szög: $\alpha := \arctan\left(\frac{R_x}{R_0}\right) = 0^\circ$

Arányosított távolság:

Duktilitási
(támaszelfordulási) határ:

$\Theta_{\text{all}} := 6^\circ$

$$Z := \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{\text{kg}^{\frac{1}{3}}}{\text{m}} = 2.516$$

Oszlop magassága:

$L := 3 \text{ m}$

Oszlopok osztásköze:

$sp := 2 \text{ m}$

SDOF modell szórása:

$SDOF := 1.233$

$\sigma_{\text{SDOF}} := 0.209 \cdot SDOF$

Nyírási teherbírás modell
bizonytalansága:

$ME_{\text{shear}} := 1.19$

$\nu_{\text{ME.shear}} := 0.218$

$\sigma_{\text{ME.shear}} := ME_{\text{shear}} \cdot \nu_{\text{ME.shear}}$

Vasbeton keresztmetszet definiálása

Magasság: $h := 400 \text{ mm}$ $\nu_h := 1\%$ $\sigma_h := h \cdot \nu_h$

Szélesség: $b := 400 \text{ mm}$ $\nu_b := 1\%$ $\sigma_b := b \cdot \nu_b$

Betonfedés: $c_{\text{bot}} := 50 \text{ mm}$

Vasak száma $n_{\text{bot}} := 3$

Kengyel átmérő: $D_{\text{shear}} := 16 \text{ mm}$

Kengyelek távolsága: $s_{\text{shear}} := 180 \text{ mm}$ $\sigma_{s,\text{diff}} := \frac{b}{2 \cdot 12}$

Vasátmérő:

M10
M12
M16
M18
M20
M25

Betonacél
minőség:

S400B
S500B

Betonminőség:

C16/20
C20/25
C25/30
C30/37
C35/45

► Keresztmetszet adatbázis

Alsó vasalás hasznos magassága:

$$d_{\text{bot}} = 326 \text{ mm}$$

$$\mu_{d,\text{diff}} := 6 \text{ mm} \quad \sigma_{d,\text{diff}} := 12 \text{ mm}$$

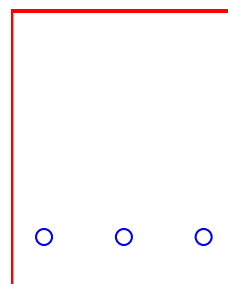
Vasalás keresztmetszeti területe:

$$A_s := \left[n_{\text{bot}} \cdot \frac{(D_{\text{bot}})^2 \cdot \pi}{4} \right] = 603 \text{ mm}^2$$

$$\nu_{A_s} := 2\% \quad \sigma_{A_s} := A_s \cdot \nu_{A_s} = 12.064 \text{ mm}^2$$

Vasalási hányad:

$$\rho_{\text{bot}} := \frac{A_s}{b \cdot h} = 0.377\%$$



A keresztmetszet vázlatos rajza

Robbanási paraméterek számítása

A Kingery-Bulmash képletek alkalmazása:

$$\text{sor}_p := \begin{cases} 1 & \text{if } 0.2 \leq Z < 2.9 \\ 2 & \text{if } 2.9 \leq Z < 23.8 \\ 3 & \text{if } 23.8 \leq Z < 198.5 \end{cases}$$

A regressziós együtthatók:

$$A_p := \begin{pmatrix} 7.2106 \\ 7.5938 \\ 6.0536 \end{pmatrix} \quad B_p := \begin{pmatrix} -2.1069 \\ -3.0523 \\ -1.4066 \end{pmatrix} \quad C_p := \begin{pmatrix} -0.3229 \\ 0.40977 \\ 0 \end{pmatrix} \quad D_p := \begin{pmatrix} 0.1117 \\ 0.0261 \\ 0 \end{pmatrix} \quad E_p := \begin{pmatrix} 0.0685 \\ -0.01267 \\ 0 \end{pmatrix}$$

A túlnyomási csúcsérték:

$$P_{\text{SO}} := e^{\left(A_{p_{\text{sor}_p}} + B_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z) + C_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z)^2 + D_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z)^3 + E_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z)^4 \right)} \cdot \text{kPa} \quad P_{\text{SO}} = 168.806 \text{ kPa}$$

Visszaverődési adatok számítása

A diagram görbéinek beolvasása:

$$\text{raw} := \text{02_193.xlsx} \quad P_{\text{row}} := \text{02_193.xlsx} \quad \alpha_{\text{row}} := \text{02_193.xlsx}$$

Kettős interpoláció alkalmazása:

$$i := 1 \dots \text{length}(P_{\text{row}}^T) \quad A_i := \text{linterp}(\alpha_{\text{row}}^{\circ}, \text{raw}^{\langle i \rangle}, \alpha)$$

$$C_{\text{r}\alpha} := \text{linterp}(\text{reverse}(P_{\text{row}}^T) \cdot \text{psi}, \text{reverse}(A), P_{\text{SO}}) = 3.157$$

Visszavert túlnyomás számítása:

$$P_R := C_{\text{r}\alpha} \cdot P_{\text{SO}} = 532.905 \cdot \text{kPa}$$

$$\text{mean}_{\text{PR}} := 1.03$$

$$\sigma_{\text{Pr}} := 0.069 \cdot P_R$$

A diagram görbéinek beolvasása:

$$I_{\text{r}\text{raw}} := \text{02_194.xlsx} \quad \alpha_{\text{row}} := \text{02_194.xlsx} \quad I_{\text{r}\text{row}} := \text{02_194.xlsx}$$

Kettős interpoláció alkalmazása:

$$i := 1 \dots \text{length}(I_{\text{r}\text{row}}^T) \quad B_i := \text{linterp}(\alpha_{\text{row}}^{\circ}, I_{\text{r}\text{raw}}^{\langle i \rangle}, \alpha)$$

$$\left[\frac{I_R}{W^{\frac{1}{3}}} \right] := \text{linterp} \left(\text{reverse}(I_{\text{r}\text{row}}^T) \cdot \text{psi}, \text{reverse}(B) \cdot \frac{\text{psi} \cdot \text{ms}}{\text{lb}^{\frac{1}{3}}}, P_{\text{SO}} \right) = 23.908 \cdot \frac{\text{psi} \cdot \text{ms}}{\text{lb}^{\frac{1}{3}}}$$

Visszavert impulzus számítása:

$$I_R := \left[\frac{I_R}{W^{\frac{1}{3}}} \right] \cdot W^{\frac{1}{3}} = 1.194 \times 10^3 \cdot \text{kPa} \cdot \text{ms}$$

$$\text{mean}_{\text{IR}} := 0.99$$

$$\nu_{\text{Ir}} := 0.178 - 0.0237Z = 0.118$$

$$\sigma_{\text{Ir}} := I_R \cdot \nu_{\text{Ir}} = 141 \cdot \text{kPa} \cdot \text{ms}$$

Betonoszlop tulajdonságai

Dinamikus szilárdságnövelő tényezők: $DIF_{s,b} := 1.17$ $DIF_{s,s} := 1.1$

$DIF_{c,b} := 1.19$ $DIF_{c,s} := 1.1$

Beton sűrűsége: $\rho_c := 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $\nu_{\rho c} := 4\%$ $\sigma_{\rho c} := \rho_c \cdot \nu_{\rho c}$

Betonacél sűrűsége: $\rho_s := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $\nu_{\rho s} := 2\%$ $\sigma_{\rho s} := \rho_s \cdot \nu_{\rho s}$

Betonacél folyáshatár (várható érték): $f_{sm} := \frac{f_{yk}}{1 - 1.645\nu_{sf}} \cdot DIF_{s,b}$ $\nu_{sf} = 0.06$ $\sigma_{fsm} := f_{sm} \cdot \nu_{sf}$

Beton nyomószilárdság (várható érték): $f_{cm} := f_{ck} + 8 \text{ MPa} \cdot DIF_{c,b}$ $\nu_{fcm} := 15\%$ $\sigma_{fcm} := f_{cm} \cdot \nu_{fcm}$

Betonacél rugalmassági modulusza: $E_s := 200 \text{ GPa}$

Beton rugalmassági modulusza: $E_c(f_{cm}, \rho_c) := \left(3000 \cdot \sqrt{\frac{f_{cm}}{\text{MPa}}} + 6900 \right) \cdot \text{MPa} \cdot \left(\frac{\rho_c}{2300 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{1.5}$

Nyomatéki teherbírás CSA A23.3-04 Section 10

Nyomott betonzóna kitöltöttségét figyelembe vevő tényezők: $\alpha_1(f_{cm}) := 0.85 - 0.0015 \cdot \frac{f_{cm}}{\text{MPa}}$

$\beta_1(f_{cm}) := 0.97 - 0.0025 \cdot \frac{f_{cm}}{\text{MPa}}$

Nyomott betonzóna magassága: $a(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b) := \frac{A_s \cdot f_{sm}}{\alpha_1(f_{cm}) \cdot f_{cm} \cdot b}$

Semleges tengely helyzete: $c_o(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b) := \frac{a(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b)}{\beta_1(f_{cm})}$

Keresztmetszet nyomatéki ellenállása:

$$M_R(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b, \mu_{d,diff}) := A_s \cdot f_{sm} \cdot \left(d_{bot} + \mu_{d,diff} - \frac{a(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b)}{2} \right)$$

Rugalmassági moduluszok aránya: $\alpha_E(f_{cm}, \rho_c) := \frac{E_s}{E_c(f_{cm}, \rho_c)}$

Berepedt keresztmetszet inerciája:

$$I_{II}(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b, \rho_c, \mu_{d,diff}) := \left[b \cdot \frac{c_o(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b)^3}{3} \dots \right. \\ \left. + A_s \cdot \alpha_E(f_{cm}, \rho_c) \cdot (d_{bot} + \mu_{d,diff} - c_o(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b))^2 \right]$$

Inhomogén keresztmetszet rugalmassági modulusza:

$$E(A_S, f_{sm}, f_{cm}, b, \rho_C) := \frac{E_C(f_{cm}, \rho_C) \cdot b \cdot c_o(A_S, f_{sm}, f_{cm}, b) + E_S \cdot A_S}{b \cdot c_o(A_S, f_{sm}, f_{cm}, b) + A_S}$$

Ekvivalens tömeg tényező:

$$K_M := 0.33$$

Ekvivalens teher tényező:

$$K_L := 0.5$$

Ekvivalens ellenállás tényező:

$$K_R := K_L$$

Oszlop teherbírása:

$$R(A_S, f_{sm}, f_{cm}, b, \mu_{d,diff}) := \frac{8 \cdot M_I(A_S, f_{sm}, f_{cm}, b, \mu_{d,diff})}{L^2} \cdot L$$

A hajlított rúdelem merevsége:

$$K_E(A_S, f_{sm}, f_{cm}, b, \rho_C, \mu_{d,diff}) := \frac{384 E(A_S, f_{sm}, f_{cm}, b, \rho_C) \cdot I_{II}(A_S, f_{sm}, f_{cm}, b, \rho_C, \mu_{d,diff})}{5 \cdot L^4} \cdot L$$

Az ekvivalens tömegtényező alkalmazása:

$$\text{Mass}(\rho_C, \rho_S, b, h, A_S) := \left[\rho_C \cdot b \cdot h + \rho_S \cdot A_S + (2 \cdot b + 2 \cdot h) \cdot \frac{D_{\text{shear}}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{\rho_S}{s_{\text{shear}}} \right] \cdot L \cdot K_M$$

A hatásoldal:

$$EF(I_R, \rho_C, \rho_S, b, h, A_S, f_{sm}, f_{cm}, \mu_{d,diff}, \text{SDOF}) := \frac{\left[\frac{(\text{mean}_{I_R} \cdot I_R \cdot \text{sp} \cdot L \cdot K_L)^2}{2 \cdot \text{Mass}(\rho_C, \rho_S, b, h, A_S) \cdot K_R \cdot R(A_S, f_{sm}, f_{cm}, b, \mu_{d,diff})} \dots \right.}{\left. + \frac{2 \cdot K_E(A_S, f_{sm}, f_{cm}, b, \rho_C, \mu_{d,diff})}{R(A_S, f_{sm}, f_{cm}, b, \mu_{d,diff})} \right]}{\text{SDOF}}$$

Az ellenállás oldal:

$$RF := \tan(\Theta_{\text{all}}) \cdot \frac{L}{2}$$

Az előző kifejezések segítségével felírva a határállapot függvény:

$$G(x) := RF - EF(I_R, \rho_C, \rho_S, b, h, A_S, f_{sm}, f_{cm}, \mu_{d,diff}, \text{SDOF})$$

Ellenállás oldali szórás: $S_R := \sqrt{0} = 0$

Hatás oldali szórás:

$$S_E := \sqrt{\left(\frac{d}{dI_R} \text{EF}(I_R, \rho_C, \rho_S, b, h, A_S, f_{sm}, f_{cm}, \mu_{d.diff}, SDOF) \cdot \sigma_{I_R}\right)^2 \dots} \\ + \left(\frac{d}{d\rho_C} \text{EF}(I_R, \rho_C, \rho_S, b, h, A_S, f_{sm}, f_{cm}, \mu_{d.diff}, SDOF) \cdot \sigma_{\rho_C}\right)^2 \dots \\ + \left(\frac{d}{d\rho_S} \text{EF}(I_R, \rho_C, \rho_S, b, h, A_S, f_{sm}, f_{cm}, \mu_{d.diff}, SDOF) \cdot \sigma_{\rho_S}\right)^2 \dots \\ + \left(\frac{d}{db} \text{EF}(I_R, \rho_C, \rho_S, b, h, A_S, f_{sm}, f_{cm}, \mu_{d.diff}, SDOF) \cdot \sigma_b\right)^2 \dots \\ + \left(\frac{d}{dh} \text{EF}(I_R, \rho_C, \rho_S, b, h, A_S, f_{sm}, f_{cm}, \mu_{d.diff}, SDOF) \cdot \sigma_h\right)^2 \dots \\ + \left(\frac{d}{dA_S} \text{EF}(I_R, \rho_C, \rho_S, b, h, A_S, f_{sm}, f_{cm}, \mu_{d.diff}, SDOF) \cdot \sigma_{A_S}\right)^2 \dots \\ + \left(\frac{d}{df_{sm}} \text{EF}(I_R, \rho_C, \rho_S, b, h, A_S, f_{sm}, f_{cm}, \mu_{d.diff}, SDOF) \cdot \sigma_{f_{sm}}\right)^2 \dots \\ + \left(\frac{d}{df_{cm}} \text{EF}(I_R, \rho_C, \rho_S, b, h, A_S, f_{sm}, f_{cm}, \mu_{d.diff}, SDOF) \cdot \sigma_{f_{cm}}\right)^2 \dots \\ + \left(\frac{d}{d\mu_{d.diff}} \text{EF}(I_R, \rho_C, \rho_S, b, h, A_S, f_{sm}, f_{cm}, \mu_{d.diff}, SDOF) \cdot \sigma_{\mu_{d.diff}}\right)^2 \dots \\ + \left(\frac{d}{dSDOF} \text{EF}(I_R, \rho_C, \rho_S, b, h, A_S, f_{sm}, f_{cm}, \mu_{d.diff}, SDOF) \cdot \sigma_{SDOF}\right)^2 \dots \\ S_E = 0.032 \text{ m}$$

Eredő szórás:

$$S_{RE} := \sqrt{S_R^2 + S_E^2} = 31.758 \cdot \text{mm}$$

A megbízhatósági index:

$$\beta_{eff} := \frac{RF - \text{EF}(I_R, \rho_C, \rho_S, b, h, A_S, f_{sm}, f_{cm}, \mu_{d.diff}, SDOF)}{S_{RE}} = 1.848$$

Tönkremeneteli
valószínűség:

$$P_f := \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{-\beta_{eff}} e^{\frac{-x^2}{2}} dx = 0.032$$

Nyírás ellenőrzése CSA A23.3-04 Section 11

Betonacél folyáshatár (várható érték): $f_{sm} := \frac{f_{yk}}{1 - 1.645\nu_{sf}} \cdot DIF_{s,s}$

Beton nyomószilárdság (várható érték): $f_{cm} := (f_{ck} + 8 \text{ MPa}) \cdot DIF_{c,s}$

Alkalmazott nyírási vasalás: $A_v := 2 \frac{D_{shear}^2 \cdot \pi}{4} = 402.124 \cdot \text{mm}^2$ $\sigma_{Av} := A_v \cdot \nu_{As}$

Nyírási hasznos magasság: $d_v := \max(0.9 \cdot d_{bot}, 0.72 \cdot h) = 293.4 \cdot \text{mm}$

Beton berepedését figyelembe vevő tényező: $\beta := 0.18$

Nyomott betonrácsrúd dőlésszöge: $\Theta := 35^\circ$

A dinamikus reakcióerő: $V_{df} := 0.39 R(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b, \mu_{d,diff}) + 0.11 \cdot P_R \cdot sp \cdot L = 449.487 \cdot \text{kN}$

A hatás oldal:

$$EF(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b, \mu_{d,diff}, P_R) := 0.39 R(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b, \mu_{d,diff}) + 0.11 \cdot \text{mean}_{P_R} \cdot P_R \cdot sp \cdot L$$

Az ellenállás oldal:

$$RF(f_{cm}, b, A_v, f_{sm}, s_{shear}, ME_{shear}, d_v) := \left(\beta \cdot \sqrt{\frac{f_{cm}}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} \cdot b \cdot d_v + \frac{A_v \cdot f_{sm} \cdot d_v \cdot \cot(\Theta)}{s_{shear}} \right) \cdot ME_{shear}$$

A határállapot függvény:

$$G(f_{cm}, b, \mu_{d,diff}, A_v, f_{sm}, s_{shear}, A_s, P_R, ME_{shear}, d_v) := RF(f_{cm}, b, A_v, f_{sm}, s_{shear}, ME_{shear}, d_v) \dots + -1 \cdot EF(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b, d_{bot}, P_R)$$

A hatás oldal eredő szórása:

$$S_E := \sqrt{\left(\frac{d}{df_{cm}} EF(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b, \mu_{d,diff}, P_R) \cdot \sigma_{fcm}\right)^2 + \left(\frac{d}{db} EF(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b, \mu_{d,diff}, P_R) \cdot \sigma_b\right)^2 + \left(\frac{d}{dd_{bot}} EF(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b, \mu_{d,diff}, P_R) \cdot \sigma_{d,diff}\right)^2 + \left(\frac{d}{dA_s} EF(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b, \mu_{d,diff}, P_R) \cdot \sigma_{A_s}\right)^2 + \left(\frac{d}{df_{sm}} EF(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b, \mu_{d,diff}, P_R) \cdot \sigma_{fsm}\right)^2 + \left(\frac{d}{dP_R} EF(A_s, f_{sm}, f_{cm}, b, \mu_{d,diff}, P_R) \cdot \sigma_{Pr}\right)^2} \dots = 25.778 \cdot \text{kN}$$

Az ellenállás oldal eredő szórása:

$$S_R := \sqrt{\left(\frac{d}{df_{cm}} RF(f_{cm}, b, A_v, f_{sm}, s_{shear}, ME_{shear}, d_v) \cdot \sigma_{fcm}\right)^2 + \left(\frac{d}{db} RF(f_{cm}, b, A_v, f_{sm}, s_{shear}, ME_{shear}, d_v) \cdot \sigma_b\right)^2 + \left(\frac{d}{dA_v} RF(f_{cm}, b, A_v, f_{sm}, s_{shear}, ME_{shear}, d_v) \cdot \sigma_{A_v}\right)^2 + \left(\frac{d}{ds_{shear}} RF(f_{cm}, b, A_v, f_{sm}, s_{shear}, ME_{shear}, d_v) \cdot \sigma_{s,diff}\right)^2 + \left(\frac{d}{df_{sm}} RF(f_{cm}, b, A_v, f_{sm}, s_{shear}, ME_{shear}, d_v) \cdot \sigma_{fsm}\right)^2 + \left(\frac{d}{dME_{shear}} RF(f_{cm}, b, A_v, f_{sm}, s_{shear}, ME_{shear}, d_v) \cdot \sigma_{ME,shear}\right)^2 + \left(\frac{d}{dd_v} RF(f_{cm}, b, A_v, f_{sm}, s_{shear}, ME_{shear}, d_v) \cdot \sigma_{d,diff}\right)^2} \dots = 166.611 \cdot \text{kN}$$

Összevont eredő szórás: $S_{RE} := \sqrt{S_R^2 + S_E^2} = 168.593 \cdot \text{kN}$

A megbízhatósági index:

$$\beta_{eff} := \frac{G(f_{cm}, b, \mu_{d,diff}, A_v, f_{sm}, s_{shear}, A_s, P_R, ME_{shear}, d_v)}{S_{RE}} = 0.814$$

Tönkremeneteli
valószínűség:

$$P_f := \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{-\beta_{eff}} \frac{e^{-x^2/2}}{2} dx = 0.208$$

Acélelem vizsgálata Monte Carlo szimuláció és átlaggyorsulások módszerével



VBIED robbanóanyag mennyisége: $W := 200 \text{ kg}$

$C_{\text{neq}} := 0.82$

Acél szelvény:

VBIED távolsága: $R_0 := 11 \text{ m}$

$R_x := 0 \text{ m}$

$$R := \sqrt{R_0^2 + R_x^2} = 11 \text{ m}$$

Beesési (visszaverődési) szög: $\alpha := \text{atan}\left(\frac{R_x}{R_0}\right) = 0^\circ$

Nyomásfüggvény típusa:

Háromszög
Friedlander

Duktilitási határ:

$\mu := 15$

Acélminőség:

S235
S355

DIF iterációk száma:

$\text{iter}_{\text{DIF}} := 3$

Oszlopok magassága:

$L := 2.6 \text{ m}$

Szimulációk száma:

$n_{\text{MC}} := 1000$

Oszlopok osztásköze:

$\text{sp} := 3 \text{ m}$

Gerinchízalás:

$t_{\text{w.add}} := 11 \text{ mm}$

HEA100
HEA120
HEA140
HEA160
HEA180
HEA200
HEA220
HEA240
HEA260
HEA280
HEA300
HEA320
HEA340
HEA360
HEA400
HEA450
HEA500
HEA550
HEA600
HEA650

► Keresztmetszet adatbázis

► Függvények definiálása

Véletlenszám generáló függvények

Lognormál eloszlás:

$$\text{GENlog}(\text{mean}, \text{COV}) := \text{LogNormal}(1) \cdot \text{mean} \cdot \text{COV} + \text{mean}$$

Normál eloszlás:

$$\text{GEN}(\text{mean}, \text{COV}) := \text{Normal}(1) \cdot \text{mean} \cdot \text{COV} + \text{mean}$$

Normál eloszlás felhasználó által megadott (korrelált) eloszlás szerint:

$$\text{GEN2}(\text{mean}, \text{COV}, \text{rand}) := \text{rand} \cdot \text{mean} \cdot \text{COV} + \text{mean}$$

Bemenő valószínűségi változók

Acél rugalmassági modulusa:

$E_s := 210 \text{ GPa}$

$\nu_{E,s} := 6\%$

Acél sűrűsége:

$\rho := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$\nu_\rho := 2\%$

Acél folyáshatára:

$f_{\text{ym}} = 452.2 \cdot \text{MPa}$

$\nu_{f_y} = 0.05$

Övszélesség:

$b = 300 \cdot \text{mm}$

$\nu_b := 1.014\%$

Szelvény magassága:

$h = 290 \cdot \text{mm}$

$\nu_h := 0.443\%$

Gerincvastagság:

$t_w = 8.5 \cdot \text{mm}$

$\nu_{t_w} := 4.005\%$

Övvastagság:

$t_f = 14 \cdot \text{mm}$

$\nu_{t_f} := 4.434\%$

Kingery-Bulmash relatív
modellszórása:

$$\nu_{\text{ME.Pr}} := 0.069$$

$$\text{ME}_{\text{Pr}} := 1.03$$

$$\nu_{\text{ME.Ir}} := 0.1783 - 0.0237 \cdot Z = 0.134$$

$$\text{ME}_{\text{Ir}} := 0.99$$

Korrelációs mátrix:

$$C := \begin{pmatrix} 1 & 0.92 \\ 0.92 & 1 \end{pmatrix}$$

$$C_c := \text{cholesky}(C) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0.92 & 0.392 \end{pmatrix}$$

SDOF számítási modell
szórása:

$$\text{ME}_{\text{SDOF}} := 1.233$$

$$\nu_{\text{SDOF}} := 0.2$$

Ekvivalens tömeg tényező:

$$K_M := 0.33$$

Ekvivalens teher tényező:

$$K_L := 0.5$$

Ekvivalens ellenállás tényező:

$$K_R := K_L$$

Megoldás vezérlés

Csillapítás:

$$\xi := 1\%$$

Szerkezet válaszanak
vizsgált időtartama:

$$t_{\text{max}} := 15 \cdot \text{ms}$$

Időlépcső:

$$\Delta t := 0.002 \cdot \text{ms}$$

Lépések száma:

$$N_o := \text{round}\left(\frac{t_{\text{max}}}{\Delta t}\right) = 7500$$

$$q := 1 \dots N_o$$

Kiértékelési időpontok:

$$t_q := \Delta t \cdot q$$

$$\text{kezdet} := \text{time}(11) \cdot \text{s}$$

► Az SDOF rezgésegyenlet numerikus megoldása


```

PPP := | HAJLITAS  $\leftarrow$  0
        NYIRAS  $\leftarrow$  0
        OSSZEVONT  $\leftarrow$  0
        for i  $\in$  1..nMC
            |  $\rho\rho \leftarrow \text{GEN}(\rho, \nu_\rho)$ 
              E  $\leftarrow \text{GEN}(E_s, \nu_{E.s})$ 
              H  $\leftarrow \text{GEN}(h, \nu_h)$ 
              B  $\leftarrow \text{GEN}(b, \nu_b)$ 
              Tf  $\leftarrow \text{GEN}(t_f, \nu_{tf})$ 
              Tw  $\leftarrow \text{GEN}(t_w, \nu_{tw})$ 
              X  $\leftarrow \text{Normal}(2)$ 
              Xc  $\leftarrow C_c \cdot X$ 
              Aw  $\leftarrow (H - 2 \cdot T_f) \cdot (T_w + t_{w.add})$ 
              Ast  $\leftarrow 2 \cdot B \cdot T_f + T_w \cdot (H - 2 \cdot T_f)$ 
              Wpl  $\leftarrow \frac{1}{4} \cdot [B \cdot H^2 - (B - T_w) \cdot (H - 2 \cdot T_f)^2]$ 
              Ix  $\leftarrow \frac{1}{12} \cdot [B \cdot H^3 - (B - T_w) \cdot (H - 2 \cdot T_f)^3]$ 
              KE  $\leftarrow \frac{384 \cdot E \cdot I_x}{5 \cdot L^4} \cdot L$ 
              Mass  $\leftarrow \rho\rho \cdot A_{st} \cdot L \cdot K_M$ 
              fn  $\leftarrow \frac{\sqrt{\frac{(K_R \cdot K_E)}{\text{Mass}}}}{2\pi}$ 
              Fy  $\leftarrow \text{GENlog}(f_{ym}, \nu_{fy})$ 
              Mp  $\leftarrow W_{pl} \cdot F_y$ 
              R  $\leftarrow \frac{8 \cdot M_p}{L^2} \cdot L$ 
              yield_force  $\leftarrow K_R \cdot R$ 
              XE  $\leftarrow \frac{R}{K_E}$ 
              Wuse  $\leftarrow W \cdot C_{neq}$ 
              PR.mean  $\leftarrow \text{ROBB}(W_{use}, R_0, R_x) \cdot 2 \cdot \text{kPa}$ 
              IR.mean  $\leftarrow \text{ROBB}(W_{use}, R_0, R_x) \cdot 3 \cdot \text{kPa} \cdot \text{ms}$ 
              PR  $\leftarrow \text{GEN2}(P_{R.mean} \cdot ME_{Pr}, \nu_{ME.Pr}, X_{c1})$ 
              IR  $\leftarrow \text{GEN2}(I_{R.mean} \cdot ME_{Ir}, \nu_{ME.Ir}, X_{c2})$ 
              Fmax  $\leftarrow P_R \cdot sp \cdot L \cdot K_L$ 

```

```

 $t_d \leftarrow T_d(p_R, I_R)$ 
 $p \leftarrow \text{for } k \in 1 \dots \text{No}$ 
     $A_k \leftarrow \begin{cases} F_{\max} \cdot \left(1 - \frac{t_k}{t_d}\right) & \text{if } t_k < t_d \\ 0 \cdot N & \text{if } t_k \geq t_d \end{cases}$ 
 $\text{for } j \in 1 \dots \text{iter}_{\text{DIF}}$ 
     $\text{result} \leftarrow \text{response}\left(\frac{p}{N}, \frac{\Delta t}{\text{sec}}, \frac{\text{yield\_force}}{N}, \frac{\text{Mass}}{\text{kg}}, \frac{f_n}{\text{Hz}}, \xi\right)$ 
     $U \leftarrow \text{result} \cdot m$ 
     $\text{MAX} \leftarrow \begin{cases} g \leftarrow 2 \\ \text{while } \frac{U_{g+1}}{U_g} > 1 \\ \quad \begin{cases} g \leftarrow g + 1 \\ \quad \left(\frac{U_{g-1}}{\text{mm}} \quad \frac{g \cdot \Delta t}{s}\right) \end{cases} \end{cases}$ 
     $t_E \leftarrow \text{MAX}_{1,2} \cdot s$ 
     $\varepsilon \leftarrow \frac{F_y}{E \cdot t_E}$ 
     $\text{DIFF} \leftarrow \text{DIF}(\varepsilon)$ 
     $\text{yield\_force} \leftarrow K_R \cdot R \cdot \text{DIFF}$ 
     $u_{\max} \leftarrow \text{MAX}_{1,1} \cdot \text{mm}$ 
 $V_{df} \leftarrow 0.39R + 0.11 \cdot \frac{F_{\max}}{K_L}$ 
 $V_r \leftarrow A_w \cdot \frac{\text{DIFF} \cdot F_y}{\sqrt{3}}$ 
 $k_{\text{SDOF}} \leftarrow \frac{1}{\text{GEN}(\text{ME}_{\text{SDOF}}, \nu_{\text{SDOF}})}$ 
 $\text{HAJLITAS} \leftarrow \begin{cases} \text{HAJLITAS} + 1 & \text{if } k_{\text{SDOF}} \cdot u_{\max} \leq \mu \cdot X_E \\ \text{HAJLITAS} & \text{otherwise} \end{cases}$ 
 $\text{NYIRAS} \leftarrow \begin{cases} \text{NYIRAS} + 1 & \text{if } V_r \geq V_{df} \\ \text{NYIRAS} & \text{otherwise} \end{cases}$ 
 $\text{OSSZEVONT} \leftarrow \begin{cases} \text{OSSZEVONT} + 1 & \text{if } V_r \geq V_{df} \wedge k_{\text{SDOF}} \cdot u_{\max} \leq \mu \cdot X_E \\ \text{OSSZEVONT} & \text{otherwise} \end{cases}$ 
 $\begin{pmatrix} \text{HAJLITAS} \\ \text{NYIRAS} \\ \text{OSSZEVONT} \end{pmatrix}$ 

```

A szimuláció eredménye

Vizsgált minták száma: $n_{MC} = 1000$

Hajlítás

"Megfelelő" szimulált események száma: $PPP_1 = 673$

Tönkremeneteli valószínűség: $P_f := 1 - \frac{PPP_1}{n_{MC}} = 32.7\%$

Megbízhatósági index: $P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{-X} e^{\frac{-x^2}{2}} dx$

$$\beta := (\text{Find}(X)) = 0.448$$

Nyírás

"Megfelelő" szimulált események száma: $PPP_2 = 783$

Tönkremeneteli valószínűség: $P_f := 1 - \frac{PPP_2}{n_{MC}} = 21.7\%$

Megbízhatósági index: $P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{-X} e^{\frac{-x^2}{2}} dx$

$$\beta := (\text{Find}(X)) = 0.782$$

Hajlítás és nyírás

"Megfelelő" szimulált események száma: $PPP_3 = 609$

Tönkremeneteli valószínűség: $P_f := 1 - \frac{PPP_3}{n_{MC}} = 39.1\%$

Megbízhatósági index: $P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{-X} e^{\frac{-x^2}{2}} dx$

$$\beta := (\text{Find}(X)) = 0.277$$

Számításhoz szükséges időtartam: $T_{calc} := \text{vege} - \text{kezdet} = 1 \cdot \text{min}$

Vasbeton elem vizsgálata Monte Carlo szimuláció és átlaggyorsulások módszerével



VBIED robbanóanyag mennyisége: $W := 210 \text{ kg}$ $C_{\text{neq}} := 0.82$

VBIED távolsága: $R_0 := 14 \text{ m}$ $R_x := 0 \text{ m}$ $R := \sqrt{R_0^2 + R_x^2} = 14 \text{ m}$

Beesési (visszaverődési) szög: $\alpha := \text{atan}\left(\frac{R_x}{R_0}\right) = 0^\circ$

Nyomásfüggvény típusa:

Háromszög
Friedlander

Betonminőség:

C16/20
C20/25
C25/30
C30/37
C35/45

Vasátmérő:

M10
M12
M16
M18
M20
M25

Duktilitási határ:

$\Theta_{\text{all}} := 6^\circ$

DIF iterációk száma:

$\text{iter}_{\text{DIF}} := 2$

Betonacél
minőség:

Oszlopok magassága:

$L := 3 \text{ m}$

Szimulációk száma:

Oszlopok osztásköze:

$sp := 2 \text{ m}$

$n_{\text{MC}} := 1000$

S400B
S500B

Magasság:

$h := 300 \text{ mm}$

$\nu_h := 1\%$

Vasak száma:

Szélesség:

$b := 300 \text{ mm}$

$\nu_b := 1\%$

$n_{\text{bot}} := 4$

Betonfedés:

$c_{\text{bot}} := 50 \text{ mm}$

Kengyel átmérő:

$D_{\text{shear}} := 18 \text{ mm}$

Kengyelek távolsága:

$s_{\text{shear}} := 160 \text{ mm}$

$\sigma_{\text{sdiff}} := \frac{b}{12 \cdot 2}$



Alsó vasalás hasznos magassága:

$d_{\text{bot}} = 223 \text{ mm}$ $\mu_{\text{d,diff}} := 6 \text{ mm}$ $\sigma_{\text{d,diff}} := 12 \text{ mm}$

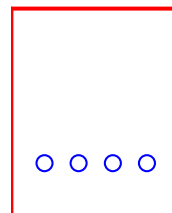
Vasalás keresztmetszeti területe:

$$A_{\text{s,bot}} := \left[n_{\text{bot}} \cdot \frac{(D_{\text{bot}})^2 \cdot \pi}{4} \right] = 1018 \text{ mm}^2$$

$\nu_{\text{As}} := 2\%$

Vasalási hányad:

$$\rho_{\text{bot}} := \frac{A_{\text{s,bot}}}{b \cdot h} = 1.131\%$$



A keresztmetszet vázlatos rajza



Függvények definiálása

Véletlenszám generáló függvények

Normál eloszlás:

$$\text{GEN}(\text{mean}, \text{COV}) := \text{Normal}(\mathbf{1}) \cdot \text{mean} \cdot \text{COV} + \text{mean}$$

$$\text{GEN3}(\text{mean}, \sigma) := \text{Normal}(\mathbf{1}) \cdot \sigma + \text{mean}$$

Normál eloszlás felhasználó által
megadott (korrelált) eloszlás szerint:

$$\text{GEN2}(\text{mean}, \text{COV}, \text{rand}) := \text{rand} \cdot \text{mean} \cdot \text{COV} + \text{mean}$$

Bemenő valószínűségi változók

Acél rugalmassági
modulusa:

$$E_s := 210 \text{ GPa}$$

Acél sűrűsége:

$$\rho_s := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\nu_{\rho_s} := 2\%$$

Beton testsűrűsége:

$$\rho_c := 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\nu_{\rho_c} := 4\%$$

Betonacél folyáshatár (várható érték):

$$f_{sm} := \frac{f_{yk}}{1 - 1.645 \nu_{sm}} = 554.754 \cdot \text{MPa}$$

$$\nu_{sm} := 6\%$$

Beton nyomószilárdság (várható érték):

$$f_{cm} := f_{ck} + 8 \text{ MPa} = 43 \cdot \text{MPa}$$

$$\nu_{cm} := 15\%$$

P I

Korrelációs mátrix:

$$C := \begin{pmatrix} 1 & 0.99 \\ 0.99 & 1 \end{pmatrix}$$

$$C_c := \text{cholesky}(C) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0.99 & 0.141 \end{pmatrix}$$

Kingery-Bulmash relatív
modellszórása:

$$\nu_{ME,Pr} := 0.069$$

$$ME_{Pr} := 1.03$$

$$\nu_{ME,Ir} := 0.1783 - 0.0237 \cdot Z = 0.122$$

$$ME_{Ir} := 0.99$$

SDOF számítási modell szórása:

$$ME_{SDOF} := 1.233$$

$$\nu_{SDOF} := 0.209$$

Nyírási teherbírás modell relatív szórása:

$$ME_{shear} := 1.19$$

$$\nu_{ME,shear} := 0.218$$

Ekvivalens tömeg tényező:

$$K_M := 0.33$$

Ekvivalens teher tényező:

$$K_L := 0.5$$

Ekvivalens ellenállás tényező:

$$K_R := K_L$$

Megoldás vezérlésCsillapítás: $\xi := 1\%$ Szerkezet válaszanak
vizsgált időtartama: $t_{\max} := 70 \cdot \text{ms}$ Időlépcső: $\Delta t := .002 \cdot \text{ms}$ Lépések száma: $N_o := \text{round}\left(\frac{t_{\max}}{\Delta t}\right) = 35000$ $q := 1 \dots N_o$ Kiértékelési időpontok: $t_q := \Delta t \cdot q$ kezdet := time(11)·s

► Az SDOF rezgésegyenlet numerikus megoldása

```

PPP := | HAJLITAS ← 0
        NYIRAS ← 0
        OSSZEVONT ← 0
        for i ∈ 1..nMC
            ρC ← GEN(ρc, νρc)
            ρS ← GEN(ρs, νρs)
            H ← GEN(h, νh)
            B ← GEN(b, νb)
            AS ← GEN(As.bot, νAs)
            Dbot ← dbot + GEN3(μd.diff, σd.diff)
            FS ← GEN(fsm, νsm)
            FC ← GEN(fcm, νcm)
            X ← Normal(2)
            XC ← CC·X
            EC ←  $\left(3000 \cdot \sqrt{\frac{F_C}{\text{MPa}}} + 6900\right) \cdot \text{MPa} \cdot \left(\frac{\rho_C}{2300 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}\right)^{1.5}$ 
            αrc ← max $\left(0.85 - 0.0015 \cdot \frac{F_C}{\text{MPa}}, 0.67\right)$ 
            βrc ← max $\left(0.97 - 0.0025 \cdot \frac{F_C}{\text{MPa}}, 0.67\right)$ 
            aa ←  $\frac{A_S \cdot F_S}{\alpha_{rc} \cdot F_C \cdot B}$ 
            coo ←  $\frac{aa}{\beta_{rc}}$ 
            Mr ← AS·FS· $\left(D_{\text{bot}} - \frac{aa}{2}\right)$ 
            αmod ←  $\frac{E_S}{E_C}$ 

```

```


$$I_{II} \leftarrow B \cdot \frac{c_{oo}^3}{3} + A_s \cdot \alpha_{mod} \cdot (D_{bot} - c_{oo})^2$$


$$E_{mean} \leftarrow \frac{E_c \cdot B \cdot c_{oo} + E_s \cdot A_s}{B \cdot c_{oo} + A_s}$$


$$R \leftarrow \frac{8 \cdot M_r}{L^2} \cdot L$$


$$K_E \leftarrow \frac{384 E_{mean} \cdot I_{II}}{5 \cdot L^4} \cdot L$$


$$M_{rb} \leftarrow \left[ A_s \cdot L + (2B + 2 \cdot H) \cdot \frac{D_{shear}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{L}{s_{shear}} \right] \cdot (\rho_S)$$


$$Mass \leftarrow (\rho_C \cdot B \cdot H \cdot L + M_{rb}) \cdot K_M$$


$$f_n \leftarrow \frac{\sqrt{\frac{(K_R \cdot K_E)}{Mass}}}{2\pi}$$


$$yield\_force \leftarrow K_R \cdot R$$


$$X_E \leftarrow \frac{R}{K_E}$$


$$W_{use} \leftarrow W \cdot C_{neq}$$


$$P_{R,mean} \leftarrow ROBB(W_{use}, R_0, R_x) \cdot 2 \cdot kPa$$


$$I_{R,mean} \leftarrow ROBB(W_{use}, R_0, R_x) \cdot 3 \cdot kPa \cdot ms$$


$$P_R \leftarrow GEN2(P_{R,mean} \cdot ME_{Pr}, \nu_{ME.Pr}, X_{c_1})$$


$$I_R \leftarrow GEN2(I_{R,mean} \cdot ME_{Ir}, \nu_{ME.Ir}, X_{c_2})$$


$$F_{max} \leftarrow P_R \cdot sp \cdot L \cdot K_L$$


$$t_d \leftarrow T_d(P_R, I_R)$$


$$p \leftarrow \text{for } k \in 1 \dots No$$


$$A_k \leftarrow \begin{cases} F_{max} \cdot \left(1 - \frac{t_k}{t_d}\right) & \text{if } t_k < t_d \\ 0 \cdot N & \text{if } t_k \geq t_d \end{cases}$$


$$\text{for } j \in 1 \dots iter_{DIF}$$


$$result \leftarrow response\left(\frac{p}{N}, \frac{\Delta t}{sec}, \frac{yield\_force}{N}, \frac{Mass}{kg}, \frac{f_n}{Hz}, \xi\right)$$


$$U \leftarrow result \cdot m$$


$$MAX \leftarrow \begin{cases} g \leftarrow 2 \\ \text{while } \frac{U_{g+1}}{U_g} > 1 \\ \quad g \leftarrow g + 1 \end{cases}$$


```

$$\left| \left| \frac{\frac{g-1}{\text{mm}} \quad \frac{g \cdot \Delta t}{s}}{\right|} \right|$$

$$t_E \leftarrow \text{MAX}_{1,2} \cdot s$$

$$\varepsilon_{cc} \leftarrow \frac{0.35\%}{t_E}$$

$$\varepsilon_{rsb} \leftarrow \frac{F_s}{E_s \cdot t_E}$$

$$\text{DIF}_{cc} \leftarrow \text{DIF}_c(\varepsilon_{cc})$$

$$\text{DIF}_{rsb} \leftarrow \text{DIF}_{rb}(\varepsilon_{rsb})$$

$$\text{yield_force} \leftarrow K_R \cdot \left(\text{RFn}(\text{DIF}_{cc} \cdot F_c, \text{DIF}_{rsb} \cdot F_s, \rho_C, \rho_S, B, H, c_{oo}, D_{bot}, A_s)_{1,2} \cdot \text{kN} \right)$$

$$f_n \leftarrow \text{RFn}(\text{DIF}_{cc} \cdot F_c, \text{DIF}_{rsb} \cdot F_s, \rho_C, \rho_S, B, H, c_{oo}, D_{bot}, A_s)_{1,1} \cdot \frac{1}{s}$$

$$u_{\max} \leftarrow \text{MAX}_{1,1} \cdot \text{mm}$$

$$k_{\text{shear}} \leftarrow \text{GEN}(\text{ME}_{\text{shear}}, \nu_{\text{ME.shear}})$$

$$S_{\text{shear}} \leftarrow s_{\text{shear}} + \text{GEN3}(0, \sigma_{\text{sdiff}})$$

$$V_{df} \leftarrow 0.39R + 0.11 \cdot \frac{F_{\max}}{K_L}$$

$$A_V \leftarrow \text{GEN} \left(2 \frac{D_{\text{shear}}^2 \cdot \pi}{4}, \nu_{A_s} \right)$$

$$D_V \leftarrow \max(0.9 \cdot D_{bot}, 0.72 \cdot H)$$

$$V_C \leftarrow 0.18 \cdot \sqrt{\frac{\text{DIF}_{cc} \cdot F_c}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} \cdot B \cdot D_V$$

$$V_S \leftarrow \frac{A_V \cdot \text{DIF}_{rsb} \cdot F_s \cdot D_V \cdot \cot(35^\circ)}{S_{\text{shear}}}$$

$$V_{r,\max} \leftarrow 0.25 \cdot \text{DIF}_{cc} \cdot F_c \cdot B \cdot D_V$$

$$V_r \leftarrow \min(V_C + V_S, V_{r,\max}) \cdot k_{\text{shear}}$$

$$k_{\text{SDOF}} \leftarrow \text{GEN}(\text{ME}_{\text{SDOF}}, \nu_{\text{SDOF}})$$

$$\text{HAJLITAS} \leftarrow \left| \text{HAJLITAS} + 1 \text{ if } \frac{1}{k_{\text{SDOF}}} \cdot u_{\max} \leq \tan(\Theta_{\text{all}}) \cdot \frac{L}{2} \right|$$

$$\begin{aligned}
 & \text{HAJLITAS} \text{ otherwise} \\
 \text{NYIRAS} & \leftarrow \begin{cases} \text{NYIRAS} + 1 & \text{if } V_r \geq V_{df} \\ \text{NYIRAS} & \text{otherwise} \end{cases} \\
 \text{OSSZEVONT} & \leftarrow \begin{cases} \text{OSSZEVONT} + 1 & \text{if } V_r \geq V_{df} \wedge \frac{1}{k_{\text{SDOF}}} \cdot u_{\text{max}} \leq \tan(\Theta_{\text{all}}) \cdot \frac{L}{2} \\ \text{OSSZEVONT} & \text{otherwise} \end{cases} \\
 & \begin{pmatrix} \text{HAJLITAS} \\ \text{NYIRAS} \\ \text{OSSZEVONT} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

A szimuláció eredménye

Vizsgált minták száma:

$$n_{\text{MC}} = 1000$$

Elmozdulási határérték:

$$\tan(\Theta_{\text{all}}) \cdot \frac{L}{2} = 157.656 \cdot \text{mm}$$

Hajlítás

"Megfelelő" szimulált események száma: $\text{PPP}_1 = 776$

Tönkremeneteli valószínűség:

$$P_f := 1 - \frac{\text{PPP}_1}{n_{\text{MC}}} = 22.4\%$$

Megbízhatósági index:

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{-X} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

$$\beta := (\text{Find}(X)) = 0.759$$

Nyírás

"Megfelelő" szimulált események száma: $\text{PPP}_2 = 948$

Tönkremeneteli valószínűség:

$$P_f := 1 - \frac{\text{PPP}_2}{n_{\text{MC}}} = 5.2\%$$

Megbízhatósági index:

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{-X} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

$$\beta := (\text{Find}(X)) = 1.626$$

Hajlítás és nyírás

"Megfelelő" szimulált események száma: $\text{PPP}_3 = 742$

Tönkremeneteli valószínűség: $P_f := 1 - \frac{\text{PPP}_3}{n_{\text{MC}}} = 25.8\%$

Megbízhatósági index: $P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{-X} e^{\frac{-x^2}{2}} dx$

$$\beta := (\text{Find}(X)) = 0.65$$

Számításhoz szükséges időtartam: $T_{\text{calc}} := \text{vege} - \text{kezdet} = 0.3 \cdot \text{min}$

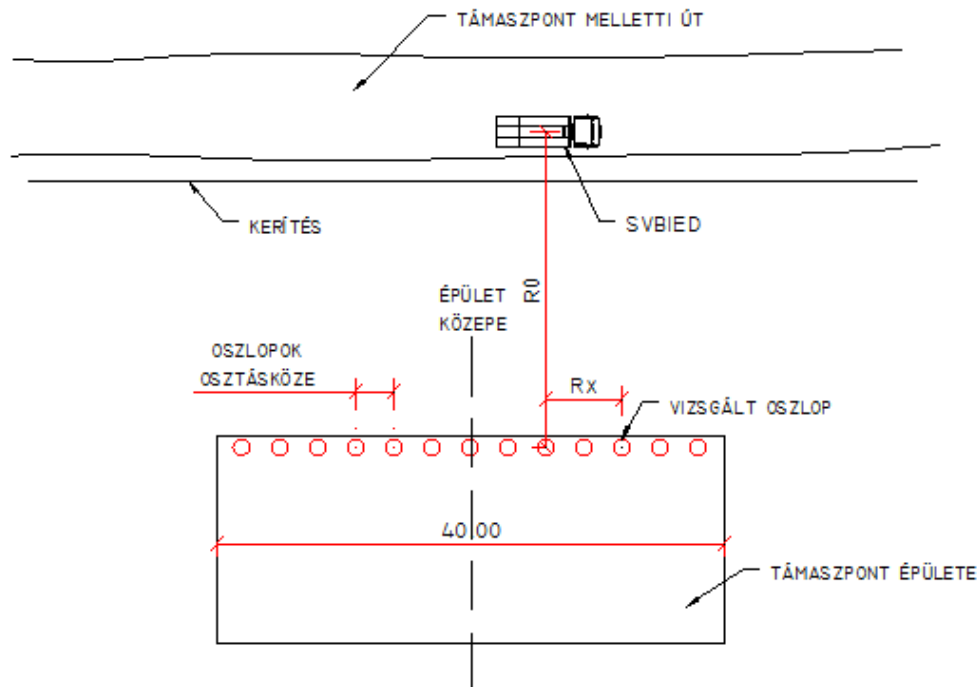
Vasbeton oszlop vizsgálata Monte Carlo szimulációval és az energiaegyensúlyi egyenlet alkalmazásával



VBIED robbanóanyag mennyisége:

$W := 210 \text{ kg}$

$C_{\text{neq}} := 0.82$



VBIED távolsága:

$R_0 := 14 \text{ m}$

$R_x := 0 \text{ m}$

$$R := \sqrt{R_0^2 + R_x^2} = 14 \text{ m}$$

Beesési (visszaverődési) szög:

$$\alpha := \arctan\left(\frac{R_x}{R_0}\right) = 0^\circ$$

Duktilitási határ:

$\Theta_{\text{all}} := 6^\circ$

Oszlopok magassága:

$L := 3 \text{ m}$

Szimulációk száma:

Oszlopok osztásköze:

$sp := 2 \text{ m}$

$n_{\text{MC}} := 10000$

Magasság:	$h := 400\text{mm}$	$\nu_h := 1\%$	Betonminőség:	Vasátmérő:
Szélesség:	$b := 400\text{mm}$	$\nu_b := 1\%$	C16/20 C20/25 C25/30 C30/37 C35/45	M10 M12 M16 M18 M20 M25
Betonfedés:	$c_{\text{bot}} := 50\text{mm}$			
Kengyel átmérő:	$D_{\text{shear}} := 16\text{mm}$			
Kengyelek távolsága:	$s_{\text{shear}} := 180\text{mm}$	$\sigma_{\text{sdiff}} := \frac{b}{12 \cdot 2}$	Betonacél minőség:	
Vasak száma:	$n_{\text{bot}} := 3$		S400B S500B	

► Keresztmetszet adatbázis

Alsó vasalás hasznos magassága:

$$d_{\text{bot}} = 326 \cdot \text{mm} \quad \mu_{\text{d.diff}} := 6\text{mm} \quad \sigma_{\text{d.diff}} := 12\text{mm}$$

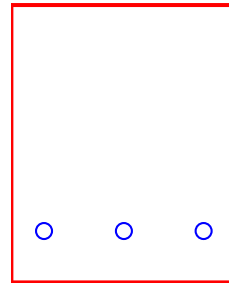
Vasalás keresztmetszeti területe:

$$A_{\text{s.bot}} := \left[n_{\text{bot}} \cdot \frac{(D_{\text{bot}})^2 \cdot \pi}{4} \right] = 603 \cdot \text{mm}^2$$

$$\nu_{\text{As}} := 2\%$$

Vasalási hányad:

$$\rho_{\text{bot}} := \frac{A_{\text{s.bot}}}{b \cdot h} = 0.377 \cdot \%$$



A keresztmetszet vázlatos rajza

► Függvények definiálása

Véletlenszám generáló függvények

Normál eloszlás:	$\text{GEN}(\text{mean}, \text{COV}) := \text{Normal}(\mathbf{1}) \cdot \text{mean} \cdot \text{COV} + \text{mean}$
	$\text{GEN3}(\text{mean}, \sigma) := \text{Normal}(\mathbf{1}) \cdot \sigma + \text{mean}$
Normál eloszlás felhasználó által megadott (korrelált) eloszlás szerint:	$\text{GEN2}(\text{mean}, \text{COV}, \text{rand}) := \text{rand} \cdot \text{mean} \cdot \text{COV} + \text{mean}$

Bemenő valószínűségi változók

Betonacél rugalmassági modulusa:	$E_s := 210 \text{ GPa}$	
Acél sűrűsége:	$\rho_s := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\nu_{\rho_s} := 2\%$
Beton testsűrűsége:	$\rho_c := 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\nu_{\rho_c} := 4\%$
Betonacél folyáshatár (várható érték):	$f_{sm} := \frac{f_{yk}}{1 - 1.645\nu_{sm}} = 443.803 \cdot \text{MPa}$	$\nu_{sm} := 6\%$
Beton nyomószilárdság (várható érték):	$f_{cm} := f_{ck} + 8 \text{ MPa} = 33 \cdot \text{MPa}$	$\nu_{cm} := 15\%$
Dinamikus szilárdságnövelő tényezők:	$\text{DIF}_{s,b} := 1.17$ $\text{DIF}_{s,s} := 1.1$ $\text{DIF}_{c,b} := 1.19$ $\text{DIF}_{c,s} := 1.1$	
Kingery-Bulmash relatív modellszórása:	$\nu_{\text{ME.Pr}} := 0.069$	$\text{ME}_{\text{Pr}} := 1.03$
	$\nu_{\text{ME.Ir}} := 0.1783 - 0.0237 \cdot Z = 0.122$	$\text{ME}_{\text{Ir}} := 0.99$
Korrelációs mátrix:	$C := \begin{pmatrix} 1 & 0.99 \\ 0.99 & 1 \end{pmatrix} \quad C_c := \text{cholesky}(C) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0.99 & 0.141 \end{pmatrix}$	
SDOF számítási modellszórása:	$\text{ME}_{\text{SDOF}} := 1.233$	$\nu_{\text{SDOF}} := 0.209$
Nyírási teherbírás modellszórása:	$\text{ME}_{\text{shear}} := 1.19$	$\nu_{\text{ME.shear}} := 0.218$
Ekvivalens tömeg tényező:	$K_M := 0.33$	
Ekvivalens teher tényező:	$K_L := 0.5$	
Ekvivalens ellenállás tényező:	$K_R := K_L$	

```

PPP := HAJLITAS ← 0
NYIRAS ← 0
OSSZEVONT ← 0
for i ∈ 1..nMC
    ρC ← GEN(ρC, νρC)
    ρS ← GEN(ρS, νρS)
    H ← GEN(h, νh)
    B ← GEN(b, νb)
    AS ← GEN(AS.bot, νAS)
    Dbot ← dbot + GEN3(μd.diff, σd.diff)
    FS ← GEN(fsm, νsm) · DIFS.b
    FC ← GEN(fcm, νcm) · DIFC.b
    FSS ← FS ·  $\frac{DIF_{S.s}}{DIF_{S.b}}$ 
    FCC ← FC ·  $\frac{DIF_{C.s}}{DIF_{C.b}}$ 
    X ← Normal(2)
    XC ← CC · X
    EC ←  $\left( 3000 \cdot \sqrt{\frac{F_C}{\text{MPa}}} + 6900 \right) \cdot \text{MPa} \cdot \left( \frac{\rho_C}{2300 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right)^{1.5}$ 
    αrc ← max $\left( 0.85 - 0.0015 \cdot \frac{F_C}{\text{MPa}}, 0.67 \right)$ 
    βrc ← max $\left( 0.97 - 0.0025 \cdot \frac{F_C}{\text{MPa}}, 0.67 \right)$ 
    aa ←  $\frac{A_S \cdot F_S}{\alpha_{rc} \cdot F_C \cdot B}$ 
    coo ←  $\frac{aa}{\beta_{rc}}$ 
    MI ← AS · FS ·  $\left( D_{\text{bot}} - \frac{aa}{2} \right)$ 
    αmod ←  $\frac{E_S}{E_C}$ 
    III ← B ·  $\frac{c_{oo}^3}{3} + A_S \cdot \alpha_{\text{mod}} \cdot \left( D_{\text{bot}} - c_{oo} \right)^2$ 
    Emean ←  $\frac{E_C \cdot B \cdot c_{oo} + E_S \cdot A_S}{B \cdot c_{oo} + A_S}$ 

```

$$\begin{aligned}
R &\leftarrow \frac{\sigma \cdot I_{II} R}{L^2} \cdot L \\
K_E &\leftarrow \frac{384 E_{\text{mean}} \cdot I_{II}}{5 \cdot L^4} \cdot L \\
M_{rb} &\leftarrow \left[A_S \cdot L + (2B + 2 \cdot H) \cdot \frac{D_{\text{shear}}^2 \cdot \pi}{4} \cdot \frac{L}{s_{\text{shear}}} \right] \cdot (\rho_S) \\
\text{Mass} &\leftarrow (\rho_C \cdot B \cdot H \cdot L + M_{rb}) \cdot K_M \\
X_E &\leftarrow \frac{R}{K_E} \\
W_{\text{use}} &\leftarrow W \cdot C_{\text{neq}} \\
P_{R,\text{mean}} &\leftarrow \text{ROBB}(W_{\text{use}}, R_0, R_x) \cdot 2 \cdot \text{kPa} \\
I_{R,\text{mean}} &\leftarrow \text{ROBB}(W_{\text{use}}, R_0, R_x) \cdot 3 \cdot \text{kPa} \cdot \text{ms} \\
P_R &\leftarrow \text{GEN2}(P_{R,\text{mean}} \cdot ME_{Pr}, \nu_{ME.Pr}, X_{c1}) \\
I_R &\leftarrow \text{GEN2}(I_{R,\text{mean}} \cdot ME_{Ir}, \nu_{ME.Ir}, X_{c2}) \\
F_{\text{max}} &\leftarrow P_R \cdot sp \cdot L \cdot K_L \\
t_d &\leftarrow T_d(P_R, I_R) \\
X_M &\leftarrow \frac{(I_R \cdot sp \cdot L \cdot K_L)^2}{2 \cdot \text{Mass} \cdot K_R \cdot R} + \frac{X_E}{2} \\
\text{check}_1 &\leftarrow \left(\frac{I_R \cdot sp \cdot L}{R} \cdot \frac{1}{t_d} \geq 3 \right)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{(continue) if } \frac{I_R \cdot \text{sp} \cdot L}{R} \cdot \frac{1}{t_d} < 3 \\
& V_{df} \leftarrow 0.39R + 0.11 \cdot \frac{F_{\max}}{K_L} \\
& S_{\text{shear}} \leftarrow s_{\text{shear}} + \text{GEN3}(0, \sigma_{\text{sdiff}}) \\
& A_V \leftarrow 2 \frac{D_{\text{shear}}^2 \cdot \pi}{4} \\
& D_V \leftarrow \max(0.9 \cdot D_{\text{bot}}, 0.72 \cdot H) \\
& V_C \leftarrow 0.18 \cdot \sqrt{\frac{F_{cc}}{\text{MPa}}} \cdot \text{MPa} \cdot B \cdot D_V \\
& V_S \leftarrow \frac{A_V \cdot F_{ss} \cdot D_V \cdot \cot(35^\circ)}{S_{\text{shear}}} \\
& V_{r,\max} \leftarrow 0.25 \cdot F_{cc} \cdot B \cdot D_V \\
& k_{\text{ME, shear}} \leftarrow \text{GEN}(\text{ME}_{\text{shear}}, \nu_{\text{ME, shear}}) \\
& V_r \leftarrow \min(V_C + V_S, V_{r,\max}) \cdot k_{\text{ME, shear}} \\
& k_{\text{SDOF}} \leftarrow \text{GEN}(\text{ME}_{\text{SDOF}}, \nu_{\text{SDOF}}) \\
& U_{\max_i} \leftarrow \frac{X_M}{k_{\text{SDOF}}} \\
& \text{HAJLITAS} \leftarrow \begin{cases} \text{HAJLITAS} + 1 & \text{if } \frac{X_M}{k_{\text{SDOF}}} \leq \tan(\Theta_{\text{all}}) \cdot \frac{L}{2} \\ \text{HAJLITAS} & \text{otherwise} \end{cases} \\
& \text{NYIRAS} \leftarrow \begin{cases} \text{NYIRAS} + 1 & \text{if } V_r \geq V_{df} \\ \text{NYIRAS} & \text{otherwise} \end{cases} \\
& \text{OSSZEVONT} \leftarrow \begin{cases} \text{OSSZEVONT} + 1 & \text{if } V_r \geq V_{df} \wedge \frac{X_M}{k_{\text{SDOF}}} \leq \tan(\Theta_{\text{all}}) \cdot \frac{L}{2} \\ \text{OSSZEVONT} & \text{otherwise} \end{cases} \\
& \begin{pmatrix} \text{HAJLITAS} \\ \text{NYIRAS} \\ \text{OSSZEVONT} \\ \text{check} \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{VALID} := & \begin{cases} h \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1 \dots \text{length}(\text{PPP}_4) \\ \quad h \leftarrow \begin{cases} (h + 1) & \text{if } (\text{PPP}_4)_i = 1 \\ h & \text{otherwise} \end{cases} \\ h \end{cases}
\end{aligned}$$

Elmozdulási határérték:

$$\tan(\Theta_{\text{all}}) \cdot \frac{L}{2} = 157.656 \cdot \text{mm}$$

A szimuláció eredménye

Vizsgált minták száma: $n_{MC} = 10000$

Ebből az érvényességi feltételt teljesíti: $VALID = 10000$

Hajlítás

"Megfelelő" szimulált események száma: $PPP_1 = 7087$

Tönkremeneteli valószínűség: $P_f := 1 - \frac{PPP_1}{VALID} = 29.13\%$

Megbízhatósági index: $P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{-X} e^{\frac{-x^2}{2}} dx$

$$\beta := (Find(X)) = 0.55$$

Nyírás

"Megfelelő" szimulált események száma: $PPP_2 = 8394$

Tönkremeneteli valószínűség: $P_f := 1 - \frac{PPP_2}{VALID} = 16.06\%$

Megbízhatósági index: $P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{-X} e^{\frac{-x^2}{2}} dx$

$$\beta := (Find(X)) = 0.992$$

Hajlítás és nyírás

"Megfelelő" szimulált események száma: $PPP_3 = 6065$

Tönkremeneteli valószínűség: $P_f := 1 - \frac{PPP_3}{VALID} = 39.35\%$

Megbízhatósági index: $P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{-X} e^{\frac{-x^2}{2}} dx$

$$\beta := (Find(X)) = 0.27$$

Számításhoz szükséges időtartam: $T_{calc} := \text{vege} - \text{kezdet} = 0.1 \cdot \text{min}$

Monte Carlo szimuláció alkalmazása vasbeton oszlop P-I diagramjával



VBIED robbanóanyag mennyisége:

$W := 200 \text{ kg}$

$C_{\text{neq}} := 0.82$

VBIED távolsága:

$R_0 := 15 \text{ m}$

$R_x := 0 \text{ m}$

$$R := \sqrt{R_0^2 + R_x^2} = 15 \text{ m}$$

Beesési (visszaverődési) szög:

$$\alpha := \arctan\left(\frac{R_x}{R_0}\right) = 0^\circ$$

Szimulációk száma:

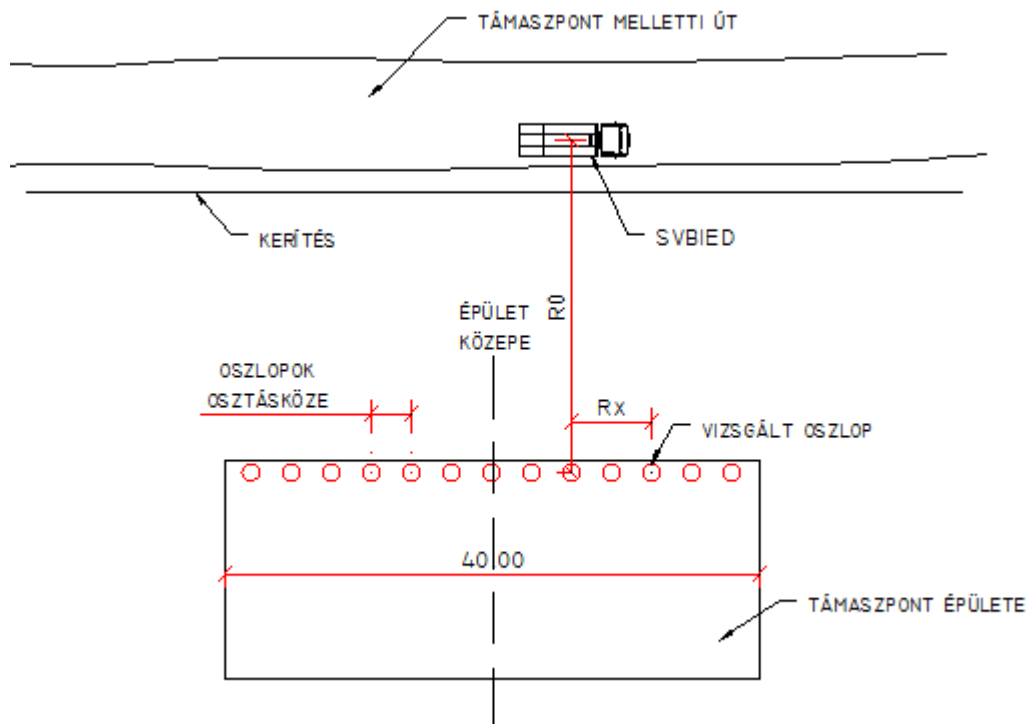
$n_{\text{MC}} := 10000$

Oszlopok magassága:

$L := 2.5 \text{ m}$

Oszlopok osztásköze:

$sp := 2 \text{ m}$



Vasbeton keresztmetszet definiálása

Magasság:	$h := 500\text{mm}$	$\nu_h := 1\%$	Betonminőség:	Hosszvas átmérő:
Szélesség:	$b := 300\text{mm}$	$\nu_b := 1\%$	C16/20 C20/25 C25/30 C30/37 C35/45	M10 M12 M16 M18 M20 M25
Betonfedés:	$c_{\text{bot}} := 50\text{mm}$			
Kengyelek távolsága:	$s_{\text{shear}} := 300\text{mm}$	$\sigma_{s,\text{shear}} := \frac{b}{2.12}$		
Vasak száma:	$n_b := 4$ $n_h := 2$		Betonacél minőség:	Nyírási vasátmérő:
			S400B S500B	M10 M12 M16 M18 M20 M25

▶ Keresztmetszet adatbázis

Betonacél folyáshatár (várható érték): $f_{sm} := \frac{f_{yk}}{1 - 1.645\nu_{rs}} = 554.754 \cdot \text{MPa}$ $\nu_{rs} := 6\%$

Beton nyomószilárdság (várható érték): $f_{cm} := f_{ck} + 8 \text{MPa} = 38 \cdot \text{MPa}$ $\nu_{cm} := 15\%$

Vasalás hasznos magassága:

$d_{\text{bot}} = 426 \cdot \text{mm}$ $\mu_{d,\text{diff}} := 6\text{mm}$ $\sigma_{d,\text{diff}} := 12\text{mm}$

Vasalás keresztmetszeti területe:

$$A_{s,\text{long}} := (n_b + 2 \cdot n_h) \cdot \frac{(D_{\text{longst}})^2 \cdot \pi}{4}$$

$$A_{s,\text{long}} = 1608 \cdot \text{mm}^2 \quad \nu_{As} := 2\%$$

Hosszirányú vasalási hányad:

$$\rho_{\text{bot}} := \frac{A_{s,\text{long}}}{b \cdot h} \cdot \frac{f_{sm}}{550 \text{MPa}} = 1.082 \cdot \%$$

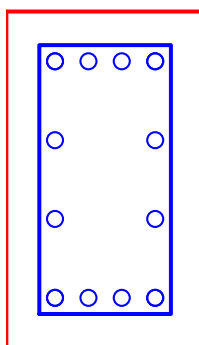
Nyírási vasmennyiség:

$$A_v := 2 \cdot \frac{D_{\text{shear}}^2 \cdot \pi}{4} = 402.124 \cdot \text{mm}^2$$

$$\nu_{As} := 2\%$$

Nyírási vasalási hányad:

$$\rho_s := \frac{A_v}{s_{\text{shear}} \cdot b} \cdot \frac{f_{sm}}{550 \text{MPa}} = 0.451 \cdot \%$$



A keresztmetszet vázlatos rajza

▶ Függvények definiálása

Véletlenszám generáló függvények

Normál eloszlás:

$$\text{GEN}(\text{mean}, \text{COV}) := \text{Normal}(\mathbf{1}) \cdot \text{mean} \cdot \text{COV} + \text{mean}$$

$$\text{GEN3}(\text{mean}, \sigma) := \text{Normal}(\mathbf{1}) \cdot \sigma + \text{mean}$$

Normál eloszlás felhasználó által
megadott (korrelált) eloszlás szerint:

$$\text{GEN2}(\text{mean}, \text{COV}, \text{rand}) := \text{rand} \cdot \text{mean} \cdot \text{COV} + \text{mean}$$

Bemenő valószínűségi változók

Kingery-Bulmash relatív
modellszórása:

$$\text{ME}_{\text{Pr}} := \mathbf{1.03}$$

$$\nu_{\text{ME.Pr}} := \mathbf{0.069}$$

$$\text{ME}_{\text{Ir}} := \mathbf{0.99}$$

$$\nu_{\text{ME.Ir}} := \mathbf{0.1783} - \mathbf{0.0237} \cdot Z = \mathbf{0.118}$$

P I

Korrelációs mátrix:

$$C := \begin{pmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0.99} \\ \mathbf{0.99} & \mathbf{1} \end{pmatrix}$$

$$C_{\text{C}} := \text{cholesky}(C) = \begin{pmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0.99} & \mathbf{0.141} \end{pmatrix}$$

```

PPP := nmc.real ← 0
MEGFELEL ← 0
for i ∈ 1..nMC
    B ← GEN(b, νb)
    H ← GEN(h, νh)
    Fs ← GEN(fsm, νrs)
    Fc ← GEN(fcm, νcm)
    AV ← GEN(AV, νAs)
    AS ← GEN(As.long, νAs)
    Sshear ← GEN3(sshear, σs.shear)
    ρbot ←  $\frac{A_S}{B \cdot H} \cdot \frac{F_s}{550 \text{ MPa}}$ 
    ρs ←  $\frac{A_V}{S_{\text{shear}} \cdot B} \cdot \frac{F_s}{550 \text{ MPa}}$ 
    Dbot ← dbot + GEN3(μd.diff, σd.diff)
    X ← Normal(2)
    Xc ← Cc · X
    Wuse ← W · Cneq
    Modt ←  $\frac{sp}{B}$ 
    PR.mean ← ROBB(Wuse, R0, Rx)2
    IR.mean ← ROBB(Wuse, R0, Rx)3
    PR ← Modt · GEN2(PR.mean · MEPr, νME.Pr, Xc)1
    IR ← Modt · GEN2(IR.mean · MEIr, νME.Ir, Xc)2
    P0 ←  $11 \cdot \frac{F_c}{\text{MPa}} + 3.456 \cdot \frac{D_{\text{bot}}}{\text{mm}} - 0.268 \cdot \frac{L}{\text{mm}} - 1.552 \cdot \frac{B}{\text{mm}} + 14753.44 \cdot \rho_{\text{bot}} + 8924.068 \cdot \rho_s + 851.9$ 
    I0 ←  $59 \cdot \frac{F_c}{\text{MPa}} + 13.16 \cdot \frac{D_{\text{bot}}}{\text{mm}} - 0.43 \cdot \frac{L}{\text{mm}} - 0.26 \cdot \frac{B}{\text{mm}} + 1091.78 \cdot \rho_{\text{bot}} + 489.97 \cdot \rho_s - 3302.33$ 
    nmc.real ←  $\begin{cases} (n_{\text{mc.real}} + 1) & \text{if } P_0 > 0 \vee I_0 > 0 \\ n_{\text{mc.real}} & \text{otherwise} \end{cases}$ 
    (continue) if P0 ≤ 0 ∨ I0 ≤ 0
    P(I) ←  $\frac{12 \cdot \left( \frac{P_0}{2} + \frac{I_0}{2} \right)^{1.5} + P_0 \cdot I + P_0 \cdot I_0}{(I - I_0)}$ 
    checki ← IR < I0 ∨ PR < P(IR)
    MEGFELEL ←  $\begin{cases} (\text{MEGFELEL} + 1) & \text{if } I_R < I_0 \vee P_R < P(I_R) \\ \text{MEGFELEL} & \text{otherwise} \end{cases}$ 

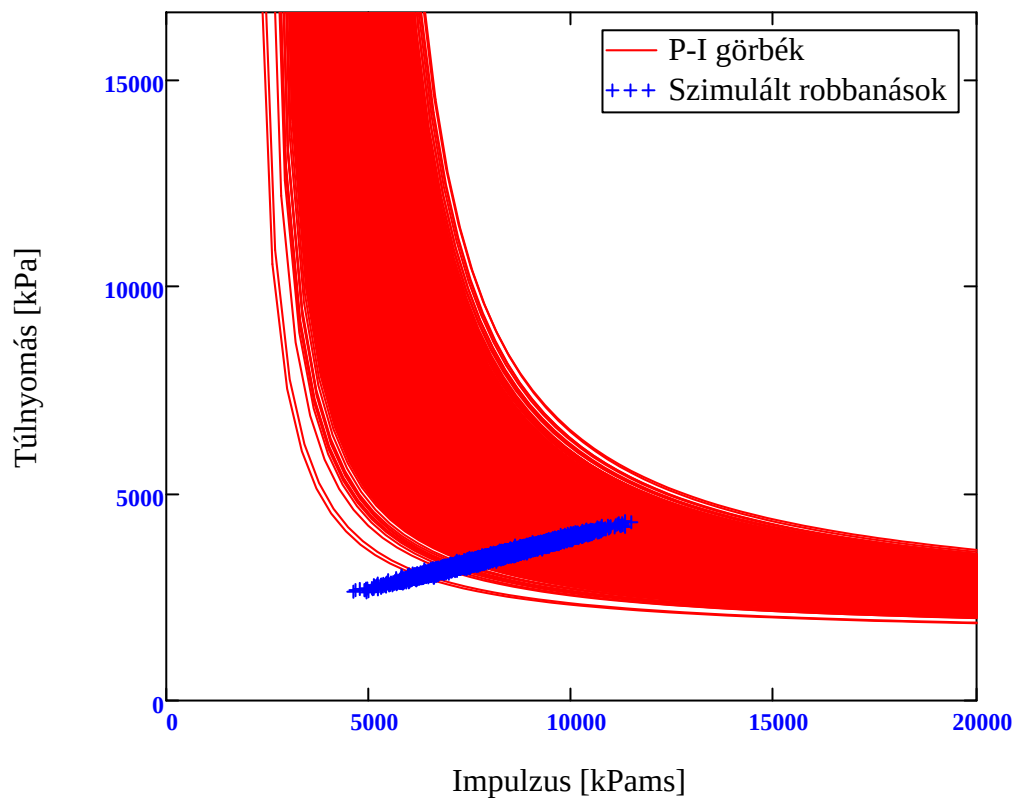
```

```

Pgyujtesi ← PR
Igyujtesi ← IR
for j ∈ 1 .. 50
    Jj,i ← I0 +  $\frac{20000 - I_0}{50} \cdot j$ 
    Kj,i ← P(Jj,i)
    (
        Pgyujtes
        Igyujtes
        MEGFELEL
        nmc.real
        J
        K
    )

```

A szimuláció eredménye



"Megfelelő" szimulált események száma: $PPP_3 = 9423$

Összes kiértékelhető szimuláció: $PPP_4 = 10000$

Tönkremeneteli valószínűség: $P_f := 1 - \frac{PPP_3}{PPP_4} = 5.77\%$



Megbízhatósági index:

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{-X} e^{\frac{-x^2}{2}} dx$$

$$\beta := \text{Find}(X) = 1.574$$

Számításhoz szükséges időtartam: $T_{\text{calc}} := \text{vege} - \text{kezdet} = 1.5 \cdot \text{min}$

Dobhártya szakadás ellenőrzése Monte Carlo szimulációval



Analízis beállítások

Szimulációk száma:

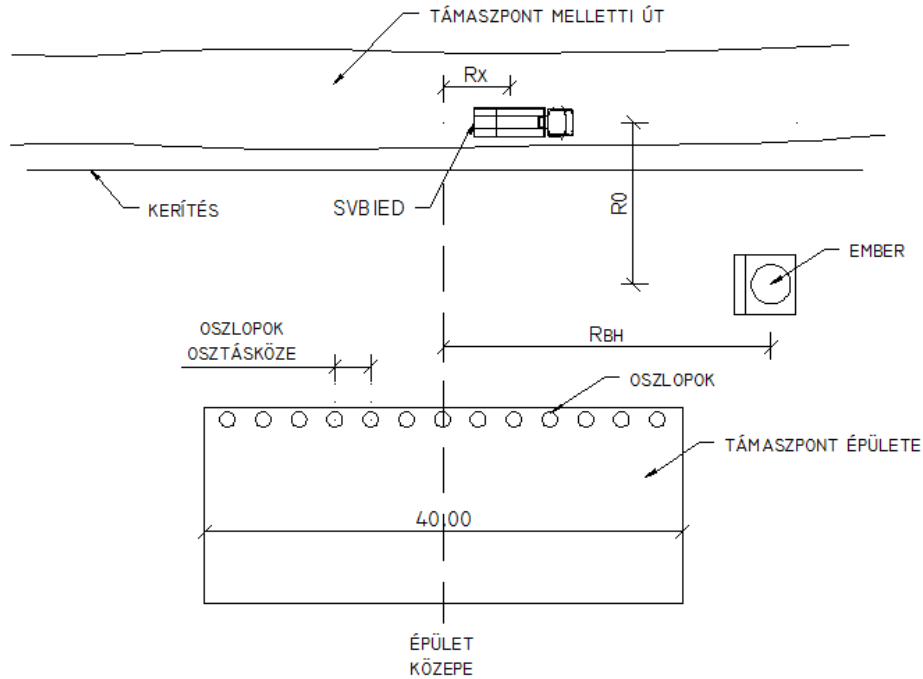
$n_{MC} := 5000$

Sűrűségfüggvény felbontása:

$n_d := 5000$

VBIED támadás valószínűsége:

$P_{VBIED.T} := 6.42\%$



Bemenő valószínűségi változók

VBIED robbanóanyag mennyiségének statisztikai jellemzői:

$\mu := 444$ [kg]

$\sigma := 341$ [kg]

Csonkolási határok:

$a := 0$ [kg]

$b := 5000$ [kg]

Töltettényező:

$C_{neq} := 0.82$

A távolságok definiálása:

$R_{bh} := 25m$

$R_0 := 10m$

$\sigma_{R0} := 0$

$R_x := 0m$

$\sigma_{Rx} := 10m$



Függvények definiálása

Kingery-Bulmash relatív modellszórása:

$ME_{Ps} := 1.03$

$\nu_{ME.Ps} := 0.069$



```

PPP := MEGFELEL ← 0
for i ∈ 1..nMC
  X ← Normal(1)
  r0 ← GEN3(R0, σR0)
  rx ← GEN3(Rx, σRx)
  RX ← Rbh - rx
  veletlen ← rnd(1)
  WWW ← root  $\left( \int_0^{Nn} \text{trf}(x) dx - \text{veletlen}, Nn, 0, 5000 \right)$ 
  Wuse ← WWW · Cneq · kg
  RR ←  $\sqrt{r0^2 + rx^2}$ 
  Z ←  $\frac{RR}{\frac{1}{3} \frac{\text{kg}}{\text{m}}} \cdot \frac{1}{3}$ 
  sorp ←  $\begin{cases} 1 & \text{if } 0.2 \leq Z < 2.9 \\ 2 & \text{if } 2.9 \leq Z < 23.8 \\ 3 & \text{if } 23.8 \leq Z < 198.5 \end{cases}$ 
  PSO ←  $e^{\left( A_{P_{\text{sor}_p}} + B_{P_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z) + C_{P_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z)^2 + D_{P_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z)^3 + E_{P_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z)^4 \right)} \cdot \text{kPa}$ 
  PSi ← GEN2(PSO · MEPs, νME.Ps, X)
PS

```

$$P_S := \begin{pmatrix} 35.6 \\ 45.4 \\ 67.7 \\ 105 \\ 163 \\ 243 \end{pmatrix} \quad ED := \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ 25 \\ 50 \\ 75 \\ 90 \end{pmatrix} \%$$

$$BSP := \text{bspline}(P_S, ED, P_S, 1)$$

$$F1(x) := \text{interp}(BSP, P_S, ED, x)$$

$$P_{f.dob}(x) := \begin{cases} F1(x) & \text{if } 0 \leq F1(x) < 1 \\ 0 & \text{if } F1(x) < 0 \\ 1 & \text{if } F1(x) \geq 1 \end{cases}$$



```

j := 1..nMC      Kj := j
f := 1..nd + 1
Δ :=  $\frac{\max(PPP) - \min(PPP)}{n_d} = 348.797 \text{ Pa}$ 
kdiertf := min(PPP) + Δ · (f)

```

```

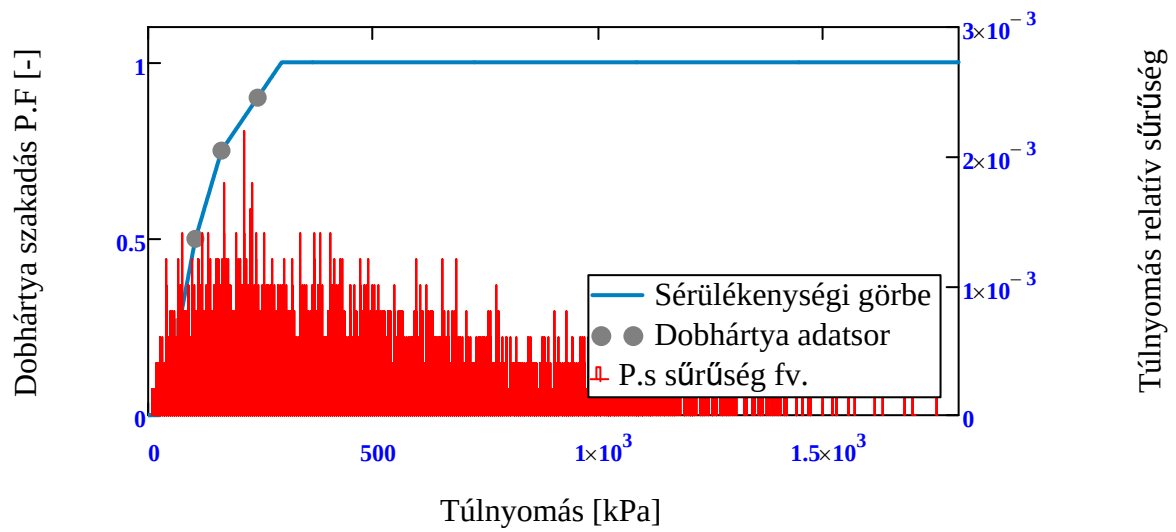
COUNT(X) :=  $\begin{cases} h \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1..n_{MC} \\ h \leftarrow \begin{cases} (h + 1) & \text{if } X \leq PPP_i < X + \Delta \\ h & \text{otherwise} \end{cases} \\ h \end{cases}$ 

```

$$RELSUR_f := \frac{\text{COUNT}(kdiert_f)}{n_{MC}} \quad \text{Ellenőrzés: } \sum_{i=1}^{n_d+1} RELSUR_i = 1 \quad P_{F.dob} := \sum_{i=1}^{n_d+1} \left(RELSUR_i \cdot P_{f.dob} \left(\frac{kdiert_i}{\text{kPa}} \right) \right)$$



A számítás eredménye



Dobhártyaszakadás valószínűsége
biztos robbanás esetén:

$$P_{F,dob} = 0.868$$

Dobhártyaszakadás valószínűsége:

$$P_{F,dob,T} := P_{F,dob} \cdot P_{VBIED,T} = 5.57\%$$

Megbízhatósági index:

$$P_{F,dob,T} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\beta_a} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

$$\beta_{dob,T} := \left(\text{Find}(\beta_a) \right) = 1.592$$

Szerkezet megbízhatóságának ellenőrzése



VBIED támadás valószínűsége:

$$P_{\text{VBIED.T}} := 44.62\%$$

A hatásgörbe meghatározása

A W mennyiség adatsora: DATA :=

$$\begin{pmatrix} 1.60 \\ 468.00 \\ 32.00 \\ 40.00 \\ 114.00 \\ 110.00 \\ 1076.00 \\ 500.00 \\ 510.00 \\ 750.00 \\ 820.00 \\ 600.00 \\ 750.00 \end{pmatrix}$$

Biztos robbanás esetén a $p(W \mid \text{VBIED})$ mennyiség sűrűségfüggvénye:

Várható érték: $\mu := \text{mean}(\text{DATA}) = 444$

Szórás: $\sigma := \text{stdev}(\text{DATA}) = 341$

Előforduló W értékek alsó és felső határa: $a := 0$ $b := 5000$ [kg]

A csonkolt normál eloszlás: $\text{trf}(x) := \frac{\text{dnorm}(x, \mu, \sigma)}{\text{pnorm}(b, \mu, \sigma) - \text{pnorm}(a, \mu, \sigma)}$

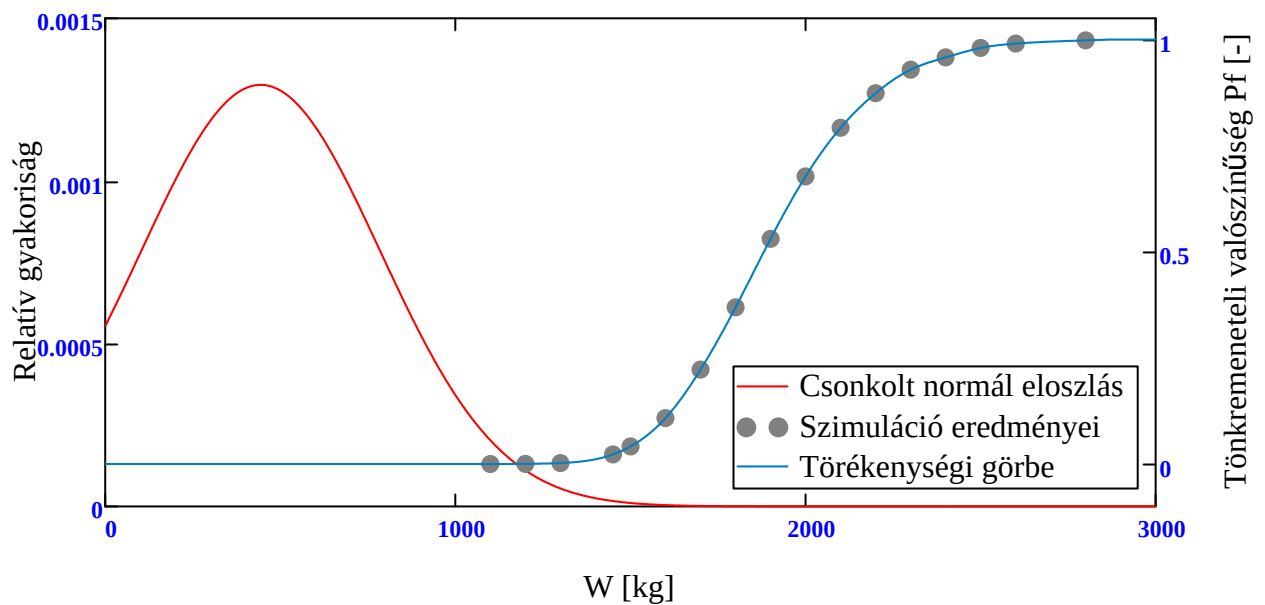
A törékenységi görbe előállítás

A törékenységi görbe valószínűségi módszerrel előállított pontjai:

$W :=$	$P_f :=$	·%
1100	0.00271	
1200	0.03092	
1300	0.23426	
1450	2.2555	
1500	4.1345	
1600	10.8317	
1700	22.234	
1800	36.9	
1900	53.055	
2000	67.763	
2100	79.2	
2200	87.346	
2300	92.893	
2400	95.79	
2500	98.01	
2600	99.04	
2800	99.8	

$$F1(x) := \text{interp}(\text{lspline}(W, P_f), W, P_f, x)$$

$$\text{FRAG}(x) := \begin{cases} \text{interp}(\text{lspline}(W, P_f), W, P_f, x) & \text{if } 0 \leq F1(x) < 1 \\ 0 & \text{if } F1(x) < 0 \\ 1 & \text{if } F1(x) \geq 1 \end{cases}$$



A T élettartam alatti tönkremeneteli valószínűség

Normál eloszlás esetén:

$$P_{f,T} := \int_0^b \text{FRAG}(x) \cdot \text{trf}(x) dx \cdot P_{\text{VBIED},T} = 8.695 \times 10^{-5}$$

A megbízhatósági index:

$$P_{f,T} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\beta_a} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$$

$$\beta := (\text{Find}(\beta_a)) = 3.754$$

Robbanási paraméterek parciális biztonsági tényezőjének kalibrálása



Analízis beállítások

Szimulációk száma:

$$n_{MC} := 10000$$

Sűrűségfüggvény felbontása:

$$n_d := 1000$$

Kívánt túllépési valószínűség:

$$P_{tul} := 1\%$$

Bemenő valószínűségi változók

VBIED robbanóanyag mennyisége:

$$W := 210 \text{ kg}$$

$$\nu_W := 0\%$$

$$C_{neq} := 0.82$$

$$W := W \cdot C_{neq} = 172.2 \text{ kg}$$

VBIED távolsága:

$$R_0 := 14 \text{ m}$$

$$\nu_{R0} := 0\%$$

$$R_x := 0 \text{ m}$$

$$\nu_{Rx} := 0\%$$

$$R := \sqrt{R_0^2 + R_x^2} = 14 \text{ m}$$

Beesési (visszaverődési) szög:

$$\alpha := \arctan\left(\frac{R_x}{R_0}\right) = 0^\circ$$

▼ Függvények definiálása

Robbanási paraméterek

$$Z_{alap} := \frac{R}{W^{\frac{1}{3}}} \cdot \frac{\text{kg}^{\frac{1}{3}}}{\text{m}} = 2.516$$

$$A_p := \begin{pmatrix} 7.2106 \\ 7.5938 \\ 6.0536 \end{pmatrix} \quad B_p := \begin{pmatrix} -2.1069 \\ -3.0523 \\ -1.4066 \end{pmatrix} \quad C_p := \begin{pmatrix} -0.3229 \\ 0.40977 \\ 0 \end{pmatrix} \quad D_p := \begin{pmatrix} 0.1117 \\ 0.0261 \\ 0 \end{pmatrix} \quad E_p := \begin{pmatrix} 0.0685 \\ -0.01267 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\text{sor}_p := \begin{cases} 1 & \text{if } 0.2 \leq Z_{alap} < 2.9 \\ 2 & \text{if } 2.9 \leq Z_{alap} < 23.8 \\ 3 & \text{if } 23.8 \leq Z_{alap} < 198.5 \end{cases}$$

$$P_{SO.alap} := e^{\left(A_{p_{\text{sor}_p}} + B_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z_{alap}) + C_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z_{alap})^2 + D_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z_{alap})^3 + E_{p_{\text{sor}_p}} \cdot \ln(Z_{alap})^4 \right)} \cdot \text{kPa} = 169 \cdot \text{kPa}$$

Visszaverődési tényezők számítása

$\text{raw} :=$  02_193.xlsx
 $P_{\text{row}} :=$  02_193.xlsx
 $\alpha_{\text{row}} :=$  02_193.xlsx

$$C_r(P_{\text{SO}}, \alpha_p) := \begin{cases} \text{for } i \in 1 \dots \text{length}(P_{\text{row}}^T) \\ A_i \leftarrow \text{linterp}(\alpha_{\text{row}}^{\circ}, \text{raw}^{\langle i \rangle}, \alpha_p) \\ \text{linterp}(\text{reverse}(P_{\text{row}}^T) \cdot \text{psi}, \text{reverse}(A), P_{\text{SO}}) \end{cases} \quad C_r(1500 \text{ psi}, 25 \text{ deg}) = 8.025$$

$$P_{\text{R.alap}} := C_r(P_{\text{SO.alap}}, \alpha) \cdot P_{\text{SO.alap}} = 532.905 \cdot \text{kPa}$$

$I_{\text{r raw}} :=$  02_194.xlsx
 $\alpha_{\text{row}} :=$  02_194.xlsx
 $I_{\text{r row}} :=$  02_194.xlsx

$$I_{\text{r}\alpha}(P_{\text{SO}}, \alpha_p, W) := \begin{cases} \text{for } i \in 1 \dots \text{length}(I_{\text{r row}}^T) \\ B_i \leftarrow \text{linterp}(\alpha_{\text{row}}^{\circ}, I_{\text{r raw}}^{\langle i \rangle}, \alpha_p) \\ \text{linterp}\left(\text{reverse}(I_{\text{r row}}^T) \cdot \text{psi}, \text{reverse}(B) \cdot \frac{\text{psi} \cdot \text{ms}}{\text{lb}^{\frac{1}{3}}}, P_{\text{SO}}\right) \cdot W^{\frac{1}{3}} \end{cases}$$

$$I_{\text{R.alap}} := I_{\text{r}\alpha}(P_{\text{SO.alap}}, \alpha, W) = 1194 \cdot \text{kPa} \cdot \text{ms}$$

Véletlenszám generáló függvények

Normál eloszlás:

$$\text{GEN}(\text{mean}, \text{COV}) := \text{Normal}(1) \cdot \text{mean} \cdot \text{COV} + \text{mean}$$

Normál eloszlás felhasználó által
megadott (korrelált) eloszlás szerint:

$$\text{GEN2}(\text{mean}, \text{COV}, \text{rand}) := \text{rand} \cdot \text{mean} \cdot \text{COV} + \text{mean}$$

Függvények definiálása

Kingery-Bulmash relatív
modellszórása (egyenileg
megadva, vagy Netherton):

$$\text{ME}_{\text{PR}} := 1$$

$$\nu_{\text{ME.PR}} := 0.2$$

$$\text{ME}_{\text{IR}} := 1$$

$$\nu_{\text{ME.IR}} := 0.22$$

☐ Netherton&Stewart

Korrelációs mátrix:

$$C := \begin{pmatrix} 1 & 0.92 \\ 0.92 & 1 \end{pmatrix}$$

$$C_c := \text{cholesky}(C) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0.92 & 0.392 \end{pmatrix}$$

Túlnyomás parciális biztonsági tényezője

$$ME_{Pr} := \begin{cases} 1.03 & \text{if } KB = 1 \\ ME_{PR} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\nu_{ME.Pr} := \begin{cases} 0.069 & \text{if } KB = 1 \\ \nu_{ME.PR} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$ME_{Ir} := \begin{cases} 0.99 & \text{if } KB = 1 \\ ME_{IR} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$PPP := \text{for } i \in 1 \dots n_{MC}$$

$$X \leftarrow \text{Normal}(2)$$

$$X_c \leftarrow C_c \cdot X$$

$$r0 \leftarrow \text{GEN}(R_0, \nu_{R0})$$

$$rx \leftarrow \text{GEN}(R_x, \nu_{Rx})$$

$$W_{use} \leftarrow \text{GEN}(W, \nu_W)$$

$$RR \leftarrow \sqrt{r0^2 + rx^2}$$

$$\alpha \leftarrow \text{atan}\left(\frac{rx}{r0}\right)$$

$$Z \leftarrow \frac{RR}{\frac{1}{3} \frac{\text{kg}}{\text{m}}} \cdot \frac{1}{W_{use}}$$

$$sorp \leftarrow \begin{cases} 1 & \text{if } 0.2 \leq Z < 2.9 \\ 2 & \text{if } 2.9 \leq Z < 23.8 \\ 3 & \text{if } 23.8 \leq Z < 198.5 \end{cases}$$

$$P_{SO} \leftarrow e^{\left(A_{p_{sorp}} + B_{p_{sorp}} \cdot \ln(Z) + C_{p_{sorp}} \cdot \ln(Z)^2 + D_{p_{sorp}} \cdot \ln(Z)^3 + E_{p_{sorp}} \cdot \ln(Z)^4 \right)} \cdot \text{kPa}$$

$$P_{R.mean} \leftarrow C_r(P_{SO}, \alpha) \cdot P_{SO}$$

$$I_{R.mean} \leftarrow I_{r\alpha}(P_{SO}, \alpha, W_{use})$$

$$\nu_{ME.Ir} \leftarrow \begin{cases} (0.1783 - 0.0237 \cdot Z) & \text{if } KB = 1 \\ \nu_{ME.IR} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$P_{R_i} \leftarrow \text{GEN2}(P_{R.mean} \cdot ME_{Pr}, \nu_{ME.Pr}, X_{c1})$$

$$I_{R_i} \leftarrow \text{GEN2}(I_{R.mean} \cdot ME_{Ir}, \nu_{ME.Ir}, X_{c2})$$

$$\left(\begin{array}{c} \frac{P_R}{\text{kPa}} \\ \frac{I_R}{\text{kPa} \cdot \text{ms}} \end{array} \right)$$

$$P_R := PPP_1 \cdot \text{kPa}$$

$$I_R := PPP_2 \cdot \text{kPa} \cdot \text{ms}$$

$j := 1 \dots n_{MC} \quad K_j := j$

$f := 1 \dots n_d + 1$

$$\Delta := \frac{\max(P_R) - \min(P_R)}{n_d} = 772.073 \text{ Pa}$$

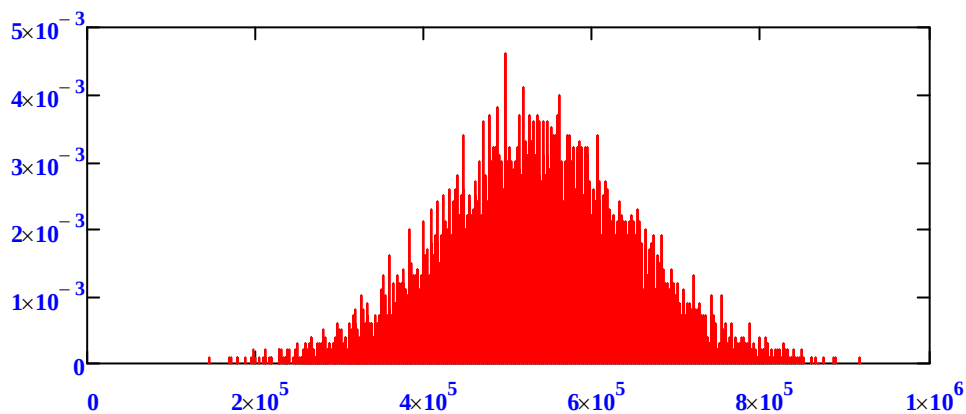
$kiert_f := \min(P_R) + \Delta \cdot (f - 1)$

COUNT(X) := $\left| \begin{array}{l} h \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1 \dots n_{MC} \\ \quad h \leftarrow \left| \begin{array}{l} (h + 1) \text{ if } X \leq P_{R_i} < X + \Delta \\ h \text{ otherwise} \end{array} \right. \\ \quad h \end{array} \right|$

$$RELSUR_f := \frac{\text{COUNT}(kiert_f)}{n_{MC}}$$

Ellenőrzés: $\sum_{i=1}^{n_d+1} RELSUR_i = 1$

XX := $\left| \begin{array}{l} W \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 1 \dots n_d \\ \quad W \leftarrow (W + RELSUR)_i \\ \quad \text{return } (i) \text{ if } W \geq 1 - P_{tul} \end{array} \right|$

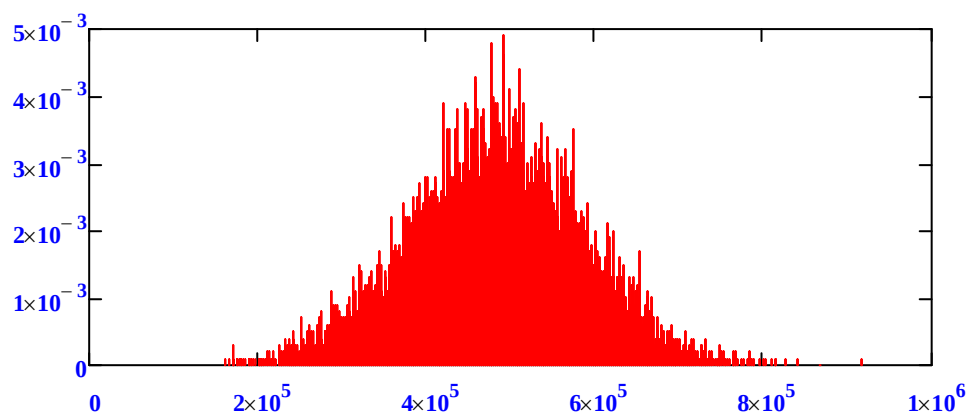


Kívánt túllépési valószínűséghez tartozó érték:

$$P_{R,x} := XX \cdot \Delta + \min(P_R) = 782 \cdot \text{kPa}$$

Az értékhez tartozó parciális biztonsági tényező:

$$\alpha_{Pr} := \frac{P_{R,x}}{P_{R.alap}} = 1.467$$

Impulzus parciális biztonsági tényezője

Kívánt túllépési valószínűséghez tartozó érték:

$$I_{R,x} := XX \cdot \Delta + \min(I_R) = 1793 \cdot \text{kPa} \cdot \text{ms}$$

Az értékhez tartozó parciális biztonsági tényező:

$$\alpha_{Pr} := \frac{I_{R,x}}{I_{R,alap}} = 1.502$$

$$\begin{aligned}
 \beta := & \begin{aligned} & W \leftarrow \mu_W \\ & R \leftarrow \mu_R \\ & M \leftarrow \mu_M \\ & Z_X \leftarrow \mu_{Z.X} \\ & F_Y \leftarrow 2\text{MPa} \\ & F_Y \leftarrow \text{root}(g(W, R, M, Z_X, F_Y), F_Y) \\ & Z_W \leftarrow \frac{W - \mu_W}{\sigma_W} \\ & Z_R \leftarrow \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \\ & Z_M \leftarrow \frac{M - \mu_M}{\sigma_M} \\ & Z_{Z.X} \leftarrow \frac{Z_X - \mu_{Z.X}}{\sigma_{Z.X}} \\ & Z_{F.Y} \leftarrow \frac{F_Y - \mu_{F.Y}}{\sigma_{F.Y}} \\ & Z \leftarrow \begin{pmatrix} Z_W \\ Z_R \\ Z_M \\ Z_{Z.X} \\ Z_{F.Y} \end{pmatrix} \\ & G_{1\text{der}}(W, R, M, Z_X, F_Y) \leftarrow \frac{d}{dW} g(W, R, M, Z_X, F_Y) \\ & G_{2\text{der}}(W, R, M, Z_X, F_Y) \leftarrow \frac{d}{dR} g(W, R, M, Z_X, F_Y) \\ & G_{3\text{der}}(W, R, M, Z_X, F_Y) \leftarrow \frac{d}{dM} g(W, R, M, Z_X, F_Y) \\ & G_{4\text{der}}(W, R, M, Z_X, F_Y) \leftarrow \frac{d}{dZ_X} g(W, R, M, Z_X, F_Y) \\ & G_{5\text{der}}(W, R, M, Z_X, F_Y) \leftarrow \frac{d}{dF_Y} g(W, R, M, Z_X, F_Y) \\ & \left(G_{1\text{der}}(W, R, M, Z_X, F_Y) \cdot \sigma_W \right) \end{aligned}
 \end{aligned}$$

A megbízhatósági index:

$$\boxed{\beta = 1.82}$$

$$\begin{aligned}
G &\leftarrow \begin{pmatrix} G_{2\text{der}}(W, R, M, Z_x, F_y) \cdot -\sigma_R \\ G_{3\text{der}}(W, R, M, Z_x, F_y) \cdot -\sigma_M \\ G_{4\text{der}}(W, R, M, Z_x, F_y) \cdot -\sigma_{Z.x} \\ G_{5\text{der}}(W, R, M, Z_x, F_y) \cdot -\sigma_{F.y} \end{pmatrix} \\
\beta &\leftarrow \frac{G^T \cdot Z}{\sqrt{G^T \cdot G}} \\
\alpha &\leftarrow \frac{G^T \cdot T}{\sqrt{G^T \cdot G}} \\
\text{for } i \in 4 \\
&\quad Z_W \leftarrow \alpha_1 \cdot \beta \\
&\quad Z_R \leftarrow \alpha_2 \cdot \beta \\
&\quad Z_M \leftarrow \alpha_3 \cdot \beta \\
&\quad Z_{Z.x} \leftarrow \alpha_4 \cdot \beta \\
&\quad W \leftarrow Z_W \cdot \sigma_W + \mu_W \\
&\quad R \leftarrow Z_R \cdot \sigma_R + \mu_R \\
&\quad M \leftarrow Z_M \cdot \sigma_M + \mu_M \\
&\quad Z_x \leftarrow Z_{Z.x} \cdot \sigma_{Z.x} + \mu_{Z.x} \\
&\quad F_y \leftarrow 2\text{MPa} \\
&\quad F_y \leftarrow \text{root}(g(W, R, M, Z_x, F_y), F_y) \\
&\quad Z_{F.y} \leftarrow \frac{F_y - \mu_{F.y}}{\sigma_{F.y}} \\
&\quad Z \leftarrow \begin{pmatrix} Z_W \\ Z_R \\ Z_M \\ Z_{Z.x} \\ Z_{F.y} \end{pmatrix} \\
&\quad G_{1\text{der}}(W, R, M, Z_x, F_y) \leftarrow \frac{d}{dW} g(W, R, M, Z_x, F_y) \\
&\quad G_{2\text{der}}(W, R, M, Z_x, F_y) \leftarrow \frac{d}{dR} g(W, R, M, Z_x, F_y)
\end{aligned}$$

$$G_{3\text{der}}(W, R, M, Z_x, F_y) \leftarrow \frac{d}{dM} g(W, R, M, Z_x, F_y)$$

$$G_{4\text{der}}(W, R, M, Z_x, F_y) \leftarrow \frac{d}{dZ_x} g(W, R, M, Z_x, F_y)$$

$$G_{5\text{der}}(W, R, M, Z_x, F_y) \leftarrow \frac{d}{dF_y} g(W, R, M, Z_x, F_y)$$

$$G \leftarrow \begin{pmatrix} G_{1\text{der}}(W, R, M, Z_x, F_y) \cdot -\sigma_W \\ G_{2\text{der}}(W, R, M, Z_x, F_y) \cdot -\sigma_R \\ G_{3\text{der}}(W, R, M, Z_x, F_y) \cdot -\sigma_M \\ G_{4\text{der}}(W, R, M, Z_x, F_y) \cdot -\sigma_{Z.x} \\ G_{5\text{der}}(W, R, M, Z_x, F_y) \cdot -\sigma_{F.y} \end{pmatrix}$$

$$\beta \leftarrow \frac{G^T \cdot Z}{\sqrt{G^T \cdot G}}$$

$$\alpha \leftarrow \frac{G^T}{\sqrt{G^T \cdot G}}^T$$

β