

## ÁRAMLÁSTANI MEGKÖZELÍTÉS ALKALMAZÁSA A ROBBANTÁSOK ELLENI VÉDEKEZÉSBEN

*ÖSSZEGZÉS: A robbantások elleni védekezés az utóbbi években mind inkább jelentősebb témává válik a biztonságtechnikában, de ezzel egyidőben rohamosan fejlődik a mérnöki tudomány is, amely a modern számítástechnikai kapacitással komoly áttörést ért el. A robbanási paraméterek kísérleti eredményekre támaszkodó módszere mellett alkalmazhatjuk a numerikus áramlástan lökéshullámok terjedésének leírására optimalizált megoldó algoritmusait is. Bemutatjuk ennek az igen nagy számítási kapacitást igénylő módszernek az előnyeit: az összetett geometria esetén való megoldhatóságot, a szerkezeti modellekkel való kapcsolási lehetőséget. Példákon mutatjuk be egy robbanás komplex városi környezetben kifejtett hatását, védőfalak szerepét az építmények védelmében, nem szokványos geometriájú épület robbanásterhét.*

*Kulcsszavak: Áramlástan; Lökéshullám; CFD; Védekezés; Robbanás*

### AZ EMPIRIKUS MEGKÖZELÍTÉS

#### Arányosítási törvény

A XX. század elején a robbanások terjedésével, és a kísérletek korlátozott lehetőségei miatt megjelent az igény a különböző méretű robbanások közötti átjárás megteremtésére, hogy ezáltal következtetni lehessen olyan robbanások paramétereire is, amelyekre konkrétan nem végeztek kísérletet.

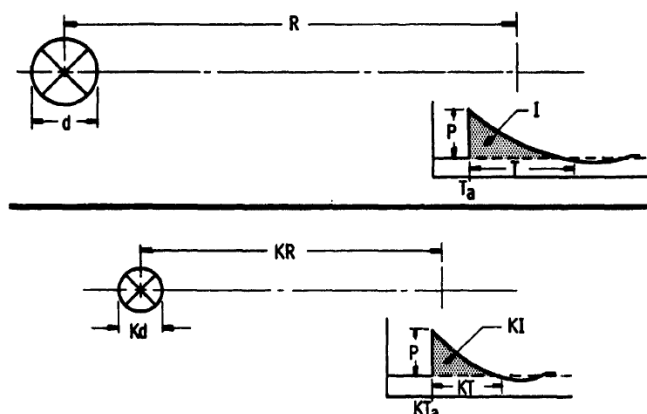
A kérdés a következő volt: hogyan lehetséges arányosítási szabályt felállítani a különböző robbantási szituációk között? Ha R1 távolságban felrobbantott D1 töltet jellemzői és az R2 távolságban robbantott D2 töltet jellemzői ismeretesek, hogyan következtethetünk az R3, D3 paraméterű robbanási jellemzőkre? A megoldás a robbanási paramétereket befolyásoló két változónak (a robbanóanyag mennyiség és a mérési ponttól való távolság) az egymástól függő viszonyában rejlik. Olyan távolság-tömeg arányt kell felállítani, aminél valamely paraméter kvázi konstansnak vehető. Hopkinson 1915-ben tett hipotézise szerint a P túlnyomási csúcserték állandó értékűsége a

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

arányosított távolság alkalmazásával teljesül. Az 1. 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 köbgyöke arányszámának válik függő változójává, a többi paraméterhez az arányosítás során úgy juthatunk, ha az arányosítástól „megtisztítjuk”, tehát a tömeg köbgyökével meg kell szorozni. Elméletének fontos következménye, hogy a kétváltozós robbanási paramétereket immár egy egyváltozós függvényként lehet meghatározni.

<sup>1</sup> Okleveles építőmérnök, NKE Katonai Műszaki Doktori Iskola doktorandusz, [zsolt.roman@ymail.com](mailto:zsolt.roman@ymail.com)

<sup>2</sup> Okleveles építőmérnök, NKE Katonai Műszaki Doktori Iskola doktorandusz [nagy.robi.86@gmail.com](mailto:nagy.robi.86@gmail.com)



1. ábra - Hopkinson arányosítási hipotézise [1]

## Kísérleti eredmények

A Hopkinson arányosítást követve különböző arányosított távolságú töltetekkel végeztek robbantásokat, és a mért paramétereket ábrázolták, majd a pontokra görbét illesztettek. Ezért is van, hogy ha a túlnyomási csúcserték meghatározására alkalmas képletet keresünk, jó eséllyel valamilyen polinomiális interpolált függvényt találunk.

Ilyen például amerikai oldalról a Mills [2] által nyújtott képlet:

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

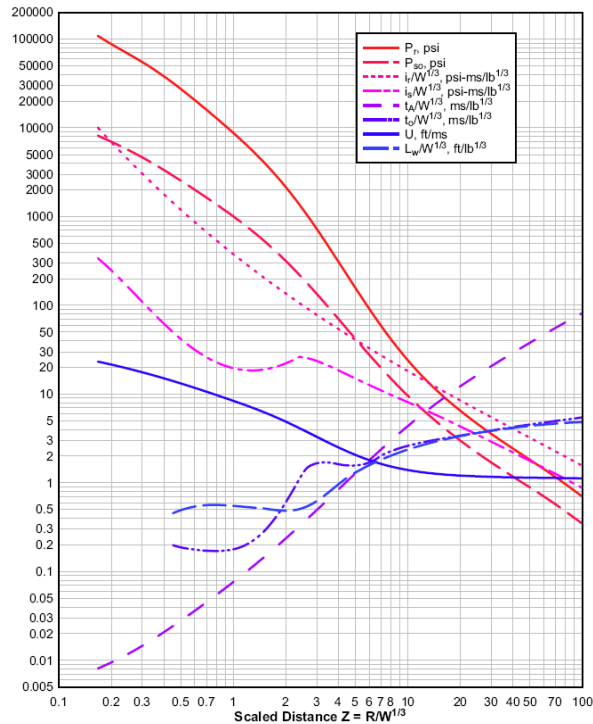
vagy az orosz irodalomban fellelhető képlet [3] (itt a  $Z$  nem külön változó, hanem  $C$  a tömeg,  $R$  a távolság):

$$\Delta_{p\neq} = 0.084 \frac{\sqrt[3]{C}}{R} + 0.27 \frac{\sqrt[3]{C^2}}{R^2} + 0.7 \frac{C}{R^3} \quad (3)$$

Belátható, hogy a két fenti ajánlás csak az interpolációs együtthatókban különbözik egymástól. A sok helyen, különböző körülmények közt elvégzett robbantások eredményeit többen is megkísérelték összesíteni, a TM5-1300-ban [4] közreadott általános empirikus grafikon a 2. ábrán látható.

## Empirikus teherfelvétel

A kísérleti robbantásokból megkapott paraméterekből a szerkezetre ható terhek megállapítását a TM5-1300 részletesen bemutatja, többek közt Glasstone és Dolan [5] atomfegyverek hatásairól szóló könyve alapján. Kezelhetők a lökeshullám egyszeri visszaverődései, számíthatók a frontfal, oldalfal és hátsó fal terhei. Ezek az eljárások egyszerű térben, egyszerű geometriák esetén használhatók. A nyílásokat tartalmazó homlokzat problémája is megoldott, de a lokalizált hatások nem tudnak érvényesülni. Az eljárás legnagyobb hátránya, hogy feltételezi a sík hullámok elvének meglétét, holott bizonyos szerkezeti magasság esetén ez a feltételezés nem igaz.



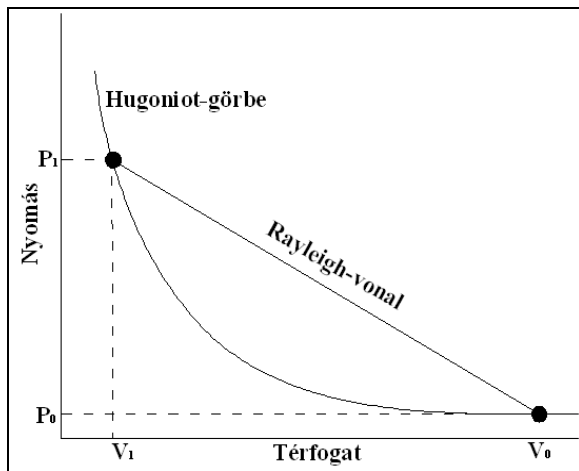
2. ábra - Kísérleti robbanási paraméterek földközeli robbanás esetén [4]

## NUMERIKUS ÁRAMLÁSTAN

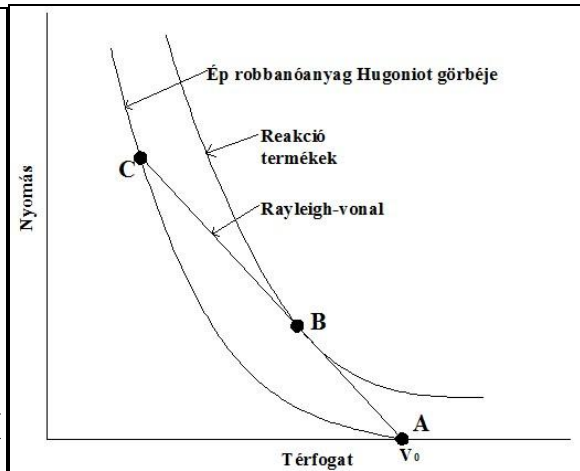
### A robbanás gázdinamikai megközelítése

Az áramlástani megközelítés sokkal pontosabb és sokkal nagyobb vizsgálati távlatokat nyit az empirikus módszerhez képest. A módszer kalibrálásához szintén szükségesek kísérletekből nyert adatok, de ez a robbanóanyag állapotegyenletének a szintjén történik meg, így sok más bizonytalansági tényező kizárható: a levegő hőmérséklete, a légköri nyomás, visszaverődések, töltet alakja stb. Ezen tényezők az áramlástani módszerben mind figyelembe vehetők, megadhatók, és a számításban benne vannak paraméterként.

A módszer alkalmazhatóságához több tudományos áttörés is szükséges volt. Először Rankine és Hugoniot írta fel 1887-ben eredményesen a lökeshullámban lejátszódó folyamatokat. Ők egy végtelen vékony közegnek fogták fel a lökeshullámot, amelyben szinguláris állapotváltozás jön létre. A lökeshullámban is érvényes a tömeg-, lendület-, és energiamegmaradás törvénye. Az energiamegmaradás törvényének megfelelően a 3. ábrán látható görbe a Hugoniot görbe, ez mindazon p-V pontoknak az összessége, amely p-V állapotokban a vizsgált közeg létezhet. Ennek a görbének két pontja közti állapotváltozás normál esetben a görbe mentén jön létre, a szinguláris állapotváltozást egy közvetlen ugrással, a Rayleigh egyenes mentén írhatjuk le. Később - 1905-ben - Chapman és Jouget terjesztette ezt az elméletet ki a robbanóanyagokra is. A robbanás során keletkező reakciótermékek nem viselkednek ideális gázként, tehát a p-V síkon más görbével írhatók le. A detonáció folyamatának egy szemléletes módja látható a 4. ábrán. A lökeshullám hatására a robbanóanyag itt is az A pontból a C pontra szeretne szingulárisan átugrani, ám a kémiai reakció miatt „nem ér el oda”, egyensúlyi állapotot csak a reakciótermékek Hugoniot görbéjén talál, „félúton” a C pont felé. Chapman és Jouget korszakalkotó hipotézise az volt, hogy a B pontban a Rayleigh egyenes épp a reakciótermékek Hugoniot görbéjének érintőjét adja. Ez a feltétel matematikailag határozottá tette a jelenség leírását.



3. ábra - Tetszőleges közegben történő szinguláris állapotváltozás

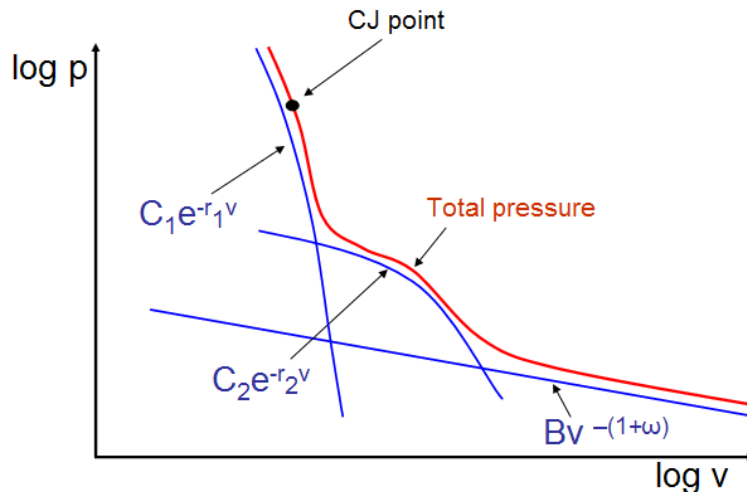


4. ábra - Detonáció folyamata a p-V síkon

A B pontot Chapman és Jouget után CJ pontnak is szokás nevezni. A detonáció jelenségének leírása után a kutatások a reakciótermékek Hugoniot görbéjének pontos meghatározására összpontosítottak. Ez szükséges ahhoz, hogy pontosan modellezhető legyen, mi történik a gázokkal a CJ pontra kerülésük után. A gázok kiterjedése a rendkívül magas hőmérséklet miatt adiabatikus expanzióként megy végbe. Az 5. ábrán láthatók azok az adiabaták, melyek leírják ezt a folyamatot. Ezeket számszerűen megfogalmazva 1968-óta a Jones-Wilkins-Lee féle TNT állapotegyenletként ismeretes:

$$P = C_1 \left(1 - \frac{\omega}{r_1 V}\right) e^{-r_1 V} + C_2 \left(1 - \frac{\omega}{r_2 V}\right) e^{-r_2 V} + \frac{\omega \psi}{V} \quad (4)$$

ahol  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ , és  $\omega$  kísérletekből megállapított konstansok (1. táblázat).



5. ábra - TNT reakciótermékeinek adiabatikus expanziója [6]

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

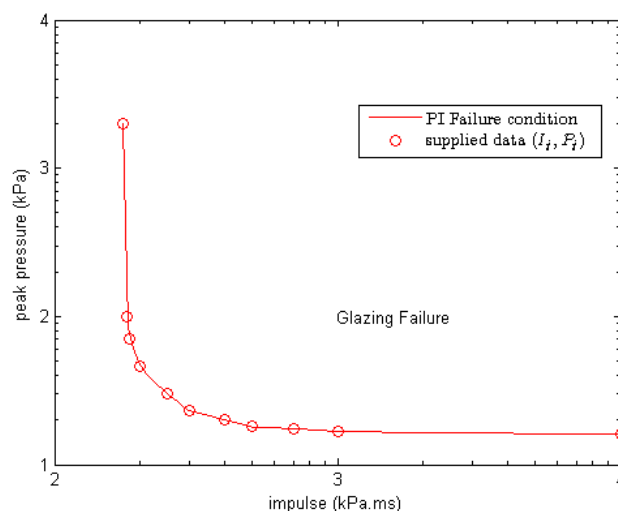
1. táblázat - A TNT JWL állapotegyenletének kísérleti konstansai [7]

## Áramlástanai szoftverek

Az egyik legkorábban végzett numerikus vizsgálat a lökéshullámok tekintetében Brode nevéhez fűződik, aki 1955-ben a Los Alamosi kutatóközpontban lényegében a ma is az áramlás-tanban alkalmazott összefüggéseket oldotta korabeli számítéstechnikai lehetőségek mellett [8]. Az előző pontokban foglaltakat a FEM és FVM technológiákkal párosítva több szoftveres környezetet is kifejlesztettek a lökéshullámok modellezésére. Az ANSYS által felvásárolt Century Dynamics AutoDYN néven ismert explicit megoldója a legszélesebb körben használt szoftver. További programok még az ABAQUS, LS-DYNA, NASTRAN. Ez a három szoftver teljes körű megoldásokat kínál, egy-, és kétirányú kapcsolással a szilárd és gáz közegek közt. Az egyszerűbb programok csak áramlástanai résszel rendelkeznek, pl. a Sharc, illetve a ProSAir.

Az itt bemutatásra kerülő szimulációkat a Cranfieldi Egyetemen fejlesztett ProSAir szoftverrel végeztük el. A szoftverrel végtelen merev testként modellezzük az épületeket, akadályokat, és ezek felületén - vagy bárhol a térben - mérési pontokat definiálunk, ahol a lökéshullám állapotjelzőinek időbeni változása lekérdezhető. A szoftver csak 41 bájt memóriát címez meg térfogatelemenként, és külön képes kezelni a robbanás során az 1 dimenziós gömbkoordinátás, 2 dimenziós hengerkoordinátás, és 3 dimenziós descartes koordinátás megoldási fázisokat, így teremtve meg a lehetőséget a számítási idő csökkentésére (a hálósűrítés nem támogatott). A nagy rendszerek ezzel szemben alap esetben csak 1, 2, vagy 3 dimenzióban dolgoznak, azonban a felhasználó által generált és tetszőlegesen sűrített hálózaton. Az időlépcső csak egy paramétertől függ. Hátránya a programnak, hogy a levegőt csak állandó  $\gamma$  értékű, ideális gázként kezeli, csak gömb alakú tölteteket tud számítani, és érzékeny a számítási tartomány peremfeltételeire. A megfelelő oldaltávolságok, geometriai arányok betartásának hiányában a kapott adatok pontatlanok lehetnek, vagy elveszhet a szimmetria.

Lehetőség van a végtelen merev felületeken kívül ablakok modellezésére is, amelyek adott terhelésnél tönkremennek, és onnantól a lökéshullám át tud haladni rajta. Ez nagyban elősegíti a komplex terekben történő áramlások követését, és megkönnyíti az ablakok betörésének vizsgálatát is, hiszen nem kell utólag ellenőrizni az eredményeket, hogy azok meghaladják-e az ablak teherbírását. Az ablakelemek tönkremenetelének egyik lehetséges vizsgálata a PI diagram, ahol a nyomás-impulzus síkon egy hiperbola választja el a tönkremenő és a sértetlen zónát.



6. ábra - Az ablakelemek tönkremeneteli feltétele

A program a klasszikus Jones-Wilkins-Lee féle TNT állapotegyenlettel dolgozik (1. táblázat). Az Air3D kombinálja az Advection Upstream Splitting Method (AUSMDV)-ot a MUSCL-Hancock féle időintegrálással, egy másodrendű számítást eredményezve (a nagy szoftvereknél 4-5-öd rendű numerikus megoldásokat is alkalmaznak pl. Runge-Kutta módszerek). A megoldást az Euler egyenletek megoldásával kaphatjuk meg, ezek 3D-s esetben a következők (alsó indexben a parciális deriváltak) [11]:

$$U_t + F(U)_x + G(U)_y + H(U)_z = 0 \quad (5)$$

Ahol

$$U = \left\{ \begin{array}{c} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho \left( e + \frac{v^2}{2} \right) \end{array} \right\} \quad \text{konzervatív mennyiségek}$$

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

fluxusok vektorai

Ezekbe az egyenletekbe a fluxusok vektorának ötödik eleménél kell implementálni a JWL állapotegyenletet. A számítás során kapott eredmények a következők:

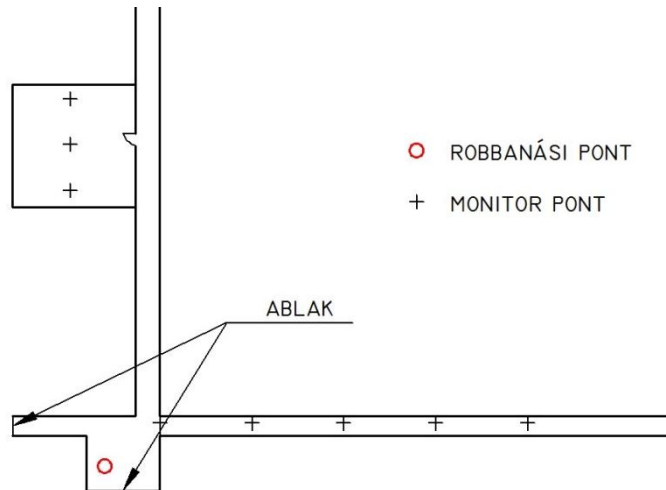
- hullámfront x,y,z irányú sebessége
- túlnyomás
- hőmérséklet
- sűrűség
- energia

Ebből gyakorlati jelentősége a túlnyomásnak és a sebességnek van. Előbbi a terhek felvételéhez és megannyi más vizsgálat kiindulási adataként szükséges, utóbbi a repeszhatás vizsgálatához kell.

## ESETTANULMÁNYOK

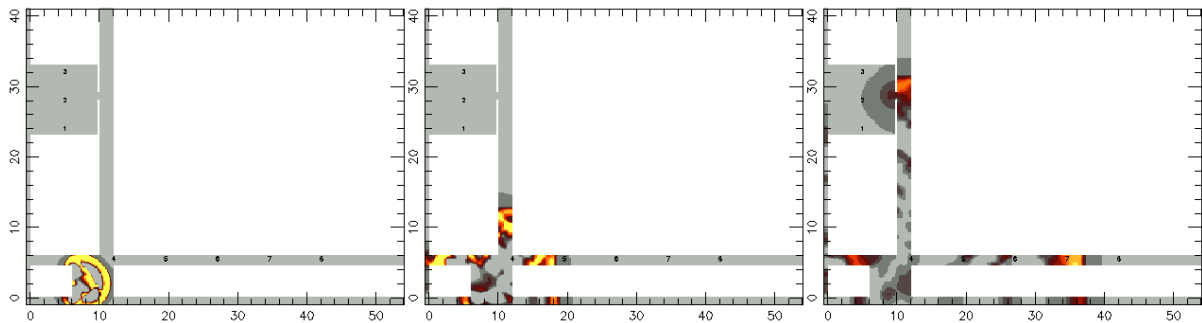
### Irodaház vizsgálata belső robbanásra

Vizsgáljuk meg egy tetszőleges irodaház portáján elhelyezett aktatáskába rejtett pokolgép hatását a belső térre. Az egyszerűsített alaprajz a 7. ábrán látható, a belmagasság 2.7 m. A vizsgált robbanóanyag mennyiség 2.4 kg TNT. Négy monitorozási pontot veszünk fel, ahol a sebesség és a nyomás kerül lekérdezésre. A robbanási ponthoz közeli falakban két ablak is tönkremenő felületként lett betéve, tehát adott nyomás-impulzus értékpárnál tönkremegy, és onnantól már áthaladhat rajta a lökéshullám.

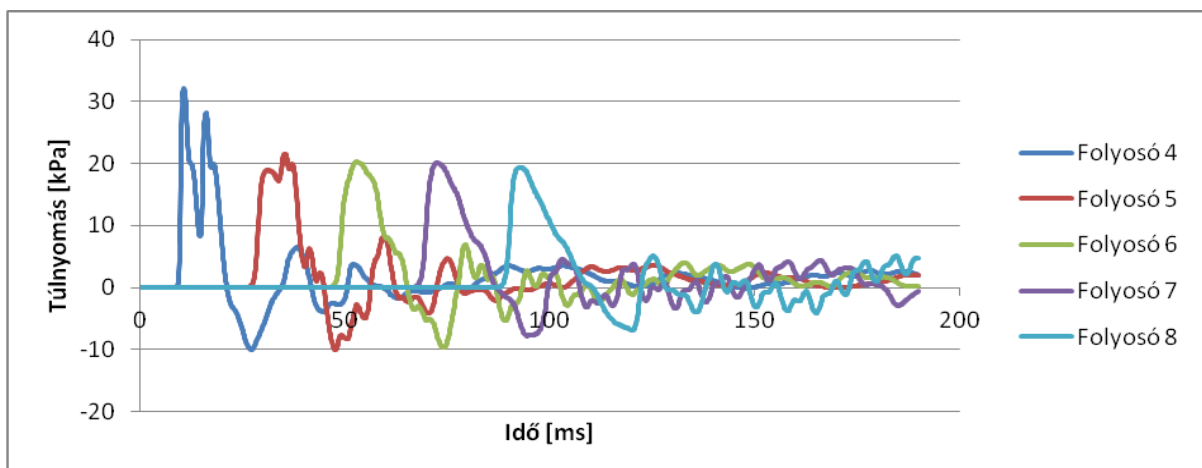


7. ábra - Irodaház alaprajzi elrendezése

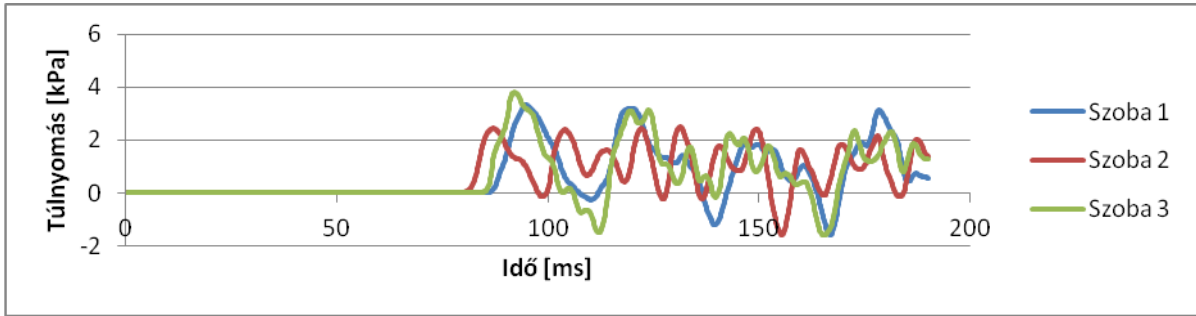
A 8. ábra 3 különböző fázisban mutatja a lökéshullámot. Megállapítható, hogy a portánál lévő ablak azonnal betörik. A 9. ábrán a folyosó pontjainak túlnyomásai vannak ábrázolva. Látható, hogy a túlnyomás a zárt térű terjedés miatt számottevően nem csökken, holott az empirikus számítás az 1. pontnál még túlbecsüli az értéket, a többinél pedig folyamatosan csökkenne a túlnyomás értéke. Megállapítható tehát, hogy a folyosón történő terjedés esetén a CFD számítás alkalmas a modellezésre, az empirikus pedig nem. A szobában lévő túlnyomási időtörténeten (10. ábra) látható a zárt térben való sok visszaverődés hatása. Mind a folyosón, mind a szobában mérhető túlnyomások elmaradnak az emberre veszélyes értéktől. Ha a sebességet nézzük (11. ábra) és feltételezzük, hogy a repeszek ezzel a sebességgel repülnek, azt kapjuk, hogy a folyosón a 20 g tömegű repeszek okoznak súlyos sérüléseket, míg a szobában nem számíthatunk repeszhatásra.



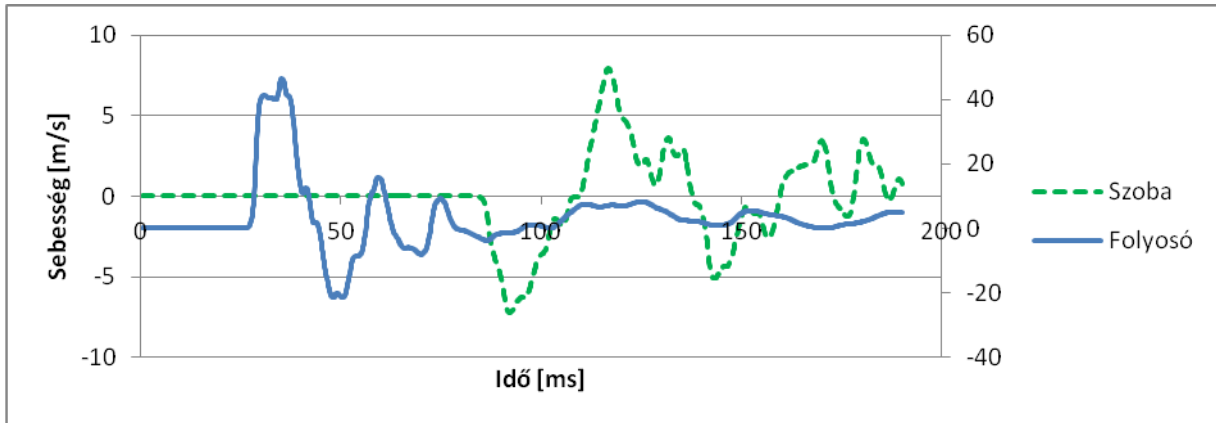
8. ábra - Lökéshullám terjedése a folyosókon



9. ábra - Folyosón lévő pontok túlnyomási értékei



10. ábra - Szobában lévő pontok túlnyomási értékei



11. ábra - Sebességek a szobában és a folyosón

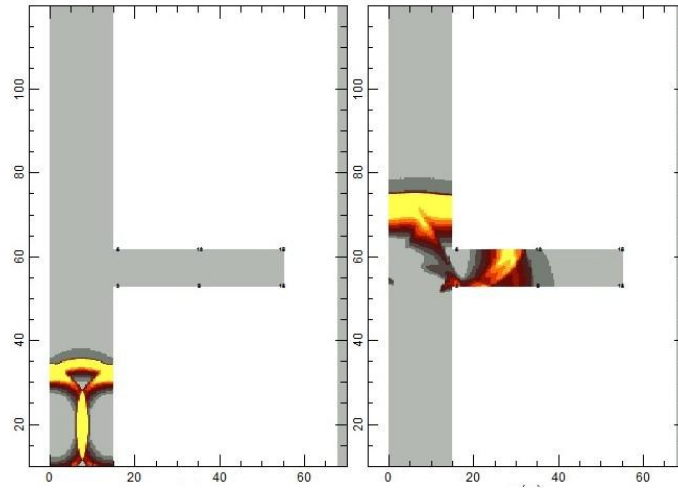
## Beugró homlokzat melletti robbanás modellezése

Vizsgáljuk meg a 12. ábrán látható utcán történő robbanás (250 kg TNT) hatását a sorház beugráshoz ér, behatol a belső, zárt előkertbe (13. ábra). A 14. ábrán a feltüntetett nyomások a belső udvarban egyre mélyebben elhelyezett monitorozási pontok. Megállapítható, hogy a legnagyobb nyomás a belső udvar végében, a falnál van, ahol a lökeshullám visszaverődik. Az utcához közelebb lévők nagyobb biztonságban vannak. Természetesen az emberélettvédelmi, illetve ablakokra vonatkozó vizsgálatokat itt is el lehetne végezni.

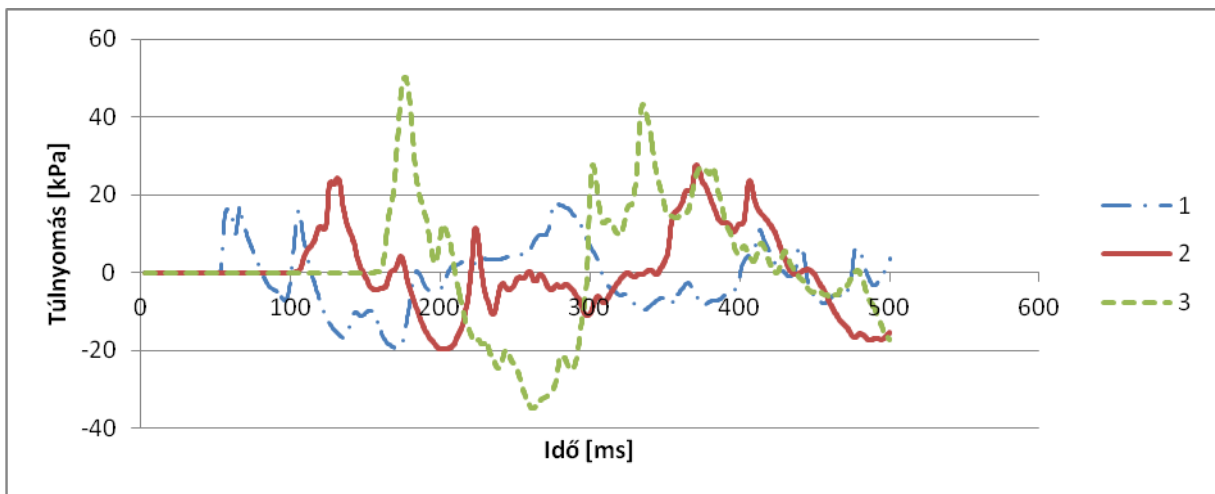


12. ábra - Beugró homlokzati kialakítás a Budafoki úton





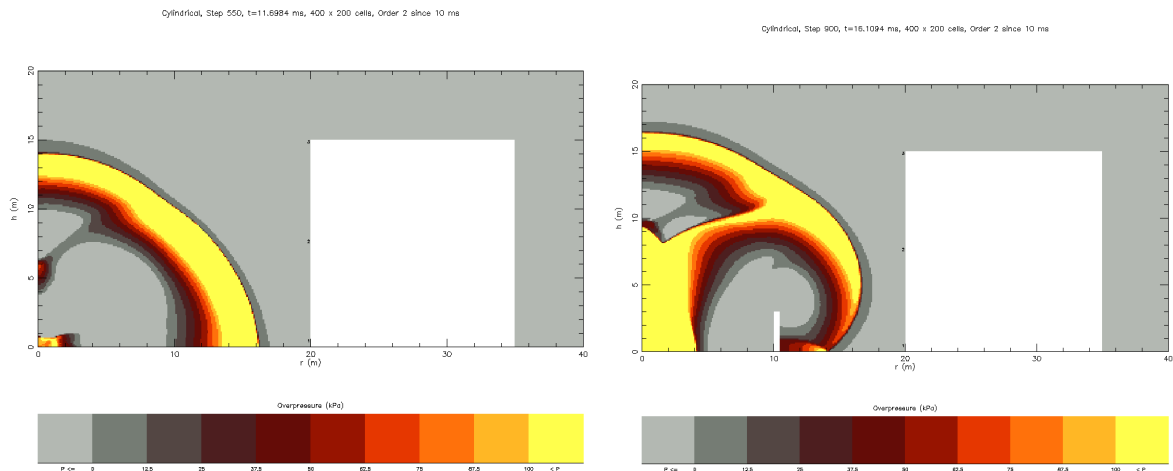
13. ábra - A lökeshullám a robbanáskor és a beugró részénél



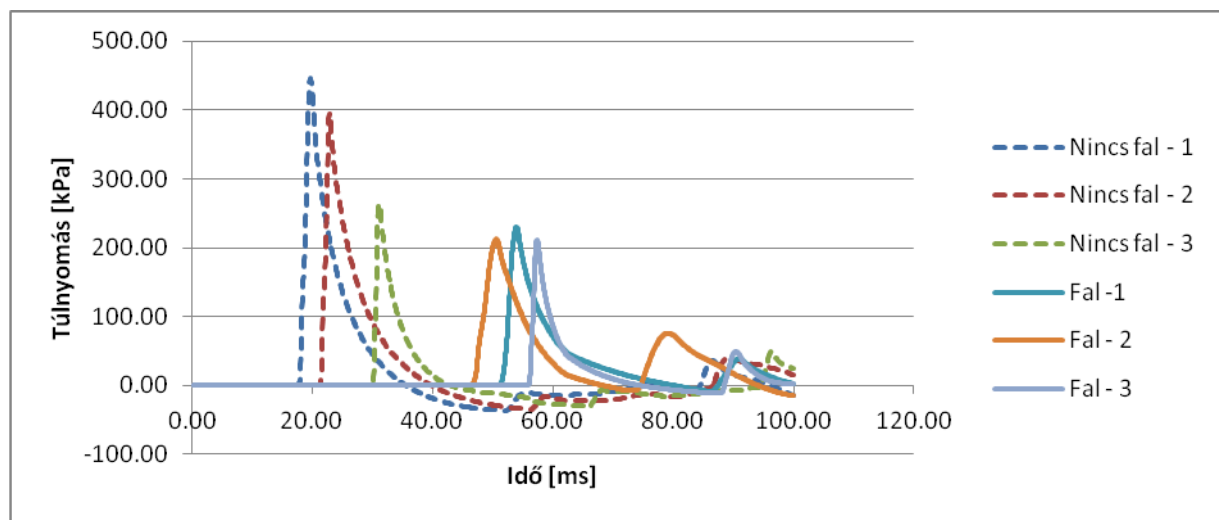
14. ábra - Nyomásgörbék a beugróban

### Védőfallal körbevett épület robbanásterhe

Vizsgáljuk meg, hogy egy általános geometriájú (5 szintes) épület homlokzati robbanásterhén (400 kg TNT) mit változtat egy az épülettől 10 méterre elhelyezett, 3 m magas robbanásvédő fal. Feltételezzük, hogy a fal nem semmisül meg a robbanás hatására. A 15. 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. A fal hatása jól látható az ábrákon a lökeshullám legnagyobb nyomású szélső zónájában, amely a fal esetében kisebbre adódik.



15. ábra - Fal nélküli és fallal védett épület vizsgálata (oldalnézet)

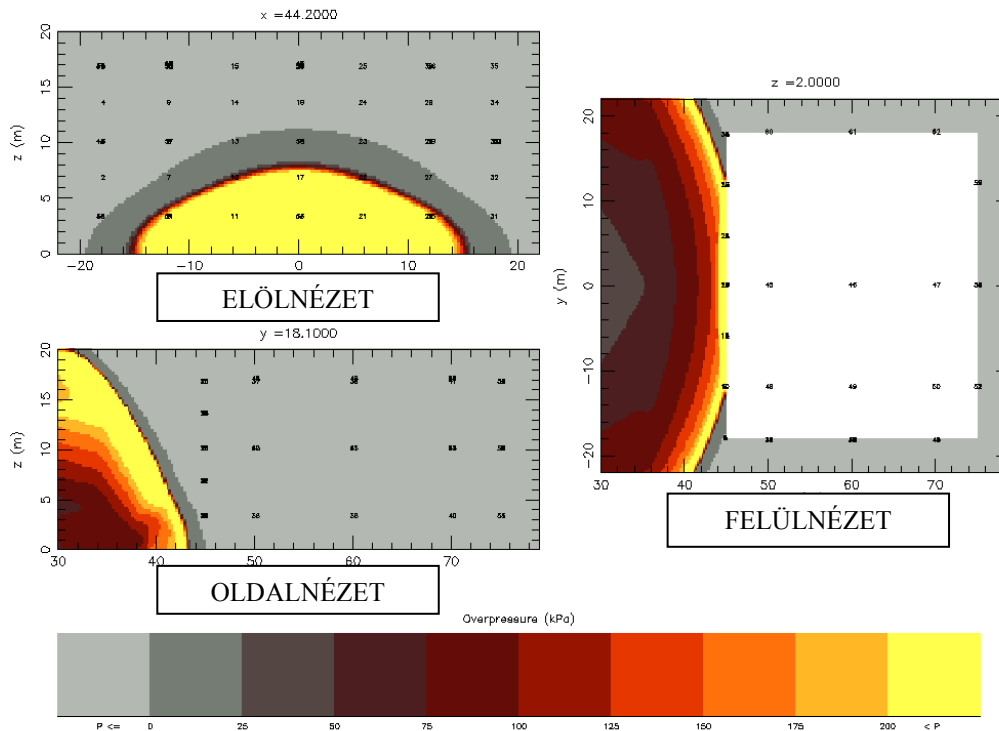


16. ábra - Fal nélküli és fallal védett elrendezés esetén a fal nyomásgörbéi

Ez látható az 16. ábrán is, ahol a homlokzaton felvett 3 monitorozási pont nyomásgörbéje látható. Az ábrából jól kitűnik, hogy a fal az épület alján és közepén közel felére csökkenti a ható túlnyomást, míg a tetején már kevésbé jelentős a csökkenés. Hasonló módon, az alsó két ponton az impulzus értéke 60%-re csökken, a felső ponton ez az érték mindössze 80%. A kapott értékekkel természetesen minden további vizsgálat elvégezhető.

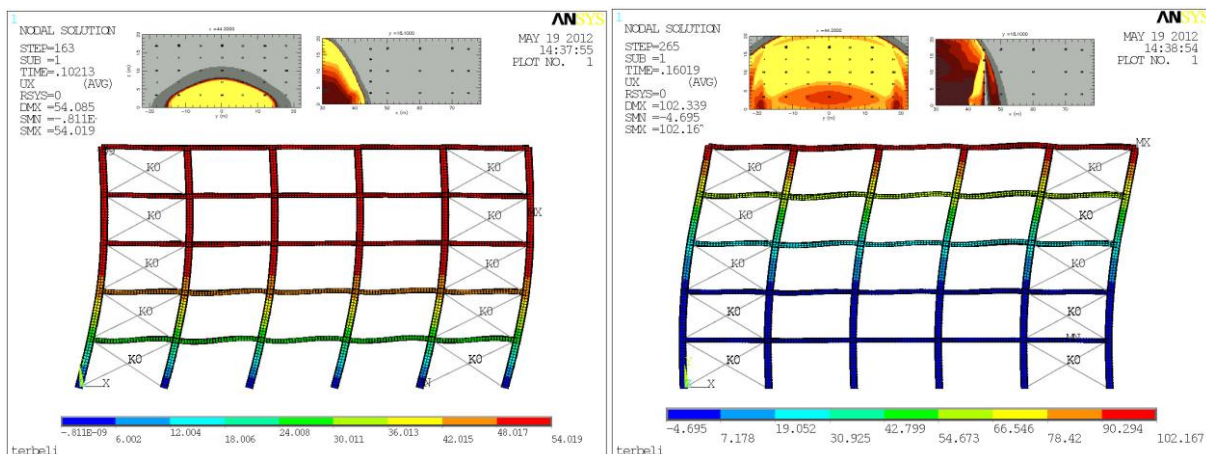
# Irodaház szerkezetének vizsgálata robbanásteherre

3D, Step 70, t=33.7874 ms, 196 x 176 x 80 cells, Order 2 since 10 ms



17. ábra - Lökéshullám szétterjedése a homlokzaton

Hasonlítsuk össze egy acélszerkezetű, rácozott merevített keretállású irodaház maximális tetőponti elmozdulását 8000 kg TNT egyenértékű, 45 m-re történő robbanás esetén empirikus, illetve CFD teherfelvétel mellett! A fő különbség az lesz, hogy míg az empirikus teher a sík hullámok feltételezésének megfelelően egyben nyomja meg az egész homlokzaton, addig az áramlástani vizsgálat kihozza azt, hogy a lökéshullám időben szétterjed a homlokzaton, nem egyszerre nyomja azt meg (17. ábra).



18. ábra - A szerkezet elmozdulása a terhelés kezdeti és későbbi fázisában []

Az 18. ábrán látható, hogy a terhelés elején más rezgésalakot gerjeszt a lökéshullám, mint a végén, amikor már az egész homlokzaton terheli. A számítások nem kerülnek részletezésre, de az eredmények közlése 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 csök-

kenés egyértelműen mutatja az áramlástanai teherfelvétel szükségességét. A pontosságnak az ára az, hogy kapcsolt analízist kell végrehajtani, tehát a folyadéktérből kinyert eredményeket kell a szerkezeti modellterben alkalmazni, ami két különböző programrendszer használata esetén nehézkes eljárás.

## ÖSSZEFOGLALÁS

Bemutatásra került a robbanásokból származó lökéshullámok empirikus és áramlástanai megközelítése. A mai számítási kapacitás mellett már nem elrugaszkodott elvárás, hogy a robbantásvédelem vizsgálatait a CFD számításokkal pontosítsuk. Ennek alátámasztására néhány apró példát mutattunk be, amelyben olyan hatásokat vizsgáltunk, melyek az empirikus megközelítés mellett - a komplex geometria miatt - nem lehetségesek. Az eredmények bemutatásánál csak a túlnyomások, sebességek karakterisztikáját igyekeztünk bemutatni, nem konkrét vizsgálatokat végeztünk. Az összehasonlításokból kitűnik a komplex geometria hatása a lökéshullám terjedésére és a túlnyomások alakulására. Az eredmények alapján úgy ítéljük meg, hogy érdemes a különböző problémákra paraméteres vizsgálatokat végezni a jövőben.

*Köszönetünket nyilvánítjuk ki a Cranfield Egyetemnek a ProSAir szoftver kutatási céljából kiadott licenstéért.*

TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások. „A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.”

„The project was realised through the assistance of the European Union, with the co-financing of the European Social Fund.”

## IRODALOM

1. B. HOPKINSON - British Ordnance Board Minutes 13565 - 1915
2. MILLS C.A. First International Conference on "Concrete for Hazard Protection" Edingburgh 1987
3. GYÖRGYI József - Szerkezetek Dinamikája - Műegyetemi Kiadó 2006
4. US Army Corps of Engineers - STRUCTURES TO RESIST THE EFFECTS OF ACCIDENTAL EXPLOSIONS - 1990
5. GLASSTONE, DOLAN - Effects of Nuclear Weapons 1977
6. www.kxcad.net
7. ZAKRISSON - Numerical simulations of blast loads and structural deformation from near-field explosions in air – Elsevier – 2010
8. H. L. BRODE - Numerical Solution of Spherical Blast Waves - Journal of Applied Physics 1955
9. P. W. COOPER – Explosives Engineering – Wiley - 1996
10. ROMÁN Zsolt - Acélszerkezetű épület vizsgálata pontosított robbanásteherre - MSc Diplomamunka BME Építőmérnöki kar 2012
11. Air3D - User's Manual – Cranfield University