

Nagy Róbert¹

ROBBANÁSTERHEK KÖZELÍTŐ FELVÉTELE²

Épületeink robbanással szembeni biztonságának megítélésének, és az új épületek erre való tudatos tervezésének első lépcsője a robbanásból a szerkezetre ható teher megállapítása. A mérnöki praktikum szempontjait szem előtt tartva, főként az ennek egyszerűsített módszereivel foglalkozom, rövid kitekintést nyújtva a számítógéppel segített tervezés felé. A robbanáselmélet néhány arányosító tényezőjének bevezetésével (trotil egyenérték, energetikai hasonlósági törvény) és a robbanás mechanizmusának formalizálásával képesek vagyunk leírni a kialakuló lökéshullám főbb tulajdonságait (túlnyomás, impulzus, lecsengési idő). Ezt a hatást alakítjuk a szerkezetre ható teherre figyelembe véve annak térbeli elhelyezkedését, geometriai kialakítását és anyagi viselkedését. Ezzel a módszerrel konzervatív becslést igyekszünk adni az épületet érő terhekre.

BLAST LOAD ASSESSMENT

Aiming at estimating the safety of our buildings against explosions and the conscious-minded design of our structures to withstand explosions, the first step we have to cope with is the assessment of the blast load. With a practical approach we focus on its simplified methods, with a minor view on computer aided design. Introducing scaling factors like TNT equivalency and scaled distance, and formalizing the explosion process we are able to describe the main properties of the shock wave (overpressure, momentum, and positive phase duration). This effect is converted to loads acting on the structure considering its position in space, geometry and material behaviour. With this method we intend to estimate the loads in a safety-first manner.

KIVONAT

A közelmúlt egyre intenzívebb terrorista cselekményeinek következtében **szerkezeteink robbanással szembeni megóvására** egyre nagyobb hangsúlyt kell fektetnünk. A repülést kiszolgáló létesítményekhez hasonló, nagy jelentőségű épületek esetében pedig mindez különösen indokoltá válik.

Jelen cikk ennek a tervezési és ellenőrzési folyamatnak az első lépcsőjét, a külső robbanásból a szerkezetre ható **teher modellezésének** lehetőségeit elemzi, és foglalja össze. A mérnöki praktikum szempontjait szem előtt tartva főként az **egyszerűsített módszerekkel** foglalkozom, azonban rövid kitekintést teszek a számítógéppel segített tervezés, a numerikus szimulációk adta új lehetőségek felé is.

A robbanáselmélet segítségével néhány arányosító tényező bevezetésével (trotil egyenérték, energetikai hasonlósági törvény) és a robbanás mechanizmusának formalizálásával képesek vagyunk leírni a kialakuló **lökéshullám főbb tulajdonságait** (túlnyomás, impulzus). Ezt a hatást alakítjuk a szerkezetre ható teherre figyelembe véve annak térbeli elhelyezkedését, geometriai kialakítását és anyagi viselkedését. Ezzel a módszerrel konzervatív becslést igyekszünk adni az épületet érő terhekre.

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar. mail.robert.nagy@gmail.com

²Lektorálta: Prof. Dr. Lukács László ny. alez, egyetemi tanár, Nemzeti Közzolgálati Egyetem, lukacs.laszlo@uni-nke.hu

A pontosság további növelésének érdekében a közvetítő közeget, a környezetet és az épületet közösen kell kezelnünk figyelembe véve azok kölcsönös egymásra hatását. Ez azonban már a legújabb kutatások irányába vezet és nagykapacitású számítástechnikai háttérrel feltételez. Az ezt kezelni képes **numerikus módszerek** (FEM, FVM) alkalmazásával a paraméterter kísérletekkel validált pontjai által közrezárt intervallumon képesek vagyunk a hatásokat nagy pontossággal interpolálni.

BEVEZETÉS

A jelenkori világpolitika és a harcászat fejlettség elérte, hogy a fejlett államok területszerzési céllal nem támadnak egymásra. Ugyanakkor, ezzel párhuzamosan új hadviselési forma jelent meg, melynek művelői beleolvadnak polgári társadalomba. Ennek egyik formáját képezik a **terrorszervezetek**, melyek célja, ahogyan azt a szó eredeti jelentése is mutatja, rettegés, zavar és a biztonság hiányának előidézése a lakosság körében. Eszközei erőszakos cselekmények, vagy az azokkal való fenyegetés, céljai pedig különböző politikai, vallási vagy nemzeti ideológiák érvényesítése. A globalizáció következtében a mindennapi élet árca elfedi ezeket a csoportokat, éppen ezért az aktív védekezés morális kérdéseket feszeget, amelyek közül például az egyéni szabadságjogokra minden kormánynak különös tekintettel kell lennie, így a terrorizmus ellen folytatott harc komoly nehézségekbe ütközik. Azonban egyik hatásos és szükséges módja az épületeink szándékos **robbantással szemben tanúsított ellenállásának tudatos méretezése**, amellyel biztonságosabb és élhetőbb környezetet hozhatunk létre a lakosság számára, megóvhatjuk az emberek életét és a társadalmi berendezkedés működéséhez szükséges kifinomult, és ezzel egyidejűleg mindinkább sérülékeny rendszereinket. A repülést kiszolgáló létesítményekhez hasonló, nagy jelentőségű épületek esetében mindez különösen indokolttá és aktuálissá válik, és közös katonai – építőmérnöki együttműködést igényel.

ROBBANÁS ÉS ROBBANÓANYAGOK

Ebben a fejezetben összefoglalom a robbanással kapcsolatos alapvető ismereteket és fogalmakat. A különböző robbanástípusok csoportosítása után lehatárolom a gyakorlati szempontból legfontosabb eseteket, a további fejezetek főként koncentrálnak. Röviden ismertetem a robbanás mechanizmusát, a jelenség számszerűsítésének módját és modelljeit, a robbanóanyagok különböző fajtáit, végül az egységes kezeléshez szükséges arányosító tényezőket.

A robbanás fogalma és fajtái

Robbanás során egy termodinamikailag nyílt rendszerben **rövid idő** alatt **nagy mennyiségű energia** szabadul fel.

A folyamat szempontjából megkülönböztetünk **nukleáris**, **fizikai** és **kémiai** robbanásokat. Az első esetben a felszabaduló energia az egymással kölcsönható atommagok egyesülése³ vagy hasadása⁴ során kialakuló tömegdefektus következménye. A második típusnál a rendszert

³ Uránium vagy plutónium töltet esetén

⁴ Hidrogén töltet esetén

alkotó elemek nem szenvednek kémiai változást. Ilyen például egy sűrített gázt tartalmazó tartály tönkremenetele, ahol a kitáguló anyag lehűlése során felszabaduló belső energia alakul át mozgási energiává. Ugyancsak fizikai eredetű robbanást okoz egy nagy sebességgel becsapódó tárgy, ahol viszont éppen a mozgási energia alakul át hővé. A harmadik kategóriába különböző heves hő és gázfejlődés kíséretében lezajló kémiai reakciók tartoznak. Ezen belül érdemes különbséget tenni **térrobbanások** és **kondenzált fázisú robbanások** közt. Térrobbanás során a kémiai reakcióban résztvevő anyagok közül legalább az egyik gáz halmazállapotú, ezáltal nagy térrészt tölt ki viszonylag kis koncentrációval, így a térfogategységre eső reakcióhő átlagosan három nagyságrenddel alatta marad a kondenzált fázisú eseteknek⁵, amikor is a reakcióban résztvevő anyagok folyadék vagy szilárd halmazállapotúak, és így a keletkező robbanási gáztermék az eredeti térfogat 10000-szerese is lehet, szemben térrobbanás során bekövetkező megközelítőleg 10-szeres térfogat növekedéssel. A közelmúlt tanulságai alapján épületeink terrorizmus elleni robbanásvédelemének gyakorlati szempontjából a legfontosabb kategóriát a kondenzált fázisú kémiai robbanások jelentik, így a további fejezetekben ezzel foglalkozom részletesen.

Általában az exoterm kémiai reakciók a gyújtóforrást körülvevő kis térrészből indulnak ki, és egy reakciófrontnak nevezett jól meghatározott tartományban mennek végbe, amely időben előre halad felemészten a még reagálatlan anyagot. A front haladási sebessége jellemzi a reakció **hevességét**. Így azokat növekvő sorrendbe rendezve, a következő szakirodalmi elnevezések használatosak: égés, gyors égés, gyenge, közepes, erős deflagráció, robbanás és detonáció. Éles határvonalakat nem húzhatunk köztük. Az **égés** frontjának sebessége 10 m/s-nál kisebb, hőátadás és diffúzió révén terjed, a nyomásemelkedés pedig elenyésző. A **deflagráció** sebessége néhány 100 m/s is lehet, de feltétlenül a hangsebesség alatt marad, ekkor a front és a keletkezett gáznemű égéstermék haladási iránya egymással ellentétes. A **robbanási** front sebessége – már a hangsebességet meghaladva – elérheti az 1000 m/s-ot is. Ekkor a reakciókinetikában a hőátadáson és a diffúzióon kívül jelentős szerepet játszik a fronton kialakuló adiabatikus kompresszió is, ilyen esetben a robbanási termékek már a fronttal egyező irányba haladnak. A **detonációs** front legnagyobb sebessége 10000 m/s lehet. Ebben az esetben a folyamatot a front adiabatikus összenyomódása következtében kialakuló belsőenergia növekedés hajtja. A továbbiakban e két utóbbival foglalkozom.

A robbanás során kialakuló terhek leírása szempontjából még különbséget kell tennünk **zárt** illetve **nyílt térben** létrejövő robbanások, továbbá a terhet közvetítő közeg szempontjából **levegőben**, **folyadékban** vagy **talajban** végbemenő robbanások közt. A következő fejezetekben mind nyílt, mind zárt térben, levegőben lezajló robbanásokról lesz szó.

A robbanási folyamat

Ebben az alponban a robbanás fizikai folyamatát mutatom be a szemléletesség és a kísérleti megfigyelhetőség előnyeit kihasználva egy egyik végén **zárt csőben létrejövő térrobbanás** példáján keresztül. Az inicializálás hatására a cső zárt végén lévő gyújtóforrás környezetében a gáz égni kezd, kitágul és a csőben előre nyomul. Az égő és az elégetlen gáz közti határréteg

⁵ Példaként álljon itt az optimális robbanó összetételű metán-levegő elegy 3,5 kJ/l és a TNT 6700 kJ/l nagyságú robbanáshője

a lángfront, ennek felületére vett merőleges sebességét nevezzük égési sebességnek. A front kezdetben tompa kúp alakú, majd a turbulencia következtében hullámossá, de a cső keresztmetszete mentén kiegyenlítetté válik. A turbulencia fokozódásával a reakciófelület és ezzel, a hőtermelés fokozódásán keresztül, annak haladási sebessége is egyre nő. A lángzónát a mögötte keletkező égéstermék kitágulása a dugattyúként előrenyomja és előtte nyomáshullámnak nevezett gáztorlasz keletkezik, ahol a sűrűség és a nyomás is megnövekszik. A nyomás maximuma ekkor a lángfronttal érintkező határfelületen van, azonban a további gyorsulás következtében a később keletkező nyomáshullámok utolérlik a korábbiakat, a nyomás maximuma előretolódik a nyomásfront felé, majd kialakul a robbanási hullám. Ekkor a friss gáz meggyújtásában a hőátadás és a diffúzió mellett szerephez jut a nyomáshullám adiabatikus összenyomódása következtében kialakuló felmelegedés is, azonban a kémiai reakció még mindig a lángzónában folyik. A reakció további gyorsulásával kialakul a detonációs hullám, amelynek fontjában a nyomás ugrásszerűen olyan mértékben megnő, hogy a friss gáz már itt gyulladási hőmérsékletre melegszik és beindítja a gyulladási folyamatot, amely egészen a láng frontjáig tart, azonban az égés maga a lángfront és az elégett gáz határreége közé korlátozódik.

A fizikai jelenség megismerése után, amelyet gyors filmfelvételek segítségével kísérleti elemzések segítségével sikerült megérteni, a következő pontban rátérünk a matematikai leírásra.

A robbanási folyamat modelljei

A XIX. század végén egymástól függetlenül David L. Chapman (1899), Emile Jouguet (1904) és Mihkel'son (1890) közel egy időben fektette le a robbanáselmélet alapjait, amelyet ma a szakirodalom **Chapman – Jouguet (CJ) - elmélet** néven ismer. Modelljük alapfeltevése szerint a robbanás energiáját termelő kémiai reakció egy felületen, a robbanás frontján, végtelenül gyorsan – és így a reakciókinetikát figyelmen kívül hagyva – következik be, ahol ugrásszerűen változnak a gáz kémiai összetétele és a fizikai állapotjelzői is. Ahhoz, hogy a detonációfront sebessége időben állandó maradjon, szükséges, hogy a mögötte keletkező ritkulási hullámok ne gyengítsék le, a detonációs termékek ne haladjanak lassabban a lokális hangsebességnél (ez a ritkulási hullámok terjedési sebessége). Ezt kiegészítve azzal a megfigyeléssel, hogy minden robbanóanyaghoz egy jól meghatározott detonációhullám sebesség tartozik, a következőekben részletezendő, lökeshullám terjedés **Rankine – Hugoniot - modellje** alapján belátható, hogy ez a sebesség épp a lokális hangsebesség lesz.

$$\text{A tömegmegmaradás: } \rho_{CJ} \cdot (U - u_{CJ}) = \rho_1 \cdot U. \quad (1)$$

$$\text{A lendületmegmaradás: } p_{CJ} - p_1 = \rho_1 \cdot u_{CJ} \cdot U, \quad (2)$$

$$\text{Az energiamegmaradás: } e_{CJ} + \frac{1}{2}(U - u_{CJ})^2 + \frac{p_{CJ}}{\rho_{CJ}} = e_1 + \frac{1}{2}U^2 + \frac{p_1}{\rho_1} + Q, \quad (3)$$

$$\text{CJ hipotézis: } \rho_1 \cdot U^2 = \rho_{CJ} \cdot \gamma \cdot p_{CJ}. \quad (4)$$

A 2. világháború alatt szintén egymástól függetlenül Jakov Zel'dovich (1940), Neumann János (1942) és Werner Döring (1943) továbbfejlesztette az előző modellt. Ez, a hármójukról elnevezett, **ZNW - elmélet** már kiterjedt detonációhullámot feltételez, amelyet a lökésfront és a reakciófront határol. A lökésfronton a gáz állapotváltozói ugrásszerűen változnak és a megnövekedett nyomás a robbanóanyagot felhevíti, amely azonban a detonációhullámban még

nem alakul át, ez csak a CJ elméletből megtartott reakciófronton következik e szintén pillanatszerűen, a reakciókinetikát figyelmen kívül hagyva. A modell még mindig tartalmaz hiányosságokat, amelyeket az utóbbi időkben részben kiegészítettek, azonban már ebben a formájában is képes meglehetősen összetett jelenségek leírására is. A gyakorlat szempontjából ennyi háttértudás elegendőnek bizonyul.

Robbanóanyagok

A robbanóanyagok olyan vegyületek vagy keverékek, melyek meghatározott külső behatásokra gyors kémiai átalakulásra képesek, miközben nagymennyiségű és nagy nyomású gázok képződnek, mely gázok kiterjedésük közben mechanikai munkát fejtenek ki.

A katonai és polgári vonatkozásban használt valamennyi robbanóanyagot gyakorlati alkalmazásuk szerint az alábbi módon csoportosíthatjuk:

Robbanóanyagok típusai				
Toló hatású (Impulzív)	Inicializáló (Primer)	Brizáns		
		Alacsony hatóerejű	Közepes hatóerejű	Magas hatóerejű
A robbanás fő hatásmechanizmusa az égés	Mechanikai és hőhatásokra érzékenyek, gyújtóeszközök lőszerelésére, brizáns anyagok iniciálására használhatók.	NH ₄ NO ₃ alapú robbanóanyagok, paxitok, robbanóanyagok	Nitrotoluol származékok	
Lőporok	Durranóhigany /Hg(CNO) ₂ / Ólom-azid /Pb(N ₃) ₂ /	Paxit Ando	TNT Plasztikus	Hexogén /RDX/ Nitropenta

1. táblázat A robbanóanyagok csoportosítása

A **toló hatású** (impulzív) robbanóanyag például a lőpor, fő hatásmechanizmusa az égés, így ezek tárgyalásától eltekintek. Az **iniciáló** (primer) robbanóanyagokat, mint például az ólom-azidot /Pb(N₃)₂/ és a durranóhiganyt /Hg(CNO)₂/ gyújtóeszközök lőszerelésére használják, csekély mennyiségű anyag robbantása is előidézhetheti a vele közvetlenül érintkező brizáns robbanóanyag robbanását. **Brizánsnak** nevezik azokat a robbanóanyagokat, amelyeknél a maximális nyomás olyan gyorsan alakul ki, hogy lökeshullámot képez, és ennek következtében a környező vagy az érintkező anyagokon romboló munkát végez. Külső hatásokkal szemben lényegesen kevésbé érzékenyek, mint az iniciáló robbanóanyagok. Többnyire szilárd halmazállapotúak, de létezik folyékony, illetve gáz halmazállapotú típus is. Elterjedésük fő feltétele volt, hogy stabil állapotúak legyenek, ezáltal biztonságos szállítást és felhasználást tettek lehetővé úgy katonai, mint polgári helyzetekben. A brizáns robbanóanyagokat önállóan, vagy keverékként használják fel. A legelterjedtebb közülük a trinitrotoluol /TNT/, más néven trotil. Ezen kívül gyakori robbanóanyagok a teljesség igénye nélkül a hexogén /RDX/, a pentrix, a pikrinsav, a semtex és az ammóniumsáletrom. Mind ipari eljárásokkal készült, magas hatóerejű robbanóanyagok. Kevésbé stabil, így veszélyesebb robbanóanyagok az egyszerű körülmények közt elkészíthető, kisebb terroristámadásokhoz is felhasznált vegyületek, például a HMTD, a TATP és az ANFO. Ezek többnyire kisebb hatóerejűek is az előzőeknél.

Töltetnek nevezzük a rombolási céllal, esetleg számításon alapuló robbanóanyag mennyiséget. A töltet fogalma magában foglalja az adott mennyiségű robbanóanyag **formáját és elhe-**

lyezését is. A forma befolyásolja a robbanóanyag által keltett lökeshullám terjedési jellemzőit, de ennek inkább csak a lokális vizsgálatoknál van jelentősége, például felhelyezett töltettel végzett nyílásrobbantáskor, továbbá a terroristatámadások általában nem egy darab adott formájú robbanóanyaggal készülnek, hanem a töltetet a gépjárműben elhelyezett több tíz robbanóttest összessége adja, ráadásul ezek minőségben és nagyságban is eltérnek egymástól.

Arányosítási törvény

Általánosan elterjedt gyakorlat, hogy a különböző robbanóanyagok teljesítőképességét a TNT-hez viszonyítják. Így bevezetjük a **TNT egyenérték** fogalmát, amely megadja, hogy mekkora tömegű TNT-vel helyettesíthető az adott töltet, hogy ugyanazt a robbanási paraméter értéket kapjuk, mint az eredeti esetben. Itt fontos megjegyezni, hogy ez arányosítás többféle szempont szerint történhet, így különböző értékeket kapunk, ha például a maximális túlnyomást, a felszabaduló energiamennyiséget, fajlagos impulzust vagy éppen a pozitív fázis idejét akarjuk kalibrálni. A gyakorlatban legelterjedtebb arányosítás a robbanóanyagok **robbanáshőjén** alapul. Ennek képlete:

$$W_E = \frac{H_{\text{exp}}^d}{H_{\text{TNT}}^d} W_{\text{exp}}, \quad (5)$$

CF

ahol W_E a TNT tömeg egyenérték, W_{exp} az átszámítandó robbanóanyag tömege, H_{exp}^d az átszámítandó robbanóanyag robbanáshője, H_{TNT}^d a TNT robbanáshője. Praktikus bevezetni a két robbanáshő hányadosaként definiált **töltettényező** (CF), amely értékei táblázatokból kikereshetők. Álljon itt néhány példa [1][2][6]:

Robbanóanyag	Égéshő [kJ/kg]	Töltettényező (CF)
TNT	4520	1,00
RDX	5360	1,19
HMX	5680	1,26
60% RDX + 40% TNT	5190	1,15
Folyékony nitroglicerín	6700	1,48
Semtex	5660	1,25
Amatol 40/60	3703	0,82
ANFO	4113	0,91

2. táblázat Néhány robbanóanyagok töltettényezője [1][2][6]

A LÖKÉSHULLÁM

Modellegyenletek

A robbanási termékek gyors tágulása a környező közvetítő közegben (esetünkben ez mindig levegő lesz) lökeshullámot idéz elő, ahol ugrásszerűen megváltoznak a gáz állapotjelzői. melyek front előtti és front mögötti értékei közt a tömeg-, a lendület- és az energiamegmaradás egyenletei, kiegészítve a gáz állapotegyenletével teremtenek kapcsolatot. Ezek a **Rankine – Hugoniot egyenletek**, melyek egy dimenzióban az alábbi egyszerű alakba írhatók:

A tömegmegmaradás: $\rho_2 \cdot (U - u_2) = \rho_1 \cdot u_1.$ (6)

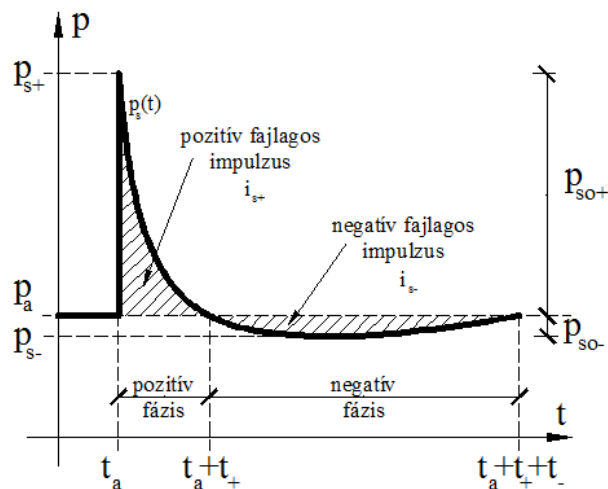
A lendületmegmaradás: $p_2 - p_1 = \rho_1 \cdot u_1 \cdot U.$ (7)

Az energiamegmaradás: $E_2 - E_1 = \frac{p_2 + p_1}{2} \cdot \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right).$ (8)

Az állapotegyenlet: $p = (\gamma - 1) \cdot \rho \cdot E.$ (9)

Időbeli nyomásprofil

A tér egy adott pontján áthaladó lökeshullám-front hatására kialakuló tipikus statikus nyomás⁶ – idő diagram az alábbi ábrán látható:



1. ábra A lökeshullám keltette statikus nyomás - idő tipikus grafikonja a tér egy rögzített pontjában

A hullámfront megérkezési idejét t_a , a légkörnél magasabb nyomású fázis időtartamát t_+ az alacsonyabbét t_- jelöli. p_a a légköri nyomás, p_{s+} az ugrásszerűen kialakuló maximális, p_{s-} pedig a minimális statikus nyomás. A lecsengés jó közelítéssel az alábbi alakú exponenciális függvénnyel írható le, ahol p_{so+} a légköri nyomáson felüli maximális statikus túlnyomás, b a függvény alakját befolyásoló paraméter, és az idő paraméter a hullám megérkezésétől indul.⁷

$$p_{so}(t) = \begin{cases} p_{so+} \cdot \left(1 - \frac{t - t_a}{t_+} \right) \cdot e^{-\frac{b \cdot (t - t_a)}{t_+}} & \text{ha } t < t_a + t_+ \\ 0 & \text{ha } t \geq t_a + t_+ \end{cases} \quad (10)$$

TNT robbanás esetén, a pozitív fázis időtartamára a M. A. Szadovszkij kísérleti úton az alábbi összefüggést állapította meg [7]:

$$t_+ = \gamma \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[6]{W_{TNT}} \cdot \sqrt{R}, \quad (11)$$

ahol R a robbanástól mért távolságot, W_{TNT} a töltet súlyát jelöli. A nyomáshullám jellemzésére

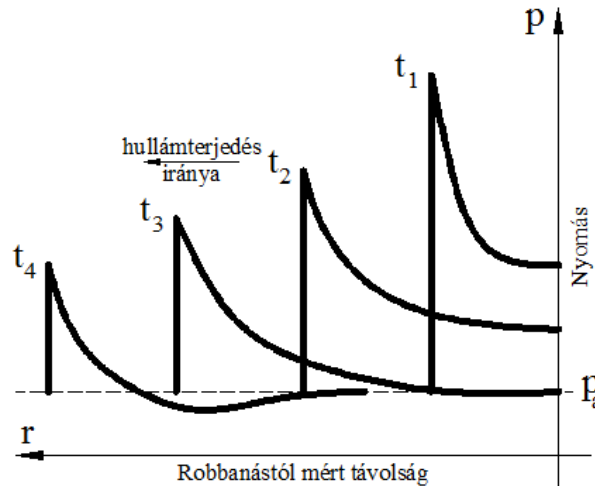
⁶ A statikus nyomást az angol szakirodalom side-on pressure-nek is nevezi, mivel méréséhez, a műszereket a hullámfrontra merőlegesen kell elhelyezni ennek rögzítéséhez.

⁷ A továbbiakban az egyszerűség kedvéért a légköri nyomáson felüli maximális túlnyomás értékére egyszerűen a túlnyomás fogalmát használom.

használt fő paraméterek ezek közül a statikus túlnyomás, a pozitív fázis időtartama, és ezeket kiegészítve a pozitív fázis fajlagos impulzusa, amelyet formálisan az alábbi integrál fejez ki:

$$i_{s+} = \int_{t_a}^{t_a+t_+} p_{so}(t) dt. \quad (12)$$

A negatív szakasz tovább tart, azonban kisebb intenzitású a pozitívnál. Ahogy a robbanás centrumától távolodunk, az egyre később megérkező hullámfront maximális pozitív túlnyomása csökken, a lecsengési idő megnő. Ezt vázlatosan a következő ábra szemlélteti:



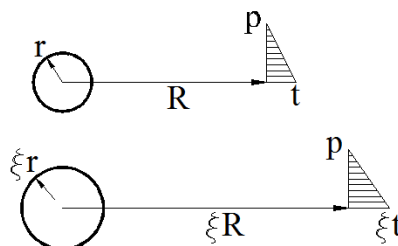
2. ábra A statikus nyomás grafikonja a robbanástól vett távolság függvényében különböző időpillanatokban

Arányosított távolság

Az arányosított távolság bevezetésével a különböző lökeshullámok leírására elegendő egyetlen közös vonatkoztatási rendszer. A legegyszerűbb, és a tapasztalatokkal jól egyező, ezáltal a gyakorlatban legtöbbet alkalmazott ilyen transzformációt **Hopkinson – Crantz - féle köbgyökös arányosításnak** nevezik, és azt fejezi ki, hogy a robbanási paraméterek a töltet tömegének köbgyökével arányosan változnak. Ennek egyik legfontosabb eredménye, hogy a két különböző W_1 és W_2 töltet R_1 és R_2 távolságokban a robbanástól megegyező statikus túlnyomást produkál, ha közöttük fennáll:

$$\frac{R_1}{\sqrt[3]{W_1}} = \frac{R_2}{\sqrt[3]{W_2}} = Z, \quad (13)$$

ahol Z az arányosított távolság. Ez szemléletesen a következő ábrán mutatható be:



3. ábra A Hopkinson – Crantz – arányosítás vázlata

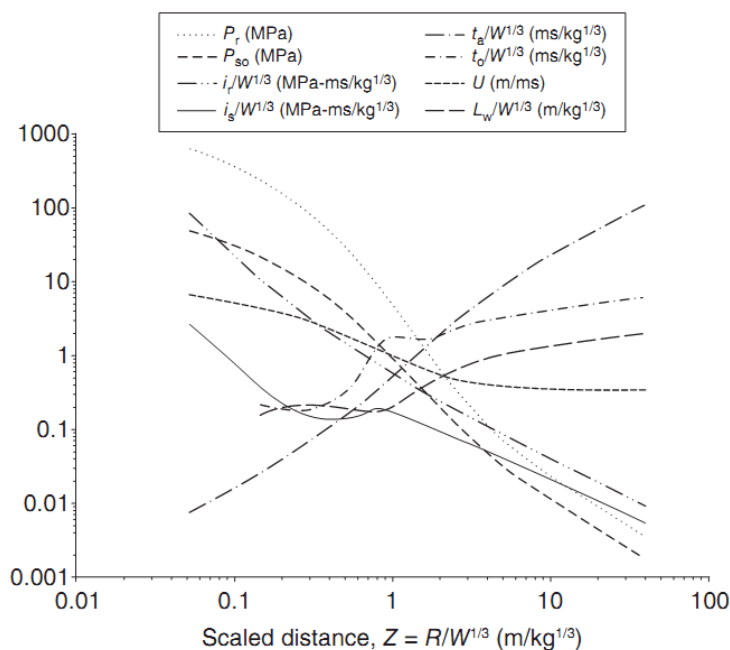
Tehát, ha a töltet sugarát x -szeresére növeljük, ezzel tömege x^3 -szeresére nő. Ekkor az elmélet következtében azonos arányosított távolság esetén a vizsgált pontban a két elrendezés azonos túlnyomást produkál. Megjegyzendő, hogy a lecsengési idő viszont a második esetben x -szeresére nő, így a fajlagos impulzus nem marad állandó. A modell kiegészítve a felszabaduló energiára vetített TNT-egyenérték koncepciójával alkalmas különböző robbanóanyagok egységesített kezelésére is.

Nomogramok

A TNT egyenérték és az **arányosított távolság** bevezetésével a lökeshullám fő paramétereinek térbeli alakulását egyetlen függvénycsoporthal írhatjuk le, melynek változója:

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W_E}}, \quad (14)$$

A levezetett összefüggéseket szabad térben bekövetkező gömbszerű és hengerszerű robbanás esetre nomogramok formájában megtalálhatjuk mind a pozitív, mind a negatív fázisra többek között a [3] útmutatóban:



4. ábra A lökeshullám pozitív fázisának jellemzői tengerszinten szabad térben bekövetkező gömbszerű TNT robbanás esetére

Ahol az r index a falra merőlegesen beeső hullám visszaverődés utáni értékeit jelöli, L_w a pozitív fázis hossza. Több, kísérleti alapon meghatározott függvény is létezik, amelyekkel a nomogramok használata megkerülhető. Ezek általános alakja például a statikus túlnyomás és skálázott távolság kapcsolatára:

$$p_{so+} = A_0 + \frac{A_1}{Z} + \frac{A_2}{Z^2} + \frac{A_3}{Z^3}, \quad (15)$$

ahol A_i , ($i=0,1,2,3$) a kísérletileg meghatározott paramétereket jelöli. Szadovszkij mérései szerint [7]:

	A_0	A_1	A_2	A_3
Gömbyszerű terjedés	0	0,84	2,7	7
Félgömbszerű terjedés	0	1,06	3,40	8,82

3. táblázat A statikus túlnyomás és skálázott távolság kapcsolatát kifejező együtthatók Szadovszkij mérései szerint [7]

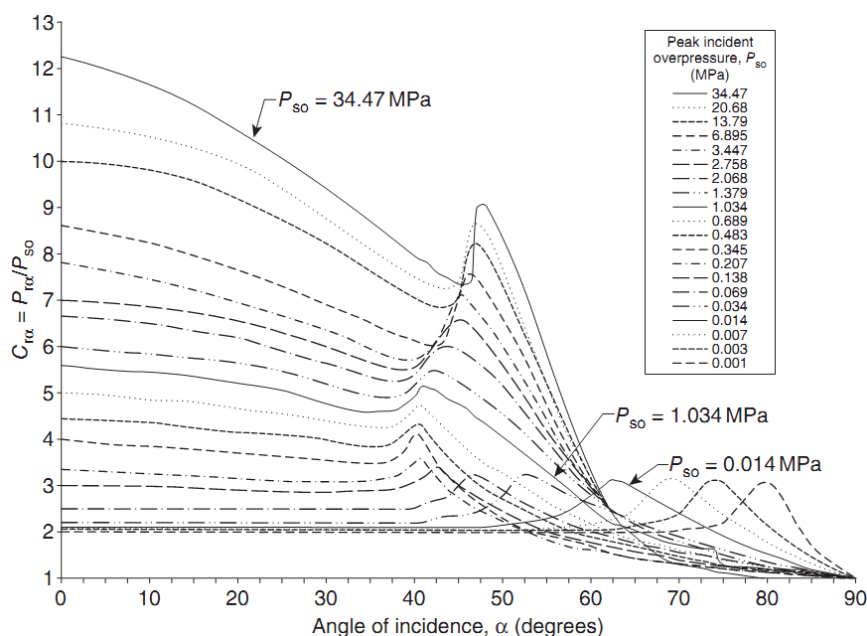
HULLÁMJELENSÉGEK

Ebben a pontban elhagyjuk a nyílt térben terjedő hullám feltételezését, és a hullámfront útjába kerülő akadályok hatását kíséreljük meg leírni közelítő módszerekkel. A közelítés abban áll, hogy az akadályokat merevnek tekintjük.

Reflexió

Ha egy hullám útjába akadályokat helyezünk, a lokális nyomás, ezáltal a testre ható teher, jelentős mértékben megemelkedik. Ez a növekedés erősen nemlineáris jelleget mutat és főleg a beeső hullám erősségétől (ennek gyakorlati mértéke a statikus túlnyomás) és a beesés szögétől függ. A következő ábra a visszavert hullám túlnyomásának (p_{ra}) és a beeső hullám statikus túlnyomásának (p_{so}) hányadosát, az úgynevezett visszaverődési tényezőt (C_{ra}) ábrázolja a hullám terjedési irányának az akadály felületének normálisával bezárt, úgynevezett beesési szög, valamint a beeső hullámfront statikus túlnyomásának függvényében.

$$C_{ra} = \frac{p_{ra}}{p_{so+}}. \quad (16)$$



5. ábra A visszaverődési tényező grafikonja a beesési szög és a beeső hullám statikus túlnyomásának függvényében [3]

A tényező maximális értékei merőleges beesés esetén állnak elő, amire a klasszikus Rankine – Hugoniot egyenletek segítségével az alábbi elterjedt felírás adható:

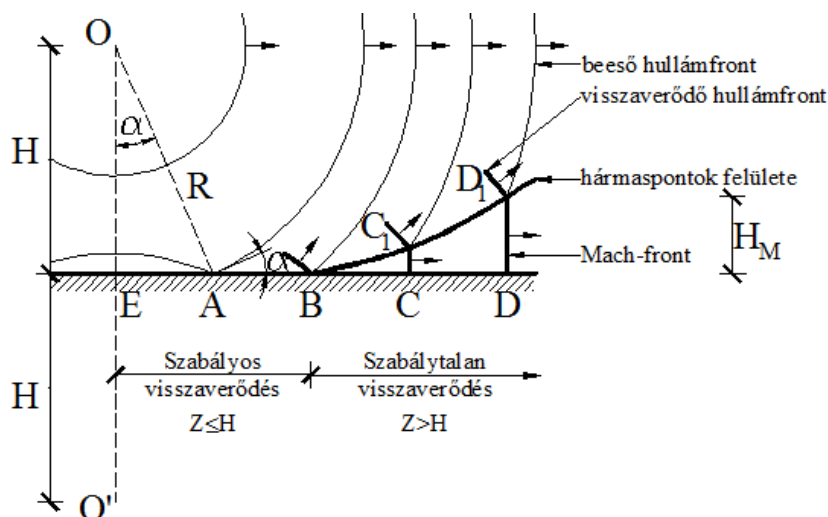
$$C_{ra} = 2 \frac{4 \cdot p_{so+} + 7 \cdot p_a}{p_{so+} + 7 \cdot p_a}. \quad (17)$$

A képletből kiolvasható, hogy gyenge, akusztikushoz közeli lökeshullámok esetén a merőleges visszaverődés kétszeres nyomásnövekedést eredményez, ennek következtében a jelenség ekkor modellezhető egy „tükörtöltet” beiktatásának segítségével, amit az eredeti töltet fal síkjára való tükrözésével kapunk. A 17. egyenlet szerint, ha a lökeshullám erősségével a végtelenhez tartunk, a nyomásnövekedés 8-szoros lehet. Ez ellentmond a grafikonon feltüntetett értékeknek. Ez abból a feltételből következik, hogy az 5. egyenlet levezetése során a közvetítő közeget ideális gáznak feltételeztük, vagyis az állandó nyomáshoz és az állandó térfogathoz tartozó fajlagos hőkapacitás aránya (adiabatikus kitevő) állandó, speciálisan a túlnyomó részben kétatomos molekulákból álló levegő esetében:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{f+2}{f} = \frac{7}{5} = 1,4. \quad (18)$$

Ez a feltételezés azonban nagyon erős lökeshullámok esetében, amikor a megemelkedett hőmérséklet (ez a jelenség 1500 K felett válik jelentőssé) a gáz molekulaszervezetét megváltoztatja, már nem helytálló, és a visszaverődési tényező akár 12 fölé is megnőhet.

Érdekes még megfigyelni a függvények lefutásában 40° és 60° között megjelenő változásokat, amely az úgynevezett Mach - visszaverődés következménye, amikor is a Mach - szögnél nagyobb beesési szög esetén a visszavert hullám interferál a beesővel és a fal közelében egy megemelkedett nyomású légréteget hoz létre. Így a visszaverődési jelenség két zónára bontható a közeli szabályos, és a távolabbi szabálytalan visszaverődés zónájára, ahogyan azt az alábbi ábra is mutatja egy a talaj felett H magasságban felrobbanó töltet példáján keresztül.



6. ábra A Mach - hullámok kialakulása

A ROBBANÁSTEHER

Ez a fejezet a robbanásból származó, az épületre ható teher tervezés során figyelembe veendő értékeinek meghatározásával foglalkozik. A robbanás okozta terhek kategorizálása után, bemutatom az idealizált lökésdiagram alkalmazásával történő egyszerűsített teherfelvétel módszerét.

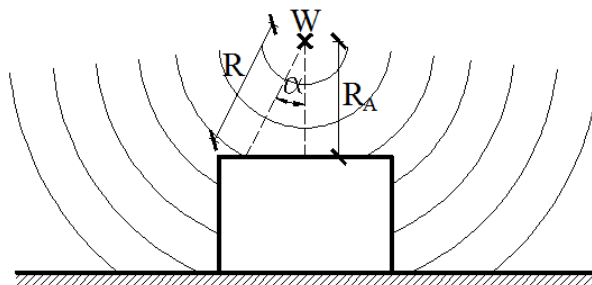
Robbanási típusok

Viselkedése szerint az alábbi robbanási típusokat különíthetjük el:

Robbanási típusok			
Nyílt terű			Zárt terű
Szabad légterű	Korlátolt szabad légterű	Földközeli	
Gömbszerű terjedés, nincs felerősítő hatás	Mach hullám	Félgömbszerű terjedés	Többszörös visszaverődés
Levegőben robbantott atombomba	Légi bombák	Autóbomba	Térrobbanások

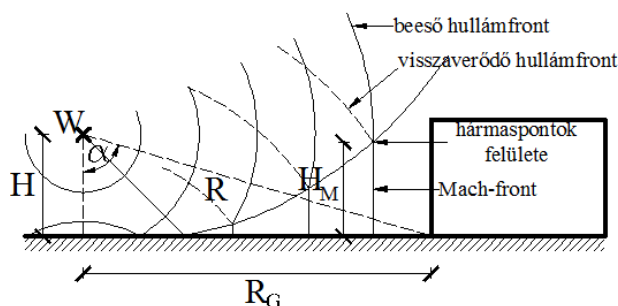
4. táblázat A robbanási típusok csoportosítása viselkedésük szerint

A **szabad légterű robbanás** esetén a lökeshullám gömbszimmetrikusan terjed, és nem szenved felerősítő hatást, amíg el nem éri a vizsgált felületet. Ilyen viselkedéssel írható le a levegőben felrobbantott atombomba. Ezt látható az alábbi ábrán:



7. ábra Szabad légterű robbanás

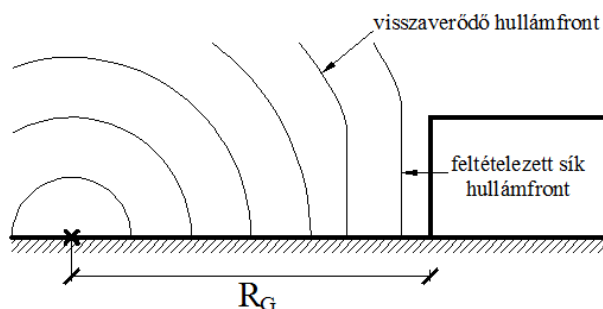
A **korlátolt szabad légterű robbanás** esetén a földről visszaverődő hullám hatására kialakul a Mach – visszaverődés, mielőtt még a front elérné az épületet. A [3] alapján azokat a robbanásokat tekinthetjük ilyen esetnek, amikor a robbanás egy 1-2 emeletes ház magasságának kb. háromszoros magasságában történik. Speciális rendeltetésű légi bombák vagy repülő szerencsétlenségek tartozhatnak ebbe a kategóriába.



8. ábra Korlátolt légterű robbanás

Földközeli robbanás esetén a robbanás közvetlenül a talaj felszínén történik, a lökeshullám félgömbszerűen terjed, amelyet felerősít a földről való visszaverődés. A lökeshullám energiája így megközelítőleg 1,8-szorosa a szabad légterű robbanásnak. Ha a talajt teljesen merev visszaverő felületnek tételezzük fel, és nincs kráterképződés, akkor az értékek pontosan 2-szer akkorák lennének, mint a szabad légterű robbanásnál. A különbséget elég a túlnyomási csúcsértéknél, a származtatott mennyiségek azzal együtt változnak. Közelítésképp a sík hullámok modelljét alkalmazhatjuk, ami egyenletes nyomást fejt ki a homlokfalra. Ez a közelítés meg-

tehető, mivel egy általános magasságú épületnél a felsőbb szintek nyomásának késése ezredmásodpercekben mérhető, ami a t_+ lecsengési időhöz képest kicsi. A terroristatámadások például az autóbombák főleg ebbe a csoportba tartoznak. A modellt a következő ábra szemlélteti:

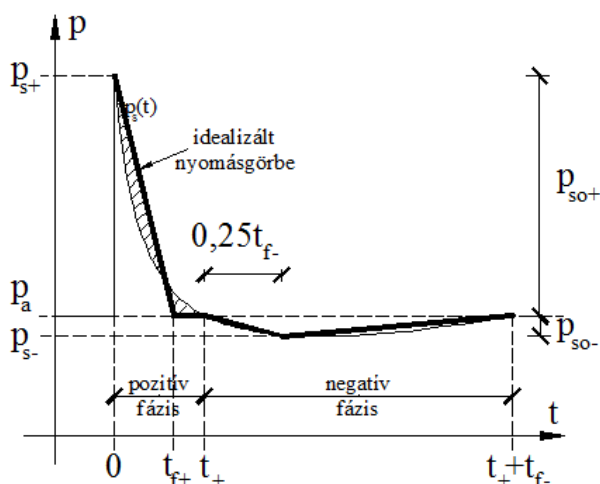


9. ábra Földközeli robbanás

Idealizált lökésdiagram

A továbbiakban a föld közeli robbanásokat vizsgálom részleteiben. Ennél az esetről megjegyzendő, hogy a robbanás a talajban földrengésszerű hullámokat produkál, amiből gyorsulások számíthatók az épület alapjánál, azonban ennek hatása csekély, így ezen a szinten elhanyagoljuk.

A teher számításához ismernünk kell a lökeshullám túlnyomási csúcsertékét, a fajlagos impulzusmennyiséget, a dinamikus nyomást és a lecsengési időket. Hogy ezt megtehesük, első lépésben létre kell hozunk egy idealizált nyomásgörbét, amely az alábbi ábrán látható:



10. ábra Földközeli robbanás idealizált nyomásgörbéje [3]

A dinamikus nyomás maximuma a Rankine – Hugoniot - egyenletekből meghatározható, értéke:

$$q_o = \frac{5}{2} \cdot \frac{p_{so+}^2}{p_{so+} + 7 \cdot p_a} \quad (19)$$

Az idealizált lecsengési időket mind a pozitív, mind a negatív fázisra a valódi és az idealizált diagramok alatti terület egyenlőségének feltételéből kapjuk:

$$t_{f+} = 2 \cdot \frac{i_{s+}}{p_{so+}}, \quad t_{f-} = 2 \cdot \frac{i_{s-}}{p_{so-}} \quad (20)$$

A pozitív fázis idealizált lecsengési ideje az eredeti függvény konvex volta miatt biztosan kisebb lesz a valóságosnál, így az idealizált diagram ezen a szakaszon zérusértékű lesz.

Nyílások nélküli, téglatest alakú épület terhei

Ebben a pontban egy egyszerű épületre ható földközeli robbanásterhek meghatározásával foglalkozunk. Egyszerűsítésként feltesszük, hogy a robbanás kellően távol történt az épülettől, vagyis az azt érő hullámok görbülete elhanyagolható, így a teljes felületre azonos nyomás hat, továbbá, hogy az épület alacsonyabb a síkhullám magasságánál.

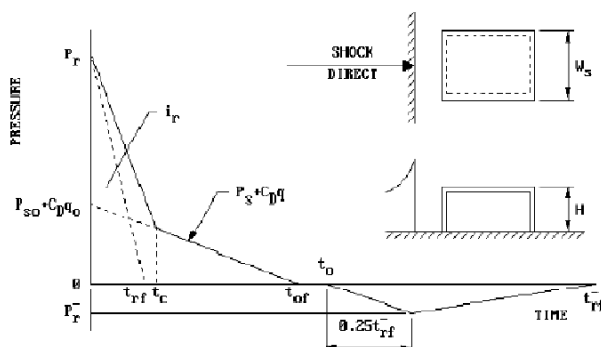
A teher négy részből tevődik össze:

- a túlnyomási csúcserőből származó erőkből;
- a dinamikus nyomásból származó erőkből;
- a visszaverődésből származó többlet erőkből és
- a negatív túlnyomásból származó erőkből.

Az épület geometriája nagyban befolyásolja a fenti négy terhelési csoport jelentőségét. Vizsgáljuk külön az épület határoló falaira jutó terheket.

Homlokfal terhei

Ennek az esetnek a vázlata az alábbi ábrán látható:



11. ábra Homlokfalra ható nyomás időtörténete [3]

Azzal a feltevéssel élünk, hogy a hullámfront merőlegesen éri a homlokfalat. Ekkor a már megismert visszaverődési jelenség következik be, és a homlokfalon kialakuló statikus túlnyomás a visszaverődési tényező értéke szerint megnövekszik. A visszaverődés hatásának leépülési idejét t_c -vel jelöljük. A hullámfront megérkezése után ennyi idő elteltével áll vissza a túlnyomás értéke arra, amit a statikus túlnyomás és a dinamikus nyomás összege adna. Innen lineárisan csökken a nyomás, amíg a már ismertetett módon kiszámított idealizált lecsengés időtartama nulla nem lesz. A negatív fázis első negyedben a túlnyomás tovább csökken p_r -értékre, majd visszaáll zérusra. A t_c az időtartam, ami alatt a hullám megkerüli az épületet, vagyis közelítően [1]:

$$t_c = \frac{3 \cdot S}{U}, \quad (21)$$

ahol S a homlokfal magasságának vagy szélességének fele közül a kisebb. Ezután a falra ható nyomást a statikus nyomás és a dinamikus nyomás egy C_D formátényezővel (négyzet esetén ez 1-re vehető) szorzott értékének összege adja. A pozitív szakaszon a nagyon kis időtartamok

és a t_c -re felírt képlet közelítő volta miatt el kell végeznünk egy ellenőrzést, miszerint az átadódó pozitív fajlagos impulzus nem lehet nagyobb a végtelen síklap esetén kialakuló értékénél, amelyet a 4. ábra nomogramjából kaphatunk. Ha a végtelen síklap mégis kisebb értéket ad, akkor ezzel a modellel folytatjuk tovább a számítást és az előző bilineáris diagram helyett egyszerű háromszög alakot alkalmazunk az alábbi idealizált lecsengési idővel:

$$t_{rf+} = 2 \cdot \frac{i_{r+}}{p_{r+}}. \quad (22)$$

A negatív fázis lecsengési ideje hasonlóan számítható:

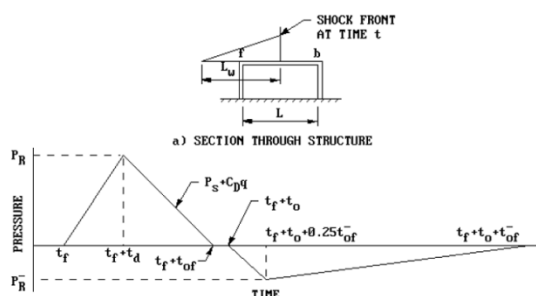
$$t_{rf-} = 2 \cdot \frac{i_{r-}}{p_{r-}}. \quad (23)$$

Ha a homlokfal a hullámfront terjedési irányával a szöget zár be, akkor egyszerűen i_r helyett i_{ra} , p_r helyett p_{ra} -val számolhatunk.

Oldal- és hátfal, valamint a tető terhei

Az oldalfalak és a tető terhei a lökéshullám hosszának (L_w) ismeretében határozható meg.

Az egyes falszakaszok minden pontjára előállítható egy idealizált terheléstörténet, amely feltételezve, hogy a fal nem túl hosszú a lökéshullámhoz viszonyítva (ezt az elöl és hátul kialakuló túlnyomás maximumok összehasonlításával dönthetjük el), jó közelítéssel azonos az egész felületre.



12. ábra Oldalfalra és tetőre ható nyomás időtörténete [3]

A [3] bevezet egy C_E tényezőt, amely a falhossz és a lökéshullám hosszának arányától függ, és a p_r kalibrálására szolgál. A dinamikus nyomás formatényezőjére a [3] az alábbi értékeket javasolja:

A dinamikus nyomás csúcserőértéke	Formatényező
[psi]	[-]
0-25	-0,4
25-50	-0,3
50-130	-0,2

5. táblázat A formatényező a dinamikus nyomás csúcserőértékének függvényében [3]

Azonban a széltehernél megszokott formulák és zónafelosztás is alkalmazható. A felszökési (t_d) és az idealizált lecsengési idő (t_{f+}) a szintén meghatározható [3] segítségével.

Hátsó fal esetében az eljárás hasonló az előzőekhez az ott érvényes tényezőkkel számolva.

Ha az előzőekben bemutatott módszereknél pontosabb eljárásokra van szükség, esetleg komplex, új jelenségeket szeretnénk kezelni, elkerülhetetlen, hogy áttérjünk a numerikus megoldásokra.

Két szintet különböztetünk meg, az elsőt **szemi-empirikusnak** nevezik, melyek többnyire sugárkövetéses algoritmusokat használnak. Ezzel csak egyszerű geometriájú, merev peremekkel rendelkező problémák kezelhetők megfelelő pontossággal, de az általános tervezéshez ez többnyire elegendőnek bizonyul.

A második szintet a **numerikus differenciálegyenlet megoldók** jelentik. A komplex vizsgálatokhoz itt már a hullámot közvetítő közeg – d ami többnyire folyadék vagy gáz – és a szilárd szerkezet kölcsönös egymásra hatását is figyelembe tudjuk venni. A probléma rendszerelméleti megközelítésével két választási lehetőségünk adódik. Kezelhetjük a teljes rendszert egy egységként, vagy különböztetve célszerűen a két kölcsönható fázisra. A gyakorlat szinte kizárólag ez utóbbit alkalmazza, mivel nem igényel feladatspecifikus megoldóeljárásokat, mint az első, és mindkét alrendszerhez a neki legmegfelelőbb numerikus megoldóeljárás rendelhető. Például a szilárd fázis egyensúlyi differenciálegyenlet-rendszerét a **végelemek módszerével** (FEM), míg az áramlási tér transzportegyenleteit a **véges térfogatok módszerével** (FVM) kezelhetjük. Ha alrendszerekre bontjuk a feladatot, akkor biztosítanunk kell a köztük lévő kommunikációt, esetünkben ezt **fluid structure interaction**nek (FSI) nevezik. Erre is két lehetőségünk adódik. Az első az úgynevezett **egyirányú kapcsolat** (weak coupling), amely egyirányú kommunikációt biztosít az alrendszerek közt, praktikusán a gáz nyomását átadja a szilárdtest megoldónak peremfeltételként, de az ennek következtében fellépő deformációk már közvetlenül nem hatnak vissza az áramlási térre. Akkor alkalmazandó, amikor az egyik rendszer dominálja a másikat. A másik változat **kétirányú kapcsolást** (strong coupling) biztosít, ezáltal jóval nagyobb számítási igénye is lesz. Ekkor az áramlási tér megoldása során a peremeken kapott feszültségek a szilárd test változó peremfeltételeit jelentik, míg annak elmozdulásai az áramlási tér változó peremfeltételeit adják. Megemlítendő, hogy ha a szilárd testeket a modellezés során merevnek tekintjük, akkor tipikusan a valóságosnál nagyobb teherértékeket kapunk, vagyis a biztonság javára térünk el. Fontos megjegyezni, hogy a robbanások numerikus kezeléséhez a folyadékdinamikában megszokott egyenleteket ki kell egészíteni a robbanóanyag állapotegyenletével, amelynek paramétereit meghatározni fáradságos munka lehet.

ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk hasznos eszközként szolgálhat a katonai és az építőmérnöki területen mozgó szakemberek számára. Gyors és hatékony eszközt ad a kezükbe mind a már meglévő épületek robbanással szembeni biztonságának megítélésének, mind az új épületek robbanással szembeni tudatos tervezésének első lépéscsokján, a **terhek közelítő becslésében**.

A **robbanóanyagok** egyenértékűsítési módszerével és az arányosított távolság bevezetésével szabványosítani tudtuk a **robbanás jelenségét**, a szabadon terjedő **lökéshullám** jellemzőit megismerve kiválasztottuk az épületekre kifejtett terhelés szempontjából meghatározó para-

métereket (statikus túlnyomás, lecsengési idő, fajlagos impulzus), ezek után a hullám útjába kerülő merev akadályok hatását elemezve bevezettük a **visszaverődési** együtthatót és felismertük a Mach - visszaverődést. A robbanások csoportosítását követően a szándékos robbanások szempontjából legfontosabb nyílt terű, földközeli robbanások példáján keresztül útmutató jelleggel, érintőlegesen felvázoltam a **terhek felvételét** jelentő szabvány szintű eljárás néhány lépését.

A dolgozat **hazai előírások hiányában** erőteljesen támaszkodik a témában élenjáró és eddig a legszélesebb körű vizsgálatokkal bíró, az Amerikai Védelmi Minisztérium által elkészített, kiadványokra. Egyben a figyelmet is felhívva a téma hazai viszonyok közt elhanyagoltságára.

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.”

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] G. C. MAYS, P. D. SMITH: Blast effects on buildings, Thomas Telford, London, 1995, ISBN: 0-7277-2030-9
- [2] ROMÁN Zsolt: Épületen kívüli robbanások modellezése és vázas épületen való alkalmazása Diplomamunka 2010 Budapesti Műszaki Egyetem
- [3] U.S. Department of Defense: TM 5-1300 Structures to resist the effects of accidental explosions, 1990
- [4] U.S. Department of Defense: UFC 4-010-01 Minimum antiterrorism standards for buildings, 2012
- [5] C. E. NEEDHAM: Blast waves, Springer, Berlin, 2010; ISBN: 978-3-642-05287-3
- [6] M.Y.H. BANGASH, T. BANGASH: Explosion-Resistant Buildings, Springer, London, 2006; ISBN: 978-3-540-20618-7
- [7] VARGA József: Robbantás és műszaki zárás, Zrínyi Miklós Katonai Akadémia, Műszaki Tanszék, 1983