

# AZ ATOMERŐMŰRE TÖRTÉNŐ REPÜLŐGÉP-RÁZUHANÁS ÉPÍTŐMÉRNÖKI ASPEKTUSAI

LACZÁK LILI ESZTER\* – KÁROLYI GYÖRGY\*\*

\*PhD-hallgató. BME, Hidak és Szerkezetek Tanszék. Budapest, 1111 Műgyetem rkp. 3.

Fax (titk.): (+36-1) 463-1784. E-mail: laczak.lili@epito.bme.hu

\*\*az MTA doktora, egyetemi tanár. BME, Nukleáris Technikai Intézet.

Budapest, 1111 Műgyetem rkp. 9. Fax (titk.): (+36-1) 463-1954. E-mail: karolyi@reak.bme.hu

A repülőgép-becsapódáshoz tartozó extrém terhek valószínűsége átlagos építmények esetén elhanyagolható, így az általános tervezési előírások, szabványok ezeket nem tartalmazzák. Kiemelt létesítmények, például atomerőművek esetében azonban a lehetséges következmények súlyossága miatt mindenképpen foglalkoznunk kell ütközések hatásaival, az előírt vizsgálatok a tervezési alapon is megjelennek. Cikkünk nagy merevségű szerkezetbe történő repülőgép-ütközés hatásait tárgyalja építőmérnöki szempontból. Az atomerőmű konténmentjének, a hermetikus teret határoló szerkezetnek a falai 1–1,5 m vastagságú vasbeton anyagú, sűrűn, több rétegben vasalt falak, így a vasbeton anyag viselkedése jelentős mértékben meghatározza az ütközés következményeit. Röviden összefoglaljuk a beton és a betonacél viselkedésének jellemzőit magas hőmérséklettel járó, ütközés jellegű terhek esetén. Ezen felül bemutatjuk az ütközés globális (teljes szerkezetet érintő) és lokális (az ütközési zónában lejátszódó, az állékony-ságot nem veszélyeztető) hatásait. Kitérünk a hatások lehetséges modellezésére, a napjainkban leginkább elterjedt számítási, vizsgálati módszerekre.

**Kulcsszavak:** repülőgép-ütközés, lokális hatás, globális hatás, atomerőmű, konténment

## BEVEZETÉS

Szokásos épületeinket, építményeinket sokféle hatás érheti élettartamuk során. A szerkezet mindennapi igénybevételein túl figyelembe kell venni szélsőséges időjárási körülményeket (nagy szél, feltorlódott hó), földrengést, tüzeseteket. A tervezés alapjait rögzítő szabványok tartalmazzák, hogy milyen gyakoriságú események hatását kell vizsgálni a tervezés során. Természeti jelenségek esetén az elvárt biztonság eléréséhez az elmúlt 100–150 év időjárási, illetve a 475 év visszatérési idejű földrengés jellemzői alapján határozzák meg a tervezéskor figyelembe veendő hatásokat.

Olyan különleges események, mint egy repülőgép becsapódása, átlagos építmények esetén elhanyagolhatóan kis valószínűségűek, ezért a szokásos szabványok nem tartalmazzák rájuk vonatkozó előírásokat. Kiemelt létesítmények, mint például atomerőművek esetén az esetleges extrém következmények miatt azonban a szokásos szabványok helyett különleges irányelvek érvényesek. Egy repülőgép-becsapódás nem okozhat olyan szerkezeti károkat egy erőműben, amik annak biztonságos leállítását és az aktív zóna hűtését veszélyeztetnék, vagy radioaktív anyag kijutását eredményeznék. Az erőművek reaktorát és a nagy fontosságú egységeit a környezet-

tól való hermetikus elszigetelés érdekében egy, a hűtőközeg-vesztéssel járó üzemzavar utáni jelentős belső nyomásra méretezett (min. 1–1,5 m falvastagságú) vasbeton épületben, a konténmentben helyezik el. A konténment biztosítja a reaktor, a pihentető medence és a biztonsági szempontból fontos rendszerek védelmét a külső hatásokkal szemben, így a repülőgép-beccsapódás esetén megvédi a reaktor biztonságos állapotban tartásához szükséges rendszereket, illetve megakadályozza a radioaktív anyagok kijutását a környezetbe. Az újabb típusú reaktorok esetén gyakran alkalmaznak kettős konténmentet, melyek közül a belső a radioaktív közegek kijutását akadályozza meg, a külső pedig a külső veszélyek (robbanás, repülő tárgy, repülőgép-rázuhanás, tornádó stb.) elleni védelmet biztosítja.

Repülőgép-rázuhanás lehetőségét a 20. század közepe óta vizsgálják, elsődlegesen a katonai repülőterek közelében elhelyezkedő erőművek esetében. A vizsgálatok sokáig csak kisméretű, könnyű vadászgépek véletlenszerű ütközésére terjedtek ki, ami főleg a gépek fel- és leszállása során következhet be. A tervezési alapban a  $10^{-7}$ /év gyakoriságnál nagyobb gyakorisággal rázuhanó légi jármű ütközésének határait (ütközés, kiömlő üzemanyag robbanás/tűz) kell figyelembe venni. A 2001. szeptember 11-ei terrortámadások sajnos egy új eshetőségre is felhívták a figyelmet, mely szerint akár utasszállító gépek nagy sebességű ütközése sem kizárható (bár természetesen továbbra is nagyon kis valószínűségű). Ennek hatására – az országok legtöbbjének nukleáris biztonsági követelményei szerint – az új atomerőművek tervezésénél figyelembe kell venni a nagy polgári légi szállítójármű atomerőműre történő rázuhanását is, függetlenül annak valószínűségétől. Ezzel lényegében a szándékos rárepülés esetét is kezeli az atomerőmű tervezője. Ebben az esetben a követelmény sajátos, vagy azt kell garantálni, hogy a konténment ép marad, vagy azt, hogy nem következik be a rázuhanás komplex hatására sem zónaolvasás.

## MI TÖRTÉNHEZ?

Azt, hogy milyen szerkezeti károkat okozhat egy repülőgép beccsapódása, számos tényező befolyásolhatja: a repülőgép mérete, tömege, merevsége, az ütközés iránya, az ütközési zóna elhelyezkedése és mérete, a (cél)szerkezet jellemzői. Az ütközés következményeit két nagy csoportra oszthatjuk: globális és lokális hatásokra. Globális a hatás, ha befolyásolja a szerkezet egészének viselkedését: el kell kerülni az összeomlást, súlyos károsodásokat, felborulást, a túlzottan nagy deformációkat. A lokális hatásokat a vasbeton-szerkezet anyagának viselkedése határozza meg: az ütköző test beékelődhet, repedéseket okozhat minkét oldalon, szélsőséges esetben átllyukaszthatja a falat, illetve át is hatolhat rajta. Az elsődleges hatásokon túl figyelembe kell venni, hogy az ütközésből a szerkezeten keresztül átadódó intenzív rezgés a konténmenten belül elhelyezkedő technológiai rendszereket (reaktor, csővezetékek stb.) is károsíthatja, valamint a szétrepülő törmelékdarabok másodlagos lövedékként is veszélyeztetik a biztonság szempontjából fontos rendszereket. Az ütközéskor a kiömlő kerozin fellobbanása (fire-ball) és tartós égése komoly veszélyt jelent.

## NÉHÁNY SZÓ A VASBETON VISELKEDÉSÉRŐL

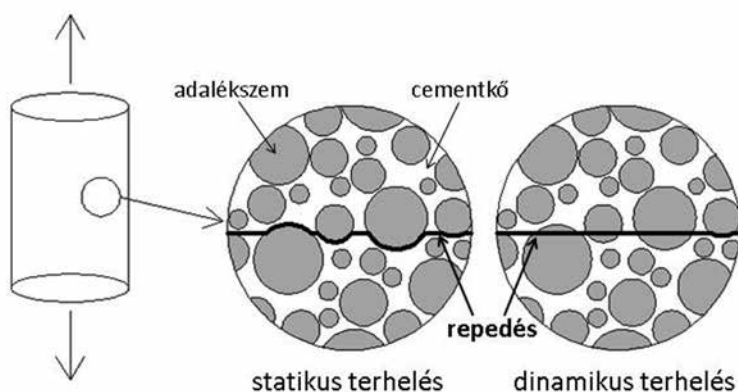
Fontos néhány szót ejteni a hermetikus védőfalak építőanyagáról, a vasbetonról, ugyanis az ütközés folyamatának elemzésénél az egyik legnagyobb bizonytalanságot a vasbeton anyag viselkedésének ismerete, illetve annak bizonytalansága okozza.

Az építőanyagok többségének viselkedése nagymértékben függ a terhelés sebességétől, pontosabban attól, hogy milyen gyorsan következnek be a deformációi. Ennek mérőszáma az alakváltozási sebesség, amely a fajlagos (egységnyi hosszra vonatkozó) hosszváltozás ( $\epsilon$ ) sebessége. Néhány jellemző terheléshez tartozó alakváltozási sebességet mutat be az 1. ábra. Sebességük szerint a terhelések három csoportba oszthatók: statikus, kvázi-statisztikus és dinamikus terhekre. Az első két csoportban még elhanyagolható az anyagok terhelési sebességtől való függése, míg dinamikus terhelés estén ezt mindenképpen figyelembe kell vennünk.



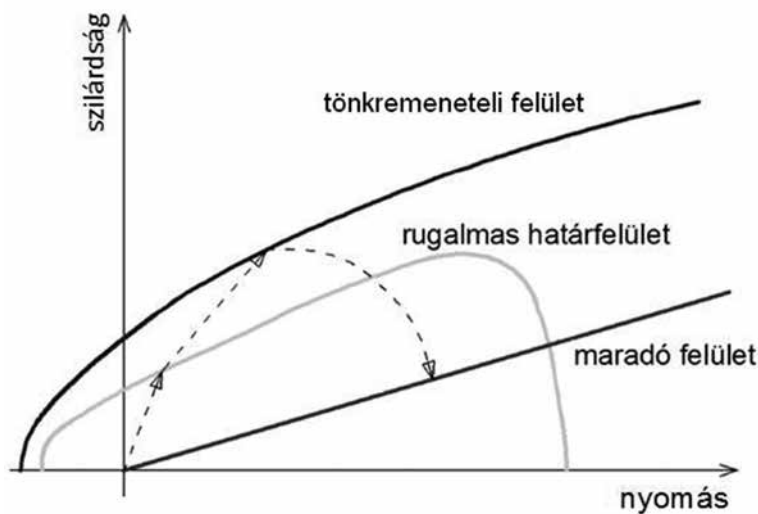
1. ábra. Terhelések alakváltozási sebesség szerinti csoportosítása ([1] alapján)

A tipikus betonok és betonacélok viselkedése jól ismert a szerkezetre tartósan ható terhek esetén, azonban nagy terhelési sebesség és ütközésszerű teher működésekor ettől lényegesen eltérő viselkedés tapasztalható. Kemény testek (pl. fegyverlővedék, acélgolyó) ütésének hatására nagyon gyors repedésnövekedés következik be, az anyag ridegebben viselkedik, ami mérnöki szempontból rendkívül kedvezőtlen, hisz a szerkezet hirtelen meggyöngyösödik. Kedvező tapasztalat viszont az, hogy a beton szilárdsága és vele a teherbíró képessége is megnő gyors terhelések esetén. Ezt a két ellentétes viselkedést megmagyarázza, ha megvizsgáljuk, hogy hogyan is alakul a repedés terjedése statikus, illetve dinamikus terhelés esetén. A beton a tönkremenetel során kialakuló repedések terjedése szempontjából ún. kvázi-rideg anyagként viselkedik, a repedések csúcsa előtt mikrorepedésekkel teli áthidaló zóna alakul ki, mely gátolja a repedések gyors továbbhaladását. A 2. ábrán látható betonhenger lassú húzásakor a repedés megkerüli a nagyobb szilárdságú adalékszemeket, míg gyors terheléskor erre „nincs ideje” és az adalékszemeken áthalad, ezzel növelve a teherbírást. A betonacél szilárdsága nagy terhelési sebesség hatására a betonéhoz hasonlóan nő. Azonban meg kell jegyeznünk, hogy az ütközéssel járó magas hőmérséklet hatására az acél lágyul, ellenálló képessége romlik.



2. ábra. Repedés terjedése statikus és dinamikus húzás esetén ([2] alapján)

Az eddigiek alapján látható, hogy mennyire összetetten viselkedik a vasbeton, így jelentős a kísérletek szerepe. A kísérletek irányulhatnak az anyagi viselkedés vagy teljes szerkezetek viselkedésének kutatására. A kísérletek eredményeinek értékelését nehezíti, hogy például az acéllal ellentétben a betont nem a mikrostruktúra (kristályszerkezet), hanem az alkotórészek (cementkő, kavics, pórus, repedések) szerkezete határozza meg. Ennek fontos következménye az ún. mérethatás, tehát a beton tulajdonságainak a próbatest vagy szerkezet méretétől való függése. A mérethatás miatt a kisméretű modellkísérletek eredményeiből nem lehet egyértelműen következtetni



3. ábra. Beton viselkedését jellemző határfelületek ([3] alapján)

a valós méretű szerkezet viselkedésére, különösen nem repülőgép-beccsapódáshoz hasonló extrém terhek esetén.

A repülőgép-beccsapódással kapcsolatos kísérletek tervezését és kivitelezését az is nehezíti, hogy egy test repülőgép-sebességnek megfelelő sebességre gyorsítása csak különleges kilövőszerkezetek (ágyúk, rakéták) segítségével történhet. A szokásosan alkalmazott ejtési vagy lengősúlyos kísérletekkel nem érhető el megfelelő sebesség (példaképp: egy 20 m magasból leejtett tömeg 20 m/s sebességgel csapódik a földre, ami jelentősen kisebb, mint a repülőgép-ütközések legalább 100 m/s-os nagyságrendje).

A beton anyagjellemzőit a számítógépes modellezés során összetett anyagmodellekkel jellemzik, melyek figyelembe veszik a beton eltérő viselkedését húzásra és nyomásra, a terhelési sebességtől való szilárdságfüggést, a beton tönkremeneteli folyamatait (repedés miatt lágyulás) stb. Az anyagi viselkedés jellemző határfelületeit mutatja be a 3. ábra.

## AZ ÜTKÖZÉS GLOBÁLIS HATÁSA

Repülőgép-beccsapódás esetén a szerkezetet érő globális hatások akkor kerülnek előtérbe, ha a vasbeton fal merevsége jelentősen nagyobb, mint a beccsapódó repülő. Ilyenkor ún. puha ütközés következik be, ami azt jelenti, hogy a fal mozgásai, károsodásai jelentősen kisebbek, mint a repülőben keletkező kár (a repülő lényegében összemorzsosodik a falon). Tapasztalatok alapján ez a jelenség következik be egy vadászipilóta nagy vastagságú falnak történő ütközésekor [4]. Egy Phantom F4 típusú repülőgépet ráerősítettek egy vezetősínen futó szánra, majd rakéták segítségével 215 m/s (770 km/h) sebességre gyorsítva ütköztették egy  $7 \times 7 \times 3,6$  m-es vasbeton tömbnek. A választott ütközési sebesség egy átlagos vadászipilóta fel-, illetve leszállási sebessége volt. A beccsapódás során a repülőgép gyakorlatilag lassulás nélkül tört össze a vasbeton falon, amely azonban az ütközési zónában leállott pár cm-es felszíni réteget leszámítva nem szenvedett károsodást (4. és 5. ábra). A kísérlet egyik célja az ütközés során a falra ható erő meghatározása volt. Ennek érdekében légpárnákra helyezték a falat, ami így súrlódásmentesen tudott csúszni, a mért gyorsulásból az ütközési erő számítható volt.

Ahhoz, hogy a célszerkezet (vasbeton fal) viselkedését vizsgálhassuk, ismernünk (vagy becsülnünk) kell azt az erőt, amelyet a repülőgép fejt ki rá. Ez az erő folyto-

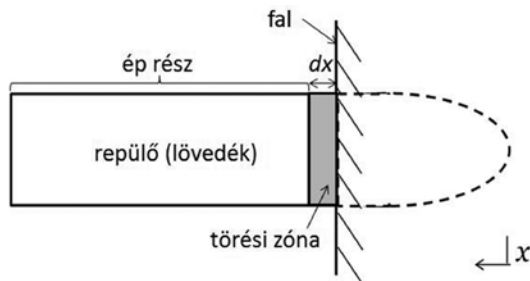


4. ábra. Phantom F4 vadászipilóta ütközése vasbeton falba [4]



5. ábra. A vasbeton céltárgy a Phantom gép ütközése után [4]

nosan változik az ütközés során, így egy időben változó teherfüggvény segítségével írható le. Az ütközési erő nagysága és időbeli alakulása függ a repülőgép és a becsapódás korábban felsorolt jellemzőitől, valamint attól, hogy milyen mértékben hat vissza a célszerkezet mozgása az ütközés lefolyására. Mivel ez a visszahatás elegendően nagy merevségű (falvastagságú) szerkezetek esetében elhanyagolható, így a számítási módok nagy része tökéletesen merev célszerkezetet feltételez. A mindmáig leginkább alkalmazott analitikus számítási módszert Riera [5] fejlesztette ki, amikor az Amerikai Egyesült Államokban tömegessé vált az atomerőművek építése. Modelljében a falra merőleges (normális irányú) ütközéseket vett alapul, és feltételezte, hogy az ütközés során a becsapódó repülőgépnak mindig csak közvetlenül a falhoz érkező része morzsolódik össze. A törési jelenséget úgy modellezte, hogy a repülő egy  $dx$  hosszúságú kis darabja letörik az ép részről, majd sebessége lelassul a célszerkezet (merev szerkezet esetén 0) sebességére.



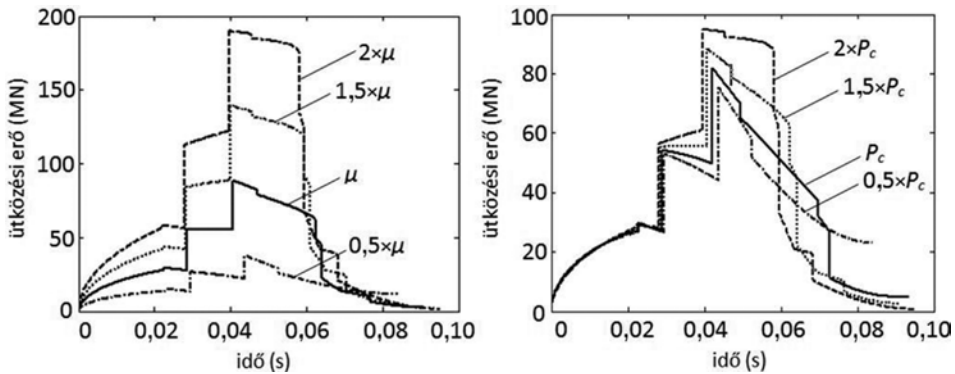
6. ábra. Riera modellje ([6] alapján)

A Riera-módszer nagy előnye, hogy a célszerkezetre ható erő csak a repülőgép tömegeloszlásától, hossz-mentén változó szilárdságától és az ütközés kezdősebességétől függ:

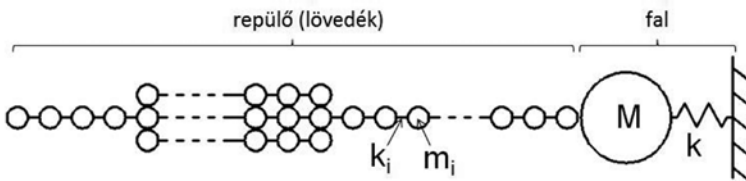
$$F = P_c + \mu \cdot v^2$$

ahol  $F$  az ütközés során a falra ható erő,  $P_c$  és  $\mu$  a repülő aktuálisan törő részének szilárdsága és fajlagos tömege,  $v$  pedig a törés pillanatnyi sebessége.

A tömegeloszlás, és így a fajlagos tömeg a gép adatai alapján közvetlenül számolható, a törési ellenállás meghatározása azonban nehéz feladat, bizonytalan eredménnyel. A kísérleti eredmények azt mutatják, hogy egy átlagos vadászrepülő esetén az ütközési erő mindössze 10–15%-a adódik a törési ellenállásból és 85–90%-a a tömeg- és sebességfüggő rész, így ennek a bizonytalanságnak aránylag kicsi szerep jut. Ennek szemléltetésére egy Phantom F4 vadászgéphez hasonló paraméterekkel és 215 m/s sebességgel ütköző gépből kiindulva 0,5, 1, 1,5, 2-szeresére változtattuk a gép részeinek fajlagos tömegét, majd törési ellenállását. Ennek a számításnak az eredményeit mutatja a 7. ábra. Látható, hogy az ütközési erőre lényegesen nagyobb hatása van a fajlagos tömeg megváltoztatásának. Természetesen ez csak vadászgép jellegű ütköző testek esetén igaz, egy jelentősen keményebb tárgy esetén a törési ellenállás is dominánssá válhatna.



7. ábra. Ütközési erő változása a fajlagos tömeg és a törési szilárdság változtatásának hatására

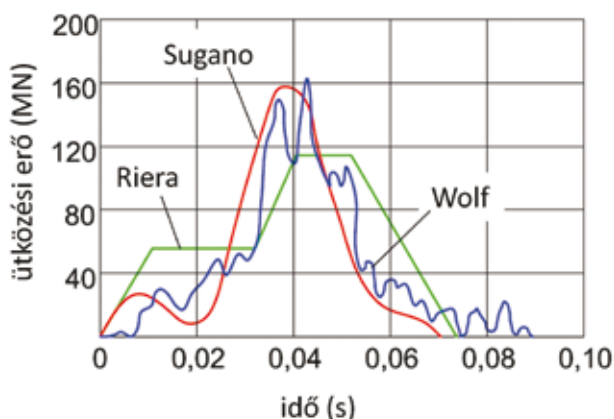


8. ábra. Wolf modellje ([7] alapján)

Riera modellje mellett megjelentek más egyszerűsített megoldások is. Wolf [7] például sorba kötött, tönkremenetelre képes rugókkal és képlékenyen ütköző tömegekkel modellezte a repülőtet. A Riera-moddelllel ellentétben a célszerkezet elmozdulásait is figyelembe vette, egy rugalmasan megtámasztott tömeg segítségével, ahogy azt a 8. ábra mutatja.

A 9. ábrán a Riera és Wolf modelljével kapott reakcióerő lefutások láthatóak Sugano valós kísérleti eredményeivel összehasonlítva. Látható, hogy mind a Riera-moddell, mind Wolf modellje jól közelíti Sugano valós méretű kísérlete során mért eredményeit.

A szabványok és előírások többsége, egyszerűsége és megfelelő pontossága miatt, Riera modelljét követi. A gyártóktól kapott adatok segítségével több repülőgéptípushoz előállították az ütközési erő-idő függvényeket. Ezeket az időfüggő terheket működtetik a szerkezetek (többségében végeselemes módszert alkalmazó) számítógépes modelljeire. Az elmúlt években a számítógépek fejlődésével és kapacitásának növekedésével elérhetővé váltak a mindennapi felhasználók számára is olyan programok, amelyek nagy sebességu és nagy deformációkkal járó ütközési feladatokat is képesek megoldani. Ezzel lehetővé vált olyan modellek alkalmazása, amelyekben a repülőgép és a fal is egyszerre modellezhető és a teljes ütközési folyamat vizsgálható. A modellezés részletességének csupán a bemenő adatok bizonytalansága szabhat határokat. Ugyanakkor felmerül a kérdés, hogy például egy utasszállító ütközésének vizsgálatakor van-e annak jelentősége, hogy modellezzük-e a gépben található üléseket, kisebb szerkezeti részeket. A Riera-moddell és a Wolf-moddell egyszerűsége ellenére is pontos eredményeinek fényében ezek a részletek nem játszhatnak lényeges szerepet. A még elhanyagolható egyszerűsítések becslése minden esetben a mérnökök feladata. A vizsgálatok nagy részében a bizonytalanságok figyelembevételére paraméteres vizsgálatokat alkalmaznak, a nagyszámú vizsgálat eredményét statisztikai módon értékelik.



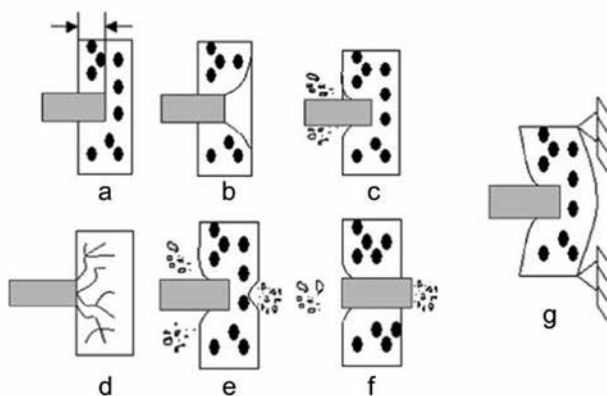
9. ábra. Ütközési erő-idő függvény számított, illetve mért grafikonja ([4, 8] alapján)



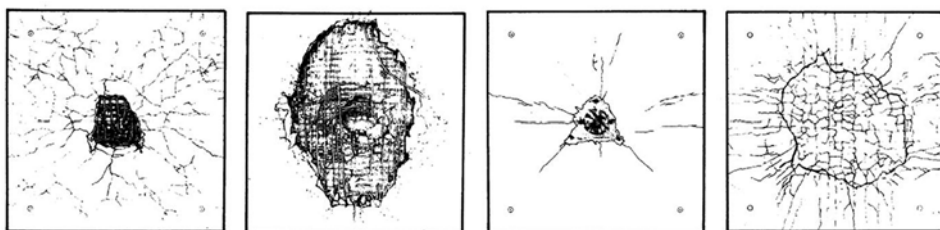
## AZ ÜTKÖZÉS LOKÁLIS HATÁSA

A 10. ábra ütközések vasbeton falra gyakorolt lehetséges lokális hatásait mutatja. Atomerőművek esetén minden olyan hatás elkerülendő, amely a védett (reaktor felőli) oldalon károsodást okozhat.

A lokális hatások akkor válnak elsődleges fontosságúvá, ha az ütköző test a falhoz képest elegendően nagy merevségű, tömegű és/vagy sebességű ahhoz, hogy csak kis mértékben deformálódjon az ütközés során. Ilyen lehet egy kemény és nagyon gyors lövedék, egy meglendített és a szerkezetbe csapódó acélgolyó, vagy repülőgép ütközésekor a leszakadó hajtómű. Utóbbi hatását többek között Muto és Sugano kutatócsoportja [10] vizsgálta. Kísérleteikkel a mérethatás jelentőségét is kimutatták: lövedékeik 1:7,5, 1:2,5 és 1:1 arányban modellezték a már bemutatott globális vizsgálat-hoz is használt Phantom-típusú gép 3 m hosszú és 1,7 t tömegű hajtóművét. A lövedékek méretével párhuzamosan a célszerkezetet jelentő vasbeton panelek mérete is változott. A valós méretű kísérlet esetén 7×7 m alapterületű 0,9–1,6 m-ig változó vastagságú lemezeket használtak. A jelenségek bemutatásaképp a 11. ábra a valós



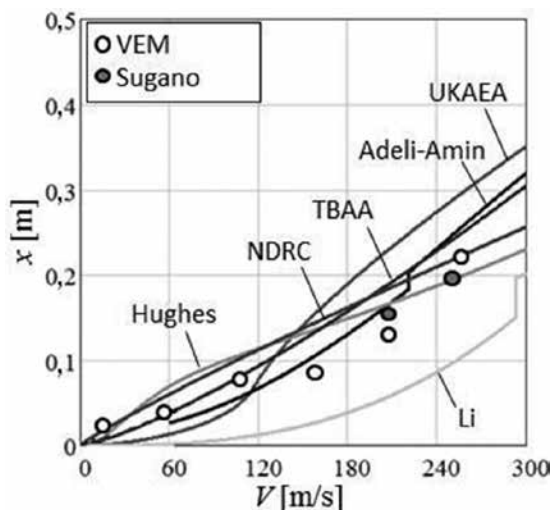
10. ábra. Ütközés lokális hatása vasbeton szerkezet esetén: a) behatolás, b) szakadókúpos repedés, c) mállás (külső oldal), d) repedés, e) varasodás (védett oldali mállás), f) átfürödés ([9] alapján)



11. ábra. Hajtómű ütközésének lokális hatásai [10]. Balról jobbra: 0,9 m vastag fal ütközés felőli és védett oldal, 1,6 m vastag fal ütközés felőli és védett oldal

méretű hajtómű ütközésének hatását mutatja 0,9 m és 1,6 m vastagságú falpanelek esetén. Látható, hogy a kisebb falvastagság esetén a lövedék teljesen áthatolt a falon, míg az 1,6 m-es falba befűródott, de a védett oldalon csak repedések jelentek meg.

A Sugano kísérletéhez hasonló vizsgálatok célja elsősorban az, hogy megalapozzanak olyan elméleti alapokon nyugvó, de kísérletekhez igazított (szemiempirikus) képleteket, melyekkel azután kísérletek elvégzése nélkül is jól becsülhetők az egyes károsodási módok elkerüléséhez szükséges falvastagságok, anyagminőségek, betonacél-mennyiségek. Mivel ezek a formulák kísérletekhez igazítottak, így alkalmazhatóságuk korlátozott, nem fedhető le velük minden ütközési eset, ugyanakkor általános esetekben megfelelőek lehetnek. Példaképp a 12. ábrán az 1:2,5 arányú Sugano-tesztben alkalmazott lövedék penetrációs mélység ( $x$ )–ütközési sebesség ( $V$ ) összefüggése látható különböző modellekkel számítva [9, 11]. A körök a valós teszt eredményeit, illetve végeselemes modellünk eredményeit [12] ábrázolják. A diagramon megfigyelhető a különböző számításokkal kapható eredmények eltérése egymástól és a mért eredményektől is.



12. ábra. Penetrációs mélység–ütközési sebesség összefüggése különböző empirikus formulák [9, 11], a Sugano-teszt [10] és végeselemes modell (VEM) [12] alapján

## ÖSSZEFOGLALÁS

Repülőgépek atomerőművekbe történő becsapódása a 20. század közepe óta vizsgált jelenség, ami a megnövekedett légi forgalom, illetve a terrorizmus veszélye miatt napjainkban is aktuális probléma. A számítógépek fejlődése lehetővé teszi egyre összetettebb és részletesebb modellek és szimulációk készítését az ilyen ütközésekről. Ugyanakkor nagy fontosságú az, hogy a jelenségeket globálisan is áttekint-

sük, mivel csak így lehetséges annak megítélése, hogy melyek azok a részletek, amelyek elhanyagolhatóak a vizsgálat során. A számítógépes modellekben számos bizonytalan paraméter található, így azt is el kell döntenünk, hogy melyek azok, amelyek elsődleges fontosságúak, amiknek vizsgálatára nagy hangsúlyt kell fektetnünk. A témával kapcsolatos kutatások egyik lehetséges iránya ennek megfelelően az lehet, hogy a meglévő egyszerűsített modelleket részletesen megvizsgálva és továbbfejlesztve továbbra is a lényeges jelenségekre fektetjük a hangsúlyt a sok bizonytalanságot tartalmazó részletes modellekkel szemben. Ez természetesen nem azt jelenti, hogy nem használjuk ki a számítógépes modellek lehetőségeit, de az egyszerűsített modellekkel kiegészítve alkalmazzuk őket. Hasonlóan fontos vizsgálati irány a kísérletekkel és félempirikus számítási módokkal összehangolt számítógépes szimuláció, amikor a valóságban mért eredmények alapján határozzuk meg a bizonytalan paraméterek értékeit és ezekből kiindulva végzünk szélesebb spektrumú számításokat. A jövő mindenképpen a számítógépes modelleké, de nagyon lényeges, hogy az eredményeket más módszerek segítségével is megbecsülhessük, és így ellenőrizhessük a részletes számítógépes szimulációk eredményeit.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Kutatásunk az MVM Paksi Atomerőmű Zrt., a Jövőnk Nukleáris Energetikusa-ért Alapítvány és az OTKA K 100894 támogatásával készült. Külön köszönjük Dr. Katona Tamásnak a hasznos tanácsokat és Dr. Kövesdi Balázsnak a német nyelvű fordítást.

## HIVATKOZÁSOK

- [1] Vinay Kumar, S.: Ansys Explicit Dynamics with Ansys/Ls-Dyna. *Ansys szoftver bemutató prezentáció*. <http://www.slideshare.net/vinaykumars/explicit-dynamics> (Utolsó megtekintés: 2015. 07. 03.)
- [2] Zielinski, A. J.: *Concrete structures under impact loading. Rate effects, Report 5-84-14, Report 5-84-14, Research No. 2.3.84.07*. Delft University of Technology, Department of Civil Engineering, Delft 1984.
- [3] Ansys Workbench Help, Version: 15.0.0, SAS IP, Inc., 2013.
- [4] Sugano, T. et al.: Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force. *Nuclear Engineering and Design* 140 (1993) 373–385.
- [5] Riera, J. D.: On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces. *Nuclear Engineering and Design* 8 (1968) 415–426.
- [6] Abbas, H. et al.: Aircraft crash upon outer containment of nuclear power plant. *Nuclear Engineering and Design* 160 (1996) 13–50.
- [7] Wolf, J. P. et al.: Response of equipment to aircraft impact. *Nuclear Engineering and Design* 47 (1978) 169–193.
- [8] Forasassi, G. et al.: *Preliminary analysis of an aircraft impact. CIRTEN-UNIPI RL 1059/2010*. Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare della Produzione, Pisa 2010.

- [9] Li Q. M. et al.: Local impact effects of hard missiles on concrete targets. *International Journal of Impact Engineering* 32 (2005) 224–284.
- [10] Muto, K. et al.: *Experimental Studies on Local Damage of Reinforced Concrete Structures by the Impact of Deformable Missile. Part 1-4, Report*. Muto Institute of Structural Mechanics, Central Research Institute of Electric Power Industry. Tokió 1992.
- [11] Teland, J. A.: *A review of empirical equations for missile impact effects on concrete. Report no. FFI/RAPPORT-97/05856*. Norwegian Defence Research Establishment, Kjeller 1998.
- [12] Laczák Lili Eszter – Károlyi György: *Local Effects of Impact into Concrete Structure*. Kézirat. 2015.

## CIVIL ENGINEERING ASPECTS OF AIRCRAFT IMPACT INTO A NUCLEAR POWER PLANT

### *Summary*

Probability of extreme loads caused by an aircraft impact is negligibly low. Therefore, in case of common buildings, such loads are out of the scope of standards and general regulations. Despite their low probability, investigation of impacts can be significant for special facilities such as nuclear power plants (NPPs) because of their severe consequences. Regulations for NPPs include suggestions for modelling, calculation methods and design for aircraft impact, which are part of the basis of design. This paper, from a civil engineering perspective, summarizes the effects of an aircraft impact into rigid engineering structures. NPP containments are usually 1–1.5 m thick reinforced concrete (RC) structures with high amount and density of reinforcement. Consequently, examination of the behaviour of concrete and RC subjected to high loading rates is inevitable. Behaviour of concrete and steel material in case of high temperature and high intensity dynamic loading is also discussed in this paper. Moreover, global and local effects of aircraft impact are also presented together with the possible modelling, calculation and testing methods.

**Keywords:** aircraft impact, local effect, global effect, NPP, containment