



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Tudományos Diákköri Konferencia 2012

Repülőgép ütközése vasbeton szerkezettel



Készítette: Laczák Lili Eszter

Konzulensek: Dr. Károlyi György
Dr. Dunai László

Összefoglalás

A repülőgépek mérnöki létesítményekbe történő becsapódásának vizsgálata 2001. szeptember 11. óta kiemelt jelentőséget kapott, mivel a terrorveszély megnövekedésével korábban csak érintőlegesen vizsgált hatások potenciális veszélyforrássá váltak. A terrortámadások előtt csak viszonylag kevés kutatás vizsgálta, hogy milyen jelenségek játszódnak le akkor, amikor egy nagy tömegű (utasszállító) gép nagy sebességgel ütközik nagy vastagságú vasbeton falba, mint amilyen egy atomreaktor külső határoló fala, napjainkban azonban ennek a jelenségnek a vizsgálata kulcsfontosságú új műtárgyak, létesítmények tervezésekor, illetve régiek felújításakor, biztonsági felülvizsgálatakor.

Jelen TDK dolgozat repülőgép (deformálódó lövedék) nagy vastagságú vasbeton falnak (merev céltárgynak) történő ütközését, és ennek globális hatásait vizsgálja. A dolgozat első felében áttekintjük a témával kapcsolatos kutatásokat, eredményeket, amelyek megfelelő háttérrel nyújthatnak a dolgozat második felét képező önálló vizsgálatoknak. Az eddigi kutatások nagy része modellezés tekintetében Jorge D. Riera brazil építőmérnöknek az 1960-as években kidolgozott alapmodelljét követi. A Riera-féle modell a szakirodalom által elfogadott, számos kísérlettel alátámasztott feltételezéseket tartalmaz, pontos alkalmazása azonban nem minden esetben tisztázott.

A TDK dolgozat második felében a Riera-modell által mutatott jelenségek bemutatására, valamint analitikus eredményeinek egy saját numerikus analízis eredményeivel való összevetésére kerül sor. A numerikus modell az ANSYS végeselemes program explicit dinamikus analíziseket végrehajtó moduljának segítségével készült (LS-DYNA). Az LS-DYNA elsősorban rövid idő alatt lejátszódó, nagy deformációval járó dinamikai feladatok, nagy deformációkat tartalmazó, többszörösen nemlineáris kvázi-statikuss feladatok, illetve kontakt vagy ütközési feladatok megoldására alkalmas.

A vizsgálatok elsősorban a repülőgép viselkedésének elemzésére terjednek ki, ugyanakkor cél annak áttekintése is, hogy milyen mértékben konzervatív feltételezés a céltárgyat merevnek tekinteni. Az analitikus és numerikus vizsgálatok során tapasztalt eltérések okainak feltérképezésével (a repülőben az ütközés során végigfutó lökéshullámok, valamint a jellemző paraméterek szerepe és összehangoltsága) szintén foglalkozunk.

Abstract

Analysing the consequences of potential aircraft impact into engineering structures is an issue of high importance since September 11, 2001. Since the terrorist attacks, phenomena that had been lightly investigated before, have become potential sources of danger. Before the terrorist attacks only few researches had investigated the high velocity impact of a large and heavy aircraft (airliner) into a thick, rigid reinforced concrete wall, such as the outer containment structure of a nuclear reactor. Nowadays the analysis of this phenomenon may become a key issue in case of design of new structures, renovation works or safety tests.

The main goal of this paper is to examine the global effects of impact of an aircraft, as a deformable missile into a high-thickness wall, regarded as a rigid target. In the first part of the study previous research on the issue are summarised that give adequate background for the independent researches that compose the second part of the study. The majority of the previous research is based on and follow the model of Brazilian civil engineer Jorge D. Riera. The Riera model is widely accepted, its assumptions have been verified by several experiments. However, in certain cases the applicability of this model has not been clarified in details.

The second part of the paper, the introduction of Riera's model is complemented by the comparison of its analytic results to our own numerical model results. The numerical analysis has been carried out by the aid of LS-DYNA, the explicit dynamic module of FEM software ANSYS. LS-DYNA can be used for the solution of short-term, large-deformation dynamic problems, non-linear quasi-static problems and contact or impact problems.

Our investigation primarily focuses on analysing the behaviour of the aircraft, but at the same time our goal is to review how conservative is the assumption that the target structure is perfectly rigid. The differences of the analytical and numerical results and their potential origins (propagation of shockwaves, important parameters and their harmonization) are also discussed.

1. A kutatás háttere	5
1.1. Az atomerőművek építőmérnöki szemmel	5
1.2. A vasbeton szerkezetet ütközéskor érő hatások	6
1.3. A vasbeton viselkedése nagy terhelési sebesség esetén	7
1.4. Az ütközések osztályozása	8
1.5. Az ütközések Riera-féle modellje	9
2. Az ütközés modellezése rugalmasan megtámasztott céltárgy esetén	10
3. A kutatás célja és menete	12
4. A modellek bemutatása	12
4.1. Az analitikus modell	12
4.2. A numerikus modell	16
5. A számítások	19
6. Az eredmények összehasonlítása és értékelése	20
6.1. Az összetört géprész hossza	21
6.2. r0, ra1-ra5 jelű esetek	21
6.3. r0, rb1-rb5 jelű esetek	22
6.4. A repülő sebessége	25
6.4.1. r0, ra1-ra5 jelű esetek	25
6.4.2. r0, rb1-rb5 jelű esetek	25
6.5. A céltárgy mozgása	28
6.5.1. ra1-ra5 jelű esetek	28
6.5.2. rb1-rb5 jelű esetek	31
7. Összefoglalás	34
Hivatkozások	36

A címlapfotó és forrása:

F4-Phantom vadászgép és vasbeton fal ütközésének valós-méretű modellje

T. Sugano, H. Tsubota, Y. Kasai, N. Koshika, C. Itoh, K. Shirai, W.A.Von Risemann, D.C.

Bickel, M.B. Parks: Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force.

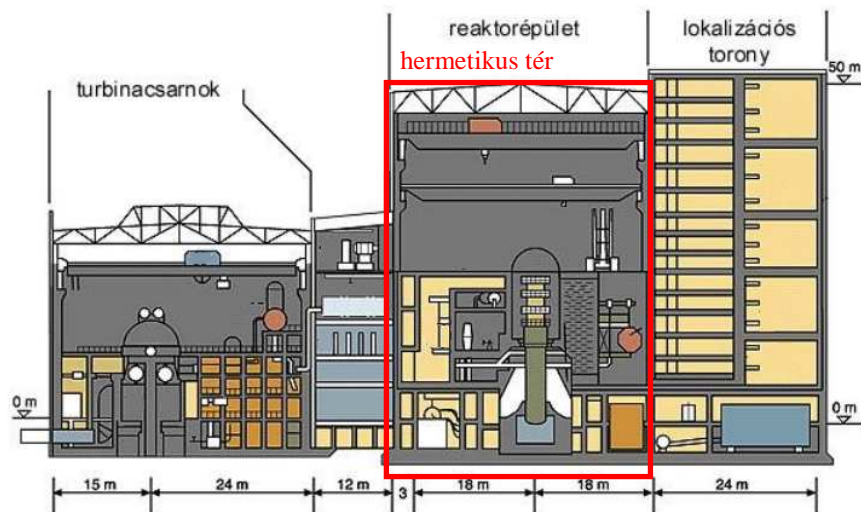
Nuclear Engineering and Design, **140** (1993), 373-385.

1. A kutatás háttere

1.1. Az atomerőművek építőmérnöki szemmel

Az atomerőművek kiemelt jelentőségű létesítmények, melyek tervezésénél a szokásos szerkezetekhez képest nagyobb biztonsági szint elérése a cél, ennek megfelelően esetükben a szabványokban található fél-valószínűségi módszerek közvetlenül nem alkalmazhatóak.

Az atomerőművek külső védelmi vonala egy minimum 1m vastagságú vasbeton fal, melynek több lényeges funkciója is van. Elsődlegesen védelmet biztosít a sugárzás ellen, ezen felül a reaktor hűtőköreit tartalmazó hermetikus teret megvédi a külvilág hatásaitól, valamint megakadályozza a nagy nyomású gőz kijutását esetleges meghibásodások esetén.



1. ábra A VVER-440/213 reaktortípus felépítése és a hermetikus tér fal [7]

A külső határoló fal tervezésekor ennek megfelelően az alábbi különleges hatásokkal kell számolnunk:

- külső vagy belső robbanás, nagy nyomás (Paks esetében 1,5 bar nyomásig [7])
- tűz
- földrengés
- magas hőmérséklet
- repülőgépek vagy más lövedékek becsapódása
- stb.

A fenti felsorolás ötödik pontja, a repülőgépek becsapódása 2001. szeptember 11. óta kiemelt jelentőséget kapott, mivel a terrorveszély megnövekedésével korábban csak érintőlegesen vizsgált hatások potenciális veszélyforrássá váltak. Az USA-t ért terrortámadások előtt csak viszonylag kevés kutatás vizsgálta, hogy mi történik akkor, ha egy nagy tömegű (utasszállító) gép nagy sebességgel ütközik egy nagy vastagságú vasbeton falba, mint amilyen egy atomreaktor külső határoló fala. A korábbi kutatások vizsgáltak ilyen jellegű ütközéseket, de főleg kisméretű, nagy sebességű katonai repülőgépek ütközéséről folytak modellezések, mivel az utasszállító, vagy más nagyobb gépek légi folyosói megelőzés céljából rendszerint távol helyezkednek el a nukleáris létesítményektől.

Lövedék becsapódásakor döntően kétféle hatást vizsgálhatunk: a becsapódás adott kiterjedésű környezetének lokális károsodásait, illetve a teljes szerkezete globális válaszát.

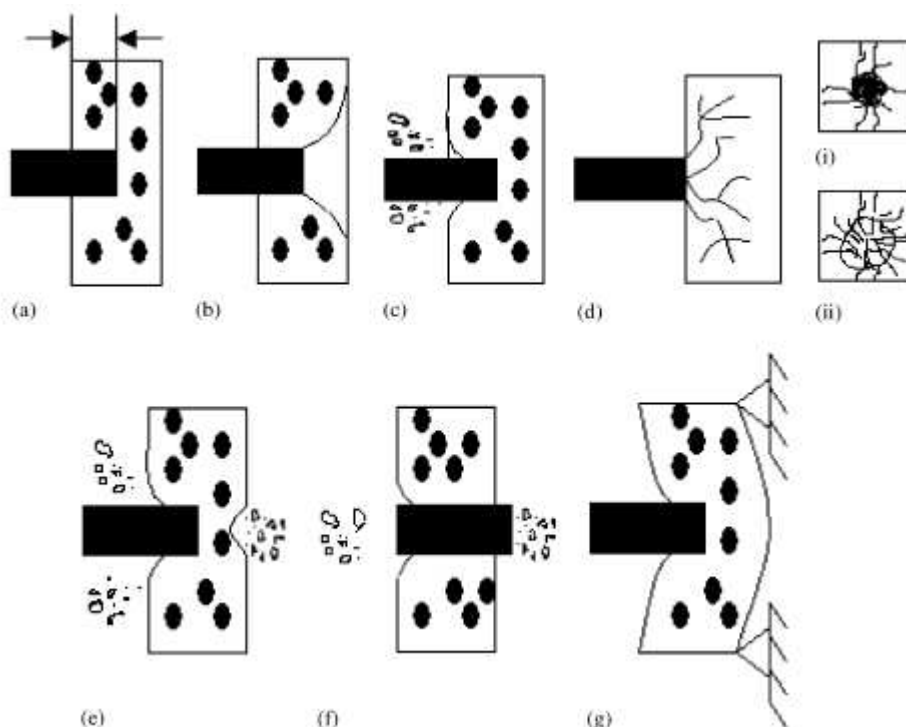
Jelen tanulmány célja áttekinteni a nagy vastagságú vasbeton falak repülőgép (deformálható lövedék) ütközésének hatására történő globális reakcióinak vizsgálatával foglalkozó korábbi kutatásokat, melyek alapfeltevése, hogy a célszerkezet elmozdulásai elhanyagolhatók az ütközési erő számítása során. Munkám során az elméleti eredményeket végeleges szimulációkkal hasonlítom össze. A számítások során kiemelt fontosságot kap az a kérdés, hogy milyen hatása van, ha a céltárgy elmozdulásait elhanyagolhatjuk, a vasbeton falat teljesen merevnek tekintjük. Látni fogjuk, hogy a merev szerkezet irodalomban használt feltevése nem minden esetben vezet helyes eredményre.

1.2. A vasbeton szerkezetet ütközéskor érő hatások

Lövedék becsapódásának hatására a céltárgy lokális és globális károsodása jelentősen függ a lövedék és a célszerkezet eltérő merevségi viszonyaitól. A lövedéket tekinthetjük merevnek vagy deformálhatónak, a céltárgyat pedig rugalmasnak, képlékenynek vagy merevnek.

Repülőgépek esetén például merev lövedéknek tekinthetőek a hajtóművek és a szárnyak.

Amennyiben a lokális hatásokat vizsgáljuk, úgy több tönkremeneteli jelenséget különböztethetünk meg: behatolás (2.(a) ábra), kúpos repedés (2.(b) ábra), mállás (külső oldal) (2.(c) ábra), külső vagy védett oldali repedés (2.(d) ábra), varasodás (védett oldali mállás (2.(e) ábra), átfúródás (2.(f) ábra). Amennyiben atomreaktorok faláról van szó, úgy az átlukadás mellett kiemelt fontosságú a varasodás elkerülése. Az általánosan elfogadott vastagság, amelyenél nem következik be átlukadás: min. 0,9 m, míg a varasodás elkerüléséhez min. 1,6 m vastagság szükséges [1].



2. ábra: Vasbeton szerkezet lokális (a-f) és globális válasza (g) lövedék becsapódásakor ([1] alapján)

Globális válasz tekintetében a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (IAEA) előírásai szerint a szerkezetnek meg kell állítania a repülőt, valamint biztosítania kell a szerkezet globális stabilitását, a vasbeton fal nem szenvedhet nagymértékű deformációkat és biztosítania kell a

reaktor kényszerleállását is. A nyírási vasalásnak (kengyeleknek) a deformációk szempontjából kiemelkedő szerepe van, az IAEA előírásai alapján 2%-os határnyúlásuk engedhető meg. A globális szerkezeti válasz vizsgálatához dinamikus vizsgálatokat kell végrehajtanunk, követnünk kell a rezgéshullámok terjedését és a szerkezet válaszát [4].

1.3. A vasbeton viselkedése nagy terhelési sebesség esetén

A vasbeton, mint szerkezeti anyag szilárdsága és ellenállása függ a terhelési sebességtől. A szabványos kísérletek által meghatározott szilárdságértékek kvázi-statisz terheléshez tartoznak. A szabványos kvázi-statisz vizsgálatkor alkalmazható maximális terhelési sebesség megadható a feszültség-növekmény, az elmozdulás-növekmény vagy a törőerő eléréséig tartó legrövidebb időtartammal [6].

Az általánosan elterjedt kvázi-statisz terhelési sebesség a gyakorlatban 0,2- 0,5 N/(mm²s). A betonszilárdság terhelési sebességtől való függésének jellemzésére szolgál a dinamikus hatástényező (dynamic impact factor, DIF), mely a dinamikus terheléshez és a kvázi-statisz terheléshez tartozó szilárdsági értékek hányadosa. Az Európai- Nemzetközi Beton Bizottság (CEB) 1990-es ajánlása szerint [1]:

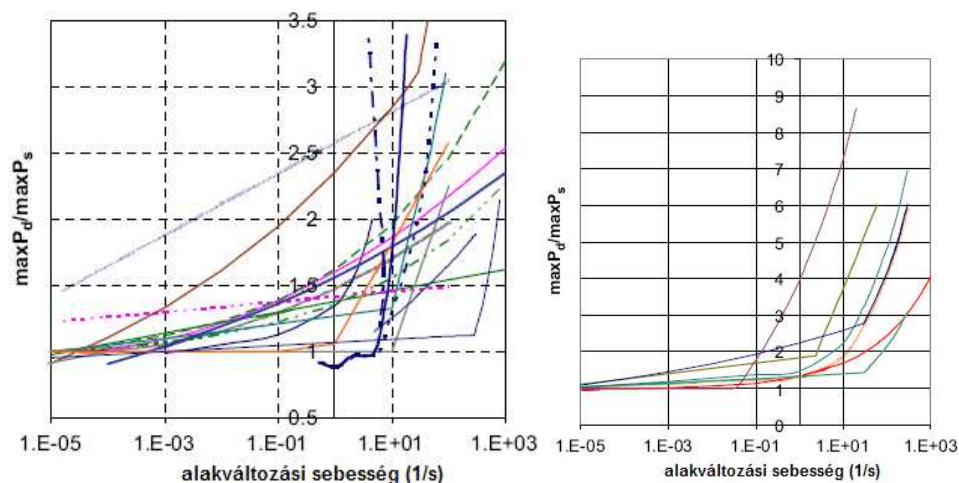
$$DIF = \frac{f_{cd}}{f_{cs}} = \left[\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right]^{1.026\alpha_s}, \quad \text{ha } \dot{\epsilon} \leq 30 \text{ s}^{-1},$$

$$DIF = \gamma_s \left[\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right]^{1/3}, \quad \text{ha } \dot{\epsilon} > 30 \text{ s}^{-1},$$

ahol f_{cd} , f_{cs} , $\dot{\epsilon}$, $\dot{\epsilon}_s$ a dinamikus, illetve kvázi-statisz terheléshez tartozó szilárdság és alakváltozási sebesség, α_s , γ_s pedig a szilárdságtól függő tényezők.

A 3. ábra a dinamikus hatástényező alakváltozási sebességtől való függését mutatja egytengelyű húzás és nyomás esetén. Látható, hogy az alakváltozási sebesség növelésekor a szilárdság (teherbírás) nyomás esetén 3-4-szeresére, húzás esetén 6-7-szeresére (8-9-szeresére) is nőhet. A diagramok tendenciájukban megegyeznek, azonban a különböző vizsgálati körülmények, paraméterek miatt az eredmények változatosak.

Jelen kutatásban általános ütközési jelenségeket vizsgálunk, így az egyszerűség kedvéért az anyagok terhelési sebesség függő tulajdonságaitól eltekintünk.



3. ábra: A dinamikus valamint a statisz terheléshez tartozó törőteher aránya az alakváltozási sebesség függvényében egytengelyű nyomás (balra) és egytengelyű húzás (jobbra) esetén különböző kísérleti eredmények alapján [5]

1.4. Az ütközések osztályozása

A gyakorlatban döntően kétfajta ütközést különböztethetünk meg: puha és kemény ütközést.

1. megközelítés

A legegyszerűbb alapdefiníció szerint a puha ütközés a képlékeny ütközéshez hasonló, tehát puha ütközés esetén nem következik be visszapattnás, a két ütköző test pedig együtt mozog tovább. Ez az értelmezés azonban repülőgépek szerkezettel való ütközése során nem célravezető, mivel a repülő és céltárgy merevségének jelentős különbsége miatt lepattanás sohasem következik be.

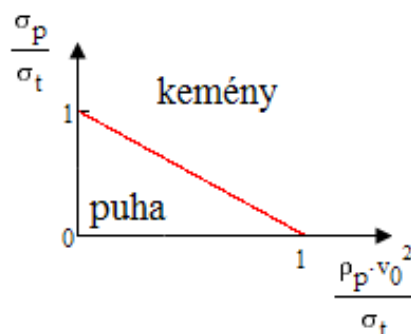
2. megközelítés

Más megközelítés lehet azokat az ütközéseket nevezni puha ütközéseknek, melyek során a lövedék (a kezdetben mozgó test) deformációi lényegesen nagyobbak a céltárgy (a kezdetben nyugalomban lévő test) elmozdulásainál és alakváltozásainál. Ekkor azonban felmerülhet a kérdés, hogy nem célszerűbb-e a céltárgy ellenállása és teherbírása alapján osztályozni az ütközéseket (például ilyen módon puha ütközésnek tekinteni a céltárgy károsodás nélküli nagy elmozdulásaival járó ütközést).

3. megközelítés

A [8] cikkben egy harmadik típusú megközelítést javasolnak a szerzők: a puha ütközést az különbözteti meg a keménytől, hogy nem következik be a lövedék penetrációja a céltárgyba. Ilyen módon az ütközés jellege függ a lövedék és a céltárgy szilárdságától (σ_p , σ_t) valamint a lövedék sűrűségétől (ρ_p) és kezdeti sebességétől (v_0). Eredményeik alapján az alábbi határ húzható meg a puha és kemény ütközések között:

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_t} + \frac{\rho_p \cdot v_0^2}{\sigma_t} = 1$$



4. ábra Az ütközések osztályozása ([8] alapján)

Ugyanezen cikkben a korábban elvégzett kutatások és kísérletek eredményeit is osztályozzák az új kritériumok alapján és megállapítják, hogy a puha és kemény ütközések közti határvonal megfelel a szemléletből is várt osztályozásnak.

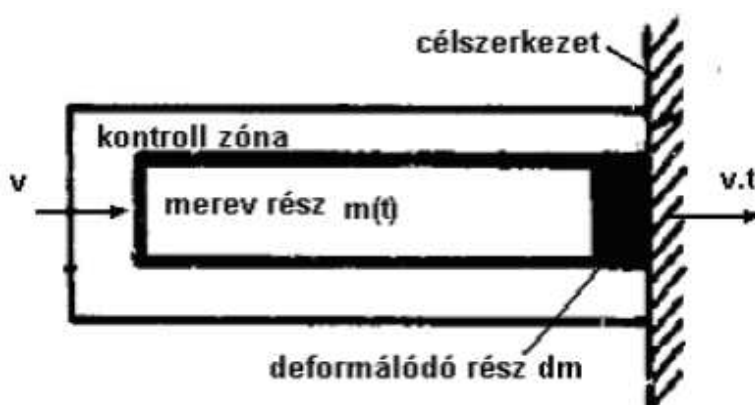
1.5. Az ütközések Riera-féle modellje

Repülőgép és szerkezet ütközésének modellezése során a következő paramétereket kell figyelembe vennünk:

- ütközési sebesség és becsapódási szög,
- ütköző tömeg, tömegeloszlás, törőteher,
- a repülő és a célszerkezet merevségi viszonyai,
- ütközési zóna nagysága, helyzete.

A témában megjelent cikkek nagy része modellezés tekintetében Jorge D. Riera brazil építőmérnök alapmodelljét követi, mely a 2. megközelítés szerinti puha ütközéseket írja le. A Riera-modell alapfeltevései ([2-4]):

- a) az ütközés a felület normálisának irányában történik, hisz ekkor lesz a szerkezet válasza maximális;
- b) a repülő törés közben egy merev és egy deformálódó részből áll, a repülő modelljének anyaga merev-ideálisan képlékeny;
- c) az ütközés tökéletesen képlékeny, az összetört rész a célszerkezettel együtt mozog tovább, illetve szétszóródik, miután felvette a szerkezet sebességét;
- d) a repülő deformációja csak a célszerkezettel érintkező keresztmetszetben történik;
- e) a deformációt létrehozó törőteher hatására a repülő mereven viselkedő része lelassul;
- f) adott időpillanatban a célszerkezetet érő hatás megegyezik a repülő törőterhének és az ütköző keresztmetszet megállításához szükséges erőnek az összegével, ennek megfelelően elegendő ismerni a repülő tömegeloszlását, valamint adott keresztmetszethez tartozó törőterhét.



5. ábra A Riera-modell [4]

2. Az ütközés modellezése rugalmasan megtámasztott céltárgy esetén

A Riera-féle modell a szakirodalom által elfogadott, számos kísérlettel alátámasztott feltételezéseket tartalmaz. Az alábbiakban bemutatjuk a Riera-modellt rugalmasan megtámasztott céltárgy esetén.

Jelölések:

$m(t)$: az repülőgép nem törött részének tömege, mely függ az időtől

$v(t)$: a repülőgép nem törött részének sebessége

M : a célszerkezet tömege

$v_t(t)$: a célszerkezet sebessége

P_c : a repülőgép törőterhe

$F(t)$: reakcióerő, mely a célszerkezetre hat

dm : dt idő alatt összetörő repülőgéprész tömege

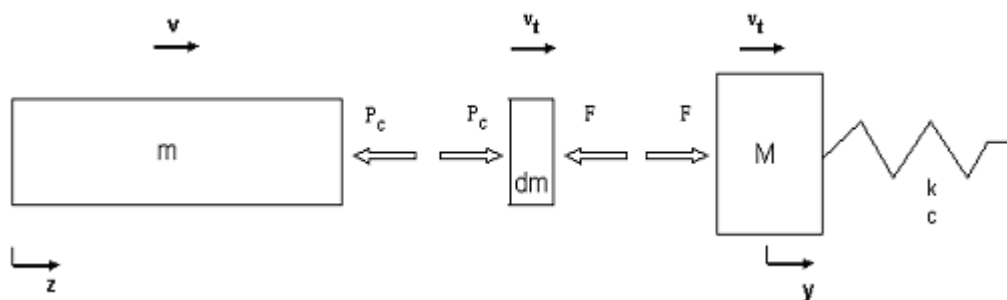
dx : dt idő alatt összetörő repülőgéprész hossza

$x(t)$: a t idő alatt összetört géprész hossza

$\mu(x)$: repülőgép egységnyi hosszra jutó tömege, ahol x a gép orrától mért távolság az ütközése előtt

$z(t)$: a repülő helyzete

$y(t)$: a célszerkezet helyzete



6. ábra: Az általunk alkalmazott modell

Az általunk alkalmazott modell három részből áll: az M tömegű célszerkezetből, mely rugalmasan megtámasztott egy szabadságfokú rendszer, a repülőgép $m(t)$ tömegű egyelőre deformálatlan részéből, valamint a dt idő alatt éppen összetört dm tömegű dx hosszúságú részből. Riera c) jelű feltétele alapján a törött rész és a célszerkezet azonos sebességgel mozog, ami:

$$\frac{dy}{dt} = v_t.$$

Rövid dt idő alatt egy dx hosszúságú szakasz törik össze, ez a törés a gép és a céltárgy sebességkülönbségéből származik, ennek megfelelően:

$$\frac{dx}{dt} = v - v_t = v - \frac{dy}{dt}.$$

A repülő ép részének helyzetét z -vel jelöljük, az ép rész v sebességgel mozog:

$$v = \frac{dz}{dt}, \quad \frac{dx}{dt} = \frac{dz}{dt} - \frac{dy}{dt}$$

- **1. feltevés**

Rövid dt idő alatt dm tömeg törik össze, mely dm tömeg kifejezhető a repülő tömegeloszlásával:

$$\begin{aligned} dm &= \mu(x) \cdot dx, \\ \frac{dm}{dt} &= \mu(x) \cdot \frac{dx}{dt} = \mu(x) \cdot \left(\frac{dz}{dt} - \frac{dy}{dt} \right). \end{aligned}$$

A törés a P_c törőerő hatására jött létre, mely a gép törött és nem törött része között hat, az ép rész mozgásegyenlete az impulzustétel alapján:

$$\begin{aligned} -P_c \cdot dt + m \cdot v &= (m - dm) \cdot (v + dv) + dm \cdot v = m \cdot v + m \cdot dv, \\ -P_c \cdot dt &= m \cdot dv \\ -P_c &= m \cdot \frac{dv}{dt} = m \cdot \frac{d^2 z}{dt^2} \quad (1) \end{aligned}$$

- **2. feltevés**

Az adott pillanatban összetörő dm tömeget $-F$ és P_c erők dt idő alatt lelassítják a célszerkezet sebességére:

$$\begin{aligned} (P_c - F) \cdot dt &= dm \cdot (v_t - v), \\ P_c - F &= \frac{dm}{dt} \left(\frac{dy}{dt} - \frac{dz}{dt} \right), \\ P_c - F &= - \left(\frac{dz}{dt} - \frac{dy}{dt} \right)^2 \cdot \mu(x). \quad (2) \end{aligned}$$

- **3. feltevés**

A célszerkezetet egy szabadságfokú, rugalmasan megtámasztott rendszerrel helyettesítjük, így felírható a rezgés egyenlete:

$$F - k \cdot y - c \cdot \frac{dy}{dt} = M \cdot \frac{d^2 y}{dt^2}, \quad (3)$$

ahol k a rugó rugóállandója, c pedig a sebességgel arányos csillapítás csillapítási tényezője.

Az (1), (2), (3) jelű egyenletekből behelyettesítések után a következő egyenletrendszert kapjuk:

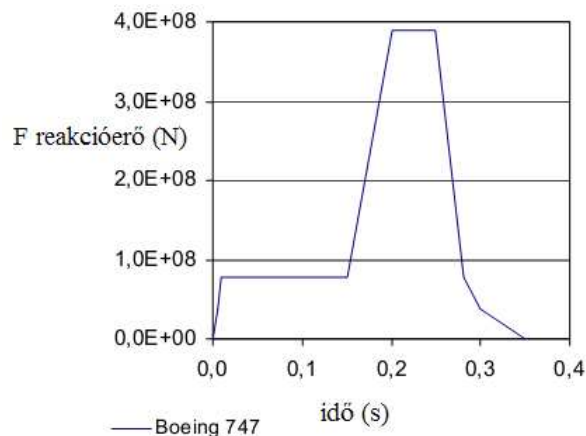
$$\begin{aligned} \text{I.} \quad \frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{-P_c}{m(x)} - \frac{P_c}{M} - \frac{\mu(x)}{M} \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \frac{c}{M} \cdot \frac{dy}{dt} + \frac{k}{m} \cdot y \\ \text{II.} \quad \frac{d^2 y}{dt^2} &= \frac{P_c(x)}{M} + \frac{\mu(x)}{M} \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 - \frac{k}{M} \cdot y - \frac{c}{M} \cdot \frac{dy}{dt} \end{aligned}$$

Az egyenletrendszerben $P_c(x)$, $\mu(x)$, $m(0)$, M , k , c a repülőgép típusának és a célszerkezet jellegének ismeretében felvehető, így az egyenletrendszer megoldásával $x(t)$ és $y(t)$ számítható.

A reakcióerő is kifejezhető a (2) egyenlet alapján:

$$F = P_c + \mu(x) \cdot \frac{d^2 x}{dt^2}$$

Példaképp a reakcióerő időbeli alakulását mutatja a 7. ábra Boeing 747 típusú utasszállító ütközése során.



7. ábra Boeing 747 merev céltárgynak ütközése során fellépő reakcióerő [4]

3. A kutatás célja és menete

Az előző fejezetben bemutatott Riera-modellt számos kutatás vizsgálta és verifikálta. Mindeddig nem készült azonban a modellnek olyan szisztematikus vizsgálata a paraméterek széles tartományában, amely tisztázta volna a modell alkalmazhatóságának határait. Kutatásunk elsődleges célja annak meghatározása, hogy milyen mértékben függ a Riera-modell pontossága a céltárgy (vasbeton szerkezet) merevségétől, illetve hogy mennyire konzervatív megközelítés a céltárgyat végtelenül merevnek tekinteni.

Ennek érdekében a Riera-modell analitikus megoldását vetjük össze egy vele paraméterek tekintetében összehangolt numerikus modell eredményeivel. A modellekben a lövedék (repülő) jellemzőinek változatlanul hagyása mellett változtatjuk a céltárgy (szerkezet) anyagának tulajdonságait (merevség, sűrűség), ilyen módon feltérképezve azt a merevségtartományt, amelyben a Riera-modell kellő pontossággal közelíti a valóságot.

4. A modellek bemutatása

4.1. Az analitikus modell

A könnyebb kezelhetőség érdekében az 2. fejezetben bemutatott I. és II. jelű egyenleteket dimenziótlan alakra hoztuk. A dimenzió nélküli mennyiségek a következők:

Az összetört géphossz, a célszerkezet elmozdulása és az eltelt idő dimenziótlan alakban:

$$x_e = \frac{x}{L}, \quad y_e = \frac{y}{L}, \quad t_e = \frac{t}{\sqrt{\frac{L \cdot m_0}{P_{c0}}}}$$

A nem összetört géprész tömege és a gép tömegeloszlása:

$$m(x) = m_0 \cdot m_e(x_e), \quad \mu(x) = \frac{m_0}{L} \cdot \mu_e(x_e),$$

ahol L a gép hossza és m_0 a kezdeti tömege, P_{c0} pedig a törőteher jellemző értéke:

$$P_c(x) = P_{c0} \cdot \phi(x_e).$$

Ekkor a sebességek és gyorsulások a következőképp alakulnak:

$$\frac{dx}{dt} = \sqrt{\frac{L \cdot P_{c0}}{m_0}} \cdot \frac{dx_e}{dt_e}, \quad \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{P_c}{m_0} \cdot \frac{d^2x_e}{dt_e^2},$$

$$\frac{dy}{dt} = \sqrt{\frac{L \cdot P_{c0}}{m_0}} \cdot \frac{dy_e}{dt_e}, \quad \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{P_c}{m_0} \cdot \frac{d^2y_e}{dt_e^2}.$$

A 2. fejezetben bemutatott I. és II. jelű egyenleteket pedig a következő alakra lehet hozni:

$$\frac{d^2x_e}{dt_e^2} = \frac{-\phi(x_e)}{m_e(x_e)} + \frac{m_0}{M} \left[-\phi(x_e) - \mu_e(x_e) \cdot \left(\frac{dx_e}{dt_e} \right)^2 + \sqrt{\frac{c^2 \cdot L}{m_0 \cdot P_{c0}}} \cdot \frac{dy_e}{dt_e} + \frac{k \cdot L}{P_{c0}} \cdot y_e \right]$$

$$\frac{d^2y_e}{dt_e^2} = \frac{m_0}{M} \left[\phi(x_e) + \mu_e(x_e) \cdot \left(\frac{dx_e}{dt_e} \right)^2 - \sqrt{\frac{c^2 \cdot L}{m_0 \cdot P_{c0}}} \cdot \frac{dy_e}{dt_e} - \frac{k \cdot L}{P_{c0}} \cdot y_e \right]$$

Bevezetjük a következő mennyiségeket a tömegarány, a csillapítás és a merevség jellemezésére:

$$\varepsilon = \frac{m_0}{M}, \quad \gamma = \sqrt{\frac{c^2 \cdot L}{m_0 \cdot P_{c0}}}, \quad \kappa = \frac{k \cdot L}{P_{c0}}.$$

Az I-II. egyenletek ekkor a következőképp alakulnak (az „e” indexeket innentől elhagyva):

$$\text{I. } \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{-\phi(x)}{m(x)} + \varepsilon \left[-\phi(x) - \mu(x) \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \gamma \cdot \frac{dy}{dt} + \kappa \cdot y \right],$$

$$\text{II. } \frac{d^2y}{dt^2} = \varepsilon \left[\phi(x) + \mu(x) \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 - \gamma \cdot \frac{dy}{dt} - \kappa \cdot y \right],$$

ahol:

$$\text{III. } m(x) = \int_x^1 \mu(x_v) dx_v, \quad m(0) = \int_0^1 \mu(x_v) dx_v = 1.$$

A dimenzió nélküli reakcióerő pedig:

$$\text{IV. } f = \frac{F}{P_{c0}} = \phi(x) + \mu(x) \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 .$$

A számításhoz szükséges kezdeti feltételek:

$$x(0) = 0 , \quad y(0) = 0 ;$$

$$\frac{dy}{dt}(0) = 0 ;$$

$$\frac{dx}{dt}(0) = v_0 \cdot \sqrt{\frac{m_0}{L \cdot P_{c0}}} .$$

A számítás addig tart, amíg a gép össze nem törik, tehát $x=1$ nem lesz, illetve amíg a gép törik, tehát az összetörés sebessége pozitív (a gép nem pattan vissza). A gép törését követően a céltárgy szabadrezgést végez:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\varepsilon \cdot \left(\gamma \cdot \frac{dy}{dt} + \kappa \cdot y \right)$$

A fenti I-IV. egyenletekből álló egyenletrendszer speciális esetekben tovább egyszerűsödik.

Ha a célszerkezet végtelen merev : $\varepsilon = 0$

$$\text{I. } \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{-\phi(x)}{m(x)} ,$$

$$\text{II. } \frac{d^2y}{dt^2} = 0 ,$$

$$\text{III. } m(x) = \int_x^1 \mu(x_v) dx_v ,$$

$$\text{IV. } f = \phi(x) + \mu(x) \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 .$$

Ha a törőerő és a tömegeloszlás állandó:

$$\phi(x) = \phi , \quad \mu(x) = \mu .$$

Ekkor:

$$m(x) = \int_x^1 \mu(x_v) dx_v = \mu(1-x) .$$

És mivel $m(0)=1$, így $\mu=1$, aminek hatására az alapegyenletek a következők lesznek:

$$\text{I. } \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{-1}{1-x} + \varepsilon \cdot \left[-1 - \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \gamma \cdot \frac{dy}{dt} + \kappa \cdot y \right],$$

$$\text{II. } \frac{d^2y}{dt^2} = \varepsilon \cdot \left[1 + \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 - \gamma \cdot \frac{dy}{dt} - \kappa \cdot y \right],$$

$$\text{IV. } f = 1 + \left(\frac{dx}{dt} \right)^2.$$

Végül, ha a fenti két esetet kombináljuk, tehát **végtelen merev céltárgy és egyenletes tömegeloszlású és állandó törőterhű lövedék** szerepel a modellben, akkor:

$$\text{I. } \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{-1}{1-x}$$

$$\text{II. } \frac{d^2y}{dt^2} = 0$$

$$\text{IV. } f = 1 + \left(\frac{dx}{dt} \right)^2$$

Jelen kutatásban a törőterhet mindvégig állandónak, a tömegeloszlást egyenletesnek tekintjük, a csillapítást elhanyagoljuk, valamint megvizsgáljuk véges, illetve végtelen merevségű céltárgy esetét is.

Az egyenletrendszer megoldására negyedrendű Runge-Kutta módszert használtunk, a megoldáshoz készített számítógépes program időlépése 0,001 volt (dimenzióatlanított alak).

A program bemenő adatai:

- a repülő kezdősebessége,
- a repülő tömegeloszlása (jelen kutatásban állandó),
- a repülő törőereje (jelen kutatásban állandó),
- a céltárgy tömege,
- a céltárgyat megtámasztó rugó rugóállandója,
- a céltárgyat megtámasztó rugó csillapítása (jelen kutatásban nincs csillapítás).

A program által kiszámított eredmények:

- az összetört géphossz pillanatnyi értéke (X),
- a repülő pillanatnyi sebessége (V_r),
- az céltárgy (fal) pillanatnyi elmozdulása (U_f),
- a céltárgy pillanatnyi sebessége (V_f),
- a reakcióerő pillanatnyi értéke (F).

Mind a bemenő adatok, mind pedig a számított eredmények dimenzió nélküliek, így ezeket megfelelő módon át kell alakítani a valós eredményekkel való összevetéshez.

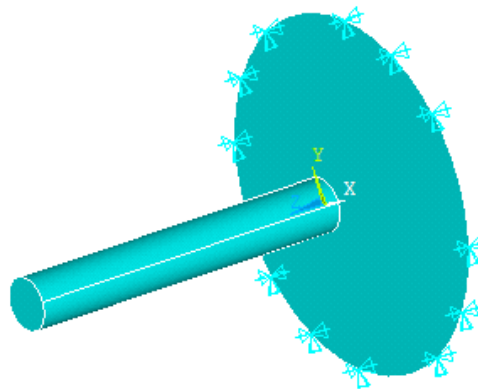
4.2. A numerikus modell

Numerikus modellem elkészítéséhez az ANSYS végeselemes program explicit dinamikus analíziseket végrehajtó modulját használtam (LS-DYNA). Az LS-DYNA elsősorban rövid idő alatt lejátszódó, nagy deformációval járó dinamikai feladatok, nagy deformációkat tartalmazó, többszörösen nemlineáris kvázi-statikusan feladatok, illetve kontakt/ütközési feladatok megoldására alkalmas [9].

A repülőgép merev céltárgynak történő ütközését egy üreges körhenger csuklósan megtámasztott kör alakú lemezzel történő ütköztetésével modelleztem. (ld. 8. ábra)

A henger közepes sugara 1,5 m, hossza 20 m, falvastagsága 0,3 m, anyaga acél (9. ábra, pontos leírását ld. később). A körlemez 10 m sugarú, 1 m vastagságú, anyaga az „r0” jelű esetben végtelenül merev, a többi esetben lineárisan rugalmas fiktív anyag (10. ábra).

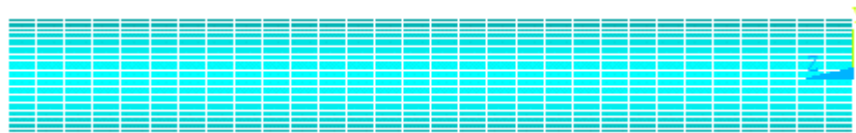
Mivel az ANSYS nem használ mértékegységeket, így a paraméterek megadásakor mindvégig SI alapegységeket és a belőlük származó, prefixumok nélküli alapmennyiségeket használtam.



8. ábra A numerikus modell felépítése

Mind a repülő, mind a céltárgy SHELL163 (Explicit Thin Structural Shell - vékony explicit szerkezeti héj) elemekből épül fel, mely explicit dinamikus analízisekhez alkalmazható.

A repülő anyagmodellje az acélnak megfelelő plasztikus-kinematikus anyagmodellt módosítva a Riera-modell alapanyagához hasonlóan terhelési sebességtől nem függő tulajdonságú, merev-ideálisan képlékeny anyag. A repülő anyagának rugalmassági modulusa nagy, folyáshatára egyben a törési határfeszültsége is.



9. ábra A lövedék végeselemes felosztása

A plasztikus-kinematikus anyagmodell izotróp, kinematikus-felkeményedő anyagmodell kombinációja, amelyben a tulajdonságok függenek az alakváltozás sebességétől és létrejöhet

tönkremenetel. Az alakváltozási sebességet ($\dot{\epsilon}$ -ot) a modell az alábbi, Cowper-Symonds modellből számítja:

$$\sigma_Y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{\text{eff}})$$

ahol σ_Y a folyáshatár, σ_0 a kezdeti folyáshatár, C, P, β paraméterek, ϵ_p^{eff} az effektív képlékeny megnyúlás, E_p a képlékeny felkeményedési modulus, ami

$$E_p = \frac{E_{\text{tan}} E}{E - E_{\text{tan}}}$$

ahol E_{tan} az érintő modulus, E pedig a rugalmassági modulus.

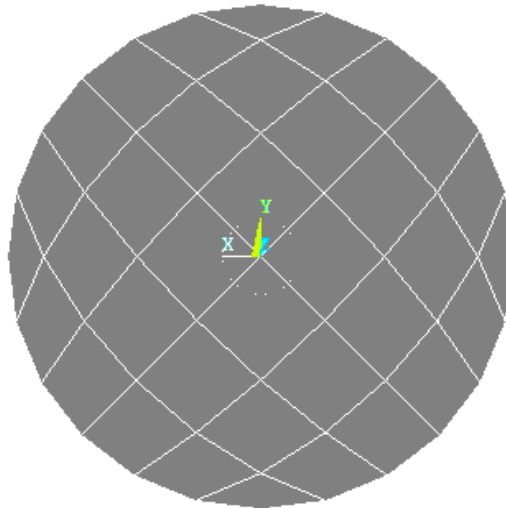
A repülő általam használt anyagának tulajdonságai:

rugalmassági modulus (Pa)	2E12
Poisson-tényező	0,27
sűrűség (kg/m ³)	7850
β paraméter	0
folyáshatár (Pa)	3,1E8
érintő modulus (Pa)	7,63E8
C paraméter (s ⁻¹)	10000
P paraméter	1
határnyúlás	0,75

Mivel C paraméter nagy és $\beta=0$, így a folyáshatár nem függ a terhelési sebességtől. A nagy rugalmassági modulus pedig olyan anyagot eredményez, mint amilyen a Riera-modell repülőjének anyaga is.

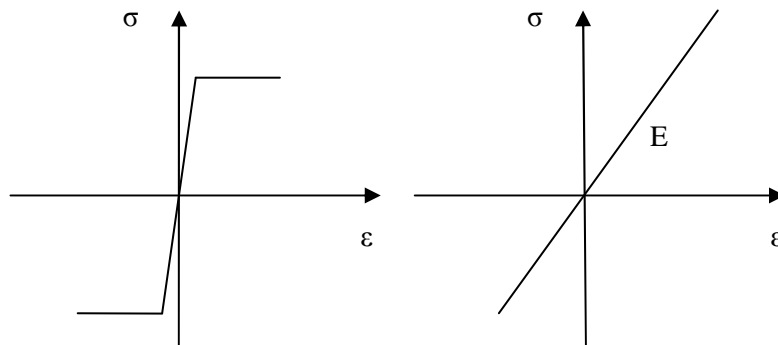
A lemez anyaga az r0 esetben végtelen merev (sem eltolódni, sem elfordulni nem képes), a többi esetben pedig lineárisan rugalmas. A lemez anyagát jellemző paraméterek: rugalmassági modulus (Pa), Poisson-tényező, sűrűség (kg/m³). Az „ra” jelű esetekben acél sűrűségű és Poisson-tényezőjű, míg az „rb” jelű esetekben beton sűrűségű és Poisson-tényezőjű anyagot alkalmaztunk (a modellek részletes bemutatása a következő fejezetben található).

	r0	ra1-ra5	rb1-rb5
rugalmassági modulus (Pa)	Végtelen merev anyag	2,1E13-2,1E9	3,5E13-3,5E9
Poisson-tényező		0,272	0,2
sűrűség (kg/m ³)		7850	2500



10. ábra A céltárgy végeselemes felosztása

A repülő és a céltárgy anyagának feszültség-alakváltozás diagramja a 11. ábrán látható.



11. ábra A repülő és a céltárgy anyagának σ - ϵ diagramja (az arányok nem valóságok)

A vizsgálat során a henger (repülő) 200 m/s = 720 km/h sebességgel mozog 2 m-t (az eddig eltelt idő 0,01 s), majd nekiütközik a falnak. A vizsgált időtartamot minden esetben úgy vesszük fel, hogy a teljes törési folyamat lejátszódhasson. A közegellenállást és egyéb hatásokat nem vesszük figyelembe.

A paraméterek megválasztásánál célunk volt, hogy a repülő az ütközés során részben összetörjön, részben épen maradjon és így a teljes jelenség vizsgálhatóvá váljon.

A numerikus modell futtatásának végeredményeképp az alábbi eredményeket kérdezzük le:

- a repülőt (henger) hátsó alaplapijának elmozdulása (Z),
- a henger hátsó alaplapijának sebessége (V_r),
- a céltárgy (körlemez) középpontjának eltolódása (U_f),
- a céltárgy középpontjának sebessége (V_f),
- az összetört géprész hossza ($X=Z-U_f$).

5. A számítások

Annak érdekében, hogy a Riera-modell alkalmazhatóságának határait vizsgáljuk, az analitikus és numerikus (végeelemes) modellel végzett számítások eredményeit kell összehasonlítani. Ehhez azonban szükséges a kétfajta modell bemenő adatainak összehangolása.

A végeelemes modellek bemenő adatainak megadását követően az azoknak megfelelő analitikus modellbeli dimenziótlan paramétereket kell meghatározni. A repülő analitikus modelljének állandó nagyságú törőterhe és egyenletes tömegeloszlása a numerikus modell adatainak dimenziótlanításával közvetlenül kapható.

A céltárgy esetében további kiegészítő vizsgálatok szükségesek a bemenő adatok meghatározásához. A numerikus modellben alkalmazott céltárgy rugalmassági modulusból és sűrűségéből szükséges meghatározni az analitikus modell rugalmasan megtámasztott céltárgyának k rugómerevségét és M tömegét.

A rugómerevség meghatározásához a numerikus modell körlemezének középpontjára egységnyi erőt működtetve a lemezközép elmozdulásából (U_{kp}) számítható a helyettesítő rugó rugóállandója (k).

$$k = \frac{1}{U_{kp}}$$

A rugóállandók ismeretében az M együttmozgó céltárgy-tömeg a numerikus modellel végzett virtuális kísérlet eredményeiből számítással meghatározható. A lemez középpontját 1 m/s kezdősebességgel elindítjuk, majd magára hagyjuk és a kialakuló csillapítatlan szabadrezgés periódusidejét (T) vizsgáljuk, amiből az M tömeg az alább formula átrendezésével számítható:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{k}{M}}$$

A vizsgált összesen $1+5+5=11$ eset numerikus és analitikus modelljeinek bemenő adatait az alábbi táblázat tartalmazza.

1. Táblázat Az analitikus és numerikus modellek bemenő adatai

	ρ	E	ν	U_{kp}	k	T	A	M
	kg/m ³	N/m ²		m	N/m	s	m	kg
r0				végtelen merev céltárgy				
ra1	7850	2,10E+13	0,272	2,73E-12	3,66E+11	0,0083	2,40E-04	639195,6
ra2		2,10E+12		2,73E-11	3,66E+10	0,027	8,00E-04	676402,4
ra3		2,10E+11		2,73E-10	3,66E+09	0,083	2,40E-03	639195,6
ra4		2,10E+10		2,73E-09	3,66E+08	0,26	8,00E-03	627226,4
ra5		2,10E+09		2,73E-08	3,66E+07	0,82	2,45E-02	623886,1
Együttmozgó céltárgy tömeg:								641181
		E	ν	U_z	k	T	A	M
		N/m ²		m	N/m	s	m	kg
rb1	2500	3,50E+13	0,2	1,76E-12	5,68E+11	0,004	1,10E-04	230275,4
rb2		3,50E+12		1,76E-11	5,68E+10	0,012	3,60E-04	207247,9
rb3		3,50E+11		1,76E-10	5,68E+09	0,037	1,30E-03	197029,4
rb4		3,50E+10		1,76E-09	5,68E+08	0,12	3,70E-03	207247,9
rb5		3,50E+09		1,76E-08	5,68E+07	0,375	1,10E-02	202390,5
Együttmozgó céltárgy tömeg:								208838

A jelölések:

- ρ : numerikus modell céltárgyának sűrűsége
- E: numerikus modell céltárgyának rugalmassági modulusa
- U_{kp} : numerikus modell lemez középpontjának eltolódása 1 N erő hatására
- k: a numerikus modell lemezének megfelelő analitikus modellbeli rugóállandó
- T: a középpont egységnyi kezdeti sebességéből származó szabadrezgés periódusideje a numerikus modellben
- A: a középpont egységnyi kezdeti sebességéből származó szabadrezgés amplitúdója a numerikus modellben
- M: a helyettesítő együttmozgó céltárgy-tömeg az analitikus modellben (a zölddel jelölt érték az egyes modellekből számolt értékek átlaga)

A rózsaszínnel jelölt ra_3 és rb_4 esetekhez tartozó rugalmassági modulusok az acél, illetve beton anyag valós rugalmassági modulusai, a többi rugalmassági modulusot ezek tíz hatványokkal való szorzásával vettük fel az átfogó vizsgálat érdekében.

A számított együttmozgó céltárgy-tömegek a numerikus modellbeli lemezek tömegének 26-27%-ai, ami egy $\sim 5,1$ m sugarú körlemez tömegének felel meg. Ez azt jelenti, hogy a numerikus modell együttmozgó része egy körülbelül $\sim 5,1$ m sugarú körlemez.

6. Az eredmények összehasonlítása és értékelése

A következőkben a numerikus és analitikus modellek számítási eredményeit mutatjuk be, illetve hasonlítjuk össze. Előzetes vizsgálatok alapján azt várjuk, hogy a feltérképezett céltárgy-merevség tartományban a lágyabb céltárgyak esetében az analitikus Riera-modell fokozatosan egyre nagyobb eltérést fog mutatni a numerikus megoldástól.

Az alkalmazott jelölések a következők:

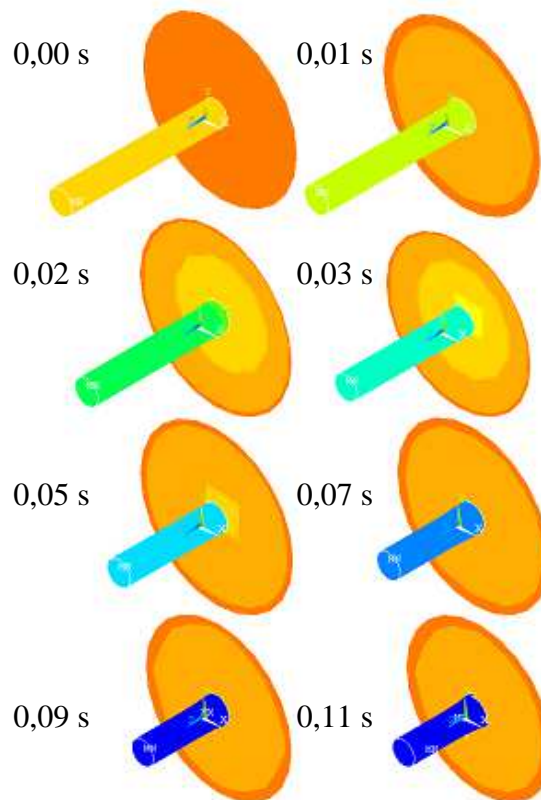
- r_{0a} ill. r_{0n} : végtelen merev céltárgy eset, analitikus, illetve numerikus megoldás,
- ra_{1a} ill. ra_{1n} : ra_1 merevségi eset, analitikus, illetve numerikus megoldás,
- rb_{1a} ill. rb_{1n} : rb_1 merevségi eset, analitikus, illetve numerikus megoldás.

A modellek összehasonlításakor az alábbi mennyiségek változását, illetve különböző modellekben való eltérését értékeljük:

- az összetört géphossz (x),
- a gép sebességének változása (v_f),
- a törés időtartama (t),
- a céltárgy mozgása (U_f).

6.1. Az összetört géprész hossza

A 12. ábra az rb4n jelű numerikus vizsgálat pillanatképeit mutatja, a színek az alakváltozásokat jellemzik.



12. ábra 1 m vastagságú beton lemez és lövedék ütközése (rb4n), az ütközés után 0; 0,01; 0,02; 0,03; 0,05; 0,07; 0,09; 0,11 s-mal

6.2. r0, ra1-ra5 jelű esetek

A 13. ábra az r0, ra1-ra5 esetek numerikus (n) és analitikus (a) modellből származó eredményeit mutatja. A diagramon a repülő (lövedék) összetört részének alakulása látható az idő függvényében. Az egyes esetekben az ábrázolás addig az időpontig tart, amikor a gép törése befejeződik (az ép rész sebessége 0-ra csökken).

Az ábrán látható, hogy az ra4 és ra5 eseteket leszámítva (melyek a leglágyabb céltárgyakhoz tartoznak) a törések lefutása nem tér el egymástól jelentős mértékben. Az r0, ra1-ra3 esetekben mind az analitikus, mind a numerikus számítások eredményei alapján ~10-11 m géphossz törik össze, a törés ideje pedig 0,09-0,11 s. Ez azt jelenti, hogy merev céltárgy esetén (8750 kg/m^3 sűrűség mellett $2,1\text{E}13$ - $2,1\text{E}11$ numerikus modellbeli rugalmassági modulus, illetve $3,66\text{E}11$ - $3,66\text{E}13$ analitikus modellbeli rugóállandó) a Riera-modell analitikus megoldása jól közelíti a numerikus eredményeket, azaz végtelen merev céltárgy feltételezése (mely jelentősen egyszerűsíti a számításokat) is elfogadható mértékű eltéréseket okoz.

Az ra4 jelű esetben, melyben a céltárgy rugalmassági modulusa a valós acéltárgy rugalmassági modulusának 1/10 része, az analitikus modell eredményében a törési idő ~20%-kal, míg az összetört géphossz ~15%-kal csökken. A numerikus modell az eddigiektől jelentősen eltérő jelleget mutat. Az ra4n jelű numerikus futtatásban a merevebb céltárgyak

esetével ellentétben nem lassuló tendenciájú a törés, hanem sokkal kiegyenlítettebb sebességű. Ez feltételezhetően annak köszönhető, hogy az ütközés során a nagy mozgásokat végző céltárgy körülbelül egy fél periódust mozog, eltávolodik, majd közeledik a repülőhöz (ld. 20. ábra). Ekkor ugyanis a céltárgy az ütközés második, lassuló fázisában (tehát amikor a repülő mozgási energiája nagy részben már felemészte) éri el szélső helyzetét és indul el a lövedékkel szemben, ezzel intenzívebb, nem lassuló törést biztosítva.

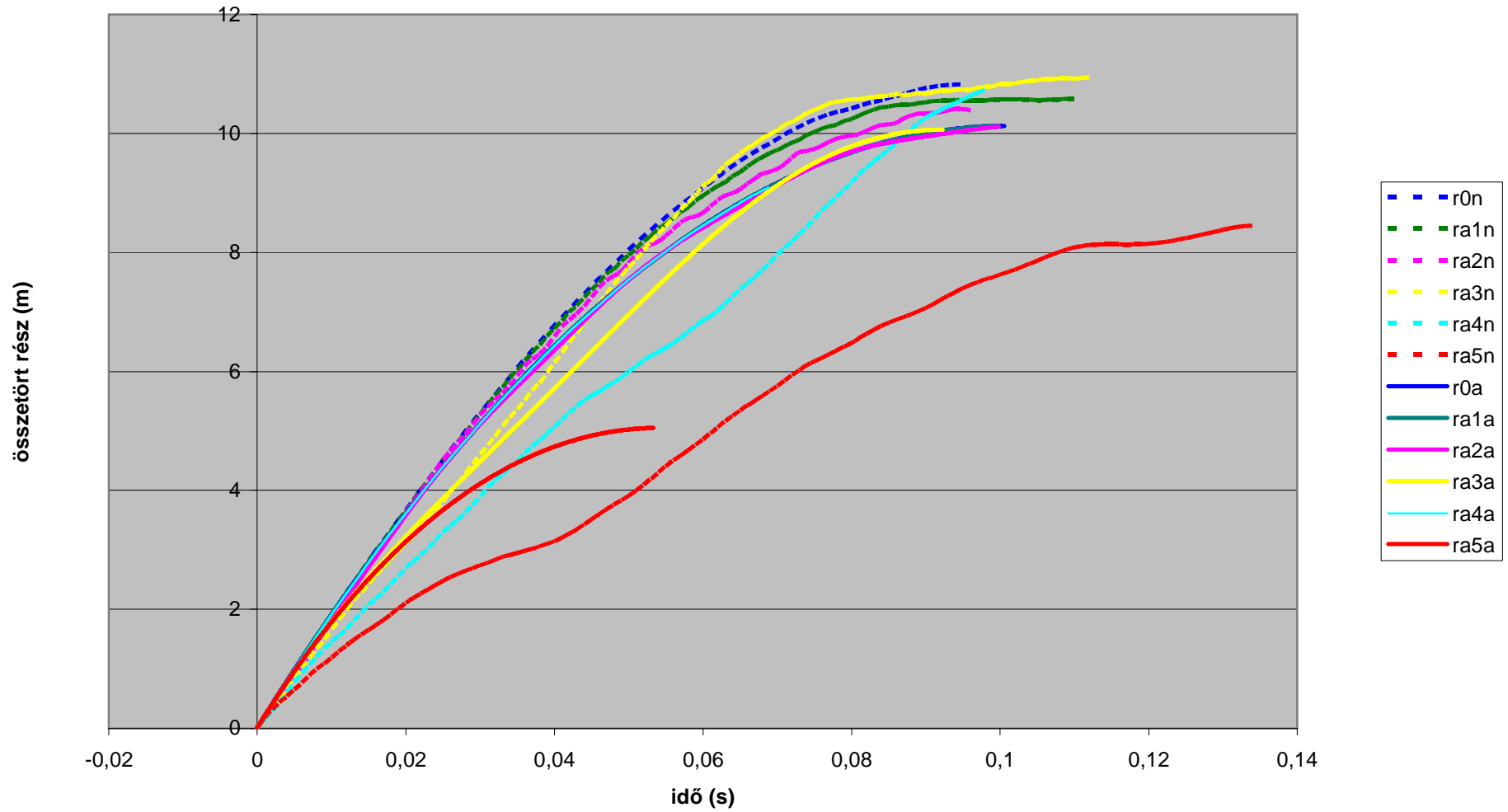
Az ra4 esetben tapasztalható eltérés tovább erősödik az ra5 jelű (az acélanyag rugalmassági modulusának 1/100 részét alkalmazó) esetben. Itt mind a numerikus, mind az analitikus megoldás eredménye jelentősen eltér az eddigi merevebb céltárgy esetek eredményeitől és egymástól is. A numerikus modellben az ra4n jelű esetben már leírt tendencia folytatódik: a gép lassabban és kiegyenlítettebb sebességgel törik, a törés 25-30%-kal hosszabb ideig tart, mint a merevebb esetekben. Az ra5a analitikus megoldás ezzel szemben 50%-kal rövidebb törési időt és 50%-kal kisebb eltörött géphosszt mutat. Az ra5a és ra5n analitikus és numerikus megoldások mind tendenciában, mind pedig értékekben jelentősen eltérnek egymástól, a Riera-modell ebben az esetben már nem közelíti a valóságot.

6.3. r0, rb1-rb5 jelű esetek

Az rb1-rb5 jelű esetekben beton sűrűségű céltárgyakat vizsgálunk. Az együttmozgó céltárgy-tömeg ennek megfelelően az ra1-ra5 jelű esetek céltárgy tömegének $\sim 1/3$ része. A rugalmassági modulusok nagyságrendjükben azonosak maradtak. Átlagos beton valós rugalmassági modulusát az rb4 esetben alkalmaztuk.

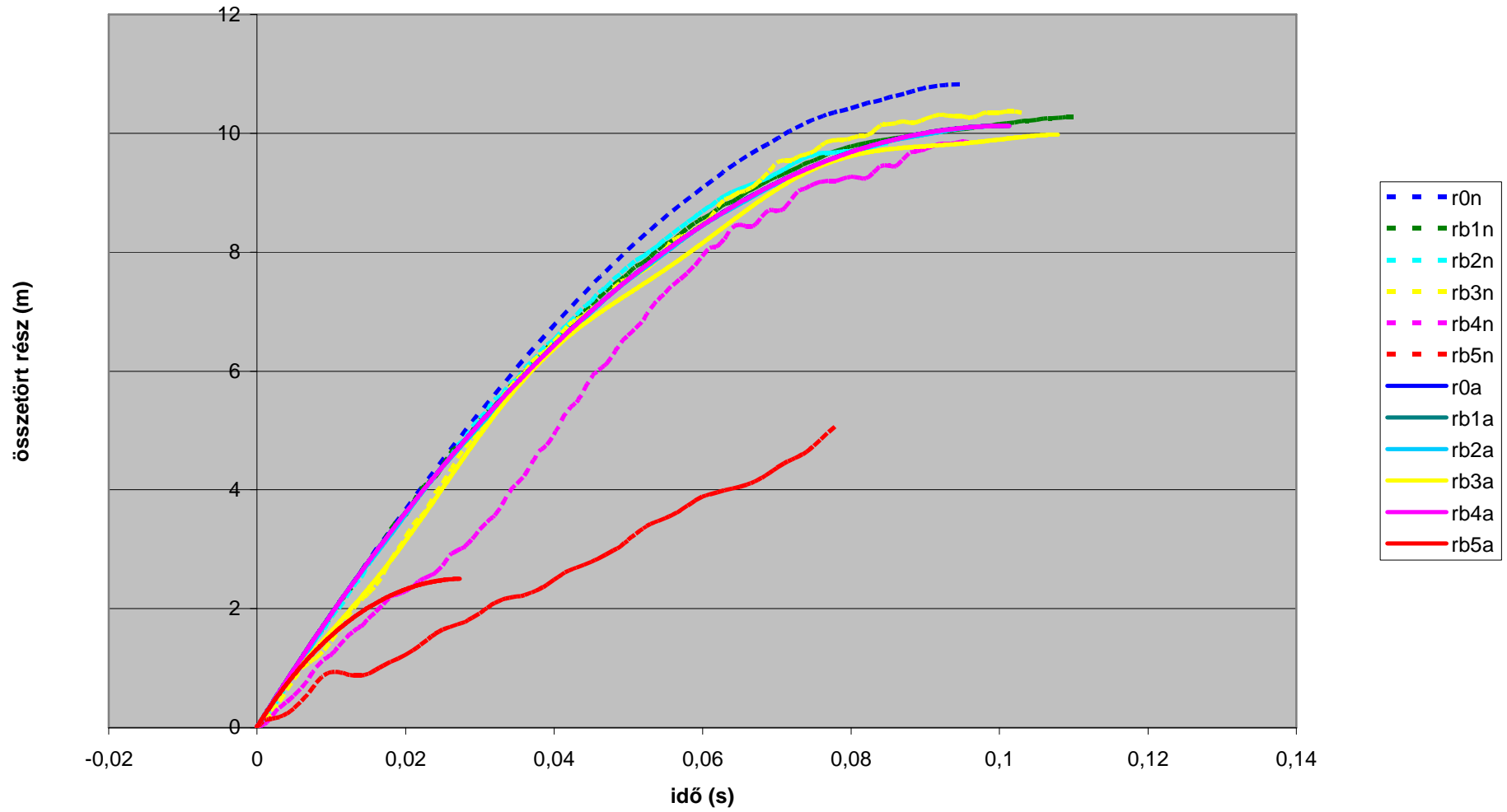
A futtatások eredményeit a 14. ábra mutatja. A 6.2 pontban leírtakhoz hasonlóan alakulnak a törési folyamatok ebben az esetben is. A gépekből ~ 10 - 11 m törik össze, átlagosan $\sim 0,9$ - $0,11$ s alatt. Jelentős eltéréseket ismét az r4, r5 merevségi esetek mutatnak. Az rb4 eset elérései azért érdekesek, mert ez a merevségi eset tartozik a valós beton merevséghez, amelynek modellezésére eredményeink alapján a Riera-modell nem alkalmas (meg kell azonban jegyeznünk, hogy atomerőművek esetében a fal 1 m-nél vastagabb, így a merevség is nagyobb lenne). Az rb5 eset numerikus megoldása nem lassuló tendenciájú, hanem egyenletes törést mutat, az analitikus megoldásnál 2,5-szer nagyobb törési idővel és 2-szer nagyobb összetört géphosszal.

Összetört géphossz



13. ábra Az összetört géphossz időbeli alakulása r0, ra1-ra5 esetekben (acél sűrűségű céltárgy)

Összetört géphossz



14. ábra Az összetört géphossz időbeli alakulása r0, rb1-rb5 esetekben (beton sűrűségű céltárgy)

6.4. A repülő sebessége

A repülő sebességét a numerikus modellben egy, a henger hátsó lapján lévő pontban mértük. Az ütközés addig tart, amíg a gép ép része meg nem áll. Az ütközés kezdetén a gép sebessége 200 m/s, a gép sebessége erről az értékről csökken 0 m/s-ig.

6.4.1. r0, ra1-ra5 jelű esetek

A repülő sebességének időbeli alakulását a végtelen merev, illetve acél sűrűségű céltárgy esetekben a 15. ábra szemlélteti. Látható, hogy a merevebb céltárgy esetekben a lassuló tendenciájú törést (ld. 6.1 fejezet) az ép rész sebességének egyenletes csökkenése kíséri. Az ép géprész átlagos gyorsulása $\sim -2000 \text{ m/s}^2$ lassulás.

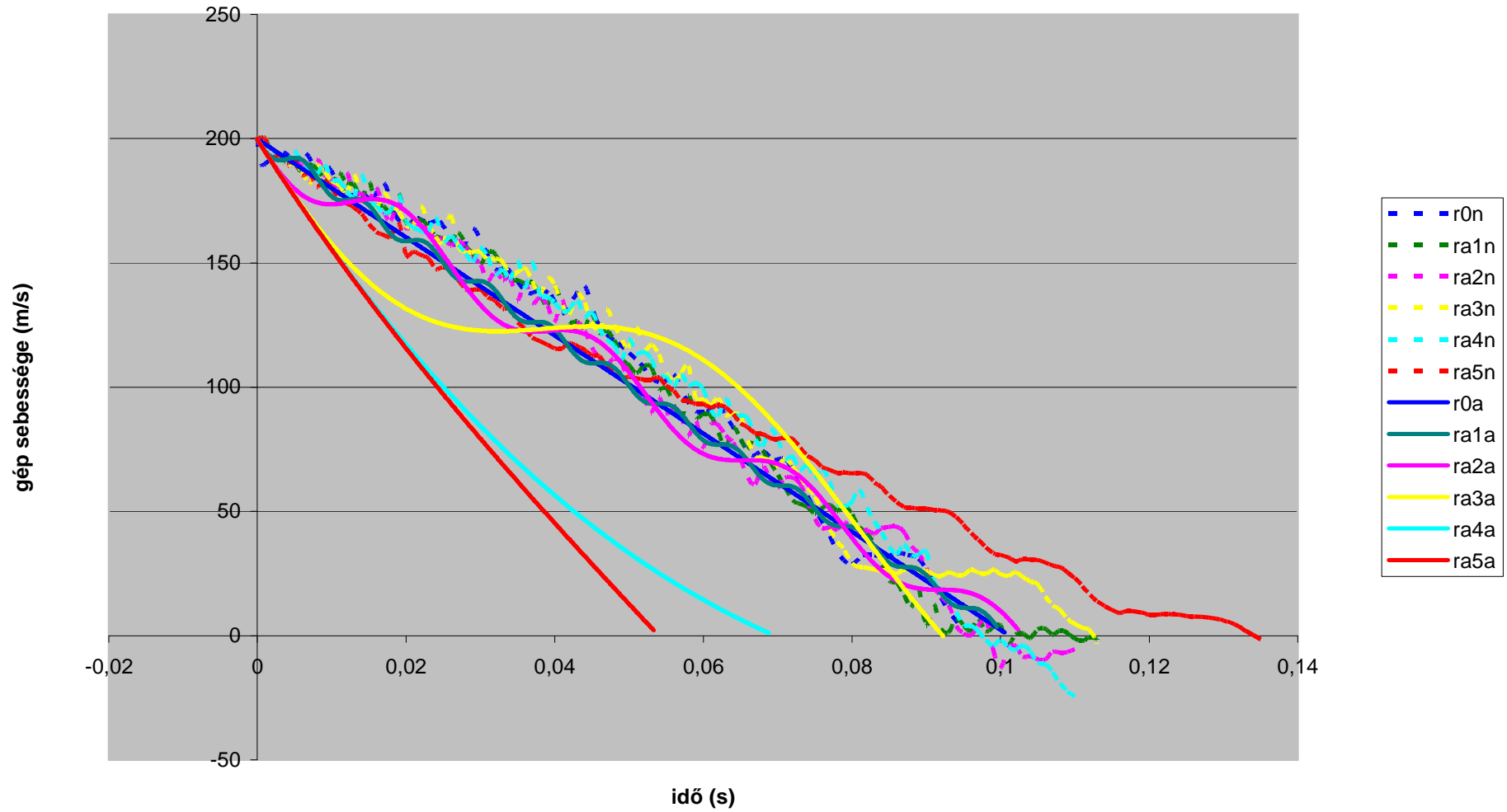
A numerikus futtatások eredményei az ra5n jelű esetet leszámítva, ahol az ütközés lassabb, (0,135 s-ig tart) nem mutatnak jelentős eltérést.

Az analitikus eredményekben azonban élesen kirajzolódik a céltárgy rugalmasságának különbsége. A kisebb rugóállandók esetén az egyre nagyobb céltárgy amplitúdók hatása és a kitérés periódusok megjelennek az ép rész sebességének lefutásában. Amikor a gép és a céltárgy egy irányba mozog, akkor a gép lassulása kevésbé intenzív (a céltárgy „kitér” a gép elől), amikor azonban a céltárgy a géppel ellentétes irányú kitérést mutat, akkor az ép rész negatív gyorsulása nagyobb lesz (a görbékhez húzott érintők meredeksége nagy negatív érték). Az ra3a esetben a céltárgy kitérése már összemérhető a gép törésének mértékével, így a kitérés periódusok hatása már látható, a leállási időt azonban ez még nem befolyásolja jelentősen (0,9 s). Az ra4a és ra5a esetben azonban teljes mértékben a céltárgy kitérés periódusai irányítják az ütközést. A későbbiekben látni fogjuk, hogy ebben a két esetben az analitikus megoldásban a céltárgy az ütközés teljes folyamata során egy irányba mozog a repülővel, az ütközés a céltárgy periódusidejének kevesebb, mint negyedéig tart. Az ra4 esetben az ütközési idő szempontjából nem tapasztalható jelentős eltérés a végeselemes és Riera-modellek között, az ép rész mozgásának jellege a Riera-modellben azonban jelentősen eltér a numerikus modell eredményeitől. Az ra5 esetben a végeselemes modell és az analitikus megoldás teljesen különböző eredményeket ad.

6.4.2. r0, rb1-rb5 jelű esetek

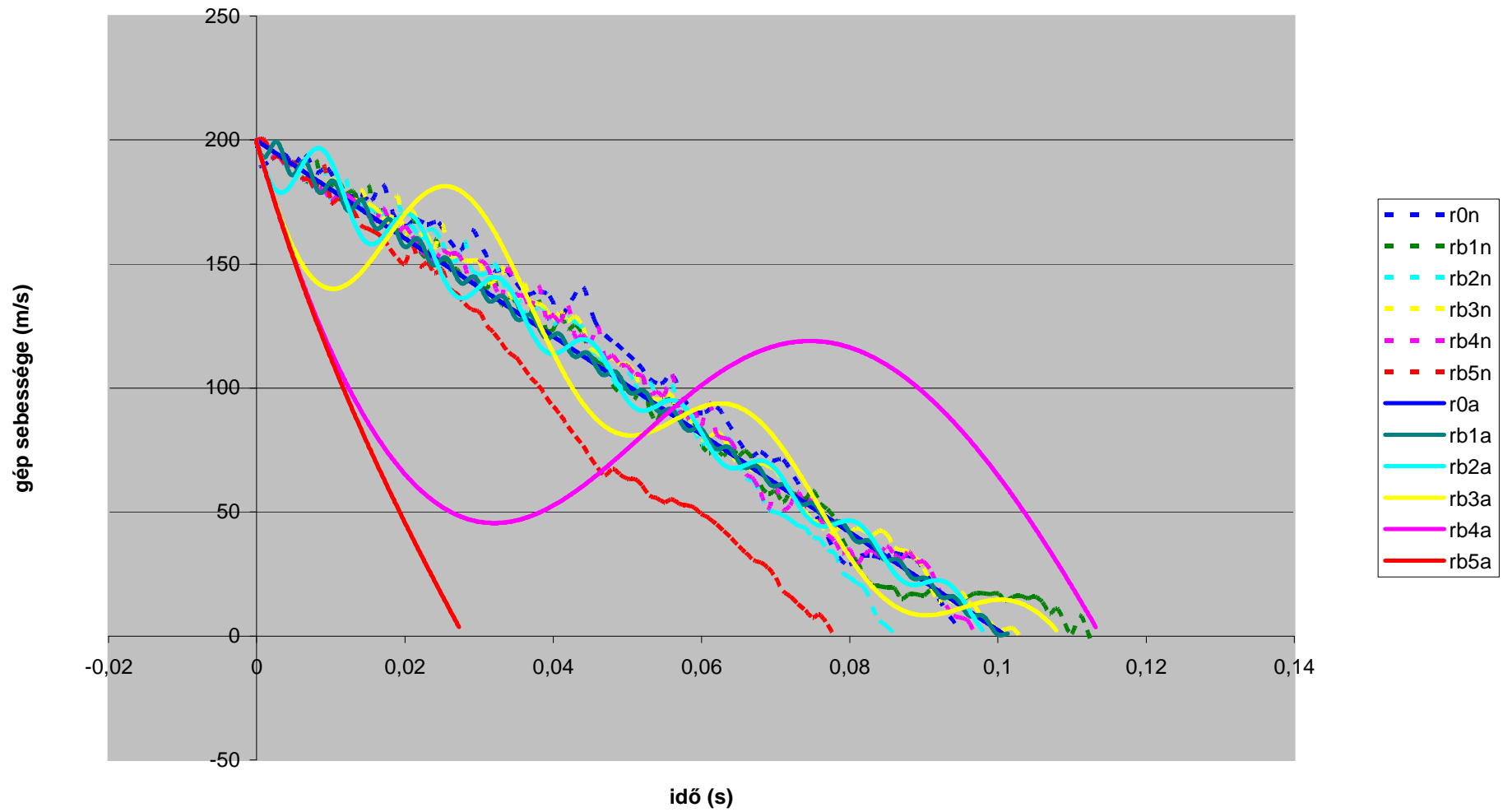
A beton sűrűségű céltárgy esetében az ra1-ra5 esetekhez hasonló következtetéseket vonhatunk le. A lassulási folyamatban már az rb3a esetben jelentős a rugalmas céltárgy mozgásának hatása, mivel a kisebb tömegű céltárgy periódusideje kisebb és így több periódus zajlik le az ütközése során, mint az acél sűrűségű céltárgyak esetében. Érdekes azonban, hogy a 14. ábra alapján a törési folyamat még nem mutatott jelentős eltérést a numerikus megoldástól.

A gép sebessége



15. ábra A repülő sebességének időbeli alakulása r0; ra1-ra5 esetekben (acél sűrűségű céltárgy)

A gép sebessége



16. ábra A repülő sebességének időbeli alakulása r0; rb1-rb5 esetekben (beton sűrűségű céltárgy)

6.5. A céltárgy mozgása

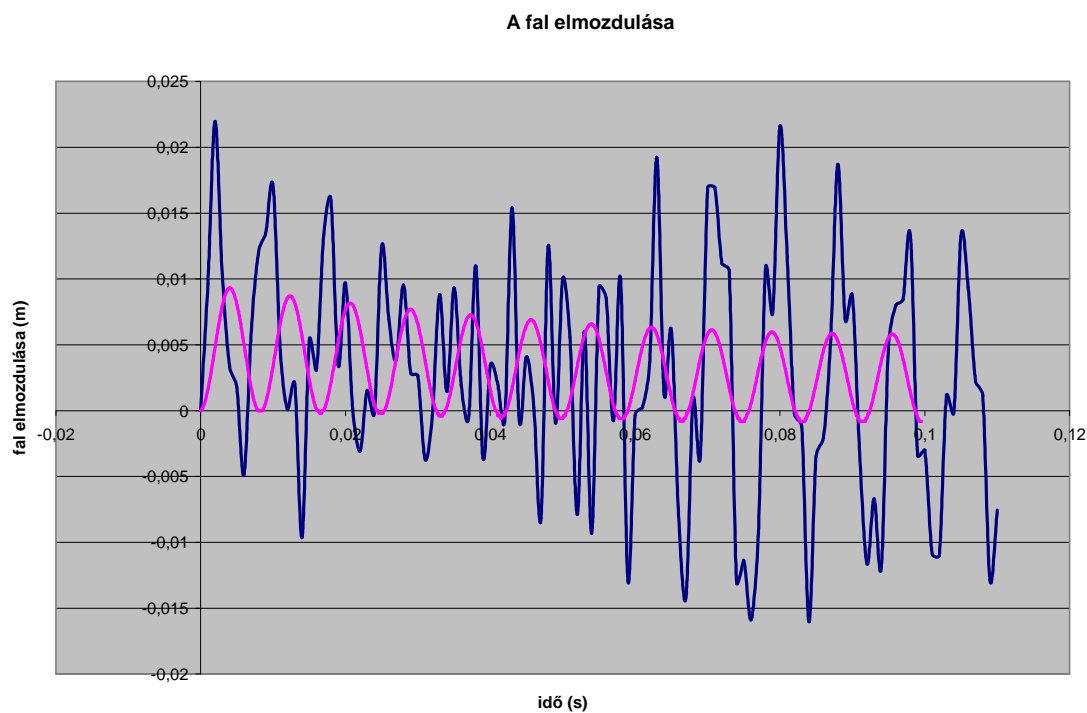
A következőkben a numerikus modell csuklósan megtámasztott, lineárisan rugalmas anyagú céltárgy középpontjának kitéréseit vetjük össze az analitikus modell lineáris rugóval megtámasztott céltárgyának kitéréseivel.

Az eredmények alapján általánosan elmondható, hogy a kitérések a közepes r_2 , r_3 merevségek esetében közelítik egymást a leginkább. Nagy céltárgy-merevségek esetén az analitikus megoldással szemben a numerikus eredményekben számos zavar (pl. lökeshullámok hatása) jelenik meg, mely zavarok nagyságrendileg összemérhetőek a kitérésekkel, így jelentős eltéréseket okoznak. Kis merevségek esetében ezzel szemben az eddig is tapasztalt, jellegében teljesen eltérő analitikus és numerikus törési folyamat különbsége okoz jelentős különbségeket a céltárgyak mozgásában.

A diagramokon a rózsaszín színnel jelölt analitikus kitéréseket a törés leállásáig rögzítettük, tehát csak a gerjesztett rezgési rész látható, a törési folyamat után folytatódó szabadrezgés nem.

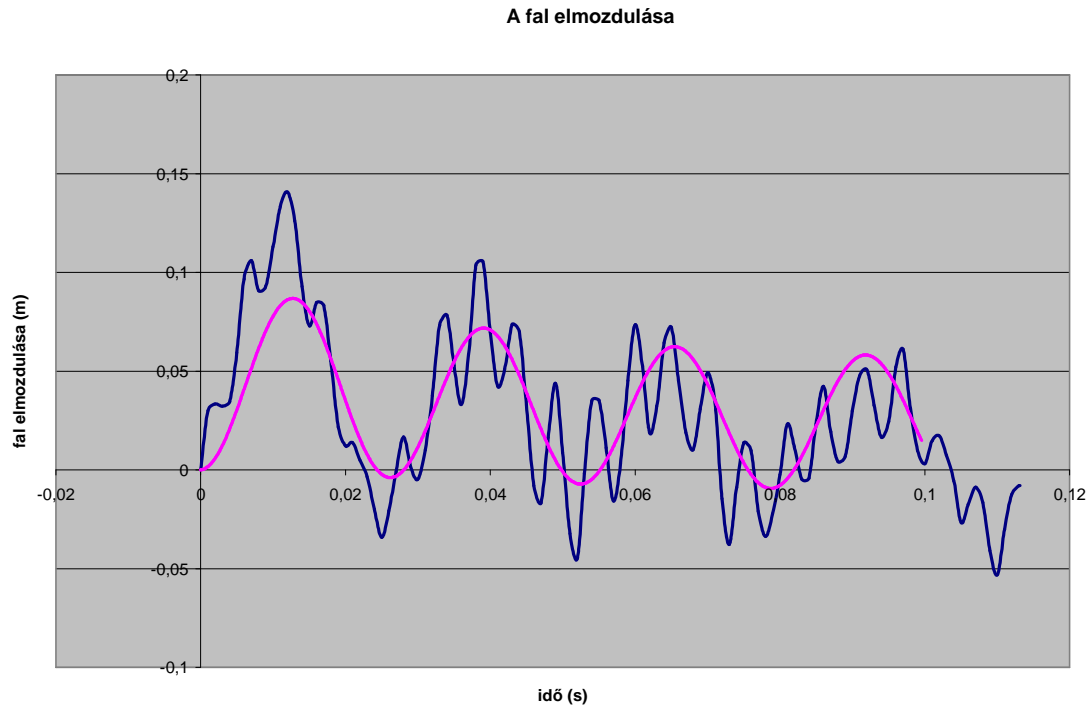
6.5.1. ra_1 - ra_5 jelű esetek

A céltárgy merevségének változtatásával a kitérések nagyságrendje is változik. A numerikus futtatások esetében minden alkalommal tapasztalhatóak a főrezgésen kívül kisebb periódusú zavarok, melyek a grafikonokat a fő rezgési tendencián felül „hullámossá” teszik. Nagy céltárgy merevségek esetén ezek a zavarok még összemérhető nagyságrendűek a valós rezgéssel, így jelentős eltéréseket okoznak a numerikus és analitikus modell eredményei között (ld. 17. ábra). Ezek a zavarok feltehetően a repülőben létrejövő lökeshullámok következményei, melyek jól megfigyelhetőek a numerikus szimulációban.

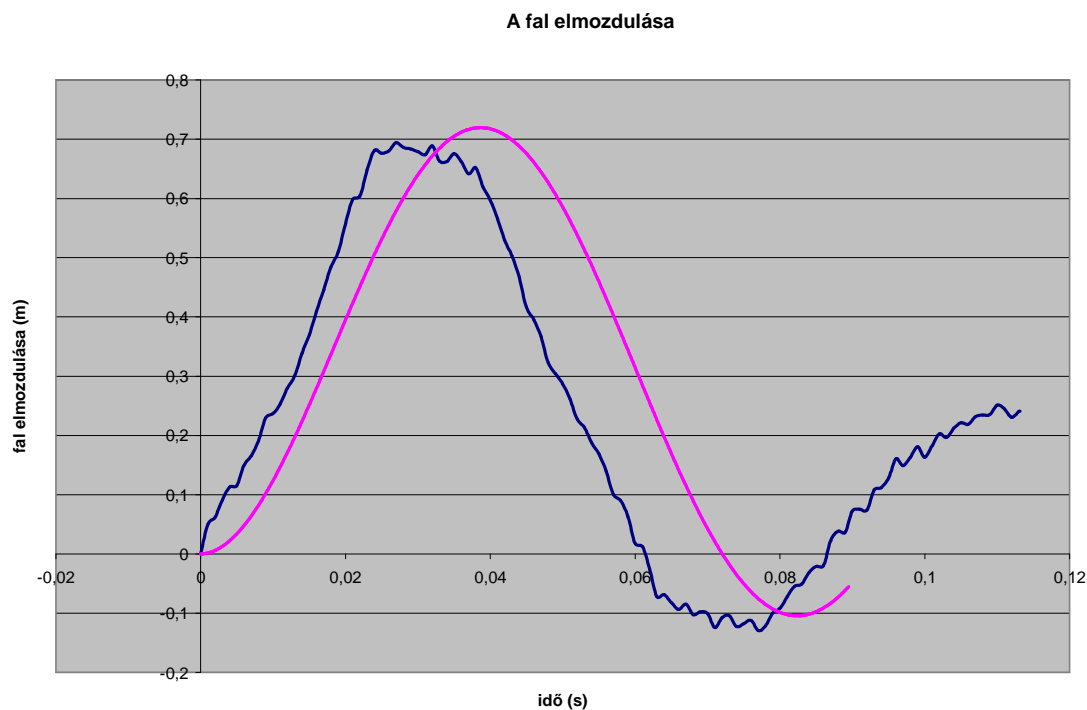


17. ábra A céltárgy elmozdulása ra_1 eset numerikus (ra_1n) és analitikus (ra_1a) megoldásakor

A 18. ábrán látható ra2 céltárgy merevség esetében az amplitúdó már elegendően nagy ahhoz, hogy a lökéshullámok miatti zavarok ellenére látható legyen a kétfajta modell hasonlósága, mind a periódusidők, mind pedig a kitérések tekintetében. Szintén jól közelíti egymást az ra3 merevség két modellje, annak ellenére, hogy a céltárgy kitérése ebben az esetben eléri a lövedék deformációjának 7 %-át (ld. 19. ábra).

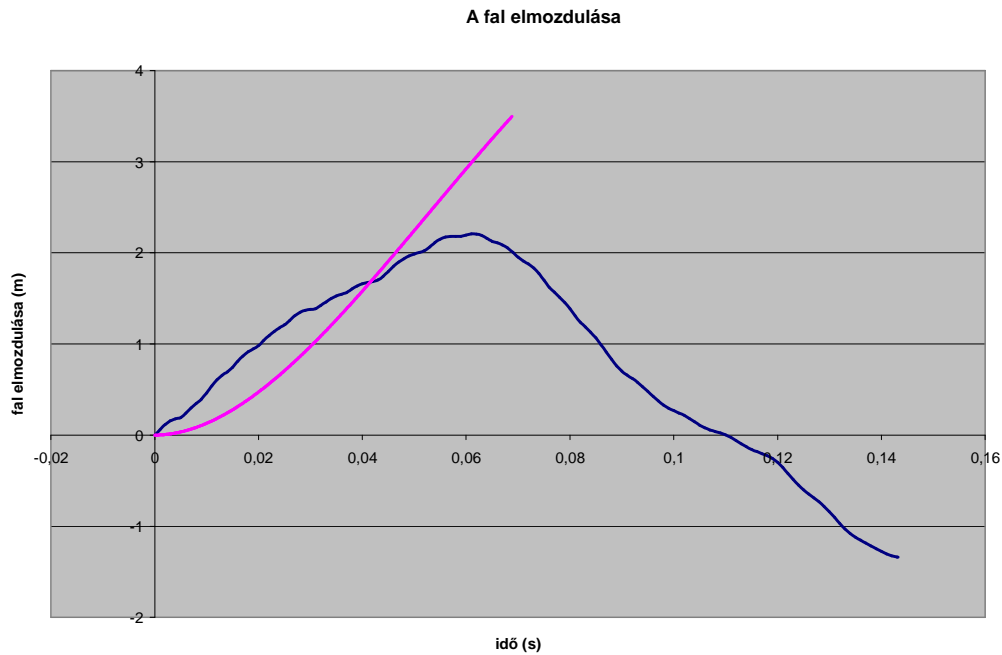


18. ábra A céltárgy elmozdulása ra2 eset numerikus (ra2n) és analitikus megoldásakor (ra2a)

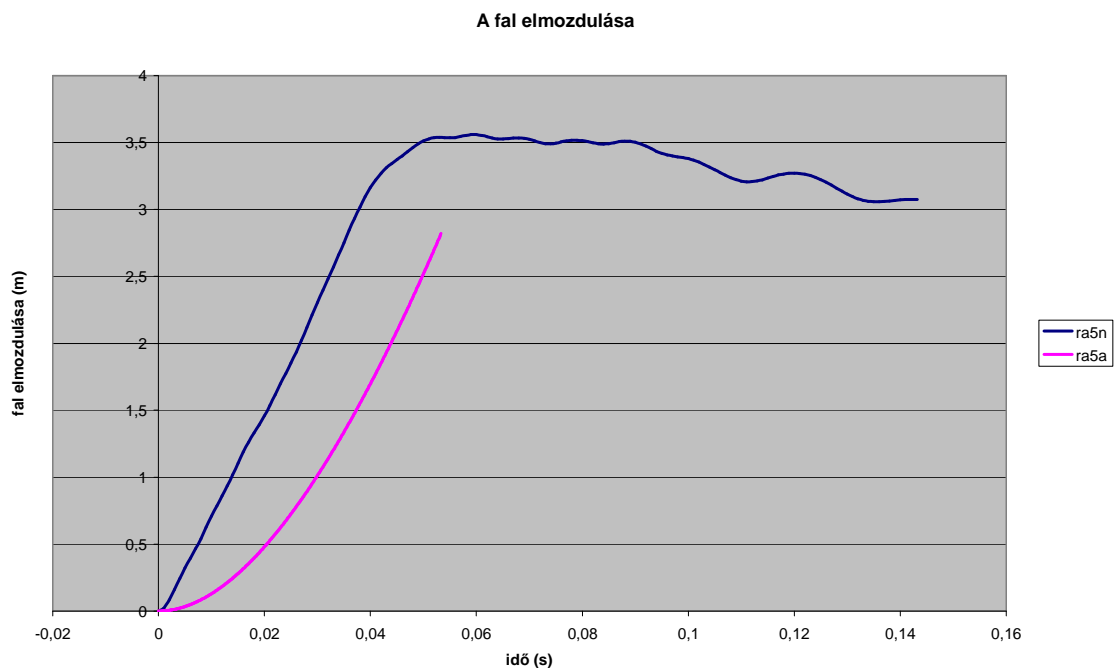


19. ábra A céltárgy elmozdulása ra3 eset numerikus (ra3n) és analitikus megoldásakor (ra3a)

A kisebb merevségű ra4, ra5 esetekben a már eddig is tapasztalt eltérések jól láthatóan megjelennek a 20. és 21. ábrán. A nagy kitérések miatt a lökéshullámokból adódó zavar hatása itt már egyáltalán nem érvényesülhet, így a jelentős eltérések magyarázata az, hogy ez az a céltárgy-merevségi tartomány, amelyben a Riera-modell már nem alkalmazható. Ezekben az esetekben a numerikus modellben a céltárgy kitérése eléri a repülő deformációjának ~20-40%-át. Ez azt jelenti, hogy már biztosan nem teljesül a puha ütközés azon definíciója, amely nagyságrendileg nagyobb deformációkat feltételez a lövedékben, mint a céltárgyban. Érdekes, hogy az analitikus modellek céltárgyai ezekben az esetekben nem érik el a kitérésük szélső helyzetét, míg a numerikus modell lemezei még a törés folyamata során megállnak, majd visszaindulnak a lövedék irányába.



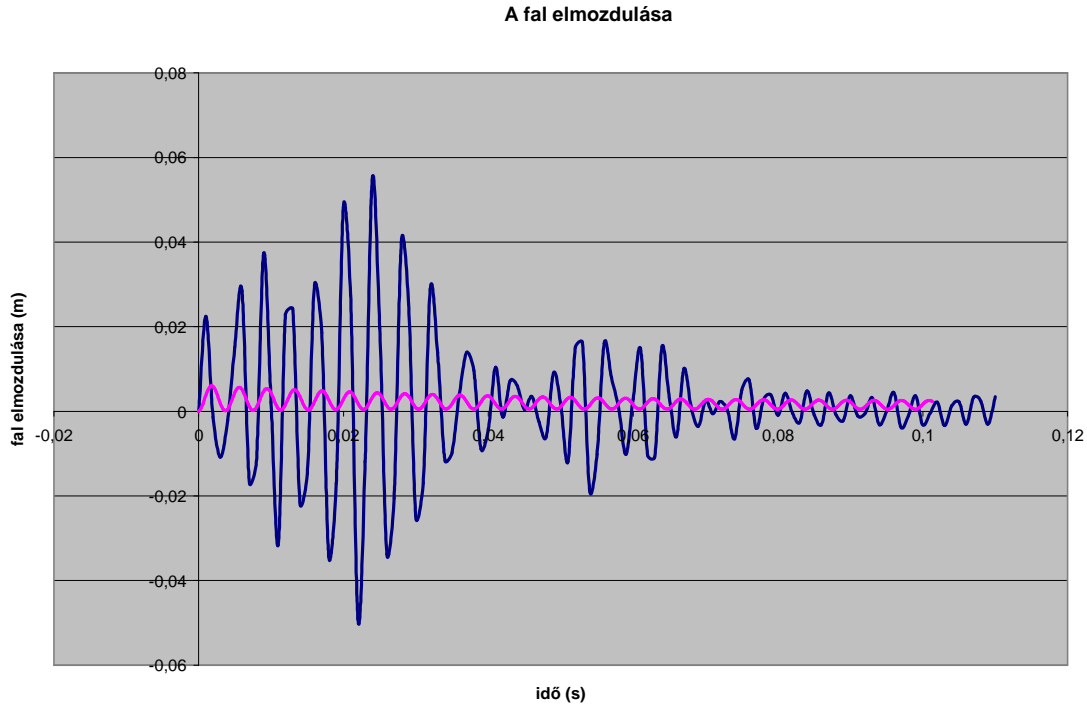
20. ábra A céltárgy elmozdulása ra4 eset numerikus (ra4n) és analitikus megoldásakor (ra4a)



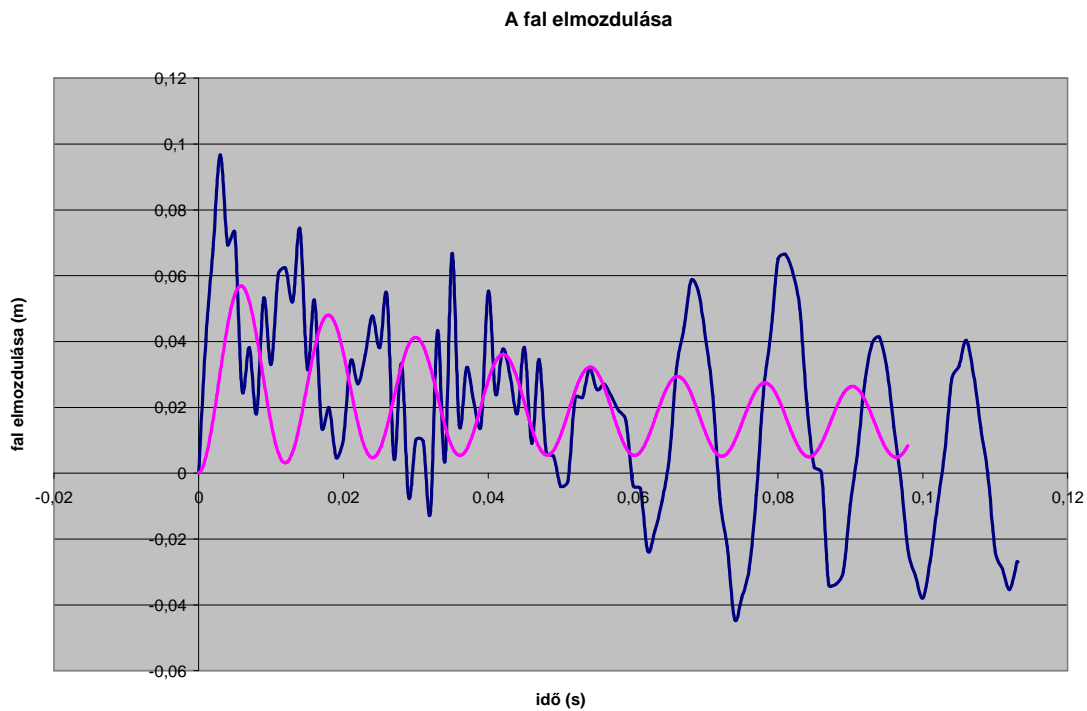
21. ábra A céltárgy elmozdulása ra5 eset numerikus (ra5n) és analitikus megoldásakor (ra5a)

6.5.2. rb1-rb5 jelű esetek

Az ra1-ra5 jelű esetekhez hasonlóan alakulnak az rb1-rb5 esetek a céltárgy kitérései, azzal a különbséggel, hogy a kisebb céltárgy-sűrűség még érzékenyebbé teszi a nagyobb merevségű eseteket a numerikus modellben zavarként megjelenő lökéshullámokra (22. és 23. ábra).

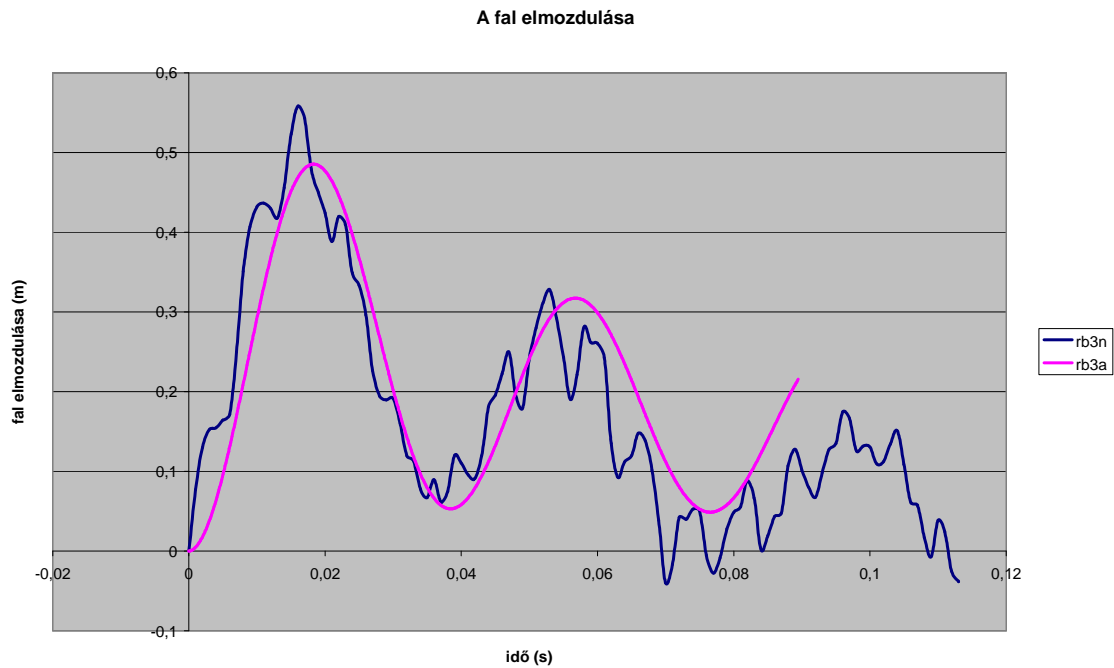


22. ábra A céltárgy elmozdulása rb1 eset numerikus (rb1n) és analitikus megoldásakor (rb1a)



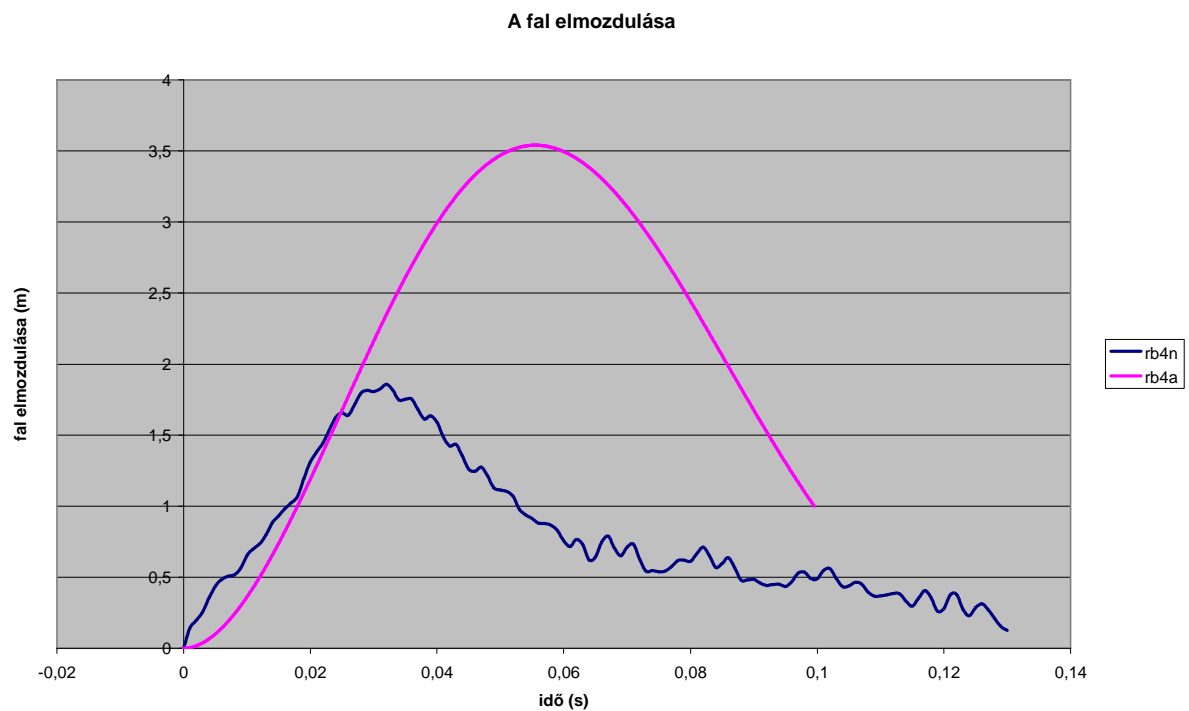
23. ábra A céltárgy elmozdulása rb2 eset numerikus (rb2n) és analitikus megoldásakor (rb2a)

Az rb3 jelű esetben érzékelhető a két modell összhangja, mind a periódusidők, mind az amplitúdók tekintetében, a nagyobb merevség, a kisebb céltárgy tömeg ellenére kisebb kitéréseket okoz, mint az ra3 esetben tapasztalhatóak.



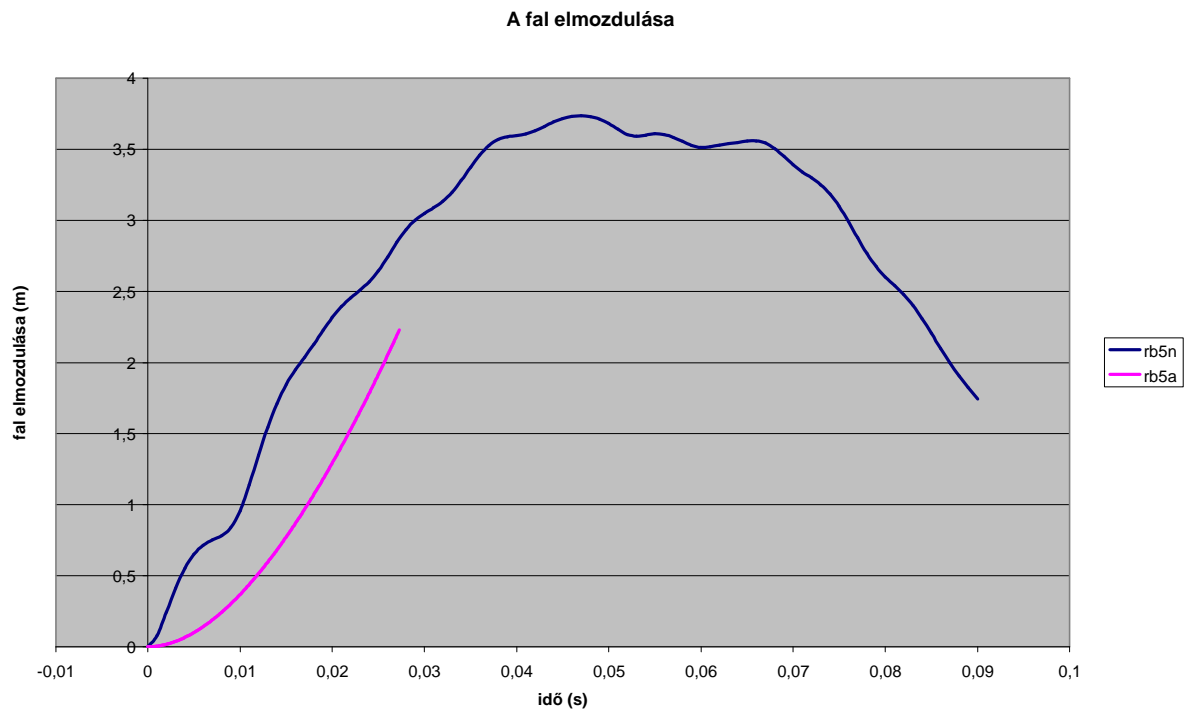
24. ábra A céltárgy elmozdulása rb3 eset numerikus (rb3n) és analitikus megoldásakor (rb3a)

Az rb4 esetben az ra4 esethez hasonlóan az analitikus modell céltárgy-kitérése a nagyobb, különbség azonban, hogy az rb4a esetben a törés során a céltárgy eléri szélső helyzetét és a 0,06 s-tól kezdve a repülővel ellentétes irányban mozog (ez a jelenség jól látható a 16. ábrán is).



25. ábra A céltárgy elmozdulása rb4 eset numerikus (rb4n) és analitikus megoldásakor (rb4a)

A numerikus modellek kitérései az rb4, rb5 eseten is elérik az összetört géphossz legalább ~20%-át (rb5n esetében ~60%-át), így az ütközés itt sem tekinthető szokványos értelemben puha ütközésnek.



26. ábra A céltárgy elmozdulása rb5 eset numerikus (rb5n) és analitikus megoldásakor (rb5a)

7. Összefoglalás

A dolgozatban deformálódó lövedék (repülőgép) merev fallal (atomreaktor külső vasbeton fala) való ütközését vizsgáltuk. Az általunk felépített modellekben puha ütközést feltételeztünk, ami az általunk alkalmazott definíció szerint részint azt jelenti, hogy a lövedék penetrációja nem következik be.

Elsődleges célunk az volt, hogy a gyakorlatban több évtizede alkalmazott Riera-féle modell alkalmazhatóságát vizsgáljuk eltérő céltárgy-merevségek esetében. Ennek érdekében Riera-modell alapú analitikus számítások eredményeit hasonlítottuk össze az általunk épített numerikus (végeselemes) modellek eredményeivel. A vizsgált 11 modellben a repülő tulajdonságai változatlanok voltak, a céltárgy merevsége és tömege azonban változott. A céltárgy merevségek közt szerepelt 1 m vastag acél, illetve beton anyagú falnak megfelelő merevség is, annak érdekében, hogy reális eseteket is vizsgáljunk.

Szintén célunk volt annak eldöntése, hogy milyen mértékben okozhat eltéréseket, ha a számítások egyszerűsítésének érdekében a céltárgyat tökéletesen merevnek tekintjük.

Az analitikusan és numerikusan vizsgált modellesek eredményeit és értékelését a 2. Táblázat tartalmazza. Az r0 eset a végtelen merev céltárgyhoz tartozik, majd ezt követik egymás alatt az eltérő nagyságrendű merevséggel rendelkező esetek, csökkenő merevségi sorrendben.

2. Táblázat: A vizsgált numerikus és analitikus modellek eredményei

Eset	t_a	t_n	x_a	x_n	A_a	A_n	A_a/x_a	A_n/x_n	x-t	v-t	A-t
	0,1 s	0,1 s	m	m	m	m					
r0	10	9,5	10,6	10,8	0	0	0,000	0,000	ok	ok	nincs
ra1	10,1	11	10,1	10,6	0,01	0,02	0,001	0,002	ok	ok	zavar
rb1	10,1	11	10,1	10,3	0,005	0,05	0,000	0,005	ok	ok	zavar
ra2	10	9,6	10,1	10,4	0,07	0,15	0,007	0,014	ok	ok	ok
rb2	10	8,6	10,1	9,9	0,05	0,1	0,005	0,010	ok	ok	zavar
ra3	9,2	11,2	10,1	10,9	0,8	0,8	0,079	0,073	ok		ok
rb3	10,8	10,3	10	10,3	0,5	0,55	0,050	0,053	ok		ok
ra4	6,8	9,8	9,1	10,7	3,5	2,2	0,385	0,206			
rb4	10,1	9,6	10,1	9,8	3,5	2	0,347	0,204			
ra5	5,3	13,4	5,4	8,5	2,8	2,5	0,519	0,294			
rb5	2,7	7,8	2,5	5,1	2,2	3,7	0,880	0,725			

Az alkalmazott jelölések magyarázata:

- t_a : törés időtartama az analitikus modellben
- t_n : törés időtartama a numerikus modellben
- x_a : összetört géphossz az analitikus modellben
- x_n : összetört géphossz a numerikus modellben
- A_a : a céltárgy maximális elmozdulása az analitikus modellben
- A_n : a céltárgy maximális elmozdulása a numerikus modellben
- x-t: annak értékelése, hogy a gép törésének időbeli lefutását vizsgálva az analitikus és numerikus modell nagy, közepes vagy kis mértékben illeszkedik egymáshoz

- v-t: annak értékelése, hogy az ép géprész sebességének csökkenését vizsgálva az analitikus és numerikus modell nagy, közepes vagy kis mértékben illeszkedik egymáshoz
- A-t: annak értékelése, hogy a céltárgy kitérésének időbeli lefolyását vizsgálva az analitikus és numerikus modell nagy, közepes vagy kis mértékben illeszkedik egymáshoz

A numerikus és analitikus modellek eredményeinek illeszkedése:

Nagymértékű egyezés a modellek között	Közepes mértékű egyezés a modellek között	A két modell nem illeszkedik egymáshoz
---------------------------------------	---	--

A táblázat adatai alapján látható, hogy a Riera-modell alkalmazhatóságának vannak határai, a kevésbé merev céltárgyak esetében egyre nagyobb különbségek tapasztalhatóak a Riera-modell és a numerikus modell eredményei között. A pontos határok eldöntése további kutatásokat igényel, azonban a kapott eredmények alapján kijelenthető, hogy:

- Ha a merevségi viszonyok miatt a céltárgy várható elmozdulása az összetörő géphossz **1-2%-a** alatt marad, akkor a Riera-modell, illetve a végtelen merevnek tekintett céltárgy alkalmazása **jól közelíti** a valóságos folyamatot.
- Ha a merevségi viszonyok miatt a céltárgy várható elmozdulása az összetörő géphossz **5-10%-a** alatt marad, akkor a Riera-modell, illetve a végtelen merevnek tekintett céltárgy alkalmazása **megfelelően** közelíti a valóságos folyamatot.
- Ha a merevségi viszonyok miatt a céltárgy várható elmozdulása az összetörő géphossz **20-30%-át** meghaladja, akkor a Riera-modell, illetve a végtelen merevnek tekintett céltárgy feltételezése **rosszul** közelíti a valóságot.

Vizsgálataink eredményei alapján a Riera-modell 1 m vastag acél anyagú fal (ra3 jelű eset) viselkedésének modellezésére mérsékelten, míg 1 m vastag beton anyagú fal viselkedésének modellezésére (rb4jelű eset) rosszul alkalmazható. Ezekben az esetekben tehát az ütközésnél fellépő reakcióerő számításakor csatolt modellt szükséges alkalmazni (nem elegendő a reakcióerőket teherként működtetni a szerkezetre).

Szintén megfogalmazható, hogy kis céltárgy-merevségek esetén nem csupán a végtelen merev céltárgyat feltételező Riera-modell és a végelemes modell eredményeinek eltérése jelentős, de a végtelen merev és rugalmasan megtámasztott céltárgyak esetében kapott analitikus eredmények is jelentősen különböznek.

Hivatkozások

- [1] Q.M. Li, S.R. Reid, H.M. Wen, A.R. Telford: Local impact effects of hard missiles on concrete targets. *International Journal of Impact Engineering*, **32** (2005), 224-284
- [2] J. D. Riera: On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces. *Nuclear Engineering and Design*, **8** (1968), 415-426.
- [3] J.P. Wolf, K.M. Bucher, P.E. Skrikerud: Response of equipment to aircraft impact. *Nuclear Engineering and Design*, **47** (1978), 169-193.
- [4] G. Forasassi, R. Lofrano: Preliminary analysis of an aircraft impact. CIRTEN-UNIFI RL 1059/2010, Pisa, July 2010.
- [5] D.M. Cotsovos, M.N. Pavlović: Numerical investigation of concrete subjected to high rates of uniaxial tensile loading. *International Journal of Impact Engineering*, **35** (2008), 319-335.
- [6] Balázs L Gy.: Építőanyagok I., BMEEOEMAT12 segédlet a BME Építőmérnöki Kar hallgatói részére. HEFOP/2004/3.3.1/0001.01, 2004.
- [7] Paksi Atomerőmű Zrt. honlapja: <http://atomeromu.hu/>
- [8] P. Koechlin, S. Potapov: Classification of soft and hard impacts- Application to aircraft crash. *Nuclear Engineering and Design*, **239** (2009), 613-618.
- [9] ANSYS, Release 11.0 Documentation for ANSYS, LS-DYNA Users' Guide.