



TDK SZEMELVÉNYEK 2016

Válogatott munkák a BME Építőmérnöki Karának
2016. évi TDK Konferenciájáról

Tartalom

Bevezető

Potó Vivien: Önvezető járművek térképeinek előállítása
lézerszkennel alkalmazásával

Nagy Eszter Dóra: Lefolyás idősorok vizsgálata nem mért
vízgyűjtők feltárásának előkészítésére

Csortos Gabriella: Vasúti pályaszerkezeti elemek zaj- és
rezgéscsillapító hatásainak vizsgálata üzemi
állapotban és laboratóriumi körülmények között

Agári Tamás, Cebula Ágnes: Kőzetkárosodási formák
térképezése a Citadella kőzetein

Balczó Gáspár, Csanády Dániel: Biológiai lebomló
táblás hőszigetelő anyagok

Csillag Fruzsina, Németh Gábor: A paksi KKÁT
épületének vizsgálata repülőgép becsapódásra

Kenéz Ágnes: Acél rácsszerkezetű torony körüli
széláramlás vizsgálata

**A paksi KKÁT épületének vizsgálata repülőgép
becsapódásra
(Aircraft impact analysis of ISFS facility in Paks)**

*Csillag Fruzsina MSc I. évf.
Németh Gábor MSc I. évf.*

Konzulensek:

Dr. Dunai László egyetemi tanár

Hidak és Szerkezetek Tanszék

Dr. Katona Tamás János egyetemi tanár, tudományos tanácsadó

Pécsi Tudományegyetem, MVM Paksi Atomerőmű Zrt.

Laczák Lili Eszter egyetemi tanársegéd

Hidak és Szerkezetek Tanszék

Kulcsszavak: dinamikus vizsgálat; paksi atomerőmű; repülőgép ütközés

1. Bevezetés

Atomerőművek működése során – így a Paksi Atomerőmű esetében is – elhasznált fűtőelemek keletkeznek, melyek radioaktív hulladéknak minősülnek. A kiégett fűtőelemeket a végleges elhelyezésük előtt 50 évre a Kiégett Kazetták Átmeneti Tárolójába (KKÁT) helyezik. A radioaktív hulladék veszélyessége miatt a KKÁT épülete kiemelt biztonsági intézkedéseket követel meg.

Feladatunk volt, hogy elemezzük a kiemelt fontosságú építmény repülőgép rázuhanásra történő vizsgálati lehetőségeit, majd a kiválasztott vizsgálati módszerek alkalmazását egy mintapéldán keresztül mutassuk be.

A teljes repülőgép becsapódásának elemzésére analitikus és numerikus módszerek is léteznek. Esetünkben a vizsgálat lényege az volt, hogy meghatározzuk a radioaktív anyagokat tároló csövek károsodásának mértékét. A tárolócsövek a komplex kialakítású szerkezet belsejében találhatók, így amikor a homlokzatnak történő ütközés csövekre gyakorolt hatásait kellett elemeznünk, a céltárgy paraméterei több szerkezeti elem kialakításától, állásától, egymáshoz való kapcsolatától függtek. Ezek meghatározásához már önmagában szükséges numerikus modell elkészítése, így vizsgálatainkat végegyes lemes szoftver alkalmazásával végeztük el.

A modellépítés után két lehetséges ütközési módra végeztünk dinamikus vizsgálatot. Vizsgáltuk egy földköznelben (közel vízszintesen) sikló gép ütközését a szerkezet déli falába, illetve felülről (közelítőleg 45°-ban) történő rázuhanást, mely a vasbeton szerkezet fölötti acélszerkezetű betöltő csarnokon át történik.

Végül a numerikus modellből kapott eredményekből kiválasztottuk a – radioaktív anyagokat tároló csövek szempontjából – legkedvezőtlenebb elmozdulás értéket, majd geometriai megfontolások alapján vizsgáltuk meg az ebből származó károsodás lehetőségét.

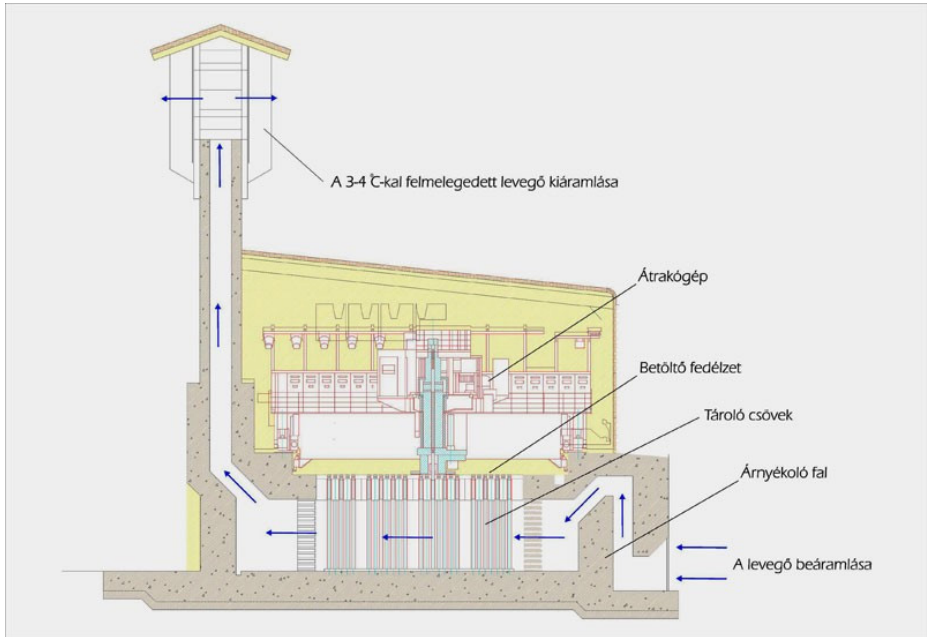
Az ütköző repülőgép típusát valószínűségi alapon kell meghatározni, mi azonban példaképp a szakirodalomban széles körben vizsgált Phantom F4 adataival dolgoztunk.

A becsapódó lövedék és a céltárgy merevségi viszonyai alapján két ütközéstípust különböztetünk meg. Puha ütközéskor a céltárgy alakváltozásai elhanyagolhatóak a lövedék deformációjához képest, a szerkezeti válasz globális jellegű, a hatások a teljes szerkezetre kiterjedőek. Kemény ütközés esetén a lövedék deformációja elhanyagolható a céltárgy károsodásaihoz képest, a becsapódó tárgy ütközése döntően lokális károkat okoz az ütközési zóna közvetlen környezetében [1]. Jelen cikkben a terjedelmi korlátok miatt csak a puha ütközéssel foglalkozunk.

2. A szerkezet bemutatása

A vizsgált szerkezet, a KKÁT moduláris kialakítású, vasbeton kamrákból álló, mindkét irányban nagy merevségű keresztirányú falakkal rendelkező, tömör doboz szerkezet (1. ábra). A kamrafalak és a betöltő fedélzet alkotja a dobozszerkezetet, aminek vastagsági paramétereit leginkább a sugárvédelmi követelmények határozzák meg. A betöltő fedélzet egy perforált, acéllemezekkel határolt, betonnal kitöltött üreges szerkezet, amely a keresztirányú merevséget alapvetően befolyásolja. Ez a szerkezet biztosítja a kazettákat tároló csőszerkezetek felső végének oldalirányú megtámasztását. Minden kamra betöltő fedélzete négy szorosan illeszkedő perforált acélszerkezetből épül fel.

A szerkezet hosszán kétoldalt végigmenő sínek és acél lemezelemek növelik a szerkezet keresztirányú merevségét.



1. ábra: A KKÁT keresztmetszete [2]

A tárolócsöveket a betöltő fedélzet acélszerkezetében kialakított átvezető csöveken keresztül vezetik át, majd letámasztják a kamrát alulról határoló lemezalpra. A kazetták függőleges irányban állnak a csövekben, de szabadon helyezkednek el.

3. Puha ütközés

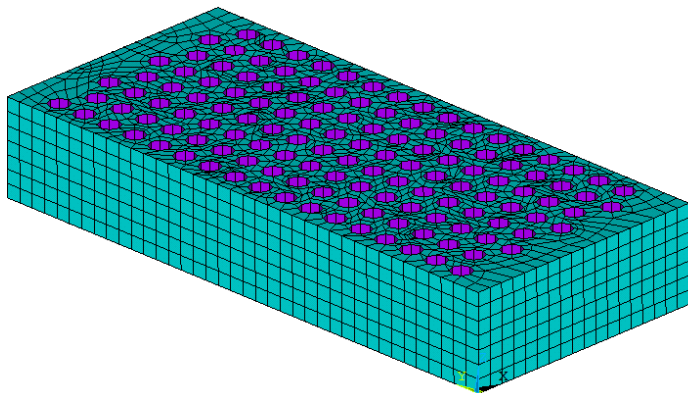
A vizsgálatok elvégzéséhez egy kamra szerkezetén kívül a betöltő fedélzet önálló végelem modelljét készítettük el ANSYS környezetben. A betöltő fedélzet jelentős hatással van a szerkezet merevségére, ami alapvető paramétere az ütközésvizsgálatnak. Ennek megfelelően az előlről és felülről történő becsapódások modelljeihez meghatároztuk a betöltő fedélzet vízszintes és függőleges merevségét.

3.1. Betöltő fedélzet modellezése

A betöltő fedélzet egy sajátos kialakítású szerkezet, amely a tárolócsövek megtámasztására és vezetésére szolgál, ennek megfelelően igen sok áttörés található rajta. A szerkezet kontúrja acéllemezekkel határolt, az ezek által közrezárt üreget pedig betonnal töltik ki.

3.1.1. Héjmodell

Első modellünkben csak az acélszerkezet jelenik meg (2. ábra). A héjmodellt azért készítettük, hogy a testmodellel összehasonlítva szemléltessük, mekkora merevítő hatása van a betonnak.



2. ábra: Betöltő fedélzet héjmodellje

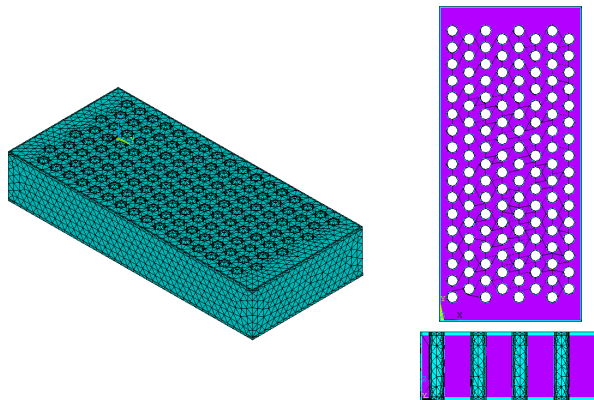
Az általunk választott végelem a SHELL181 héjelem. Ez a végelem-típus alkalmas a vékony héjszerkezetek elemzésére, így a centiméter-nagyságrendű vastagságú acéllemezeket jól modellezhetjük vele. A négyszögelem 4 csomóponttal rendelkezik, csomópontonként hat szabadságfokkal.

A szerkezetet kétoldalt, a rövidebb, X tengellyel párhuzamos élek mentén támasztottuk meg, a beépítési mód alapján csuklósan. A modellt az ANSYS Mechanical APDL programjában építettük fel, ahol statikusan tettük rá a terheket. A vízszintes teher esetében a terhelés 1 kN-nak megfelelő, a magasság mentén megoszló teher a lemez közepén. Amennyiben a terhet koncentráltan működtettük volna a szerkezeten, az erős lokális alakváltozásokat okozott volna, így a merevségre nem tudunk volna érdemben következtetni. A teheresetből meghatároztuk a szerkezet átlagos X irányú elmozdulását, amelyet az oldallemezek legnagyobb vízszintes (hosszirányú) eltolódásainak átlagaként definiáltunk, így egyszerűen tudunk következtetni a vízszintes merevségre (eredményeket ld. 1. táblázat).

Függőleges terhelés esetében a teher 1 kN nagyságú koncentrált erő. Mivel a vezető csövek egymáshoz elegendően közel helyezkednek el, így a szerkezet felső lemezének közepére helyezett erő hatása globálisan jelentkezik. A teheresetből meghatároztuk a szerkezet átlagos Z irányú elmozdulását, amelyet az alsó- és felső lemezek legnagyobb függőleges eltolódásainak átlagaként definiáltunk, így egyszerűen tudunk következtetni a függőleges merevségre (eredményeket ld. 1. táblázat).

3.1.2. Testmodell

Második modellünknel a beton hatását is figyelembe vettük, így ezt testelemekből építettük fel (3. ábra). A modellhez SOLID187 elem típust használtunk. Ez egy magasabb rendű 3D, 10 csomóponttal rendelkező tetraéder elem. Az egyenként három eltolódási szabadságfokkal rendelkező csomópontok a tetraéder csúcsain és az élek felezőpontjain helyezkednek el. A szerkezetet a héjmodellhez hasonlóan kétoldalt, az X tengellyel párhuzamos szélső élek mentén csuklósan támasztottuk meg.



3. ábra: Betöltő fedélzet testmodellje, vízszintes és függőleges irányú metszettel (kék - acél, lila - beton)

A modellre először a héjmodell tehereseteit működtettük és irányonként leolvastuk az átlagos elmozdulásokat. Mivel a szerkezet terhelése sokkal inkább hasonlít az egyenletesen megoszló teherre, így újabb tehereseteket készítettünk: leterheltük a testmodellt 1 kN/m² nagyságú felületen megoszló erővel.

3.1.3. Merevségi eredmények összehasonlítása

A modellek futtatása előtt hálófüggetlenség vizsgálatot készítettünk, melynél a konvergencián kívül törekedtünk arra, hogy mindkét modellen egységes hálóméretet alkalmazunk. Az alkalmazott hálóméret végül 0,125 m lett.

1. táblázat: Különböző modellekkel kapott merevségi eredmények

	Héjmodell eredmény [kN/mm]	Testmodell eredmény [kN/m ² /mm]	
		koncentrált	megoszló
Vízszintes merevség	3436	5291	408
Függőleges merevség	749	3049	1631

Mivel a beton kitölti az acéllemezektől határolt üreges teret – ezzel megtámasztva az acéllemezeket és növelve az inerciát –, a betonnal kitöltött testmodell jóval merevebb viselkedést mutat. Az 1. táblázatból látható, hogy a lehajlások csökkentek.

A betöltő fedélzet elkülönített vizsgálatát követően, a beton hatását is figyelembevevő testelemekből felépített modellből kapott eredményeket építettük be a globális kamra-modellbe.

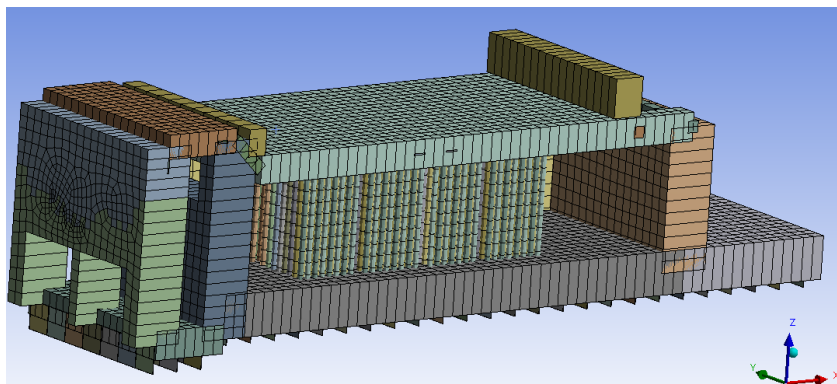
3.2. Kamraszerkezet modellezése

A KKÁT épülete vasbeton kamrák (vasbeton dobozok) sorozatából áll, melyek – ami a falakat illeti – ugyanolyan geometriával épültek és épülnek. Éppen ezért a vizsgálat szempontjából felesleges a teljes épületet lemodellezni, elegendő csak egyetlen kamrát (4. ábra) megépíteni, amelyhez megfelelő megtámasztásokat illesztünk a szomszédos kamrákkal való kapcsolódások helyére.

A szerkezetet ANSYS Workbench programban modelleztük, a kamrafalakat, az alaplemezt és a betöltő fedélzetet héjelemekből építettük fel. Az alkalmazott elemtípus a Quad 4, négy csomópontos lineáris bázisfüggvényű héjelem.

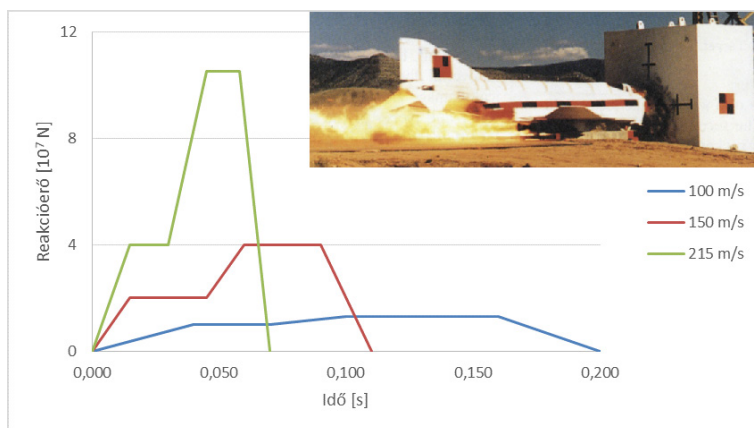
A betöltő fedélzet sűrűségét a valós geometria alapján meghatározott átlagsűrűsége állítottuk be, figyelembe véve a nagymennyiségű beton mellett az acéllemezeket és az üregeket. A tárolócsövek merevítő hatását figyelembe vettük, illetve modellezésük azért is szükséges volt, hogy a csövek eltolódását egyszerűbben nyomon tudjuk követni. Az tárolócsöveket Low Order Beam gerendaelemmel hálóztuk.

A tárolócsöveket a betöltő fedélzet közel 1 méter hosszon vezeti a csövek tetejénél, így a felső megtámasztás befogottnak tekinthető. A csövek alját tartó három-három tüske feltételezhetően csuklós megtámasztást biztosít. Az alaplemezt talajrugókkal támasztottuk meg, melyek merevségét dinamikus szondázás ütésszámaiból származtatott össze-nyomódási modulus értéknek megfelelően vettünk fel.



4. ábra: Kamramodell végelemek hálózata

Az alkalmazott Phantom F4 gépet, és teherfüggvényeit [3] az 5. ábra mutatja. A teherfüggvény a géptípustól és a becsapódási sebességtől függ, és a Riera-modell segítségével határozható meg [4]. Három sebességet vizsgáltunk: 100 m/s, 150 m/s és 215 m/s. A függvényeket két részre osztottuk: a (0 s-tól nézve) második lineáris szakasztól induló többletnyomást a gépszárnyak adják át a szerkezetre, az ez alatti részt pedig a géptörzs.



5. ábra: Phantom F4 különböző sebességekhez tartozó teherfüggvényei

Az előlről történő becsapódást a szerkezet homloksíkjára merőlegesen tételeztük fel, ugyanis ez adja a legkedvezőtlenebb eredményeket. A felülről történő rázuhanás a valószínűleg csak igen alacsony hajlásszög alatt jöhetne létre, azonban a biztonság javára 45 fokos becsapódási szöget tételeztünk fel.

Előre nem látható, hogy a rázuhanás akkor okoz nagyobb kárt, ha a csövekre történik, vagy akkor, ha a csövek közötti vékony, alátámasztatlan sávra, így mindkét esetet megvizsgáltuk.

3.3. Numerikus számítás eredményei

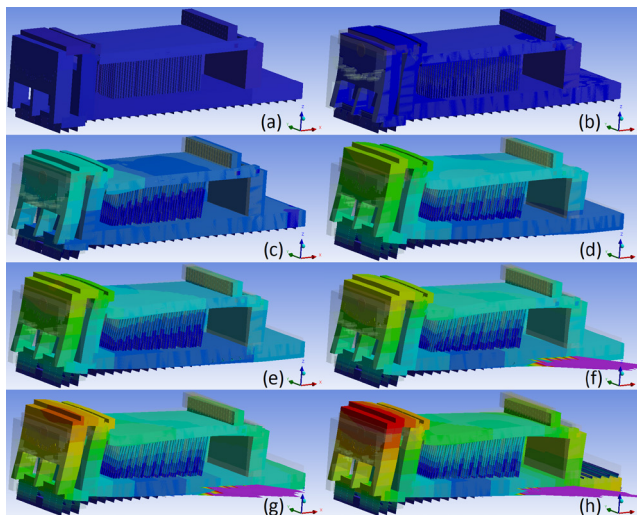
A numerikus számítások során összesen kilenc esetet vizsgálunk a kamramodell esetében: három becsapódási felületre működtettünk helyenként három-három különböző sebességhez tartozó teherfüggvényt. A vizsgált becsapódási felületek elhelyezése:

- déli oldalon történő merőleges becsapódás, legkedvezőtlenebb magassági szint – a gép teteje egyvonalban a fal felső síkjával;
- felülről történő rázuhanás 45 fokos szögben, a gép pontosan a középső csőtartományok közé érkezik;
- felülről történő rázuhanás 45 fokos szögben, a gép pontosan a középső csőtartomány közepébe érkezik.

A 6. ábra a déli oldalról történő becsapódás elmozdulásait mutatja az idő függvényében $v=100$ m/s sebesség esetén.

A program az elmozdulásokat kékből-pirosba tartó színskálán jelöli, a nagyobb eltolódásokat a melegebb színek mutatják. A déli oldalról történő becsapódás esetén jól látszik a 6. (a)-tól (c) ábrarészig tartó, fokozatos (lineáris) növekedés, ahogy a gép orra, majd a törzs kezd ütközni, az ütközési zóna a fal középső része. A (d) résztől az (f) ábrarészig a gépszárnyak és a törzs által okozott nyomás alakul ki (szintén lineárisan növekvően). Előlről történő becsapódás esetén a rezgéshullámok olyan gyorsan terjednek, hogy már 0,11 s-nál sem a becsapódást felfogó fal elmozdulásai a legnagyobbak. Ez az oka annak, hogy az (f) ábrarésztől megjelennek a lilás színek (mivel a nagyobb elmozdulások már a csöveknél, alaplemeznél, talajrugóknál alakulnak ki). Az (f) ábrarésztől (h)-ig a farokrész felé haladva a terhelés állandó, így a szerkezetben egyre lassabban nőnek az elmozdulások. A terhelés megszűnése után a szerkezet szabadrezgésbe kezd, 0,2 s-nál az (a) ábrarészhez hasonló helyzet kezd kialakulni.

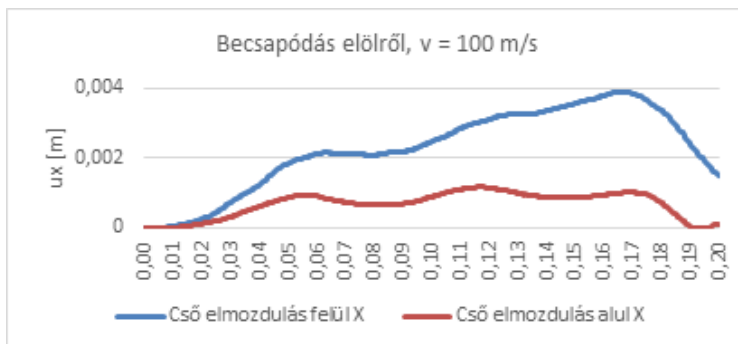
Mivel elsődleges célunk a tárolócsövek deformációinak meghatározása, így a kapott eredményeket a csövek tetején és alján, X (hossztengely) és Z (függőleges) irányban történő elmozdulások szempontjából vizsgáltuk. A déli oldalról, előlről történő becsapódás esetén a vízszintes irányú, felülről történő rázuhanás esetén a függőleges irányú elmozdulások voltak mértékadók. A 7-8. ábrákon a maximális eltolódásokat szemléltetjük az idő függvényében 100 m/s sebesség esetén. Az ábrákon látható görbék az összes tárolócső együttes vizsgálatából adódnak.



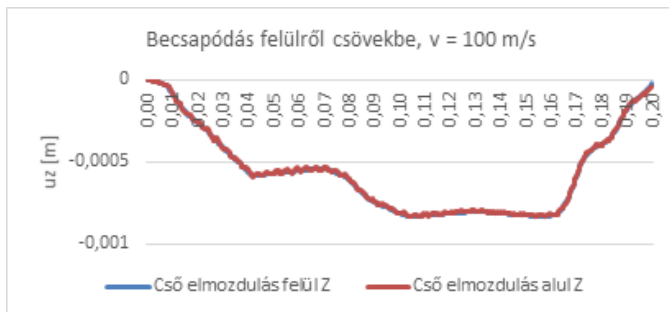
6. ábra: Elölről történő becsapódás alatt bekövetkező elmozdulások az idő függvényében

Az ábrákat elemezve két fontos következtetést vonhatunk le. Egyrészt a déli fal felől történő becsapódásnál a tárolócsövek aljának elmozdulása jóval kisebb a csövek tetejéhez képest, így a biztonság javára az alsó elmozdulásokat elhanyagolhatjuk. Felülről történő rázuhanáskor a csövek alsó és felső részének eltolódásai közel azonosak, így az eltolódást ezen esetekben nincs értelme vizsgálni – helyette az elfordulásokat elemezzük.

Az ábrákon továbbá az is megfigyelhető, hogy a felülről való becsapódás esetén az elmozdulás maximuma jól leköveti a teherfüggvényt, a déli oldalról történő ütközés esetén pedig eltoltan jelentkezik a teherfüggvény maximuma. Ez érthető, hiszen a csövek tetejénél, illetve aljánál mérjük az elmozdulásokat, így elölről való becsapódás esetén a hatásnak el kell jutnia a becsapódást felfogó faltól a betöltő fedélzetig, míg felülről történő rázuhanásnál az elmozdulások közvetlenül a betöltő fedélzetet terhelik, így a csövek a tehernek megfelelően mozognak el.



7. ábra: Elölről történő becsapódás elmozdulásai 100 m/s sebesség esetén



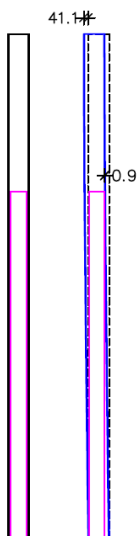
8. ábra: Felülről történő becsapódás elmozdulásai 100 m/s sebesség esetén

A 8. ábra alapján látható, hogy a függőleges eltolódások kismértékűek (maximális különbség a csövek alja és teteje között: 2 mm), a származtatott elfordulás értékek szintén (ld. 2. táblázat), így feltételezhetően nem okoznak károsodást a csövekben.

2. táblázat: Mértékadó tárolócső elmozdulások

	Eltolódás (u_x) [mm]	Elfordulás (φ_x) [rad]	
	Déli oldalról	Felülről, csőtartomány közé	Felülről, csövekbe
100 m/s	3,90	0,00266	0,00024
150 m/s	17,39	0,00226	0,00305
215 m/s	41,08	0,00916	0,00445

A tárolócsövek mértékadó vízszintes eltolódása $u_x=41,08$ mm. A kazetták épségének szempontjából vizsgálhatjuk azt, hogy a hajlékony tárolócsövek belsejében elhelyezett, merev kazetták befeszülhetnek az elmozdulások hatására a csőbe. Az ellenőrzés egy egyszerű geometriai feltétel vizsgálatát jelenti.



Egyszerűsített vizsgálatunkban az alul csuklós, felül befogottan feltételezett tárolócső a mértékadó eltolódás hatására fél szinuszhullámnak megfelelő alakot vesz fel. A geometriai feltétel vizsgálatához ennek megfelelően a megadott geometriájú tárolócsövet az előzőknek megfelelően deformáljuk, majd megpróbáljuk beleilleszteni az eredetileg függőlegesen álló kazettát. Amennyiben sikerül anélkül, hogy az elemet befeszítsenék, akkor a kiégett fűtőelem kazetta a vizsgálat alapján nem sérül. A vizsgálatot a 9. ábrán szemléltetjük.

Az ábrán látható, hogy a kiégett kazetta nem feszül be az eltolódás hatására. Amennyiben kicsúszik a kazetta a tárolócső üregének a szélére, úgy függőleges helyzetben maradván még mindig marad ~ 1 mm helye. A kazetta ezenfelül el is tud fordulni az üregben, tehát a biztonság még nagyobb.

9. ábra: Kiégett kazetta ellenőrzése a tárolócsőben való befeszülésre

4. Összefoglalás

A gép törzsét a szárnyakkal együtt puha lövedékként, globális végeselemes modell segítségével vizsgáltuk. A globális modellre a Riera-módszerből származó időfüggő terhet működtettünk. Az egy kamrát tartalmazó globális modellhez szükséges merevség értékek meghatározásához, külön elemeztük a betöltő fedélzet lokális modelljét. A végeselemes modellben a déli fal felőli vízszintes, illetve felülről a betöltő fedélzetbe történő 45° -os ütközést vizsgáltunk.

Vizsgálatunk alapján, puha ütközés esetén centiméter nagyságrendű elmozdulások jöttek létre, melyek esetén a kiégett kazetták nem feszülnek be tároló szerkezetükbe, így nem károsodnak.

Célunk egy lehetséges egyszerűsített vizsgálati módszer bemutatása volt, a választott mintapélda során, a biztonság oldalán tett egyszerűsítésekkel és feltételezésekkel élünk.

Megjegyezzük, hogy a dolgozatban alkalmazott kiindulási feltételezések – géptípus, ütközési zónák, becsapódási szögek stb. – egy valós vizsgálat esetén kiegészítő valószínűségi elemzésekkel meghatározott adatok.

5. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani Dr. Dunai Lászlónak, Dr. Katona Tamásnak és Laczák Lilinek a munkánk során nyújtott útmutatásért, tanácsokért és rengeteg segítségért, amelyek nélkül nem jöhetett volna létre dolgozatunk.

Továbbá köszönjük Tóth Zoltánnak és Puskás Anitának a SOM System Kft.-től a szükséges adatszolgáltatást, a szakmai tanácsokat és segítséget, illetve a KKÁT bejárásának megszervezését és a szakértői körbevezetést.

Ezúton is köszönjük a Pro Progressio Alapítvány TDK hallgatói ösztöndíját, mely igen nagy elismerés volt számunkra.

6. 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]: <http://www.rhk.hu/letesitmenyeink/kkat/> (hozzáférés: 2016. 09. 29.)
- [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]: J.D. Riera: On the stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces. Nuclear Engineering and Design, 8 (1968), 415-426