

# A deformációs energia eloszlásának identifikációja járműtest deformáció esetén

Harmati István \* Rövid András \*\* Várlaki Péter \*\*\*

\* *Széchenyi István Egyetem, Matematika és Számítástudomány  
Tanszék, Győr 9026, Egyetem tér 1. (e-mail: harmati@sze.hu).*

\*\* *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Járműváz és  
Könnyűszerkezetek Tanszék, Budapest 1111, Bertalan L. u. 1. (e-mail:  
rovid@kme.bme.hu).*

\*\*\* *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Járműváz és  
Könnyűszerkezetek Tanszék, Budapest 1111, Bertalan L. u. 1. (e-mail:  
varlaki@kme.bme.hu).*

---

Kivonat A járművek deformációs folyamatának modellezése fontos szerepet játszik mind a balesetelemzésben, mind pedig a biztonságos jármű megtervezésében. A deformáció során elnyelt energia és az annak megfelelő energia ekvivalens sebesség (EES) szintén nagy jelentőséggel bír. Ezen mennyiségek egzakt meghatározása vagy mérése rendkívül bonyolult, szinte lehetetlen feladat, egyrészt a feladat komplexitása, másrészt a szükséges paraméterek kellően pontos ismeretének hiánya miatt. Célunk a járműtest által elnyelt energia minél pontosabb, megbízhatóbb becslése és a deformációs folyamat energiaviszonyait legalább jellegében leíró, alacsony komplexitású modell kidolgozása.

---

## 1. BEVEZETÉS

Az EU útjain évente mintegy 1,3 millió közlekedési baleset történik, ezek több mint 40000 halálos áldozatot és 1,7 millió sérültet követelnek. Az EU által 2001-ben kiadott „Fehér Könyv” irányelveinek megfelelően az akkori adatokhoz képest 2010-re 50%-kal kell csökkenteni a közlekedésbaleseti halálesetek számát (hazánkra némileg enyhébb szabályozás vonatkozik, 2010-ig 30%-kal, 2015-ig 50%-kal kell csökkenteni ezen értéket). A csökkenés elsősorban a közlekedési morál javításával érhető el, de igen nagy szerepük van az egyre fejlődő járműbiztonsági rendszereknek is.

Ez magába foglalja mind az aktív biztonság (baleset megelőzés, vezetési kultúra), mind a passzív biztonság (a megtörtént balesetben lehetőleg minél kisebb emberi sérülés történjen) növelését. A gyártók mind az aktív, mind a passzív biztonsági rendszereket fejlesztik. Az aktív biztonsági rendszerek közé sorolhatók a többi jármű mozgását és az útviszonyokat is elemző intelligens járművezérlési rendszerek, míg a passzív biztonsági rendszerek közé tartoznak a biztonsági öv, a különféle légzsákok, és az ún. energia elnyelő elemek, energia elnyelő zónák. Ez utóbbiak az ütközés előtti mozgási energia átalakulásakor keletkező deformációs energia elnyelésére szolgálnak, így megóvják az utasteret az ütközés súlyosabb következményeitől, legalábbis egy bizonyos sebesség határáig. A felsoroltak mindegyikének fejlesztése rendkívül bonyolult mérnöki feladat, melyek megoldásában felhasználják a tapasztalati adatokat, a vizsgált rendszert legalább közelítőleg leíró matematikai modelleket, és természetesen a szimulációs eljárások eredményeit. A tapasztalati adatok származhatnak valódi balesetekből, ekkor viszont csak kevés paraméter ismert, és ezek értéke is bizonytalan. Ezért megfelelőbb, ha jól megtervezett, ismert paraméterekkel rendelkező, legalább

elvileg megismételhető törési próbákat hajtanak végre. Ennek során a vizsgált jármű és az ütközési folyamat minél több paraméterét regisztrálják, majd az elméleti szimulációs modell viselkedését az itt mért adatokkal hasonlítják össze. Ezek a kísérletek azonban egyrészt rendkívül költségesek, évente csak néhány ezret végeznek el belőlük, másrészt a rendszer minden egyes paraméterét szinte lehetetlen egyszerre mérni az ütközési folyamat igen rövid időtartama alatt. Ezért az egyes részfolyamatokra és azok paramétereire vonatkozó modellezési eljárások és becslési módszerek kiemelt fontosságúak.

## 2. FEM ÉS ENERGIAHÁLÓ ALAPÚ MODELLEK

A deformációs energiát leíró, a mai napig használt módszerek két fő csoportba sorolhatók. Az elsőt alkotják a véges elemes módszerek (FEM), melyek általában igen pontosak és jól használhatóak a deformációs folyamat modellezésénél, viszont igénylik a járműtest és az ütközés paramétereinek rendkívül aprólékos ismeretét, amely az esetek nagy részében nem áll rendelkezésünkre. Ezen felül, ha kellően pontos eredményeket szeretnénk, akkor a módszer komplexitása is igencsak megnő (Griškevičius [2003]).

A véges elemes szimulációkban a gépkocsi modellje ritkán tartalmaz 500 000 elemnél kevesebbet. A modell időfüggő dinamikai folyamatot ír le, és számos érintkezési feltételt kell kezelnie. A számítások nemlineáris anyagtörvényeket kell alkalmazni, hiszen az ütközés során az egyes alkatrészek képlékeny alakváltozást szenvednek. Ráadásul a nagy sebességgel lejátszódó folyamat miatt az anyagjellemzők még az alakváltozás sebességétől is függenek. A futtatás során hatalmas mennyiségű adat keletkezik (pl. minden csomópontban 3 elmozdulás-érték, a feszültségtenzor 9 eleme, stb.), és egy modell több 100 000 csomópontból áll. A deformációs energia eloszlását, az egyes részek által

elnyelt energia mennyiségét az így számított értékekből (erő, elmozdulás) határozzák meg, természetesen sok más jellemzővel együtt. A differenciálegyenleteken alapuló véges elemes leírás általános, minden területen használható modellt eredményez, bár ez a modell rendkívül bonyolult és nagy számításigényű. Azonban itt is komoly szerepet kap a heurisztika, a mérnöki tapasztalat, pl. a véges elem háló megalkotásában.

A deformációs energiát meghatározó módszerek másik csoportjának az úgynevezett "energiaháló" alapú modelleket tekinthetjük. A FEM alapú leíráshoz képest ezek a csak egy konkrét részproblémát (energia eloszlás) kezelő heurisztikus modellek jóval kisebb komplexitásúak, de természetesen nem nyújtanak teljes körű leírást a jármű deformációjáról. Ezek jól megtervezett, ismert (laboratóriumi) körülmények között elvégzett töréstesztek eredményein alapuló, alacsony komplexitású modellek. Általában a maximális deformáció, a maradandó deformáció és a deformáció alakja alapján határozzák meg az elnyelt energiát általában viszonylag egyszerűbb összefüggések alapján (Campbell [1974], Strother [1986], Strother [1998]).

A következőkben néhány, a második csoportba tartozó, a szakirodalomban használt modellt ismertetünk és javaslatot teszünk újabb, a lágy számítási módszereken (Soft Computing) alapuló kvázi-heurisztikus leírásokra is.

### 3. GYAKORIBB ERŐMODELLEK

Az ütközés (az egyszerűség kedvéért merev falnak ütközés) során a jármű kinetikus energiája deformációs energiává alakul. Természetesen más jellegű jelenségekben is disszipálódik az energia (pl. hang; csattanás az ütközéskor), de ezek jóval kisebb mértékben kapnak szerepet, mint a deformáció, ezért a könnyebbség kedvéért ezeket most elhanyagoljuk. Az energiamegmaradás elve szerint tehát

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 = \int_0^{\delta_m} \int_0^{w_0} f(x)dx \quad (1)$$

ahol  $\delta_m$  a maximális deformáció,  $f$  pedig a jármű egységnyi szélességében fellépő erő. Az alábbi modellek az  $f$  erőre adnak különféle formulákat. Ezek közül a legegyszerűbbet ismertetjük részletesebben, a többinél csak magát az erőt leíró függvényt adjuk meg.

#### 3.1 Lineáris erő modell

Ezen modell alapfeltevése szerint a jármű egységnyi szélességére ható erő arányos a deformáció mértékével, azaz

$$f = K \cdot x \quad (2)$$

ahol  $K$  az adott járműre jellemző merevség. A deformációs folyamat során az összenyomódási fázis után egy visszalökődési rész következik. A modell feltevése szerint a maximális deformáció ilyen módon a visszaalakuló ( $\delta_0$ ) és a maradandó deformáció ( $\delta_r$ ) összegére bontható:

$$\delta_m = \delta_0 + \delta_r \quad (3)$$

Azt is feltesszük, hogy  $\delta_0$  állandó, azaz független a maradandó deformáció nagyságától. Ebből az is következik,

hogy egy bizonyos  $v_0$  sebességhatárig a jármű nem szenved maradandó alakváltozást, hiszen

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}K(\delta_0 + \delta_r)^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{K}{m}}(\delta_0 + \delta_r) \quad (4)$$

vagyis az ütközési sebesség lineáris függvénye a maradandó (tehát a szakértő által látható, elemezhető, mérhető) deformációnak. A szokásos jelölésekkel (Campbell-együtthatókkal) felírva:

$$v = b_0 + b_1\delta_r \quad (5)$$

Könnyen belátható, hogy hasonló összefüggés érvényes a maradandó deformáció és a fellépő erő között is, tehát az erő is lineáris függvénye a maradandó deformációnak:

$$f = m(b_0b_1 + b_1^2\delta_r) = A + B\delta_r \quad (6)$$

A fenti formulák alapján már egyszerűen meghatározható a jármű  $w$  szélességéhez tartozó maximális elnyelt energia:

$$E_d = \frac{1}{2} \int_0^w f\delta_m dw = \frac{1}{2} \int_0^w \left( \frac{A^2}{B} + A\delta_r + \frac{1}{2}B\delta_r^2 \right) dw \quad (7)$$

Ebből láthatjuk, hogy ezen modell feltevéseit és egyszerűsítéseit elfogadva a maradandó deformáció nagyságának ismeretében meghatározható a járműtest által elnyelt energia és így az ütközési sebesség is. Ez az egyik legszeleesebb körben használt modell, ez adja több szimulációs program alapját is (pl. CRASH, SMAC).

Talán meglepő, de ez az egyszerű modell elég jól közelíti a meglehetősen komplex valóságot. EMORI a töréstesztek alapján lineáris összefüggést fedezett fel a maradandó deformáció nagysága és a sebesség között (Emori [1968]), majd CAMPBELL az (5) összefüggést feltételezve kísérleti eredmények alapján határozta meg a  $b_0$  és  $b_1$  együtthatókat (Campbell [1974]).

#### 3.2 Bilineáris erő modell

A bilineáris modell két konstans merevségű modellből áll össze. Az alacsonyabb sebességtartományokra egy  $k_1$  merevségű lineáris modell érvényes, egészen egy bizonyos  $x_{BL}$  maradandó deformációig, ezután a bilineáris forma érvényes egy kisebb  $k_2$  értékkel (Strother [1986], Neptune [1999], Varat [1994]).

$$f(x) = \begin{cases} k_1(x + x_0) & \text{ha } x \leq x_{BL} \\ k_1(x_{BL} + x_0) + k_2(x - x_{BL}) & \text{ha } x > x_{BL} \end{cases} \quad (8)$$

Az energia pedig:

$$E_d = \int_0^{w_0} \frac{1}{2}k_1(x + x_0)^2 dw - \int_0^{w_0} \frac{k_1 - k_2}{2}(x - x_{BL})^2 dw \quad (9)$$

(a második tag természetesen  $x < x_{BL}$  esetén 0-nak értendő).

#### 3.3 Erő-telítődési modell

Ez tulajdonképpen a bilineáris modell speciális esete, amikor  $k_2 = 0$ . Vagyis most az erő a maradandó deformációig növekszik, utána viszont állandó marad. Ezt a modellt sikerrel alkalmazták frontális, oldalirányú és hátsó ütközések

vizsgálatánál (Strother [1990], Woolley [1991], Strother [1998], Welsh [1999]).

$$f(x) = \begin{cases} k(x + x_0) & \text{ha } x \leq x_S \\ k(x_S + x_0) & \text{ha } x > x_S \end{cases} \quad (10)$$

Az energia pedig:

$$E_d = \int_0^{w_0} \frac{1}{2} k(x + x_0)^2 dw - \int_0^{w_0} \frac{k}{2} (x - x_S)^2 dw \quad (11)$$

(a második tag, hasonlóan az előzőhöz,  $x < x_S$  esetén 0-nak értendő).

### 3.4 Hatvány modell

Nagy számú törésteszt bizonyítja, hogy a merevség a deformáció nagyságával (mélységével) csökken. Hasonló igaz az erőkre is: bár az erő növekszik a deformáció nagyságával, a növekedés üteme (meredeksége) csökken, amíg a maximális erő el nem éri. Ez adja az elvi alapját ennek a modellnek. Az egységnyi szélességre jutó erő:

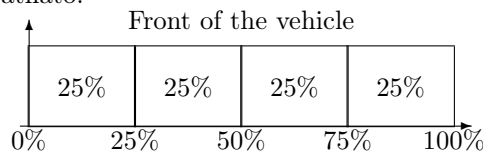
$$f(x) = f_0^{1-n} k_0^n (x + x_0)^n \quad (12)$$

## 4. ENERGIAHÁLÓK

A baleseti statisztikákat vizsgálva kitűnik, hogy a leggyakrabban előforduló típus a frontális ütközés. Ennek megfelelően a deformációs modellek (és a járműgyártók) elsősorban a jármű eleje által elnyelt energiára koncentrálnak, illetve ezen rész energiaelnyelő képességeit próbálják leírni, majd ennek segítségével fejleszteni. A legegyszerűb módszer természetesen a vizsgált deformált járműtest összehasonlítása olyan más, hasonló deformációt szenvedett járművekkel, melyek esetében ismertek az ütközés körülményei (pl. töréstesztek adatai).

### 4.1 A Campbell modell

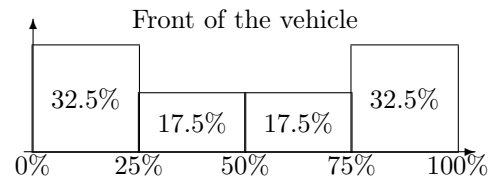
Az első, energiahálót használó modell CAMPBELL névéhez fűződik. Azt feltételezte, hogy az elnyelt deformációs energia a jármű teljes szélességében egyenletesen oszlik el. További feltevése volt, hogy a jármű a kis sebességű ütközést maradandó deformáció nélkül vészeli át, ezen sebesség fölött pedig a maradandó deformáció és a sebesség kapcsolata lineáris (Campbell [1974]). Mint láttuk, ez a modell egy nagyon egyszerű dinamikai erőmodellből származtatható.



1. ábra. Energiaeloszlás a jármű teljes szélességén – Campbell modell

### 4.2 A Röhlich modell

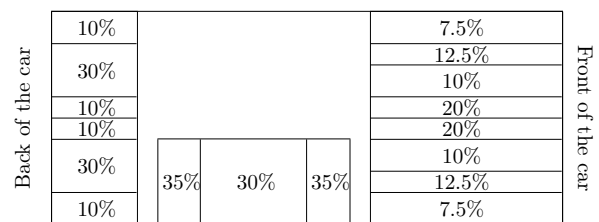
Ez a Campbell-modell továbbfejlesztésének tekinthető. Már nem tételezi fel az egyenletes eloszlást a jármű szélességében, hanem az egyre kifinomultabb töréstesztek eredményeire alapoz, ennek megfelelően pontosabb eredményeket is szolgáltat, mint például a jármű ütközés előtti sebessége.



2. ábra. Energiaeloszlás a jármű teljes szélességén – Röhlich modell

### 4.3 A Schaper modell

A Schaper által kidolgozott módszer alapja az volt, hogy az FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standards) előírásait teljesítő járművek hasonló deformációs karakterisztikával bírnak. Számos töréstesztet analizálva néhány jellegzetes zónát definiált a járműtesten, és ezeken a tartományokon határozta meg a deformációs energiát.



3. ábra. Felülnézeti energiaeloszlás a Schaper modell alapján: egyenes és oldalirányú ütközés



4. ábra. Felülnézeti energiaeloszlás a Schaper modell alapján: ferde ütközés

## 5. A DEFORMÁCIÓS FOLYAMAT HEURISZTIKUS MODELLJE

Az előzőektől eltérően olyan modellt szeretnénk alkotni, amely a teljes deformációs folyamat során információt nyújt az elnyelt energia eloszlásáról és nem csak a végeredménnyel foglalkozik (Harmati [2007b], Harmati [2007a]). A töréstesztekből és a balesetek elemzéséből az alábbiakra lehet következtetni:

- Egy-egy cella energia elnyelő képessége a deformációs folyamat során nem jellemezhető állandó értékkel.
- A cellák energia elnyelő képessége erősen irányfüggő: előfordulhat, hogy egyik irányban könnyebben, míg más irányban jóval nehezebben deformálhatóak.
- Bizonyos esetekben fontos lehet szomszédos cellák közötti energiaterjedés (nyíróerők)

A fentieknek megfelelő modell rövid leírása a következő: tekintsük a járműtest kétdimenziós derékszögű rácsból történő felbontását (felülnézetből, a jármű hossz tengelyével párhuzamos és arra merőleges élekkel). A felosztást az egyes részek energia elnyelési képességét figyelembe véve

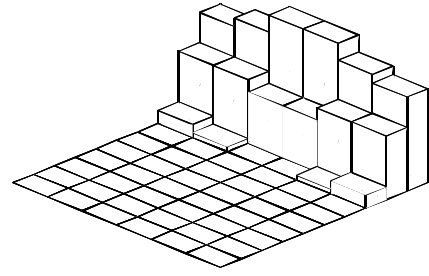
tesszük meg úgy, hogy egy-egy cella közelítőleg homogén legyen. A felbontást természetesen három dimenzióban is megtehetjük, ekkor a járműtestet a felülnézeti kép mélységében is cellákra osztjuk fel. A deformációs energia modellezéséhez minden egyes cellához rendelhetünk egy-egy függvényt, amely leírja az adott rész energia elnyelési tulajdonságát. A deformáció során a cella elnyelési képessége erősen változhat, bizonyos mennyiségű elnyelt energia után hasonló mértékű deformáció csak jóval nagyobb energia befektetéssel érhető el, vagyis a cella tulajdonképpen telítődni kezd. Ezen jelenség leírására egy monoton csökkenő függvényt választunk: a cella a beérkező energia egyre kisebb hányadát képes elnyelni, a többi egyszerűen átfolyik rajta, és a szomszédos cellák bemenetét képezi. Egyszerű választás lehet egy szakaszonként lineáris vagy szigmoidszerű függvény. A pontosabb közelítés érdekében akár vehetjük néhány ilyen típusú függvény konvex kombinációját is. A cella által elnyelt energia tulajdonképpen az így definiált elnyelési függvény integráljaként adódik. Tény, hogy a járműtest felosztásával kapott cellák energia elnyelési tulajdonsága erősen irányfüggő: a cellát valamilyen irányban könnyű, míg egy másik (pl. az előzőre merőleges) irányban jóval nehezebb deformálni, vagyis hasonló mértékű deformáció eléréséhez jóval nagyobb bemeneti energiára van szükség. Ezért célszerűnek tűnik minden egyes cellához több, a szóba jöhető ortogonális irányoknak megfelelő függvényt definiálni. Célszerű itt a felosztásnál alkalmazott rácsháló tengelyeivel párhuzamos irányokat használni. Ezen irányok fogják szolgáltatni a rácstengelyekkel nem párhuzamos külső hatások felbontásával keletkező komponensek irányait is, így ferde ütközés esetén az energiaeloszlás az egyes komponensek hatásainak összegeként értelmezhető.

A közúti balesetek jelentős része a frontális ütközés valamely formája (teljes vagy részleges átfedéssel), így szükséges ezzel külön is foglalkozni. Teljesen átfedő ütközésnél a jármű teljes szélességében roncsolódik (pl. fálnak vagy másik járműnek csapódik). Ekkor az energiaterjedés folyamata leírható az egymás mellett álló cellák közötti energiaátvitel elhanyagolásával is, hiszen a deformációs energia nagy része becsapódás irányának megfelelően az egymás mögött álló cellákon halad végig.

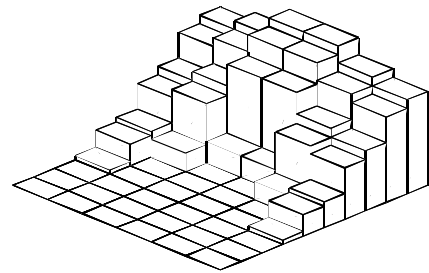
Részlegesen átlapoló ütközés esetén (pl. fának ütközik a jármű) viszont fontos szerepet kap az egymás melletti cellák közötti energiaátvitel is, tulajdonképpen a külső hatás által deformált cella húzza maga után a vele szomszédosakat. Ezt a hatást a következőképpen vehetjük figyelembe: egy cella által átengedett energia (a bejövő és az elnyelt különbsége) a vele szomszédos cellákkal való kapcsolatának szorosságát jellemző súlyok arányában oszlik el a szomszédjai között.

## 6. A DEFORMÁCIÓS FOLYAMAT FUZZY MODELLJE

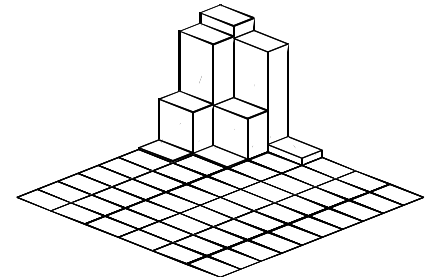
Az előző részben leírtak megvalósíthatók a felosztott járműtesthez rendelt fuzzy szabálybázis segítségével is (Harmati et al. [2008]). Ebben az esetben az egyes cellákhoz nem energia elnyelési függvényt rendelhetünk, hanem a cella éppen aktuális, energiaelnyelés szempontjából lényeges tulajdonságát, vagyis azt, hogy milyen mértékben képes még energia elnyelésére. Általában persze a cella



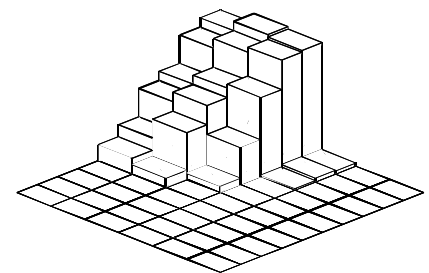
5. ábra. Frontális ütközés modellje – kisebb sebesség



6. ábra. Frontális ütközés modellje – nagyobb sebesség



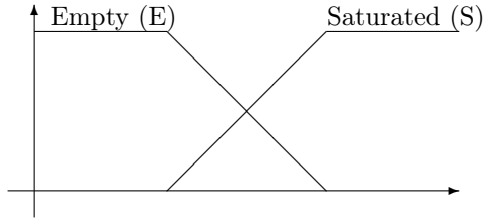
7. ábra. Féligátlapoló ütközés modellje – kisebb sebesség



8. ábra. Féligátlapoló ütközés modellje – nagyobb sebesség

valamilyen köztes állapotban van a 'telített' és az 'üres' állapotok között, melyet jellemezhetünk úgy is, mint bizonyos mértékben 'telített' és bizonyos mértékben 'üres'. Ezek után a cellák ezen szélsőséges állapotaihoz rendelhetünk szabályokat, úgy kezelve az energiaátvitelt, mintha az kvantumokban történne:

- Ha egy cella 'üres', akkor a következő inputot elnyeli.
- Ha egy cella 'telített', akkor a következő inputot áttereszti.



9. ábra. A cellaállapot fuzzy partíciója

Egy ilyen szabálybázist szemléltet három egymást követő cella esetére a 1. táblázat. Itt  $E$  az üres,  $S$  a telített cellát jelöli, a konzekvens részen 0, ha az adott cella átengedi az inputot és 1, ha elnyeli. Ezen szabályokból Takagi–Sugeno fuzzy következtetési eljárással kaphatjuk meg az általános esetre érvényes formulát.

Rule	Antecedent	Consequent
1	E E E	1 0 0
2	E E S	1 0 0
3	E S S	1 0 0
4	E S E	1 0 0
5	S E E	0 1 0
6	S E S	0 1 0
7	S S E	0 0 1
8	S S S	0 0 0

1. táblázat. Fuzzy szabálybázis három egymást követő cella esetén

Általánosan az elnyelt energia egységnyi inputra történő megváltozása  $\Delta \mathbf{x}$  :

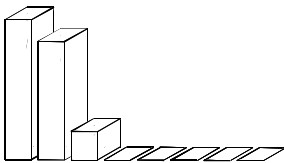
$$\Delta \mathbf{x} = (\mu_1^E(x_1), \dots, \mu_n^E(x_n) \prod_{j=1}^{n-1} \mu_j^S(x_j))u \quad (13)$$

$\Delta \mathbf{x}$   $i$ . koordinátája:

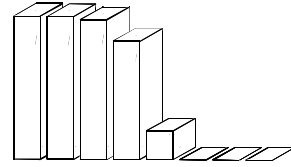
$$\Delta x_i = \mu_i^E(x_i) \prod_{j=1}^{i-1} \mu_j^S(x_j)u \quad (14)$$

ahol  $\mu_i^E$  és  $\mu_i^S$  az  $i$ . cella 'üres' (empty, E) és a 'telített' (saturated, S) tulajdonságának tagsági függvényei.

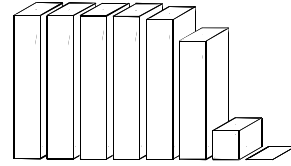
Ezzel az eljárással energia adagonként (kvantumonként) megkaphatjuk az addig elnyelt energia éppen aktuális megváltozását, ehhez az adott állapotot hozzávéve pedig az éppen aktuális eloszlását. Példaként egy 8 cellából álló rendszer energia eloszlásának változását mutatjuk be. A 10–12. ábrákon a cellák telítődési szintje azonos, míg a 13–15. ábrákon a második cella telítődési szintje 25%-kal, a harmadiké és a negyediké 50%-kal nagyobb, mint a többié.



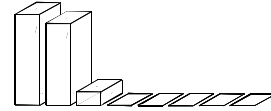
10. ábra. Energiaeloszlás azonos telítődési szinteknél – 1



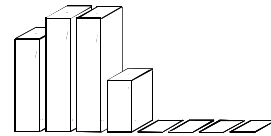
11. ábra. Energiaeloszlás azonos telítődési szinteknél – 2



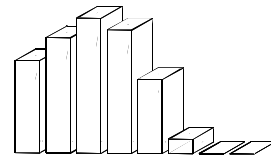
12. ábra. Energiaeloszlás azonos telítődési szinteknél – 3



13. ábra. Energiaeloszlás eltérő telítődési szinteknél – 1



14. ábra. Energiaeloszlás eltérő telítődési szinteknél – 2



15. ábra. Energiaeloszlás eltérő telítődési szinteknél – 3

## ÖSSZEGZÉS

Röviden ismertettük a járműtest deformáció során elnyelt deformációs energia meghatározásának és modellezésének

energiահáló alapú főbb modelljeit. Javaslatot tettünk a deformációs folyamat energiaviszonyait egyszerű megmondások alapján közelítőleg leíró heurisztikus és fuzzy modell megalkotására. Jellemében mindkét modell jól írja le az energiaeloszlást, de a konkrét mérési adatokkal történő kvantitatív vizsgálat, a modellek validálása még a további kutatómunka része.

M. Huang *Vehicle Crash Mechanics* CRC Press, 2002.

#### HIVATKOZÁSOK

- K. Campbell. Energy basis for collision severity *SAE*, 740565, 1974.
- R. Emori Mechanics of automobil collision *1st International Conference on Vehicle Mechanics*, Wayne State University, Detroit, Michigan, July, 1974.
- J.A. Neptune A comparison of crush stiffness characteristics from partial-overlap and full-overlap frontal crash tests *SAE*, 1999-01-0105, 1999.
- K.J. Welsh Crush energy and structural characterization *SAE*, 1999-01-0099, March 1999.
- C.E. Strother, R.W. Kent, and C.Y. Warner Estimating vehicle deformation energy for vehicles struck in the side *SAE*, 980215, 1998.
- C.E. Strother, R.L. Woolley, and M.B. James A comparison between NHTSA crash test data and CRASH3 frontal stiffness coefficients *SAE*, 900101, 1990.
- C.E. Strother, R.L. Woolley, and M.B. James Crush energy in accident reconstruction *SAE*, 860371, 1986.
- R.L. Woolley, C.E. Strother, and M.B. James Rear stiffness coefficients derived from barrier test data *SAE*, 910120, 1991.
- M.S. Varat, S.E. Husher, and J.F. Kerkhoff An analysis of trends of vehicle frontal impact stiffness *SAE*, 940914, 1994.
- I.Á. Harmati, A. Rövid, L. Szeidl, and P. Várlaki Energy distribution modeling of car body deformation using fuzzy control and LPV representations *8th WSEAS International Conference on Applied Informatics and Communications*, Rhodes, Greece, August, 2008, pages 146–151.
- I. Harmati and P. Várlaki Identification of energy distribution for crash deformational processes of road vehicles *Acta Polytechnica Hungarica*, Vol. 4, No. 2, 2007, pages 19–28.
- I. Harmati and P. Várlaki *Estimation of energy distribution for car body deformation* 3rd International Symposium on Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Agadir, Morocco, March 28–30, 2007.
- H. Steffan, B.C. Geigl, A. Moser, and H. Hoschopf Comparison of 10 to 100 km/h rigid barrier impacts, Paper No. 98-S3-P-12.
- P. Griškevičius, and A. Žiliukas The crash energy absorption of vehicles front structures *Transport*, Vol. 18., No. 2., 2003., pages 97–101.
- P. Baranyi TP model transformation as a way to LMI based controller design *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(2), 2004, pages 387-400.
- A. Rövid, A.R. Várkonyi-Kóczy, P. Várlaki and P. Michelberger Soft computing based car body deformation and EES determination for car crash analysis *Proceedings of the Instrumentation and Measurement Conference*, 2004.
- R.M. Brach (ed.) *Accident Reconstruction: Crash Analysis* SAE, 2001.