Gumialkatrészek viselkedésének vizsgálata jármű-mechatronikai rendszerekben

Madocsai Gergely, Veress Árpád, Palkovics László

Széchenyi István Egyetem, H9026 Győr, Egyetem tér 1.

Absztrakt: Jelen tanulmány a gumi alkatrészek, elsősorban tömítés végeselemes vizsgálatával foglalkozik, többféle, hiperelasztikus anyagmodell felhasználásával.

Az iparban szükség van arra, hogy a megfelelő pontosságú, a valóságot jól közelítő eredményeket minél gyorsabban lehessen produkálni, költséges és időigényes prototípusok legyártása nélkül.

A szimulációk célja megvizsgálni, hogy különböző körülmények között melyik módszerrel lehet a legbiztosabban és leggyorsabban jól felhasználható eredményekhez jutni.

1. BEVEZETÉS

A számítógépes végeselemes analízis manapság az iparban, így a járműiparban is teljesen elterjedt eljárás. Ennek segítségével a fejlesztés felgyorsult, valamint jóval költséghatékonyabbá is vált, ugyanis a fejlesztés korai állapotában elkerülhető több prototípus legyártása, amelyeken azelőtt költséges és időigényes méréseket hajtottak végre.

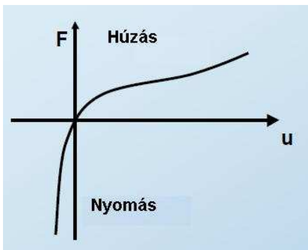
Gumi alkatrészek esetén a kialakuló deformációk általában nagyok, ez az analízis szempontjából nehézség, mivel a nagy alakváltozások mechanikája szerint ilyenkor a feladat már nem lineáris. Ez jóval számításigényesebb is a lineáris esethez képest, továbbá a modell érzékenyebb a háló kialakítására, a peremfeltételekre és az elemtípusokra.

Az iparban ugyanakkor szükség van arra, hogy a megfelelő pontosságú, a valóságot jól közelítő eredményeket minél gyorsabban lehessen produkálni. A szimulációk célja, megvizsgálni, hogy különböző körülmények között melyik-melyik módszerrel lehet a legbiztosabban és leggyorsabban jól felhasználható eredményekhez jutni.

Elsőként két leegyszerűsített geometriájú tömítés esetén vizsgáljuk meg, hogy az egyes hiperelasztikus anyagmodellek milyen eredményeket szolgáltatnak, mennyire térnek el egymástól. Az egyszerű geometriák szimulációiból szerzett tapasztalatok alapján két, valós tömítési geometrián (vezérlőelektronika fedéltömítés, gumimembrán) végzett végeselemes szimulációk kerülnek bemutatásra.

2.A HIPERELASZTIKUS ANYAGOK

A tökéletesen elasztikus anyagokra felállított modelleknek egyik típusa a „hiperelasztikus anyag”. Ebben a modellben a feszültség és a nyúlás közötti kapcsolatot az alakváltozási energia sűrűségfüggvény írja le [6, 8, 9, 11]. Ez a modell nem tökéletesen reprezentálja a valóságban megfigyelhető jelenségeket, de nagyon jól közelíti azokat és matematikailag jól kezelhető. A modellben a vizsgált anyagok tökéletesen elasztikusak, izotrópikusak és izotermikusak.

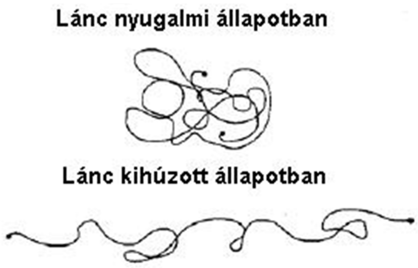


1. ábra: A gumi általános szakítógörbéje [7]

A legáltalánosabb és legjobb példa a hiperelasztikus anyagra a gumi. A gumi feszültség-nyúlás grafikonján látható (1. ábra), hogy húzóerő hatására kezdetben lágyul az anyag (a görbe meredeksége csökken), de egy idő után ismét felkeményedik, a görbe meredeksége nő [1, 3, 7]. Kompresszió hatására viszont az anyag progresszíven keményedik. A gumi az őt érő erőhatások következtében térfogatát jelentős mértékben nem változtatja, ezért összenyomhatatlannak is tekinthető. Anyagát hosszú láncú molekulák alkotják, amelyek rendezetlenül, összegabalyodva, helyezkednek el [10]. Ha a molekulákból álló „boglyát” elkezdjük húzni, akkor az egyes szálak egymástól elválnak, és mind inkább kiegyenesednek, így az anyag nagymértékben képes megnyúlni (2. ábra). Azonban ahogy az összes molekula kezd a tőle telhető mértékben kiegyenesedni, már nem lehet ilyen könnyen tovább nyújtani az anyagot. Ha a húzóerőt megszüntetjük, akkor a molekulák ismét összecsavarodnak, és a test visszanyeri eredeti alakját. Ha

Online: ISBN 978-963-88875-3-5
CD: ISBN 978-963-88875-2-8
Editor: Dr. Péter Tamás

nyomást gyakorolunk az anyagra, akkor deformálódik ugyan, a molekuláris szálak jobban összepréselődnek, de a húzáshoz képest igen hamar felkeményedik az anyag.



2. ábra: Gumi molekulák [7]

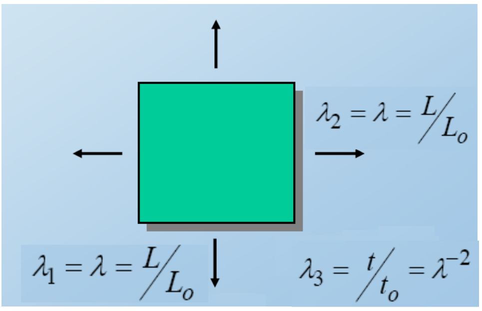
A hiperelasztikus anyagmodellek az alakváltozási energia sűrűségfüggvényével írhatók le. Ennek ismertetéséhez először definiálni kell néhány fogalmat.

A nyúlási viszony [2] (1):

$$\lambda = \frac{L}{L_0} = \frac{L_0 + \Delta u}{L_0} = 1 + \varepsilon \text{, amelyben} \qquad (1)$$

λ: nyúlási viszony
L_0: a kiindulási hossz
L: deformált hossz (terhelés következtében)
Δu: az alakváltozás mértéke
ε: fajlagos alakváltozás

A tér három kitüntetett irányának megfelelően három elsődleges nyúlási viszonyt definiálhatunk. A megértést segítendő a következő ábrán egy kéttengelyű feszültség által terhelt vékony gumilap látható a három nyúlási viszony ábrázolásával (3. ábra).



3. ábra: Gumilap nyúlási viszonyai [7]

Ebben az esetben λ_1 és λ_2 a síkbeli nyúlási viszonyt szemléltetik, λ_3 pedig a vastagság megváltozását reprezentálja. Mivel a gumi anyagokat összenyomhatatlannak tekinthetjük, ezért igaz a (2) kifejezés:

$$\lambda_3 = \frac{1}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} \qquad (2)$$

A nyúlási invariánsok az alakváltozási energia-sűrűség függvény felíráshoz szükségesek (3):

$$I_1 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$$
$$I_2 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \cdot \lambda_1^2$$
$$I_3 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2, \qquad (3)$$

Ha összenyomhatatlan anyagról van szó, akkor a harmadik invariáns az 1 értéket veszi fel.

A nyúlási invariánsok úgy reprezentálják az anyag nyúlását, hogy a nyúlás irányától függetlenek. Az alakváltozási energia sűrűségfüggvény néhány formájában ezeknek a skaláris invariánsoknak a függvénye.

Térfogat arány [2] (4):

$$J = \frac{V}{V_0} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \qquad (4)$$

J: a térfogat arány
V_0: az eredeti térfogat
V: a terhelés hatására kialakult térfogat

Az alakváltozási energia sűrűségfüggvénynek (W), amely egy skalárértékű függvény, néhány alakja a fentiek ismeretében a következőképpen írható fel [2, 6, 9, 11] (5, 6):

$$W = W(I_1, I_2, I_3)$$
$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \qquad (5)$$
$$W = W_d(\overline{I_1}, \overline{I_2}) + W_b(J), \quad \overline{I_p} = J^{\frac{-2}{3}} \cdot I_p \quad \text{(p=1,2,3)}$$
$$W = W(\overline{\lambda_1}, \overline{\lambda_2}, \overline{\lambda_3}) + W_b(J), \overline{\lambda_p} = J^{\frac{-1}{3}} \cdot \lambda_p \quad \text{(p=1,2,3)} \qquad (6)$$

A különböző felírások természetesen ekvivalensek és a hiperelasztikus anyagmodellek ezen az elméleten alapulnak.

Azt már látjuk, hogy az alakváltozási energia sűrűségfüggvény kapcsolatban áll az alakváltozással, de ahhoz, hogy ebből feszültségértékeket kapjunk, ami gyakran a végeselemes szimulációk kívánt végeredménye, az alakváltozási energia sűrűségfüggvényt még deriválni kell az alakváltozás szerint [9]. A problémát leegyszerűsítve, amennyiben $W=W(\varepsilon)$, akkor a (7) kifejezés a következő formát ölti:

$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon} \qquad (7)$$

σ: feszültség [Pa]

Ennek a műveletnek a konkrét formája az alakváltozási energia sűrűségfüggvény leírásától függ. Természetesen térbeli problémák esetén már feszültségi és alakváltozási tenzorokról beszélünk.

3. HIPERELASZTIKUS ANYAGMODELLEK

A végeselemes szoftverben több hiperelasztikus anyagmodell is megtalálható: *Neo-Hooke*, *Mooney-Rivlin* 2, 3, 5 és 9 paraméteres változata, első-, másod- és harmadrendű *Polinom*, első-, másod- és harmadrendű *Yeoh*, valamint első-, másod- és harmadrendű *Ogden* modellek közül lehet választani [12]. Ezek részletezve alább kerülnek bemutatásra.

I. Polinom modell

Ez a formula az első és a második deformációs invariánson alapszik (8).

$$W = \sum_{i+j=1}^{N} c_{ij} \cdot (\bar{I}_1 - 3)^i \cdot (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{k=1}^{N} \frac{1}{d_k} \cdot (J_{el} - 1)^{2k} \tag{8}$$

c_{ij}: anyagparaméterek [Pa]
$\bar{I}_1$, $\bar{I}_2$: deformációs invariánsok
d_k: összenyomhatatlansági paraméter [1/Pa]
J_{el}: elasztikus térfogati deformáció

Általában a fenti összefüggést N>3 esetben ritkán használjuk, valamint maximálisan 300%-os nyúlásig alkalmazható.

II. Mooney-Rivlin modell

Az programban kettő-, három-, öt-, és kilencparaméteres Mooney-Rivlin modellek találhatóak meg. Ezek a különböző egyenletek a Polinom modell különböző esetei.

- 2 paraméteres Mooney-Rivlin anyagmodell:

A kétparaméteres Mooney-Rivlin modell megegyezik a Polinom modellel N=1 esetben (9):

$$W = c_{10} \cdot (\bar{I}_1 - 3) + c_{01} \cdot (\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d} \cdot (J_{el} - 1) \tag{9}$$

c_{10}, c_{01}: anyagparaméterek [Pa]
$\bar{I}_1$, $\bar{I}_2$: deformációs invariánsok
d: összenyomhatatlansági paraméter [1/Pa]
J_{el}: elasztikus térfogati deformáció

- 3 paraméteres Mooney-Rivlin anyagmodell:

A háromparaméteres Mooney-Rivlin modell hasonlít a Polinom modellhez, ha N=2 és c_{20}=c_{02}=0 (10):

$$W = c_{10} \cdot (\bar{I}_1 - 3) + c_{01} \cdot (\bar{I}_2 - 3) + c_{11} \cdot (\bar{I}_1 - 3) \cdot (\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{d} \cdot (J_{el} - 1)^2 \tag{10}$$

c_{10}, c_{01}, c_{11}: anyagparaméterek [Pa]
$\bar{I}_1$, $\bar{I}_2$: deformációs invariánsok
d: összenyomhatatlansági paraméter [1/Pa]
J_{el}: elasztikus térfogati deformáció

- 5 paraméteres Mooney-Rivlin anyagmodell:

Az ötparaméteres Mooney-Rivlin modell megegyezik a Polinom modellel N=2 esetben (11):

$$W = \sum_{i+j=1}^{2} c_{ij} \cdot (\bar{I}_1 - 3)^i \cdot (\bar{I}_2 - 3)^j + \frac{1}{d} \cdot (J_{el} - 1)^2 \tag{11}$$

c_{ij}: anyagparaméterek [Pa]
$\bar{I}_1$, $\bar{I}_2$: deformációs invariánsok
d: összenyomhatatlansági paraméter [1/Pa]
J_{el}: elasztikus térfogati deformáció

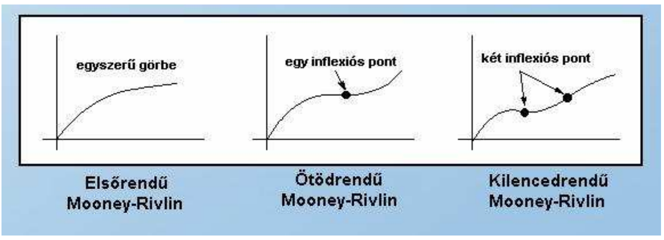
- 9 paraméteres Mooney-Rivlin anyagmodell:

A kilencparaméteres Mooney-Rivlin modell megegyezik a Polinom modellel N=3 esetben (12):

$$W = \sum_{i+j=1}^{3} c_{ij} \cdot (\bar{I}_1 - 3)^i \cdot (\bar{I}_2 - 3)^j + \frac{1}{d} \cdot (J_{el} - 1)^2 \tag{12}$$

c_{ij}: anyagparaméterek [Pa]
$\bar{I}_1$, $\bar{I}_2$: deformációs invariánsok
d: összenyomhatatlansági paraméter [1/Pa]
J_{el}: elasztikus térfogati deformáció

Általánosságban elmondható, hogy a kétparaméteres Mooney-Rivlin modell nagyjából 100 %-os alakváltozásig ad helyes eredményt, bár nem veszi számításba a nagy alakváltozásoknál létrejövő felkeményedést, ahogy a nyomófeszültség esetén létrejövő karakterisztikát sem követi megfelelően.



4. ábra: Mooney-Rivlin anyagmodell [7]

Az öt- illetve kilencparaméteres modell esetén a feszültség-alakváltozás görbének egy- illetve kettő inflexiós pontja van, mint ahogy az 4. ábrán látható. Ezek a görbék már tartalmazzák a nagy deformációknál létrejövő felkeményedést.

Az öt és kilencparaméteres modell általánosan 100-200 %-os deformációkig is alkalmazható.

III. Yeoh modell

A Yeoh modell hasonlít a Polinom modellhez, de egyszerűbb annál, mert csak az első deformációs invariánson alapszik (13).

$$W = \sum_{i=1}^{N} c_{i0} \cdot (\bar{I}_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{d_i} \cdot (J_{el} - 1)^{2i} \tag{13}$$

c_{i0}: anyagparaméterek [Pa]
$\bar{I}_1$: deformációs invariáns
d_i: összenyomhatatlansági paraméter [1/Pa]
J_{el}: elasztikus térfogati deformáció

Rendszerint N=3 értéke mellett alkalmazzuk ezt a modellt. A háromparaméteres verzió általánosságban jó illeszkedést biztosít a nagy deformációk tartományában.

IV. Neo-Hooke modell

A Neo-Hooke modell a Polinom modellből vezethető le N=1, c_{01}=0 és $c_{10}=\mu/2$ paraméterértékek esetén (14):

$$W = \frac{\mu}{2} \cdot (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{d} \cdot (J_{el} - 1)^2 \tag{14}$$

μ: anyagparaméter [Pa] ($\mu=2*c_{10}$)
$\bar{I}_1$: deformációs invariáns
d: összenyomhatatlansági paraméter [1/Pa]
J_{el}: elasztikus térfogati deformáció

Ez a legegyszerűbb hiperelasztikus modell, ami általában jó kiindulási alapnak szolgál. Egytengelyű feszültségek esetén 30-40 %-os, tiszta nyírás esetén pedig 80-90 %-os deformációkig alkalmazható az általános irányelvek szerint.

V. Ogden modell

Ez a modell a deformációs invariánsok helyett közvetlenül a főirányú nyúlásoktól függ (15):

$$W = \sum_{i=1}^{N} \frac{\mu_i}{\alpha_i} \cdot (\overline{\lambda_1^{\alpha_i}} + \overline{\lambda_2^{\alpha_i}} + \overline{\lambda_3^{\alpha_i}} - 3) + \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{d_i} \cdot (J_{el} - 1)^{2i} \tag{15}$$

μ_i: anyagparaméterek [Pa]
λ_1, λ_2, λ_3: a tér három kitüntetett irányára vonatkozó nyúlási viszony
d_i: összenyomhatatlansági paraméter [1/Pa]
J_{el}: elasztikus térfogati deformáció

Ez a modell visszavezethető a Neo-Hooke modellre N=1, $\mu_1=\mu$, és α_1=2 esetben, illetve a kétparaméteres Mooney-Rivlin modellre N=2, $\mu_1=2c_{10}$, α_1=2, $\mu_2=-2c_{01}$, α_2=-2 esetben.

Mivel az Ogden modell közvetlenül függ a főirányú nyúlásoktól, ezért pontosabb és jobb illeszkedést biztosít a mért eredményekhez.

Általánosságban akár 700%-os deformációkig is alkalmazható.

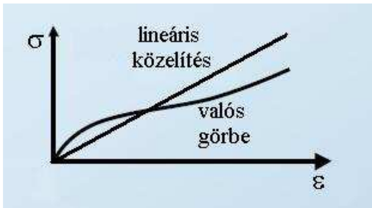
4. AZ ANYAGTULAJDONSÁG LINEÁRIS KÖZELÍTÉSE

A bemutatott anyagmodellek mindegyike egy viszonylag bonyolult egyenlettel írja le a deformációból eredő alakváltozási energia sűrűségfüggvényt, amelyen még mindig végre kell hajtani egy deriválást ahhoz, hogy a kívánt feszültségértékeket megkapjuk. Ez a rengeteg művelet komoly erőforrásokat igényel, és egy adott hardverkörnyezetben lassabb a megoldás folyamata, mint egy lineáris probléma esetén, mivel az utóbbinál az általános Hooke-törvény szerint könnyen származtatható a feszültség az alakváltozásból (16):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \tag{16}$$

E: rugalmassági modulus [Pa]
ε: fajlagos alakváltozás

Látható, hogy az adott anyagra jellemző rugalmassági modulus ismeretében egy egyszerű művelettel számítható a feszültség. Egy hiperelasztikus anyag esetében is kereshető egy olyan E érték, amellyel a feszültség és a fajlagos alakváltozás közötti kapcsolatot reprezentáló egyenes a vizsgálati tartományban a valós polinom közelében marad (5. ábra). Ha egy szimuláció során az anyagtulajdonságot egy ilyen beállítással közelítjük, az természetesen a pontosságot rontja, de gyorsabban és könnyebben megoldható problémához vezet.



5. ábra: Az anyagtulajdonság lineáris közelítése

Ebben az esetben szükséges még a végeselemes szoftverben megadni az anyag Poisson-tényezőjét (ν). Mivel a gumi anyagok általában összenyomhatatlannak tekinthetőek, ezért a ν=0,5 érték lenne a kívánatos, azonban a végeselemes szoftverek általában nem futnak le ezzel a beállítással. A gyakorlat azt mutatja, hogy ν= 0,4–0,45 érték beállításával a szimulációk már lefutnak, azonban ez is rontja a pontosságot.

5. A GUMI ANYAGTULAJDONSÁGAINAK MÉRÉSE

Az előzőekben bemutatott modellek mindegyikét a megfelelő paraméterekkel kell igazítani a modellezni kívánt anyag tulajdonságaihoz. A paraméterek meghatározását, és így a modell illesztését a szoftver önállóan végre tudja hajtani, ha a valós anyagtulajdonság mérési eredményeit táblázatos formában visszük be a rendszerbe.

Ehhez azonban szükség van a modellezni kívánt anyag mérési eredményeire. A mérési eljárások, módszerek közül a négy legáltalánosabb az egytengelyű, a kéttengelyű, a nyírási és a térfogati teszt [1, 2].

Egytengelyű teszt során a próbadarabot egy tengely mentén húzzák vagy összenyomják (6/a. ábra). A deformációs állapot a következő (17):

$$\lambda_1 = \lambda_A \qquad \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_A^{-1/2} \tag{17}$$

ahol λ_A az egytengelyű nyúlási viszony.

Kéttengelyű tesztnél az anyagot a tér két kitüntetett irányában is húzzák vagy nyomják (6/b. ábra). A deformációs állapot a következő (18):

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_A \qquad \lambda_3 = \lambda_A^{-2} \tag{18}$$

ahol λ_A a kéttengelyű nyúlási viszony.

Térfogati teszt esetén a tér mindhárom irányában húzzák a mérendő anyagot (6/c. ábra). A deformációs állapot a következő (19):

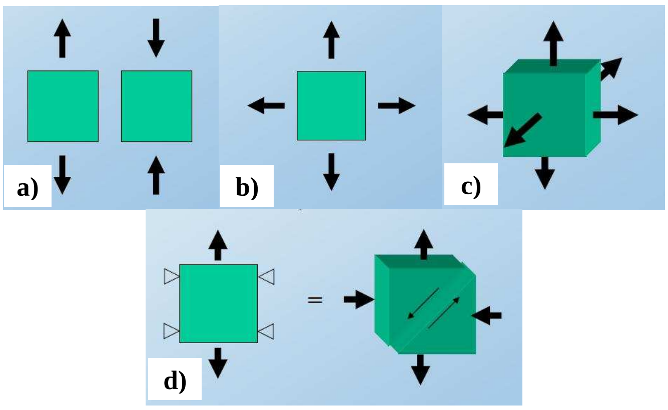
$$\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_A = J^{1/3} \tag{19}$$

ahol λ_A a nyúlási viszony a terhelés irányában.

Nyírási teszt során a tiszta nyírás állapotát idézik elő (6/d. ábra A deformációs állapot a következő (20):

$$\lambda_1 = \lambda_A \qquad \lambda_2 = \lambda_A^{-1} \qquad \lambda_3 = 1 \tag{20}$$

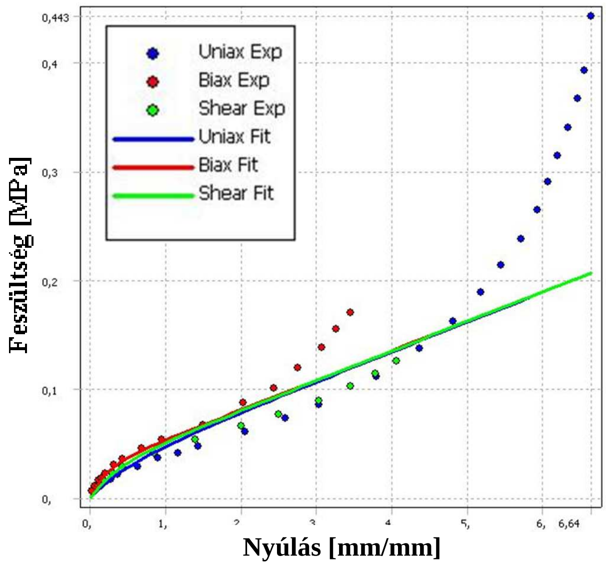
ahol λ_A a nyúlási viszony a terhelés irányában.



6. ábra: a) Egytengelyű, b) kéttengelyű, c) térfogati és d) nyírási teszt [2]

6. AZ ANYAGMÉRÉSI EREDMÉNYEK FELHASZNÁLÁSA

Az anyagmérési eredmények alapján a szoftver képes meghatározni azon paramétereket, amelyekkel az egyes anyagmodellek polinomjai a legjobban illeszkednek a valós eredmények görbéihez. Az illesztés eredményét grafikusan is ellenőrizhetjük, amelyre példaként a szoftverben mellékelt anyagkönyvtárban található Neoprene Rubber anyag diagramja látható a 7. ábrán. Az illesztés után az ábrán a bemenő adatpontokat lehet látni, valamint az anyagmodell egytengelyű, kéttengelyű és térfogati illesztett görbéit. Ha például csak egytengelyű mérési eredményeink vannak, a szoftver ez alapján is megpróbálja ráilleszteni a kéttengelyű, térfogati, stb. görbét. Az így kapott görbék helyessége mérési eredmények ismerete nélkül kérdéses, néhány esetben szemmel láthatóan értelmetlen, valószerűtlen eredmények születnek (például ha a kéttengelyű illesztett görbe már 10 %-os nyúlás esetén negatív feszültségi tartományba lép). Az ilyen hibák kizárása érdekében célszerű az illesztett görbéket minden esetben mérnöki szemlélettel ellenőrizni.

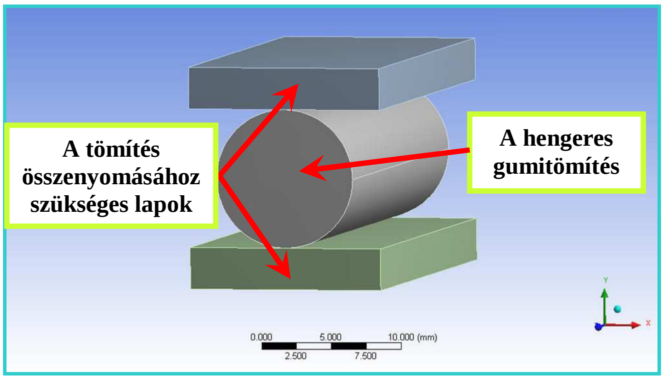


7. ábra: A szoftver anyagkönyvtárában található, Neoprene Rubber anyagmérésre illesztett anyagmodell

Természetesen nem mindig szükséges egy anyagon több mérési eljárást elvégezni. A költséghatékonyság miatt általában csak egytengelyű húzási vizsgálatokat végeznek, amelynek alapján a program rendszerint már jó eredménnyel tudja megállapítani az egyes anyagmodellekhez szükséges paraméterek értékeit. Speciális esetekben, jelentősebb alakváltozás esetén, illetve nagy pontosságú szimulációkhoz azonban szükség lehet több mérési módszer elvégzésére is.

7. EGYSZERŰSÍTETT MODELLEK

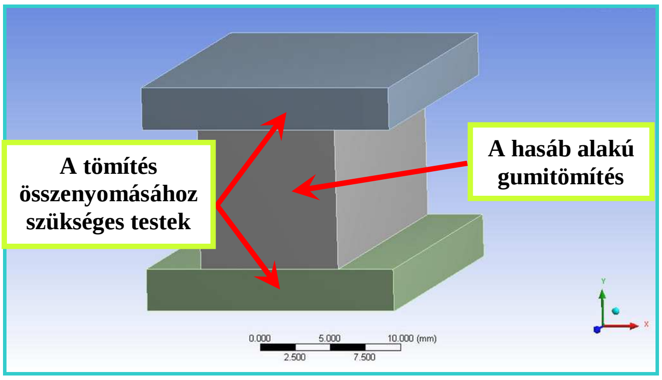
Az egyszerűsített végeselemes modellek kialakításakor a fő cél az volt, hogy valós problémákat reprezentáljanak egy olyan szimulációval, amely gyorsan és nagy biztonsággal megoldható különböző módszerekkel is. Az egyes módszerek által szolgáltatott eredményeket ezután össze lehet vetni, és következtetések vonhatók le az anyagmodellek további használatával kapcsolatban.



8. ábra: A hengeres tömítés

Az első modell egy hengeres tömítés részlete két sík felületű test között (8. ábra). A hengeres, gumi anyagú test a két lap között több lépcsőben kerül összenyomásra, hogy különböző mértékű deformációk esetén is összevethetőek legyenek az eredmények.

A második modell az előzőhöz nagyban hasonlít, de ebben az esetben a tömítés hasáb keresztmetszetű (9. ábra). Ez a szimuláció szempontjából egy komolyabb probléma, mivel az éleken található elemek nagy alakváltozáson mennek keresztül. Ez utóbbi modellt jelen dolgozatban csak megemlítjük, az eredményeket a henger alakú tömítést tartalmazó modellről mutatjuk be.



9. ábra: A hasáb alakú tömítés

8. EGYSZERŰSÍTETT MODELLEK PREPROCESSZÁLÁSA

A végeselemes háló 8 csomópontú hexaéder elemekből (SOLID185), sweep" metódussal készült. A tömítés és az egyes nyomólapok közé súrlódásos kontaktot definiáltunk, 0,6 értékű együtthatóval. A statikus szilárdságtani vizsgálathoz az alsó lap aljára egy fix megfogás kényszert alkalmaztunk, amely megakadályozza annak elmozdulását, a felső lap tetejére pedig egy elmozdulásos kényszert definiáltunk, amely a tömítés összenyomásáért felelős. A henger hossztengelyére merőleges síkokra, ahol tulajdonképpen a valóságban a geometria folytatódna, súrlódásmentes megfogást írtunk elő. Ez azt eredményezi, hogy az eredmények szempontjából ugyanazt érjük el, mintha a teljes geometriát vizsgálnánk a szimulációban, azonban a számításhoz szükséges idő jelentősen lecsökken. Szeretnénk kitérni arra, hogy ennek a lehetőségnek szigorú feltételei vannak: a geometriában és a terhelésben is szimmetriának kell lennie ahhoz, hogy ez az eljárás ne vezessen hamis eredményekre.

A hengeres tömítés esetében az összenyomást 6 lépésben definiáltuk, minden lépésben 0,5 mm-t összenyomva a hengert, tehát a hatodik terhelési lépés végén összesen 3 mm-el összenyomva a tömítést. Így 6 különböző mértékű deformáció esetén is ki lehet értékelni a szimulációt. (A hasáb alakú tömítés esetében 5 lépésből álló elmozdulást definiáltunk, melynek során a tömítés minden lépésben 0.5 mm-t kerül összenyomásra, így végül a teljes összenyomás 2,5 mm). A módszer segítségével a különböző mértékű nyúlások esetén is össze lehet hasonlítani az egyes anyagbeállítások eredményeit.

Végül a legfontosabbat, az anyagbeállításokat ismertetjük. A két nyomólap anyagának a szoftver anyaggyűjteményében megtalálható szerkezeti acélt állítottuk be. Ez a gumitömítéshez képest végtelenül merevnek tekinthető.

A henger anyagbeállítását külön-külön szimulációkban, az szoftverben létező összes hiperelasztikus anyagmodell beállításával teszteljük. A hiperelasztikus anyagmodellek paramétereit minden esetben ugyanahhoz a valós anyagmérési adatsorhoz illesztettük. A valós anyagmérés adatai 118 %-os nyúlásig tartalmaztak egytengelyű húzásból származó feszültségértékeket, így ha a szimuláció során ennél nagyobb nyúlások lépnek fel, akkor a hiperelasztikus anyagmodellek esetén nagy eltérések is adódhatnak.

Az anyagmodellek illesztett görbéinek szemrevételezése során azt tapasztaltuk, hogy egyes esetekben a kéttengelyű húzásra vagy a nyírási tesztre illesztendő görbe lefutása valószerűtlen. Korábban már megemlítettük, hogy a szoftver egyféle mérésen alapuló bemenő adatok esetén is prediktálja a többi görbe lefutását, de ennek eredménye, valósághűsége kérdéses. A konkrét példában a Mooney-Rivlin 2 és 9 paraméteres változatánál, valamint az első és harmadrendű Polinom anyagmodell esetében egyértelműen sejthető, hogy az illesztés nem pontos. Ennek megvizsgálása érdekében készítettünk egy szimuláció sorozatot ismét az összes, szoftverben megtalálható hiperelasztikus anyagmodellel, de bemenő adatként megadtuk a származtatott, a várható lefutásnak megfelelő kéttengelyű húzási és nyírási teszteredményeket is. Ezeket az egytengelyű húzás eredményéből képeztük úgy, hogy a görbék lefutása megfeleljen más hasonló tulajdonságú anyagokkal végzett mérések eredményeinek. Ezzel nem biztos, hogy minden esetben pontosabb eredményeket érünk el - mivel szükséges lenne ezeket a kiegészítő anyagméréseket elvégezni, hogy valóban pontosan lehessen paraméterezni az anyagmodelleket - de vizsgálhatóvá válik az, hogy milyen hatással van a szimulációra, ha csak egy-, vagy ha többféle mérési eredmény alapján paraméterezzük az anyagmodelleket, és így ki lehet zárni a minden kétséget kizáróan hibás illesztéseket.

Az anyagmérésből kapott feszültség-nyúlás görbére illesztettünk egy egyenest, amelynek meredekségéből meghatároztunk egy olyan rugalmassági modulust, amellyel lineáris anyagként is közelítettük a gumi viselkedését. A szimuláció során a Poisson-tényezőt 0,45-re állítottuk be. Így egy lineáris közelítés eredményét is össze lehet hasonlítani a hiperelasztikus anyagmodellek eredményeivel, mivel a gumi anyagbeállításán kívül az egyes szimulációk között egyéb eltérés nincs.

Összességében 29 különböző szimuláció készült – a hengeres és a hasáb alakú tömítés esetén is, külön-külön: 14 az egytengelyű húzási eredményre illesztett anyagmodellekkel, 14 a származtatott eredményekre illesztett anyagmodellekkel, és egy a lineáris közelítéssel.

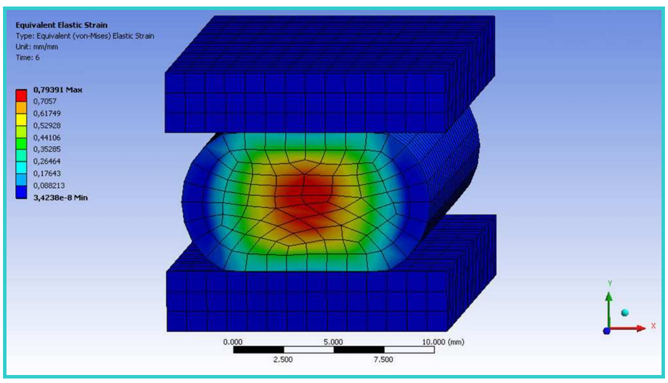
9. A HENGERES TÖMÍTÉS EREDMÉNYEINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A szimulációk futtatása során az egytengelyű húzási eredményekre illesztett hiperelasztikus modellek közül a 9 paraméteres Mooney-Rivlin és 3 paraméteres Polinom modellek viszonylag hamar leálltak vagy hibára vezettek, míg a többi beállítással az összes terhelési lépés lefutott.

A 10. ábrán a hatodik terhelési lépés végén, a legnagyobb mértékben összenyomott henger nyúlása látható. A különböző anyagbeállításokkal számított részeredményeket, azaz az egyes terhelési lépésekben a lineáris közelítéssel, valamint csak az egytengelyű húzási eredményekre paraméterezett hiperelasztikus anyagmodellekkel kialakuló legnagyobb nyúlásokat az 1. táblázatban lehet áttekinteni. (Ahol a táblázat nem tartalmaz adatot, ott nem született eredmény az adott anyagbeállítással.)

A 2. táblázat tartalmazza a származtatott kéttengelyű húzási és nyírási eredményekre is illesztett anyagmodellekkel kialakuló nyúlásokat. Itt nincs különösebb eltérés a korábbi eredményekhez képest, leszámítva azt, hogy mindegyik beállítással lefutott az összes terhelési lépés szimulációja.

A hiperelasztikus anyagmodellek mindegyike nagyon hasonló nyúlási maximumot produkált, ebből arra következtethetünk, hogy mindegyik esetben jól reprezentálják a tömítés anyagának összenyomhatatlan mivoltát.



10. ábra: A hengeres tömítés nyúlása [mm/mm]

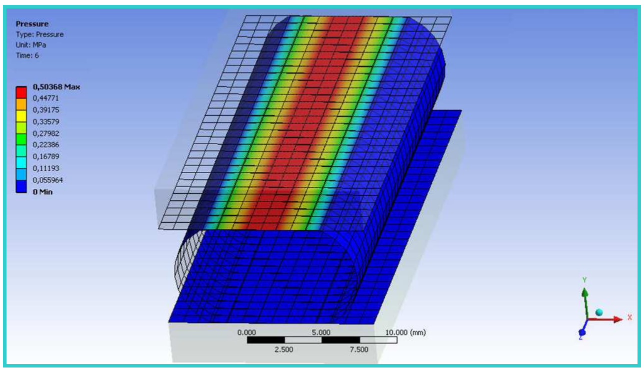
Anyagbeállítás	Nyúlás csúcsértéke az adott terhelési lépés végén [mm/mm]					
	1. lépés (0,5 mm)	2. lépés (1 mm)	3. lépés (1,5 mm)	4. lépés (2 mm)	5. lépés (2,5 mm)	6. lépés (3 mm)
Lineáris közelítés	0,079	0,142	0,203	0,279	0,375	0,49
Mooney-Rivlin 2	0,093	0,218	0,324	0,44	0,607	0,795
Mooney-Rivlin 3	0,093	0,217	0,324	0,433	0,587	0,752
Mooney-Rivlin 5	0,093	0,213	0,322	0,437	0,557	0,704
Mooney-Rivlin 9	Nem konvergált					
Neo-Hooke	0,093	0,218	0,324	0,437	0,605	0,794
Ogden 1	0,093	0,217	0,324	0,434	0,593	0,763
Ogden 2	0,093	0,212	0,322	0,437	0,557	0,689
Ogden 3	0,093	0,212	0,321	0,437	0,557	0,689
Polinom 1	0,094	0,218	0,324	0,44	0,607	0,795
Polinom 2	0,093	0,213	0,322	0,437	0,557	0,704
Polinom 3	Nem konvergált					
Yeoh 1	0,094	0,218	0,324	0,438	0,605	0,794
Yeoh 2	0,093	0,217	0,324	0,434	0,591	0,761
Yeoh 3	0,093	0,217	0,324	0,432	0,584	0,751

1. táblázat: A hengeres tömítésben kialakuló nyúlások az egytengelyű húzási eredmények alapján

Anyagbeállítás	Nyúlás csúcsértéke az adott terhelési lépés végén [mm/mm]					
	1. lépés (0,5 mm)	2. lépés (1 mm)	3. lépés (1,5 mm)	4. lépés (2 mm)	5. lépés (2,5 mm)	6. lépés (3 mm)
Mooney-Rivlin 2	0,093	0,218	0,324	0,438	0,606	0,794
Mooney-Rivlin 3	0,093	0,217	0,324	0,432	0,583	0,743
Mooney-Rivlin 5	0,093	0,216	0,324	0,432	0,576	0,73
Mooney-Rivlin 9	0,093	0,215	0,323	0,435	0,571	0,735
Neo-Hooke	0,093	0,218	0,324	0,437	0,605	0,794
Ogden 1	0,093	0,217	0,324	0,432	0,585	0,748
Ogden 2	0,093	0,212	0,322	0,437	0,557	0,689
Ogden 3	0,093	0,212	0,321	0,437	0,557	0,689
Polinom 1	0,093	0,218	0,324	0,438	0,606	0,794
Polinom 2	0,093	0,216	0,324	0,432	0,576	0,73
Polinom 3	0,093	0,215	0,323	0,435	0,571	0,73
Yeoh 1	0,094	0,218	0,324	0,438	0,605	0,794
Yeoh 2	0,093	0,216	0,324	0,431	0,581	0,741
Yeoh 3	0,093	0,216	0,323	0,433	0,574	0,733

2. táblázat: A hengeres tömítésben kialakuló nyúlások a származtatott anyagmérési eredmények alapján

A lineáris közelítés az egyes terhelési lépésekben kisebb nyúlási csúcsértékeket eredményezett, ez azzal is magyarázható, hogy a 0,5-nél kisebb Poisson tényező (0,45) miatt az egyes elemi cellák nem csak nyúlnak, de térfogatuk is csökken.

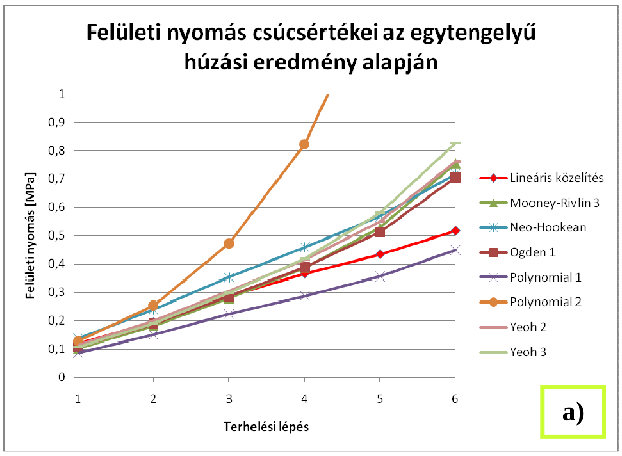


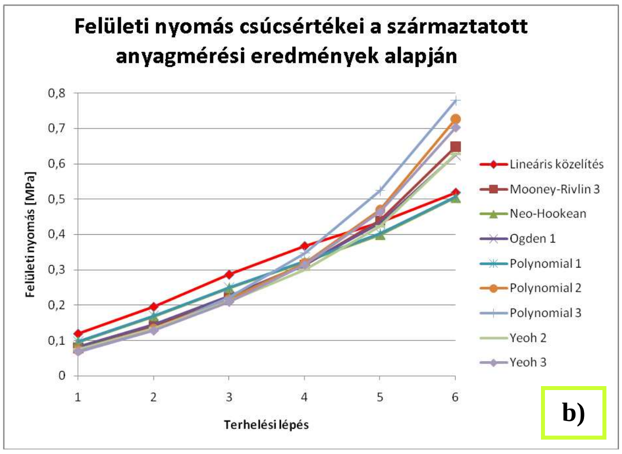
11. ábra: A hengeres tömítés - felületi nyomáskép [MPa]

A tömítés és az acéllap között kialakuló felületi nyomás csúcsértékéből lehet következtetni a tömítő képességre. A kialakuló feszültség és a felületi nyomás között persze összefüggés van, hiszen mindkettő ugyanazokra a kialakuló reakcióerőkre vezethető vissza. A szimulációk során kialakult felületi nyomások értékei a 3. és 4. táblázatban találhatóak.

Anyagbeállítás	Felületi nyomás csúcsértéke az adott terhelési lépés végén [MPa]					
	1. lépés (0,5 mm)	2. lépés (1 mm)	3. lépés (1,5 mm)	4. lépés (2 mm)	5. lépés (2,5 mm)	6. lépés (3 mm)
Lineáris közelítés	0,119	0,195	0,286	0,367	0,435	0,518
Mooney-Rivlin 2	0,086	0,15	0,223	0,287	0,355	0,449
Mooney-Rivlin 3	0,102	0,182	0,279	0,387	0,527	0,754
Mooney-Rivlin 5	0,129	0,255	0,473	0,822	1,403	2,451
Mooney-Rivlin 9	Nem konvergált					
Neo-Hooke	0,138	0,24	0,354	0,459	0,569	0,718
Ogden 1	0,107	0,189	0,287	0,388	0,512	0,705
Ogden 2	0,001	0,002	0,004	0,009	0,019	0,048
Ogden 3	0,001	0,002	0,004	0,009	0,019	0,046
Polinom 1	0,086	0,15	0,223	0,287	0,355	0,449
Polinom 2	0,129	0,255	0,473	0,822	1,403	2,451
Polinom 3	Nem konvergált					
Yeoh 1	0,138	0,24	0,354	0,459	0,569	0,719
Yeoh 2	0,114	0,201	0,305	0,414	0,549	0,762
Yeoh 3	0,107	0,192	0,299	0,42	0,58	0,827

3. táblázat: A hengeres tömítés alatt kialakuló felületi nyomás csúcsértékei az egytengelyű húzási eredmények alapján





12. ábra: A felületi nyomás csúcsértékei

Anyagbeállítás	Felületi nyomás csúcsértéke az adott terhelési lépés végén [MPa]					
	1. lépés (0,5 mm)	2. lépés (1 mm)	3. lépés (1,5 mm)	4. lépés (2 mm)	5. lépés (2,5 mm)	6. lépés (3 mm)
Mooney-Rivlin 2	0,097	0,17	0,25	0,324	0,402	0,507
Mooney-Rivlin 3	0,079	0,141	0,222	0,313	0,439	0,648
Mooney-Rivlin 5	0,073	0,134	0,216	0,319	0,469	0,726
Mooney-Rivlin 9	0,067	0,128	0,221	0,347	0,524	0,779
Neo-Hooke	0,096	0,168	0,248	0,322	0,399	0,504
Ogden 1	0,082	0,146	0,225	0,314	0,431	0,625
Ogden 2	0,001	0,002	0,005	0,01	0,022	0,053
Ogden 3	0,001	0,002	0,005	0,01	0,022	0,052
Polinom 1	0,097	0,17	0,25	0,324	0,402	0,507
Polinom 2	0,073	0,134	0,216	0,319	0,469	0,726
Polinom 3	0,067	0,128	0,221	0,347	0,524	0,779
Yeoh 1	0,096	0,169	0,248	0,322	0,399	0,504
Yeoh 2	0,075	0,135	0,211	0,3	0,423	0,627
Yeoh 3	0,069	0,128	0,209	0,314	0,463	0,702

4. táblázat: A hengeres tömítés alatt kialakuló felületi nyomás csúcsértékei a származtatott anyagmérési eredmények alapján

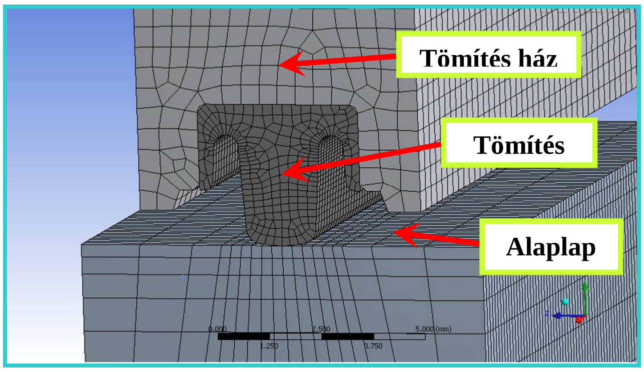
A lineáris közelítés összehasonlítása a nemlineáris modellekkel a 12/a. és 12/b. ábrán látható. A pontokat összekötő vonalaknak nincs fizikai tartalma, pusztán a leolvasást könnyítik meg. Mivel a Mooney-Rivlin 2, 5 és 9 paraméteres változatai megegyeznek a Polinom modell első-, másod- és harmadrendű változataival, így az eredményeik is gyakorlatilag ugyanazok. Ezért a Mooney-Rivlin 2, 5 és 9 paraméteres változatának eredményeit nem közöltük. A Neo-Hooke és az elsőrendű Yeoh anyagmodell eredményei is pontosan megegyeznek, ezért az elsőrendű Yeoh sem került a diagramra. Továbbá az Ogden másod- és harmadrendű modell nyomáseredményei nyilvánvalóan hibásak, ezért ezek is kimaradtak a diagramokból. Az eredményeken látható, hogy a kizárólag egytengelyű húzási anyagmérési eredmény alapján paraméterezett anyagmodellekben sokkal nagyobb eltérések adódnak, mint a származtatott eredményekkel kiegészített illesztés esetében. Főként az utóbbi esetben, a 12/b. ábrán látható, hogy az elsőrendű anyagmodellek (a Neo-Hooke, az elsőrendű Polinom, az elsőrendű Yeoh és a kétparaméteres Mooney-Rivlin) lefutása a lineáris közelítés-hez nagyon hasonló. A magasabb rendű modelleknél a nyomásnövekedés exponenciális jellege figyelhető meg.

A lineáris közelítés eredményei ebben a nyúlási tartományban (legfeljebb 75-80%) jó közelítéssel megegyeznek a nemlineáris anyagmodellek adta eredményekkel. Érdemes megemlíteni, hogy a feladatok megoldásához szükséges idő a lineáris közelítés esetében közelítőleg fele annyi volt, mint a többi esetben.

10. VALÓS GUMI ALKATRÉSZEK SZIMULÁCIÓJA

10.1 MECHATRONIKAI FEDÉLTÖMÍTÉS ÖSSZENYOMÁSA:

Az összetettebb geometriák szimulációra gyakorolt hatásának vizsgálata céljából a 13. ábrán látható összeállítást készítettük el. A geometrián kialakítottuk azokat a felületek, amelyeken később a kontaktkapcsolatokat lehet majd definiálni. A végeselemes háló 8 csomópontú hexaéder alakú elemekből (SOLID185) készült a „sweep” (söprés) eljárással. A modell többféle tulajdonságú csatlakozó-felületet tartalmaz. A tömítés a házba mereven kötött érintkezéssel kapcsolódik. A tömítés alsó tömítő felülete és az alaplap közé súrlódásos érintkezést definiáltunk 0,6 értékű súrlódási együtthatóval. A szimuláció során a tömítés házának alsó fele is felfekszik az alaplapra, ezért e kettő között is súrlódásos kontaktot állítottunk be szintén 0,6 értékű együtthatóval.

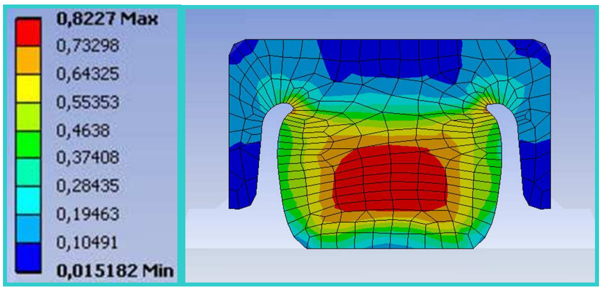


13. ábra: Elektronika-ház fedéltömítés

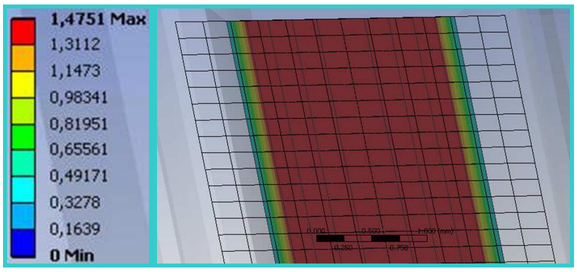
A statikus szilárdságtani vizsgálathoz a kényszerek kialakítása hasonló a korábbi példákhoz. Az alap aljára egy fix megfogást definiáltunk, a tömítés házát egy elmozdulás kényszerrel addig mozgattuk, amíg a felfekvő felületei hozzá nem érnek az alaphoz, így modellezve az alkatrész beszerelését. A terhelésben és a geometriában is fennálló szimmetriát a hossztengelyre merőleges síkokon definiált súrlódásmentes kényszerrel vettük figyelembe, így elegendő a teljes geometria helyett egy kisebb részletet modellezni.

Az alaplap anyaga egy alumínium ötvözet, a tömítés háza poliamid. A tömítés esetében a valós, 118 %-os nyúlásig terjedő mérési eredmények alapján megfelelően paraméterezett Neo-Hooke, elsőrendű Ogden és harmadrendű Yeoh hiperelasztikus anyagmodelleket teszteltük, illetve a mérési eredmények alapján lineáris közelítéssel is indítottunk szimulációkat, melyeknél a Poisson-tényező értékét 0,4-re vettük fel. (A Poisson tényező magasabb értéke mellett konvergencia lefutási problémák adódtak.)

A szimuláció mind a négy anyagbeállítással sikeresen lefutott. Az eredmények értékelése során az elvégzett iterációk számát, a kialakuló nyúlás csúcsértékét, valamint a tömítés alatti felületi nyomás maximális értékét hasonlítottuk össze (5. táblázat). A deformálódott tömítésben kialakuló nyúlások a 14. ábrán láthatóak. Az alaplap és a tömítés közötti felületi nyomás eloszlása a 15. és a 16. ábrán látható.



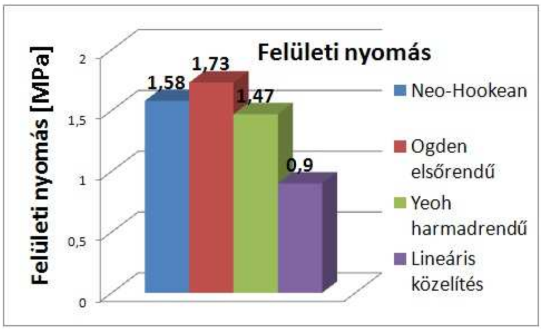
14. ábra: A deformált tömítésben kialakult nyúlás [mm/mm]



15. ábra: A tömítés alatt kialakult felületi nyomáskép [MPa]

Anyagbeállítás	Iterációk száma	Nyúlás [mm/mm]	Felületi nyomás [MPa]
Neo-Hooke	37	0,87	1,58
Ogden elsőrendű	50	0,92	1,73
Yeoh harmadrendű	37	0,82	1,47
Lineáris közelítés	48	0,47	0,90

5. táblázat: Az eredmények összefoglalása



16. ábra: A tömítés alatt kialakuló felületi nyomás csúcsértékei [MPa]

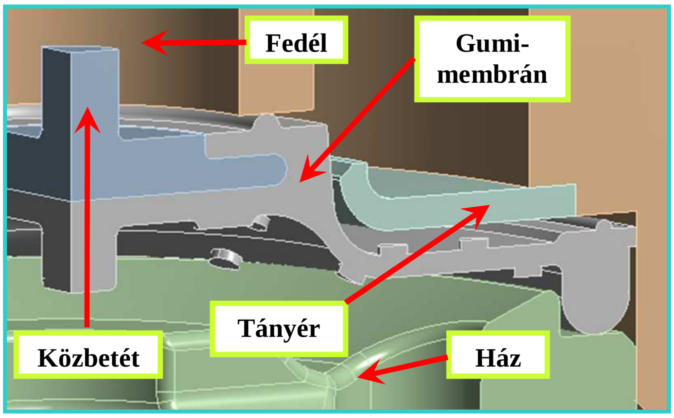
A szimulációja során nagy alakváltozáson ment keresztül a tömítés. A lineáris anyagközelítéssel végzett szimuláció eredményein egyértelműen látható az eltérés a hiperelasztikus anyagmodellekéihez képest. Ennek oka abban is kereshető, hogy a lineáris közelítésnél alkalmazott Poisson-tényező 0,4 értéke miatt az alkatrész térfogata nem maradt állandó az összenyomás során.

Az értékek ugyanakkor nagyságrendileg azonosak a nemlineáris modellekhez viszonyítva. Ha a szimuláció eredményének ilyen mértékű pontossága is elégséges, akkor célszerű a lineáris közelítés alkalmazása, ugyanis konvergencia lefutása biztosabb, és a futásideje is körülbelül fele a nemlineáris modellekéihez képest. Az eredmények értékelésekor és felhasználásakor tekintettel kell lenni arra, hogy ez nem egy pontos eljárás.

10.2 GUMIMEMBRÁN SZIMULÁCIÓJA

10.2.1 A SZIMULÁCIÓK ELŐKÉSZÍTÉSE

A geometriai komplexitás további fokozása érdekében egy, a mechatronikai rendszerekben gyakran előforduló, gumimembrán geometriáját is elkészítettük, amelynek negyed modellje, illetve beépítési környezete a 17. ábrán látható. A szimulációban ezt a negyed modellt vizsgáltuk a megfelelő szimmetria-feltételekkel, így elérhető, hogy kisebb számítási idő mellett produkáljon olyan eredményt, mintha a teljes modellt vizsgáltuk volna.

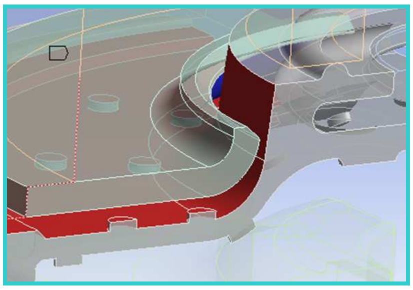


17. ábra: Negyed modell gumimembrán és környezete

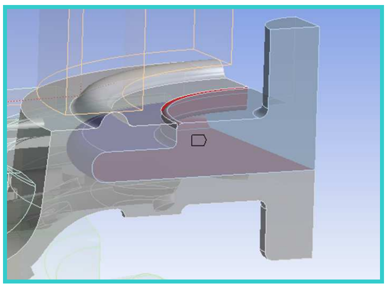
A membránt két terhelési állapotában is vizsgáltuk. Az egyik esetben a teljes alsó felületére, valamint a felső felületének egy részére hat nyomás, a másik esetben csak a teljes felső felületére hat nyomás. Mindkét esetben a szimuláció első lépésében a membrán karimáját kellett összepréselni, ezzel modellezve az alkatrész beszerelését.

A gumimembrán anyagtulajdonsága a megfelelően paraméterezett Mooney-Rivlin 2 paraméteres hiperelasztikus anyagmodellel szimuláltuk. A környezetében található alkatrészek merev testként lettek modellezve.

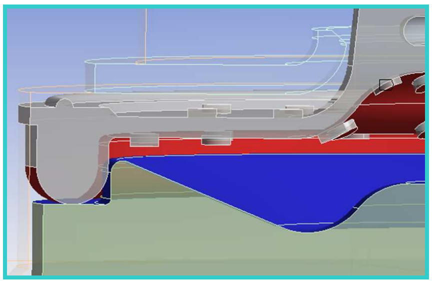
A 18. ábrán a membrán és a tányér közötti súrlódásos érintkezés, a 19. ábrán a gumimembránba illesztett közbetét fix kötése, a 20. ábrán a membrán és a ház közötti súrlódásos érintkezés, a 21. ábrán pedig a membrán és a fedél közötti súrlódásos érintkezés látható. A súrlódási tényező minden esetben 0,1 értékű.



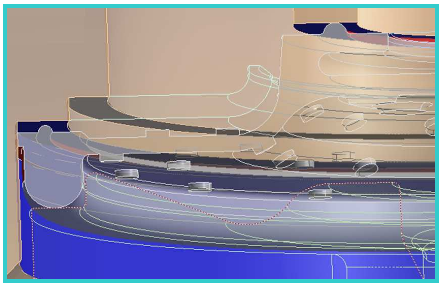
18. ábra: A membrán és a tányér érintkezése



19. ábra: A membrán és a közbetét érintkezése

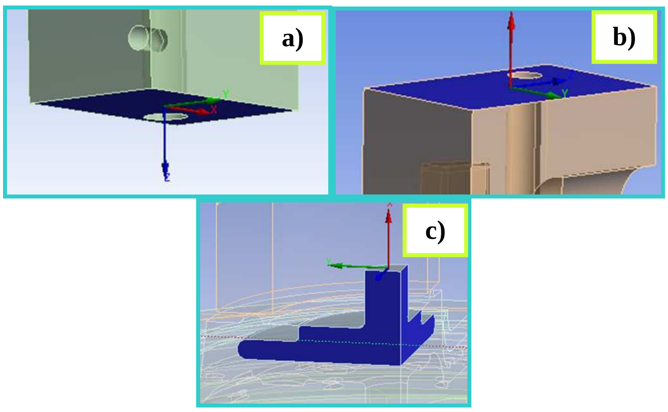


20. ábra: A membrán és a ház érintkezése



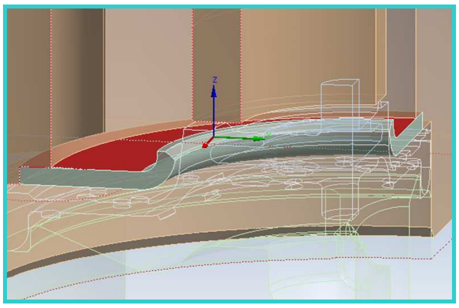
21. ábra: A membrán és a fedél érintkezése

A szimulációban a merev testek használata miatt – ami jelentősen lerövidíti a számítási időt és javít a konvergencián, ha eltekintünk a bennük kialakuló feszültségektől – csatlakozásokat is definiálni kell. A 22/a. ábrán a ház az alsó felületén rögzítve van a virtuális talajhoz, ezzel a test összes szabadsági fokát lekötve. A 22/b. ábrán a fedél a tetején lévő felületen van csatlakoztatva a talajhoz, ám az X tengely irányában (függőlegesen) elmozdítható, erre az egy szabadságfokra azért lesz majd szükség, hogy a membrán karimáját össze lehessen szorítani a ház és a fedél között. A 22/c. ábrán látható a membránban található közbetét csatlakozása a talajhoz. Az X tengely menti függőleges elmozdulást ennél is engedélyeztük, hogy a szimuláció során a nyomás hatására a membrán elmozdulását ne akadályozza.



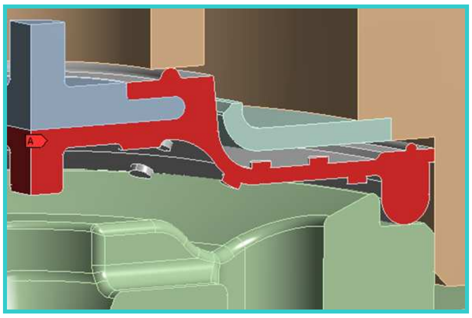
22. ábra: A ház a), a fedél b) és a membrán közbetét c) csatlakozása a virtuális talajhoz

A 23. ábrán végül a tányér és a fedél csatlakozása látható, a kettő közötti elmozdulási lehetőséget kizárva.



23. ábra: A tányér és a fedél csatlakozása

A szimmetriatulajdonság kihasználásához definiálni kell a szimmetriasíkokat. Ez gyakorlatilag egy súrlódásmentes, csak az adott síkban való elmozdulást és elfordulást megengedő kényszert jelent, ami a másik 3 szabadságfokot az adott síkban leköti. Ezt a szimulációban a 24. ábrán látható két síkon alkalmaztuk.

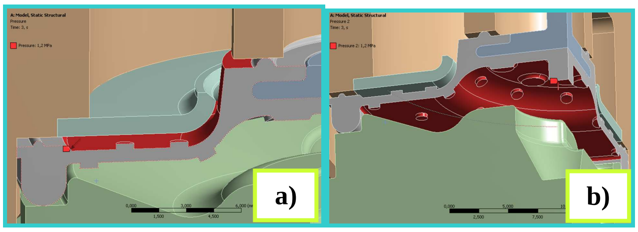


24. ábra: A szimmetria tulajdonság definiálása

Végül mindkét terhelési esetben az első terhelési lépés, hogy a fedelet rányomtuk a házra egy X tengely irányú (függőleges) elmozdulás kényszerrel, így összeszorítva a membrán karimáját.

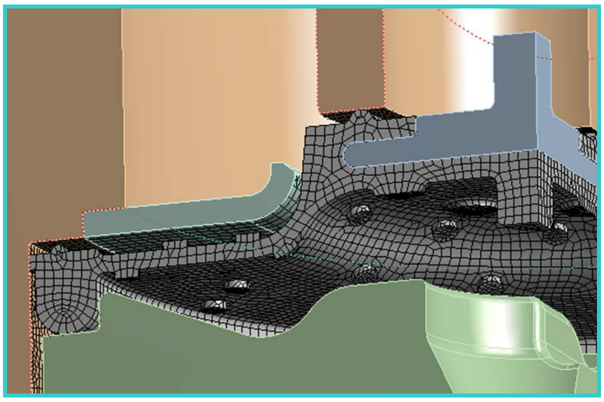
10.2.2. AZ ELSŐ TERHELÉSI ESET ÉS EREDMÉNYEI

Az első terhelési esetben a membránra a teljes alsó felületén valamint felső felületének egy részén hatott 1,2 MPa felületre merőleges túlnyomás (25/a. és 25/b. ábra).

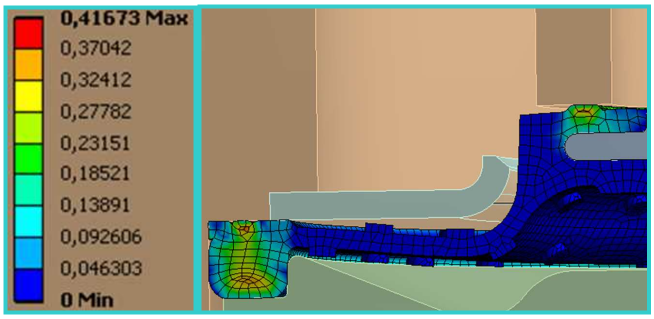


25. ábra: Nyomás a membrán felső a) és alsó részen b) – az első terhelési esetben

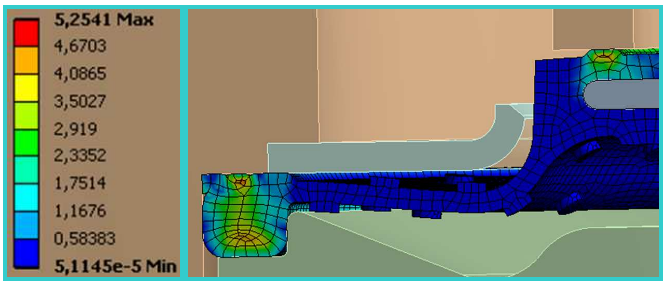
A végeselemes háló (26. ábra) kialakításához 20 csomópontú hatlapú térfogati elemeket alkalmaztunk a membránnal, valamint felületi elemeket, a membránnal érintkező merev testfelületeken. A teljes végeselemes háló 29776 elemből áll. A számítás eredményeit tekintve, a legnagyobb nyúlásra 41 % adódott (27. ábra). A membránban ekkor ébredő feszültség csúcsértéke 5,25 MPa értékű lett (28. ábra).



26. ábra: A végeselemes háló az első terhelési esetben



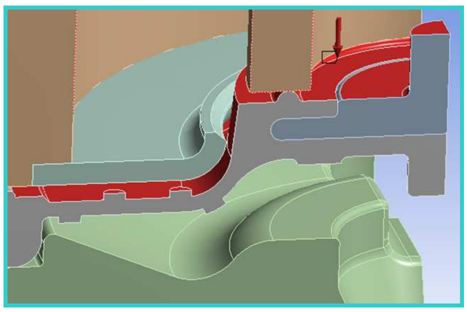
27. ábra: Az első terhelési esetben kialakuló nyúlás [mm/mm]



28. ábra: Az első terhelési esetben kialakuló feszültség [MPa]

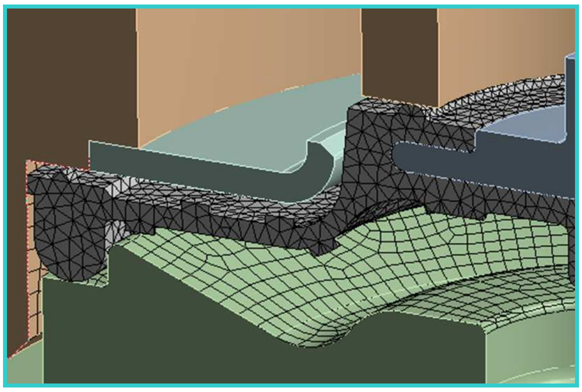
10.2.3. A MÁSODIK TERHELÉSI ESET ÉS EREDMÉNYEI

A második terhelési esetben a membrán teljes felső felületére hat 1,2 MPa túlnyomás (29. ábra).



29. ábra: Nyomás a második terhelési esetben

Ebben az esetben a végeselemes háló 12 csomópontú tetraéder térfogati elemekkel készült el, a membránnal illeszkedő felületeken pedig szintén felületi hálót alakítottunk ki (30. ábra). A végeselemes háló így 38060 elemből állt.

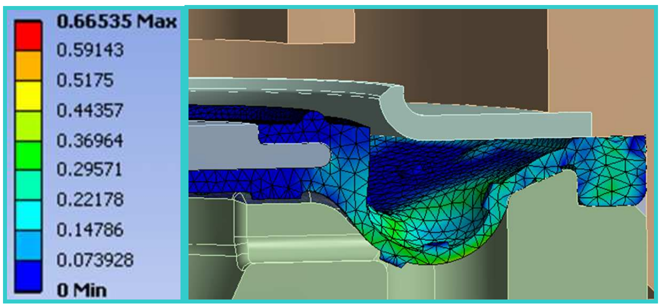


30. ábra: A végeselemes háló a második terhelési esetben

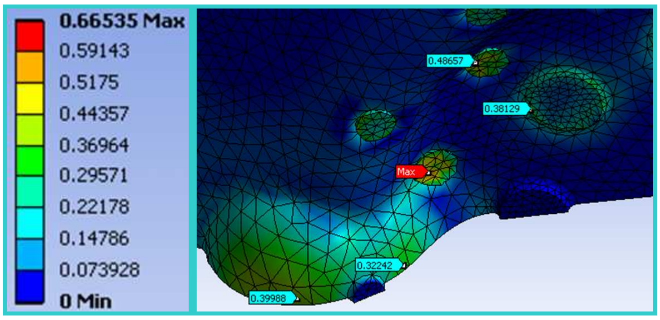
A feladat megoldása után elsőként a kialakuló nyúlást vizsgáltuk. A házban található furatba egy helyen a membrán benyomódik, itt nagyobb nyúlás alakult ki, ennek értéke 67%-ra adódott (31/a. és 31/b. ábra).

A kialakuló feszültség eloszlás a 32. ábrán látható. Csúcsértéke 8,77 MPa, amely fárasztó igénybevétel esetén jelentős hatással lehet a gumi élettartamára.

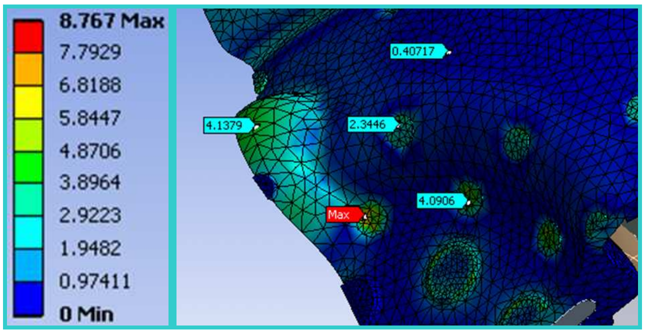
A 33. ábrán az elmozdulás eloszlást láthatjuk. A membrán kritikus pontjának legnagyobb elmozdulása a karima összenyomása előtti állapothoz képest 4,73 mm értékű.



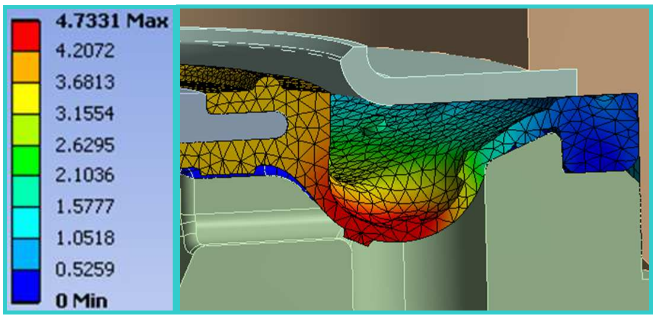
31/a. ábra: A nyúlás a második terhelési esetben [mm/mm]



31/b. ábra: A nyúlás a második terhelési esetben [mm/mm]



32. ábra: A feszültség a második terhelési esetben [MPa]



33. ábra: A membrán elmozdulása a második terhelési esetben [mm]

10.2.4. AZ EREDMÉNYEKBŐL LEVONT KÖVETKEZTETÉSEK

A szimulációk eredményei alapján rá lehet mutatni arra a terhelési esetre, ami a membránt nagyobb mértékben veszi igénybe, illetve meg lehet nevezni azokat a pontokat a geometrián, amelyek a tönkremenetelt tekintve kritikusak lehetnek, ezért a szimulációk sikeresnek tekinthetőek. Ezzel az alkatrésszel valós teszteket is végeztek, amelyek szintén megerősítették az eredmények helyességét, mivel a sérülések, szakadások azokon a helyeken történtek meg, amik a szimuláció alapján is kritikusak.

A szimuláció előkészítése során kiemelt gondot kellett fordítani a peremfeltételek helyes megadására, éppúgy, mint az érintkezések (kontaktok) pontos definiálására vagy a szimmetria feltételek megadására, mivel ezek már nem voltak olyan egyértelműen meghatározhatóak, mint az egyszerűbb modelleknél.

A szimuláció érzékeny volt a megfelelő végeselemes háló kialakítására is. Mindkét terhelési esetben csak több próbálkozás után sikerült lefuttatni azt a modellt, amelynél nem adódtak konvergencia lefutási problémák. A feladat számítása több napot vett igénybe, amit egy-egy módosítás után újra kellett kezdeni.

11. ÖSSZEFOGLALÁS

A hiperelasztikus anyagokkal végzett végeselemes szimulációk során a hagyományos szilárdságtani analízisekhez képest két fő eltéréssel kell számolni: egyfelől a hiperelasztikus anyagok nemlineáris volta miatt az alakváltozási energia sűrűségfüggvény segítségével lehet meghatározni a kialakuló igénybevételt, másrészt a jellemzően nagyságrendekkel nagyobb alakváltozásokat is figyelembe kell venni, mivel a kis alakváltozások esetén érvényes mechanikai törvényszerűségek ilyenkor már nem érvényesek. Napjainkban azonban a végeselemes szoftverek ezt már megfelelően tudják kezelni, így általában csak a számítási igény növekedésével kell számolnunk.

Az egyes hiperelasztikus anyagmodellek paramétereinek meghatározása nagyon fontos tényező, mivel nagyban befolyásolja az eredmények alakulását. Az egyszerű modellekkel - hengeres és hasáb alakú tömítésekkel - végzett szimulációk során láthattuk, hogy csak egytengelyű húzási anyagmérési eredmények alapján paraméterezett különböző hiperelasztikus anyagmodellekkel végzett szimulációk során az eredmények tekintetében nagy eltérések alakultak ki (lásd 1-2, 3-4. táblázat, valamint 12. ábra). Az egyszerűbb, alacsonyabb rendű modellek (pl. Neo-Hooke) kellőképp robosztusak, ilyen esetekben is valószerű eredményeket adnak, ugyanakkor kevésbé pontosan modellezik a valós anyagot, például nem képesek több inflexiós pontot is reprezentálni a szakítódiagramon. A magasabb rendű anyagmodellek már képesek erre, de érzékenyebbek is a bemenő anyagmérési eredményekre. A feladat során előfordult, hogy csak az egytengelyű húzási eredmény alapján paraméterezve nyilvánvalóan hibás eredményt adtak. Ezekben az esetekben célszerű kéttengelyű húzásból és nyírásból adódó eredményeket is megadnunk, még akkor is, ha valójában ilyen mérések nem történtek, mivel ezeknek a várható lefutását becsülve kisebb hibát produkálunk, mint amikor a nyilvánvalóan hibásan paraméterezett anyagmodellel végzünk számításokat. Az egytengelyű húzási eredményekből származtatott kéttengelyű húzási és nyírási eredmények alapján is paraméterezett anyagmodellek eredményeinél jól látszik, hogy a különböző modellek között nagyon lecsökkent az eltérés, azaz sokkal pontosabb eredményeket kaphatunk, ha többféle mérési eredmény is rendelkezésünkre áll az anyagmodellek pontos paraméterezéséhez (lásd 1-2, 3-4. táblázat, valamint 12. ábra).

Érdemes kiemelni még az anyagtulajdonság lineáris közelítését is, mivel a szimulációk során megmutattuk, hogy korlátos mértékű alakváltozásokig (kb. 50 %-os nyúlásig) jó eredményt produkált, és még nagyobb alakváltozás esetén is nagyságrendileg jó becslést biztosít (lásd 1-2, 3-4. táblázat, valamint 12. ábra). A mérnöki gyakorlatban ez jól használható, ugyanakkor nagyon értékes előnye a módszernek, hogy biztos konvergencia lefutást nyújt, valamint közel felére csökkenti a számítások idejét. Ipari körülmények között, termékfejlesztési területen ezeket az előnyöket nem lehet figyelmen kívül hagyni. Bizonyos feladatokhoz, ahol extrém nagy nyúlások alakulnak ki, vagy az eredmények pontosságát megkövetelik, ott a lineáris közelítés nem alkalmazható.

Az egyszerű modellek tapasztalatai alapján egy valós tömítési geometrián is végeztem több anyagbeállítással szimulációkat, amelyek eredményei megerősítették a korábbi tapasztalatainkat, amely szerint ilyen jellegű feladatoknál megfontolandó a lineáris közelítés alkalmazása (lásd 5. táblázat, 16. ábra).

A gumimembránnal végzett szimuláció egy más jellegű feladat, mivel itt a geometria komplexitásán túl az igénybevétel is összetettebb volt. Ezen a feladaton jól látható, hogy mekkora szerepe van azoknak a módszereknek, amelyek segítségével a számítási idő csökkenthető, úgy, mint a szimmetria tulajdonság kihasználása, melynek segítségével elég egy negyed modellt megoldani, valamint a gumi alkatrészekhez képest elhanyagolható rugalmasságú, fém alkatrészek merev testként való modellezése.

12. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

TAMOP-4.2.1/B-09/1/KONV-2010-0003: Mobilitás és környezet: Járműipari, energetikai és környezeti kutatások a Közép- és Nyugat-Dunántúli Régióban

A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

13. FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Allen, P. W., Lindley, P. B., Payne, A. R.: Use of rubber in engineering, Maclaren and Sons Ltd, London, 1970

[2] ANSYS Material Modeling: Hyperelastic Material Characterization (http://ansys.net/papers/nonlinear/hyper_elasticcity_curvefitting.pdf)

[3] Davey, A. B., Payne, A. R.: Rubber in engineering practice, Maclaren and Sons Ltd, London, 1964

[4] Dr. Eleőd András: Számítógéppel segített gyártmánytervezés, BME, Budapest, 1995

[5] Dr. habil. Égert János, Dr. Keppler István: A végeselem módszer mechanikai alapjai, Universitas-Győr Nonprofit Kft., Győr, 2007

[6] Holzapfel, G. A.: Nonlinear solid mechanics (A continuum approach for engineering), John Wiley & Sons, Chichester, 2001

[7] Hyperelasticity www.ansys.spb.ru/pdf/present/conflong_hyperel.pdf

[8] Marsden, J. E.: Mathematical foundations of elasticity, Dover, Mineola N.Y., 1994

[9] Ogden, R. W.: Non-linear elastic deformations, Ellis Horwood Limited, Chichester, 1984

[10] Treloar, L. R. G.: The physics of rubber elasticity, Clarendon Press, Oxford, 1958

[11] Wikipedia: Strain Energy Density Function (http://en.wikipedia.org/wiki/Strain_energy_density_function)

[12] Ansys help