

**Debreceni Egyetem
Műszaki Kar
Gépészmérnöki Tanszék**



Gumialkatrészek végeelem szimulációja az ADINA szoftver segítségével

Készítette: Jacsó Nóra gépészmérnök hallgató

Belső konzulens: Dr. Mankovits Tamás

Kállai Imre

Huri Dávid

Tanszékvezető: Ráthy Istvánné Dr.

Debrecen

2014.

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS.....	3
2. SZAKIRODALMI FELDOLGOZÁS.....	4
2.1. A GUMI FELHASZNÁLÁSA NAPJAINKIG	4
2.2. A VÉGESELEMES MÓDSZER KIALAKULÁSA	5
2.3. ADINA VÉGESELEM SZOFTVER BEMUTATÁSA	6
3. AZ ISO 7743 ÉS ISO 48 SZABVÁNYOK ELŐÍRÁSAI, ALKALMAZÁSA	7
3.1. MINTADARABOK ELŐKÉSZÍTÉSE	7
3.2. AZ „A” TÍPUSÚ MÉRÉS KÖRÜLMÉNYEI, MÓDSZERE	7
4. LABORATÓRIUMI MÉRÉSEK A VÉGESELEMES VIZSGÁLATOKHOZ	9
4.1. MINTADARABOK MÉRETEI	9
4.2. ISO 48- KEMÉNYSÉG MEGHATÁROZÁSA	9
<i>4.2.1. Mintadarabok keménysége</i>	<i>10</i>
4.3. MINTADARABOK NYOMÓVIZSGÁLATA	12
<i>4.3.1. Nyomóvizsgálat eredményeinek kiértékelése</i>	<i>12</i>
5. A SZABVÁNYOS GUMI PRÓBATEST VÉGESELEM VIZSGÁLATA.....	19
5.1. GUMI ALAKVÁLTOZÁSA.....	19
5.2. ANYAGÁLLANDÓK MEGHATÁROZÁSA.....	20
5.3. KIMUNKÁLT SZABVÁNYOS PRÓBATESTEK VIZSGÁLATA	25
6. GUMIÜTKÖZŐ VÉGESELEM SZIMULÁCIÓJA	29
7. ÖSSZEFOGLALÁS.....	35
8. IRODALOMJEGYZÉK	36

1. BEVEZETÉS

A gumi kiváló rugalmas tulajdonságait régóta ismerjük, így a gumiból készült ütközők alkalmazása is széles körben elterjedt, pl. járművek légrugóiban. Számos gumiból készült gyártmány (mint például a gumiabroncs) már régen magas fejlettségi fokot ért el, és a technika nélkülözhetetlen eszközévé vált [1].

A gépekkel szemben támasztott, egyre fokozódó igények szükségessé tették, hogy a gumi előnyös tulajdonságait a rugózástechnika területén is kihasználjuk, és ez a kutatómunka kiszélesedését is előmozdította. Ma már elegendő adat áll rendelkezésünkre a gumiütközők megbízható megtervezéséhez és alkalmazásához.

A gumi nagy alakváltozási energiát képes tárolni, akár több száz százalékos alakváltozást is elvisel, így járművek rugózására rendkívül előnyös. Nyomásra a karakterisztika progresszív jelleget mutat, amely a legtöbb rugózási feladatnál előnyösen kihasználható. Egyidejűleg figyelembe kell vennie a tervezőnek azt, hogy a gumi összenyomhatatlan anyagnak tekinthető, így biztosítani kell a terhelésnél is a szabad alakváltozást [2]. Továbbá figyelembe kell venni, hogy a gépjárművek motorházteteje alatti alkatrészek és tömítések magas hőmérsékletnek, fékfolyadéknak, olajnak és más vegyi anyagoknak vannak kitéve.

A dolgozat célja szabványos próbatestek $\sigma - \varepsilon$ (feszültség-alakváltozás) görbéinek előállítása, amelynek jelentős szerepe van a gumialkatrész végeselem analízisében. Gumialkatrészek esetén ezen $\sigma - \varepsilon$ jelleggörbék írják le legjobban az adott alkatrész viselkedését.

A mérés az ISO 7743 (Rubber, vulcanized or thermoplastic – Determination of compression stress-strain properties) szabvány alapján lett elvégezve [3]. Cél a mérés végeztével az eredmények kiértékelése, adatok csoportosítása, és ezekből az anyagállandók kinyerése, melyek segítségével elvégezhető a végeselemes vizsgálat. Ehhez elő kell állítani a kimunkált próbatest jelleggörbáját a paraméteroptimalizáláshoz, melyből az adatok és anyagállandók megismerése után a konkrét gumialkatrészre a végeselemes vizsgálat elvégezhető.

2. SZAKIRODALMI FELDOLGOZÁS

2.1. A gumi felhasználása napjainkig

A gumi alapanyagának, a kaucsuknak a használata már az ősidőkre visszavezethető. A fából kinyert nyersanyagot már a kezdetekben is vízhatlanításra és tömítésre tudták használni. A kísérletek során egyre több felfedezést tettek a kaucsuk alkalmazhatóságára és szabadalmakat nyújtottak be, majd megindult a gumi ipari szintű felhasználása. Faraday határozta meg először annak összetételét, majd Lüdersdorf pontosította, miszerint a kaucsuk 5:8 arányban szénből és hidrogénből áll. 1841-től jöttek újabb felfedezések, Goodyear rájött a gumi vulkanizálására és annak hatására, Hancock tovább gondolta és szabadalmaztatta Goodyear találmányát, Mitchell rájött a savval való keverés újrahasznosíthatóságára. 1888-ban Dunlop szabadalmaztatta az első pneumatikus gumibroncsot. a XX. század kezdetén izoprén polimerizációval megkezdődött a műgumi előállítása. A nyersanyagok fejlődése lehetővé tette a technológiai folyamatok jelentős megugrását [4].

Az abroncsgyártás a '30-as évektől napjainkig a legjelentősebb kaucsuk felhasználási terület. Ma azonban a gumibroncsok mellett számos területen alkalmazzák a gumit gépészetben, pl. tömítésként, vízhatlanításra, viszkoelasztikus viselkedésének köszönhetően pedig rugózásra, lengéscsillapításra [5].



1. ábra Gépjárművekbe épített lérugó

A több évtizede ismert gumit alapanyagként, összetevőként számos területen felhasználják. Jelentős szerepe van a közlekedésben és a gépészetben is. Légrugókban alkalmazott gumiütközők vizsgálatával foglalkozik Mankovits és Szabó több cikkben is [6]. Az egyetlen olyan anyagcsoport, ami a legszélesebb hőmérsékleti tartományokban is biztosítja az elasztikus tulajdonságokat [5].

2.2. A végeselemes módszer kialakulása

A végeselem szoftverek az elmúlt fél évszázadban jelentős fejlődésen mentek keresztül, melynek köszönhetően számos rugalmasságtani feladatnak a közelítő eredményét vagyunk képesek kinyerni, mely jelentősen elősegíti a pontos mérnöki munkát.

A végeselemes technika előretörésével nem látott lehetőségek nyíltak meg a gumik tervezésében, vizsgálatában. A mai korszerű végeselemes programrendszerek már hatékonyan tudják kezelni a gumialkatrészeket. A végeselem vizsgálatához szükséges anyagjellemzők kinyerése céljából a laboratóriumi mérés elengedhetetlen. A gumik viselkedésének leírására számos anyagmodell létezik. Ilyen például a Neo-Hooke, a Mooney-Rivlin, a Yeoh, az Arruda-Boyce, az Ogden anyagmodell. Ezek alkalmazhatósága nagymértékben függ az igénybevételtől. Ezen anyagmodellek numerikus anyagállandóinak meghatározásához elő kell állítani a gumi rugókarakterisztikáját, jelleggörbét. Számos kutató foglalkozik paraméterillesztéssel hiperelasztikus anyagok vizsgálata esetén. Többek között Ogden ezzel foglalkozik tanulmányaiban [7, 8].

2. 3. ADINA végelelem szoftver bemutatása

Az ADINA R&D-t 1986-ban alapította a végelelem-módszer egyik legnagyobb és legelismertebb kutatója, Klaus-Jürgen Bathe professzor, aki jelenleg az MIT-n kutat és oktat. A cég célja az volt, hogy olyan általános célú végelelem szoftvert fejlesszenek ki, amelyek alkalmasak lineáris és nem lineáris végelelemes vizsgálatok elvégzésére, szilárd testek és szerkezetek, hőtani, áramlástan (CFD), stb. problémák elemzésére. Széleskörű alkalmazhatóságával megbízható és hatékony eredményeket nyújt végelelemes vizsgálatokhoz. Ez az oka annak, hogy gyakran választják a szoftvert olyan kritikus megbízhatóságot igénylő feladatoknál, mint például hidak vizsgálata földrengés esetén, orvos biológiai alkalmazások, atomreaktorok tervezése és sok más tanulmány és számítás elvégzésére.

Shangguan és Lu például egy motortartó gumibakot vizsgált végelelem-módszer segítségével az ADINA programrendszerben, továbbá javaslatokat tettek a geometria optimalizálására [9]. Több anyagmodellt használtak a gumi leírására, majd az ADINA programrendszerrel nyomásvizsgálatokat végeztek, amelyeket összevetettek a mérési eredményekkel. Ez bátorítást ad arra, hogy a szoftver alkalmas a kitűzött feladatom elvégzésére.

A szoftver oktatási verziója a Miskolci Egyetem Mechanikai Tanszékének honlapjáról letölthető.

3. AZ ISO 7743 és ISO 48 SZABVÁNYOK ELŐÍRÁSAI, ALKALMAZÁSA

3.1. Mintadarabok előkészítése

Az egytengelyű nyomóvizsgálat – a nehézgépjárművek hátsó lengéscsillapítójában alkalmazott légrugó gumiütközője – ISO 7743 szabvány által előírt méretekre kiesztergált próbatesteken végeztük el. A gumiütköző és a kimunkált próbatestek az 1. ábrán láthatóak [10].



2. ábra Gumiütköző és a kiesztergált darabok

A próbatestek kivételének módja az ISO 23529 előírásai szerint történt. A próbatestre vonatkozó alapvető követelmény a sima és párhuzamos felületek megléte, amint az a 2. ábrán a számozott próbatestek esetében látható. A szabvány a próbatestek minimális számát három darabban írja elő, a vizsgálathoz az ábrán látható négy darab próbatestet használtuk. A mérést az ISO 7743 szabvány alapján, a Miskolci Egyetem Anyagvizsgáló Laboratóriumában egy INSTRON 5566 típusú anyagvizsgáló gépen végeztük el az előírt körülmények között.

3.2. Az „A” típusú mérés körülményei, módszere

Az ISO 7743 nemzetközi szabvány 3 vizsgálati típust határoz meg gumi anyagok nyomóvizsgálatához (A, B és C vizsgálati módszer), amelyek közül az A módszert alkalmaztuk a jelen vizsgálatnál. Itt egy szabványos próbatestet kell vizsgálni, amely esetében a nyomólemezek és a gumi próbatest közötti kenés által biztosított a súrlódásmentes állapot.

Az „A” típusú mérésre a szabvány előírja a tengelyszimmetrikus próbatest méreteit, melynek átmérője $29\text{mm}\pm 0.5\text{mm}$ és magassága $12.5\text{mm}\pm 0.5\text{mm}$. A mérés során a laboratóriumi hőmérséklet 23°C . A súrlódás kiküszöbölését lítium bázisú gépszírkenéssel biztosítottuk. Az előírás szerint legalább 3 mintadarabon kell a méréseket elvégezni, azonban 4 próbatest állt rendelkezésre.

A gumiütközőt előírt összenyomódásig (25%) állandó sebességgel kell terhelni a fémlemezek között, amíg az előírt összenyomódást el nem éri. A mérésből származó értékeket az INSTRON 5566 anyagvizsgáló géphez telepített számítógép tárolta (idő, megrövidülés [mm, %], terhelés, nyomófeszültség, ciklusok száma), amelyből az eredmények kiértékelésre kerülnek.

Az ISO 7743 szabvány „A” mérési módszere alapján a vizsgált hengeres próbatesteket önbeálló pofák közé fogjuk és központosan ható erővel összenyomjuk. A pofák és a próbatest érintkezési felületén fellépő súrlódás miatt az érintkező felületeken az alakváltozás gátolt, mely a próbatest magasságának irányában nem egyenletes alakváltozást okoz. Ez hordósodáshoz vezet. A hordósodás mértéket kenőanyag alkalmazásával csökkentettük. A gumik viszkoelasztikus tulajdonsága miatt a mérést úgy kell elvégezni, hogy a tényleges nyomóvizsgálat előtt 3 előterhelési ciklust alkalmazunk, azaz három felterhelés- leterhelés ciklus után vizsgáljuk a 25%- nyi alakváltozáshoz szükséges erőt és a deformáció milyenségét. A mérés folyamán az előterhelési ciklusokban és a tényleges mérés folyamán is 10mm/perc keresztfej elmozdulási sebességet alkalmaztunk. Az 1. táblázat tartalmazza a mérés körülményeit.

1. táblázat A mérés körülményei

Vizsgált alkatrész	Légrugó gumiütközője
Próbatest	A gumiütközőből kimunkálva
Alkalmazott szabvány	ISO 7743
Módszer	A
Laboratóriumi hőmérséklet	23°C
Kenőanyag	lítium bázisú gépszír
Próbatestek száma	4db
A vizsgálat időpontja	2013. 04. 08.

4.LABORATÓRIUMI MÉRÉSEK A VÉGESELEMES VIZSGÁLATOKHOZ

4.1. Mintadarabok méretei

A kimunkált próbatestek méreteit tolómérővel mértük meg 3 helyen. Ezek eredményeit, valamint az előírt értékeket a 2. táblázat tartalmazza. A kiértékelés eredménye alapján a 2. próbatest nem felelt meg, így a további vizsgálatokban nem szerepel.

2. táblázat Gumi mintadarabok geometriai méretei [mm]

		1. minta	2. minta	3. minta	szórás	átlag	min	max	előírt
1. próbatest	D	29	28.82	29.11	0.15	28.98	28.82	29.11	$D=29\pm0.5$ $h=12.5\pm0,5$
	h	12.98	13.02	13	0.01	13	12.98	13.02	
2. próbatest	D	29	29.11	29.12	0.07	29.08	29	29.12	
	h	13.12	13.22	13.2	0.05	13.18	13.12	13.22	
3. próbatest	D	29.1	29	29.22	0.11	29.11	29	29.22	
	h	12.79	12.82	12.88	0.05	12.83	12.79	12.88	
4. próbatest	D	28.91	29	29	0.05	28.97	28.91	29	
	h	12.38	12.31	12.3	0.04	12.33	12.3	12.38	

4.2. ISO 48- Keménység meghatározása

A gumik keménységét az ISO 48 (Rubber, vulcanized or thermoplastic- Determination of hardness) szabvány alapján mértük meg. A szabvány 4 mérési módszert határoz meg sík felületekre a keménységi szinteknek megfelelően (Method N, H, L, M.- Normal, High- hardness, Low- hardness and Micro test). Jelen esetben a normál módszert alkalmazzuk, melynél a mintadarab vastagsága nagyobb vagy egyenlő 4 mm és keménysége 35 és 85 IRHD (International Rubber Hardness Degrees) érték közötti (esetenként 35 és 95 IRHD).

4.2.1. Mintadarabok keménysége

A Shore féle keménységmérést főképp polimerek, elasztomerek és gumianyagok keménységének mérésére használják. A keménység olyan anyagtulajdonság, mely segítségével meghatározhatók egyéb jellemezők is, mint például rugalmasság, szilárdság, kopásállóság [11-13]. Az anyagok keménysége jelentősen befolyásolja felhasználhatóságukat, alkalmazási területeiket. Gumi anyagok esetében az egyik legfontosabb jellemzője az anyagnak, mely befolyásolja a rugalmasságát, viszkoelasztikus tulajdonságait.



3. ábra A próbatestek keménységmérése

A nyomóvizsgálat előtt minden próbatesten Shore A keménységet mértünk digitális Shore keménységmérővel. A keménységvizsgálati eredményeket a 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat Mért Shore- A keménységek

Mérés száma	1.próbatest	3.próbatest	4.próbatest
1	82.6	83.2	82.6
2	85.4	85.1	84.3
3	84.3	84.9	83.8
4	84.7	82.8	84.7
5	85	84.6	85.2
6	83.5	83.4	83.9
7	84.5	85.3	84.5
8	82.1	84.1	82.9
9	85.3	85.5	84.6
10	86.1	84.7	83.8
Minimum	82.1	82.8	82.6
Maximum	86.1	85.5	85.2
Átlag	84.35	84.36	84.03

A mérési eredmények alapján a varianciaanalízis módszerrel ellenőrzésre került, hogy feltételezhető-e, hogy a mintadarabok azonos keménységűek. Az analízist a MS Excel beépített „varianciaanalízis” adatelemző eljárással végeztük el. 3 csoporttal, egy csoporton belül 10 elemmel kellett számolni. Az elemzés során – a MS Excel által számított – értékeket a 4. táblázat, a vizsgálat eredményét a 5. táblázat mutatja.

4. táblázat A varianciaanalízis során számított értékek (MS Excel)

Csoportok	Darabszám	Összeg	Átlag	Variancia
1. próbatest	10	843.5	84.35	1.609
3. próbatest	10	843.6	84.36	0.885
4. Próbatest	10	840.3	84.03	0.653

5. táblázat varianciaanalízis eredménye (MS Excel)

Tényezők	SS	df	MS	$F_{számított}$	p-érték	F_{krit}
Csoportok között	0.705	2	0.352	0.336	0.718	3.354
Csoporton belül	28.33	27	1.049			
Összesen	29.035	29				

A 5. táblázatban látható a csoportok közt és a csoportokon belül számított varianciák aránya: $F_{számított}=0.336$, és az 5%-os szignifikancia szinthez tartozó kritikus érték: $F_{krit}=3.354$. Mivel $F_{számított}<F_{krit}$ (sőt F sokkal kisebb, mint F_{krit}) elfogadásra kerül, hogy a minták azonos várható értékű (normális eloszlású) valószínűségi változótól származnak, azaz a továbbiakban joggal feltételezhető, hogy a próbatestek keménysége egyenlő.

4.3. Mintadarabok nyomóvizsgálata

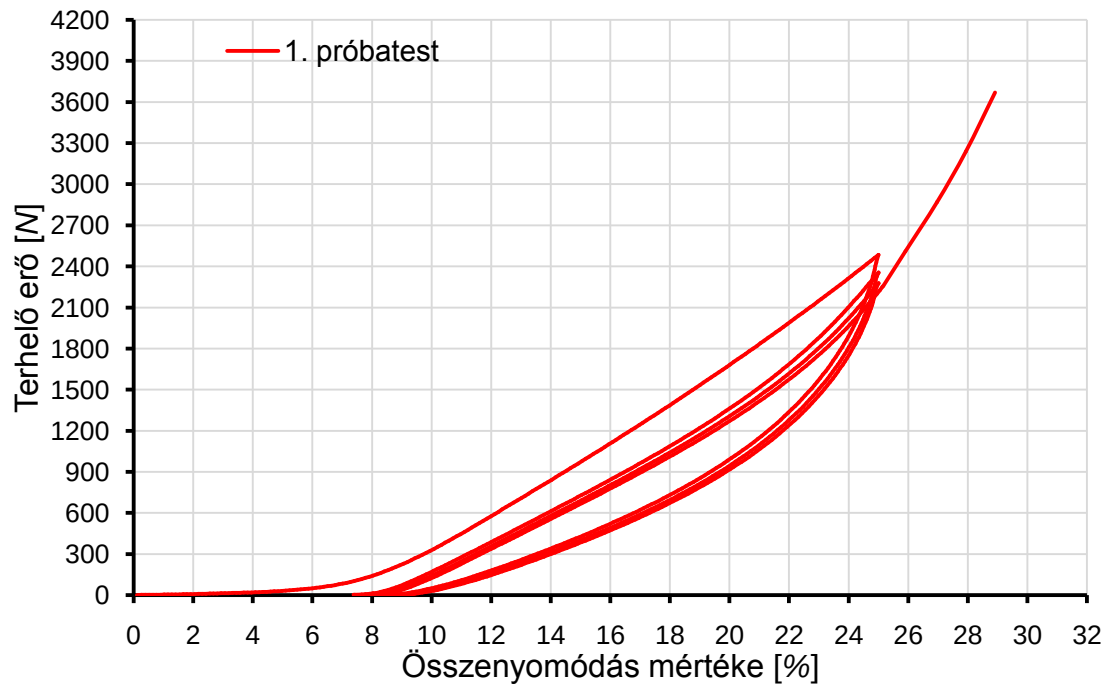
4.3.1. Nyomóvizsgálat eredményeinek kiértékelése

Az ISO 7743 szabvány szerint mindhárom próbatesten elvégeztük a nyomóvizsgálatot (4. ábra). Az eredményeket a vizsgálat során kinyert adatok szolgáltatták. A gumi rugalmassági modulusza különböző alakváltozási mértéknél szintén kiértékelésre került. Itt meg kell jegyezni, hogy a szabványban szereplő „compression modulus”-t, a későbbiekben csak rugalmassági modulusznak nevezzük.

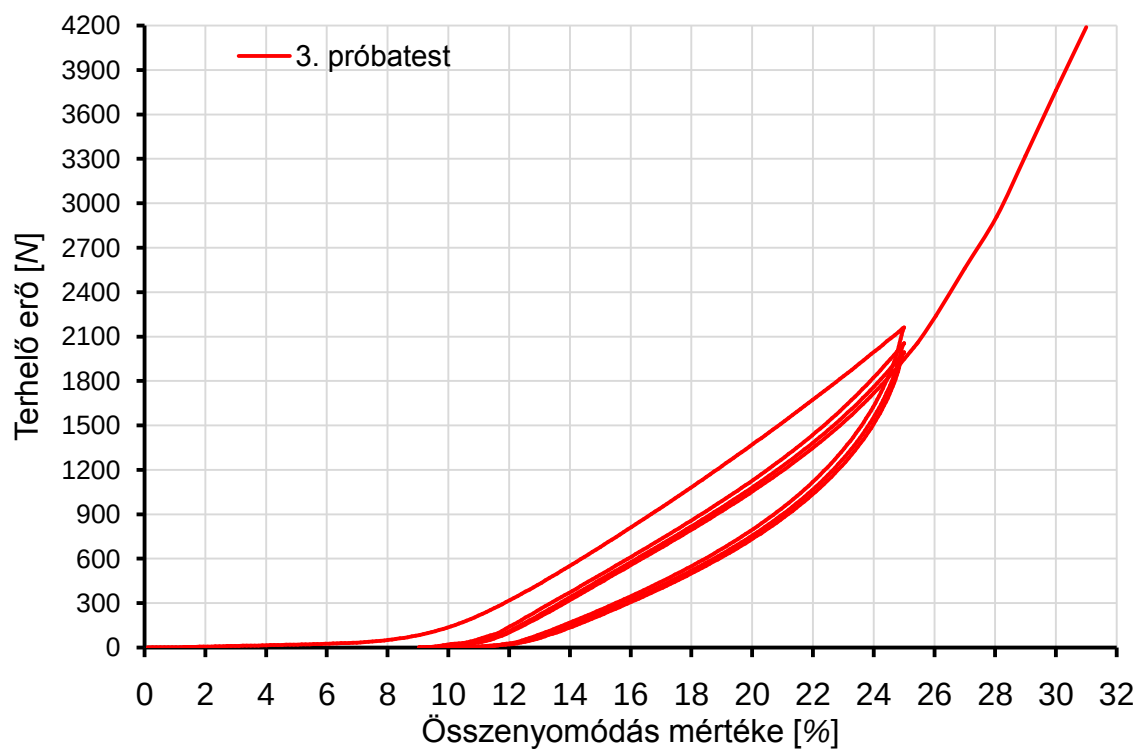


4. ábra A nyomóvizsgálat

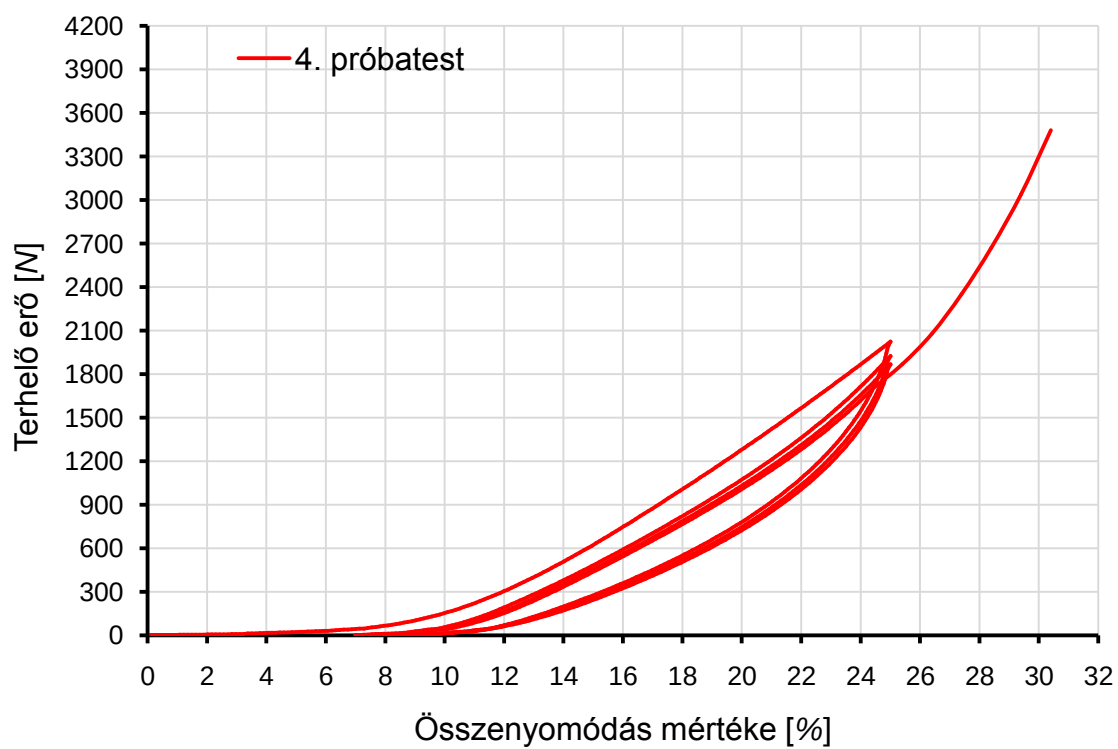
A számítógép által tárolt adatokból állítottuk elő az 1., a 3. és a 4. próbatest terhelő erő-összenyomódás (%) jelleggörbéit (5-7. ábra).



5. ábra 1-es próbatest jelleggörbéje

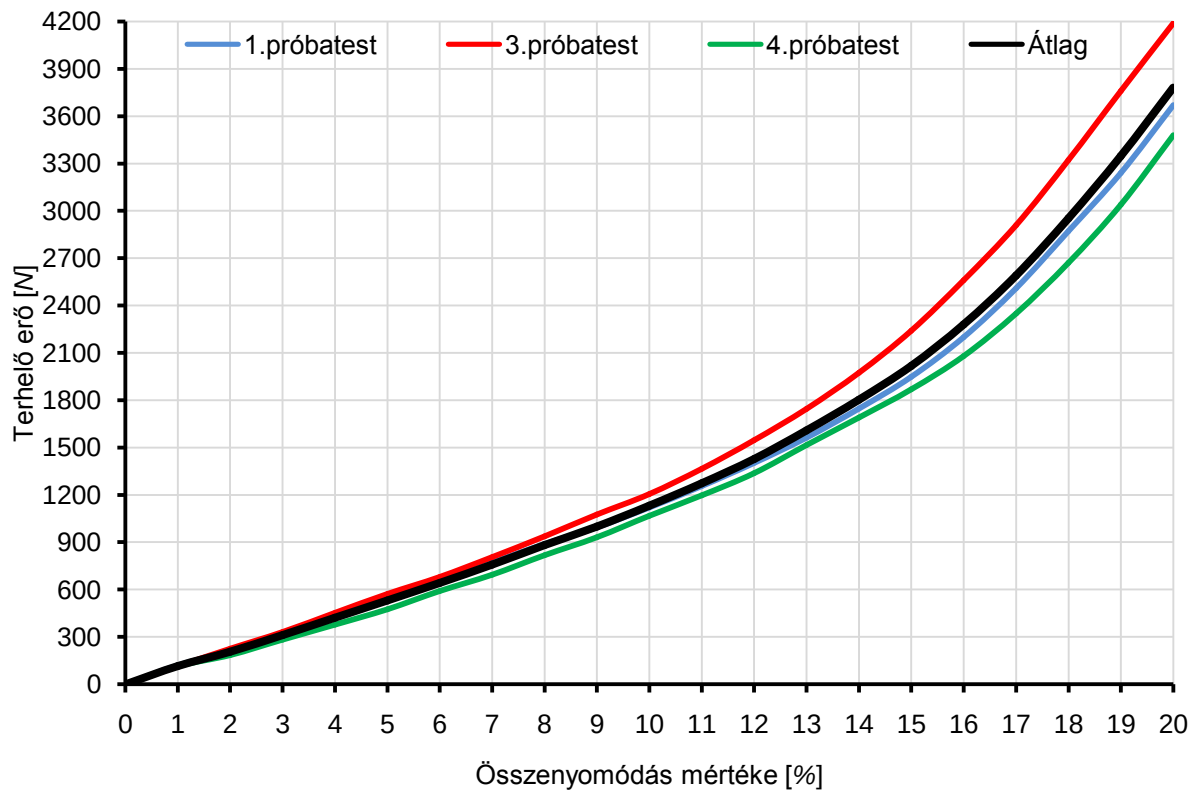


6. ábra 3-as próbatest jelleggörbéje



7. ábra 4-es próbatest jelleggörbéje

Az erő- deformáció görbékből jól látható a mérés folyamán alkalmazott előterhelési ciklusok és a negyedik felterhelés, összenyomás, azaz a mérés szempontjából lényeges szakasz, ahonnan információt kapunk a gumi próbatestünk rugalmas viselkedéséről. A görbét megvizsgálva tapasztalható az alapanyag viszkoelasztikus, azaz késve rugalmas tulajdonsága. Az első előterhelési ciklus után, a terhelés megszűntével a próbatest nem nyerte vissza az eredeti magasságát, így a második, harmadik és negyedik felterhelés esetén mindig később kezdődött a tényleges összenyomás, deformáció. Ez a jelenség jól megfigyelhető, ha a terhelés ráadás és elvételi ciklusból megrajzoljuk a rugalmassági hiszterézis hurkokat. Ilyenkor tapasztalható, hogy az egymást követő ciklusokban a hiszterézis veszteségek csökkennek, és egy határértékhez tartanak, majd a rendszer deformációjában állandósult állapot áll be. Ez az egyensúly a gumi viszkoelasztikus és relaxációs tulajdonságainak a „kiegyenlítődésein” alapul, amely mögött bonyolult molekuláris és szegmensmozgások állnak. Azonban egy termék, jelen esetben egy légrugónak a használata során is az alkalmazott anyagok ugyancsak ebben az állandósult állapotban működnek, így a pontos számítások, méretezések, szimulációk elvégzéséhez is ebben a tartományban kell az anyagunkat vizsgálni. A próbatest kialakítása és a mérés körülményei is ideálisnak tekinthetők, így ebben az esetben az összenyomódás mértéke és a szükséges terhelő erő között közel lineáris összefüggésnek kell fenn állnia kis alakváltozás esetén. Azonban a mérések kezdetén, geometriai hibákból származó plusz összenyomódás figyelhető meg a próbatestek jelleggörbéjén, amit a további számításokhoz korrigálni kell. Ezt a végterhelés görbéjének lineáris szakaszára illesztett egyenes, és a vízszintes tengely által kimetszett pontba eltolt függőleges tengellyel végeztük el.



8. ábra A korrekció után kapott végterhelések

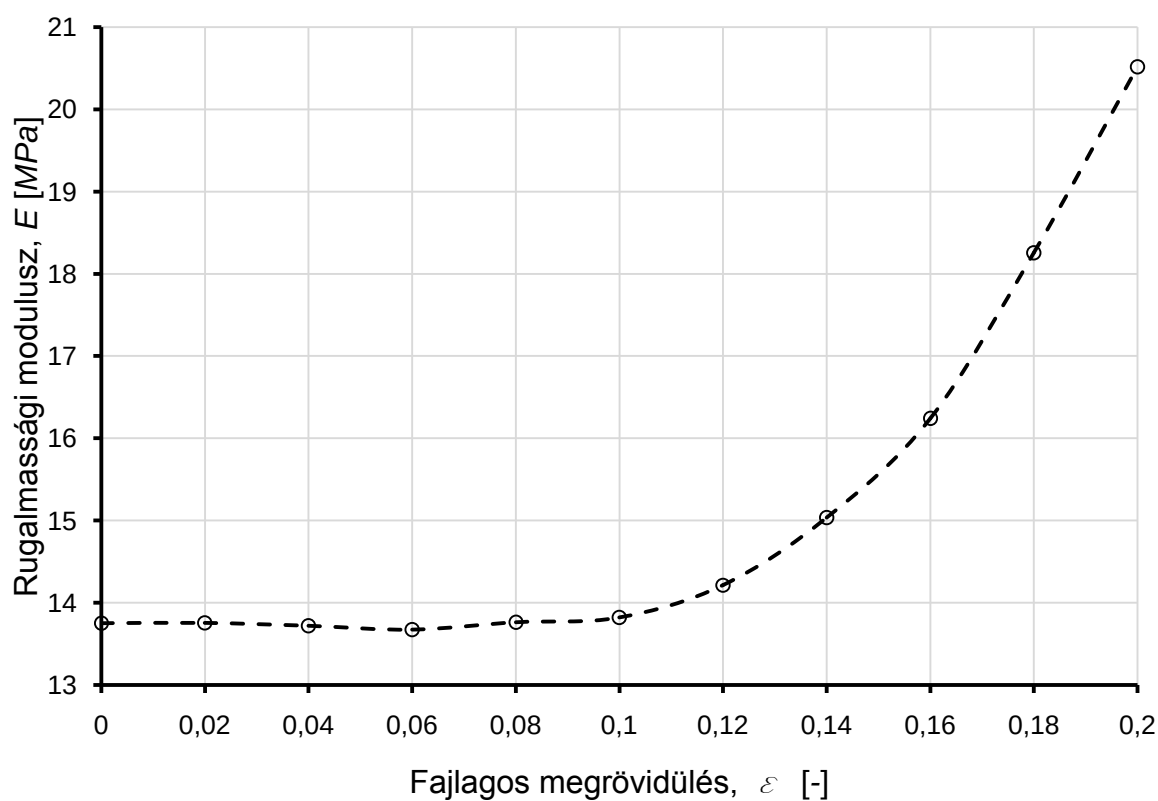
A 4. felterhelés (végterhelés) eredményeként kapott görbéből határozhatók meg adott alakváltozás értékekre a gumi rugalmassági modulusza az

$$E = \frac{F}{A\varepsilon} \quad (1)$$

összefüggés szerint, ahol F a terhelő erő értékei adott alakváltozás esetén, ε a fajlagos összenyomódás értékei, amíg A a próbatest keresztmetszete az aktuális állapotban. Felhasználtuk, hogy a vizsgált gumit tökéletesen összenyomhatatlannak tekintjük, azaz térfogata a terhelés hatására nem változik. A kapott rugalmassági moduluszokból átlagot vonva kapjuk meg a feszültségek számításához szükséges anyagállandókat. Ezek eredményeit az alábbi táblázat tartalmazza. A rugalmassági modulusz változása a 9. ábrán látható.

6. táblázat A rugalmassági modulusz számítás eredményei

	Korrekció eredménye [mm]		Rugalmassági modulusz, E [MPa]				
	h_0	A_0	$E_{4\%}$	$E_{8\%}$	$E_{12\%}$	$E_{16\%}$	$E_{20\%}$
1.próbatest	11.83	724.8452	14.35338	14.09314	14.18156	15.93603	20.2526
2.próbatest	11.4	749.0246	14.49072	14.39755	15.13528	17.94334	22.37577
3.próbatest	11.05	735.5085	12.31066	12.79732	13.32789	14.84687	18.92568
Átlag			13.71825	13.76267	14.21491	16.24208	20.51802

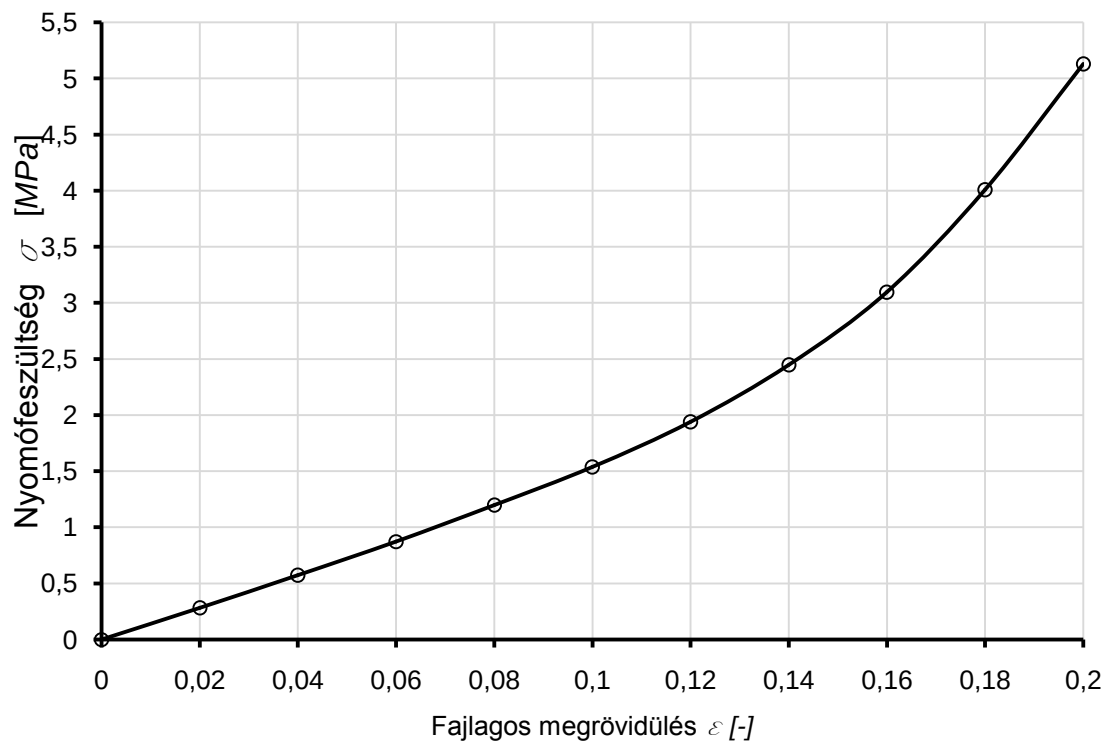


9. ábra A rugalmassági modulusz és az alakváltozás kapcsolata

Súrlódásmentes állapotot feltételezve az ISO 7743 alapján a feszültség-alakváltozás kapcsolatát 30%-os összenyomódásig kielégítően írja le az alábbi összefüggés,

$$\sigma = \frac{E\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (2)$$

A behelyettesítések után előállítható a végelelemes anyagállandók meghatározásához szükséges $\sigma - \varepsilon$ jelleggörbe (10. ábra).

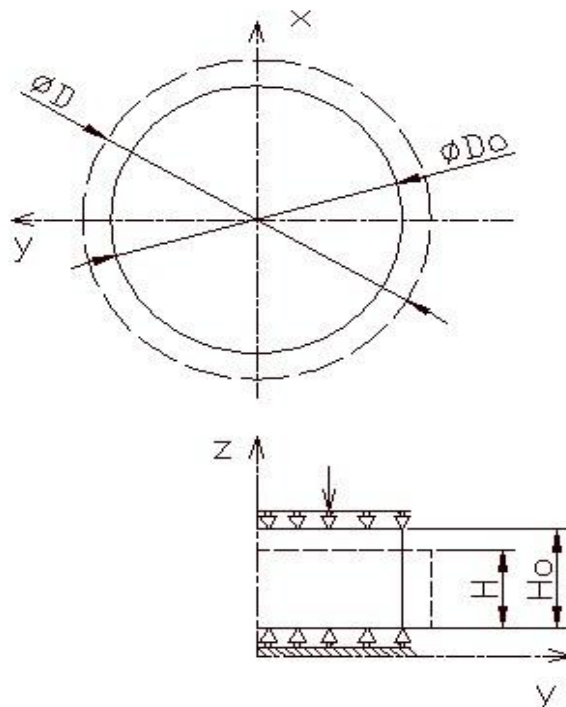


10. ábra A próbatestek átlagos karakterisztikája (továbbiakban: a gumi jelleggörbéje)

5. A SZABVÁNYOS GUMI PRÓBATEST VÉGESELEM VIZSGÁLATA

5.1. Gumi alakváltozása

A gumi próbatestet ideális esetben, azaz súrlódásmentes állapotban vizsgáljuk, melynek meridián metszete és felülnézete látható az alábbi szerkezeti ábrán. Az ábra illusztrálja a deformációt ideális esetre, ahol H_0 és D_0 a kezdeti (eredeti) magasság és átmérő, míg H és D az alakváltozott geometriai méretek a nyomó igénybevétel hatására.



11. ábra A próbatest kezdeti és pillanatnyi állapota ideális esetben

Az ISO 7743 szabvány előírja, hogy a 4. terhelési félciklusnál kell kiolvasni az eredményeket. Figyelembe véve azt, hogy a gumi a viszkoelasztikus tulajdonsága miatt pillanatnyi maradó alakváltozást szenved, annak mérete megváltozik. Így a végeselemes vizsgálatokban szükségeszerű azt a pillanatnyi geometriát vizsgálni, amelynek méreteit a 7. táblázat tartalmazza.

7. táblázat A vizsgált próbatest geometriai méretei

Geometriai méretek	
Átmérő (D)	31,621mm
Magasság (H)	11.6267mm

5.2. Anyagállandók meghatározása

A végeselemes vizsgálatokhoz elengedhetetlenül fontos az anyag tulajdonságainak ismerete, melyet az anyagállandókból kapunk meg. A rugalmasságtan alapja szerint a test méretéhez képest nagy az elmozdulás és az alakváltozás. Így egyszerű lineáris vizsgálat nem elegendő.

Gumik esetén az anyagmodelleket az alakváltozási energiasűrűség függvénnyel szokás megadni. Majdnem összenyomhatatlan anyagok energiasűrűség függvénye is felbontható egy térfogatváltozási és egy torzulásos részre

$$W = W_V + W_D \quad (3)$$

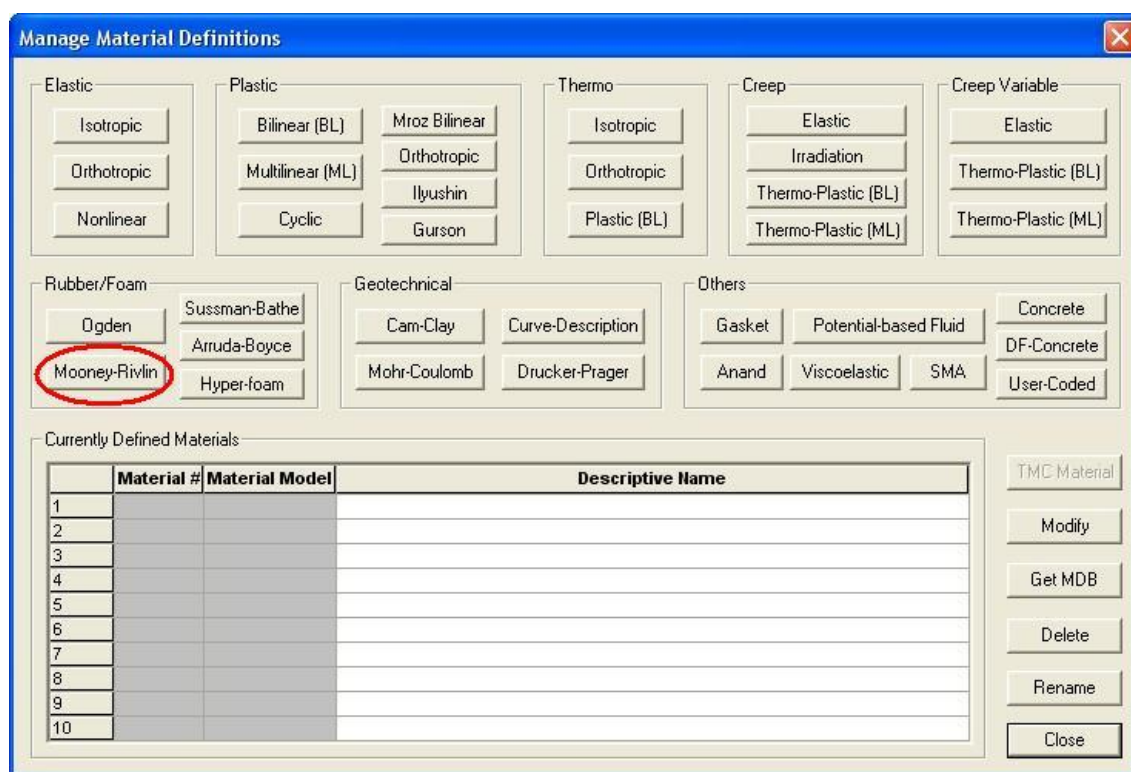
Ahol W_V jelöli a térfogatváltozásból származó, míg W_D a torzulásból származó alakváltozási energiasűrűséget. A W_V -t az alábbi egyszerű formában alkalmazzuk

$$W_V = \frac{1}{2} \kappa (J - 1)^2 \quad (4)$$

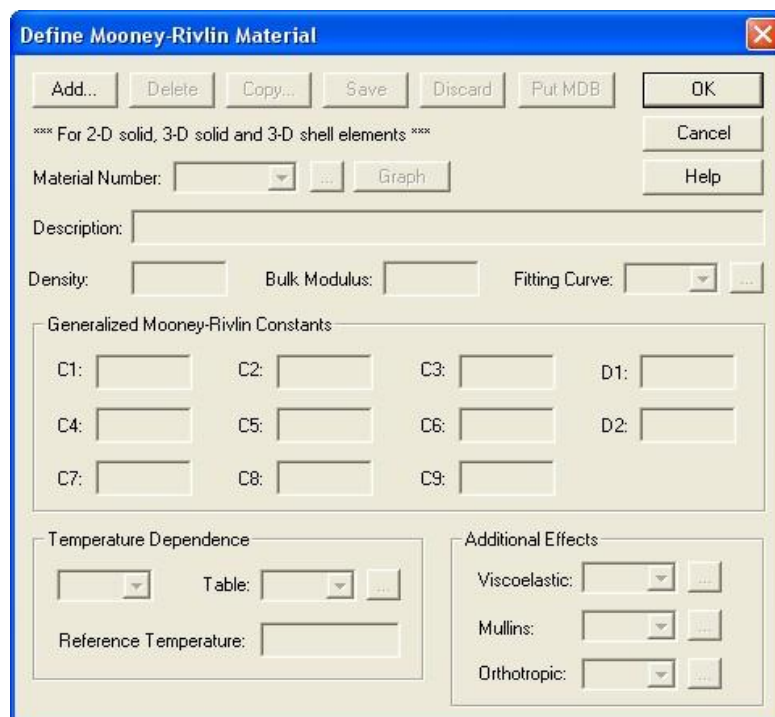
Ahol κ a térfogati rugalmassági (Bulk) modulusz, amely egy valóságos anyagjellemző és a végeselemes vizsgálatokban büntetőparaméterként értelmezhető, a J a térfogatváltozásra utal [13]. Ha összenyomhatatlan anyagot vizsgálunk, akkor $W_V = 0$, mivel a Poisson-tényező $\nu = 0,5$. Megjegyezzük, hogy az iparban alkalmazott gumik a gumikeverék összetevői miatt majdnem összenyomhatatlan anyagnak tekinthetők [14]. Ennek megfelelően a Poisson-tényező $0,49 < \nu < 0,5$ közé esik. Az alakváltozási energiasűrűség torzulásos tagjára számos anyagmodell használatos. Nyomó igénybevételre a Mooney- Rivlin anyagmodellt használjuk, mint anyagtörvény. Mivel a gumi homogén izotróp anyag, így az anyagtörvényt az alakváltozási tenzorok skalár invariánsaival szokás kifejezni. A 9 paraméteres Mooney- Rivlin anyagtörvény így [1] alapján

$$W_{D_{MR}} = C_1(I_I - 3) + C_2(I_{II} - 3) + C_3(I_I - 3)^2 + C_4(I_I - 3)(I_{II} - 3) + \\ C_5(I_{II} - 3)^2 + C_6(I_I - 3)^3 + C_7(I_I - 3)^2(I_{II} - 3) + \\ C_8(I_I - 3)(I_{II} - 3)^2 + C_9(I_{II} - 3)^3 \quad (5)$$

alakban írható fel, ahol I_I és I_{II} az ún. Cauchy- Green alakváltozási tenzor torzulásos tagjának első- és második skalár invariánsa, $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8, C_9$ pedig az ún. Mooney- Rivlin anyagállandók [13]. A 12. ábrán az ADINA anyagmodell típusai láthatók. A 13. ábra mutatja, hogy az általam választott Mooney- Rivlin anyagmodell definiálásához milyen adatokat kell megadni.



12. ábra Az ADINA szoftver anyagmodell adatbázisa



Define Mooney-Rivlin Material

*** For 2-D solid, 3-D solid and 3-D shell elements ***

Material Number:

Description:

Density: Bulk Modulus: Fitting Curve:

Generalized Mooney-Rivlin Constants

C1: C2: C3: D1:

C4: C5: C6: D2:

C7: C8: C9:

Temperature Dependence

Table:

Reference Temperature:

Additional Effects

Viscoelastic:

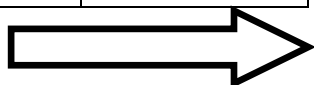
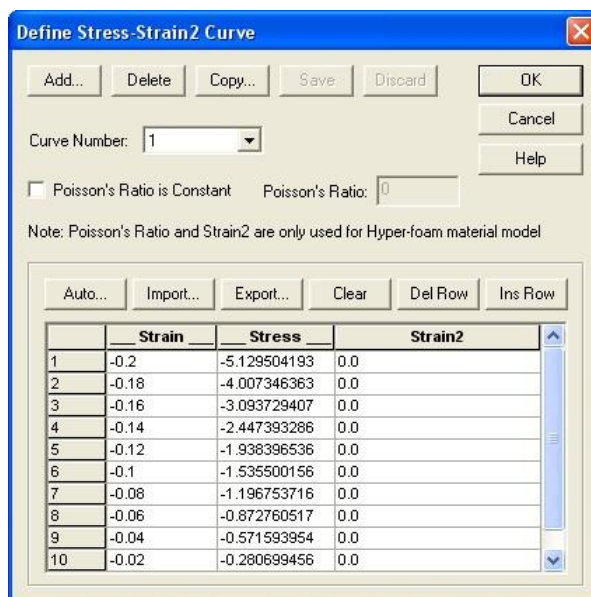
Mullins:

Orthotropic:

13. ábra Mooney- Rivlin anyagállandó meghatározása

A laboratóriumi mérésből meghatározott $\sigma - \varepsilon$ jelleggörbéből (10. ábra) nyert adatok lesznek a bemenő adatok a szoftverbe a végeleemes anyagállandók (9 Mooney-Rivlin anyagállandó és a térfogati rugalmassági modulusz) meghatározásához. Ennek eredménye a 14. ábrán látható.

Strain [%]	Stress [MPa]
0	0
0,02	0,28069946
0,04	0,57159395
0,06	0,87276052
0,08	1,19675372
0,1	1,53550016
0,12	1,93839654
0,14	2,44739329
0,16	3,09372941
0,18	4,00734636
0,2	5,12950419

Define Stress-Strain2 Curve

Curve Number:

☐ Poisson's Ratio is Constant Poisson's Ratio:

Note: Poisson's Ratio and Strain2 are only used for Hyper-foam material model

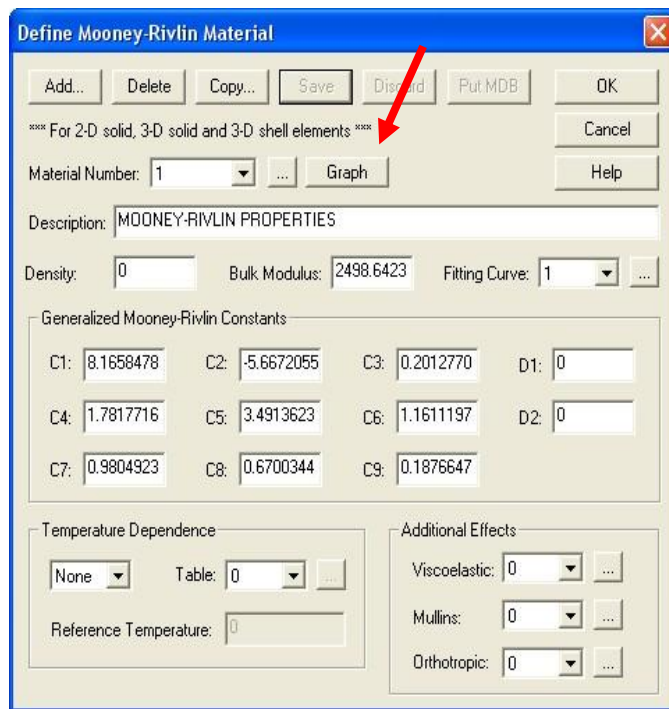
Auto... Import... Export... Clear Del Row Ins Row

	Strain	Stress	Strain2
1	-0.2	-5.129504193	0.0
2	-0.18	-4.007346363	0.0
3	-0.16	-3.093729407	0.0
4	-0.14	-2.447393286	0.0
5	-0.12	-1.938396536	0.0
6	-0.1	-1.535500156	0.0
7	-0.08	-1.196753716	0.0
8	-0.06	-0.872760517	0.0
9	-0.04	-0.571593954	0.0
10	-0.02	-0.280699456	0.0

14. ábra Az anyagtulajdonságok megadása

Az értékeket negatív előjellel vittük be a rendszerbe, mert esetünkben a gumi összenyomásáról van szó, így a megnyúlás valójában megrövidülés.

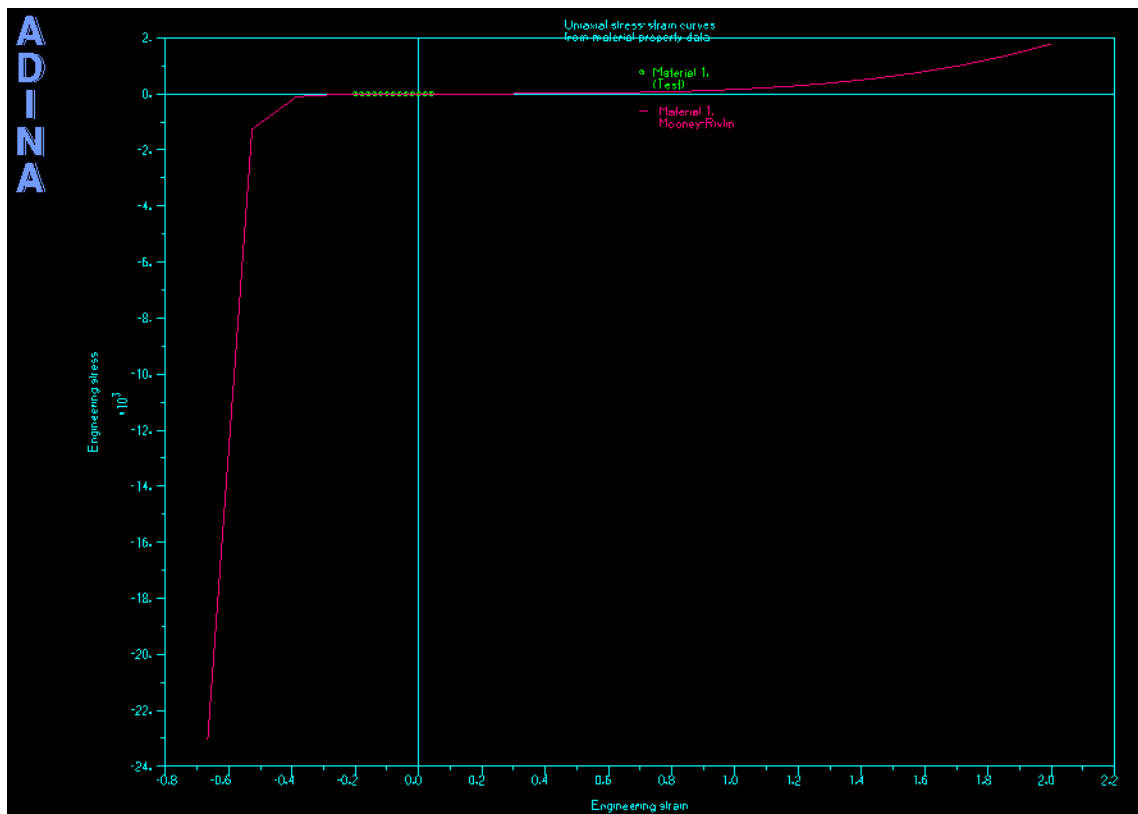
A gumi próbatest egytengelyű nyomóvizsgálat eredményeinek bevitele után az ADINA paraméterillesztéssel meghatározza a Mooney- Rivlin állandókat, valamint a térfogati rugalmassági moduluszt, amely $\kappa = 2498.64 \text{ MPa}$ -ra adódott.



Mooney-Rivlin anyagállandók [MPa]	
C1	8.16584787
C2	-5.667205515
C3	0.201277015
C4	1.78177169
C5	3.491362337
C6	1.161119718
C7	0.980492391
C8	0.67003449
C9	0.187664771
Bulk:	2498.642355

15. ábra ADINA által számított Mooney- Rivlin anyagállandók

A szoftver kirajzolja a gumi jelleggörbét Mooney-Rivlin anyagmodell szerint, ami jó közelítést mutat. Ezt az alábbi 16. ábra szemlélteti.

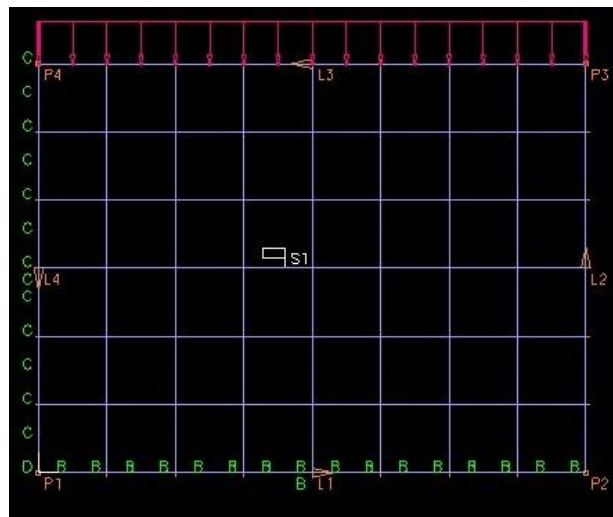


16. ábra A gumi Mooney- Rivlin anyagmodell általi jelleggörbéje

Ezzel definiáltuk a vizsgálat tárgyát képező anyagunkat.

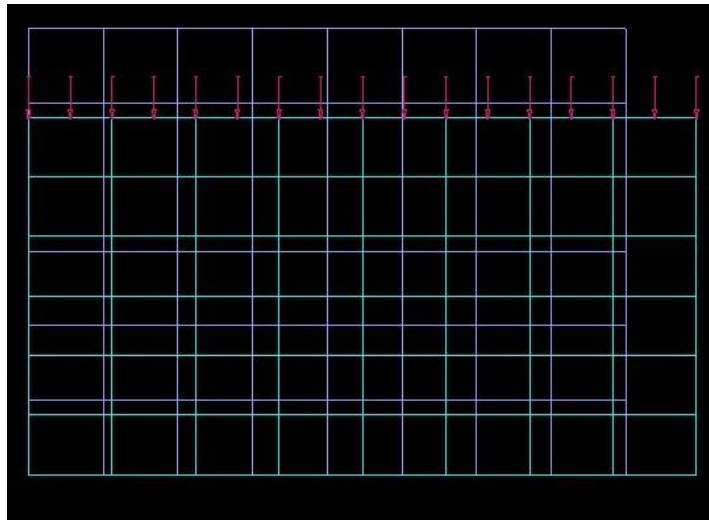
5.3. Kimunkált szabványos próbatestek vizsgálata

A VEM program futtatásához, a modell felépítéséhez első lépésben a geometriát kell megadni, ezután a peremfeltételeket, terhelést, az anyagtulajdonságokat, a hálózást és a kontaktokat kell definiálni a szoftverben a modell felépítéséhez. Az ideális súrlódásmentes érintkezést a modellben érintkezés nélkül hoztuk létre. Ezt a modell elemein megfelelően megadott peremfeltételekkel, azaz a z - irányú elmozdulás gátolásával, míg az y - irányú elmozdulás engedélyezésével tudtuk definiálni. A próbatest tengelyszimmetrikus, így elég a vizsgált alkatrész meridián metszetét megrajzolni, vizsgálni. Mivel a szabványos próbatest és az eredeti gumiütköző geometriája is megfelel a tengelyszimmetrikus ábrázolásmódnak, így a további VEM ábrákon meridián metszetben van ábrázolva a vizsgált próbatest.

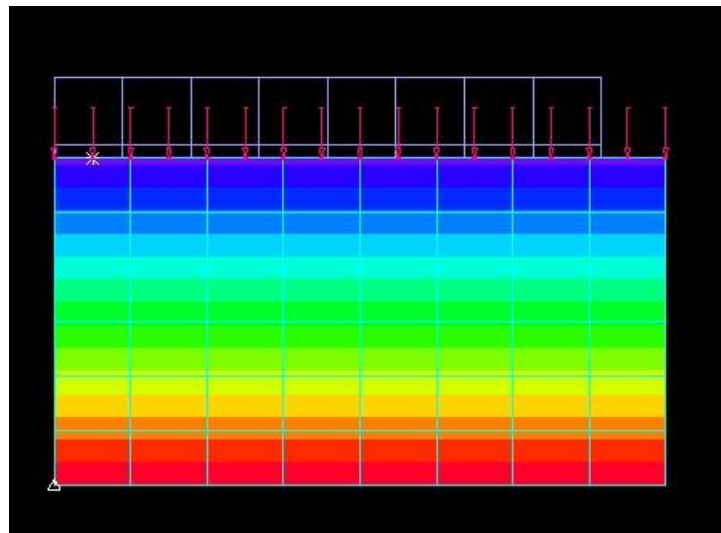


17. ábra A próbatest végeelem modellje

A terhelés a felső élre előírt elmozdulás, melynek mértéke 20%, és a szimuláció látványos futtatásához, illetve az adatok pontos kinyeréséhez 20 lépésben lett terhelve a próbatest. A geometria az yz síkban lett létrehozva, így a peremfeltételek a következő módon lettek megadva: 1-es, alsó élre z - irányú elmozdulást kell gátolni, illetve a 4-es vonal y - irányú elmozdulását a gumi tengelyszimmetrikus ábrázolása miatt.



18. ábra A deformált próbatest és az eredeti geometria

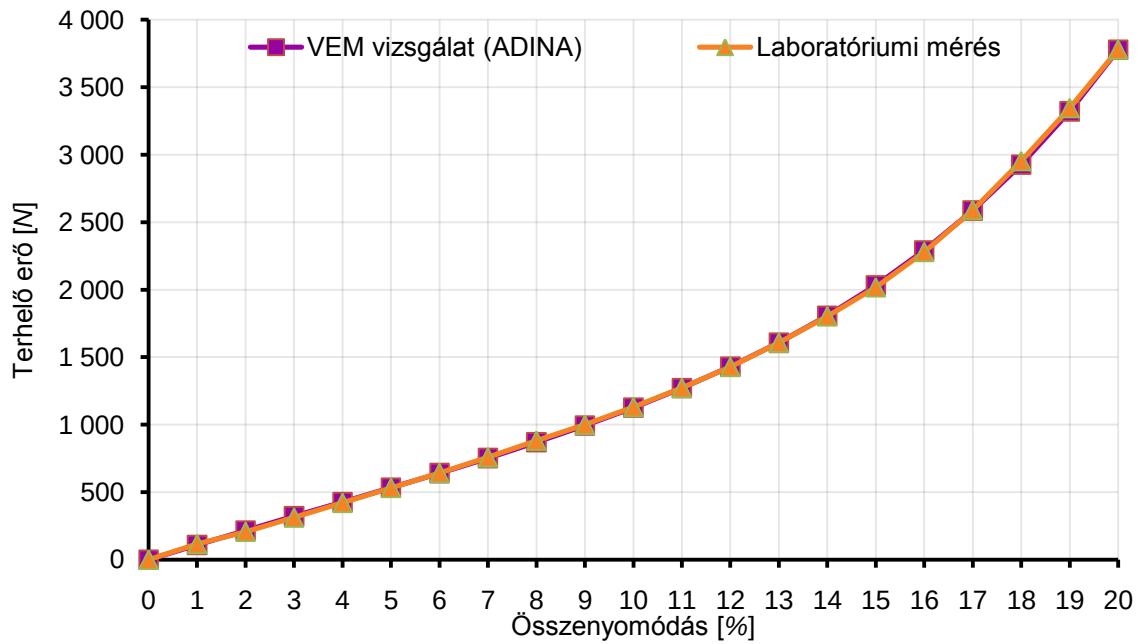


19. ábra Próbatest VEM szimulációja

A 18. ábrán jól látható az eredeti geometria sötétkék színnel, illetve a nyomás hatására, előírt elmozdulásként megadott terhelés és az alakváltozott próbatest hálóját világoskék színnel. Ideális esetet szimulálva súrlódásmentes állapotot feltételezve a gumi alakváltozása közben nem lép fel súrlódás, ez esetben hordósodásmentes a deformáció.

A 19. ábrán a próbatest VEM szimulációjának futása után kinyert eredmények alapján a z – irányú elmozdulás, deformáció mértéke látható különböző színekkel.

A 20. ábrából jól látható, hogy a gumi jelleggörbéje a számított és mért értékek esetén minimális eltérést adnak, tehát a számítások helytállóak.



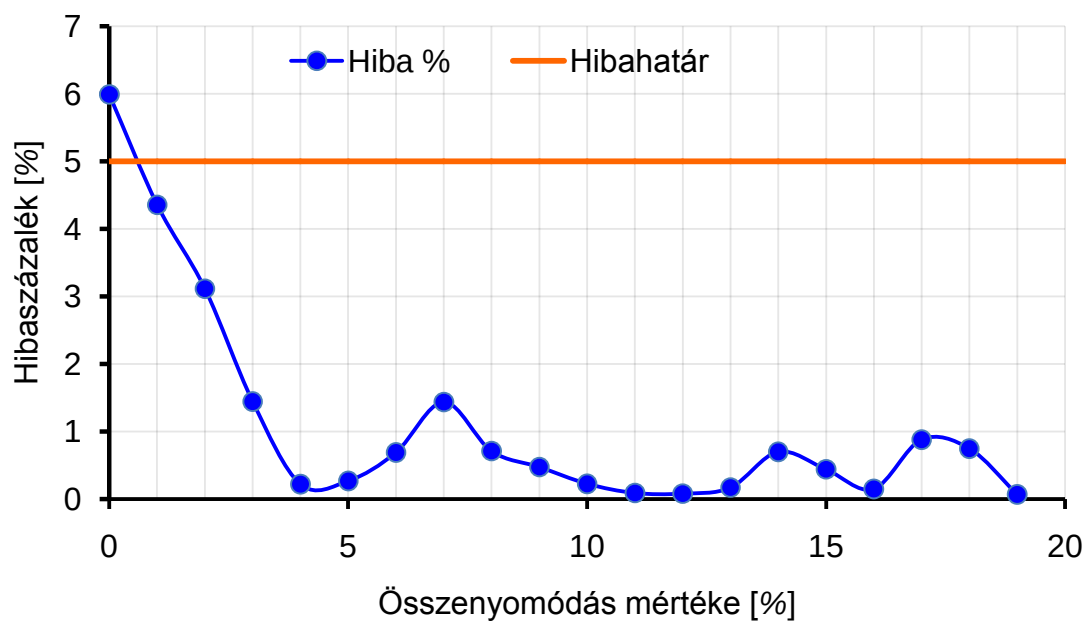
20. ábra Mért és futtatott értékek összehasonlító jelleggörbéi

Az eltérés az alábbi összefüggéssel számítható:

$$H(\%) = \frac{|F_{mért} - F|}{F_{mért}} 100 \quad (6)$$

Ahol $F_{mért}$ a laboratóriumi mérés során kapott nyomóerő értéke, az aktuális összenyomódás mértéknél, amíg F a szimuláció során kinyert pillanatnyi összenyomódáshoz tartozó nyomóerő érték.

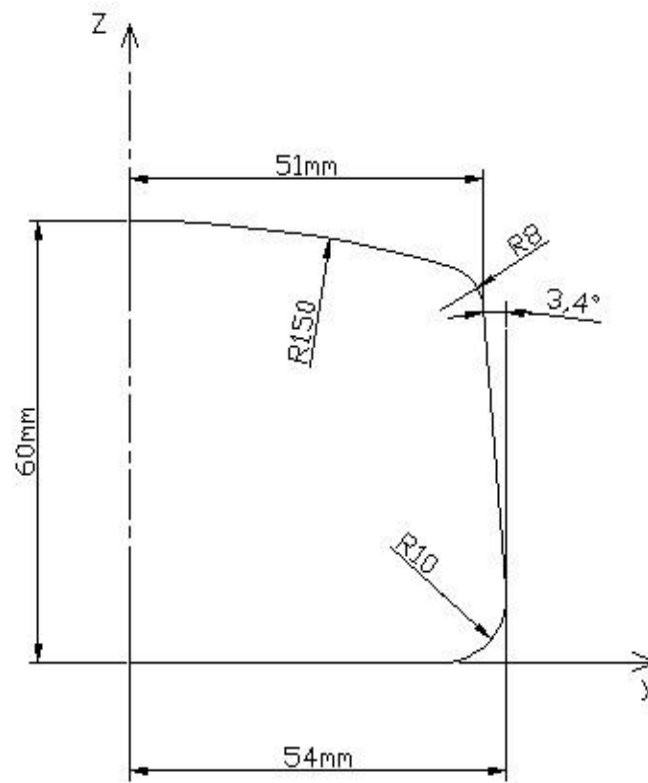
A végeelem szoftver futás után kinyert reakcióerőket összevetve a számított és mért értékekkel az eredmények közti eltérés a 21. ábrán látható.



21. ábra Hiba mértéke az összenyomódás folyamán

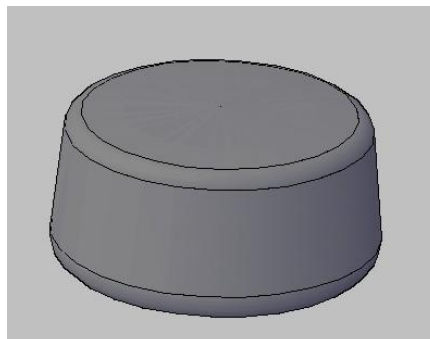
6. GUMIÜTKÖZŐ VÉGESELEM SZIMULÁCIÓJA

A következő 22. ábrán a vizsgált tengelyszimmetrikus gumiütköző méretei láthatóak.



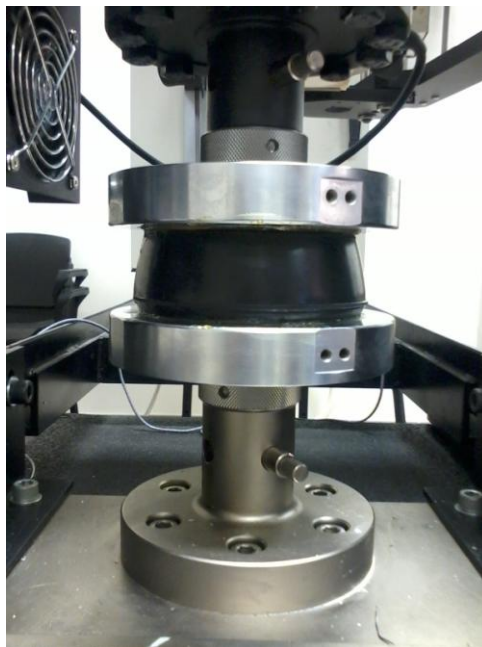
22. ábra Gumiütköző tengelyszimmetrikus képe

A lérugónál alkalmazott gumiütköző bak 3D-s modellje a 23. ábrán látható.

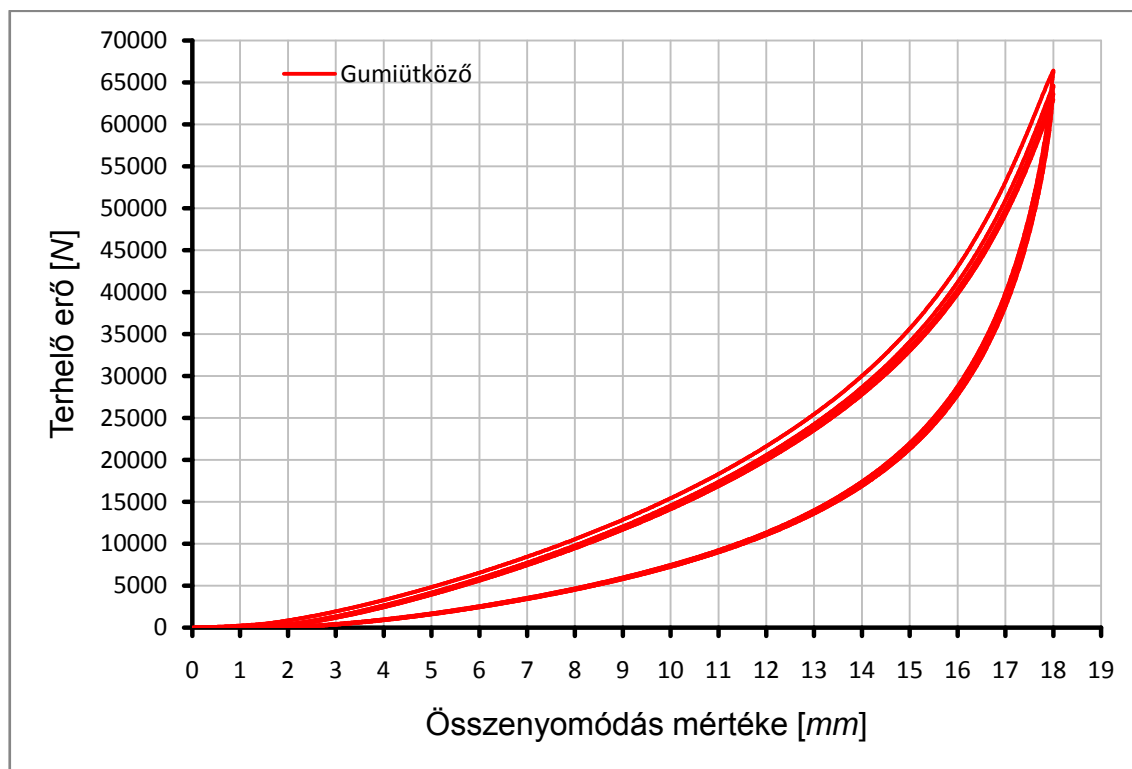


23. ábra Gumiütköző 3D-s ábrázolása

A gumiütközőn szintén elvégeztük a nyomóvizsgálatot, ideális körülményeket (súrlódásmentességet) biztosítva. A vizsgálat által kapott jelleggörbét az 25. ábra mutatja.

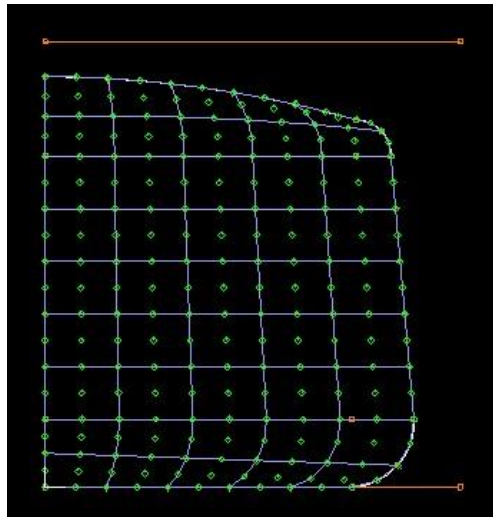


24. ábra Gumiütköző nyomóvizsgálata



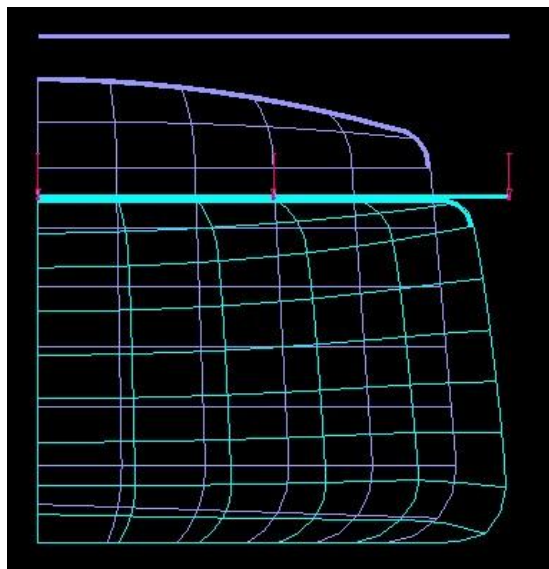
25. ábra Gumiütköző rugókarakterisztikája a laboratóriumi mérés alapján

A diagramból jól látható, hogy a gumibak nyomóvizsgálata által kinyert adatokból előállított rugó karakterisztika nem mutat plusz összenyomódást, így a gumibak végterhelés görbéjének előállításához nem szükséges korrekció. Továbbá a görbék a próbatestek jelleggörbéivel megegyező progresszív jelleget mutatnak, tehát a gumi rugalmassága nem tér el kisebb próbatestek esetében az eredeti munkadarabhoz képest.

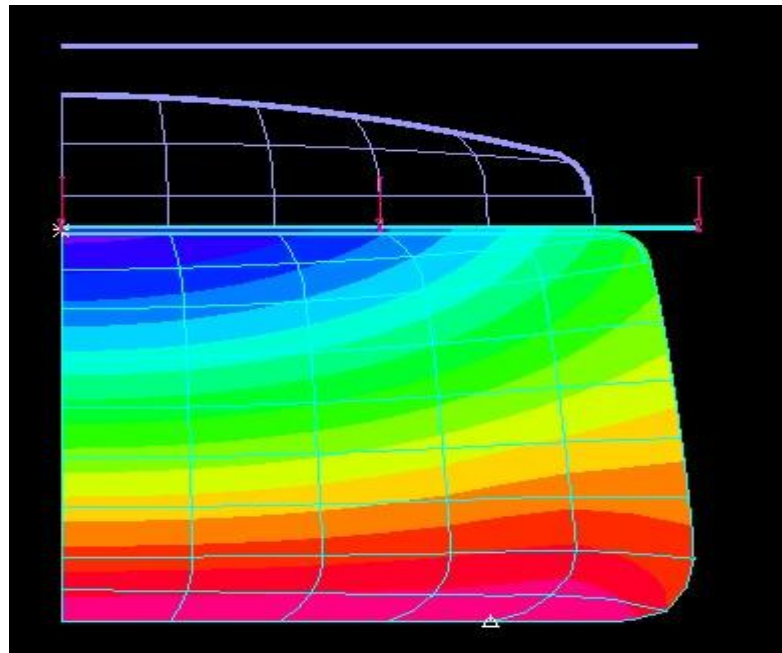


26. ábra Gumiütköző hálózása 9 csomópontú elemekkel

A 26-os ábrán látható, hogy a gumibak meridián metszetét egyetlen zárt felületként definiáltuk, amit az ADINA 9 csomópontú négyszög elemekre osztott fel, ezáltal még pontosabb eredményeket biztosítva.

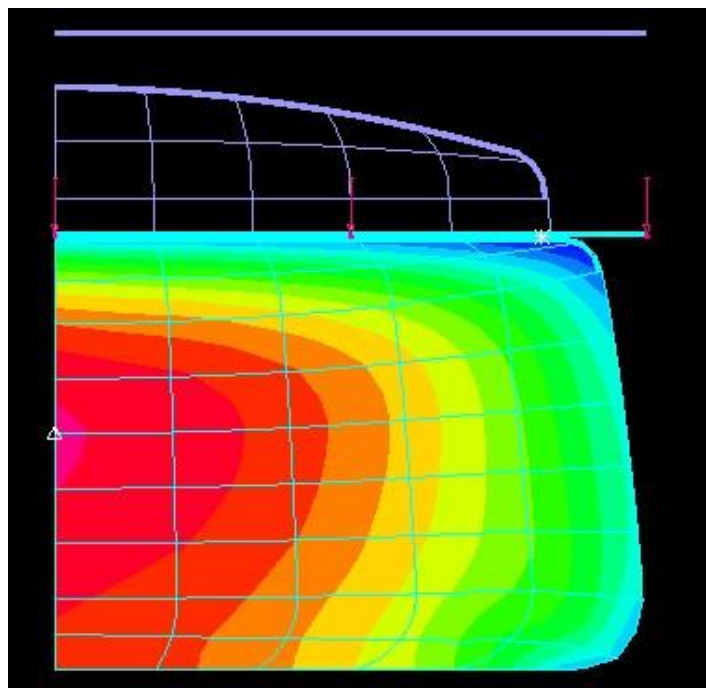


27. ábra A deformált gumiütköző és a kiinduló geometria



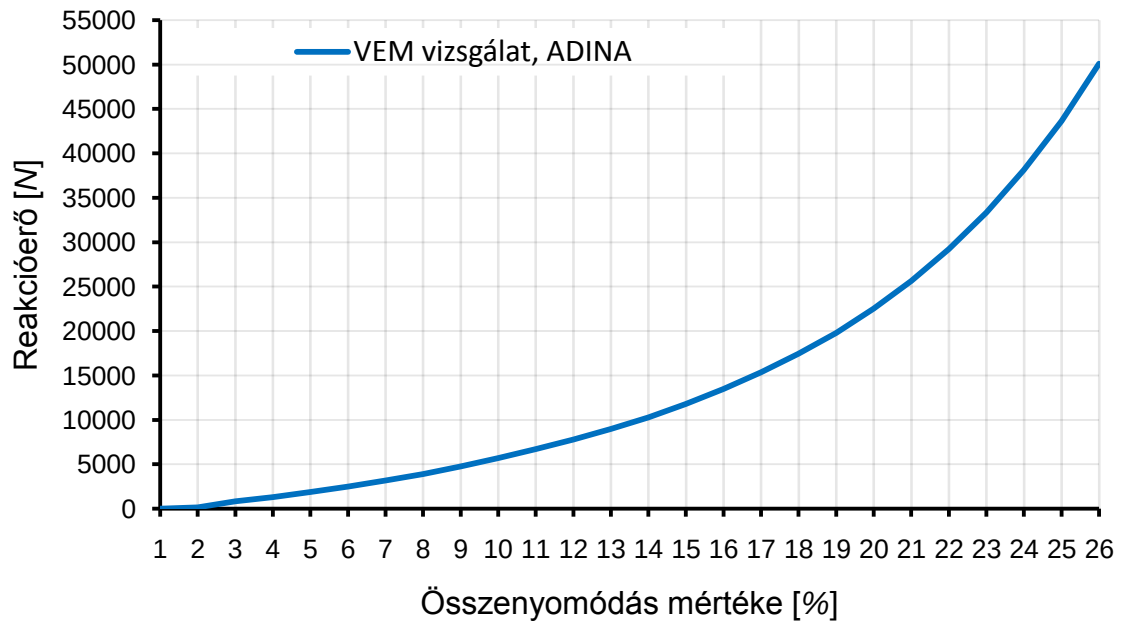
28. ábra Gumiütköző VEM szimulációja

A 28. ábrán a gumiütköző VEM futtatása során kinyert eredmények alapján a z – irányú elmozdulás mértéke látható, melynek értékeit az ADINA definiálja, és az eredmények kiolvashatóak.



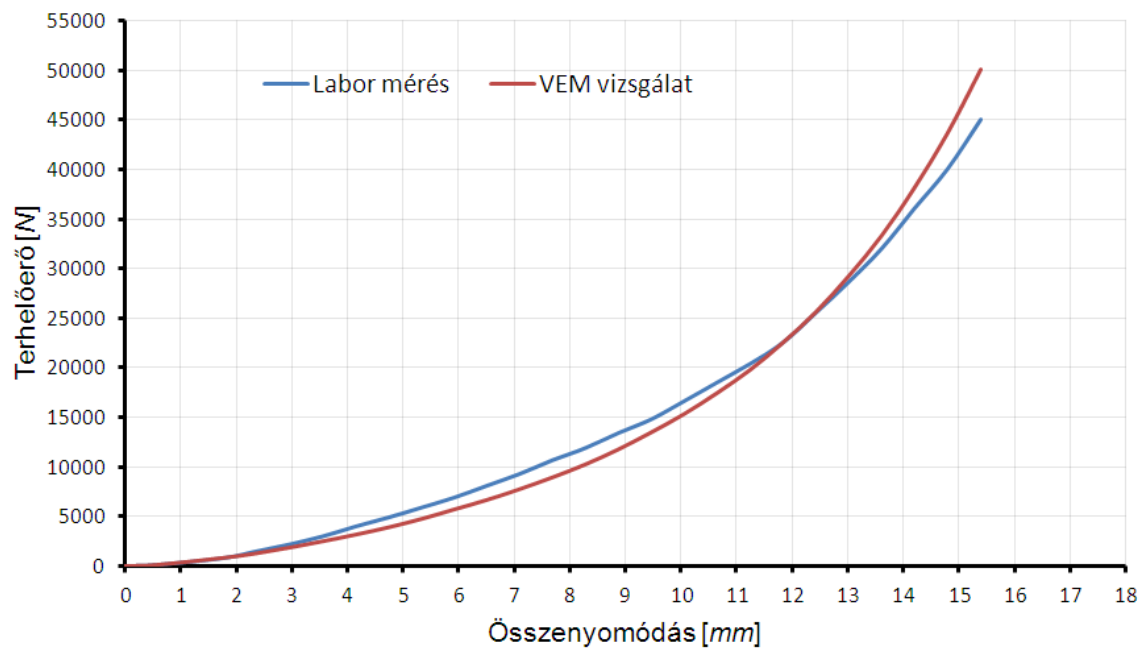
29. ábra- Deformáció mértéke az alakváltozott gumiütközőn

A 29. ábra a végeselemes szimuláció után kapott deformált gumiütköző deformációs gradiensének mértékét mutatja. Jól látható, hogy az elsődleges deformációt a gumi külső felülete mentén szenved el a test, majd befelé haladva egyre kisebb a deformációs gradiens mértéke. Illetve az ideális súrlódási feltételek biztosítása által hordósodás sem tapasztalható.



30. ábra Gumiütköző rugókarakterisztikája VEM szimuláció alapján

A 30. ábrán a gumiütköző rugókarakterisztikája látható a VEM szimuláció során kinyert adatokból, melyen szintén tapasztalható a gumi anyagunk progresszív karakterisztikája, ami előnyösen kihasználható gépjárművek rugózásához, lengéscsillapításra és számos más terület eszközeként.



31. ábra Gumiütköző mért és futtatott értékeinek összehasonlítása

A fenti ábra azt mutatja, hogy a gumiütköző vizsgálata során is megállapítottuk, hogy a végeselemes szimuláció és a nyomóvizsgálat eredményeiből kinyert jelleggörbékből azonos terhelőerő esetén közel megegyező nagyságú az összenyomódás mértéke.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Egy iparban alkalmazott gumiütközőből kimunkált próbatestekre bemutattuk az ISO 7743 szabvány által előírt próbatest vizsgálati eljárását, amellyel előállítható a végeselemes anyagállandók meghatározásához szükséges gumi jelleggörbe. Bizonyításra került, hogy a gumik rugalmassági modulusza az alakváltozás függvényében változik, ezért is hívják azt látszólagos rugalmassági modulusznak.

A mérési és kiértékelési tapasztalatok azt mutatták, hogy a mérési eredményeket korrigálni kell, mert a gumik kb. 5-10% deformációig lineáris viselkedést mutatnak. A próbatestek eltérő karakterisztikáit a mérési hibák mellett az magyarázhatja, hogy nem mindegy, hogy honnan vesszük ki a próbatestet az alkatrészből. Ennek vizsgálata a későbbiekben szükséges, amely arra vonatkozik, hogy a térhálósodás vajon homogén-e a vulkanizálás hatására.

A próbatestek jelleggörbéiből kerültek meghatározásra a gumi numerikus anyagállandói, amelyek a végeselemes vizsgálathoz szükségesek. A laboratóriumi mérés és a végeselemes vizsgálat eredményei nagyon jó egyezést mutattak. Ez bizonyítja azt, hogy az ISO szabvány előírásait megfelelően követve kinyerhetőek a szimulációhoz szükséges anyagállandók.

A kapott anyagállandókat alkalmazva a vizsgált gumiütköző is analizálásra került, melynek eredménye szintén összehasonlításra került a hozzá tartozó méréssel.

A vizsgálatokból kiderült, hogy a próbatesten végzett labormérés segítségével előállított anyagállandók megfelelőek hasonló igénybevételt szenvedő bonyolult geometria vizsgálatához is.

8. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] **MAKHULT, M.:** Gumirugók, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1963.
- [2] **MANKOVITS, T.:** Gumialkatrészek alakoptimalizálása, PhD Értekezés, 2013.
- [3] **ISO 7743,** Rubber, vulcanized or thermoplastic- Determination of compression stress- strain properties, 2008.
- [4] **SCHEL, T.:** A gumi története, Chemonet {online}, <http://chemonet.hu/hun/tudakozo/kokel/gumi.html>
- [5] **DR BARTHA, Z.:** Gumiipari kézikönyv I., Taurus- OMIKK, Budapest 1988.
- [6] **MANKOVITS, T. SZABÓ. T.:** Finite Element Analysis of Rubber Bumper Used in Air- springs, Procedia Engineering, MMS, 2012., pp.388- 396.
- [7] **OGDEN, R.W.:** Nonlinear Elasticity with Application to Material Modeling, AMAS Lecture Notes, 2003.
- [8] **OGDEN, R.W., SACCOMANDI, G., SGURA, I.:** Fitting Hyperelastic Models to Experimental Data, Computational Mechanics, Volume 34(6), 2004., pp. 484-502.
- [9] **W. B. SHANGGUAN, Z. H. LU.:** Experimentel Study and simulation of a Hydraulic Engine Mount with Fully Coupled Fluid Structure Interaction Finite Element Analysis Model, Computers & Structures, 82(22):1751- 1771, 2004.
- [10] **JACSÓ, N. MANKOVITS, T. KÁLLAI, I. HURI, D. KOCSIS, I. BALOGH, G.:** Gumi próbatest laboratóriumi mérése és kiértékelése nyomó igénybevételre, Debreceni Műszaki Közlemények, 2013/1., pp. 89-97.
- [11] **SZABÓ, G. MANKOVITS, T.:** Gumialkatrész Shore – féle keménységének kiértékelése az anyagvizsgálatok statisztikai módszerével, Debreceni Műszaki Közlemények, Volume 9(1), 2010., pp. 52-63
- [12] **TISZA, M.:** Anyagvizsgálat, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc 2005.
- [13] **GÁL, I., KÓRÓDY, L.:** Anyagismeret és technológia III., Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest 1983.
- [14] **MANKOVITS, T. SZABÓ, T.:** Nemlineáris VEM program gyakorlati alkalmazása gumialkatrészekre, Multidiszciplináris Tudományok, 2. Kötet (2012), p 103-114.

Lezárás dátuma: 2014.05.02.