

INTEGRÁLT ADATKEZELŐ ÉS ANYAGMODELL-ILLESZTŐ RENDSZER GUMIK MECHANIKAI VIZSGÁLATÁHOZ

INTEGRATED DATA MANAGEMENT AND MATERIAL MODEL FITTING SYSTEM FOR MECHANICAL TESTING OF RUBBERS

Varga Tamás Antal*, Dr. Fazekas Bálint**, Dr. Mankovits Tamás***

ABSZTRAKT

A gumianyagok pontos anyagkarakterizálásához többféle kvázistatikus és dinamikus vizsgálat szükséges, amelyek jelentős mennyiségű mérési adatot eredményeznek. A Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszékén rendelkezésre áll a mérések elvégzéséhez szükséges laboratóriumi infrastruktúra és a megfelelő szaktudás. A nagyszámú mérési adat egységes feldolgozására kifejlesztettünk egy ún. Rubber Material Lab szoftvert, amely a mérési adatokat egy Instron anyagvizsgálógépből és egy Metravib DMA berendezésből standardizált formában importálja és kezeli. A szoftver lehetőséget biztosít a mérési adatok szerkesztésére, diagramon történő megjelenítésére és összehasonlítására, továbbá hiperelasztikus anyagmodellek illesztésére. Az illesztett modellparaméterek az Abaqus és az Ansys végeselemes szoftverekkel kompatibilis formátumban közvetlenül exportálhatók.

ABSTRACT

For accurate material characterization of rubber materials, various quasi-static and dynamic tests are required, generating a substantial amount of measurement data. The laboratory infrastructure and research expertise required to perform these tests are available at the Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen. To enable standardized processing of the large volume of measurement data, the Rubber Material Lab software was developed to import and manage Instron and DMA measurement data in a standardized format. The software enables measurement data to be edited, plotted, and compared, and also supports the fitting of hyperelastic material models. The fitted model parameters can be exported directly in Abaqus- and Ansys-compatible formats.

1. BEVEZETÉS

A gumialkatrészek mechanikai viselkedésének leírása és megfelelő anyagmodelljének meghatározása összetett feladat. A gumik nagy alakváltozásra képesek, mechanikai viselkedésük függhet a hőmérséklettől és a terhelési sebességtől, töltött gumikeverékek esetén pedig ciklikus terhelés hatására amplitúdófüggő lágyulás, az úgynevezett Payne-effektus is jelentkezhet. A nagy alakváltozás rugalmas viselkedésének leírására számos hiperelasztikus anyagmodell létezik, többek között a Mooney–Rivlin-, Ogden-, Yeoh- és Arruda–Boyce-modellek [1–7]. A viszkoelasztikus viselkedés, valamint a Mullins- és Payne-hatás leírásához további anyagtörvények alkalmazása szükséges [8–12]. Az ezekhez szükséges nagyszámú mérési adathalmaz feldolgozása jelentős időráfordítást igényel, különösen akkor, ha az adatok különböző forrásokból és formátumokban állnak rendelkezésre.

Gumik karakterizálása során jellemzően több terhelési esetben, több hőmérsékleten és különböző terhelési sebességeken végzünk vizsgálatokat, minden mérési esethez több próbatestet alkalmazva. A nyomóvizsgálatok eredményét az érintkező felületek kenési állapota is befolyásolhatja, ezért indokolt több peremfeltétel vizsgálata. A viszkoelasztikus tulajdonságok meghatározásához akár többrészes relaxációs mérésekre is szükség lehet. A frekvenciafüggő merevség vizsgálatához DMA (Dinamikus Mechanikai Analízis) méréseket szokás végezni. Mivel a mérési adatok több berendezésből és különböző exportformátumokban származhatnak, a feldolgozás során az eltérő adatszerkezetek és a ciklikus mérések automatikus felismerése is szükségessé válhat.

Ezen mérési adatok feldolgozására hoztuk létre a Rubber Material Lab névre hallgató szoftvert, amely segíti ezen adatok feldolgozását. A munkafolyamat során nem új anyagtörvényeket hozunk létre, hanem egyetlen felületen tudjuk elvégezni az adatok importálását,

* óráadó, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék varga.tamas@eng.unideb.hu

PhD hallgató, Debreceni Egyetem Pékar Imre Gépészeti Tudományok Doktori Iskola.

szimulációs mérnök, Robert Bosch Kft.

** adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Gép- és Terméktervezés Tanszék fazekas.balint@gt3.bme.hu

szimulációs mérnök, Robert Bosch Kft.

*** egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, tamas.mankovits@eng.unideb.hu

ellenőrzését, feldolgozását, összehasonlítását és végül az anyagmodell illesztését is, amelyet különböző végelemek szoftverekbe is képesek vagyunk exportálni anyagkártyaként. Ezen program célja az gumi anyagkártyájának előállításának automatizálása, illetve a mérési eredmények könnyebb utókövetése és egysítése.

2. KUTATÁSI ÉS LABORATÓRIUMI HÁTTÉR

2.1. Gumimechanikai kutatások a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszékén

A gumik végeselemes modellezése több mint egy évtizede van jelen a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszékének a mindennapjaiban. Mankovits Tamás és szerzőtársai elsőként gumiütközők végeselemes viselkedését vizsgálták, majd ezt követően tengelyszimmetrikus gumialkatrészek alakoptimalizálásával foglalkoztak [13-14]. Ezt követően Huri Dávid hiperelasztikus anyagmodelleket hasonlított össze. Ezen kívül válaszfelület-módszert alkalmazott autópári gumitermékek tervezésére, valamint elemezte a modellek pontosságát nyomóigénybevételre [15-17]. Ezek az eredmények rámutattak arra, hogy az alkalmazott anyagmodell és a bemeneti anyagadatok minősége jelentősen befolyásolhatja az optimalizálás megbízhatóságát. 2025-ös évben kezdte meg doktori tanulmányait Varga Tamás Antal, aki kormányművekben alkalmazott gumialkatrészek végeselemes vizsgálatával és optimalizációjával foglalkozik. A doktori kutatáshoz Fazekas Bálint ipari szakértőként kapcsolódott. Korábbi, Goda Tiborral közös munkájában olyan konstitutív modellezési keretet dolgoztak ki, amely a Mullins-hatást, a maradó alakváltozást és az idő-hőmérséklet-függő viselkedést egységesen kezeli [18].

2.2. Laboratóriumi infrastruktúra

A Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszék Műanyag- és Gumi Anyagvizsgáló Laboratóriuma (1. ábra) biztosítja a gumik karakterizálásához szükséges infrastruktúra jelentős részét. A laboratóriumban megtalálható egy Instron 68TM-10 univerzális anyagvizsgáló gép a hozzá illeszthető hőkamrával, nitrogén tárolótartállyal, egy érintésmentes videoextenzométer, egy GOM Aramis optikai nyúlásmérő, valamint egy Shore keménységmérő berendezés is. Rendelkezésre áll továbbá egy ISO 37 szabványnak megfelelő próbatest stancoló berendezés is [22]. A laboratórium úgy került felszerelésre, hogy a gumi anyagok vizsgálata mellett lehetőség legyen műanyagok vizsgálatára is. Ezen laboratórium folyamatos mérési szolgáltatásokat nyújt a régiós termelővállalatoknak.



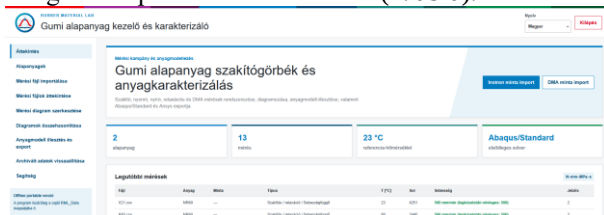
1. ábra. A Debreceni Egyetem Műanyag- és Gumi Anyagvizsgáló Laboratóriuma [21].

Ezen kívül a Debreceni Egyetem Kémia Intézetében elérhető egy Metravib DMA berendezés is, amellyel meghatározható a gumik dinamikai viselkedése is [19-20].

3. RUBBER MATERIAL LAB SZOFTVER FELÉPÍTÉSE ÉS MŰKÖDÉSE

3.1. Szoftver felépítése

A Rubber Material Lab telepítést nem igénylő, helyben futtatható Windows-alkalmazás, amely böngészőalapú felületen kezelhető (2. ábra).



2. ábra. Rubber Material Lab szoftver kezelőfelülete

A szoftver a háttérben kezeli az importált fájlokat, a projektadatbázist és a számításokat, magyar és angol nyelven, internetkapcsolat nélkül is használható. A projektmappa elkülönítve tárolja a nyers és feldolgozott adatokat, az exportokat, az archívumokat és a biztonsági mentéseket. Minden importált forrásfájl változatlan formában megőrződik, és SHA-256-ellenőrzőösszeget kap. A munkafolyamat az alapanyag definiálásával és a hozzá tartozó mérési adatok importálásával kezdődik. Az adatok feldolgozását és összehasonlítását követően hiperelasztikus anyagmodell illeszthető a kiválasztott mérési görbékre, majd a kapott paraméterek Abaqus- és Ansys-kompatibilis formátumban exportálhatók. Ezen logikai felépítés a 3. ábrán látható.



3. ábra. Rubber Material Lab szoftver felépítése

3.2. Alapanyagok definiálása

Az alapanyagok definiálása menüpontban lehetőség nyílik többféle alapanyag definiálásra, amelyhez lehetőség van hozzárendelni az alapanyag kódját, megnevezését, gyártási tételét és a mérést végző személy nevét. Amennyiben valamelyik alapanyagra nincs szükségünk azt archiválni is lehet, amely egy külön menüpontban visszaállítható a későbbiekben.

3.3. Mérési fájlok importálása

A mérési fájlok importálása során lehetőség van az Instron és a Metravib anyagvizsgáló gépekből exportált .csv fájlok beolvasására. Az Instron berendezésből exportált fájlok esetében az első sor a mért mennyiségek megnevezését, a második sor pedig a hozzájuk tartozó mértékegységeket tartalmazza. A szoftver ezt a struktúrát automatikusan felismeri, és a beolvasott adatokat ennek megfelelően kezeli. A menüben a mérési adathoz hozzá tudjuk rendelni az alapanyagot, a vizsgálat típusát (húzó, nyomó, nyíró, DMA), a mérési módot, a mérés dátumát, a mérést végző személy nevét, a próbatest sorszámát és a vizsgálati hőmérsékletet is. Ezen kívül itt manuálisan is megadható a próbatestünk keresztmetszete, ahol a nyúlást mérjük, illetve a videoextenzométeres méréshez használt pontoknak a távolsága. Ezek általában az Instron gépben is megadásra kerülhetnek, amelyet a szoftver szintén felismer és a későbbiekben összehasonlítható lesz. A mérési sebességet a szoftver automatikusan felismeri.

3.4. Mérési fájlok áttekintése

Ebben a menüpontban lehetőségünk nyílik az importált adatok áttekintésére és azoknak esetleges archiválására. Itt feltüntetésre kerül a beolvasott fájl neve, az alapanyag megnevezése, a mérés dátuma, a mérést végző személy neve, a mérés típusa, a vizsgálati hőmérséklet, a mérési sebesség, valamint az is, hogy a mérési adatunk hány sorból áll.

3.5. Mérési diagram szerkesztése

A mérési diagram szerkesztése fülénél lehetőségünk nyílik a mérési adatokat megtekinteni diagram formájában, ahol lenyíló menü alapján lehetőségünk van kiválasztani, hogy a diagram függőleges és vízszintes tengelyén milyen adatokat kívánunk megjeleníteni. Gumik mérésénél több alkalommal előfordul, hogy a próbatestünk elszakad, ezeket az adatokat itt levághatjuk manuálisan, vagy használhatjuk a szoftver által felismert szakadási értékeket is. Ezen kívül itt közelítő függvényeket (lineáris, polinomok, hatványfüggvények, logaritmikus és exponenciális függvény) is illeszthetünk a görbékre. Az illesztett függvények a diagramon is megjelennek, és az illesztéshez tartozó számszerű paraméterek is megjelenítésre kerülnek. A feldolgozott görbék elmentésre kerülnek, amelyekhez elnevezés is rendelhető.

3.6. Diagramok összehasonlítása

Ezen menüpontban az eredeti és a feldolgozott görbéket is össze lehet hasonlítani egymással, amelyekre szintén közelítő görbék illeszthetők. Itt is kiválasztható, hogy a vízszintes és a függőleges tengelyen milyen értékek kerüljenek megjelenítésre.

3.7. Anyagmodell illesztés és export

Az anyagmodell illesztés és export menüpontban lehetőség nyílik a korábban meghatározott görbéket kiválasztani és azokra anyagmodellt illeszteni. Az illesztőmodul Neo-Hooke-, két- és ötparaméteres Mooney-Rivlin-, Yeoh (egy-három paraméteres)-, Ogden (egy-három paraméteres)- és Arruda-Boyce-modelleket kezel. Ezek a modellek ma is széles körben használatosak, mert más-más kompromisszumot kínálnak az egyszerűség, a rugalmasság és az extrapoláció között [1-7]. A szoftver használata során ki kell választanunk pontosan, hogy melyik anyagmodellre kívánunk illeszteni.

A hyperelasztikus anyagmodellek paramétereinek meghatározása görbénként normalizált, kiegyensúlyozott legkisebb négyzetes célfüggvény minimalizálásával történik, ez megakadályozza, hogy az eltérő mintavételi sűrűségű mérési görbék aránytalanul befolyásolják a végeredményt. A nemlineáris optimumkeresés több kezdőpontból indított, deriváltmentes Nelder-Mead simplex algoritmussal történik, amelyet a kapott

paraméterkészlet fizikai érvényességének ellenőrzése követ.

Az illesztést követően jelentést kapunk az illesztett görbék SSE- (Sum of Squared Errors), RMSE- (Root Mean Square Error), SEE- (Standard Error of the Estimate) és R^2 -mutatóiról, valamint a az egyes görbék illesztési hibáit is meghatározza és megjeleníti. Különböző jeltartományú görbék összevetéséhez szórással korrigált célfüggvények is választhatók.

A program ellenőrzi a kezdeti nyírási modulust, a feszültség- és energiaértékek végességét, a feszültség előjelét és a tangensviselkedést az illesztett tartományban. Ez nem teljes matematikai stabilitási bizonyítás, de kiszűri a nyilvánvalóan hibás paraméterkészleteket.

Az anyagmodell illesztését követően az adott anyagmodellekhez tartozó értékek megjelenítésre kerülnek, amelyeket a végelelem szoftver használ. Ezt követően lehetőség nyílik továbbá az Abaqus szoftverben használt .inp fájl kimentésére és az Ansysnál használt APDL formátum exportálására. Ezen fájlokat az említett két szoftverbe könnyen importálhatók és így az adatokat sem szükséges manuálisan beírni.

3.8. Archiválás és segítség menüpont

Az utolsó két menüpontban lehetőségünk van a korábban archivált adatok visszaállítására, illetve a segítség menüpontban megtaláljuk a szoftver készítőjének nevét, illetve az adott verziótörténetet is a szoftverről, hogy az újabb verziókban mi került bevezetésre.

4. JÖVŐBELI TERVEK

A jövőben a szoftvert ki kívánjuk bővíteni GOM Aramis mérési eredmények beolvasásával is, amellyel pontosabban meghatározhatóak a nyúlásértékek és a Poisson-tényező is. További fejlesztési irány az anyagmodell illesztése a viszkoelasztikus viselkedést leíró Prony-sorral, valamint annak bővítése a Mullins- és Payne-hatás paraméterezésével. A végső célunk pedig még az is lenne, hogy az adott anyagkártyákhoz végelelemes szimulációt is készítsünk, amelyet a szoftverrel validálni is tudunk majd.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszéke az elmúlt évtizedben nagy hangsúlyt fektetett a műanyag és gumiipari kutatásokba. Ezt jól igazolja, hogy a tanszéken több kolléga is foglalkozik ilyen jellegű kutatással, amelynek egy jó bázisa a Műanyag- és Gumi Anyagvizsgáló Laboratórium. Ez laboratórium remekül kiszolgálja a tudományos és ipari igényeket is.

A fejlesztett Rubber Material Lab legfontosabb előnye, hogy egységes és reprodukálható munkafolyamatot biztosít a gumianyagok karakterizálása során keletkező nagy mennyiségű mérési adat feldolgozására. A szoftver

támogatja az adatok szerkesztését, összehasonlítását és archiválását, továbbá lehetővé teszi hiperelasztikus anyagmodellek illesztését és az illesztés minőségének számszerű értékelését. Az azonosított anyagmodell-paraméterek Abaqus és Ansys végelelemes környezetben közvetlenül felhasználhatók. A kialakított munkafolyamat csökkenti a manuális adatfeldolgozás igényét, valamint elősegíti a mérési eredmények következetes, reprodukálható kezelését.

6. SUMMARY

The Department of Mechanical Engineering at the Faculty of Engineering, University of Debrecen, has placed considerable emphasis on research into plastic and rubber products over the past decade. This is demonstrated by the fact that several researchers at the department are actively involved in this field, with the Plastics and Rubber Materials Testing Laboratory providing a strong foundation for these activities. The laboratory effectively supports both scientific research and industrial needs.

The main advantage of the developed Rubber Material Lab software is that it provides a standardized and reproducible workflow for processing the large amount of measurement data generated during the characterization of rubber materials. The software supports the editing, comparison, and archiving of measurement data and enables the fitting of hyperelastic material models as well as the quantitative evaluation of fitting quality. The identified material model parameters can be directly used in Abaqus and Ansys finite element environments. The developed workflow reduces the need for manual data processing and facilitates the consistent and reproducible handling of measurement results.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

„A Kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-KDP-2025 kódszámú Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program – Kooperatív Doktori Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.”



8. IRODALOM

- [1] MOONEY, M.: *A Theory of Large Elastic Deformation*, Journal of Applied Physics, 11(9), 582-592, 1940. <https://doi.org/10.1063/1.1712836>
- [2] RIVLIN, R. S.: *Large Elastic Deformations of Isotropic Materials*, I. Fundamental Concepts. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 240(822), 459-490, 1948. <https://doi.org/10.1098/rsta.1948.0002>

[3] OGDEN, R. W.: *Large Deformation Isotropic Elasticity - On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids*, Proceedings of the Royal Society A, 326(1567), 565-584, 1972. <https://doi.org/10.1098/rspa.1972.0026>

[4] YEOH, O. H.: *Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber*, Rubber Chemistry and Technology, 66(5), 754-771, 1993. <https://doi.org/10.5254/1.3538343>

[5] ARRUDA, E. M.; BOYCE, M. C.: *A Three-Dimensional Constitutive Model for the Large Stretch Behavior of Rubber Elastic Materials*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 41(2), 389-412, 1993. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(93\)90013-6](https://doi.org/10.1016/0022-5096(93)90013-6)

[6] MARCKMANN, G.; VERRON, E.: *Comparison of Hyperelastic Models for Rubber-Like Materials*, Rubber Chemistry and Technology, 79(5), 835-858, 2006. <https://doi.org/10.5254/1.3547969>

[7] HE, H.; ZHANG, Q.; ZHANG, Y.; CHEN, J.; ZHANG, L.; Li, F.: *A Comparative Study of 85 Hyperelastic Constitutive Models for Both Unfilled Rubber and Highly Filled Rubber Nanocomposite Material*, Nano Materials Science, 4(2), 64-82, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.07.003>

[8] BERGSTRÖM, J. S.; BOYCE, M. C.: *Constitutive Modeling of the Large Strain Time-Dependent Behavior of Elastomers*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 46(5), 931-954, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(97\)00075-6](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(97)00075-6)

[9] WILLIAMS, M. L.; LANDEL, R. F.; FERRY, J. D.: *The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-Forming Liquids*, Journal of the American Chemical Society, 77(14), 3701-3707, 1955. <https://doi.org/10.1021/ja01619a008>

[10] MULLINS, L.: *Softening of Rubber by Deformation*, Rubber Chemistry and Technology, 42(1), 339-362, 1969. <https://doi.org/10.5254/1.3539210>

[11] DIANI, J.; FAYOLLE, B.; GILORMINI, P.: *A Review on the Mullins Effect*, European Polymer Journal, 45(3), 601-612, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2008.11.017>

[12] PAYNE, A. R.: *The Dynamic Properties of Carbon Black-Loaded Natural Rubber Vulcanizates*, Part I. Journal of Applied Polymer Science, 6(19), 57-63, 1962. <https://doi.org/10.1002/app.1962.070061906>

[13] MANKOVITS, T.; SZABÓ, T.: *Finite Element Analysis of Rubber Bumper Used in Air-Springs*, Procedia Engineering, 48, 388-395, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.530>

[14] MANKOVITS, T.; SZABÓ, T.; KOCSIS, I.; PÁCZELT, I.: *Optimization of the Shape of Axis-Symmetric Rubber Bumpers*, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 60(1), 61-71, 2014. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2013.1315>

[15] HURI, D.; Mankovits, T.: *Comparison of the Material Models in Rubber Finite Element Analysis*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,

393, 012018, 2018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/393/1/012018>

[16] HURI, D.; MANKOVITS, T.: *Automotive Rubber Product Design Using Response Surface Method*, Periodica Polytechnica Transportation Engineering, 50(1), 28-38, 2022. <https://doi.org/10.3311/PPTr.16280>

[17] HURI, D.: *Prediction Accuracy of Hyperelastic Material Models for Rubber Bumper under Compressive Load*, Polymers, 16(17), 2534, 2024. <https://doi.org/10.3390/polym16172534>

[18] FAZEKAS, B.; GODA, T. J.: *Constitutive Modelling of Rubbers: Mullins Effect, Residual Strain, Time-Temperature Dependence*, International Journal of Mechanical Sciences, 210, 106735, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106735>

[19] ADAMS, J. W.; Merrett, C. G.: *Comparing Different Data Processing Methods for Determining a Prony Series from Dynamic Mechanical Analyzer Frequency Data*, Polymer Engineering & Science, 63(5), 1459-1470, 2023. <https://doi.org/10.1002/pen.26297>

[20] Waste, P., Jogi, B., Ratna, D., Warhatkar, H., Al-Hamad, A., Dalvi, V., Chakraborty, B., Kulkarni, A.P., Balogh, G.: *Viscoelastic and damping properties of ethylene vinyl acetate (EVA) and its dicumyl peroxide (DCP) cross-linked variants*, Discover Materials, 2026. <https://doi.org/10.1007/s43939-026-00803-3>

[21] University of Debrecen, Department of Mechanical Engineering: Plastic and Rubber Materials Testing Laboratory. <https://mecheng.unideb.hu/node/311>

[22] ISO 37:2024; *Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of tensile stress-strain properties*, International Organization for Standardization, Geneva.