

## Kis érzékenységű fotoelasztikus anyagok feszültségoptikai állandójának mérése

### Measurement of the Photoelastic Coefficients of Low-sensitivity Materials

*BOJTOS Attila*

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Mechatronika, Optika és Gépészeti Informatika Tanszék, H-1111. Budapest, Műegyetem rkp. 3, D-ép. 4.-em. Tel: +36 1 463-2602, Fax: +36 1 463-3787, bojtos@mogi.bme.hu, www.mogi.bme.hu

#### Abstract

*A feszültségoptikai vizsgálatok egyik alapvető lépése a modellanyagok kalibrálása, amely a feszültségoptikai vizsgálatokon túl fotoelasztikus anyagok numerikus optikai modellezéséhez, vagy fotoelasztikus szenzor fejlesztéséhez is nélkülözhetetlen. Ezekben az esetekben nem mindig alkalmazható nagy feszültségoptikai érzékenységgel bíró anyag. Ezért a kutatás célja kis fotoelasztikus érzékenységgel bíró átlátszó anyagok feszültségoptikai állandójának meghatározása. A cikk kis vastagságú minták vizsgálatát mutatja be, melyek geometriája az anyag kis érzékenysége miatt kedvezőtlenül hat a mérésre. A mérés során átlátszó szilikon elastomert és üveget vizsgáltunk hagyományos kalibrálási eljárással és a Senarmont-féle kompenzációs módszerrel.*

**Keywords:** photoelastic coefficients, photoelastic materials, stress optics, calibration, material testing.

#### Kivonat

*Calibration of model materials is a fundamental step in stress-optics testing, which is essential not only for stress-optics testing but also for numerical optical modelling of photoelastic materials or for photoelastic sensor development. In these cases, a material with high photoelastic sensitivity may not always be used. Therefore, the aim of the research is to determine the photoelastic coefficients of the transparent materials with low photoelastic sensitivity. The article describes the testing of samples with small thicknesses, whose geometry is unfavourable to measurement due to the low sensitivity of the material. During the measurement, a transparent silicone elastomer and glass were tested by a conventional calibration method and the Senarmont compensation method.*

**Kulcsszavak:** fotoelasztikus anyagok, feszültségoptikai állandó, feszültségoptika, kalibrálás, anyagvizsgálat.

#### Bevezetés

A feszültségoptikai anyagok érzékenységét a gyártók megadják az adatlapon, de nagyobb pontosság érdekében kalibrálási eljárást javasolnak, mivel idővel és tételről tételre változhat az értékük [1]. Ezért minden egyes modellanyagot a kísérlet időpontjában kalibrálni kell. A kalibrálás során olyan tiszta (húzás, nyomás vagy hajlítás) igénybevételnek kell kitenni a próbatestet [2], amely egyszerű terheléssel könnyen megvalósítható és elméleti értéke számolható [2], [3], [1]. A modellanyag jellegétől függően az alábbi eljárások használatosak:

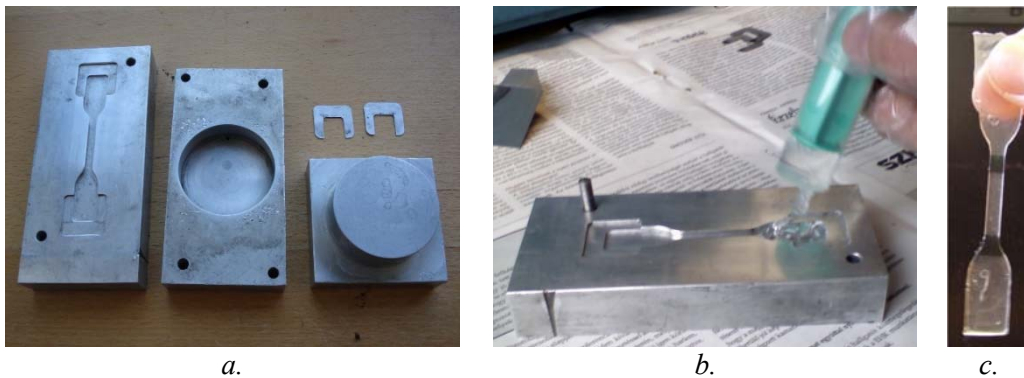
*Feszültségoptikai állandó meghatározása önállóan alkalmazott modellanyagok esetén:* rúd egytengelyű húzása és nyomása [2], [4], koncentrált erővel terhelt „végtelen” félsík [2], [1], az átmérőjén, radiálisan nyomott sík körtárcsa [2], [4], [1], kéttámaszú tartó tiszta (4 pontos) hajlítása [2] [3], [4], kis rugalmassági modulus esetén sík alakváltozásra kényszerített nyomott téglatest [5].

*Nyúlásoptikai állandó meghatározása rétegbevonatok esetén:* hajlításra igénybe vett konzolos tartó felületére felvitt réteg nyúlása [2], [3], [6], kis rugalmassági modulus esetén ismert görbületű kényszerített hajlítás [7].

A kis feszültségoptikai aktivitású anyagok kalibrálási problémáját a megengedett terhelés hatására létrehozott kis kettőtörés, vagy retardáció jelenti. De ezt nem csak a kis feszültségoptikai érzékenység, hanem a kedvezőtlen geometriai feltételek is okozhatják. Esetünkben az egyik vizsgálati anyagból nem volt lehetséges tetszőleges geometriájú próbatest gyártása, hanem a megrendelő által biztosított  $\sim 0,5$  mm vastagságú üveglapokat kellett használni. A fent felsorolt kalibrálási eljárásokból, így csak az egytengelyű húzás jöhetett számításba. Az üvegek szokásos feszültségoptikai értékét, geometriáját és szakítószilárdságát alapul véve előzetes számítások azt mutatták, hogy a vizsgálat során a megengedhető terheléssel nem érjük el az első rendszámot a megfigyelt zónákban. A fenti módszerek akkor lehet megfelelően alkalmazni, ha a modellanyag feszültségoptikai aktivitása elég nagy ahhoz, hogy több zóna is megjelenjen a vizsgálati terhelés mellett. Amennyiben ez nem lehetséges, akkor a kénytelenek vagyunk tört rendszámokat leolvasni valamilyen kompenzációs eljárás segítségével. Egyszerűsége és csekély eszközigénye miatt választásunk a Senarmont kompenzációra esett.

## 1. Minta előkészítés

### 1.1. Szilikongumi minták gyártása



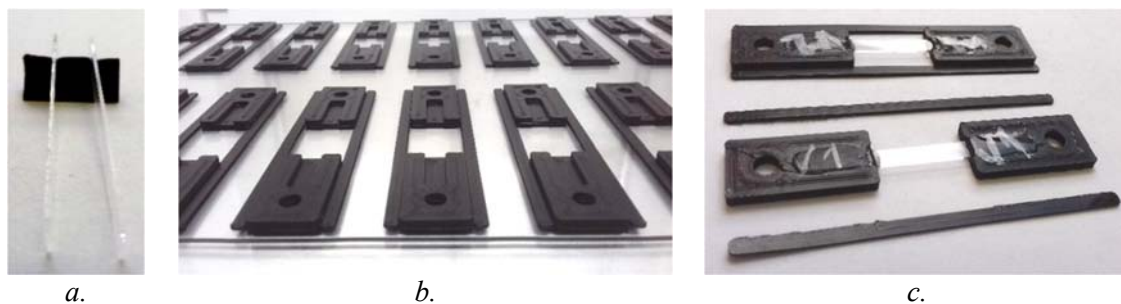
1. ábra

*Szilikonpróbatess gyártása. a.) présforma, b.) a szilikon alapanyag betöltése, c.) a megnyúlás kamerás méréséhez jelölőkkel ellátott kész próbatess.*

Két olyan szilikongumit vizsgáltunk (Nusil MED-6020, 40 Shore-A; Nusil MED-6755, 30 Shore-A), amelyek az előzetes tesztek alapján fotoelasztikus aktivitást mutattak. Mindkét anyag két komponensű, optikailag átlátszó szilikon, melyekből húzó próbatesszek vákuumos keverés után présformában vulkanizálással lettek előállítva. A piskóta alakú húzó próbatesszek középső vizsgálandó részére szilikon festékekkel fekete jelölők lettek festve a kamerás nyúlásméréshez. A kezdeti geometria pontos meghatározásához mérőmikroszkópot használtunk tekintettel a könnyen összenyomható anyagra.

### 1.2. Üveg minták

Az üveg próbatesszeket, melyeknek célszerű mérete  $5 \times 40$  [mm], egy  $118 \times 302 \times 0,5$  [mm] üveglapból kellett kivágni. Az esetleges anyagtulajdonságbeli anizotrópia feltárása érdekében az üveglapból vízszintes (H) és függőleges (V) irányban is vágunk ki mintákat.



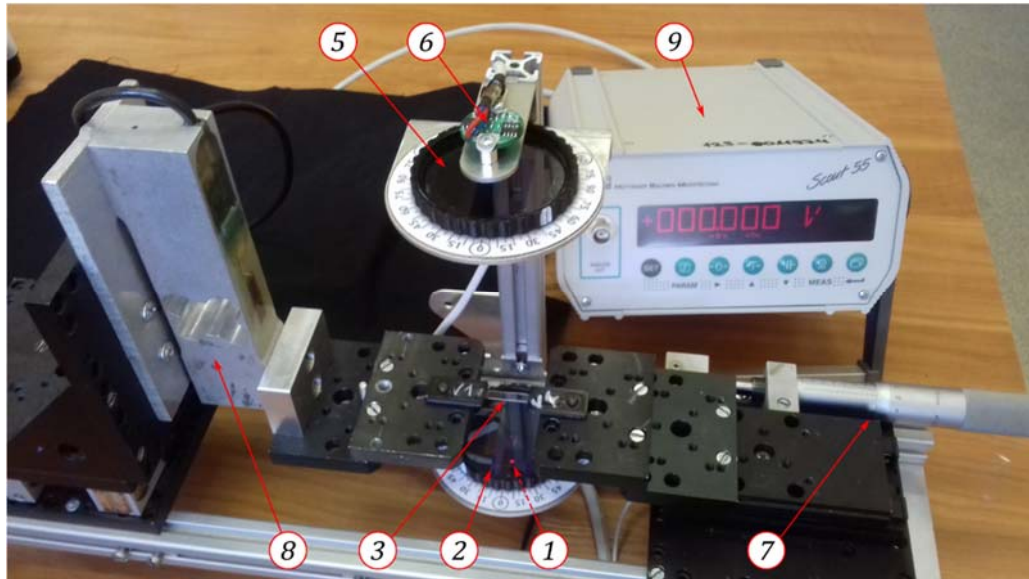
2. ábra

*A minták előkészítése és foglalása: a.) vágott (bal) és csiszolt élű (jobb) minta, b.) 3D nyomtatott mintatartók, c.) a mintatartóba beragasztott minta (fent) és a távtartóktól megszabadított, a vizsgálatra kész minta (lent).*

A kivágást nehezítette az anyag rendkívül kis vastagsága. A darabolást gyémánthegyű kézi üvegvágóval tudtuk elvégezni, ami a vágási él mentén szabálytalan felületet eredményezett. Ezt utólagos csiszolással és polírozással kezeltük (2. ábra/a). Az üvegminták foglalására 3D nyomtatással készítettünk befogóeszközt (2. ábra/b), amelybe Araldit epoxi ragasztóval ragasztottuk az üvegsíkokat. A 3D nyomtatott befogók két szélén távtartók biztosítják a két vég távolságát és egytengelyűségét. A távtartókat az epoxi ragasztó megszilárdulása után átvágtuk, így hozva létre terhelhető befogófejeket az üvegminta két végére (2. ábra/c).

Az üvegminták szélességi és vastagsági méretét digitális mérőórával, több méréssel meghatároztuk a minta hossza menti középpont közelében. A feszültségoptikai állandó meghatározásához a geometriai méreteket mintánként külön kezeltük.

## 2. Mérési módszer



3. ábra

Mérési összeállítás. 1.) Lézer fényforrás, 2.) polarizátor, 3.) minta, 5.) analizátor, 6.) fotodetektor, 7.) mikrométer orsós finompozicionáló asztal, 8.) erőmérő cella, 9.) Mérőerősítő.

A mérés elrendezését az 3. ábra mutatja. A Senarmont kompenzációs módszer lényege, hogy a kereszttezett állású polárszűrőket (P1 és P2) 45°-ra állítottuk a főfeszültséghez, jelen esetben a húzóterhelés irányához képest. A minta és az analizátor közé, az analizátor polarizációs síkjával párhuzamos negyedhullámlemez (Q) helyeztünk. A finompozicionáló mikrométerorsójának elforgatásával ráadjuk a kívánt terhelést. Esetünkben a terhelőerő értékét (F) kalibrált erőmérő cellával mértük. Az analizátort (P2) addig forgattuk, míg a fotodetektoron mért fényerősség minimumát meg nem találtuk, ez jelenti a sötét színsáv vizsgált helyre való vándorlását. Az analizátor kereszttezett álláshoz képesti szögelfordulásából ( $\alpha$ ) számolható a retardáció mértéke, vagyis a színsáv rendszáma:  $m = n \pm \alpha / \pi$ , ahol  $n$  a vizsgált helyen azon szomszédos egész számú színsávérték egyike [2]. Esetünkben a kis vastagság és kis fotoelasztikus érzékenység miatt az alkalmazott terheléstartományon nem érjük el a 1. rendszámot, tehát  $n = 0$ .

$$m = \pm \frac{\alpha}{\pi} \quad (1)$$

Ahol:  $m$  [rdsz] – a színsáv rendszáma;  $\alpha$  – az elforgatott analizátor szöge a negyedhullámlemez állásához viszonyítva. Az  $\alpha$  szög  $\pm 3 \dots 4^\circ$  pontossággal ( $\sim 1/50$  rdsz.) határozható meg általában [2] az elsötétedés (sötét színsáv) szemmel való megfigyelés útján. Esetünkben lézer fényforrásból átjutó fényt fotodetektorral mértük. A detektor kimeneti értékének figyelése és a minimum pont keresése valamivel kisebb  $\sim 1^\circ$  becsült szögpontosságot jelent, (ez az analizátor szögskála osztása). A mérés pontosságát a szűrők és a  $\lambda/4$  lemez szöghelyzetének leolvasásán túl az alkalmazott fény és a  $\lambda/4$  lemez sáv szélessége, az erőmérés és a mintadarabok méretének bizonytalanága befolyásolja.

### 3. Mérések kiértékelése, eredmények

#### 1.3. Üvegminták feszültségoptikai együtthatója

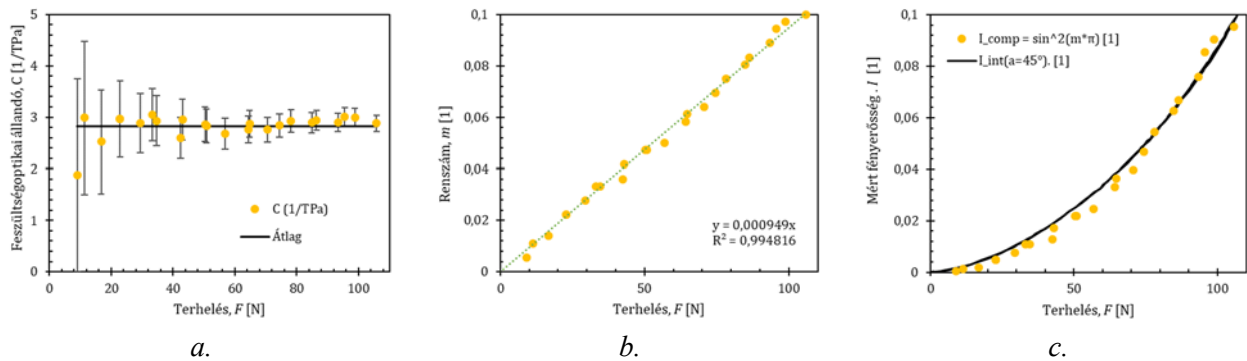
A feszültségoptikai együtthatót a feszültségoptika alapegyenlete (2) alapján tudjuk meghatározni. Az egytengelyű feszültségi állapot a terhelő erő és a keresztmetszet ismeretében felírhatjuk a (3) alakban.

$$m = \frac{Cd}{\lambda_f} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2)$$

$$C = \frac{\lambda_f b}{F} m = \frac{\lambda b \alpha}{F \pi} \quad (3)$$

ahol:  $C$  [rdsz /TPa], vagy [1 /TPa] – a feszültségoptikai állandó; gyakori még az  $S$  [N/mm\*rdsz] – a vizsgáló fény hullámhosszát magába foglaló feszültségoptikai állandó használata, megadásakor meg kell adni a hullámhosszat is, jelen esetben  $\lambda_f = 656,5$  nm;  $F$  [N] – a terhelő erő;  $m$  [rdsz] – a színsáv rendszáma;  $b$  [mm] – a minta szélessége, (a terhelőerő irányára és a fény útjára merőleges méret).

A mérési bizonytalanság pontos értékét minden mérési pontban (kb. 20 ... 30 / minta) kiszámoltuk, amire egy üveg minta esetén az 4. ábra láthatunk példát.

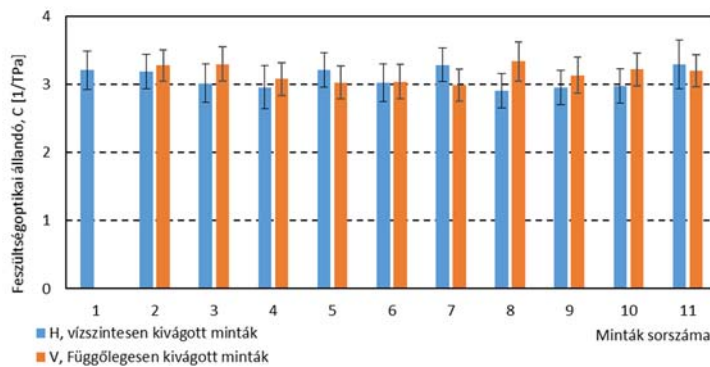


4. ábra

Egy (H8) minta mérési eredményei. Egy mérési pont egy terhelési szinthez tartozik. a.) A modellfüggvény (3) által a  $C_j$  értékeken számolt  $u_j$  bizonytalanságot ábrázolják a hibasávok. Látható, hogy kis terhelés felé haladva a hiba mértéke egyre nő. b.) Az  $m$  rendszámok az  $F$  terhelőerő függvényében. c.) A fényerősség mérés összehasonlítása a mért  $m$  rendszámok segítségével rekonstruált transzmissziós görbével.

Egy (H8) minta a teljes terhelési tartományon elvégzett mérésének ábrázolását mutatja az 4. ábra/a. Látható, hogy az egyes  $C_j$  feszültségoptikai állandó értékekhez tartozó  $u_j$  bizonytalanság a kis terhelés felé haladva egyre nő. A mérés bizonytalanságának csökkentése érdekében azok feldolgozásánál csak azokat az értékeket vettük figyelembe, melyeknek az aktuális mérési értékhez viszonyított relatív hibája nem haladta meg a 10%-ot. Ez a gyakorlatban az ~55 N alatti terheléshez tartozó mérési pontok elhagyását jelenti.

Az (3) egyenlet szerinti eredmény megkapható akkor is, ha az egyes mérési pontokhoz tartozó  $m$  rendszámokat számoljuk ki és arra egyenest illesztünk (4. ábra/b). Az adatok kiértékelésénél mindkét módszert alkalmaztuk és összehasonlítottuk. Az összes minta mérési eredményét és mérési bizonytalanságát a 5. ábra mutatja. A mérés eredménye azt mutatja, hogy a minta kivágás irányának nincs szignifikáns hatása az eredményre.



5. ábra

*Az összes minta mérési eredménye és mérési bizonytalansága. A mérés eredménye azt mutatja, hogy a minta kivágás irányának nincs szignifikáns hatása az eredményre.*

Mivel a vízszintes és függőleges minták eredménye nem mutat szignifikáns különbséget az eredmény összevontan adjuk meg. A teljes sokaságra vonatkozó átlagos  $C$  feszültségoptikai állandó értéket az egyes minták  $C_k$  értékeinek átlagaként számoltuk.

$$C = 3,126 \pm 0,531 [1/TPa]$$

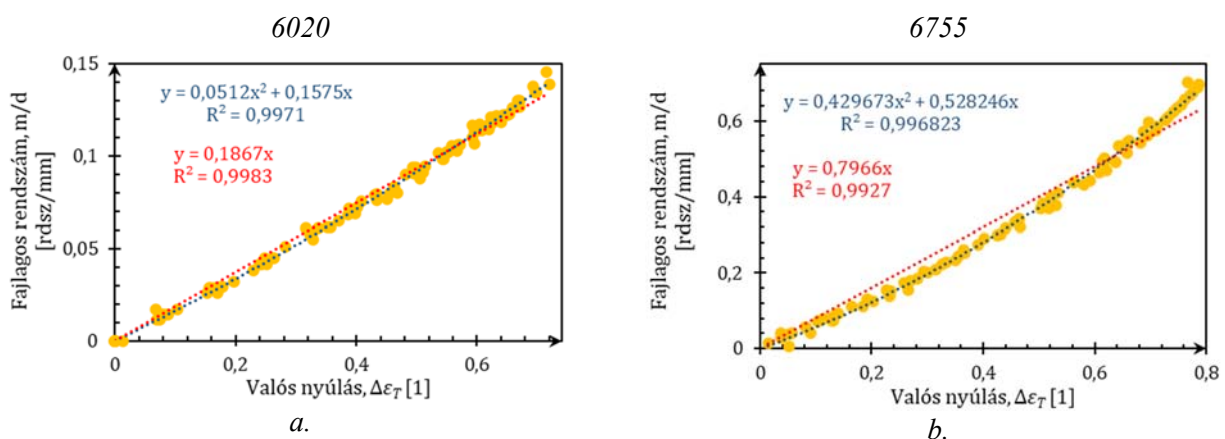
#### 1.4. Szilikongumi minták nyúlásoptikai együtthatója

Olyan esetekben, ahol inkább az kettőstörés-alakváltozás összefüggés az érdekes, mint a szilikongumi próbatestek esetén, a *nyúlásoptikai tényező* meghatározása válik szükségessé. Lineáris anyagi viselkedés esetén a feszültségoptikai ( $S$ ) és a nyúlásoptikai ( $D$ ) együttható között az anyag rugalmassági modulusa ( $E$ ) teremt kapcsolatot  $D=E/S$ . Nagy alakváltozást szenvedő, nemlineáris karakterisztikával rendelkező gumiszerű anyagok esetén a nyúlásoptikai tényezőt a valós (logaritmikus, vagy Hencky féle) nyúlások segítségével határozhatjuk meg [2].

$$m = \frac{Dd}{\lambda_f} (\varepsilon_{T1} - \varepsilon_{T2}) = \frac{Dd}{\lambda_f} \ln \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \quad (4)$$

$$D = \frac{\lambda_f}{\Delta\varepsilon_T d} m = \frac{\lambda_f \alpha}{\Delta\varepsilon_T d \pi} \quad (5)$$

A fény terjedésének irányába eső vastagságtól függ a mért színrend  $m$  mértéke. Nagy alakváltozások esetén a keresztmetszet változása már nem elhanyagolható, ezért célszerű a *fajlagos rendszámot*  $m/d$  ábrázolni az optikai tengelyre merőleges alakváltozások különbségének ( $\varepsilon_{T1} - \varepsilon_{T2} \equiv \Delta\varepsilon_T$ ) függvényében. A fajlagos rendszám egységnyi vastagságra eső rendszámot adja meg, ahol a vastagságot a terhelés irányában mért megnyúlás és a gumi anyagokra jellemző térfogatállandóság ( $\nu \approx 0,5$ ) feltételéből számoltuk.



6. ábra

*MED-6020 (a) és MED-6755 (b) Szilikongumi fajlagos rendszámának mérési eredményei.*

A definíció szerinti összefüggésből a *fajlagos rendszám* értékét kifejezve

$$\frac{m}{d} = \frac{D}{\lambda_f} \Delta \varepsilon_T \quad (6)$$

és a mérési pontokra illesztett függvény alapján az *fajlagos rendszám* lineáris illesztés esetén

$$\frac{m}{d} = a_1 \cdot \Delta \varepsilon_T, \quad (7)$$

ahol  $a_1$  együttható az illesztett egyenes meredeksége.

A két egyenletet egyenlővé téve kapjuk a nyúlásoptikai együttható értékét.

$$D_{const} = \lambda_f a_1 \quad (8)$$

A 6. ábra láthatjuk hogy a lineáris illesztés, vagyis amikor a nyúlásoptikai együttható ténylegesen egy állandó, csak MED-6020 típusú anyagnál ad jó közelítést, a MED-6755-ös anyagnál nem. Magasabb rendű poligonnal közelítve a fajlagos rendszám – alakváltozás adatsort mindkét anyag esetén már kielégítőbb eredményre jutunk.

$$\frac{m}{d} = a_2 \cdot (\Delta \varepsilon_T)^2 + a_1 \cdot \Delta \varepsilon_T \quad (9)$$

$$D_{lin} = \lambda_f (a_2 \cdot \Delta \varepsilon_T + a_1) \quad (10)$$

Mindkét illesztés esetén a függvény az origón halad keresztül ( $a_0 = 0$ ), ami a modell törvényszerűségeiből adódik (deformálatlan állapotban nulla retardációt feltételezünk, tehát nincs befagyott feszültség), másrészt a nagyobb terheléseknél mért értékeket nagyobb súlyozással veszi figyelembe.

A szilikongumi próbatestek nyúlásoptikai együtthatói különböző módszerekkel meghatározva 1. táblázat

D pontok átlagolásával	Nusil MED-6020	Nusil MED-6755
$D_{\text{átlag}}$	1,197	4,814
$m/d - \Delta \varepsilon_T$ lineáris illesztésével		
$D_{\text{all}}$	1,226	5,230
$m/d - \Delta \varepsilon_T$ 2. fokú polinom illesztésével		
$D_{lin} = b_1 \cdot \Delta \varepsilon_T + b_0$		
$b_0$	1,034	3,468
$b_1$	0,336	2,821

#### 4. Összefoglaló

Kis vastagságú (0,5 mm) üveg és (2 mm) szilikongumi feszültégoptikai mérését végeztük. A kis feszültégoptikai állandó és a kis vastagság nem tette lehetővé az egész rendszámú színsávok megfigyelését, ami a hagyományos kalibrálási eljárásokhoz nélkülözhetetlen. A mérés során jellemzően  $m = 0,1 \dots 0,3$  volt az elérhető rendszám, lásd a 4. ábra és 6. ábrákat. Ezért a feszültégoptikai állandó meghatározásához a tört rendszámok mérését a Senarmont kompenzáció módszerével végeztük.

A hagyományos eljárásban a 0-a rendű színsáv szemrevételezés útján való megkeresése közvetlenül nem jelenik meg az egyenletekben de jelentősen befolyásolja az analízátor szögbeállításának hibáját. Az áthaladó fény erősségének objektív mérésével ez a szubjektív érzékelésen alapuló mérési hiba kiküszöbölhető, vagy legalábbis csökkenthető volt. A mérési eredmények alapján látható, hogy az üveg a vizsgálati tartományon lineáris viselkedést mutat, szemben a szilikongumival, amelynek rendszám – alakváltozás függvénye nem lineáris és ennek következtében a nyúlásoptikai együttható nem írható le egy állandóval, hanem értéke függ a terhelés mértékétől.

#### Köszönetnyilvánítás

A bemutatott kutatás a BME-NVA-02 számú projekt részeként az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatással, a TKP2021 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

**Irodalmi hivatkozások**

- [1] K. Ramesh, *Developments in Photoelasticity - Basics of photoelasticity and photoplasticity*. IOP Publishing, 2021. doi: 10.1088/978-0-7503-2472-4ch1.
- [2] F. Thamm, G. Ludvig, I. Huszár, and I. Szántó, *A szilárdságtan kísérleti módszerei*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1968.
- [3] L. Borbás and P. Ficzere, “FESZÜLTSEGMÉRÉS, optikai feszültségvizsgálat rétegbevonatos eljárásával, eredmények ellenőrzése VEM analízissel,” Budapest, 2008. [Online]. Available: [http://www.kge.bme.hu/hun/Lab\\_Optikai\\_feszultseg\\_Segedlet.pdf](http://www.kge.bme.hu/hun/Lab_Optikai_feszultseg_Segedlet.pdf)
- [4] K. Ramesh, R. Vivek, P. T. Dora, and D. Sanyal, “A simple approach to photoelastic calibration of glass using digital photoelasticity,” *J Non Cryst Solids*, vol. 378, pp. 7–14, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.06.004>.
- [5] F. Thamm, *Műanyagok szilárdságtana előadásjegyzet*.
- [6] VISHAY, “Calibration of PhotoStress® Coatings,” Tech Note TN-701-1, 2011. Accessed: Feb. 23, 2023. [Online]. Available: [http://www.vishaypg.com/docs/11211/11211\\_te.pdf](http://www.vishaypg.com/docs/11211/11211_te.pdf)
- [7] VISHAY, “Calibration of Low-Modulus Photostress® Coatings by the Imposed-Curvature Method,” 11238, 2010. [Online]. Available: [http://www.vishaypg.com/docs/11238/\\_vmr-tc0.pdf](http://www.vishaypg.com/docs/11238/_vmr-tc0.pdf)