



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

VASTAG ZSOLT

TDK

RÉSZVÉTEL UNIDIREKCIONÁLIS SZÉNSZÁL/EPOXI ANYAG  
HÚZÓ MECHANIKAI TULAJDONSÁGAINAK PONTOS  
MEGHATÁROZÁSÁRA ALKALMAS PRÓBATESTEKEN VÉGZETT  
NEMZETKÖZI KÖRVIZSGÁLATBAN

Témavezető:

Dr. Czél Gergely

Egyetemi docens

BUDAPEST, 2023

## Tartalomjegyzék

Jelölések jegyzéke .....	iii
1. Bevezetés .....	2
2. Szakirodalmi áttekintés.....	3
2.1. Szabványos unidirekcionális kompozit húzó próbatestek .....	3
2.2. Nyíl alakú fülekkel ellátott próbatestek .....	8
2.3. Folytonos védőrétegű szendvics próbatestek .....	8
2.4. Piskóta és pillangó típusú próbatestek .....	11
2.5. X-pillangó és szendvics X-pillangó próbatestek .....	14
2.6. A szakirodalom összefoglalása.....	17
3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések .....	19
3.1. Felhasznált alapanyagok.....	19
3.2. Alkalmazott berendezések .....	22
3.3. Vizsgálati módszerek.....	22
3.4. Előkészületek, mintaelőkészítés .....	24
4. Kísérletek és kiértékelés .....	26
4.1. A próbatestek eredményeinek összehasonlítása .....	26
4.2. Szignifikancia vizsgálatok .....	37
4.3. Görbe illesztés és szakadási feszültség becslés a szendvics próbatestek kiértékeléséhez .....	38
5. ÖSSZEFOGLALÁS.....	40
5.1. További megoldásra váró feladatok .....	41
6. Irodalomjegyzék .....	42

## JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

## Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
a	A mestergörbe egyenletének együtthatója	MPa
b <sub>1</sub>	Szélesség	mm
h	Vastagság	mm
h <sub>t</sub>	Fül vastagság	mm
L	Pofák közti távolság	mm
L <sub>0</sub>	Mérési hossz, video nyúlásmérőhöz	mm
L <sub>2</sub>	Szabad hossz	mm
L <sub>3</sub>	Próbatest hossz	mm
L <sub>T</sub>	Fül hossz	mm
E	Rugalmassági modulus	GPa
E <sub>0</sub>	Kezdeti rugalmassági modulus	GPa
p	p-érték	-
R <sub>a</sub>	A hidraulikus befogó pofákat előfeszítő erő	kN
V	Térfogat hányad	-
V <sub>A</sub>	A ragasztó anyag térfogat hányada	-
V <sub>C</sub>	A szénszál erősítésű kompozit anyag térfogat hányada	-
V <sub>G</sub>	Az üvegszál erősítésű kompozit anyag térfogat hányada	-

## Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
$\alpha$	Szignifikancia szint	-
$\varepsilon$	Fajlagos nyúlás	%
$\sigma$	Húzófeszültség	MPa
$\sigma_A$	A ragasztó rétegben ébredő húzófeszültség	MPa
$\sigma_C$	A szénszál erősítésű kompozit rétegben ébredő húzófeszültség	MPa
$\sigma_G$	Az üvegszál erősítésű kompozit rétegben ébredő húzófeszültség	MPa
$\sigma_{G/C/G}$	Az üvegszál/szénszál szendvics kompozitban ébredő húzófeszültség	MPa
$\sigma_x$	A húzás tengelyével párhuzamos húzófeszültség komponens	MPa
$\sigma_z$	A próbatest síkjára merőleges húzófeszültség komponens	MPa

$\tau$	Nyírófeszültség	MPa
$\tau_{xz}$	Rétegeközi nyírófeszültség	MPa

## Rövidítések

---

Rövidítés	Megnevezés
A	Ragasztóanyag (adhesive)
ASTM	American Society for Testing Materials
B	Ragasztott (bonded)
CC	Együtt térhálósított (co-cured)
CF	Szénszál (carbon fibre)
CO	Rátérhálósított (cured-on)
EP	Epoxi gyanta
GF	Üvegszál (glass fibre)
ISO	International Organisation for Standardization
PPS	Polifenilén-szulfid
SCF	Feszültség koncentrációs tényező (stress concentration factor)
UD	Egyirányú szál (unidirekcionális) erősítés
VEM	Végeselem módszer



## 1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedekben töretlenül növekedett a szálerősítésű kompozitok népszerűsége. Alacsony sűrűségük, nagy tömegre fajlagosított szakítószilárdságuk és mechanikai viselkedésük egyszerű variálhatósága kiemeli őket az anyagtudományban. Mindezeknek köszönhetően ideális anyag az olyan műszaki területeken, ahol nagy merevségű és szilárdságú anyagra van szükség, ugyanakkor, mindezen elvárásoknak szigorú tömegre vonatkozó megszorítások mellett kell eleget tenni. Ilyen területek a mérnöki élet tradicionálisan legdinamikusabban fejlődő területei, mint az orvosi implantológia, a repülőgépipar, a sporteszköz ipar, és a szélerőművek révén az energetikai gépipar is.

Éppen emiatt tűnhet meglepőnek, hogy a mechanikai anyagvizsgálatok területén legalapvetőbb, unidirekcionális (UD) szálerősítésű kompozit próbatesteken végzett egytengelyű húzóvizsgálatok pontosságát egy évtizedek óta megoldatlan probléma rontja.

A húzó próbatestekre a szakítógépekben alkalmazott ékpályás befogó pofák hatásmechanizmusa miatt nagy, a próbatest lapjára merőleges erő hat, ami a jellemzően anizotrop kompozit anyagokat roncsolhatja. A próbatest roncsolódását megelőzendő, elterjedt a próbatest végén kompozit, vagy alumínium fülek (tabok) alkalmazása. A fülek miatt azonban a próbatestek keresztmetszete nem állandó, ami feszültséggyűjtő helyeket eredményez.

Európai kutatóhelyek egy nagyszabású körvizsgálatot (round-robin) indítottak, azzal a céllal, hogy a ma szabványos UD kompozit próbatest típusokat új, hatékonyabb megoldásokkal egészítsék ki, vagy váltsák fel. A körvizsgálatban részt vesz a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Polimertechnika Tanszéke is.

Munkámban ebbe a körvizsgálatba kapcsolódtam be. A kutatási program során két szabványos és három új típusú próbatestet hasonlítottam össze egytengelyű húzóvizsgálatok segítségével. A vizsgálat során két különböző típusú módszerrel gyűjtöttem a nyúlási adatokat, amelyek összehasonlítása is szerepelt a kutatás céljai között.

## 2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Bár a szakító próbatestek általában egyszerű geometriájúak, az anyagtudományban betöltött fontos szerepüknek köszönhetően az utóbbi időben egyre gazdagodó szakirodalommal rendelkeznek. Különösen igaz ez az unidirekcionális szálerősítésű kompozit húzó próbatestekre, melyek az említett feszültséggyűjtő helyek jelensége miatt is különös figyelmet kaptak a tudományos irodalomban.

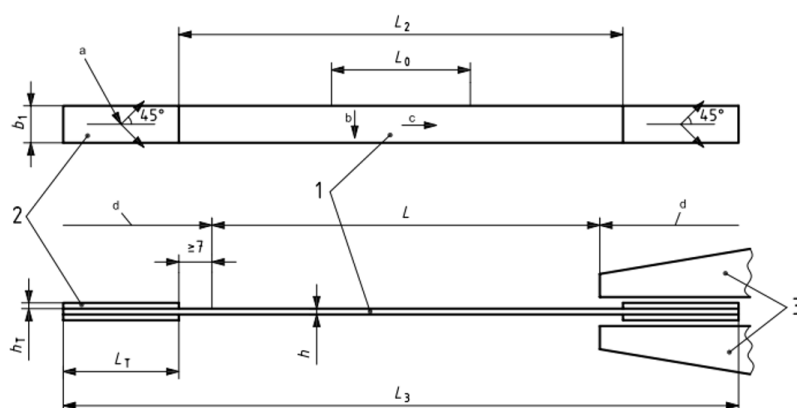
### 2.1. Szabványos unidirekcionális kompozit húzó próbatestek

Az unidirekcionális szálerősítésű kompozit húzó próbatestek elkészítésére két szabvány terjedt el; a nemzetközi ISO 527-5 [1] és az amerikai ASTM D3039/D3039M [2]. Mind két szabvány egyszerű, párhuzamos szélű lemez próbatestet ajánl, amelyek végeit  $\pm 45^\circ$ -os szálirányú UD üvegszál/epoxi, vagy szintén a húzás tengelyével  $45^\circ$ -ban elforgatott szövet kompozit fülekkel kell ellátni (1. ábra) (1. táblázat).

Az ISO 527-5, amely mindössze két „A” és „B” típusú, hossz-, illetve keresztirányú szál elrendezésű próbatestet ajánl, lényegesen szigorúbb az ASTM szabványánál, ami a próbatestek kialakításával kapcsolatban inkább lehetséges alternatívákat jelöl meg konkrét utasítások helyett.

A fülek elkészítésére elterjedt az üvegszál erősítésű, elektronikai célra készült kompozit lapok használata, de ezek mellett más kompozit, alumínium fülekkel ellátott [3], és fülek nélküli megoldások is léteznek [4]. Az elektronikai célú lapok népszerűsége az anyag jó minőségében (sima, állandó vastagságú), elérhetőségében és elfogadható árban rejlik. A füleknek két szerepe van; egyrészt a próbatest végeket megóvják a jellemzően barázdás befogó pofák roncsoló hatásától, amelyet a nagyfokú anizotropiával jellemezhető UD próbatestek máskülönben nem viselnének el tönkremenetel nélkül, másrészt csökkenti a húzás során, a befogott felületen ható nyíróerők hatását. A mérési elrendezést tekintve mindkét szabvány azt javasolja, hogy a befogó pofák lógjanak túl a füleken (1. ábra).

Jól ismert jelenség azonban, hogy a fülek okozta keresztmetszet változás feszültséggyűjtő helyeket eredményez a próbatestekben, ezzel korai tönkremenetelt okozva a húzóvizsgálatok során. Emiatt a valós mérések nyúlási és szilárdsági eredményei elmaradnak az elméletileg elérhető szakadási nyúlási és feszültségi értékektől [5, 6].



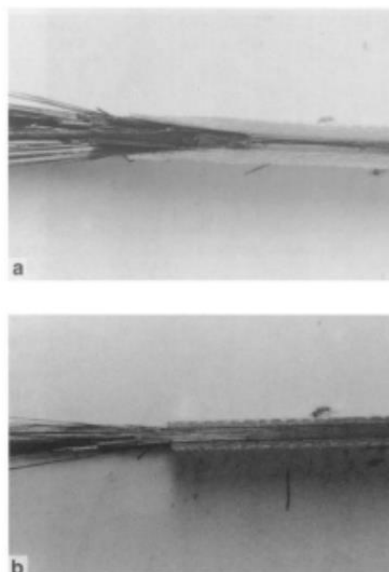
1. Ábra ISO 527-5 szerint szabványos „A” és „B” kompozit próbatetest. 1: próbatetest, 2: fül, 3: szakítógéppofák, a: fül szövet irány, b: B próbatetest száliránya, c: „A” próbatetest száliránya, d: pofabetétek által takart hossz a próbatesten [1]

$L_3$	$L_2$	$b_1$	$h$	$L_0$	$L$	$L_T$	$h_T$
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Próbatetest hossz	Szabad hossz	Szélesség	Vastagság	Mérési hossz, video nyúlásmérőhöz	Pofák közti távolság	Fül hossz	Fül vastagság
250	150	15	1	50	136	>50	0,5-2

1. Táblázat ISO 527-5 szerinti „A” próbatetest méretei

A legjobban elterjedt, ékpályás befogó pofák használata esetén az ASTM szabvány azt javasolja, hogy a feszültséggyűjtő hatás csökkentése érdekében, a fülek 90°-os váll helyett 7-10°-os ferde szakasszal érjenek véget a szabad hossz irányában. Azonban egy 1994-ben Hojo és társai [7] által végzett, a témában nagy hatású körvizsgálat eredményei szerint a 10°-os ferde végű fül típus nem gyakorol jelentős hatást a húzóvizsgálatok kimenetelére a könnyebben gyártható 90°-os, szögletes végű fülekhez képest. Valamint kimutatta, hogy a ferde végű fülek erősen hajlamosak a rétegelválásra a ferde szakaszokon, amely a gyakorlati tapasztalat szerint csökkentheti a mért szakadási nyúlás értékeket. (2. ábra). Ugyanakkor Kulakov és társai [8] egy véges elem módszerrel (VEM) folytatott kutatás során azt találták, hogy a 10° alatti ferdeség már érdemben növelheti a szakadási nyúlást. Hozzá kell tenni, hogy modell nem vette figyelembe a ferde végű fülekkel ellátott próbatesteknél jellemzően bekövetkező fül elválását a próbatesttől.





**2. Ábra** Ferde (a) és szögletes végű (b) fülekkel ellátott húzó próbatestek tönkremenetel után. Jól látható, hogy a ferde végű fülek rétegelválást követően szétnyíltak a ferde szakaszon [7]

Egy kutatás sorozat első részében Portnov és társai [9, 10] azt állapították meg, hogy a húzóvizsgálatok során a feszültséggyűjtő helyek keletkezése a szabványos próbatestek esetén gyakorlatilag kiküszöbölhetetlen. A feszültséggyűjtő helyek hatása nagy szakítószilárdságú, anizotrop próbatesteknél fokozott, mert a szakítógépek pofáinak ékpályás kialakítása miatt nagy maximális erők esetén, a próbatestre merőleges irányban túl nagy erők léphetnek fel.

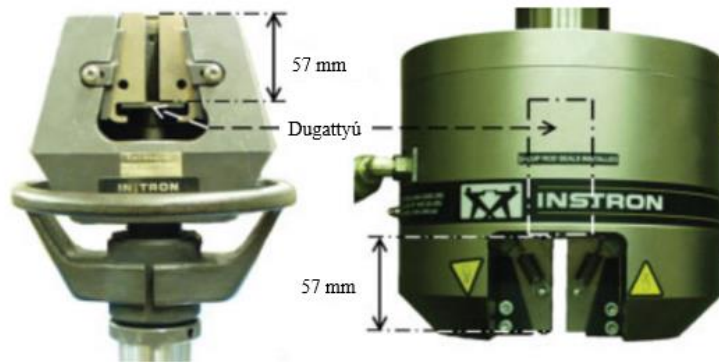
A kutatás második részében végeelem módszerrel szimulálták egy ékpályás befogó pofába helyezett próbatest feszültségállapotát a fül és a szabadhossz környezetében. A kutatás kitért a fület és próbatestet összekötő ragasztóréteg elasztoplasztikus jellegének hatására is, amely, mint megállapították, csillapítani tudja a feszültségkoncentrációs hatást a próbatestekben.

De Baere és társai [5] VEM-mel végzett kutatásukban 4 különböző geometriát (hosszabb és rövidebb szabványos füleket) 4 fül alapanyagot ( $\pm 45^\circ$  szál elrendezésű CF/PPS,  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  szál elrendezésű CF/PPS, GF/Epoxi, Alumínium, valamint acél) 2 mérési elrendezést (pofából kilógó és nem kilógó füleket) és két típusú befogó előfeszítést (manuális és hidraulikus) vizsgáltak (3. 4. és 5. ábrák).

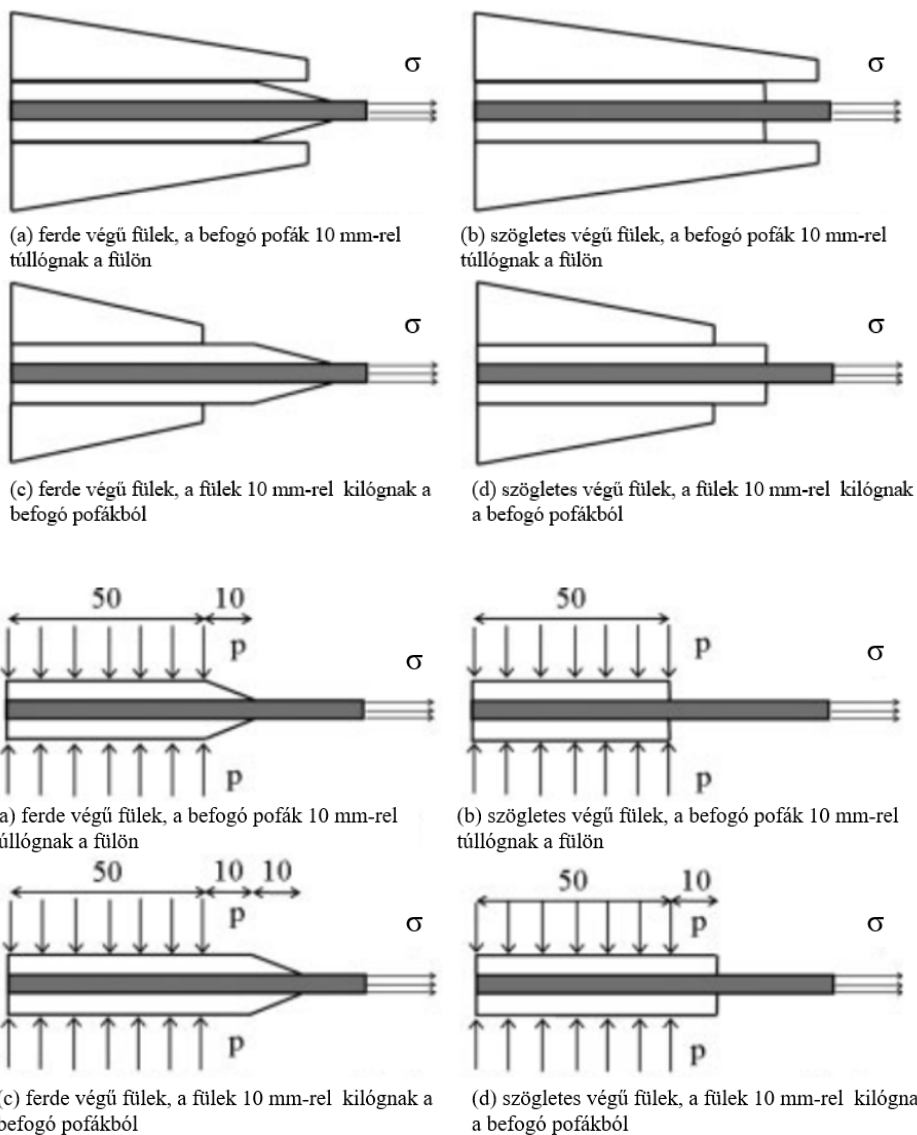
Az ábrákon látható SCF (stress concentration factor – feszültségkoncentrációs tényező) a feszültséggyűjtő hatás mértékét jelöli (1. egyenlet).

$$SCF = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{névleges}}} \quad (1)$$

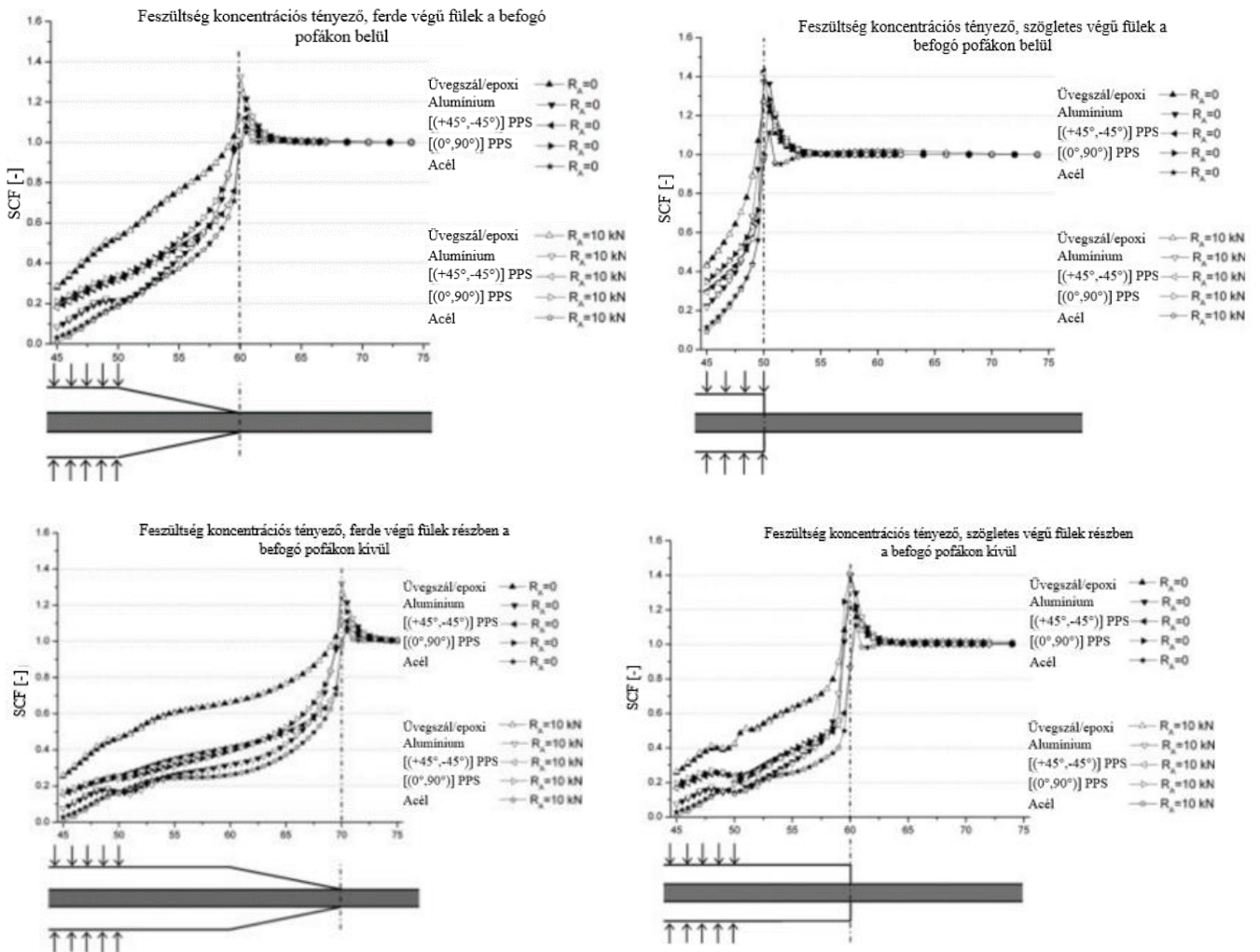
Ahol  $\sigma_{\max}$  a vizsgált pontban ébredő valós, maximális feszültség, a  $\sigma_{\text{névleges}}$  pedig az elméleti (állandó keresztmetszetben fellépő) névleges feszültség.



3. **Ábra** Manuális (balra) és hidraulikus (jobbra) előfeszítésű befogó pofák [5]



4. **Ábra** De Baere és társai által vizsgált próbatest típusok és mérési elrendezések [5]



\* $R_A$  a hidraulikus működtetésű pofákat előfeszítő erő.  $R_A = 0$  esetén a pofák manuális előfeszítésűek

5. Ábra De Baere és társai VEM szimulációinak eredményei diagramokon. [5]

A kutatás eredményei szerint a befogó pofák típusa nem befolyásolja jelentősen a feszültséggyűjtő helyekben keletkező feszültséget. Azonos nagyságú felületen történő befogás esetén a szögletes végű fülel ellátott próbatestek esetén előnyös, ha a füleken túl lóg a befogó pofa, a ferde végű fülekkel ellátott próbatestek esetén azonban a pofa, vagy a fül túllógása nem okoz különösebb eltérést. A legkisebb feszültségkoncentrációt a PPS mátrixú  $\pm 45^\circ$  szénaszál erősítésű kompozit fülekkel sikerült elérni.

Megemlítendő, hogy a PPS mátrixú fülek ragasztásának gyakorlati kivitelezése nehézkes, az anyag nagymértékű inertsége miatt. A ragasztó réteg terhelhetőségét nagyban elősegíti a ragasztott felületek méretének növelése és az adhéziót javíthatja, ha a ragasztást megelőzően a felületeket érdesítjük.

## 2.2. Nyíl alakú fülekkel ellátott próbatestek

Egy, a közelmúltban kifejlesztett próbatest típus a feszültséggyűjtő hatás problémáját a fülek nyílszerű kialakításával célozza megoldani. Az elképzelés mögött az áll, hogy a feszültséggyűjtő helyet a fülek fokozatos elkeskenyítésével elnyújtjuk a próbatesten, ezzel minimalizálva a feszültséggyűjtő hatást. A próbatest első, nagy mintaszámú vizsgálata a most zajló körvizsgálatban történik.

A Babak Fazlali és társai [11] cikkében bemutatott vizsgálat sorozat, amely során hasonló próbatesteket vizsgáltak, mint amelyeket ez a TDK dolgozat is, azt találta, hogy ezek a próbatestek a legsikeresebbek között voltak a magas szakadási nyúlások elérésének szempontjából. Ugyanakkor VEM vizsgálattal azt is megállapították, hogy a kutatásban vizsgált próbatest típusok között a nyíl alak eredményezte a legnagyobb SCF értéket. Az ellentmondó megállapítást a kutatás úgy magyarázta, hogy a nagy feszültséggyűjtő hatás csupán a nyíl hegyének szűk környezetére korlátozódik, és nem hat azonos mértékben a próbatest teljes szélességében.

További előnye ennek a próbatest kialakításának a geometria egyszerűsége, ami megkönnyíti a próbatest és a fülek elkészítését. A könnyű gyárthatóság a potenciális hibaforrások számát is csökkenti, amely pedig a próbatestek megbízhatóságát növeli.

A nyíl alakú fül további optimalizálására, és a nyílhegy csúcsán megjelenő feszültséggyűjtő pont problémájának megoldására már vannak konkrét elképzelések. A fül végének nyíl helyett, trapéz vagy kör alakra való kiképzése VEM-es szimulációk szerint jobb feszültségeloszlást eredményezhet a próbatestben. [11]

## 2.3. Folytonos védőrétegű szendvics próbatestek

Bármely fül konstrukciónál jellemző, hogy minden igyekezet ellenére a feszültséggyűjtő hatás megmarad, a tönkremenetel a fülek végeinek közelében következik be. Ez a próbatest keresztmetszetének változása miatt alakul így. Cél és társai [12] ezt a problémát azzal próbálták meg kiküszöbölni, hogy a próbatesten, a fülekhez hasonló feladatú, a próbatest teljes hosszát takaró védőrétegeket alkalmaztak. Ezáltal a keresztmetszet a teljes próbatest hosszon azonos marad és nem alakul ki geometriából fakadó feszültséggyűjtő hely. A pofákban lévő részen pedig csiszolópapírral lehet csökkenteni a roncsoló hatást.

A módszer a maga egyedi előnyeit és hátrányait eredményezte: A próbatestekben valóban megszűnt a feszültséggyűjtő hatás, azonban ezzel típussal nem lehet közvetlen szakító szilárdságot mérni, hiszen a próbatest és a folytonos védőréteg együttesen, szendvics szerkezetként veszi fel a terhelést. A szakadási nyúlás ettől függetlenül tökéletesen mérhető, mivel a fajlagos nyúlás a teljes keresztmetszetben állandónak tekinthető. Szükséges feltétel, hogy a vizsgált anyag szakadási nyúlása előre ismertén kisebb legyen, mint a védőréteg anyagáé.

A próbatestben keletkező feszültségek közvetett módon közelíthetők. Kumar R. és társai [13] szerint a szendvics próbatest összetételét ismerve, a keverésszabály használatával, származtatható a szénszál erősítésű kompozit rétegben keletkező feszültségi állapot (2. egyenlet).

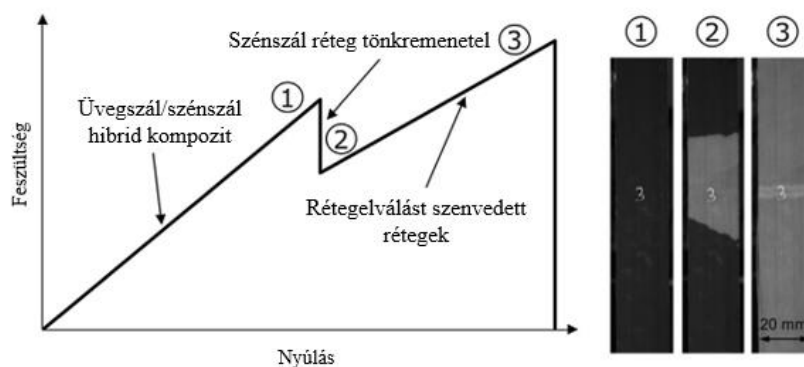
$$\sigma_C = \frac{\sigma_{G/C/G} \cdot V_G - \sigma_A \cdot V_A}{V_C} \quad (2) [13]$$

Ahol,  $\sigma_C$ ,  $\sigma_G$ ,  $\sigma_{G/C/G}$ , és  $\sigma_A$  a szénszál erősítésű kompozit, az üvegszál erősítésű kompozit, a teljes szendvics próbatest és a ragasztó rétegekben ébredő húzó feszültségek.  $V_G$ ,  $V_A$ ,  $V_C$ , pedig az üvegszál erősítésű kompozit, a ragasztóréteg és a szénszál erősítésű kompozit réteg térfogat aránya a próbatestben.

Az üvegszál erősítésű kompozitban keletkező feszültségeket, korábban vizsgált, üvegszál erősítésű kompozit próbatestek mérési görbéi alapján közelítették.

A szendvics próbatest további előnye, hogy megfelelő elővigyázatosság mellett, a húzóvizsgálatot időben, a védőréteg tönkremenetelét megelőzően leállítva a próbatest nem robban szét, mint ahogy az jellemző UD szénszál erősítésű kompozit próbatestek esetén. Ehelyett a szénszál/epoxi lemez bennmarad a még nem roncsolódott védőrétegek között, ezzel lehetővé téve a mérőszemélyzetnek, hogy a próbatesten magán figyeljék meg a tönkremenetel pontos helyét.

A próbatest feszültség-nyúlás diagramja egyedi képet mutat. Mivel szendvics szerkezettel van dolgunk, a diagram képe egy, a ridegebb vizsgált anyag tönkremenetelkor keletkező meredek esésből, majd a még nem tönkrement védőrétegben felvett terhelés felfutásából áll (6. ábra).



**6. Ábra** A szendvics próbatestek egyedi tönkremeneteli folyamata; 1: az ép próbatest meredek feszültségfelfutása, 2: a szénszálréteg tönkre megy, a terhelés leesik, a rétegválást szenvedett védőréteg átveszi a teljes terhelést, 3: A próbatest a végső tönkremenetel előtt nem sokkal [12]

Jandrics András diplomamunkájában [14] 3 különböző módszert mutatott be a próbatest elkészítésére.

1. A szénszál és üvegszál prepreget (gyantával előimpregnált erősítőszál) egyszerre rétegelve, majd autoklávban **együtt térhálósítva**, CC (co-cured),
2. először a szénszál kompozitot kitérhálósítva, majd az üvegszál prepreget a már elkészült próbatestre rétegelve, majd **rátérhálósítva**, CO (cured-on),
3. vagy pedig a két prepregből felépített lemezt külön térhálósítva, majd **összeragasztva** B (bonded).

Mind három típusnak megvannak a sajátos előnyei és hátrányai. Az 1. módszer kivitelezése a legegyszerűbb és jó kötést biztosít az összetérhálósított prepregek között. Azonban az autokláv ciklus alatt a szénszál és üvegszál kompozit réteghatárai hullámosak lettek, ami tovább komplikálja a mérés megbízhatóságát, és a feszültség visszafejtését. Továbbá, a próbatestben maradandó feszültségek keletkezhetnek a térhálósítási hőmérsékletéről történő lehűlés során, a két anyag eltérő hőtágulási együtthatóiból fakadóan.

A ragasztással végzett eljárás valamivel kisebb szakadási nyúláshoz vezet a többi módszernél tapasztaltnál képest, de a próbatest továbbra is jellemzően a szabad hosszon megy tönkre. A ragasztás maga azonban némi hozzáértést és különös figyelmet igényel, mert a nagy kiterjedésű rétegelt lemezek közé könnyen légbuborékok szorulhatnak. Fontos előny, hogy a szobahőmérsékleten végzett ragasztás során nem keletkezik hőfeszültség a rétegek között.

A rátérhálósított védőréteg típus esetén is számolni kell a hőfeszültségekkel, azonban a rétegek határfelülete sík és a tapasztalatok alapján a három módszer közül ez a típus érte el a legnagyobb szakadási nyúlást.

Babak Fazlali és társai [11] kutatásukban azt találták, hogy az általuk vizsgált, több, különböző típusú próbatest közül ez a próbatest típus érte el a legnagyobb szakadási nyúlást. Az ő esetükben együtt térhálósított módszerrel készültek a minták.

## 2.4. Piskóta és pillangó típusú próbatestek

Bármilyen szakító (és fásasztó) próbatest esetén klasszikus módszer a nyúlás és tönkremenetel helyének beállítására a szabad hossz elkeskenyítése. Az így kapott próbatest típus elterjedt megnevezése a „piskóta” angolul „dogbone” vagy „dumbbell” próbatest.

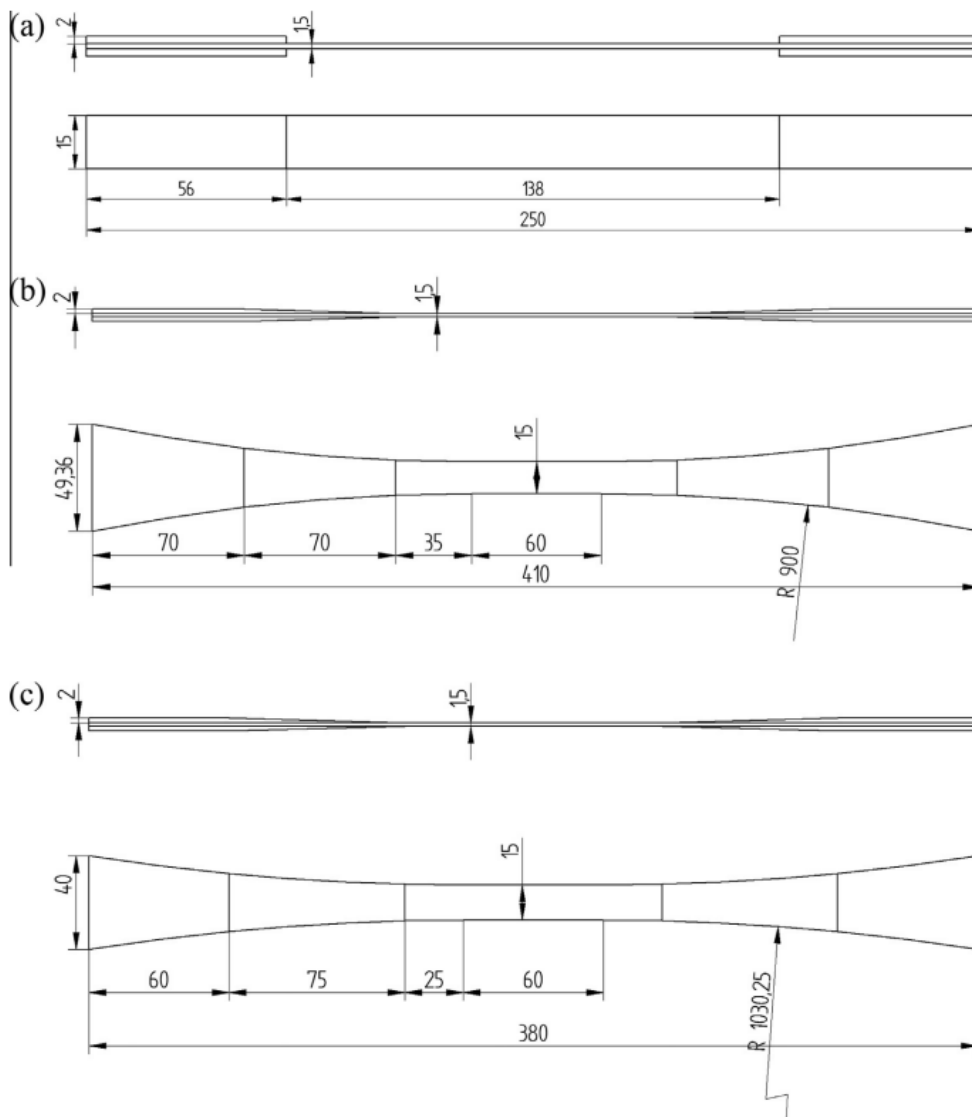
A szabad hossz elvékonyítása izotrop anyagoknál magától értetődő technika, azonban erősen anizotrop és szálerősített kompozitoknál a klasszikus piskóta alak nem mindig kivitelezhető eredményesen, mert a próbatesten végig nem futó erősítő szálak a terhelés hatására lerepednek és terhelésfelvevő képességük megszűnik.

A De Baere és társai [15] 0-90°-os szál elrendezésű szénszál erősítésű kompozit próbatestek húzóvizsgálatára használt klasszikus piskóta alakú próbatest geometriát. Bár a szabványok nem javasolják ezt a típust kompozitok esetén, az eredmények szerint, 0-90°-es szövetnél a piskóta alak hatékonyan csökkenti a feszültséggyűjtő hatást és elősegíti a szabad hosszon történő tönkremenetelt.

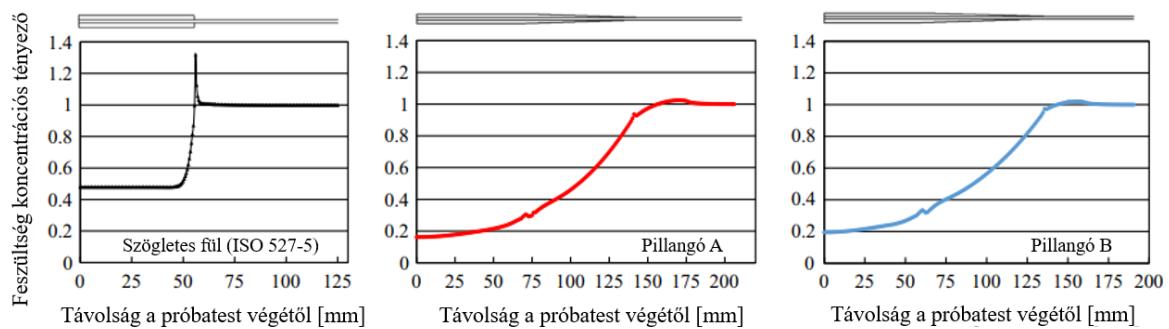
A Dán Műszaki Egyetem (DTU) kutatói hasonló elgondolással egy, a piskóta próbatestekhez hatásmechanizmusában hasonló, de az említett problémát csökkenteni célzó ún. „butterfly” (pillangó) próbatest geometriával álltak elő.

Az új próbatest fülei hosszabbak, a végek felé elvékonyodnak és a befogott rész nagy rádiusszal szélesedik a próbatest végei felé. 2016-ban Korhikoski és társai [16] Két különböző típusú pillangó (7. ábra) és egy az ISO-527-5 és ASTM D3039/D3039M szabványoknak megfelelő próbatestet vizsgált végeselem módszerrel, majd valós, húzó-húzó fásasztási vizsgálatral. Az eredményeket összevetve az látszott, hogy a feszültséggyűjtő hatás lényegesen csökken a pillangó próbatestek esetén (8 ábra). Az ábrákon jól látszik, hogy míg a szabványos próbatesteknél a feszültségek meredek csúcsot mutatnak a fülek végén (9. ábra), a pillangó próbatesteknél sokkal egyenletesebb a feszültségek eloszlása (10. és 11. ábra).

Ugyanakkor, a várakozásnak megfelelően UD kompozitok esetén a pillangó próbatestek nem végigfutó erősítőszálai hajlamosak voltak lerepedni a próbatestről és a ferde végű fülek is jellemzően rétegelválást szenvedtek az ismétlődő terhelés hatására.

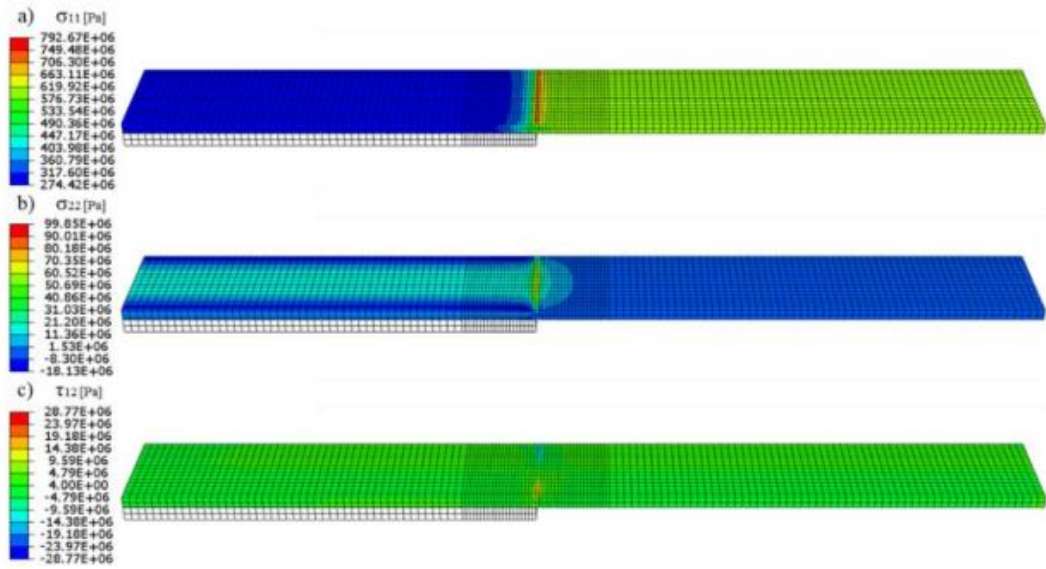


7. **Ábra** A szabványos (a) és az „A” (b) és „B” (c) pillangó próbatest geometriája [16]

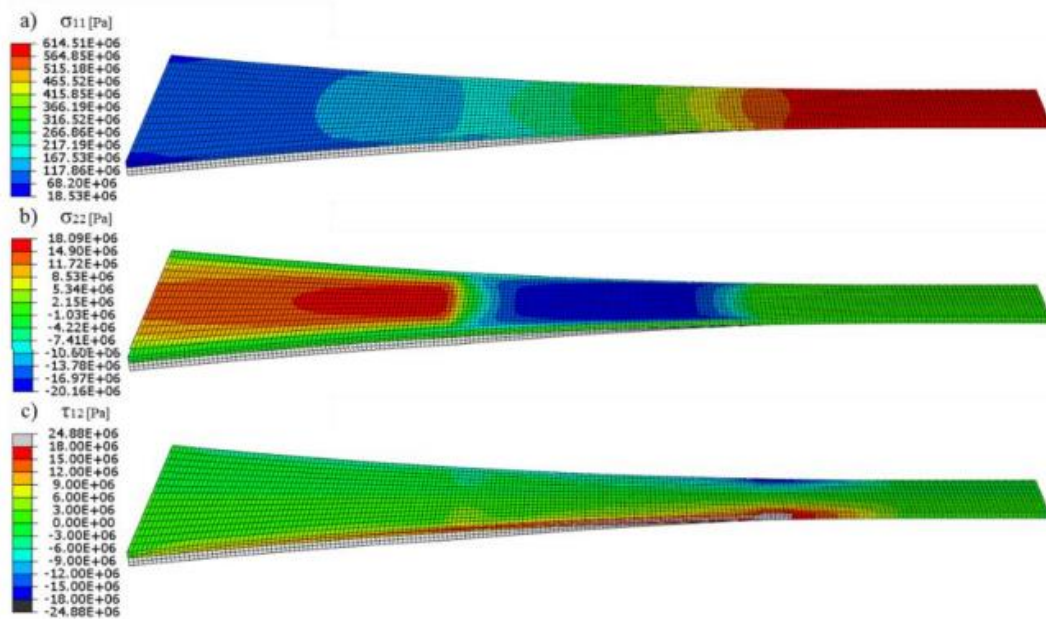


8. **Ábra** A hosszirányú feszültségből eredő feszültségkoncentrációs hatás mértéke a szabványos, a pillangó „A” és a pillangó „B” próbatestek esetében a próbatest hossza mentén. [16]

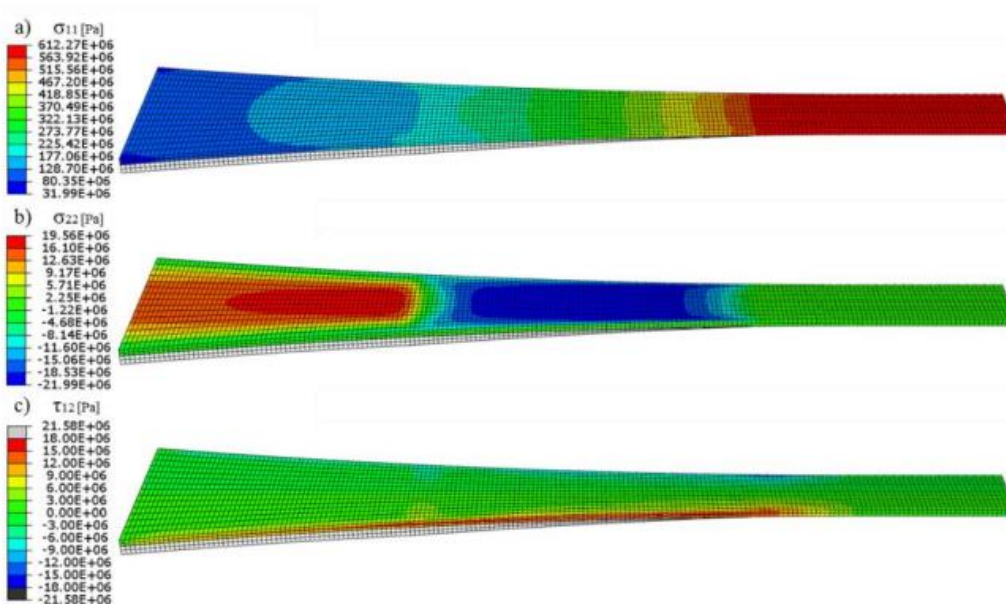




9. Ábra A szabványos próbatest feszültségeloszlása hossz- (a), és keresztirányú (b) valamint nyírófeszültségek (c) szerint [16]



10. Ábra Az új típusú pillangó (A) próbatest feszültségeloszlása hossz- (a), és keresztirányú (b) valamint nyírófeszültségek (c) szerint [16]



11. **Ábra** Az új típusú pillangó (B) próbatetest feszültségeloszlása hossz- (a), és keresztirányú (b) valamint nyírófeszültségek (c) szerint [16]

A pillangó próbatetest egy nagy hátránya az UD kompozit megmunkálásának nehézsége. A lekerekítés nem teszi lehetővé, a más próbatesteknél bevett, vágókoronggal történő geometria kialakítást. Az eddigi kutatásokban többnyire vízsugaras vágással, vagy CNC megmunkálással alakították ki a próbatesteket.

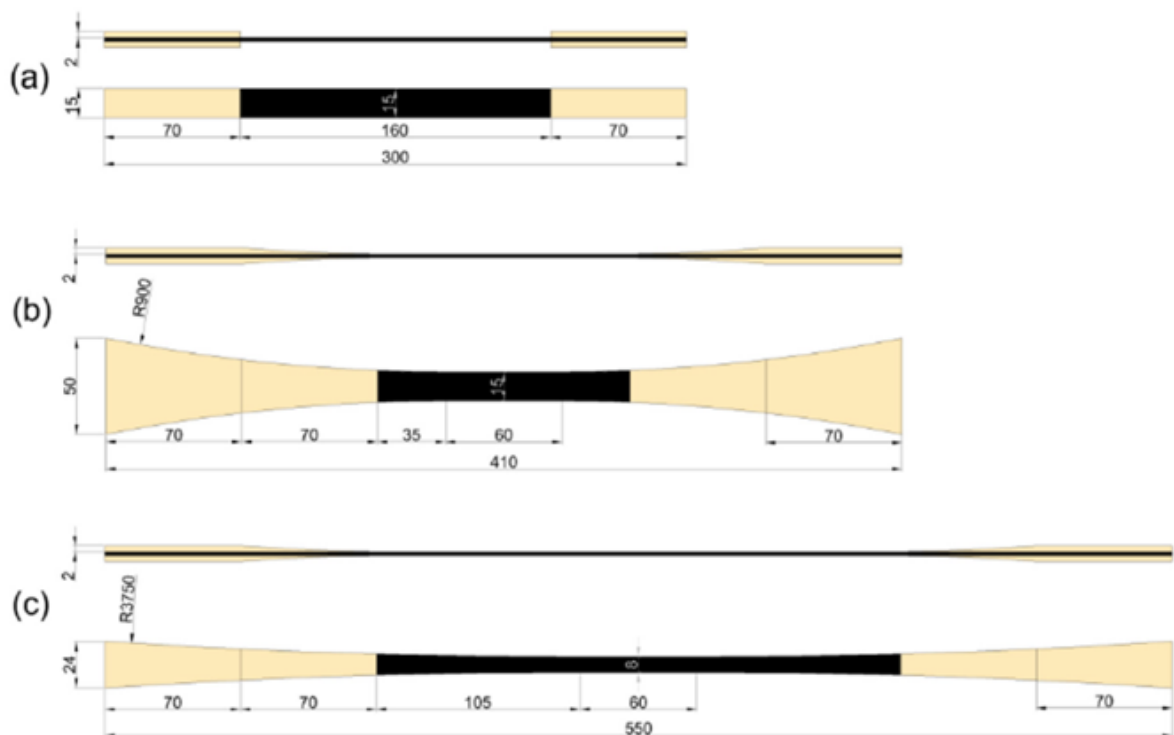
## 2.5. X-pillangó és szendvics X-pillangó próbatestek

2021-ben Kumar és társai [13] a pillangó és szendvics próbatestek sikeréből és hátrányaiból kiindulva 6 különböző típusú próbatestet vizsgáltak. Egy az ISO 527-5-nek és ASTM D3039/D3039M-nek megfelelő egyenes oldalú, szögletes végű fülekkel ellátott próbatestet, egy pillangó próbatestet és egy, a pillangó próbatestet geometriájából kiinduló, jobban elnyújtott, nagyobb rádiusszal szélesedő próbatestet, illetve az ezek folytonos védőrétegekkel ellátott változatait (12 és 13. ábra).

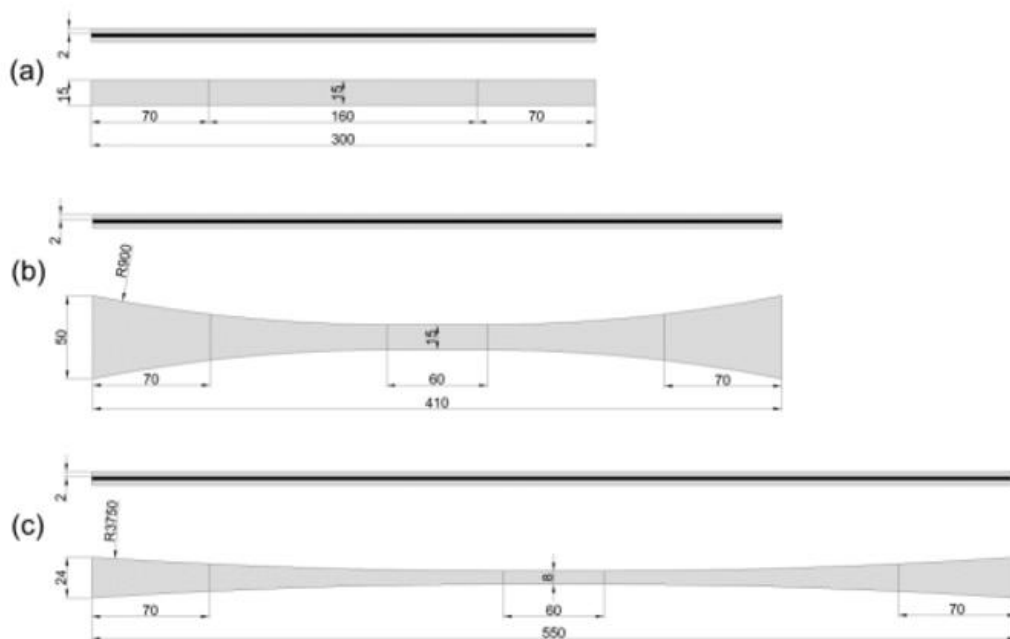
Az X-pillangó próbatestek mögötti elképzelés az, hogy a nagyobb rádiusszal keskenyedő próbatestek kiszélesedő részein csökken a nyíróerő a hagyományosabb pillangó próbatestekhez képest, ezzel csökkentve a szálfelhúzó és lerepedés veszélyét a nem végigfutó erősítőszálakra.

A 2 mm vastag próbatestek vinilészter mátrixú szénszálból készültek. Az ugyancsak 2 mm vastag UD üvegszál erősítésű epoxi kompozit anyagú folytonos védőrétegeket epoxi ragasztóval rögzítették a próbatestek felületére.

A vizsgálat során azt állapították meg, hogy míg a szabványos próbatetek átlagban 1,31%-os nyúlást értek el tönkremenetelkor, a pillangó próbatetek már 1,42%-ot, az X-pillangó pedig 1,44%-ot. A folytonos védőréteg további szakadási nyúlási növekményt eredményezett, leglátványosabb a szendvics X-pillangó próbatest nyúlása 1,53%, ami a szabványos próbatetekhez képest 17%-os nyúlás növekményt jelent (14. ábra). Ezek az eredmények alátámasztották az X-pillangó próbatetek működőképességét, viszont ugyan ezen típus szendvics változata azt bizonyította, hogy az X-pillangó próbatest továbbra is alábecsüli a kompozit anyag maximálisan elérhető szakadási nyúlását.

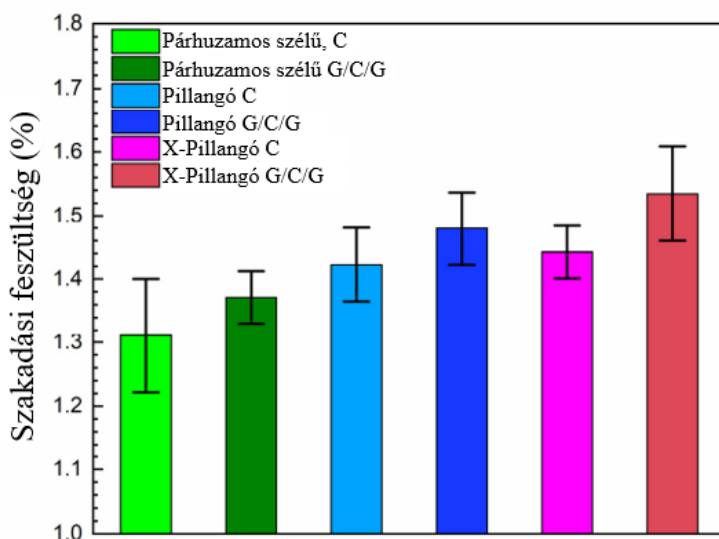


12. Ábra ISO/ASTM szerint szabványos (a) pillangó (b) és X-pillangó (c) próbatest geometriája  
Kumar és társainak kutatásában [13]



13. **Ábra** Párhuzamos szélű szendvics (a) szendvics pillangó (b) és szendvics X-pillangó (c) próbatest geometriája folytonos védőréteggel Kumar és társainak kutatásában [13]

Szénszál erősítésű kompozit	Próbatest geometria		
	Párhuzamos szélű	Pillangó	X-Pillangó
Védőréteg nélkül, C	1.31 ± 0.09	1.42 ± 0.06	1.44 ± 0.04
Folytonos védőréteggel, G/C/G	1.37 ± 0.04	1.48 ± 0.06	1.53 ± 0.07



\*A C védőrétegek nélküli, szénszál erősítésű kompozit, a G/C/G pedig üvegszál erősítésű kompozit védőrétegekkel ellátott szénszál erősítésű kompozit próbatesteket jelöl

14. **Ábra** Kumar és társainak szakadási nyúlás eredményei [13]

## 2.6. A szakirodalom összefoglalása

A kutatók az unidirekcionális szénszál erősítésű kompozit húzópróbatestek kialakításából adódó feszültséggyűjtő helyek jelenségét több új típusú próbatesttel próbálják minimalizálni, illetve megszüntetni. Az új típusú próbatestek különböző irányból közelítik a problémát, az egyes konstrukciók előnyeit és hátrányait a 2. táblázatban foglaltam össze.

Próbatest típus	Szabványos	Próbatest geometria	Fül geometria	Gyárthatóság	Tönkremeneteli források	Közvetlen kiértékelhetőség
Szögletes végű fülekkel ellátott	Igen	Párhuzamos szélű lemez	Egyszerű lemez	Legegyszerűbb. Vágás gyémántkoronggal	A fül végén nagy feszültséggyűjtő hatás van a hirtelen keresztmetszeti változás miatt.	Feszültség és nyúlás is
Ferde végű fülekkel ellátott	Igen	Párhuzamos szélű lemez	Ferde végű lemez	A ferde végű füleket a fül kompozit rétegeinek lépcsős kialakításával, vagy utólagos CNC megmunkálással alakítják ki	A fül hajlamos a rétegelválásra: Ezt követően a feszültségeloszlás hasonló a szögletes végű fülekkel ellátott próbatestekéhez. A rétegelválás dinamikus hatása is ronthatja a próbatestet.	Feszültség és nyúlás is
Nyíl alakú fülekkel ellátott	Nem	Párhuzamos szélű lemez	Nyíl alakú lemez	A fülek Vízugaras vágóval kialakíthatók	A nyílhegy szűk környezetében nagy a feszültséggyűjtő hatás.	Feszültség és nyúlás is
Szendvics	Nem	Párhuzamos szélű lemez	Folytonos (UD) lemez	A folytonos védőréteg ragasztható, rátérhálósítható, vagy a próbatesttel együtt térhálósítható	A folytonos védőrétegek megszüntetik a geometriából eredő feszültséggyűjtő hatást	Csak nyúlás
X-Pillangó	Nem	Nagy rádiusszal keskenyedő	Keskenyedő és ferde végűlemez	Legösszetettebb. A próbatestet és fület egyaránt CNC megmunkálással lehet elkészíteni	A keskenyedő szakaszokon a rétegelválás és szálkirepedések miatt. Ezekből fakadóan dinamikus roncsoló hatás is felléphet.	Feszültség és nyúlás is
Szendvics X-pillangó	Nem	Nagy rádiusszal keskenyedő	Folytonos és keskenyedő lemez	CNC megmunkálás x-y irányban	A folytonos védőrétegek megszüntetik a geometriából eredő feszültséggyűjtő hatást	Csak a nyúlás

2. Táblázat A szakirodalomban jelenleg tárgyalt szabványos és új típusú UD kompozit próbatestek

A feszültséggyűjtő hatás jelenségének megoldására irányuló elképzeléseket három csoportba lehet osztani:

1. A fülek geometriájának optimalizálása a feszültséggyűjtő hely elnyújtásával, például nyíl alakú fülek alkalmazásával,
2. a teljes próbatest geometriájának optimalizálása a próbatest szabad hosszának elkeskenyítésével,
3. a próbatest teljes hosszának védőrétegekkel való takarásával, amellyel a geometriából fakadó feszültséggyűjtő hatás megszűnik.

A szakirodalomban láthattuk, hogy mindhárom elképzelés eredményes lehet a szakadási nyúlások növelése szempontjából. Láthattuk azt is, hogy az egyes elképzelések kombinálása ugyancsak működőképes koncepció lehet [13].

A következő fejezetekben tárgyalt körvizsgálat célja, hogy kiderítse, melyik elképzelés a legeredményesebb és megbízhatóbb a felsorolt három közül, három új és két szabványos próbatest összehasonlításával.

### 3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

#### 3.1. Felhasznált alapanyagok

A körvizsgálat során vizsgált próbatetek mind Toray gyártmányú T800S szénszál erősítésű epoxi kompozit előimpregnált lapokból (prepregből) készültek [17], [0]<sub>5</sub> rétegrenddel. A próbatest végi fülek a próbatest tengelyére 0-90°-os elrendezésű üvegszál szövet/epoxi prepreg alapanyagúak. A szendvics próbatest védőrétegek Hexcel Hexply 913 epoxi gyantával impregnált Owens Corning üvegszálból készültek [0]<sub>4</sub> rétegrenddel (S-Glass/913 epoxy).

A szabványos (szögletes végű és ferde végű fülekkel ellátott) próbatetek végeire kerülő fülek autoklávban készültek és 3M AF126 ragasztófilm segítségével szintén autoklávban építették össze a 300x300 mm-es szénszálal lapokat a füleket képező üvegszálal lemez darabokkal. Végül gyémántkoronggal vágják ki a próbateteket, amelyek így egyúttal a füleket is tartalmazzák.

A nyíl alakú füleket vízszugaras vágás után Araldite 2011 típusú két komponensű epoxi ragasztó felhasználásával ragasztották fel a gyémántkoronggal kivágott próbatetekre külön-külön.

A szendvics próbatetek esetén is Araldite 2011 epoxi ragasztót alkalmaztak az előre kitérhálósított rétegek összeépítéséhez, majd a három rétegű szendvics lemezből gyémántkoronggal vágják ki a próbateteket.

Az X-pillangó próbatetek esetén a fülek üvegszál/epoxi anyagát. 3M DP460 két komponensű epoxi szerkezeti ragasztóval rögzítették, majd az alakos próbateteket CNC géppel vágják ki. Az alapanyagok adatai az 3. és 4. táblázatban láthatók.

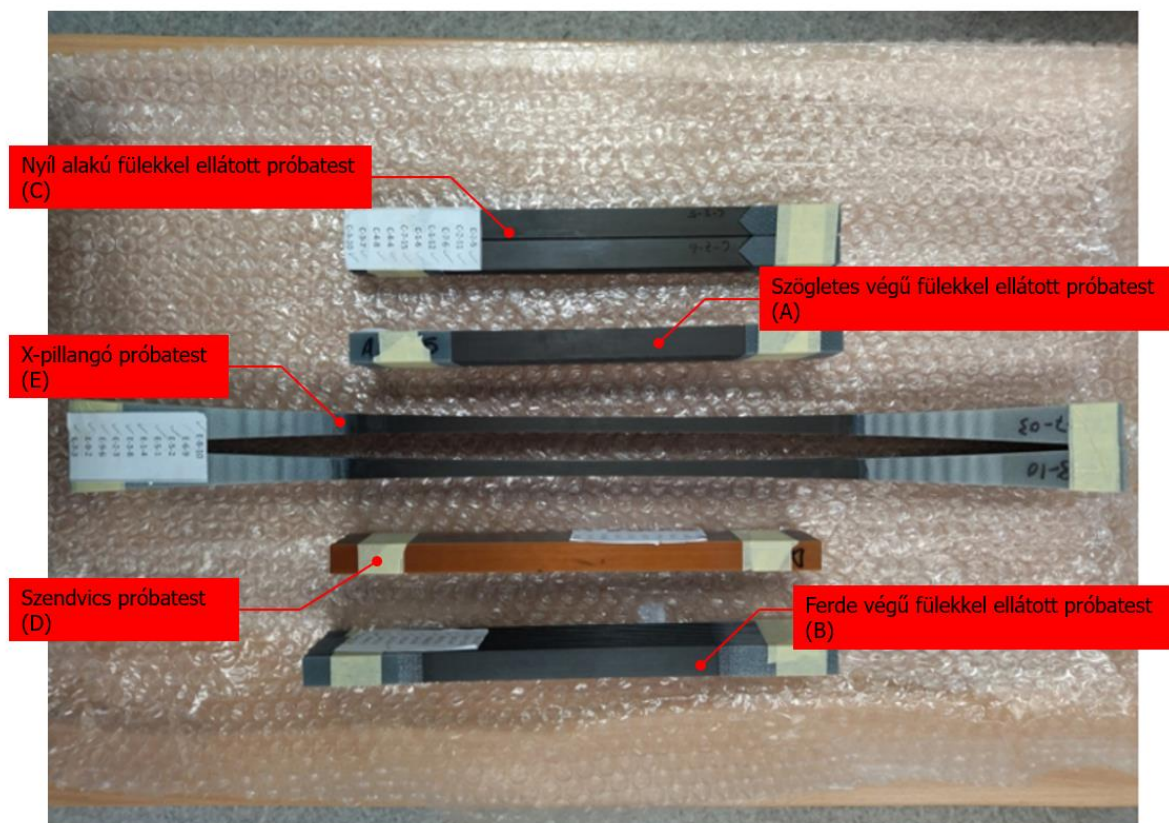
Erősítősál tulajdonságok			
Alapanyag megnevezés	Szakadási nyúlás	Szakító-szilárdság	Rugalmassági modulus
	[%]	[MPa]	[GPa]
T800S (szénszál)	2,0	5880	294
OCV flitstrand S-glass (üvegszál)	3,6-4,4	3300-4100	92

3. Táblázat Az erősítősálak mechanikai tulajdonságai

Prepreg tulajdonságok			
Alapanyag megnevezés	Szál térfogat arány	Névleges kikeményített vastagság	Becsült rugalmassági modulus
	[%]	[mm]	[GPa]
CF/EP (T800S/3900)	55	0,194	163,2
GF/EP S-Glass/913 Üvegszál/epoxi	50	0,25	47,1

4. Táblázat A prepregek tulajdonságai

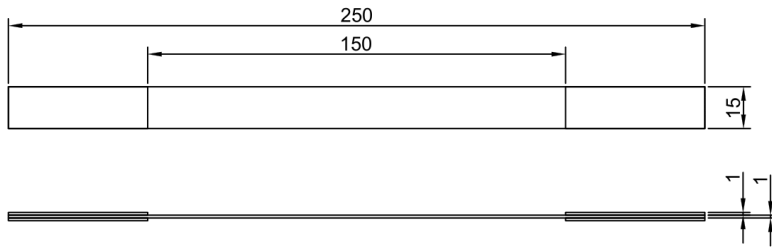
Az elkészült szögletes végű, ferde végű, és nyíl alakú fülekkel ellátott, valamint a szendvics és X-pillangó próbatetek rendre az A, B, C, D, E jelöléseket kapták. A próbatetek a 15. és 16. ábrán megtekinthetők. A próbatetek névleges geometriai adatai az 5. táblázatban láthatók.



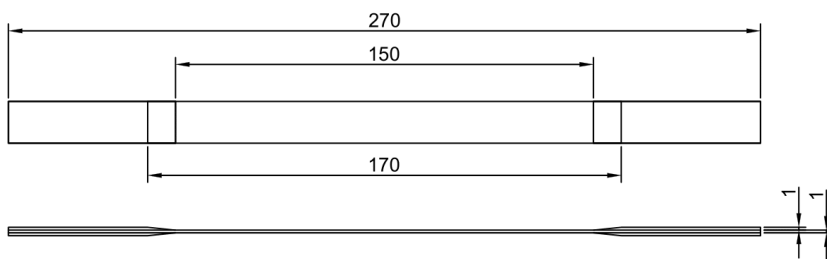
15. Ábra A kutatásban vizsgált próbatetek



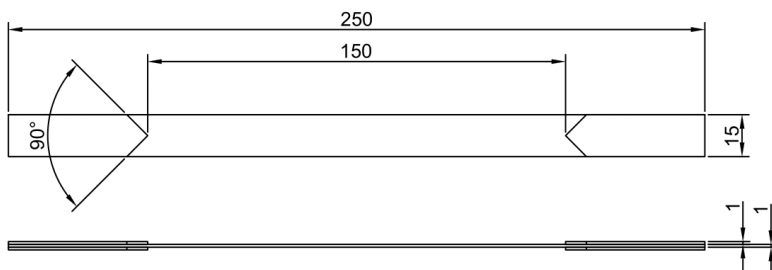
Szögletes végű fülekkel ellátott próbatest (A)



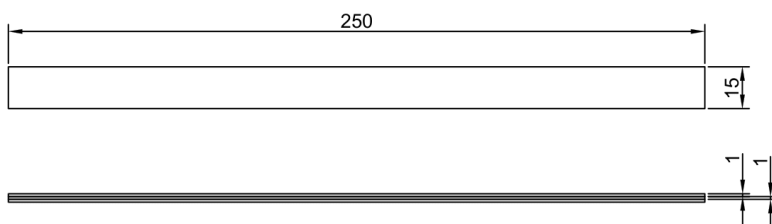
Ferde végű fülekkel ellátott próbatest (B)



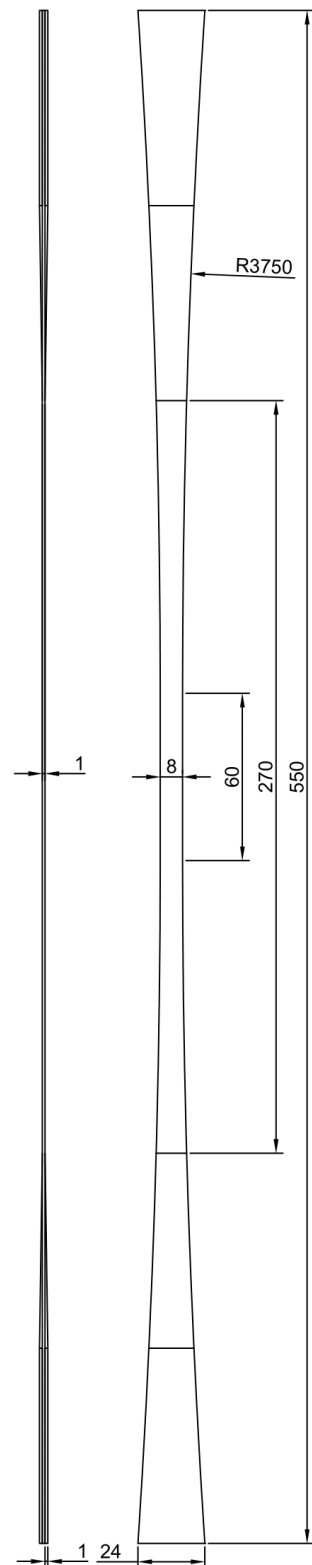
Nyíl alakú fülekkel ellátott próbatest (C)



Szendvics próbatest (D)



X-pillangó próbatest (E)



16. Ábra A vizsgált próbatestek geometriája

Próbatest betűjel (megnevezés)	Névleges szélesség	Névleges vastagság	Névleges teljes hossz	Névleges szabad hossz	Névleges Mérési hossz
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
A (szögletes végű fül, ISO)	15	1	250	150	150
B (ferde végű fül, ISO)	15	1	270	150	150
C (nyíl alakú fül)	15	1	250	150	150
D (szendvics)	15	3	250	-	150
E (X-pillangó)	8	1	550	270	60

\*A mérési hossz a próbatest azon párhuzamos szélű része, amelyen egyenes húzófeszültséget kívánunk kialakítani. Az X-pillangó próbatest esetét kivéve ez megegyezik a szabad hosszal.

### 5. Táblázat A vizsgált próbatestek geometriája

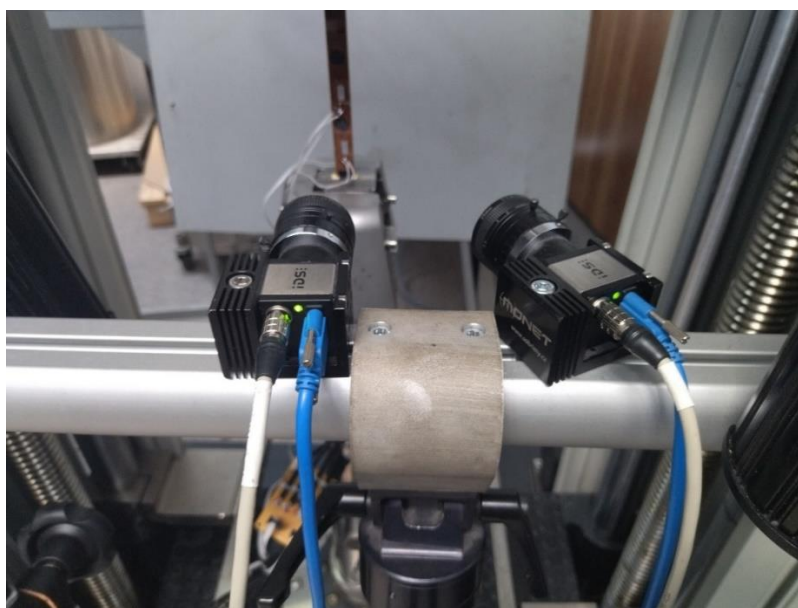
## 3.2. Alkalmazott berendezések

Minden próbatestet a Polimertechnika Tanszék Anyagvizsgáló Laboratóriumában található Zwick Z250 típusú 250 kN-os erőmérő cellával ellátott univerzális anyagvizsgáló géppel vizsgáltam. A szakítógépen manuálisan előfeszíthető, ékpályás, fogas felületű befogó pofákat alkalmaztam.

A próbatestek nyúlását HBM gyártmányú, 6 mm aktív rácshosszú, 350  $\Omega$  ellenállású K-LA11K6/350LE típusú nyúlásmérő bélyegekkel és Sobriety gyártmányú Mercury Monet 3D DIC system video nyúlásmérővel és a hozzá tartozó 5 megapixel felbontású kamerákkal mértem. A nyúlásmérőbélyegek adatgyűjtő egysége HBM gyártmányú Spider 8-30 volt.

## 3.3. Vizsgálati módszerek

A próbatesteket a nagyobb mérési megbízhatóság elérésének érdekében két különböző módszerrel vizsgáltam, nyúlásmérő bélyegekkel és video nyúlásmérővel. Minden próbatest hátoldalára egy, az ellenállás mérés elvén működő nyúlásmérő bélyeget ragasztottam, a húzás tengelyével párhuzamosan. A próbatest elülső oldalára, egymástól ~50 mm távolságra két jelölő foltot (markert) festettem fel, amelyek egymáshoz mért távolságának változását két, egymással 30°-os szöveget bezáró kamerával (17. ábra), és digitális képkorrelációt alkalmazó programmal követtem a vizsgálat során. A kamerák képeit a video nyúlásmérő rendszer dolgozta fel és rögzítette.



17. Ábra A video nyúlásmérő rendszer kamerái kb. 30°-os szögbe állítva

Két kamerára azért van szükség, mert a video nyúlásmérő mérési elvéből fakadóan bármely, a próbatest és a kamera között történő távolság változást a rendszer nyúlásnak érzékel. Ha azonban a nyúlást két, szinkronizált kamerával, 3 dimenzióban mérünk, akkor az ezen mozgásból eredő mérési hibák kiküszöbölhetők.

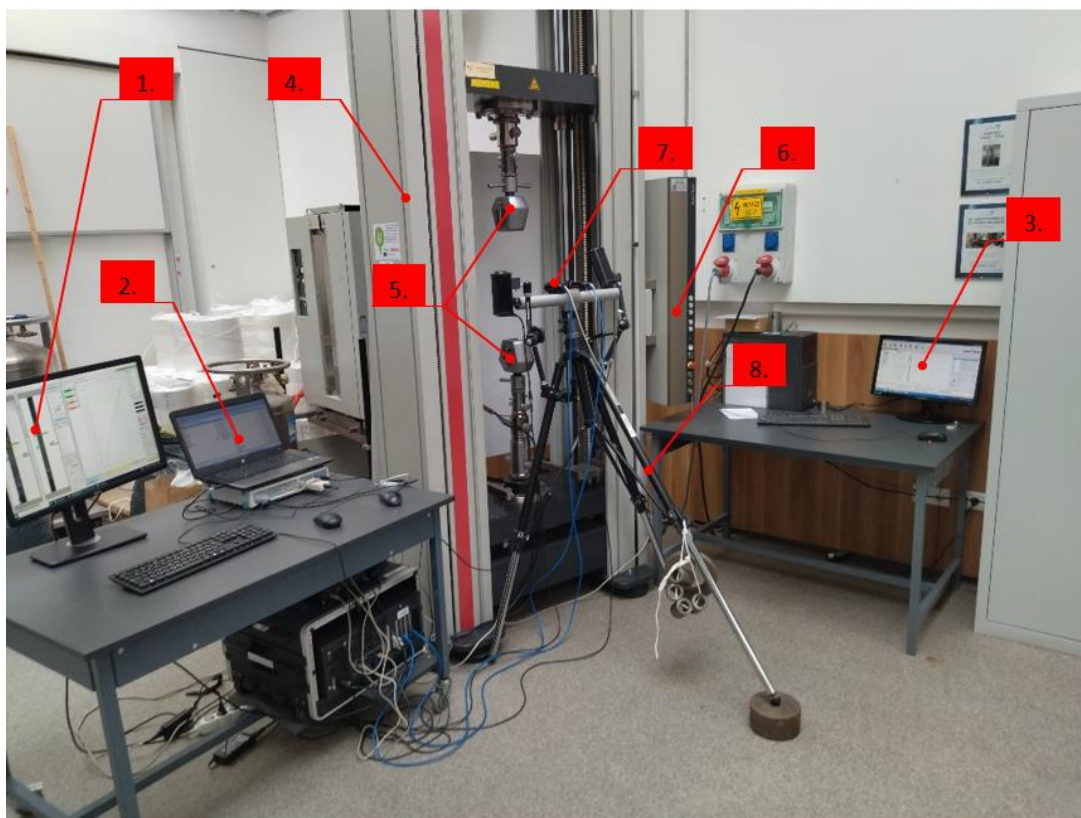
A szakítógépek keresztfejeinek sebességét minden próbatesttípusnál úgy állítottam be, hogy a próbatest 1 perc alatt eredeti hosszához képest kb. 1-3%-ot nyúljon. A beállított húzási sebességek a 6. táblázatban láthatók.

Próbatest	A	B	C	D	E
Húzási sebesség [mm/min]	5	5	5	8	7

6. Táblázat Húzási sebességek

A D típusú próbatestek esetén a próbatestek végeire helyezett csiszolópapír fülek jelentős többlet elmozdulást engedtek az ékpályák számára, mivel a pofabetétek körmei beléjük tudtak hatolni. A többlet elmozdulás miatt nagyobb keresztfej sebességet állítottam be, hogy korlátozzam a mérések időtartamát és közelebb kerüljek az előírt nyúlássebességhez. Az E típusú próbatestek esetén a jelentősen nagyobb kezdeti hossz miatt állítottam be nagyobb keresztfej sebességet.

A vizsgálat mérési elrendezése a 18. ábrán látható.



**18 Ábra** A mérési elrendezés 1: a video nyúlásmérő adatgyűjtő rendszere, 2: a nyúlásmérő bélyeg adatgyűjtő rendszere (spider), 3: a Zwick univerzális anyagvizsgálógép vezérlő és adatgyűjtő rendszere, 4: terhelőkeret, 5: befogó pófák, 6: a Zwick univerzális anyagvizsgálógép manuális vezérlő egysége, 7: a video nyúlásmérő kamerái, 8: a video nyúlásmérő állvány

### 3.4. Előkészületek, mintaelőkészítés

A próbatest hátuljára nyúlásmérőbélyegeket ragasztottam fel. Mielőtt a bélyegeket felragasztottam, a próbatestre egy, az oldalával párhuzamos egyenest rajzoltam, a bélyeget pedig egy átlátszó ragasztószalag segítségével igazítottam mellé, mert a felragasztásánál elsődleges fontosságú, hogy a bélyeg tengelye egytengelyű legyen a húzás tengelyével (19. ábra).

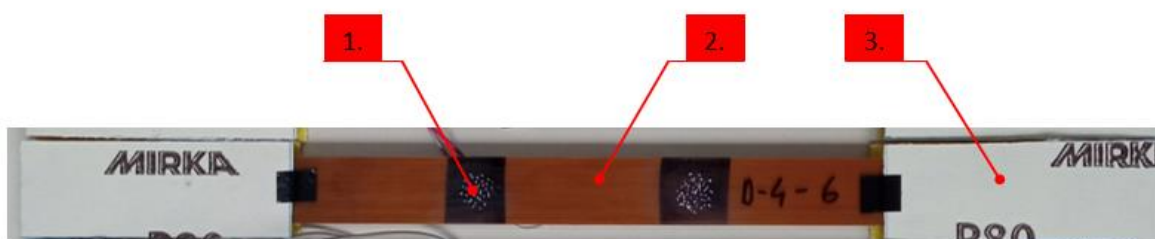
A nyúlásmérő bélyeget és próbatestet összekötő ragasztó anyag kötését elősegítendő, a felületet P800-as szemcseméretű csiszolópapírral megcsiszoltam, majd gondosan zsírtalanítottam, ezután a bélyeget 3M Scotch-Weld SF 100 típusú pillanatragasztó segítségével rögzítettem. Miután a pillanatragasztó megkötött, a ragasztószalagot eltávolítottam és a próbatesten elhelyeztem egy elosztóterminált. Végül az elosztó terminál felületére felforrasztottam a nyúlásmérő bélyegek vezetékeit és az adatgyűjtő hardverrel összeköttetést biztosító vezetékeket.

A video nyúlásmérős méréshez a próbatetek előlapjára, egymástól 50 milliméterre, két jelölő foltot festettem. A jó érzékelhetőség érdekében a felületeket először megcsiszoltam, ezzel matt, nem fénylő felületet létrehozva, majd egy fekete filccel kör alakú foltot rajzoltam, végül a folton kis, fehér pöttyöket rajzoltam, hogy elérjem a kívánt kontraszt hatást (20. ábra).

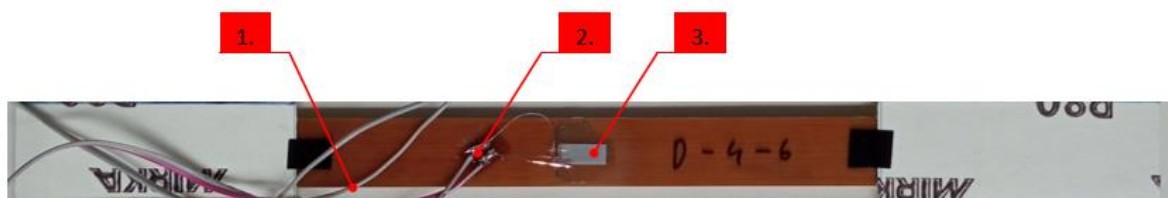
A szendvics próbatetek esetén a próbatest két végére p80-as szemcseméretű csiszolópapírt is elhelyeztem, amely a próbatest és a pófák tapadását segítette elő.



19 Ábra (D típusú) próbatetek nyúlásmérő bélyegek felragasztása előtt. A nyúlásmérőbélyegek helyre igazítását átlátszó ragasztószalag segítségével végeztem



20 Ábra A (D-típusú) próbatest előoldala. 1. jelölő folt, 2. próbatest, 3. csiszolópapír



21 Ábra A (D-típusú) próbatest hátoldala. 1. vezeték, 2. elosztó terminál, 3. nyúlásmérő bélyeg

## 4. KÍSÉRLETEK ÉS KIÉRTÉKELÉS

A kutatás során összesen 51 darab próbatestet vizsgáltam. Ezek közül 11 az ISO/ASTM szabványoknak megfelelő ferde végű fülelkel ellátott próbatest volt A szabványos, szögletes végű fülelkel ellátott és a nem szabványos nyíl alakú fülelkel ellátott, szendvics és X-pillangó próbatestekből pedig 10-10 állt rendelkezésre, azonban az X-pillangó próbatestek vizsgálata során csak 8 mérési eredmény adódott kiértékelhetőnek.

A mérések kiértékelésénél a következők kaptak kiemelt figyelmet;

1. A próbatestek egymáshoz viszonyított szakadási feszültsége és nyúlása,
2. a próbatestek egymáshoz viszonyított károsodási kezdeti feszültsége és nyúlása,
3. és a mért eredmények különbsége a mérési módszer függvényében, azaz mennyiben térnek el a nyúlásmérőbélyeg és a video nyúlásmérő által mért adatok.

### 4.1. A próbatestek eredményeinek összehasonlítása

A most következő táblázatok a teljes mérési adatsorokat és az azokból származó adatokat tartalmazzák, mint az átlag, az adatok szórása és az adatok a mérési eredmények átlagához viszonyított relatív szórása. A táblázatokban jelen vannak a nyúlásmérő bélyeggel és video nyúlásmérővel mért adatok is, valamint egy, az ezen nyúlásmérési módszerek által mért adatok eltérését jellemző oszlop is, amelyben a tönkremenetelkor mért nyúlásadatok relatív eltérését mutatom be.

A szögletes végű fülekkel ellátott próbatetek (A) mérési eredményei										
Próbatest megnevezése	Geometria		Rugalmassági modulus	Szakadási nyúlás		Tönkremeneteli feszültség	Károsodás kezdetéhez tartozó nyúlás		Feszültség a károsodás kezdetekor	A tönkremenetelkor mért nyúlás adatok relatív eltérése
	Szélesség	Vastagság		Nyúlásmérő bélyeg	Video nyúlásmérő		Nyúlásmérő bélyeg	Video nyúlásmérő		
	[mm]	[mm]		[GPa]	[%]		[%]	[MPa]		
A1	15,01	0,958	145,3	1,93	1,91	3217,7	-	-	-	0,71
A2	14,83	0,970	143,3	-	1,98	3140,3	-	-	-	-
A3	15,19	0,973	138,8	1,84	1,81	2782,1	1,66	1,63	2608,6	1,45
A4	15,02	0,975	142,8	1,84	1,82	2730,0	1,55	1,56	2465,7	0,65
A5	14,95	0,977	142,3	1,93	1,92	3148,5	-	-	-	0,56
A6	14,92	0,964	141,8	1,95	1,97	3129,0	1,76	1,74	2878,1	0,91
A7	14,93	0,980	141,8	1,98	1,97	3000,2	1,88	1,90	2970,4	0,65
A8	14,99	0,974	141,3	1,98	1,97	3057,3	1,65	1,63	2604,0	0,68
A9	14,95	0,972	141,3	1,85	1,83	2857,4	1,71	1,70	2702,5	0,81
A10	15,03	0,976	141,3	1,94	1,92	3093,5	-	-	-	0,75
Átlag	14,98	0,97	142,0	1,91	1,91	3015,6	1,70	1,69	2705	-
Szórás	0,09	0,006	1,7	0,06	0,07	168,7	0,11	0,12	188,2	-
Relatív szórás [%]	0,62	0,66	1,18	3,08	3,41	5,59	6,60	7,16	6,96	-

7. Táblázat A szögletes végű fülekkel ellátott próbatetek mérési eredményei

A szögletes végű fülekkel ellátott próbatetek átlagos szakadási nyúlása nyúlásmérő bélyeggel és video nyúlásmérővel is 1,91%-ra adódott. Az átlagos szakadási feszültség 3016 MPa. A korai károsodás jelensége gyakran előfordult; tízből hat próbatest esetén.

A ferde végű fülekkel ellátott próbatetek (B) mérési eredményei										
Próbatest megnevezése	Geometria		Rugalmassági modulus	Szakadási nyúlás		Tönkremeneteli feszültség	Károsodás kezdetéhez tartozó nyúlás		Feszültség a károsodás kezdetekor	A tönkremenetelkor mért nyúlás adatok relatív eltérése
	Szélesség	Vastagság		Nyúlásmérő bélyeg	Video nyúlásmérő		Nyúlásmérő bélyeg	Video nyúlásmérő		
	[mm]	[mm]	[GPa]	[%]	[%]	[MPa]	[%]	[%]	[MPa]	[%]
B1	14,94	0,971	143,0	1,88	1,86	2895,1	1,63	1,62	2603,8	1,01
B2	15,10	0,976	141,5	1,84	1,81	2735,4	1,73	1,70	2693,5	1,39
B3	15,12	0,980	140,3	1,96	1,95	3117,9	-	-	-	0,76
B4	15,10	0,977	143,8	1,89	1,87	3061,5	1,79	1,76	2933,9	0,96
B5	15,08	0,967	140,8	1,74	1,72	2693,1	1,56	1,54	2459,9	1,15
B6	15,07	0,979	139,8	1,92	1,90	3087,4	-	-	-	0,97
B7	15,15	0,979	142,3	1,77	1,74	2835,7	-	-	-	1,57
B8	15,25	0,975	145,3	1,97	1,96	3255,5	-	-	-	0,74
B9	15,11	0,965	142,3	1,89	1,87	3060,8	1,75	1,73	2856,0	0,88
B10	15,11	0,973	145,6	1,95	1,92	3106,9	1,89	1,99	3095,7	1,65
B11	15,07	0,974	143,3	1,98	1,96	3208,7	1,71	1,68	2794,4	0,92
Átlag	15,10	0,97	142,5	1,89	1,87	3005,3	1,73	1,72	2777	-
Szórás	0,07	0,005	1,9	0,08	0,08	187,4	0,11	0,14	212,2	-
Relatív szórás [%]	0,48	0,49	1,34	4,26	4,41	6,24	6,26	8,14	7,64	-

8. Táblázat A ferde végű fülekkel ellátott próbatetek mérési eredményei

A szabványos próbatetek között az átlagos szakadási nyúlásokat és szakadási feszültségeket tekintve minimális eltérés van. Az 1,89%-os nyúlásmérő bélyeggel és 1,87%-os video nyúlásmérővel mért átlagos szakadási nyúlás értékek csupán -0,02% és -0,04% eltérést jelentenek a szögletes végű fülekkel ellátott próbatetek átlagos szakadási nyúlásához képest, ami, mint azt később tárgyalom, statisztikailag nem szignifikáns (ld.: 4.2. Szignifikancia vizsgálatok). A ferde végű fülekkel ellátott próbatestnek ez alapján nincsen gyakorlati előnye az egyszerűbben gyártható, szögletes végű fülekkel ellátott próbatestekkel szemben. A próbatest típusnál jellemzően a fülek részleges elválása is fellépett a mérések során (22. ábra). Mindezek összhangban vannak a szakirodalomban bemutatott jelenségekkel [7]. A korai károsodások előfordulása itt is gyakori volt, tizenegy próbatestből hétnél lehetett megfigyelni. Oka elsősorban a fülek ferde szakaszainak a próbatestektől történő elválása volt.





22. **Ábra** Ferde végű fülekkel ellátott próbatest a húzóvizsgálat után. A fülek részleges elválása gyakran előfordult

A nyíl alakú fülekkel ellátott próbatestek (C) mérési eredményei										
Próbatest megnevezése	Geometria		Rugalmassági modulus	Szakadási nyúlás		Tönkremeneteli feszültség	Károsodás kezdetéhez tartozó nyúlás		Feszültség a károsodás kezdetekor	A tönkremenetelkor mért nyúlás adatok relatív eltérése
	Szélesség	Vastagság		Nyúlásmérő bélyeg	Video nyúlásmérő		Nyúlásmérő bélyeg	Video nyúlásmérő		
	[mm]	[mm]		[GPa]	[%]		[%]	[MPa]		
<b>C1</b>	15,05	0,978	142,3	1,91	1,90	3100,5	1,89	1,88	3077,2	0,68
<b>C2</b>	15,33	0,989	140,8	1,96	1,94	3053,4	1,47	1,47	2301,4	1,04
<b>C3</b>	15,24	0,982	144,3	1,97	1,95	3145,9	1,93	1,92	3126,4	0,93
<b>C4</b>	15,10	0,984	142,8	1,93	1,93	3103,9	1,76	1,75	2828,6	0,15
<b>C5</b>	15,04	0,974	144,3	1,97	1,95	3178,3	-	-	-	1,30
<b>C6</b>	15,08	0,971	140,8	1,96	1,94	3120,6	-	-	-	0,76
<b>C7</b>	15,02	0,972	143,3	1,97	1,95	3128,2	1,54	1,52	2447,7	0,93
<b>C8</b>	15,05	0,974	144,8	1,97	1,88	3169,8	1,57	1,55	2528,3	4,48
<b>C9</b>	15,13	0,971	142,3	1,91	1,90	3088,4	1,88	1,86	3046,6	0,98
<b>C10</b>	15,23	0,969	141,8	1,99	1,98	3241,4	-	-	-	0,52
<b>Átlag</b>	15,13	0,98	142,7	1,95	1,93	3133,1	1,72	1,71	2765	-
<b>Szórás</b>	0,11	0,007	1,4	0,03	0,03	53,5	0,19	0,19	337,4	-
<b>Relatív szórás [%]</b>	0,70	0,68	1,00	1,34	1,58	1,71	11,15	11,12	12,20	-

9. **Táblázat** A nyíl alakú fülekkel ellátott próbatestek mérési eredményei

Az 1,95%-os nyúlásmérő bélyeggel és 1,93%-os video nyúlásmérővel mért szakadási nyúlás és 3133 MPa feszültség értékekkel a nyíl alakú fülekkel ellátott próbatestek átlagosan nagyobb szakadási nyúlást és feszültséget értek el, mint a szabványos próbatestek. Mindezt az eredmények körülbelül fele akkora szórásával, amiből következik, hogy ennek a próbatest konstrukciónak a megbízhatósága is nagyobb lehet. A korai károsodások előfordulása a szabványos próbatestekéhez volt hasonló. Oka minden bizonnyal, a nyíl alakú fülek, pofák alól kilógó néhány mm-es végének elválása lehetett a próbatesttől.

A szendvics próbatetek (D) mérési eredményei										
Próbatest megnevezése	Geometria		Rugalmassági modulus *	Szakadási nyúlás		Tönkremeneteli feszültség**	Károsodás kezdetéhez tartozó nyúlás		Feszültség a károsodás kezdetekor**	A tönkremenetelkor mért nyúlás adatok relatív eltérése
	Szélesség	Vastagság		Nyúlásmérő bélyeg	Video nyúlásmérő		Nyúlásmérő bélyeg	Video nyúlásmérő		
	[mm]	[mm]		[GPa]	[%]		[%]	[Mpa]		
D1	15,18	3,607	61,3	2,00	1,99	3302,1	-	-	-	0,34
D2	15,25	3,593	62,8	2,02	2,02	3350,2	1,98	1,99	3295,8	-0,05
D3	15,17	3,560	64,8	1,95	1,97	3259,3	-	-	-	-1,19
D4	15,15	3,615	62,8	2,02	2,02	3343,4	-	-	-	0,25
D5	15,15	3,542	63,3	1,99	1,98	3270,3	-	-	-	0,55
D6	15,15	3,645	63,0	1,91	1,90	3121,4	-	-	-	0,71
D7	15,19	3,563	64,3	1,96	1,94	3195,4	-	-	-	1,10
D8	15,07	3,517	63,8	1,97	1,98	3270,8	-	-	-	-0,07
D9	15,07	3,602	63,3	1,90	1,90	3130,6	-	-	-	-0,09
D10	15,14	3,599	62,8	1,99	1,99	3289,3	1,78	1,81	2961,5	0,15
Átlag	15,15	3,58	63,2	1,97	1,97	3253,3	1,88	1,90	3128,6	-
Szórás	0,05	0,038	1,0	0,04	0,04	80,0	0,15	0,13	236,3	-
Relatív szórás [%]	0,36	1,06	1,52	2,13	2,19	2,46	7,79	6,75	7,6	-

\*Az alacsony rugalmassági modulusra vonatkozó értékek a szendvics konstrukcióból adódnak.

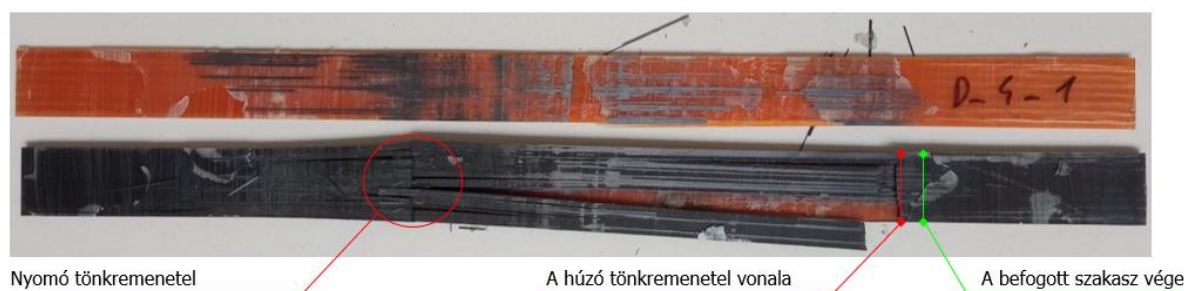
\*\*A szendvics próbatetek szénszál rétegében ébredő feszültség értékeiket mestergörbe segítségével közelítettem.

#### 10. Táblázat A szendvics próbatetek mérési eredményei

Korai károsodás ritkán, mindössze kétszer fordult elő. A video nyúlásmérővel és nyúlásmérő bélyeggel is átlagosan 1,97%-nak mért szakadási nyúlás és az ebből becsült 3253 MPa értékű átlagos szakadási feszültség jelentősen meghaladta a szabványos próbatetek eredményeit. A becslés módszerét a 4.3. Görbe illesztés és szakadási feszültség becslés a szendvics próbatetek kiértékeléséhez fejezetben tárgyalom.

A folytonos védőrétegekkel ellátott próbatetek, a várakozásoknak megfelelően, a szénszál réteg szakadása után is egy darabban maradtak. Ezért ezeket a felnyitást követően megvizsgálhattam, kérdés esetén ellenőrizhettem a szénszál réteg tönkremenetelének pontos helyét (23. ábra).

Ez egy új, nagyon hasznos lehetőség, amely a hagyományos próbatétel típusok esetén nem állt rendelkezésre. A megvizsgált szendvics próbatéteken az látszott, hogy szinte minden esetben a szabad hosszban történt a tönkremenetel. A 23. ábrán látható próbatésten megfigyelhető volt a szendvics próbatétek tönkremenetelét követő folyamat is, amely során a szénszál erősítésű kompozit anyag szakadása után a megszűnő terhelés következtében felszabaduló rugalmas energia hatására a szénszál erősítésű kompozit réteg nagy sebességgel húzódik vissza és egy ponton eltörik a dinamikus fellépő nyomóerő hatására. A nyomó jellegű törés helyén nem ritka, hogy össze is csúsznak a réteg darabjai.



**23. Ábra** Egy szendvics próbatétel a húzóvizsgálatot követően. A próbatétel szénszál/epoxi rétege szinte teljes egészében a védőrétegek között maradt

Az X-pillangó próbatétek (E) mérési eredményei										
Próbatétel megnevezése	Geometria		Rugalmassági modulus	Szakadási nyúlás		Tönkremeneteli feszültség	Károsodás kezdetéhez tartozó nyúlás		Feszültség a károsodás kezdetekor	A tönkremenetelkor mért nyúlás adatok relatív eltérése
	Szélesség	Vastagság		Nyúlásmérő bélyeg	Video nyúlásmérő		Nyúlásmérő bélyeg	Video nyúlásmérő		
	[mm]	[mm]		[GPa]	[%]		[%]	[MPa]		
E1	8,03	0,972	140,8	1,94	1,92	3132,0	-	-	-	1,18
E2	8,01	0,981	143,8	1,89	1,87	3083,9	-	-	-	1,00
E3	7,97	0,949	142,8	1,95	1,94	3131,7	1,84	1,82	3016,1	0,25
E4	8,00	0,968	143,8	1,89	1,88	3055,8	-	-	-	0,34
E5	8,09	0,962	141,8	1,86	1,85	2905,2	1,75	1,74	2834,3	0,45
E6	8,01	0,972	141,8	2,02	1,99	3247,6	1,91	1,88	3123,0	1,28
E7	8,31	0,961	143,3	1,87	1,84	2996,2	-	-	-	1,69
E8	7,96	0,974	141,8	1,93	1,91	3109,5	-	-	-	0,95
Átlag	8,03	0,97	142,4	1,92	1,90	3082,7	1,83	1,81	2991	-
Szórás	0,11	0,009	1,1	0,05	0,05	101,7	0,08	0,07	146,0	-
Relatív szórás [%]	1,33	0,95	0,77	2,71	2,68	3,30	4,37	3,95	4,9	-

**11. Táblázat** Az X-pillangó próbatétek mérési eredményei

Az X-pillangó próbatetek szakadási nyúlása 1,92% a nyúlásmérő bélyeg és 1,90% a video nyúlásmérő módszerekkel mérve. A szakadási feszültség 3083 MPa-nak adódott. Ezek az eredmények a gondos tervezés és bonyolult kivitelezés tükrében meglepően alacsonyak. A szabványos ferde végű fülekkel ellátott és az X-pillangó próbateteknél egyaránt jellemző volt a fülek részleges leválása (22. és 24. ábra), ami a viszonylag alacsony nyúlás értékek fő okozója lehet ezeknél a típusoknál.



24. Ábra X-pillangó próbatest a húzóvizsgálat után. Ennél a típusnál, hasonlóan a ferde végű fülekkel ellátotthoz, jellemző volt a fülek részleges elválása

A szabványos próbatetek átlagos szakadási nyúlása elmaradt az új típusú próbatetekétől. A legnagyobb átlagos szakadási nyúlást a várakozásoknak megfelelően a szendvics próbatest érte el, amit szorosan követett a nyíl alakú fülekkel ellátott próbatest típus. A nyíl alakú fülekkel ellátott próbatetek eredményeinek átlagos szórása a legkisebb.

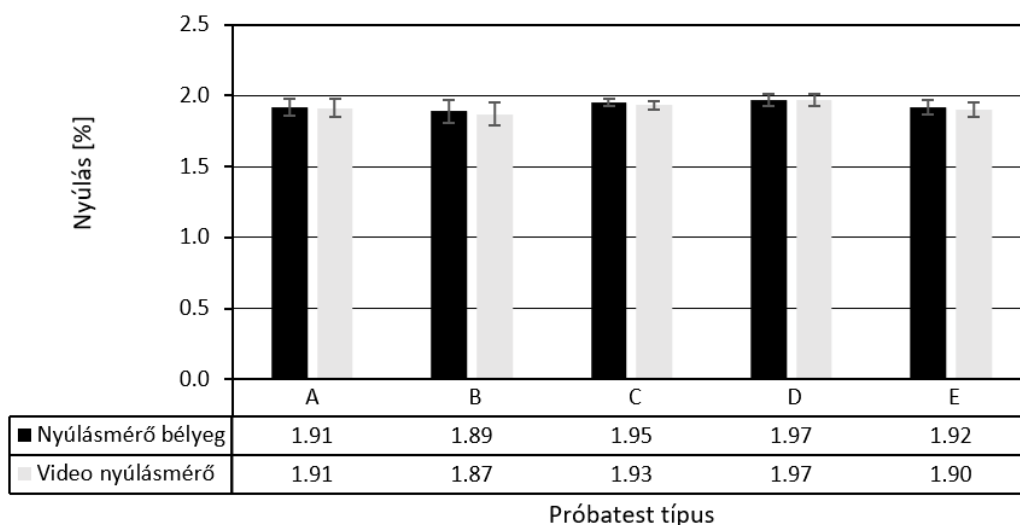
A nem szabványos próbatetek között az X-pillangó érte el a legkisebb átlagos nyúlást és eredményeiben nem különbözik sokkal a szögletes végű fülekkel ellátott próbatesttől. A szabványos próbatetek között a ferde végű fülekkel ellátott próbatetek meglepően alacsony átlagos szakadási nyúlást értek el a többi próbatest típushoz képest, és a legnagyobb átlagos szórást adták (7.-11. és 12 táblázat) (25. ábra).

#### A mérési eredmények átlagainak összehasonlítása

Próbatest típus	Átlagos geometria		Átlagos rugalmassági modulus	Átlagos tönkremeneteli nyúlás		Átlagos tönkremeneteli feszültség
	Szélesség	Vastagság		Nyúlásmérő bélyeg	Video nyúlásmérő	
	[mm]	[mm]	[GPa]	[%]	[%]	[MPa]
A	14,98 (0,62)	0,972 (0,66)	142,0 (1,18)	1,91 (3,08)	1,91 (3,41)	3015,6 (5,59)
B	15,10 (0,48)	0,974 (0,49)	142,5 (1,34)	1,89 (4,26)	1,87 (4,41)	3005,3 (6,24)
C	15,13 (0,70)	0,976 (0,68)	142,7 (1,00)	1,95 (1,34)	1,93 (1,57)	3133,1 (1,71)
D	15,15 (0,36)	3,584 (1,06)	63,2 (1,52)	1,97 (2,13)	1,97 (2,19)	3253,3 (2,46) *
E	8,03 (1,33)	0,969 (0,95)	142,4 (0,77)	1,92 (2,71)	1,90 (2,68)	3082,7 (3,30)

\*A szendvics próbatetek szénszál rétegében ébredő feszültség értékeiket mestergörbe segítségével közelítettem.

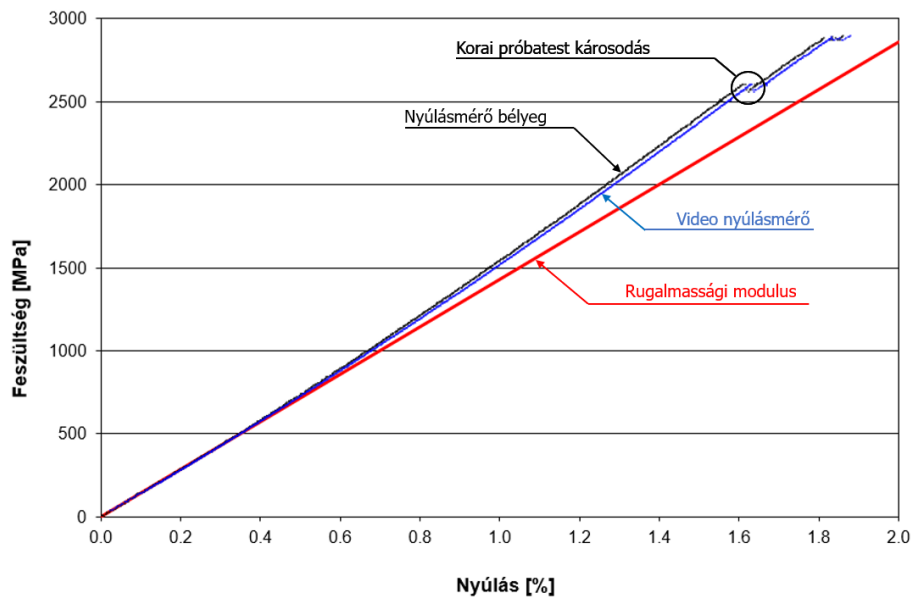
12. Táblázat A mért eredmények összehasonlítása. A zárójelben található értékek a relatív szórásokat mutatják %-ban



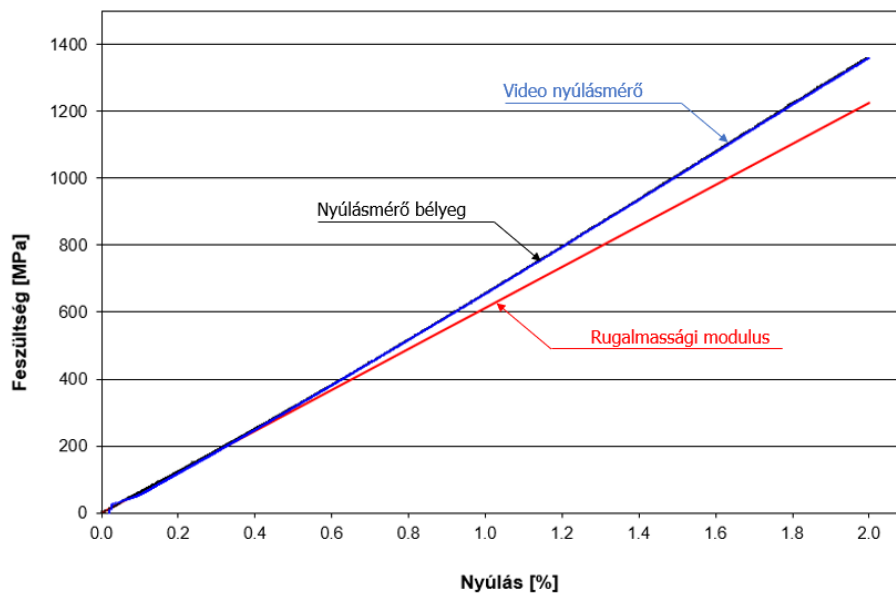
25. Ábra A próbatestek szakadási nyúlása nyúlásmérő bélyeggel és video nyúlásmérővel

A video nyúlásmérő és nyúlásmérő bélyeg adatait megfigyelve az látszik, hogy a video nyúlásmérő mérési pontjai általában a mérés teljes ideje során folyamatosan, egyre nagyobb mértékben maradnak el a nyúlásmérőbélyeg mérési pontjaitól. Ez a B-próbatestek egy kiragadott feszültség-nyúlás ábrájában is jól látszik (26. ábra). Azonban az eltérés nagysága a tönkremenetel pillanatában az 51 mérésből mindössze 15-nél volt 1%-nál nagyobb. Kiugróan nagy érték (4,48%-os eltérés) csak egyszer fordult elő. Mivel a tapasztalt eltérés nem számottevő, egyes méréseknél pedig nem is lép fel jól elkülöníthetően, mint ahogy az a D-próbatestek egy ugyancsak kiragadott görbéjén látszik (27. ábra), a továbbiakban csak a video nyúlásmérővel mért nyúlás adatokat közlöm.

Választásom azért esik a video nyúlásmérő adatsoraira, mert nagy mintaszámú húzóvizsgálatok esetén ez a mérési típus könnyebben kivitelezhető és olcsóbb, mivel a nyúlásmérő bélyegek felragasztása precíz és időigényes feladat, továbbá a jelentős költséget képviselő bélyegek egyszer használatosak.



26. **Ábra** Egy kiragadott szabványos, ferde végű fülelkel ellátott próbatest szakítógörbéje. Megfigyelhető a korai károsodás is, ahol a folytonos görbén először látszik szakadás



27. **Ábra** Egy kiragadott új típusú, szendvics próbatest szakítógörbéje

A 26 és 27 ábrákon jól megfigyelhető a szénszál erősítésű kompozit progresszív, a nyúlás növekedésével egyre merevebb jellege is. Ez elsősorban a szénszálak sajátos lamellás szerkezetének köszönhető, ami húzó terhelés hatására képes kis mértékben a terhelés irányába rendeződni, ezzel növelve a szál merevségét. Emellett egy magasabb szerkezeti szinten is bekövetkezhet az UD kompozitot alkotó eredetileg kisebb-nagyobb orientációs hibát mutató szálak rendeződése, amely szintén növekvő merevséget eredményezhet.

Számos próbatestnél korai károsodás volt megfigyelhető a vizsgálatok során. Ez a jelenség káros, mivel zavarhatja a mérés kiértékelését. A mérőszemélyzetnek korai károsodást szenvedő próbatestek esetén el kell döntenie, hogy pontosan mit fogad el végső tönkremenetelként, ami nem mindig egyértelmű feladat. A korai károsodás gyakorisága adott próbatest típus esetén megtekinthető a 13. táblázatban.

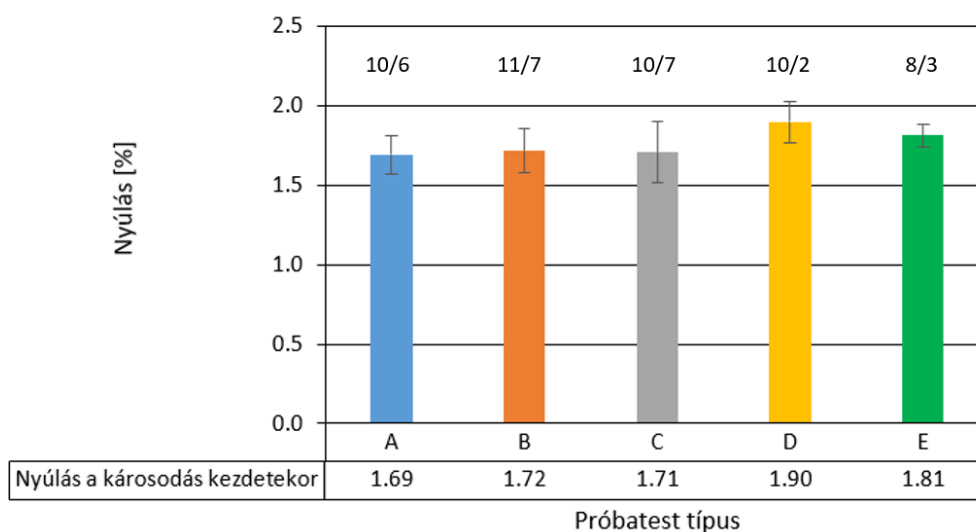
Próbatest típus	Korai károsodást mutató próbatestek aránya	Teljes mintaszám/korai károsodást mutató próbatestek száma	Átlagos nyúlás a károsodás kezdetekor	Károsodás kezdetéhez tartozó nyúlás aránya a szakadási nyúláshoz képest
	[%]	[db]	[%]	[%]
A	60	10/6	1,69 (7,16)	88,48
B	64	11/7	1,72 (8,14)	91,98
C	70	10/7	1,71 (11,15)	88,60
D	20	10/2	1,90 (7,79)	96,45
E	37,5	8/3	1,81 (4,37)	95,26

\*A zárójeles értékek az adott átlagértékek relatív szórásai %-ban

### 13. Táblázat A károsodás kezdetéhez tartozó nyúlások

A 13. táblázatban az látszik, hogy a szabványos próbatestek és a szabványoshoz hasonló nyíl alakú fülekkel ellátott próbatest esetében közel hasonló, a próbatestek számát figyelembe véve gyakorlatilag azonos gyakorisággal fordul elő korai károsodás. Az X-pillangó próbatesteknél ez a gyakoriság felére csökken a szabványos próbatestekéhez képest, a szendvics próbatesteknél pedig még ritkább a korai károsodás.

A károsodás megindulása a szabványos és nyíl alakú fülekkel ellátott próbatesteknél közel azonos nyúlásoknál következik be ~1,7% körül. A szendvics és X-pillangó próbatesteknél ez a nyúlás jellemzően nagyobb. (28. ábra).



**28 Ábra** Károsodás kezdete az egyes próbatípusok esetén. Az oszlopok felett szereplő számok a teljes mintaszámot és a korai károsodást mutató próbatípusok számát mutatják

A károsodás kezdetekor és tönkremenetelkor mért nyúlás és feszültség értékek viszonyára érdemes nagyobb figyelmet fordítani, mert információt adhat a tönkremeneteli okokról. A 13. táblázatban az is látható, hogy adott próbatípus esetén átlagosan hány százalék nyúlás történt meg a károsodás kezdetéig a szakadási nyúláshoz képest. Ez az érték akár információt is szolgáltathat arról, hogy egy próbatípus mennyire strapabíró, azaz, a károsodás kezdetekor bekövetkező roncsolódást követően mennyire tartja meg a terhelésvetítő képességét. Ebből pedig az is elemezhető lehet, hogy egy adott próbatípus mennyire érzékeny a gyártási hibákra, valamint a geometriából eredő tönkremeneteli forrásokra, mint például a ferde fülek rétegelváltásra való hajlama.

Az X-pillangó próbatípusok esetén feltételezhető, hogy a fülek rétegelváltása, és/vagy a nem végigfutó szálak felrepedésének halmozott hatása jobban roncsolja a próbatípusot, mint más típusokat. Ez magyarázhatja az X-pillangó típus vártnál alacsonyabb szakadási nyúlásait is, hiszen az összetett geometria több károsodási és tönkremeneteli forrást is eredményez ennél a típusnál a többihez képest.

A rétegelváltás dinamikus hatása a szabványos próbatípusok esetén is felfedezhető; míg a ferde végű fülekkel ellátott próbatípusok később kezdtek károsodni, mint a szögletes végű fülekkel ellátottak, a ferde végű fülekkel ellátott próbatípusok tönkremenetelére átlagosan némileg hamarabb bekövetkezett.



## 4.2. Szignifikancia vizsgálatok

Ahhoz, hogy megtudjuk, hogy statisztikailag szignifikáns-e a próbatestek átlagos szakadási nyúlásainak különbsége, kétmintás szignifikancia vizsgálatot végeztem minden próbatest pár mérési adatsoraira  $\alpha = 0,05$  szignifikancia szint mellett. Mivel az adatsorok normális eloszlást követnek, egymástól függetlenek és szórásuk nem azonos, ezért Welch-próbát alkalmaztam (14. táblázat).

	A	B	C	D	E
A	1	0.22	0.37	0.039	0.72
B		1	0.036	0.0038	0.32
C			1	0.054	0.16
D				1	0.012
E					1
$\alpha$	0.05				

14. Táblázat A próbatestek átlagos nyúlásértékeinek eltéréseihez tartozó p-értékek

A kutatás adatsorait vizsgálva 95%-os biztonsággal kijelenthető:

1. A szabványos próbatestek átlagos szakadási nyúlásai között nincs szignifikáns különbség.
2. A szendvics (D-típusú) próbatest egyértelműen nagyobb átlagos szakadási nyúlást ért el a szabványos próbatesteknél (A és B típus), és az X-pillangó próbatesteknél ( $p=0,039$  az A-típust,  $p=0,0038$  a B-típust és  $p=0,012$  az E-típust tekintve).
3. A nyíl alakú fülekkel ellátott (C-típusú) próbatest statisztikailag szignifikánsan nagyobb átlagos nyúlást eredményezett, mint a ferde végű fülekkel ellátott (B-típusú  $p=0,036$ ).
4. Az E-próbatest típusnál nem jelenthető ki, hogy szignifikánsan eltérő eredmények születtek a szabványos próbatestekhez képest.

Megjegyzendő, hogy bár a szakadási nyúlást tekintve a Welch-próba nem igazolt a nyíl alakú fülekkel ellátott próbatestnél statisztikailag szignifikáns eltérést a szögletes végű fülel ellátott próbatesthez képest, a nyíl alakú fülekkel ellátott próbatest konzisztensen magas, kis szórású nyúlási eredményeit figyelembe véve, végeredményében egy jobb próbatest konstrukció lehet a szabványosaknál. Ennek megállapítására azonban további vizsgálatokra lesz szükség.

### 4.3. Görbe illesztés és szakadási feszültség becslés a szendvics próbatestek kiértékeléséhez

Konstrukcióból fakadó, hogy a szendvics próbatestek feszültsége közvetlenül nem mérhető. Mivel a szénszál/epoxi réteg jelentősen merevebb az üvegszál/epoxi védőrétegnél, ezért azonos nyúlás mellett eltérő feszültség alakul ki bennük. Kumar és társai [13] görbe illesztést javasoltak a próbatestek szakító görbéinek vizsgálatára azzal a céllal, hogy a korai károsodást mutató próbatestek „fűrészfogas” görbéit kijavítsák, ezzel a kompozit anyagra ideális szakítógörbéket kapva.

Ez a módszer arra is alkalmas, hogy a nem szendvics konstrukciójú próbatestek mérési adatsoraiból mestergörbét szerkesszék, amit felhasználhatok a szendvics próbatestek feszültségeinek kiértékelésére.

A mestergörbe megszerkesztéséhez felhasznált adatsor kiválasztásakor érdemes szem előtt tartani, hogy az adatsorok mennyire adnak ideálisan viselkedő görbéket, azaz:

1. Az átlagos szakadási nyúlás legyen minél nagyobb,
2. a korai károsodás legyen minél ritkább, illetve következzen be a lehető legkésőbb,
3. a próbatestek adott nyúláshoz tartozó feszültségeinek szórása legyen minél kisebb.

A fenti megfontolások alapján a C-típusú próbatestek adatsorát választottam a mestergörbe elkészítésére, mert viszonylag nagy szakadási nyúlásokat ért el kis szórással.

A szénszál erősítésű kompozit, polinomiális görbével leírható, feszültség-nyúlás viselkedése a rugalmassági modulus alábbi definíciójából levezethető, amennyiben feltételezzük, hogy a kezdeti rugalmassági modulus egy, a nyúlással egyenesen arányos konstanstól ( $a$ ) függ. Az adott feszültségi állapothoz tartozó rugalmassági modulus pedig a kezdeti (feszültségmentes állapothoz tartozó) rugalmassági modulusból és a nyúlásból felírt egyenlettel közelíthető.

$$E = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = a\varepsilon + E_0$$

Ahol:

" $a$ " a nyúlás együtthatója,

$E_0$  a kezdeti rugalmassági modulus

Az egyenlőséget integrálva megkapjuk az adott nyúláshoz tartozó feszültséget leíró (3.) egyenletet:

$$\int \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} d\varepsilon = \int (a\varepsilon + E_0) d\varepsilon$$

$$\sigma = \frac{1}{2} a \cdot \varepsilon^2 + E_0 \cdot \varepsilon \quad (3) [13]$$

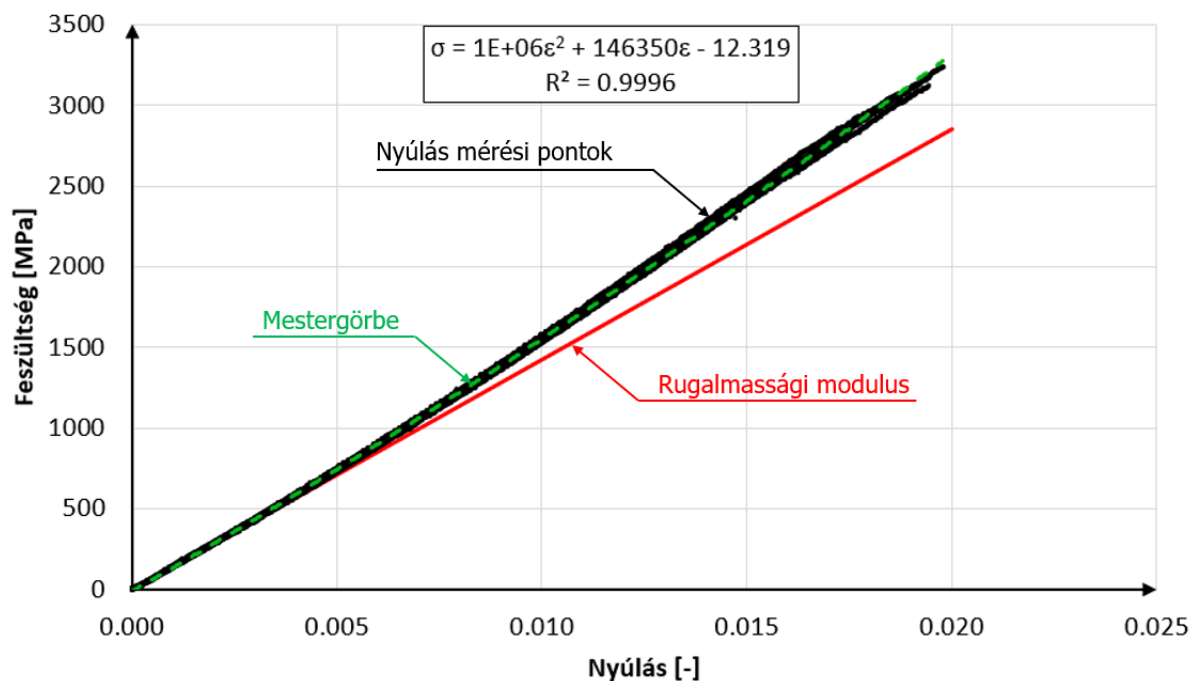
Az  $a$  és  $E_0$  értékeket egy táblázatkezelő program görbeillesztő funkciójával nyertem ki. Ezek az értékek:

$$a = 2000000 \text{ [MPa]}$$

$$E_0 = 146350 \text{ [MPa]}$$

A kiadódó görbe egyenlete tartalmaz egy  $c = -12,319$  [MPa] értékű konstans is, amely a mérési görbék esetleges nullpont eltéréséből eredhet. Mivel a konstans a húzószilárdsághoz képest 1%-nál kisebb hibát jelent, elhanyagolható.

A mestergörbe segítségével becsülhetővé vált a szendvics próbatest szénszál/epoxi kompozit rétegében ébredő feszültség. Megállapítható, hogy a becsült értékek alapján a szendvics próbatestek érték el a legnagyobb átlagos szakadási feszültséget is (13. táblázat). A kapott mestergörbe a 29. ábrán látható.



29. Ábra A C-próbatestek adatsorából származtatott mestergörbe

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálatban 5 különböző típusú próbatestet vettem össze, ebből 2 típus az ISO 527-5 és ASTM D3039/D3039M szerint szabványos szögletes és ferde végű fülekkel ellátott volt.

A vizsgált új típusú próbatestek többnyire nagyobb nyúlást értek el, mint a szabványos típusok, ez alól kivételt képez az X-pillangó próbatest, amely nem ért el statisztikailag szignifikáns nyúlás növekedést.

A szendvics próbatestek érték el a legnagyobb nyúlásokat, és gyakori volt a szabad hosszon történő tönkremenetel is. Viszont ennél a típusnál, a konstrukcióból kifolyólag nem, vagy csak közvetetten visszafejthető a szakadási feszültség. A feszültségek számítására egy lehetséges módszert bemutattam a dolgozatban.

A nyíl alakú fülekkel ellátott próbatestek érték el a második legnagyobb átlagos szakadási nyúlást, és a közvetlenül mért legmagasabb szakadási feszültségeket. Azonban a folytonos védőrétegű próbatestek nyúlásból becsült feszültségei már nagyobbak voltak a nyíl alakú fülekkel ellátott próbatestekénél.

A szabványos ferde végű fülekkel ellátott és a nem szabványos X-pillangó próbatestek a vártnál alacsonyabb szakadási nyúlásokat értek el. Ez betudható az összetettebb geometriából fakadó, többféle tönkremeneteli forrásának, mint:

1. A ferde végű fülek elválása a ferde szakaszon,
2. és az X-pillangó próbatestek nem végigfutó szálainak felrepedése.

A vizsgálat sorozat eredményei arra mutatnak, hogy az UD kompozit próbatest fejlesztések során érdemes az egyszerűbb próbatest geometriát előnyben részesíteni. A fülek tervezésénél az elvékonyítás helyett előnyös lehet a valamilyen állandó vastagságú, alakos konstrukcióra való áttérés. Az új típusú próbatestek előnyeit és hátrányait a 15. táblázatban foglaltam össze.

Próbatest típus	Nyíl alakú fül	Szendvics	X-Pillangó
<b>Előnyök</b>	Magas, kis szórású szakadási nyúlási értékek.	Szignifikánsan nagyobb szakadási nyúlások a szabványos próbatestekénél. A tönkremenetel bizonyíthatóan a szabad hosszon történik meg.	-
<b>Hátrányok</b>	A rendelkezésre álló adatsorok alapján egyelőre nem kijelenthető, hogy a szakadási nyúlások eltérése a szögletes végű füllel ellátott próbatestétől statisztikailag szignifikáns. A korai károsodás zavarhatja a kiértékelést.	A feszültségek kiértékeléséhez mestergörbére, vagy egyéb, közvetett módszerre van szükség.	A mérési eredmények alapján nem ért el magasabb szakadási nyúlásokat a szabványos próbatesteknél. A fülek ferde szakaszai hajlamosak az elválásra. A próbatesten végig nem futó szálak mentén repedések jelenhetnek meg.

15. Táblázat Az új próbatestek eredményeinek összefoglalása

### 5.1. További megoldásra váró feladatok

A szendvics és nyíl alakú fülekkel ellátott próbatestek kiemelkedően jó eredményeket értek el a vizsgálatok során. Mivel mind a két próbatest típusnak sajátos előnyei vannak, ezért érdemes lehet mindkettőt tovább fejleszteni. A szendvics próbatestek feszültségi állapotának visszafejtésére matematikai módszert kell kifejleszteni. Az állandó vastagságú, alakos végű fülek, mint a nyíl alakú fülek továbbfejlesztésére pedig Fazlali és társainak cikke [11] adhat iránymutatást, akik több, a nyíl alakú fülekhez hasonló fül kialakításra tettek javaslatot.

## 6. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] EN ISO 527-5: Plastics. Determination of tensile properties. Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites (2009).
- [2] ASTM D3039/D3039M: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (2011).
- [3] Mazlina Mohd Tahir, Wen-Xue Wang, Terutake Matsubara.: A novel tab for tensile testing of unidirectional thermoplastic composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 32, 1-15, (2017).
- [4] Daniel O. Adams, Donald F. Adams: *Tabbing Guide For Composite Test Specimens*. Department of Mechanical Engineering University of Utah, Salt Lake City, Utah 84109 (2002).
- [5] I. De Baere, W. Van Paepegem, J. Degrieck: On the design of end tabs for quasi-static and fatigue testing of fibre-reinforced composites. *Polymer Composites*, 30, 381-390 (2008).
- [6] I. De Baere, W. Van Paepegem, M. Quaresimin, J. Degrieck: On the tension–tension fatigue behaviour of a carbon reinforced thermoplastic part I: Limitations of the ASTM D3039/D3479 standard. *Polymer Testing*, 30, 625-632 (2011).
- [7] M. Hojo, Y. Sawada, H. Miyairi: Influence of clamping method on tensile properties of unidirectional CFRP in 0° and 90° directions — round robin activity for international standardization in Japan. *Composites*, 25, 786-796 (1994).
- [8] V. L. Kulakov, Yu. M. Tarnopol'skii, A. K. Arnautov, J. Rytter: Stress–Strain State In The Zone Of Load Transfer In A Composite Specimen Under Uniaxial Tension. *Mechanics of Composite Materials*, 40, 91-1000 (2004).
- [9] Georgii G. Portnov, Vladimir L. Kulakov, A. K. Arnautov: A refined stress-strain analysis in the load transfer zone of flat specimens of high-strength unidirectional composites in uniaxial tension 1. Theoretical analysis. *Mechanics of Composite Materials*, 42, 547-554 (2006).
- [10] Georgii G. Portnov, Vladimir L. Kulakov, A. K. Arnautov: A refined stress-strain analysis in the load transfer zone of flat specimens of high-strength unidirectional composites in uniaxial tension 2. Finite-element parametric analysis. *Mechanics of Composite Materials*, 43, 29-40 (2007).
- [11] Babak Fazlali, Shailee Upadhyay, Sagar Ashokbhai Ashodia, Francisco Mesquita, Stepan V. Lomov, Valter Carvelli, Yentl Swolfs: Specimen designs for accurate tensile testing of unidirectional composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 175, (2023).

- [12] Gergely Czél, Meisam Jalalvand, Michael R. Wisnom: Hybrid specimens eliminating stress concentrations in tensile and compressive testing of unidirectional composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 91, 436-447 (2016).
- [13] Kumar R., Mikkelsen L. P., Lilholt H., Madsen B.: Experimental Method for Tensile Testing of Unidirectional Carbon Fibre Composites Using Improved Specimen Type and Data Analysis. *Materials*, 14, (2021).
- [14] András Jandrics: Development of Novel Unidirectional Bonded Sandwich Specimens for Accurate Determination of the Tensile Failure Strain of Carbon Fibre/Epoxy Composites. Diploma. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék (2023).
- [15] I. De Baere, C. Hochard, W. Van Paepegem, J. Degrieck On the tension–tension fatigue behaviour of a carbon reinforced thermoplastic part II: Evaluation of a dumbbell-shaped specimen, *Polymer Testing*, 30, 663-672 (2011).
- [16] Samuli Korhikoski, Povl Brøndsted, Essi Sarlin, Olli Saarela. Influence of specimen type and reinforcement on measured tension–tension fatigue life of unidirectional GFRP laminates, *International Journal of Fatigue*, 85, 114-129 (2016).
- [17] Toray, T800S Intermediate Modulus Carbon Fiber Data Sheet. <https://www.toraycma.com/wp-content/uploads/T800S-Technical-Data-Sheet-1.pdf>.pdf (9 10 2023).