

Debreceni Egyetem
Műszaki Kar
Gépészmérnöki Tanszék



Anyagmodell illesztése és ellenőrzése optikai mérőrendszerrel poliamidra

Szerző: File Máté BSc hallgató

Témavezető: Huri Dávid
Tanszékvezető: Dr. Mankovits Tamás

Debrecen
2021.



Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	II
1. Bevezetés	1
2. Kutatási téma megalapozása	2
2.1. Általánosságban a polimerekről	2
2.2. Műanyagok végeelem modellezése	3
2.3. Digitális képkorrelációs módszer és alkalmazásai	5
2.3.1. GOM Aramis rendszer működése	6
2.3.2. DIC módszerrel végzett vizsgálatok polimereken	7
2.4. A de Saint-Venant-elv vizsgálata	8
3. Mechanikai anyagjellemzők meghatározása szakítóvizsgálattal	10
3.1. Próbatetek előkészítése	10
3.2. Mérési metódus beállítása	11
3.3. A mérési elrendezés és a mérés menete	12
3.4. A mért adatok kiértékelése	13
3.5. Poisson-tényező mérése	16
3.5.1. A próbatest előkészítése	16
3.5.2. Mérési metódus beállítása és a mérés menete	17
3.6. A mért értékek összegzése	18
3.7. Rugalmas alakváltozás ellenőrzése maximális terhelésre	18
4. Végeelemes szimulációk futtatása különböző anyagmodellekkel	20
4.1. A végeelem modellek előkészítése	20
4.1.1. Próbatest geometriák modellezése	20
4.1.2. Kényszerek és erőhatások megadása	21
4.2. Szimuláció lineárisan rugalmas anyagmodellel, kis nyúlás szerinti Young-modulussal	22
4.2.1. Anyagmodell és diszkretizáció	22
4.2.2. Hálósűrűség analízis	23
4.2.3. Szimuláció és kiértékelés a lineárisan rugalmas anyagmodellel, szabvány szerinti Young-modulussal	25



4.3. Szimuláció lineárisan rugalmas anyagmodellel, maximumnál számított Young-modulussal	27
4.3.1. Anyagmodell és tulajdonság létrehozása.....	27
4.3.2. Szimuláció és kiértékelés a lineárisan rugalmas anyagmodellel, 30 MPa-hoz közelített Young-modulussal	29
4.4. Szimuláció nemlineárisan rugalmas anyagmodellel.....	31
4.4.1. Anyagmodell és tulajdonság létrehozása.....	31
4.4.2. Szimuláció és kiértékelés a nemlineárisan rugalmas anyagmodellel.....	32
5. Vizsgálat optikai nyúlásmérő rendszerrel	35
5.1. Próbatetek előkészítése, festése	35
5.1.1. A próbatetek előkészítése	35
5.1.2. A próbatetek festése.....	36
5.2. Vizsgálat elvégzése, eredmények kiértékelése	36
5.2.1. Az optikai mérési metódus bemutatása	36
5.2.2. Az elkészült képek posztprocesszálása	38
5.2.3. Eredmények kiértékelése	41
6. Az optimális anyagmodell kiválasztása.....	44
6.1. Teljes lemez ellenőrzése.....	44
6.1.1. A megmunkálások ellenőrzése	45
6.1.2. Lokális maximum nyúlások ellenőrzése	47
6.1.3. Elmozdulások ellenőrzése.....	49
6.2. Az optimális anyagmodell	52
7. Összegzés.....	53
Köszönetnyilvánítás	55
Irodalomjegyzék	56



1. Bevezetés

TDK kutatásom témája a szakdolgozatommal történő foglalkozás során született, melynek témája egy mechanikai elv, a de Saint-Venant-elv vizsgálata optikai nyúlásmérő rendszerrel, valamint végeselem szoftver segítségével. Ezen munkám során találkoztam a polimerek modellezésének legjelentősebb problémájával, a megfelelő anyagmodell kiválasztásával. Így adódott az ötlet, hogy az anyagot különböző anyagmodellek illesztésével közelíteném a végeselem szimulációk során, és ezek közül az optikai mérőrendszerrel történő laboratóriumi vizsgálat eredményeit felhasználva kiválasztanám a legmegfelelőbbet, illetve meghatároznám, az egyes anyagmodellek alkalmazhatósági korlátait.

A kutatás kezdetén széleskörű irodalomfeldolgozást fogok végezni, melyben először kitérek a polimerekre általánosságban, azok végeselemes modellezési lehetőségeire és a GOM Aramis működési elvére a digitális képkorrelációra. Az irodalomfeldolgozás során igyekezni fogok korszerű, hasonló témájú cikkek összegyűjtésére.

A kutatás irodalmi háttérének feltárása után a beszerzésre került egy poliamidlemezből a vizsgálandó próbatestek kimunkálásra fognak kerülni. Emellett ezen a műanyaglapon egy ISO 527-2 szabvány szerinti szakítóvizsgálatot is el fogok végezni annak érdekében, hogy a lehető legpontosabb anyagmodelleket tudjam létrehozni a végeselem szoftverben. A poliamid nemlineárisan rugalmas karakterisztikáját három anyagmodell segítségével fogom közelíteni. Két lineárisan rugalmas anyagmodellel, melyek közül az egyik a szabvány szerint számított Young-modulus segítségével készül el, a másik pedig a maximum terheléshez számított Young-modulust fogja felhasználni. Harmadik anyagmodellként pedig egy nemlineárisan rugalmas anyagmodellt használok fel, melyhez a szoftverbe a szakítógörbék bevitelére van szükség.

A végeselemes modellek elkészítésekor külön figyelmet fordítok arra, hogy azok a laboratóriumi vizsgálatnak lehető legjobban megfeleljenek, az esetleges hibák elkerülésének érdekében. A szimulációk elvégzése, illetve kiértékelése után a laboratóriumi vizsgálatok elvégzésére kerül sor. A korszerű, optikai teljes mező nyúlás-és elmozdulás mérő rendszerrel történő vizsgálat során a próbatestek teljes felületén megfigyelhető az értékek eloszlása.

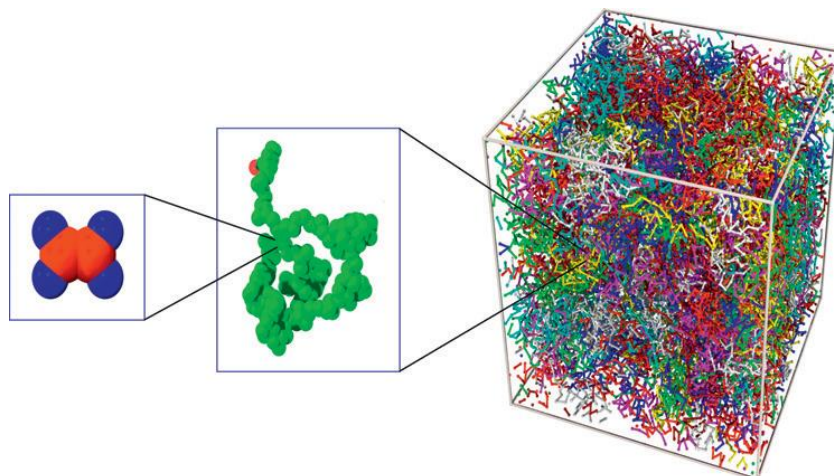
A numerikus módszerrel kapott eredményeknek a méréssel való összevetésével különböző nyúlástartományokban is lehetséges a különböző anyagmodellek pontosságának vizsgálata.

2. Kutatási téma megalapozása

Ezen fejezet célja a polimerekhez, azok modellezéséhez, illetve a műanyagokra illeszthető anyagmodellek szakirodalmainak és cikkeinek feldolgozása a kutatási téma megalapozásához. A fejezetben igyekszek minél több irodalmat feldolgozni, illetve azokat rendszerezni. A szakirodalmak mellett kitérek a végeelem szoftver, illetve a GOM Aramis szoftver nyúlásszámítási módszerére, valamint a fejezet végén megemlíteném a de Saint-Venant-elv vizsgálatára kialakult módszert, mely ezen kutatást és a vizsgált próbatestet szülte.

2.1. Általánosságban a polimerekről

A polimereket folyamatosan ismétlődő elemek, úgynevezett monomerek hosszú láncai építik fel, melyek egymásba fonódnak. A monomerekben az atomokat kovalens kötések tartják össze, mely miatt nagy többségben rosszul vezetik a hőt és az elektromosságot. A 2.1. ábrán egy polimer felépítése van szemléltetve, bal oldalon egy monomer, középen egy hosszú több monomerből álló lánc, jobb oldalon pedig a teljes polimer látható [1].



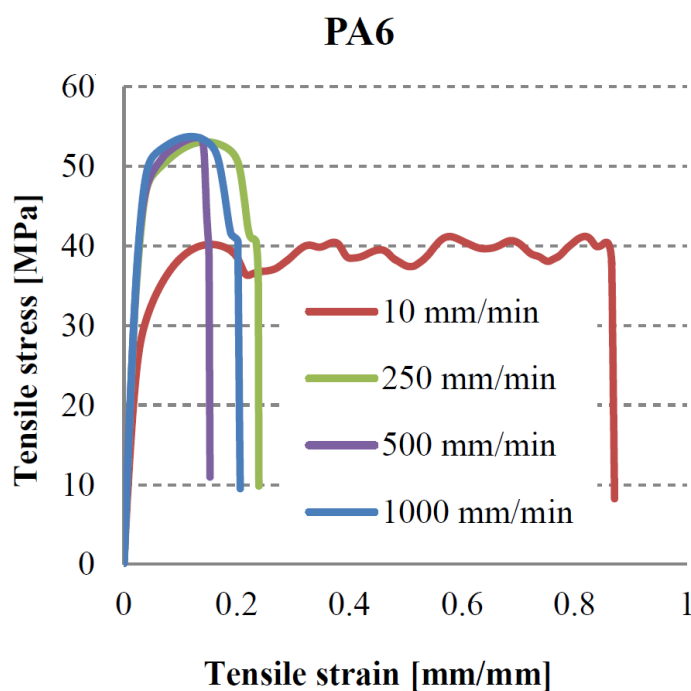
2.1. ábra. Egy polimer tipikus felépítése [1]

A polimerek csoportosítására többféle módszer ismert, az én szempontomból azonban a lényeges csoportosítás az amorf, illetve a részlegesen kristályos műanyagok közötti különbségtétel. Ez a csoportosítás azért lényeges, mert az általam vizsgált poliamid (PA6) a részlegesen kristályos műanyagok közé tartozik. A különbséget az amorf és a részlegesen kristályos csoportok között az képezi, hogy az amorf polimerek esetében a szerkezet teljesen rendezetlen, oldalcsoportok akadályozzák meg a kristályosodást, így ezen csoport merevségi

tulajdonságai rosszabbak, mint a részlegesen kristályos csoporté. Az amorf tartományok a nyúlásért, illetve a szívósságért felelnek. A polimerek működésében nagy szerepet játszik azok tárolása, a terhelési sebesség, illetve az alapanyag gyártási módja. Így a mechanikai tulajdonságok kimérését illetve a laboratóriumi vizsgálatokat egyazon műanyag lemez felhasználásával fogom elvégezni [1], [2].

2.2. Műanyagok végelem modellezése

A műanyagok mechanikai tulajdonságai a rugalmas zónában lényegesen különböznek a fémektől. Míg a fémek a rugalmas stádiumban lineárisan viselkednek, a műanyagokra leggyakrabban ez nem jellemző. A PA6 esetében is megfigyelhető ez a jelenség, az anyag a linearitását jóval a folyáshatár elérése előtt elveszíti. Ez a tény megfigyelhető a *Musteata* és társai által végzett szakítóvizsgálatokon is [3]. Egy összegzett feszültség-nyúlás diagramjuk a 2.2. ábrán látható.

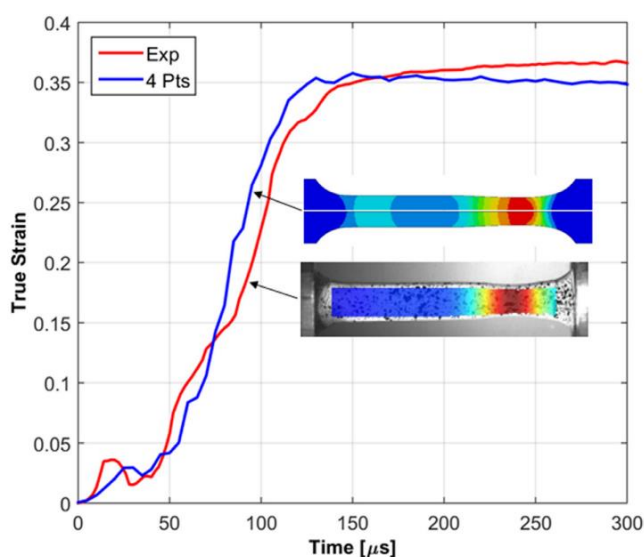


2.2. ábra. PA6 szakítóvizsgálata [3]

Az ábrán a nemlineáris viselkedés mellett szintén megfigyelhető a terhelés sebességétől való függőség, így a laboratóriumi vizsgálatokat az anyagparaméterek meghatározásával megegyező sebességen fogom elvégezni [3].

A nemlineáris karakterisztika modellezésére több módszer ismert. Bizonyos szintig közelíthetőek lineárisan rugalmas anyagmodellekkel, de a linearitás elvesztése után ezen

anyagmodellek már nem működőképesek. Pontosabb megoldások várhatóak úgynevezett „multilineáris” anyagmodellek felhasználásával. Ez látható a Tzibula és társai által elvégzett vizsgálatban is, melynek során ők egy négy pontos közelítéssel hoztak létre egy anyagmodellt a mérési eredményekre. A kapott anyagmodell és a mért eredmények a 2.3. ábrán látható. A gumiknál elterjedt hiperelasztikus anyagmodellek nem megfelelőek a műanyagok rugalmas tartományban történő modellezéséhez, mivel ezek az anyagmodellek csak nagy mértékű megnyúlás mellett tudnak biztosan működni [1], [4], [5].



2.3. ábra. Méréssel született eredmények, illetve a négy ponttal közelített anyagmodell [5]

A szimulációk során szintén nagyobb pontosság várható a nemlineáris szimulációk használatával, mint az látható a Pálfalvi és Mashimo által elvégzett vizsgálat eredményeiből is, melyek a 2.1. táblázatban láthatóak [6].

2.1. táblázat. Szimulációk és a mérés eredményei [6]

	Első módus	Második módus
Lineáris számítás	22,1 Hz	66,3 Hz
Nemlineáris számítás	21,9 Hz	61,9 Hz
Mérés	21,3 Hz	62,0 Hz

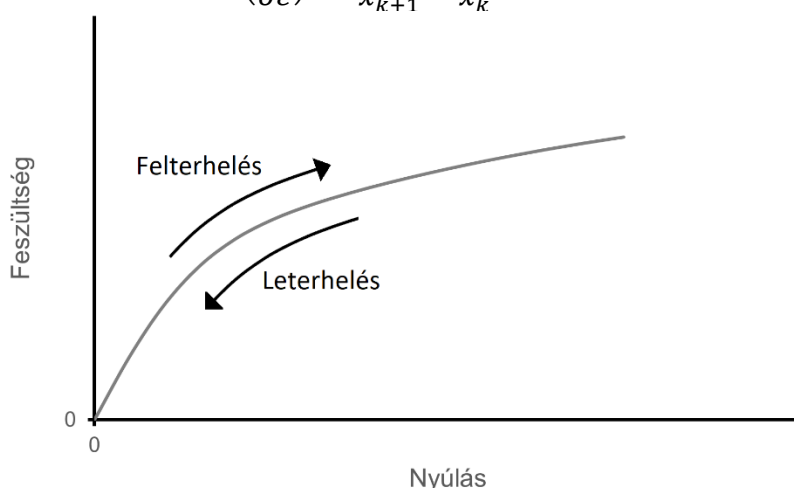
Az eredményeken az is látható, hogy a kisebb frekvenciaértékeknél a lineáris, illetve a nemlineáris számítások is pontos értéket mutattak, de a nagyobb frekvenciáknál már nem. Ez annak tudható be, hogy a nemlinearitás egy bizonyos szintig közelíthető lineáris szimulációkkal [6].

A femap végelem szoftverben megtalálható anyagmodellek közül én a vizsgálataim során egy egyszerű lineárisan rugalmas anyagmodellt, illetve a nemlineárisan rugalmas anyagmodellt fogom alkalmazni. Mindkét modell a végelem módszer alapegyenlete alapján jár el, mely a 2.1. képletben látható [7].

$$K \cdot q = f \quad 2.1.$$

Az alapegyenletben a K a szerkezet globális merevségi mátrixa, a q a globális csomóponti elmozdulásvektor, az f pedig a globális tehervektor. A cél az egyenletek számítása során a q elmozdulásvektor meghatározása minden csomópont esetében. A különbséget az képezi, hogy a lineáris anyagmodell a feszültség és nyúlások arányát a Young-modulus által definiált egyenes segítségével határozza meg, míg a nemlineáris anyagmodell esetében a modell létrehozásakor kell megadni egy feszültség-nyúlás görbét, mely mentén a fel-és leterhelés végbe fog menni. A görbe pontjai között egy úgynevezett rögtönzött modulust számít, melyet interpolál vagy extrapolál a görbe pontjai között elhelyezkedő értékek meghatározásához. A rögtönzött modulus $\left(\frac{\delta \bar{\sigma}}{\delta \bar{\epsilon}}\right)$ számítása a 2.2. képletben látható, ahol az x_k és y_k értékek a megadott görbe k -adik x illetve y koordinátái [7], [8].

$$\left(\frac{\delta \bar{\sigma}}{\delta \bar{\epsilon}}\right) = \frac{y_{k+1} - y_k}{x_{k+1} - x_k} \quad 2.2.$$



2.4. ábra. Nemlineárisan rugalmas anyagmodell [7]

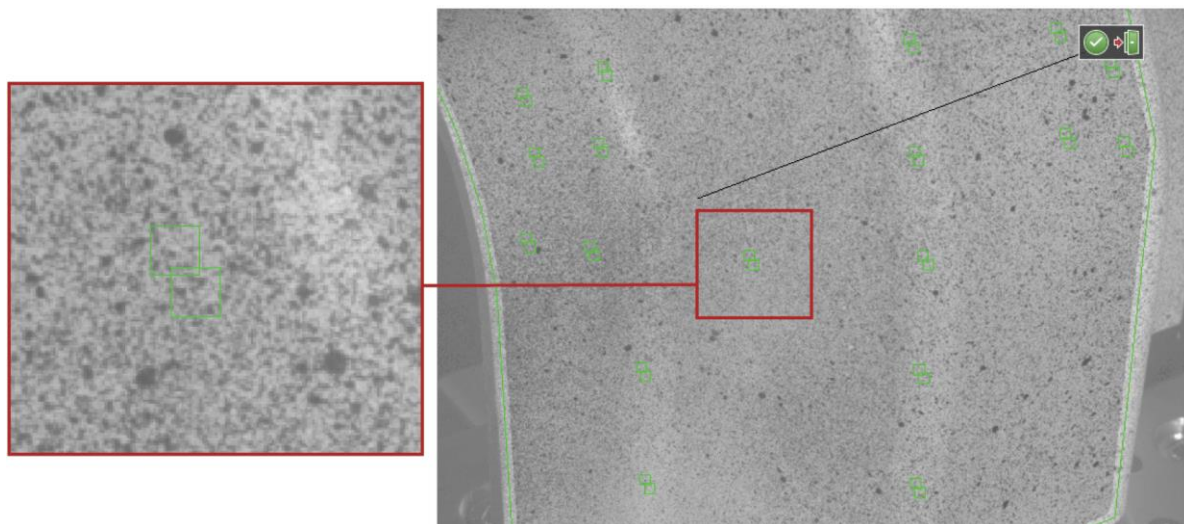
2.3. Digitális képkorrelációs módszer és alkalmazásai

A digitális képkorrelációs módszer a vizsgálat során készült képek összehasonlításán alapul. A kamerák, illetve a szoftverek pixelcsoportokat követnek le, majd ezeket keresik meg minden

képen. A pixelcsoportok pozíciójának összehasonlításával nyúlás-és elmozdulás értékek nyerhetők ki. A módszer megfelelő működéséhez általában valamilyen mintát kell felvinni a próbatest felületére, melyből a szoftver kiválaszthatja a pixelcsoportokat. A mintának megfelelő kontraszttal kell rendelkeznie a háttérhez képest. A módszert széleskörben alkalmazzák anyag-, illetve szerkezetvizsgálatokhoz [9].

2.3.1. GOM Aramis rendszer működése

Ezen elv alapján működik a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszékén elérhető GOM Aramis Adjustable 12M mérőrendszer is. A rendszer működéséhez a próbatestre először egy sztochasztikus mintát kell felfesteni, melyek közül a rendszer két egymásra fekvő négyzet segítségével választ ki pixelcsoportokat [10].



2.5. ábra. A GOM Aramis pixelcsoport kiválasztása [10]

A kiválasztott négyzeteket követi le a képeken a szoftver, meghatározza a koordinátaikat, majd összehasonlítja azokat. A négyzetek pozíciójának összehasonlítása a 2.3 képletben látható, ahol az f a négyzet kezdeti, a g pedig a négyzet deformált koordinátája [10].

$$c(\Delta x, \Delta y) = \frac{\langle f(x, y), g(x + \Delta x, y + \Delta y) \rangle}{|f(x, y)| \cdot |g(x, y)|} \quad 2.3$$

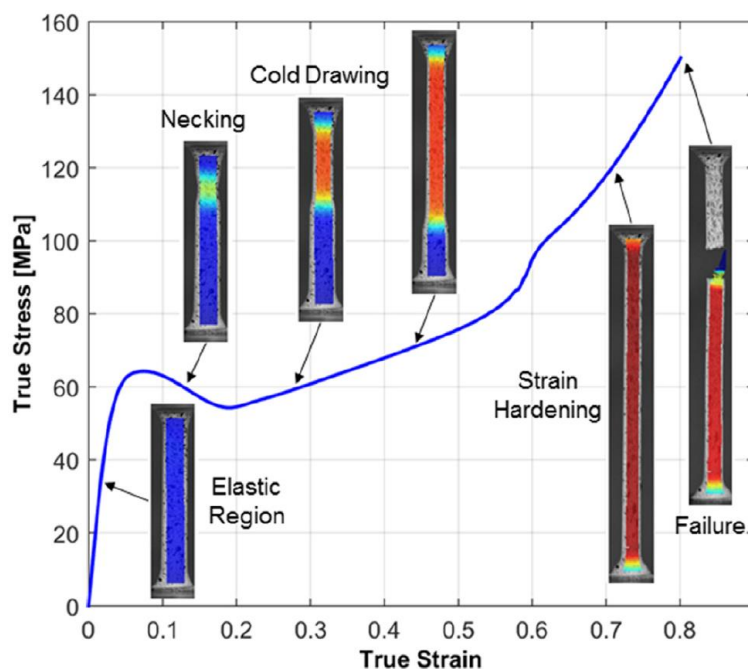
A négyzetek meghatározása után egy hálót fektet a képekre, melynek alapjait ezek jelentik. Az elemek hosszának változásából határozza meg a nyúlásértékeket a 2.4 képletben látható módon, ahol az l_0 a referenciaelem hossza a Δl pedig a hossz változása [10].

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad 2.4$$

A GOM rendszere ezt a nyúlásértéket „Technical Strain”-nek nevezi, dolgozatomban ezzel a nyúlásértékkel fogok számítani [10].

2.3.2. DIC módszerrel végzett vizsgálatok polimereken

A 2.2. pontban már említett Tzibula és társai a polikarbonát dinamikus, illetve statikus vizsgálatához használták fel a DIC módszert, melynek segítségével a már említett 4 pontos közelítésű modellt ellenőrizték le. A mérésekhez esetükben is a próbatestek festésére volt szükség. A teljes szakító, illetve dinamikus vizsgálat során felvételeket készítettek a kamerával. A szakítóvizsgálatuk feszültség-nyúlás görbéje ráhelyezve az adott pillanatok DIC módszer segítségével kiértékelt képeivel a 2.6. ábrán látható [5].



2.6. ábra. A szakítóvizsgálat feszültség-nyúlás görbéje ráhelyezett DIC képekkel [5]

A cikkben látható, hogy egy megfelelően előkészített végeelem modell közvetlenül összevethető a DIC módszer által szolgáltatott eredményekkel [5].

Filho és Nunes egy PTFE műanyag nyíróvizsgálatoknál használta fel a DIC módszert két különböző próbatest esetében. Mindkét próbatest esetében a deformáció homogenitását ellenőrizték, melyhez elengedhetetlen volt a kétdimenziós DIC módszer alkalmazása. Vizsgálatuk során a módszer a vártak megfelelő, értékes eredményeket nyújtott [11].



Major és társai pedig polipropilént és azon alapuló kompozitokat vetettek alá húzóvizsgálatnak, a nyúlások meghatározása érdekében. Ehhez a Gépészmérnöki Tanszéken rendelkezésre álló GOM Aramis rendszer egy korábbi típusát használták fel [12].

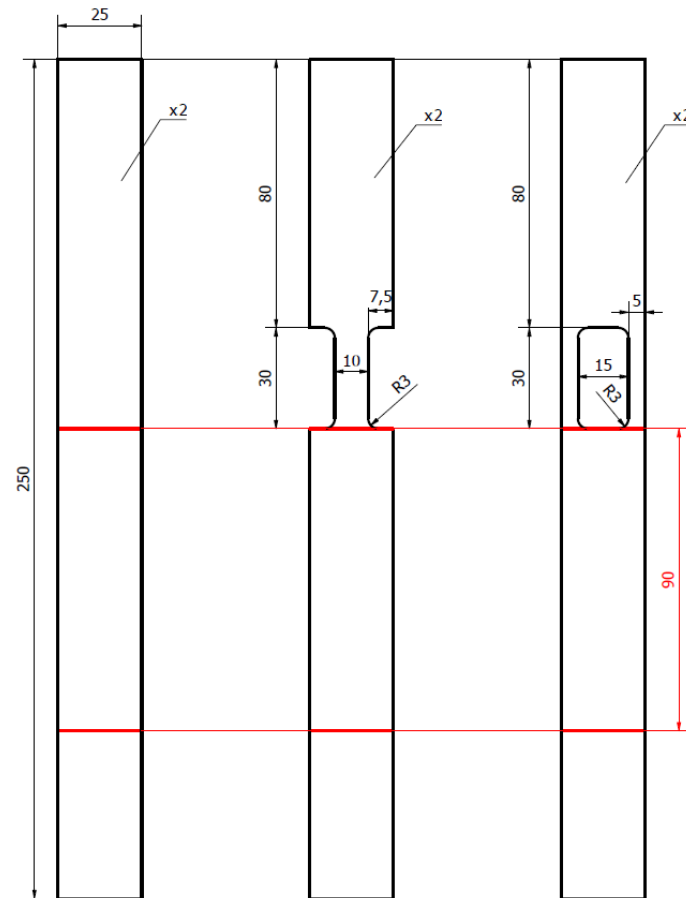
2.4. A de Saint-Venant-elv vizsgálata

A de Saint-Venant-elvet vagy más néven a lokális hatások elvét egy francia matematikus, Barré de Saint-Venant írta le 1855-ben. Inkább megfigyelésnek mondható, nem pedig rögzített törvénynek. Az elv így szól: [13]

„Ha egy elasztikus testnek egy kis felületelemére ható erők egy másik, statikailag megegyező erőrendszerre cserélődnek, mely a felület ugyanazon részén hat, a terhelések ezen átrendeződése lényeges változást idéz elő a feszültségekben lokálisan, de nincs számottevő hatása egy olyan távolságban ható feszültségekre, amely nagy a felületnek azon lineáris méreteihez képest, amin az erők meg lettek változtatva.” [13], [14]

Az elvnek több különböző megfogalmazás is született, de a lényege minden különböző megfogalmazásnak megegyezik. Amennyiben a testet érő axiális terhelések ugyanazt az eredőt generálják, nem számít az, hogy milyen formában érik el a testet, mivel egy bizonyos távolságra az erőhatástól a feszültségek állandósulni fognak a különböző terhelési módok között. Ez alapján a komplex terhelések sokkal könnyebben kezelhető egyszerűbb erőhatásokra cserélhetők, ezzel egyszerűsítve a számítási folyamatot. A távolság, amely után az elv érvényesülni tud általában a keresztmetszet legnagyobb méretével egyenlő. Később megfigyelésre került, hogy az elv hatása a megmunkálásokra is érvényesül [15], [16].

A de Saint-Venant-elvet három különböző terhelési mód segítségével szeretném vizsgálni. Az Instron 68TM-10 egytengelyű statikus anyagvizsgálógép befogóival azonban csak egy terhelési mód megadása lehetséges, így a próbatestek megmunkálásán keresztül fogom a különböző terhelési módokat létrehozni. A próbatestek a 2.7. ábrán láthatóak.



2.7. ábra. A próbatestek geometriája

Az ábrán látható pirossal jelölt vizsgált zónában fogom a különböző próbatestek nyúlásait megfigyelni, illetve ezeket összehasonlítani. A próbatestek anyaga a már említett PA6, az őket érő terhelés pedig egy 400 N-os egytengelyű húzó terhelés lesz. A terhelés hatására a teljes lemez esetében a vizsgált zónában egy megoszló terhelés hatása várható, a két oldalt mart lemez esetében a terhelés egy 10 mm széles zónában támadja meg a vizsgált zónát, a középen mart lemez esetében pedig a terhelés két 5 – 5 mm széles területen érkezik. A de Saint-Venant-elv értelmében viszont a megmunkálásoktól 25 mm-re minden próbatest esetében ugyanazon eloszlás várható.

3. Mechanikai anyagjellemzők meghatározása szakítóvizsgálattal

Ezen fejezet célja a beszerzett anyag mechanikai tulajdonságainak pontos meghatározása a végeselemes vizsgálat és a laboratóriumi mérések összehasonlíthatóságának érdekében. Ehhez az MSZ EN ISO 527-2 szabványban leírt módon fogok eljárni. A méréshez az Instron 68TM-10 típusú (Norwood MA, USA) elektromechanikus egytengelyű anyagvizsgálógépet és a rá felszerelt Instron AVE 2 (Advanced Video Extensometer) érintésmentes optikai nyúlásmérőt használok fel. Az anyag tulajdonságainak meghatározásához az MSZ EN ISO 527-2 szabvány szerint járok el, így az anyag minden tulajdonságát meg tudom határozni a Poisson tényező kivételével, melyet egy másik próbatest felhasználásával fogok megtenni. A fejezet utolsó mérése pedig az anyag rugalmasságának ellenőrzése lesz.

3.1. Próbatestek előkészítése

A próbatesteket a laborban megtalálható Instron Stancolóval vágtam ki, az ISO 527-2-es szabvány Type 1A próbatestének megfelelő kivágó szerszámmal [17]. A stancoló és a szerszám a 3.1. ábrán látható.



3.1. ábra. Az Instron Stancoló és a Type 1A szerszám

A szabvány szerint a méréshez 5 db próbatestet használok fel, melyek ugyanazon műanyaglapból kerültek kivágásra. A kivágás után minden próbatest vastagságát és szélességét megmértem 5-5 pontban, majd a mért adatokat táblázatba vezettem, majd átlagoltam őket, amit a 3.1. táblázat tartalmaz. Ezen méretek a mérőrendszerek számára elengedhetetlenek lesznek az értékek pontos meghatározásához [17], [18].



3.1. táblázat. Kivágott Type 1A alakú próbatestek méretei

<i>Méret</i>	<i>Próbatest 1</i>	<i>Próbatest 2</i>	<i>Próbatest 3</i>	<i>Próbatest 4</i>	<i>Próbatest 5</i>
<i>Szélesség</i>	9,89 mm	9,882 mm	9,882 mm	9,888 mm	9,864 mm
<i>Vastagság</i>	2,046 mm	2,052 mm	2,044 mm	2,048 mm	2,050 mm

A nyúlások méréséhez az AVE 2 rendszernek szüksége van legalább 2 mm átmérőjű megfelelően kontrasztos referenciapontokra a felületen. Hosszirányban az axiális nyúlások meghatározásához két pontra van szükség, ezek egymástól 75 mm-re a próbatest közepén helyezkednek el, ezt a jeltávolságot a szabvány írja elő. A Poisson-tényező meghatározásához azonban szükség van keresztirányban további két pontra a felületen, melyek között a távolság a szabványban nincs megadva [17], [18]. Az AVE 2 rendszer esetében a pontok egymástól legalább 6 mm-re kell, hogy elhelyezkedjenek, de nem lehetnek a próbatest szélén, így a 10 mm széles Type 1A próbatesttel nem lehet a Poisson tényezőt biztosan meghatározni. Ezen tulajdonság meghatározásához így egy másik próbatestre és mérésre lesz szükség. Így a piskóta próbatestekre csak a hosszirányú pontok felfestése szükséges, amelyeket a kamerához beszerzésre került sablon, és a sablonhoz mellékelt olaj alapú tollal végeztem el [19]. A próbatestek a pontok felfestése után készen állnak a mérésre, a következő lépés a mérési módszer beállítása.

3.2. Mérési módszer beállítása

Az Instorn 68TM-10 anyagvizsgáló gépet vezérlő Bluehill szoftverhez beszerzésre kerültek különböző szabványok alapján létrehozott módszerek is, többek között az általam használt ISO 527-2 is. A módszer megnyitása után különböző információkat kell megadni a méréssel kapcsolatban, például a próbatest típusát, az extenzométer típusát, valamint a mérés sebességét is. A mérés körülményei a 3.2. táblázatban láthatóak.

3.2. táblázat. Mérés körülményei

<i>Próbatest típusa</i>	<i>ISO 527-2 Type 1A</i>
<i>Hőmérséklet</i>	<i>24 °C</i>
<i>Páratartalom</i>	<i>47,9 %</i>
<i>Extenzométer típusa</i>	<i>Video</i>
<i>Erőmérő cella</i>	<i>Instron 2560 típusú statikus</i>
<i>Erőmérő cella kapacitása</i>	<i>±10 kN</i>

Az anyagot ismerve a mérés sebességét 50 mm/perc -re állítottam, mivel a folyáshatár elérése után lényeges alakváltozás fog bekövetkezni. A mérés vége az erőérték több, mint 40%-os visszaesésekor fog bekövetkezni. Ez a körülmény csak a szakadáskor fog teljesülni.

A fenti beállítások megadása után az adatok gyűjtésének, valamint exportálásának beállításával foglalkoztam, megadtam, hogy a rögzítés 20 Hz -cel történjen, valamint a mérés végén minden rögzített adat kerüljön mentésre ún. „Raw data” nyers adatként. Emellett beállítottam a mérés követésére használható ablakot, melyen látható egy erő-elmozdulás diagram, egy feszültség-nyúlás diagram, egy táblázat, mely a fontosabb mért adatokat tartalmazza, valamint az extenzométer kamerájának képe. Ezek a diagramok és a táblázat egy automatikusan generált jegyzőkönyv formájában szintén mentésre kerülnek.

3.3. A mérési elrendezés és a mérés menete

A metódus beállítása után tovább lépve a szoftver bekéri az első próbatest szélességét, vastagságát, valamint a vizsgált hosszt. Ezen adatok megadása után lenulláztam az erőmérő cellát, majd befogtam az első próbatestet. A befogáshoz ékpályás befogót alkalmazok. Még a mérés megkezdése előtt a kezdőpontban meghatároztam egy nullpontot a keresztfej mozgásában. Minden mérés után egy gomb megnyomásával ebbe a pontba fog visszatérni a keresztfej, ezzel biztosítva az állandó vizsgált hosszt, amely a szabvány szerint 115 mm . A kezdeti mérési elrendezés a 3.2. ábrán látható [17].

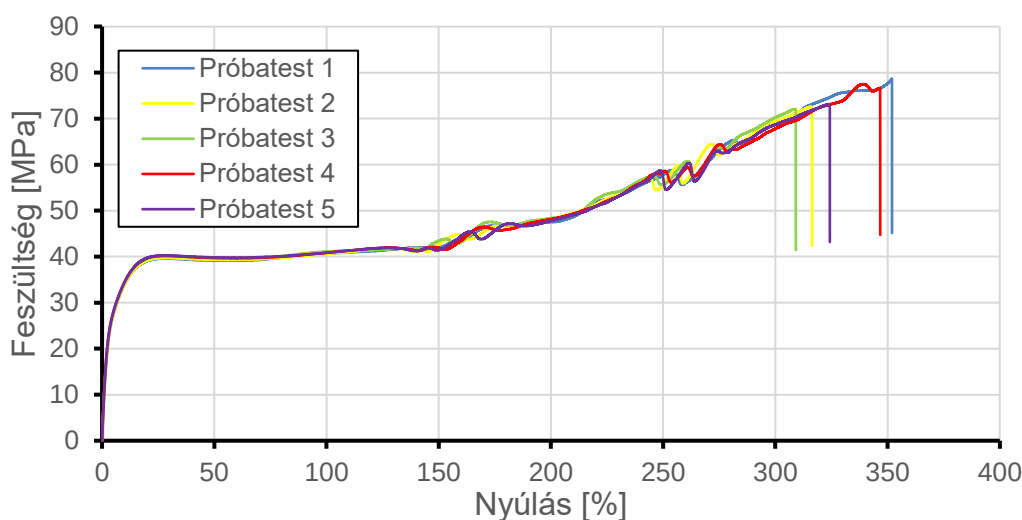


3.2. ábra. Kezdeti mérési elrendezés

A mérés mindezek után a start gombbal indítható, és a próbatest szakadásáig tart. A mérés befejezése után a szoftver kéri a következő próbatest méreteit, majd annak befogása után az újabb vizsgálat egyből indítható. Az 5 db próbatest elszakadása után a rendszer kiadja az adathalmazt és az általa generált diagramokat. Ezen dokumentumok segítségével fogom elvégezni a kiértékelést.

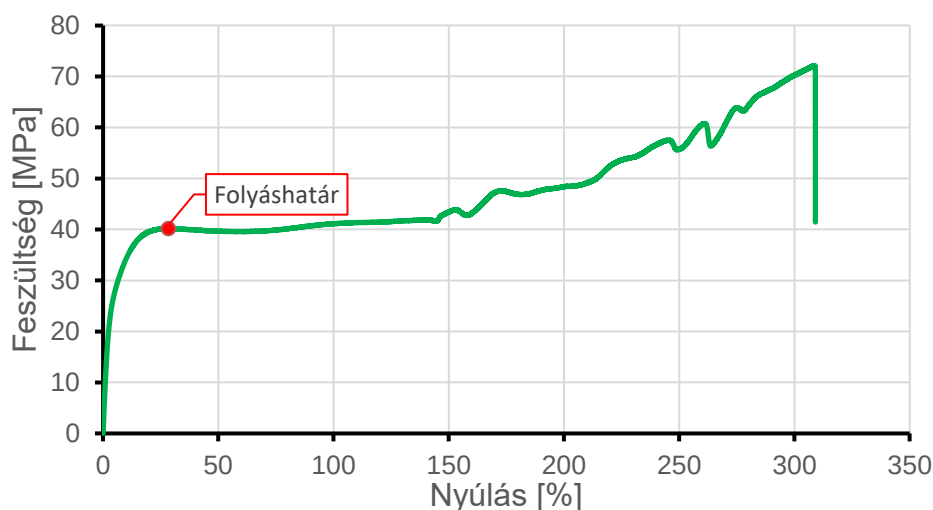
3.4. A mért adatok kiértékelése

A mért adatok kiértékelésekor a legfontosabb a Young-modulus, és a rugalmas zóna meghatározása volt. A Young-modulusra a végeelem szoftverben lesz szükség az anyagjellemzők megadásakor, a rugalmas zóna pontos meghatározása pedig azért szükséges, mivel a vizsgálatot kizárólag ebben a stádiumban szeretném elvégezni, a megismételhetőség és a pontos összehasonlíthatóság érdekében. Az öt mérés eredményét egy összesített feszültség-nyúlás diagramba vezettem, mely a 3.3. ábrán látható.



3.3. ábra. A kapott feszültség-nyúlás diagram a különböző próbatestekre

A mérőrendszer automatikusan meghatározta a folyáshatár értékét, melyet az egyes próbatestek diagramjain is ábrázoltam. Ez a pont jelenti a rugalmas zóna határát, azaz a vizsgálatot majd ezen feszültségérték alatt kell elvégezni. A 3. próbatest feszültség-nyúlás diagramja a folyáshatár ábrázolásával a 3.4. ábrán látható.



3.4. ábra. A 3. próbatest feszültség-nyúlás diagramja

A rendszer által meghatározott folyáshatár értékeket és a hozzá tartozó nyúlásértékeket táblázatba vezettem, amely a 3.3. táblázatban látható.

3.3. táblázat. A kapott folyáshatár értékek

Próbatestek	σ_f [MPa]	ε_f [%]
Próbatest 1	39,569	27,112
Próbatest 2	39,716	28,409
Próbatest 3	40,147	28,399
Próbatest 4	40,176	27,805
Próbatest 5	40,296	27,793
Átlag	39,981	27,904
Szórás	0,318	0,536
Medián	40,147	27,805
Maximális eltérés	1,44%	2,50%

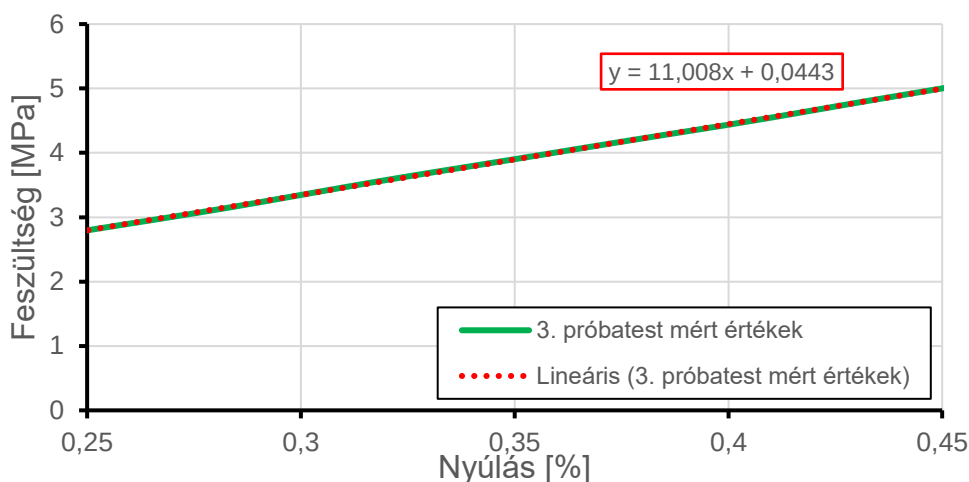
A mért értékek 1,44%, illetve 2,5%-os maximális eltéréséből, és minimális szórásából látszik, hogy a folyáshatár megfelelően került meghatározásra, a mérés jól reprodukálható.

A kiértékelést a Young modulus meghatározásával folytattam. A szabványban két módszer található ezen érték meghatározására, mindkettő a 0,05 – 0,25%-os nyúlásintervallumban számítható. Az anyag szakítógörbéje ezen intervallumban azonban jelentősen eltér a lineáristól, így a kapott Young-modulus értékek mediántól való maximális eltérése 10% körüli volt, ezért én a vizsgálathoz 0,25 – 0,45% közötti nyúlásintervallumot használtam fel. Itt inkább a módszer segítségével meghatároztam a Young-modulus értékét. Az első módszer az intervallum

meredekségének meghatározása volt a végpontok segítségével, a 3.1. képletnek megfelelő módon [18].

$$E = \frac{\sigma_{0,45} - \sigma_{0,25}}{\varepsilon_{0,45} - \varepsilon_{0,25}} \quad 3.1.$$

A második módszer pedig szintén az intervallum meredekségének meghatározása volt egy egyenes illesztésével. Az egyenes illesztéséhez az Excel szoftver „Trendvonal illesztése” funkcióját használtam fel. Az illesztett egyenes egyenletéből a meredekség meghatározható, melyet 100-zal megszorozva megkapható a Young-modulus értéke MPa-ban. A szorzásra azért a diagramon százalékosan megadott fajlagos nyúlás miatt van szükség. Az egyenes illesztése a 3. próbatest diagramjára a 3.5. ábrán látható [18].



3.5. ábra. A Young-modulus meghatározása egyenes illesztéssel

A két módszerrel kapott eredményeket táblázatba vezettem, mely a 3.4. táblázatban látható.

3.4. táblázat. A két módszerrel kapott Young-modulus értékek

Próbatestek	E végpontokkal [MPa]	E egyenes illesztéssel [Mpa]
Próbatest 1	1080,707	1077,700
Próbatest 2	1103,087	1099,900
Próbatest 3	1103,333	1100,800
Próbatest 4	1125,719	1122,100
Próbatest 5	1135,884	1134,800
Átlag	1109,746	1107,060
Szórás	21,605	22,069
Medián	1103,333	1100,800
Maximális eltérés	2,95%	3,09%

Mindkét módszer megfelelő pontosságú eredményt adott, mivel mindkét esetben a maximális eltérés kisebb a mérnöki gyakorlatban elfogadott 5%-os hibahatártól. A két módszer közül az egyenes illesztésével kapott értékeket fogom felhasználni, mivel ez a módszer nem csak két pont adatait veti össze, hanem a teljes adatsor értékeit dolgozza fel, ezzel kiszűrve a mérésből adódó esetleges bizonytalanságot.

3.5. Poisson-tényező mérése

A Poisson-tényező méréséhez a minimális jeltáv miatt a szabvány szerinti Type 1A próbatest szélessége nem megfelelő, így egy más geometriájú próbatesten végzett vizsgálat segítségével tudom csak ezt a tulajdonságot meghatározni.

3.5.1. A próbatest előkészítése

Az AVE 2 videoextenzométer számára minimum 2 mm átmérőjű pontok szükségesek, amelyeket egymástól legalább 6 mm-re kell elhelyezni, de nem eshetnek túlságosan közel a próbatest széléhez sem. A rendszer egy biaxiális mérőrendszer, tehát képes egyidejűleg a pontok hosszirányú és keresztirányú elmozdulásait figyelni és azokból számítani [19].

A próbatest, amit alkalmazni fogok, tehát 25 mm széles lesz, és a keresztirányú jelöléseket egymástól 15 mm-re fogom felfesteni, ami azt jelenti, hogy 3 – 3 mm marad a próbatest szélei és a jelölések között. A próbatestek ugyanazon 2 mm vastag lapból lettek kimunkálva, hosszuk pedig 16 mm lett. A hossz meghatározásánál figyelembe vettem a de Saint-Venant-elvet, így a szabványos 75 mm-es jeltávra rá kellett hagynom mindkét oldalon legalább a próbatest szélességével egyenlő távolságot, azaz 25 – 25 mm-t, tehát a vizsgált hossz 130 mm lett. A befogásra pedig biztosítottam 15 – 15 mm-t. A kis terhelés miatt ez a befogási hossz elegendő. A jelöléseket a szabványos méréshez hasonlóan vittem fel [17].



3.6. ábra. A Poisson-tényező mérésére használt próbatest

3.5.2. Mérési módszer beállítása és a mérés menete

A vizsgálatához az előzőekben használt módszert alkalmaztam, de módosítottam, mivel csak a Poisson-tényező értékére volt szükségem. Mivel ezt a tényezőt a szabvány szerint 0,3 – 1,5% axiális nyúlásértékek között kell vizsgálni, így ezutáni értékekre már nincs szükség, tehát a mérés végét 2%-os axiális nyúlás eléréséhez kötöttem, valamint beállítottam a Poisson-tényező (ν) számítását a fent említett intervallumban. A rendszer ezen tényezőt az axiális (ε_1) és a keresztirányú nyúlások (ε_2) arányából számolja ki, a 3.2 képletben látható módon. Majd minden rögzített adatpont eredményéből a „Legkisebb négyzet módszerével” határozza meg a tényleges Poisson-tényező értékét. [18], [20].

$$\nu = \frac{-\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad 3.2$$

Ezután beállítottam a vizsgált hosszt, amely a de Saint-Venant-elv teljesülésének érdekében 130 mm, valamint a mérés sebességét, amely ebben az esetben is 50 mm/perc maradt. A méréskövetést szintén módosítottam, egy erő-elmozdulás diagramot szemléltetek, az AVE 2 képét, valamint egy táblázatot, ami tartalmazza a Poisson-tényezőt és a maximális terheléshez tartozó adatokat. A mérési elrendezés, valamint a mérés menete nem változott az előző méréshez képest, itt is ékpályás befogót alkalmaztam.



3.7. ábra. A Poisson-tényező mérésének kezdeti elrendezése

Minden próbatest vizsgálata után a rendszer ebben az esetben is kiadott egy adathalmazt és egy automatikusan generált jegyzőkönyvet. Ebben az esetben nem volt szükség kiértékelésre, mert csak a rendszer által automatikusan kiszámított Poisson-tényezőre volt szükség. A kapott értékek a 3.5. táblázatban láthatóak.



3.5. táblázat. Mért Poisson-tényező értékek

	<i>Pt.1</i>	<i>Pt.2</i>	<i>Pt.3</i>	<i>Pt.4</i>	<i>Pt.5</i>	<i>Átlag</i>	<i>Szórás</i>
<i>Poisson-tényező</i>	0,46	0,44	0,45	0,45	0,44	0,45	0,01

Az értékek minimális szórása azt bizonyítja, hogy a Poisson-tényező mérése megfelelően lett elvégezve.

3.6. A mért értékek összegzése

A két mérés során kapott értékekből meghatároztam a Young-modulus és a Poisson-tényező értékeit, amelyeket a végeselemes szimulációk során a lineárisan rugalmas tulajdonságot leíró anyagmodellben fogok használni.

Próbatestek mért értékeinek átlagait fogom felhasználni a végeselemes szimulációk során. Ezeket az értékeket egy összegzett táblázatba vezetem, amely a 3.6. táblázatban látható.

3.6. táblázat. A PA 6 mért anyagjellemzői

<i>Young-modulus</i>	1107,060 MPa
<i>Poisson-tényező</i>	0,45
<i>Folyáshatár</i>	39,981 MPa

3.7. Rugalmas alakváltozás ellenőrzése maximális terhelésre

A rugalmasság ellenőrzéséhez felterheltem 5 db Type 1A szakítópróbatestet 30 MPa-os feszültségértékig, majd eltávolítottam róla a terhelést. A pontos feszültségszámítás érdekében ebben az esetben is le kellett mérnem a próbatesteket, majd a mért értékeket a mérőrendszerbe vezetnem.

3.7. táblázat. Kivágott próbatestek méretei

<i>Méret</i>	<i>Próbatest 1</i>	<i>Próbatest 2</i>	<i>Próbatest 3</i>	<i>Próbatest 4</i>	<i>Próbatest 5</i>
<i>Szélesség</i>	9,89 mm	9,882 mm	9,864 mm	9,866 mm	9,874 mm
<i>Vastagság</i>	2,048 mm	2,05 mm	2,05 mm	2,056 mm	2,052 mm

A terhelés előtt, rögzítettem az AVE 2 által mért jeltávolság értékét, majd ezt összevettem a terhelés eltávolítása után 10 perccel mért értékekkel. A mért jeltávolságok a 3.8. táblázatban láthatóak.



3.8. táblázat. A mért jeltáv értékek

<i>Próbatestek</i>	<i>Mérés előtt [mm]</i>	<i>Mérés után [mm]</i>	<i>Különbség [%]</i>
<i>Próbatest 1</i>	74,704	75,294	0,790%
<i>Próbatest 2</i>	74,733	75,292	0,748%
<i>Próbatest 3</i>	74,741	75,147	0,543%
<i>Próbatest 4</i>	74,635	75,065	0,576%
<i>Próbatest 5</i>	74,501	74,978	0,640%
<i>Átlag</i>	74,6628	75,1552	0,659%
<i>Szórás</i>	0,0996	0,139268	0,107%

A mért értékek minimális eltérése azt bizonyítja, hogy az anyagban a 30 MPa terhelés hatására még rugalmas alakváltozás ment végbe, azaz ezzel a terheléssel a vizsgálat elvégezhető az alapanyag károsodása nélkül.

4. Végeselemes szimulációk futtatása különböző anyagmodellekkel

Ezen fejezet célja a lehető a laboratóriumi vizsgálatnak lehető legjobban megfelelő végeselemes modellek létrehozása. A szimulációkhoz a szakítóvizsgálatok során kapott értékek felhasználásával létrehozni több különböző anyagmodellt. A szimulációk után az eredmények kiértékelésekor azon értékekre fogok hangsúlyt helyezni, melyek a GOM Aramis Adjustable 12M optikai mérőrendszerrel is megfigyelhetők.

4.1. A végeselem modellek előkészítése

A végeselem modellek megalkotásánál igyekeztem mind geometriában, mind a terhelés, valamint a kényszerek elhelyezésében és módjában a valóságot tükrözni a lehető legjobb összehasonlíthatóság érdekében. A lemezalkatrészgeometriájából és peremfeltételeiből adódóan a terhelés hatására síkfeszültségi állapotba kerül, így lehetőség van síkbeli membrán elemek alkalmazásával 2D-s analízist végezni.

4.1.1. Próbatest geometriák modellezése

A próbatestek geometriáját a 2.4.1. *fejezetben* megadott módon készítettem el. Mindhárom próbatest modelljét leegyszerűsítettem. A két befogó alatt elhelyezkedő 50 – 50 mm hosszú területet nem szükséges szimulálni, mivel nem szolgáltat információt, így azokat egy vonallá egyszerűsítettem. Mindhárom próbatest esetében tehát egy 150 mm hosszú területet modellezek le. Az egyszerűsítéssel a modellre előírt kényszereket az élek mentén van lehetőség elfogadni.

A teljes lemez esetében a modell egy egyszerű téglalap volt. A geometria a 4.1. *ábrán* látható.



4.1. ábra. Teljes lemez geometriája

A két oldalt mart lemez esetében először egy vonalláncot hoztam létre, a megadott geometria szerint, amelyet ezután határfelületté alakítottam. Végül a határfelület kitöltésével létrejött a teljes felület. A létrehozott geometria a 4.2. ábrán látható.



4.2. ábra. Két oldalt mart lemez geometriája

A középén mart lemez esetében az eljárás megegyezett a két oldalt mart lemeznél használttal. Az így létrehozott geometria a 4.3. ábrán látható.



4.3. ábra. Középén mart lemez geometriája

4.1.2. Kényszerek és erőhatások megadása

A kényszerek és az erőhatások megadásánál a laboratóriumi vizsgálat során használt ékpályás befogók hatását szükséges modellezni. Mivel mindhárom próbatest azonosan kerül rögzítésre és terhelésre, így a három modell erő- és kényszermegadása megegyezik.

Először a próbatest rögzített ékpályás befogó felőli oldalával kezdtem. Ebben az esetben kiválasztottam a már ezelőtt létrehozott geometria megfelelő élét, amely a 4.4. ábrán pirossal látható. Majd lekötöttem az elmozdulásokat az X és Y irányokban.



4.4. ábra. Rögzített befogó kényszer elhelyezése

A pontosság érdekében a másik oldali befogóhoz szintén szükség volt kényszerek megadására, mivel az a valóságban csak a terheléssel megegyező irányú elmozdulásokat enged

meg. Így a túl oldali élen szintén meg kellett adnom egy kényszert, ahol az Y irányú elmozdulásokat tiltottam le, az él kiválasztása piros színnel a 4.5. ábrán látható.



4.5. ábra. Mozgó befogó kényszer elhelyezése

Végül a terhelés megadása következett. Az előbb felhasznált élre helyeztem a terhelést, mely egy X irányú 400 N -os terhelés volt.

4.2. Szimuláció lineárisan rugalmas anyagmodellel, kis nyúlás szerinti Young-modulussal

A szimulációt először a lineárisan rugalmas anyagmodellel fogom elvégezni, a szabványban javasolt nyúlástartománytól kismértékben eltérő $0,25 - 0,45\%$ -os nyúlásértékek között meghatározott Young-modulus felhasználásával.

4.2.1. Anyagmodell és diszkretizáció

A lineárisan rugalmas anyagmodell létrehozásához a 3.3. pontban látható mért értékek közül a Young-modulus és a Poisson-tényező megadására volt szükség. A megadott értékek a 4.1. táblázatban láthatóak.

4.1. táblázat. PA 6 anyaparaméterei a lineárisan rugalmas anyagmodellhez

Young modulus	1107,060 MPa
Poisson tényező	0,45

A végeselemes diszkretizáció alatt szükséges megadni az elem típusát és annak kötelező attribútumait. A vizsgálathoz a legalkalmasabb a síkfeszültségi állapotot leíró membrán elemtípus, mely csak a saját síkjából érkező terheléseket tudja értelmezni. Ez a feltételezés megfelelő, mivel az anyagvizsgáló gép csak egy irányban fejt ki erőt, mely ebben az esetben az X tengely iránya. Az elemhez már definiált anyagmodellen kívül a lemez vastagsága és a 4.2. táblázatban szereplő tulajdonságok kerültek hozzárendelésre.



4.2. táblázat. A diszkretizáláshoz használt elem tulajdonságai

Elem típusa	Membrane
Elem alakja	négyszög
Elem fokszáma	Lineáris, kvadrátikus

4.2.2. Hálósűrűség analízis

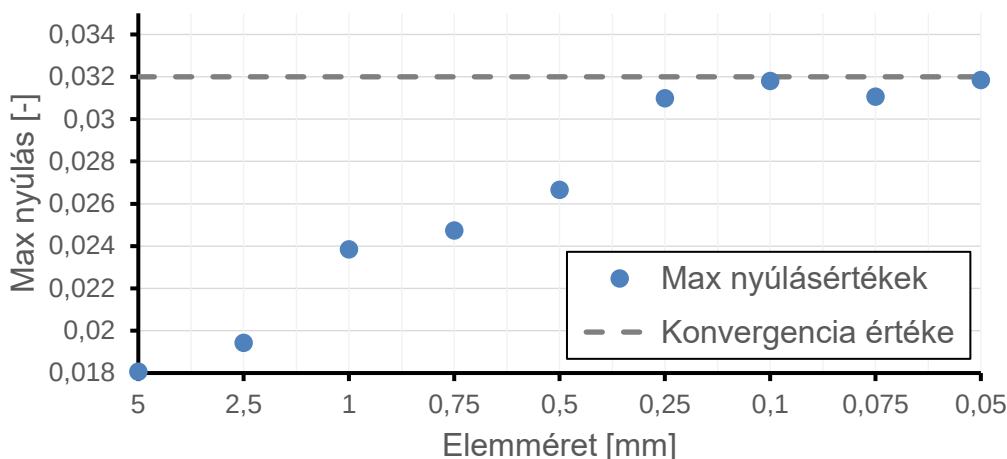
A hálósűrűség analízis elvégzése kihagyhatatlan annak érdekében, hogy a végelelemes számítások pontos eredményekkel szolgáljanak. Ennek elvégzéséhez az egyik modellen különböző hálósűrűségek mellett kell futtatni a szimulációt majd a kapott eredményeket grafikonba vezetni. Mivel a végelelem módszer egy közelítési eljárás, így a kapott eredmények egyre inkább egy valós eredményhez konvergálnak, de nem tudják azt elérni. A hálósűrűség analízis során azt a bizonyos sűrűséget keressük, mely után az eredmények már szinte teljesen megegyeznek.

Én a hálósűrűség analízishez az egyik összetettebb geometriájú próbatestet, a két oldalán mart lemezt használtam fel, mivel a másik megmunkált próbatest esetében is hasonló geometriai változások kaptak helyet, így elég csak az egyik próbatestet vizsgálni. A megadtam a különböző elemméreteket, majd minden elemmérettel behálóztam a felületeket négyzetelemek és a 4.4.1. pontban létrehozott Membrane tulajdonság segítségével. A szimulációk után kapott eredmények közül a maximum értékeket egy közös táblázatba vezettem, majd diagramban is ábrázoltam. Az értékek a 4.3. táblázatban láthatóak.

4.3. táblázat. Különböző elemmérettel futtatott szimulációkból kapott maximális feszültség-, nyúlásértékek és változásai

Elemméret [mm]	Feszültség konvergencia		Nyúlás konvergencia	
	Maximális Fesz- ültség [MPa]	Relatív változás	Maximális Nyúlás [-]	Relatív változás
5	20,04614	-	0,01806	-
2,5	21,50754	7,49%	0,0194129	7,49%
1	26,41015	22,79%	0,0238367	22,79%
0,75	27,40713	3,76%	0,0247322	3,76%
0,5	29,53023	7,77%	0,0266537	7,77%
0,25	34,34231	16,25%	0,0309841	16,25%
0,1	35,26681	2,63%	0,0317985	2,63%
0,075	34,44724	-2,33%	0,0310574	-2,33%
0,05	35,33152	2,54%	0,0318458	2,54%

Ezen eredmények közül a nyúlásértékek alapján választottam ki a megfelelő hálót, mivel a laboratóriumi vizsgálat során a GOM Aramis rendszer is ezt az értéket méri. A maximális nyúlásértékek változása különböző elemméretek függvényében a 4.6. ábrán látható.



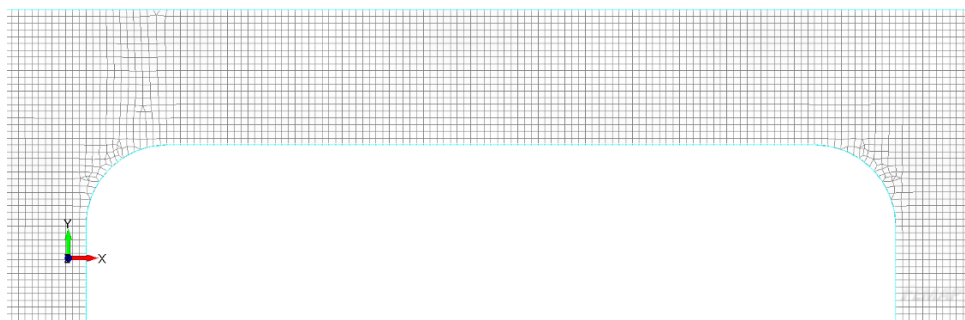
4.6. ábra. Nyúlásértékek különböző hálósűrűségek esetén

A diagramon látható, hogy az értékek a 0,25 mm-es elemméret után már csak minimális mértékben változnak meg, körülbelül a 0,032-es fajlagos nyúlásértékhez konvergálnak, így én ezt a hálósűrűséget választom a szimulációm elvégzésére.

4.4. táblázat. Az elemméret hatása a maximális elmozdulás értékekre

Elemméret [mm]	Elmozdulás [mm]	Relatív változás
5	1,4654	-
2,5	1,4797	0,98%
1	1,4909	0,76%
0,75	1,4921	0,08%
0,5	1,4931	0,07%
0,25	1,4937	0,04%
0,1	1,4939	0,01%
0,075	1,4939	0,00%
0,05	1,4939	0,00%

A feszültségértékek a nyúlásértékeknek megfelelően ugyanezen elemméret esetén kezdtek konvergálni hiszen azok között a Hooke törvény általi kapcsolat lineáris. Az elmozdulás értékek viszont már az 1 mm-es elemméret után nem mutattak jelentős változást. A 0,25 mm-től sűrűbb hálók esetében a számítások elvégzéséhez szükséges idő is lényegesen megnövekedett.

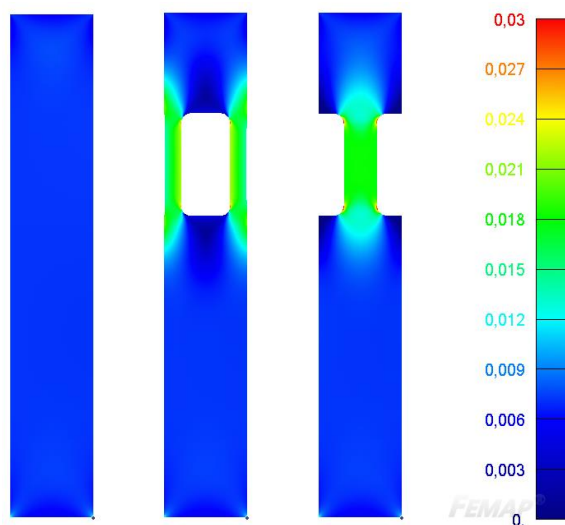


4.7. ábra. 0,25 mm-es elemmérettel készített háló a megmunkálás környékén

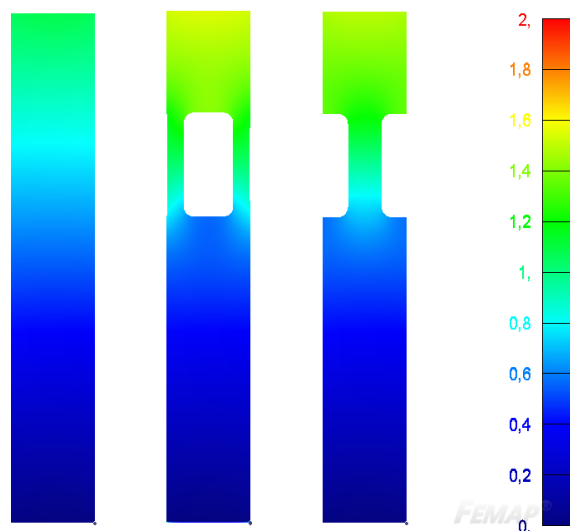
4.2.3. Szimuláció és kiértékelés a lineárisan rugalmas anyagmodellel, szabvány szerinti Young-modulussal

A szimuláció a próbatestek geometriáinak a hálósűrűség analízis során meghatározott hálóval történő felosztásával kezdődött, melyet a hálósűrűség analízis során leírt módon végeztem el. Majd a Simcenter Nastran megoldó segítségével megtörtént a számítás. Végül az eredmények kiértékelése következett, ahol figyelmet fordítottam arra, hogy azok egymással, és az optikai nyúlásmérő rendszer által adott eredményekkel is összevethetőek legyenek.

A kiértékelést elvégeztem a főnyúlásokra, a „*Plate Top MajorPRN Strain*” opcióval és az elmozdulásokra a „*Total Translation*” opcióval. Ezekre az értékek eloszlására fókuszálok a próbatestek felületének mentén, mivel a GOM Aramis rendszerrel végzett optikai vizsgálatokkal ezek vethetőek össze. A kiértékelt próbatestek a megfelelő skála mellett a 4.8. és 4.9. ábrákon láthatóak.



4.8. ábra. Nyúláseloszlás a három próbatesten



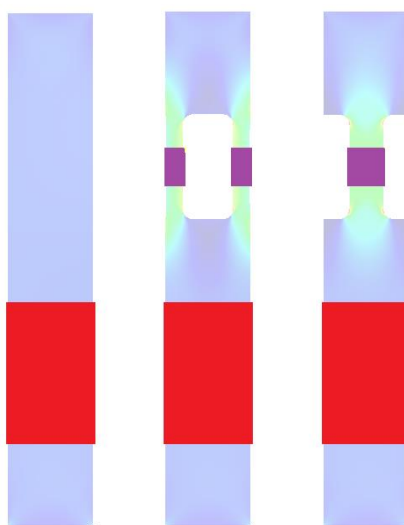
4.9. ábra. Elmozdulások a három próbatesten

A futtatási eredményekből kinyertem a maximum értékeket, mely a 4.5. táblázatban látható.

4.5. táblázat. Maximum értékek a három próbatest esetében

Próbatest	Nyúlás [-]	Elmozdulás [mm]
Teljes	0,0156862	1,0794
Középen mart	0,0259502	1,5491
Két oldalt mart	0,0309841	1,4937

Ezután leellenőriztem a három különböző lemez átlagos nyúlásértékeit a nagyobb keresztmetszetnél. Ehhez a de Saint-Venant-elv alapján állandósult értékeket tartalmazó elemeket választottam ki, melyek az $X = 25 \text{ mm}$ -től az $X = 65 \text{ mm}$ -ig helyezkednek el. A kiválasztott elemek a 4.10. ábrán pirossal láthatóak.



4.10. ábra. A vizsgálatokhoz kiválasztott elemek

Az így kiválasztott elemek átlagértékeit táblázatba vezettem, mely a 4.6. táblázatban látható.



4.6. táblázat. Átlagos nyúlások a három próbatest esetében nagy keresztmetszetenél

<i>Próbatestek</i>	<i>Átlagos nyúlás [-]</i>
<i>Teljes lemez</i>	0,00721094
<i>Középen mart lemez</i>	0,00720168
<i>Két oldalt mart lemez</i>	0,00721583
<i>Átlag</i>	0,00720948
<i>Szórás</i>	7,1866E-06
<i>Medián</i>	0,00721094
<i>Maximális eltérés</i>	0,13%

Ezután ellenőriztem a nagyobb átlagos nyúlásokat tartalmazó kisebb keresztmetszeteket a két megmunkált próbatesten. A de Saint-Venant-elv alapján az az $X = 100\text{ mm}$ -től $X = 110\text{ mm}$ -ig elhelyezkedő elemeket vettem figyelembe. A kiválasztott elemek a két megmunkált próbatest esetében a 4.10. ábrán lila színnel láthatóak. Az így kiválasztott elemek átlagértékei a 4.7. táblázatban láthatóak.

4.7. táblázat. Átlagos nyúlások a megmunkálásoknál

<i>Próbatestek</i>	<i>Átlagos nyúlás [-]</i>
<i>Középen mart lemez</i>	0,018022
<i>Két oldalt mart lemez</i>	0,018248
<i>Medián</i>	0,018135
<i>Maximális eltérés</i>	0,62%

A két különböző geometria ellenére a nyúlásértékek közel azonosak, ez az anyagmodell működésének, a közel tiszta húzó terhelésnek, illetve az azonos keresztmetszetnek tudható be.

4.3. Szimuláció lineárisan rugalmas anyagmodellel, maximumnál számított Young-modulussal

A második szimulációt szintén a lineárisan rugalmas anyagmodell segítségével fogom elvégezni, de ebben az esetben a maximum terheléshez (30 MPa) illesztett Young-modulus került felvételre anyagparaméternek.

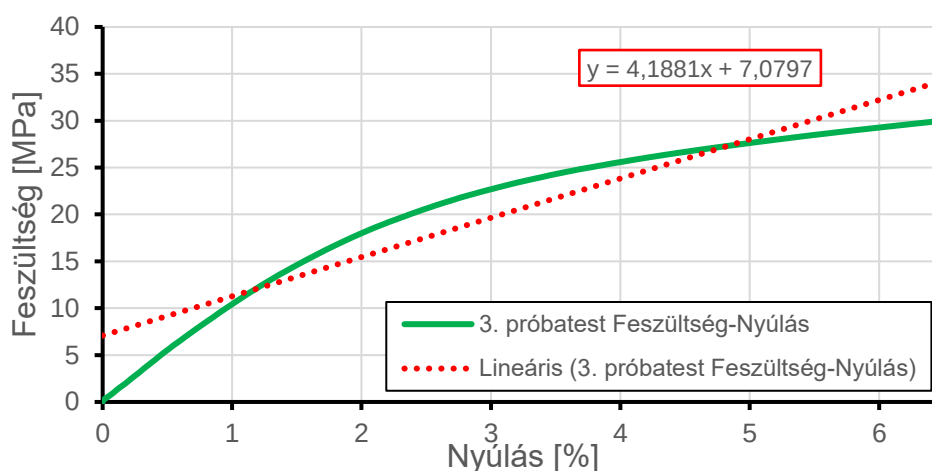
4.3.1. Anyagmodell és tulajdonság létrehozása

Ezen anyagmodell létrehozásához egy új Young-modulus kiszámítására van szükség a 0 és a 30 MPa közötti terhelés intervallumban. A kiszámításhoz ebben az esetben is a végpontokból

történő számítás és a vonalillesztés módszereit fogom használni. Először a végpontok segítségével számítottam ki a Young-modulus értékét minden próbatest esetében, a 4.2. képlet felhasználásával.

$$E = \frac{\sigma_{30} - \sigma_0}{\varepsilon_{30} - \varepsilon_0} \quad 4.2.$$

Ezután a vonalillesztés módszerével is meghatároztam a Young-modulust minden próbatest esetében. A vonalillesztés a 3. próbatest esetében a 4.11. ábrán látható.



4.11. ábra. Alsó szál nyúláseloszlásai a három próbatest esetében

A két módszer felhasználásával kapott eredményeket táblázatba vezettem, mely a 4.8. táblázatban látható.

4.8. táblázat. A két módszerrel kapott Young-modulus értékek 30 MPa-nál

Próbatestek	E végpontokkal [MPa]	E egyenes illesztéssel [Mpa]
Próbatest 1	447,7570038	404,650
Próbatest 2	450,4204204	401,590
Próbatest 3	461,2107037	418,810
Próbatest 4	477,0301403	428,210
Próbatest 5	478,6256007	429,220
Átlag	463,009	416,496
Szórás	14,446	12,913
Medián	461,211	418,810
Maximális eltérés	3,78%	4,11%

A táblázatban jól látható, hogy mindkét módszer a mérnöki gyakorlatban elfogadott 5%-os hibahatárnak megfelelő pontosságú volt, azonban egymástól lényegesen eltérnek az

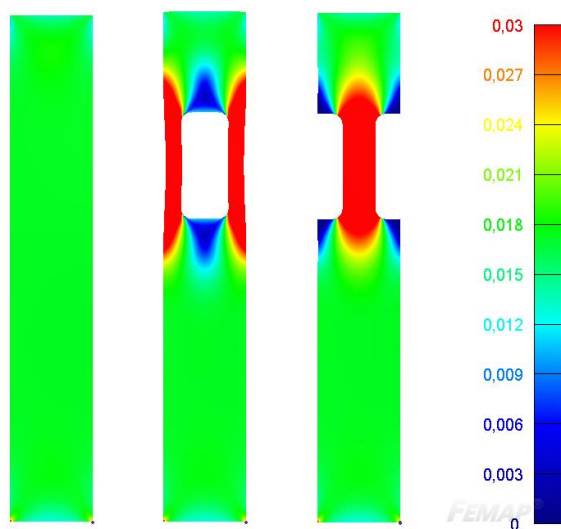
eredmények. Ebben az esetben a végpontokkal számított Young-modulust használtam fel a további számításokhoz, mivel a vonalillesztés a teljes intervallumot figyelembe vette, számomra viszont a 30 MPa-hoz tartozó alakváltozás helyes leírása a fontosabb. A Poisson-tényező nem változott a korábban megadott értékhez képest, így a szoftverben az anyagmodell létrehozásához megadott értékek a 4.9. táblázatban lázhatóak.

4.9. táblázat. PA 6 anyag	
Young modulus	463,009 MPa
Poisson tényező	0,45

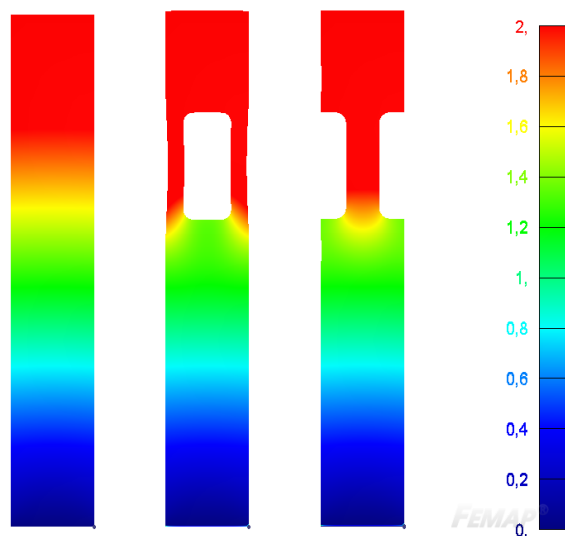
Az anyagmodell létrehozása után ebben az esetben is a végelelemes diszkretizáció következett, mely megegyezett a 4.2.1. pontban megadottal.

4.3.2. Szimuláció és kiértékelés a lineárisan rugalmas anyagmodellel, 30 MPa-hoz közelített Young-modulussal

A tulajdonság létrehozása után a következő lépés a szimuláció. Ebben az esetben nincs szükség hálósűrűség analízis elvégzésére, mivel a háló sűrűsége főként geometria függő, így felhasználható az előző szimuláció során meghatározott 0,25 mm-es elemméret. A szimulációk ebben az esetben is a Simcenter Nastran megoldó segítségével lettek elvégezve. A kiértékelést a korábbi szimulációhoz hasonlóan végeztem el. A legtöbb figyelmet ebben az esetben is a GOM Aramis rendszer által mérhető értékekre fordítottam, melyek a főnyúlás-és elmozdulásértékek voltak. A Három próbatest ezen értékekre kiértékelt képe a 4.12. és 4.13. ábrákon látható.



4.12. ábra. Nyúláseloszlás a három próbatesten



4.13. ábra. Elmozdulások a három próbatesten

A modellekből kinyertem az adatokat, melyek közül meghatároztam a maximum értékeket, ezek a 4.10. táblázatban láthatóak.

4.10. táblázat. Maximum értékek a három próbatest esetében

<i>Próbatest</i>	<i>Nyúlás [-]</i>	<i>Elmozdulás [mm]</i>
<i>Teljes</i>	0,0375969	2,5871
<i>Középen mart</i>	0,0621977	3,7129
<i>Két oldalt mart</i>	0,0742632	3,5801

A 4.4.3. pontban látható módon kiválasztottam a nagy keresztmetszetek vizsgálatához szükséges piros jelölésű elemeket, majd a kapott átlagos nyúlásértékeket táblázatba vezettem, mely a 4.11. táblázatban látható.

4.11. táblázat. Átlagos nyúlások a három próbatest esetében nagy keresztmetszetről

<i>Próbatestek</i>	<i>Átlagos nyúlás [-]</i>
<i>Teljes lemez</i>	0,0172883
<i>Középen mart lemez</i>	0,0172611
<i>Két oldalt mart lemez</i>	0,017295
<i>Átlag</i>	0,017281467
<i>Szórás</i>	1,79534E-05
<i>Medián</i>	0,0172883
<i>Maximális eltérés</i>	0,16%

Ezután megvizsgáltam az átlagos nyúlásokat a megmunkálások esetében is, szintén a 4.4.3. pontban látható elemek kiválasztásával. Ezen értékek a 4.12. táblázatban láthatóak.



4.12. táblázat. Átlagos nyúlások a megmunkálásoknál

Próbatestek	Átlagos nyúlás [-]
Középen mart lemez	0,043196
Két oldalt mart lemez	0,043202
Medián	0,043199
Maximális eltérés	0,01%

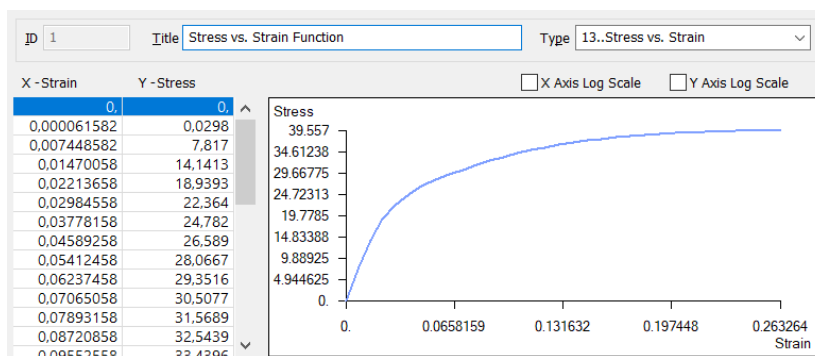
A kapott értékek ebben az esetben is a két különböző geometria ellenére közel azonosak, ez az anyagmodell működésének, a közel tiszta húzó terhelésnek, illetve az azonos keresztmetszetnek tudható be.

4.4. Szimuláció nemlineárisan rugalmas anyagmodellel

A harmadik szimulációt a Femap szoftverbe épített nemlineárisan rugalmas anyagmodell felhasználásával fogom elvégezni, melynek létrehozásához a szakítóvizsgálatok során kapott feszültség-alakváltozás görbe megadására van szükség.

4.4.1. Anyagmodell és tulajdonság létrehozása

A nemlineárisan rugalmas anyagmodell megadása nagyban hasonlít a lineárisan rugalmas anyagmodell létrehozásához, tehát meg kellett adni az anyag Young-modulusát, valamint Poisson-tényezőjét, a 4.4.1. pontban látható módon. A különbséget az képezi, hogy ebben az esetben ki kell egészíteni az anyagmodellt egy a nemlinearitást leíró függvénnyel. A függvény ebben az esetben a szakítóvizsgálatok során kapott feszültség-nyúlás görbe, melyet a folyáshatárig adtam meg. Az adatpontok mennyiségét a könnyebb kezelhetőség, illetve a megoldó könnyebb konvergálása érdekében csökkentettem másodpercenként egyre. Az így megadott függvény a szoftverkörnyezetben a 4.14. ábrán látható.

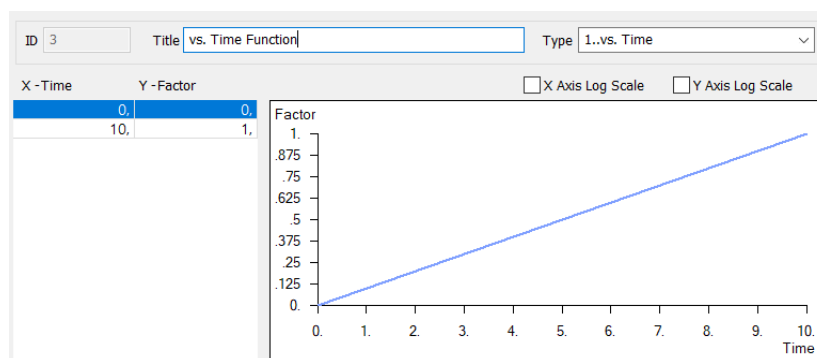


4.14. ábra. Nemlinearitást megadó feszültség-nyúlás görbe

Az anyagmodell ezen függvény hozzárendelése után készen áll, a következő lépés a végelelemes diszkretizáció volt, mely megegyezett a 4.2.1. pontban leírtakkal

4.4.2. Szimuláció és kiértékelés a nemlineárisan rugalmas anyagmodellel

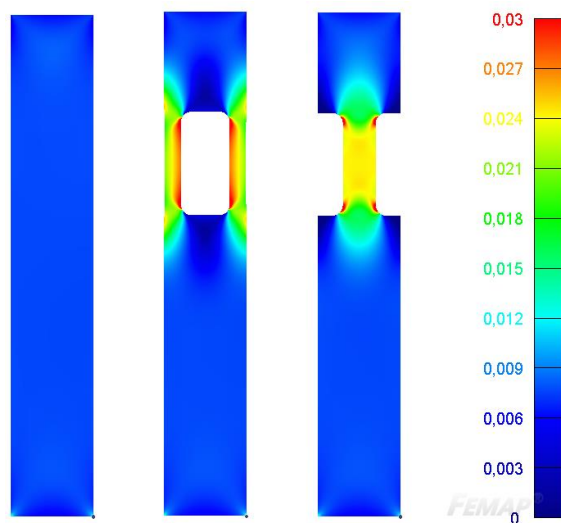
A szimulációt ebben az esetben a Simcenter Nastran megoldó „Nonlinear Static” moduljának segítségével végeztem el. Ahhoz, hogy ez a megoldó pontosan dolgozzon több lépésben kell elvégeznie a szimulációt. Ehhez a terhelés megadásánál egy függvény segítségével megadtam a terhelés időbeli lefolyását. A maximális terhelés elérésének ideje megegyezik az időlépcsők számával, mely ebben az esetben 10. A terheléshez társított függvény a 4.15. ábrán látható.



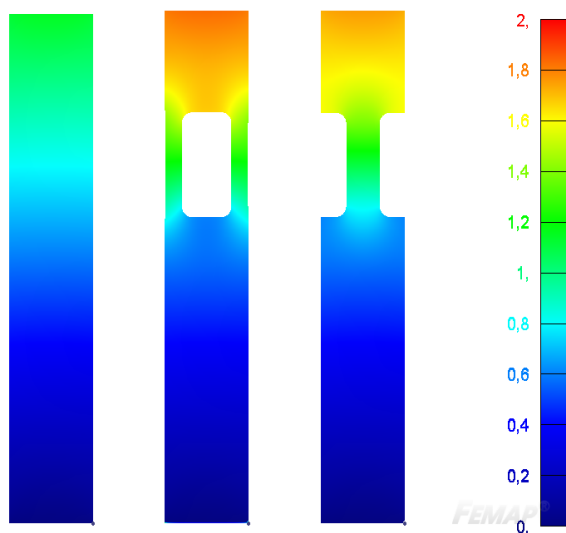
4.15. ábra. Terhelés fokozatosságát megadó függvény

A megoldó így 10 lépésben fogja elvégezni a szimulációt, minden lépés a megelőző lépés deformált állapotát veszi alapként és újra számol a saját terhelésértékével.

Hálósűrűség analízisre ebben az esetben sem volt szükség, itt is 0,25 mm-es elemméretet alkalmaztam. A kiértékelés ebben az esetben is a GOM Aramis rendszer által mérhető értékekre alapján lett elvégezve, tehát a főnyúlás-és elmozdulásértékre. A Három próbatest ezen értékekre kiértékelte képe a 4.16. és 4.17. ábrákon látható.



4.16. ábra. Nyúláseloszlás a három próbatesten



4.17. ábra. Elmozdulások a három próbatesten

Ebben az esetben is kinyertem az adatokat, a maximumértékeket pedig táblázatba vezettem, mely a 4.13. táblázatban látható.

4.13. táblázat. Maximum értékek a három próbatest esetében

<i>Próbatest</i>	<i>Nyúlás [-]</i>	<i>Elmozdulás [mm]</i>
<i>Teljes</i>	0,0178340	1,1469
<i>Középen mart</i>	0,0406364	1,8325
<i>Két oldalt mart</i>	0,0472186	1,7573

Ezután a 4.4.3. pontban látható módon ebben az esetben is leellenőrizem a nagy keresztmetszetek esetén adódó átlagos nyúlásértékeket mindhárom próbatest esetében. Az értékek a 4.14. táblázatban láthatóak.



4.14. táblázat. Átlagos nyúlások a három próbatest esetében nagy keresztmetszetenél

<i>Próbatestek</i>	<i>Átlagos nyúlás [-]</i>
<i>Teljes lemez</i>	0,00766086
<i>Középen mart lemez</i>	0,00765087
<i>Két oldalt mart lemez</i>	0,0076654
<i>Átlag</i>	0,007659043
<i>Szórás</i>	7,4334E-06
<i>Medián</i>	0,00766086
<i>Maximális eltérés</i>	0,13%

Következő lépésként a megmunkálásoknál adódó nagyobb átlagos nyúlásértékeket is ellenőriztem, szintén a 4.4.3. pont alapján. Az értékek a 4.15. táblázatban láthatóak.

4.15. táblázat. Átlagos nyúlások a megmunkálásoknál

<i>Próbatestek</i>	<i>Átlagos nyúlás [-]</i>
<i>Középen mart lemez</i>	0,024559
<i>Két oldalt mart lemez</i>	0,024558
<i>Medián</i>	0,024558
<i>Maximális eltérés</i>	0,00%

A kapott értékek ebben az esetben is közel megegyeznek a már többször említett okból.

5. Vizsgálat optikai nyúlásmérő rendszerrel

Ezen fejezet célja a laboratóriumi vizsgálat elvégzése a GOM Aramis Adjustable 12M optikai mérőrendszerrel. A fejezet elején a próbatestek előkészítéséről, illetve a festéséről ejtenék szót, melyet a vizsgálat bemutatása követ. Az elkészült képeket ezután a posztprocesszálok annak érdekében, hogy a véges elem módszerrel a lehető legjobban összehasonlítható eredményeket nyerjem ki belőlük. A fejezetet pedig a kinyert eredmények kiértékelésével zárom.

5.1. Próbatestek előkészítése, festése

A próbatestek a rajzoknak megfelelően egy PA6 anyagminőségű lemezből kerültek CNC marógép segítségével kimunkálásra, majd a GOM által előírt módon felkerült mindegyik próbatestre a sztochasztikus minta a méréseket megelőzően.

5.1.1. A próbatestek előkészítése

A próbatestek a Debreceni Egyetem Műszaki Karán az Anyag-és Gyártástechnológia laborban kerültek megmunkálásra, az itt megtalálható DMG Mori 4 tengelyes CNC vezérelt marógép segítségével. Az alapanyag ugyanazon PA6 anyagminőségű műanyag lemez volt, melyből a szakítópróbatestek is ki lettek vágva. A műanyag lapból egy 5 mm átmérőjű maró segítségével lettek a próbatestek megmunkálva a 2.4.2. pontban található rajz alapján. Az így kapott próbatestekről ezután kézi szerszám segítségével eltávolításra került a sorja. A 9 db elkészült próbatest a 5.1. ábrán látható.



5.1. ábra. A PA6 anyagminőségű lemezből CNC marógéppel kimunkált próbatestek

5.1.2. A próbatestek festése

Az elkészült próbatesteket ezután egyenként minden mérés előtt elő kellett készíteni. Ehhez először egy speciális, gyorsan párolgó porózus állagú mattító festéssel be kellett fújni a felületet egyenletesen. Ezután egy fekete festékszóróval a próbatest feletti ködölés segítségével kisméretű fekete mintázat készült. Így létrejött az 5.2. ábrán látható, a DIC módszert alkalmazó Aramis rendszer számára megfelelő úgynevezett *sztochasztikus* mintázat a próbatest felületén.



5.2. ábra. A próbatest vizsgált felületén elkészült sztochasztikus minta

A mattító festék hasznos tulajdonsága, hogy 4 óra múlva teljesen elpárolog a felületről, valamint egy kendő segítségével könnyen letörölhető, így a próbatestekre többször is felkerülhet a minta. A Correlate szoftver az elkészült mintát értékeli egy 0-tól 10-ig terjedő skálán, így könnyen megállapítható annak minősége.

5.2. Vizsgálat elvégzése, eredmények kiértékelése

A vizsgálatot elvégzéséhez először a metódus beállítására volt szükség, melyet a próbatestek egyenkénti mérése követett. A méréseket a 2. fejezetben leírtak alapján végeztem el. A kiértékelés során igyekeztem a végeelem módszerrel legjobban összehasonlítható eredményeket kinyerni.

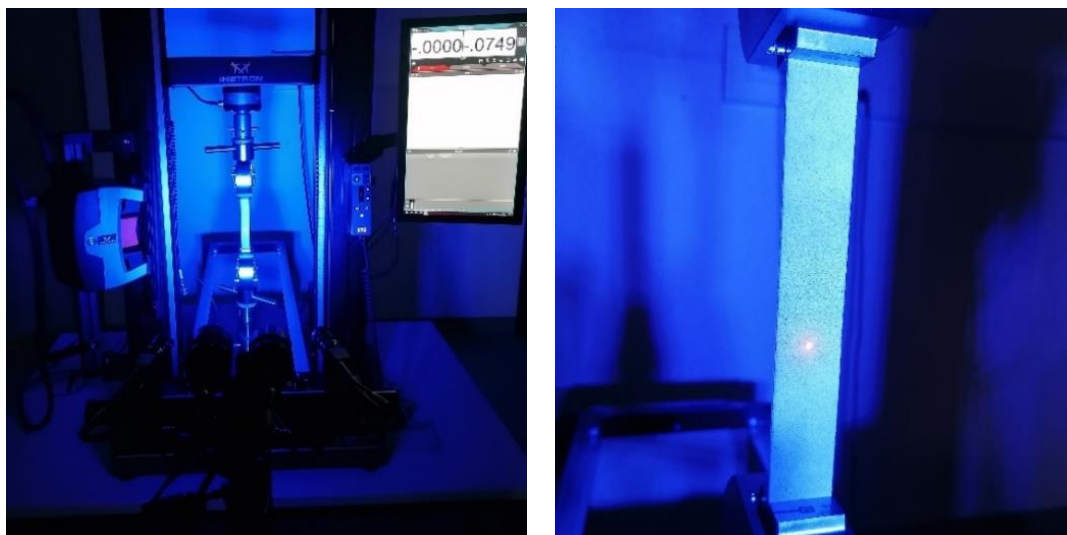
5.2.1. Az optikai mérési metódus bemutatása

A rendszert minden vizsgálat előtt kalibrálni kell, mely a rendszer használati útmutatója alapján lett elvégezve. A kalibráció eredményei az 5.1. táblázatban láthatóak.

5.1. táblázat. A kalibráció eredményei:

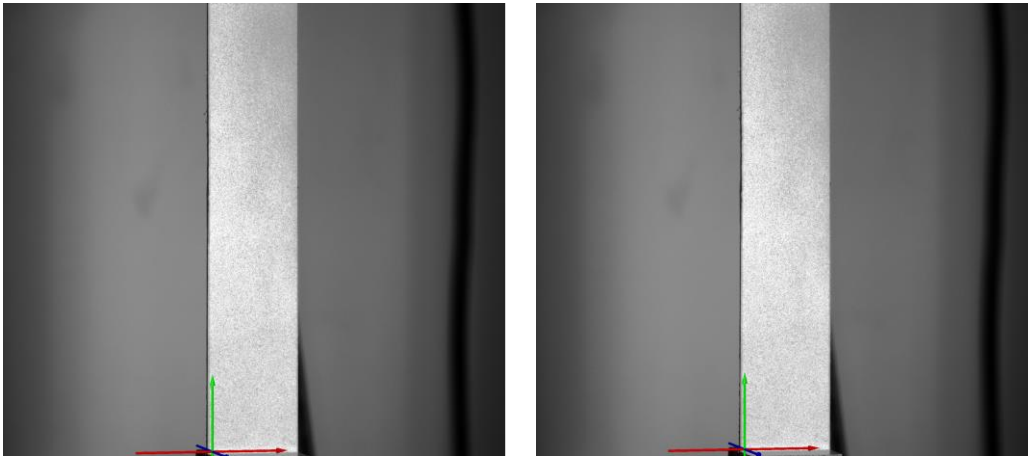
<i>Kalibráció dátuma:</i>	2021.10.05 10:43
<i>Kalibráció eltérése:</i>	0,033 pixel
<i>Kalibráció megengedett eltérése:</i>	0,1 pixel
<i>Kamerák szöge:</i>	24,9°
<i>Magasság variancia:</i>	66 mm
<i>Vizsgálati terület:</i>	175 / 130 / 110 mm

A kalibráció elvégzése után a mérési metódus beállítható, illetve a mérés elvégezhető. A próbatestek befogásához ékpályás befogókat alkalmazok, melyek távolságát pontosan 150 mm-re állítottam. A szakítógép szoftverében létrehoztam egy nullpontot annak érdekében, hogy minden próbatest ugyanazon hosszön kerüljön befogásra. A mérési elrendezés az 5.3. ábrán látható.



5.3. ábra. Mérési elrendezés

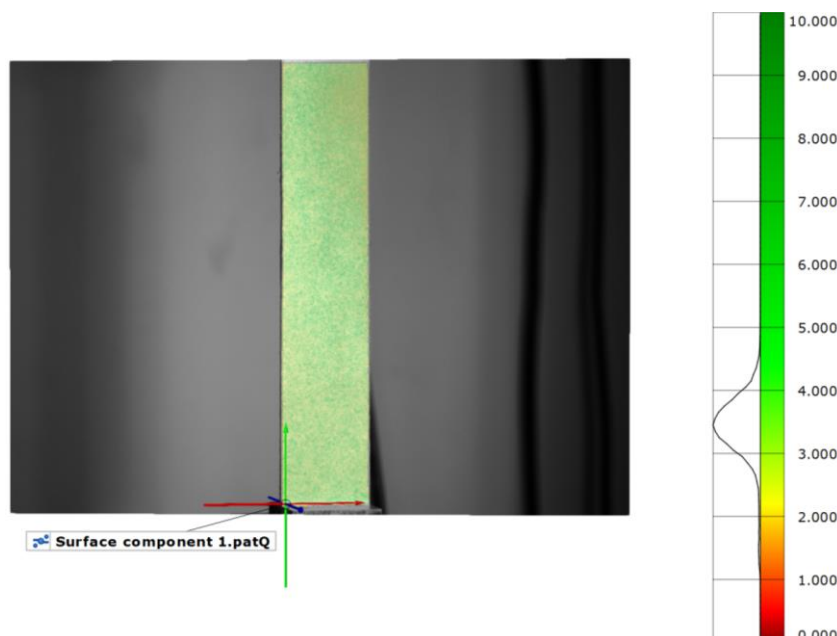
A minden próbatestről a befogás után egy képet készítettem az Aramis rendszer segítségével. Ez a kép fogja képezni a szoftver számára a kiinduló állapotot a minták közötti távolsághoz. A kép elkészítése után az Instron anyagvizsgáló gép segítségével felterheltem a próbatesteket 400 N-ra, az anyagtulajdonságok meghatározásakor alkalmazott 50 mm/perc sebességgel. A terhelést elérve újabb képet készítettem az optikai nyúlásmérő rendszerrel. Az első próbatestről készült első és második kép az 5.4. ábrán látható.



5.4. ábra. Az teljes lemez terhelés előtti és a terhelt képe

5.2.2. Az elkészült képek posztprocesszálása

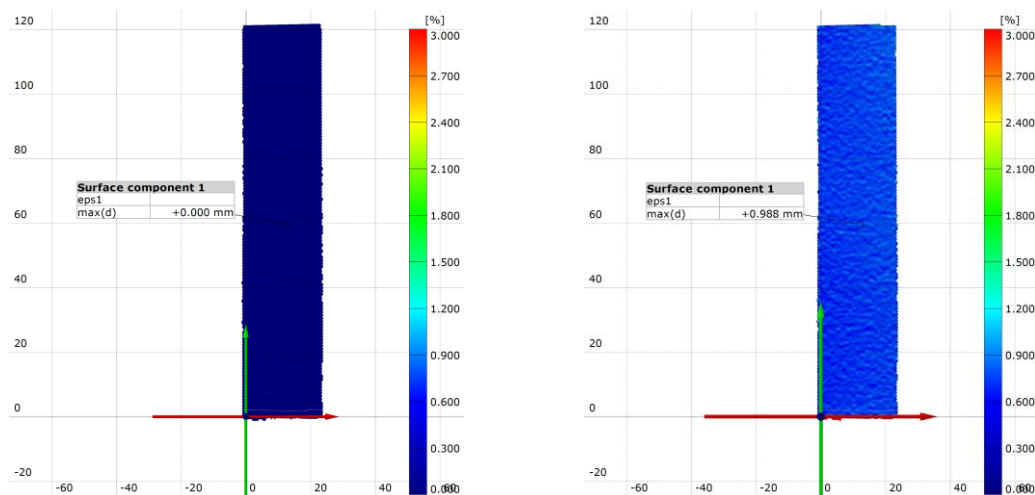
A képek elkészítése után egy felületelem (Surface Component) létrehozása szükséges, mely segítségével a felületre felfestett mintából van lehetőség kiválasztani a vizsgált területet. Ezeket a pontokat fogja a GOM Correlate szoftver a deformált képen nyomonkövetni. A felületelem létrehozásakor lehetőséget nyújt a szoftver a minta minőségének ellenőrzésére is. A minta minőségét egy 0-tól 10-ig terjedő skálán osztályozza, ahol a 3-as értéktől a minta megfelelőnek minősül. A minta minősége az első teljes lemez esetében az 5.5. ábrán látható.



5.5. ábra. Az 1. teljes lemez mintájának minősége

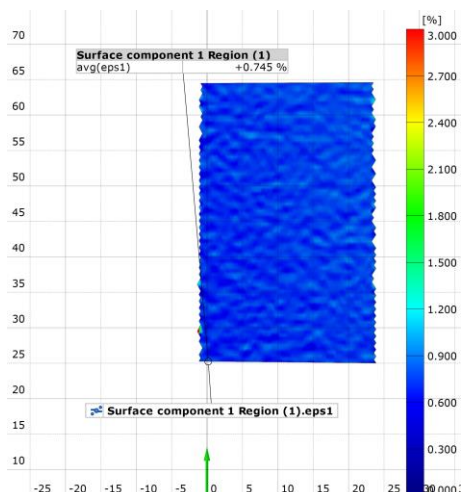
A kész felületelemet a szoftver háromdimenzióban is tudja kezelni, valamint a felületelem deformációját a szoftver különböző módon tudja kiértékelni. A vizsgálatom esetében a

főnyúlások, valamint az elmozdulások érdekesek. A nyúlásértékek változása az első és második kép között az 1. teljes próbatest esetében az 5.6. ábrán látható.



5.6. ábra. Az teljes lemez főnyúlásai kezdeti és terhelt állapotban

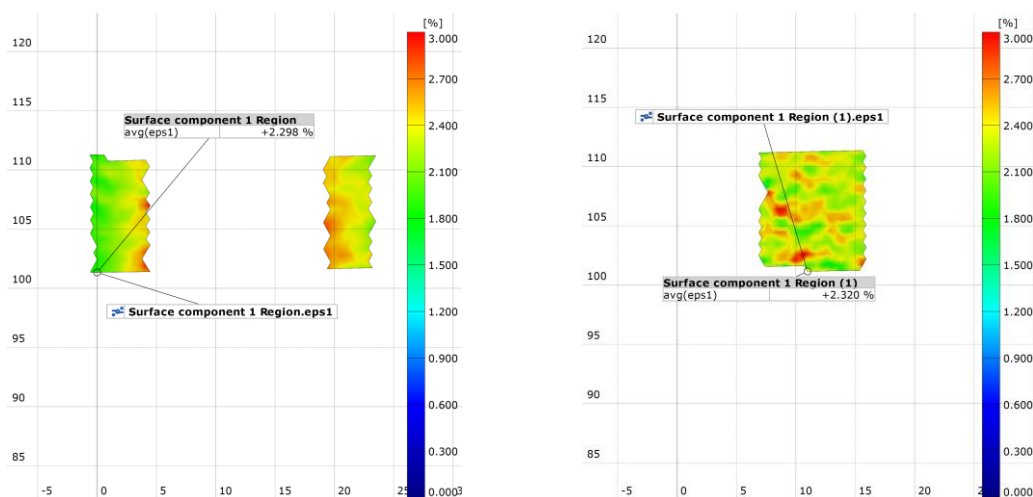
A nyúlásértékek kinyeréséhez különböző felületelem régiók létrehozására van szükség. Az egyik ilyen régió, amelyet minden próbatest esetében létrehozok, az a mérés előtti képen az $Y = 25 \text{ mm}$ -től az $Y = 65 \text{ mm}$ -ig tartó hossz. Ezen a területen fogom meghatározni a próbatestek szélesebb geometriájához tartozó átlagos nyúlásértékeket. A de Saint-Venant-elv értelmében ezen területen egyik próbatest esetében sem fogja befolyásolni a vizsgált értékeket a megmunkálás vagy a befogás. A létrehozott régió az átlagos főnyúlásértékekkel az 5.7. ábrán látható.



5.7. ábra. Az 1. teljes lemez átlagos nyúlásai a szélesebb régióban

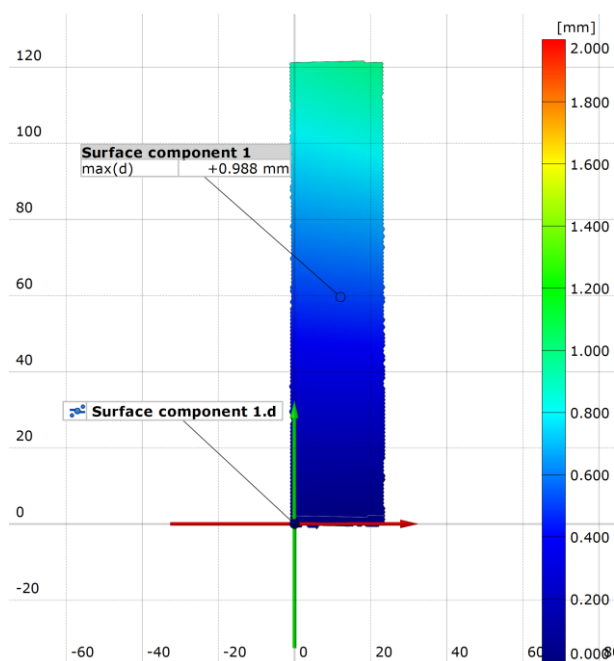
A komplexebb geometriák esetében azonban a keskenyebb területeken is létre kell hoznom egy ilyen régiót, mely a mérés előtti képen az $Y = 100 \text{ mm}$ -től $Y = 110 \text{ mm}$ -ig tart. Ezen területen szintén teljesül a de Saint-Venant-elv, mivel a megmunkált területek hossza 30 mm ,

mely az $Y = 90 \text{ mm}$ -től az $Y = 120 \text{ mm}$ -ig tart, keresztmetszet legnagyobb mérete 10 mm . Az így létrehozott felületrégiók és az átlag értékeik egy két oldalt mart és egy közepén mart próbatest esetén az 5.8. ábrán látható.



5.8. ábra. A középén- és két oldalt mart lemezek kis keresztmetszetű felületrégióinak nyúlása

A felületelem maximum elmozdulását a deformált képen szintén ellenőrzöm. A teljes lemez esetében az elmozdulás az 5.9. ábrán látható.



5.9. ábra. A teljes lemez elmozdulás állapota

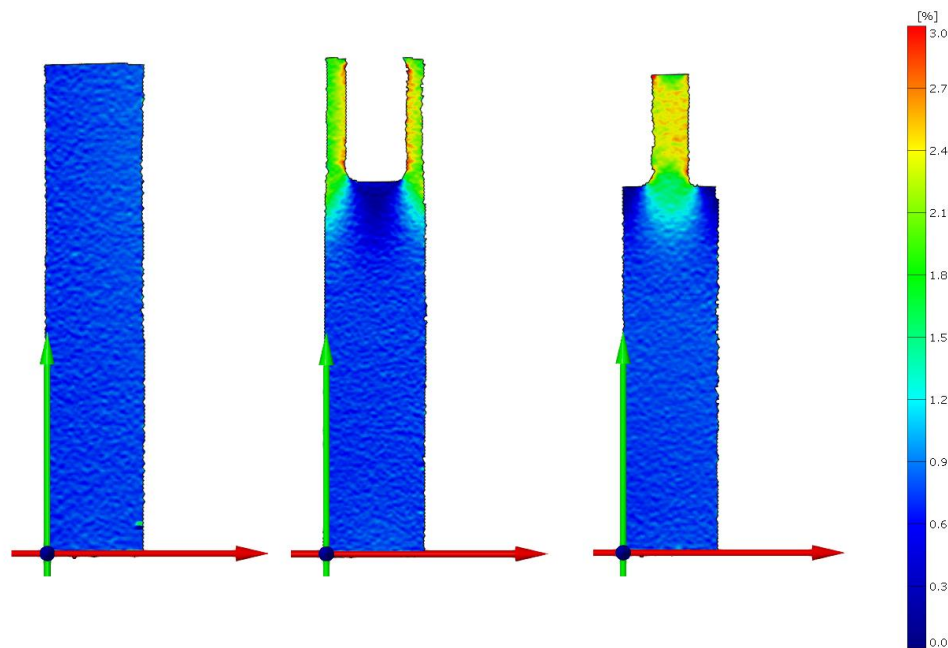
5.2.3. Eredmények kiértékelése

A posztprocesszálast minden próbatest kezdeti és terhelt állapotában készült kép esetén elvégeztem, melyekből ezután kinyertem az adatokat. Ezeket próbatest típusonként vetettem össze. Az összehasonlítást a szélesebb geometriánál mért nyúlásértékekkel kezdtem. A típusok nyúlásértékei az 5.2. táblázatban láthatóak.

5.2. táblázat. A nagyobb geometriánál adódó nyúlásértékek a különböző típusoknál

<i>Próbatestek</i>	<i>Teljes [%]</i>	<i>Két oldalt mart [%]</i>	<i>Középen mart [%]</i>
<i>Próbatest 1</i>	0,744	0,794	0,727
<i>Próbatest 2</i>	0,745	0,775	0,745
<i>Próbatest 3</i>	0,782	0,774	0,733
<i>Átlag</i>	0,757	0,781	0,735
<i>Szórás</i>	0,021656408	0,011269428	0,009165151
<i>Medián</i>	0,745	0,775	0,733
<i>Maximális eltérés</i>	4,97%	2,45%	1,64%

A táblázat értékeinek kis szórása és 5%-tól kisebb maximális eltérése alapján a vizsgálat megismételhető. A mért próbatestek közül kiválasztom a mediánértékekhez tartozó próbatesteket a különböző típusokban, és ezeket fogom tovább vizsgálni. Az így kiválasztott próbatestek tehát a 2. teljes lemez, a 3. középen mart lemez és a 2. két oldalt mart lemez. Az így kiválasztott három lemez nyúlásképe az 5.10. ábrán látható.



5.10. ábra. A három lemez nyúláseloszlásai



A három kiválasztott próbatest nyúlásértékeit egymáshoz hasonlítva ellenőrizhető a de Saint-Venant-elv teljesülése, ez a 5.3. táblázatban látható.

5.3. táblázat. A kisebb geometriánál adódó nyúlások a megmunkált próbatestek esetében

<i>Próbatestek</i>	<i>Átlagos nyúlás [%]</i>
<i>Teljes lemez</i>	<i>0,745</i>
<i>Középen mart lemez</i>	<i>0,733</i>
<i>Két oldalt mart lemez</i>	<i>0,775</i>
<i>Átlag</i>	<i>0,751</i>
<i>Szórás</i>	<i>0,021633</i>
<i>Medián</i>	<i>0,745</i>
<i>Maximális eltérés</i>	<i>4,03%</i>

A kapott átlagos nyúlásértékek 4,03%-os eltérése alátámasztja a de Saint-Venant-elv elméleti háttérét, mivel a vizsgált felület régiók úgy lettek létrehozva, hogy a befogástól, illetve a megmunkálásoktól is kimaradjon a keresztmetszet legnagyobb méretének megfelelő 25 mm-es távolság.

A két megmunkált lemez képeiből ezután kinyertem a megmunkálásoknál a kisebb keresztmetszetből adódó nyúlásértékeket. Ezek az értékek a 5.4. táblázatban láthatóak.

5.4. táblázat. A kisebb geometriánál adódó nyúlások a megmunkált próbatestek esetében

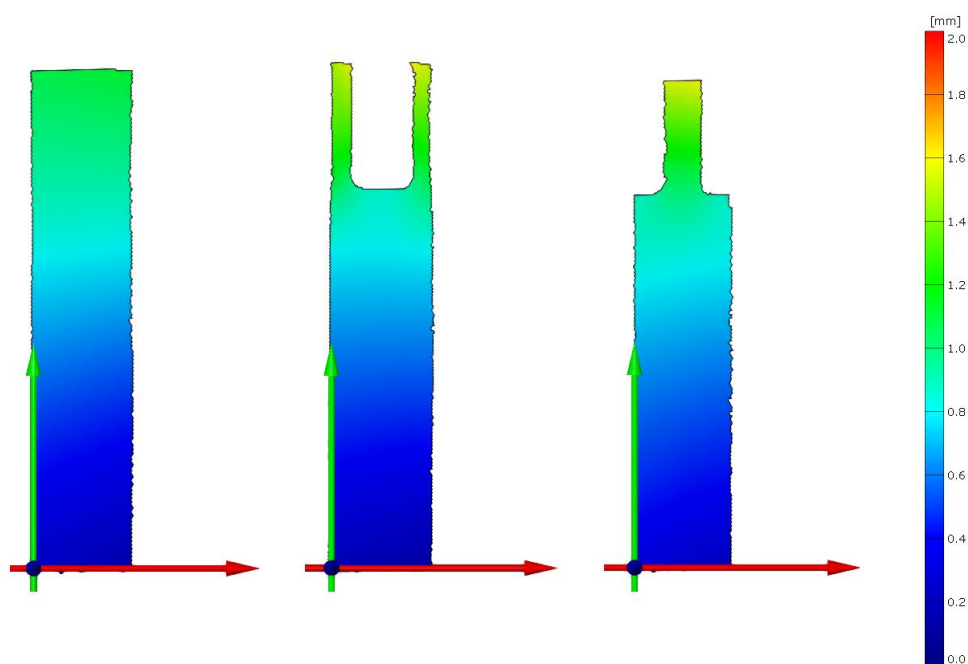
<i>Próbatestek</i>	<i>Átlagos nyúlás [%]</i>
<i>Középen mart lemez</i>	<i>2,335</i>
<i>Két oldalt mart lemez</i>	<i>2,396</i>
<i>Medián</i>	<i>2,3655</i>
<i>Maximális eltérés</i>	<i>1,29%</i>

A két különböző geometria a várakozásoknak megfelelően nagyon hasonló értékeket mutatott, az eltérés a két érték között mindössze 1,29%, tehát a vizsgálat a nagyobb nyúlásoknál is pontosnak mondható. A következő lépésként a három próbatest típus elmozdulásait nyertem ki, melynek értékei az 5.5. táblázatban láthatóak.

5.5. táblázat. Maximális elmozdulás értékek a három különböző próbatesttípus esetében

<i>Próbatestek</i>	<i>Maximális elmozdulás [mm]</i>
<i>Teljes lemez</i>	0,961
<i>Középen mart lemez</i>	1,643
<i>Két oldalt mart lemez</i>	1,581

A geometriából adódóan a három próbatest értékei nem hasonlíthatók össze, ezért nem tartalmaz a táblázat átlag, szórás, medián, illetve maximális eltérés sorokat.

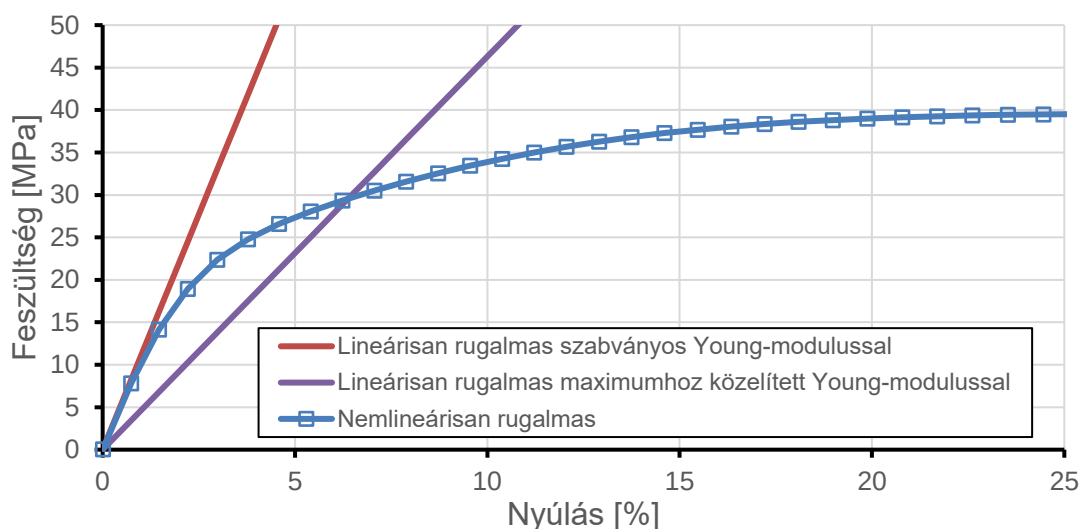


5.11. ábra. A három lemez elmozdulásai

A kiértékelések után a kapott értékek a végeselemes szimulációk során kapott értékekkel összevethetőek, melyből a következtetések levonhatóak.

6. Az optimális anyagmodell kiválasztása

Ezen fejezet célja az optimális anyagmodell kiválasztása, melyhez először a nagyobb keresztmetszeteknél kapott értékeket fogom felhasználni. Ezeket a teljes lemezen fogom vizsgálni. A teljes lemez vizsgálatát a megmunkált próbatestek nyúlás-, illetve elmozdulás értékeinek vizsgálata fogja követni. A három vizsgált anyagmodell közül a mért értékek segítségével fogom kiválasztani azt, amelyik a legjobban megfelel a mért értékeknek. Emellett meg fogom határozni az egyes anyagmodellek alkalmazási korlátait.



6.1. ábra. A feszültség és nyúlás kapcsolata a három anyagmodell esetében

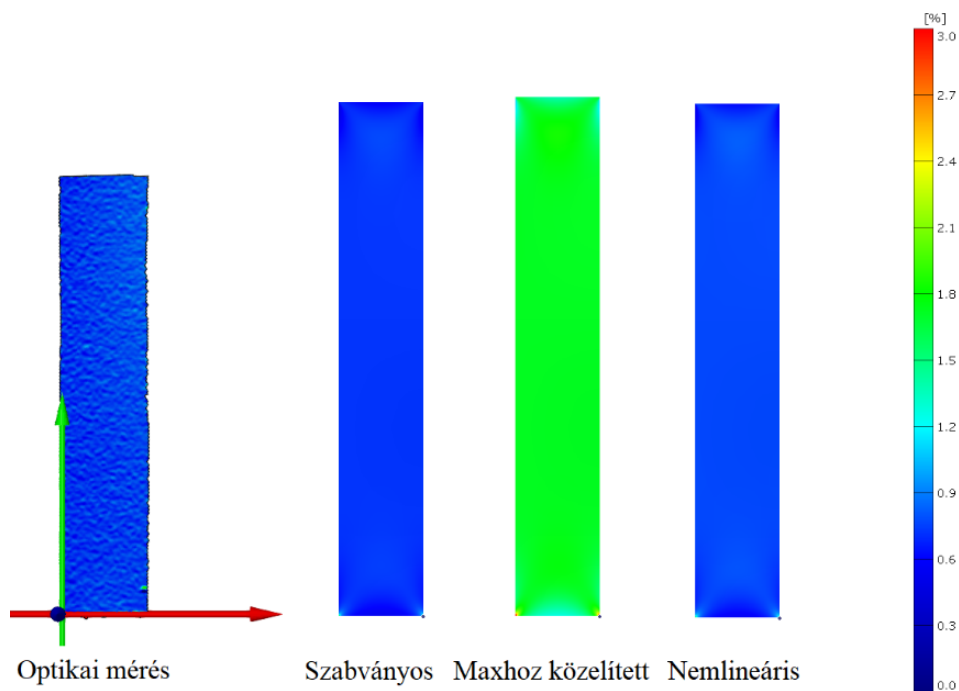
6.1. Teljes lemez ellenőrzése

A teljes lemez értékeinek ellenőrzését a nyúlásértékek összevetésével kezdtem. A három anyagmodell, illetve a mérés által szolgáltatott értékeket táblázatba vezettem, mely a 6.1. táblázatban látható.

6.1. táblázat. Átlagos nyúlásértékek a teljes lemez esetén

Módszerek	Nyúlás [%]	Eltérés a méréstől
Optikai mérés	0,745	-
Szabványos Young-modulussal	0,721	-3,22%
Maxhoz közelített Young-modulussal	1,728	131,96%
Nemlineárisan rugalmas	0,766	2,82%

A táblázat értékeiből jól látszik, hogy a maximum terheléshez közelített Young-modulussal történő számítás esetén jóval nagyobb értékek jelentek meg, mint a mérés esetén. Ennek oka a szakítógörbék kezdeti nagy meredeksége, mely körülbelül a 15 MPa érték után egyre inkább ellaposodik. A 30 MPa -hoz történő lineáris közelítéssel így a kis nyúlásokhoz nem megfelelő értékek születtek. A szabványos Young-modulussal történő lineáris közelítés, illetve a nemlineáris közelítés azonban közel $3 - 3 \%$ -os eltérést nyújtott, mely alapján kijelenthető, hogy ezen két anyagmodell közül bármelyik felhasználható kis nyúlásértékek esetén. A 3% -os hiba egybevág a Young-modulus meghatározásakor kapott 3% -os maximális eltéréssel, mely a 3.4. táblázatban figyelhető meg. A négy módszerrel kapott képeket egy színskála mentén is elhelyeztem, melyen szintén szépen látszanak a fent említett következtetések, a kép a 6.2. ábrán látható.



6.2. ábra. A teljes lemez nyúlásértékei azonos színskála mellett

A teljes lemez értékei alapján nem lehetséges egyetlen anyagmodell kiválasztása, ehhez a megmunkált próbatestek értékeinek megvizsgálása is szükséges.

6.1.1. A megmunkálások ellenőrzése

A megmunkált próbatestek kisebb keresztmetszetű részein nagyobb nyúlásértékek esetén is megvizsgálható az illesztett anyagmodellek viselkedése. Ebben az esetben is a mért értékek alapul vételével egy relatív hiba számítható, mellyel az anyagmodellek pontossága



meghatározható a megmunkálásoknál is. A mért érték, és az anyagmodellek által szolgáltatott értékek, illetve ezek relatív hibája a méréshez képest a 6.2. és a 6.3. táblázatokban látható.

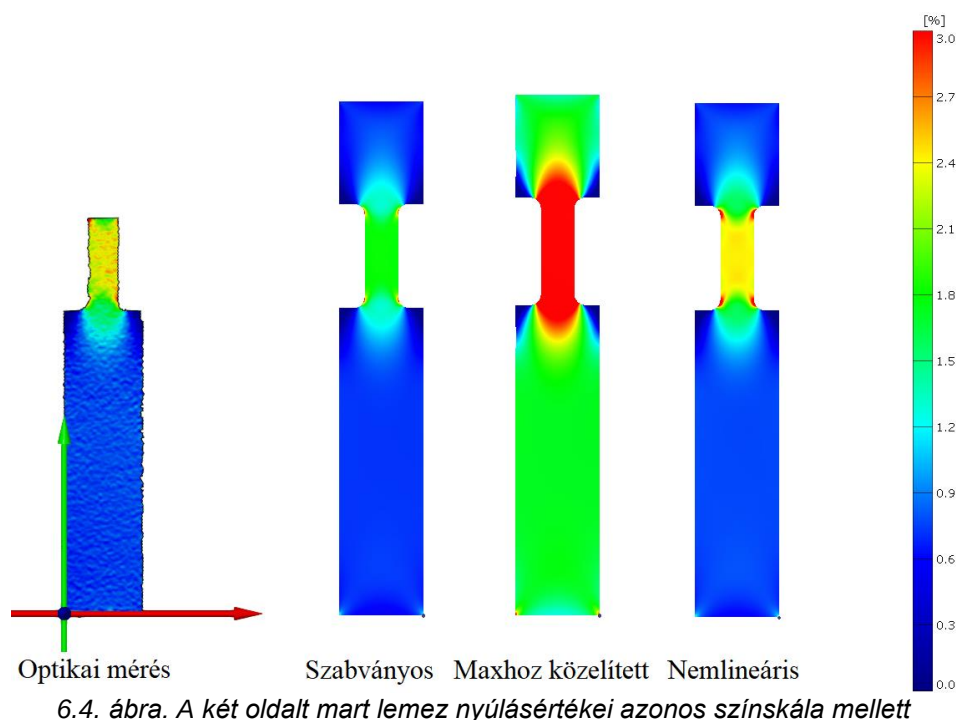
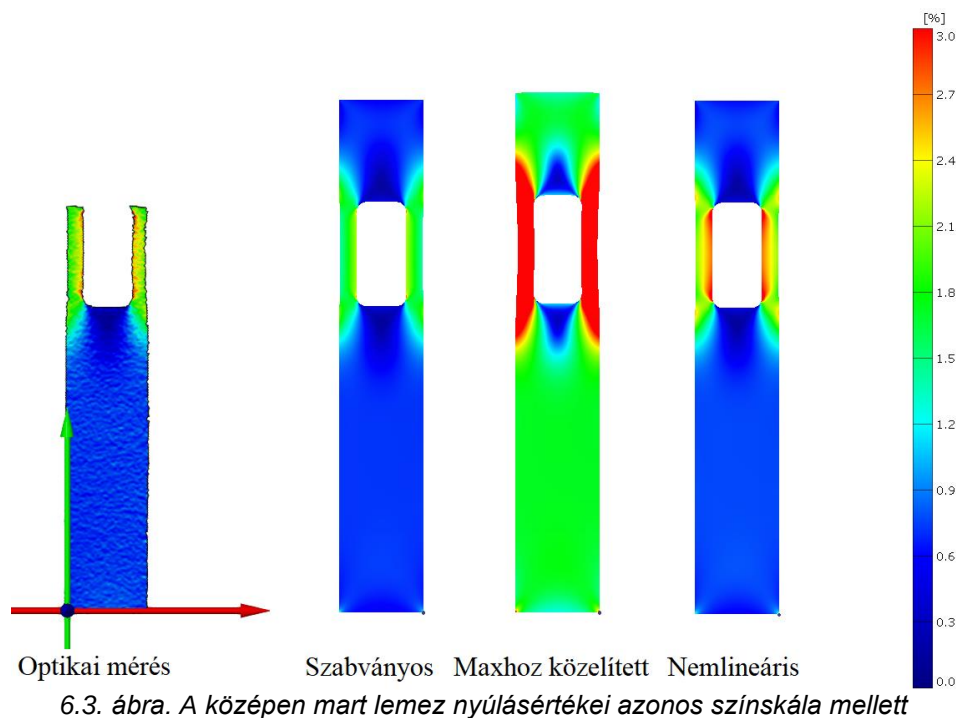
6.2. táblázat. Átlagos nyúlásértékek a megmunkálásoknál a középén mart lemez esetén

<i>Módszerek</i>	<i>Nyúlás [%]</i>	<i>Eltérés a méréstől</i>
<i>Optikai mérés</i>	2,335	-
<i>Szabványos Young-modulussal</i>	1,8022	-22,82%
<i>Maxhoz közelített Young-modulussal</i>	4,3196	84,99%
<i>Nemlineárisan rugalmas</i>	2,44062	4,52%

6.3. táblázat. Átlagos nyúlásértékek a megmunkálásoknál a két oldalt mart lemez esetén

<i>Módszerek</i>	<i>Nyúlás [%]</i>	<i>Eltérés a méréstől</i>
<i>Optikai mérés</i>	2,396	-
<i>Szabványos Young-modulussal</i>	1,8248	-23,84%
<i>Maxhoz közelített Young-modulussal</i>	4,3202	80,31%
<i>Nemlineárisan rugalmas</i>	2,42566	1,24%

Az eredményekből jól látható, hogy a megmunkálások esetében a nemlineárisan rugalmas anyagmodell nyújtotta a legpontosabb eredményt. A középén mart lemez esetében 4,52% relatív hiba jelentkezett, a két oldalt mart lemez esetében pedig 1,24%. Mindkét eredmény megfelel a mérnöki gyakorlatban elterjedt 5%-os hibahatárnak. A szabványos Young-modulussal létrehozott lineárisan rugalmas anyagmodell esetében a nagy hiba annak tudható be, hogy a műanyag szakítógörbéje kb. a 15 MPa-os feszültség után egyre inkább ellaposodik, melyet a lineáris közelítés nem tud lekövetni. A maximum terheléshez közelített lineárisan rugalmas anyagmodell esetében a probléma hasonló, de ebben az esetben a lineáris közelítés jóval a valós szakítógörbe alatt halad el. Ennél a nyúlásértéknél egyértelműen a nemlineárisan rugalmas anyagmodell a legalkalmasabb. A táblázat eredményeit a képek közös színskála mellett történő ábrázolása is tükrözi, mely a 6.3. és 6.4. ábrákon látható.



6.1.2. Lokális maximum nyúlások ellenőrzése

A nyúlásértékek összehasonlításának utolsó szempontja a lokális maximum értékek ellenőrzése. Ebben az esetben is a megmunkált próbatesteket használtam fel, mivel csak a komplexebb geometriák esetében alakulnak ki feszültséggyűjtő helyek, ahol a feszültségekkel arányosan a nyúlásértékek is megnövekednek. Ebben az esetben a végelem szoftverben és a



GOM szoftverében is a lekerekítések közelében kijelöltem egy kis területet, ahol a maximumértékeket ellenőrzöm. A lokális maximumértékek a mérések, illetve a szimulációk esetében a 6.4. és a 6.5. táblázatokban látható.

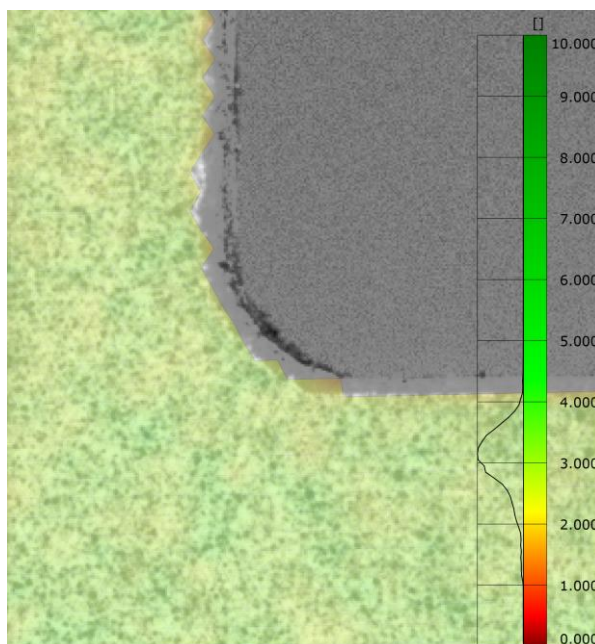
6.4. táblázat. Lokális maximumértékek a középen mart lemez esetén

<i>Módszerek</i>	<i>Nyúlás [%]</i>	<i>Eltérés a méréstől</i>
<i>Optikai mérés</i>	3,229	-
<i>Szabványos Young-modulussal</i>	2,59502	-19,63%
<i>Maxhoz közelített Young-modulussal</i>	6,21977	92,62%
<i>Nemlineárisan rugalmas</i>	4,05772	25,66%

6.5. táblázat. Lokális maximumértékek a két oldalt mart lemez esetén

<i>Módszerek</i>	<i>Nyúlás [%]</i>	<i>Eltérés a méréstől</i>
<i>Optikai mérés</i>	4,132	-
<i>Szabványos Young-modulussal</i>	3,09841	-25,01%
<i>Maxhoz közelített Young-modulussal</i>	7,42632	79,73%
<i>Nemlineárisan rugalmas</i>	4,7166	14,15%

A lokális maximumok esetén egyik anyagmodell sem szolgáltat megfelelő eredménnyel. Azonban az ezt megelőző vizsgálatokban jól teljesítő nemlineáris anyagmodellt alapul véve következtethető, hogy az optikai mérőrendszer nem képes ilyen szintű lokális maximumértékek mérésére. Ennek egyik oka lehet, a sztochasztikus minta és a háttér közötti szegmentálási pontatlanság, tehát nem megfelelően tudja behatárolni a képeken látható próbatestek széleit, valamint szintén nem megfelelően tudja az íveket lekövetni. Az egyik ilyen feszültséggyűjtő hely körüli behatárolás a 6.5. ábrán látható. A mérőrendszer lehetséges hibája miatt ebben az esetben nem lehet kiválasztani a megfelelő anyagmodellt.



6.5. ábra. Nem megfelelő szegmentálás egy lekerekítés mentén

6.1.3. Elmozdulások ellenőrzése

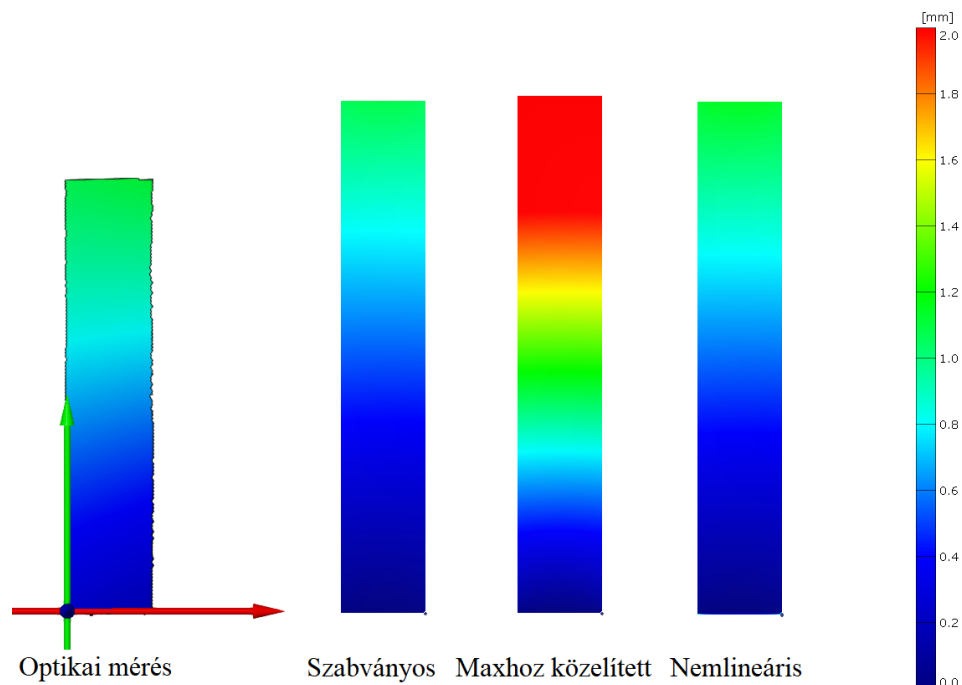
A maximális elmozdulásokat ellenőriztem a különböző próbatestek esetében. A végelelem szimulációk során a teljes próbatestet modelleztem le, a kamera azonban csak egy 120 mm-es hosszt lát a próbatestekből, tehát a végelelemes eredményeknél is csak ezt a 120 mm-es hosszt veszem figyelembe a próbatestek közepén. Az összehasonlítást a teljes lemez eredményeivel kezdtem, a maximális elmozdulás értékek a 6.6. táblázatban láthatóak.

6.6. táblázat. Maximális elmozdulások a teljes lemez esetén

<i>Módszerek</i>	<i>Elmozdulás [mm]</i>	<i>Eltérés a méréstől</i>
<i>Optikai mérés</i>	0,961	-
<i>Szabványos Young-modulussal</i>	0,861331	-10,37%
<i>Maxhoz közelített Young-modulussal</i>	2,064449	114,82%
<i>Nemlineárisan rugalmas</i>	0,915128	-4,77%

A teljes lemez értékei alapján ebben a nemlineárisan rugalmas anyagmodell nyújtotta a pontos eredményt. A szabványos Young-modulussal számított lineárisan rugalmas anyagmodell esetében a nagyobb mértékű hibát a befogásoknál létrejövő nagyobb feszültségek eredményezhetik. A maximumhoz közelített lineárisan rugalmas anyagmodell esetében a sokkal kisebb rugalmassági modulus eredményezte a túl nagy mértékű elmozdulást. Ezt a

táblázat mellett a négy különböző kép közös színskála mellett történő ábrázolása is megmutatja, mely a 6.6. ábrán látható.



6.6. ábra. A teljes lemez elmozdulás értékei azonos színskála mellett

Ezután összehasonlítottam a megmunkált próbatestek elmozdulás értékeit. Ezek a 6.7. és 6.8. táblázatokban láthatóak.

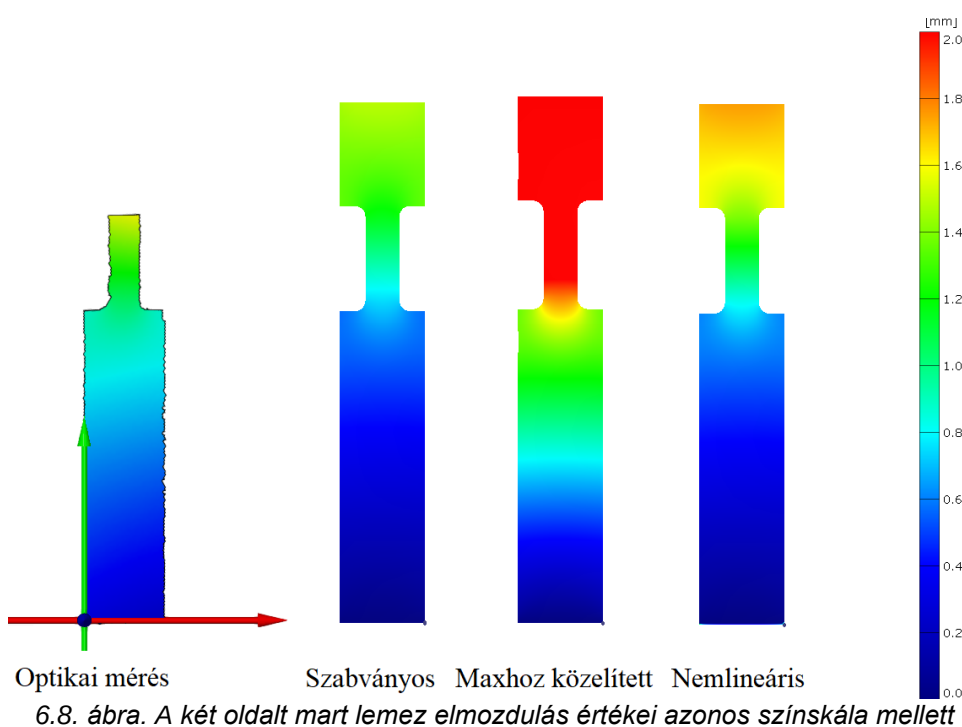
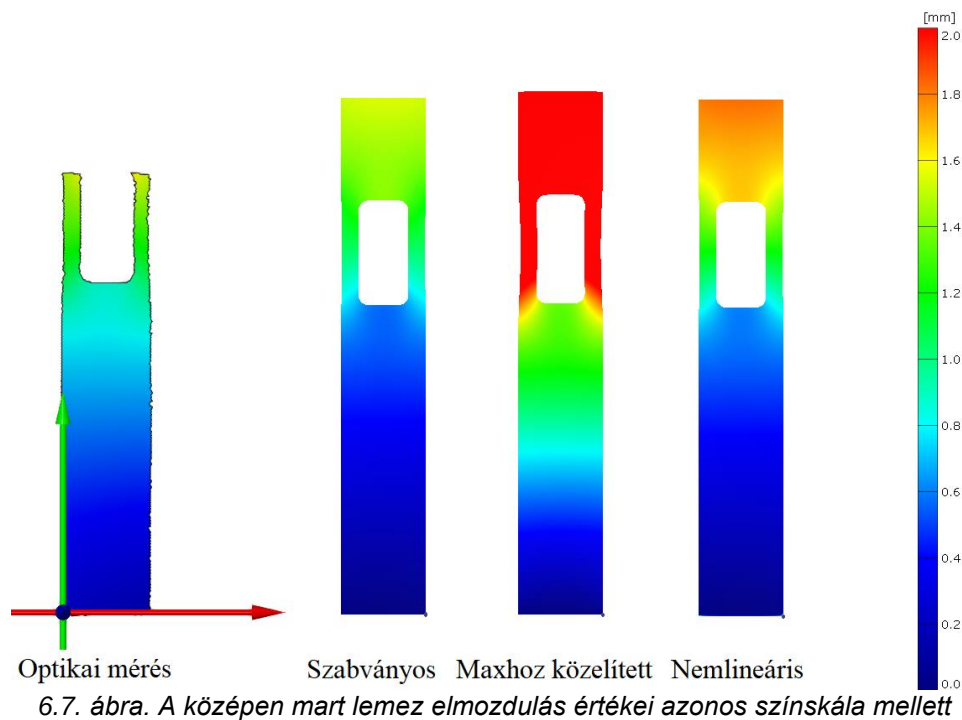
6.7. táblázat. Maximális elmozdulások a középen mart lemez esetén

Módszerek	Elmozdulás [mm]	Eltérés a méréstől
Optikai mérés	1,631	-
Szabványos Young-modulussal	1,409765	-13,56%
Maxhoz közelített Young-modulussal	3,378942	107,17%
Nemlineárisan rugalmas	1,697979	4,11%

6.8. táblázat. Maximális elmozdulások a két oldalt mart lemez esetén

Módszerek	Elmozdulás [mm]	Eltérés a méréstől
Optikai mérés	1,521	-
Szabványos Young-modulussal	1,348762	-11,32%
Maxhoz közelített Young-modulussal	3,23273	112,54%
Nemlineárisan rugalmas	1,59131	4,62%

A megmunkált próbatestek elmozdulás értékeinek kiértékelése ismételten alátámasztotta a nemlineárisan rugalmas anyagmodell pontosságát. A teljes lemezhez hasonlóan a különböző anyagmodellekkel kapott, illetve a mért eredmények a 6.7. és a 6.8. ábrákon láthatóak.





6.2. Az optimális anyagmodell

A megfelelő anyagmodell a poliamid húzóvizsgálatainak szimulációjához az optikai nyúlásmérő eredményeivel történő összehasonlítás alapján a nemlineáris anyagmodell. A kisebb, illetve nagyobb nyúlásértékeknél, valamint az elmozdulásoknál is a mérnöki gyakorlatban elterjedt 5%-os hibahatárnak megfelelő eredményeket adott. Ez az anyagmodell tehát felhasználható a PA6 anyag húzóvizsgálatainak szimulációjára a rugalmas zónában.

6.9. táblázat. A nemlineárisan rugalmas anyagmodell hibái

<i>Próbatestek</i>	<i>Eltérés nyúlásban</i>	<i>Eltérés elmozdulásban</i>
<i>Teljes lemez</i>	2,82%	-4,77%
<i>Középen mart lemez</i>	4,52%	4,11%
<i>Két oldalt mart lemez</i>	1,24%	4,62%

A szabványos Young-modulussal létrehozott anyagmodell csak a kisebb nyúlásértékek esetében nyújtott megfelelő eredményt. Amennyiben a vizsgált alkatrészen várhatóan csak kisebb nyúlások fognak jelentkezni célszerű ennek az anyagmodellnek az alkalmazása, mivel itt megfelelő pontossággal rendelkezik, valamint az anyagmodell létrehozásának ideje rövidebb, valamint sokkal egyszerűbb, mint a nemlineáris anyagmodell esetében. Mindezek mellett a szimuláció hardverigénye is kisebb, mint a nemlineáris szimulációé. Tehát amennyiben a vizsgálandó alkatrés terhelése ismert és kis kb. 1 %-os nyúlásértékekkel jár, célszerű ennek az anyagmodellnek az alkalmazása, de amennyiben az elmozdulások, illetve nagyobb nyúlásértékek esnek a vizsgálat fókuszába, akkor elengedhetetlen a nemlineáris anyagmodell alkalmazása.

6.10. táblázat. A szabványos Young-modulussal számított lineárisan rugalmas anyagmodell hibái

<i>Próbatestek</i>	<i>Eltérés nyúlásban</i>	<i>Eltérés elmozdulásban</i>
<i>Teljes lemez</i>	-3,22%	-10,37%
<i>Középen mart lemez</i>	-22,82%	-13,56%
<i>Két oldalt mart lemez</i>	-23,84%	-11,32%

A maximális terheléshez közelített anyagmodell működését a feszültséggyűjtő helyek pontos meghatározásának nehézsége okozza a legnagyobb problémát, de egy pontos közelítés esetén ez az anyagmodell alkalmas lehet a lokális maximum értékek pontos meghatározására.



7. Összegzés

A kutatásomat egy széleskörű irodalomfeldolgozással kezdtem. Igyekeztem a témához kapcsolódó korszerű cikkeket, könyveket összegyűjteni, és azokat feldolgozni, rendszerezni. Először általánosságban a polimereket ismertem meg, majd azok végeselemes modellezési lehetőségeit tártam fel. Ezután kiválasztottam a Femap végeselem szoftverben a megismert módszereknek megfelelő anyagmodelleket, melyekkel a szimulációkat végig fogom vinni. Végül három anyagmodellt választottam ki. Két lineárisan rugalmas anyagmodellt, az egyiket szabvány szerint kiszámított Young-modulussal, a másikat pedig maximális terheléshez közelített Young-modulussal. A harmadik anyagmodell pedig egy nemlineárisan rugalmas anyagmodell, mely létrehozásához szakítógörbéből kinyert feszültség-és nyúlásértékeket kell a szoftverbe vinni. A végeselemes háttér feltárása után megismerkedtem a laboratóriumi vizsgálat egyik eszközének működési elvével. Ez az eszköz a GOM Aramis Adjustable 12M teljes mező optikai mérőrendszer, mely a digitális képkorreláció módszere alapján működik. Az irodalomfeldolgozásom végén pedig a kutatást kiváltó vizsgálatot, a de Saint-Venant-elv vizsgálatát tekintetem át.

A kutatás elméleti háttérének elsajátítása után beszerzésre került egy PA6 lemez, melyből megmunkálásra kerültek a vizsgálatához szükséges próbatestek, illetve ebből kivágott szabványos minták segítségével kimértem az anyag mechanikai tulajdonságait, illetve leellenőriztem, hogy a vizsgálatban előforduló maximális terhelés esetén rugalmas alakváltozás megy-e végbe az alapanyagban. Az anyagtulajdonságok meghatározását az ISO 527-2 szabvány alapján igyekeztem elvégezni, azonban Young-modulus számításához a szabványban megadott 0,05 – 0,25%-os nyúlásintervallumban az anyag karakterisztikája nagyban eltér a lineáristól, így a kapott értékek szórása 10% körüli volt. A rugalmassági modulus meghatározásához így én az ehhez legközelebbi, de már 5%-os maximális eltérés alatti intervallum értékeit használtam fel, mely a 0,25 – 0,45%-os nyúlásintervallum volt.

A pontos anyagjellemzőkre a lehető legjobb anyagmodellek létrehozásának érdekében volt szükség, mivel a dolgozat következő lépése a végeselemes modellek létrehozása volt, ahol törekedtem a laboratóriumi vizsgálatnak legmegfelelőbb modellek megalkotására. A peremfeltételeket, illetve a terheléseket úgy adtam meg, hogy a lehető legjobban tükrözze az Instron 68 TM-10 statikus egytengelyű anyagvizsgálógép befogói által létrehozottakat. A



modellek létrehozása után hálósűrűség analízist végeztem el annak érdekében, hogy megtaláljam azt a legnagyobb elemméretet, amely még pontos értékekkel szolgál. Három szimulációt végeztem el. A szimulációkban a geometriák, a peremfeltételek, a terhelések, illetve a hálók megegyeztek, egyedül a fent említett anyagmodellek változtak.

A végeselemes szimulációk kiértékelése után elvégeztem a laboratóriumi vizsgálatot is, ehhez először a GOM Aramis rendszer számára elő kellett készítenem a próbatestek felületét egy sztochasztikus minta festésével. A minta pontjait követte a rendszer, és ezek elmozdulásából határozta meg a nyúlásértékeket. A festés után befogtam a próbatestet, majd egy képet készítettem róla az Aramis rendszerrel. Ezután ráhelyeztem a terhelést, majd a maximális terhelés elérésekor egy újabb képet készítettem róla. Az elkészült képeket a GOM Correlate szoftver segítségével posztprocesszáltam, majd eredményeket nyertem ki belőlük.

A dolgozatom végén összehasonlítottam a különböző anyagmodellek eredményeit a mérés eredményeivel, és kiszámítottam a relatív hibákat. Az összehasonlításokat négy szempont alapján végeztem el. Először a nagyobb keresztmetszethez tartozó kisebb nyúlásértékeket vizsgáltam. Ez alapján a szabványos Young-modulussal létrehozott lineárisan rugalmas anyagmodell is és a nemlineárisan rugalmas anyagmodell is 3 – 3%-os relatív hibaértéket nyújtott, tehát ezen zónában mindkét anyagmodell megfelelő volt. A következő lépésként a megmunkálásoknál adódó nagyobb nyúlásértékeket vizsgáltam meg, ahol csak a nemlineárisan rugalmas anyagmodell szolgáltatott a mérnöki gyakorlatban pontosnak mondható 5%-tól kisebb hibát. A nyúlásértékeket utoljára a lokális maximumértékeknél hasonlítottam össze, de itt a mérőrendszer nem megfelelő szegmentálása miatt egyik esetben sem született megfelelő eredmény. Végül a maximális elmozdulás értékeket hasonlítottam össze, ahol szintén a nemlineáris anyagmodell szolgáltatta a legpontosabb eredményt, a hibaérték mindhárom próbatest esetében 4% körüli volt. Az összehasonlítás alapján levontam a konklúziókat, mely szerint amennyiben a nyúlások vannak a vizsgálat középpontjában és azok értéke 1% alatt várható célszerű a szabványos Young-modulus értékkel létrehozott lineárisan rugalmas anyagmodell alkalmazása, a könnyebb beállítás, gyorsabb és kevésbé hardverigényes szimuláció, illetve az anyagmodell létrehozásához szükséges adatok könnyebb beszerezhetősége miatt. Minden más esetben a nemlineárisan rugalmas anyagmodell alkalmazása szükséges, mely minden vizsgálható értéket a mérnöki gyakorlatban elterjedt 5%-os pontosságnak megfelelően nyújtott.



Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszékének és munkatársainak a korszerű mérőrendszerek, illetve szoftverek biztosításáért, valamint a kutatásom során kapott sok segítségért.

Külön köszönetet szeretnék mondani témavezetőmnek Huri Dávidnak a munkám folyamatos felügyeléséért, mentorálásáért, valamint a konzultációkért.

A tudományos munka elkészítését az EFOP-3.6.1-16-2016-00022 számú projekt támogatta. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Végül pedig köszönetet szeretnék mondani a Debreceni Egyetem Tehetséggondozó Programjának a támogatásért.



Irodalomjegyzék

- [1] J. Bergström, *Mechanics of Solid Polymers*. Elsevier, 2015.
- [2] “Dr. Máthé Csabáné, Műanyagok kiválasztásának szempontjai,” www.quattroplast.hu, 2004. .
- [3] A. E. Musteata, G. Pelin, M. Botan, and L. Deleanu, “TENSILE TESTS FOR POLYAMIDE 6 AND POLYPROPYLENE,” *Mech. Test. Diagnosis*, vol. 8, no. 4, pp. 16–22, Jan. 2019, doi: 10.35219/mtd.2018.4.02.
- [4] H. Lobo, “Methodology for Selection of Material Models for Plastics Impact Simulation,” *6th Eur. LS-DYNA Users’ Conf.*, pp. 97–106, 2007, Accessed: Oct. 19, 2021. [Online]. Available: https://www.testpaks.com/ls-dyna07/ls-dyna07_paper.htm.
- [5] S. Tzibula, Z. Lovinger, and D. Rittel, “Dynamic tension of ductile polymers: Experimentation and modelling,” *Mech. Mater.*, vol. 123, no. January, pp. 30–42, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.mechmat.2018.04.014.
- [6] A. Pálfalvi and K. Mashimo, “Non-linear finite element analysis of a polymer-made machine part,” *Period. Polytech. Mech. Eng.*, vol. 48, no. 1, pp. 65–72, 2004.
- [7] Siemens, “Simcenter Nastran 2020.1 Help.” 2020.
- [8] T. Mankovits and D. Huri, “Modellezés és szimuláció.” Debreceni Egyetem, Debrecen, 2015.
- [9] N. McCormick and J. Lord, “Digital Image Correlation,” *Mater. Today*, vol. 13, no. 12, pp. 52–54, Dec. 2010, doi: 10.1016/S1369-7021(10)70235-2.
- [10] GOM, “Digital Image Correlation and Strain,” *Tech. White Pap.*, 2018.
- [11] J. C. A. D. Filho and L. C. S. Nunes, “Experimental determination of deformation homogeneity and shear states using the digital image correlation method,” *Polym. Test.*, vol. 96, p. 107114, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.polymertesting.2021.107114.
- [12] M. Jerabek, Z. Major, and R. W. Lang, “Strain determination of polymeric materials using digital image correlation,” *Polym. Test.*, vol. 29, no. 3, pp. 407–416, May 2010, doi: 10.1016/j.polymertesting.2010.01.005.
- [13] H. Sönerlind, “Applying and Interpreting Saint-Venant’s Principle,” *Comsol*, 2018. <https://www.comsol.com/blogs/applying-and-interpreting-saint-venants-principle/> (accessed Mar. 14, 2021).
- [14] B. Saint-Venant, *Mém. savants étrangers*, vol. 14. Párizs, 1855.
- [15] S. Dr. Kaliszky, M. Kurutzné Dr. Kovács, and G. Dr. Szilágyi, *Szilárdságtan*. Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó, 2000.



- [16] Á. Muttnyánszky, *Szilárdságtan*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1981.
- [17] “MSZ EN ISO 527-2:2012, Műanyagok. A húzási tulajdonságok meghatározása. 2. rész: A fröccs- és extrúziós műanyagok vizsgálati feltételei, Hatályba lépés időpontja: 2012.08.01, Budapest: MSZT, 2012.” .
- [18] “MSZ EN ISO 527-1:2020, Műanyagok. A nyúlási tulajdonságok meghatározása. 1. rész: Általános alapelvek, Hatályba lépés időpontja: 2020.03.01, Budapest: MSZT, 2020.” .
- [19] Instron, “Instron Video Extensometer AVE2 and SVE2 Operator ’ s Guide,” 2017.
- [20] Instron, “Poisson’s Ratio - Instron.” <https://www.instron.com/en/our-company/library/glossary/p/poissons-ratio> (accessed Aug. 18, 2021).