

Debreceni Egyetem
Műszaki Kar
Gépészmérnöki Tanszék



Egyirányú szálerősítésű kompozit makro és meso modellezési eljárásainak összehasonlítása

Szerző: File Máté MSc hallgató

Témavezető: Huri Dávid
Tanszékvezető: Dr. Mankovits Tamás

Debrecen
2022.



Tartalomjegyzék

1. BEVEZETÉS	1
2. KUTATÁSI TÉMA MEGALAPOZÁSA	2
2.1. Anyagmodellek a feszültség-alakváltozás kapcsolat leírására.....	2
2.2. A kompozitok mechanikai tulajdonságai.....	4
2.3. A kompozit szerkezetek modellezési lehetőségei.....	4
2.4. Egyirányú szálerősítésű kompozit makro modellezése	5
2.5. Egyirányú szálerősítésű kompozit meso modellezése	5
2.6. A dolgozat célkitűzése.....	6
3. MODELLEZÉSHEZ SZÜKSÉGES MECHANIKAI JELLEMZŐK MEGHATÁROZÁSA SZAKÍTÓVIZSGÁLATOKBÓL	7
3.1. A vizsgálat alapanyaga, próbatestei.....	7
3.2. A vizsgálatához felhasznált mérőeszközök	8
3.3. A mérési eljárás és a mérés menete	9
3.4. Eredmények kiértékelése	10
4. A MODELLEK ELLENŐRZÉSÉRE SZOLGÁLÓ LABORATÓRIUMI VIZSGÁLAT	13
4.1. A próbatestek és az eljárás bemutatása.....	13
4.2. Eredmények kiértékelése	14
5. EGYIRÁNYÚ SZÁLERŐSÍTÉSŰ KOMPOZIT MAKRO MODELLEZÉSE	16
5.1. A makro modellezéshez szükséges anyagmodell létrehozása	16
5.2. A hajlító vizsgálat végelem modelljének létrehozása.....	18
5.3. A makro modell által szolgáltatott eredmények kiértékelése	20
6. EGYIRÁNYÚ SZÁLERŐSÍTÉSŰ KOMPOZIT MESO MODELLEZÉSE	22
6.1. Mikroszkópos képek készítése a szálszerkezetről	22
6.2. A szálszerkezetről készült képek kiértékelése	23
6.3. A mikrostruktúra egységcellájának létrehozása	25
6.4. Anyagparaméterek számítása	26
6.5. Meso modellel készült szimuláció.....	27
7. A MAKRO ÉS MESO ANYAGMODELLEKKEL FUTTATOTT NUMERIKUS SZÁMÍTÁSI ÉRTÉKEK ÖSSZEHOSONLÍTÁSA.....	29
7.1. Eredmények összehasonlítása.....	29
7.2. Következtetések levonása.....	30
8. ÖSSZEGZÉS.....	32
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	34
IRODALOMJEGYZÉK.....	35



1. Bevezetés

A kompozit anyagok egyre gyakrabban fordulnak elő a mérnöki gyakorlat minden területén. Az így készült szerkezetek erőre adott válaszána végeelemes szimulációja így egyre fontosabbá válik. Ezen anyagok mechanikai tulajdonságai azonban nagyban függenek a terhelés irányától, illetve a szerkezet jellegétől.

A kompozit anyagok szálszerkezetének végeelemes modellezésére jelenleg három módszer ismert. Az egyik a mikrostruktúra teljes modellezése, a másik a mikrostruktúra teljes elhanyagolása és a szerkezet egy anyagként történő kezelése, melyet makro modellezésnek nevezünk. A harmadik a meso modellezés, amely esetén a végeelemes modellben a mikrostruktúrát elhanyagoljuk, azt csak elemi szinten hívjuk meg. A TDK dolgozatomban a három módszer közül a makro és a meso modellezés alkalmazhatóságát hasonlítom össze.

Az összehasonlításához egyirányú szálerősítésű kompozit anyagot használok, melynek a lehető legpontosabb modelljének szakítóvizsgálatokon keresztül kell meghatározni annak pontos mechanikai tulajdonságait. A modellek összehasonlítását egy hárompontos hajlítóvizsgálaton keresztül végzem el, amelyet laboratóriumi környezetben is megvalósítok.

A laboratóriumi vizsgálatok után elvégzem a két modellezési módszer alkalmazásához szükséges lépéseket, valamint a kapott eredményeket kiértékelem és szemléltetem.

Végül összehasonlítom a két modellezési módszertan eredményeit, és összefoglalom a következtetéseket figyelembe véve a modellek létrehozásának komplexitását, erőforrás- és időigényét, a modellek által szolgáltatott eredmények pontosságát, illetve a módszerek további alkalmazási lehetőségeit.

2. Kutatási téma megalapozása

Ezen fejezet célja a téma szakirodalmi megalapozása, a kompozitok vizsgálatához és modellezéséhez kapcsolódó könyvek, folyóiratcikkek feltárásával, illetve rendszerezésével. A fejezet elején a kompozitok mechanikai tulajdonságait részletezem, majd ezek alapján a szálszerkezet modellezésének lehetőségeit taglalom, a legegyszerűbb makro modellezési eljárástól a köztes meso modellezésen át a teljes mikrostruktúra modellezéséig. A fejezet fennmaradó részeiben pedig az általam használni kívánt makro és meso modellek tulajdonságait, lehetőségeit tárom fel részletesebben.

2.1. Anyagmodellek a feszültség-alakváltozás kapcsolat leírására

A rugalmas zónában történő feszültség-alakváltozás kapcsolat leírására szolgáló anyagmodellek közül a legegyszerűbb a lineárisan rugalmas izotropikus anyagmodell. A rugalmas szakaszon ezen modell esetében a feszültség és alakváltozás értékek közötti függvénykapcsolat lineáris. Az izotropikusság azt jelenti, hogy az anyag tulajdonságai nem függenek a terhelés irányától. Ilyen anyag például az acél. Az izotropikus anyagok egyenletrendszere a következőképpen alakul [1], [2]:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/(2G) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/(2G) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/(2G) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix}, \quad (1.1.)$$

ahol ε az alakváltozási jellemzők, σ a feszültség az adott irányokban, E a rugalmassági modulus, ν a Poisson-tényező, G pedig a nyírási rugalmassági modulus.

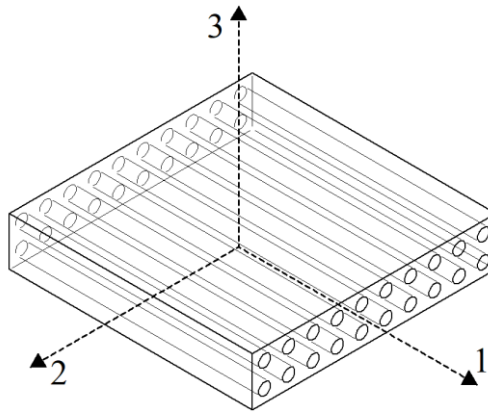
Komplexebb feszültség-alakváltozás relációt írnak le a nemlineárisan rugalmas modellek. Ezen modellek esetében a két érték között fellépő kapcsolatot nem egy egyenes, hanem valamilyen görbe írja le. Dolgozatomban nem fogok ilyen tulajdonságokkal rendelkező anyaggal foglalkozni, így nem taglalom ezen csoportot tovább [1].

A lineárisan rugalmas viselkedésű anyagokon belül beszélhetünk olyan anyagokról is, amelyek anizotropikus, azaz irányfüggő tulajdonságot mutatnak. Amennyiben az anyag

irányfüggő tulajdonságai három jellemző irányra bonthatóak fel, akkor ortotróp anyagról beszélünk. Az ortotróp anyagok egyenletrendszere a következőképpen alakul [1], [2]:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix}, \quad (1.2.)$$

ahol a bevitt értékek az anyag adott irányra vonatkozó mechanikai tulajdonságai. Tehát E_1 a főirány rugalmassági modulusa, E_2 és E_3 pedig a két keresztirányé. A Poisson-tényezők és a nyírási rugalmassági modulusok megadása hasonlóképpen történik, például a ν_{12} a főirány terhelésekor a 2-es keresztirány Poisson-tényezője. A 2.1. ábrán a három iránytengely értelmezése látható.



2.1. ábra. Az iránytengelyek értelmezése

A kompozit anyagok egy részét ebbe a csoportba lehet sorolni, azonban bizonyos anyagok esetében előfordulhat a transzverzális izotrópia, azaz a két-irányú irányfüggőség, amely az ortotróp anyagmodellek egy szimmetriával egyszerűsített változata, az ortotróp anyagok egyenletrendszere tehát a következőképpen egyszerűsödik le transzverzálisan izotropikus esetben: [1], [2]

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & -\nu_{12}/E_1 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{23}/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix}, \quad (1.3.)$$

ahol az ortotróp esethez hasonlóan a tényezők az adott irányokat jellemzik, viszont ebben az esetben a 2 és 3 tengelyek közti izotrópia miatt ezek az értékek megegyeznek.



Ezen modellek mellett beszélhetünk viszkozitást, illetve plasztikusságot leíró modellekről is, azonban ezeket a dolgozatom szintén nem érinti.

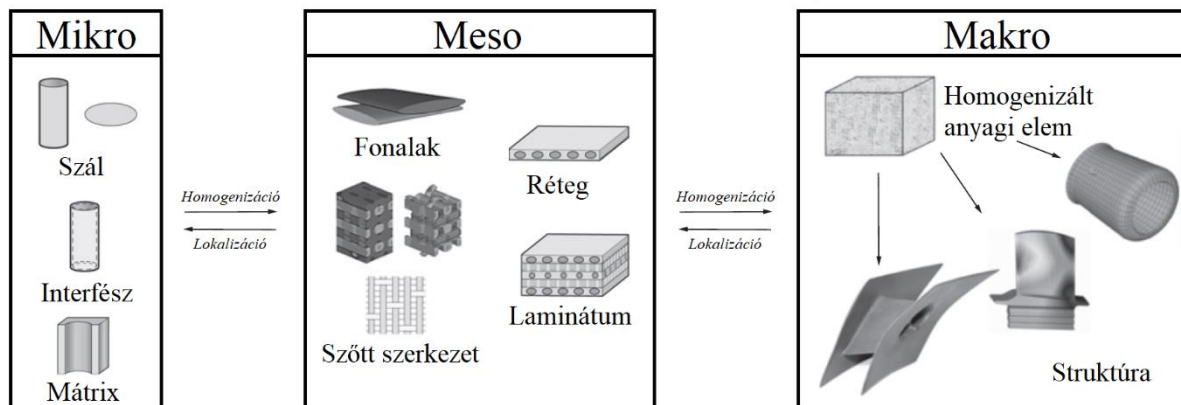
2.2. A kompozitok mechanikai tulajdonságai

Kompozitokról olyan szerkezetek esetében beszélünk, ahol a szerkezetet két egymástól elkülönülő anyag, a mátrix és a szálerősítés építi fel és köztük egy szintén jól elkülöníthető kapcsolati zóna, az interfész helyezkedik el. A szálerősítés jellegétől függően több típust különböztethetünk meg, azonban egy tulajdonság minden kompozit anyagra jellemző [2]. Ez pedig a mechanikai tulajdonságoknak a szálerősítés irányától való függése. Az anyag a szálerősítésnek megfelelő irányban fejti ki a legjobb mechanikai tulajdonságait, míg attól eltérő irányokban a teljesítménye drasztikusan is csökkenhet, ahogy a [3]–[7] munkákban olvasható. Ezen tulajdonságuk miatt nem modellezhetőek egyszerű izotróp anyagmodellekkel, mivel ezen anyagmodellek nem veszik figyelembe az anyag irányfüggő tulajdonságát, helyettük az ortotróp (egyszerűbb esetekben tranzverzálisan izotróp) anyagmodellek használata az indokolt [1], [2], [8]. A mérnöki gyakorlatban az irányfüggőség csökkentése érdekében a szálirányokat úgy helyezik el a szerkezetben, hogy azok minél több irányba nézzenek. Ezzel egy kvázi-izotróp anyagot hozunk létre, amely szerkezetek már modellezhetőek izotróp anyagmodellekkel, és a mikrostruktúra elhanyagolásával [1], [2], [8], [9].

2.3. A kompozit szerkezetek modellezési lehetőségei

A mérnöki gyakorlatban jelenleg három módszert különböztethetünk meg a kompozit szerkezetek modellezésére [2], [8], [10]. Az első a makro modellezés, amely esetén a teljes kompozit szerkezetet egy anyagnak tekintjük és egy ortotróp anyagmodellt alkalmazva modellezzük [10]–[13]. A második, ettől pontosabb megoldás a meso modellezés, mely alkalmazásakor külön anyagnak tekintjük a mátrixot és a szálerősítést (bizonyos esetekben még az interfészt is), tehát külön anyagmodellekkel adjuk meg az anyagok tulajdonságait. Az egymáshoz viszonyított geometriai elrendezésüket pedig egy egységcella létrehozásával adjuk meg. Így egy úgynevezett *Multiscale* modellt hozunk létre. Megnevezését ez a modell arról kapta, hogy a végelem modell hasonlóan jön létre a makro modellezési eljárásakor alkalmazott modellhez, azonban az elemek a szimuláció futtatásakor meghívják az egységcellát, melyből kiolvassák az anyag tulajdonságait [10], [13]–[17]. Az utolsó, és egyben legpontosabb, de ezzel

együtt a legnagyobb számítási kapacitást is igénybe vevő eljárás a kompozit teljes mikrostruktúrájának modellezése. A gyakorlatban a számítási igénye, illetve a komplexitása miatt ez a módszer a háttérbe szorul [10], [18], [19]. A 2.2. ábra a három modellezési lehetőséget szemlélteti.



2.2. ábra. A kompozit szerkezetek modellezési lehetőségei [2]

2.4. Egyirányú szálerősítésű kompozit makro modellezése

Egyirányú szálerősítéssel rendelkező kompozit szerkezetek esetén áll fenn legjobban az anyag irányfüggő tulajdonsága. Makro modellezés esetén a szerkezet egy rétegét egy anyagként modellezzük, irányfüggő anyagmodellt felhasználva. Ezen modellek létrehozásához csak a szálerősítéssel párhuzamos, illetve arra merőleges irányok mechanikai tulajdonságaira van szükség [1], [2], [8]. Makro modellezés használata figyelhető meg egyirányú kompozitokra a [20] munkában. A modellek kiegészíthetők, hogy ne csak a rugalmas viselkedést vegyék figyelembe, hanem esetlegesen viszkoelasztikus tulajdonságokat, valamint tönkremenetelt is lehet ilyen modellekkel szimulálni, ahogyan az a [21], [22] munkákban is olvasható. Ezen modellek létrehozására, illetve kezelésére a mai végelem szoftverek jelentős része alkalmas.

2.5. Egyirányú szálerősítésű kompozit meso modellezése

A makro modellezéssel ellentétben ebben az esetben nem hanyagoljuk el a szerkezet mikrostruktúráját, hanem ezt egy egységcella formájára egyszerűsítjük. Ezáltal nem egy anyagként van kezelve a szerkezet egy rétege, hanem a mátrixot és a szálerősítést külön adjuk meg. A makro modellezéshez hasonlóan ez is alkalmas viszkoelasztikusság, tönkrementel, illetve fáradás szimulációjára. Az így létrehozott *Multiscale* modellek napjainkban a kutatások egyik fókuszát képezik [2], [8]. Ezzel a módszerrel modellezett egyirányú kompozitokat a [23]–



[25] munkákban ismertetik. Tovább pontosíthatja a modellt az interfész figyelembevétele, mely esetben az egy különálló elemként jelentkezik az egységcella létrehozásakor, ilyen modellek a [26]–[28] munkákban tanulmányozhatók.

2.6. A dolgozat célkitűzése

A dolgozatomban összehasonlítom a makro és meso modellezési módszereket egyirányú szálerősítéses kompozitot vizsgálva szakítóvizsgálati eredményeket felhasználva. Fel kívánom tární a két modellezési lehetőség előnyeit, illetve hátrányait egy olyan esetben, ahol nem áll rendelkezésre a modell létrehozásához szükséges minden mérési adatsor. A modellek pontosságát egy komplexebb feszültségi állapotot előidéző laboratóriumi vizsgálat modellezésén és a mért, illetve számított eredmények összevetésén keresztül határozom meg. A kutatás eredményeként összefoglalom a két modellezési módszer előnyeit és hátrányait, valamint feltárom a hiányos adatsorból történő modellezés lehetséges pontosságát.

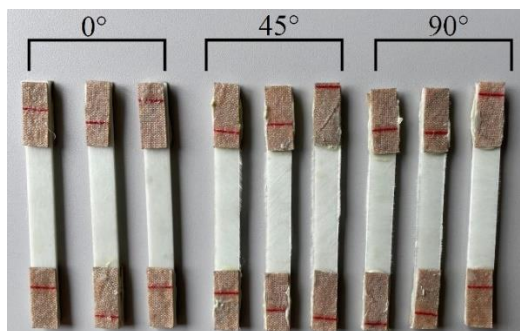
3. Modellezéshez szükséges mechanikai jellemzők meghatározása szakítóvizsgálatokból

Ebben a fejezetben a modellezéshez szükséges anyagparaméterek mérését, illetve kiértékelését mutatom be. Ezeket a paramétereket szakítóvizsgálat segítségével határoztam meg. A fejezet elején bemutatom az alapanyagot, illetve a gyártott próbatesteket. Ezután a felhasznált mérőrendszereket, illetve a létrehozott és alkalmazott mérési eljárást írom le. Végül pedig kiértékelem a vizsgálat elvégzésével kapott eredményeket.

3.1. A vizsgálat alapanyaga, próbatestei

A kutatásom alapanyaga egy egyirányú szálerősítéssel rendelkező kompozit volt. A szálerősítés anyaga üvegszál, a mátrix pedig egy újrahasznosítható termoplasztikus gyanta, amelyet a francia Arkema cég Elium néven forgalmaz.

Az alapanyagból 100 mm széles, 2 mm vastag és 1 m hosszú lemezek álltak rendelkezésre, melyből 100 mm hosszú és 10 mm széles csíkokat vágtunk ki CNC megmunkálás segítségével különböző orientációkban (szálistírnak megfelelően, arra 45, illetve 90 fokos szögben). Minden orientációból 3-3 db próbatest készült el. A különböző orientációkra a transzverzálisan izotropikus anyag adott irányát leíró anyagparamétereinek kiszámítása érdekében van szükség, melyet később fogok részletezni. A próbatestek méreteit a gyártás után mikrométerrel ellenőriztem, melyre a pontos feszültségszámítás érdekében van szükség. A próbatestek végeire a befogó alatti részek védelme érdekében 1 mm vastag szőtt kompozit réteget ragasztottam, 20 mm hosszúságban. A ragasztást a LOCTITE HY4080 kétkomponensű hibrid ragasztóval végeztem el, majd 1 hétig hagytam a ragasztóanyagot térhálósodni laboratóriumi hőmérsékleten. A ragasztott próbatestek a 3.1. ábrán láthatóak.



3.1. ábra. Próbatestek a szakítóvizsgálathoz

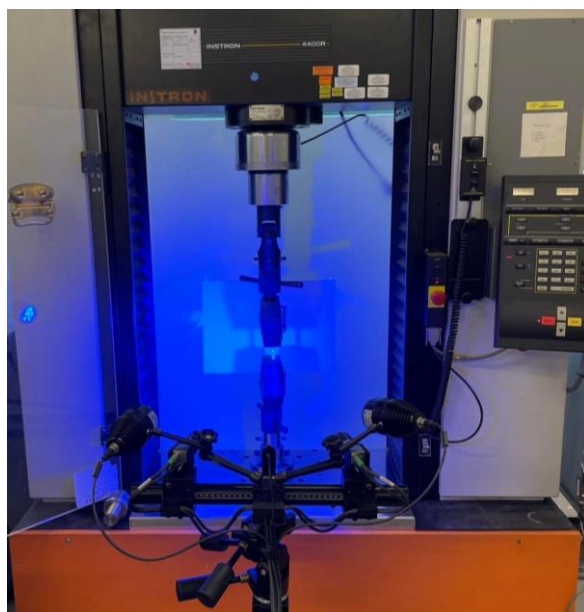
3.2. A vizsgálathoz felhasznált mérőeszközök

A szakítóvizsgálat elvégzéséhez az INSTRON 4400R vezérlővel felszerelt 1196-os gépállványt használtam. A nyúlásértékeket a GOM Aramis 12M optikai teljes mező nyúlásmérő rendszerrel rögzítettem. A teljes mező nyúlásmérésre azért volt szükség, mivel ez lehetővé teszi a modellek szempontjából szükséges a Poisson-tényezők meghatározását, illetve a vizsgálat közben az alakváltozások egészen a tönkremenetelig mérhetőek. A mérőrendszerek adatai a 3.1. táblázatban láthatóak.

3.1. táblázat. Mérőeszközök tulajdonságai

INSTRON 1196 gépállvány 4400R vezérlővel	
Mérőcella típusa	INSTRON 2511-319 típusú 100 kN-os statikus
Mérőeszköz kapacitása	250 kN
Kiértékelő szoftver	Bluehill 2
Próbatest megfogása	100 kN kapacitású ékpályás befogó
GOM Aramis Adjustable 12M	
Szenzor típusa	Schneider 50 mm
Kalibrációs tábla	CP40/170/43554
Mérési távolság	697 mm
Mérési terület	175 x 130 x 110 mm ³

A kamerarendszert beállítottam az anyagvizsgáló gép elé, ügyelve a mérőlegesség lehető legjobb fenntartására, majd kalibráltam az eszközt. A mérési elrendezés egy próbatesttel a 3.2. ábrán látható.



3.2. ábra. A szakítóvizsgálat mérési elrendezése a nyúlásmérésre használt optikai mérőrendszerrel

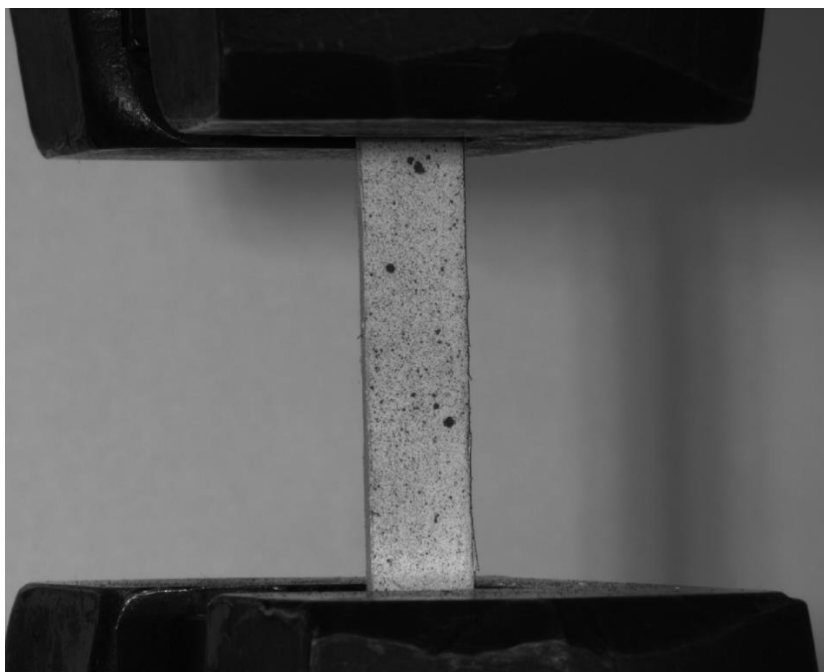
3.3. A mérési eljárás és a mérés menete

A vizsgálat során a próbatesteket rögzített sebességgel terheltem, miközben folyamatosan rögzítettem az erőértékeket, illetve képeket készítettem róluk a kamerarendszerrel. A két eszköz összehangolását csak az adatrögzítési frekvencia alapján tudtam megtenni, melyet minden próbatest esetében 4 Hz-re állítottam. A mérési eljárás adatai a 3.2. táblázatban láthatóak.

3.2. táblázat. Mérési eljárás adatai

Terhelés módja	Húzó
Terhelés sebessége	2 mm/perc
Adatrögzítés	4 Hz

A két rendszer összehangolása és a mérési eljárások beállítása után a mérőeszközök készen álltak a vizsgálatra. A teljes mező nyúlásmérő rendszer működéséből adódóan a próbatestekre egy sztochasztikus mintát kell festeni. A minta véletlenszerű pontjait fogja a rendszer koordináta pontokként felhasználni, valamint a mérés során nyomon követni. A sztochasztikus mintát egy speciális porszerű matt fehér festékekkel alapoztam meg, melyre matt fekete akril festékekkel ködölve pontokat vittem fel. Az elkészült mintáról az Aramis rendszer által készített kép a 3.3. ábrán látható.



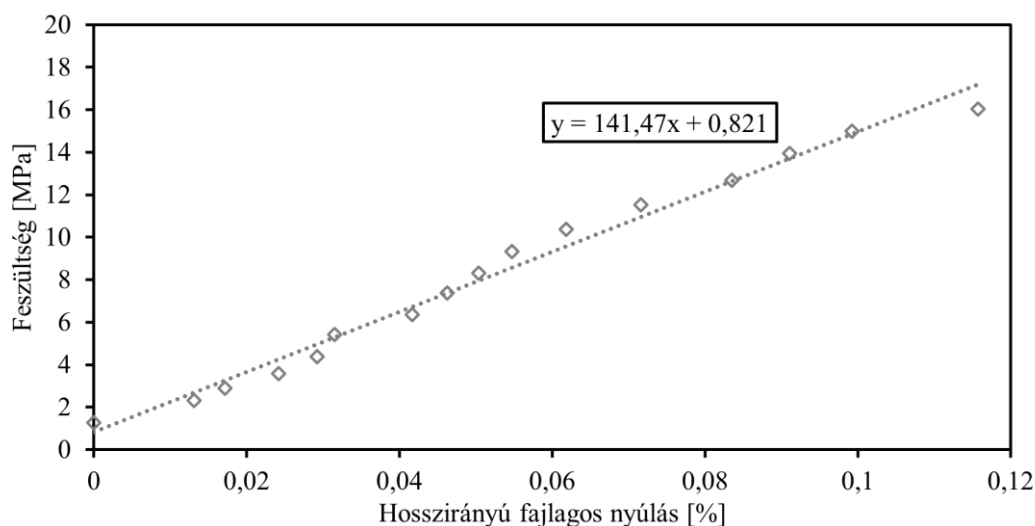
3.3. ábra. A sztochasztikus mintával festett szakítópróbatestről készült szoftveres kép

A próbatesteket egyenként csak közvetlenül a vizsgálatuk előtt festettem meg, ezzel elkerülve a próbatestek anyaga és a festékek közötti esetleges kémiai reakciót, illetve a felvitt réteg rongálódását. A festett próbatestek ezután vizsgálatra kerültek, mely a teljes

tönkremenetelig tartott. Mind a 9 db próbatest vizsgálata után az eredmények kiértékelésével folytattam a munkát.

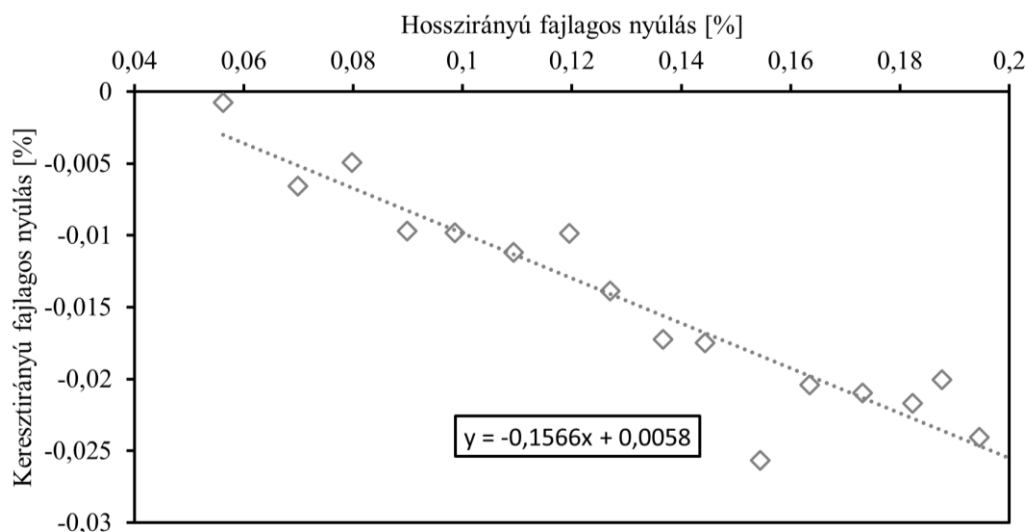
3.4. Eredmények kiértékelése

A modellezés elvégzéséhez a három orientáció rugalmassági modulusára, illetve Poisson-tényezőjére volt szükségem. A vizsgált próbatestek mindegyikén kiértékeltem ezeket az értékeket egyenesillesztéssel. A rugalmassági modulus esetében a feszültség-hosszirányú fajlagos nyúlás diagram értékeire illesztettem egyenest, minden próbatest esetében igyekeztem a lehető legtöbb adatpontot felhasználni. Az egyenes illesztése egy próbatest esetében a 3.4. ábrán látható.



3.4. ábra. Egyenes illesztése a rugalmassági modulus meghatározásához

Az illesztett egyenes egyenletéből a meredekségérték 100-zal történő megszorzásával meghatározható a rugalmassági modulus. A felszorzásra a hosszirányú fajlagos nyúlás százalékos értékei miatt volt szükség. A Poisson-tényező meghatározását hasonlóképpen a keresztirányú fajlagos nyúlás-hosszirányú fajlagos nyúlás diagram értékeire illesztett egyenessel végeztem el, mely a 3.5. ábrán látható.



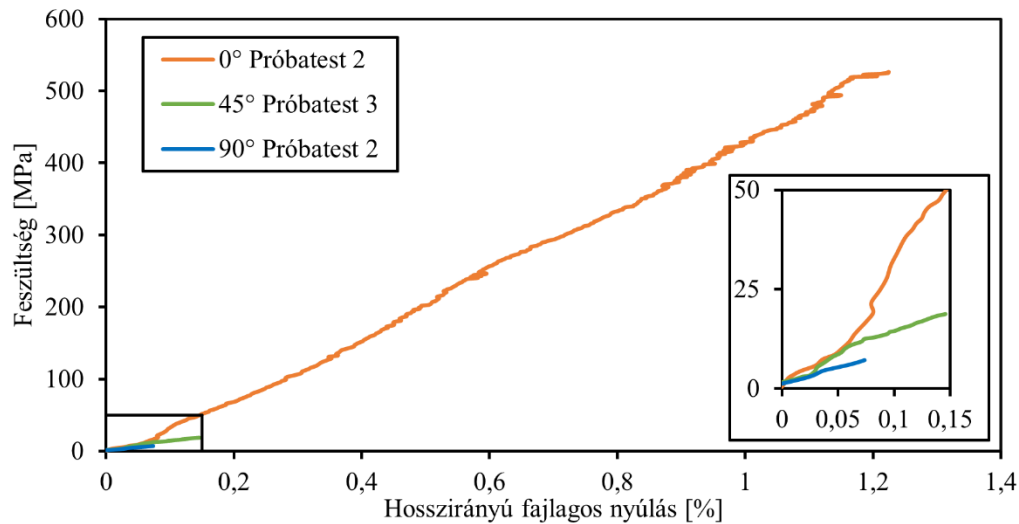
3.5. ábra. Egyenes illesztése a Poisson-tényező meghatározásához

Minden próbatest kiértékelése után az értékeket táblázatba vezettem, mely a 3.3. táblázatban látható. A 0°-os próbatestek közül az egyik esetben a rugalmassági modulus értéke nagyban meghaladja a többi próbatest értékét, ennek az oka valószínűleg egy gyártásból eredő hiba, melyet a 6.3. fejezetben részletezek. A 45 fokos próbatestek közül a legelső a befogásnál egy anyaghiba miatt tönkrement, így nem tudtam adatokat rögzíteni azon a próbatesten. A 90 fokos próbatesteken nem lehetett meghatározni a Poisson-tényezőt, mivel a vizsgálat során a rendszer által mérhetetlenül kis mértékű alakváltozást szenvedtek el keresztirányban. Ennek az oka valószínűleg az, hogy a mátrix és a szálak között kialakult kapcsolat képtelen volt megfelelő mértékű feszültséget elfogadni ahhoz, hogy a szálak mérhető alakváltozást szenvedjenek el.

3.3. táblázat. A szakítóvizsgálatok eredményei

Rugalmassági modulus [MPa]			
Próbatest száma	0°	Orientáció 45°	90°
1	56467	-	9984,6
2	44873	14147	8126,9
3	41902	13860	7181,9
Átlag	47747,333	14003,5	8431,133
Medián	44873	13860	8126,9
Relatív hiba	25,837%	2,071%	22,859%
Poisson-tényező [-]			
Próbatest száma	0°	Orientáció 45°	90°
1	0,1546	-	-
2	0,1629	0,1045	-
3	0,1566	0,1054	-
Átlag	0,1580	0,1050	-
Medián	0,1566	0,1045	-
Relatív hiba	4,023%	0,861%	-

Az anyagmodellek létrehozásához a rugalmassági modulus alapján a medián értéket képviselő próbatest értékeit használom fel mindhárom orientáció esetén. A három kiválasztott próbatest feszültség-hosszirányú fajlagos nyúlás görbéje a 3.7. ábrán látható.



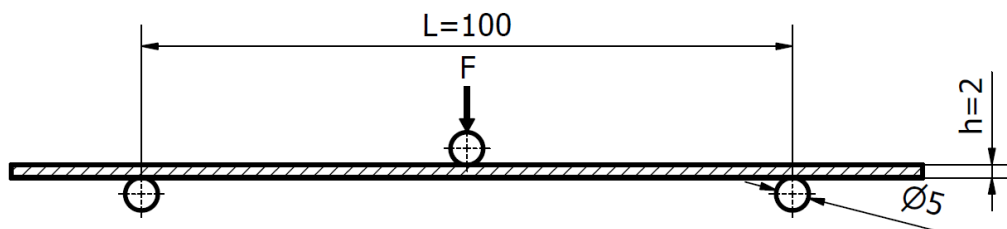
3.6. ábra. A medián értékek alapján kiválasztott próbatestek feszültség-fajlagos nyúlás görbéi

4. A modellek ellenőrzésére szolgáló laboratóriumi vizsgálat

Ebben a fejezetben azt a laboratóriumi vizsgálatot mutatom be, amellyel a makro és meso modelleket kívánom ellenőrizni. Ehhez egy komplexebb feszültségi állapot felhasználásával kívánom megvizsgálni meg a modellek lehetőségeit, így egy hárompontos hajlítóvizsgálatot választottam erre a célra.

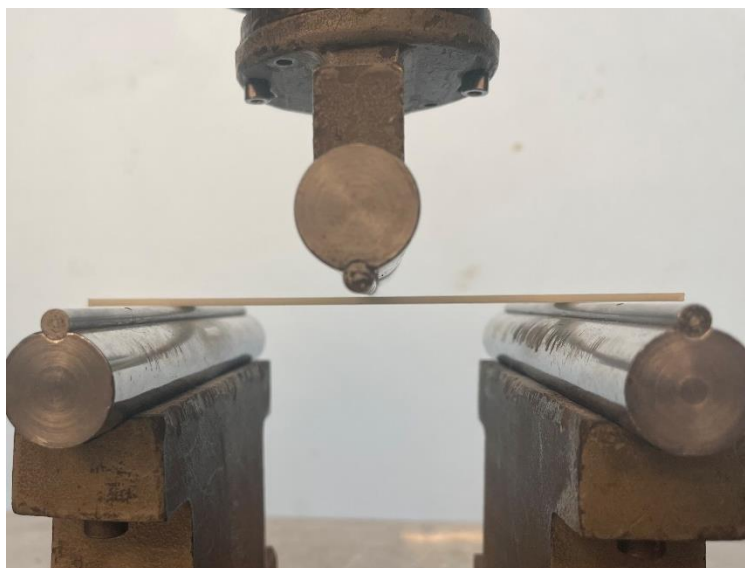
4.1. A próbatestek és az eljárás bemutatása

A vizsgálat elvégzéséhez a 3.1. fejezetben már említett kompozit lapból további három darab 150 mm hosszú, 15 mm széles csíkokat munkáltam ki szálirányban. A próbatestek méreteit a vizsgálatot megelőzően mikrométerrel ellenőriztem, melyre ebben az esetben is a pontos számításokhoz volt szükség. A vizsgálat során az alsó megtámasztás távolságát 100 mm-re határoztam meg. Az elméleti elrendezést a 4.1. ábra szemlélteti.



4.1. ábra. A hajlító vizsgálat elméleti vázlata

A méréshez a 3.2. fejezetben már említett INSTRON 4400R vezérlővel ellátott 1196-os gépállványt használtam. Ebben az esetben hajlító feltétet alkalmaztam 5 mm-es hajlító henger átmérővel. A 4.1. ábrának megfelelően az alsó támaszok távolságát 100 mm-re állítottam. A mérési elrendezés a 4.2. ábrán látható.



4.2. ábra. A hajlítóvizsgálat mérési elrendezése a próbatesttel

A mérési elrendezés felépítése után a Bluehill 2 szoftverben létrehoztam a mérési eljárást, amelybe a bevitt adatok a 4.1. táblázatban láthatóak.

4.1. táblázat. Mérési eljárás adatai

Terhelés módja	Hárompontos hajlító
Terhelés sebessége	2 mm/perc
Adatrögzítés	4 Hz

A mérési eljárás beállítása után megkezdtem a vizsgálatot. A vizsgálat az adott próbatest tönkremenetelig tartott.

4.2. Eredmények kiértékelése

A vizsgálat során mindhárom próbatest értékeiből meghatároztam a hajlítási rugalmassági modulus értékét a következő képlet segítségével:

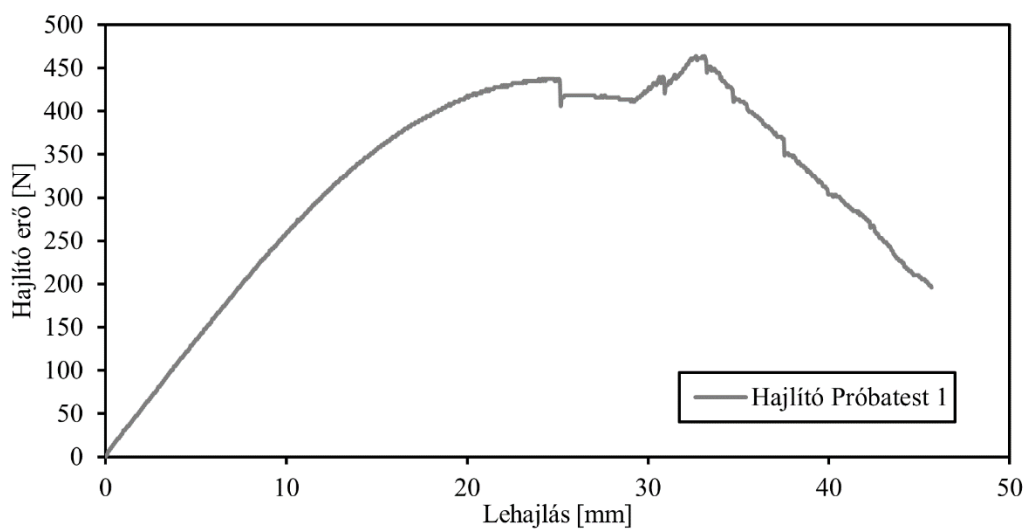
$$E_h = \frac{L^3 m}{4bh^3}, \quad (4.1.)$$

ahol az L az alsó támaszok közti távolság, az m az erő-elmozdulás görbe meredeksége, a b a próbatest szélessége, a h pedig a próbatest vastagsága. Az m értékét a korábbiakhoz hasonlóan egyenes illesztéssel határoztam meg. A rugalmassági modulus mellett a 300 N-os terhelésnél meghatároztam a lehajlás mértékét minden próbatest esetében, mivel a végelelemes modellek létrehozásához is ezt a terhelést alkalmazom. A próbatestek adataiból kiértékelt értékek a 4.2. táblázatban láthatóak.

4.2. táblázat. Hárompontos hajlító vizsgálat eredményei

Próbatest	Hajlítási rugalmassági modulus [MPa]	Lehajlás az 300 N terhelésnél [mm]
1	51679	12,000
2	52519	11,708
3	51213	11,875
Átlag	51804	11,861
Medián	51679	11,875
Relatív hiba	1,625%	1,405%

A hajlítási rugalmassági modulus értékek alapján kiválasztottam a medián értéket képviselő próbatestet, melyhez a szimulációk eredményeit fogom hasonlítani. Ezen próbatest erő-elmozdulás görbéje a 4.3. ábrán látható.



4.3. ábra. A medián értéket képviselő hárompontos hajlításnak kitett próbatest erő-elmozdulás görbéje



5. Egyirányú szálerősítésű kompozit makro modellezése

Ebben a fejezetben az egyirányú szálerősítésű kompozit makro modellezését mutatom be az Altair Hypermesh szoftver segítségével. Ebben az esetben a kompozit szálszerkezetet egy anyagként modellezem, melyhez egy transzverzálisan izotróp anyagmodellt fogok alkalmazni. A fejezet elején bemutatom ezen anyagmodell létrehozását, illetve a szükséges értékek számítási módját a mért értékekből. Az anyagmodell létrehozása után a végelelemes modellalkotást mutatom be. Végül pedig kiértékelem a szimuláció futtatásával kapott eredményeket.

5.1. A makro modellezéshez szükséges anyagmodell létrehozása

A makro modellezéshez egy transzverzálisan izotróp anyagmodell létrehozására van szükség, melyhez szükséges paraméterek a 5.1. táblázatban láthatóak.

5.1. táblázat. A transzverzálisan izotróp anyagmodell létrehozásához szükséges paraméterek [29]

Megnevezés	Jelölés
Hosszirányú rugalmassági modulus [MPa]	E_1
Keresztirányú rugalmassági modulus [MPa]	E_2
Hosszirányú Poisson-tényező [-]	ν_{12}
Síkbeli nyírási rugalmassági modulus [MPa]	G_{12}
Keresztirányú nyírási rugalmassági modulus [MPa]	G_{23}

A táblázatban látható értékek közül az E_1 , illetve ν_{12} értékei a 0° -os orientáció rugalmassági modulusának és Poisson-tényezőjének felelnek meg, míg az E_2 értékét a 90° -os orientáció rugalmassági modulusa adja. A G_{12} értéke nem adódik közvetlenül egyik szakítóvizsgálat eredményeiből sem, ennek közelítő számításához a következő képletet használtam fel [30]:

$$\frac{1}{E_\phi} = \frac{\cos^4 \phi}{E_1} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right) \sin^2 \phi \cos^2 \phi + \frac{\sin^4 \phi}{E_2}, \quad (5.1.)$$

mely a mindkét jellemző iránytól eltérő szakítóvizsgálat egyenlete, ahol a ϕ a próbatest szálsírányának szöge, mely ebben az esetben 45° , az E_ϕ pedig ebből a szakítóvizsgálatból kapott rugalmassági modulus értéke [30]. Az egyenletből a G_{12} kifejezhető:



$$G_{12} = \frac{\sin^2 \phi \cos^2 \phi}{\frac{1}{E_\phi} - \frac{\cos^4 \phi}{E_1} - \frac{\sin^4 \phi}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} \sin^2 \phi \cos^2 \phi} . \quad (5.2.)$$

Az utolsó ismeretlen érték a G_{23} , mely a keresztmetszet nyírási rugalmassági modulusa. Ennek kiszámítása a transzverzálisan izotróp anyagmodell ismerete alapján egyszerű, mivel a keresztmetszetre a Hooke-törvény alkalmazható:

$$G_{23} = \frac{E_2}{2(1 + \nu_{23})} . \quad (5.3.)$$

Ehhez azonban a ν_{23} meghatározása szükséges, melyhez a 90° -os próbatest terhelése esetén a vastagság mentén lett volna szükség a Poisson-tényező meghatározására. Azt feltételezve viszont, hogy a 90° -os próbatest terhelésekor a keresztmetszet egyforma mértékben csökkent vastagság, illetve szélesség mentén, felírható, hogy:

$$\nu_{21} \approx \nu_{23} . \quad (5.4.)$$

Ezzel a feltétellel élve a G_{23} értéke meghatározható lenne, azonban a mérések során a ν_{21} értékét, mely a 90° -os orientáció Poisson-tényezője, nem tudtam mérésrel meghatározni a kicsi keresztirányú alakváltozás miatt. Ismert viszont a következő összefüggés a transzverzálisan izotróp anyagok egyenletrendszeréből [1]:

$$-\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} , \quad (5.5.)$$

ahonnan a ν_{21} értéke kifejezhető:

$$\nu_{21} = \frac{\nu_{12}}{E_1} E_2 . \quad (5.6.)$$

Az így kapott értéket behelyettesítve a 5.3. *képletbe* a feltételezett keresztirányú nyírási rugalmassági modulus meghatározható.

A szoftverkörnyezetben a MAT8 anyagmodellt alkalmaztam, mely a Hypermesh ortotróp anyagmodellje. Az anyagparaméterek értékeit az 5.2. *táblázat* alapján vettem fel, melyeket a szakítóvizsgálatokon és a fenti képletek alkalmazásán keresztül határoztam meg.

5.2. táblázat. A traszverzálisan izotróp anyagmodell létrehozásához szükséges paraméterek értékei

Megnevezés	Jelölés	Érték
Hosszirányú rugalmassági modulus [MPa]	E_1	44873
Keresztirányú rugalmassági modulus [MPa]	E_2	8127
Hosszirányú Poisson-tényező [-]	ν_{12}	0,1566
Síkbeli nyírási rugalmassági modulus [MPa]	G_{12}	6656
Keresztirányú nyírási rugalmassági modulus [MPa]	G_{23}	3951

5.2. A hajlító vizsgálat végeelem modelljének létrehozása

A végeelem modellt úgy hoztam létre, hogy a lehető legjobban megfeleljen a 4. fejezetben bemutatott hajlítóvizsgálat elrendezésének. A végeelem modell létrehozását a geometria létrehozásával kezdtem. A 4.1. ábrán látható, hogy a terhelés a vizsgálat szimmetriasíkjában helyezkedik el, így a modell egy félmodellé egyszerűsíthető. Továbbá a vizsgálat szempontjából nincs szükség a hajlítófeltéteken túllógó próbatest részek modellezésére sem. A próbatest lemez jellegéből adódóan lehetőség van azt a középsíkján modellezni, melyhez a geometriát egy kétdimenziós sík formájában hoztam létre, mely az 5.1. ábrán látható.



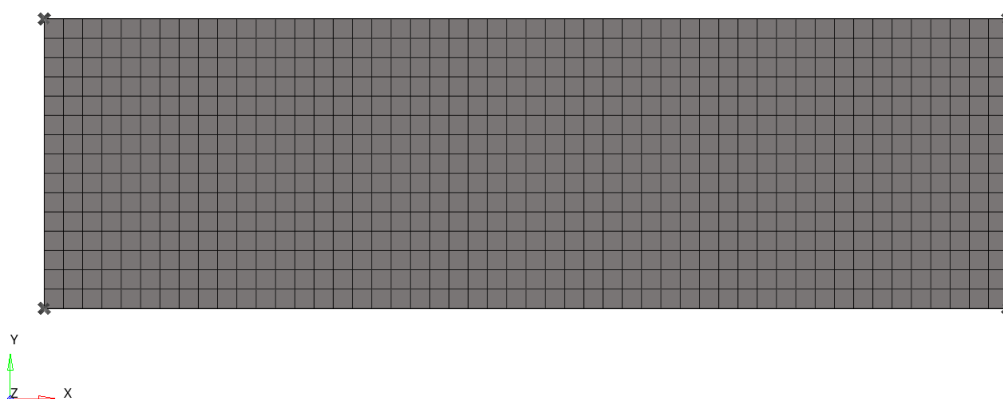
5.1. ábra. A próbatest egyszerűsített geometriája

A Hypermesh szoftver működéséből adódóan a következő lépés a háló létrehozása. A létrehozott háló adatait az 5.3. táblázat tartalmazza, illetve a háló az 5.2. ábrán látható.

Ezután létrehoztam a kompozit alapanyagok modellezéséhez használt tulajdonságot a PCOMPP -ot. Ez a tulajdonság különböző rétegeket tud laminátumok formájában kezelni. Jelen vizsgálat esetén egy réteggént fogom az egész 2 mm vastagságot modellezni. A réteg használatára a szálirány helyes megadása miatt van szükség. A réteghez hozzáadtam a teljes geometriát, illetve az 5.1. fejezetben létrehozott anyagmodellt.

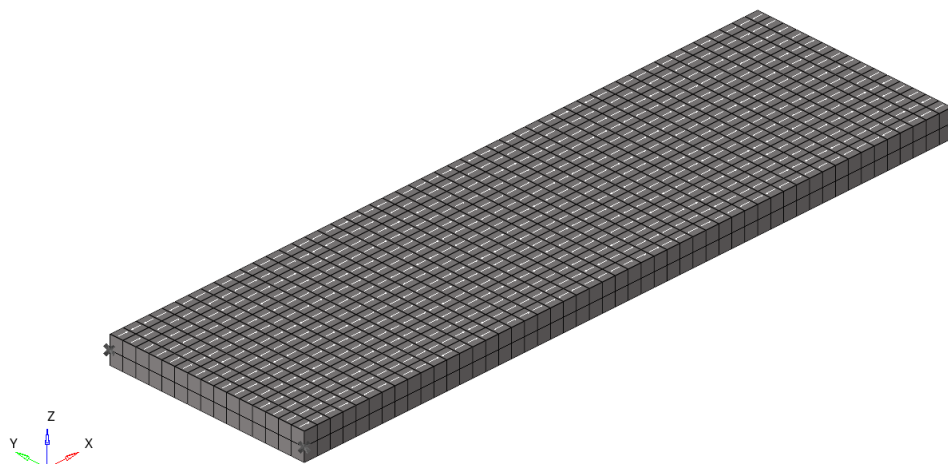
5.3. táblázat. A háló tulajdonságai

Elem típusa	Héjelem
Elem alakja	Négyszög
Elem mérete	1 mm
Elem vastagsága	2 mm
Anyagmodell	MAT8
Elem tulajdonsága	PCOMPP



5.2. ábra. A hálózott geometria

Az 5.3. ábrán a már kompozit réteggel ellátott geometria látható. A szálirányt az elemeken látható fehér vonalak mutatják.



5.3. ábra. A kompozit réteggel ellátott geometria

Ezután a kényszerek megadása következett. Ezeket úgy adtam meg, hogy a lehető legjobban megfeleljenek az anyagvizsgáló gép által felállított kényszereknek, illetve eleget tegyenek a szimmetriának. A szimmetriából adódik, hogy a próbatest szimmetriasíkjában nem lehet X irányú elmozdulás (1), illetve szögelfordulás sem lehet az Y tengely mentén (5) az anyagfolytonosság miatt. A geometria másik végén elhelyezkedő él mentén az alsó támasztás

köti le a Z irányú elmozdulást (3). Ez a feltét nem ébreszt más kényszert, de a modell statikai meghatározása miatt még ugyanezen pontokon lekötöm a maradék két szögelfordulást is, azaz az X (4) és Z (6) tengelyek körül, illetve az él középső pontján meggátoltam az Y irányú elmozdulást is (2). A kényszerezett modell az 5.4. ábrán látható.



5.4. ábra. A kényszerezett modell

Végül a terhelések megadása következett, melyhez a szimmetriasíkban elhelyezkedő élre definiáltam a 3. fejezetben meghatározott 300 N nagyságú erő felét, azaz 150 N -t a Z tengely irányával ellentétesen. Az erő felezésére azért volt szükség, mivel a modellt is félmodellé egyszerűsítettem. Az erőt az él mentén csomópontonként egyenlően osztottam szét. Az elkészült végeelem modell az 5.5. ábrán látható.



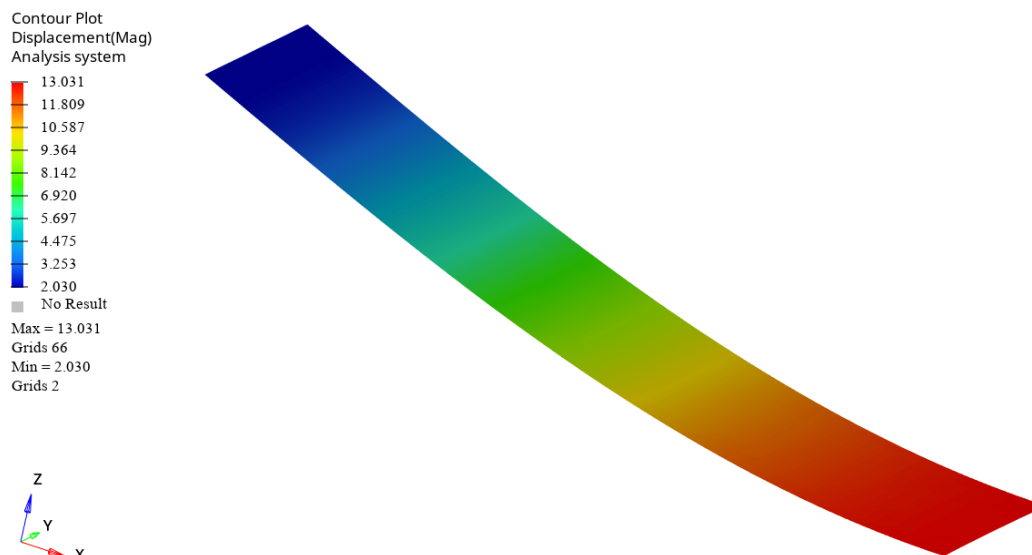
5.5. ábra. Az elkészült végeelem modell

A modell elkészültével az analízis beállítása következett. A vizsgálat geometriai nemlinearitásából adódóan nemlineáris statikus megoldót alkalmaztam. A terhelést 100 egyenlő részre bontottam, illetve engedélyeztem a geometriai nemlinearitást létrehozó opciókat. A szimuláció ezután futtatható.

5.3. A makro modell által szolgáltatott eredmények kiértékelése

A szimuláció kiértékelését megelőzően nem volt szükség hálókongvergenca analízis elvégzésére, mivel a vizsgálatom szempontjából érdekes maximális elmozdulás kongvergenciája már kevésbe sűrű hálózások esetén is teljesül

A szimuláció futtatása után megjelenítettem az eredményeket. A lemez deformált képe az 5.6. ábrán látható.



5.6. ábra. A makro modell deformált képe

A modellből kiértékeltem a laboratóriumi vizsgálattal történő összehasonlításhoz szükséges értéket, mely a lemez maximális elmozdulásértéke volt, melyből a 4.1. képlet segítségével kiszámítottam a hajlítási rugalmassági moduluszt is. A kapott értékek az 5.4. táblázatban láthatóak.

5.4. táblázat. A makro modell szimulációjából kiértékelt eredmények

Lehajlás 300 N terhelés hatására [mm]	13,031
Hajlítási rugalmassági modulus [MPa]	47963

6. Egyirányú szálerősítésű kompozit meso modellezése

Ebben a fejezetben az egyirányú szálerősítésű kompozit meso modellezési eljárását mutatom be. Ennek első lépéseként az kompozit térfogatkitöltési tényezőjét határozom meg a mikroszkópia és a digitális képfeldolgozás eszközeinek segítségével. Ezután bemutatom a Multiscale anyagmodell létrehozásának menetét, végül pedig elvégzem a végelelemes szimulációt.

6.1. Mikroszkópos képek készítése a szálszerkezetről

A képeket száliiránynak megfelelően készítettem, egy ennek megfelelő csiszolatról, melyet a csiszolást megelőzően műanyagba ágyaztam. A szálszerkezet vizsgálatához elkészített csiszolat a 6.1. ábrán látható.

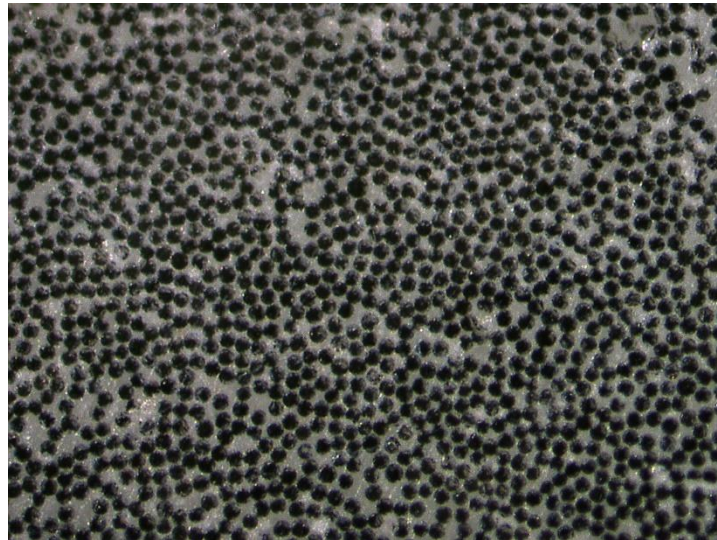


6.1. ábra. A szálszerkezet mikroszkópos vizsgálatához készített csiszolat

A csiszolatól a Zeiss Smartzoom digitális mikroszkóp segítségével 5 képet készítettem, különböző helyeken, egyforma nagyításban. Az elkészült képek adatai a 6.1. táblázatban, egy így elkészült kép pedig a 6.2. ábrán látható.

6.1. táblázat. A mikroszkópos képek adatai

Nagyítás	336x
Felbontás [pixel]	1600x1200
Méretarány [$\mu\text{m}/\text{pixel}$]	0,6632
Kép területe [μm^2]	1061x796

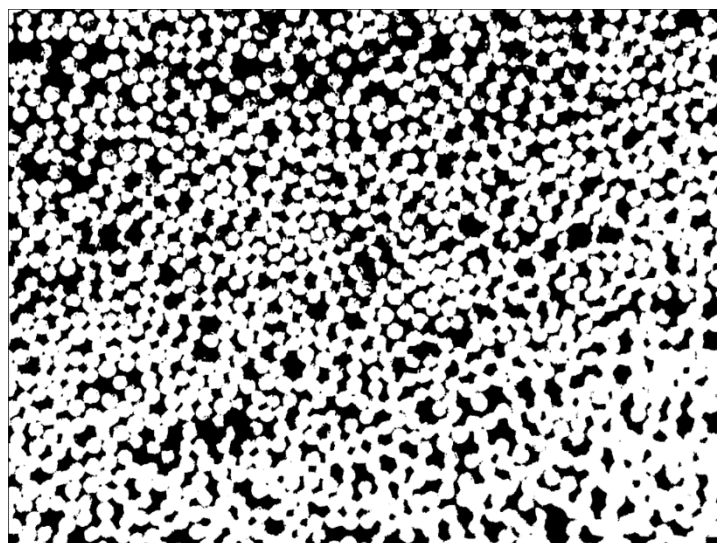


6.2. ábra. A szálszerkezetről készült mikroszkópos 336x-os nagyításban

6.2. A szálszerkezetről készült képek kiértékelése

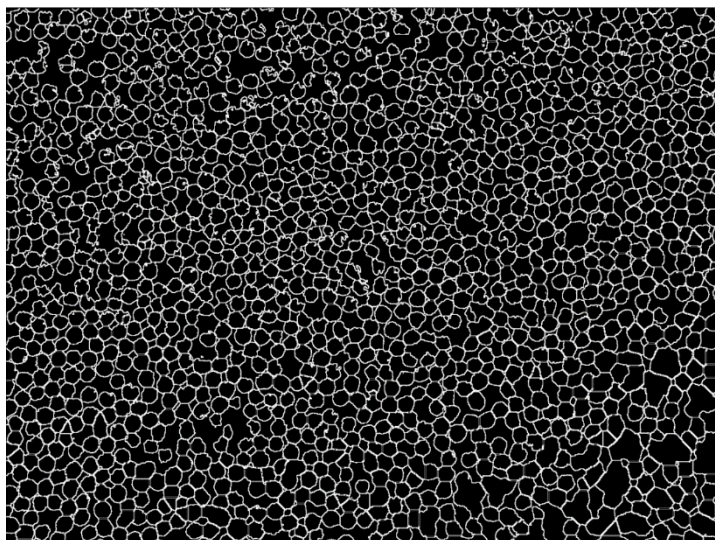
A szálszerkezetről készült képeket az ImageJ szoftver segítségével értékeltem ki. A kiértékelés során a szálak mennyisége, illetve azok átmérője volt a legfontosabb szempont minden kép esetében. Ezek segítségével tudtam a kitöltési tényezőt meghatározni, mely a mikrostruktúra modellezéséhez szükséges.

Az ImageJ szoftver segítségével minden képet 32 bites szürkeárnyalatossá kellett alakítanom a további feldolgozás érdekében. A 32 bites képen ezután ki tudtam jelölni a szükséges részeket, melyek a szálak voltak. megnöveltem a kontrasztot a kijelölt részek és a mátrix között. Az így kapott fekete-fehér kép a 6.3. ábrán látható.



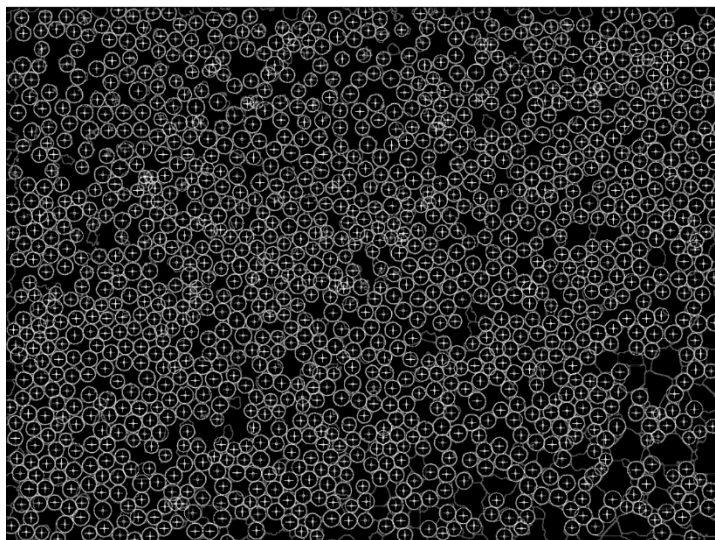
6.3. ábra. A fekete-fehér kép

A képen látszik, hogy több helyen a szálak összefolytak a kiválasztáskor. Ezeket a részeket szétválasztottam. Majd a fekete és fehér átmenetek szegmentálásával elkülönítettem a szálerősítés körvonalait. A 6.4. ábra a szegmentált éleket mutatja.



6.4. ábra. A szálak szegmentált élei

Végül pedig a Hough Circle Transform Plugin segítségével a szegmentált élekre köröket illesztettem, melyek a 6.5. ábrán láthatóak.



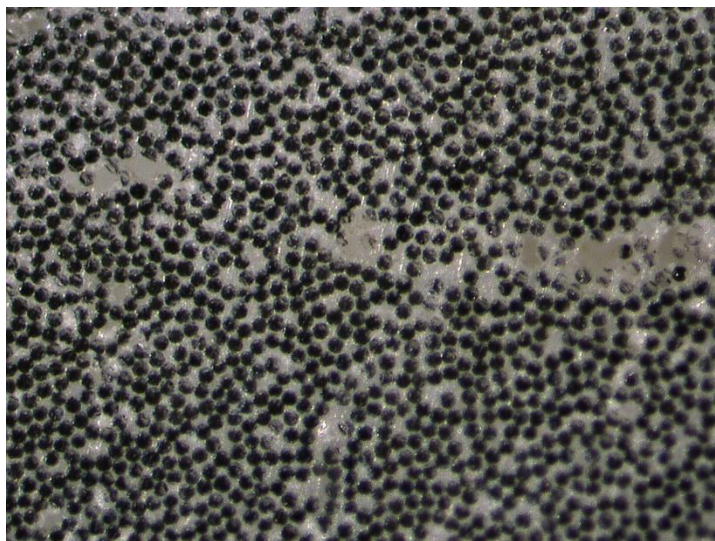
6.5. ábra. Az illesztett körök

Ezt a folyamatot minden kép esetében elvégeztem, majd a kapott körátmérőket, illetve kör mennyiségeket táblázatba vezettem, mely a 6.2. táblázatban látható.

6.2. táblázat. A képekből kiértékelt adatok

Kép száma	Átlagos szál átmérő [μm]	Szálak száma [db]
1	22,669	1507
2	22,806	1570
3	22,834	1285
4	22,049	1571
5	22,679	1456
Medián	22,679	1507
Relatív hiba	2,778%	14,731%

Az eredményekből jól látszik, hogy a körátmérőket kis eltéréssel határozta meg ez a módszer, a szálmennyiségek nagyobb eltérését a 3. képen látható nagyobb méretű anyaghiba okozta. Ezen anyaghiba jelenléte megmagyarázza a 3.3. táblázatban mért magasabb rugalmassági modulus értéket. A 6.6. ábrán a próbatest keresztmetszetében anyaghibák láthatóak, amelyek lecsökkentik a kitöltési tényezőt, amellyel egyenes arányosságban van a rugalmassági modulus értéke is.



6.6. ábra. A 3. kép az anyaghibával

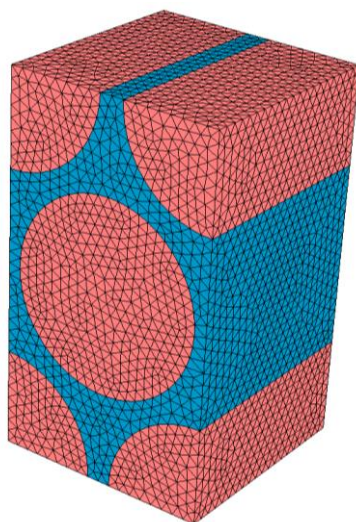
6.3. A mikrostruktúra egységcellájának létrehozása

A képek kiértékelése után létrehoztam a mikrostruktúra egységcelláját, melyhez az Altair Multiscale Designer szoftvert használtam. A szoftver rendelkezik több alapértelmezett egységcellával, én a vizsgált anyagomnak legjobban megfelelő Honeycomb modellt választottam ki, mivel ez alkalmas sűrű egyirányú szálerősítéssel rendelkező anyagok

modellezésére. Az egységcella generálásához az egyedüli bemenő paraméter a kitöltési tényező, melyet a 6.2. táblázat medián értékeinek felhasználásával határoztam meg. Hosszú egyirányú szálerősítés esetén a térfogati kitöltési tényező egyszerűsíthető a keresztmetszetről készült képekre, a következőképpen:

$$V^f = \frac{A_{sz}}{A_k}, \quad (6.1.)$$

ahol a V^f a térfogati kitöltési tényező, az A_{sz} a szálak által lefedett terület a képeken, az A_k pedig a kép teljes területe. A képletbe történő behelyettesítés után a kitöltési tényező értéke $V^f = 71,632\%$ -nak adódott. Az érték megadása után legeneráltam az egységcellát, mely a 6.7. ábrán látható.



6.7. ábra. A 71,632 %-os kitöltési tényezővel generált Honeycomb egységcella

6.4. Anyagparaméterek számítása

A Multiscale Designer szoftver két lehetőségek biztosít az anyagparaméterek meghatározására. Az első, úgynevezett előre haladó módszer esetében a mátrix, illetve szálerősítés anyagi paramétereit kell megadni külön-külön, és azok alapján a szoftver kiszámítja a kompozit anyagunk mechanikai tulajdonságait. Ezen módszer alkalmazásához ismerni kell a kiinduló alapanyagokat, mely információval én jelenleg nem rendelkezek. Emiatt a második módszert tudtam alkalmazni, mely a sokkal számításigényesebb inverz karakterizáció. Ebben az esetben a szoftverbe bemenő adatként a teljes anyagon mért eredményeket kell betáplálni várható értéként és az egy optimáló algoritmus segítségével a



szálerősítés, illetve mátrixanyag paramétereinek változtatásán keresztül megpróbálja ezen várható értékeket megközelíteni. A várható értékként megadott paraméterek esetében a 6.3. táblázatban láthatóak.

6.3. táblázat. Az optimáló algoritmus várható értékeként megadott paraméterek

E_1 [MPa]	44873
$E_2 = E_3$ [MPa]	8127
$\nu_{12} = \nu_{13}$ [-]	0,1566

Ezen várható értékek mellett kiinduló paramétereket is meg kellett adni, melyeket a szoftver saját anyagi táblázatából választottam ki az üvegszála, illetve a PMMA (Polimetil-metakrillát) műanyagra, mely a mátrixot képezi. Ezután az optimáló algoritmus beállítása következett, majd az algoritmus indítható volt. Az algoritmus adatai a 6.4. táblázatban láthatóak.

6.4. táblázat. Az optimáló algoritmus adatai

Algoritmus típusa	Trust region
Függvény tolerancia	4
Maximális iterációk száma [db]	100

Az algoritmus a bevitt adatoknak megfelelő megoldásra jutott 29 iteráció után, mely kb. 13 órát vett igénybe. A sikeres konvergálást követően a szoftverből meghatározhatóak a kompozitot felépítő anyagok paraméterei, melyek a 6.5. táblázatban láthatók.

6.5. táblázat. Az optimáló algoritmus által meghatározott összetevő anyagi paraméterek

Mátrix anyagmodellje	Izotropikus
Mátrix rugalmassági modulusa [MPa]	1901
Mátrix Poisson-tényezője [-]	0,197
Szálerősítés anyagmodellje	Izotropikus
Szálerősítés rugalmassági modulusa [MPa]	60450
Szálerősítés Poisson-tényezője [-]	2,74

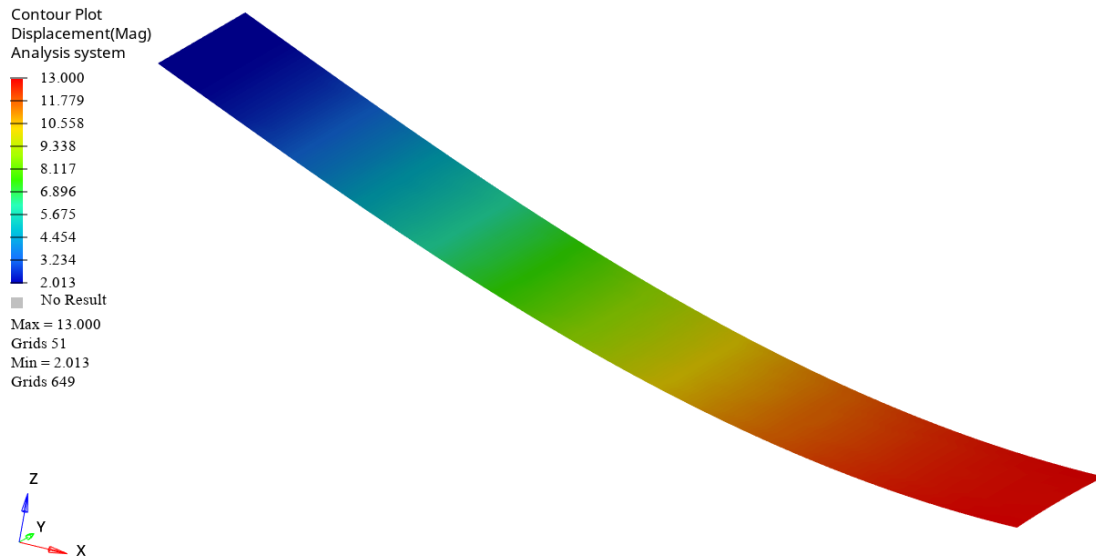
A szoftver ezen értékek alapján az egységcellával kiszámított szerkezet mechanikai tulajdonságait is meghatározta, melyeket a Hypermesh szoftver anyagmodellként tud kezelni.

6.5. Meso modellel készült szimuláció

Az anyagmodell létrehozása után a hajlítóvizsgálat szimulációja következett, melyet az 5.2. fejezetben leírt modell módosításával végeztem el. Az egyedüli módosítás az anyagmodell külső állományból történő beolvasása volt. Ennek beállítása után a szimuláció ebben az esetben is elvégezhető, majd kiértékelhető. Ebben az esetben is, a maximális lehajlás értékét határoztam



meg, melyből kiszámoltam a hajlító rugalmassági moduluszt, illetve megjelenítettem a deformált képet, melyek a 6.8. ábrán, illetve 6.6. táblázatban láthatóak.



6.8. ábra. A meso modell deformált képe

6.6. táblázat. A meso modell szimulációjából kiértékelt eredmények

Lehajlás 300 N terhelés hatására [mm]	13,000
Hajlítási rugalmassági modulus [MPa]	48077



7. A makro és meso anyagmodellekkel futtatott numerikus számítási értékek összehasonlítása

Ezen fejezetben a makro és meso modellezési módszerek által szolgáltatott eredményeket hasonlítom össze, illetve vetem össze a laboratóriumi környezetben elvégzett hajlítóvizsgálat során mért értékekkel. A kapott értékek alapján ismertetem a következtetéseket, figyelembevéve a modellek létrehozásának komplexitását, azok által szolgáltatott értékeket, illetve a felhasználási lehetőségeket.

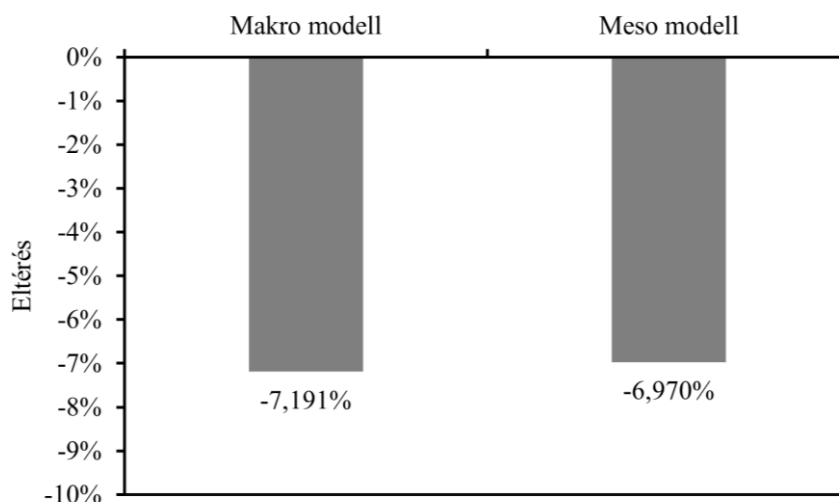
7.1. Eredmények összehasonlítása

A hajlítóvizsgálat laboratóriumi vizsgálatának, illetve a két módszerrel számított értékek összehasonlításának alapjául a laboratóriumi mérés eredményeit használtam fel. A 7.1. táblázat mutatja a három vizsgálat által szolgáltatott eredményeket.

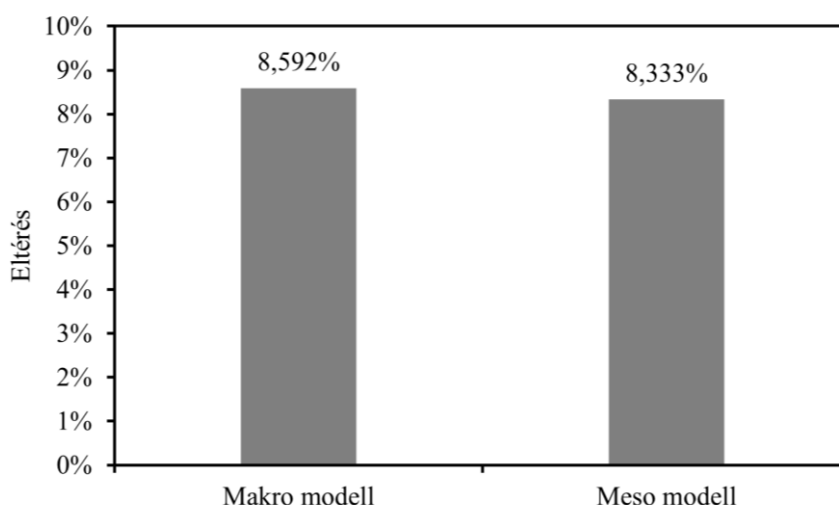
4.2. táblázat. A laboratóriumi és numerikus hajlító vizsgálat eredményei

Vizsgálat	Hajlítási rugalmassági modulus [MPa]	Lehajlás 300 N terhelésnél [mm]
Hajlítóvizsgálat	51679	12,000
Szimuláció (Makro modell)	47963	13,031
Szimuláció (Meso modell)	48077	13,000

A laboratóriumi mérés értékeitől történő eltérés a 7.1. és 7.2 ábrákon látható.



7.1. ábra. A két módszer eltérései a laboratóriumi méréstől a hajlító rugalmassági modulus értékében



7.2. ábra. A két módszer eltérései a laboratóriumi méréstől a lehajlás értékében

Az ábrán jól látszik, hogy a két módszer közel egyforma értéket szolgáltatott, a meso modell értékei csak minimális mértékben lettek pontosabbak a makro modell értékeitől. Látható az is, hogy mindkét modell viszonylag nagy 8% -os relatív hibát mutatott a lehajlás értékiben, azaz mindkét esetben nagyobb lett a lehajlás értéke a mért értéktől.

7.2. Következtetések levonása

A két modell által szolgáltatott értékek közel megegyeztek, viszont a létrehozásuk komplexitása, illetve időigénye közel sem egyforma. A meso modell létrehozásához nem volt elég a szakítóvizsgálatok által szolgáltatott eredmény, szükséges volt a mikrostruktúra jobb megismeréséhez mikroszkópos felvételek készítésére. Ez időt, illetve erőforrást vett igénybe, de mindemellett az optimáló algoritmus teljes futása is több mint fél napig tartott. A makro modell létrehozásához ezzel ellentétben viszonylag egyszerű számításokra, illetve a mért és számított értékek megadására volt csak szükség. A meso modellek létrehozásának tehát lényegesen magasabb erőforrásigénye van.

A meso modell nem csak a teljes anyag mechanikai tulajdonságait szolgáltatotta eredményül, hanem meghatározta a szerkezetet felépítő két anyag paramétereit is. Ez hasznos olyan esetekben, mint az általam bemutatott vizsgálat, ahol nem ismert a szerkezetet felépítő két anyag. A makro modellel ezen paraméterekre nem lehet következtetni.

A Multiscale Designer szoftver további laboratóriumi mérések eredményeinek betáplálásán keresztül lehetőséget nyújt nemlinearitás, illetve tönkremenetel leírására, melyre az egyszerű



makro modellek esetén nincs közvetlenül lehetőség. Komplexebb anyagmodellek létrehozásán, illetve lényegesen több kézi számításon keresztül ezen modellek is tudnak hasonló paramétereket számítani, viszont ez a meso modell esetében egy hasonló optimáló algoritmuson keresztül egyszerűbben megoldható. A nemlinearitás, illetve tönkremenetel modellezésekor a két módszer pontosságának, illetve alkalmazhatóságának vizsgálata jövőbeli kutatási célt képezhet.

Mindkét modell esetében elmondható, hogy az alapanyag gyártásából, illetve próbatest előállításból származó hibák nagyban befolyásolják mindkét modell teljesítményét. A mikroszkópos vizsgálat során az egyik képen jelentős anyaghibát figyeltem meg. Ezen anyaghiba jelenléte csökkenti a szerkezet kitöltési tényezőjét, ezzel csökkentve a szerkezet rugalmassági modulusát.

Összegezve, a makro modellek alkalmasak olyan feladatok megoldására, ahol csak a teljes szerkezet rugalmas tulajdonságainak leírása van a középpontban. A meso modellek alkalmazása még a nagyobb idő- és erőforrásigény ellenére is indokolt komplexebb anyagtulajdonságokat (például tönkremenetel, vagy nemlinearitás) tartalmazó feladatok esetében. Emellett ezek a modellek olyan esetekben is alkalmazhatóak, amikor csak a szerkezetet felépítő anyagok állnak rendelkezésre, vagy azok feltárása van a középpontban.



8. Összegzés

A kompozit anyagok szálszerkezetének végeselemes modellezésére jelenleg három módszer ismert. Az egyik a mikrostruktúra teljes modellezése. A másik a mikrostruktúra teljes elhanyagolása és a szerkezet egy anyagként történő kezelése, melyet makro modellezésnek nevezünk. A harmadik a meso modellezés, amely esetén a végeselemes modellben a mikrostruktúrát elhanyagoljuk, azt csak elemi szinten hívjuk meg. A TDK dolgozatomban a három módszer közül, a makro, illetve a meso modellezést hasonlítottam össze laboratóriumi vizsgálatokon, illetve a modellezési módszerek alkalmazásán keresztül.

Az összehasonlításhoz egy egyirányú szálerősítésű kompozit anyagot használtam fel. A modellek pontosságának biztosításához 0° , 45° és 90° -os orientációjú szakítóvizsgálatokon keresztül meghatároztam a pontos mechanikai tulajdonságait. A vizsgálat során a fajlagos nyúlások teljes mezőn történő nyomon követéséhez a GOM Aramis rendszert alkalmaztam. A modellezési módszerek összehasonlításához egy további laboratóriumi vizsgálatot is elvégeztem ugyanezen anyagra, mely egy hárompontos hajlítóvizsgálat volt.

A laboratóriumi vizsgálatok elvégzése után először a makro modellezési eljárást mutattam be, illetve végeztem el az Altair Hypermesh szoftver segítségével. A szakítóvizsgálatok alapvetően nem szolgáltatnak elegendő információt egy ilyen modell létrehozásához, viszont közelítő számítások alkalmazásával a szükséges paraméterek előállíthatóak. A hiányzó paraméterek kiszámítása után létrehoztam a végeselem modellt és kiértékeltem a szimuláció által szolgáltatott eredményeket a laboratóriumi vizsgálatnak megfelelően.

A meso modellel folytattam a munkát, mely létrehozásához szükségem volt a kitöltési tényezőre, melyet keresztmetszetről készített mikroszkópos képek segítségével határoztam meg. Ezen adat ismeretében már létrehozható volt az egységcella az Altair Multiscale Designer szoftverben, valamint az egységcella alapján egy optimáló algoritmus segítségével kiszámíthatóak voltak a kompozit szerkezetet felépítő egységek, illetve a teljes kompozit szerkezet mechanikai tulajdonságai. Az így létrehozott anyagmodellt ezután a makro modellezéshez használt végeselem modellen alkalmaztam. Végül pedig ezen módszer eredményeit is kiértékeltem.



A dolgozatom utolsó fejezetében összevettem a két módszer eredményeit a laboratóriumi vizsgálat eredményeivel, illetve levontam a következtetéseket. A két modellezési eljárás a lehajlást 8,3%-os, illetve 8,5 %-os eltéréssel állapította meg, ahol a pontosabb értéket a meso modellezés szolgáltatta. Ezen viszonylag nagy mértékű eltérésnek részben oka lehet a mikroszkópos vizsgálat során megfigyelt gyártásból adódó hiba, mely a szálerősítés anyagon belüli inhomogenitásaként jelentkezett, jelenléte a vizsgált próbatestekben csökkentette a kitöltési tényezőt, ezzel csökkentve a rugalmassági modulust.

A két modellezési eljárás közti különbség a pontosságban nem tükrözte a két modell létrehozásához szükséges erőforrás-, illetve időigény különbségét. A meso eljárás elvégzéséhez elengedhetetlen a szálszerkezet pontos megismerése, melyet én mikroszkópos vizsgálaton keresztül végeztem el. Ugyanezen eljárás optimáló algoritmusával emellett az anyagmodell kiszámítását több, mint fél napon keresztül végezte el. Ezekkel ellentétben a makro modell létrehozása nem igényelt további vizsgálatot, csak néhány viszonylag egyszerű kézi számítást.

A szolgáltatott eredményekben is eltérés látható, a makro módszer csak a kész szerkezet mechanikai tulajdonságait tudja szimulálni, illetve a dolgozatban bemutatott eljárás csak a rugalmas zóna modellezésére alkalmas, nemlinearitás, illetve tönkremenetel modellezéséhez speciális anyagmodellekre van szükség, melyekhez külső szoftverek vagy komplexebb kézi számítások szükségesek. A meso módszernél alkalmazott Multiscale Designer szoftver ezzel ellentétben ezen tulajdonságok kiszámítására is lehetőséget nyújt, melyekhez további mérési eredmények betáplálása szükséges. Emellett a módszer meghatározta a kompozit szerkezetet alkotó két anyag paramétereit is.

Összegezve, az egyszerűbb feladatok elvégzéséhez a makro modellezési módszer ugyanolyan alkalmasnak bizonyult, mint a meso modellezés, viszont bármely komplexebb vizsgálat esetében az utóbbi eljárás alkalmazása ajánlott.



Köszönetnyilvánítás

Huri D.: Témavezetésért, szakmai iránymutatásért.

Major Z. - Johannes Kepler University intézetigazgatója: Az alapanyag biztosításáért, szakmai iránymutatásért, konzultációért.

Mankovits T. - tanszékvezető: A laboratóriumi és szimulációs infrastruktúra biztosításáért.

Balogh G.: Segítségért a csiszolat elkészítésében, mikroszkópiában.

Géresi Z.: Segítségért a próbatestek kimunkálásában.

OMAA 11öu5 - Entwicklung von Materialmodellen für 3D-gedruckte elastomere und kurzfaserverstärkte Verbundwerkstoffe című pályázat (DE-JKU): A munka támogatásáért.



Irodalomjegyzék

- [1] J. S. Bergstrom, *Polymer solid mechanics*. 2000.
- [2] J. Aboudi, S. M. Arnold, and B. A. Bednarczyk, *Micromechanics of Composite Materials*. Elsevier, 2013.
- [3] A. Parmiggiani, M. Prato, and M. Pizzorni, “Effect of the fiber orientation on the tensile and flexural behavior of continuous carbon fiber composites made via fused filament fabrication,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 114, no. 7–8, pp. 2085–2101, Jun. 2021, doi: 10.1007/s00170-021-06997-5.
- [4] P. R. V. Doddi, R. Chanamala, and S. P. Dora, “Effect of fiber orientation on dynamic mechanical properties of PALF hybridized with basalt reinforced epoxy composites,” *Mater. Res. Express*, vol. 7, no. 1, 2020, doi: 10.1088/2053-1591/ab6771.
- [5] G. Radhakrishnan and S. Mathialagan, “Effect of fiber orientation on mechanical behavior of glass fiber reinforced polyethylene terephthalate foam sandwich composite,” *Mater. Today Proc.*, vol. 62, pp. 624–628, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.03.623.
- [6] N. Hashim, D. L. A. Majid, E.-S. Mahdi, R. Zahari, and N. Yidris, “Effect of fiber loading directions on the low cycle fatigue of intraply carbon-Kevlar reinforced epoxy hybrid composites,” *Compos. Struct.*, vol. 212, no. July 2018, pp. 476–483, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.01.036.
- [7] M. Cordin, T. Bechtold, and T. Pham, “Effect of fibre orientation on the mechanical properties of polypropylene–lyocell composites,” *Cellulose*, vol. 25, no. 12, pp. 7197–7210, Dec. 2018, doi: 10.1007/s10570-018-2079-6.
- [8] J. Fish, *Practical Multiscaling*. 2013.
- [9] D. L. Van Otterloo and V. Dayal, “How isotropic are quasi-isotropic laminates,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 34, no. 1, pp. 93–103, Jan. 2003, doi: 10.1016/S1359-835X(02)00180-X.
- [10] P. Wriggers and M. Hain, “Micro-Meso-Macro Modelling of Composite Materials,” in *Computational Methods in Applied Sciences*, vol. 7, no. May, 2007, pp. 105–122.
- [11] C. Oddy, M. Ekh, and M. Fagerström, “Macroscale modelling of 3D-woven composites : Elastoplasticity and progressive damage,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 250, no. April, p. 111696, 2022, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2022.111696.
- [12] C. Oddy, M. Ekh, T. Ekermann, S. Hallström, and M. Fagerström, “A framework for macroscale modelling of inelastic deformations in 3D-woven composites,” *Mech. Mater.*, vol. 160, no. April,



- p. 103856, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.mechmat.2021.103856.
- [13] W. Zhuang, S. Chen, X. Yang, and Y. Liu, "Meso/macroscale study on the shear failure of CFRP laminates considering fibre rotation," *Thin-Walled Struct.*, vol. 181, no. 5988, p. 110105, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.tws.2022.110105.
- [14] H. Yin, Q. Li, and L. Iannucci, "Meso-scale Finite Element (FE) modelling of biaxial carbon fibre non-crimp-fabric (NCF) based composites under uniaxial tension and in-plane shear," *Compos. Struct.*, vol. 290, p. 115538, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115538.
- [15] N. Naouar, D. Vasiukov, C. H. Park, S. V. Lomov, and P. Boisse, "Meso-FE modelling of textile composites and X-ray tomography," *J. Mater. Sci.*, vol. 55, no. 36, pp. 16969–16989, Dec. 2020, doi: 10.1007/s10853-020-05225-x.
- [16] D. Ma, Á. González-Jiménez, M. Giglio, C. M. dos Santos Cougo, S. C. Amico, and A. Manes, "Multiscale modelling approach for simulating low velocity impact tests of aramid-epoxy composite with nanofillers," *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 90, no. November 2020, 2021, doi: 10.1016/j.euromechsol.2021.104286.
- [17] J. Marszałek, J. Stadnicki, and P. Danielczyk, "Finite element model of laminate construction element with multi-phase microstructure," *Sci. Eng. Compos. Mater.*, vol. 27, no. 1, pp. 405–414, 2020, doi: 10.1515/secm-2020-0044.
- [18] C. Liu, J. Xie, Y. Sun, and L. Chen, "Micro-scale modeling of textile composites based on the virtual fiber embedded models," *Compos. Struct.*, vol. 230, no. October, p. 111552, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111552.
- [19] C. Chang, Y. Zhang, and H. Wang, "Micromechanical modeling of unidirectional composites with random fiber and interphase thickness distributions," *Arch. Appl. Mech.*, vol. 89, no. 12, pp. 2563–2575, 2019, doi: 10.1007/s00419-019-01595-0.
- [20] N. Griya, K. C. Nithin Kumar, D. P. Singh, and A. Shaikh, "Finite element analysis of UD carbon-epoxy laminate under in-plane load," *Mater. Today Proc.*, vol. 26, pp. 756–759, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.020.
- [21] M. Braun, I. Iváñez, and M. P. Ariza, "A numerical study of progressive damage in unidirectional composite materials using a 2D lattice model," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 249, no. April, p. 107767, May 2021, doi: 10.1016/j.engfracmech.2021.107767.
- [22] H. Liu *et al.*, "Modelling damage in fibre-reinforced thermoplastic composite laminates subjected to three-point bend loading," *Compos. Struct.*, vol. 236, p. 111889, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.111889.
- [23] N. An, Q. Jia, H. Jin, X. Ma, and J. Zhou, "Multiscale modeling of viscoelastic behavior of



- unidirectional composite laminates and deployable structures,” *Mater. Des.*, vol. 219, p. 110754, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.matdes.2022.110754.
- [24] N. K. Parambil and S. Gururaja, “Bridging micro-to-macro scale damage in UD-FRP laminates under tensile loading,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 157–158, no. April, pp. 184–197, 2019, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2019.03.039.
- [25] M. Naderi, J. Michopoulos, N. Iyyer, K. Goel, and N. Phan, “Multiscale analysis of fatigue crack initiation life for unidirectional composite laminates,” *Compos. Struct.*, vol. 213, no. November 2018, pp. 271–283, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.01.107.
- [26] J. Gao *et al.*, “Predictive multiscale modeling for Unidirectional Carbon Fiber Reinforced Polymers,” *Compos. Sci. Technol.*, vol. 186, no. April 2019, p. 107922, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.compscitech.2019.107922.
- [27] K. N. Antin, A. Laukkanen, T. Andersson, D. Smyl, and P. Vilaça, “A multiscale modelling approach for estimating the effect of defects in unidirectional carbon fiber reinforced polymer composites,” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 12, 2019, doi: 10.3390/ma12122885.
- [28] D. Yang, Y. Sun, Z. Yang, X. Chen, and C. Wang, “Multiscale modeling of unidirectional composites with interfacial debonding using molecular dynamics and micromechanics,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 219, no. April, p. 108893, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.108893.
- [29] Altair Engineering Inc., “Altair Multiscale Designer,” 2020, [Online]. Available: <https://altairhyperworks.com/product/Multiscale-Designer>.
- [30] J. C. Marín, J. Cañas, F. París, and J. Morton, “Determination of G₁₂ by means of the off-axis tension test. Part I: Review of gripping systems and correction factors,” *Compos. - Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 33, no. 1, pp. 87–100, 2002, doi: 10.1016/S1359-835X(01)00065-3.