

PPS-karbonszál kompozit multiscale modellezése

Multiscale modeling of a PPS-carbon fibre composite

File Máté^a, Huri Dávid^b, Kállai Imre^c, Mankovits Tamás^d, Andreas Kapshammer^e, Major Zoltán^f^aDiehl Aviation Hungary kft., tervezőmérnök, mate.file@eng.unideb.hu^bDebreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, adjunktus, huri.david@eng.unideb.hu^cDiehl Aviation Hungary kft., mérnökségvezető, imre.kallai@diehl.com^dDebreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, tanszékvezető, tamas.makovits@eng.unideb.hu^eJohannes Kepler Universität Linz, Institute of Polymer Product Engineering, kutató, andreas.kapshammer@jku.at^fJohannes Kepler Universität Linz, Institute of Polymer Product Engineering, intézetvezető, zoltan.major@jku.at

Kulcsszavak

végelelemes szimuláció,
multiscale anyagmodell,
szakítóvizsgálat,
mikroszkópos vizsgálat,
kompozit

Keywords

finite element simulation,
multiscale material model,
tensile test,
microscopic analysis,
composite

Absztrakt

Jelen kutatás egy PPS-karbonszál kompozit végelelemes modellezését mutatja be multiscale anyagmodell felhasználásával. A modellezés alapjául szobahőmérsékleten és 150°C-on végzett szakítóvizsgálatok, illetve a keresztmetszet mikroszkópos vizsgálata által nyújtott eredmények szolgáltak. Az alapanyag megfelelő modellezéséhez létrehoztunk egy egységcellát, majd 0°-os és 90°-os orientációjú szakítóvizsgálat eredményeket felhasználva egy optimalizáló algoritmus segítségével illesztettük az anyagmodelleket, és meghatároztuk a vizsgált alapanyagot építő elemek anyagi tulajdonságait. A kapott multiscale modelleket ezután a 45°-os orientációjú próbatestek eredményeivel összehasonlítva ellenőriztük.

Abstract

This work presents the finite element modelling of a PPS-carbon fibre composite material using multiscale constitutive models. Results from tensile tests done at room temperature and 150°C, as well as cross-section microscopy, were used as the basis for the modelling. To model the material behaviour, a unit cell was created, and the 0° and 90° tensile test results were used to fit the material model. An optimization algorithm was used to complete this task, and it also computed the material properties of the composite components as well. The created material models were compared to results of the 45° orientation tensile test specimens, and their accuracy was determined.

1. Bevezetés

A kompozit anyagok terhelésre adott válaszában leírására jelenleg három modellezési eljárás ismert [1-3]. Egyik a makro modellezés, amely esetében a szál, illetve mátrix által alkotott szerkezetet egy anyagnak tekintjük, egy ortotrop anyagmodellt alkalmazva [3-6]. A legkomplexebb eljárás a mikro modellezés, ahol az építőelemeket minden pontban modellezzük. Ez az eljárás rendkívül nagy számítási kapacitást igényel, így a gyakorlatban ennek alkalmazása háttérbe szorult [3, 7, 8].

A két modellezési eljárás közé sorolható a jelen munkában is alkalmazott mezo (multiscale) modellezés. Ebben az esetben a szálszerkezetet egy egységcellává egyszerűsítjük. Az egységcella magában hordozza a mátrix és a szálerősítés anyagmodelleit (esetenként a köztük lévő kapcsolatot is), illetve geometriája közelíti a valódi alapanyag elrendezését. Az egységcellán homogenizált anyagi tulajdonságokat tudják a végelelemes modell elemei anyagmodellként felhasználni. Az egységcella tehát magában hordozza a felépítő anyagok, illetve a teljes kompozit szerkezet tulajdonságait is. Ezen modellek tehát lehetőséget nyújtanak a szálszerkezet figyelembevételére, a végelelemes szimulációk számítási kapacitásának túlzott megnövelése nélkül. Az egységcella létrehozására két módszer ismert: kiszámítható a felépítő anyagok alapján, valamint kiszámítható a kompozit szerkezeten mért értékek alapján. Ez utóbbi eljárás visszafertő tervezésre (reverse-engineering) is alkalmas, mivel kiszámíthatóak a felépítő anyagok tulajdonságai is [3, 6, 9-12].

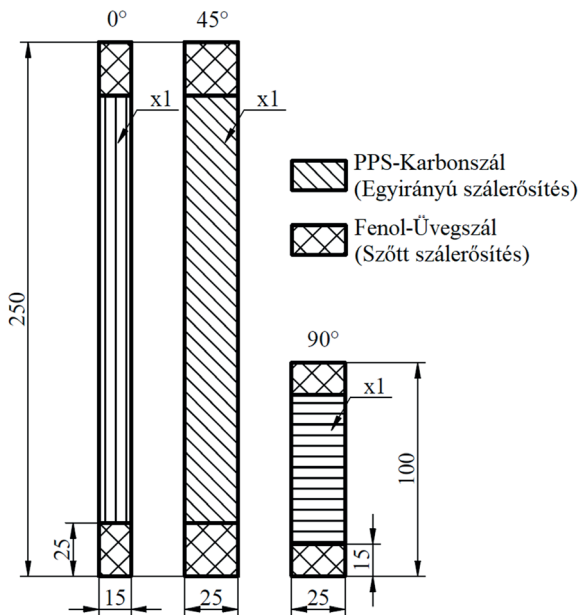
Egy kompozit alapanyag a merevségi és a szilárdsági jellemzőinek meghatározásához számos 0° és 90°-os szakítóvizsgálatra, nyíró vizsgálatra és nyomóvizsgálatra van szükség. A fent említett mezo modellek alkalmazása nagyban lerövidítheti ezt a folyamatot, mivel az

egységcella karakterizációja során akár nem megfelelő mennyiségű mérési eredmény is megadható, és optimalizáló algoritmusok segítségével a mérési eredmények hiánya áthidalható.

Munkánk során egy egyirányú szálerősítésű kompozit modellezését végeztük el szobahőmérsékleten, illetve 150°C-on. A modellezéshez csak 0° és 90°-os orientációjú szakítóvizsgálatok eredményeit használtuk fel. A modellezés során a rugalmas tulajdonságokra helyeztük a hangsúlyt. A 0° és 90°-os orientációjú próbatestek értékei alapján létrehozott multiscale modelleket pedig 45°-os orientációjú szakítóvizsgálatok eredményeivel hasonlítottuk össze, ezzel meghatározva a modellek pontosságát.

2. Anyagok és módszerek

A szakítóvizsgálatokat az ISO 527-5-ös szabvány szerint végeztük [13]. A próbatestek geometriája eltért a szabvány által javasolt méretektől, mivel a rendelkezésre álló kompozit lemez méretei nem tették lehetővé a szabványos méretű próbatestek kimunkálását. A munka alapanyagát egyirányú szálerősítésű polifenilén szulfid (PPS)-karbonszál kompozit alkotta. A Johannes Kepler Universität Linz, Institute of Polymer Product Engineering által szolgáltatott 1 mm vastag kompozit lemezből az anyagi tulajdonságok meghatározásához 0° és 90°-os orientációkban munkáltunk ki szakítópróbatesteket. A modellek ellenőrzéséhez pedig további szakítópróbatesteket vágtunk ki 45°-os orientációban. A próbatestek befogásra szolgáló felületeire 1 mm vastagságú fenol-üvegszál kompozit lemezeket ragasztottunk LOCTITE HY4080 ragasztó segítségével. A próbatestek méreteit az 1. ábra szemlélteti. Az eltérő próbatest méreteket a rendelkezésre álló kompozit lemez lehető legjobb kihasználása miatt választottuk meg.



1. ábra: A különböző szálorientációjú szakítópróbatestek méretei

A próbatestek vizsgálatához egy 10 kN kapacitású INSTRON 68TM-10 egytengelyű anyagvizsgáló gépet használtunk. Az alakváltozást GOM Aramis 12M teljes mező optikai nyúlásmérő rendszerrel követtük. A két rendszer összehangoltan, egyazon adatregisztrációs frekvenciával rögzítette a mért értékeket. A szakítóvizsgálatokat két különböző hőmérsékleten végeztük. Szobahőmérsékleten, illetve 150 °C-os hőmérséklet alatt. A magasabb hőmérsékletű szakítóvizsgálatok klímakamrában zajlottak. A próbatesteket a szakítóvizsgálatok elvégzése előtt 20 percig temperáltuk. A GOM Aramis rendszer a magasabb hőmérsékletű vizsgálatok során a kamra üveglapján keresztül rögzítette a vizsgálatot. Az üveglap optikai mérőeszközök alkalmazása érdekében lencseüvegből készült [14]. Nem megfelelő mennyiségű alapanyag miatt a magasabb hőmérsékletű esetben csak 45°-os és 90°-os próbatesteket vizsgáltunk. A vizsgálat körülményei az 1. táblázatban láthatók, a vizsgálati elrendezés a két különböző hőmérsékleten pedig a 2. ábrán látható.

1. táblázat: A szakítóvizsgálat körülményei

Terhelés módja	Húzó
Terhelés sebessége	2 mm/perc
Adatrögzítés	4 Hz
Hőmérséklet	23±3 °C, 150±3 °C
Páratartalom	50%

A szálszerkezet modellezéséhez mikroszkópos vizsgálatot végeztünk a keresztmetszeten. A vizsgálatához Zeiss Primotech digitális mikroszkópot használtunk. A képeket 500x-os nagyításban készítettük, 5 db képet készítettünk a keresztmetszet különböző pontjaiban, melyeket ImageJ szoftver segítségével dolgoztunk fel. A képeket először 32 bites szürkeárnyalatossá transzformáltuk, majd a képeket fekete-fehérré alakítottuk. A fekete fehér képen elkülönült szálakra pedig a *Hough Circle Transform Plugin* segítségével köröket illesztettünk. A képen a körök által lefedett terület (A_{sz}) és a teljes képek területének (A_k) arányából kaptuk meg a kitöltési tényező százalékos értékét (V_f):

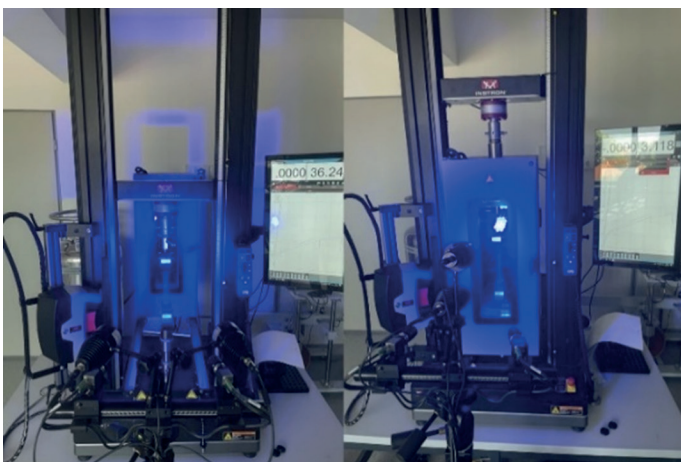
$$V_f [\%] = \frac{A_{sz}}{A_k} \cdot 100. \quad (1)$$

A multiscale modell létrehozásához az Altair Multiscale Designer szoftvert használtuk. A szoftver lehetőséget nyújt előremenő modellezésre, mely esetén az alapanyag építőelemeinek anyagi tulajdonságainak ismeretére van szükség, és a szoftver ezen értékek alapján számolja ki a kompozit viselkedését. Mivel esetünkben a kompozit anyagon mért eredmények álltak rendelkezésre, így a szoftver másik lehetőségét, az inverz anyagmodell karakterizációt alkalmaztuk, mely egy a megbízhatósági tartomány módszeren alapuló optimalizáló algoritmus segítségével működik. Az algoritmus célértékeiként a 0°-os és 90°-os orientációjú próbatesteken mért értékek szolgáltak. A rendszer ezen értékeket próbálta megközelíteni a kompozitot felépítő anyagok paramétereinek változtatásával. A számítás eredményeként tehát nem csak egy lineárisan rugalmas, ortotróp anyagmodellt kaptunk, mely alkalmas az anyag rugalmas tulajdonságainak modellezésére különböző szálorientációk mellett, hanem a rendszer javaslatot adott a kompozitot felépítő anyagok mechanikai tulajdonságaira is.

A multiscale anyagmodellek ellenőrzéséhez, illetve pontosságuk meghatározásához a 45°-os orientációjú laboratóriumi szakítóvizsgálat eredményeit használtuk fel. A mért értékeket összevetettük a 45°-os orientációra meghatározott multiscale anyagmodellel elvégzett numerikus analízis értékeivel. A végeselemes szimulációkat az Altair Hypermesh szoftver, illetve az Optistruct megoldó segítségével végeztük el. A szimulációk célja a laboratóriumi körülmények között elvégzett szakítóvizsgálatok lehető legpontosabb modellezése volt.

3. Laboratóriumi vizsgálatok eredményei

A szakítóvizsgálatokat orientációnként és hőmérsékletenként 3-3 próbatesten végeztük el. Az eredményekből kiértékelésre kerültek a modellezés szempontjából legfontosabb, rugalmassági modulus és Poisson tényező



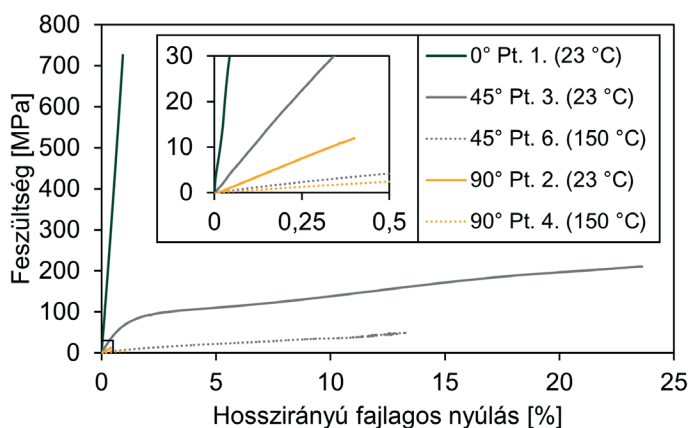
2. ábra: A szakítóvizsgálat mérési elrendezés szobahőmérsékleten és 150 °C alatt hőkamrával

értékek. A 90°-os próbatestek esetében a kis mértékű, keresztirányú alakváltozás miatt a Poisson-tényező meghatározására nem volt lehetőség. Minden orientációban kiválasztottuk a rugalmassági modulus szerint a medián értéket képviselő próbatestet, melyek értékei a 2. táblázatban láthatóak.

2. táblázat: A szakítóvizsgálatok során kapott eredmények medián értékei

Rugalmassági modulus [MPa]			
Hőmérséklet	Orientáció		
	0°	45°	90°
23 °C	66233	8971,4	3152,6
150 °C	-	923,0	518,6
Poisson-tényező [-]			
Hőmérséklet	Orientáció		
	0°	45°	90°
23 °C	0,29	0,82	-
150 °C	-	0,98	-

A feszültség-fajlagos nyúlás görbéket pedig a 3. ábra szemlélteti.



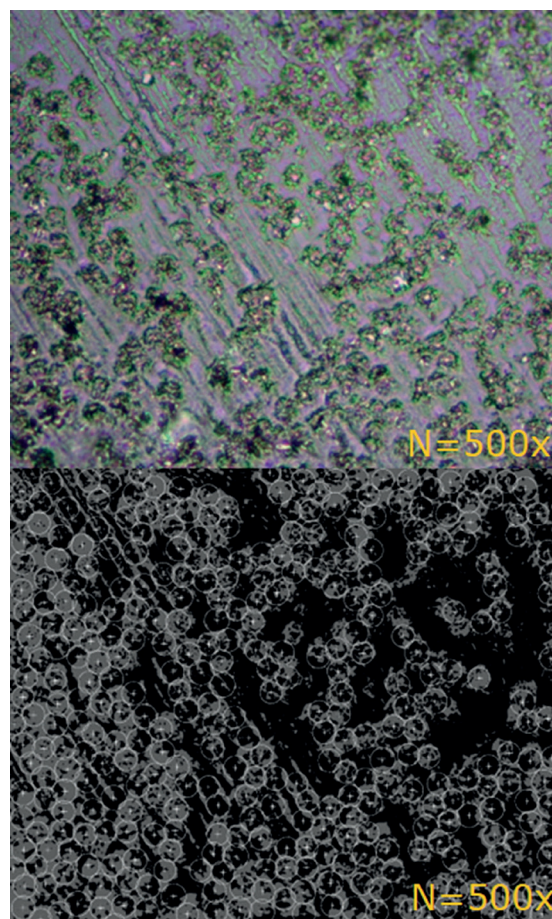
3. ábra: A medián értéket képviselő próbatestek feszültség-fajlagos nyúlás görbéi különböző orientációk, illetve hőmérsékletek mellett

A mikroszkópos vizsgálat során is a modellezés szempontjából legfontosabb érték kinyerésére fektettük a hangsúlyt, mely esetünkben a térfogati kitöltési tényező volt. Egy készített mikroszkópos felvételt, valamint a képre illesztett köröket mutatja a 4. ábra.

Az öt képből kiértékelt térfogati kitöltési tényező medián értéke 64,6%-ra adódott.

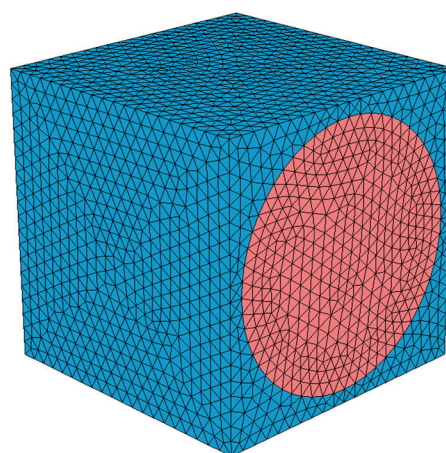
4. Multiscale anyagmodellek létrehozása

Az anyagmodellek létrehozásának első lépése az egységcella létrehozása volt. Az egységcellát az Altair Multiscale designer szoftver előre meghatározott és hálózott egységcella könyvtárából választottuk ki. A rendelkezésre álló alapanyag modellezéséhez az egyirányú egységcellát választottuk. A cella tartalmazta a mátrix és a szálerősítés modelljét is, méretei 1x1x1 egység. Munkánk során a két anyag közötti interfészt nem modelleztük, a kiválasztott egységcella itt egy ragasztott kapcsolatot alkalmaz. A cella hálózása tetraéderekkel történt, az elemek



4. ábra: A keresztmetszet egy mikroszkópos felvétele és az illesztett körök

mérete 0,05 egység. A cella karakterizálásának bemenő paramétere a kitöltési tényező, melyet a laboratóriumi vizsgálat alapján 64,6%-ra állítottunk be. Az egységcella szoftveres képe a 5. ábrán látható.



5. ábra: A 64,6%-os kitöltési tényezővel létrehozott egységcella

Az egységcella létrehozása után a szobahőmérsékletű anyagmodellel folytattuk a munkát. Az inverz karakterizációs módszer célértékeinek a 0° és 90°-os orientációjú próbatestek értékeit adtuk meg a 3. táblázatban látható módon.

3. táblázat: Az optimalizáló algoritmus célértékei szobahőmérsékleten

Rugalmassági modulus száírányban (E_1)	66233 MPa
Rugalmassági modulus keresztírányban ($E_2=E_3$)	3153 MPa
Poisson-tényező száírányban ($\nu_{12}=\nu_{13}$)	0,29

Az optimalizáló algoritmus futtatásához szükséges megadni a változók kiinduló értékeit, melyhez a Multiscale Designer szoftver anyagadatbázisában elérhető szénszál és a mátrixot képző PPS műanyag anyagi tulajdonságait használtuk. A kiinduló értékek a 4. táblázatban láthatóak.

4. táblázat: Az optimalizálás változóinak kiinduló értékei szobahőmérsékleten

Szálerősítés (karbonszál)	
Főirányú rugalmassági modulus (E_1)	220632 MPa
Keresztírányú rugalmassági modulus (E_2)	15886 MPa
Főirányú Poisson-tényező (ν_{12})	0,25
Keresztmetszeti Poisson-tényező (ν_{23})	0,2
Nyírási rugalmassági modulus (G_{12})	19857 MPa
Mátrix, szobahőmérséklet (PPS)	
Rugalmassági modulus (E)	3792 MPa
Poisson-tényező (ν)	0,36

Az optimalizáló algoritmus 23 iterációt követően konvergált, a futásidő kb. 8 óra volt. A sikeres konvergálást követően a szoftverből kiolvashatóak voltak a kompozitot félépítő anyagok számított paraméterei, ezen anyagi tulajdonságok az 5. táblázatban láthatóak.

5. táblázat: Az összetevő anyagok optimalizáló algoritmus által meghatározott értékei szobahőmérsékleten

Szálerősítés (karbonszál)	
Főirányú rugalmassági modulus (E_1)	101704 MPa
Keresztírányú rugalmassági modulus (E_2)	4991,2 MPa
Főirányú Poisson-tényező (ν_{12})	0,32
Keresztmetszeti Poisson-tényező (ν_{23})	0,2
Nyírási rugalmassági modulus (G_{12})	19857 MPa
Mátrix, szobahőmérséklet (PPS)	
Rugalmassági modulus (E)	1481,9 MPa
Poisson-tényező (ν)	0,21
Homogenizált anyagi paraméterek, szobahőmérséklet	
Főirányú rugalmassági modulus (E_1)	66233 MPa
Keresztírányú rugalmassági modulus (E_2)	3152,6 MPa
Főirányú Poisson-tényező (ν_{12})	0,29
Keresztmetszeti Poisson-tényező (ν_{23})	0,21
Nyírási rugalmassági modulus (G_{12})	2790 MPa

A Multiscale Designer szoftver optimalizáló algoritmus futásának másik eredménye egy olyan anyagmodell, melyet a Hypermesh szoftver fel tud használni bemenő információként a végelelemes szimulációk elvégzéséhez.

A 150 °C-os esethez is elkészítettük az anyagmodellt. A 0°-os orientációjú próbatesteken a kevés rendelkezésre álló próbatest miatt csak szobahőmérsékleten tudtunk szakítóvizsgálatokat végezni, így a modellezés során a hőmérséklet hatását csak a 150 °C-on mért 90°-os orientációjú próbatesteken tudtuk felhasználni. A hőmérséklet hatását így csak a mátrixanyag mechanikai tulajdonságai reflektálják.

A szobahőmérsékletű esethez hasonlóan a magasabb hőmérsékletű modell létrehozásához is az inverz karakterizációs módszert alkalmaztuk. Célértékként csak egy értéket tudtunk megadni, mely a 150 °C-on mért 90°-os orientációjú próbatest rugalmassági modulusa volt. Az érték a 6. táblázatban látható.

6. táblázat: Az optimalizáló algoritmus célértékei a 150 °C-os esetre

Rugalmassági modulus keresztírányban ($E_2=E_3$)	518,6 MPa
--	-----------

Kiinduló értéként pedig a korábban kiszámított szobahőmérsékletű anyagmodell számított értékeit állítottuk be, melyek az 5. táblázatban láthatóak.

Az optimalizáló algoritmus ebben az esetben lényegesen kevesebb iterációt követően kb. 3 óra után konvergált. Az eredményekben a szálerősítés értékei nem változtak meg az 5. táblázatban láthatóakhoz képest. A 150 °C-os esethez számított mátrixanyag értékei a 7. táblázatban láthatóak.

7. táblázat: Az optimalizáló algoritmus által meghatározott 150 °C-os mátrix értékei

Mátrix, 150 °C (PPS)	
Rugalmassági modulus (E)	114,5 MPa
Poisson-tényező (ν)	0,05
Homogenizált anyagi paraméterek, 150 °C	
Főirányú rugalmassági modulus (E_1)	65746 MPa
Keresztírányú rugalmassági modulus (E_2)	518,6 MPa
Főirányú Poisson-tényező (ν_{12})	0,26
Keresztmetszeti Poisson-tényező (ν_{23})	0,07
Nyírási rugalmassági modulus (G_{12})	285,7 MPa

5. A szakítóvizsgálat végelelemes modellezése és összehasonlítás

A végelelemes modellek elkészítésekor a cél a laboratóriumi körülmények lehető legpontosabb modellezése volt. Mivel a szakítóvizsgálat geometriája, a mechanikai modell kinematikai és dinamikai peremfeltételei szimmetrikusak, így egyszerűsítettük a végelelemes modellt egy 150 x 25 mm-es síklappá, kétdimenziós kiterjedésű héjelemek segítségével. A próbatestek befogó alatt elhelyezkedő területeit nem modelleztük.

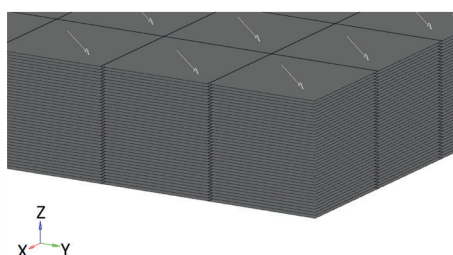
A végelelemes modell peremfeltételeit is a szakítóvizsgálatnak megfelelően adtuk meg. A próbatest egyik oldalán, a rövidebb él mentén lekötöttük az X és Z irányú elmozdulás szabadságfokokat, valamint ezen él egyik végpontjában az Y elmozdulás szabadságfokot is. A próbatest másik oldalán pedig megadtuk a terhelést képző X=1 mm-es előírt elmozdulást. A végelelemes modell peremfeltételei a 6. ábrán láthatóak.

**6. ábra:** A végelelemes modell peremfeltételei

A peremfeltételek megadása után a modell hálózásra került, a korábban geometriai elemekre megadott peremfeltételeket a szoftver a számítás során fordítja le csomóponti megadásra. Az anyagmodell működéséből adódóan a hálózás során meg kellett adnunk a szálirányt, mely esetünkben 45° volt. Az orientáció megadása mellett a szoftver működéséből adódóan rétegekre kellett osztanunk az 1 mm-es vastagságot. A rétegekre osztást, illetve a szálirány megadását, azaz a laminátumok kezelését a Hypermesh szoftverben a PCOMPP elemi tulajdonság teszi lehetővé. A megfelelő háló létrehozásához konvergencia vizsgálatot végeztünk. Az így kapott háló tulajdonságai a 8. táblázatban láthatóak, a hálót pedig a 7. ábra szemlélteti.

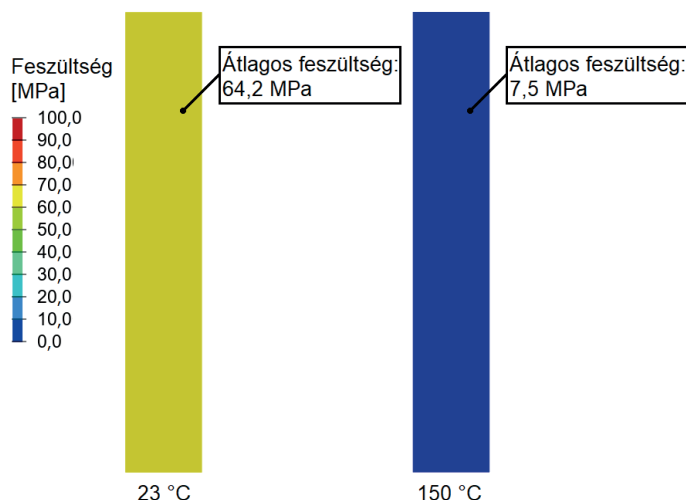
8. táblázat: Az optimalizáló algoritmus célértékei szobahőmérsékleten

Elem típusa	Héjelem
Elem alakja	Négyszög
Elem fokszáma	Lineáris
Elem csomópontjainak száma	4
Elem mérete	1 mm
Elem vastagsága	0,025 mm (40 réteg)
Anyagmodell	MAT8 (Multiscale modell)
Elem tulajdonsága	PCOMPP



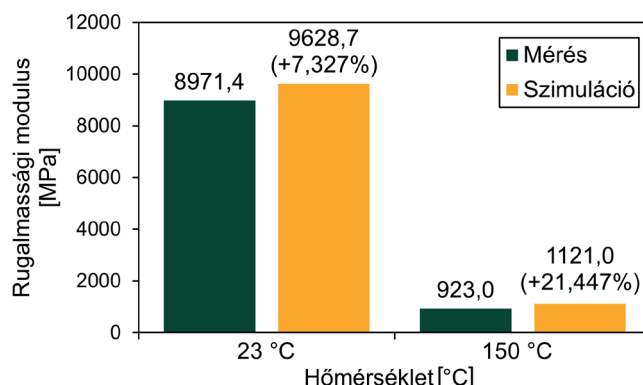
7. ábra: A 45°-os orientációjú száliránnyal diszkrétizált végeleemes modell

A szimulációk elvégzéséhez az Optistruct lineáris megoldót alkalmaztuk. Mindkét hőmérsékletű anyagmodellel elvégeztük a szimulációt. A szimulációk feszültségképei a 8. ábrán láthatóak.



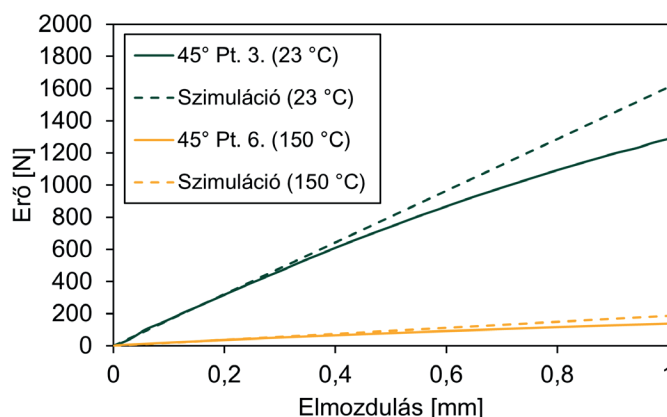
8. ábra: A végeleemes szimulációk feszültségképei az 1 mm-es előírt elmozdulás hatására diszkrétizált végeleemes modell

Kiértékeljük az átlagos fajlagos nyúlás és feszültségértékeket. A kapott értékekből meghatároztuk a modellek rugalmassági modulusát, melyeket össze tudunk vetni a mért 45°-os orientációjú próbatestek rugalmassági modulusával. Az összehasonlítás a 9. ábrán látható. A szimulációk által szolgáltatott eredmények mellett zárójelben a relatív hiba értékét is szemléltettük.



9. ábra: A mérések és szimulációk által szolgáltatott 45°-os orientációjú rugalmassági modulus értékek összehasonlítása

A szimulációk eredményeit összevetettük a laboratóriumi vizsgálatok során kapott erő-elmozdulás diagramokkal is, mely a 2 mm-es elmozdulás értékig a 10. ábrán látható.



10. ábra: A 45°-os orientációjú próbatestek és a szimulációk erő-elmozdulás diagramja

6. Összefoglalás

Ezen munka egy egyirányú szálerősítésű PPS-karbonszál kompozit anyag multiscale anyagmodellel történő modellezését mutatta be. A modellezési feladat elvégzéséhez, illetve a kapott eredmények ellenőrzéséhez laboratóriumi vizsgálatokat végeztünk. A modellek létrehozásához 0° és 90°-os orientációjú szakítóvizsgálatok, illetve keresztmetszeten végzett mikroszkópos vizsgálat eredményeit használtuk fel.

A laboratóriumi vizsgálatok alapján létrehoztunk egy multiscale anyagmodell szobahőmérsékleten, illetve 150 °C-os hőmérsékleten. A végeleemes modelleket a 45°-os orientációjú szakítóvizsgálatoknak megfelelően építettük fel, mivel ezen próbatesteken mért értékeket

használtuk fel a modellek ellenőrzéséhez.

Az összehasonlításához a modell létrehozásához nem alkalmazott 45°-os orientációjú próbatetek eredményeit használtuk fel. Megállapítható volt, hogy a szobahőmérsékletű modell kb. 7,5%-os relatív hibával tudta lekövetni az alapanyag terhelésre adott válaszát. A modell létrehozásához csak két irányú szakítóvizsgálatok és mikroszkópos analízis eredményeit használtuk fel. A szoftver tehát 7,5%-os relatív hibával közelítette meg az alapanyag viselkedését szobahőmérsékleten, hiányos bemenő adatok mellett. A 150 °C-os modell esetében csak a 90°-os orientációjú próbatetek értékeinek célként történő felhasználásával egy újabb optimalizációt végeztünk a szobahőmérsékletű modellen. A magasabb hőmérsékletű esetben nem végeztünk szakítóvizsgálatot. Az így kapott modell a 150 °C alatt mért 45°-os orientációjú próbatetek értékeit kb. 21,5%-os hibával tudta megközelíteni. A hőmérséklet hatására megemelkedett hibaértéket a magas hőmérsékleten végzett 0°-os orientációjú szakítóvizsgálat hiánya okozta. Ezen eredmények hiányában az optimalizációt csak a szobahőmérsékletű modell és a magas hőmérsékletű 90°-os orientációjú próbatetek eredményei alapján futtattuk.

A modellek által mutatott hibaértékek tehát további laboratóriumi vizsgálatok elvégzésével tovább csökkenthetők. További lehetőség a modellek javítására a mátrix nemlinearitásának figyelembevétele és modellezése, ehhez azonban számos további vizsgálatra van szükség. A bemutatott modell tehát lineárisan közelíti az anyag viselkedését.

Az anyagmodellek a teljes alapanyag modellezése mellett javaslatot adtak a felépítő elemek anyagi tulajdonságaira is.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást az OMAA 11öu5 – Entwicklung von Materialmodellen für 3D-gedruckte elastomere und kurzfaserverstärkte Verbundwerkstoffe (Debreceni Egyetem – Johannes Kepler Universität) című pályázat támogatta.

Irodalomjegyzék

- [1] Aboudi J., Arnold S. M., Bednarczyk B. A.: *Micromechanics of Composite Materials*. Elsevier, 2013, <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05224-9>
- [2] Fish J.: *Practical Multiscaling*. Wiley, 2013, ISBN: 978-1-118-41068-4
- [3] Wriggers P., Hain M.: *Micro-Meso-Macro Modelling of Composite Materials*. Computational Methods in Applied Sciences, 2007, pp. 105-122. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6577-4_7
- [4] Oddy C., Ekh M., Fagerström M.: *Macroscale modelling of 3D-woven composites: Elasto-plasticity and progressive damage*. International Journal of Solids and Structures, 250, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2022.111696>
- [5] Oddy C., Ekh M., Ekermann T., Hallström S., Fagerström M.: *A framework for macroscale modelling of inelastic deformations in 3D-woven composites*. Mechanics of Materials, 160, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.103856>
- [6] Zhuang W., Chen S., Yang X., Liu Y.: *Meso/macroscale study on the shear failure of CFRP laminates considering fibre rotation*. Thin-Walled Structures, 181, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110105>
- [7] Liu C., Xie J., Sun Y., Chen L.: *Micro-scale modeling of textile composites based on the virtual fiber embedded models*. Composite Structures, 230, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111552>
- [8] Chang C., Zhang Y., Wang H.: *Micromechanical modeling of unidirectional composites with random fiber and interphase thickness distributions*. Archive of Applied Mechanics, 89, 2019; pp. 2563-2575. <https://doi.org/10.1007/s00419-019-01595-0>
- [9] Yin H., Li Q., Iannucci L.: *Meso-scale Finite Element (FE) modelling of biaxial carbon fibre non-crimp-fabric (NCF) based composites under uniaxial tension and in-plane shear*. Composite Structures, 290, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115538>
- [10] Naouar N., Vasiukov D., Park C. H., Lomov S. V., Boisse P.: *Meso-FE modelling of textile composites and X-ray tomography*. Journal of Materials Science, 55, 2020, pp. 16969-16989. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05225-x>
- [11] Ma D., González-Jiménez Á., Giglio M., dos Santos Cougo C. M., Amico S. C., Manes A.: *Multiscale modelling approach for simulating low velocity impact tests of aramid-epoxy composite with nanofillers*. European Journal of Mechanics - A/Solids, 90, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2021.104286>
- [12] Marszałek J., Stadnicki J., Danielczyk P.: *Finite element model of laminate construction element with multi-phase microstructure*. Science and Engineering of Composite Materials, 27, 2020, pp. 405-14. <https://doi.org/10.1515/secm-2020-0044>
- [13] ISO 527-5:2021 - Plastics — Determination of tensile properties — Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites
- [14] INSTRON. Environmental Chambers 3119-600 https://www.instron.com/-/media/literature-library/products/2019/05/3119-600-series-environmental-chambers-brochure.pdf?sc_lang=en-US&ch=112 (2024.05.15.)