

Egyirányú szálerősítésű kompozit alapanyag multiscale modellezése

Multiscale modelling of a unidirectional composite material

FILE Máté¹, BALOGH Gábor¹, HURI Dávid¹, MAJOR Zoltán², MANKOVITS Tamás¹

¹ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék, 4028 Debrecen, Ótemető utca 2-4,
<https://mecheng.unideb.hu/>

² Johannes Kepler University Linz, Institute of Polymer Product Engineering, 4040 Linz, Altenberger Straße 69,
<https://www.jku.at/institute-of-polymer-product-engineering/>

Abstract

Currently three different methods are known for the finite element modelling of composite materials. The first method involves the complete modelling of the microstructure. The second neglects the microstructure and considers the composite structure as a single material, this method is called macro modelling. The third method is the meso, or multiscale modelling. In this case, the microstructure is neglected on the finite element model, but it is applied to every element in the form of a unit cell. In this work, the multiscale method is used for the modelling of a unidirectional composite material, using the Altair Multiscale Designer software. The laboratory tensile tests and the microscopic analysis of the microstructure, which are required for the modelling, are introduced. To test the accuracy of the model, the results of a three-point bend test were used. The measurement was done in laboratory conditions, based on which a simplified finite element model was created. The calculated and measured results were compared, based on which we were able to determine the accuracy of the created model.

Keywords: unidirectional composite, finite element analysis, material model fitting

Kivonat

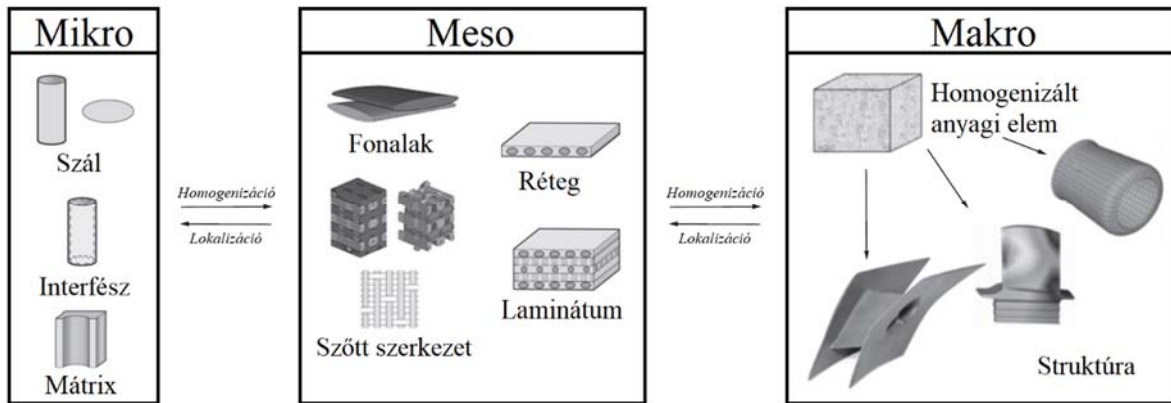
A kompozit alapanyagok végeelemes vizsgálatára jelenleg három módszer ismert. Az egyik a mikrostruktúra teljes modellezése, a másik annak teljes elhanyagolása és a szerkezet egy anyagként történő kezelése, melyet makro modellezésnek nevezünk. A harmadik módszer pedig a meso, vagy multiscale modellezés, mely esetén a mikrostruktúra a végeelem modellen elhanyagolásra kerül, csak egy egységcella formájában hívjuk meg elemi szinten. Ezen munkában a multiscale módszert mutatjuk be egy egyirányú szálerősítéssel rendelkező kompozit alapanyag esetében, az Altair Multiscale Designer szoftver felhasználásával. Ismertetjük a modell létrehozásához szükséges laboratóriumi szakítóvizsgálatokat és a keresztmetszet mikroszkópos analizisét. A modell pontosságának ellenőrzéséhez egy hárompontos hajlítóvizsgálat eredményeit használtuk fel. A vizsgálatot elvégeztük laboratóriumi környezetben, majd ennek megfelelően egy egyszerűsített végeelemes modell is készült az összehasonlításhoz. A számított és mért eredmények összevetésével megállapítottuk az így létrehozott modell pontosságát.

Kulcsszavak: egyirányú szálerősítésű kompozit, végeelemes szimuláció, anyagmodell illesztés

1. Bevezetés

A mérnöki gyakorlatban jelenleg három módszert különböztethetünk meg a kompozit szerkezetek modellezésére [1–3]. Az első a makro modellezés, amely esetén a teljes kompozit szerkezetet egy anyagnak tekintjük és egy ortotrop anyagmodellt alkalmazva modellezzük [3–6]. 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. A kompozit szerkezet felépítését pedig egy egységcellává egyszerűsítjük, mely megadja az építőelemek egymáshoz viszonyított arányát és geometriai elrendezését. Az egységcella mechanikai tulajdonságai kiszámíthatók a geometria és a felépítő anyagok paramétereinek ismeretében. A szimuláció során a modell hasonlóan épül fel, mint a makro szimuláció esetében, de az egységcellán kiszámított mechanikai tulajdonságok kerülnek alkalmazásra elemi szinten. Így egy úgynevezett Multiscale modell jön létre [3,6–10].

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 [3,11,12]. A 1. ábra a három modellezési lehetőséget szemlélteti.



1. ábra. A kompozitok modellezési lehetőségei [1]

2. Anyag és módszer

2.1. A vizsgálat anyaga

A vizsgált alapanyag szálerősítést egyirányú üvegszál, míg a mátrixanyagát PMMA (Polimetilmetakrilát) képezte. Az anyagot a francia Arkema cég Elium néven forgalmazza. A különböző vizsgálatok elvégzéséhez a próbatesteket marással munkáltuk ki a kapott lemezekből.

2.2. Anyagparaméterek meghatározása

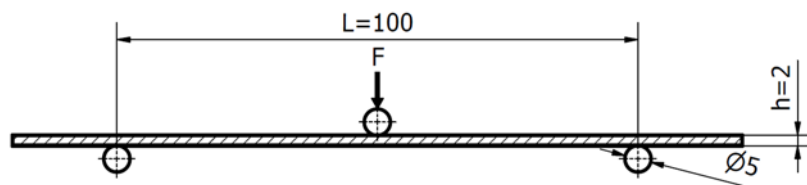
Az anyagparaméterek meghatározásához szakítóvizsgálatot végeztünk el két különböző orientációban: szálnak megfelelően, illetve a szálakra merőlegesen. A vizsgálat az ISO 527-5 szabványnak megfelelően zajlott, orientációként három-három próbatesttel [13]. Az így kapott eredményekből meghatározhatóak voltak a modellezéshez szükséges anyagparaméterek. A kimunkált próbatestek a 2. ábrán láthatóak.



2. ábra. A széliránynak megfelelő (0°) és arra merőleges (90°) szakítópróbatestek

2.3. Hárompontos hajlítóvizsgálat

A modell ellenőrzéséhez egy hárompontos hajlítóvizsgálatot végeztünk el. A vizsgálat elvi elrendezése a 3. ábrán látható, a próbatest szélessége 10 mm volt. Az összehasonlításhoz a laboratóriumi vizsgálat, illetve a végelem modell által 300 N terhelés esetén szolgáltatott lehajlás értéket használtuk fel.



3. ábra. A hárompontos hajlító vizsgálat elvi ábrája

2.3. Mikroszkópos vizsgálat

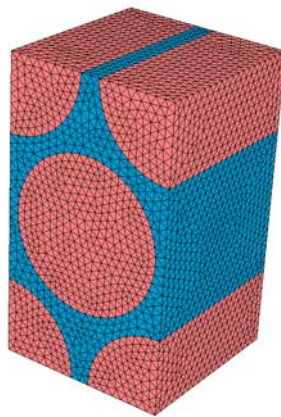
A modellezéshez az anyag mechanikai tulajdonságain kívül szükség volt a szerkezet kitöltési tényezőjének meghatározására, melyhez a keresztmetszetről 5 helyen mikroszkópos képeket készítettünk. A képeken elválasztottuk egymástól a mátrixanyagot, illetve a szálakat, majd a szálakra köröket illesztettünk. A körök által lefedett terület, illetve a kép teljes területének arányából kiszámítható volt a kitöltési tényező.

1. táblázat A mikroszkópos képek adatai

Nagyítás	336x
Felbontás [pixel]	1600x1200
Méretarány [$\mu\text{m}/\text{pixel}$]	0,6632
Kép területe [μm^2]	1061x796
Képek száma [db]	5

2.5. Az anyag multiscale modellezése

A kompozit alapanyag modellezéséhez az Altair Multiscale Designer szoftvert használtuk fel. A szoftver által létrehozott modell az anyag szerkezetét egy egységcellával helyettesíti. Ezen cella kiválasztása, illetve egyetlen bemenő paraméterének, a kitöltési tényezőnek a megadásával végeztük a modellezést. A mikroszkópos vizsgálat alapján a szerkezetet az úgynevezett „Honeycomb” egységcellával egyszerűsítettük, mely a 4. ábrán látható.



4. ábra. A „Honeycomb” egységcella

Az egységcella meghatározása után a szakítóvizsgálatok során a 0 és 90 fokos próbatesteken mért rugalmassági modulus értékeket, valamint a 0 fokos próbatesteken Poisson-tényező értékét adtuk meg melyek alapján a szoftver egy megbízhatósági tartományon alapuló (trust region) optimalizáló algoritmus segítségével visszaszámolta a mátrix, illetve szálerősítés anyagparamétereit, valamint létrehozta a végelem szoftverben is használható anyagmodellt. Az optimalizáció futásának adatai a 2. táblázatban láthatóak.

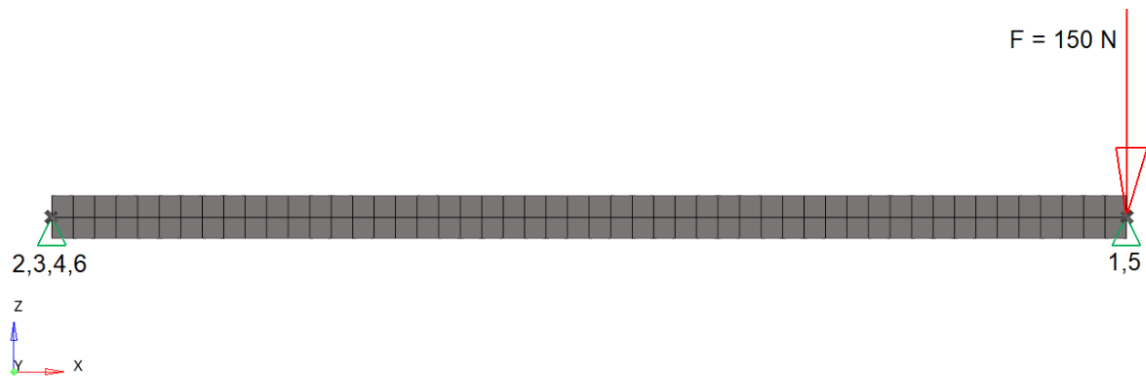
2. táblázat Az optimalizáció futásának adatai

Algoritmus típusa	Trust region
Maximális iterációk száma [db]	100
Futott iterációk száma [db]	29
Futásidő [óra]	13

2.6. Végelem modell

A multiscale anyagmodellt a hárompontos hajlítóvizsgálaton keresztül ellenőriztük. Ehhez egy egyszerűsített végelelemes modell készült a laboratóriumi vizsgálatnak megfelelően. A próbatest 5 mm-es héj elemekkel került hálózásra. Emellett a próbatestet félmodellként vizsgáltuk a geometria és a peremfeltételek szimmetriatulajdonságai miatt. A kényszerek a szimmetriának, valamint a laboratóriumi vizsgálat

körülményeinek megfelelően kerültek megadásra, azaz az erőhatás vonalában rögzítésre került az X irányú elmozdulás, illetve az elfordulás az Y tengely mentén. A megtámasztás helyén pedig a teljes él mentén lekötésre került a Z irányú elmozdulás, valamint a teljes meghatározás érdekében az él mentén egy pontban a maradék három szabadságfok is. A végeelemes modell a 5. ábrán látható.



5. ábra. A hárompontos hajlítóvizsgálat végeelemes modellje

A szimulációt a geometriai nemlinearitásból adódóan nemlineáris megoldóval több lépésben futtattuk. Az összehasonlításhoz az elmozdulás értékeket használtuk fel, mivel ezen értékek hamar konvergálnak, nem volt szükség hálókongvergencia vizsgálat elvégzésére.

3. Eredmények

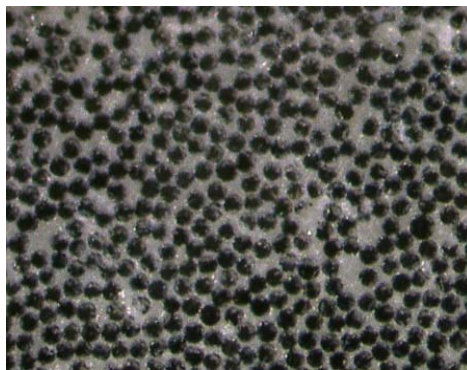
3.1. A modellezéshez szükséges vizsgálatok eredményei

A szakítóvizsgálatok medián eredményei minden orientációban a 3. táblázatban láthatóak.

3. táblázat A lineárisan rugalmas anyagmodell létrehozásához kiértékelt anyagparaméterek

Orientáció	0°	90°
Rugalmassági modulus [MPa]	44873	8127
Poisson-tényező [-]	0,1566	Nem mérhető

A mikroszkópos vizsgálat egy képe az 5. ábrán, az eredményei pedig a 4. táblázatban láthatóak.



5. ábra. A keresztmetszetről készült mikroszkópos kép

4. táblázat A mikroszkópos vizsgálat eredményei

Szálak átlagos száma [db]	1507
Átlagos szálátmérő [μm]	22,679
Kitöltési tényező [%]	71,632

3.2. Összehasonlító vizsgálat eredményei

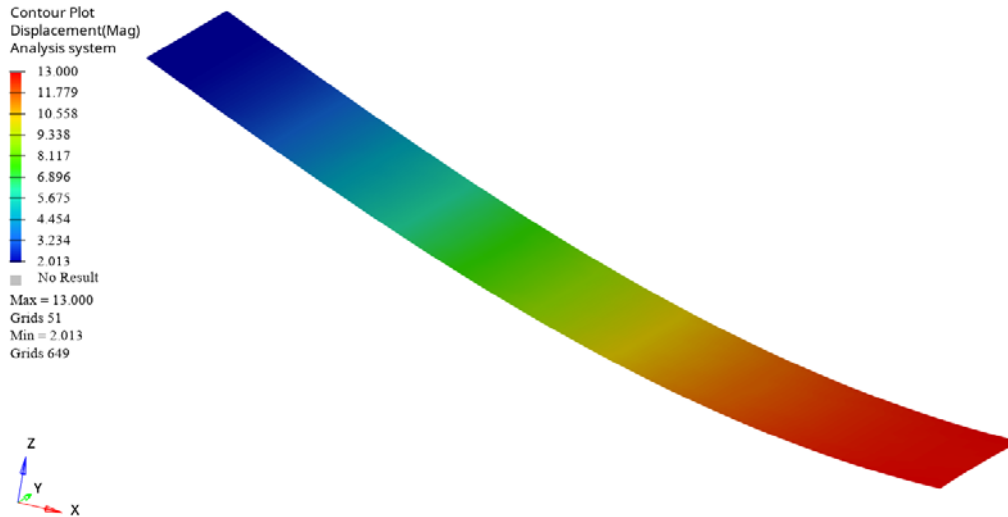
A laboratóriumi hajlítóvizsgálat során a mért medián lehajlás érték 300 N terhelés esetén 12,000 mm-nek adódott, 0,146 mm szórással.

A Multiscale Designer az optimalizáció során kiszámította a szálerősítés, illetve a mátrix mechanikai tulajdonságait, ezek az 5. táblázatban láthatóak.

5. táblázat A kompozit anyagot felépítő szálerősítés és mátrix mechanikai tulajdonságai

A kompozit építőeleme	Szálerősítés	Mátrix
Rugalmassági modulus [MPa]	60450	1901
Poisson-tényező [-]	0,274	0,197

A végeelem modell elemei hivatkoznak ezekkel az anyagtulajdonságokkal rendelkező egységcellára. A multiscale anyagmodell felhasználásával futtatott végeelemes szimuláció deformált képe az 6. ábrán látható.



6. ábra. A végeelemes modell deformált képe

A kiértékelt maximális lehajlás érték 13,000 mm-nek adódott. A kapott érték összehasonlításra került a laboratóriumi vizsgálat során mért értékkel. A multiscale modell a mért lehajlás értékeket 8,33%-os relatív hibával közelítette meg.

4. Összegzés

Ezen munkában egy egyirányú szálerősítéssel rendelkező kompozit alapanyag multiscale modellezése került bemutatásra, a szükséges laboratóriumi vizsgálatok elvégzésétől a végeelem modellig. A bemutatott eljárás sikeresnek mondható, mivel a létrehozott multiscale végeelemes modell az egyirányú kompozit alapanyag viselkedését 8,33%-os pontossággal tudta szimulálni. A modellezés során a szoftver kiszámította a mért értékek alapján a kompozit szerkezetet felépítő mátrixanyag és szálerősítés mechanikai tulajdonságait, melyek pontosságát a szimuláció eredményei igazolják. Ezen paraméterek kiszámítása a multiscale modellek egyik előnyét képezi, viszont jelentős hátránynak nevezhető meg az optimalizáló algoritmus futásideje, mely jelen esetben 13 órát vett igénybe.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást az OMAA 11öu5 - Entwicklung von Materialmodellen für 3D-gedruckte elastomere und kurzfaseverstärkte Verbundwerkstoffe (DE-JKU) projekt támogatta.

Irodalmi hivatkozások

- [1] Aboudi J, Arnold SM, Bednarcyk BA. Micromechanics of Composite Materials. Elsevier; 2013.
- [2] Fish J. Practical Multiscale Modeling. Wiley; 2013.
- [3] Wriggers P, Hain M. Micro-Meso-Macro Modelling of Composite Materials. In: Computational Methods in Applied Sciences. 2007. p. 105–22.
- [4] Oddy C, Ekh M, Fagerström M. Macroscale modelling of 3D-woven composites: Elasto-plasticity and progressive damage. Int J Solids Struct. 2022;250(April):111696.
- [5] Oddy C, Ekh M, Ekermann T, Hallström S, Fagerström M. A framework for macroscale modelling of inelastic

- deformations in 3D-woven composites. *Mech Mater.* 2021 Sep;160(April):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 Struct.* 2022 Dec;181(5988):110105.
- [7] 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. *Compos Struct.* 2022 Jun 15 [cited 2022 Sep 8];290:115538.
- [8] Naouar N, Vasiukov D, Park CH, Lomov S V., Boisse P. Meso-FE modelling of textile composites and X-ray tomography. *J Mater Sci.* 2020 Dec 14;55(36):16969–89.
- [9] Antin KN, Laukkanen A, Andersson T, Smyl D, Vilaça P. A multiscale modelling approach for estimating the effect of defects in unidirectional carbon fiber reinforced polymer composites. *Materials (Basel).* 2019;12(12).
- [10] Marszałek J, Stadnicki J, Danielczyk P. Finite element model of laminate construction element with multi-phase microstructure. *Sci Eng Compos Mater.* 2020;27(1):405–14.
- [11] Liu C, Xie J, Sun Y, Chen L. Micro-scale modeling of textile composites based on the virtual fiber embedded models. *Compos Struct.* 2019;230(October):111552.
- [12] Chang C, Zhang Y, Wang H. Micromechanical modeling of unidirectional composites with random fiber and interphase thickness distributions. *Arch Appl Mech.* 2019;89(12):2563–75.
- [13] ISO - ISO 527-5:2009 - Plastics — Determination of tensile properties — Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites [Internet]. [cited 2023 Feb 14].