

POLIMER SZENDVICSSZERKEZETEK MEZOMODELLEZÉSE MESO MODELLING OF POLYMER SANDWICH STRUCTURES

File Máté*, Kállai Imre**, Dr. Huri Dávid***, Dr. Mankovits Tamás****

ABSZTRAKT

A cikkben egy polimer szendvicsszerkezet hajlítóvizsgálatának végelemes modellezését mutatjuk be direkt mezoléptékű és homogenizált makroléptékű modell felhasználásával. Kutatásunk fő célja két modellezési módszer megbízhatóságának és hatékonyságának vizsgálata. Az összehasonlítás során a tömegértékekben nem tapasztaltunk eltérést, amely bizonyítja a geometria helyességét. A reakcióerő értékek minimális eltérést mutattak, amely elfogadható, mivel homogenizált makromodell alkalmazásával a szimulációs időt 78%-kal le tudtuk csökkenteni. Ez a módszer szintén lehetőséget nyújt több különböző magszerkezet vizsgálatára, amely egy jövőbeli kutatási lehetőség.

ABSTRACT

In this work, the finite element modelling of a polymer sandwich structure was performed under a three-point bend test. The modelling was done using direct meso scale and homogenized macro scale modelling approaches. The main goal of our research was to compare the reliability and efficiency of the two modelling approaches. During the comparison, no error was found in the weight values, proving that the geometries were correct. The reaction force values showed minimal deviation, which is acceptable, since the run time of the simulation was reduced by 78% through the use of the homogenized macro model. This approach also enables the simulation of multiple different core structures, which is a future research possibility.

1. BEVEZETÉS

A könnyűszerkezetes tervezésben egyre nagyobb igény mutatkozik olyan teherhordó szerkezetek iránt, amelyek nagy merevséget és szilárdságot kis tömeggel és hatékony anyagfelhasználással ötvöznék. A szendvicsszerkezetek e követelményeknek két viszonylag merev fedőréteg és az azokat elválasztó könnyű magszerkezet alkalmazásával felelnek meg az 1. ábrán látható rétegrendben. Az additív gyártás összetett cellás geometriák előállítását teszi lehetővé, így a mag topológiája és geometriai paraméterei az adott

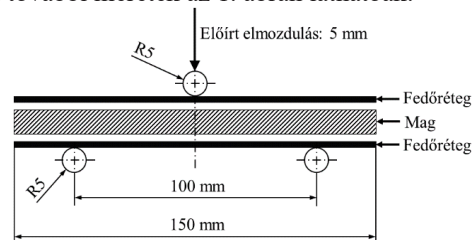
mechanikai követelményekhez igazíthatók. A megnövekedett geometriai tervezési szabadság ugyanakkor jelentősen megnöveli a lehetséges konstrukciók számát, ezért azok hatékony vizsgálata és optimalizálása megfelelő numerikus modellezési eljárások alkalmazását igényli.

A cellás szerkezetű mag geometriájának reprezentációjára alapvetően makro- és mezoléptékű numerikus modellek alkalmazhatók. A makroléptékű modellekben a cellás szerkezetet egy homogenizált ortotrop ekvivalens folytonos közeggel helyettesítik. Ez a megközelítés alkalmas a szerkezet globális mechanikai válaszáinak meghatározására, miközben alacsonyabb számítási költsége miatt nagyobb szerkezeti modellek hatékony elemzését is lehetővé teszi [1]. Ezzel szemben a direkt mezoléptékű modellekben a mag cellás geometriáját explicit módon reprezentálják, így képesek leírni a helyi deformációs mechanizmusokat is. Nagyobb számítási költség mellett azonban lehetővé teszik a lokális deformációs mechanizmusok részletesebb vizsgálatát [2], [3].

A jelen kutatás célja additív gyártással előállítható, termoplasztikus cellás magszerkezetű szendvicspanelek direkt mezo- és homogenizált makroléptékű modellezési megközelítésének összehasonlítása hárompontos hajlítóvizsgálat numerikus modellezésével, különös tekintettel a globális mechanikai válasz reprodukálhatóságára és a számítási hatékonyságra.

2. MODELLEZÉSI FELADAT BEMUTATÁSA

A hárompontos hajlítóvizsgálat numerikus modelljét az ISO 14125 követelményeinek megfelelően építettük fel, azonban a szendvicsszerkezet eltér a szabványos méretektől. A próbatest szélessége esetünkben 25 mm volt, a további méretek az 1. ábrán láthatóak.



1. ábra A modellezett szendvicsszerkezet hárompontos hajlítóvizsgálatának felépítése

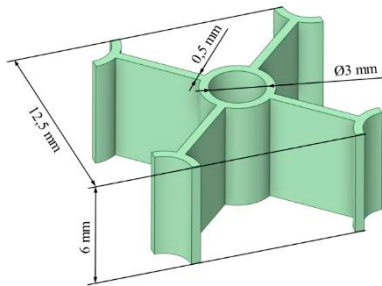
* PhD hallgató, Debreceni Egyetem, Pekár Imre Gépészeti Tudományok Doktori Iskola

** mérnökségvezető, Diehl Aviation Hungary Kft.

*** egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék

**** egyetemi docens, Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Gépészmérnöki Tanszék

A fedőrétegek vastagsága 0,75 mm, a magszerkezet egy egységcellájának felépítése pedig a 2. ábrán látható.



2. ábra A magszerkezetet felépítő egységcella méretei

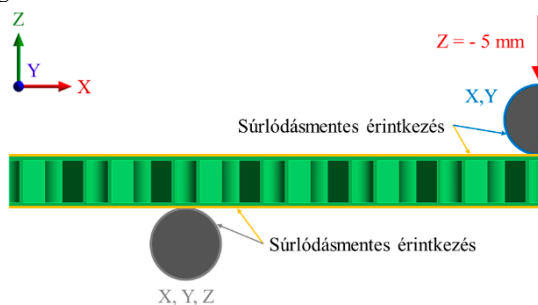
3. DIREKT MEZOLÉPTÉKŰ MODELLEZÉS

A végeleemes modellt az Ansys 2025 R2 szoftver Mechanical moduljában építettük fel. Az alapanyag mechanikai viselkedésének leírására izotróp, lineárisan rugalmas anyagmodellt alkalmaztunk (Ansys Granta, Plastic PA6), melynek anyagparaméterei az 1. táblázatban láthatóak.

1. táblázat Az izotróp, lineárisan rugalmas anyagmodell paraméterei

Rugalmassági modulus [MPa]	1111
Poisson-tényező [-]	0,35
Nyírási rugalmassági modulus [MPa]	411
Sűrűség [kg/m ³]	1140

A feladat jellegéből adódóan továbbá a szimulációs idő minimalizálása miatt a próbatestet negyedmodellé egyszerűsítettük, a kényszereket, illetve a terhelést is ennek megfelelően adtuk meg. A hajlítöhengereket ideálisan merev elemekkel modelleztük. Az 5 mm-es előírt elmozdulást a felső, mozgó hajlítöhengeren adtuk meg, míg a terheléstől eltérő irányokban az elmozdulás szabadságfokokat lekötöttük. Az alsó hengeren az összes szabadságfokot lekötésre került. A szimmetriasíkokkal egybeeső csomópontok síkra merőleges szabadságfokait gátoltuk. A hajlítöhengerek és a próbatest közé súrlódásmentes kapcsolatot írtunk elő, „Adjust to touch” kezdeti érintkezési beállítással és „Augmented Lagrange” számítási formulával. A felépített végeleemes modell a 3. ábrán látható.



3. ábra A felépített direkt mezomodell az érintkezésekkel, kényszerekkel és a terheléssel

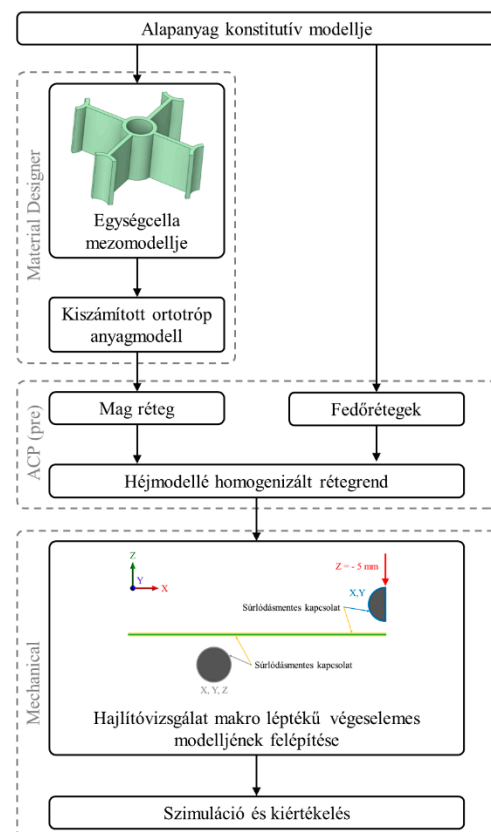
A végeleemes hálózást a 2. táblázatban bemutatott beállításokkal végeztük. A vizsgált globális erő-elmozdulás válasz alacsony hálózérkenysége miatt külön hálókongruencia-vizsgálatot nem végeztünk. Az elemméretet úgy választottuk meg, hogy a legkisebb geometriai méret mentén is legalább két elem keletkezzen.

2. táblázat A mezomodell diszkretizációs jellemzői

Elem típusa, alakja	Térfogati, tetraéder
Elem csomópontjainak száma	10 db
Elem mérete (szendvicsszerkezet)	0,2 mm
Elem mérete (hajlító henger)	1 mm

4. HOMOGENIZÁLT MAKROLÉPTÉKŰ MODELLEZÉSI

A homogenizált makromodell a szendvicsszerkezet felépítését nem veszi explicit módon figyelembe, hanem annak ekvivalens mechanikai viselkedését egy tömör kontinuummal írja le. A viselkedés leírásához egy több lépésből álló, egységcellán alapuló homogenizálási eljárást alkalmaztunk, melynek eredményét a makroléptékű végeleemes modell anyagmodellként hívta meg. A teljes homogenizált makromodellel történő eljárás folyamatábrája az 4. ábrán látható.



4. ábra A hajlítóvizsgálat homogenizált makromodellel történő modellezésének folyamatábrája

A homogenizált makromodellezési eljárásához az Ansys 2025 R2 Material Designer és ACP (pre) modulokat használtuk. A geometriát három részre bontottuk, két fedőrétegre és a mag geometriára, amelyet a Material Designer modulban mezoléptékben modelleztünk a 2. ábrán látható geometriának megfelelően. Az egységcella végeselemes szimulációjához a test direkt mezomodellnél alkalmazott anyagmodellt használtuk fel (1. táblázat), valamint a 3. táblázatban található elemekkel hálóztuk.

A Material Designer modul az egységcellán hat különböző terhelési esetet modellez, amelyek eredményeiből meghatározható a mag szerkezeti felépítésének hatását ekvivalens tömör kontinuummal helyettesítő, ortotróp lineárisan rugalmas anyagmodell.

3. táblázat Az egységcella diszkretizációs jellemzői

Elem típusa, alakja	Térfogati, tetraéder
Elem csomópontjainak száma	10 db
Elem mérete (egységcella)	0,2 mm

Az elemméret kiválasztásához több különböző elemméret segítségével is lefuttattuk a szimulációt, majd azt a legkisebb elemméretet választottuk ki, amely a lehető legkisebb elemméret értékéhez képest kevesebb, mint 1% eltérést mutatott. A hálókongvergenzia vizsgálat eredményeit a 4. táblázat mutatja. A 0,5 mm-től nagyobb elemméret alkalmazása a geometria kis falvastagsága miatt nem volt lehetséges, a 0,1 mm-től kisebb elemméret esetében pedig a rendelkezésre álló 32 GB memória nem volt elegendő.

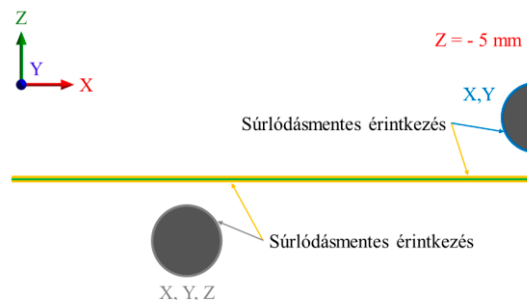
4. táblázat Az egységcella hálókongvergenzia vizsgálata

Elem mérete	X irányú rugalmassági modulus	Eltérés
[mm]	[MPa]	[%]
0,5	1,558	+6,40
0,25	1,485	+1,49
0,2	1,476	+0,88
0,15	1,469	+0,41
0,1	1,463	Referencia

A rétegrendet az ACP (pre) modulban építettük fel. A két 0,75 mm vastagságú fedőréteghez az 1. táblázatban található lineárisan rugalmas anyagmodellt használtuk fel, a 6 mm magas maghoz pedig az egységcellán kiszámított ortotróp anyagmodellét társítottuk. A modul segítségével ezután egyetlen héjmodellé homogenizáltuk a szendvicsszerkezet geometriáját.

A hárompontos hajlítóvizsgálat modellezését a direkt mezomodellel esetéhez hasonlóan az Ansys 2025 R2 Mechanical modulban végeztük el. Ebben az esetben is negyedmodellét alkalmaztunk, a szendvicsszerkezet geometriáját egyetlen felülettel modelleztük, míg a

hajlítóhengereket a korábban bemutatott módon testmodellként. A kényszerek, a terhelés és a kapcsolatok szintén a testmodellen bemutatott módon kerültek megadásra. A szimmetriakényszerek megadásakor ebben az esetben az XZ síkkal párhuzamos szimmetriasík mentén csak a síkra merőleges elmozdulás szabadságfokokat kötöttük le, míg az YZ irányú szimmetriasík esetében az elmozdulás mellett az Y tengely körüli elfordulást is gátoltuk. A súrlódásmentes kapcsolat beállításakor figyelembe vettük a héjelemeken megadott 7,5 mm-es vastagságot és 4 mm-es keresési sugarat adtuk meg. A felépített végeselemes makromodellel az 5. ábrán látható.



5. ábra A felépített makromodellel az érintkezésekkel, kényszerekkel és a terheléssel

A felhasznált háló tulajdonságai pedig az 5. táblázatban láthatóak. A hajlítóhengerek esetében a direkt mezomodellel bemutatott hálót alkalmaztuk. Mivel ebben az esetben is a kiértékelés során csak az erő-elmozdulás összefüggést vizsgáltuk, így a hálókongvergenzia vizsgálat elvégzése nem volt indokolt.

5. táblázat A makromodellel diszkretizációs jellemzői

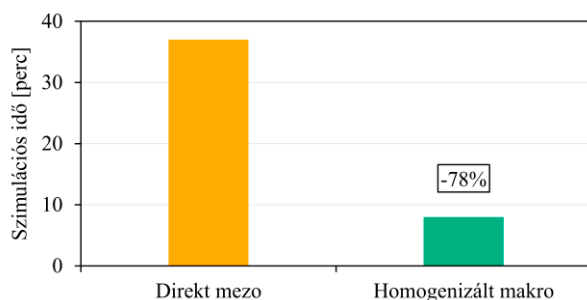
Elem típusa, alakja	Héj, négyszög
Elem csomópontjainak száma	8 db
Elem mérete (héjelem)	1 mm

5. A VÉGESELEMES SZIMULÁCIÓ ÉS AZ EREDMÉNYEK ÖSSZEHOSONLÍTÁSA

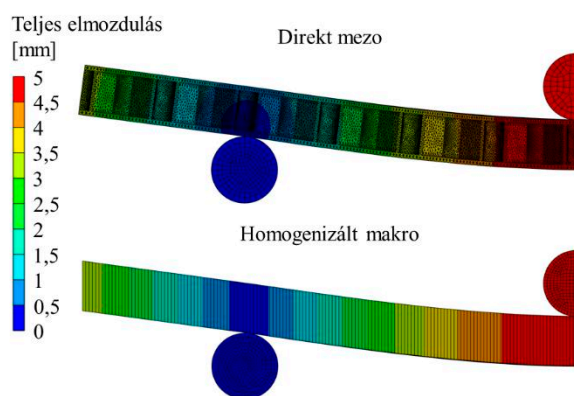
A szimulációt mindkét modell esetében nemlineáris megoldóval, 10 időlépcsőre bontva végeztük. A szimulációt egy Intel I5-11400f processzorral és 32 GB memóriával szerelt számítógépen végeztük. A szimulációk kiértékelésekor a szendvicsszerkezetek tömegére, az 5 mm-es lehajláshoz tartozó reakcióerőre, és a teljes szimulációs időre fókuszáltunk. Az eltérések számításakor a direkt mezomodellel értékeit használtuk referenciaként. Az eredményeket a 6. táblázat összegzi. A futtatási idő különbségét a 6. ábra szemlélteti. A 7. ábrán pedig a két modell deformált képe látható teljes elmozduláskontúrral.

6. táblázat A szimulációk eredményeinek összehasonlítása

Modellezési eljárás	Tömeg [g]	Reakció erő [N]	Futtatási idő [perc]
Direkt mezo	9,81	108,8	37
Homogenizált makro	9,81	108,4	8
Eltérés	0,00%	-0,37%	-78%



6. ábra A különböző modellezési eljárások számítási költsége



7. ábra A szimulációs modellek deformált képei elmozduláskontúrral

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben egy szendvicsszerkezet szimulációjának lehetőségeit mutattuk be direkt mezo és homogenizált makroléptékű modellezési eljárásokkal. A homogenizált makromodell felépítése lényegesen komplikáltabb, azonban a mag egységcellaként történő kezelése lehetővé teszi a geometriai paraméterek változtatását vagy a topológia egyszerű cseréjét.

A két modell összehasonlítása során a tömegre, a reakcióerőre és a szimuláció futtatási idejére fókuszáltunk. A tömegben látható teljes egyezés azt mutatja, hogy a homogenizálás során a geometria nem változott meg. A reakcióerő értékeiben minimális eltérés látható, a homogenizált makromodell által szolgáltatott érték 0,37%-kal kisebb, mint a direkt mezomodell értéke. A hiba mértéke a mérnöki gyakorlatban elfogadható,

főleg amennyiben figyelembe vesszük a 78%-os csökkenést a számítási időben.

Az egységcella alkalmazása lehetőséget nyújt több különböző magstruktúra hatékony modellezésére. Ennek bizonyítása egy jövőbeli kutatási lehetőség.

7. SUMMARY

In this article, the possibilities of simulating a sandwich structure via direct meso and via homogenized macro modelling approaches were showcased. The build-up of the homogenized macro model is significantly more complicated; however, the simplification of the core into a unit cell makes the exchange of the geometry simple.

During the comparison of the two models, we focused on the weight, the reaction force and the simulation runtime. The complete lack of error in the weight values signifies that the geometry did not change during the homogenization. The reaction force values showed minimal error. The values of the homogenized macro model were 0,37% smaller than the direct meso model. This error value is acceptable, especially if the 78% reduction in run time is taken into account.

The usage of the unit cell enables the efficient modelling of multiple different sandwich structures. The proof of which is a future research possibility.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS MINISZTERIUM EKÖP-KDP-2025 KÓDSZÁMÚ EGYETEMI KUTATÓI ÖSZTÖNDÍJ PROGRAM – KOOPERATÍV DOKTORI PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT

9. IRODALOM

- [1] DERELI E., MBENDOU II J., PATEL V., MITTELSTEDT C.: Analytical and numerical analysis of composite sandwich structures with additively manufactured lattice cores, Composites Part C Open Access, Vol. 14, No. June, p. 100484, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2024.100484>
- [2] SEEMANN R., KRAUSE D.: Numerical modelling of Nomex honeycomb sandwich cores at meso-scale level, Composite Structures, Vol. 159, pp. 702–718, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.071>
- [3] ANANDAN S., DHALIWAL G., GANGULY S., CHANDRASHEKHARA K.: Investigation of sandwich composite failure under three-point bending: Simulation and experimental validation, Journal of Sandwich Structures & Materials, Vol. 22, No. 6, pp. 1838–1858, 2020, <https://doi.org/10.1177/1099636218791162>