

ADDITÍV GYÁRTÁSTECHNOLÓGIÁVAL KÉSZÍTETT, FOLYTONOS SZÁLLAL ERŐSÍTETT KOMPOZITOK SZIMULÁCIÓS ELEMZÉSE

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF CONTINUOUS FIBER– REINFORCED COMPOSITES MADE BY ADDITIVE MANUFACTURING

*Szederkényi Bence Boldizsár, doktorandusz, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.*

Dr. Turcsán Tamás, Szimulációs csoportvezető, eCon Engineering Kft.

*Dr. Kovács Norbert Krisztián, egyetemi adjunktus, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, MTA–BME Lendület Könnyűszerkezetes Polimer*

Kompozitok Kutatócsoport

*Dr. Czigány Tibor, egyetemi tanár, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki
Kar, Polimertechnika Tanszék, ELKH-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport*

ABSTRACT

In this study, we examined the applicability of a fiber direction segmentation method in the simulation of a continuous fiber-reinforced additive manufactured polymer composite structure. We designed the fiber reinforcement paths for this topology-optimized component, then checked the behavior of this structure using finite element analysis. We manufactured the reinforced geometry and performed validation tests. Then we compared the results of the simulations and tests, discussed the stiffness characteristics, failure and deformations of the component.

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt években egyre erősödő törekvés figyelhető meg az iparban a nyersanyag és energiafogyasztás visszaszorítására. Ez a cél a mozzgatott tömeg csökkentésével érhető el, amit a tartószerkezeteknél a felhasznált anyagmennyiség határoz meg. Mivel a terhelések a legtöbb esetben adottak, így a nagyszilárdságú könnyűszerkezetes anyagok alkalmazásával érhető el megfelelő eredmény. A könnyűszerkezetes anyagokon belül is a polimer kompozitoknak van a legnagyobb fajlagos szilárdsága, ami szerkezetbe építve a terhelési irányba rendezhető nagyszilárdságú erősítőszálaknak köszönhető. Ezeknek az elemi szálaknak a fajlagos tulajdonságai a fémekkel összehasonlítva többszörös értékeket vehetnek fel [1].

A 20. század végén megjelenő és azóta töretlenül fejlődő additív gyártástechnológiákkal (AM) az eddig nehezen vagy egyáltalán nem gyártható geometriák megvalósíthatóvá váltak, amivel elhárultak az

akadályok a komplex geometriájú alkatrészek gyártása előtt. Az utóbbi években megjelentek olyan tervezési módszerek is, amelyekkel a szerkezeti anyagokban rejlő potenciál jobban kihasználhatóvá vált. Ez az ún. topológia optimalizáció [2-5], illetve ennek a módszernek a továbbfejlesztéséből születő, mesterséges intelligenciát is alkalmazó generatív tervezés [6-8]. Ezekkel a tervezési módszerekkel az alkatrész terhelési állapotát előre definiálva alakíthatunk ki numerikus eljárások segítségével jobban kihasznált szerkezeteket. A módszer többek között a NASA bolygóközi leszállóegységének vázszerkezetében, illetve az Airbus bionikus válaszfalában bizonyította már, hogy a jövő tervezési módszere [9].

Az erőfolyam optimalizáló tervezési eljárásokat a gyakorlatban eddig leginkább a fém-porágyas (SLM) módszerekkel együtt alkalmazták. Azonban az additív gyártástechnológiákhoz szükséges polimerek fejlődése, illetve az ezzel párhuzamosan megjelenő vágott szálas (FFF FRP), illetve a folytonos szállal erősített 3D nyomtatás (FFF CFRP) megnyitotta az utat a terhelésre optimalizált nagyszilárdságú polimer kompozitok előállítására [10, 11].

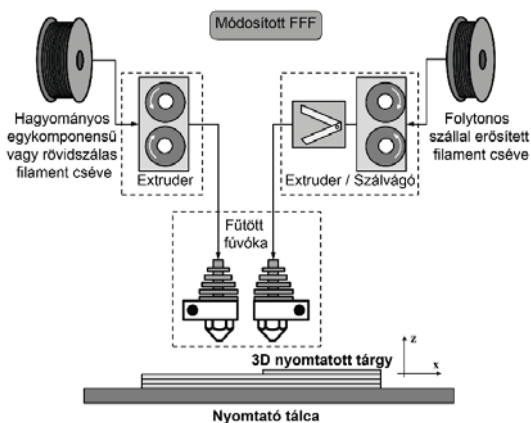
A kompozitoknál eddig alkalmazott hagyományos rétegfektetési eljárásoknál minden egyes réteg azonos felépítésű és a tervezés során a különböző szögben lefektetett rétegeket tekintjük az optimalizáció legkisebb elemi szintjének. Ezzel szemben az additív technológiával előállított kompozitok tulajdonságai az elemi rétegeken belül is eltérhetnek a folytonosan változtatható szálfektetési pályák és a technológiából adódó porózus felépítés miatt. Emiatt a kompozitok mechanikai tulajdonságainak leírására és

optimalizálására eddig alkalmazott rétegszintű módszerek itt csak közelítéssel alkalmazhatók. Ennek következtében az additív eljárással készült kompozitok megbízható méretezése, optimális szálfektetési stratégiájának kialakítása egyelőre nem megoldott [12].

Cikkünkben termoplasztikus mátrixú folytonos szállal erősített 3D nyomtatott kompozitok szimulációval támogatott méretezési problémáival foglalkozunk és kísérletet teszünk ezek pontosítására.

2. FOLYTONOS SZÁLERŐSÍTETT 3D NYOMTATÁS

Az AM eljárások az eddig ismert anyageltávolítási módok helyett anyaghozzáadás útján rétegről-rétegre hozzák létre a kívánt modellt. A folytonos szálerősített, termoplasztikus mátrixú kompozitnyomtatás egy ömledék rétegzésen (FFF) alapuló eljárás, amely hőre lágyuló mátrixszal előre impregnált szálköteget helyez az ömledékrétegbe. Az erősítési folyamat történhet koextrúzióval vagy egy másodlagos extruderfej segítségével (1. ábra). Az általunk használt Markforged Mark II 3D nyomtató az utóbbi, kétfejes megoldással működött.



1. ábra: A szálerősített FFF berendezés felépítése és működése [13]

A nyomtatási folyamat során a nyomtatófej(ek) a modell anyagát – amennyiben szükséges támaszanyagát – a modell keresztmetszetének megfelelően rétegenként (125 μm) helyezi(k) el a modell térben. Egy réteg kinyomtatása után a folytonos szálal egy speciális olló vágja el, majd a fűvóka egy réteggel feljebb mozdul és újabb réteget helyez el az építési térben. Ez a folyamat a modell elkészültéig ismétlődik. Összességében elmondható, hogy a folytonos szállal erősített FFF nyomtatással nagy-

pontosságú, és jó szilárdsági tulajdonságokkal rendelkező alkatrészek hozhatók létre. A technológia fő előnye, hogy az erősítés módjának és irányának meghatározásában nagy tervezési szabadság ad a tervezőnek [10].

3. ERŐSÍTŐSTRUKTÚRA LÉTREHOZÁSA

Ebben a fejezetben az erősítésre kiválasztott alapeometriát és az erősítési stratégia kialakítását mutatjuk be.

3.1. Geometria bemutatása

Az erősítési struktúra tervezésére egy olyan irodalomból vett formát választottunk [14], amelyről tudtuk, hogy topológiai optimalizációval lett létrehozva, ugyanakkor a szálelhelyezés nem volt megfelelően optimalizálva. Mindemellert jól dokumentáltak voltak a peremfeltételei, előállítási és tönkremeneteli körülményei, illetve alapanyagának ismertek voltak a mechanikai tulajdonságai, előállítása pedig azonos gyártástechnológiával és anyagból történt, mint ami nekünk is rendelkezésünkre állt (2. ábra).



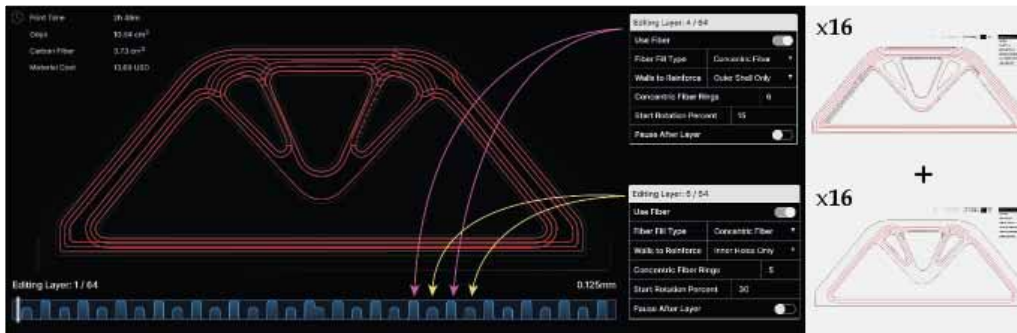
2. ábra: Referenciamodell [14]

3.2. Erősítőstruktúra bemutatása

Az erősítőstruktúra kialakításánál arra törekedtünk, hogy a szerkezet minden nagyobb feszültségnek kitett részére a lehető legtöbb erősítés kerüljön. Ezért a nyomtatás előkészítéséhez szükséges szelitelőszoftverben az a két stratégia lett kiválasztva, amelyek egymást kiegészítve külső és belső falak mentén egyaránt erősítik a szerkezetet. A választott stratégiával a próbatest falaitól kiindulva koncentrikusan lettek elhelyezve az erősítő szálkötegek sorban kívülről hat, belülről pedig öt hurokban (3. ábra).

4. ALKALMAZOTT SZIMULÁCIÓS MÓDSZEREK

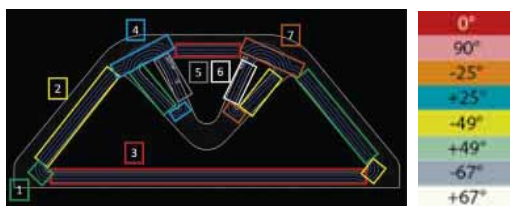
Ebben a fejezetben bemutatjuk az erősített próbatest viselkedésének előrejelzésére alkalmazott szimulációs módszereket és azokat a megfontolásokat, amivel sikerült modellezhetővé tenni a bonyolult erősítőstruktúrát.



3. ábra: A végső erősítés (balra) és az ezt alkotó kétféle erősítőstruktúra (jobbra)

4.1. Szálirány-szegmentáció

A szimulációs modell felépítéséhez a rétegeken belül is folytonosan változó szálirányokat rúdelem-főirányonként eltérő csoportokba soroltuk, amiket ezután az egységen belüli átlagos száliránnyal definiáltunk és a rétegeken belül külön elemi egységekként kezeltünk. A kitüntetett szálirányok így a 0° ; 90° ; $\pm 25^\circ$; $\pm 49^\circ$ és $\pm 67^\circ$ -os értékek lettek. Így összesen 8 tartományra bontottuk az erősítőstruktúrát (4. ábra).

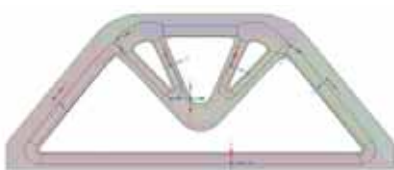


4. ábra: Szálirányszegmentáció

Ezzel a módszerrel a rendszerünk alkalmassá vált a diszkrét szálirányokra alapozó modellel való feldolgozásra. Így már a szimulációs környezetben kezelhetővé váltak a rétegeken belül folytonosan irányváltó erősítő szálkötegek. A szimulációhoz az Ansys 2020R2 végeelem szoftvert használtuk.

4.2. Szimuláció

A szálirányok meghatározására lokális koordinátarendszereket használtunk, amelyeket előre definiáltunk a szálszegmentációnak megfelelően.



5. ábra: Koordináta rendszerrel jellemzett szálirány szegmensek

A koordinátarendszerekkel jellemzett unidirekcionális tartományokhoz rendeltük

hozzá az erősítőszálak ortotrop anyagtulajdonságait, így a szoftver külön tudta kezelni a szegmentált tartományokat egymástól (5. ábra). A szimuláció felépítésében azzal az egyszerűsítéssel éltünk, hogy az alternáló erősítőstruktúrát, amelynek a rétegrendjét a 3. ábra mutatja típus szerint a próbatest két oldalára csoportosítottuk, illetve ezeket a struktúrákat rétegszinten össze is vontuk, ahogy ezt a 6. ábra szemlélteti.



6. ábra: Szegmentált szálirányok és a többsítített erősítőrétegek

A modell felépítése után a hárompontos hajlításnak megfelelő mechanikai kényszerekkel futtattuk a szimulációt. Az elmozdulási kényszert öt lépcsőben, fél milliméterenként adtuk a próbatestre. Az elmozdulások hatására ébredő reakcióerőket vizsgáltuk, amelyek alapján következtetéseket vontunk le. A szimulációt 0,5 mm élhosszú, Solid 186 típusú elemekből álló tetraéder és hexaéder elemeket vegyesen tartalmazó hálóval futtattuk, amelynek minőségét az 1. táblázat mutatja.

1. táblázat: Az szimulációhoz használt háló minősége

| | Min. | Max. | Átlag | Szórás |
|--------------|-------|--------|-------|--------|
| Torzulás | 0,002 | 0,995 | 0,344 | 0,178 |
| Oldalviszony | 1,027 | 23,494 | 2,067 | 0,656 |
| Elem minőség | 0,115 | 0,999 | 0,765 | 0,113 |

A posztprocesszási szakaszban az inverz biztonsági tényezőket vizsgáltuk az alkatrészben, amelyekhez a kompozitoknál széles körben elismert és alkalmazott feszültség

és deformációs energia, Puck, Tsai-Wu és Tsai-Hill tönkremeneteli kritériumokat összekapcsolva használtuk [15].

5. ALKALMAZOTT ANYAGOK ÉS BERENDEZÉSEK

Ebben a fejezetben a próbatetek gyártásához használt alapanyagok, gyártó-, illetve mérő berendezések kerülnek bemutatásra.

5.1. Alapanyag

Mátrixanyag: Onyx (PA6 szén rövidszállal erősítve).

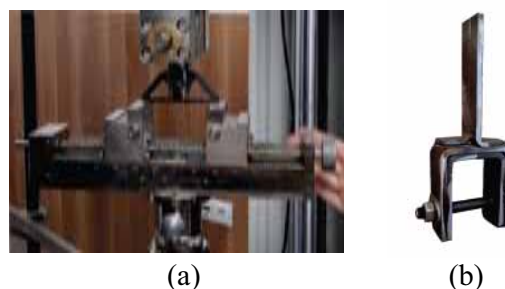
Erősítőanyag: Folytonos szénszál 1K roving (1000 elemi szál alkotja a köteget).

A komponensek anyagtulajdonságait irodalomból vettük [16], ezeket a 2. táblázatban foglaltuk össze.

2. táblázat: A szimulációhoz használt anyagtulajdonságok [16]

| Tulajdonság | Irány | Szál köteg | Mátrix |
|-------------------------------------|-------|------------|--------|
| Szakítószilárdság [MPa] | x | 808,0 | 40 |
| | y | 38,8 | |
| | z | 5,3 | |
| Szakadási nyúlás [%] | x | 1,15 | 25 |
| | y | 1,30 | |
| | z | 0,83 | |
| Rugalmassági modulus [GPa] | x | 20,70 | 2,4 |
| | y | 1,32 | |
| | z | 1,54 | |
| Nyomószilárdság [MPa] | x | 275 | - |
| | y | 72 | |
| | z | 80 | |
| Nyomó tönkremeneteli deformáció [%] | x | 1,14 | - |
| | y | 1,50 | |
| | z | 1,05 | |
| Nyírószilárdság [MPa] | xy | 45,0 | - |
| | xz | 9,5 | |
| | zy | 12,8 | |
| Nyíró rugalmassági modulus [GPa] | xy | 1,86 | - |
| | xz | 0,49 | |
| | zy | 1,06 | |
| Nyíró tönkremeneteli deformáció [%] | xy | 5 | - |
| | xz | 5 | |
| | zy | 5 | |

A 3D-nyomtatást a BME Polimertechnika Tanszék laboratóriumában található Markforged Mark II típusú FFF rendszerű 3D nyomtatójával végeztük. A hajlítóvizsgálatot Zwick Z250 szakítógép segítségével végeztük (7. ábra: (a)), szobahőmérsékleten, 2mm/perc vizsgálati sebességgel. A mérésekhez olyan befogót terveztünk, amely lehetővé tette a nem szabványos próbatest geometria mérését (7. ábra: (b)).



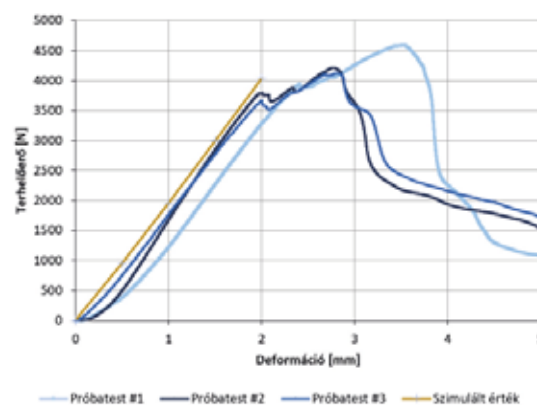
7. ábra: A mérés elrendezése (a), illetve a saját tervezésű és gyártású befogó (b)

6. EREDMÉNYEK

Ebben a fejezetben az általunk elvégzett vizsgálatokat és azok eredményeit mutatjuk be.

6.1. Merevségi vizsgálat

Az elvégzett szimulációk a hálófüggetlenség elérésével 2,4 %-os pontossággal jelezték előre az adott struktúra merevségét. Ennek a szemléltetésére a 8. ábra összehasonlító diagramja szolgál, míg a pontos merevségi értékeket a 3. táblázat tartalmazza.



8. ábra: Szimulált és mért adatok összehasonlítása

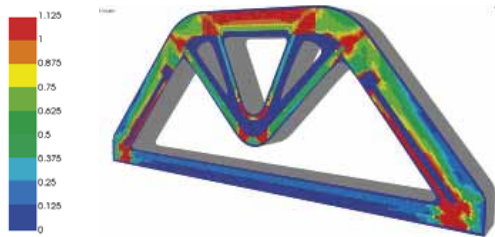
3. táblázat: Mérések összehasonlítása a szimulált eredményekkel

| | Merevség [N/mm] | Eltérés [%] | Mesh elemszám |
|--------------|-----------------|-------------|---------------|
| Mért (átlag) | 2072 ± 4,2 | - | - |
| Szimulált | 2022 | -2,4 | 278593 |

6.2. Tönkremenetel vizsgálata

A szimulációs eredmények piros részei mutatják, hogy hol várható tönkremenetel az alkatrészen belül, az inverz biztonsági tényező értéke ezeken a területeken haladja meg az 1-et. (9. ábra). Ez az előrejelzés a mérések során be is igazolódott. A próbatetek közül kettő az erőbevezetés helyén ment tönkre, ahol átszakadt az erőbevezetés alsó homlokléfelülete (10. ábra (a), piros karika), egy pedig berogyott a jobb

szélső erőfolyam-átvezetési területen (10. ábra (b), piros karika).



9. ábra: Tönkrementeli előrejelzés inverz biztonsági tényezők szemléltetésével (1 fölött tönkrementés)

Az eredmények azt jelzik, hogy a struktúra továbbfejlesztéséhez az adott tönkrementeli helyeken tovább kell erősíteni az alkatrészt.



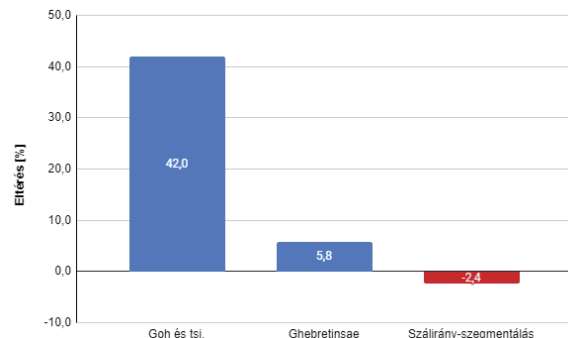
10. ábra: A piros karikák mutatják a próbatestek tönkrementeli helyeit. Átszakadás erőbevezetésnél (a) és berogyás az erőfolyam egyik törési pontjánál (b)

Megállapítható, hogy az általunk elvégzett szálirányszegmentációs szimulációk főleg a vizsgált profil merevségére adtak pontos becslést. Továbbá a tönkrementeli helyek előrejelzésére is alkalmazhatóak voltak, azok tönkrementeli jellegére, kritikus helyeire jó előrejelzést adtak.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánkban három fő tervezési paraméter alakulását vizsgáltuk a méréseink és szimulációink során. Ezek az adott konstrukció merevsége, maximális teherbíróképessége, illetve deformációjának és tönkrementelének jellege. Elvégeztük egy topológiai optimalizációval létrehozott alkatrész szálerősítő struktúrájának megtervezését, majd ezt a struktúrát szimulációs módszerrel ellenőriztük. Az erősített geometriát legyártottuk és azon hárompontos hajlítással validációs méréseket végeztünk. A kapott eredményeket összehasonlítottuk a szimulációk eredményeivel. A szimulációkban kitértünk az alkatrész merevségi jellemzőire, tönkrementelére és deformációira. A kapott eredmények alapján kijelenthető, hogy az eddig publikált eredményekkel összehasonlítva [16, 17] pontosabb eljárással sikerült az FFF

technológiával előállított CFRP kompozitok hajlítómerevségét modellezni.



11. ábra: Irodalomban fellelhető hajlító igénybevétel szimulációk pontossága a saját eredményekkel összehasonlítva [16, 17]

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk megjelenését az NKFIH OTKA K 138472 számú pályázat támogatta.

9. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Liu Y., Zwingmann B., Schlaich M.: Carbon fiber reinforced polymer for cable structures-a review. *Polymers*, 7, 2078–2099, 2015.
- [2] Gea H. C.: Topology optimization: A new micro-structure based design domain method. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, Part F1678*, 283–290, 1994.
- [3] Hassani B., Hinton E.: A review of homogenization and topology optimization III - Topology optimization using optimality criteria. *Computers and Structures*, 69, 739-756, 1998.
- [4] Chen Y., Ye L.: Topological design for 3D-printing of carbon fibre reinforced composite structural parts. *Composites Science and Technology*, 204, Paper ID: 108644, 2021.
- [5] Youn S. K., Park S. H.: A study on the shape extraction process in the structural topology optimization using homogenized material. *Computers and Structures*, 62, 527–538, 1997.
- [6] Hertlein N., Buskohl P. R., Gillman A., Vemaganti K., Anand S.: Generative adversarial network for early-stage design flexibility in topology optimization for additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 675–685, 2021.
- [7] Jang S., Yoo S., Kang N.: Generative Design by Reinforcement Learning: Enhancing the Diversity of Topology Optimization Designs. *CAD Computer Aided Design*, 146, Paper ID: 103225, 2022.

- [8] Krish S.: A practical generative design method. CAD Computer Aided Design, 43, 88–100, 2011.
- [9] <http://www.techstorym2m.hu/az-airbus-bionikus-tervezessel-formalja-a-jovo-repuleset.html%20> (2022.10.10.)
- [10] Gebhardt H.: Additive Manufacturing /3D Printing, Hanser, München, 2016.
- [11] Gandhi U. N., Sebastian G., Osswald T. A., Song Y.: Discontinuous Fiber-Reinforced Composites, Hanser, München, 2020.
- [12] Papon E. A., Haque A., Mulani S. B.: Process optimization and stochastic modeling of void contents and mechanical properties in additively manufactured composites. Composites Part B: Engineering, 177, Paper ID: 107325, 2019.
- [13] Dutra T. A., Ferreira R. T. L., Resende H. B., Blinzler B. J., Larsson R.: Expanding puck and schurmann inter fiber fracture criterion for fiber reinforced thermoplastic 3D-printed composite materials. Materials, 13, Paper ID: 1653, 2020.
- [14] Chen Y., Ye L.: Topological design for 3D-printing of carbon fibre reinforced composite structural parts. Composites Science and Technology, 204, Paper ID: 108644, 2021.
- [15] Daniel I. M., Cho J. M., Werner B. T., Fenner J. S.: Mechanical behaviour and failure criteria of composite materials under static and dynamic loading. ICCM International Conferences on Composite Materials. Conference proceeding, p9, 2009.
- [16] Goh G. D., Toh W., Yap Y. L., Ng T. Y., Yeong W. Y.: Additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic for topology optimized unmanned aerial vehicle structures. Composites Part B: Engineering, 216, Paper ID: 108840, 2021.
- [17] Ghebretinsae F.: Mechanical Testing And Finite Element Analysis Of 3D Printed Continuous Carbon Fiber Reinforced Onyx® Thermoplastic. Master thesis, Universitetet i Stavanger, Faculty of Science and Technology, 2019.