

# ESETTANULMÁNY HELIKOPTER KOMPOZIT PADLÓLEMEZE OPTIMÁLÁSÁRA

## CASE STUDY FOR THE OPTIMIZATION OF COMPOSITE HELICOPTER FLOOR

Dr. Alaa Al-Fatlawi\*, Dr. Jármái Károly\*\* és Dr. Kovács György\*\*\*

### ABSTRACT

The optimization procedure of a Fiber Reinforced Plastic (FRP) composite floor system has been shown. 9 design constraints have been considered: deflection; face stress (bending load, end load); stiffness; flexure; core shear stress; shell buckling; in-cell buckling; and shear buckling. The single-objective weight optimization problem was solved using Matlab's Interior Point Algorithm, the Excel Solver's Nonlinear Generalized Reduced Gradient (GRG) Algorithm, and the Laminator software. Digimat-HC program solved the numerical models of the optimal sandwich plates for helicopter floors. The main contribution of the study is the elaboration of a novel method for optimizing a totally FRP composite sandwich structure that is more advantageous than standard helicopter floors due to its material components and construction. This result is confirmed in a case study.

### 1. BEVEZETÉS

A szálerősítéses műanyag (FRP) kompozitok kiválóan alkalmasak légi járművek szerkezeti elemeinek gyártására. Ugyanis az FRP kompozitok sűrűsége kicsi, ezért alkalmazásuk a légi járművek súlycsökkenését eredményezi. Ez egyrészt kisebb üzemanyag-fogyasztást, ezáltal üzemanyag-költségcsökkenést; másrészt kisebb légszennyezést is okoz.

A cikkben egy esettanulmány kerül bemutatásra egy adott helikopter FRP kompozit padlólemezének optimalálására. A Gép folyóirat ugyanezen számának előző cikkében [1] már ismertettük egy FRP szendvicsszerkezet általunk kidolgozott optimáló módszerét, amelynek a gyakorlatban való alkalmazására egy konkrét esettanulmányt mutatunk be ebben a cikkben. A [2,3] publikáció tartalmazza az esettanulmányban vizsgált szendvicsszerkezet szerkezeti elemeinek anyagjellemzőit.

Az esettanulmányban az egycélfüggvényes optimalálás során a célfüggvény:  $W_{min}$  – a minimális tömeg. Az optimalálás eredménye: a  $t_{c,opt}$  – az optimális magvastagság, valamint a  $t_{f,opt}$  – a

fedőlemezek optimális vastagsága. Az optimáló módszer alkalmazása megerősítette, hogy jelentős súlycsökkenés érhető el az Excel Solver (GRG Nonlinear Algorithm) és a Matlab (Interior Point Algorithm) szoftverekkel kapott – FRP fedőlemezekből és FRP méhsejtmagból álló – helikopterpadló szendvicselemeznél.

### 2. TÖMEGOPTIMÁLÁS AZ EXCEL SOLVER ALKALMAZÁSÁVAL

Az 1. táblázat a helikopterpadló szendvicselemez tömegoptimalálásának eredményeit mutatja be. A szendvicselemez hatszögletű cellájú FRP kompozit méhsejtmagból és FRP kompozit fedőlemezekből áll. Az optimalálást Excel Solver program (GRG Nonlinear Algorithm) felhasználásával végeztük el.

1. táblázat. Az Excel Solver programmal (GRG Nonlinear Algorithm) kapott szerkezetoptimalási eredmények. Az optimális helikopterpadló szendvicselemez kompozit méhsejtmagból, valamint különböző rétegszámú és szálorientációjú FRP kompozit fedőlemezekből áll.

A fedőlemez típusai:	Rétegek száma és szálorientációi:	$W_{min}$ (kg)	$t_{f,opt}$ (mm)	$t_{c,opt}$ (mm)
(1) Szőtt üveg-szál fenollal	4 (0°, 90°, 90°, 0°)	22,133	1	136
(2) Szőtt üveg-szál epoxival	4 (0°, 90°, 90°, 0°)	22,133	1	136
(3) Szőtt szén-szál epoxival	2 (0°, 90°)	14,486	0,6	95
(4) Hibrid rétegek	4 (0°, 90°, 90°, 0°)	15,475	1,1	85

### 3. TÖMEGOPTIMÁLÁS A MATLAB ALKALMAZÁSÁVAL

A 2. táblázat a helikopterpadló szendvicselemezének tömegoptimalási eredményeit mutatja be, amely FRP kompozit méhsejtmagból és FRP kompozit fedőlemezekből áll. Az optimalálás eredménye a

\* végzett doktorandusz, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

\*\* professzor, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

\*\*\* docens, Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézet

Matlab szoftver alkalmazásával (*Interior Point Algorithm*) került meghatározásra.

2. táblázat. A Matlab programmal (*Interior Point Algorithm*) kapott szerkezetoptimalási eredmények. Az optimális helikopterpadló szendvicselemeze kompozit méhsejtmagból és különböző rétegszámú és szálorientációjú kompozit fedőlemezekből áll.

A fedőlemezek típusai:	Rétegek száma és szálorientációi:	$W_{min}$ (kg)	$t_{f,opt}$ (mm)	$t_{c,opt}$ (mm)
(1) Szótt üveg-szál fenollal	4 (0°, 90°, 90°, 0°)	22,127	1	136
(2) Szótt üveg-szál epoxival	4 (0°, 90°, 90°, 0°)	22,127	1	136
(3) Szótt szén-szál epoxival	<b>2 (0°, 90°)</b>	<b>14,473</b>	<b>0,6</b>	<b>95</b>
(4) Hibrid rétegek	4 (0°, 90°, 90°, 0°)	15,475	1,1	85

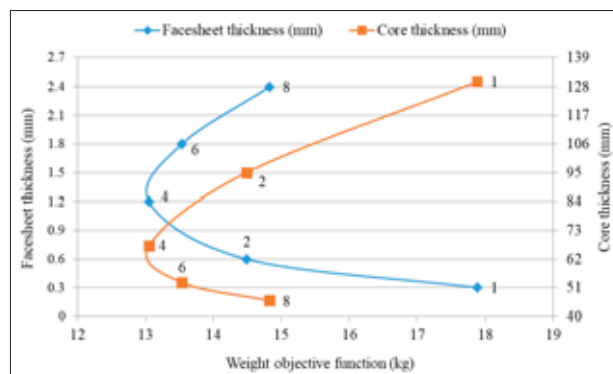
#### 4. A MATLAB ÉS AZ EXCEL SOLVER ALKALMAZÁSÁVAL ELÉRT OPTIMÁLÁSI EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

A 2. és a 3. fejezetekben bemutatott 1. és 2. táblázat a vizsgált helikopterpadló optimális szendvicselemeze az adatait mutatja be. A táblázatok adatai alapján megállapítható, hogy a Matlab és az Excel Solver programokkal ugyanazon adatokkal rendelkező szendvicsszerkezetet lehetett optimálisnak definiálni, tehát mindkét programmal ugyanaz az optimális szerkezet adódott.

Így a vizsgált helikopterpadló optimális szendvicselemeze a felső és az alsó fedőlemeze is 2 darab (0°, 90°) szállirányú, szótt szénszál epoxigyanta rétegből (amelyek vastagsága:  $t_{f,opt} = 0,6$  mm), valamint közöttük egy méhsejtmagból (amelynek vastagsága:  $t_{c,opt} = 95$  mm) áll. Ez biztosítja a minimális tömegű szerkezetet. A helikopter padló optimális szendvicselemeze minimális tömege pedig 14,5 kg. A fentiek alapján megállapítható, hogy az optimális szendvicsszerkezet paraméterei ( $t_{f,opt}$ ;  $t_{c,opt}$ ), valamint az újonnan megalkotott optimális konstrukció számított tömege ( $W_{min}$ ) is megegyezik a Matlab és az Excel Solver szoftver alkalmazása esetén (1. és 2. táblázat).

Az 1. ábra grafikusán mutatja be az FRP fedőlemezek és az FRP méhsejtmag optimális vastagságának kapcsolatát a minimális tömeg esetén az 1. és a 2. táblázat adatai alapján.

Összegezve megállapítható, hogy az általunk újonnan kidolgozott optimalisasi módszer megbízható, mivel az új, optimális konstrukció optimális paraméterei mind a Matlab, mind az Excel Solver szoftver alkalmazása esetén azonosak (az 1. és a 2. táblázat).



1. ábra. A fedőlemezek és a mag optimális vastagságának kapcsolata a minimális tömeg esetén.

Az optimaló módszer helyességéből adódóan az optimális szendvicsszerkezet mind a 9 tervezési feltételnek megfelel. Ennek elméleti ismertetése az [1] publikációban már bemutatásra került.

• Az esettanulmányban a vizsgált optimális szerkezet esetén a 9 tervezési feltétel közül a következő 4 tervezési feltétel számított értékeinek kisebbnek kell lenniük, mint a vonatkozó maximálisan megengedett értékeknek:

1. Lehajlás ( $\delta$ ): maximális megengedett érték: 25 mm // számított érték: 24,949 mm.
2. A fedőlemez normál feszültsége  $x$ -irányban ( $\sigma_{f,x}$ ): maximális megengedett érték: 785,5 MPa // számított érték: 211,7 MPa.
3. A mag nyírófeszültsége ( $\tau_c$ ): maximális megengedett érték: 2,28 MPa // számított érték: 0,338 MPa.
4. A fedőlemez normál feszültsége  $y$ -irányban ( $\sigma_{f,y}$ ): maximális megengedett érték: 687 MPa // számított érték: 54 MPa.

• Az esettanulmányban az optimális szerkezet számított értékeinek nagyobbak kell lenniük a vonatkozó minimálisan megengedett értékeknél az alábbi 5 tervezési feltétel esetén:

5. Merevség ( $D_{11,x}$ ): minimális megengedett érték: 174,6 kN·m // számított érték: 179,4 kN·m.
6. Kihajlás ( $P_b$ ): minimális megengedett érték: 64,86 kN/m // számított érték: 766,61 kN/m.
7. Nyírési tönkremenetel ( $P_{cr}$ ): minimális megengedett érték: 53,51 kN // számított érték: 7064,12 kN.
8. Héjgyűrődés ( $P_{wr}$ ): minimális megengedett érték: 64,86 kN/m // számított érték: 285,72 kN/m.
9. Méhsejt horpadás ( $\sigma_{fib}$ ): minimális megengedett érték: 785,2 MPa // számított érték: 1296,9 MPa.

A fenti adatok alapján megállapítható, hogy a megalkotott optimális szendvicsszerkezet mind a kilenc tervezési feltételnek megfelel.

## 5. A KOMPOZIT SZENDVICSSZERKEZET TOVÁBBI ELŐNYEI

### 5.1. A tervezési feltételekkel kapcsolatos biztonsági tényezők

A biztonsági tényezők nagyon fontosak a tervezőmérnökök számára, mivel releváns mérőszámok, amelyeket figyelembe kell venni az alkatrészek vagy a szerkezetek tervezésekor. A biztonsági tényező a maximális feszültség vagy terhelés és a fellépő feszültség vagy terhelés hányadosa. A helikopter padló szendvicselemeze – amely FRP kompozit méhsejtmagból és az előzőekben már említett 4 különböző típusú FRP kompozit fedőlemezekből áll – tervezési feltételeinek biztonsági tényezőit a 3. táblázat mutatja be.

3. táblázat. Biztonsági tényezők a helikopterpadló szendvicselemezeének tervezési feltételeihez.

Feltételek	A biztonsági tényező (FoS) a 4 különböző fedőlemezhez kapcsolódik			
	Szött üvegszál fenollal (0°, 90°, 90°, 0°)	Szött üveg-szál epoxival (0°, 90°, 90°, 0°)	Szött szén-szál epoxival (0°, 90°)	Hibrid rétegek (0°, 90°, 90°, 0°)
$D_{11,x}$	1,018	1,018	1,027	1,03
$\delta$	1	1	1	1
$\sigma_f$	4,173	6,258	3,71	4,05
$\tau_c$	9,608	9,608	6,731	3,984
$\sigma_f$	10,302	15,741	12,71	15,582
$P_{b,cr}$	Nem aktív feltétel			
$P_{cr}$	1,812	1,208	1,3	1,585
$P_{wr,cr}$	2,808	1,671	1,652	3,995
$\sigma_{f,cr}$	1,812	1,208	1,3	1,585

4. táblázat. A szendvicselemez éves üzemanyag- és karbonmegtakarítása.

1. Üzemanyag-megtakarítás	Ár	Egység
A szállításhoz szükséges üzemanyag tömege +1 kg/h esetén	0,04	kg
A szállításhoz szükséges üzemanyag tömege +1 kg/1 év esetén	200	kg
Üzemanyagköltség/1000 kg	993	USD
Üzemanyagköltség a szállításhoz +1 kg/1 év esetén	199	USD
A helikopterpadló optimális szendvicselemezeének tömege	<b>14,473</b>	kg
2. Szén-dioxid megtakarítás		
Termelt széndioxid/1 kg üzemanyag	3,1	kg
Termelt széndioxid szállításhoz 1 kg/1 év	620	kg
A széndioxid tonnánkénti költsége	40	USD

## 5.2. Az éves üzemanyag- és szén-dioxid megtakarítás

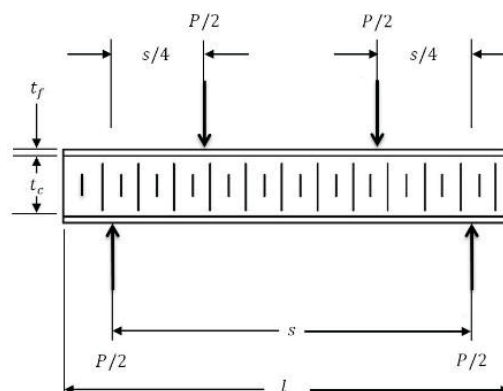
Az IATA (Nemzetközi Légi Szállítási Szövetség) adatai szerint az éves 1 kg hozzáadott hasznos tömeg szállításához szükséges üzemanyag tömege 200 kg. Az 1000 kg-ra jutó éves költség pedig kb. 993 USD. Ezért az 1 kg hozzáadott tömeg szállításának a költsége 1 évre kb. 199 USD. Az üzemanyag kilogrammonként termelt karbonkibocsátása kb. 3,1 kg. Az 1 kg/év szállítása során keletkezett karbon pedig kb. 620 kg. A CO<sub>2</sub>/tonna költsége kb. 40 USD, amint azt a 4. táblázat mutatja.

## 6. A SZENDVICSELEMEZ NUMERIKUS ELEMZÉSE A DIGIMAT-HC PROGRAMMAL

A Digimat-HC program egy megbízható eszköz a négyponos hajlító tesztek modellezésére. A szoftver alkalmazása pontos és rugalmas a méhsejt magszerkezetű szendvicsszerkezetek elemzéséhez is. A kutatás a helikopterpadló szendvicselemezei modelljeinek numerikus szimulációját is tartalmazza. A helikopterpadló méhsejt-szendvicselemez méreteit az 5. táblázat mutatja be (2. ábra).

5. táblázat. A helikopterpadló méhsejtvázás szendvicselemezének méretei.

Dimenzió	Méhsejt Fedőlemez Erő					
	Hossz $l$	Fesztáv $s$	Szélesség $b$	Méhsejt vastagság $t_c$	Fedőlemez vastagság $t_f$	Erő $P$
(1) Szött üvegszál fenollal				136	1	
(2) Szött üvegszál epoxival				136	1	
(3) Szött szén-szál epoxival	1500	1400	825	95	0,6	53,51
(4) Hibrid rétegek				85	1,1	

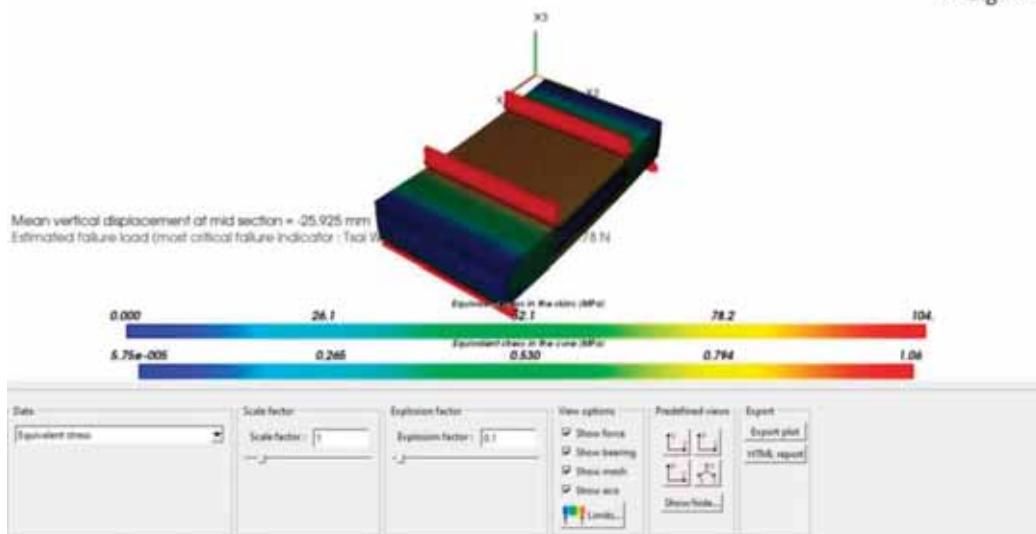


2. ábra. A méhsejtvázás szendvicselemez négyponos hajlítóvizsgálata a Digimat-HC programmal.

A négypontos hajlítóvizsgálatot a Digimat-HC szoftver alkalmazásával végeztük el. A szimuláció

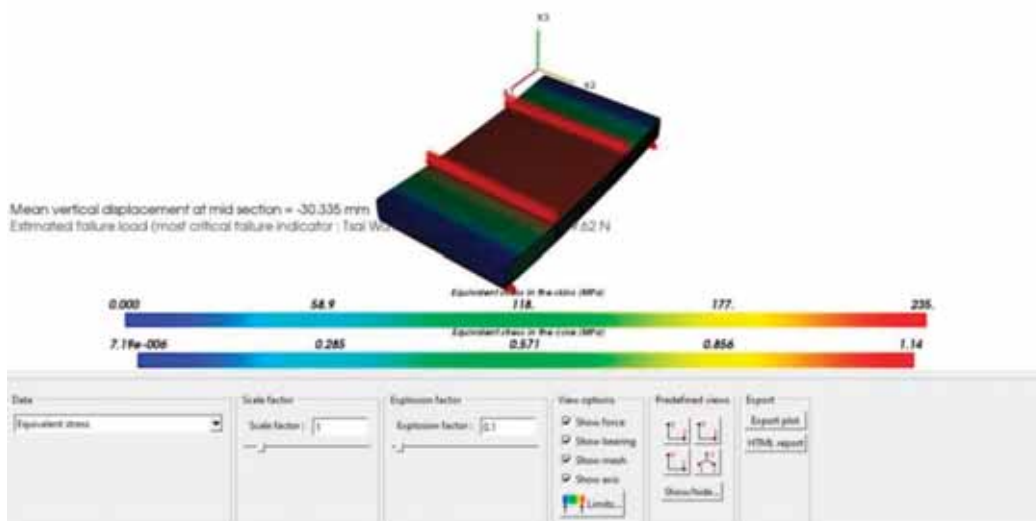
eredményeit a helikopter padlójának optimális méreteivel a 6. táblázat tartalmazza.

Digimat



3. ábra. A helikopterpadló szendvicselemezőnek négyponos hajlítóvizsgálatának numerikus modellje. A szendvicsszerkezet áll: FRP méhsejtmagból ( $t_c = 136$  mm) és epoxigyantás üvegszál-szövetes fedőlemezekből ( $t_f = 1$  mm).

Digimat



4. ábra. A helikopterpadló szendvicselemezőnek négyponos hajlítóvizsgálatának numerikus modellje. A szendvicsszerkezet áll: FRP méhsejtmagból ( $t_c = 95$  mm) és epoxigyantás szénszál-szövetes fedőlemezekből ( $t_f = 0,6$  mm).

6. táblázat. A helikopterpadló méhsejtes szendvicsszerkezetek numerikus eredményei a Digimat-HC programmal.

$\delta$  - a szerkezet függőleges középhajlása;  
 $\sigma_{skin}$  - egyenértékű héj feszültség;  
 $\tau_c$  - egyenértékű magnyírófeszültség.

A különböző héjak optimális kialakítása	$\delta$ (mm)	$\sigma_{skin}$ (MPa)	$\tau_c$ (MPa)
Szött üvegszál fenollal	25,925	104	1,06
Szött üvegszál epoxival	25,925	104	1,06
Szött szénszál epoxival	30,335	235	1,14
Hibrid rétegek	31,541	198	1,03

## 7. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JÖVŐBENI KUTATÁSOK

Egy új – FRP fedőlemezekből és FRP méhsejtmagból összeállított – szendvicsszerkezet

optimalizációs módszerét dolgoztuk ki. Az új optimalizációs módszer alkalmazásával meghatározható a helikopter padlójének optimális anyagösszetétele és szerkezete, amely a minimális tömegű szendvicsszerkezetet biztosítja. A módszerben kilenc tervezési feltételt vettünk figyelembe, amelyek az alábbiak: a lehajlás; a fedőlemez feszültsége (hajlító terhelés és végterhelés); a merevség; a mag nyírófeszültsége; a héjfeszültség; a kihajlás; a nyírási deformáció; a héjgyűrődés és a méhsejt horpadása. Az optimalizálás során az FRP fedőlemezek optimális rétegösszetétele négy különböző típusú FRP kompozit réteg rétegekombinációjából lett meghatározva [szőtt üvegszálak fenolgyantával; szőtt üvegszálak epoxigyantával; szőtt szénzsálak epoxigyantával és a hibrid rétegek (vagyis a szőtt üvegszál-epoxi és a szőtt szénzsál-epoxi rétegek kombinációja)].

Az új optimalizációs módszer gyakorlati alkalmazhatóságát egy esettanulmány bemutatásával is igazoltuk. Az esettanulmányban a helikopter padlólemez szendvicselemeinek optimális szerkezete FRP kétrétegű, szőtt szénzsálás epoxigyantás fedőlemezekből (a szálak orientációja keresztirányú ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ); 0,6 mm vastagságú) és FRP méhsejtes magból (95 mm vastagságú) áll. Az optimális szerkezet minimális tömege 14,473 kg.

Az egycélfüggvényes tömegoptimalizációs feladat a MATLAB szoftver IPA (Interior Point Algorithm) algoritmusával és az Excel Solver szoftver GRGNA (Generalized Reduced Gradient Nonlinear Algorithm) algoritmusával került megoldásra. A fedőlemezek optimalizálása során a Laminator szoftvert is alkalmaztuk. A helikopterpadló optimális szendvicselemeinek numerikus modelljeit a Digimat-HC szimulációs szoftverrel építettük fel.

Az általunk újonnan kidolgozott, kilenc tervezési feltételt figyelembe vevő optimalizációs módszer megbízhatóságát és alkalmazhatóságát egy esettanulmánnyal igazoltuk azzal, hogy az új optimalizációs szendvics konstrukció szerkezeti elemeinek jellemzőire kapott eredmények azonosak lettek a Matlab és az Excel Solver szoftver alkalmazása esetén is (1. és 2. táblázat). Továbbá a kidolgozott optimalizációs módszer megbízhatóságát a Digimat-HC végelemes szoftver alkalmazásával is igazoltuk (6. fejezet), mivel a szerkezet végelemes analízisének szimulációs eredményei is megerősítik az alkalmazott tervezési feltételek teljesülését.

A kutatás fő hozzáadott értéke az, hogy egy teljesen FRP kompozit szendvicsszerkezet optimalizációs módszere került kidolgozásra. A megalkotott FRP kompozit szendvicsszerkezet – mind az anyagösszetétel, mind a szerkezeti kialakítás tekintetében – jóval előnyösebb, mint a jelenleg alkalmazott hagyományos helikopter padlólemezek.

Ez azt jelenti, hogy az újonnan tervezett teljesen FRP szerkezet – alacsony sűrűsége miatt – jelentős súlymegtakarítást, ezáltal kisebb üzemanyag-fogyasztást és üzemanyagköltséget, valamint kisebb környezeti terhelést is eredményez, mint a hagyományos szerkezetek. Ebből adódóan az általunk kidolgozott optimalizációs módszerrel tervezett teljesen FRP szendvicsszerkezetek széles körben alkalmazhatók a gyakorlatban a szállító járművek szerkezeti elemeiként.

A szakirodalom szintézise alapján megállapítható, hogy a szakirodalomban ugyan számos tervezési és optimalizációs módszer áll rendelkezésre a légi járművek szerkezeti elemeinek optimalizására, azonban a teljesen FRP szendvicsszerkezetekre vonatkozóan nem lelhető fel optimalizációs módszer. Ezért az általunk kidolgozott optimalizációs módszer hiánypótló.

Összegzésként megállapítható, hogy adott mérnöki alkalmazásokhoz szükséges szerkezetek kialakításához a megfelelő anyagösszetevők meghatározása is alapvető fontosságú. A jövőbeni kutatásaink során – a teljesen FRP szendvicsszerkezetekre vonatkozóan – az általunk már kidolgozott optimalizációs módszer további gyakorlati alkalmazási lehetőségeit vizsgáljuk, pl. a közúti, vízi vagy légi közlekedési járművek más szerkezeti elemei esetén is. Ezen kívül további tervezési feltételek és más típusú FRP kompozit anyagok alkalmazását is vizsgálni fogjuk a szerkezet-optimalizációk során.

## 8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatta K 134358 projekt keretében.

## 9. IRODALOM

- [1] Alaa Al-Fatlawi, Jármai Károly, Kovács György: Helikopter kompozit padlólemeze optimalizálásának elméleti alapjai, GÉP, 2002, 2, 30–37.
- [2] Hexcel Composites Publication No. AGU 075b, Honeycomb Sandwich Design Technology. 2000. Available online: [https://www.hexcel.com/user\\_area/content\\_media/raw/Honeycomb\\_Sandwich\\_Design\\_Technology.pdf](https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf) (accessed on 10 June 2021).
- [3] Product Data of Fibreglass/Phenolic Honeycomb Publication ATU 122b. 2007. Available online: [https://www.hexcel.com/user\\_area/content\\_media/raw/HRP\\_eu.pdf](https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HRP_eu.pdf) (accessed on 23 April 2021).