

HELIKOPTER KOMPOZIT PADLÓLEMEZE OPTIMÁLÁSÁNAK ELMÉLETI ALAPJAI

THEORETICAL BACKGROUND OF THE COMPOSITE HELICOPTER FLOOR OPTIMISATION

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

ABSTRACT

The use of Fiber Reinforced Plastic (FRP) composites in aircraft structural components results in weight reductions, which results in reduced fuel consumption, cheaper fuel costs, less air pollution, and enhanced speed. The research objective was to design a novel optimization approach for a helicopter floor made entirely of FRP composite material. The optimization process involved examining 46 distinct layer combinations of four different FRP layers (woven glass fiber with phenolic resin; woven glass fiber with epoxy resin; woven carbon fiber with epoxy resin; hybrid composite) and different FRP honeycomb core structural elements. The face sheets were constructed using a variety of different layer counts and fiber orientations including cross-laminated, angled, and multidirectional. The optimization procedure took into account nine design constraints: 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 Technique, Excel Solver's nonlinear Generalized Reduced Gradient (GRG) algorithm, and Laminator software. Digimat-HC solved numerical models of ideal sandwich plates for helicopter floors using the Digimat-HC program. The primary contribution is the creation of a novel method for optimizing a totally FRP composite sandwich structure that is more favorable than standard helicopter floors due to its material components and construction. This truth has been shown through a case study.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a vállalatok versenyképességének növelése és a fenntarthatóság biztosítása érdekében új, korszerű anyagok és szerkezetek, valamint innovatív és környezetbarát technológiák alkalmazására van szükség mind a gyártó-, mind a szállítási szektorban [1-3]. A legdrágább és környezetszennyezőbb szállítási mód a légi közlekedés. Ezért a fő célok az üzemanyag-fogyasztás csökkentése és az üzemanyagköltségek

csökkentése mellett a kisebb környezeti károk elérése, valamint a légi közlekedés hatékony és biztonságos működésének javítása [4-6].

A kutatási téma fontosságát az adja, hogy - a légi járművek közül - különösen a helikopterek számos különleges, összetett és kockázatos helyzetben játszanak kulcsszerepet. Csak helikopterek képesek számos fontos és veszélyes feladatot ellátni, pl. légi mentési, tűzoltási és légi felügyeleti feladatok. Ezért a helikopterekkel szemben számos speciális követelmény van, amelyek a következők: kis tömeg; nagy sebesség; könnyű és biztonságos manőverezőképeség; költséghatékony üzemeltetés (alacsony üzemanyag-fogyasztás); és biztonságos szállítás (pl. megbízhatóság, törésbiztonság) [7,8]. A törésbiztonság fontos elvárás a helikopterekkel kapcsolatban, mivel a helikopterek szerkezetének ellen kell állnia az ütközésnek és meg kell védenie a helikopterben tartózkodókat. Ezért a helikopterek padló szerkezetét úgy kell megtervezni, hogy ellenálljon az emberi testet érő terheléseknek és gyorsulásoknak egy kényszerleszállás során. Előfordul, hogy a helikopterek emberi hibák vagy műszaki hibák miatt zuhannak le. A helikopterek tervezése mindig is kiemelt fontosságú marad a szerkezeti hibák elkerülése érdekében. A helikopterek roncsolódása energiaelnyelő anyagok vagy szerkezetek alkalmazásával csökkenthető [9,10]. A helikopter-szerkezetek törésbiztos kialakításával és energiaelnyelő mechanizmusaival kapcsolatban számos cikk jelent meg [11-14].

A korszerű kompozit anyagok alkalmazása a helikopterek szerkezeti elemeinek (például a helikopterek padlójának) tervezése és gyártása során kielégíti a helikopterekkel szemben a fentiekben említett elvárásokat. Ennek oka, hogy a kompozitok a hagyományos anyagoknál előnyösebb tulajdonságokkal rendelkeznek [15,16]. A kompozit anyagok kis sűrűsége jelentős súlycsökkenést jelent, ami egyrészt kisebb üzemanyag-fogyasztást, üzemanyagköltség-csökkenést és kisebb légszennyezést eredményez, másrészt lehetővé teszi a helikopterek nagyobb sebességét. Továbbá a kompozit szerkezetek nagy szilárdsággal, jó rezgéscsillapítással, korrózióval és vegyi anyagokkal

* végzett doktorandusz, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

** professzor, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

*** docens, Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézet

szembeni jó ellenállással, tűzállósággal és jó hőszigeteléssel rendelkeznek [17,18].

A kompozit anyagok – a fent említett tulajdonságaiknak köszönhetően – széleskörű gyakorlati alkalmazási lehetőségeket biztosítanak ezen korszerű anyagok számára, elsősorban a légi járművek, pl. helikopterek szerkezeti elemeiként való felhasználásra.

A kompozit anyagok leggyakrabban használt típusai a szálerősítésű műanyag (FRP) kompozitok. Az FRP kompozitok két komponensből állnak: (1) egy mátrix anyagból (általában gyanták) és (2) egy erősítő komponensből (általában szálak). A szálak biztosítják a kompozit anyagok szilárdságát. A mátrix anyag tartja a szálakat és védi őket a negatív környezeti hatásoktól. Az erősítő szálaknak és mátrix anyagoknak is számos típusa áll rendelkezésre. A különböző szálaknak és mátrix anyagoknak számos kombinációja állítható elő, amelyek biztosítják az adott szerkezet kialakításához szükséges ideális kompozit anyagok megalkotását [19].

A gyakorlatban a leggyakrabban használt FRP kompozitok a következő szálakat kombinálják: szén, üveg, aramid stb. és a következő mátrixokat: epoxi, fenol stb. Az epoxigyanta jó mechanikai tulajdonságokkal, kiváló környezeti ellenállással és könnyű feldolgozhatósággal rendelkező polimer. A fenolgyanta egy szintetikus polimer, amely jó kémiai, tűz- és hőállósággal, alacsony toxikus kibocsátással és egyszerű feldolgozással rendelkezik [20,21]. A leggyakrabban alkalmazott szintetikus erősítő anyagok az üvegszálak és a szénszálak. Az üvegszál a legszélesebb körben alkalmazott erősítőanyag a viszonylag alacsony költségének köszönhetően. A szénszálak nagy a szilárdság/tömeg aránya, és magas költsége ellenére számos alkalmazásban, különösen a légi és űrtechnikai alkalmazásokban használják [22, 23].

1. Az FRP szendvicsszerkezetek a mérnöki alkalmazásokban a legszélesebb körben alkalmazott szerkezeti elemek közé tartoznak. Az FRP szendvicsszerkezetek FRP fedőlemezekből (pl. laminált lemezek) és maganyagokból (pl. méhsejt, hab) épülnek fel. Ezen szerkezetek nagy szilárdságot és merevséget, könnyű összeszerelhetőséget és kiváló testreszabhatóságot biztosítanak [24-26].

2. Számos releváns publikáció áll rendelkezésre a kompozit szendvicsszerkezetek tervezési és optimalizálási eljárásaira vonatkozóan, amelyek célja olyan optimális szerkezeteket létrehozása, amelyek kis súly és költség mellett nagy merevséget és szilárdságot biztosítanak [27-29]. Heimbs és társai szénszál-erősítéses műanyag szendvicsszerkezetek mechanikai viselkedését vizsgálták az LS-DYNA FE szoftverrel. A modellek validálását és a szendvicsszerkezet optimalizálását az LS-OPT szoftverrel végezték el [30,31]. Bisagni és társai egy optimalizálási módszert dolgoztak ki egy alumíniumötvözetből készült helikopter padlólemezére [32]. Adel és Steven hibrid kompozit fedőlapokkal

ellátott habszendvics-szerkezetek egycélfüggvényes és többcélfüggvényes optimalizálási módszerét dolgozták ki hajlítási és csavarási méretezési feltételek alkalmazásával [33].

3. Néhány cikk a habosított anyagok hangszigetelő képességének vizsgálatára szolgáló kísérleti és számítási módszereket mutat be, valamint a szürke relációs elemzési módszert, továbbá a többcélfüggvényes részecskecsoport optimalizáló algoritmust alkalmazza a habkompozitok akusztikai teljesítményének javítására [34-36]. Khan és társai a méhsejt-mag deformációjának és tönkremeneteli módjainak a modellezését mutatják be statikus terhelés esetén [37].

4. Számos szakirodalom foglalkozik különböző kompozit szerkezetek optimalizálási feladatainak megoldására szolgáló technikák és módszerek bemutatásával [38-41]. A szerkezetoptimalizáláshoz sok szoftveralkalmazás (pl. MATLAB, ABAQUS) vált általánossá. A végeselemes szoftveralkalmazásokat gyakran használják a szerkezeti analízis során differenciálegyenletek numerikus megoldására [42-44]. Khalkhali és szerzőtársai egy módosított genetikus algoritmust használtak hullámos maggal rendelkező szendvicspanelek tömeg- és lehajlási célfüggvényeinek megoldására [45]. Corvino és társai genetikus algoritmusokon alapuló többcélfüggvényes optimalizálási eljárást mutattak be az ANSYS szoftverrel [46].

5. A fellelhető szakirodalom szintézise alapján megállapítható, hogy bár a szendvicsszerkezetek optimalizálására számos tervezési és optimalizálási módszer áll rendelkezésre, azonban a teljesen FRP szendvicsszerkezetekre (amelyben mind a fedőlemezek, mind a méhsejt-mag is FRP kompozit) vonatkozó optimalizáló módszer a szakirodalomban nem található. Ezért az újonnan kidolgozott optimalizálási módszer hiánypótló ezen a kutatási területen.

A kutatás célja egy helikopter padlólemezének kialakításához használható teljesen FRP kompozit – vagyis FRP fedőlemezek és FRP méhsejt-mag – szendvicsszerkezet optimalizálási módszerének kidolgozása volt. Az optimalizálás célja a helikopter szendvics padlólemeze optimális anyagösszetételének és szerkezeti kialakításának a meghatározása volt, amely a szerkezet minimális tömegét biztosítja. Az optimalizálás során 4 különböző típusú FRP kompozit réteg (1. szőtt üvegszálak fenolgyantával; 2. szőtt üvegszálak epoxigyantával; 3. szőtt szénszálak epoxigyantával és 4. hibrid kompozit rétegek) 46 rétegekombinációjából álló fedőlemezekből és FRP méhsejt-magból álló konstrukciókat vizsgáltunk. A fedőlemezek különböző számú és szálirányú [keresztirányú (0°, 90°); szögben álló (±45°) és többirányú (0°, 90°, ±45°)] rétegekből kerültek összeállításra.

A szerzők egy egycélfüggvényes tömegoptimalizálási módszert dolgoztak ki kilenc tervezési feltétel alkalmazásával, amelyek a következők: a lehajlásra; a

fedőlemez feszültségre (hajlító terhelés és végerterhelés); a merevségre; a mag nyírófeszültségére; a héj feszültségére; a kihajlásra; a nyírási deformációra; a héjgyűrődésre és a méhsejt horpadására vonatkozó feltételek. Az optimalizálási feladat a MATLAB szoftver IPA (Interior Point Algorithm) algoritmusával, az Excel Solver szoftver GRGNA (Generalized Reduced Gradient Nonlinear Algorithm) algoritmusával és a Laminator szoftver alkalmazásával került megoldásra. A helikopter szendvics padlólemezének numerikus modellezése a Digimat-HC szoftver alkalmazásával valósult meg. Továbbá a helikopter padlólemezének optimalizálása során alkalmazott mind a kilenc tervezési feltételre vonatkozó biztonsági tényezők is kiszámításra kerültek.

A kutatás fő hozzáadott értéke az, hogy egy teljesen FRP kompozit szendvicsszerkezet optimalizálási módszere került kidolgozásra – mind az anyagösszetétel, mind a szerkezeti kialakítás tekintetében –, mely szendvicsszerkezet jóval előnyösebb, mint a jelenleg alkalmazott hagyományos helikopter padlólemezek. Továbbá az újonnan kidolgozott optimalizálási módszerben kilenc tervezési feltétel került figyelembe vételre, míg más publikációkban tárgyalt optimalizálási módszerek általában csak három-négy tervezési feltételt alkalmaznak. A nagyszámú tervezési feltétel alkalmazása megbízhatóbb optimális szendvicsszerkezetet eredményez, amely biztosítja a helikopter biztonságosabb üzemeltetését is. Összegezhető, hogy az újonnan tervezett teljesen FRP szerkezet – alacsony sűrűsége miatt – jelentős súlymegtakarítást, ezáltal alacsonyabb üzemanyag-fogyasztást, alacsonyabb üzemanyagköltséget és kisebb környezeti terhelést eredményez, mint a hagyományos szerkezetek. Következésképpen az újonnan kidolgozott optimális módszerünkkel tervezett teljesen FRP szerkezetek széles körben alkalmazhatók a gyakorlatban különböző mérnöki alkalmazásokban, pl. a szállító járművek szerkezeti elemeiként (hajófedém, szállító járművek szerkezeti elemei, stb.) való felhasználásokra.

2. AZ ÚJONNAN TERVEZETT HELIKOPTER PADLÓLEMEZÉNEK SZERKEZETE ÉS ANYAGÖSSZETÉTELE

A helikopter padlólemezének az újonnan tervezett könnyűszerkezetes szendvicslemeze FRP méhsejt magból és 4 különböző típusú FRP kompozit réteg [(1) szőtt üvegszálak fenolgyantával; (2) szőtt üvegszálak epoxigyantával; (3) szőtt szénszálak epoxigyantával és (4) hibrid (szőtt üvegszál-epoxi és szőtt szénszál-epoxi rétegek kombinációja) rétegek] rétegekombinációjából álló fedőlemezekből áll. A fedőlemezek különböző számú és szálirányú [keresztirányú (0°, 90°); szögben álló (±45°) és többirányú (0°, 90°, ±45°)] rétegekből kerültek összeállításra. Az 1. ábrán látható az Airbus

helikopter padlólemeze, amelyet szendvicsszerkezettel kívánunk kialakítani [47].



1. ábra Airbus helikopter [47].

A helikopter padlólemeze 1500 x 825 mm méretű, és önhordó, azaz a padló szélein kívül nincsenek külső merevítők. A padlólemez $p = 1500 \text{ kg/m}^2$ és 4,5 g gyorsulás egyenletes eloszlású nyomásnak vetik alá, és $\delta_{max} = 25 \text{ mm}$ -rel deformálódik (lásd az 1. táblázatot). A helikopter padlólemeze egyszerűen alátámasztott, és $l/b = 1,8$ (lásd a 2. táblázatot).

1. táblázat A helikopterpadló szendvicslemezeének műszaki adatai [48]

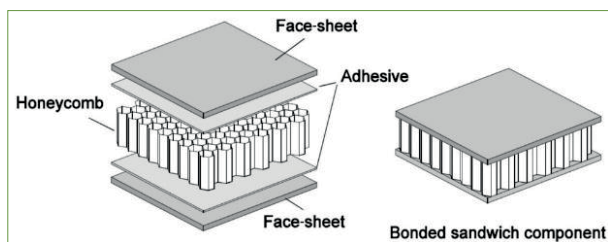
Hossz	Szélesség	Lehajlás	Gyorsulás	Maximális terhelés	
l	b	δ_{max}	g	P	p
(mm)	(mm)	(mm)	(m/sec ²)	(N)	(Pa)
1500	825	25	9,81-4,5	53510	66217,5

2. táblázat A szabadon felfekvő helikopterpadló szendvicslemezeének a tervezési adatai

Hajlítási lehajlástényezője	Nyírási lehajlástényezője	Maximális hajlító-nyomatek	Maximális nyíróerő	Kihajlástényező
K_b	K_s	M	F	β
5	1	Pl	P	1
384	8	8	2	

2.1. Az újonnan tervezett helikopter padlólemezének szerkezete

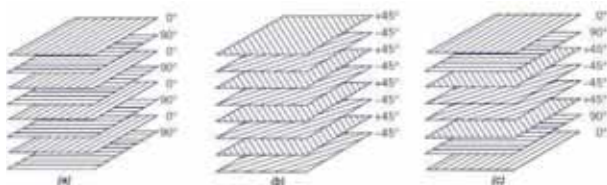
Az FRP szendvicslemez kis tömeggel és viszonylag nagy merevség-tömeg aránnyal rendelkezik. Az FRP kompozit szendvicslemez két FRP fedőlemezéből (felső és alsó) áll, amelyeket egy vastagabb FRP méhsejt-mag választ el egymástól. A fedőlemezek és a méhsejt-mag összeállítása ragasztóanyaggal történik (2. ábra). A szerkezet nagy merevsége a fedőlemezek közötti távolságból adódik, a kis súlya pedig a méhsejt-mag kis sűrűségének köszönhető. A kompozit méhsejt-mag kiváló tulajdonságai számos ipari alkalmazásban hasznosíthatók, mint pl. a helikopter padlólemezének gyártása során is.



2. ábra. Méhsejtvázás szendvicselem felépítése.

2.1.1 A szendvicsszerkezet fedőlemeze

A 3. ábra a cikkben vizsgált kompozit rétegelt fedőlemezek három típusát mutatja, amelyek a keresztirányú rétegek (0° , 90°), a szögben álló rétegek ($\pm 45^\circ$) és a többirányú rétegek (0° , 90° , $\pm 45^\circ$). A 3. táblázat az alkalmazott különböző kompozit rétegek mechanikai tulajdonságait mutatja, mely anyagok a Hexcel Composites Company termékei.



3. ábra A kompozit rétegek elrendezése. (a) Keresztirányú rétegek (0° , 90°); (b) Szögben álló rétegek ($\pm 45^\circ$) és (c) Többirányú rétegek (0° , 90° , $\pm 45^\circ$).

3. táblázat Az alkalmazott FRP rétegek anyagtulajdonságai [49].

Réteg típusa	Szilárdság (MPa) Húzás/Nyomás	Rugalmassági modulus (GPa) Húzás/Nyomás	Poisson arány (-)	Rétegvastagság (mm)	Tömeg/Réteg (kg/m ²)
Szött üvegszál fenolgyantával	400/360	20/17	0,13	0,25	0,47
Szött üvegszál epoxigyantával	600/550	20/17	0,13	0,25	0,47
Szött szénszál epoxigyantával	800/700	70/60	0,05	0,3	0,45

4. táblázat. Az alkalmazott FRP méhsejt-mag anyagtulajdonságai [50].

Jellemzők		Nyomás		Nyírás			
Sűrűség	Cellaméret	Stabilizált		Hosszirány		Keresztirány	
		Erő	Modulus	Erő	Modulus	Erő	Modulus
(kg/m ³)	(mm)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
104,12	6,35	8,14	828	4	159	2,28	90

3. EGYCÉLFÜGGVÉNYES OPTIMÁLÁSI MÓDSZER

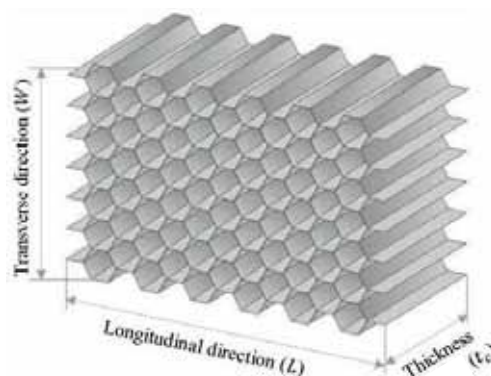
3.1. Tömegcélfüggvény

A szendvicsszerkezet teljes tömegének a számítása:

$$W_t = W_f + W_c = 2 \rho_f l b t_f + \rho_c l b t_c \quad (1)$$

2.1.2. A szendvicsszerkezet méhsejt-magja

A hatszögletű méhsejt-mag a legnépszerűbb méhsejt alakzat, amely fém és kompozit anyagokból is gyártható (4. ábra).



4. ábra. Méhsejt sejt konfiguráció (hatszögletű cellák).

A 4. táblázat az FRP méhsejt-mag mechanikai tulajdonságait adja meg. A méhsejt-mag a Hexcel Composites Company terméke, amely megfelel a legtöbb repülőgépgyártó cég előírásainak is.

ahol: $t_f = N_f t_i$; indexek: f - fedőlemez; c - mag.

A szendvicsszerkezet teljes tömege a hibrid kompozit fedőlemezek (üveg- és szénszálak) alkalmazása esetén:

$$W_t = W_f + W_c = 2(W_{f,g} + W_{f,cr}) + W_c = 2(\rho_g N_g t_g + \rho_{cr} N_{cr} t_{cr}) l b + \rho_c l b t_c \quad (2)$$

3.2. Tervezési változók

A kompozit szendvicselemeznel célszerű az alábbi méretkorlátokat előírni a méhsejt-mag vastagságára (t_c) és a fedőlemezek vastagságára (t_f) vonatkozóan:

$$1 \text{ mm} \leq t_c \leq 100 \text{ mm} \quad (3)$$

$$0,5 \text{ mm} \leq t_f \leq 2 \text{ mm} \quad (4)$$

ahol: $t_f = N_l t_{f_l}$; N_l - a laminátban lévő rétegek száma; t_{f_l} - egy réteg vastagsága.

3.3. Tervezési feltételek

3.3.1. A szerkezet merevsége

A szendvicselemez hajlítási merevségi feltétele a következő képlettel adható meg:

$$D_{11,x} = D_{11}/(1 - v_{12}^f v_{21}^f) \geq D_{min} = \frac{K_b p l^4}{\delta} \quad (5)$$

ahol: $D_{11} = 0,5 d^2 A_{11}^f + 2 D_{11}^f + 2 d B_{11}^f$; $v_{12}^f = A_{12}^f / A_{22}^f$; $v_{21}^f = A_{12}^f / A_{11}^f$ és $d = t_f + t_c$.

A szendvicselemez nyírási merevségi feltétele a következő képlettel adható meg:

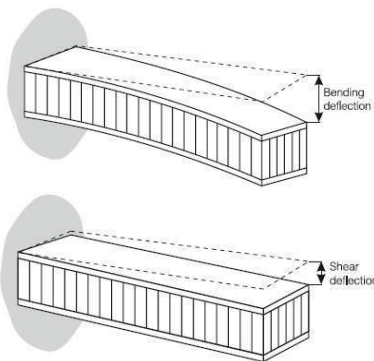
$$\tilde{S}_{11} = \frac{d^2 E_c}{t_c 2 (1 + v_c)} \quad (6)$$

A szendvicselemez számított merevségének nagyobbak kell lenni, mint az 1. és 2. táblázat adatai alapján számítható minimális merevségnek.

3.3.2. A szerkezet lehajlása (5. ábra)

A szendvicselemez lehajlási feltétele:

$$\delta_{max} \geq \delta = \frac{K_b p l^4}{D_{11,x}} + \frac{K_s p l^2}{\tilde{S}_{11}} \quad (7)$$



5. ábra. A szendvicsszerkezet lehajlása

A helikopterpadló szendvicselemeze 1. táblázatban megadott maximális lehajlásának (δ_{max}) nagyobbak kell lenni, mint a számított lehajlásnak (δ).

3.3.3. Feszültség a fedőlemezben

A szendvicselemez feszültségi feltétele:

$$\sigma_{f,x} \geq \sigma_f = \frac{M}{d t_f b} \quad (8)$$

$\sigma_{f,x}$ - az FRP fedőlemezben x irányban fellépő feszültség (a Laminator szoftverrel meghatározva);
 σ_f - a fedőlemez számított feszültsége.

3.3.4. A mag nyírófeszültsége

A nyírófeszültség korlátozási feltétel a következő képlettel adható meg:

$$\tau_{c,y} \geq \tau_c = \frac{F}{d b} \quad (9)$$

$\tau_{c,y}$ - a kompozit méhsejt-mag nyírási feszültsége keresztirányban (4. táblázat);

τ_c - a mag számított nyírófeszültsége.

3.3.5. Héjfeszültség (végterhelés)

A héjfeszültség korlátozási feltétel a következő képlettel adható meg:

$$\sigma_{f,y} \geq \sigma_f = \frac{P}{2 t_f b} \quad (10)$$

$\sigma_{f,y}$ - az FRP fedőlemezben y irányban fellépő feszültség (a Laminator szoftverrel meghatározva);
 σ_f - a fedőlemez számított feszültsége.

3.3.6. Kihajlás (6. ábra)

A kompozit szendvicselemez kihajlása:

$$P_{b,cr} = \frac{\pi^2 D_{11,x}}{\beta l^2 + \frac{\pi^2 D_{11,x}}{\tilde{S}_{11}}} \geq \frac{P}{b} \quad (11)$$

$P_{b,cr}$ - számított terhelés, amelyen a kihajlás bekövetkezik;

P/b - egységnyi szélességre jutó terhelés.



6. ábra. A szendvicsszerkezet kihajlása

3.3.7. Nyírási deformáció (7. ábra)

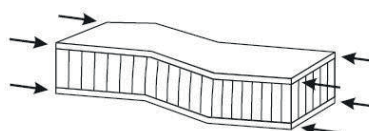
A nyírási deformáció az alábbi módon számítható:

$$P_{cr} = t_c G_c b \geq P \quad (12)$$

ahol: $G_c = G_w$;

P_{cr} - a számított terhelés, amelyen a nyírási deformáció bekövetkezik;

P - a tényleges terhelés.



7. ábra. A szendvicsszerkezet nyírási deformációja

3.3.8. Héjgyűrődés (8. ábra)

A következő héjgyűrődési feltételek számíthatók:

$$\sigma_{wr,cr} = 0,5 \sqrt[3]{E_{f,x} E_c G_c} \geq \sigma_{f,x} \quad (13)$$

ahol $G_c = G_L$.

$$\sigma_{wr,cr} = 0,5 \sqrt[3]{E_{f,y} E_c G_c} \geq \sigma_{f,y} \quad (14)$$

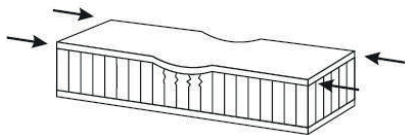
ahol $G_c = G_W$.

$$P_{wr,cr} = 2 \sqrt{D_{11}^f \frac{E_c}{(t_c/2)}} \geq \frac{P}{b} \quad (15)$$

ahol: $E_{f,x} = A_{11}^f (1 - \nu_{12}^f \nu_{21}^f) / t_f$; $E_{f,y} = A_{22}^f (1 - \nu_{12}^f \nu_{21}^f) / t_f$ és $E_f = \sqrt{E_{f,x} E_{f,y}}$.

A feszültség, amelyen a héjgyűrődés bekövetkezik ($\sigma_{wr,cr}$) nagyobb, mint a héj folyáshatára x irányban ($\sigma_{f,x}$) és y irányban ($\sigma_{f,y}$). A számítás a Laminator szoftverrel történik.

$P_{wr,cr}$ - a terhelés, amelyen a héjgyűrődés történik;
 P/b - a terhelés egységnyi szélességre.



8. ábra. A szendvicsszerkezet héjgyűrődése

3.3.9. Méhsejt-horpadás (héj gödrösödés) (9. ábra)

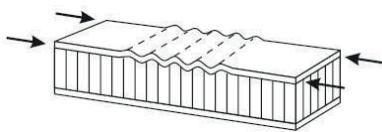
A méhsejt horpadási feltétele a következő képlettel számítható:

$$\sigma_{fib,cr} = \frac{2E_f}{(1 - \nu_{12}^f \nu_{21}^f)} \left[\frac{t_f}{s} \right]^2 \geq \sigma_{f,y} \quad (16)$$

ahol: $E_f = \sqrt{E_{f,x} E_{f,y}}$;

$\sigma_{fib,cr}$ - a feszültség, amelyen a méhsejt horpadás bekövetkezik;

$\sigma_{f,y}$ - a héj folyáshatára (a Laminator szoftverrel számítva).



9. ábra. A szendvicsszerkezet méhsejt-horpadása

A Laminator program képes megoldani a kompozit laminátum klasszikus elemzését. Az egycélű függvényes optimálás során követett eljárást az alábbi 10. folyamatábra mutatja.

1. lépés: Készítsen egy "objecfun.m" file-t (célfüggvény)



2. lépés: Készítsen egy "nonlconstr.m" file-t (nemlineáris feltételek)



3. lépés: Az optimálás futtatása:

- Nyissa meg az "optimálás" alkalmazást.
- A „Belső Pont Algoritmust” (Interior Point Algorithm) ki kell választani a megoldók *fmincon*-korlátozott nemlineáris minimalás listájából.
- Enter@*objecfun*, hogy hívja az *objecfun.m* file-t a minimalizálás érdekében.
- Adja meg a kezdőpont mező kezdőpontját, ahol az algoritmus megkezdí a vektorként megadott minimalás keresését.
- Határozza meg a nemlineáris feltételeket külön file-ként. Enter@*nonlconstr.m* a nemlineáris feltételek mezőben a *nonlconstr.m* file hívásához. A változók alsó és felső határa vektorként van meghatározva.
- Adja meg a beállításokat, és válassza az iteratív lehetőséget, hogy algoritmus adatokat kapjon a parancsablakban minden iteráció esetén.
- Futtassa a *Solver*-t és tekintse meg az eredményeket.

10. ábra. Az egycélű függvényes optimálási eljárás folyamatábrája

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk összefoglalja a kompozit anyagok alkalmazási lehetőségeit abban az esetben, ha a méhsejtvázás szendvicsszerkezet teljesen kompozit kialakítású. A cikkben át lettek tekintve azok a tönkremeneteli esetek, amelyeket a méretezés szempontjából mindenképp szükséges figyelembe venni. Ezek, mint méretezési feltételek szerepelnek az optimális szendvicsszendvicsszerkezetének optimális kialakításánál. A cikk a vizsgálatok elméleti alapjait ismerteti. Ezt követően kerülhet sor a kidolgozott módszer gyakorlati alkalmazására, amelynek során egy konkrét szerkezetoptimalási feladat kerül majd megoldásra [51].

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

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

6. IRODALOM

- [1] Koberg, E.; Longoni, A. A systematic review of sustainable supply chain management in global supply chains. *J. Clean. Prod.* 2019, 207, 1084–1098.
- [2] Grondys, K.; Androniceanu, A.; Dacko-Pikiewicz, Z. Energy management in the operation of enterprises in the light of the applicable provisions of the energy efficiency directive (2012/27/EU). *Energies* 2020, 13, 4338.
- [3] Cselényi, J.; Illés, B.; Kovács, G.; Bálint, R. Network of north-east hungarian logistical centres and logistical clusters, In Proceedings of the 3rd International Logistics and Supply Chain Congress - Logistics and

- Supply Chain Management in a Globalizing World, Istanbul, Turkey, 23–24 November 2005.
- [4] Rushton, A.; Croucher, P.; Baker, P. *The Handbook of Logistics & Distribution Management*; Kogan Page Limited: London, 2010.
- [5] Kot, S. Sustainable supply chain management in small and medium enterprises. *Sustainability* 2018, 10, 1143.
- [6] Farkas, J.; Jármai, K.: Structural synthesis of sandwich beams with outer layers of box section, *J Sound Vib.* 1982, 84(1), 47–56.
- [7] Teodorović, D.; Janić, M. *Transportation Engineering: Theory, Practice and Modeling*; Butterworth-Heinemann: Oxford, 2016.
- [8] Kovács Gy. Innovative mathematical methods and new software applications for cost-effective, profitable and environmentally friendly freight transport. *Pol. J. Environ. Stud.* 2019, 28, 2659–2671.
- [9] Astori, P.; Zanella, M.; Bernardini, M. Validation of numerical models of a rotorcraft crashworthy seat and subfloor. *Aerospace* 2020, 7, 174.
- [10] Todor, M.P.; Kiss, I. Systematic approach on materials selection in the automotive industry for making vehicles lighter, safer and more fuel-efficient. *Appl. Eng. Lett.* 2016, 1, 91–97.
- [11] Hajela, P.; Lee, E. Topological optimization of rotorcraft subfloor structures for crashworthiness considerations. *Comp. Struct.* 1997, 64, 65–76.
- [12] Zheng, J.; Xiang, J.; Luo, Z.; Ren, Y. Crashworthiness design of transport aircraft subfloor using polymer foams. *Int. J. Crashworth.* 2011, 16, 375–383.
- [13] Astori, P.; Impari, F. Crash response optimisation of helicopter seat and subfloor. *Int. J. Crashworth.* 2013, 18, 570–578.
- [14] Yang, X.; Ma, J.; Wen, D.; Yang, J. Crashworthy design and energy absorption mechanisms for helicopter structures: A Systematic literature review. *Prog. Aeros. Sci.* 2020, 114, 100618.
- [15] Hollaway, L.C. A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Constr. Build. Mater.* 2010, 24, 2419–2445.
- [16] Todor, M.P.; Bulei, C.; Kiss, I. An overview on fiber-reinforced composites used in the automotive industry, *Ann. Fac. Eng. Huned. Int. J. Eng.* 2017, 15, 181–184.
- [17] Ferreira, A.D.B.L.; Nóvoa, P.R.O.; Marques, A.T. Multifunctional Material Systems: A state-of-the-art review. *Compos. Struct.* 2016, 151, 3–35.
- [18] Callister, W.D.; Rethwisch, D.G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 8th ed.; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 2018.
- [19] Kollár, L.P.; Springer, G.S. *Mechanics of Composite Structures*; Cambridge University Press: London, UK, 2003.
- [20] Sarika, P.R.; Nancarrow, P.; Khansaheb, A.; Ibrahim, T. Bio-based alternatives to phenol and formaldehyde for the production of resins. *Polymers* 2020, 12, 2237.
- [21] Culkova, K.; Khouri, S.; Straka, M.; Rosova, A. Ecological and economic savings of fly ash using as geopolymer. *Rocz. Ochr. Sr.* 2018, 20, 73–88.
- [22] Dong, C.; Davies, I.J. Optimal design for the flexural behavior of glass and carbon fiber reinforced polymer hybrid composites. *Mater. Des.* 2012, 37, 450–457.
- [23] Smith, W.F.; Hashemi, J. *Foundations of Materials Science and Engineering*, 6th ed.; McGraw-Hill Education: New York, NY, USA, 2019.
- [24] Zaharia, S.M.; Enescu, L.A.; Pop, M.A. Mechanical performances of lightweight sandwich structures produced by material extrusion-based additive manufacturing. *Polymers* 2020, 12, 1740.
- [25] Baca Lopez, D.M.; Ahmad, R. Tensile mechanical behaviour of multi-polymer sandwich structures via fused deposition modelling. *Polymers* 2020, 12, 651.
- [26] Yan, J.; Wang, G.; Li, Q.; Zhang, L.; Yan, J.D.; Chen, C.; Fang, Z. A comparative study on damage mechanism of sandwich structures with different core materials under lightning strikes. *Energies* 2017, 10, 1594.
- [27] Nayak, S.K.; Singh, A.K.; Belegundu, A.D.; Yen, C.F. Process for design optimization of honeycomb core sandwich panels for blast load mitigation. *Struct. Multidiscip. Optim.* 2013, 47, 749–763.
- [28] Xiang, L.; Gangyan, L.; Chun, H.W.; Min, Y. Optimum design of composite sandwich structures subjected to combined torsion and bending loads. *Appl. Compos. Mater.* 2012, 19, 315–331.
- [29] Nikbakt, S.; Kamarian, S.; Shakeri, M. A review on optimization of composite structures Part I: Laminated composites. *Compos. Struct.* 2018, 195, 158–185.
- [30] Heimbs, S.; Mehrens, T.; Middendorf, P.; Maier, M.; Schumacher, A. Numerical Determination of the Nonlinear Effective Mechanical Properties of Folded Core Structures for Aircraft Sandwich Panels. In Proceedings of the 6th European LS-DYNA Users' Conference, Gothenburg, Sweden, 29–30 May 2007.
- [31] Heimbs, S.; Middendorf, P.; Hampf, C.; Hähnel, F.; Wolf, K. Aircraft Sandwich Structures with Folded Core under Impact Load. In Proceedings of the International Conference on Sandwich Structures, Porto, Portugal, 6–8 May 2008.
- [32] Bisagni, C.; Lanzi, L.; Ricci, S. Size and Topological Optimization for Crashworthiness Design of Helicopter Subfloor. In Proceedings of the 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Atlanta, Georgia, 4–6 September 2002.
- [33] Adel, I.S.; Steven, L.D. Weight and cost multi-objective optimization of hybrid composite sandwich structures. *Int. J. Comp. Met. Exp. Meas.* 2017, 5, 200–210.

- [34] Hambric, S.A.; Shepherd, M.R.; Schiller, N.H.; Snider, R.; May, C. Quieting a rib-framed honeycomb core sandwich panel for a rotorcraft roof. *J. Am. Helicopter Soc.* 2017, 62, 1–10.
- [35] Debeleac, C.; Nechita, P.; Nastac, S. Computational investigations on soundproof applications of foam-formed cellulose materials. *Polymers* 2019, 11, 1223.
- [36] Chen, S.; Zhu, W.; Cheng, Y. Multi-objective optimization of acoustic performances of polyurethane foam composites. *Polymers* 2018, 10, 788.
- [37] Khan, M.S.; Abdul-Latif, A.; Koor, S.S.R.; Petrù, M.; Tamin, M.N. Representative cell analysis for damage-based failure model of polymer hexagonal honeycomb structure under the out-of-plane loadings. *Polymers* 2021, 13, 52.
- [38] Sohoul, A.; Yildiz, M.; Suleman, A. Design optimization of thin-walled composite structures based on material and fiber orientation. *Compos. Struct.* 2017, 176, 1081–1095.
- [39] Gillet, A.; Francescato, P.; Saffre, P. Single- and multi-objective optimization of composite structures: The influence of design variables. *J. Compos. Mater.* 2010, 44, 457–480.
- [40] Ghafil, H.N.; Jármay, K. Dynamic differential annealed optimization: New metaheuristic optimization algorithm for engineering applications. *Appl. Soft Comput.* 2020, 93, 106392.
- [41] Houmat, A. Optimal lay-up design of variable stiffness laminated composite plates by a layer-wise optimization technique. *Eng. Optimiz.* 2018, 50, 205–217.
- [42] Virág, Z.; Szirbik, S. Finite element modal analysis of a hybrid stiffened plate. *Ann. Univ. Petroşani Mech. Eng.* 2019, 21, 115–120.
- [43] Delgado, S.D.R.; Kostal, P.; Cagánová, D.; Cambál, M. On the possibilities of intelligence implementation in manufacturing: The role of simulation. *Appl. Mech. Mater.* 2013, 309, 96–104.
- [44] Farkas J. Jármay K. *Fémszerkezetek innovatív tervezése*, Gazdász-Elasztik Kiadó és Nyomda, 2015, 592 old.
- [45] Khalkhali, A.; Khakshournia, S.; Nariman-Zadeh, N. A hybrid method of FEM, modified NSGAI and TOPSIS for structural optimization of sandwich panels with corrugated core. *J. Sandw. Struct. Mater.* 2014, 16, 398–417.
- [46] Corvino, M.; Iuspa, L.; Riccio, A.; Scaramuzzino, F. Weight and cost oriented multi-objective optimization of impact damage resistant stiffened composite panels. *Comp. Struct.* 2009, 87, 1033–1042.
- [47] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inaer_Airbus_Helicopters_EC145_T2_JP7991183.jpg (accessed on 10 June 2021).
- [48] Zenkert, D. *An Introduction to Sandwich Construction*; Engineering Materials Advisory Services (EMAS): London, UK.; Stockholm, Sweden, 1995.
- [49] 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 (accessed on 10 June 2021).
- [50] Product Data of Fibreglass/Phenolic Honeycomb Publication ATU 122b. 2007. Available online: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HRP_eu.pdf (accessed on 23 April 2021).
- [51] Alaa Al-Fatlawi, Jármay Károly, Kovács György: Esettanulmány helikopter kompozit padlólemeze optimalására, *GÉP*, 2022, 2, 38–42.