

NAPELEMES SZENDVICS PANELEK OPTIMÁLIS MÉRETEZÉSE MŰHOLDAS ALKALMAZÁSOKHOZ

OPTIMUM DESIGN OF SOLAR SANDWICH PANELS FOR SATELLITES APPLICATIONS

Alaa Al-Fatlawi*, Dr. Jármai Károly **, Dr. Kovács György ***

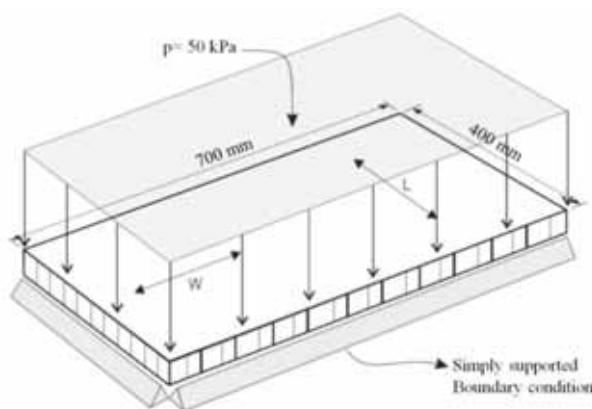
ABSTRACT

The aim of the article was to verify the optimum design of solar sandwich panels for microsatellites applications. The sandwich panel consists of aluminium honeycomb core and aluminium materials facesheets. In this study, a methodology for a combined weight and/or cost optimization for sandwich panel with aluminium facesheets and honeycomb core is presented. The fmincon Solver Constrained Nonlinear Minimization / Interior Point Algorithm was used to solve the single objective function the weight or the cost of the honeycomb sandwich panel. The Multiobjective optimization technique was applied to minimize the weight and the cost of the sandwich panel included the Weighted Normalized Method with Excel Solver program and Genetic Algorithm Solver with Pareto front in Matlab program. The weight and/or the cost of the sandwich panel are the objective functions subjected to required constraints based on total stiffness (bending and shear stiffness), total deflection (bending and shear deflection), facing skin stress (bending load), core shear stress, facing skin stress (end loading), overall panel buckling (critical bending and shear buckling load), shear crimping load, skin wrinkling (critical stress and load) and intracell buckling (facesheet dimpling). The design variables are thicknesses of core and facesheets. The use of sandwich construction results in light structure.

1. BEVEZETÉS

A szendvicsszerkezeteket gyakran használják napelemes alkalmazásokban. A szendvicsszerkezet két vékony kompozit lapból áll, amelyek között egy könnyű magréteg található. A szendvicsszerkezetek kialakítása lehetővé teszi a külső homloklemek számára az axiális terhelések, hajlítónyomatékok és síkbeli nyírás viselését, míg a méhsejtmag a normál hajlító nyírást veszi fel. A szendvicsszerkezetek hajlamosak a meghibásodásokra a normál nagy helyi feszültségkoncentrációk miatt, a mag / homloklemez összeállításának heterogén jellege miatt. Ezért az elemek beépítésénél réteges betéteket kell alkalmazni, hogy eloszlassák a csatlakozások pontszerű terhelését. A szendvicspanel lapokat általában

alumíniumötvözetből vagy kompozit anyagokból készítik. A magot általában méhsejt vagy alumínium habszerkezet felhasználásával gyártják [1,2]. A műholdas szendvicspanel szabadon felfekvő peremmel, alumínium homloklemezrel és méhsejtvázas maggal rendelkezik. A szendvicspanelt egyenletes nyomásnak ($p = 50 \text{ kPa}$) teszik ki és deformációnak (2 mm) a szendvicspanel bármely pontján. Kiszámításra került az optimális fedőlap és magvastagság a legkisebb súly és költség elérése céljából. Feltételezzük, hogy a felső és az alsó lapok azonos vastagságúak. A szatellit szendvicspanel műszaki adatai az 1. táblázat szerint (lásd az **1-2. ábrát**) [3].



1. ábra Méhsejt szendvicspanel, amely mind a négy oldalon szabadon felfekvő peremfeltétellel rendelkezik, egyenletesen elosztva (50 kN/m^2) terheléssel a felső lapon.

2. ALUMÍNÍUM MÉHSEJT MAGSZERKEZET

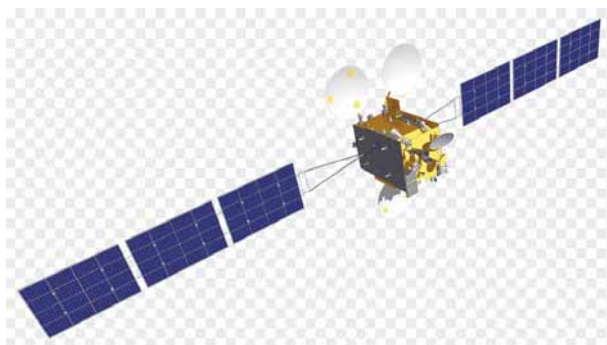
A méhsejt szendvicspanelek jelentik a legkönnyebb megoldást a nyomó- vagy hajlító terhelések esetén a speciális alkalmazásoknál. A méhsejt szendvicsmagokat méhsejt sejtekké formált vékony csíkok felhasználásával állítják elő. A méhsejt-geometria nem izotróp, hosszirányban nagyobb merevségű. A mag közel izotróp módon viselkedik a síkbeli terhelések esetén, ha szendvic-konfigurációban állítják össze [4-7]. Az alumínium méhsejt magot számos területen

* doktorandusz, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

*** egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Gyártástudományi Intézet, 3515 Miskolc, Egyetemváros

alkalmazzák és különféle ágazatokban, például a tömegközlekedési iparban, a hajózási ágazatban, az építőiparban stb. [8-18]. Alapanyagként az alumínium méhsejt magot szendvicspanelekben használják, és padlókon, tetőkön, ajtók, válaszfalak, homlokzatok, munkafelületeknél, automata gépekhez és minden olyan termékhez, amely optimális merevség/tömeg arányt igényel. Az alumínium méhsejt, mint a panelek magja, számos előnnyel rendelkezik, minthogy könnyű, merev, tűzálló, valamint összenyomódási, nyíró- és korrózióállósága jelentős. Az alumínium méhsejt mag használható a lamináris áramlású szellőzés terelőjeként és a kinetikus energia ütközésselnyelőjeként. A méhsejt magjának sűrűsége a fólia vastagságától és a sejtek átmérőjétől függ. A méhsejt magjának a **2. táblázatban** bemutatott mérnöki anyagjellemzői (lásd a **3. ábrát**) ideálisak számos alkalmazáshoz, például légi konténerekhez [19], vagy műholdas szendvicspanelekhez [20].

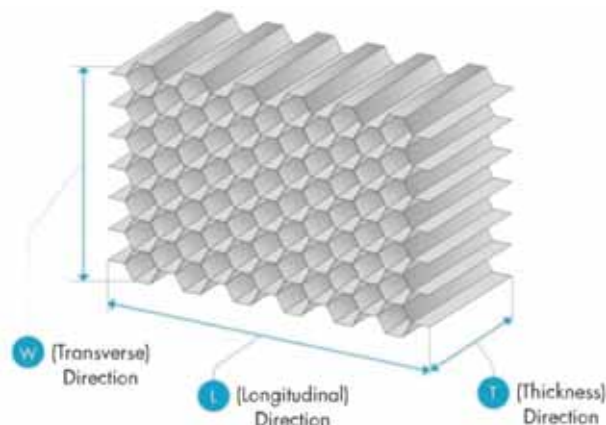


2. ábra A műholdas panelek szerkezete (ultra-nagy merevség és szilárdság egységnyi tömegre vonatkoztatva).

A felső és alsó alumínium ötvözetű héjak a leggyakrabban használt fémanyagok az űrhajók gyártásában. Előnyei a nagy szilárdság/tömeg arány, a nagy alakíthatóság és a könnyű megmunkálás, a hegeszthetőség és az elérhetőség alacsony költség mellett [20]. A műhold felső és alsó oldallapja, a napelem panel alumíniumból (ötvözet 5251 H24) állt. Az **1. táblázat** a panel tipikus homlokzati anyagainak tulajdonságait mutatja.

1. táblázat Tipikus szendvics panel héj mechanikai jellemzői [20].

Az alumínium héj ötvözet (5251 H24)	
Tipikus húzó/nyomó szilárdság [MPa]	150
Rugalmassági modulus húzás/nyomás [GPa]	70
Poisson arány	0.33
Tipikus kikeményedett rétegvastagság [mm]	0.5
Tipikus rétegtömeg [kg/m ²]	1.35



3. ábra Alumínium méhsejtvázás szerkezet.

2. táblázat Az alumínium méhsejt mechanikai jellemzői [20].

		Nyomás		Lemez nyírás			
Sűrűség	Cella méret	Stabilizált		L – irány		W – irány	
		Szilárdság	Modulus	Szilárdság	Modulus	Szilárdság	Modulus
kg/m ³	mm	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
83	6	4.6	1000	2.4	440	1.5	220

3. EGYCÉLFÜGGVÉNYES OPTIMÁLÁS AZ EXCEL SOLVER PROGRAM ÉS A MATLAB PROGRAM HASZNÁLATÁVAL

Az Excel Solver és a Matlab program (fmincon Solver/Interior Point Algorithm) használatával minimalizálták a szendvicspanel teljes tömegét, amely magában foglalja a felső és az alsó alumínium lapok súlyát, valamint a méhsejt magot, elhanyagolva a kötőanyag súlyát.

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

ahol W_t a szendvicspanel teljes tömege, ρ_f az homlok sűrűsége, l a hossza, b a szendvicspanel szélessége, t_f az homlok lap vastagsága, ρ_c a méhsejt magjának sűrűsége és t_c a méhsejtmag vastagsága.

A szendvicspanel teljes költségét, amely magában foglalja a felső és az alsó alumínium homlok lapok anyagának költségeit, valamint az alumínium méhsejt mag költségét, minimálisra csökkent a Matlab program és az Excel Solver program használatával.

$$C_t = 2 \rho_f l b t_f C_f + \rho_c l b t_c C_c \quad (2)$$

ahol C_t a szendvicspanel teljes költsége euróban, C_f a laplap anyagának költsége egységnyi tömegre (4,61 €/kg) [20]. C_c a méhsejt mag anyagának

térfogategységre vetített költsége (18 mm magmagasság esetén 20 €/m^3) (€/m^3).

A tervezési változók

A méhsejtváz magassága és a héjlemez vastagsága.

$$10 \text{ mm} \leq t_{c,opt} \leq 100 \text{ mm} \quad (3)$$

$$0.1 \text{ mm} \leq t_{f,opt} \leq 5 \text{ mm} \quad (4)$$

A méretezési feltételek

A teljes merevség

Az alumínium szendvicspanelek teljes merevségének korlátozása magában foglalja a hajlítási és nyírómerevségeket.

$$D_{f,x} \geq D_{min} \quad (5)$$

$$D_{f,x} = (E_f t_f h^2 b) / (2(1-\nu_f^2)) \quad (6)$$

$$D_{min} = (EI)_{min} = K_b P_{max} l^3 / \delta_{max} \quad (7)$$

ahol, $K_b = 5/384$, $S = b h G_c$, $G_c = G_w$ és $h = t_c + t_f$.

A szendvicspanel számított merevségének $D_{f,x}$ a globális koordináta rendszerben nagyobbak kell lennie, mint a szendvicsszerkezet minimális merevsége D_{min} ami δ_{max} és P_{max} adatok felhasználásával került kiszámításra. Ahol S a nyírómerevség, K_b a hajlítási alakváltozási együttható, E_f a héj rugalmassági modulusa, ν_f a Poisson arány és h a héj középpontok távolsága [19].

A teljes lehajlás

Az alumínium szendvicspanel teljes lehajlásának korlátozása magában foglalja a hajlítási és a nyírási alakváltozást:

$$\delta = (K_b P l^3 / D_{f,x}) + (K_s P l / S) \leq \delta_{max} \quad (8)$$

ahol $K_b = 5/384$ és $K_s = 1/8$.

A számított összehajlásnak, δ kisebbnek kell lennie, mint a méhsejtváz szendvicspanel δ_{max} (2 mm) értéke, ahol K_s a nyírási lehajlási együttható. A panel szabadon felfekvő mind a négy oldalán.

A héj feszültség

A méhsejtváz szendvicspanel héj feszültségének korlátozása a következő:

$$\sigma_f = M / h t_f b \leq \sigma_{f,y} \quad (9)$$

A számított héj feszültségnek kisebbnek kell lennie, mint a folyáshatár $\sigma_{f,y}$ (150 MPa). Ahol $M = P l^2 / 8$ a maximális hajlítónyomaték [20].

A mag nyírófeszültség számítása

A méhsejt szendvicspanel nyírófeszültségének korlátozása a következő:

$$\tau_c = F / h b \leq \tau_{c,y} \quad (10)$$

ahol $F = P / 2$ a legnagyobb nyíróerő.

A mag számított nyírófeszültségének kisebbnek kell lennie, mint a mag anyagának a nyírófeszültség határa $\tau_{c,y}$ (1,5 MPa) keresztirányban (W).

A héj feszültség számítása

A méhsejt szendvicspanel héj feszültségére vonatkozó feltétel:

$$\sigma_f = P / (2 t_f b) \leq \sigma_{f,y} \quad (11)$$

A számított héj feszültségnek kisebbnek kell lennie, mint a fedőlap folyáshatára $\sigma_{f,y}$ (150 MPa).

A panel kihajlás számítása

A méhsejt szendvicspanel kihajlásának korlátozása:

$$P_{b,cr} = \pi^2 D_{f,x} / (\beta l^2 + \pi^2 D_{f,x} / S) \geq P \quad (12)$$

ahol $\beta = 1$ és $P_{b,cr}$ a kritikus erő terhelés. Az a számított terhelés, amelyenél a kihajlás bekövetkezne P (14 kN).

A nyírási fodrosodás számítása

A méhsejtváz szendvicspanel nyíró terhelésének korlátozása a következő:

$$P_{cr} = t_c G_c b \geq P \quad (13)$$

ahol P_{cr} a kritikus nyírási fodrosodási terhelés, G_c a méhsejt mag nyírási rugalmassági modulusa és E_c a mag rugalmassági modulusa nyomás esetén.

A kiszámított terhelés, amelyenél a nyírási fodrosodás bekövetkezne nagyobb, mint a maximális terhelés P (14 kN).

A héj ráncosodás számítása

A méhsejtváz szendvicspanel héjlemez ráncosodásának korlátozása a következő:

$$\sigma_{f,cr} = 0,5 (E_f E_c G_c)^{1/3} \geq \sigma_{f,y} \quad (14)$$

$$P_{cr,min} = t_f (2t_f E_f E_c / 3t_c (1 - 2)) \geq P / b \quad (15)$$

Az a feszültség szint, amelyenél a fedőréteg ráncosodása jelentkezne, jóval meghaladja a fedőrétegre jellemző (150 MPa) folyáshatárt, amint azt az **1. táblázat** mutatja. A számított terhelés, amelyenél a fedőréteg ráncosodna $P_{cr,min}$ nagyobb, mint az alkalmazott szélességre vonatkoztatott maximális terhelés (P/b) (35 kN/m).

4. AZ EGYCÉLFÜGGVÉNYES OPTIMÁLÁS EREDMÉNYEI

Az Excel Solver program eredményei alapján műholdas alkalmazáshoz a méhsejt szendvicspanel minimális súlya és költsége optimális fedőlemezzel és magvastagságokkal a **3. és 4. táblázatban** látható.

3. táblázat. Minimálja a súly célfüggvényt, és figyelmen kívül hagyja a költség célfüggvényt az Excel Solver és a Matlab [21] program segítségével a méhsejt szendvicspaneljén.

	W_{min}	$t_{f,opt}$	$t_{c,opt}$
	[kg]	[mm]	[mm]
Excel	2.2934	0.487	66.972
Matlab	2,2397	0,505	63,518

4. táblázat. Minimálja a költség célfüggvényt, és figyelmen kívül hagyja a súly célfüggvényt az Excel Solver és a Matlab program segítségével a méhsejt szendvicspaneljén.

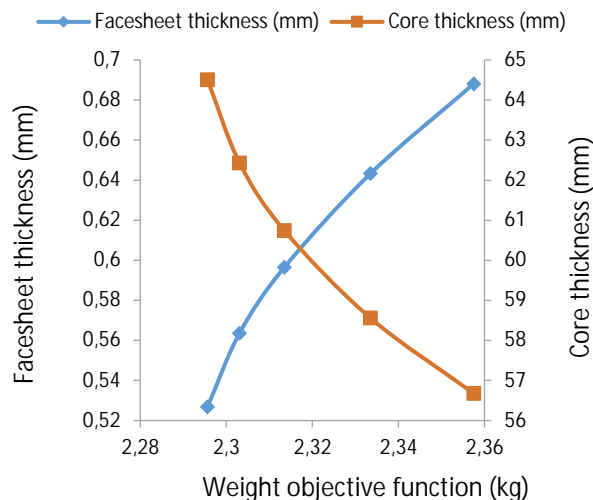
	C_{min}	$t_{f,opt}$	$t_{c,opt}$
	[€]	[mm]	[mm]
Excel	21.65734	1.025124	46.64538
Mathlab	21.6573	1.0251	46.6453

5. táblázat: A súly- és a költség célfüggvény minimálásának eredményei különböző súlyozásokkal.

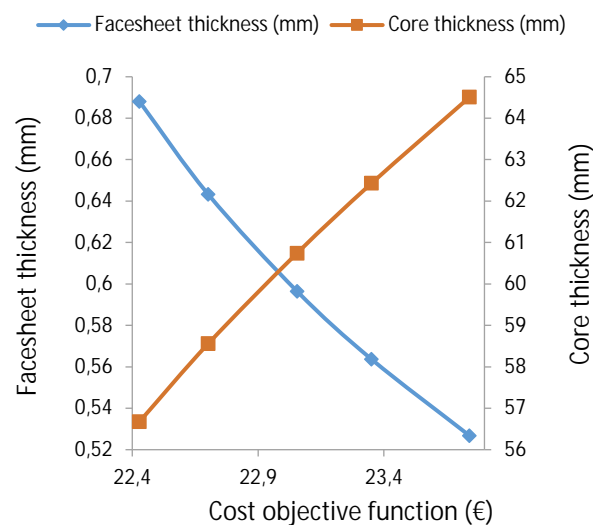
Ty	Alumínium ötvözet (5251 H24)		W_{min}	C_{min}	$t_{f,opt}$	$t_{c,opt}$
No	W_1 (%)	W_2 (%)	[kg]	[€]	[mm]	[mm]
1	50	50	2.357	22.42	0.68	56.67
			5184	8431	8089	5031
2	60	40	2.333	22.70	0.64	58.55
			5075	1801	3268	7914
3	70	30	2.313	23.05	0.59	60.74
			4871	5143	6447	2672
4	80	20	2.303	23.35	0.56	62.43
			0815	1422	3624	0378
5	90	10	2.295	23.74	0.52	64.50
			6145	0916	6742	8660

5. A TÖBBCÉLFÜGGVÉNYES OPTIMÁLÁS EREDMÉNYEI

A többcélű optimálás a súlyra és a költségre együtt történt az Excel Solver program (Súlyozott normalizált módszer) segítségével, amint az **5. táblázat** mutatja, ahol W_1 az 1. célfüggvény súlyozott értéke (súly célfüggvény) és W_2 a 2. célfüggvény súlyozott értéke (költségfüggvény).



4. ábra A súly célfüggvény minimális értékei az optimális fedőlemez- és magvastagsággal esetén, ahol a szendvicspanel alumínium méhsejtmagból és alumínium fedőlemezekből áll.



5. ábra A költség célfüggvény minimális értékei az optimális fedőlemez- és magvastagsága esetén, ahol szendvicspanel alumínium méhsejtmagból és alumínium fedőlemezekből áll.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk célja egy könnyű szendvicspanel megtervezése volt, amely felhasználható a műholdas alkalmazásoknál. A szendvicspanel alumínium méhsejtmagból áll, felső és alsó alumínium fedőlemezekkel. Az optimálást a szendvicspanel

számára dolgoztuk ki az Excel Solver program segítségével. A célfüggvények a műhold paneljének összsúlya és/vagy költsége voltak. A tervezési feltételeket a következőkben vettük figyelembe: teljes merevség (hajlítási és nyírómerevség), teljes elhajlás (hajlításból és nyírásból), a héj feszültség (hajlító terhelés), a mag nyírófeszültsége, a héj feszültség (maximális terhelés), a panel teljes deformációja (kritikus hajlítás és nyírási alakváltozás), nyíró fodorosodást okozó terhelés, héjlemez ráncosodása (kritikus feszültség és terhelés) és méhsejten belüli kihajlás, valamint a tervezési változók méretkorlátozása. A szendvicspanel optimális értékeit két különböző program (Excel Solver program és Matlab program) segítségével mutattuk be.

Az Excel Solver program használatával megvalósuló egycélű függvényes optimális alumínium-méhsejtváz szendvicspanel, amely biztosítja a minimális súlyt (2,2934 kg), az optimális vastagságú alumínium fedőlappal és méhsejtmaggal a következő értékű (0,4874 mm, 66,9722 mm). Az optimális alumínium szendvicspanel, amely biztosítja a minimális költséget (21.6573 €), az optimális vastagságú alumínium lap és a méhsejt mag a következő értékű (1.0251 mm, 46.6453 mm).

Az egycélű függvényes Matlab Program (fmincon Solver Constrained Nonlinear Minimization Interior Point Algorithm) alkalmazásával az optimális alumínium-méhsejtváz szendvicspanel, amely biztosítja a minimális súlyt (2,2397 kg), az alumínium fedőlemez és a méhsejt mag optimális vastagságával (0,505 mm, 63,518 mm), valamint az optimális alumínium szendvicspanel, amely biztosítja a minimális költséget (21,6589 €), az optimális vastagságú alumínium lap és a méhsejt mag (1,02568 mm, 46,6377 mm). A két optimális módszerrel kapott eredmény jó egyezést mutat.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatásával a K 134358 nyilvántartási számú projekt keretében valósult meg.

IRODALOM

- Gasser, F., Nader, A., Ahmed, H.: Finite element analysis for satellite structures. Springer, London (2013).
- Bitzer, T.: Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing. Chapman and Hall, London (1997).
- Zenkert, D.: An introduction to sandwich construction. Student edition. Chamelton Press, Oxford, London (1995).
- Zenkert, D.: The handbook of sandwich construction. Engineering Materials Advisory Services Ltd. (EMAS), Emas Publishing, London (1997).
- Kollár, L., Springer, G.: Mechanics of composite structures. Cambridge University Press, London (2003).
- Jun, W., Dai, G.: Development of the hybrid insert for composite sandwich satellite structures. Composites: Part A, 42(8), 1040–1048 (2011).
- Craig, L.: Design, analysis, fabrication, and testing of a nanosatellite structure. Faculty of the Virginia

Polytechnic Institute and State University, Virginia (2002).

- Daisuke, S., Noboru, Y., Koji, T.: Thermal design of photovoltaic / microwave conversion hybrid panel for space solar power system. IEEE Journal of Photovoltaics, 7(1), 374 – 382 (2017).
- Byoung, J. K., Dai, G. L.: Development of a satellite structure with the sandwich T-joint. Composite Structures 92(2), 460–468 (2010).
- Boudjemai, A., Bouanane, M.H., Merad, L., Si Mohammed A.M.: Small satellite structural optimisation using genetic algorithm approach. In 3rd International Conference on Recent Advances in Space Technologies, Institute of Electrical and Electronics (IEEE), Istanbul, Turkey (2007).
- Cho, H.K., & Rhee, J.: Vibration in a satellite structure with a laminate composite hybrid sandwich panel. Composite Structures 93(10), 2566–2574 (2011).
- Virág, Z., Szirbik, S.: Finite element modal analysis of a hybrid stiffened plate. Annals of the University of Petroşani, Mechanical Engineering, 21, 115-120 (2019).
- Alaa, A., Jármay, K., Kovács, Gy.: Optimum design of honeycomb sandwich plates used for manufacturing of air cargo containers. Editura Politehnica, Academic Journal of Manufacturing Engineering, 18(2), 116-123 (2020).
- Teng, L., Zheng, X., Jin, H.: Performance optimization and verification of a new type of solar panel for microsatellites. International Journal of Aerospace Engineering, (2), 1–14 (2019).
- Alaa, A., Jármay, K., Kovács, Gy.: Theoretical and numerical comparison study of aluminum foam sandwich structure. Pollack Periodica, An International Journal for Engineering and Information Sciences, 15(2), 1-15 (2020).
- Virág, Z.: Determination of optimum diameter of a welded stiffened cylindrical shell. Pollack Periodica, 4(1), 41-52 (2009).
- Rion, J., Månson, J., Leterrier, Y.: Ultra-light photovoltaic composite sandwich structures. Lausanne, EPFL, France (2008).
- Timár, I; Borbély, T; Horváth, P.: Szendvicselemez optimalizálása, In: XXIV. Nemzetközi Gépész Találkozó, Déva, Románia (2016) pp. 425-430. , 6 p.
- Bode, W.: Evaluation of a Lightweight Composite Bottom Panel for Air Cargo Containers. Master Thesis, Faculty of Aerospace Engineering, Department of Aerospace Structures & Materials, Netherlands (2016).
- Hexcel
Homepage, https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf, last accessed 2020/03/10.
- Achille, M.: Optimization in practice with Matlab for engineering students and professionals. Cambridge University Press, United States of America (2015).