

GÉPÉSZETI SZERKEZET TÖBBVÁLTOZÓS OPTIMÁLÁSA GYÁRTÁSI TECHNOLOGIA ÉS KÖLTSÉGELEMZÉS ALAPJÁN

MULTIVARIABLE OPTIMISATION OF MECHANICAL STRUCTURE BASED ON MANUFACTURING METHOD AND COST ANALYSIS

*Bodnár Dávid**, *Jármai Károly***

ABSTRACT

Solving the problems of designing a structure while keeping costs reasonable are part of the routine for a mechanical engineer. By using intuition and expertise, an engineer can quickly come up with a solution, but these solutions are often rooted in assumptions and previous solutions of other designers. By utilizing a multivariable optimization approach, there is the possibility to find the optimal solution for the problem based on framework conditions instead of assumptions. Framework conditions are the objective functions, which can be the load case, expected lifetime, available materials, manufacturing method and allocated budget.

ABSZTRAKT

A gépészmérnökök mindennapi rutinjához tartozik, hogy egy szerkezet tervezésével kapcsolatos problémákat úgy oldjanak meg, hogy közben a gyártási költségek alacsonyok maradjanak. Az intuíció és a szakértelem felhasználásával egy mérnök gyorsan találhat megoldást, de ezek a megoldások gyakran feltételezésekben és más tervezők korábbi megoldásaiban gyökereznek. A többváltozós optimalizációs megközelítés alkalmazásával lehetőség nyílik arra, hogy feltételezések helyett keretfeltételek alapján találjuk meg a probléma megoldását. A keretfeltételek, melyek a célfüggvények is lehetnek: terhelések, az elvárt élettartam, a rendelkezésre álló alapanyagok, gyártási módszer és a rendelkezésre álló költségvetés.

1. BEVEZETÉS

A tervezési és gyártási folyamatok során rendkívül fontos a költségek szem előtt tartása. Ezek a költségek a választott alapanyag fajlagos költségétől és a gyártási folyamatok költségvonzatától függenek. A gyártási költségek részei azok az elemek amik közvetlenül hatnak a szerkezet méretére, kialakítására vagy alakjára. Ezeket

a költségeket függvénybe foglalva lehetőség adódik a keretfeltételek alapján optimális megoldást keresni az adott feladatra.

Az optimális méretezés célfüggvény és feltételrendszer kidolgozását igényli, így a szerkezetanalízis átgondoltabb véghezvitelét, ezzel arra ösztönözve a tervezőt, hogy ne a rutin vezérelje [1].

A költség szem előtt tartása mellett fontos még, hogy a szerkezet hatékony legyen. Ez akkor mondható el, ha a szerkezet a keretfeltételeknek maradéktalanul megfelel.

2. KERETFELTÉTELEK

A keretfeltételek a szerkezetet leíró mennyiségek, két csoportot különböztetünk meg: előre megadott paraméterek és tervezési változók. Az előre megadott paraméterek nem változnak az optimalizálás során, míg a tervezési változók igen. A tervezőn múlik milyen értékeket rögzít és miket hagy meg tervezési változónak. Rögzítve lehet: a szerkezeti elemek maximális hossza, az anyag fizikai és mechanikai jellemzői, a szerkezet alakja, keresztmetszet-területek.

Az élettartam alatt várhatóan jelen lévő terhelések előre becsülhetők, és a tervezési feladatoknál rendkívül fontosak is. A terhek és erők a szerkezet tömegéből, a szerkezet ember általi használatából és a természeti hatásokból eredhetnek. A szerkezetnek képesnek kell lennie elviselni és biztonságosan továbbítani azokat az alapra. Terhelések lehetnek statikusak vagy dinamikusak, és különböző irányokból és forrásokból származhatnak.

A tervezés során a terhelések számos szempontból befolyásolják a szerkezet méretét és az anyagok kiválasztását.

Biztonság: A tervezett szerkezetnek elegendő szilárdsággal kell rendelkeznie ahhoz, hogy megfeleljen a terheléseinek anélkül, hogy deformálódna vagy

* mérnök, Emerson Automation FCP Kft. Eger, PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

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

meghibásodás lépne fel. A biztonsági tényezők bevezetése fontos a váratlan terhelések és változások kezelése érdekében. A biztonsági tényező általában a szakítószilárdság számított értékét módosítja.

Élettartam: A tervezés során figyelembe kell venni a szerkezet élettartamát. Ezt az Eurocode EC3[2] alapján érdemes elvégezni. Az erőtani követelmények teljesülésének ellenőrzéséhez az előírt tervezési élettartam mellett a szabvány teherbírási és használhatósági határállapotokat definiál. A határállapotok megfelelését igazolni kell[3]. A tervezési állapotok lehetnek tartós, ideiglenes és rendkívüli állapotok. Az időtől függő, halmozódó jellegű hatások esetén a határállapotok (pl. a fáradás) igazolásakor a használati élettartamot is figyelembe kell venni.

Általánosságban elmondható, hogy az élettartamot különböző típusú szerkezeteknél különböző tervezési élettartamok határozzák meg. Például:

Közúti híd: Elvárt élettartam 75-100 év.

Építőipari szerkezetek: 50-100 év.

Repülőgép szárnyai: 20-30 év.

Autó: Átlagosan 10-15 év.

Ezen számok természetesen általánosítások és a konkrét tervezési élettartam függ a tervezői szándékoktól, a használati körülményektől és az alkalmazott anyagoktól.

Anyagválasztás: A terhelések befolyásolják az anyagok kiválasztását is. Nem jelenhet ki biztosan, hogy egy nagyobb szakító szilárdságú anyag előnyösebb minden esetben, ezért a tervező számos alapanyag közül választhat[4]. Tömör anyagból csak nagyon kis méretű alkatrészeket gazdaságos gyártani, nagyobb méreteknél az acélszerkezetet úgy alakítják ki, hogy egydimenziós elemekből épüljenek fel.

3. KÖLTSÉGELEMELK

3.1 ANYAGKÖLTSÉG

Az anyagköltség a szerkezethez szükséges alapanyag súlyától függ. A fajlagos anyagköltség acél esetében 0,7-1 EUR/kg, alumíniumnál 1,95 – 3,1 EUR/kg, rozsdamentes acélnál 2,9 – 5,1 EUR/kg[5].

$$K_M = k_m \rho V \quad (1)$$

Ahol K_M [kg] az anyagköltség, V [mm³] a térfogat és ρ az anyag sűrűsége. Acél esetében $7,85 \times 10^{-6}$ kg/mm³, alumínium $2,7 \times 10^{-6}$ kg/mm³, rozsdamentes acél $7,78 \times 10^{-6}$ kg/mm³[6].

3.2 GYÁRTÁSI KÖLTSÉG

A gyártási költség időalapú. A költség tehát arányos a gyártáshoz szükséges idővel és a munkaerő költséggel. Utóbbi költség országoként változik.

$$K_F = k_F \sum_i T_i \quad (2)$$

Ahol, K_F [EUR] a gyártási költség, k_f [EUR/min] a fajlagos gyártási költség és T_i [min] a gyártási idő.

3.3 FELÜLETELŐKÉSZÍTÉSI IDŐ

A felület előkészítés része a felület tisztítása, homokszórása stb. jelenti. A tisztítási idő a felület nagyságától függ, és a következőképpen határozhatjuk meg:

$$T_{SP} = \theta_{ds} a_{sp} A_s \quad (3)$$

Ahol A_s [mm²] a felület nagysága, $a_{sp} = 2 \times 10^{-6}$ min/mm², és θ_{ds} a nehézségi tényező.

3.4 HEGESZTÉSI MUNKÁK IDEJE

A hegesztési feladat több részfeladatból áll össze. Ezek a részfeladatok a következők: előkészítés, összefűzés, tényleges hegesztési idő, elektróda csere, salakolás és köszörülés.

Az előkészítés és összeszerelés ideje az alábbi közelítő képlet segítségével számítható ki:

$$T_{w1} = C_1 \theta_{dw} \sqrt{\kappa \rho V} \quad (4)$$

A hegesztési idő közelítő számítása:

$$T_{w2} = \sum_i C_{2i} a_{wi}^2 L_{wi} \quad (5)$$

Ahol C_1 a hegesztési technológiától függ, értéke általában 1, a C_2 a technológián felül a pozíció (fej felett, függőleges) és a normál hegesztés (downhand) közötti időkülönbséget is figyelembe veszi. θ_{dw} a nehézségi tényező, κ az elemek száma. A nehézségi tényező a szerkezet összetettségétől, hogy az térbeli vagy síkbeli, illetve a felhasznált elemek típusától. A javasolt értéktartomány 1 – 4 között van. a_{wi} a varrat mérete, L_{wi} a hegesztés hossza[7–9].

1. táblázat Hegesztési idők $T_{w2}(\text{min/m})$ a varratméret $a_w(\text{mm})$ függvényében sarokvarratokra. Downhand pozícióban.

Hegesztési technológia	$a_w[\text{mm}]$	$10^3 T_{w2}$
SMAW	1-6	$0.7889a_w^2$
GMAW-CO2	1-6	$0.3394a_w^2$
FCAW	1-6	$0.2302a_w^2$
FCAW-MC	1-6	$0.4520a_w^2$
GTAW/TIG	1-6	$1/(-0,012+1,079/a_w^{1.5})$

Ahol:

SMAW – Bevonat elektródás kézi ívhegesztés

GMAW-CO2 – Védőgáz ívhegesztés CO₂-vel

FCAW – Porbeles ívhegesztés

FCAW-MC – Fémhuzalos ívhegesztés

GTAW/TIG – Wolfram elektródás védőgáz ívhegesztés

3.5 FESTÉSI IDŐ

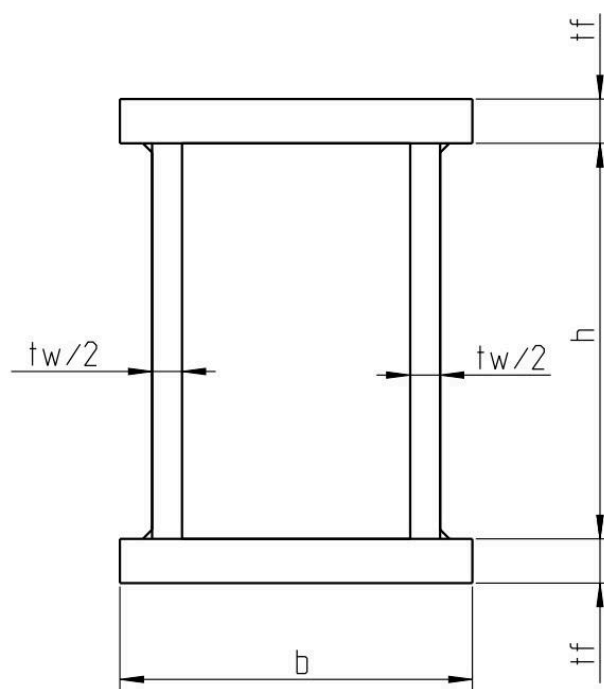
A festésnél alapozó és fedőfestéket feltételezve, a költséget meghatározhatjuk:

$$T_p = \theta_{dp}(a_{gc} + a_{tc})A_s \quad (4)$$

Ahol θ_{dp} a nehézségi tényező, $\theta_{dp}=1, 2$ vagy 3 vízszintes, függőleges vagy fejfeletti festés esetén. Alapozó festék paramétere $a_{gc} = 2 \times 10^{-6} \text{ min/mm}^2$, fedőfesték paramétere $a_{tc} = 2,85 \times 10^{-6} \text{ min/mm}^2$.

4. KÖLTSÉGSZÁMÍTÁS

A számítást két különböző esetre vizsgáljuk meg, az első esetben az övlemez és a gerinclemez vastagsága tervezési változó és egymástól független, a második esetben pedig a vastagságuk egyenlő. Ezzel azt bemutatva, hogy a tervezési megkötések milyen mértékben képesek befolyásolni a gyártási költségeket. Az iparban megfigyelhető egy racionálási folyamat, amelynek során a raktáron tárolt alapanyagok mennyiségét és a variációk számát is csökkentik, ezzel csökkentve a k_f fajlagos gyártási költséget.



1. ábra Szekrényszelvényű tartó ábrája

Az optimális méretezéshez használt képletek:

Keresztmetszet terület:

$$A = 2h \frac{t_w}{2} + 2bt_f \quad (5)$$

Másodrendű nyomaték:

$$I_x = \frac{2h^3 \frac{t_w}{2}}{12} + 2bt_f \left(\frac{h}{2} + \frac{t_f}{2} \right) \quad (6)$$

A keresztmetszeti tényező:

$$W_x = \frac{I_x}{\frac{h}{2}} \quad (7)$$

Nyomaték:

$$M_b = \frac{FL}{4} \quad (8)$$

Szakítószilárdság méretezési feltétel:

$$\delta_{max} = \frac{M_b}{W_x} \leq \frac{f_g}{\gamma_m} \quad (9)$$

A terhelés mértéke $F=10$ [kN], a fesztáv $L = 15$ [m]. A szelvény keresztmetszete a teljes hosszon állandó.

A számítást 2 esetre vizsgáljuk meg, az első esetben az övlemez és a gerinclemez vastagsága tervezési változó és egymástól független, a második esetben pedig a vastagságuk egyenlő. Ezzel azt bemutatva, hogy a tervezési megkötések milyen mértékben képesek befolyásolni a gyártási költségeket. Az iparban megfigyelhető egy racionálási folyamat, amelynek során a raktáron tárolt alapanyagok mennyiségét és a variációk

számát is csökkentik, ezzel csökkentve a k_f fajlagos gyártási költséget.

Az optimaláláshoz nemlineáris ARG módszert használtam, ami a lokális optimumot keresi meg a bemenő feltételeknek megfelelően. A kapott eredmények általános esetre vizsgálva: $A_{opt} = 2075,86 \text{ mm}^2$ és $I_{x1} = 23006830,48 \text{ mm}^4$. Az eredmények ha $t_w = t_f$ paramétert használjuk $A_2 = 3677,93 \text{ mm}^2$ és $I_{x2} = 23901316,12 \text{ mm}^4$. A különbség 78 %. Annak a vizsgálata, hogy ez a gyártási költség béli különbség megtérül-e a fajlagos gyártási költségben gyártónként és termelési helyszínenként is eltérhet, ezért minden esetben egyedi mérlegelést kíván. Ezt a mérlegelést megkönnyítheti, ha a különböző lehetséges megoldások folyamatosan követve vannak, és a tervezés során például ADT-t (Autogenetic Design Theory) alkalmazva a végleges megoldás az optimális megoldás lehet[10].

5. ÖSSZEGZÉS

A hatékony innováció a modern ipari vállalatoknál kulcsfontosságú[11]. A tervezési megkötések azonban nagy mértékben befolyásolhatják a végső költségeket. A bemutatott példában tervezési paraméternek véve, hogy állandó vastagságú alapanyagra legyen szükség a gyártáshoz a szükséges nyersanyag költségek nagy mértékben megugrottak. Ennek az oka, hogy a nyomott övlemeznél más vastagságú alapanyag lenne optimális. A festési költségek nem változnak számottevően, mert ott a szelvény teljes hossza dominál, ami tervezési állandó. Kijelenthető tehát, hogy érdemes az optimalálás során kapott értékeket követni, de egyéni mérlegelés alapján eltérhetünk azoktól. A bemutatott példánál a vastagság állandóvá tétele egyszerűbbé tenné a raktározási feladatokat, a gyártási és előállítási költségeket a méretgazdaságosság miatt csökkentené, míg a festési, felületvédelmi feladatokra minimális hatással van.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A C2307874 számú projekt a kulturális és innovációs minisztérium nemzeti kutatási fejlesztési és innovációs alapról nyújtott támogatásával, a kdp-2023 pályázati program finanszírozásában valósult meg.



7. IRODALOM

- [1] FARKAS, József és Károly JÁRMAI. *Optimum Design of Steel Structures* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-36867-7. Elérhető: doi:10.1007/978-3-642-36868-4

- [2] EN 1993-1-1: EUROCODE 3: *Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*. évszám nélkül.
- [3] AL NAGEIM, H., T. J. MACGINLEY és T. J. MACGINLEY. *Steel structures : practical design studies*. B.m.: Taylor & Francis, 2005. ISBN 9781482263558.
- [4] ADÁM DOBOSY. TERVEZÉSI HATÁRGÖRBÉK NAGYSZILÁRDSÁGÚ ACÉLOKBÓL KÉSZÜLT, ISMÉTLŐDŐ IGÉNYBEVÉTELŰ SZERKEZETI ELEMKEHEZ. 2018.
- [5] *Steel Prices & Indices* [online]. [elérés. 2024-02-10]. Elérhető: <https://mepsinternational.com/gb/en/prices-and-indices>
- [6] DR. JÁRMAI KÁROLY. *VÉKONYFALÚ HEGESZTETT SZERKEZETEK KÖLTSÉGSZÁMÍTÁSA KÜLÖNBÖZŐ GYÁRTÁSI TECHNOLÓGIÁKKAL* [online]. évszám nélkül [elérés. 2024-03-01]. Elérhető: <https://real.mtak.hu/79867/>
- [7] MELA, Kristo és Markku HEINISUO. Weight and cost optimization of welded high strength steel beams. *Engineering Structures* [online]. 2014, **79**, 354–364. ISSN 01410296. Elérhető: doi:10.1016/j.engstruct.2014.08.028
- [8] CHAYOUKHI, S ; ; Z ; BOUAZIZ és A ZGHAL. COSTWELD: A COST ESTIMATION SYSTEM OF WELDING BASED ON THE FEATURE MODEL. *Advances in Production Engineering & Management*. 2009, **4**, 263–274. ISSN 1854-6250.
- [9] JÁRMAI, K és J FARKAS. *Cost calculation and optimisation of welded steel structures*. 1999.
- [10] SOLTÉSZ, László és Szilárd NAGY. The connection between ADT and evolutionary methods in product development. In: *Journal of Physics: Conference Series* [online]. B.m.: IOP Publishing Ltd, 2021. ISSN 17426596. Elérhető: doi:10.1088/1742-6596/1935/1/012001
- [11] SOLTÉSZ, László, László KAMONDI és László BERÉNYI. Project management success factors: in search of product development project specialities. *Design of Machines and Structures* [online]. 2020, **10**(2), 114–122. ISSN 17856892. Elérhető: doi:10.32972/dms.2020.022