

Dr Jármai Károly

Acélkeret tervezése és optimalása tűzvédelemre

A tűzvédelem általános definíciója azt jelenti, hogy az adott szerkezet, vagy szerkezeti elem meddig képes a tűz kitörése után azt a funkciót ellátni, amire tervezték. A tűzvédelem fontosságára az elmúlt években a terrorcselekmények és a balesetek hívták fel a figyelmet (1. ábra). Hogyan lehet a szerkezeteket magas hőmérsékleten történő alkalmazásra tervezni.

Mennyibe kerül a biztonság?

Az acélszerkezeteket számos előnyük miatt sok épület tartószerkezeténél alkalmazzák. Mindazonáltal ezen szerkezetek tűz esetén védelem nélkül hamar tönkremennek. Az acél jó hővezető képessége, anyagjellemzői erős hőmérsékletfüggésével együtt rövid idő alatt nagy alakváltozásokat eredményezhetnek, ami az épület összedőléséhez vezethet. Acélkeretek tervezése tűzvédelemre az Eurocode 1 és 3 1.2 fejezete [1 - 4] alapján történhet. Az acél védve lehet olyan anyagokkal, mint kőzetgyapot, gipszkarton, beton, hőszigetelő festék, valamint vízzel töltött szerkezetek. *E cikkben egy keret tűzvédelemre tervezésének optimalását mutatjuk be.* Egy viszonylag egyszerű keretmodellt választva bemutatjuk, hogyan kapcsolható össze a két terület hegesztett acélszerkezeteknél (2. ábra). Összehasonlítást végeztünk négyzet szekrényszelvényű (SHS) oszlop és négyzet-, négyszög szelvényű (SHS, RHS) gerendák alkalmazásával egy tartály alátámasztó keretnél. A keret tartály alátámasztásra szolgál és függőleges és vízszintes terhelése van (3. ábra). Zártszelvényű oszlopot és gerendát használunk azért, hogy csökkentsük a szerkezet térfogatát és tömegét. Kihajlási és helyi horpadási feltételeket veszünk figyelembe a tervezésnél.

Tűzvédelemre optimalva a szerkezetet megmutatjuk, mennyibe kerül a biztonság, milyen viszony van a keret tömege és a tűzállósága között. Első lépésben a szerkezet tömegét minimáljuk mint célfüggvényt. Részletesebb célfüggvény lehet a későbbiekben mely tartalmazza az anyag-, gyártási- és szerelési költségeken kívül a tűzvédelem költségeit is. *Ebben a cikkben csak a tűzvédelem és az anyagfelhasználás viszonya szerepel. Egyéb tűzvédelmi megoldások itt nem kerülnek elemzésre.*

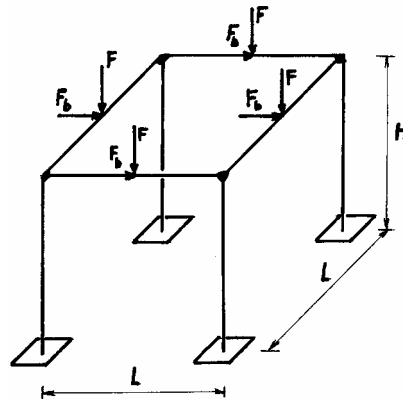


1. ábra Épülettűz, WTC támadás, tűzvédelmi kísérlet, kohászati acéldaru

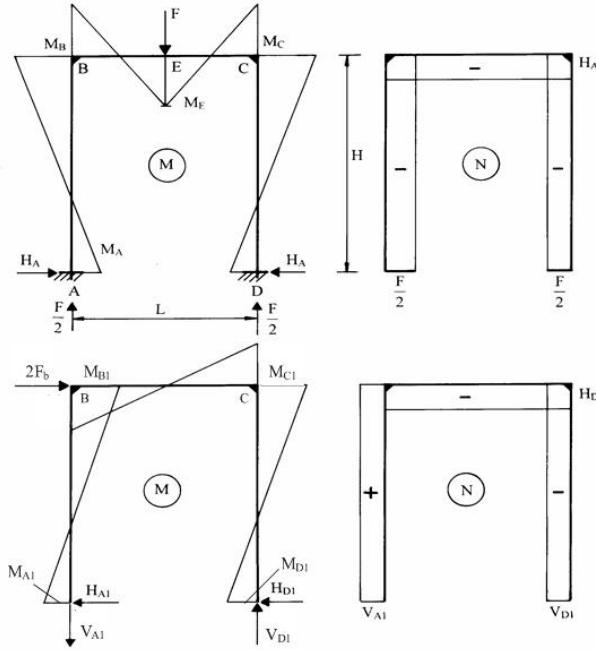
A keretelemek számítása

A gerendák négyszög, vagy négyzetszelvényből (RHS, SHS) készülnek, melynél a változók h_2 , b_2 , t_2 , az oszlopok négyzetszelvényből (SHS) készülnek, melynél a változók h_1 , t_1 . A négyszögcszelvényű (RHS) gerenda fő méretei a magasság h , a szélesség b és a vastagság t (4. ábra).

A hajlítónyomatékok és erők a függőleges F erőből a 3. ábrán láthatók Glushkov et al. [5] számítási képletei alapján [6]:

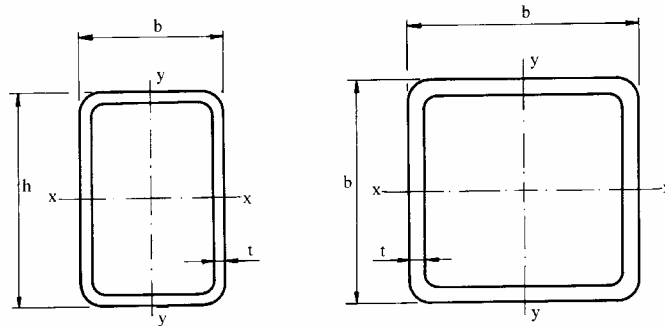


2. ábra Tartó keretszerkezet függőleges és vízszintes terheléssel



3. ábra Hajlítónyomatékok és a nyomóerők a keretnél

Mind az oszlop, mind a gerenda zártszelvényű. A hajlítónyomatékok és a nyomóerők a keret egyes elemeiben és pontjaiban számíthatók.



4. ábra Az RHS és SHS szelvények

Hajlítónyomatékok a vízszintes keretben számítható a vízszintes F_b erő hatására. A vízszintes erő a függőleges tizedrésze.

Stabilitási-feszültségi feltétel a **gerendánál** (E pont, nincs tűzvédelem) [3] alapján

$$\frac{H_A + H_{D1}}{\chi_{2,min} A_2 f_{y1}} + \frac{k_{yy2} M_E}{W_{y2} f_{y1}} + \frac{k_{yz2} M_{Bz}}{W_{z2} f_{y1}} \leq 1, \quad f_{y1} = \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

Ahol H_A, H_{D1} nyíróerők, M_E, M_{Bz} nyomatékok, $\chi_{2,min}$ hajlítási horpadási tényező, A_2 keresztmetszet terület, W_{y2}, W_{z2} keresztmetszeti tényezők, k_{yy2} és k_{yz2} interakciós tényezők, f_y a folyáshatár.

Stabilitási-feszültségi feltétel a **gerendánál** (E pont, tűzvédelemmel) [4] szerint

Az elem 3-as osztályú szelvény, mely kétirányú hajlításnak és nyomásnak van kitéve

$$\frac{H_A + H_{D1}}{\chi_{2,min} k_{y,\Theta} A_2 f_{y1}} + \frac{k_{yy2} M_E}{W_{y2} k_{y,\Theta} f_{y1}} + \frac{k_{yz2} M_{Bz}}{W_{z2} k_{y,\Theta} f_{y1}} \leq 1, \quad \text{ahol } k_{y,\Theta} \text{ a hőmérséklettől függő korrekciós tényező.}$$

Stabilitási-feszültségi feltétel az **oszlopnál** (C pont, nincs tűzvédelem) [3] alapján

$$\frac{N_1}{\chi_{1,min} A_1 f_{y1}} + \frac{k_{yy1} (M_C + M_{B1})}{W_{y1} f_{y1}} + \frac{k_{zz1} (M_C)}{W_{z1} f_{y1}} \leq 1, \quad \text{ahol } N_1 \text{ az oszlopban ható nyomóerő.}$$

Stabilitási-feszültségi feltétel az **oszlopnál** (C pont, tűzvédelemmel) [4] alapján

Az elem 3-as osztályú szelvény, mely kétirányú hajlításnak és nyomásnak van kitéve

$$\frac{N_1}{\chi_{1,min,f} A_1 k_{y,\theta} f_{y1}} + \frac{k_y (M_c + M_{B1})}{W_{y1} k_{y,\theta} f_{y1}} + \frac{k_z M_c}{W_{z1} k_{y,\theta} f_{y1}} \leq 1.$$

A zártszelvény alkalmazása miatt nincs szükség az elcsavarodó kihajlás vizsgálatára.

A lemez elemek helyi horpadása

A helyi horpadás számításához az [3] által megadott határkarcsúságokat használjuk.

A gerenda övlemeze $\frac{b_2}{t_2} - 3 \leq 42\varepsilon$, a gerenda gerinclemeze $\frac{h_2}{t_2} - 3 \leq 69\varepsilon$, az oszlop övlemeze $\frac{b_1}{t_1} \leq 42\varepsilon$, az oszlop gerinclemeze $\frac{h_1}{t_1} - 3 \leq 42\varepsilon$, ahol tűzvédelemre tervezés esetén $\varepsilon = 0.85 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$.

A hőmérséklet és az anyagjellemzők meghatározása emelkedő hőmérséklet esetén

A hőmérséklet emelkedését tűzvédelem nélküli szerkezetnél [2, 4] alapján határozhatjuk meg:

Kezdőidőnek vesszük a $t_i = 0$ értéket, az időperiódus: $\Delta t_i = 5$ másodperc, $t_i = t_i + \Delta t_i$ [sec],

Az idő tartománya $0 \leq t_i \leq t_{max}$ [sec],

ahol t_{max} lehet $\frac{1}{2}$, 1, $1\frac{1}{2}$, 2, 4 óra, ami 1800, 3600, 5400, 7200, 14400 [sec].

Az acél hőmérséklete változik $20 [^\circ\text{C}] \leq \theta_a \leq 1200 [^\circ\text{C}]$ között.

A kezdőértékek a következők:

$$\theta_a = 20 [^\circ\text{C}], \Delta\theta_a = 0 [^\circ\text{C}], \rho_m = 7850 \text{ kg/m}^3.$$

A fajhő a hőmérséklet függvényében a szabvány szerint meghatározható.

A gáz hőmérséklete a tűzhatásnak kitett szerkezeti elem környezetében (szabványos hőmérséklet-idő görbe)

$$\theta_g = 20 + 345 \log\left(8 \frac{t_i}{60} + 1\right) [^\circ\text{C}],$$

A nettó hőáramlási fluxus $\dot{h}_{netc} = \alpha_c (\theta_g - \theta_a)$,

A nettó hőszugárzási fluxus $\dot{h}_{netr} = \phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma \left[(\theta_g + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4 \right] [\text{W/m}^2]$,

ahol a konfigurációs tényező $\phi = 1$, az elem felületi sugárzóképesége $\varepsilon_m = 0.8$, a tűz sugárzóképesége $\varepsilon_f = 1.0$, a Stephan Boltzmann állandó $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} [\text{W/m}^2\text{K}^4]$.

A teljes nettó hő fluxus a hőszugárzási és a hőáramlási fluxusok összegéből számítható

$$\dot{h}_{netd} = \dot{h}_{netc} + \dot{h}_{netr}, \frac{A_m}{V_m} = \frac{1}{10^{-3} t_2}, \text{ ahol } \frac{A_m}{V_m} \text{ a szelvénytényező védelem nélküli acélelemnél.}$$

A hőmérsékletváltozás $\Delta\theta_a = k_{sh} \frac{\frac{A_m}{V_m} \dot{h}_{netd} \Delta t_i}{c_a \rho_m}$, ahol $k_{sh} = 1$.

Az acélelem felületi hőmérséklete $\theta_a = \theta_a + \Delta\theta_a$. A számítás iterációval történik.

Az acél anyagjellemzőinek meghatározása magasabb hőmérsékleteken

A folyáshatár és a Young modulus meghatározása magasabb hőmérsékleten a Eurocode 3 1.2 része [4] alapján történik. Az 1. táblázat tartalmazza a redukciós tényezőket 20 és 1200 C° között.

1. táblázat A folyáshatár és a Young-féle modulus redukciós tényezői a hőmérséklet függvényében

Hőmérséklet (°C)	$k_{y,\theta}$ redukciós tényező (f_y -ra)	$k_{E,\theta}$ redukciós tényező (E_a -ra)
20	1,000	1,000
100	1,000	1,000
200	1,000	0,900
300	1,000	0,800
400	1,000	0,700
500	0,780	0,600
600	0,470	0,310
700	0,230	0,130

800	0,110	0,090
900	0,060	0,0675
1000	0,040	0,0450
1100	0,020	0,0225
1200	0,000	0,0000

A folyáshatár egy adott hőmérsékleten számítható a $k_{y,\theta}$ redukciós tényezőtől $f_{y,\theta} = k_{y,\theta} f_y$. A Young-féle modulusz egy adott hőmérsékleten számítható a $k_{E,\theta}$ redukciós tényezőtől $E_{a,\theta} = k_{E,\theta} E_a$. A tűzállóság nem a tényleges, véletlenszerűen előforduló és méretű tűzre vonatkozik, hanem a szabványos tűzre (ISO 834) [8].

Numerikus adatok

A keret magassága és a gerendahossz $H = 4000$, $L = 4000$ mm. A függőleges és vízszintes erők $F = 75$ kN, $F_b = 0.1F$ normál tervezés esetén és $F = 0.74 \times 75$ kN, $F_b = 0.1F$ tűzvédelemre tervezve. A redukciós tényező $\eta_{fi} = 0.74$ a terhelésnél, tűzvédelemre tervezés esetén. A Young-féle modulusz, a nyírási rugalmassági modulusz és a folyáshatár $E = 2.1 \times 10^5$ MPa, $G = 0.8 \times 10^5$ MPa, $f_y = 355$ MPa. A keret kilengő, 3-as osztályú szelvényekkel. Az optimalizálást a részecskecsoport módszerrel (PSO) végeztük.

A minimizálandó célfüggvény a keret tömege $m = \rho(4HA_1 + 4LA_2)$. Változók az SHS oszlopok (b_1 , t_1) és az RHS gerendák (h_2 , t_2) méretei. Ha SHS gerendák kerülnek alkalmazásra, akkor az SHS oszlopoknál a képletekben a 2-es indexet kell használni és a változók b_2 és t_2 .

Gyártási feltétel $b_2 = \frac{h_2}{2} \leq b_1$. Azért, hogy megkönnyítsük a legyártást $b_2 = b_1$ javasolt. Ebben az esetben a változók száma 3.

Optimálási eredmények

A 2. táblázat mutatja a keret optimális méreteit. Ha azonos SHS szelvényt alkalmazunk mind az oszlopnál, mind a gerendánál ez 3 változót jelent (SHS 3v). Különböző SHS szelvények esetén 4 változó van (SHS 4v), ha különböző SHS és RHS szelvényeket tekintünk, akkor is 4 változónk van, feltételezve, hogy az RHS szelvény szélessége fele a magasságának. A Dutta [9] által megadott táblázatokat használtuk az SHS és RHS szelvények méreteire. A két különböző SHS szelvény választása esetén kapjuk a legjobb megoldást.

2. táblázat Keretoptimalizálási eredmények (tűzvédelem nélkül)

Szelvény	h_1 (mm)	t_1 (mm)	h_2 (mm)	t_2 (mm)	m (kg)
SHS 3v	180	5	-	4	775.57
SHS 4v	200	5	150	4	765.53
SHS-CHS 4v	180	5	200	5	782.24

A keretoptimalizálást azonos SHS szelvény esetén tűzvédelemre is elvégeztük. A tűzvédelem ideje 225 és 4500 másodperc között változik. Mind a folytonos, mind a diszkrét méretek meghatározására kerültek. Az optimumok mutatják, hogy a növekvő tűzvédelmi idő jelentős tömegnövekedéssel jár. Ha 450-ről 4500 másodpercre növekszik az idő (10-szeresére) akkor a tömegnövekedés 1561-ről 4703 kg-ra növekszik (3-szorosára). Egy plusz egy óra biztonság tűz esetén háromszoros acélbeépítéssel érhető el.

3. táblázat A keretoptimalizálási eredményei (tűzvédelem esetén)

Tűzvédelmi idő (sec)	h_1 (mm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	K (kg)
225	250	8	6.3	1695.19
450	250	8	6.3	1699.19
900	250	8	6.3	1699.19
1800	250	12	8	2317.63
2700	220	20	12	3028.55
3600	220	25	18	3865.90
4500	220	35	22	4703.10

Az 3. táblázat viszonylag nagy vastagságértékei, melyek a hosszú tűzvédelmi idő miatt szükségesek teoretikusak, az összehasonlítás célját szolgálják. Hengerelt zártszelvénynél ilyen vastagság nem létezik, de hegesztett szekrényszelvények gyárthatók ezekben a méretekben is.

Összefoglalás

Az acélkeretek optimalálása tűzvédelemre viszonylag új terület. Egy nyomástartó edényt tartó keret méretezését mutattuk be először tűzvédelem nélkül, úgy hogy különböző szelvényeket használtunk az oszlopnál és a gerendánál. Különböző szelvényeket használva (SHS, RHS) a keret tömege is különböző. A legjobb megoldást az jelenti, ha mind az oszlop, mind a gerenda SHS szelvényű, de eltérő szelvényűek, így négy ismeretlen volt a feladatnál. Megvizsgáltuk ugyanezt a keretet tűzvédelem figyelembevételével. Ha bizonyos ideig viselnie kell a szerkezetnek a terhet, miközben a tűz miatt az anyag ellágyul, ez azt jelenti, hogy minél tovább szeretnénk biztosítani a teherviselő képességet, annál több anyagot kell beépítenünk a szerkezetbe. Jelen számpélda azt mutatja, hogy egy óra biztonság tűzvédelem szempontjából háromszor annyi acél beépítését igényeli. A tervező számára nagyon fontos tudni, hogy milyen viszony van a szerkezet biztonsága és tömege között. Az alkalmazott optimáló módszer nagyon robusztus, a módosított részecskecsoport módszer. A számítások azt mutatják, hogy az optimalásnak nagy szerepe van. További vizsgálatot igényel a tűzvédelmi bevonat és más védőanyagok alkalmazása.

Irodalom

- [1.] European Committee for Standardization (CEN); Eurocode 1 (ENV 1991-1) - Basis of Design and Actions on Structures – Part 1: Basis of Design, Brussels, Belgium, May 2000.
- [2.] European Committee for Standardization (CEN); Eurocode 1 (ENV 1991-1-2) - Basis of Design and Actions on Structures – Part 2-2: Actions on Structures - Actions on Structures Exposed to Fire, Brussels, Belgium, April 2002.
- [3.] European Committee for Standardization (CEN); Eurocode 3 (ENV 1993-1-1) - Design of Steel Structures, Part 1 – General Rules and Rules for Buildings, Brussels, Belgium, May 2003.
- [4.] European Committee for Standardization (CEN); Eurocode 3 (ENV 1993-1-2) - Design of Steel Structures, Part 1.2: General Rules - Structural Fire Design, Brussels, Belgium, December 2003.
- [5.] Glushkov,G., Yegorov,I., Yermolov ,V., Formulas for designing frames, MIR Publishers, Moscow, 1975.
- [6.] Farkas,J.& Jármái,K.: Economic design of metal structures. Rotterdam, Millpress, 2003, 340 p. ISBN 90 77017 99 2
- [7.] Farkas,J.,Jármái,K.: Analysis and optimum design of metal structures, Balkema Publishers, Rotterdam, Brookfield, 1997, 347 p. ISBN 90 5410 669 7.
- [8.] International Standards Organisation; ISO 834 - Fire Resistance Test – Elements of Building Construction, Genève, Switzerland, 1975.
- [9.] Dutta,D.: Hohlprofil-Konstruktionen. Ernst & Sohn, 532 p. 1999, ISBN 3-433-01310-1

Dr. Jármái Károly

egyetemi tanár, Miskolci Egyetem