

Szikra Csaba

Zárt téri tüzek modelljei (2.rész)

Az utóbbi időben gyakran szimulációs technikákat használunk a zárt téri tüzek elemzésére, melynek célja lehet például hő- és füstelvezető berendezések hatékonyságának vizsgálata. A modellek jóságát (pontosságát) számos tényező befolyásolja. A sok közül talán az egyik legfontosabb az alkalmazott tűzmodell.

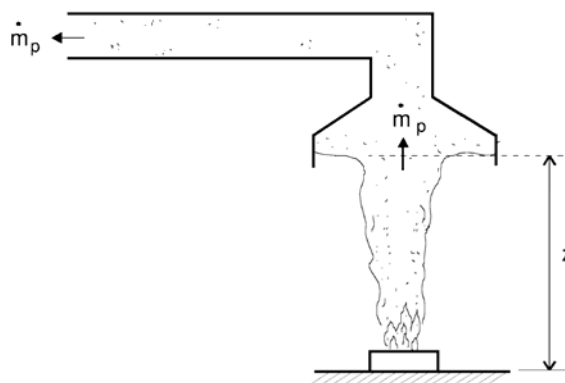
Szimulációs technikák alkalmazása esetén szakítanunk kell a fajlagos hőfelszabadulás alkalmazásának gyakorlatával (determinisztikus közelítés, tűzterhelés). Ennél sokkal pontosabb információra van szükségünk: a hőfelszabadulás teljesítményének időbeli alakulására. Ezért fontos megismernünk a nemzetközi irodalomban fellelhető különböző elvi megfontolásokon nyugvó, illetve mérésekkel alátámasztott zárt téri tűzmodelleket, melyekre építve a tűz hőteljesítményének és füstfejlesztő képességének időbeli lefolyása is számítható.

4. Tapasztalati úton származtatott csóvaegyenletek

A cikk első részében az ideális csóvamodellből származtatott egyenletek ismerttettem, melyek segítenek a fizikai folyamatok megértésében. A modellt összevetve tapasztalati eredményekkel, a fizikai folyamatot egyébként jellegre helyesen leíró egyenletek pontosíthatóvá válnak. A tapasztalati modellek segítségével az analitikus módon származtatott ideális csóva modell levezetése közben alkalmazott egyszerűsítő feltételek feloldásra kerültek.

4.1. Zukoski-féle csóvamodell

A Zukoski-féle [4] csóvamodell hasonlít leginkább az analitikus eszközökkel származtatott ideális csóvamodell egyenleteihez, hiszen a szerző mérések segítségével vetette össze az analitikus modell és a mért modell tömegáramait. A mérési eredményekkel pontosította az ideális modell együtthatóit. Adott magasságban, adott lángteljesítmény mellett egy elszívó ernyőben mérte a tömegáramot (7. ábra).



7. ábra A csóva tömegáram-mérésének elve

A szokásos környezeti jellemzőket használva, a Zukoski által pontosított tömegáram egyenlet a következő:

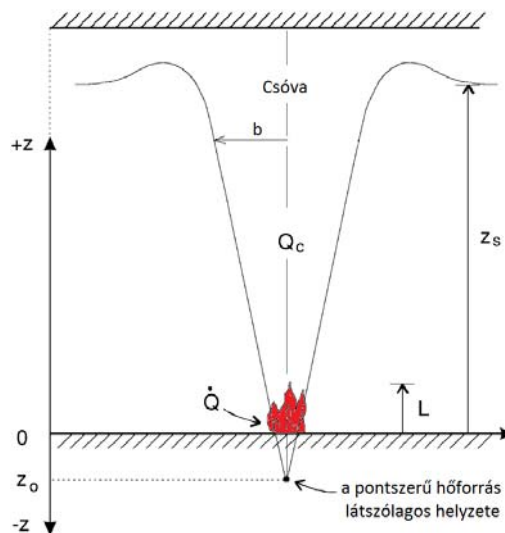
$$\dot{m}_p = 0.21 \cdot \left[\frac{\rho_{\infty}^2 \cdot g}{c_p \cdot T_{\infty}} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot \dot{Q}^{\frac{1}{3}} \cdot z^{\frac{5}{3}} = 0.074 \cdot \dot{Q}^{\frac{1}{3}} \cdot z^{\frac{5}{3}}$$

Mivel a két tömegáram-egyenlet meglehetősen hasonlít egymásra, igazolódni látszik az analitikus modell helyessége. Zukoski egyenlete alapján a hőmérsékletre és a sebességre vonatkozó egyenletet is

helyesnek tekinthetjük. A mérésből származtatott pontosítás azonban néhány lényeges feltételezésből származó pontatlanságot nem old fel (pl.: pontszerű hőforrás, sűrűségezonosság).

4.2. Heskestad féle csóvamodell

Heskestad [2] csóvamodellje az ideális modellhez képest jelentős előrelépés, mivel számos egyszerűsítő feltételt elhagy származtatása közben: a pontszerű forrás helyett bevezeti a padló síkja alatt definiált látszólagos pontszerű forrást, mely a tűz keletkezésének síkján már valódi kiterjedést takar; bevezette a konvektív lángteljesítményt (\dot{Q}_c), hiszen a csóva számos tulajdonsága nem az összes, hanem a konvektív teljesítménytől függ; a 3. ábrán bemutatott állandó hőmérséklet és sebességprofil helyett adott síkban Gaussféle normál eloszlást feltételezett, mely inkább hasonlít a csóván belüli sebesség – és hőmérséklet eloszlására (ΔT_0 – a tűz tengelyében a környezethez viszonyított hőmérsékletemelkedés, u_0 – függőleges feláramlás sebessége a tengelyben); elhagyta a Boussinesqsűrűségegre vonatkozó egyszerűsítő feltételét.



8. ábra Heskestad csóvamodellje

A pontszerű hőforrás látszólagos helyzetét (z_0) a tűz egyenértékű átmérője (tehát a kiterjedése) és a lángteljesítmény alapján az alábbi összefüggéssel határozhatjuk meg:

$$z_0(m) = 0.083 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1.02 \cdot D$$

Az egyenlet a Froud szám segítségével származtatott lángmagasság egyenletéből kiinduló tapasztalati egyenlet. A teljesítmény együtthatója felszíni tüzek mérései alapján lett pontosítva. z_0 értéke (tehát a pontszerű hőforrás látszólagos helyzete) lehet negatív (ekkor a tűz alatt helyezkedik el, mely fizikailag alacsony felületre vonatkozó fajlagos lángteljesítményt jelent), illetve pozitív (ekkor a tűz felett helyezkedik el, és nagy fajlagos lángteljesítményt jelent) is. A közepes lángmagasság egyenlete Heskestad modellje szerint is érvényes:

$$L(m) = 0.235 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1.02 \cdot D$$

A z_0 és L egyenletiben a \dot{Q} a konvekcióval és sugárzással a csóvába jutó (teljes) hőáramot jelenti, azonban a csóva termikus jellemzői szempontjából a konvektív hőáram (\dot{Q}_c) a meghatározó, hisz épp a konvektív hőáram a felhajtó erő forrása. A szokványos tüzekben a láng sugárzási vesztesége 20-40%, ezért a konvektív hőáramot

$$\dot{Q}_c = 0.6 + 0.8 \cdot \dot{Q}$$

összefüggéssel számíthatjuk. A pontszerű forrás látszólagos helyzetének bevezetésével az egyenletekben a magasság koordináta némiképp bonyolultabb alakot ölt ($z-z_0$), ettől eltekintve az egyenletek az ideális csóvamodell egyenleteihez hasonlóak. Az egyenletek csak a közepes lángmagasságon kívül (L) érvényesek. A csóva tengelyében a környezethez viszonyított hőmérséklet-emelkedést az alábbi összefüggés írja le:

$$\Delta T_0 = 9.1 \cdot \left[\frac{T_\infty}{g \cdot c_p^2 \cdot \rho_\infty^2} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot \dot{Q}_c^{\frac{2}{3}} \cdot (z - z_0)^{-\frac{5}{3}}$$

A fenti egyenletet az ideális csóvamodell egyenletével összevetve azt tapasztaljuk, hogy az együttható 5-ről 9.1-re változott. Ne feledjük, hogy ΔT_0 a csóva tengelyében a hőmérséklet (mely a hőmérséklet maximuma) és adott magasságban a hőmérséklet Gauss eloszlást mutat. A kitevők azonosak ideális csóvamodellben bevezetett kitevőkkel. A levegő szokásos paramétereivel a fenti egyenletet egyszerűbb alakra is hozhatjuk:

$$\Delta T_0 = 23.5 \cdot \left[\frac{\dot{Q}_c^{\frac{2}{3}}}{z - z_0} \right]^{\frac{5}{3}}$$

Heskestad modelljében a csóva rádiusza (tehát a szétterjedés mértéke) nem csak a magasságtól, hanem a csóva tengelyének hőmérsékletétől is függ:

$$b(m) = 0.12 \cdot \sqrt{T_0/T_\infty} \cdot (z - z_0)$$

A csóva tengelyében a felfelé haladó tömegáramot az alábbi egyenlettel számíthatjuk:

$$u_0 = 3.4 \cdot \left[\frac{g}{c_p \cdot T_\infty \cdot \rho_\infty} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\dot{Q}_c}{z - z_0} \right)^{\frac{1}{3}}$$

A szokásos környezeti jellemzőket helyettesítve a csóva tengelyében a feláramlás sebességére az alábbi egyszerűsített egyenletet kapjuk:

$$u_0 = 1.0 \cdot \left(\frac{\dot{Q}_c}{z - z_0} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Mivel a láng és a csóva esetében a környező levegőből történő bekeveredés mértéke különböző, Heskestad más egyenletet javasolt a két régió tömegáramára. A csóva tömegáramát az alábbi összefüggéssel közelíthetjük:

$$\dot{m}_p = 0.02 \cdot \left[\frac{\rho_\infty^2 \cdot g}{c_p \cdot T_\infty} \right]^{\frac{1}{3}} \cdot \dot{Q}_c^{\frac{1}{3}} \cdot z^{\frac{5}{3}} - 1.92 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{Q}_c$$

Az egyenletet összevetve az ideális csóva tömegáram egyenletével, azt tapasztaljuk, hogy az első tag változatlan, de egy additív taggal módosult az egyenlet. A szokásos környezeti jellemzőkkel az alábbi egyszerűbb forma adódik:

$$\dot{m}_p = 0.069 \cdot \dot{Q}_c^{\frac{1}{3}} \cdot z^{\frac{5}{3}} - 1.92 \cdot 10^{-3} \cdot \dot{Q}_c$$

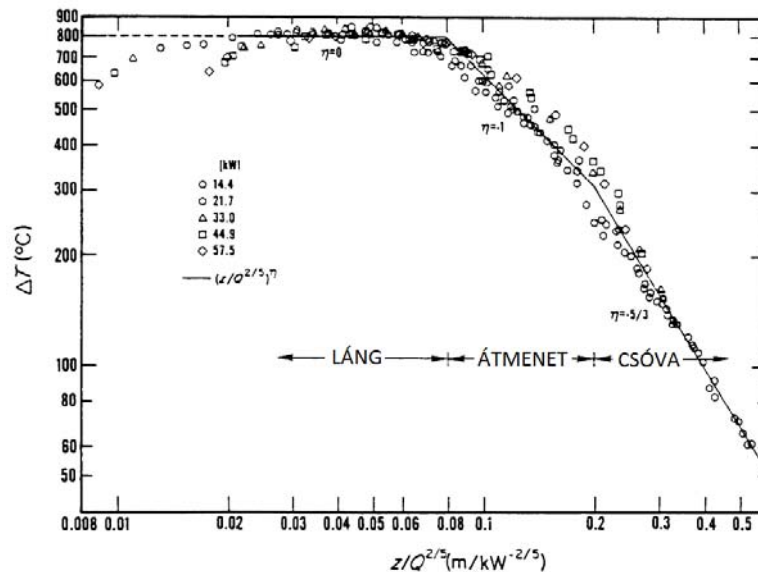
Az eredeti levezetésben a fajhő $c_p=1\text{kJ/kgK}$ értékkel szerepel. Mivel az 50%-os nedvességtartalmú 20°C-os levegőnek a fajhője $c_p=1.1\text{kJ/kgK}$, az együtthatókon az eredeti irodalomhoz képest módosítottam. A közepes lángmagasság szintjéig a tömegáramot az alábbi összefüggéssel közelíthetjük:

$$\dot{m}_p = 0.0056 \cdot \dot{Q}_c \cdot \frac{z}{L}$$

Vagyis a lángmagasság és a lángteljesítmény azonos kitevőre került.

4.3. McCaffrey féle csóvamodell

Már a közepes lángmagasság esetében megfigyelhető volt, hogy McCaffrey törekedett a dimenzióanalízis és a hasonlóságelmélet segítségével általánosítani a mérések közben szerzett tapasztalatokat. Az előző fejezetben láttuk, hogy a modellek pontosításának egyik lehetősége, hogy valamely jellemző alapján régiókra bontjuk a teljes csóvát. Egyik lehetséges módszer, hogy keressünk egy olyan változót ($z/Q^{2/5}$), mellyel eliminálódik valamely tulajdonsága a lángnak (9.ábra), nevezetesen bármely lángteljesítmény (mely most a teljes lángteljesítmény nem csak a konvektív komponens) esetében a mérés pontjai egymásra esnek.



9. ábra A csóva tengelyében a hőmérséktemelkedés különböző lángteljesítmények esetén (McCaffrey[1] mérései)

A 9. ábra szerinti mérési eredmények (melyek metán tüzek alapján készültek) azt mutatják, hogy 3 régióra érdemes bontani a csóvát.

4.4. Thomas-féle csóvamodell

5. Falak hatása a csóvákra

6. Hő- és füstterjedés a mennyezet alatt

7. Összefoglalás

- [1] McCaffrey, B., "Flame Height," SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1995.
- [2] Heskestad, G., "Fire Plumes," SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1995.
- [3] Blair J. Stratton, Determining Flame Height And Flame Pulsation Frequency And Estimating Heat Release Rate From 3D Flame Reconstruction, Fire Engineering Research Report 05/2, July 2005. (http://www.civil.canterbury.ac.nz/fire/pdfreports/Blair_Stratton_05.pdf)
- [4] Zukoski, E.E., Kubota, T., and Cetegen, B., "Entrainment in Fire Plumes," Fire Safety Journal, Vol.3, pp. 107–121, 1980.
- [5] Zárt téri tüzek modelljei (1.rész) Szikra Csaba

Szikra Csaba
BME Épületenergetikai és Épületgépészeti Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.
szikra@egt.bme.hu