

# **Hő- és füstelvezetés Méretezési elvek, módszerek,**

**2018. Január 25.**

**Lengyelfi László**

# ELMÉLETI ALAPOK 1.

© Szikra Csaba Hő- és füstelvezetés, füstmentesítés előadása 2012. BME ill. Védelem újságban megjelent cikksorozata alapján

**Lánggal égés során felszabaduló hő**  $\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g} D^{5/2}}$

Mc Caffrey dimenziótlan lángteljesítmény ( $\dot{Q}^*$ ) egyenletében a sűrűség, a fajhő és a hőmérséklet a tűz keletkezése előtti környezeti levegő jellemzői.  $\dot{Q}$  a tűz teljesítménye.

A tűz geometriai jellemzőiből alkotott dimenziótlan mennyiség a jellemző (vagy egyenértékű) átmérő és a közepes lángmagasság hányadosa  $L/D$ .

Mérési eredmények alapján a  $1 < \dot{Q}^* < 10^4$  tartományban (szokásos tüzek tartománya 2-10)

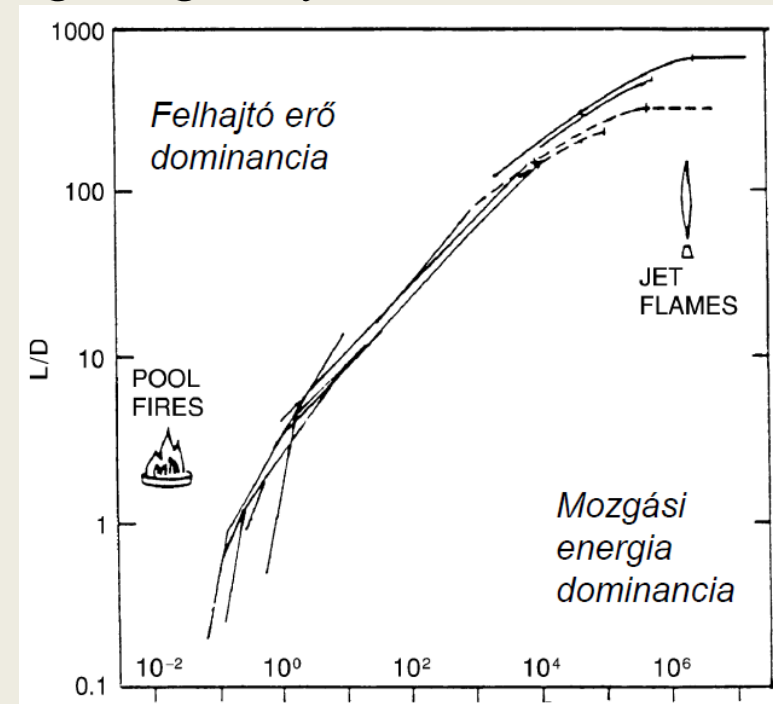
$$\frac{L}{D} = 3,7 \times (\dot{Q}^*)^{2/5} - 1,02$$

Szokásos környezeti paraméterek ( $\rho_\infty = 1,2 \text{ kg/m}^3$

;  $c_p = 1,1 \text{ kJ/kgK}$ ;  $T_\infty = 293 \text{ K}$ ;) mellett a közepes

lángmagasság a tűz teljesítményének függvényében

$$L = 0,235 \times \dot{Q}^{2/5} - 1,02 \times D$$



# ELMÉLETI ALAPOK 2.

## Hőfelszabadulás sebessége

$$\dot{Q} = A_f \times \dot{m}'' \times \chi \times \Delta H_c$$

ahol:

$\dot{Q}$ - Hőfelszabadulás sebessége RHR (MW)

$A_f$ - éghető anyag felülete (m<sup>2</sup>)

$\dot{m}''$  - fajlagos tömegveszteség (kg/m<sup>2</sup>sec)

$\chi$  - égés hatékonyságát kifejező hányados

$\Delta H_c$ - Égéshő (MJ/kg)

## Szabad felszíni tüzek fajlagos tömegvesztesége

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} \times (1 - e^{-k\beta D})$$

- ahol:
- D - egyenértékű tűzátmérő (m)

# ELMÉLETI ALAPOK 3.

Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	$\dot{m}''_c$ (kg/m <sup>2</sup> s)	$\Delta H_c$ (MJ/kg)	$k\beta$ (m <sup>-1</sup> )
<b>Cryogenics</b>				
Liquid H <sub>2</sub>	70	0.017	120.0	6.1
LNG (mostly CH <sub>4</sub> )	415	0.078	50.0	1.1
LPG (mostly C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	585	0.099	46.0	1.4
<b>Alcohols</b>				
Methanol (CH <sub>3</sub> OH)	796	0.017	20.0	a
Ethanol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH)	794	0.015	26.8	b
<b>Simple organic fuels</b>				
Butane (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	573	0.078	45.7	2.7
Benzene (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	874	0.085	40.1	2.7
Hexane (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	650	0.074	44.7	1.9
Heptane (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> )	675	0.101	44.6	1.1
Xylene (C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> )	870	0.09	40.8	1.4
Acetone (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O)	791	0.041	25.8	1.9
Dioxane (C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> )	1035	0.018	26.2	5.4 <sup>b</sup>
Diethyl ether (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O)	714	0.085	34.2	0.7
<b>Petroleum products</b>				
Benzine	740	0.048	44.7	3.6
Gasoline	740	0.055	43.7	2.1
Kerosine	820	0.039	43.2	3.5
JP-4	760	0.051	43.5	3.6
JP-5	810	0.054	43.0	1.6
Transformer oil, hydrocarbon	760	0.039 <sup>b</sup>	46.4	0.7 <sup>b</sup>
Fuel oil, heavy	940–1000	0.035	39.7	1.7
Crude oil	830–880	0.022–0.045	42.5–42.7	2.8
<b>Solids</b>				
Polymethylmethacrylate (C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>n</sub>	1184	0.020	24.9	3.3
Polypropylene (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> ) <sub>n</sub>	905	0.018	43.2	
Polystyrene (C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> ) <sub>n</sub>	1050	0.034	39.7	

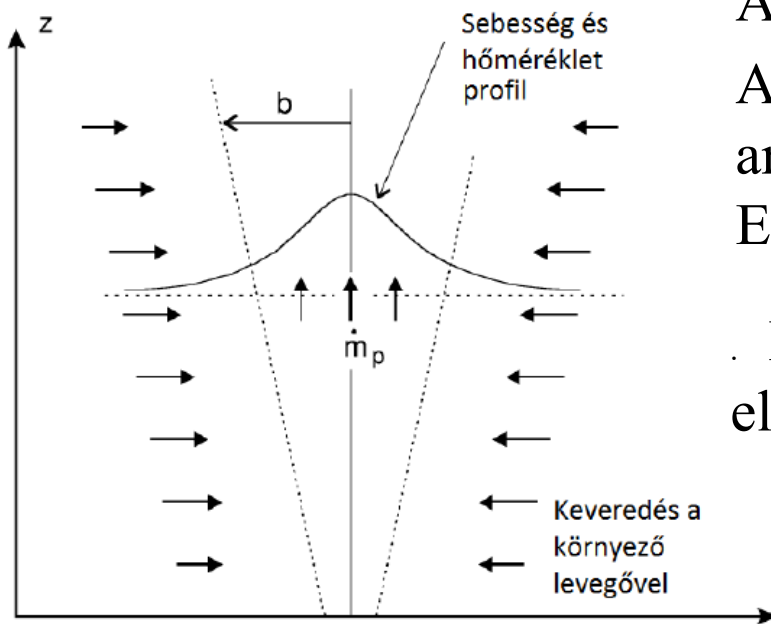
# IDEÁLIS CSÓVA MODELLE 1.

Gyakorlati alkalmazásnál a feltételezés, hogy a csóva tömegárama lép be a füstmentes levegőréteg határán a felső zónába.

A belépő gáz átlag hőmérséklete az ideális csóvamoddellel számítható.

A zónák sűrűségét ( $\rho_g$ ) az ideális gáztörvénnyel számíthatjuk.

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad ; \quad \text{és} \quad \frac{pV}{T} = nR \quad \text{ahol } n = \text{adott gáz molszáma} \quad R = 8,31 \quad \frac{J}{\text{molK}}$$

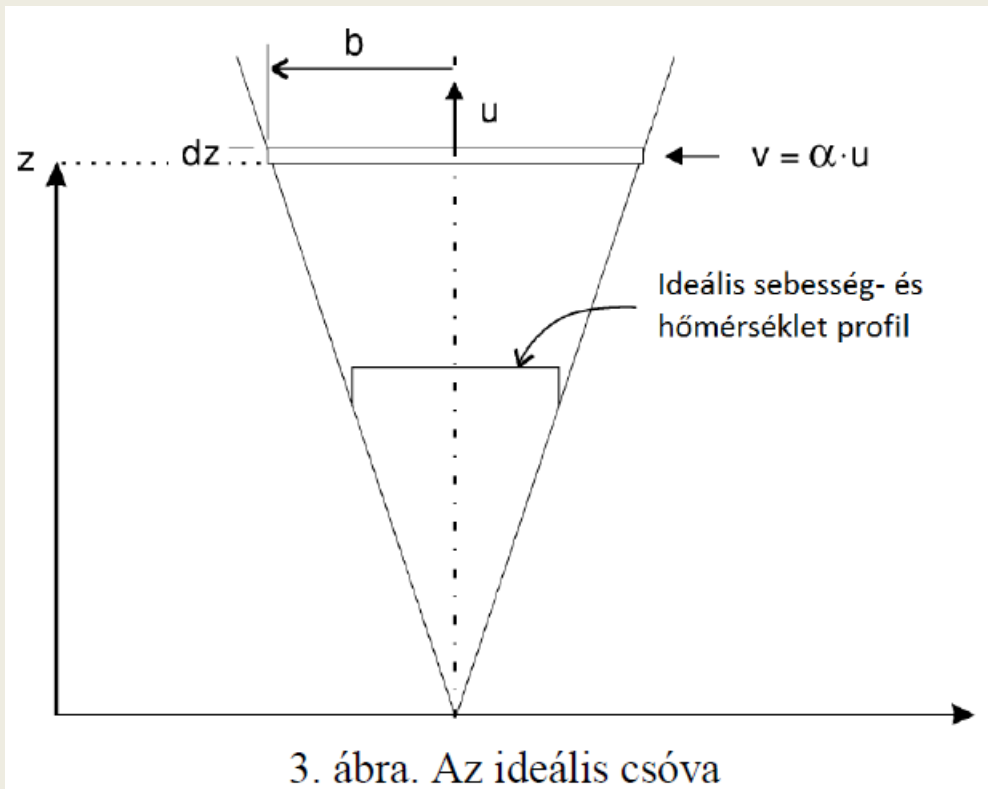


A csóva 15°-os szétterülése figyelhető meg  
A környező levegővel való keveredés arányos a függőleges irányú sebességgel. Együtthatója a keveredés állandója  $\alpha = 0,15$

. Magasság szerinti sűrűség változása elhanyagolható.

2. ábra. A korlátozás nélküli csóva szabadsugárszerű viselkedése

# IDEÁLIS CSÓVA MODELLJE 2.



Az előző dián említett feltételekkel a csóvában a  $z$  magasságban haladó energiaáramot a 3. ábra jelöléseivel a következő egyenlettel fejezhetjük ki:

$$\dot{Q} = \dot{m}_p \times c_p \times \Delta T = \pi \times b^2 \times \rho \times u \times c_p \times \Delta T$$

A környezet és a csóva hőmérséklet különbségét adott magasságban az ideális gáztörvénnyel kifejezve:

$$\Delta T = T_\infty \times \Delta \rho / \rho$$

Fenti egyenletbe helyezve

$$\dot{Q} = \pi \times b^2 \times \rho \times u \times c_p \times \Delta T_\infty \times \Delta \rho / \rho = \pi \times b^2 \times u \times c_p \times \Delta T_\infty \times \Delta \rho$$

A sebességet a zóna adott  $z$  magasságában állandónak feltételezve a sebesség

$$u = 1,94 \times \left( \frac{g}{c_p \times T_\infty \times \rho_\infty} \right)^{1/3} \times \left( \frac{\dot{Q}}{z} \right)^{1/3}$$

# IDEÁLIS CSÓVA MODELLJE 3.

A sebesség ismeretében  $z$  magasságban a tömegáram is meghatározható

$$\dot{m}_p = 0,20 \times \left( \frac{\rho_\infty^2 \times g}{c_p \times T_\infty} \right)^{1/3} \times \dot{Q}^{1/3} \times z^{5/3}$$

A  $\dot{Q} = \dot{m}_p \times c_p \times \Delta T$  egyenlet behelyezésével és az egyenlet rendezésével adódik a

$$\Delta T = 5,0 \times \left( \frac{T_\infty}{g \times c_p^2 \times \rho_\infty^2} \right)^{1/3} \times \dot{Q}^{2/3} \times z^{-5/3}$$

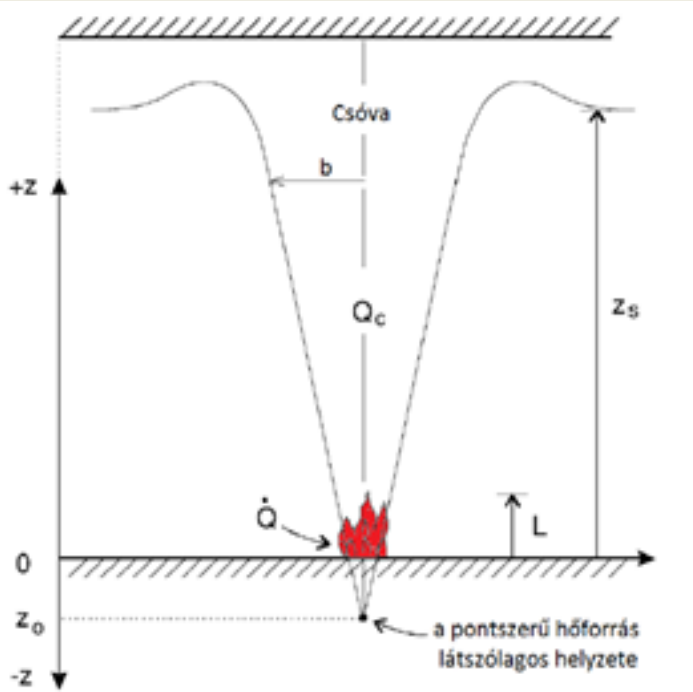
## ZUKOVSKI CSÓVAMODELLJE

Mérési eredményekkel pontosította az ideális csóvamodell együtthatóit.

$$\dot{m}_p = 0,21 \times \left( \frac{\rho_\infty^2 \times g}{c_p \times T_\infty} \right)^{1/3} \times \dot{Q}^{1/3} \times z^{5/3} = 0,074 \times \dot{Q}^{1/3} \times z^{5/3}$$

Mivel a tömegáram egyenlet meglehetősen hasonlít az ideális csóvamodellhez, a mérések alapján is igazolódik az analitikus modell helyessége. Zukovski egyenlete alapján a hőmérsékletre és a sebességre vonatkozó egyenleteket is helyesnek tekinthetjük

# HESKESTAD CSÓVAMODELLJE 1.



A pontszerű forrás helyett bevezeti a látszólagos pontszerű forrást, mely a tűz keletkezési síkjában már a valódi kiterjedést adja. Bevezeti a konvektív lángteljesítményt  $Q_c$  (A csóva számos tulajdonsága nem az összes, hanem a konvektív teljesítménytől függ.) Adott magasságban az állandó hőmérséklet és sebességprofil helyett az adott síkban Gauss féle normál eloszlást tételezett fel, mely jobban közelíti a valós csóva hőmérséklet és sebesség profilját. ( $\Delta T_0$  - a tűz tengelyében a környezethez viszonyított hőmérséklet emelkedés;  $u_0$  - a feláramlás sebessége a csóva tengelyében)

Elhagyta a Boussinesq által használt sűrűsége vonatkozó egyszerűsítő feltételt.

A pontszerű forrás látszólagos helyzete ( $z_0$ ) a tűz egyenértékű átmérője ( $D$ ) és a tűz teljesítményének ( $\dot{Q}$ ) függvényében:

$$z_0 = 0,083 \times \dot{Q}^{2/5} - 1,02 \times D$$



# HESKESTAD CSÓVAMODELLJE 2.

„z” és „L” egyenleteiben a konvekcióval és sugárzással együttes, teljes hőáram szerepel. A csóva termikus jellemzői viszont a konvekciós hőáramtól ( $\dot{Q}_c$ ) függenek, mert ez a felhajtóerő forrása. Szokványos tüzekben a tűz sugárzási teljesítménye (vesztesége) a teljes teljesítmény 20-40%-a. Ezért a konvektív hőáram  $\dot{Q}_c = 0,6 \div 0,8 \times \dot{Q}$

A látszólagos pontforrás magasságával korrigálva a magassági koordinátát a csóva tengelyében a környezethez viszonyított hőmérséklet emelkedés:

$$\Delta T = 9,1 \times \left( \frac{T_\infty}{g \times c_p^2 \times \rho_\infty^2} \right)^{1/3} \times \dot{Q}_c^{2/3} \times (z - z_0)^{-5/3} \quad \text{a szokásos környezeti jellemzőkkel:}$$
$$\Delta T = 23,5 \times \left( \frac{\dot{Q}_c^{2/5}}{z - z_0} \right)^{5/3}$$

Heskestad modelljében a csóva radiusza (széttérjedés mértéke) a magasság mellett a tengely hőmérsékletétől is függ:  $b = 0,12 \times \sqrt{\frac{T_0}{T_\infty}} \times (z - z_0)$

A csóva tengelyében a felfelé haladó sebesség:  $u_0 = 3,4 \times \left( \frac{g}{c_p \times T_\infty \times \rho_\infty} \right)^{1/3} \times \left( \frac{\dot{Q}_c}{z - z_0} \right)^{1/3}$

A levegő szokásos paramétereivel:  $u_0 = 1,0 \times \left( \frac{\dot{Q}_c}{z - z_0} \right)^{1/3}$

# HESKESTAD CSÓVAMODELLJE 3.

A környezetből a levegő bekeveredése a láng illetve a csóva esetében eltérő. Ezért Heskestad más egyenletet javasol a két régió tömegáramára.

A csóva tömegárama:

$$\dot{m}_p = 0,2 \times \left( \frac{\rho_\infty^2 \times g}{c_p \times T_\infty} \right)^{1/3} \times \dot{Q}_c^{1/3} \times (z - z_0)^{5/3} + 1,92 \times 10^{-3} \times \dot{Q}_c$$

a szokásos környezeti jellemzőkkel:

$$\dot{m}_p = 0,071 \times \dot{Q}_c^{1/3} \times (z - z_0)^{5/3} + 1,92 \times 10^{-3} \times \dot{Q}_c$$

A közepes lángmagasság szintjéig a tömegáram:

$$\dot{m}_p = 0,0056 \times \dot{Q}_c \times \frac{z}{L}$$

# McCAFFREY CSÓVAMODELLJE

A csóvát három régióra, láng-, átmeneti- és csóva tartományokra osztja. Mindhárom tartományban a tengely hőmérséklete:

$$\Delta T_0 = \left( \frac{\kappa}{0,9 \times \sqrt{2g}} \right)^2 \times \left( \frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^{2\eta-1} \times T_\infty$$

A feláramlás sebessége a tengelyben:

$$u_0 = \kappa \times \left( \frac{z}{\dot{Q}^{2/5}} \right)^\eta \times \dot{Q}^{1/5}$$

A  $\kappa$  és  $\eta$  állandók a  $z/\dot{Q}^{2/5}$  függvényében az alábbiak szerint változik

Régió	$z/\dot{Q}^{2/5}$	$\eta$	$\kappa$
láng	<0.08	1/2	6.8
átmeneti	0.08 .. 0.2	0	1.9
csóva	>0.2	-1/3	1.1

1. táblázat McCaffrey csóvae egyenleteinek együtthatói

McCaffrey egyenleteiben a teljes lángteljesítmény szerepel.

# THOMAS CSÓVAMODELLJE

Heskestad és McCaffrey a nagyon alacsony relatív lángmagasság ( $L/D$ ) tartományban nem vizsgálták az egyenleteik érvényességét. Thomas szerint a folytonos láng tartományban a lángmagasság és a tömegáram inkább a láng kerületétől, mint a teljesítménytől függ.

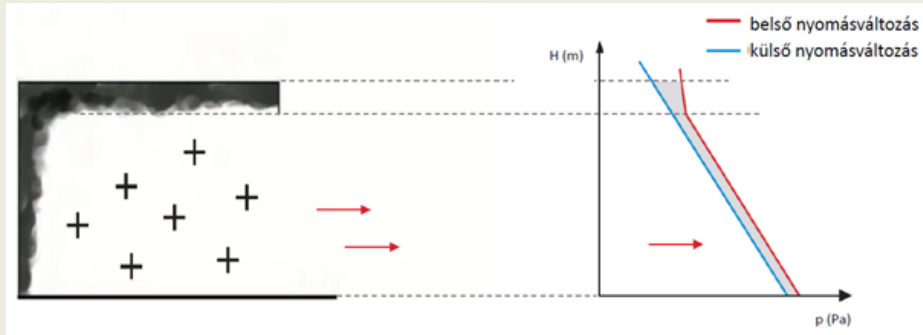
$$\dot{m}_p = 0,188 \times D \times \pi \times z^{3/2} = 0,59 \times D \times z^{3/2}$$

$L/D < 1$  tartományban a csóva alakja inkább hengeres, mint kúpos, így ez a tömegáram egyenlet megfelelő közelítést nyújt.

# HŐ- ÉS FÜSTELVEZETÉS ALAPJAI 1.

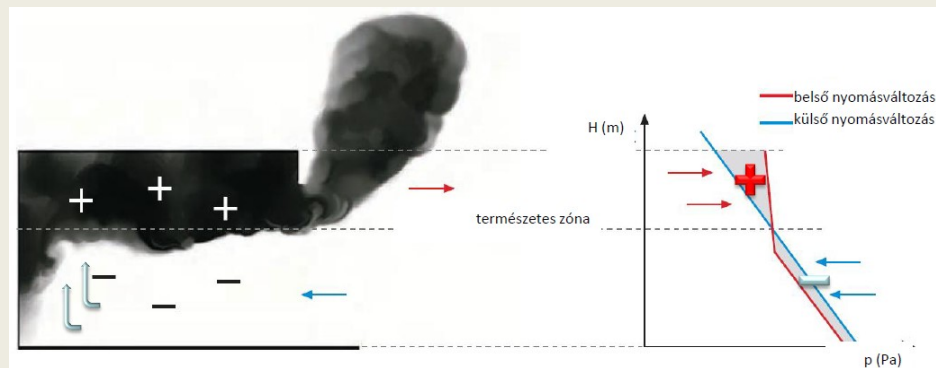
© Szikra Csaba Hő- és füstelvezetés, füstmentesítés előadása 2012. Construma

## Tűz kezdeti szakasza (termikus tárolás)

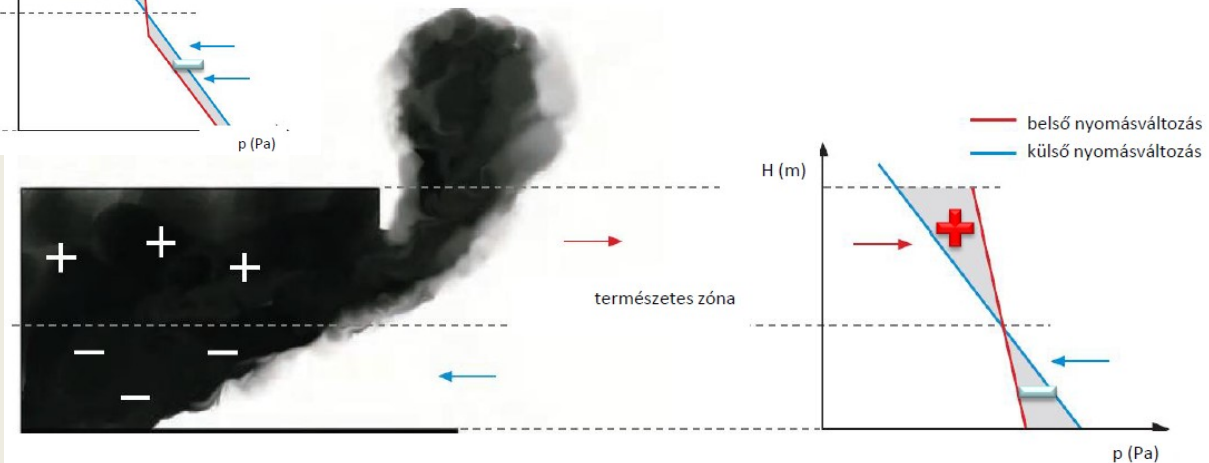


$$p_e = p_0 - Hg\rho_e$$

## Feltöltődött pufferzóna állapota

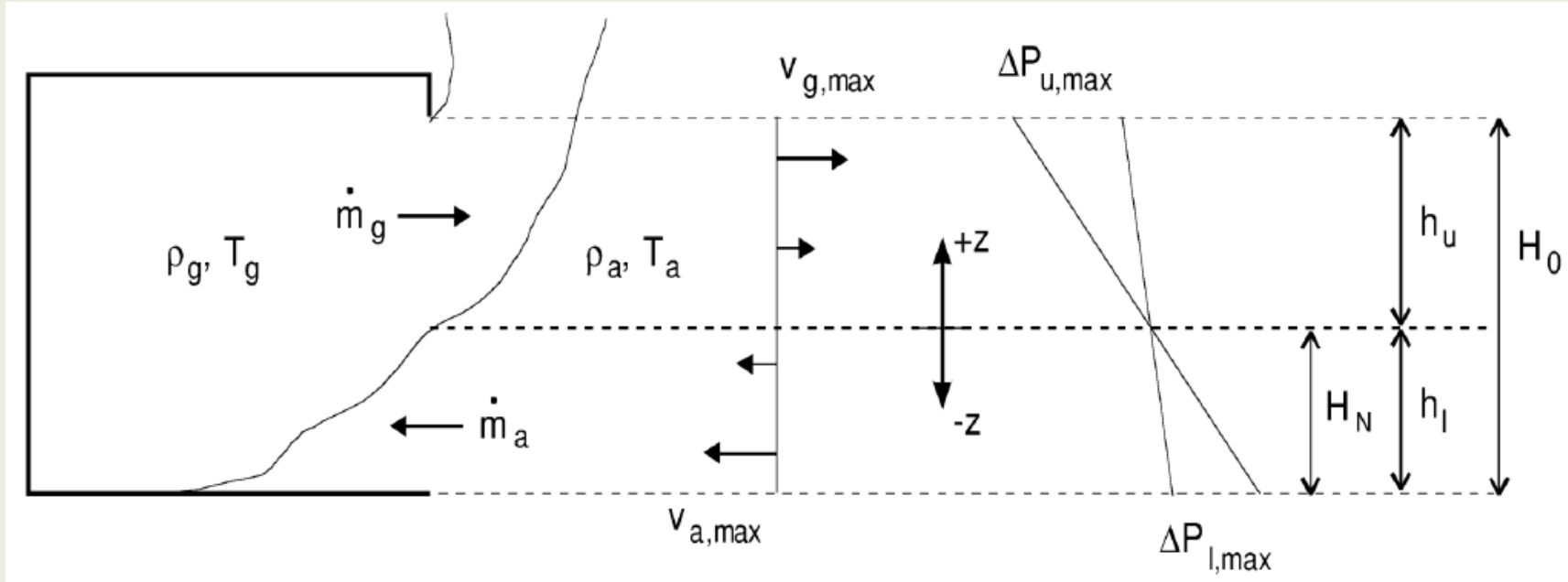


## Teljesen kifejlődött tűz



# HŐ- ÉS FÜSTELVEZETÉS ALAPJAI 2.

Teljesen kifejlődött tűz modellje (nyitott tér)



$$v(z) = \sqrt{\frac{2z(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_g}}$$

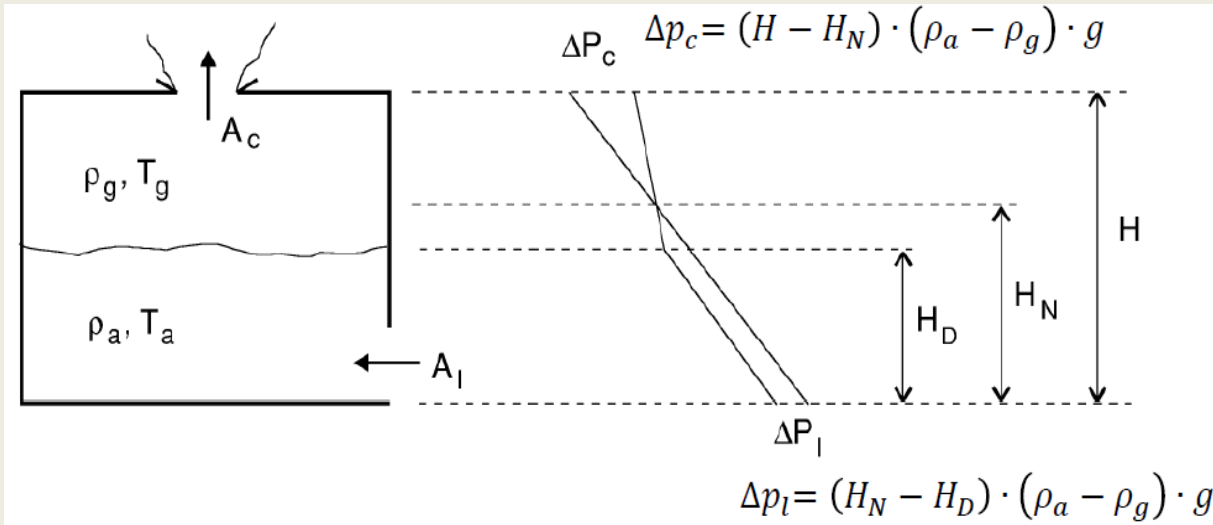
$$v_a = \sqrt{\frac{2z(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_a}}$$

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_d A \rho_a \sqrt{2gH_0} \sqrt{\frac{(\rho_a - \rho_g) / \rho_a}{[1 + (\rho_a / \rho_g)^{1/3}]^3}}$$

$$\dot{m}_a = 0,5 A \sqrt{H_0}$$

# HŐ- ÉS FÜSTELVEZETÉS ALAPJAI 3.

## Hő- és füstelvezetés modellje



A hajtóerőt a nyomáskülönbség ( $\Delta P_c$  és  $\Delta P_l$ ) adja.

A hajtóerőből számítható a sebesség  $v$ .

A sebesség ismeretével számítható a tömegáram.

$$v_c = \sqrt{\frac{2\Delta p_c}{\rho_g}} = \sqrt{\frac{2(H - H_N) \times (\rho_a - \rho_g) \times g}{\rho_g}}$$

$$v_l = \sqrt{\frac{2\Delta p_l}{\rho_a}} = \sqrt{\frac{2(H_N - H_D) \times (\rho_a - \rho_g) \times g}{\rho_a}}$$

$$\dot{m} = C_d A v \rho$$

$$\dot{m}_c = C_d A_c \rho_g \sqrt{\frac{2(H - H_N) \times (\rho_a - \rho_g) \times g}{\rho_g}}$$

$$\dot{m}_l = C_d A_l \rho_a \sqrt{\frac{2(H_N - H_D) \times (\rho_a - \rho_g) \times g}{\rho_a}}$$

A be- és kilépő tömegáramok egyenlőségéből a  $H_N$  kiszámolható.

$$C_{dc} = C_{dl} \quad \dot{m}_c = \dot{m}_l \quad H_N = \frac{A_l^2 \times \rho_a \times H_D + A_c^2 \times \rho_g \times H}{A_l^2 \times \rho_a + A_c^2 \times \rho_g}$$

# HŐ- ÉS FÜSTELVEZETÉS ALAPJAI 4.

Adott  $Q_c$ ,  $H$ ,  $H_D$ , és  $A_l$  és keresem a szükséges  $A_c$ -t.

$$T_{g\text{átl}} = T_a + \Delta T_0 = T_a + 12,89 Q_c^{2/3} H_D^{-5/3} \quad \rho_g = 353/T_{g\text{átl}}$$

$$m_p = 0,02 (\rho_\infty^2 g / c_p T_\infty)^{1/3} Q_c^{-1/3} (z - z_0)^{5/3} + 1,92 \cdot 10^{-3} Q_c = 0,071 Q_c^{-1/3} (z - z_0)^{5/3} + 1,92 \cdot 10^{-3} Q_c$$

$$H_N = H_D + m_p^2 / (2 c_d^2 A_l^2 \rho_a g (\rho_a - \rho_g))$$

$$A_c = m_p / (c_d \rho_g (2 g (H - H_N) (\rho_a - \rho_g) / \rho_g)^{1/2})$$

Az eddig ismertetett egyenleteket nemzetközi szakmai szervezetek is elismerik. Kellő alapot adnak a korrekt hő- és füstelvezető rendszerek megtervezéséhez.

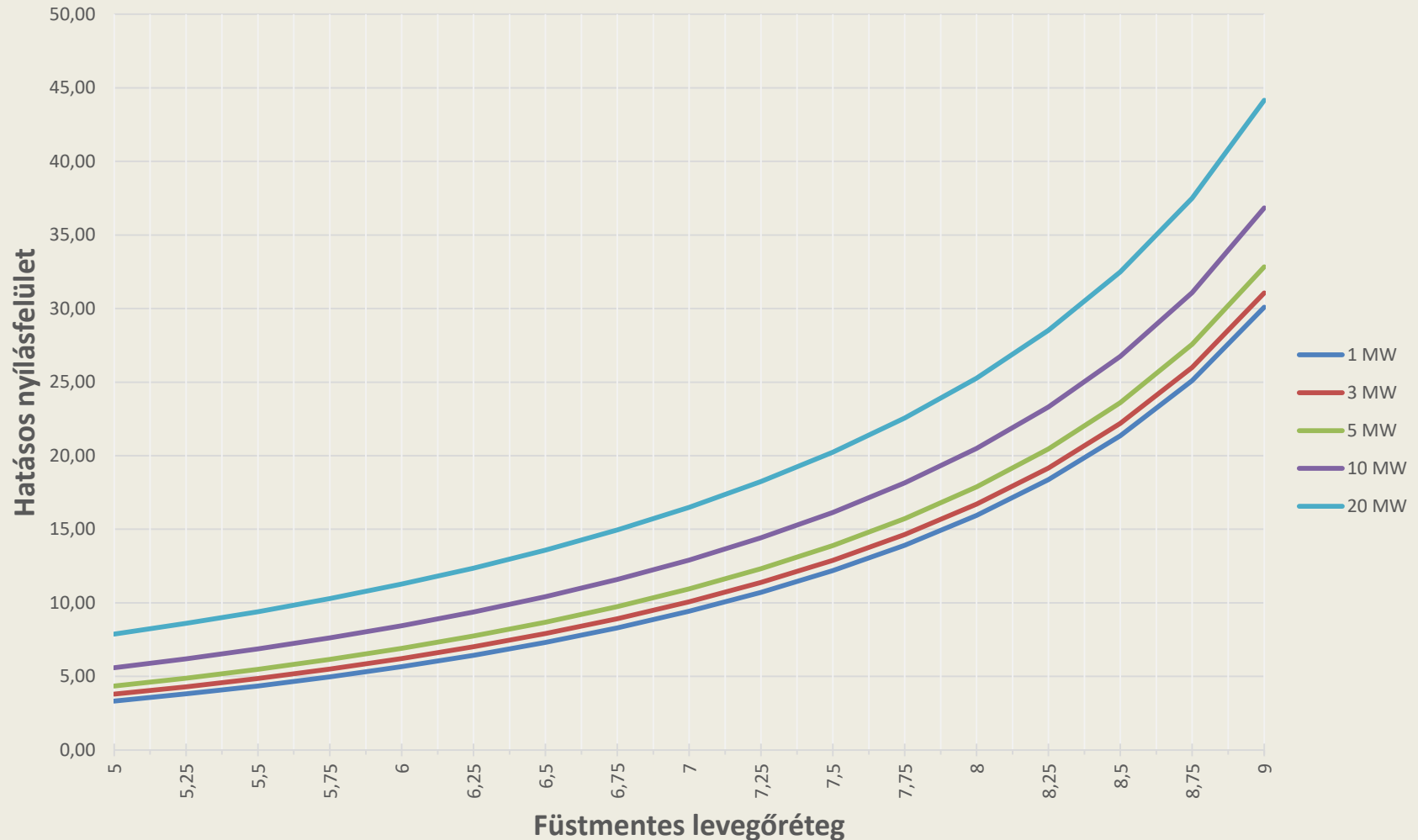
Alkalmazásuknál figyelni kell, hogy az egyes egyenleteket csak az érvényességi tartományaikon belül használjuk.

Aki alkalmazni kívánja, az üljön be a szakmérnöki képzések előadásaira. (egy pár órás tanfolyamon, pl. szakvizsgára felkészítően ez az ismeret nem szerezhető meg)



# CSÓVAMODELL GRAFIKUS ÁBRÁZOLÁSA

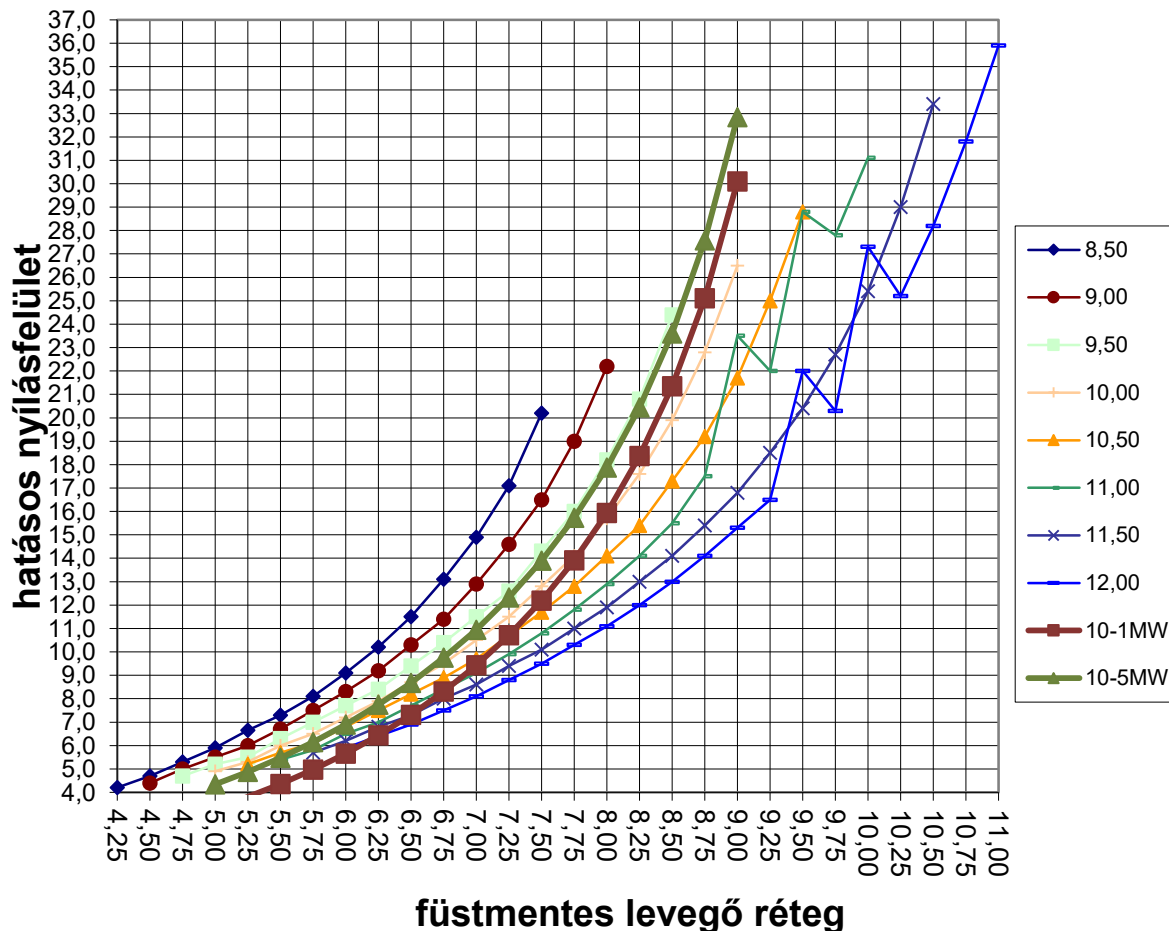
Heskestad modelljével számított hő- és füstelvezető felület a füstmentes levegőréteg függvényében  
H=10 m



# TvMI TÁBLÁZAT GRAFIKUS ÁBRÁZOLÁSA 1.

## Hő- és füstelvezetés

### 1. méretezési csoport 8,50-12,00 m belmagasság

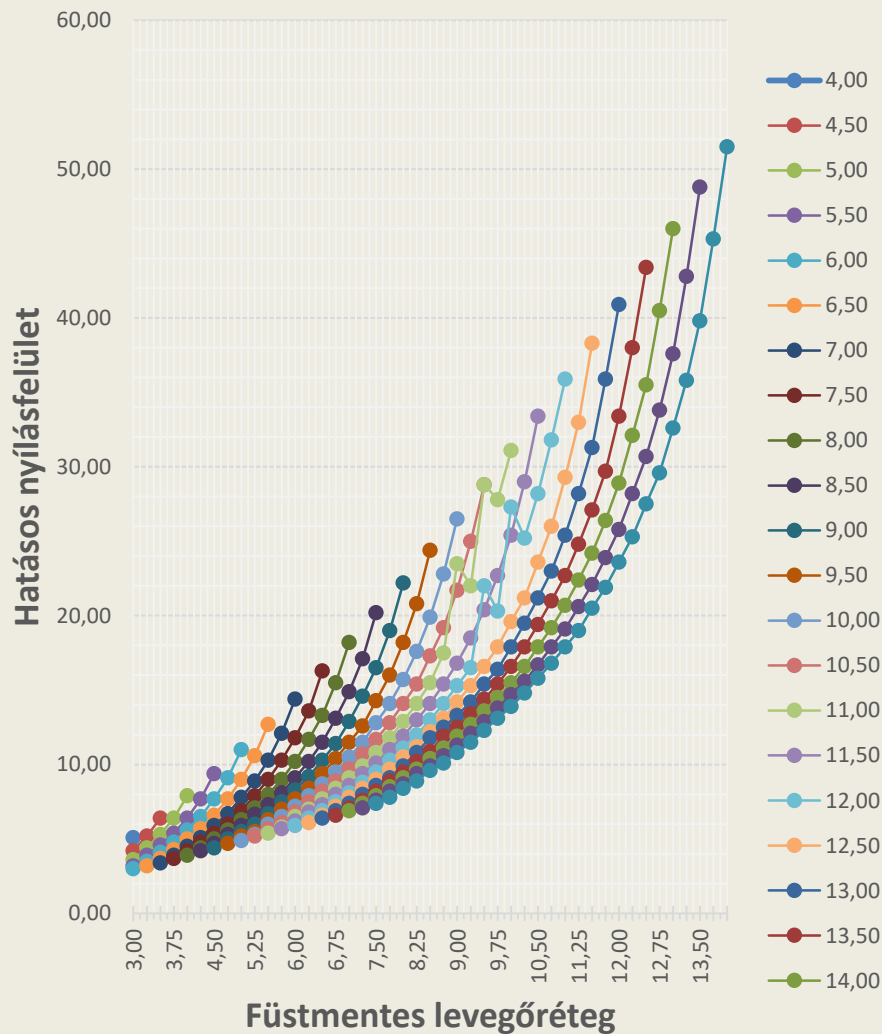


zöld és bordó színnel  
Heskestad modellel  
számított értékek 10 m  
belmagasságnál  
1 MW és 5 MW tűz  
teljesítménnyel

Táblázati értékek  
pontossága?

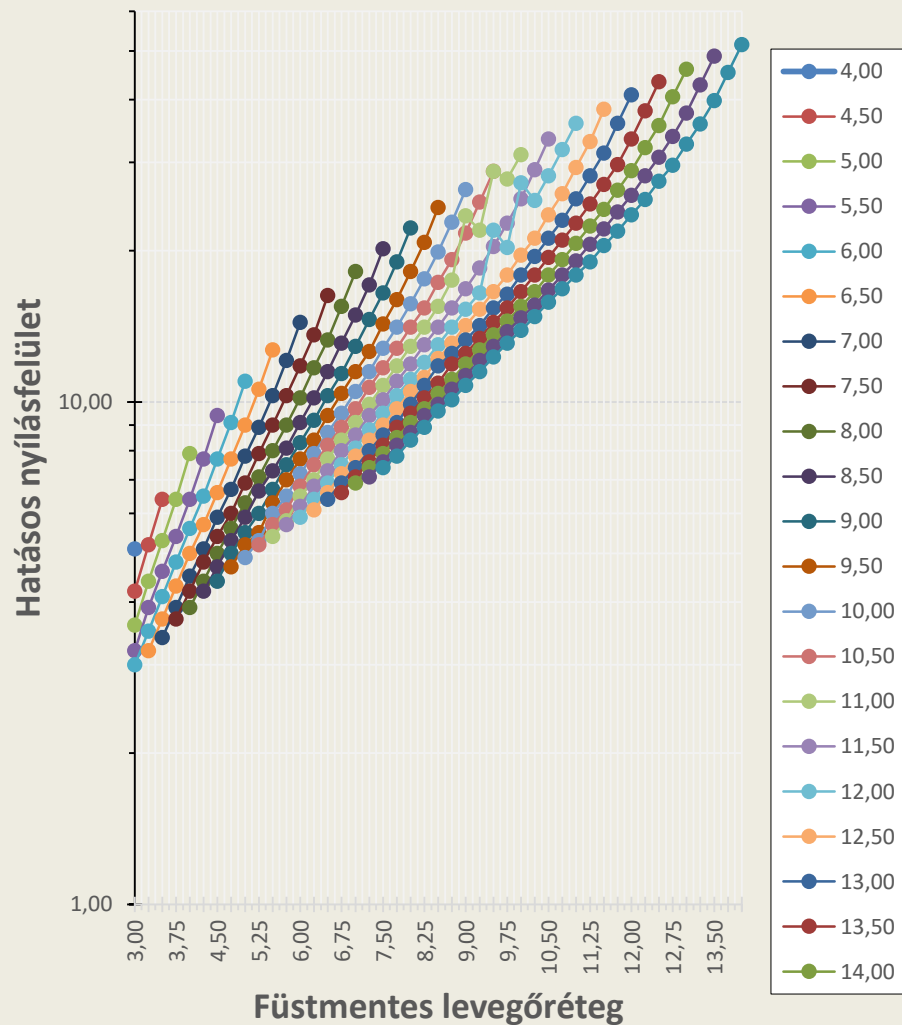
# TvMI TÁBLÁZAT GRAFIKUS ÁBRÁZOLÁSA 2.

Hő- és füstelvezetés belmagasság szerint  
1. méretezési csoport



„normál” beosztású grafikonon

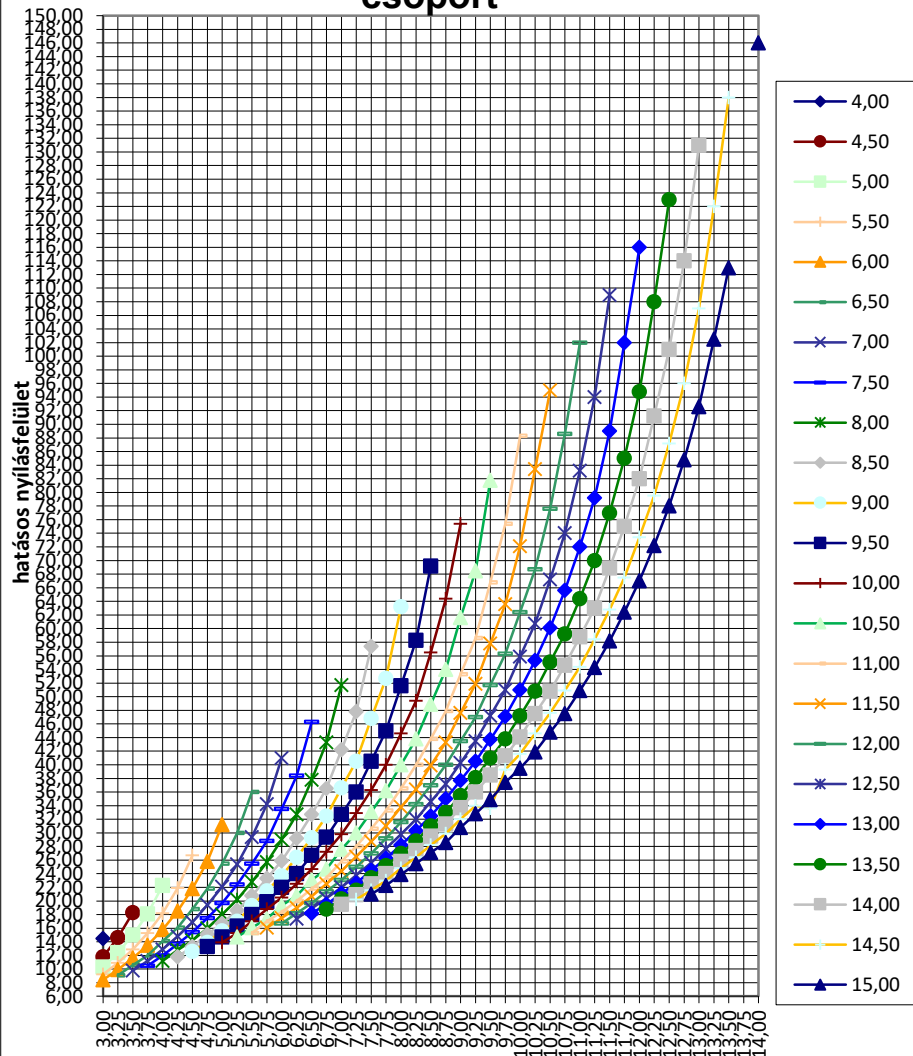
Hő- és füstelvezetés belmagasság szerint  
1. méretezési csoport



„semi logaritmikus” beosztású grafikonon

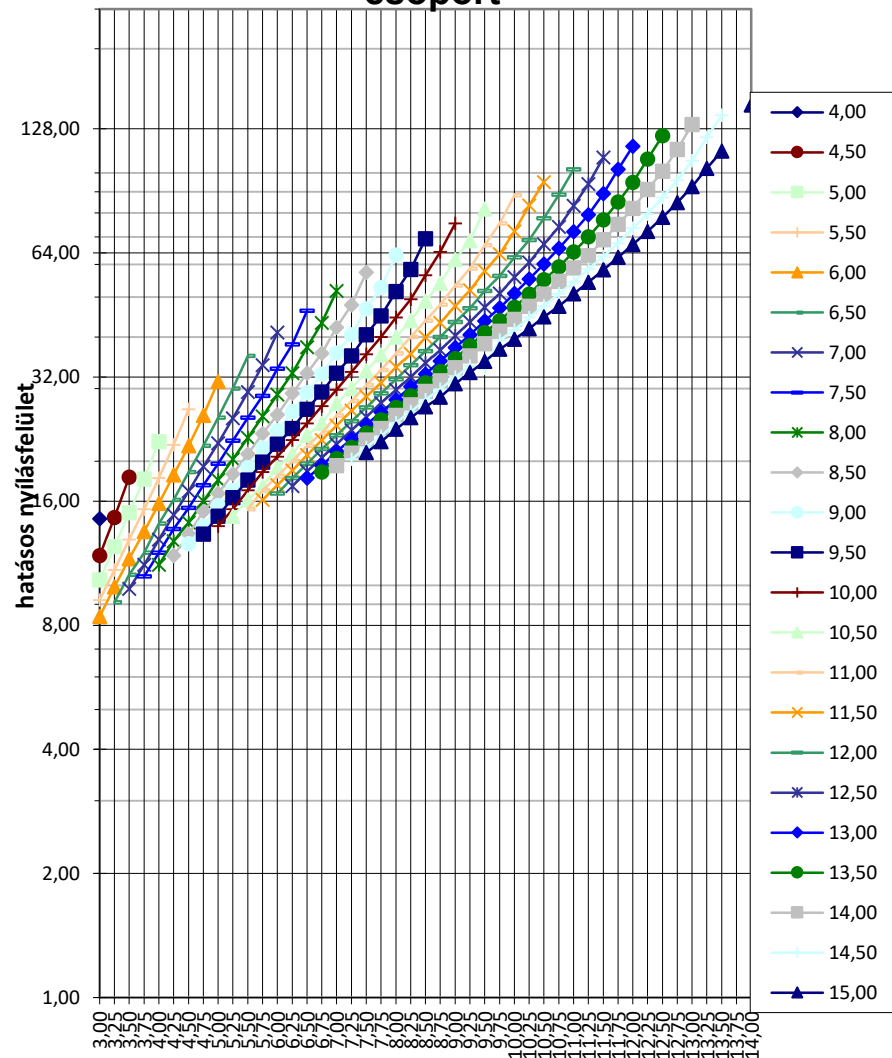
# TvMI TÁBLÁZAT GRAFIKUS ÁBRÁZOLÁSA 2.

## Hő- és füstelvezetés 4. méretezési csoport



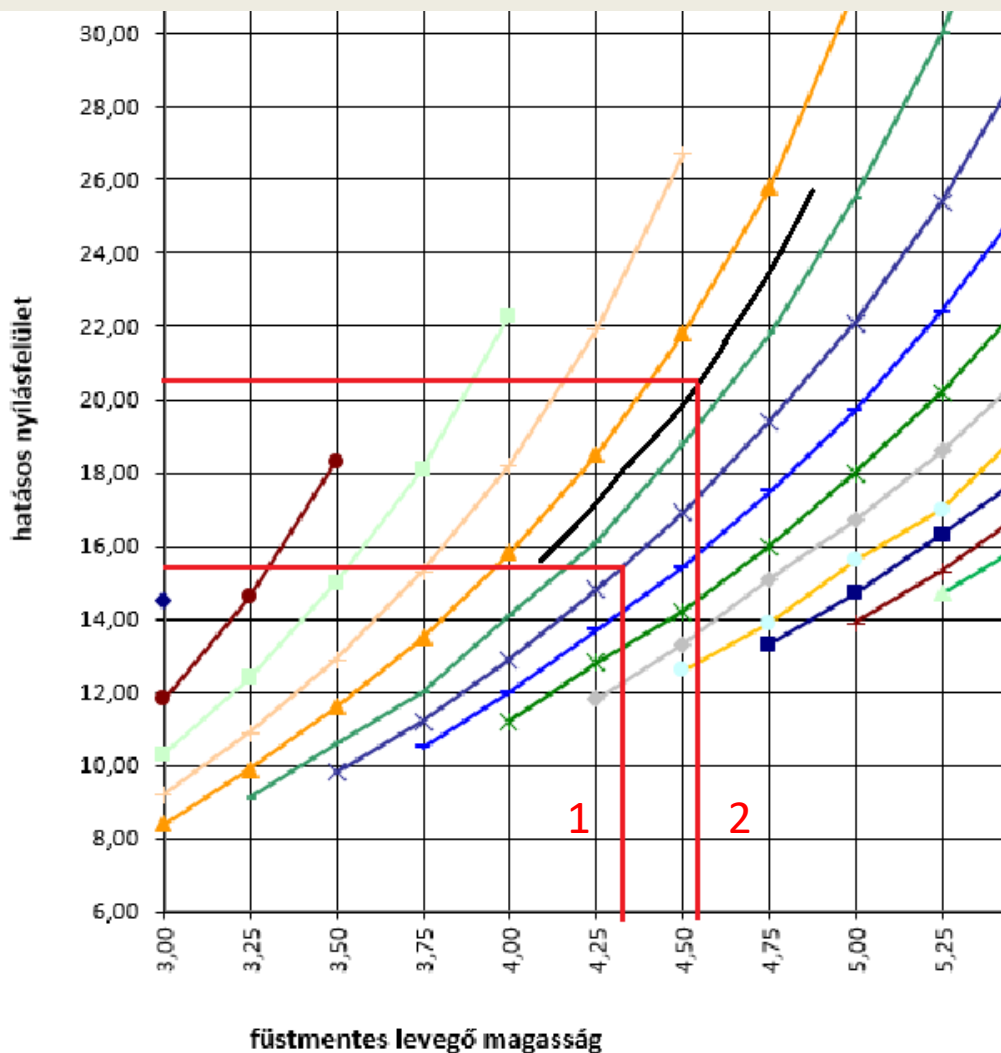
füstmentes levegő magasság

## Hő- és füstelvezetés 4. méretezési csoport



füstmentes levegő magasság

# TvMI TÁBLÁZAT ÉRTÉKEINEK INTERPOLÁLÁSA 1.



Grafikus interpolálás görbevonalzós és szükséges mértékű nagyítás segítségével

1. Táblázatban ismert belmagassághoz tartozó görbe tetszőleges füstmentes levegő magasság esetén.

2. Eltérő belmagasság esetén a görbe arányos eltolásával.

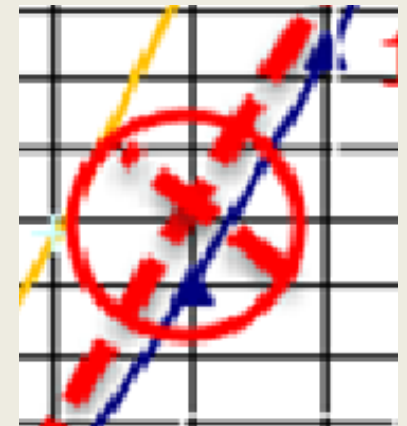
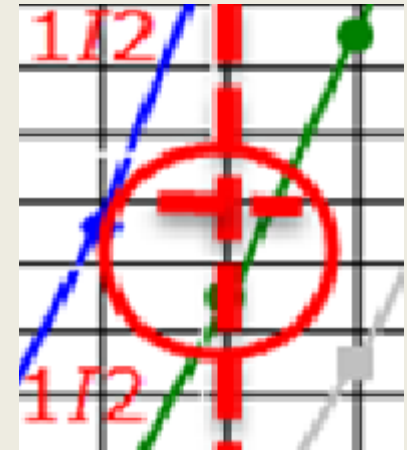
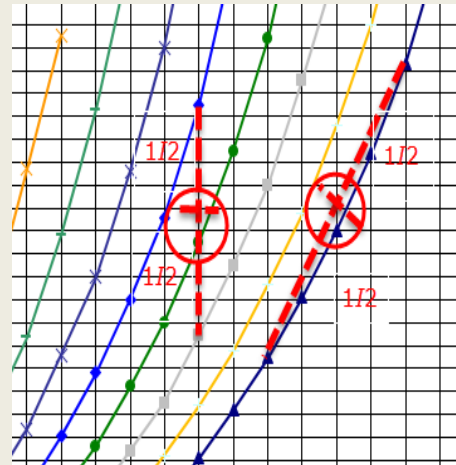
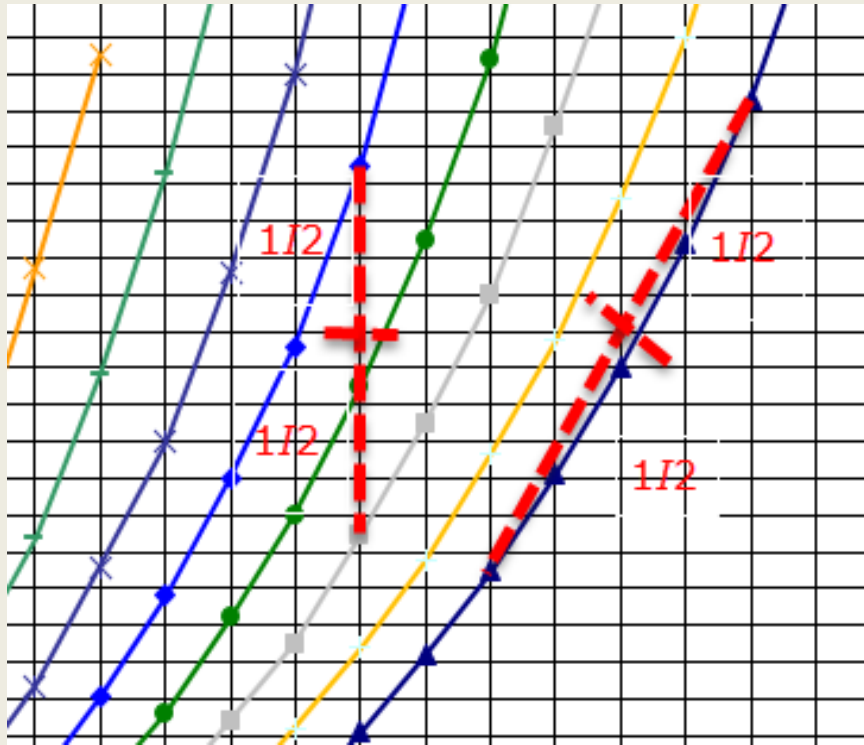
# TvMI TÁBLÁZAT ÉRTÉKEINEK

## INTERPOLÁLÁSA 2.

Füstmentes levegőréteg magasság

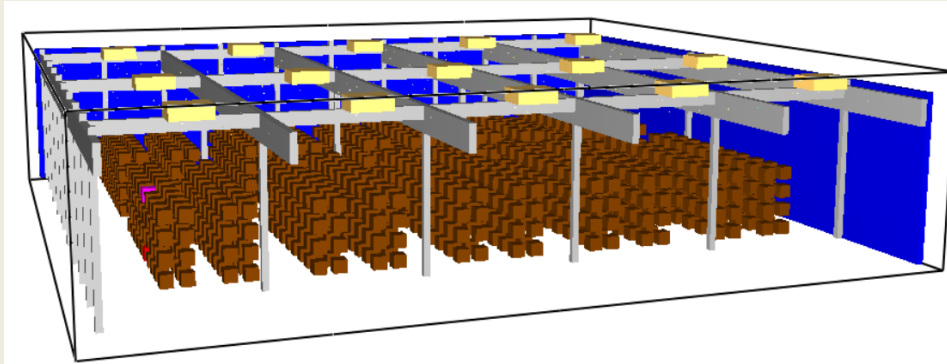
	3,00	3,25	3,50	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00
belmagasság	4,00	14,50							
	4,10								
	4,20	-2,70							
	4,30								
	4,40		+2,8	+3,7					
	4,50	11,80	14,60	18,30					
	4,60								
	4,70	-1,50	-2,20	-3,30					
	4,80								
	4,90		+2,1	+2,6	+3,1	+4,2			
	5,00	10,30	12,40	15,00	18,10	22,30			
	5,10								
	5,20	-1,10	-1,50	-2,10	-2,80	-4,10			
	5,30								
	5,40		+1,7	+2,0	+2,4	+2,9	+3,7	+4,8	
	5,50	9,20	10,90	12,90	15,30	18,20	21,90	26,70	
	5,60								
	5,70	-0,80	-1,00	-1,30	-1,80	-2,40	-3,40	-4,90	
	5,80								
	5,90		+1,5	+1,7	+1,9	+2,3	+2,7	+3,3	+4,0
6,00	8,40	9,90	11,60	13,50	15,80	18,50	21,80	25,80	31,20

# TvMI TÁBLÁZAT ÉRTÉKEINEK INTERPOLÁLÁSA 3.



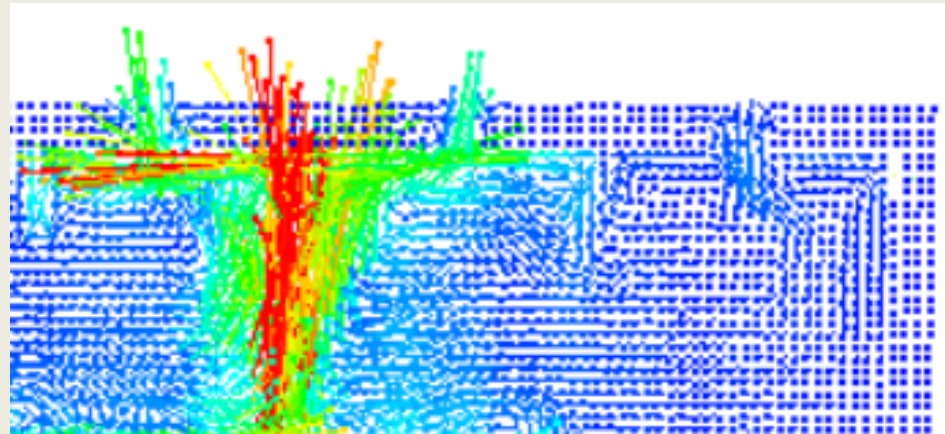
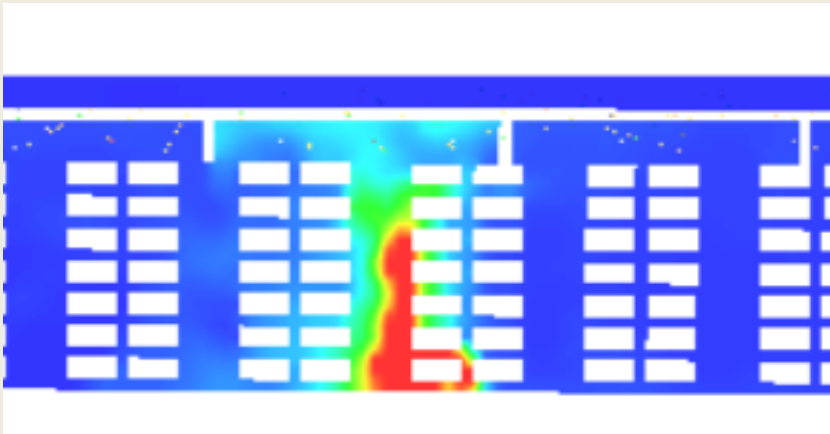
A görbék közötti távolság felfelé monotonon nő. Egy húr pontjai a görbén belül helyezkednek el. -> **A lineáris interpolációval magasabb értékek nyerhetők, mint a grafikussal, így a biztonság irányába való eltérést eredményez.**

# TŰZMODELLEZÉS



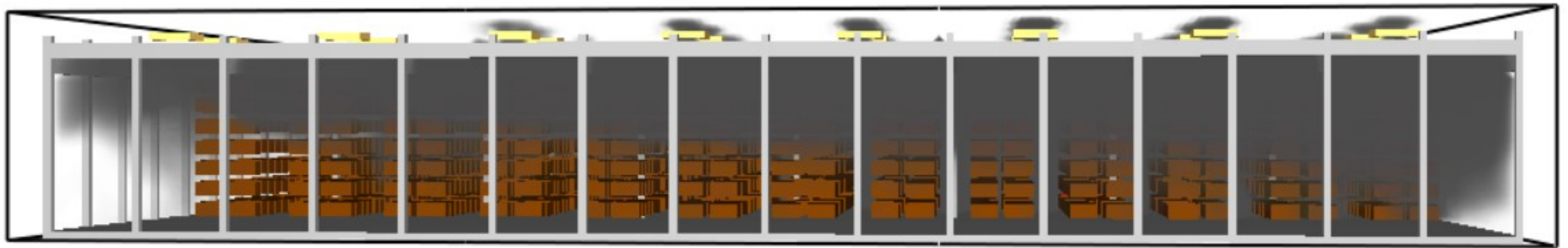
- HRR és tűzfejlődés meghatározás
- Rajzolási pontosság (egyszerűsítések)
- Értékelési szempontok felvétele
- Eredmények értékelése (+ validálás)
- Megoldások érvényessége (üzemeltetés)
- stb.

Külön konferenciát érdemlő méretezési mód.



**Legnagyobb körültekintést és elméleti felkészülést igénylő módszer.**





Előadásomban **ismertetett módszerek mindegyike alkalmas a hő- és füstelvezető rendszerek méretezésére.** Pontosságukat tekintve a táblázatos (ide értve az interpolálást is) módszer a legkevésbé pontos, míg a modellezés adja a legpontosabb eredményt. Ennek megfelelően az üzemi körülmények változására is a modellezés a legérzékenyebb.

Az adott projekthez megfelelő módszer megválasztásánál a tervezői díjon és tervezési időszükségleten felül az elvárt pontosságot, üzemeltetési feltételek változását is szükséges figyelembe venni.

**Táblázatos módszeren kívül, minden más mód alkalmazásához a hő- és füstelvezetés elméleti alapjainak ismeretét igényli,** mely egy pár órás tanfolyamon (pl. tűzvédelmi szakvizsgás képzésen) nem sajátítható el.

**Tűzvédelmi mérnöki tudás (végzettség) szükséges a helyes alkalmazáshoz.**

**KÖSZÖNÖM MEGTISZTELŐ FIGYELMÜKET!**