Szikra Csaba

A tűz modellezésének lehetőségei

A termodinamika és az áramlástan alapegyenletei segítségével különböző esetekben elemzi szerzőnk a tűztér és környezete között kialakuló nyomás, hőmérséklet és áramlási viszonyokat. Az egyenletek alapját képezhetik a mérnöki módszerek segítségével történő hő- és füstlevezető rendszerek méretezésének, melyről részletesebben a cikk végén olvashatnak.

1. Zárt téri tüzek helyisége és a környezet nyomásviszonya

A zárt térben keletkezett tüzek esetében a kifejlődés egyes szakaszaiban megfigyelhető, hogy a környezethez képest változik a nyomás. A nyomáslefolyás szempontjából szét kell választani a nyitott és zárt tereket. A zárt terekre ma az energetikai szempontok miatt jellemző az egyre tömörebb kialakítás. A zárt téri tűz helyisége és környezete közötti nyomásviszony és tömörség hatással van a tűz lefolyására.

1.1. Teljesen zárt terek, majdnem teljesen zárt terek

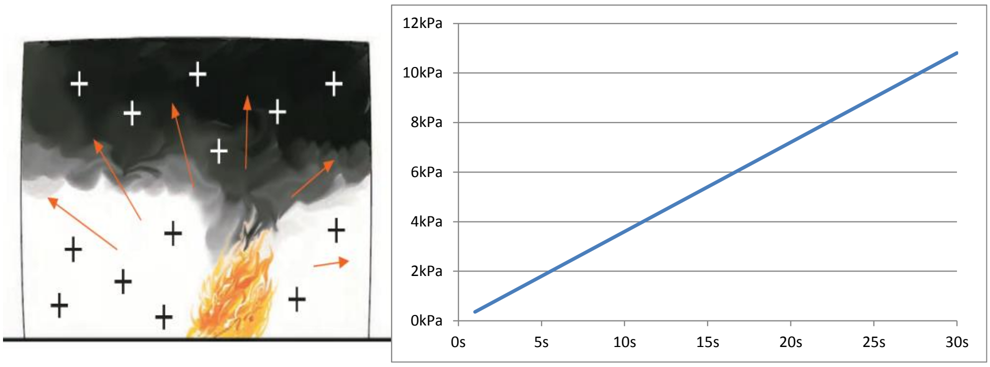
A teljesen, vagy majdnem teljesen zárt terek nyomásnövekedése viszonylag egyszerűen követhető, hiszen a tűz teljesítménye a zárt térben lévő ideális gázelegynek tekinthető levegőt melegíti. Ha eltekintünk az épületszerkezet hőelvonó hatásától (természetesen ez a modellalkotás későbbi szakaszában akár figyelembe is vehető), a helyiség térfogatát állandónak tekintjük, az ideális gáztörvény p/T=állandó alakot ölti (p az abszolút nyomás, T az abszolút hőmérséklet). Mivel számunkra a nyomásnövekedésre (Δp) van szükség, és kényelmesebb az abszolút hőmérséklet helyett a hőmérsékletváltozással (ΔT) számolni, az ideális gáztörvény a következő alakban jelenik meg (megjegyzendő, hogy a hőmérsékletkülönbség esetén használható a °C skála is), 0 indexszel a kiinduló állapot nyomását és hőmérsékletét jelölve:

$$\Delta p = p_0 \left(\frac{T_0 + \Delta T}{T_0} - 1 \right)$$

A fenti egyenletben az egyetlen ismeretlen a ΔT, mely a zárt tér hőmérséklet növekedése. Ha a zárt térben keletkezett tűz energiája teljes egészében a hőmérséklet növelésére fordítódik, használhatjuk a termodinamika jól ismert egyenletét, melyet ΔT-re rendezhetünk: $\Delta T = Q/(m \cdot c_v)$, mely egyenletben Q a tűz hőfelszabadulása (ha az egyenletet egyetlen másodpercre írjuk fel, akkor a tűz teljesítménye, kW), m a helyiségben lévő levegő tömege ($m = \rho_{lev} \cdot V_h$), c_v helyiségben lévő levegő állandó térfogaton vett fajhője (KJ/kgK). A fenti ideális gázegyenlet az alábbi alakot ölti:

$$\frac{\Delta p}{s} = p_0 \left(\frac{\dfrac{\dot{Q}}{\rho_{lev} \cdot V_h \cdot c_v}}{T_0} \right) = p_0 \left(\frac{\dot{Q}}{T_0 \cdot \rho_{lev} \cdot V_h \cdot c_v} \right)$$

Ezzel a helyiség nyomásnövekedését leíró egyenlet elkészült. Feltételezzük, hogy a tűz kezdetének pillanatában 20°C (293K) a térben a hőmérséklet, a nyomás 101325 Pa (1att), a tűz teljesítménye 100kW, a levegő sűrűsége 1.2kJ/Kg, a fajhője 0.8, akkor a nyomásnövekedés egy $100 m^3$ – es helyiségben másodpercenként 360Pa. Az alábbi diagramból jól látszik, hogy a függvény időben lineáris, amennyiben a tűz teljesítménye állandó. Tudjuk azonban, hogy a zárt terek tüzének lefolyására az a jellemző, hogy a tűz keletkezésének korai szakaszában a teljesítmény majdnem lineáris, a kiterjedt égést megelőzően majdnem négyzetes növekedést mutat.Fél perc elteltével a példában szereplő helyiség nyomása 11kPa, mely hatására az épületszerkezet minden négyzetméterére 1,1t súly nehezedik.

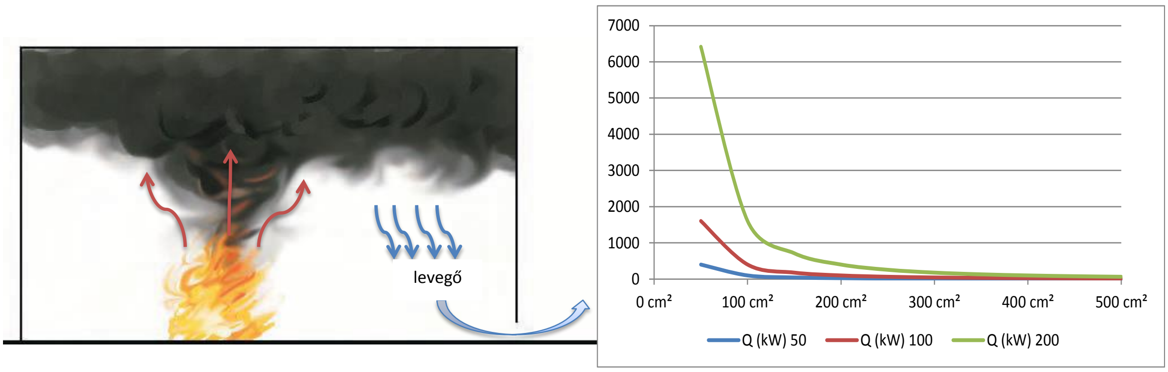


1. ábra. Tűz hatására a zárt tér nyomásnövekedése (Δp) az idő függvényében

Az egyenletből látszik, hogy azonos tűzteljesítmény esetén a helyiség térfogatának növekedésével kisebb a nyomásnövekedés. Mivel a helyiségek általában nem teljesen légtömörek, illetve a hőmérséklet növekedésével arányosan nő az épületszerkezetnek átadott hő, az idő múlásával nem arányosan nő a nyomás. A fenti modell tehát a legrosszabb esetet feltételezi. Kijelenthető, hogy a teljesen zárt helyiségek épületszerkezetei tűz esetén hamar károsodást szenvednek.
Az épületszerkezet sohasem teljesen zárt. A nyílászárók a nyomáskülönbség hatására áteresztenek, ezért a majdnem teljesen zárt terek esetében nem az előbb ismertetett modellt használhatjuk.
Ha feltételezzük, hogy a helyiség zárt, de az alsó félben a nyílászárók miatt nem tökéletes a helyiség integritása, a helyiségből kiáramló levegő hőmérséklete azonos a tűz keletkezésének kezdeti hőmérsékletével, az épületszerkezet és a helyiség között hőcsere nem zajlik, a kitáguló gáz munkát nem végez, a helyiségből a kiáramlás ideális (súrlódási veszteség nem ébred), akkor az ideális gázáramlás és a termodinamikai egyenletből levezethető a nyomásnövekedés egyenlete:

$$\Delta p = \frac{\left[\dot{Q} / (c_p \cdot T_0 \cdot A_h)\right]^2}{2 \cdot \rho_{lev}}$$

Az egyenletben a levegő állandó nyomáson vett fajhője szerepel (c_p=1.1KJ/kgK), A_h (m^2) a helyiség résmérete, mely 1cm-es résvastagság esetében 2m hosszon 0,02m^2, ami egy átlagos helyiség integritását tekintve realisztikus érték. Legyen a tűz teljesítménye 50, 100 illetve 200kW.Az alábbi ábrán a maximális nyomásnövekedést látjuk a résméret függvényében.



2. ábra. Tűz hatására a majdnem zárt tér maximális nyomása (Δp) résméret függvényében

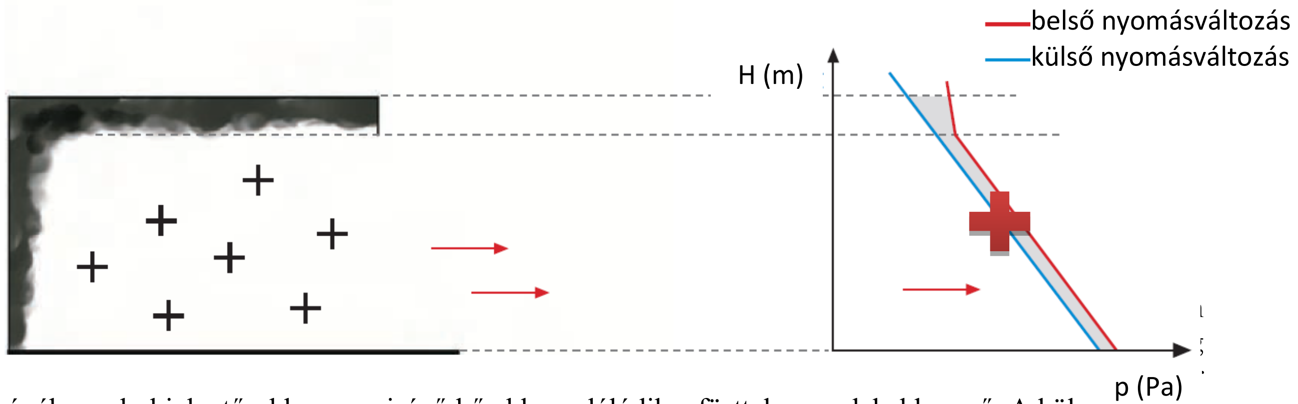
Látható, hogy viszonylag csekély résnyílás esetében is a zárt térhez képest csekély túlnyomás alakul ki a helyiségben. (100kW, 200cm^2 esetén 100Pa). Zárt téri tüzek esetében a résveszteségek miatt ez tehát a helyiség túlnyomásának nagyságrendje. Ezt a túlnyomást az épületszerkezetek általában elviselik. Nyitott nyílászárók esetében a túlnyomás jellemzően néhány 1-2Pa vagy még alacsonyabb.

1.2. Nyitott terek nyomásviszonyai

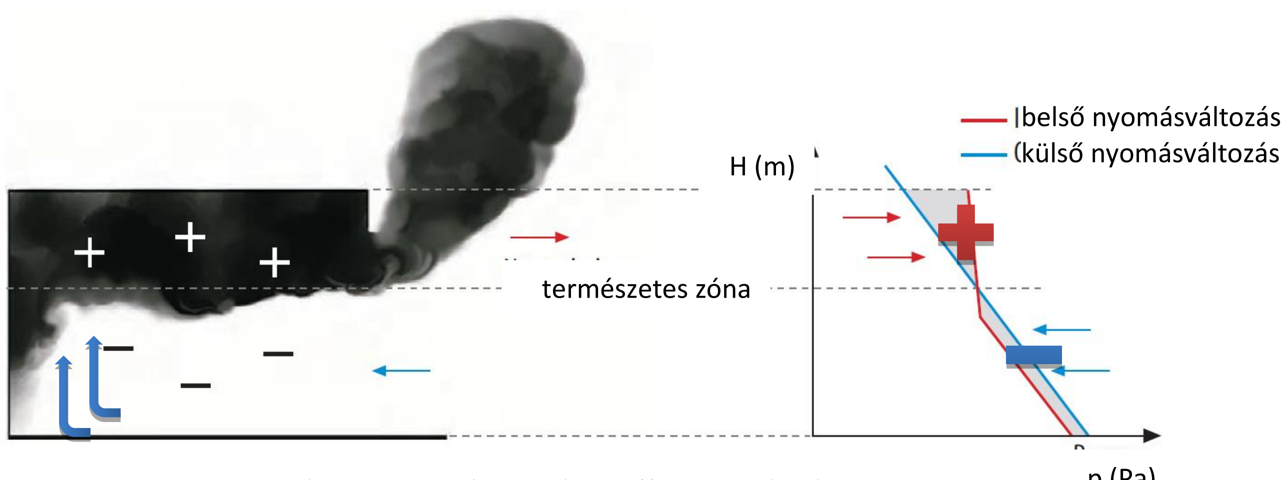
Nyitott terek, illetve azon terek esetében, ahol a helyiség tetején és alján is találhatók nyílások, más modellt használhatunk. Ezekben az esetekben a külső és belső tér közötti nyomásváltozások együttes elemzése szükséges.
Az épület körül kialakuló nyomásviszonyokat legegyszerűbben a statika alaptörvényével modellezhetjük (H- magasság, ρ_e - külső levegő sűrűsége):

$$p_e = p_0 - H \cdot g \cdot \rho_e$$

A fenti egyenlet szerint tehát az épület körül a magasság függvényében lineárisan csökken a nyomás. A levegő sűrűségét figyelembe véve méterenként 10Pa a nyomásváltozás. Ez a statikus nyomásváltozás, melyre a szél zavaró hatása még szuperponálódhat.



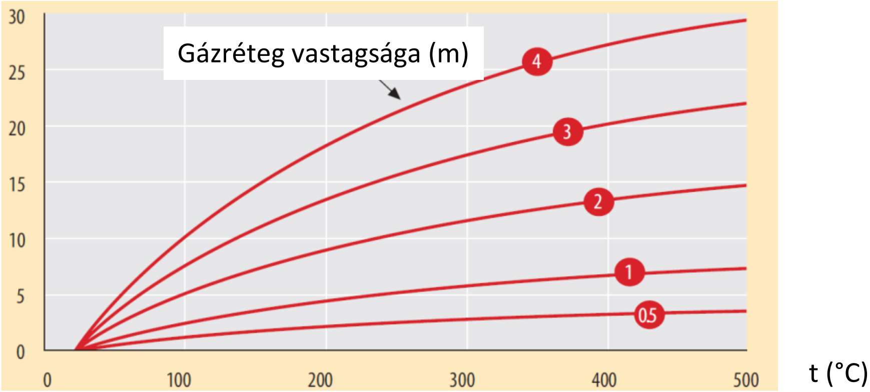
zónában, ahol jelentősebb mennyiségű hő akkumulálódik a füsttel, meredekebben nő. A külső (kék) és belső (piros) nyomás között – mint az előző fejezetben láttuk – alig van különbség, de a belső nyomás végig magasabb, tehát a nyitott helyiségből a termikusan táguló levegő kifelé áramlik.



4. ábra. Nyomásviszonyok a puffer zóna telítődése után

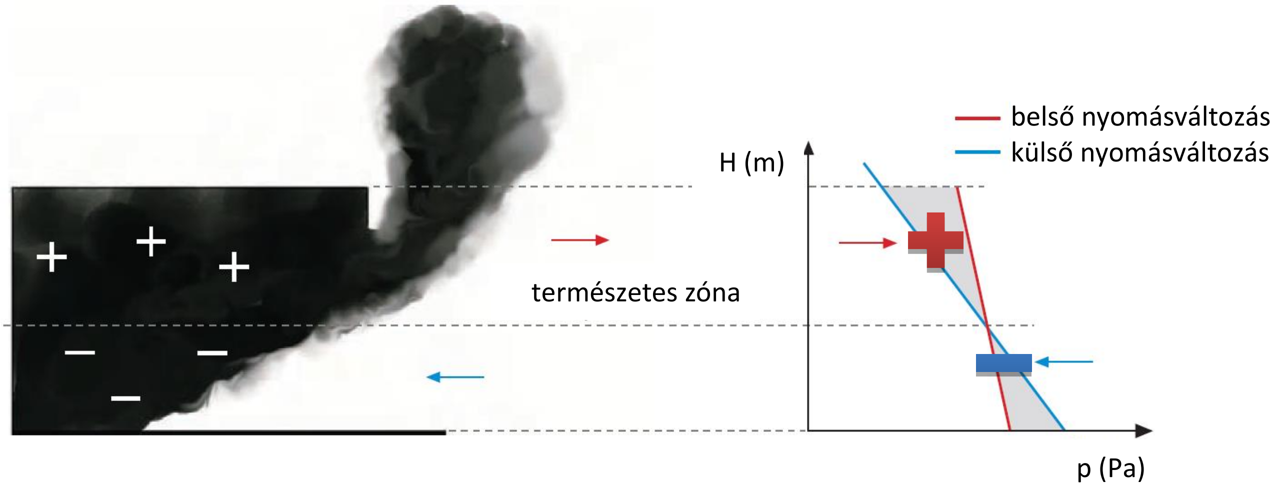
A puffer zóna telítődése után, a levegő kiáramlása mellett kitörő füsttel hő- és anyagáramlás indul el a helyiségből a környezet felé. Mivel a kiáramló térfogat már meghaladja a termikus térfogattágulást, a tűz zónájában intenzív feláramlás, a padlózónában a nyitott felületen keresztül intenzív beáramlás indul. Ennek megfelelően (4.ábra jobb oldala) a mennyezeti zónában a környezetnél magasabb, a padlózónában a környezetnél alacsonyabb nyomás jellemző. A két nyomás átmetszi egymást, tehát lesz egy pont, ahol nincs különbség a belső és külső nyomások között, ezt *természetes zónának* hívjuk. Továbbra is jellemző lesz, hogy a füsttel telt rétegben gyorsabban nő a nyomás.A termikus tágulás hatására kialakuló túlnyomás egyre csökken.

Δp (Pa)



5. ábra. A belső és külső tér közötti nyomáskülönbség (Δp) a gázréteg vastagsága és hőmérsékletének (t) függvényében

A nyomásviszonyokat ismerve az ideális gáztörvény és a statika alapegyenlete segítségével viszonylag pontos modelleket készíthetünk a nyomásviszonyok elemzésére. A nyílásméret, a gáz- és környezeti hőmérséklet, a füstgázzal telített zóna magasságának ismeretében a nyomáskülönbségeket tetszőleges magasságban kiszámíthatjuk. Az5. ábrából látható, hogy szokásos belmagasság esetén a nyomáskülönbség 10Pa nagyságrendjébe esik.



6. ábra. Nyomásviszonyok a teljesen kifejlődött égés közben

A teljesen kifejlődött égés alatt a nyomásváltozás lienarizálódik a belső térben is, mely arra utal, hogy a tökéleteshez közeli a keveredés, illetve egyenletes a hőmérséklet. Továbbra is jellemző lesz a természetes zóna. A természetes zóna felett kiáramlás, alatta beáramlás figyelhető meg.

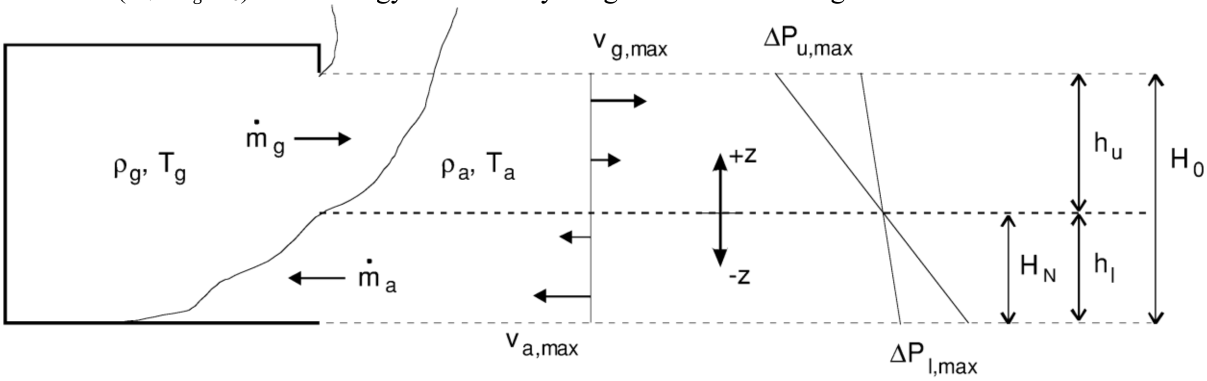
2. Nyitott (jól szellőző) terek modelljei

Az előzőekből látszik, hogy a teljesen kifejlődött égés pillanatáig a jól szellőzöttnek tekinthető térben a füsttel szennyezett rétegvastagság jól elkülönül a füsttel még szennyezetlen rétegtől. Az előzőekben ismertetett termikus táguláson és sűrűségkülönbségen alapuló modellek is felhasználják ezt a jelenséget (lásd 4. ábra). Az elkülöníthető füstréteg vastagságára épülő modelleket kétzónás modelleknek hívjuk. A kétzónás modellek nem csak a nyomáskülönbség meghatározására alkalmasak. A majdnem zárt terek modellje esetén már láttunk rá példát, hogy a nyomáskülönbség mellett a tömegáramok is számíthatók.

2.1. Teljesen kifejlődött égés esetén a tömegáramok modelljei

Az előzőekben láttuk, hogy teljesen kifejődött égés esetén a külső és belső nyomáseloszlás lineáris (tökéletes keveredés, vagy egyenletes hőmérséklet modell). Erre a fizikai jelenségre alapozva a füst (m_g) és a levegő (m_a) tömegáramára készíthetünk modellt a nyílásmagasság (H_0) és a hőmérsékletek

(T_g, T_a) ismeretében (a tömegáramok hajtóereje a nyomás és sűrűségkülönbség, de az ideális gáztörvényből az abszolút hőmérsékletek segítségével a sűrűségek számíthatók). A hatásos nyílásméretet az OTSZ-ből is ismert módon a geometriai nyílás átfolyási tényezővel módosított értékével ($C_v=A_g/A_0$) vesszük figyelembe.A nyílás geometriai szélessége: L



7. ábra. A teljesen kifejlődött égés tömegáram-modelljében használt jelölések

A teljes levezetést hely hiányában nem mutatom be.Részben már az előzőekben bemutatott egyenleteket (nyomáskülönbség hatására ideális kiáramlás, statika alapegyenlete stb.) használom, a változó sebességek miatt a tömegáramokra integrálni kell. A kiáramló gáz tömegáramára a 7. ábra jelöléseivel a következő egyenlet adódik:

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_v L \rho_g \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_g}} h_u^{3/2}$$

Hasonlóan a beáramló levegő tömegáramára:

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} C_v L \rho_a \sqrt{\frac{2(\rho_a - \rho_g)g}{\rho_a}} h_l^{3/2}$$

A két fenti összefüggésben aH_0 teljes nyílásméretet a természetes zóna osztja ketté h_u és h_l arányban ($H_0=h_u+h_l$). A sűrűségeket az ideális gáztörvényből számítjuk $P \cdot M=\rho \cdot R \cdot T$ összefüggéssel, P helyére az atmoszférikus nyomást helyettesítve, a levegő móltömegével, a $\rho \cdot T=353$ igen egyszerű összefüggés adódik, mely a sűrűség és abszolút hőmérséklet között teremt kapcsolatot. Az egyenletekben egyedül a természetes zóna geometriai helyzete nem ismert. Ennek számításához feltételezzük, hogy a beáramló és eláramló tömegáramok azonosak: $\dot{m}_g = \dot{m}_a$. A fenti két egyenletet tehát egyenlővé tehetjük, melyből adódik, hogy a természetes zóna a teljes szabad keresztmetszetet a sűrűségek arányában osztja ketté:

$$\left(\frac{h_u}{h_l}\right)^{3/2} = \left(\frac{\rho_a}{\rho_g}\right)^{1/2}$$

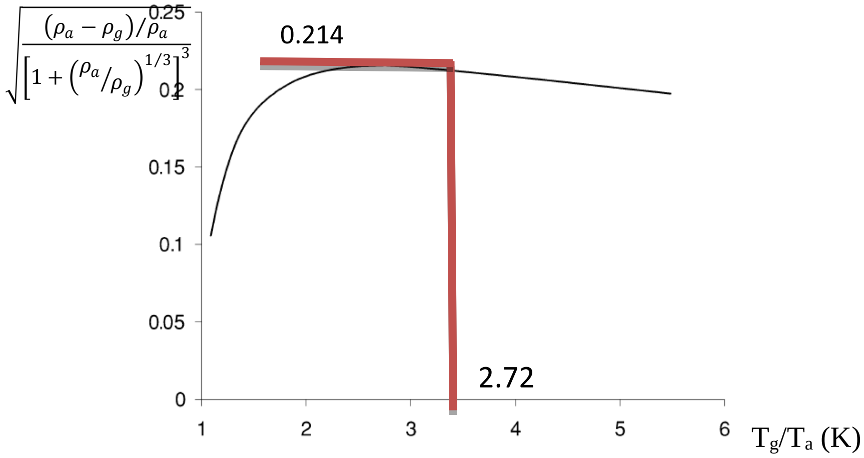
A fenti egyenletből a $H_0=h_u+h_l$ azonosság segítségével a magasságok számíthatók. Például h_l-re a következő egyenlet adódik:

$$h_l = \frac{H_0}{1 + \left(\rho_a/\rho_g\right)^{1/3}}$$

Ha a fenti egyenletet a levegő tömegáram-egyenletébe helyettesítjük, illetve a teljes nyílásfelületet $A=L \cdot H_0$ egyenlettel számítjuk, a sűrűségeket átcsoportosítva kapjuk a következő egyenletet:

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

Az egyenlet első ránézésre bonyolult, de látható, hogy az első fele az ideális áramlási sebességből, sűrűségből, effektív felületből a tömegáramot számítja(a 2/3 a sebességprofil változását veszi figyelembe). Az egyenlet második felében a nyomásviszonyból adódik a beáramló levegő felületi hányada. Ha ezt a tagot a külső és belső hőmérsékletek hányadosa függvényében ábrázoljuk, további megfontolásokra nyílik lehetőség:



8. ábra. A nyomáshányados alakulása a hőmérséklethányados függvényében

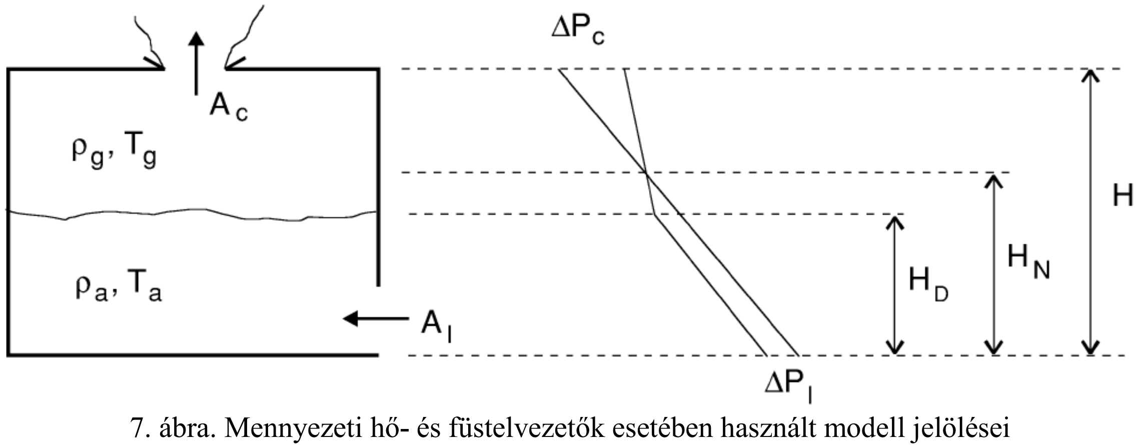
A fenti diagram megmutatja, hogy a nyomáshányadosnak maximuma van.Nagyjából 800°C tűztéri hőmérséklet esetén, a maximum érték 0.214. Ha a fenti egyenletbe helyettesítjük a nyomáshányadost, C_v=0,7 feltételezéssel élve kapjuk a sokunk számára jól ismert összefüggést:

$$\dot{m}_a = 0.5A\sqrt{H_0}$$

A leírt egyszerű összefüggés alkalmas a tűztérből kilépő füstgáz tömegáramának közelítő meghatározására, ha a tűztér hőmérséklete legalább 300°C, a hőmérséklet-eloszlás közel egyenletes. Ezek a feltételek a teljesen kiterjedt égés környezetében alakulnak ki. A számításhoz csak a szabad nyílásmagasságot kell ismerni, nem veszi figyelembe az égés közben keletkező égéstermék tömegáramot.

2.2. Vízszintes nyílások a mennyezeten

Hő- és füstelvezetés szempontjából fontos számunkra a mennyezeten elhelyezett vízszintes nyílások modellje.Jelöljük a füsttel telt légréteget H_d-vel, a természetes zóna magasságát H_n-el, a belmagasságot H-val.



7. ábra. Mennyezeti hő- és füstelvezetők esetében használt modell jelölései

A modell származtatásakor a klasszikus kétzónás modellből indulhatunk ki, ahol az A_c és A_i felületek és a környezet között keletkezik a nyomáskülönbség, mely nyomáskülönbség a be- és kijutó tömegáramok hajtóereje.A kétzónás modellben a füsttel telített réteg sűrűsége és hőmérséklete ρ_g, T_g, ahol tökéletes keveredést (állandó hőmérsékletet) feltételezünk. A füstmentes réteg sűrűsége és hőmérséklete ρ_a, T_a , mely egyezik a külső hőmérséklettel, és szintén állandó. A statikus nyomások különbségét a mennyezet és a környezet (Δp_c), illetve alégpótló nyílás és a környezet közé (Δp_l),a természetes zóna nyomásazonosságának feltételét kihasználva írhatjuk fel.

$$\Delta p_c = (H - H_N)\cdot(\rho_a - \rho_g)\cdot g$$, illetve $$\Delta p_l = (H_N - H_D)\cdot(\rho_a - \rho_g)\cdot g$$

A két egyenletből látszik, hogy Δp_c nyomáskülönbség a természetes zóna és a belmagasság különbségén, a külső levegő és füstgáz sűrűség-különbségével hat, Δp_l nyomáskülönbség esetében ugyanaz a sűrűségkülönbség a természetes zóna és a füsttel telt légréteg között hat. A nyomáskülönbség hatására létrejövő sebesség az ideális kiáramlás egyenletével számítható (az előző levezetésekben is többször utaltam rá, az egyenletet egyébként a Bernoulli egyenletből származtathatjuk):

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

illetve a tömegáram egyenlete:

$$\dot{m} = C_v \cdot A \cdot \rho \cdot v = C_v \cdot A \cdot \rho \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

A nyomáskülönbségek segítségével két tömegáram-egyenlet írható fel, $\dot{m}_c$ -re és $\dot{m}_l$ -re. Ha a tűzben keletkezett égéstermék tömegáramától eltekintünk,a tűztérbe lépő és az azt elhagyó tömegáramokat azonosnak feltételezve a természetes zóna magassága az alábbi egyenlettel számítható (a beáramlás és eláramlás C_v-je nem azonos):

$$H_N = \frac{A_l^2 c_{vl} \rho_a H_D + A_c^2 c_{vc} \rho_g H}{A_l^2 c_{vl} \rho_a + A_c^2 c_{vc} \rho_g}$$

A fenti tömegáram egyenletébe a természetes zónamagasság imént kapott egyenletét az idális gáztörvényt helyettesítve – feltételezve, hogy az eláramlás és beáramlás C_v-je azonos – megkapjuk a füsltelvezető kupola tömegáram egyenletét:

$$\dot{m}_c = \frac{C_v A_c \rho_a \sqrt{2g(H - H_D)(T_g - T_a)T_a}}{\sqrt{T_g \left(T_g + T_a \left(\frac{A_c}{A_l}\right)^2\right)}}$$

Az egyenlet tovább egyszerűsíthető, ha a levegőbevezetés felülete jellemzően nagyobb, mint a méretezendő elvezető felület (ekkor a nevezőben $\left(\frac{A_c}{A_l}\right)^2 = \mathbf{0}$ feltételezéssel élhetünk):

$$\dot{m}_c = \frac{C_v A_c \rho_a \sqrt{2g(H - H_D)(T_g - T_a)T_a}}{T_g}$$

Figyeljük meg, hogy az egyenletben az elvezetendő füst mennyiségét a füstmentes légréteg előírt magassága, a füsttel telített légréteg és a környezet hőmérséklete, valamint az épület és füstelvezető felületének geometriai mérete határozza meg.

3. Összefoglalás

A 2. fejezetben levezetett összefüggés alkalmas a füstelvezető rendszer analitikus úton történő méretezésére, ha ismerjük a tűz által keltett füst tömegáramát (a füst tömegáram egyenleteit egy későbbi alkalommal szeretném ismertetni). Természetesen a fenti összefüggés alkalmazhatóságához (esetleges szabványosításához) szükségünk van még a kockázat elvű tűzfejlődés elveinek lefektetésére is, valamint konszenzusra kell jutnunk, hogy mely környezeti jellemzők mellett kell vizsgálnunk a füstelvezető nyílás hatékonyságát. Az összefüggés nemcsak a füsttel telt légréteg méretezésére alkalmas. Feltételezve a megengedhető maximális hőmérsékletet a szerkezetvédelmi, tehát hőelvezetési méretezések alapját is képezheti.

[1] Szikra Csaba: A hő- és füstelvezetéselméleti háttere, Védelem, 2012. 1. szám, PP.:25-28, ISS N: 1218-2958

[2] Lars-GöranBengtsson: Enclosurefires, SwedishRescueServicesAgency, 2001, ISBN 91-7253-263-7

[3] BjörnKarlsson, James G. Quintiere: Enclosurefiredynamics, CRC Press, 2000, ISBN 0-8493-1300-7

[4] OTSZ, 28/2011. (IX. 6.) BM rendelet

Szikra Csaba
BME Épületenergetikai és Épületgépészeti Tanszék

1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.
szikra@egt.bme.hu