# Elszámolási rendszerek az áramlásmérésben – 3.

## Forróvíz és gőzmérés

**Barta Gergely, Dr. Csubák Tibor** – *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem*

**A folytatásban a forróvíz- és gőzelszámolási rendszerek szűkítőelemes méréseit tárgyaljuk részletesen, bemutatva a mérések elvi hátterét, szabványos kialakítását és a mérőrendszer számítási algoritmusának gyakorlatban megvalósítható változatát.**

### A szűkítőelemes mérés elve, módszere

A szűkítőelem a zárt csővezetékben áramló közeg útjába iktatott koncentrált fojtás, amelynek ellenállásán az áramló közeg mennyiségétől függő nyomásesés jön létre. A szűkítőelemes mennyiségmérési módszer lényege, hogy a csővezetékbe épített szűkítőelemen létrejövő $\Delta p$ nyomásesés egyértelmű összefüggésben van a csővezeték keresztmetszetén időegység alatt átáramló közeg $q_v$ térfogatsebességével:

$$\Delta p = c \cdot q_v^2 \quad .$$

A mennyiségmérő berendezés részei:
- szűkítőelem,
- nyomáskülönbség-mérő műszer,
- mérőszakasz,
- segédberendezések, tartozékok.

A szűkítőelemes mennyiségmérés általánosan elterjedt mind az iparban, mind a kísérleti mérések területén, mert
- a mérések a megfelelő pontossággal hajthatók végre,
- megbízhatóan reprodukálhatók,
- a mérési módszer egyszerű és általánosan használható,
- széles hőmérséklet- és nyomástartományban nagy mennyiségű folyadék, gáz vagy gőz is mérhető,
- az előállítási, beszerelési és karbantartási költségek viszonylag alacsonyak.

A módszer hátrányai:
- az áramló közeg energiája kismértékű veszteséget szenved,
- a kis sebességgel áramló közegek és lüktető áramlások mérése csak igen nehezen, vagy egyáltalán nem lehetséges,
- a különböző halmazállapotú anyagokat tartalmazó áramlások mérésére nem alkalmazható.

A módszer megbízható alkalmazásához a mérendő közegre, áramlására, valamint a technológiai csővezetékre a következő feltételeknek kell fennállniuk:
- az áramló közeg homogén fázisú legyen, szennyeződéseket csak kismértékben tartalmazhat,
- az áramló közeg fázisa ne változzék meg a szűkítőelemen való áramlás közben,
- az áramló közeg a csővezeték teljes keresztmetszetét töltse ki,
- a szűkítőelem előtt a sebességeloszlás legyen egyenletes, rendezett áramlási kép alakuljon ki,
- a közeg áramlása stacionárius legyen,
- az áramló közeg fajsúlya és viszkozitása ismert és állandó legyen,
- a szűkítőelem beépítési helyén a tényleges belső csőátmérőt ismerni kell, a belépés helye előtt és után megfelelő hosszúságú, egyenes csőszakaszt kell alkalmazni,
- gáz vagy gőz halmazállapotú közegek esetén a szűkítőelem utáni és előtti abszolút nyomások viszonya nem haladhatja meg a hangsebesség szempontjából kritikus nyomásviszony 80%-át.

### A tömegáram számítása összenyomhatatlan közegek (folyadékok) esetén

A tömegáram számításához az energiamegmaradási (*Bernoulli*-egyenlet) és az anyagmegmaradási törvényből (folytonossági egyenlet) indulunk ki. A mérési elrendezést, az áramlási és nyomásviszonyokat a 1. ábra mutatja.

A *Bernoulli*-egyenlet összenyomhatatlan közeg és vízszintes csővezeték esetén:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1'}{\rho} + u_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2'}{\rho} + u_2 \quad ,$$

ahol:

$\rho$ a közeg sűrűsége,

$v_1$, $v_2$ a közeg sebessége az I., ill. a II. szakaszon történő áthaladáskor,

$p_1'$, $p_2'$ a közeg nyomása az I., ill. II. szakasz tengelyvonalában,

vízszintes mérőszakasz esetén: $u_1=u_2$.

Az egyenletet rendezve:

$$p_1' - p_2' = \frac{\rho}{2} \cdot \left(v_2^2 - v_1^2\right) \quad .$$

A folytonossági egyenletet az I. és II. szelvényekre felírva:

$$A_1 \cdot \rho \cdot v_1 = A_2 \cdot \rho \cdot v_2 \quad .$$

Az egyszerűbb kezelhetőség érdekében bevezetjük a $\mu$ kontrakciós tényezőt:

$$\mu = \frac{A_2}{A_0}$$

és az $m$ szűkítési hányadost:

$$m = \frac{A_0}{A_1} \quad .$$

Ezek felhasználásával a folytonossági egyenlet:

$$A_1 \cdot \nu_1 = \mu \cdot A_0 \cdot \nu_2 \Rightarrow \nu_1 = \mu \cdot m \cdot \nu_2 \quad .$$

Behelyettesítve a *Bernoulli*-egyenlet fenti alakjába és $v_2$-re rendezve a

$$\nu_2 = \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2 \cdot m^2}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \left(p_1' - p_2'\right)}$$

egyenletet kapjuk. A II. szelvényen időegység alatt átáramló térfogatáram:

$$q_v = \mu \cdot A_0 \cdot \nu_2 \quad .$$

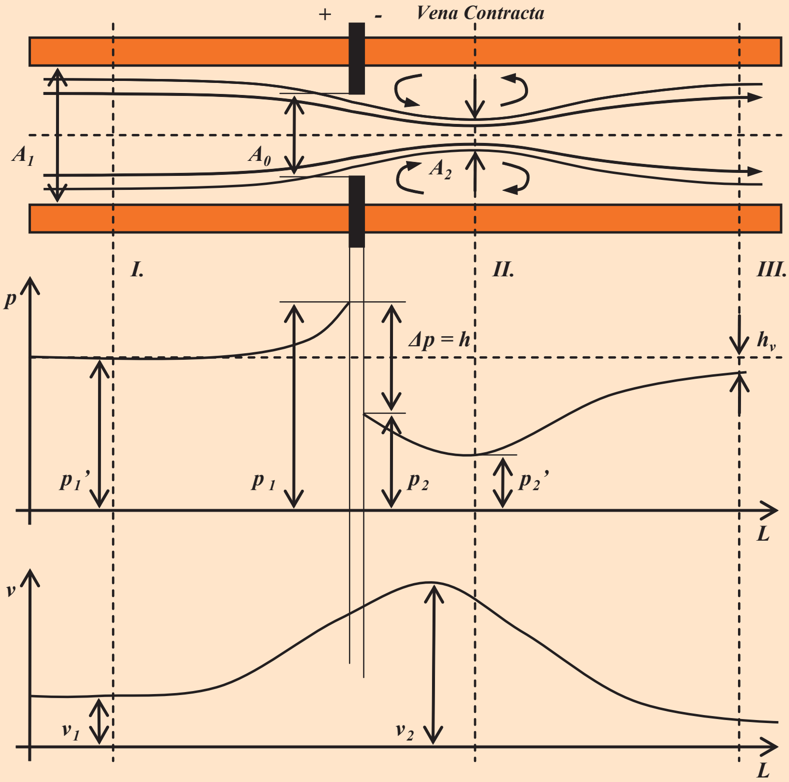
$v_2$ behelyettesítésével:

$$q_v = \frac{\mu}{\sqrt{1-\mu^2 \cdot m^2}} \cdot \frac{d^2\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \left(p_1' - p_2'\right)} \quad ,$$

ahol:

$$\frac{\mu}{\sqrt{1-\mu^2 \cdot m^2}} = \alpha' \quad .$$

az elméleti átfolyási szám. A gyakorlatban a $p_1$*'* és a $p_2$*'* nyomás helyett – amely nyomásokat az I. és II. szelvény középvonalában kellene mérni – a jobban mérhető, a szűkítőelem két oldalán lévő $p_1$ *és* $p_2$ nyomásokat mérjük, ezért az elméleti átfolyási szám a gyakorlatban nem használható.




$A_1$ – a cső belső keresztmetszete ( $\frac{D^2\pi}{4}$ )
$D$ – a csőátmérő
$A_0$ – a szűkítőelem belső keresztmetszete ( $\frac{d^2\pi}{4}$ )
$d$ – a szűkítőelem belső átmérője
$A_2$ – a Vena Contracta, a folyadéksugár legkisebb keresztmetszete
$p_1'$ – a folyadék nyomása a csővezeték tengelyvonalában
$p_1$ – a szűkítőelem előtti nyomás
$p_2$ – a szűkítőelem mögötti nyomás
$p_2'$ – a Vena Contracta síkjában lévő nyomás a cső tengelyvonalában
$h_v$ – a megmaradó nyomásveszteség
$v_1$ – a csőben lévő folyadék sebessége a mérőszakasz előtt
$v_2$ – a folyadék sebessége a Vena Contracta síkjában

*1. ábra A szűkítőelemes áramlásmérés mérési elrendezése*

**Az $\alpha$ átfolyási szám vizsgálata**

A valóságban az átfolyási szám függ az áramlási sebességtől, a közeg sűrűségétől, a közeg viszkozitásától, a csőátmérőtől, a szűkítési viszonytól és a szűkítőelem kialakításától. Az $\alpha$ gyakorlati átfolyási szám az alábbi empirikus összefüggéssel adható meg:

$$\alpha = C \cdot E \quad ,$$

ahol:
*C* sebességtényező (ld. szűkítőelem-kialakítások),
*E* belépési sebességtényező.

Az *E* belépési sebességtényező a geometria függvénye:

$$E = \left(1-\beta^4\right)^{0,5}, \quad \beta = d/D \quad ,$$

ahol:
*d* a mérőperem furatának átmérője,
*D* a csőátmérő.

A valóságos átfolyási szám felhasználásával a csővezetéken áthaladó közegmennyiség térfogatárama:

$$q_v = \alpha \cdot \frac{d^2\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (p_1 - p_2)} \quad .$$

A csővezetéken áthaladó közegmennyiség tömegárama pedig az alábbi összefüggéssel adható meg:

$$q_m = q_v \cdot \rho \quad ,$$

vagyis

$$q_m = \alpha \cdot \frac{d^2\pi}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (p_1 - p_2)}$$

### *A C* sebességtényező vizsgálata

A *C* sebességtényező két tagra bontható:

$$C = C_0 + C_{\mathrm{Re}} \quad ,$$

ahol:

$C_0$ a szűkítési viszonytól és a nyomáselvétel módjától függő érték,

$C_{\mathrm{Re}}$ a *Reynolds*-számtól, vagyis magától az áramló közeg mennyiségétől függő érték.

Tapasztalati úton juthatunk a

$$C_{\mathrm{Re}} = 91{,}71 \cdot \beta^{2,5} \cdot \mathrm{Re}^{-0,75}$$

szabványos számítási módhoz, ahol:

$$\mathrm{Re} = \frac{4 \cdot q_m}{\pi \cdot D \cdot \eta} \quad .$$

A *Reynolds*-szám kifejezésében

$q_m$ a közeg tömegárama,

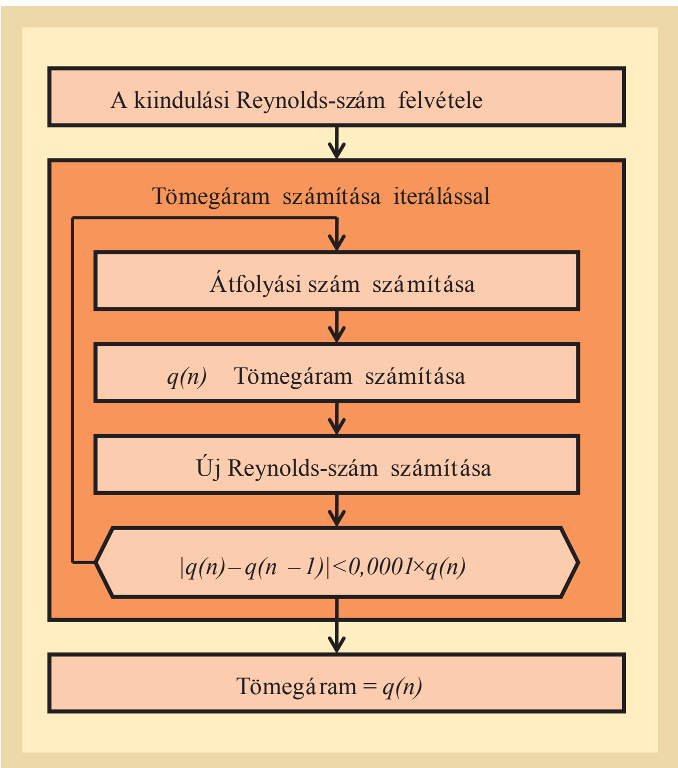
$D$ a csőátmérő,

$\eta$ a közeg dinamikai viszkozitása.

Látszik tehát, hogy $\alpha$ függ magától a mérendő mennyiségtől. Ezért a gyakorlatban kétféle módon járhatunk el:

- Technológiairányítási mérések esetén a $q_m$ tömegáram üzemszerűen előforduló munkaponti értékére kiszámoljuk a *Reynolds*-számot és $\alpha$ értékét, majd ezzel az állandónak tekintett $\alpha$-értékkel számoljuk a tömegáramot.
- Kereskedelmi elszámolási mérések esetén $\alpha$ értékét az áramló mennyiség függvényében korrigálni kell, ekkor a tömegáramszámítás egy iterációs eljárással valósítható meg (2. ábra).

*2. ábra A tömegáram számítás iterációs eljárása*




### Összenyomható közegek (gázok, gőzök) áramlásmérése

A *Bernoulli*-egyenlet összenyomható közegekre:

$$\frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} + \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{\rho} = 0 \quad .$$

Az integrál kiszámításhoz ismerni kell a

$$\rho = f(p)$$

összefüggést. A gyakorlati esetekben feltételezhető, hogy az összenyomható közeg az I. és a II szelvény között adiabatikus állapotváltozást szenved (hőszigetelt rendszer), amelyre felírható, hogy

$$\frac{p}{\rho^{\kappa}} = \mathit{állandó} \quad ,$$

vagyis:

$$\frac{p_1}{\rho_1^{\kappa}} = \frac{p_2}{\rho_2^{\kappa}} \quad ,$$

ahol:

$p_1, p_2$ a nyomás az I., ill. a II. szelvényben,

$\rho_1, \rho_2$ a sűrűség az I., ill. a II. szelvényben,

$\kappa$ az adiabatikus kitevő (az állandó nyomáson és állandó térfogaton mért fajhők viszonya).

Ebből következik, hogy

$$\frac{p}{\rho^{\kappa}} = \frac{p_1}{\rho_1^{\kappa}} \rightarrow \frac{1}{\rho} = \frac{p_1^{1/\kappa}}{\rho_1} \cdot \frac{1}{p^{1/\kappa}} \quad ,$$

tehát

$$\int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{\rho(p)} = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \quad .$$

Ezt a *Bernoulli*-egyenletbe visszahelyettesítve kapjuk, hogy:

$$\frac{v_1^2}{2} = \frac{v_2^2}{2} + \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right] \quad .$$

Az összenyomható közegre érvényes folytonossági egyenlet:

$$A_1 \cdot \rho_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot \rho_2 \cdot v_2 \quad .$$

Felhasználva $\mu$ kontrakciós tényezőt és az *m* szűkítési hányadost:

$$\mu = \frac{A_2}{A_0}; \quad m = \frac{A_0}{A_1} \quad ,$$

$v_1$ kifejezhető az alábbi alakban:

$$v_1 = \mu \cdot m \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot v_2 \quad .$$

Mivel adiabatikus állapotváltozást feltételeztünk:

$$\frac{p_1}{\rho_1^\kappa} = \frac{p_2}{\rho_2^\kappa} \to \frac{\rho_2}{\rho_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/\kappa} \quad ,$$

így

$$\nu_1 = \mu \cdot m \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/\kappa} \cdot \nu_2$$

Behelyettesítéssel:

$$\mu^2 \cdot m^2 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{1/\kappa} \cdot \nu_2^2 = \frac{\nu_2^2}{2} + \frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right] \quad ,$$

vagyis:

$$\nu_2 = \frac{\mu}{\sqrt{1 - \mu^2 \cdot m^2 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{2/\kappa}}} \cdot \sqrt{2\frac{\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{p_1}{\rho_1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]} \quad .$$

A tömegáram pedig:

$$q_m = A_2 \cdot \rho_2 \cdot \nu_2 = \alpha \cdot A_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_2^2 \cdot \frac{p_1}{\rho_1} \cdot \frac{\kappa}{\kappa-1}\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]} \quad .$$

Itt is elmondható, hogy mivel a gyakorlatban a $p_1'$, $p_2'$ nyomások helyett – amely nyomásokat az I. és II. szelvény középvonalában kellene mérni – a jobban mérhető $p_1$ és $p_2$ nyomásokat mérjük, ezért az alábbi átfolyási egyenlettel számolunk:

$$q_m = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho (p_1 - p_2)} \quad ,$$

ahol:
$\alpha$ az átfolyási szám,
$\varepsilon$ az expanziós tényező.

Az expanziós tényező az áramló közeg szűkítőelemen való átáramlása közben kialakult nyomáscsökkenése következtében létrejövő térfogat-növekedést, sebességnövekedést, ill. fajsúlycsökkenést fejezi ki. Függ a nyomáselvétel módjától, a szűkítőelem fajtájától, a szűkítési viszonytól, a $\Delta p/p_1$ viszonytól, valamint a közeg adiabatikus kitevőjétől.

Mivel $\varepsilon$ a $\Delta p/p_1$ viszonytól, valamint a mérendő mennyiségtől is függ, ezért a mérési pontosság növeléséhez az expanziós tényező értékét folyamatosan számolni kell. Ez a gyakorlatban empirikus kifejezésekkel történik (3. ábra).

IRODALOM

[1.] Dr. T. Csubák, "High-accuracy heat-flow measurement by using a quick approximate algorithm", Periodica Polytechnica Ser. El. Eng. Vol. 42, No. 2, pp. 233-250, Budapest, 1998

[2] American Gas Association, "Transmission Measurement Committee Report No. 8 – Compressibility and supercompressibility for natural gas and other hydrocarbon gases", Arlington VA, USA, 1985

*(Folytatjuk!)*

**editor@magyar-elektronika.hu**

*3. ábra Expanziós tényező számítási képletei*

| Nyomáselvétel módja | ε expanziós tényező |
|---|---|
| Sarokmegcsapolás | $\varepsilon = 1 - \left[0{,}3707 - 0{,}3134\left(\frac{d}{D}\right)^4\right] \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{1absz}}{P_1}\right)^{1/\kappa}\right]^{0{,}935}$ |
| Vena contracta | $\varepsilon = 1 - \left[0{,}41 + 0{,}35\left(\frac{d}{D}\right)^4\right] \cdot \frac{\Delta P}{P_{1absz}}$ |
| Karimamegcsapolás | |
| D és D/2 távolságban | |

ahol:

- ε – expanziós tényező
- D – a csővezeték belső átmérője
- d – a szűkítőelem furat átmérője
- ΔP – a szűkítőelemen eső nyomáskülönbség
- P – a csővezetékben áramló közeg abszolút nyomása
- κ – adiabatikus kitevő