



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Gépészmérnöki Kar  
Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék

Direkt rugóterhelésű nyomáshatároló szelepek  
öngerjesztett rezgései

Doktori disszertáció alapján készült tézisfüzet

Erdődi István

Témavezető:  
Dr. Hős Csaba

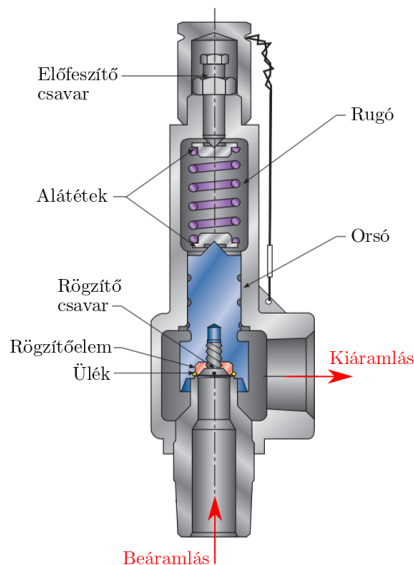
Budapest, 2019

# 1. fejezet

## Bevezetés

A nyomáshatároló szelepek képviselik a túlnyomással szembeni utolsó védvonalat, így megbízható működésük elengedhetetlen a védett rendszer biztonsága szempontjából. Egyes alkalmazási területeken, például az olajiparban — ahol a védett csővezetékek gyakran távoli, nehezen megközelíthető helyeken is keresztül haladnak — a biztonságos üzemeltetés minimális karbantartási igények mellett is garantálni kell. Ennek az elvárásnak a közvetlen rugóterhelésű kialakítás megfelel, lévén a zárótestet mindössze egy előfeszített rugó rögzíti az ülékhez (1.1. ábra), így a konstrukció rendkívül egyszerű, és kevés mozgó alkatrészből áll. Egy ilyen szelep a méretezés szempontjából két jellemző paraméterrel rendelkezik: a *nyitónyomással*, amely az a nyomásesés, amelyen a szelep nyit; valamint a *kapacitás*, amely a szelepen átengedett tömegáram a vonatkozó szabvány által előírt körülmények mellett.

Ipari tapasztalatok alapján [1] azonban ez a kialakítás bizonyos üzemeltetési körülmények között hajlamos instabil viselkedésre. Ennek oka, hogy a zárótest lényegében egy egytömegű lengőrendszerként modellezhető, amelyet az áramlásból származó erők gerjesztenek egy nemlineáris rendszert alkotva. Amennyiben egyéb csatlakozó elemek is szerepelnek a rendszer-



1.1. ábra. Egy jellemző direkt rugóterhelésű biztonsági szelep konstrukció [2].

ben, például tartályok vagy csővezetékek, úgy további instabilitások is megjelenhetnek. Ezek egyik fajtája az úgynevezett *negyedhullám instabilitás*, ami a zárótest és a felvízoldali csővezeték akusztikus kapcsolatára vezethető vissza. Ekkor a csőbéli nyomáseloszlás negyedhullám módust vesz fel. Jelen munka célja a Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék korábbi, témához kapcsolódó kutatómunkájának [3, 4, 5, 6] numerikus áramlás-tan alapú további validációja, a hivatkozott cikkekben bemutatott *negyedhullám modell* továbbfejlesztése az effektív felület felhasználásával, és a *gázdinamikai modell* kiegészítése az alvízoldali csővezeték modellezésével.

## 2. fejezet

# Az eredmények összefoglalása

### 2.1. Blowdown számítás

Számos nyomáshatároló szelepnél a zárási nyomás kisebb a nyitónyomásnál — az angol nyelvű szakirodalom a kettő különbségére a *blowdown* kifejezést használja. A műszaki gyakorlatban ez a jelenség széles körben ismert, a vonatkozó szabványok és kézikönyvek a méretezés és az üzemeltetés szempontjából is egyértelműen rendelkeznek róla [1, 7], a pontos beállítása pedig jellemzően tapasztalati úton vagy numerikus szimulációk segítségével történik. Jelen munka éppen ezért a jelenség fizikai hátterének feltárását célozza meg, és bemutat egy egyszerű, tisztán analitikus számítási eljárást, mely gyors és kvalitatív blowdown előrejelzésre alkalmas. A számítási eljárás hasonló Bazsó et al. [8] megközelítéséhez, azonban a stabilitásvizsgálat alapja jelen esetben nem a statikus-, hanem az össznyomásésés.

## 1. Tézis

Direkt rugóterhelésű nyomáshatároló szelepek nyitási és zárási nyomása közötti különbség („blowdown”) analitikusan előrejelezhető összenyomhatatlan newtoni munkaközeg esetén az egyensúlyi össznyomásesés és nyitás kapcsolatának ismeretében, melyet a

$$\Delta p_t = \frac{(1 + C_D^2 B^2(\tilde{x}) \tilde{x}^2) s (\tilde{x} + \tilde{x}_0)}{D\pi \tilde{A}_{\text{eff}}(\tilde{x})}$$

egyenlet ír le, ahol  $\Delta p_t$  az össznyomásesés a szelepen,  $C_D$  az átfolyási szám,  $\tilde{x} = 4x/D$  a dimenziótlan nyitás,  $\tilde{x}_0 = 4x_0/D$  a rugó dimenziótlan előfeszítése,  $s$  a rugómerevség,  $D$  az ülék átmérő, és  $\tilde{A}_{\text{eff}}(\tilde{x}) = A_{\text{eff}}(\tilde{x})/(D^2\pi/4)$  a dimenziótlan effektív felület. Ezen felül  $B(\tilde{x}) \equiv 1$  tányér alakú zárótestekre, valamint  $B(\tilde{x}) = (1 - \frac{\tilde{x}}{4} \cos \alpha \sin \alpha) \sin \alpha$  kúpos zárótestekre, ahol  $\alpha$  a zárótest félkúpszöge.

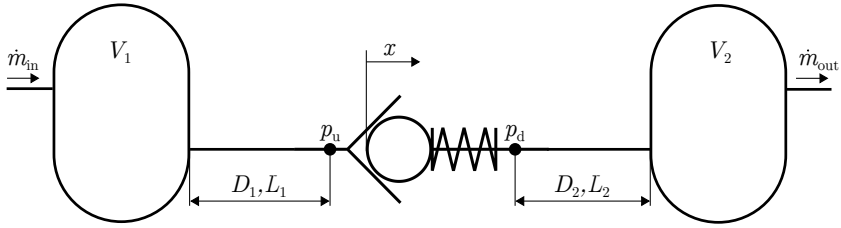
Ez alapján az egyensúlyi görbe alapján az egy adott szelepre jellemző „blowdown” megállapítható az effektív felület és az átfolyási szám ismeretében.

## 2. Tézis

Direkt rugóterhelésű nyomáshatároló szelepek  $\Delta p_t(\tilde{x})$  egyensúlyi helyzeteinek lineáris statikus stabilitási feltételét az

$$s - D\pi \frac{d\tilde{A}_{\text{eff}}(\tilde{x})}{d\tilde{x}} \frac{1}{1 + C_D^2 B^2(\tilde{x}) \tilde{x}^2} \Delta p_t + D\pi \frac{2C_D^2 \tilde{A}_{\text{eff}}(\tilde{x}) B(\tilde{x}) \tilde{x} \left( B(\tilde{x}) + \frac{dB(\tilde{x})}{d\tilde{x}} \tilde{x} \right)}{(1 + C_D^2 B^2(\tilde{x}) \tilde{x}^2)^2} \Delta p_t > 0,$$

egyenlet adja meg összenyomhatatlan newtoni munkaközeg esetén, ahol  $s$  a rugómerevség,  $D$  az ülék átmérő,  $C_D$  az átfolyási szám,  $\tilde{A}_{\text{eff}}(\tilde{x}) = A_{\text{eff}}(\tilde{x})/(D^2\pi/4)$  a dimenziótlan effektív felület,  $\tilde{x} = 4x/D$  a dimenziótlan nyitás, és  $\Delta p_t$  az össznyomásesés



2.1. ábra. A gázdinamikai modell.

a szelepen. Ezen felül  $B(\tilde{x}) \equiv 1$  tányér alakú zárótestekre, és

$$B(\tilde{x}) = \left( 1 - \frac{\tilde{x}}{4} \cos \alpha \sin \alpha \right) \sin \alpha$$

kúpos zárótestekre, ahol  $\alpha$  a zárótest félkúpszöge.

Ez a feltétel ekvivalens a

$$\frac{d\Delta p_t(\tilde{x})}{d\tilde{x}} > 0$$

feltétellel a  $\Delta p_t(\tilde{x})$  egyensúlyi görbére. Ezáltal a stabilitásvizsgálat vizuálisan is elvégezhető az effektív felület és az átfolyási szám ismeretében.

## 2.2. Átfolyó szelep peremfeltétel

A kiegészített gázdinamikai modell egy felvízoldali tartályból és csővezetékéből, a direkt rugóterhelésű szelepből (ez betölthet nyomáshatároló vagy egyenirányító szerepet is), valamint az alvízoldali csővezetékéből és tartályból áll, sematikus vázlata a 2.1 ábrán látható. A tartályokra az anyagsmegmaradás egyenletét oldja meg az üzemeltetéstől függő állapotváltozás feltételével, a csővezetékre az egydimenziós tömeg-, impulzus-, és energiamegmaradási egyenletek vannak felírva, a zárótest pedig egytömegű lengőrendszerként van modellezve. Az egyes elemeket összekapcsoló peremfeltételek alapját Hős et al. [3, 4, 5, 6]

modellje alkotja. A hivatkozott cikkekkel ellentétben jelen modellben átfolyó szelep szerepel, amihez új peremfeltétel kidolgozására volt szükség.

### 3. tézis

Kidolgoztam egy fizikailag konzisztens peremfeltételt az izentropikus karakterisztikák módszeréhez, mellyel egy két egyenes csővezeték összekötő direkt rugóterhelésű szelep működése leírható összenyomható newtoni munkaközeg esetén. A meghatározandó ismeretlenek az állapotváltozók (nyomás, hőmérséklet, sűrűség, fajlagos energia, sebesség) a felvív- és alvívoldali csővezetékek csatlakozásánál, valamint a statikus nyomás a szelep ülékénél és a zárótest után.

A módszer feltételezi, hogy a munkaközeg ideális gáz, és a szelep környezetében és a szelepen keresztül az áramlás izentropikus, valamint fojtott áramlás esetén a kritikus keresztmetszet az ülékénél található. A megoldó figyelembe veszi a keresztmetszetváltozást a felvívoldali csővezeték és az ülék, illetve a szelepház és az alvívoldali csővezeték között.

A megoldandó egyenletrendszer a szelep átfolyási egyenlete, a karakterisztikák módszeréhez kapcsolódó megmaradási egyenletek, az energiaegyenlet, az izentropikus állapotváltozást leíró egyenlet és az ideális gáz állapotegyenlete alkotja.

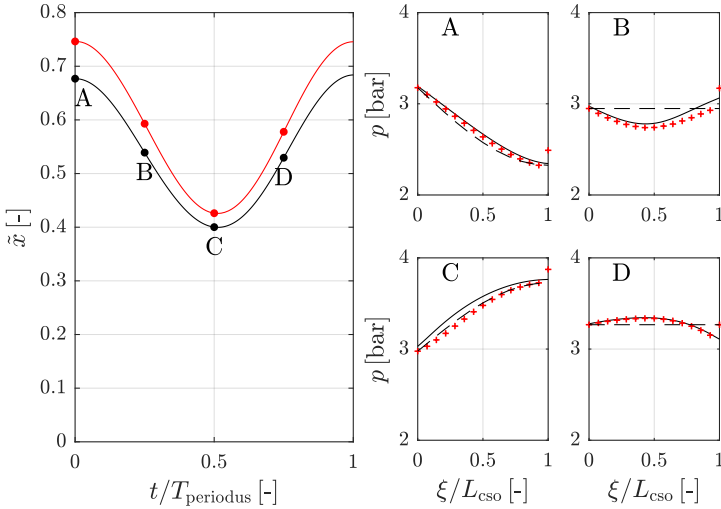
Amennyiben a szelep zárt állapotban van, az alvív- és felvívoldalon zárt csővezeték peremfeltételt kell alkalmazni. Az esetleges visszaáramlás modellezhető a két oldal felcserélésével. Kapcsolódó publikációk: [E1].

## 2.3. Negyedhullám instabilitás

A gázdinamikai modell eredményeinek és a negyedhullám modell feltételeinek validálásához instacionárius kapcsolt CFD szimulációkat végeztem. Tekintettel arra, hogy a zárótest széles nyitási tartományban elmozdulhat, a szimulációk során nemcsak a háló deformálódásának megengedésére, de dinamikus

újrahálózásra is szükség volt a háló megfelelő minőségének fenntartása érdekében.

A gázdinamikai-, a negyedhullám-, és a CFD modellek közül utóbbi tekinthető a legpontosabbnak, lévén képes a zárótest mozgásának leírása mellett a teljes áramlási tér felbontására is.



2.2. ábra. A dimenziótlan nyitás egy lengési periódus során (bal oldalt, fekete: GDM, piros: CFD), és a nyomáeloszlás a csőben a jelölt időpillanatokban (jobb oldalt, fekete folytonos vonal: GDM, piros jelölők: CFD, szaggatott vonal: negyed szinuszhullám).

A gázdinamikai és a CFD modellek eredményei esetén is megfigyelhető, hogy stabilitásvesztés után a csővezetékben a nyomáeloszlás negyedhullám módusban leng, ahogy az a 2.2 ábrán is látható. Fontos megjegyezni, hogy a két szimuláció paramétereit kis mértékben eltérnek, azonban a célom nem a két eredmény egymásra illesztése, hanem a negyedhullám alak bemutatása. Az első és utolsó előtti nyomás értékekre illesztett szinusz negyedhullám megerősíti a korábbi feltételezéseket. Az



utolsó, szelephez legközelebbi nyomás érték nem illeszkedik a negyedhullám görbére, ott már megfigyelhető a szelep „megálító” hatása.

Tudomásom szerint ez az első, CFD szimulációk segítségével is kimutatott negyedhullám instabilitás.

#### 4. tézis

Egy egyenes csővezetékhez csatlakoztatott, összenyomható newtoni munkaközegű direkt rugóterhelésű nyomáshatároló szelepre az időfüggő kétdimenziós Reynolds átlagolt Navier-Stokes egyenletekre alapuló kapcsolt CFD szimulációk segítségével megmutattam, hogy a dinamikus stabilitásvesztéskor a csőbeli nyomáseloszlás negyedhullám módusban leng. Ez bizonyítja, hogy a negyedhullám instabilitás hátterében valóban a csővezeték és a szelep akusztikus kapcsolása áll.

Kapcsolódó publikációk: [E2, E3, E4, E5, E6].

# Irodalomjegyzék

- [1] American Petroleum Institute, „API Standard 520: Sizing, Selection, and Installation of Pressure-relieving Devices, Part II—Installation,” 2015.
- [2] Emerson, „Anderson Greenwood Series 61 Spring Operated Pressure Relief Valves,” 2017.
- [3] C. J. Hős, A. R. Champneys, K. Paul, és M. McNeely, „Dynamic behavior of direct spring loaded pressure relief valves in gas service: Model development, measurements and instability mechanisms,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 31, no. 1, pp. 70–81, 2014.
- [4] C. Hős, A. Champneys, K. Paul, és M. McNeely, „Dynamic behaviour of direct spring loaded pressure relief valves in gas service: II reduced order modelling,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 36, pp. 1–12, 2015. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950423015001151>
- [5] C. Hős, A. Champneys, K. Paul, és M. McNeely, „Dynamic behaviour of direct spring loaded pressure relief valves: III valves in liquid service,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 43, pp. 1–9, 2016.
- [6] C. Hős, A. Champneys, K. Paul, és M. McNeely, „Dynamic behaviour of direct spring loaded pressure relief val-

ves: IV review and recommendations on instability avoidance,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 48, pp. 270–288, 2017.

- [7] ASME, „ASME Code Section VIII, Division I, Appendix M,” American Society of Mechanical Engineers, Tech. Rep., February 2010.
- [8] C. Bazsó és C. Hős, „On the static instability of liquid poppet valves,” *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 59, no. 1, pp. 1–7, 2015. [Online]. Available: <http://pp.bme.hu/me/article/view/7049>

## Saját publikációk

- [E1] I. Erdődi és C. Hős, „Stability analysis of spring operated check valves with upstream and downstream pipings,” in *Proceedings of CMFF'18*, Budapest, 2018.
- [E2] I. Erdődi és C. Hős, „CFD simulation on the dynamics of a direct spring operated pressure relief valve,” in *Proceedings of CMFF'15*, Budapest, 2015.
- [E3] I. Erdődi és C. Hős, „Nyomáshatároló szelep dinamikus stabilitásának numerikus áramlástan vizsgálat,” in *OGÉT 2016: XXIV. Nemzetközi Gépészeti Találkozó*, Déva, 2016, pp. 106–109.
- [E4] I. Erdődi és C. Hős, „Effect of disc geometry on the dynamic stability of direct spring operated pressure relief val-

ves,” in *VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, Hersonissos, 2016.

- [E5] I. Erdődi és C. Hős, „Numerical modeling of a direct spring operated pressure relief valve,” *Journal of Computational and Applied Mechanics*, vol. 11, no. 2, pp. 123–136, 2017.
- [E6] I. Erdődi és C. Hős, „Prediction of quarter-wave instability in direct spring operated pressure relief valves with upstream piping by means of CFD and reduced order modelling,” *Journal of Fluids and Structures*, vol. 73, pp. 37–52, 2017.