

SZELEP HIRTELEN ZÁRÁS OKOZTA NYOMÁSLENGÉS VIZSGÁLATA

INVESTIGATION OF PRESSURE SWING IN CASE OF SUDDEN CLOSURE OF VALVE

Szepesi L. Gábor*

ABSTRACT

This article shows the effect that sudden closure of a valve has on the pressure in the system. It uses CFD simulations to investigate the phenomenon at different pressure levels. It points out that safety fittings in the system (in particular the rupture discs) may not function as intended.

1. BEVEZETÉS

A vegyipari és élelmiszeripari környezetben a közegek szállítása csővezetéseken keresztül történik. Különböző technológiai folyamatok, beavatkozások elvégzéséhez elzáró, szabályozó szerelvényeket alkalmaznak. Ezen szerelvények alapvetően lehetnek szelepek, csapok, tolózárak. Szelepek esetében az áramlás iránytörést szenved, míg csapok esetében alapvetően nem. Mindkét elzárószerelvény számos kedvező és kedvezőtlen tulajdonságokkal rendelkezik, de mindkét típusnak megvan a célzott felhasználási területe. Szabályozási feladatokra szelepeket, izolálásra csapokat használhatunk alapvetően. A kisméretű szerelvények (ha nem automatizált eszközről van szó) lehet közvetlen kézi működtetésű, a nagyobb dimenziók esetében valamilyen hajtómű alkalmazásával szükséges ezeket mozgatni. Az izolálásra használt kézi gömbcsapok egyik legnagyobb hátránya, hogy a teljesen nyitott állapotból rövid idő alatt teljesen zárt állapotba lehet állítani, ami a csővezetékrendszerben nyomáslengéseket okozhat [1]. Hasonló jelenséget mutathat szivattyúk hirtelen indulása és leállása [2]. Az ilyen módon kialakuló nyomáshullámok amplitúdója, időbeli lefutása számos geometriai paramétertől, közeg jellemzőitől és a csővezeték anyagától függ.

Li Jingpin et al [3] kísérleti berendezés segítségével elemezte a csővezetékben kialakuló sebességlengéseket, majd igazolta, hogy a SIMPLE nyomáskorrekciós algoritmus alkalmas a folyamat CFD szimulációjára.

Nikpour et al [4] szintén kísérleti és szimulációs módszereket alkalmazott csőszakaszban kialakuló nyomáslengések vizsgálatára. CFD környezetnek a FLUENT-et használták, ahol íves csőszakaszokkal

tartalmazó modellt elemeztek. A szimulációs és kísérleti eredmények összevetése során megállapították, hogy a csúcshullámok közötti eltérés maximálisan 2,64%, mely igazolja, hogy a CFD módszerekkel megbízható eredmények érhetőek el. Továbbá rámutattak arra, hogy a k-eps turbulenciamodellel kapott eredmények álltak a kísérleti méréshez legközelebb. Zhang és társai [5] gravitációs kialakítású csővezetékben vizsgálták a nyomáslengést 2s-ig tartó zárási folyamat során. Kutatásukban kimutatták, hogy levegő jelenléte a rendszerben jelentős hatást gyakorol a kialakuló nyomáslengésre.

2. NYOMÁSLENGÉS KIALAKULÁSA

Az elzárószerelvény hirtelen zárásakor kialakuló nyomáshullám a zárási helytől indul el egy meghatározott sebességgel. A hullámfront sebességének a meghatározásához szükséges ismerni a csőfal anyagát, a folyadék anyagjellemzőit, a folyadék sebességét. A folyadékelem hirtelen zárásakor összenyomódik, melyet a Hooke-törvénnyel írhatunk le:

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta p}{E_f}, \quad (1)$$

ahol

Δh - a folyadékelem összenyomódása,

h - a folyadékelem eredeti hossza,

Δp - a kialakuló nyomásváltozás,

E_f - a folyadék rugalmassági modulusa.

Ha feltételezzük, hogy a csőfal is rugalmas, akkor a folyadékelem által kifejtett nyomás hatására a csőfal kitágul, amit szintén a Hooke-törvénnyel tudunk leírni:

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{\Delta p}{2 \cdot \delta \cdot E_p} \quad (2)$$

ahol

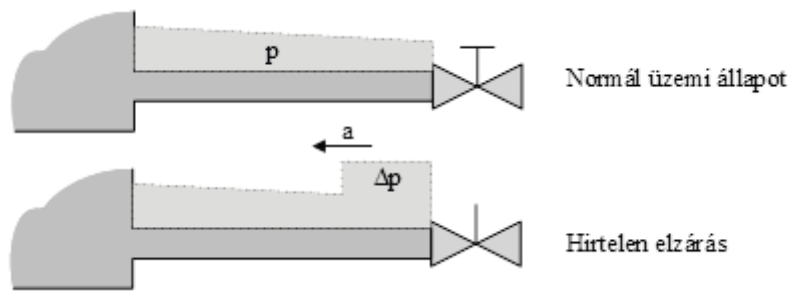
ΔD - a csőfal kitágulása,

D - a cső átmérője,

δ - a cső falvastagsága,

E_p - a csőfal rugalmassági modulusa.

* egyetemi docens, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépezeti Intézet



1. ábra Nyomáshullám kialakulása hirtelen zárás esetén

A fenti egyenletekből definiálhatunk egy redukált rugalmassági modulust, mely figyelembe veszi mind a csőfal, mind a folyadék rugalmasságát:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1}{E_f} + \frac{1}{E_p \cdot \delta / D}, \quad (3)$$

A hullámsebesség terjedését a redukált rugalmassági modulus segítségével meghatározhatjuk:

$$a = \sqrt{\frac{E_r}{\rho}}, \quad (4)$$

A csővezeték hirtelen zárásakor fellépő nyomásemelkedés a Zsukovszki-összefüggéssel határozható meg.

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v, \quad (5)$$

ahol
 Δp - nyomásváltozás,
 ρ - áramló közeg sűrűsége,
 a - visszaáramlási sebesség,
 Δv - sebességváltozás.

Abban az esetben, ha a zárás sebessége az alábbi összefüggés által számolt értéknél kisebb, akkor hirtelen zárásnak minősül, ellenkező esetben nem, így a kialakuló maximális nyomás kisebb lesz. A kritikus zárási idő:

$$\tau = \frac{2 \cdot l}{a}, \quad (6)$$

ahol
 l - a vizsgált egyenes csőszakasz.

A Joukowsky összefüggés felhasználja azt, hogy a folyadék áramlási sebessége nagyságrendekkel kisebb, mint a hullám terjedési sebessége.

Az 1-es ábrán szemléltetésre került, hogy a hirtelen zárásakor milyen módon épül fel a nyomásemelkedés. Ez

a nyomáshullám a folyadékáramlással ellentétes irányba indul meg, visszaverődik az elzárás helyétől. A nyomáshullám mögött depresszió is kialakulhat. A folyadék belső súrlódása csillapítja a jelenséget.

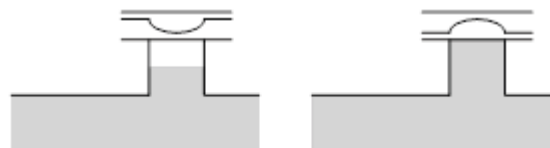
3. HASADÓTÁRCSA KONSTRUKCIÓK CSŐVEZETÉKEK TÚLNYOMÁS ELLENI VÉDELME

A csővezetékek, készülékek és egyéb rendszerek túlnyomás elleni védelmét alapvetően egy önműködően nyíló biztonsági szerelvényvel lehet kivitelezni. Az ilyen eszközök két típusba sorolhatóak: 1 – visszazáródó, 2 – nem visszazáródó. A működés után visszazáródó berendezések a biztonsági szelepek, míg a működés után nyitottan maradó eszközök a hasadótárcsák. Olyan esetekben, amikor egy veszélyes zavar következtében a nyomásnövekedés sebessége nagy, nem alkalmazható biztonsági szelep, mert a benne mozgó alkatrészek tehetetlensége miatt a nyitás sebessége nem tudja követni a nyomásemelkedés karakterisztikáját. Ilyen esetekben kivétel nélkül hasadótárcsákat szükséges alkalmazni.

A hasadótárcsa konstrukcióknak két típusa van:

- hagyományos típus,
- átbillenő típus.

A hagyományos típusú tárcsák lehetnek sík vagy elődomborított kivitelűek. (lásd 2. ábra, jobb oldali kép) Korlátok nélkül alkalmazhatóak folyadékos rendszerekben. Ezzel szemben az átbillenő típusú tárcsák csak abban az esetben alkalmazhatóak folyadékos rendszerben, ha a tárcsa előtti térfogatban található egy gáztér.



2. ábra Hasadótárcsa típusok

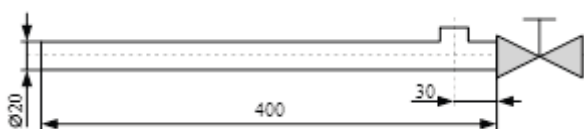
Ennek az az oka, hogy egy esetleges nyomáslengés az átbillenő hasadótárcsát átbillenti a neutrális pozíciójából, de akkora energiával nem rendelkezik,

hogy a hasadótárcsát ki is szakítsa. Ebben az új átbillent állapotban a hasadótárcsa nyitónyomása nem egyezik meg a bizonylatolt értékkel, hanem a biztonság rovására nagyobb értéken fog hasadni, ezáltal álbiztonságot teremt. Ezt leszámítva az átbillenő konstrukció számos előnnyel bírnak a hagyományos típussal szemben. A műszaki gyakorlatban, ahol lehetséges, gyakorlatilag kivétel nélkül ilyen, átbillenő (reverse) hasadótárcsákat alkalmaznak. A vizsgált rendszerben, mivel teljesen folyadékkal töltött rendszerről van szó, hagyományos típusú tárcsát vettem figyelembe.

3. NYOMÁSHULLÁM VIZSGÁLATA SZIMULÁCIÓVAL

A szerelvény hirtelen zárása következtében kialakuló nyomáshullám hatására a csővezeték túlnyomás elleni védelmét biztosító hasadótárcsa kiszakadhat. Arra kerestük a választ, hogy ilyen esetben milyen nyomás fog hatni a hasadótárcsára, elérheti-e a hasadótárcsa nyitónyomás értékét.

A numerikus szimuláció során alkalmazott geometriai modellt a 3. ábra szemlélteti.

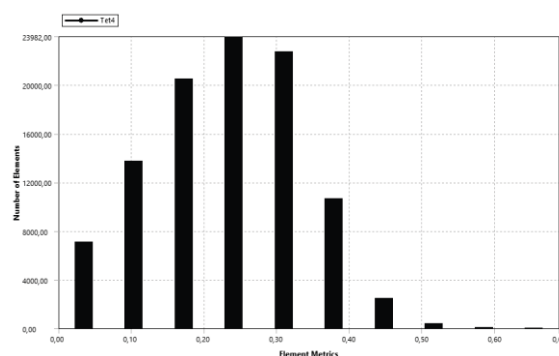


3. ábra Vizsgált csőszakasz

A 3-as ábrán látható modell a numerikus áramlástani szimulációhoz egyszerűsítésre került, a szeleptestet nem került modellezésre, az egy egyszerű falként volt kezelve. A számítási háló kialakításához tetraéder elemek kerültek alkalmazásra. A hálófüggetlenségi vizsgálat elvégzése után kijelenthető, hogy a 101449 elemet tartalmazó modell numerikusan megfelelő.



4. ábra Az alkalmazott numerikus háló



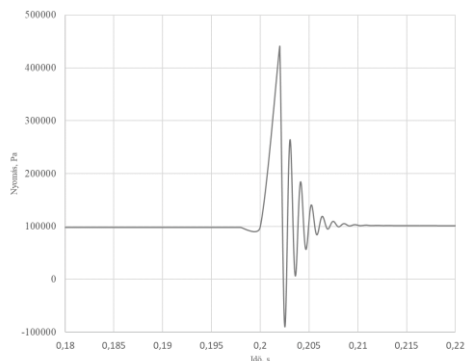
5. ábra Elemek minősége az alkalmazott hálón

Az 5. ábrán látható az elemek minőségét jellemző „skewnewss” értékek eloszlása. Jól látható, hogy a maximális érték 0,69, mely az elemek torzultságát jelenti (gyakorlatban a 0,8 alatti értékek megfelelőek).

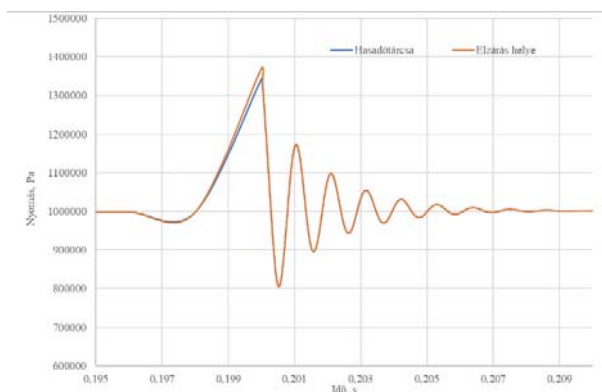
A számítás elvégzéséhez a preprocessálás során időben változó esetet volt szükséges vizsgálni, hiszen a tranzienseket kívántam meghatározni. A választott időlépték 3×10^{-5} s volt. Az áramló folyadékot összenyomható víznek volt feltételezve, ahol a víz rugalmassági modulusa $2,2 \times 10^9$ Pa. A kezdeti és peremfeltételek az alábbiak szerint alakultak:

- a belépési keresztmetszetben nyomás peremfeltétel található, melynek értéke 101325 Pa,
- a kilépési pontban sebesség peremfeltétel található az idő függvényében. A szimuláció kezdetén 2 m/s a sebesség, mely, 0,2 s alatt nullára csökken,
- a csővezeték falként volt figyelembe véve.

A számítások elemzéséhez szükséges volt egy felületet kijelölni, ahol a keletkező nyomásváltozás került regisztrálásra az idő függvényében, ez a modellben „rupturedisk” néven szerepel, valamint az elzárás közvetlen környezetében is regisztrálásra kerültek a kialakuló változások.



6. ábra Nyomásváltozás a hasadófelület közelében - szimulációs eredmények



7. ábra Nyomásváltozás a hasadófelület és az elzárás közelében - szimulációs eredmények

A 6. ábrából jól látható, hogy a 0,2s-nál bekövetkező hirtelen zárás milyen nyomásváltozást okoz. Egyértelműen kijelenthető, hogy a közel 4,5-szeres nyomásváltozás már a hasadótarcsa nyitónyomását meghaladhatja, ezért az nem tervezett veszélyforrás bekövetkezésének hatására fog kiszakadni. Jól látható továbbá, hogy milyen nyomáslengés fog a csővezetékben kialakulni. Elképzelhető, hogy a nyomáslengési csúcs hatására esetleg még nem éri el a nyomás a hasadótarcsa nyitónyomását, azonban a lengés a hasadótarcsa anyagában kisciklusú kifáradáshoz vezethet, mely szintén a hasadótarcsa indokolatlan nyitását fogja eredményezni.

A szimulációk különböző nyomások esetén kerültek elvégzésre. A 6. ábrán 1 barg-os a vízrendszer alapnyomása, míg a 7. ábrán látható eredmények esetén a rendszer nyomása 10 barg volt. Ezen az ábrán látható, hogy az elzárás helyén és a hasadófelület között milyen nyomásváltozás tapasztalható, ahogyan várható volt a hasadófelület közelében kis mértékben csökkent a kezdeti nyomáshullám maximum. A görbék közötti különbségből meghatározható a hullámterjedés sebessége, mely összevethető a (4)-es összefüggéssel.

Az elemzések eredménye rámutatott arra, hogy nem elegendő önmagában az áramlásból származó, folyadékban kialakuló nyomáslengést meghatározni, hanem a folyadékot körülvevő csővezeték és hasadótarcsa szilárdságtani állapotváltozását is szükséges vizsgálni. Ezért a kutatás a jövőben ebbe az irányba mutat.

ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott szimuláció egy, a műszaki gyakorlatban nagyon sokszor előforduló problémára világít rá. Számos esetben okozhat problémát szerelvények hirtelen zárása folyadékos környezetekben. Jelen cikk rámutat arra, hogy nem csak a hirtelen zárás, hanem szivattyú indulások is kiválthatnak ilyen folyamatokat. A nemkívánatos nyomáshullámok kialakulását megelőzendően a csővezetékrendszerbe építhetők csillapító elemek, vagy más típusú elzárószerelvények alkalmazása válhat szükségessé.

A folyamatok teljes értékű, szimulációs elemzéséhez ún. kapcsolt szimulációs eljárások elvégzése szükséges.

A kapcsolt szimulációhoz ugyan azt a modellt szükséges alkalmazni, mint a tisztán áramlástanai modellhez. A szimuláció során az áramlástanai szimulációval kapott eredmények megosztásra kerülnek a mechanikai, alakváltozást és feszültségeket leíró modellek eredményeivel is és ez visszafelé is érvényes. A kapcsolt szimuláció létrehozására (FSI – Fluid Structure Interaction) az ANSYS környezet lehetőséget biztosít.

6. IRODALOM

- [1] Dr. Szlivka F.: Hő- és áramlástechnika, Óbudai Egyetem, 2014.
- [2] Waterhammer – KSB know how brochures (<https://live-resources-e2e-sales.ksb.com/resource/blob/227418/b03ed4dd6aa0139a876090d66fe3b9f2/dow-1water-hammer-data.pdf>) link ellenőrizve: 2022.09.26.
- [3] LI Jinping, WU Peng és YANG J - Cfd Numerical Simulation of Water Hammer in Pipeline Based on the Navier-Stokes Equation - V European Conference on Computational Fluid Dynamics. Lisbon, Portugal, 14–17 June 2010
- [4] M. R. Nikpour · A. H. Nazemi · A. Hosseinzadeh Dalir F. Shoja · P. Varjavand- Experimental and Numerical Simulation of Water Hammer, Arab J Sci Eng (2014) 39:2669–2675. DOI 10.1007/s13369-013-0942-1
- [5] Boran Zhang, Wuyi Wan, Mengshan Shi - Experimental and Numerical Simulation of WaterHammer in Gravitational Pipe Flow with Continuous Air Entrainment. Water 2018, 10, 928; doi:10.3390/w10070928