

Bingham plasztikus közeg csőkönyökben történő áramlásának numerikus vizsgálata

CFD study of the flow of Bingham plastic fluid in elbow

Dr. CSIZMADIA Péter, TILL Sára

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,
Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék, 1111, Budapest, Műegyetem rkp. 3.
tel: +3614631680, www.hds.bme.hu

Abstract

The present study examines non-Newtonian fluids with Bingham plastic behaviour. These fluids are transported in many areas of the industry by means of pump systems, of which pipe elbows are an important component. Advanced numerical simulation (CFD) methods provide insight into the flows inside the elbows, and the loss coefficient can be calculated. In the present work, we investigate steady-state flow in pipe elbows with a relative radius of curvature of $R/D = 1$ by presenting a wide range of parameters (Hedström number, modified Reynolds number) using numerical flow simulation.

Keywords: Bingham plastic fluid, CFD simulation, elbow, Hedström number, modified Reynolds number

Kivonat

Jelen tanulmányban a Bingham-plasztikus viselkedésű nemnewtoni folyadékokat vesszük górcső alá. E közegek szállítása az ipar számos területén szivattyús rendszerekkel történik, amelyek fontos elemei a csőkönyökök. A fejlett áramlásszimulációs (CFD) módszerek pedig betekintést engednek a könyökök belsejében folyó áramlásokba, illetve veszteségtényezőjük is számítható. A jelen munka során egy $R/D=1$ -es relatív görbületi sugarú csőkönyökben lezajló stacionárius áramlást vizsgálunk széles paramétertartomány (Hedström-szám, módosított Reynolds-szám) bemutatásával a numerikus áramlásszimuláció eszközeivel.

Kulcsszavak: Bingham-plasztikus közeg, CFD szimuláció, csőkönyök, Hedström-szám, módosított Reynolds-szám

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a környezettudatos, energiahatékonyságra törekvő gondolkozás az első helyek egyikét foglalja el a mérnöki tervezés során, és nincs ez másképp az áramlástechnikai rendszerek esetében sem. Amennyiben pl. tiszta víz vagy olaj a szállítandó folyadék, számos forrás, szakkönyv áll rendelkezésre a veszteségek becslésére [1] [2]. Nagyobb kihívást jelent viszont, ha a munkaközeg speciális, nemnewtoni reológiai tulajdonságot mutat. Ilyen folyadékok pl. a különböző élelmiszeripari közegek (ketchup, majonéz), vagy a vegyipari gélek, zselék, továbbá a szennyvíztisztítás során alkalmazott eleveniszap is [3]. E folyadékok reológiai viselkedésére több nemnewtoni modell is illeszthető [3], amelyek közül a Bingham plasztikust vesszük górcső alá. Ekkor a folyadékban ébredő csúsztatófeszültség (τ) és az alakváltozási sebesség ($\dot{\gamma}$) között a

$$\tau = \tau_0 + \mu_B \dot{\gamma} \quad (1)$$

érvényes, ahol τ_0 a határfeszültség, μ_B a dinamikai viszkozitás Bingham-közegek esetén. Jelen tanulmányban egy gyakran alkalmazott csővezetékemben – csőkönyökben – lezajló áramlási jelenségeket elemzünk CFD módszerrel, és vizsgáljuk a Bingham-plasztikus reológia hatását az áramlási veszteségekre és az áramképre. Mindehhez az alábbi, dimenziótlan paraméterek bevezetésére van szükség:

$$\zeta = \Delta p_{\text{könyök}} \cdot \left(\frac{\rho}{2} v_{be}^2 \right)^{-1} \quad (2)$$

veszteségtényező, ami a könyök okozta össznyomásesés ($\Delta p_{k\ddot{o}ny\ddot{o}k}$) és a dinamikus nyomás ($\frac{\rho}{2} v_{be}^2$) hányadosa [4].

A Bingham-plasztikus közegeknél szokás és érdemes bevezetni a Reynolds-szám módosítását [3], [5], amiben az anyagra jellemző paraméterek is szerepet kapnak:

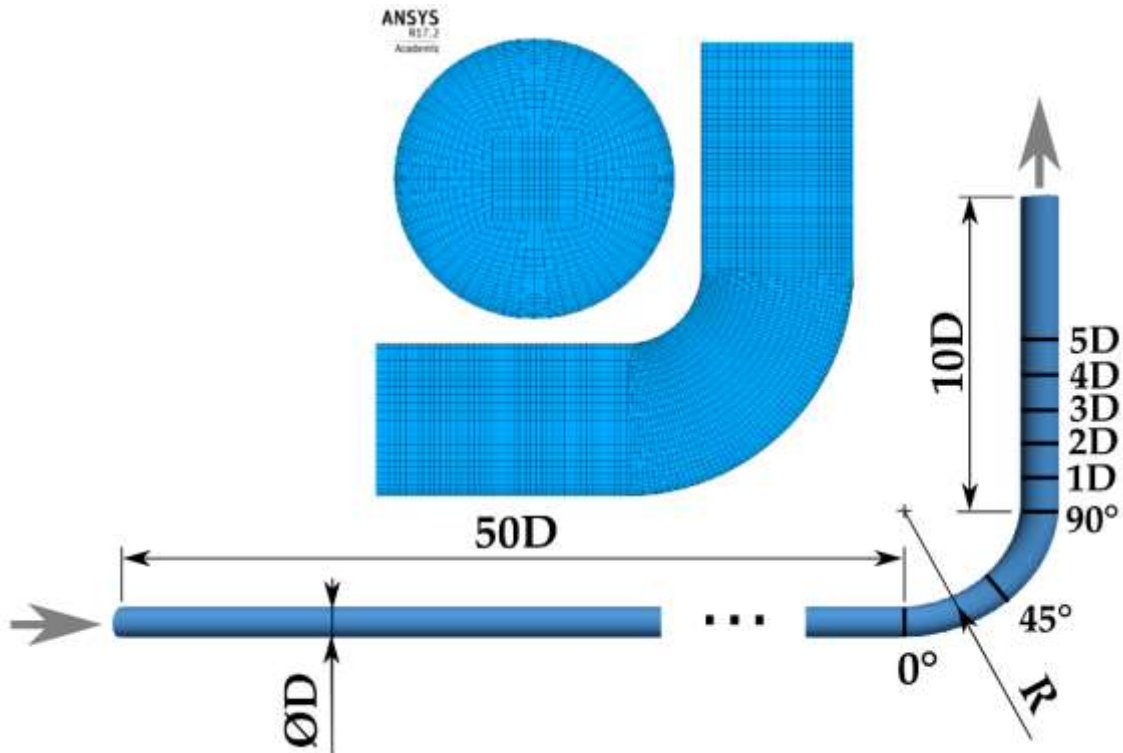
$$Re_{mod} = \frac{\bar{v}D\rho}{\frac{\tau_0 D}{8\bar{v}} + \mu_B \left(\frac{3m+1}{4m}\right)}, \quad ahol \quad m = \frac{\mu_B \frac{8\bar{v}}{D}}{\tau_0 + \mu_B \frac{8\bar{v}}{D}}, \quad (3)$$

ahol ρ a sűrűség, \bar{v} az átlagsebesség, D a cső belső átmérője. Használatos továbbá a szintén dimenziótlan Hedström-szám [6]:

$$He = \frac{D^2 \rho \tau_0}{\mu_B^2}. \quad (4)$$

2. A NUMERIKUS MODELL

Az Ansys CFX környezetben elvégzett numerikus szimulációkkal $R/D=1$ relatív görbületi sugarú csőkönyökben lezajló áramlási jelenségeket elemzünk ($D = 0,1 \text{ m}$). A hálófüggetlenségi vizsgálattal ellenőrzött, háromdimenziós, strukturált numerikus felbontásról tartalmaz egy képet az 1. ábra; az összcellszám $\approx 1,2 \text{ M}$ volt. Ezen látható, hogy a csőkönyök előtt $50D$, utána pedig $10D$ egyenes csőszakasz állt rendelkezésre az áramlás kialakulásához, illetve a szekunder áramlás hatásának figyelembevételéhez. Az időben állandósult, stacionárius áramlási modell belépő peremfeltétele előírt – kialakult newtoni turbulens - sebességprofil, a kilépő pedig állandó nyomás, a csőfal hidraulikailag sima; az alkalmazott turbulenciamodell pedig SST [7] volt. A megoldás során a szoftver automatikus időlépést alkalmazott, viszont néhány (nagy határfeszültségű) esetben numerikus instabilitás lépett fel, amit a helyi időlépés beállításával orvosolni lehetett.

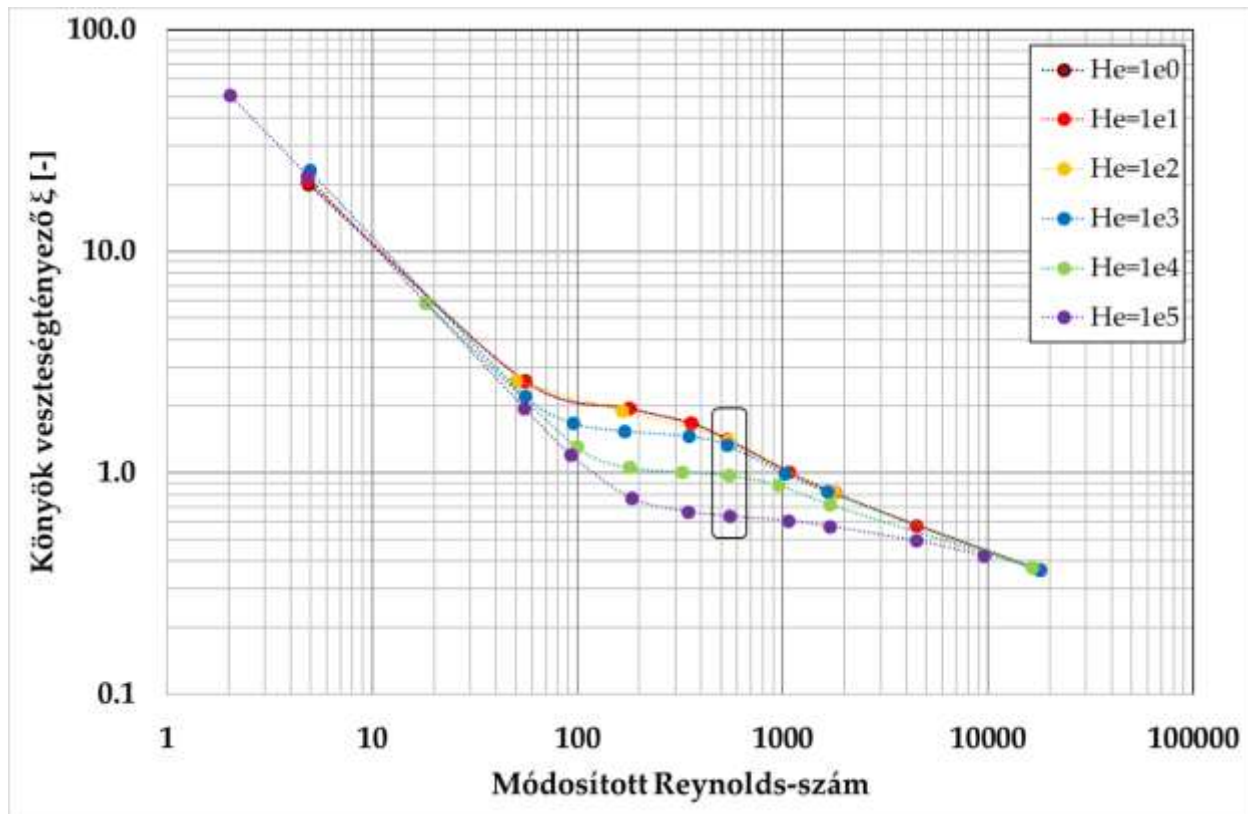


1. ábra: A vizsgált geometria és az alkalmazott numerikus felbontás.

A vizsgálat során a belépő sebesség módosításával változtattuk a módosított Reynolds-számot, valamint a τ_0 határfeszültséggel a Hedström-számot. A széles, mindkét tényezőre kb. 5 nagyságrendet lefedő paramétertartomány lehetőségét biztosított a lamináris, az átmeneti és a turbulens régiók elemzésére is.

3. EREDMÉNYEK, KÖVETKEZTETÉSEK

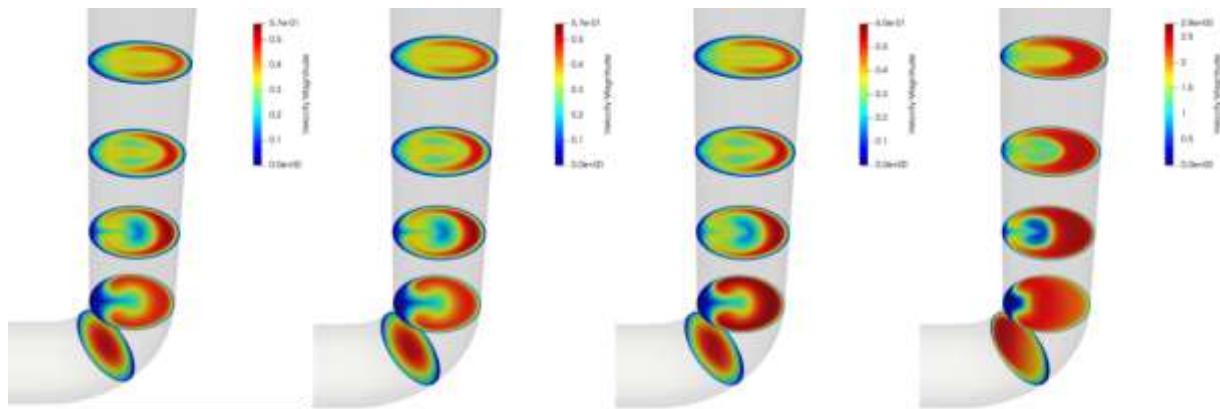
A könyök veszteségtényezőit a módosított Reynolds-szám függvényében ábrázolva (ld. 2. ábra) azt tapasztaltuk, hogy a veszteségtényező értékei a Hedström-szám szerint is rendeződnek. A módosított Reynolds-szám kis értéke esetében ezek a veszteségtényezők mind egy egyenesre esnek a log-log diagramon; majd egy bizonyos régióban a Hedström-szám szerint szétválnak; míg a turbulens tartományban megint összerendeződnek. Vagyis létezik egy olyan széles Reynolds-szám tartomány (esetünkben 50 és 20000 között) ahol a módosított Reynolds-szám, ami tartalmazza az anyagtulajdonságokat leíró paramétereket, nem elegendő a veszteségtényező megállapításához, hanem ahhoz a Hedström-szám ismerete is szükséges.



2. ábra: A veszteségtényező a módosított Reynolds-szám függvényében különböző Hedström-számok esetén; kerettel kiemelve a részletesen vizsgált $Re_{mod} \approx 540$ -hez tartozó értékek.

Amennyiben ebből a tartományból kiemelünk egy kiválasztott módosított Reynolds-számot ($Re_{mod} \approx 540$), és megvizsgáljuk a könyökben lévő sebességeloszlást, a különböző Hedström-számokon kapott áramlási képek is jól mutatják a különbséget; ez a 3. ábrán látható. Ezen az ábrán balról jobbra növekszik a Hedström-szám (rendre 1, 10, 1000, és 100 000); az ezekhez az áramképekhez tartozó veszteségtényező értékeket a 2. ábrán a bekeretezett pontok jelölik.

A kiválasztott módosított Reynolds-számnál a $He=1$ és a $He=10$ veszteségtényezői szinte egy pontra esnek, ezzel összhangban a hozzájuk tartozó áramképek is megegyeznek. A $He=1000$ -hez tartozó áramkép ettől már jól láthatóan eltér (ahogy a 2. ábrán a kék pont a pirosból is jól láthatóan elkülönül); a $He=100\ 000$ -nél kapott pedig teljesen más jelleget mutat. Minden képen jól látható az, hogy az ív után kialakul egy megcsavarodó, másodlagos örvény, de ezek mérete különbözik. A nagyobb határfeszültséghez tartozó nagyobb Hedström-szám esetében az örvény a keresztmetszet jóval kisebb részét foglalja el, és hamarabb el is hal. Fontos megjegyezni, hogy e szimulációk során a módosított Reynolds-szám mellett a μ_B viszkozitás is végig konstans értékű volt, így nem a viszkozitásváltozás okozta a Hedström-szám növekedését és a másodlagos örvényekben jelentkező különbségeket.



3. ábra: Áramképek különböző keresztmetszetekben $Re_{mod} = 540$ módosított Reynolds-szám esetén, balról jobbra a Hedström-szám rendre $He = 1; 10; 1000; 100\ 000$.

Eredményeink azt mutatják, hogy a könyök veszteségtényezői nem csak a módosított Reynolds-számtól, hanem a Hedström-számtól is függenek. Az áramképekből az látszik, hogy a csőívben kialakuló másodlagos áramlásoknak fontos szerepük van a veszteségek leírására, ezek behatóbb vizsgálata további kutatás tárgyát képezi. Ezen kívül további célunk, hogy az ívelt csőben folyó áramlások leírására használt, szintén dimenziótlan Dean-számot [8] is bevezessük. További, más görbületi sugarú csőkönyökök vizsgálatával lehetőség nyílik e paraméter elemzésére is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A munka az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-20-5-BME-156 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának valamint a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Mays L., *Water Distribution Systems Handbook*, McGraw-Hill and American Water Works Association, 2008.
- [2] Idelchik I., *Handbook of Hydraulic Resistance*, 3rd Edition, New York, NY: Begell House Inc., 2003.
- [3] Csizmadia P. és Till S., *The effect of rheology model of an activated sludge on to the predicted losses by an elbow*, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 2018, 62(4).
- [4] Lajos T., *Az áramlástan alapjai*, Budapest, 2015.
- [5] Madlener K., Frey B. és Ciezki H. K., *Generalized Reynolds number for non-Newtonian fluids*, Progress in Propulsion Physics, 2009, 1, pp. 237-250
- [6] Bobok E., *Áramlástan bányamérnököknek*, Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1987.
- [7] Csizmadia P. és Hős Cs., *CFD-based estimation and experiments on the loss coefficient for Bingham and power-law fluids through diffusers and elbows*, Computers and Fluids, 2014, 9, pp. 116-123
- [8] Kalpakli A., *Experimental study of turbulent flows through pipe bends*, Royal Institute of Technology KTH Mechanics, 2012, pp. 1-78