

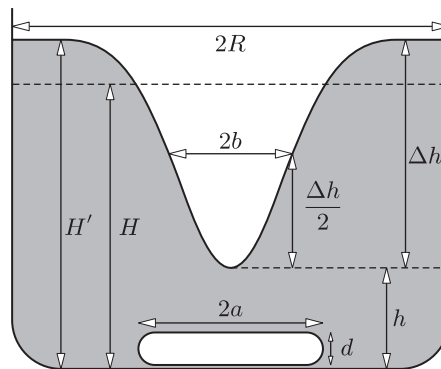
## Bevezetés

A természeti áramlások az időjárás alakítása által rendkívüli szerepet töltenek be életünkben, minél pontosabb megértésük ezért fontos feladat a fizikusok számára is. Megismerésükhöz a kísérletezésen át vezet az út, laboratóriumi körülmények között kell őket a leginkább hű módon modelleznünk. Kifejezetten erre a célra szolgál az ELTE TTK Kármán Laboratóriuma, ahol a szökőártól kezdve a különféle légköri frontokig számtalan környezeti áramló rendszer bemutatására és tanulmányozására nyílik lehetőség.

A leendő témavezetőim által ajánlott kísérletek közül a tornádómodellt választottam, és már végzős gimnazista koromban elkezdtem a méréseket. A tornádóra emléktető elrendezés meglepően egyszerű, mindössze egy edény vízre és egy mágneses keverő készülékre van hozzá szükség. A működésbe hozott rendszer képe az *I. ábrán* látható<sup>2</sup>; a sárga színű keverő készülékben forgó erős permanens mágnes vele megegyező szögsebességű forgásra kényszeríti az edény alján elhelyezett mágneses keverőfejet. A keverés által az edény közepén létrehozott erős örvénylés legfőbb jele a víz felszínén kialakuló tölcsér. Feladatom ennek az örvényes áramlásnak a minél pontosabb felderítése volt, majd a kapott mérési eredmények összevetése a tornádók megfelelő áramlási képével.

### A tölcsér méreteinek leolvasása

A lehető legegyszerűbb, mégis hatásos kísérleti módszer annak vizsgálata, hogy az örvénylés által kialakított víztölcsér méretei milyen módon függenek az edényt és a keverőfejet jellemző „bemenő” paramétereiktől. A rendszer legfontosabb geometriai méreteit az *1. ábra* foglalja össze;  $R$  a henger alakú edény sugarát, míg  $H$  az eredeti feltöltési magasságot jelöli. A keverőfejre vízszintes és függőleges méretein ( $a$ ,  $d$ ) túl jellemző még  $\Omega$  szögsebessége, melyet a keverő készüléken található egyik potenciométer (ld. *I. ábra*) segítségével lehet szabályozni. A tölcsér  $\Delta h$  magassága a kiszoruló víz miatt módosult  $H'$  vízmagasságból és a tölcsér legalsó pontjának  $h$  magasságából számolható egyszerű kivonással. A víztölcsér másik fontos mérete a vízfelszín és a legalsó pont között félúton mérendő  $b$  felszélesség.



1. ábra

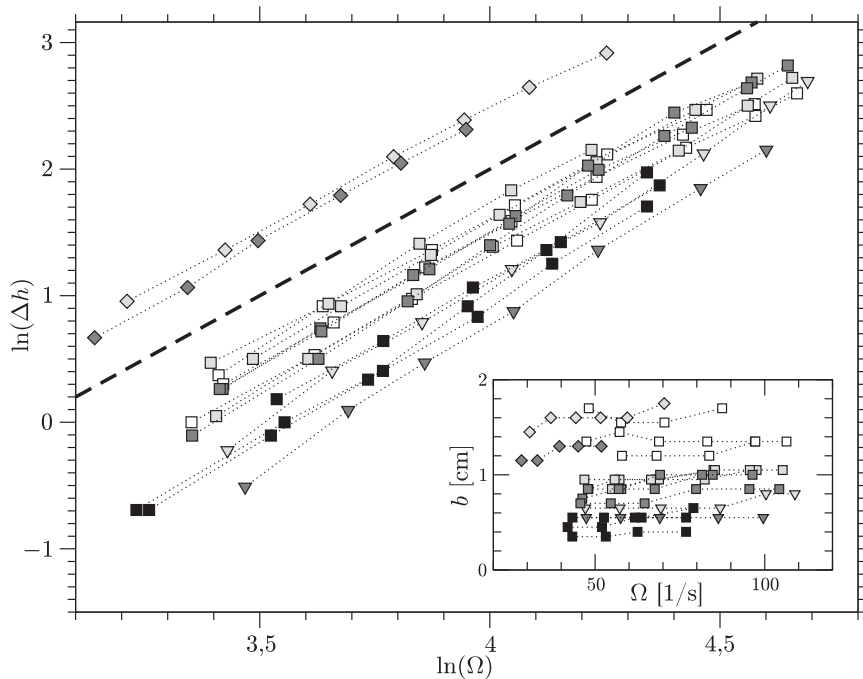
Az edény és a keverőfej méretei egyszerűen vonalzóval mérhetőek, akárcsak az eredeti és a módosult vízmagasság. A tölcsér legaljának mérésekor már két vonalzó érdekes használni a ferde leolvasásból származó hiba elkerülése végett, a felszélesség esetében pedig korrigálni kell a kapott értéket az edény optikai tulajdonságainak figyelembe vételével. Érdekes megjegyezni, hogy az utóbbi két paraméter bizonytalansága meglehetősen nagy, ez a rendszer fizikai természetéből következik. A keverőfej tengelye ugyanis nem rögzített, ezért egyensúlyi helyzete körül ugrálni képes. Ezek az apró mozgások pedig az egész áramlásban fluktuációkat keltenek, így természetes, hogy a tölcsér sem marad teljesen stacionárius; függőleges és vízszintes rezgései miatt a tölcsérmagasság hibája kb. 10%, a felszélesség pedig még nagyobb, kb. 20%.

A keverőfej szögsebességének mérésére stroboszkópot használtam; a keverőfej állni látszik (*II. ábra*), ha két felvillanás között éppen a félfordulat egész számú többszörösét teszi meg. A legkisebb megfelelő periódusidő kiválasztásával egyszerűen meghatározhatjuk a szögsebességet. A pontosság növelése érdekében az előbbi periódusidő felét is mindig kimértem; ekkor a keverőfej negyed fordulatot tesz meg két felvillanás között, és az edény alján egy mozdulatlan „keresztet” látunk (*II. ábra*). Ebből is számolható szögsebesség, a kettő átlagának hibája a tölcsér méreteihez képest elhanyagolható.

<sup>1</sup>A cikk az ELTE Fizikai Intézetében Jánosi Imre, Szabó Gábor és Tél Tamás irányításával készült díjnyertes tudományos diákköri dolgozat rövid összefoglalása.

<sup>2</sup>A római számmal jelölt színes ábrák a hátsó borítón láthatók.

A tölcser magasságának és felszélességének az egyéb paramétereiktől való függését a 2. ábra mutatja; mindkét esetben a keverőfej szögsebessége került a vízszintes tengelyre. A mérések során használt különböző keverőfejekhez eltérő szimbólumok tartoznak, míg az egyre mélyülő szürke szín az aktuális edény  $R$  sugarának növekedésével jár együtt. Az egymás mellett futó „teljesen azonos” görbék a  $H$  feltöltési magasságban különböznek, jelentéktelen hatása miatt ez az eltérés jelöletlen maradt.



2. ábra

A 2. ábra alapján kitűnően látszik, hogy a felszélesség lényegében nem változik a keverőfej szögsebességével, a tölcser magasságának függése viszont hatványfüggvény alakú. Duplán logaritmusos ábrázolás esetén ugyanis a mérési pontok egyenesekbe rendeződnek, közös meredekségük a velük párhuzamosan futó szaggatott vonallal összevetve 2. Megállapíthatjuk tehát, hogy a tölcsermagasság a keverőfej szögsebességének négyzetével arányos. A mérési adatok pontosabb vizsgálata és dimenziós megfontolások alapján a következő képletekhez jutunk, melyek a rendszert jellemző többi paramétert is tartalmazzák:

$$\Delta h = \alpha \frac{\Omega^2 a^2 d^2 \sqrt{R}}{\nu(H + kR)\sqrt{g}}, \quad b = \beta \frac{a\nu}{d\sqrt{gR}}.$$

Itt a már említett paramétereken kívül szerepelnek még a  $g$  nehézségi gyorsulás és a víz  $\nu$  kinematikai viszkozitása, melynek értéke körülbelül  $10^{-2}$  cm<sup>2</sup>/s. Az  $\alpha$ ,  $\beta$  és  $k$  dimenzió nélküli számfaktorokat jelölnek, ezek legmegfelelőbb értékei:

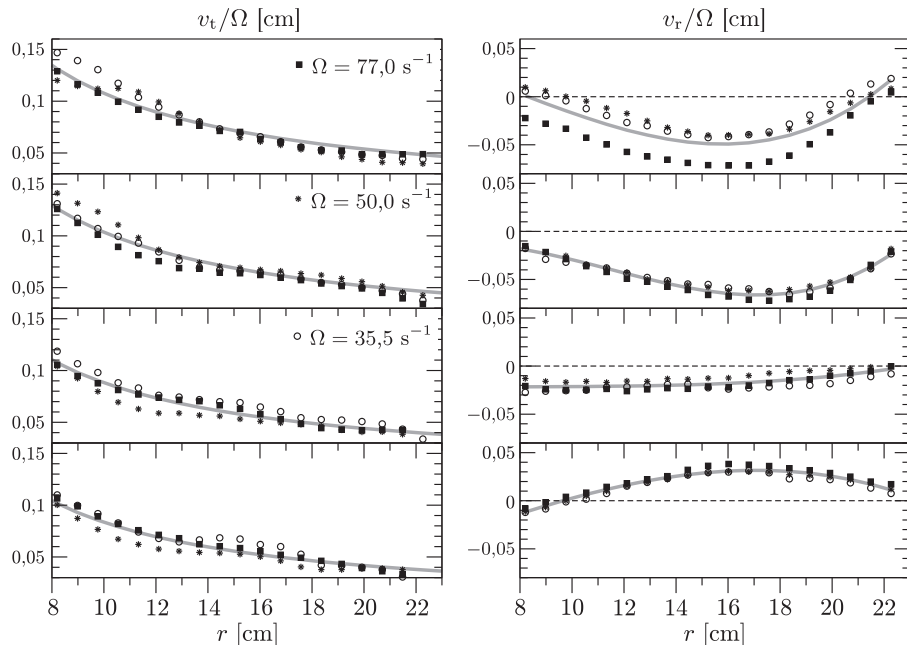
$$\alpha = (2,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}, \quad \beta = (2,8 \pm 0,8) \cdot 10^3, \quad k = 6,3 \pm 1,7.$$

A képletek visszaadják a tölcser méreteinek az  $\Omega$  szögsebességtől való korábban részletezett függését, de az is látszik belőlük, hogy a keverőfej paraméterei ( $a$ ,  $d$ ) sokkal nagyobb hatással vannak a tölcserre, mint az edény méretei ( $R$ ,  $H$ ). Az  $\alpha$  és  $\beta$  számfaktorok bizonytalanságai megfelelnek a tölcsermagasság és a felszélesség mérési hibáinak. Meglepő, hogy egy ennyire bonyolult rendszer viselkedését ilyen egyszerű képletek tudják hibahatáron belül leírni.

### Sebességtér közvetlen felvétele

Az áramlástan mérés során igen gyakran használt PIV (Particle Image Velocimetry) eljárás segítségével a folyadék egy adott síkjában közvetlenül kimérhető az áramlási tér ezen síkba eső komponense. A módszer lényege, hogy két egymást nagyon kicsi, de pontosan beállított időkülönbséggel követő, síkban terjedő lézerpulzus az áramló folyadékban szétoszlatott apró részecskéket két rövid felvillanásra kényszeríti, a lézer síkjára merőlegesen elhelyezett kamera pedig mindkét pillanatképet felveszi. Ezután egy számítógépes program a részecskék elmozdulásának és a két felvillanás között eltelt időnek ismeretében kiszámítja az adott ponthoz tartozó sebességet, pontosabban annak a lézer síkjába eső komponensét. A program az eredmények numerikus kiértékelésén túl azok megjelenítésére is alkalmas, az egyes pontokhoz rendelt sebességvektorok láthatóak a III. ábrán. Megfigyelhető, hogy az áramlási tér a várttal ellentétben nem teljesen hengersizmetrikus, kicsiny másodlagos örvényeket fedezhetünk fel a kép szélén. A középen levő rózsaszín vektorok a program által interpolált értékeket jelölnek, ezeket a kiértékelés során nem vettem figyelembe.

A PIV eljárást csak a rendszert jellemző méretek ( $R, H, a, d$ ) egy adott konfigurációja mellett alkalmaztam; az áramlási teret négy különböző vízszintes síkban vettem fel, a keverőfej szögsebességének három különböző értékénél. Minden esetben legalább 10 mérés adatait használtam, hogy az említett kis másodlagos örvények kiátlagolódjának. A 3. ábra bal oldalán a sebesség tangenciális, a jobb oldalán a radiális komponense látható a tengelytől való távolság függvényében, célszerűen leosztva a keverőfej  $\Omega$  szögsebességével. (A tangenciális és a radiális jelzők egy síkbeli polárkoordináta-rendszer érintő-, illetve sugár irányára utalnak.) „Lefelé haladva” az ábrán egyre mélyebbre jutunk az edényben. Sajnos a tengely közelében csak interpolált értékeket találunk (III. ábra), ezért kezdődik a vízszintes tengely beosztása 8 cm-től.



3. ábra

A 3. ábrán a különböző adatsorok elég jól összeesnek, úgy tűnik, a tangenciális és a radiális sebességkomponens is egyenesen arányos a keverőfej szögsebességével. Az ábra bal oldalán levő folytonos görbék a mérési pontokra illesztett  $C/r$  alakú hiperbolák, melyek kitűnően illeszkednek az adatsorokhoz. Az áramlási tér meghatározó részét adó tangenciális komponens tehát fordítottan arányos a tengelytől mért  $r$  távolsággal és – szintén a 3. ábra alapján – lényegében független a magasságtól. A hidrodinamika tankönyvek az olyan örvényt nevezik ideálisnak, amelyben a tangenciális sebességkomponens  $1/r$ -rel arányos, a radiális és a függőleges sebességkomponens pedig nulla. Mivel az utóbbi két kikötés esetünkben nem teljesül, csak azt állapíthatjuk meg, hogy a tengelytől elég távol ( $r > 8$  cm) az áramlás tangenciális komponense az ideális örvényének felel meg.

A radiális komponens láthatóan jóval bonyolultabb viselkedést mutat, a magasságtól például elég erősen függ. Kvalitatív szinten annyit mondhatunk, hogy az edény felső részében befelé, alul pedig kifelé áramlik a víz. Érdekes azonban, hogy a PIV felvételek használhatóságának belső határánál ( $r = 8$  cm) még a legalsó mért szinten is beáramlás történik.

A mérések során a sebességteret vízszintes síkokban vettem fel, emiatt a függőleges komponens „láthatatlan” marad a kamera számára. Ugyanakkor viszont ez a komponens is kiszámítható a másik kettőből, a folyadék összenyomhatatlanságát kifejező kontinuitási egyenlet és bizonyos határfeltételek figyelembe vételével. Alapvetően az a tendencia, hogy a tengely és az edény fala közt félfúton lefelé, az edény fala mentén pedig igen erősen felfelé áramlik a víz. Az edény közepéről csak a PIV módszer alapján semmit nem állíthatunk, ennek felderítéséhez szükség van a következő fejezetben bemutatott nyomkövetéses eljárásokra.

### Gyöngyökkel és festékekkel történő nyomkövetés

Az áramló folyadékba egy kicsiny gyöngyöt vagy egy csepp festéket juttatva, majd a gyöngy mozgását, illetve a festék terjedését kamerával felvéve kvalitatív képet kaphatunk az áramlási tér szerkezetéről. Kísérleteim során milliméteres átmérőjű víznél könnyebb műanyag gyöngyöket használtam, melyek normális esetben a víz felszínén úsznak. Azonban a tölcser közepébe ejtve őket elválnak a felszíntől, és egy többé-kevésbé stabil egyensúlyi helyzetbe kerülnek az örvény tengelyében. Ez csak akkor lehetséges, ha középen egy rendkívül erős lefelé áramlás működik, mely által a gyöngyre kifejett közegellenállási erő éppen egyensúlyt tart a gyöngy víznél kisebb sűrűségéből eredő többlet felhajtóerővel. A leáramlás sebessége itt megegyezik azzal az állandósult emelkedési sebességgel, amit a gyöngy állóvízben érne el; méréseim szerint ez a kísérletben használt gyöngyökre 7-8 cm/s.

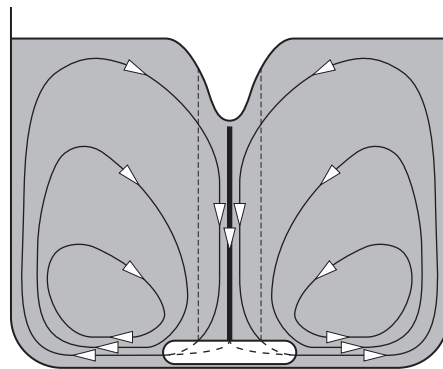
Külön figyelmet érdemel a gyöngy mozgása az egyensúlyi helyzet körül; pályája a *IV. ábrán* látható, a bal oldali képen 10, a jobb oldalin pedig 20 másodpercig figyelve. Mivel az erős leáramlás csak egy milliméteres vastagságú fonálban koncentrálódik, a gyöngy egészen kicsi oldalirányú kitérése esetén is hirtelen lecsökken a lefelé ható közegellenállási erő. Ekkor a felhajtóerő hatására elindul felfelé, majd valahol visszatér a vékony áramlási fonálba, és újra lesüllyed. A *IV. ábra* alapján nyilvánvaló, hogy mozgása teljesen kaotikus, ennek ellenére stabil, hiszen soha nem hagyja el az örvény tengelyét övező centiméteres átmérőjű áramlási csövet, mely a legbelső vékony áramlási fonálból és a körülötte levő lassabb áramlású területből áll.

További értékes részleteket jelenít meg a tölcser közepébe juttatott festékcsepp. Ellentétben az edény többi részével a festék nem oszlik szét másodpercek alatt, helyette kialakul egy élénk színű, henger alakú festékfüggöny (*V. ábra*), melynek kontúrja akár percekig is látható marad. A centiméteres átmérőjű hengerfelület éppen az előbbi áramlási csövet határolja; a függöny nagy stabilitásából arra következtethetünk, hogy itt a lefelé áramlás sebessége egészen kicsi. A gyöngyökkel történő nyomkövetés és a PIV eljárás eredményeiből ismert, hogy a felület mindkét oldalán erősebb leáramlás történik, így a függőleges sebességnek lokális minimuma van a festékfüggöny területén.

Érdekes megvizsgálni a függöny kialakulásának folyamatát is; a lefelé terjedő festék sokkal gyorsabban mozog, mint ahogy az a függöny területén tapasztalt igen gyenge leáramlásból következne. Valójában a festék jóval beljebb, a központi áramlási fonálban szállítódik, majd a nagy sebességkülönbségből fakadó kis turbulenciák következtében kiszóródik onnan. A közepén maradó festéket az erős áramlás igen hamar kimossa, az áramlási cső szélére kerülő részecskékből viszont létrejön a stabil festékfüggöny. A kialakulás egy pillanatképe látható az *V. ábra* második képén; ekkor szépen kirajzolódik a festék szállításaért felelős központi áramlási fonál is.

## Az áramlási kép összefoglalása

Az eddigiekben különböző, de egymást nagyon jól kiegészítő kísérleti módszereket adtam meg, melyek segítségével az edényben kialakuló tér szerkezete felderíthető. Az eredményeket a *4. ábra* foglalja össze; a folytonos vonallal jelölt áramvonalak közül vastaggal van kiemelve a központi áramlási fonál, míg a festékfüggöny helyét szaggatott vonal jelzi. A forgó keverőfej nagy sebességgel dobja ki a vizet maga körül, ami egy rendkívül erős kiáramlást hoz létre az edény legalján. Később ez a víztömeg az edény falának ütközve felfelé térül el, emiatt látunk erős feláramlást a falak mentén. A tengelytől távol a radiális és a függőleges komponens egy áramlási cellával jellemezhető, melynek középvonala a központi örvény tengelyét megkerülve önmagába záródik. Messze a legkülönösebb azonban az edény tengelyében létrejövő nagy sebességű áramlási fonál; ennek milliméteres átmérője jóval kisebb a rendszer bármely más karakterisztikus méreténél.



4. ábra

## Összehasonlítás a tornádóval

Az áramlási kép feltérképezése után ismertetem az általam vizsgált modell és a valódi tornádó közötti legfontosabb hasonlóságokat és eltéréseket. Az összehasonlítás során csak az áramlási terek szerkezetével foglalkozom; az energetikai viszonyok nyilván alapvetően különböznek.

A két rendszer legfontosabb közös tulajdonsága, hogy a sebesség tangenciális komponense az örvény magján kívül fordítottan arányos a tengelytől való távolsággal; a modell és a tornádó matematikai egyezést mutat a tangenciális sebesség szempontjából. A radiális és a függőleges komponenseket tekintve a központi erős leáramlást és a körülötte található gyenge áramlású területet említhetjük hasonlóságként. Sok más szempontból azonban ebben a két sebességkomponensben gyökeres eltéréseket vehetünk észre, például a keverőfej körül tapasztalt erős kiáramlásnak nincs megfelelője egy valódi tornádó esetében.

A tangenciális komponensek általánosabb összehasonlítása lehetséges a rendszerekre jellemző dimenzió nélküli számok vizsgálatával. Ezek azt fejezik ki, hogy a rendszer viselkedését mennyire befolyásolja egy adott hatás; minél

nagyobb a szám, annál kevésbé. A tornádó és a kísérleti modell esetén a viszkozitás és a nehézségi erő szerepét jellemzi a Reynolds-szám és a Froude-szám:

$$\text{Re} = \frac{uc}{\nu}, \quad \text{Fr} = \frac{u}{\sqrt{gH}}.$$

Itt a már ismert paramétereken túl szerepel a tangenciális sebesség maximális  $u$  értéke és az örvény magjának  $c$  sugara. A tornádóra és a modellre jellemző adatokat a képletekbe beírva megállapíthatjuk, hogy a Froude-számok nagyságrendileg ugyanakkorák, a Reynolds-számok pedig egységnyinél jóval nagyobbak. A nehézségi erő tehát hasonló hatást gyakorol a két rendszerre, a viszkozitás pedig az áramlás egészének szempontjából egyik esetben sem igazán fontos. Természetesen kisebb léptékben igen jelentős szerepe lehet, a tengely mentén levő kis turbulenciák kialakításában például kulcsfontosságú. A tengelytől távol viszont ennek ellenére állíthatjuk, hogy a tornádó és a modell a dimenzió nélküli számok alapján teljes dinamikai hasonlóságot mutat az áramlás domináns részét adó tangenciális komponens szempontjából.

Végül megemlíthetjük a két rendszer leglátványosabb analógiáját, a tornádó és a közepen megfestett víztölcsér közötti képi hasonlóságot. A hátsó borító háttérében látható tornádótölcsér felső része főleg a felhő anyagából, míg alsó része a földről felkapott porból és törmelékből áll. Érezhető, hogy a víztölcsér és a festékfüggöny együtt felelnek meg a tornádótölcsérnek, külön-külön pedig a tornádótölcsér két részének. A képi analógia nyilvánvalóan a dinamikai hasonlóságból következik; így újabb igazolást nyert, hogy a vizsgált elrendezés hűen modellezi a valódi tornádókat.