

PERIÓDIKUS ÁRVÍZI LENGÉSEK KISESÉSŰ FOLYAMI DUZZASZTÓMŰVEK KÖRNYEZETÉBEN

„Ha vízzel van dolgod, először kísérletezz,
azután mérlelj!”

Leonardo da Vinci

Összefoglalás

Az árhullámok levonulása idejére a duzzasztóművek (árapasztók) mozgó gát-szerkezetét felnyitjuk, hogy a víz számára az utat szabaddá tegyük. Többnyílású mű esetében a közbenső pillérek alvízi végéről a *Bénard—Kármán* féle örvénysor válik le. Ha a szabad nyílásban a víz sebessége nem éri el az áramlás és rohanás közti határsebességet, ez a periódikus örvényleválás a pillérek körül pozitív visszacsatolású lengőmozgást indít. Megfelelő geometriai és hidraulikai feltételek esetén a gerjesztő lengés (az örvényleválás) és a visszacsatolt lengés rezonál (az azonos hullámhosszúságú lengések azonos fázisban találkoznak). A rezonancia következtében a lengőmozgás energiatartalma (ezzel együtt a lengés amplitúdója) mindaddig növekszik, míg — az ellenálló erők egyidejű növekedése miatt — a dinamikus egyensúlyi állapot be nem áll.

A közbenső pillérek körül kialakuló lengés nagy energiatartalmú (nagy amplitúdójú) transzlációs hullámokat indít el, amelyek felfelé haladnak. Ezek a hullámok a partokat rongálják. Ugyanakkor a pillérekről leváló örvénysorok az interferencia következtében az alvízi mederben nem kívánatos kimosások okozói lehetnek.

Ilyen jelenséget figyeltünk meg a VITUKI Hidraulikai Laboratóriumában a II. Tiszai Vízlépcső egyik tervváltozatának kismintavizsgálata során. Az adott geometriai és hidraulikai feltételek a rezonancia esetéhez közel álló lengéjelenséget eredményeztek a duzzasztómű közbenső pillérei körül.

A következőkben a vizsgálatok alapján ismertetjük a lengéjelenség megszüntetésére, illetőleg a még eltűrhető mértékre való csökkentésére kidolgozott javaslatot, amely szélesebb körű alkalmazásra tarthat számot.

1. Bevezetés

A II. Tiszai Vízlépcső tervezése során — az *OVF Vízügyi Tervező Vállalat* megbízásából — a *Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet Hidraulikai Laboratóriumában* az 1965. évben megvizsgáltuk az egyik változat árvízi áramlási viszonyait. A több mint 250 millió m³ hasznos tározóterfogatgal rendelkező mű maximális esése csak 11,7 m. A tervezett maximális duzzasztási szint alig haladja meg az eddig előfordult legmagasabb árvíz szintjét, ezért árvízkor a duzzasztómű mozgó gát-szerkezetét fel kell emelni, a nyílásokat teljesen szabaddá kell tenni.

Tájékoztatásul megemlítjük, hogy a 10% valószínűségi árvízi hozam 2565 m³/s, az 1% valószínűségi árvízi hozam pedig 3940 m³/s, ami kb. megegyezik az eddig előfordult legnagyobb árvíz hozamával. Az eddig előfordult legkisebb vízhozam 56 m³/s, tehát a folyó meglehetősen szélsőséges vízjárású. A közepes vízhozam kb. 800 m³/s. A partokkal színelő vízhozam 1100—1200 m³/s, tehát már viszonylag kis vízhozamú árvíz előnti a hullámteret.

A *Vízlépcső* főműve egy kis teljesítményű vízerőtelepből (max. 25. MW), egy alig kiemelt küszöbű 5 × 24 m nyílású, mozgó gát-szerkezettel elzárt duz-

zasztóműből és egy 1350 t-ás hajók átzsilipelésére alkalmas 12×85 m² hasznos alapterületű hajózsilipből áll. Az árvíz leeresztésében résztvesz a hullámtéren elhelyezett 12×15 m nyílású árvízleeresztő is.

2. A laboratóriumi kismintavizsgálat során megfigyelt lengéjelenség

A tervezett változat áramlási viszonyait egy 1 : 75 méretarányú kismintán vizsgáltuk. Az árvízleeresztés során vizsgált majdnem minden üzemi állapotban a *főművön* — a teljesen vagy részlegesen felnyitott duzzasztón — *átáramló víztest lengésbe jött*.

A lengés függőleges amplitúdóját a duzzasztómű pillérein a betétgerenda felvizi hornyánál mértük. Az 1 : 75 méretarányú modellben a függőleges amplitúdó kétszeres mértéke (a legmagasabb és a legmélyebb pont közötti különbség) az üzemiállapottól függően 1—2 cm között ingadozott. Ez a természetes méretre átszámítva 75—150 cm-nek felel meg. Pl. a 3940 m³/s vízhozamú, kb. 1% valószínűségű árvíz esetében, a vízerőtelep és a duzzasztómű 3. nyílásának zárt állapota mellett, az alábbi lengés jellemzőket észleltük a modellben: az amplitúdó kétszerese az 1. és 5. nyílásban 3—5 mm, a 2. és 4. nyílásban 6—10 mm, a lengés frekvenciája minden nyílásban 42/perc. A fenti adatok a Froude-féle modellörvény szerint a természetes méretre átszámítva: 20—40 cm, ill. 40—80 cm, továbbá kb. 4,8/perc.

A duzzasztóműtől felvizi felé is ilyen amplitúdójú hullámok indultak el. Ezeknek a hullámoknak az amplitúdója a hullám energiátartalmának csökkenésével csökken, hullámhosszuk pedig a terjedési sebesség függvényében változik.

A duzzasztómű pilléreinek *alvizi oldalán* megfigyelhető a *Bénárd—Kármán-féle leváló örvénysor*.

A szilárd test — jelen esetben a pillér — végén kialakuló örvényt a külső áramlás nem permanens módon — periódikusan — öblíti le. Az örvény egyszer a szilárd test egyik oldaláról, fél periódussal később a másik oldaláról válik le, szakad le. Az ellenkező oldalon az áramlási vonalak rátapadnak a szilárd felületre.

A levált örvények haladási sebessége kisebb, mint a zavartalan áramlás sebessége. Az örvénysor lefelé haladva szét is nyílik, az örvények intenzitása (perdülete) a viszkózus folyadék fékező hatása következtében csökken, energiájuk fokozatosan hővé alakul át, végül teljesen elenyésznek.

A leírt lengéjelenség a modellben bármelyik vizsgálat megindításakor igen kismértékű volt, majd az idő múltával fokozatosan erősödött. Másfél-két óra elteltével beállt a dinamikus egyensúlyi állapot, amely azután a továbbiakban nem változott, sem nem erősödött, sem nem gyengült, a folyamat periódikussá vált. Ez *pozitív visszacsatolású, a teljes rezonancia állapothoz igen közel álló lengésfolyamatra* mutat.

Kérdés, hogy mi a gerjesztő rezgés, milyen úton alakul ki a pozitív visszacsatolás, és vajon a rezonancia feltétele hogyan elégül ki?

3. A lengés-jelenség kialakulásának feltételei

3.1. A gerjesztés

Áramlási (aerodinamikai) vizsgálatokból ismeretes, hogy áramló közegbe helyezett, nem áramvonalas kialakítású szilárd testekről az áramlási vonalak leválnak, ha a mozgás turbulens. A leváló áramlási vonal és a szilárd test fala között örvénytér alakul ki. Az örvénytér instabil állapotú, és még elvileg tökéletesen szimmetrikus áramlásban is igen csekély külső impulzus (vagy aszimmetria) elégséges ahhoz, hogy az instabil örvénytér stabil formáció felé törekedjék. Stabil formáció viszont csak leváló örvénysor esetén alakul ki. Ezt *Kármán* — elméleti megfontolások alapján — már 1911–12-ben megállapította (1). A leváló örvénysor örvényei periódikusan, egyszer a szilárd test egyik, másszor a másik oldalán válnak le.

Elméleti és kísérleti vizsgálatok egyaránt azt mutatták, hogy az örvénysor leválása periódikus. *C. Gottardelli* (2), a padovai egyetemen végzett vizsgálatai alapján azt találta, hogy a v sebességű áramlásba helyezett b átmérőjű hengerről leváló örvénysor frekvenciája (f_K):

$$f_K = S \frac{v}{b}, \text{ azaz } S = \frac{f_K b}{v},$$

ahol S — a *Strouhal*-féle szám (méretnélküli).

Vizsgálatai szerint a *Strouhal*-féle szám értéke a *Reynolds*-féle szám függvénye:

$$Re = \frac{v b}{\nu},$$

ahol a fenti jelöléseken felül ν — az áramló közeg kinematikai viszkozitása. Megállapítása szerint $Re = 60$ esetén $S = 0,14$ és $Re = 1000$ -nél $S = 0,21$.

Rayleigh Dupin (3), *Crausse* (4), továbbá *Relf* és *Simmons* (5) vizsgálatait is felhasználva az $1500 \leq Re \leq 200\,000$ tartományra egy empirikus függvényt határozott meg:

$$S = 0,195 (1 - 20,1/Re).$$

Vizsgálatai szerint, ha $Re > 200\,000$ a *Strouhal*-féle szám állandónak tekinthető, és pedig:

$$S \approx 0,2.$$

Esetünkben a henger átmérőjét és a pillér vastagságát azonosnak véve (egyik közelítés), továbbá az áramlás sebességét a duzzasztómű nyílásain átáramló víz középsebességével helyettesítve (másik közelítés), számíthatjuk a *Reynolds*-féle számot. Ennek ismeretében meghatározhatjuk a *Strouhal*-féle számot, majd ebből a *Kármán*-féle leváló örvénysor frekvenciáját. Ez a gerjesztő rezgés rezgésszáma.

Példaképpen válasszuk ki vizsgálataink közül a $2565 \text{ m}^3/\text{s}$ vízhozamú, 10% valószínűségű árvíz esetét, amikor a duzzasztómű öt nyílása volt csak felnyitva, a többi műtárgyrész pedig zárva volt.

Ebben az esetben — laboratóriumi méréseink szerint — a duzzasztómű nyílásaiban az átlagos vízmélység $m = 10,7$ m (a kismintában mért, a természetes méretre átszámított érték). A pillérek alvízi vastagsága: $b = 5,5$ m. A középsebesség a duzzasztómű nyílásaiban:

$$v = 2565 \cdot (5,10,7,24)^{-1} = 2 \text{ m/s.}$$

Az ebből számítható *Reynolds*-féle szám:

$$Re = 2,5,5 (1,10^{-6})^{-1} = 1,1,10^7.$$

Mivel $Re > 2,10^5$, tehát $S \approx 0,2$ és ebből a frekvencia:

$$f_K = 0,2 \cdot 2,5,5^{-1} = 0,0728/\text{s} = 4,36/\text{perc.}$$

Ez az érték az előző fejezetben említett 4,8/perc értékhez igen közel áll, s jó megjegyezésnek tekinthetjük, ha figyelembe vesszük az üzemállapotbeli különbséget.

3.2. A visszacsatolás és a rezonancia

A *visszacsatolás* lehetőségét és folyamatát vizsgálva helyettesítsük a *Kármán*-féle leváló örvénysort egy, a pillér alvízi végén — hajókormányyszerűen — felerősített, függőleges tengely körül elforgatható lappal. Alapállásban (a folyamat megindulásakor) nincs leváló örvény, ennek megfelel az elforgatható lap tengelyszimmetrikus állása.

A periódus első negyedében leválik az örvény a pillér jobb oldalán. Ezzel a jobbra eső nyílásban kontrakció növekedést okoz (elsősorban a pillér mellett), a nyílás vízszállítása csökken. Ez egy pozitív „lökéshullámot” indít el a pillér mellett a felvíz felé, ha a szabad nyílásban áramló víz sebessége nem éri el az áramlás-rohanás határsebességét. (Ennek az állapotnak megfelel az elforgatható lap jobbra kifordított helyzete.)

A pillér melletti vízszintemelkedés energiatartalom növekedést eredményez, amely az áramlási vonalakat visszاسimítja a fal mellé (a lap visszabilen középpállásba). Ez a periódus második negyede.

A folyamat azonban nem áll meg a szimmetrikus középpállásnál, tehetetlensége (az örvénytér instabilitása) tovább lendíti. Az örvény leválik bal oldalt (a lap kilendül balra). Ez a periódus harmadik negyede. A pillér bal oldalán megindul ugyanaz a folyamat, mint ami az első negyedben a jobb oldalon zajlott le.

Majd a negyedik negyed végére újra szimmetrikus a jelenség (alapállás), s a folyamat kezdődik előlről.

Az első—második negyedben a pillér jobb oldalán keltett pozitív „lökéshullám” a pillér mellett a felvíz felé halad a hullám terjedési sebességével. A vízmozgással ellentett értelemben haladó hullám abszolút terjedési sebessége:

$$V_{Pf} = \sqrt{g m} - v.$$

Ha a pillér hossza: l_p , akkor a pillér csúcsáig terjedő úthossz megtételéhez szükséges idő:

$$t_f = l_p / V_{Pf} = l_p (\sqrt{g m} - v)^{-1}.$$

Ugyanez a hullám a pillér másik oldalán már a vízmozgással egyező értelemben halad, azaz a lefelé haladás sebessége:

$$V_{Pl} = \sqrt{g m} + v,$$

és az út megtételéhez szükséges idő:

$$t_1 = l_P / V_{PI} = l_P (\sqrt{g m} + v)^{-1}.$$

A pozitív visszacsatolás teljes rezonancia feltétele, hogy a pillért körüljáró hullám maximuma akkor érkezzék a pillér másik oldalára, amikor a gerjesztő rezgés ott éppen maximumot kelt.

Tekintettel arra, hogy a pillért körüljáró hullám időszükséglete ($t_f + t_1$), a pillér körüli lengés periódusának a fele, meghatározható a pillér körüli lengés frekvenciája (f_P) is:

$$f_P = \frac{1}{2(t_f + t_1)}.$$

Az értékeket behelyettesítve és az egyenletet rendezve:

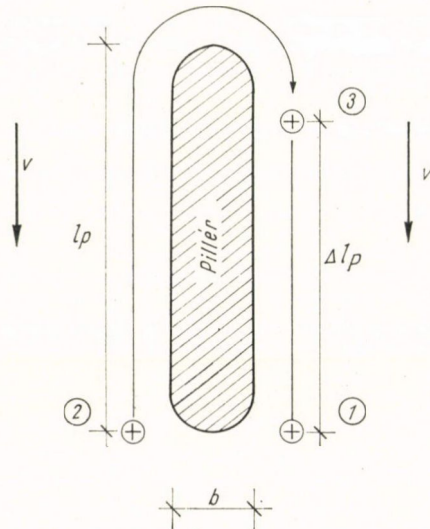
$$f_P = \frac{\sqrt{g m}}{4 l_P} (1 - Fr),$$

ahol $Fr = \frac{v^2}{g m}$ — a Froude-féle szám.

Az előbbi példa adatait felhasználva, és figyelembe véve, hogy a pillér hossza $l_P = 36,7$ m, a pillér körüli lengés frekvenciája:

$$f_P = \frac{\sqrt{9,81 \cdot 10,7}}{4 \cdot 36,7} \left(1 - \frac{2^2}{9,81 \cdot 10,7}\right) = 0,0672/\text{s} = 4,03/\text{perc}.$$

Egybevetve a pillér körüli lengés és a gerjesztő rezgés rezgésszámát megállapítható, hogy az előbbi kb. 7,5%-kal kisebb, mint az utóbbi. Mivel mind a gerjesztő, mind a gerjesztett rezgés frekvenciájának (rezgésszámának) meghatározásánál közelítéssel élünk, a rezonancia lehetőségével számolnunk kell.



1. ábra. A hullám interferencia helyszínrajzi vázlata

A tiszta rezonancia esetét feltételezve a hullámok interferenciája teljes erősítést jelent, mert azonos fázisban találkozó azonos frekvenciájú hullámok interferenciájáról van szó, amelyek egymáshoz képest fél periódussal eltolt időpontban keletkeznek. Esetünkben az amplitúdó is azonos, mert elhanyagoltuk az energiaveszteséget.

Az 1. ábrán az interferencia jelenség helyszínrajzi vázlatát tüntettük fel. A hullámok interferenciájával előálló jelenséget néhány pontban a 2. ábrán ábrázoltuk (a már ismertetett közelítéseken kívül szinuszos összefüggést is feltételezve).

Az *A* jelű görbe ábrázolja a pillér baloldalán az 1 számmal jelzett pontban a gerjesztő rezgés hatására kialakult vízállás idősort. (A periódus ideje: $T = 1/f$). A *B* jelű görbe ennek megfelelője a pillér jobb oldalán a 2 számmal jelzett pontban (fél periódussal eltolva). A *C* jelű görbe tiszta rezonancia esetén ábrázolja az 1 pontban keltett és a 2 pontból érkező hullámok egymást erősítő interferenciáját, a különböző — már említett — közelítések mellett (a fázis azonos, az amplitúdó kétszeres).

Az előző fejezetben említettük, hogy a modellben a lengés amplitúdóját és frekvenciáját a felső betétgerenda hornyánál észleltük. Ennek helye a pillér alvizi végétől $\Delta l_p = 0,9 l_p$ távolságra van (1. ábra, 3 jelű pontja). Kérdés, hogy ebben a pontban a hullámok interferenciája milyen amplitúdót eredményez (az elhanyagolások mellett).

Az 1 pontban keltett hullámnak a 3 pontba való megérkezéséhez szükséges t_{1-3} idő a közelítések figyelembevételével levezethető. Az eredmény (a periódus idő függvényében):

$$\frac{t_{1-3}}{T} = \frac{\Delta l_p}{4 l_p} (1 + \sqrt{Fr}).$$

A 2 pontban keltett hullámnak több időre van szüksége, hogy a 3 pontba elérjék. A közelítések mellett az időszükséglet:

$$\frac{t_{2-3}}{T} = \frac{1}{2} - \frac{\Delta l_p}{4 l_p} (1 - \sqrt{Fr}).$$

A 2 pontból elinduló hullám azzal az 1 pontból induló hullámmal találkozik a 3 pontban, amelyik $(t_{2-3} - t_{1-3})$ idővel előbb indult el.

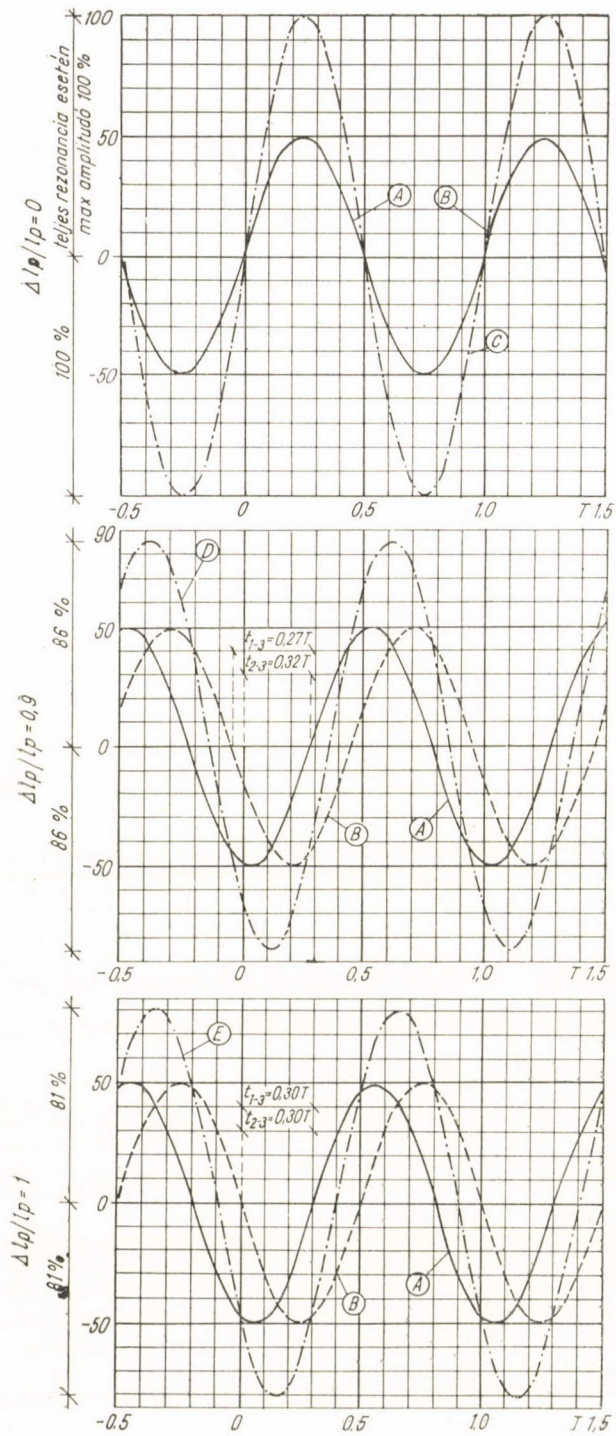
A $\Delta l_p/l_p = 0,9$ (felső betétgerenda hornya) helyen kialakuló vízállás idősort ábrázolja a 2. ábra *D* görbéje (az amplitúdó az alaphullám amplitúdójának 1,72-szerese).

A $\Delta l_p/l_p = 1$ (a pillér csúcsa) helyen kialakuló vízállás idősort ábrázolja az *E* görbe (az amplitúdó az alaphullám amplitúdójának 1,62-szerese).

Az interferencia következtében a hullám amplitúdója legnagyobb a pillér alsó végénél és legkisebb a pillér csúcsánál. (A számértékeket elhanyagolásokkal határoztuk meg.)

A pozitív visszacsatolás miatt egyazon pontban a hullám amplitúdója egyre növekszik, mindaddig, míg az általunk figyelembe nem vett ellenálló erők és a ható erők dinamikus egyensúlyba nem kerülnek. A dinamikus egyensúlyi állapot beállta utáni esetre vonatkoznak azok a méréseink, amelyeket a 2. fejezetben ismertettünk.

2. ábra. A hullámok interferenciája



3.3. A felvízi translációs hullám kialakulása és a leváló örvénysorok interferenciája

Vizsgálataink szerint a pillérektől a felvíz felé translációs hullámok (2) indulnak, amelyek sok esetben a modell felső végét is elérték, és csak a csillapító térben enyésztek el. Ezeket a hullámokat a pillérek csúcsánál kialakuló hullám gerjeszti. A hullám kezdő amplitúdója megegyezik a pillér csúcsán levő — az interferenciából származó — hullám amplitúdójával, hullámhossza pedig a felvízi hullám terjedési sebességének és a pillér körüli lengés frekvenciájának ismeretében számítható.

A felvízen, a vízáramlással ellentétesen haladó hullám terjedési sebessége:

$$V_f = \sqrt{g m_f} - v_f,$$

a hullámhossza pedig:

$$l_f = V_f / f_p.$$

Az előbbi példa adatainak és a tervadatoknak a felhasználásával a felfelé haladó felvízi translációs hullám hossza: $l_f \approx 125$ m, sebessége pedig: $V_f = 8,4$ m/s.

A hullám amplitúdója az energiavesztés következtében egyre csökken, hossza pedig a vízmélység és a szelvényközépsébség függvényében változik.

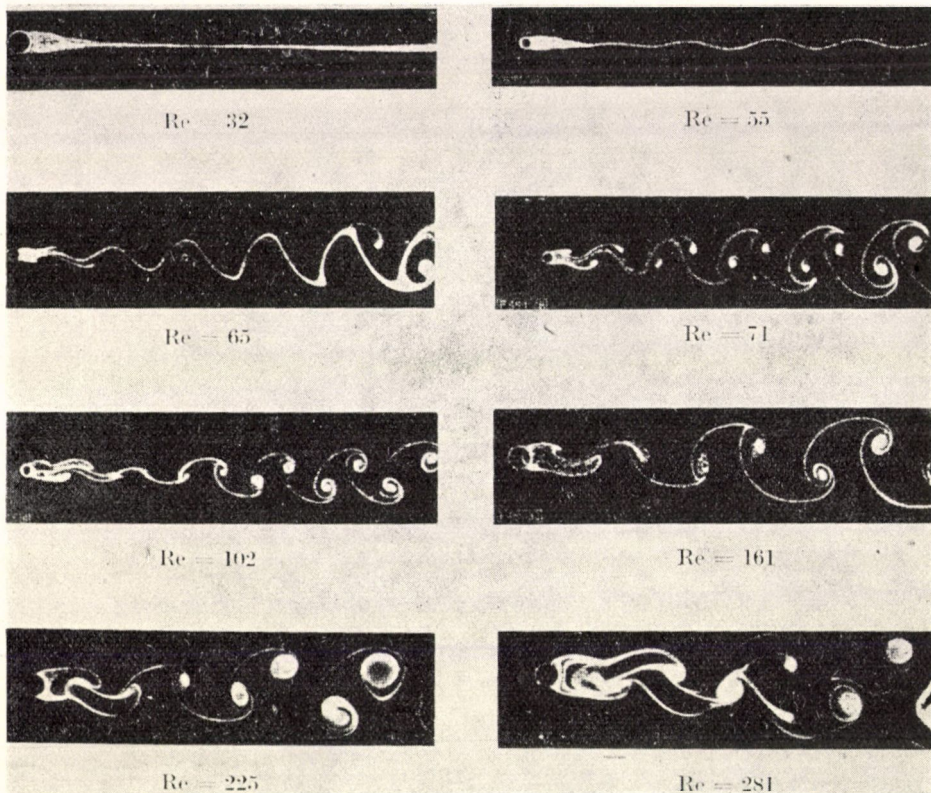
A megfigyelések szerint a pillérektől elinduló felvízi translációs hullámok gerince viszonylag rövid út megtétele után egyenesnek tekinthető. Ez csak abban az esetben lehetséges, ha a duzzasztómű közbenső pilléreinél kialakuló rezgések fázisa is azonos, nemcsak egyéb jellemzőik.

A pillérek orránál kialakuló lengések fázisazonosságának feltétele, hogy a gerjesztő rezgések — a Kármán-féle örvénysorok — is azonos fázisúak legyenek. Vizsgáljuk tehát meg először ezt a kérdést.

Elméleti megfontolások alapján már Kármán megállapította, hogy az áramló közegbe helyezett szilárd testek oldalán leváló örvénysor széttartó egyenesek mentén helyezkedik el. Gottardelli vizsgálatai szerint a nyílásszög mértéke a Reynolds-féle szám függvénye, de maximum 25° . A kevésszámú megfigyelési adat miatt azonban a függvényt nem tudta meghatározni, különös tekintettel arra, hogy a Reynolds-féle szám növekedésével a nyílásszög rohamosan nő. Példaképpen bemutatjuk Homann (10) vizsgálatának egy részéről készült felvételeket (3. ábra), amelyeken olajáramlásba helyezett henger mögötti áramlási kép látható. E fénykép-sor alapján is megállapítható, hogy az örvénysor nyílásszöge a Re növekedésével nő. (Az itt bemutatott $Re_{\max} = 2,81 \cdot 10^2$, a mi példánkban pedig $Re = 1,1 \cdot 10^7$; öt nagyságrenddel nagyobb!).

Ha feltételezzük, hogy az örvénysorok és a vízmozgás tengelye közötti szög 5 : 1 hajlású egyenessel jellemezhető (ez esetben a nyílásszög kb. $22,5^\circ$), akkor a szomszédos pillérekről leváló örvénysorok kb. 60 m-re a pillérek alvízi végétől átmetszik egymás pályáját, mivel a szabad nyílás 24 m. A metszéspontok a nyílások felezőjébe esnek. Megfigyeléseink szerint az örvények ennél nagyobb távolságra szűnnek csak meg. Mindezekből következik, hogy a rezgés-jellemzők azonosságának fenn kell állni a fázis vontkozásában is, ellenkező esetben a metszéspontban az örvények gyengítenék, ill. kioltanák egymást.

Megemlítjük, hogy az egyes pillérek mögött leváló örvénysorok rezgés-jellemzői és energiatartalmuk nem teljesen azonos. (Az árvízi sodorvonal pl. a duzzasztómű 2. nyílásába esik.) Tekintettel arra azonban, hogy az egyes pillérek mögött leváló örvénysorok elenyészésük távolságán belül egymást



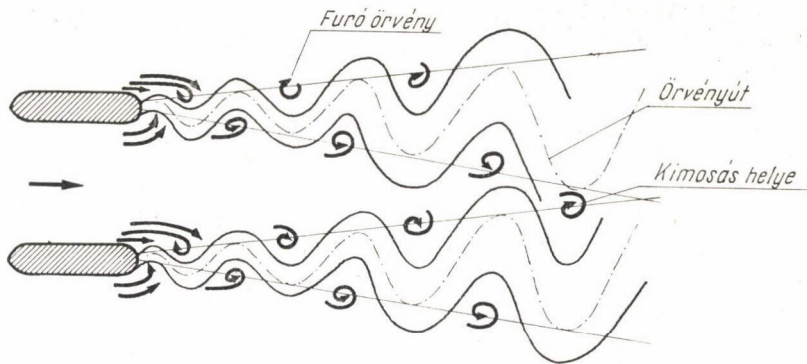
3. ábra. Olajáramlásba helyezett henger mögötti áramlási képek. A Re növekedésével a mozgás a lamináristól a leváló örvénysorig változik



4. ábra. Kifejlődött Kármán-féle leváló örvénysor áramlási képe

eléri, a kölcsönhatás következtében kialakul a szinkron állapot, tehát a közel egyenes gerincű felvízi transzlációs hullámok kialakulásának feltétele is kielégített.

Mivel a szinkron állapot feltételezése a fizikai megfontolások alapján indokoltnak látszik, várható, hogy a felvízi transzlációs hullámok a természetes



5. ábra. A közbenső pillérekről leváló Kármán-féle örvénysorok interferenciájának helyszínrajzi vázlata

méretben is ki fognak alakulni, nemcsak a modellben. Az 1—1,5 m magasságú, 100—150 m hosszúságú, 8—10 m/s sebességű transzlációs hullám kialakulása azonban semmiféleképpen nem kívánatos.

Az egyes pillérekről leváló Kármán-féle örvénysorok fázis azonossága (szinkron állapota) az alvízi oldal viszonyaira is kihat.

A 4. ábrán Eck vizsgálataiból (8) mutatunk be egy Kármán-féle örvénysort. Látható, hogy az örvények közötti cikk-cakkos csatornában haladó mozgás van. (Vízszintes síkban kialakuló, összetett lengő és haladó mozgás; növekvő amplitúdójú lengés.) A szinkron állapot következtében a szomszédos pillérektől induló és egymást metsző örvénysorok metszéspontjában az egyik pillértől érkező (fúró) örvény, a másik pillértől érkező örvénysor haladó mozgású csatornájával találkozik (5. ábra) (2).

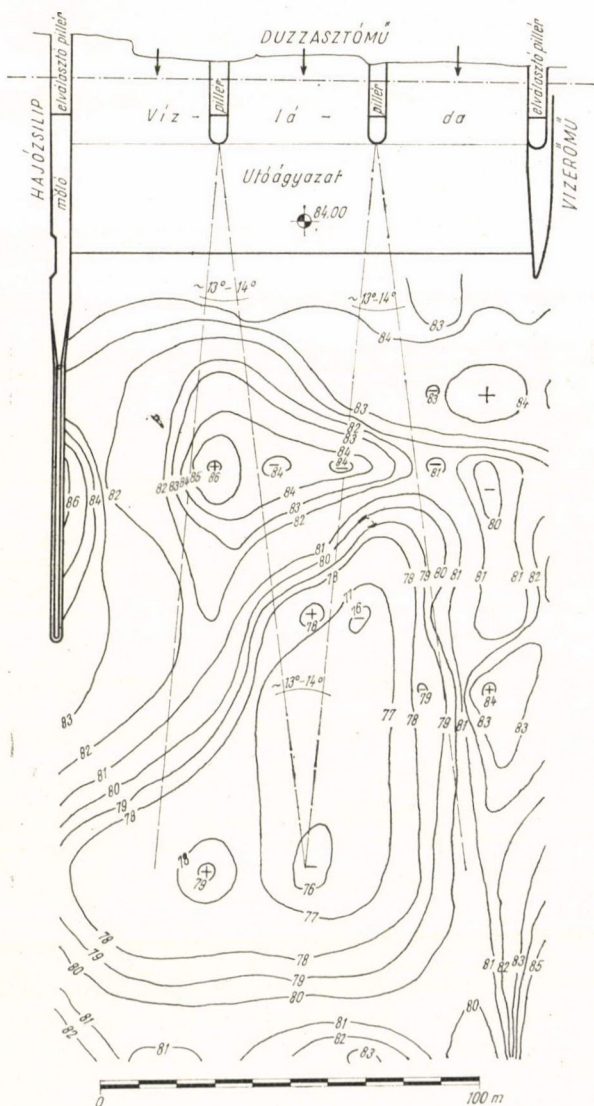
Feltehetően a felszíni vízugrás (13) és a nagyobb hordalékfelvevőképeség hatásán felül ezzel a jelenséggel indokolhatók pl. a Tiszalöki Vízlépcső alvízében mutatkozó kimélyülések is. Bemutatjuk az Intézet munkatársai által készített 1962. I. havi állapotfelvételt (6. ábra) (11).

A felvételen látható, hogy számottevőbb kimélyülés csak a középső (37 m-es) nyílás tengelyében van, és 180—190 m távolságban a pillérek alvízi végétől, a két közbenső pillérről leváló örvénysor interferenciájának helyén. (A megfelelő nyílásszög 13° — 14° .) Más időpontból származó állapotfelvételeken a kimélyülés kb. ugyanezen a helyen található. A 6. ábrán az is látható, hogy a pillérek alvízi végétől mintegy 80 m-re kezdődik egy általános medermélyülés (az utóágyazathoz képest 3—6 m), amely az ábra aljáig kb. 230—250 m távolságig terjed. Ez elsősorban a felszíni vízugrás hatásának, és a víz nagyobb hordalékfelvevő képességének tudható be.

A Kármán-féle örvénysor kialakulása tehát nemcsak a pozitív visszacsatolás rezonanciája esetén lehet nemkívánatos jelenségek forrása (pl. a felvízi transzlációs hullám), hanem az alvízi meder biztonsága miatt is kell vele foglalkozni.

4. Javaslat a káros hatások kiküszöbölésére

A folyamat megismerése után feltehető a kérdés, hogy hogyan lehet a nemkívánatos jelenséget megszüntetni, illetőleg a nemkívánatos hatások mértékét csökkenteni.



6. ábra. A Tiszalöki Vízlépcső alvízi medréről 1962.januárjában készült állapotfelvétel

Közvetlenül belátható, hogy az eredendő ok az áramló közegbe helyezett szilárd test után kialakuló Kármán-féle leváló örvénysor, és annak periodikus volta. A káros jelenségek elmaradnak, ha a leváló örvénysor kialakulását meg tudjuk akadályozni.

A leváló örvénysor kialakulása megakadályozható azzal, hogy az árvíz által körüláramlott pillér „áramvonalas” kialakítású. Ezt megközelíthetjük azzal, ha a pillér alvízi végét $8^\circ - 10^\circ$ nyílásszögnél nem nagyobb nyílásszögű toldalékkal, folyásirányú végén — elvben — élben fejezzük be. Ez esetben ugyanis az örvénysor frekvenciája végtelen nagy, melynek eredményeképpen az amplitúdó végtelen kicsiny, tehát gyakorlatilag nincs rezgés (a tehetetlenség és a nyúlósság következtében végtelen nagy frekvenciájú rezgést a víz nem tud követni.)

Áramvonalas alakú, vagy alvízi végén élben végződő pillér számos gyakorlati ok miatt azonban nem valósítható meg. Célszerű ezt a lehető legjobban megközelíteni, és emellett a pillér alvízi — kilépő — vastagságát a gyakorlatilag lehetséges minimumra lecsökkenteni.

A pillér alvízi szélességének csökkentésével ugyanis nő a leváló örvénysor frekvenciája, ami azt jelenti, hogy az időegység alatt nagyobb számú egyedi örvény válik le a pillérről. Ebben az esetben egy-egy örvény energiataralma kisebb, ezért a pozitív visszacsatolás hullámának amplitúdója is kisebb (kisebb lesz az interferencia eredményeképpen kialakuló felvízi transzlációs hullám kezdő amplitúdója is, s lehet, hogy ez kedvező esetben nem haladja meg a „fodrozódás” mértékét). A kisebb energiataralmú örvény az alvízben hamarabb lefékeződik, kedvező esetben nem éri el „életben” a szomszédos pillérről leváló örvénysorral való metszéspontot, és ezáltal az alvízi meder biztonsága is fokozódik.

Rezgéstani vizsgálatokból ismeretes, hogy a pozitív visszacsatolásból származó erősítés gyakorlatilag elhanyagolható, ha

$$\frac{f_K}{f_P} \geq 50 \text{ illetve ha } \frac{f_K}{f_P} \leq 1/50.$$

Veszélyes a pozitív visszacsatolás, illetve az erősítésre számolni kell, ha

$$1/50 \leq \frac{f_K}{f_P} \leq 50.$$

A pillér körüli lengés frekvenciáját (f_P) a pillér hosszának (l_P) módosításával lehet változtatni. Egyéb körülmények a módosítás határait azonban szűkre korlátozzák. Könnyebben módosíthatónak látszik a pillér végén leváló Kármán-féle örvénysor frekvenciája (f_K), mivel a pillér végének vastagsága (ahol az örvény leválik) nagyobb arányokban módosítható. A pillér végső (b) szélességének csökkentésével a Kármán-féle leváló örvénysor frekvenciája (f_K) növelhető, tehát könnyebben kielégíthetőnek látszik az $f_K/f_P \geq 50$ feltétel.

A kétféle frekvencia kifejezésének hányadosát egyenlővé téve ötvennel, és az összefüggést a pillér alvízi (b) szélességére megoldva az alábbi közelítő eredményre jutunk:

$$b = \frac{l_P \sqrt{Fr}}{125(1 - Fr)} + \sqrt{\left[\frac{l_P \sqrt{Fr}}{125(1 - Fr)} \right]^2 + \frac{8 l_P \nu}{25 \sqrt{g m (1 - Fr)}}},$$

ahol l_p — a pillér folyásirányú hossza [m],

$$Fr = \frac{v^2}{g m} \text{ — a vízmozgás Froude-féle száma [1],}$$

v — a vízmozgás sebessége [m/s],

$g = 9,81$ — a nehézségi gyorsulás [m/s²],

m — a vízmozgás mélysége a szabad nyílásban [m],

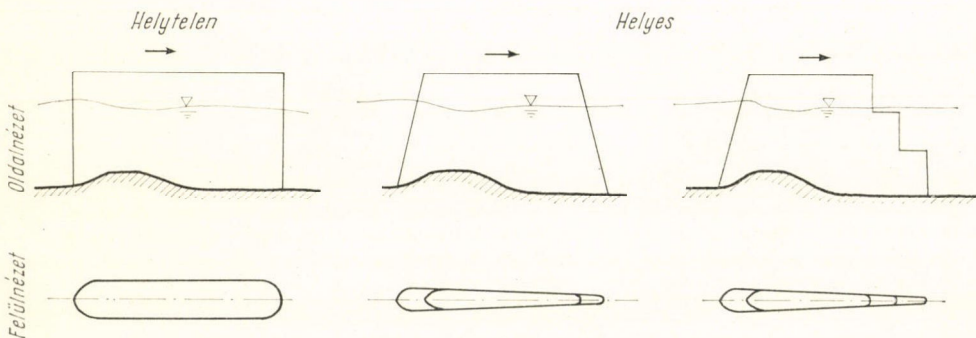
ν — a víz kinematikai viszkozitása [m²/s].

Az előbbi számadatokat felhasználva:

$$Fr = \frac{v^2}{g m} = \frac{2^2}{9,81 \cdot 10,7} = 0,0381; \quad \sqrt{Fr} = 0,195;$$

$$\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}; \quad l_p = 36,7 \text{ m};$$

$$\sqrt{g m} = \sqrt{9,81 \cdot 10,7} = 10,25 \text{ m/s és } b = 0,12 \text{ m.}$$



7. ábra. A lengés-jelenség szempontjából helytelen és helyes pilléralak

Az adott esetben tehát a pillér alvízi végét le kell csökkenteni 10–15 cm-re ahhoz, hogy a pozitív visszacsatolásból származó erősítés elhanyagolható, azaz a lengés gyakorlatilag zérus legyen. A keskenyítés azonban nem lehet meredek, mert akkor nemkívánatos leválások keletkeznek, tehát a pillér alvízi csúcsához tartozó nyílásszög nem lehet nagyobb 8°–10°-nál. (Ezt a javaslatot a kismintában kísérlettel is ellenőriztük.)

Célszerűnek tartjuk a pillér alvízi vastagságának csökkentése mellett a pillér alvízi végét lépcsőzni, ill. függőleges alkotó helyett a felvíz felé dőlő alkotókkal lezárni, és ezáltal a leváló örvénysort a vízmélység mentén is megosztani (7. ábra). Ezzel mind az alvízi meder, mind a felvízi partok biztonsága fokozható.

5. Befejezés

A több nyílású duzzasztóművek árvízi lengéseivel kapcsolatos megfontolásainkat közelítések terhelik (a pillér végéről leváló örvénysor frekvenciáját a hengerről leváló örvény frekvenciájának számítására levezetett összefüggéssel határoztuk meg; a pillért körüljáró lengésnél elhanyagoltuk az energiavesztéseget; a pillér melletti áramlási sebességet a szabad nyílások középsebességével helyettesítettük stb.). Ezért levezetett eredményeink csak közelítőeknek tekinthetők.

Az eredmények finomítása érdekében vizsgálat megkezdését tervezzük. Az előkészületek folyamatban vannak. Reméljük, hogy ezek a vizsgálatok hozzá fognak járulni a vízepítési műtárgyak biztonságának fokozásához és az üzemi (fenntartási) költségek csökkentéséhez.

Befejezésül ezen a helyen is köszönetet kell mondanom munkatársaimnak — elsősorban *Akantisz Zsuzsannának* —, hogy abban a széleskörű vizsgálatban, melynek az itt bemutatott csak egy részlete, segítségemre voltak.

IRODALOM

1. *Kármán, T.*: Nachr. d. K. Ges. d. Wiss. zu Göttingen, Math. phys. Klasse, (1911), (1912).
2. *Németh E.*: Hidromechanika. Tankönyvkiadó, Budapest, 1963.
3. *Dupin*: Etude expérimentale sur les tourbillons alternés de Bénard. (Thèse — 1930.)
4. *Crausse*: Sur quelques phénomènes dus aux tourbillons alternés. (P. S. T. de l'Ecole Française d'Ingénieurs de Beyrouth — 1945.)
5. *Relfet Simmons*: La fréquence des tourbillons produits par le mouvement des cylindres circulaires à travers un fluide. (Aeron. Res. -R 917—1924.)
6. *Leou, P.*: Vibrations d'un élément tubulaire dans un écoulement perpendiculaire à son axe. (A. I. R. H., Congrès de Londres, 1963/3.6.)
7. *Lecher, A.W.*: Cavitation observations and noise measurements as a means of investigating the trailing edge vibrations of turbine blades. (I. A. H. R. Congress of London, 1963/3.14.)
8. *Eck, B.*: Technische Strömungslehre. Springer Verlag 1961, Berlin.
9. *Schlichting, H.*: Grenzschicht-Theorie. Braun Verlag 1951, Karlsruhe.
10. *Homann, F.*: Einfluss grosser Zähigkeit bei Strömung um Zylinder und Kugel. Forschg. Ing. Wes. 7 (1936).
11. *Hamvas F.*: Hidraulikai ellenőrző mérések Tiszalökön. VITUKI összefoglaló jelentés. Témaszám: E.4.3.4.4/1963. Megbízásos munkaszám: MVIII. Kézirat, Budapest, 1963.
12. *Hankó Z.*: A II. Tiszai Vízlépcső kismintakísérlete. A műtárgy és a művek áramlási vizsgálata. VITUKI összefoglaló jelentés. Témaszám: E. 4.3.2.2/1964; E.4.3.2.3/1965. Kísérletszám: 140. Kézirat, Budapest, 1965.
13. *Haszpra O.*: A felszíni vízgrás szerepe duzzasztóművek utófenekének méretezésében. Építés- és Közlekedéstudományi Közlemények 1965/3—4. Budapest.