

MISKOLCI EGYETEM



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR
ENERGETIKAI ÉS VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZET
ÁRAMLÁS ÉS HŐTECHNIKAI GÉPEK INTÉZETI TANSZÉK

Az örvényleválás által keltett rezgőmozgások vizsgálata kis Reynolds-számú áramlások esetén

Dorogi Dániel

PHD ÉRTEKEZÉSÉNEK TÉZISFÜZETE

Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola
Gépészeti alaptudományok tématerület
Transzportfolyamatok és gépek témacsoport

A DOKTORI ISKOLA VEZETŐJE:

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella
az MTA doktora

A TÉMATERÜLET VEZETŐJE:

Prof. Dr. Páczelt István
az MTA rendes tagja

A TÉMACSOPORT VEZETŐJE:

Prof. Dr. Czibere Tibor
az MTA rendes tagja

TÉMAVEZETŐ:

Prof. Dr. Baranyi László
egyetemi tanár

Miskolc
2020

Dorogi Dániel

Az örvényleválás által keltett rezgőmozgások vizsgálata kis
Reynolds-számú áramlások esetén

PhD értekezés tézislevele

Miskolc
2020

Bírálóbizottság tagjai

Elnök

Prof. Dr. Bertóti Edgár

az MTA doktora, egyetemi tanár, *Miskolci Egyetem*

Titkár, tag

Dr. Bolló Betti

PhD, egyetemi docens, *Miskolci Egyetem*

Tagok

Prof. Dr. Vad János

az MTA doktora, egyetemi tanár, *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem*

Prof. Dr. Kollár László

PhD, egyetemi tanár, *Eötvös Loránd Tudományegyetem*

Prof. Dr. Jármái Károly

a műszaki tudomány doktora, egyetemi tanár, *Miskolci Egyetem*

Hivatalos bírálók

Dr. Könözsy László

PhD, egyetemi docens, *Cranfield Egyetem*, Egyesült Királyság

Dr. Kristóf Gergely

PhD, egyetemi docens, *Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem*

1. Bevezetés

Az elmúlt néhány évtizedben a párhuzamos áramlásba helyezett körhenger körüli folyadékáramlás vizsgálatával számos rangos tanulmány foglalkozott a téma nagy gyakorlati jelentősége miatt. E folyamat fontos szerepet játszik például a víz alatti csővezetékeknél, a szélterhelésnek kitett karcsú épületeknél (például a gyárkéményeknél), vagy akár a hőcserélőknél. A szakirodalomból ismeretes, hogy a hengerről leváló örvények gerjesztő hatással vannak a testre nézve, amelyek révén a test rezgőmozgásba (szabadrezgésbe) jöhet. Az angol szakirodalomban ezt a jelenséget „vortex-induced vibration (VIV)” néven illetik, amely számos kutatás témáját képezte [1–4]. A valóságban a henger egyidejűleg az áramlás irányával párhuzamosan (hosszirányban) és arra merőlegesen (keresztirányban) is képes elmozdulni, amelyet kétszabadságfokú rezgésnek nevezünk. Azonban az egyszabadságfokú szabadrezgés modelljét gyakran alkalmazzák a valóságos folyamatok modellezésére.

1.1. Az örvényleválás által keltett keresztirányú rezgések

Khalak és Williamson [2] kísérleti módszerek felhasználásával egy körhenger egyszabadságfokú keresztirányú szabadrezgését vizsgálta. Kimutatták, hogy a test rezgési amplitúdóját az U^* redukált sebesség függvényében ábrázolva, kis $m^*\zeta$ értékek esetén, háromágú rezgéskép jelenik meg, amelyet az alapág, a felsőág és az alsóág együttese alkot. Itt m^* és ζ rendre a tömegarány és a dimenziótlan csillapítási tényező. Megfigyelték, hogy az $m^*\zeta$ paramétert egy adott kritikus érték fölé növelve a felsőág eltűnik; kizárólag az alapág és az alsóág jelenik meg, amelyet kétágú rezgésképnek neveztek. Soti és szerzőtársai [5]¹ laboratóriumi kísérletek alkalmazásával széles dimenziótlan csillapítási tényező tartományban azonosította a háromágú válaszjelenséget. Tapasztalataik azt mutatták, hogy a felsőág igen kis rezgési amplitúdóknál is megjelenik (még $0,2d$ -nél is, ahol d a henger átmérője).

Míg a kísérleti vizsgálatokat általában az $Re = O(10^3-10^4)$ Reynolds-szám tartományban végzik, addig a numerikus szimulációkból (CFD) származó eredmények – a nagy számítási idő és az áramlás háromdimenziós viselkedése következtében [6] – általában kis Reynolds-számok esetén [$Re = O(10^2)$] állnak rendelkezésre. A CFD vizsgálatok során ahhoz, hogy minél valósághűbb eredményeket kapjanak, a rendszer sajátfrekvenciáját sokszor állandó értéken tartják [7, 8]. Ennek értelmében Re és U^* között lineáris függvénykapcsolatot tételeznek fel; $Re = KU^*$, ahol K a rendszer dimenziótlan sajátfrekvenciája. Ugyanakkor, számos tanulmány foglalkozik Re és U^* független hatásának vizsgálatával [9, 10].

Elmondható, hogy a kis Reynolds-számú áramlásoknál mért /számított rezgési amplitúdók jelentősen kisebbek (legfeljebb $0,55d$, lásd Navrose és Mittal [10]) a nagy Reynolds-számú áramlásoknál lévő amplitúdóértékeknel (megaladhatja akár a $0,8d$ -t, lásd Khalak és Williamson [2]). Emellett a kis Re esetén kapott eredményekben nem jelenik meg a felsőág még csillapítatlan

¹A továbbiakban az „és szerzőtársai” helyett a latin „et al.” rövidítést fogom használni.

rezgőmozgásoknál sem [9, 10]. Ezen esetek túlnyomó részében 2S típusú örvényszerkezet azonosítható (a hengerről két egyedülálló örvény válik le minden rezgési periódusban) mind az alap-, mind pedig az alsóágon. Evangelinos és Karniadakis [11] két- és háromdimenziós CFD szimulációk segítségével rávilágított arra, hogy a P+S módus (a hengerről egy örvénypár és egy egyedülálló örvény válik le) összefüggésbe hozható a felsőág megjelenésével. Singh és Mittal [12] kétszabadságfokú szabadrezgéseket vizsgálva $Re = 300$ felett P+S típusú örvényszerkezetet talált.

1.2. Az örvényleválás által keltett hosszirányú rezgések

A szakirodalomban a hosszirányú szabadrezgések témaköre kisebb figyelmet kapott, vélhetően a rezgési amplitúdó kicsiny volta miatt. Összefoglaló tanulmányában King [13] megmutatta, hogy a maximális hosszirányú rezgési amplitúdó $0,2d$ körüli, amely töredéke a keresztirányú szabadrezgésnél kialakuló amplitúdócsúcshoz. King [13], Aguirre [14] és Gurian et al. [15] kísérleti vizsgálatai kimutatták, hogy hosszirányú szabadrezgéseknél két gerjesztési tartomány jelenik meg. Az ún. első ághoz szimmetrikus-, a második ághoz pedig alternáló örvényszerkezetet társítottak.

Az imént említett kutatásokban a laboratóriumi vizsgálatokat túlnyomórészt az $Re = 10^3$ Reynolds-szám felett végezték. Tanida et al. [16], Konstantinidis és Bouris [17], illetve Kim és Choi [18] – alkalmazva a kényszerrezgést végző körhenger modelljét – a henger és a körülötte lévő folyadék közti mechanikai energiaátadás értékéből arra következtetett, hogy az örvényleválás által keltett hosszirányú rezgések nem jöhetnek létre kis Reynolds-számú áramlások esetén, amennyiben a rezgési amplitúdó $0,05d$ feletti. Ugyanakkor, a hosszirányú szabadrezgés létrejötté a kis Re tartományban is lehetséges, azonban ez esetben a rezgési amplitúdó mindenképp $0,05d$ alatti. Tudomásom szerint azt a kérdést, hogy a főáramlással párhuzamos irányú szabadrezgés létrejöhet-e kis Reynolds-számokú áramlásoknál, eddig még nem tették fel.

1.3. Az örvényleválás által keltett kétszabadságfokú rezgések

Ahogy az korábban említettem, a gyakorlatban a henger hossz- és keresztirányban egyszerre mozoghat, ezzel kétszabadságfokú rezgőmozgást eredményezve. Általános esetben a tömegarány (m_x^* és m_y^*) és a rendszer sajátfrekvenciája (f_{Nx} és f_{Ny}) a két irányban különböző értékű. Moe és Wu [19] illetve Sarpkaya [20] kísérleti vizsgálatokat végzett $m_x^* \neq m_y^*$ esetén az $f_{Nx}/f_{Ny} = 1-2$ sajátfrekvencia-hányados tartományban. A kapott rezgésekben nem volt felfedezhető az eredetileg keresztirányú szabadrezgéseknél azonosított alap-, felső- és alsóág egyike sem (lásd 1.1. fejezet). Jauvtis és Williamson [21] az $m^* = m_x^* = m_y^*$ és $f_N = f_{Nx} = f_{Ny}$ speciális esetre korlátozta laboratóriumi vizsgálatait. Az alap-, felső- és alsóágon túlmenően a legfelsőbb ágat is azonosították $m^* < 6$ esetén.

A keresztirányú szabadrezgésekhez hasonlóan a CFD számításokat általában kis Reynolds-számok esetén végzik. Habár néhány tanulmányban Re és U^* független hatását vizsgálják [12], az esetek többségében az $Re = KU^*$ mo-

delt alkalmazták [22, 23]. A szakirodalomban jól látható, hogy e számítások csupán kis dimenziótlan sajátfrekvenciák esetén állnak rendelkezésre (kétszabadságfokú szabadrezgéseknél a $K < 16,6$ tartományban). Tudomásom szerint azt a kérdést, hogy K milyen hatással van a kialakuló rezgésképre, még nem tették fel.

Kétszabadságfokú szabadrezgéseknél a henger pályagörbéje újabb kutatások tárgyát képezi. A vonatkozó szakirodalom alapján a nyolcas alakú pályagörbe a leggyakoribb a párhuzamos áramlásba helyezett körhenger rezgésanalízisekor [12, 22]. Ezen felül van néhány olyan eset, ahol a henger orbitális pályán mozog. Ezen alkalmazások magukba foglalják, de nem korlátozódnak azokra az esetekre, amikor a rendszer sajátfrekvenciája a két irányban különböző [24], amikor henger egyik vége rögzített [25], vagy amikor a szabadrezgésre képes hengert térben lineárisan változó megfűvási sebességű áramlásba helyezik [26]. Tudomásom szerint párhuzamos áramlásba helyezett egyedülálló körhenger esetén, kis Reynolds-számú áramlásoknál az orbitális mozgásgörbe megjelenését még nem mutatták ki.

2. A disszertáció célkitűzései

A vizsgálni kívánt problémakör irodalmának áttanulmányozása alapján kutatási kérdéseket (angol nyelven „*research questions*”) fogalmaztam meg, amelyek meghatározzák a jelen disszertáció célkitűzéseit. A kutatási kérdéseket, illetve a célkitűzéseket az alábbi pontokban ismertetem.

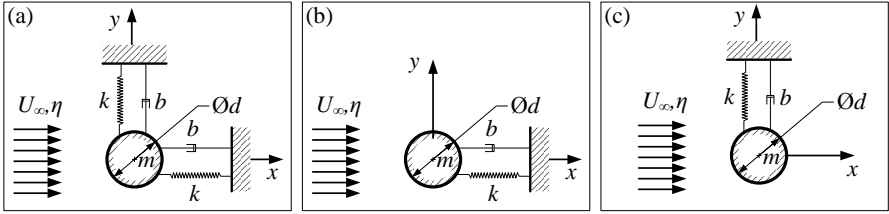
1. célkitűzés

Az értekezés első részében egy körhenger örvényleválás által keltett kétszabadságfokú rezgőmozgását vizsgálom. E célból a hossz- és keresztirányban rugalmasan felfüggesztett henger modelljét használom, amely elrendezést az 1a ábra szemlélteti. Korábban az 1.1. és 1.3. fejezetekben ismertettem, hogy a rendszer sajátfrekvenciáját sokszor állandó értéken tartják. Ezen esetekben a Reynolds-szám és a redukált sebesség között egy lineáris kapcsolat írható fel. Amint arra korábban rámutattam, az ilyen típusú számításokat eddig kizárólag kis dimenziótlan sajátfrekvenciáknál – kétszabadságfokú szabadrezgéseknél a $K < 16,6$ tartományban – végezték. A jelen disszertációban feltett első kutatási kérdés:

Milyen hatása van a rendszer K dimenziótlan sajátfrekvenciájának a kialakuló hengerrezgésre, illetve a testre ható áramlási erőtényezőkre?

2. célkitűzés

Singh és Mittal [12] számításokat végzett rögzített $U^* = 4,92$ redukált sebességnél az $50 \leq \text{Re} \leq 500$ Reynolds-szám tartományban kétszabadságfokú szabadrezgés esetén. A Reynolds-számot $\text{Re} = 300$ felett változtatva P+S



1. ábra. Kereszt- és hosszirányban (a), kizárólag hosszirányban (b), valamint kizárólag keresztirányban (c) rugalmasan felfüggesztett körhenger modellje

típusú aszimmetrikus örvényszerkezetet tapasztaltak, amely módot szabadrezgéseknél kevés esetben azonosították. Ebből kiindulva az alábbi kutatási kérdéseket fogalmaztam meg:

Megjelenik-e a P+S módus nagy dimenziótlan sajátfrekvenciák esetén? Milyen hatással van ezen aszimmetrikus örvényszerkezet a henger pályagörbéjére?

3. célkitűzés

Doktori disszertációm következő részében az egyszabadságfokú hosszirányú szabadrezgéseket tanulmányoztam, amely elrendezés az 1b ábrán látható. A korábbi kényszerrezgésből származó eredmények azt mutatták, hogy az áramlás által keltett hosszirányú szabadrezgések nem jöhetnek létre kis Reynolds-számú áramlásoknál, $0,05d$ -nél nagyobb rezgési amplitúdók esetén [16–18]. Ugyanakkor a szakirodalomban nincs rendelkezésre álló adat arra vonatkozóan, hogy az egyszabadságfokú hosszirányú szabadrezgés megjelenik-e kis Re esetén a $0,05d$ -nél kisebb rezgési amplitúdóknál. Következésképpen, kutatásaim ezen részénél feltett kérdések az alábbiak:

Lehetséges-e a hosszirányú szabadrezgések létrejötte a kis Reynolds-szám tartományban? Milyen hatást gyakorol m^* és Re a hengerrezgésre?

4. célkitűzés

PhD értekezésem befejező részében a keresztirányú szabadrezgések vizsgálatát tűztem ki célul. Az 1c ábra a keresztirányban rugalmasan felfüggesztett körhenger modelljét szemlélteti. Az 1.1. fejezetben rávilágítottam arra, hogy kis Reynolds-számú áramlásoknál a felsőág megjelenését eddig még nem tapasztalták. Azonban a szakirodalomban rendelkezésre állnak olyan adatok, amelyek egyértelműen utalnak arra, hogy a felsőág megjelenése lehetséges a kis Re tartományban. További magyarázatok az 1.1. fejezetben, illetve a disszertációmban találhatóak. Ezen okból kifolyólag az alábbi kutatási kérdéseket tettem fel:

Megjelenik-e a felsőág (vagyis a háromágú válaszjelenség) az $Re = 300$ Reynolds-szám esetén? Milyen hatást gyakorol a dimenziótlan csillapítási tényező a rezgőmozgásra?

3. A feladat megoldásának módszere

PhD értekezésemben, a 2. fejezetben feltett kérdések megválaszolása céljából, szisztematikus két-dimenziós CFD számításokat végeztem. Az összenyomhatatlan newtoni folyadék áramlását a hengerhez kötött neminercia-rendszerben felírt Navier-Stokes mozgásegyenlet két komponense, a kontinuitási egyenlet, illetve a nyomásra vonatkozó Poisson típusú differenciálegyenlet írja le. A henger elmozdulása, sebessége és gyorsulása a szerkezeti egyenletek megoldásával számíthatók ki (lásd Singh és Mittal [12]). A numerikus hibák csökkentése szempontjából a megoldandó alapegyenleteket – és a peremfeltételeket – a számítási síkra transzformáljuk, ahol az egyenleteket a véges differenciák módszerével oldjuk meg. A számítási eljárás további részleteiről a Baranyi [27] szakirodalomban, illetve a disszertációban olvashatunk.

Kutatásaim első lépése a függetlenségi vizsgálatok elvégzése volt. Ennek célja az optimális számítási paraméter-kombináció megválasztása, amelynek alkalmazásával megfelelően pontos eredményeket kapunk nem túlzottan hosszú számítási időn belül. Ezt követően – az újonnan meghatározott paraméterek segítségével – fokozatosan növekvő bonyolultsági szintű validációt végeztem. Eredményeimet összehasonlítottam Bourguet és Lo Jacono [28] illetve Navrose és Mittal [10] keresztirányú szabadrezgésnél kapott eredményeivel, Bourguet és Lo Jacono [29] hosszirányú szabadrezgésre vonatkozó adataival, valamint Prasanth és Mittal [22], He és Zhang [30], illetve Bao et al. [31] kétszabadságú szabadrezgés esetén bemutatott számítási eredményeivel. Minden vizsgált esetben az eredményeim kiváló egyezést mutattak a szakirodalmi adatokkal.

4. Az elvégzett vizsgálatok

A számítási eljárás verifikációja és validációja után szisztematikus számításokat végeztem a 2. fejezetben megfogalmazott célkitűzések teljesítéséhez.

4.1. Kétszabadságfokú szabadrezgések vizsgálata

Doktori kutatásaimat az örvényleválás által keltett kétszabadságfokú rezgések vizsgálatával kezdtem. Ahhoz, hogy az **1.** és **2. célkitűzésnél** megfogalmazott kutatási kérdésekre választ adjak, szisztematikus számításokat végeztem különböző dimenziótlan sajátfrekvenciák esetén a $K \cong 12\text{--}44$ tartományban. A Reynolds-számot a $60 \leq \text{Re} \leq 250$ intervallumon belül változtattam (K értékének megfelelően), míg a tömegarányt és a dimenziótlan csillapítási tényezőt rögzítettem rendre az $m^* = 10$ és $\zeta = 0\%$ értéken. E számítások kapcsán megfogalmazott új tudományos eredményeimet az **1.** és **2. tézisek** tartalmazzák.

4.2. Hosszirányú szabadrezgések vizsgálata

A **3. célkitűzésnél** megfogalmazott kutatási kérdések a hosszirányú szabadrezgések vizsgálatával kapcsolatosak. Ahhoz, hogy e kérdésekre választ adjak,

két számítási sorozatot hajtottam végre. Első lépésben rögzített $Re = 180$ Reynolds-szám mellett $m^* = 2, 5, 10$ és 20 tömegarány értékeknél végeztem vizsgálatokat. A megfigyelt jelenségeket az ún. harmonikus rezgési modell alkalmazásával magyaráztam meg. Ezt követően a tömegarányt $m^* = 10$ értéken rögzítve $Re = 100, 180$ és 250 Reynolds-számoknál végeztem számításokat. Mindkét számítási sorozatnál a redukált sebességet $U^* = 1,5$ és $3,5$ között változtattam, illetve a dimenziótlan csillapítási tényezőt zérus értéken rögzítettem. E CFD számításokkal kapcsolatban megfogalmazott új tudományos eredményeket a **3. és 4. tézisek** tartalmazzák.

4.3. Keresztirányú szabadrezgések vizsgálata

Végezetül ahhoz, hogy a **4. célkitűzésnél** felvetődött kutatási kérdéseket megválaszoljam, számításokat végeztem egyszabadságfokú keresztirányú szabadrezgés mellett. A CFD számításokat rögzített $Re = 300$ Reynolds-számnál és $m^* = 10$ tömegaránynál végeztem. A dimenziótlan csillapítási tényező értékét a $\zeta = 0-5\%$ intervallumon belül vettem fel, tehát a tömegarány-csillapítási tényező az $m^*\zeta = 0$ és $0,5$ értékek között változott. A redukált sebességet az $U^* = 2,5-7,5$ tartományon belül változtattam. Hasonlóan a hosszirányú szabadrezgések vizsgálatához, a harmonikus rezgési modellt alkalmaztam a tapasztalt jelenségek megmagyarázására. E témakörben megfogalmazott új tudományos eredményeim az **5. és 6. tézispontokban** olvashatók.

5. Új tudományos eredmények

1. TÉZIS

Egy körhenger örvényleválás által keltett kétszabadságfokú rezgőmozgásának CFD vizsgálatát állandó K dimenziótlan sajátfrekvencia esetén eddig kizárólag a $K < 16,6$ tartományban végezték. A $K \cong 12-35$ intervallumon belül végzett vizsgálatokból az alábbi eredmények adódnak ($m^* = 10$, $\zeta = 0\%$ és $Re = 60-250$):

- (a) A Reynolds-szám helyett az U^*St paramétert alkalmazva független változóként, a különböző K értékek esetén kapott adatsorok összehasonlítása egyszerűbbé válik.
- (b) A hosszirányú elmozdulás illetve erőtényező rms értékének ($x_{0'}$ és $C_{x'}$) a $K \cong 16,6-34,7$ dimenziótlan sajátfrekvenciák esetén az $U^*St \cong 0,47$ helyen lokális maximuma van. E csúcsertékek a dimenziótlan sajátfrekvencia növelésével növekvő tendenciát mutatnak.
- (c) A dimenziótlan sajátfrekvencia értékét a $K \cong 16,6$ és $34,7$ között felvéve, $C_{x'}$ zérushoz tart az $U^*St \cong 0,5$ pont közvetlen közelében ott, ahol a C_x hosszirányú erőtényező és az x_0 hosszirányú elmozdulás közti fázisszög 0° és 180° között ugrásszerűen változik.
- (d) A nyomásból származó C_{xp} hosszirányú erőtényező a felelős – a $K \cong 16,6-34,7$ esetén észlelt – a C_x és x_0 közti hirtelen fázisugrásért, mert

míg a C_{xp} és x_0 közti fázisszög hirtelen változást mutat az $U^*St \cong 0,5$ helyen, addig a falsúrlódásból származó C_{xv} hosszirányú erőtenyező fázisszöge (x_0 -hoz képest) lassan növekszik; az $U^*St = 0,5$ környezetében megközelítőleg 54° értékű. A C_{xp} és x_0 közti gyors fázisváltozás következtében (a $K \cong 16,6\text{--}34,7$ tartományban) a (C_{xv}, C_{xp}) határciklus az $U^*St = 0,5$ pont közelében az óramutató járásával megegyező irányításúról az óramutató járásával ellentétes irányításúra tér át.

- (e) A $K \cong 16,6\text{--}34,7$ dimenziótlan sajátfrekvencia értékek esetén a pályagörbe irányítása (a torzított nyolcas alakú görbe felső felében) az $U^*St \cong 0,5$ helyen az óramutató járásával megegyező irányításúról az óramutató járásával ellentétes irányításúra változik.

Kapcsolódó publikáció: Dorogi és Baranyi [J1]

2. TÉZIS

A P+S típusú aszimmetrikus örvényszerkezetet egy körhenger örvényleválás által keltett rezgése esetén kevés esetben azonosították. Sejtéseim szerint e módus nagy K dimenziótlan sajátfrekvenciájú esetekben meg fog jelenni. A $K \cong 35\text{--}44$ intervallumon kétszabadságfokú szabadrezgés esetén végzett CFD szimulációkból kapott eredmények ($m^* = 10$, $\zeta = 0\%$ és $Re = 60\text{--}250$) alapján az alábbi megállapítások tehetők:

- (a) A rendszer dimenziótlan sajátfrekvenciája nagymértékben befolyásolja a henger pályagörbéjének alakját. Míg $K < 36,6$ esetén kizárólag torzított nyolcas alakú pályagörbe jelenik meg, addig a $K = 36,6$ és $43,7$ értékek között – keskeny U^*St intervallumon – orbitális mozgásgörbe is megfigyelhető, amely a szakirodalomban „esőcsepp alakú görbe” néven ismert. Ezen orbitális hengermozgás U^*St tartománya K értékének növelésével kiszélesedik.
- (b) Az esőcsepp alakú mozgásgörbe aszimmetrikus, mert a henger x_0 hosszirányú elmozdulásának FFT frekvenciaspektrumában két frekvenciacsúcs található: az f_y^* és a $2f_y^*$ helyeken, ahol f_y^* a henger keresztirányú dimenziótlan rezgési frekvenciája.
- (c) Orbitális pályagörbéknel – a henger mögötti térben – P+S típusú aszimmetrikus örvényszerkezet figyelhető meg, míg torzított nyolcas alakú mozgásgörbe esetén 2S vagy C(2S) módusok jelentkeznek. E jelölésekben P és S rendre az örvénypárra és az egyedülálló örvényre, illetve C a pozitív és a negatív előjelű örvények egybeolvadására utal.
- (d) Hiszterézis görbe jelenik meg ott, ahol az örvényszerkezet P+S-ről 2S-re változik, és egyben a henger pályagörbéje esőcsepp alakúról torzított nyolcas alakúra vált. A $0,97 \leq U^*St \leq 1,01$ intervallumon U^* és Re együttes növelésével orbitális hengermozgás és P+S típusú örvényszerkezet figyelhető meg, míg ugyanezen tartományon belül U^* és Re csökkentésével nyolcas alakú pályagörbe és 2S módus jelentkezik.

- (e) Esőcsepp alakú pályagörbénél a keresztirányú erőtenyező időátlaga $|\overline{C}_y| > 0$, mert a P+S típusú örvényszerkezet aszimmetrikus módon terheli a hengert. Ezekben az esetekben \overline{C}_y két megoldás között ugrás-szerűen változik. Ezek a megoldások szimmetrikusak, mert a (C_x, C_y) és az (x_0, y_0) határciklusok egy ugrási pont előtti és utáni állapotban egymás tükörképei.

Kapcsolódó publikációk: Dorogi és Baranyi [J2], Dorogi és Baranyi [C5] és Dorogi és Baranyi [C6]

3. TÉZIS

A szakirodalomban az örvényleválás által keltett hosszirányú rezgőmozgásokat eddig kizárólag az $Re = 10^3$ Reynolds-szám felett azonosították.

- (a) Kétdimenziós CFD számítások segítségével kimutattam, hogy hosszirányú szabadrezgés kis Reynolds-számú áramlások esetén is kialakulhat. Egyágú válaszjelenség figyelhető meg minden vizsgált Reynolds-szám és tömegarány kombinációnál ($m^* = 2, 5, 10$ és 20 értékeknél $Re = 180$ esetén, illetve $Re = 100, 180$ és 250 mellett $m^* = 10$ -nél). Az \hat{x}_0 dimenziótlan rezgési amplitúdó az U^* redukált sebesség függvényében növekvő tendenciát mutat csúcsertékének eléréséig, majd pedig monoton módon csökken. Az f_x^* dimenziótlan rezgési frekvencia változása ellentétes \hat{x}_0 változásával: f_x^* kezdetben csökken, majd minimum pontjának elérése után monoton növekvő jelleget mutat. A dimenziótlan rezgési frekvencia minden vizsgált esetben kisebb, mint az álló hengernél lévő Strouhalszám kétszerese. Ezen eredmény összhangban van a szakirodalomban található, kényszerrezgés esetén kapott eredményekkel.
- (b) Adott (Re, m^*) paraméter-kombinációnál \hat{x}_0 maximuma és f_x^* minimuma közel azonos U^* értéknél jelenik meg. A tömegarány $m^* = 2$ -ről 20 -ra történő növelésével ugyan az amplitúdócsúcs és a frekvenciaminimum helye a nagyobb U^* értékek irányába tolódik el ($U^* = 2,17$ -ről $2,61$ -ra), \hat{x}_0 csúcsertéke valamint f_x^* minimuma függetlennek bizonyul m^* változásától. Ezzel szemben, amennyiben a Reynolds-számot $Re = 100$ -ról 250 -re növeljük, az amplitúdócsúcsot és a frekvenciaminimumot reprezentáló redukált sebesség érték $U^* = 2,9$ -ről $2,47$ -re csökken. A különböző tömegarányoknál kapott eredményekkel szemben, Re változtatásával \hat{x}_0 csúcsertéke nő; $Re = 100, 180$, és 250 esetén a maximális rezgési amplitúdó rendre $0,22\%$ -a, $1,1\%$ -a, illetve $2,3\%$ -a a hengerátmérőnek.
- (c) A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy az azonosított gerjesztési tartomány megfelel a nagy Reynolds-számú áramlások esetén megfigyelt második ágának, ugyanis minden vizsgált esetben alternáló örvényleválás mutatkozik.

Kapcsolódó publikációk: Dorogi et al. [C9], Dorogi et al. [C10] és Konstantinidis et al. [C12]

4. TÉZIS

Feltételezve, hogy a henger x_0 hosszirányú elmozdulása és a C_x hosszirányú erőtenyező az idő periodikus függvénye, az alábbi összefüggés adódik C_x amplitúdójára vonatkozóan:

$$\hat{C}_x = \frac{2\pi^3 m^* \hat{x}_0}{U^{*2}} \sqrt{(1 - f_x^{*2} U^{*2})^2 + 4\zeta^2 f_x^{*2} U^{*2}},$$

ahol m^* és ζ a tömegarány és a dimenziótlan csillapítási tényező, \hat{x}_0 és f_x^* a dimenziótlan rezgési amplitúdó és frekvencia, illetve U^* a redukált sebesség. A fenti összefüggésbe $\zeta = 0$ -t helyettesítve látható, hogy $\hat{C}_x = 0$ ott, ahol a rezgési frekvencia megegyezik a henger sajátfrekvenciájával, vagyis $f_x^* U^* = 1$ esetén. Ezen analitikus eredményt CFD szimulációk segítségével támasztottam alá, ahol a henger kizárólag hosszirányú szabadrezgésre volt képes. Az $m^* = 2, 5, 10$ és 20 , illetve állandó $Re = 180$ paraméterek esetén kapott számítási eredmények alapján elmondható, hogy az $U^* \cong 2,625$ helyen $\hat{C}_x \rightarrow 0$. A hosszirányú erőtenyező erőteljes nemharmonikus viselkedést mutat az $U^* = 2,625$ pont környezetében, mivel e helyen \hat{x}_0 nemzérus értékű. A $\hat{C}_x \rightarrow 0$ pont előtt $-C_x$ frekvenciaspektrumában – megjelenik a henger rezgési frekvenciájának kétszerese, vagyis a második harmonikus komponens. Azon U^* helyen, ahol a rezgési frekvencia közel esik a rendszer sajátfrekvenciájához, a második harmonikus komponens válik dominánssá.

Csillapítatlan szabadrezgések esetén az x_0 és C_x közti fázisszög 0° és 180° között hirtelen ugrásszerűen változik ott, ahol $\hat{C}_x \rightarrow 0$. Emellett a keresztirányú erőtenyezőnek a henger elmozdulásához viszonyított fázisszöge fokozatos (nem ugrásszerű) növekedést mutat megközelítőleg 20° és 110° között. E fázisszög fokozatos változása az örvényleválás időpontjának a maximális hengerhelyezethez képesti eltolódásával van szoros összefüggésben, amelyet a pillanatnyi örvénykontúrok segítségével támasztottam alá.

Kapcsolódó publikációk: Dorogi et al. [C9], Dorogi et al. [C10] és Konstantinidis et al. [C12]

5. TÉZIS

Az felsőágat (vagyis a háromágú rezgésképet) ez idáig kizárólag nagy Reynolds-számú áramlások ($Re = 10^3$ – 10^4) esetén azonosították. Kétdimenziós CFD számítások segítségével kimutattam, hogy egy körhenger örvényleválás által keltett keresztirányú szabadrezgésénél $Re = 300$ Reynolds-szám, $m^* = 10$ tömegarány és $\zeta = 0\%$ dimenziótlan csillapítási tényező esetén a rezgéskép háromágú viselkedést mutat. Az alapág a $3,45 < U^* \leq 4$ tartományon belül, a felsőág az $U^* = 4$ és $4,89$ értékek között, illetve az alsóág a $4,89 < U^* \leq 5,9$ intervallumon belül jelenik meg. Az örvényerő-tényezőnek

és a keresztirányú erőtenyezőnek a henger elmozdulásához viszonyított idő-átlagolt fázisszöge 0° és 180° között fokozatosan növekszik rendre a felsőág alapággal és alsóággal szomszédos határán. Az időben változó fázisszögekben tapasztalt rendhagyó változások (fáziscsúszások illetve határ nélküli növekedés és csökkenés) megmagyarázzák az időátlagolt fázisszögekben megjelenő fokozatos (nem ugrásszerű) növekedést.

A dimenziótlan csillapítási tényező növelésével a kezdeti háromágú rezgés-kép kétágú rezgésképpé alakul. Ezen eredmény hasonlóságot mutat a szakirodalomban nagy Reynolds-számú áramlások esetén rendelkezésre álló kísérleti eredményekkel. A $\zeta \leq 1\%$ intervallumon megjelenik a felsőág, amelynek ΔU_{UB}^* szélessége ζ növelésével csökken (például $\Delta U_{UB}^* = 0,88$ $\zeta = 0\%$ esetén, míg a $\zeta = 1\%$ esetén csupán $\Delta U_{UB}^* = 0,31$). A $\zeta = 3\%$ és 5% értéknél a felsőág teljesen eltűnik, csak az alapág és az alsóág marad meg.

Kapcsolódó publikációk: Dorogi és Baranyi [J4], Dorogi és Baranyi [C7], Dorogi és Baranyi [C8] és Dorogi et al. [C11]

6. TÉZIS

Egy körhenger örvényleválás által keltett keresztirányú rezgésének $(\text{Re}, m^*, \zeta) = (300, 10, 0\%)$ paraméter-kombinációnál végzett vizsgálatokor azonosítottam a felsőágot.

- (a) A felsőág végén ($U^* = 4,7$ és $4,89$ értékek között) a C_y keresztirányú erőtenyezőnek a henger y_0 elmozdulásához viszonyított időben változó fázisszöge közel lineárisan növekszik. Ez a hatást szoros kapcsolatban van a rezgőmozgás f_y^* frekvenciája és a keresztirányú erőtenyező $f_{C_y}^*$ frekvenciája közti nagy elhangolódással. Az $U^* = 4,7$ – $4,89$ tartományon belül $f_y^* - f_{C_y}^* \cong -0,2$, amely abszolút értékben közel esik az $\text{Re} = 300$ esetén érvényes St Strouhal számhoz. Mivel $f_y^* \cong \text{St}$ az $U^* = 4,7$ és $4,89$ között, így $f_y^* - f_{C_y}^* \cong -\text{St}$ csak akkor érhető el, ha $f_{C_y}^* = 2f_y^* \cong 2\text{St}$. E jelenség közvetlenül FFT frekvenciaanalízis segítségével látható; C_y spektrumában a $4,7 < U^* \leq 4,89$ tartományon belül a második harmonikus komponens a legdominánsabb frekvenciacsúcs $\zeta = 0\%$ esetén.
- (b) A $\zeta = 0,5\%$ dimenziótlan csillapítási tényezőnél $f_y^* - f_{C_y}^* = 0$ a teljes vizsgált U^* tartományon, tehát a keresztirányú erőtenyező és a henger elmozdulása közti fázisszög közel állandó (nem mutat lineáris növekedést) a felsőág végén. Ebből következik, hogy a keresztirányú erőtenyezőben lévő második harmonikus komponens szerepe ζ növelésével csökken. C_y frekvenciaanalízise kimutatta, hogy a második harmonikus komponens intenzitása elenyésző $\zeta = 0,5\%$ esetén még a felsőág alsóággal szomszédos határvonalán is.
- (c) A $\zeta = 0$ – 5% esetén kapott CFD számítások eredményeit összehasonlítva a harmonikus rezgési modell eredményeivel kimutatható, hogy a számításokból és a modelltől származó eredmények jól egyeznek a felsőág elején, illetve az alsóágon. Ugyanakkor a felsőág végén lévő értékek

nagymértékben eltérnek a modell eredményeitől. E tapasztalat megerősíti azt a korábbi állításumat, hogy a keresztirányú erőtenyező a felsőág végén nemharmonikus viselkedést mutat.

Kapcsolódó publikációk: Dorogi és Baranyi [J4], Dorogi és Baranyi [C7], Dorogi és Baranyi [C8] és Dorogi et al. [C11]

6. Az eredmények alkalmazhatósága

Manapság a magas karcsú épületek, a toronyépületek, a silók, a hidak illetve a tengeri alapszerkezetek tervezésének elengedhetetlen lépése az alapos aerodinamikai vizsgálat. Ezen kívül a tompa testek körüli folyadékáramlás fontos szerepet játszik a hőcserélőknél, a távvezetékknél, a mélytengeri csővezetékknél, vagy akár a hajók árbocainál. Felvetődhet mint probléma, hogy ezekenél az alkalmazásoknál a Reynolds-szám elérheti a több ezres értéket is, amely sokkal nagyobb, mint a jelen disszertációban vizsgált Re értékek. Ugyanakkor a szakirodalomban korábban már bemutatták, hogy a Reynolds-szám nem befolyásolja túlságosan nagymértékben a kialakuló áramlást; a kis Reynolds-számú áramlásoknál végzett szimulációk egész jól képesek megbecsülni a nagy Re esetén lévő jelenségeket.

Úgy vélem, hogy a jelen disszertációban közölt eredmények tudományos szempontból hasznosak. Az egyszabadságfokú szabadrezgéseknél végzett vizsgálatok kimutatták, hogy az áramlás által gerjesztett hosszirányú szabadrezgések, illetve a keresztirányú szabadrezgések témakörében tárgyalt felsőág létrejöhet kis Reynolds-számú áramlások esetén is. Ezeket a korábbi numerikus áramlástan vizsgálatok még nem mutatták ki. Az eredmények más típusú analízisével akár további következtetéseket vonhatunk le az örvényleválás által keltett rezgések megjelenési körülményeire vonatkozóan.

Pillanatnyilag a folyadék-test kölcsönhatások tématerületén egy új oktatási anyag létrehozásán gondolkozom, amelybe akár a jelen disszertációban bemutatott eredmények/vizsgálati módszerek is beépíthetők lesznek.

7. Jövőbeli tervek

Doktori kutatásaim során az örvényleválás által gerjesztett egy- illetve kétszabadságfokú rezgőmozgásokra vonatkozóan számos vizsgálatot végeztem. Azonban e tárgykörökben továbbra is sok megválaszolatlan kérdés van, amelyekhez további vizsgálatok szükségesek. A kutatásaimhoz szorosan kapcsolódó lehetséges témaköröket az alábbi pontokban ismertetem:

- Az **1.** és **2. tézis** a kétszabadságfokú szabadrezgéseknél született új tudományos eredményeket foglalja össze, ahol a henger f_{Nx} és f_{Ny} hossz- és keresztirányú sajátfrekvenciáját azonosnak tekintettem. Felmerülhet a kérdés, hogy mi az $FR = f_{Nx}/f_{Ny}$ sajátfrekvencia-hányados rezgésképre gyakorolt hatása. Erre vonatkozóan már a Dorogi és Baranyi [J3] tanulmányban végeztünk számításokat. Az eredmények azt mutatják, hogy

FR változtatása jelentős mértékben befolyásolja a pályagörbe alakját. Ezen hatások részletes vizsgálata további számításokat igényel.

- **A 3. és 4. tézisben** kimondom, hogy kis Reynolds-számú áramlásoknál egyetlen gerjesztési tartomány jelentkezik egy körhenger örvényleválás által keltett hosszirányú szabadrezgése esetén. Ugyanakkor nagy Reynolds-számok mellett két gerjesztési tartományt azonosítottak. Ahhoz, hogy megvizsgáljuk az egy- és kétágú rezgéseképek közti átmenetet, háromdimenziós számítások szükségesek.
- **Az 5. és 6. tézisben** megállapítom, hogy a felsőág megjelenik az $Re = 300$ -as Reynolds-számnál. Ugyanakkor a szakirodalomban kisebb Re esetén (például $Re = 100$ -nál) kétágú válaszjelenséget azonosítottak, ahol kizárólag az alap- és alsóág jelent meg. Célul tűztem ki további szisztematikus számítások elvégzését különböző Reynolds-számok esetén az $Re = 50$ – 300 tartományban ahhoz, hogy megtaláljam azt az Re_c kritikus Reynolds-szám értéket, amely felett háromágú rezgéskép, alatta pedig kétágú rezgéskép jelenik meg.

A jelenleg vizsgált kutatási téma releváns szakirodalmának áttekintése során észrevettem, hogy egy oszcilláló folyadékáramlásba helyezett körhenger-ről leváló örvények által gerjesztett rezgőmozgások vizsgálata kis figyelmet kapott. Azonban e jelenség számos mérnöki területen nagy jelentőséggel bír, például a hullámmozgások modellezése is hasonló módszerekkel történik. Tudomásom szerint nagyon kevés tanulmány foglalkozik e folyamatok numerikus vizsgálatával. Ebből következően a közeljövőben szisztematikus számításokat tervezek e tématerületen.

Az értekezés témájához kapcsolódó közlemények

Folyóiratcikkek

- [J1] Dorogi, D. és Baranyi, L., 2018. Numerical simulation of a freely vibrating circular cylinder with different natural frequencies. *Ocean Engineering* **158**, 196–207. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.03.079.
- [J2] Dorogi, D. és Baranyi, L., 2019. Occurrence of orbital cylinder motion for flow around freely vibrating circular cylinder in uniform stream. *Journal of Fluids and Structures* **87**, 228–246. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2019.03.004.
- [J3] Dorogi, D. és Baranyi, L., 2019. Sajátfrekvencia-hányados hatása a szabadrezgést végző körhenger körüli folyadékáramlásra. *Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok* **14**(1), 19–27.
- [J4] Dorogi, D. és Baranyi, L., Identification of upper branch for vortex-induced vibration of a circular cylinder at $Re=300$. *Submitted to Journal of Fluids and Structures*.
- [J5] Konstantinidis, E., Dorogi, D. és Baranyi, L., Resonance in vortex-induced in-line vibration at low Reynolds numbers. *Submitted to Journal of Fluid Mechanics*.

Konferencia cikkek

- [C1] Dorogi, D. és Baranyi, L., 2016. Effect of gradual amplitude increase on flow around a cylinder oscillated in line. In: *Proceedings of the 4th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2016)*. Debrecen, Hungary, pp. 151–156.
- [C2] Dorogi, D. és Baranyi, L., 2017. Elastically supported cylinder in two-degree-of-freedom motion: a numerical study. In: *Proceedings of the MultiScience – XX-XI, microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference (microCAD)*. Miskolc, Hungary, pp. 93–100.
- [C3] Dorogi, D. és Baranyi, L., 2017. Numerical simulation of flow and heat transfer for a cylinder in free vibration. In: *Proceedings of the MultiScience – XXXI, microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference (microCAD)*. Miskolc, Hungary, pp. 101–108.
- [C4] Dorogi, D. és Baranyi, L., 2018. Effect of streamwise and transverse damping on flow around an elastically supported cylinder. In: *Proceedings of the Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'18)*. Budapest, Paper number: 21, pp. 1–8.
- [C5] Dorogi, D. és Baranyi, L., 2018. Natural frequency effect on the path of an elastically supported circular cylinder. In: *Proceedings of the Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'18)*. Budapest, Paper number: 89, pp. 1–8.
- [C6] Dorogi, D. és Baranyi, L., 2018. Numerical investigation of the path of a freely vibrating circular cylinder at high reduced frequency value. In: *Proceedings of the 7th Conference on Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibrations (BBVIV7)*. Carry-le-Rouet, France, pp. 121–124.
- [C7] Dorogi, D. és Baranyi, L., 2019. Investigation of the branching behavior of a freely vibrating circular cylinder at low Reynolds numbers. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Multi-scale Computational Methods for Solids and Fluids (ECCOMAS MSF 2019)*. Sarajevo, Bosnia-Herzegovina, pp. 108–111.
- [C8] Dorogi, D. és Baranyi, L., 2019. Szabadrezgést végző körhenger körüli áramlás numerikus vizsgálata: a csillapítási tényező hatása. In: *Proceedings of the 27th International Conference on Mechanical Engineering (OGÉT2019)*. Oradea, Romania, pp. 99–102.
- [C9] Dorogi, D., Baranyi, L. és Konstantinidis, E., 2019. Effect of mass ratio on in-line vortex induced vibrations at a low Reynolds number. In: *Proceedings of the Flow-Structure Sound Interactions and Control (FSSIC2019)*. Chania, Crete Island, Greece, Paper number: 90, pp. 1–5.

- [C10] Dorogi, D., Konstantinidis, E. és Baranyi, L., 2019. Numerical investigation of streamwise vortex-induced vibration at low Reynolds numbers: mass ratio effects. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Multi-scale Computational Methods for Solids and Fluids (ECCOMAS MSF 2019)*. Sarajevo, Bosnia-Herzegovina, pp. 112–115.
- [C11] Dorogi, D., Baranyi, L. és Konstantinidis, E., Effect of damping ratio on the existence of upper branch in vortex induced vibrations at low Reynolds number. In: *Accepted for publication in the Proceedings of the 12th International Conference on Flow-Induced Vibration*. Paris-Saclay.
- [C12] Konstantinidis, E., Dorogi, D. és Baranyi, L., Aspects of vortex-induced in-line vibration at low Reynolds numbers. In: *Accepted for publication in the Proceedings of the 12th International Conference on Flow-Induced Vibration*. Paris-Saclay.

Irodalomjegyzék

- [1] Bearman, P., 1984. Vortex shedding from oscillating bluff bodies. *Annual Review of Fluid Mechanics* **16**, 195–222. DOI: 10.1146/annurev.fl.16.010184.001211.
- [2] Khalak, A. és Williamson, C., 1999. Motions, forces and mode transitions in vortex-induced vibrations at low mass-damping. *Journal of Fluids and Structures* **13**(7-8), 813–851. DOI: 10.1006/jfls.1999.0236.
- [3] Sarpkaya, T., 2004. A critical review of the intrinsic nature of the vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures* **19**(4), 389–447. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2004.02.005.
- [4] Williamson, C. és Govardhan, R., 2004. Vortex-induced vibration. *Annual Review of Fluid Mechanics* **36**, 413–455. DOI: 10.1146/annurev.fluid.36.050802.122128.
- [5] Soti, A., Zhao, J., Thompson, M., Sheridan, J. és Bhardwaj, R., 2018. Damping effects on vortex-induced vibration of a circular cylinder and implications for power extraction. *Journal of Fluids and Structures* **81**, 289–308. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2018.04.013.
- [6] Barkley, D. és Henderson, R., 1996. Three dimensional Floquet stability analysis of the wake of a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics* **322**, 215–241. DOI: 10.1017/S0022112096002777.
- [7] Willden, R. és Graham, J., 2006. Three distinct response regimes for transverse vortex-induced vibrations of circular cylinders at low Reynolds numbers. *Journal of Fluids and Structures* **22**(6-7), 885–895. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2006.04.005.
- [8] Bahmani, M. és Akbari, H., 2010. Effects of mass and damping ratios on VIV of a circular cylinder. *Ocean Engineering* **37**, 511–519. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2010.01.004.
- [9] Leontini, J., Thompson, M. és Hourigan, K., 2006. The beginning of branching behavior of vortex-induced vibration during two-dimensional flow. *Journal of Fluids and Structures* **22**(6-7), 857–864. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2006.04.003.
- [10] Navrose és Mittal, S., 2017. A new regime of multiple states in free vibration of a cylinder at low Re. *Journal of Fluids and Structures* **68**, 310–321. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2016.11.003.
- [11] Evangelinos, C. és Karniadakis, G. E., 1999. Dynamics and flow structures in the turbulent wake of rigid and flexible cylinders subject to vortex-induced vibrations. *Journal of Fluid Mechanics* **400**, 91–124. DOI: 10.1017/S0022112099006606.
- [12] Singh, S. és Mittal, S., 2005. Vortex-induced oscillations at low Reynolds numbers: hysteresis and vortex-shedding modes. *Journal of Fluids and Structures* **20**(8), 1085–1104. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2005.05.011.
- [13] King, R., 1977. A review of vortex shedding research and its application. *Ocean Engineering* **4**(3), 141–171. DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(77\)90002-6](https://doi.org/10.1016/0029-8018(77)90002-6).
- [14] Aguirre, J. Flow-induced in-line vibrations of a circular cylinder. PhD dissertation. Imperial College of Science és Technology, 1977.
- [15] Gurian, T., Currier, T. és Modarres-Sadeghi, Y., 2019. Flow force measurements and the wake transition in purely inline vortex-induced vibration of a circular cylinder. *Physical Review Fluids* **4**(3), 034701 (17 pages). DOI: 10.1103/PhysRevFluids.4.034701.
- [16] Tanida, Y., Okajima, A. és Watanabe, Y., 1973. Stability of a circular cylinder oscillating in uniform flow or in a wake. *Journal of Fluid Mechanics* **61**(4), 769–784. DOI: 10.1017/S0022112073000935.
- [17] Konstantinidis, E. és Bouris, D., 2017. Drag and inertia coefficients for a circular cylinder in steady plus low-amplitude oscillatory flows. *Applied Ocean Research* **65**, 219–228. DOI: 10.1016/j.apor.2017.04.010.

- [18] Kim, K.-H. és Choi, J.-I., 2019. Lock-in regions of laminar flows over a streamwise oscillating circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics* **858**, 315–351. doi: 10.1017/jfm.2018.787.
- [19] Moe, G. és Wu, Z.-J., 1990. The lift force on a cylinder vibrating in a current. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* **112**(4), 297–303. doi: 10.1115/1.2919870.
- [20] Sarpkaya, T., 1995. Hydrodynamic damping, flow-induced oscillations, and biharmonic response. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* **117**(4), 232–238. doi: 10.1115/1.2827228.
- [21] Jauvtis, N. és Williamson, C. H. K., 2004. The effect of two degrees of freedom on vortex-induced vibration at low mass and damping. *Journal of Fluid Mechanics* **509**, 23–62. doi: 10.1017/S0022112004008778.
- [22] Prasanth, T. és Mittal, S., 2008. Vortex-induced vibrations of a circular cylinder at low Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics* **594**, 463–491. doi: 10.1017/S0022112007009202.
- [23] Mittal, S. és Singh, S., 2005. Vortex-induced vibrations at subcritical Re. *Journal of Fluid Mechanics* **534**, 185–194. doi: 10.1017/S0022112005004635.
- [24] Kang, S., 2006. Uniform-shear flow over a circular cylinder at low Reynolds numbers. *Journal of Fluids and Structures* **22**, 541–555. doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2006.02.003.
- [25] Kheirkhah, S., Yarusevych, S. és Narasimhan, S., 2012. Orbiting response in vortex-induced vibrations of a two-degree-of-freedom pivoted circular cylinder. *Journal of Fluids and Structures* **28**, 343–358. doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2011.08.014.
- [26] Gsell, S., Bourguet, R. és Braza, M., 2017. Vortex-induced vibrations of a cylinder in planar shear flow. *Journal of Fluid Mechanics* **825**, 353–384. doi: 10.1017/jfm.2017.386.
- [27] Baranyi, L., 2008. Numerical simulation of flow around an orbiting cylinder at different ellipticity values. *Journal of Fluids and Structures* **24**(6), 883–906. doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2007.12.006.
- [28] Bourguet, R. és Lo Jacono, D., 2014. Flow-induced vibrations of a rotating cylinder. *Journal of Fluid Mechanics* **740**, 342–380. doi: 10.1017/jfm.2013.665.
- [29] Bourguet, R. és Lo Jacono, D., 2015. In-line flow-induced vibrations of a rotating cylinder. *Journal of Fluid Mechanics* **781**, 127–165. doi: 10.1017/jfm.2015.477.
- [30] He, T. és Zhang, K., 2017. An overview of the combined interface boundary condition method for fluid-structure interaction. *Archives of Computational Methods in Engineering* **24**(4), 891–934. doi: 10.1007/s11831-016-9193-0.
- [31] Bao, Y., Huang, C., Zhou, D., Tu, J. és Han, Z., 2012. Two-degree-of-freedom flow-induced vibrations on isolated and tandem cylinders with varying natural frequency ratios. *Journal of Fluids and Structures* **35**, 50–75. doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2012.08.002.