

A KUTATÁSI TÉMA SZAKMAI ZÁRÓJELENTÉSE

Témavezető: **Dr. Baranyi László egyetemi tanár**

A téma címe: **Párhuzamos áramlásba helyezett gyorsuló mozgást végző körhenger körüli kis Reynolds számú áramlások elméleti és numerikus vizsgálata**

A téma nyilvántartási száma: **K 76085**

A kutatás időtartama: **2009.01.01-2012.12.31.**

A témavezető kérésére 2013. december 31-ig meghosszabbítva

1. BEVEZETÉS, KUTATÁSI HÁTTÉR

A nem áramvonalas, ún. tompa testekről leváló örvények egy időben periodikusan változó gerjesztést adnak a testnek. Amennyiben a rendszer csillapítása kicsi és az örvényleválás frekvenciája közel esik a rendszer sajátfrekvenciájához, akkor nagy amplitúdójú rezgések jöhetnek létre, amelyek a szerkezet meghibásodásához vezethetnek. A rezgési amplitúdó egy kritikus értéke fölött az örvényleválás frekvenciája szinkronizálódik, egybeesik a szerkezet rezgési frekvenciájával. Ezt a jelenséget a szakirodalomban 'lock-in'-nek nevezik. A szélnek kitett szerkezetekről periodikusan leváló örvények romboló hatásának egyik klasszikussá vált példája a Tacoma Narrows nevű függőhíd összeomlása 1940-ben az USA-ban. A folyadékáramlásba helyezett műanyag hőmérőtokokról leváló örvények által keltett periodikus terhelés vezetett az egyik tok kifáradásához és megrepedéséhez a japán Monju atomerőműben 1995-ben. E meghibásodás miatt nagy mennyiségű primer hűtőközeg került ki a rendszerből és az atomerőművet le kellett állítani és tudomásom szerint csak 2010-ben indították újra és rövid működés után ismét leállították. A szerkezetek örvényleválás által keltett rezgése sok más esetben is problémát okozhat, például kéményeknél, silóknál, magas karcsú épületeknél, stb. Ez a jelenség okozza a hőcserélőkben lévő csövek rezgését és így a hőcserélők zajos üzemét is. A nem áramvonalas testek körüli áramlás valamint a szerkezet kölcsönhatást még ma sem ismerjük tökéletesen, így jelenleg is kutatók ezrei foglalkoznak e téma elméleti, numerikus és kísérleti vizsgálatával.

Amennyiben a folyadékáramlásba helyezett rugalmasan megtámasztott tompa testekről leváló örvények frekvenciája közel esik a rugalmas rendszer sajátfrekvenciájához és a csillapítás kicsi, akkor a örvényleválás által keltett periodikus gerjesztő erő mind az áramlás irányában, mind arra merőleges irányban okozhat rezgőmozgást. E két szabadságfokú mozgás jellemzője az, hogy rezgési amplitúdó kritikus értékei fölött a szerkezet rezgési frekvenciája megegyezik az örvényleválás frekvenciájával (lock-in). Pontosabban, az áramlásra merőleges irányú rezgés frekvenciája megegyezik az örvényleválás frekvenciájával, míg az áramlás irányú rezgés frekvenciája a tapasztalat szerint vagy azonos az örvényleválás frekvenciájával, vagy annak a kétszerese. Gyakran a rezgés az egyik irányban elhanyagolható mértékű; így juthatunk el az egy szabadságfokú modellekhez; a kereszt- valamint a hosszirányú rezgések eseteihez. A kutatók többsége ezek közül a gyakorlatban gyakrabban előforduló keresztirányú rezgéssel foglalkozik (ez indította el azt a jelenséget, amely a Tacoma Narrows függőhíd katasztrófájához vezetett); például Williamson és Roshko (1988); Lu és Dalton (1996); Blackburn és Henderson (1999); Leontini et al. (2006a,b). (Megjegyzés: a beszámolóban az "és szerzőtársai" helyett a rövidebb latin "et al." kifejezést fogjuk használni.) Kisebb figyelmet kapott a főáramlásba helyezett, az áramlás irányában rezgő tompa test körüli áramlás (például Okajima et al., 2004; Al-Mdallal et al., 2007; Mureithi et al., 2010) pedig gyakorlati szempontból ez az eset is fontos; ez vezetett például a japán Monju atomerőmű meghibásodásához és bezárásához (Nishihara et al., 2005).

Egyes kutatók (mind az egy, mind a két szabadságfokú esetben) az áramlásba helyezett rugalmasan felfüggesztett henger és áramlás kölcsönhatását vizsgálják kísérletileg vagy numerikusan (például Jauvtis és Williamson, 2004; Sanchis et al., 2008; Prasanth és Mittal (2009); Kheirkhah et al., 2012). A numerikus

vizsgálat során ilyenkor az áramlás alapegyenletein túl a hengerre felírt mozgásegyenletet is minden egyes időlépésben megoldják.

Egy másik elterjedt megközelítési mód mind kísérleti, mind numerikus eljárások esetén az, hogy az áramlásba helyezett testet mechanikusan mozgatják (előírt pálya követésére kényszerítik; kényszermozgás). Ebben az esetben is elérhető az áramlás és a test mozgásának szinkronizálódása (lock-in). kölcsönhatása. Williamson és Govardhan (2004) felvetik a kérdést, hogy mennyire lehet a mechanikusan mozgatott hengerre nyert eredményeket a rugalmasan felfüggesztett henger esetére alkalmazni. Másrészt viszont az ugyanettől a szerzőtől származó, általánosan elfogadott és sokat idézett keresztirányú hengermozgásra vonatkozó örvényleválási mód térkép (Williamson és Roshko, 1988) is párhuzamos áramlásba helyezett, mechanikusan mozgatott henger körüli áramlás kísérleti vizsgálata alapján készült. Más kutatók viszont igen hasznosnak tartják a kényszermozgatással nyert eredmények felhasználását arra, hogy megbecsüljék azt a paraméter-tartományt, ahol az örvényleválás keltette rezgés (vortex-induced vibration, VIV) kialakulhat (például Leontini et al., 2006a). A Leontini et al., 2006b numerikus tanulmányban a szerzők meghatározták az áramlásba helyezett, kényszerpályán mozgatott henger szinkronizálódásához szükséges amplitúdók küszöbértékeit, majd kiszámították a rugalmasan megtámasztott henger esetén a rezgési amplitúdókat. Az eredményeket összehasonlítva azt találták, hogy a rugalmas megtámasztás esetén nyert rezgési amplitúdók beleesnek az amplitúdó küszöbértékek által meghatározott tartományba, amely azt mutatja, hogy a mechanikusan mozgatott hengerre vonatkozó eredmények felhasználhatók a rugalmasan megtámasztott henger esetén az örvényleválás keltette rezgés előrejelzésére.

Párhuzamos áramlásba helyezett álló körhenger esetén Barkley és Henderson (1996) Floquet analízis segítségével bebizonyította, hogy $Re=188,5 \pm 1$ (Mode A) és $Re=259$ (Mode B) Reynolds számoknál háromdimenziós (3D) instabilitások jelennek meg az áramlásban, így igazából álló henger esetén $Re>190$ esetén a kétdimenziós (2D) numerikus eljárásokat nem szabad használni. Itt a Reynolds szám az $Re=Ud/v$, ahol U a főáramlás sebessége, d a henger átmérője és v a folyadék kinematikai viszkozitása. Rezgőmozgást végző henger esetén viszont mind a kísérleti (például Bearman és Obasaju, 1982), mind a numerikus eredmények azt mutatják (például Poncet, 2002), hogy a henger és az áramlás közötti szinkronizálódás növeli a jelek korrelációját a henger hossz tengelye irányában, és így magasabb Re értékig marad 2D-s az áramlás, mint álló henger körüli áramlás esetén. (Poncet, 2002) numerikus vizsgálat alapján bemutatta, hogy egy álló körhenger körüli 3D áramlás 2D-sá tehető, ha szinkronizálódott áramlást eredményező forgó oszcilláló mozgást biztosít a hengernek. Eddig, tudomásunk szerint, a szakirodalomban nem található egy olyan kritikus Re érték, amelynél párhuzamos áramlásba helyezett rezgő henger esetében 3D-sá válna az áramlás. Ez érthető is, hiszen még egy egy szabadságfokú mozgás esetén is megjelenik két új paraméter (rezgési amplitúdó és frekvencia). Lu és Dalton (1996) ill. Blackburn és Henderson (1999) a főáramlásra merőleges irányban mechanikusan mozgatott körhenger esetén 2D numerikus eljárást használtak $Re=1000$ ill. 500 esetén, de a jelen szerzők véleménye szerint $Re=1000$ esetén már biztosan 3D-s az áramlás. A kisebb számítási időt igénylő kis Reynolds számú 2D-s modellekkel is információt nyerhetünk a nagyobb Reynolds számú esetekre vonatkozóan is, mert tanulmányok kimutatták, hogy az áramlásba helyezett testek és az áramlás kölcsönhatását (Fluid-structure interaction, FSI) jellemző jelenségek csak kis mértékben függenek a Reynolds számtól. (például Newman és Karniadakis, 1995). Ugyan a valóságos FSI problémáknál az esetek többségénél az áramlás a turbulens tartományba esik (kivételem például a hődrótos anemométer drótszála körüli áramlás), a numerikus tanulmányok túlnyomó többségénél nem használnak turbulencia modellt, hanem a mozgás- és kontinuitási egyenletek közvetlen megoldásán alapuló nagy számításigényű direkt numerikus szimulációt (DNS, Direct Numerical Simulation) használják. Teszik mindezt annak ellenére is, hogy a DNS óriási számításigénye mellett további jellemzői, hogy a számítógépek mai teljesítménye és kapacitása mellett csak egyszerű geometriák és erősen korlátozott Reynolds számú feladatok megoldására alkalmas.

A vizsgálataink során mechanikusan mozgatjuk az áramlásba helyezett körhengert és vizsgálatainkat azokra az esetekre korlátozzuk, amikor kialakul a hengermozgás és az áramlás szinkronizálódása. A szakirodalomban nem találtunk szisztematikus vizsgálatot arra vonatkozóan, hogy hogyan változnak az áramlásba helyezett körhenger és az áramlás kölcsönhatásából származó erők, a nyomaték és az

energiacsere dimenziótlan alakjai (C_L felhajtóerő-tényező, C_D ellenállás-tényező, C_{pb} hátsó nyomástényező, t_q nyomatóktényező és E energiacsere) a rezgési amplitúdó vagy az f/St_0 frekvenciahányados (f a rezgés dimenziótlan frekvenciája, St_0 vagy Strouhal szám az adott Reynolds számnál az álló hengerről leváló örvények dimenziótlan frekvenciája) függvényében. Ezért ebben a kutatási projektben célul tűztük ki ezek vizsgálatát mind az egy, mind a két szabadságfokú mozgást végző henger esetén. Mivel a 3D-s vizsgálat gépideje (parallel számítások nélkül) még mindig túl hosszú, ezeket a vizsgálatokat 2D-s eljárások alkalmazásával végeztük. Végeztünk 3D-s számításokat is mind álló, mind rezgőmozgást végző hengerekre és az eredményeket összehasonlítottuk a 2D-s számítások eredményeivel.

A témavezetőnek két éves Japánbeli tartózkodása (1995-1997) során lehetősége nyílt, hogy a jelen pályázati anyag témájának elméleti, kísérleti és számítástechnikai alapjait megismerje. A témavezető az 1999-2002. időszakra OTKA támogatást nyert a rúd- és kötél szerkezetek körüli periodikus áramlási jelenségek számítására. Hasonló témában a témavezető újabb OTKA támogatást nyert egy újabb 4 éves periódusra (2003-2006), így lehetőség nyílt a szakterület mély ismeretének elsajátítására, művelésére. A jelenlegi OTKA pályázatban mindössze 3 kutató vett részt, akik közül az egyik egy mester szakos hallgató volt, aki már másfél éve PhD hallgató Németországban. A másik kutató egy tanársegéd, akinek az OTKA témavezető egyben doktori témavezetője is volt. Ő a hosszabbítás évében (2013) főleg az OTKA pályázat témakörébe illő PhD értekezése befejezésével foglalkozott, amelyet 2013-ban sikeresen meg is védett. Ő is már több, mint másfél éve távol van a munkahelyétől (táppénz majd GYES), így azóta a témavezető gyakorlatilag egyedül végzi a kutatómunkát.

Kis eltérés van a munkatervben megfogalmazott célkitűzések és a magvalósult kutatás, ill. annak eredményei között. 1) Kissé túlbecsültük a számítógépes lehetőségeinket, így a 3D-s számításainkat nem tudtuk szisztematikus paraméter hatások vizsgálatára felhasználni. 2) Nagyon komoly erőfeszítéseink ellenére sem sikerült a saját fejlesztésű programhoz sikeresen illeszteni az általunk kifejlesztett, Floquet stabilitásvizsgálatra szolgáló, számítógépes eljárást. 3) Nagyon komoly, új (a munkatervben nem szereplő) eredményeket értünk el a párhuzamos áramlásba helyezett rezgőmozgást végző fűtött körhenger és az áramlás kölcsönhatásán alapuló jellemzők (erőtényezők, hőátadás és mechanikai energiacsere) területén, amelyből 2013-ban a projekt egyik résztvevője megvédte PhD értekezését. 4) Ugyancsak jelentős új eredmények születtek a gyakorlatban előforduló 8-as pályát követő (Lissajous görbe) két szabadságfokú mozgást végző fűtetlen körhenger körüli áramlás vonatkozásában és egyéb területeken is (például a redukált rendű modell kifejlesztése Kármán-féle örvényleválás modellezésére). A következő fejezetben röviden bemutatjuk a kutatás során elért eredményeket hivatkozva a beszámoló végén található, kutatás során megjelent publikációinkra is (az OTKA közlemények jegyzékének sorrendje nem azonos az itteni hivatkozási sorrenddel).

2 A KUTATÓMUNKA EREDMÉNYEI

2.1 Álló henger (2D-s vizsgálat)

Álló hengerre vonatkozó számításokat ebben a periódusban főleg csak összehasonlítási célból végeztünk. Az [5] impakt faktoros folyóiratszövegben álló hengerre vonatkozó mérési és két különböző numerikus eljárással nyert eredményeket vetettük össze fűtetlen henger esetén. A PIV eljárással nyert mérési eredményeket saját számítási és szakirodalmi mérési eredményekkel hasonlítottuk össze. Megkíséreltünk egy olyan effektív hőmérsékletet bevezetni, amely segítségével a különböző felületi hőmérsékletű esetek jellemző görbéi összeessenek a fűtetlen henger görbéivel.

A [13] cikkben a Fluent modell kialakításához a számítási tartomány hatását vizsgáltuk a megoldásra a célból, hogy tartomány-független megoldást tudjunk meghatározni. A Fluent számítás eredményei nagyon jól egyeztek egyrészt a saját, véges differenciák módszerén alapuló kóddal nyert eredményekkel és szakirodalmi értékekkel is. Az időlépés és a hálósűrűség paramétereinek helyes megválasztására irányuló vizsgálatot a [10,38] dolgozatokban mutatjuk be.

A [31, 32] dolgozatokban összehasonlítottuk az időbeli első- (Euler) és másodrendű (Runge-Kutta; RK) és a spektrális elem módszeren alapuló (Posdziech és Grundmann, 2007) diszkretizációs eljárások

alkalmazásával nyert megoldásokat a körhenger körüli áramlás esetére. Ismeretes, hogy a másodrendű megoldás nagyobb időlépés alkalmazásával adja ugyanazt a pontosságot, mint az elsőrendű. A jelen számítási eljárásba beépített szukcesszív felülrelaxálási módszer (SOR) stabilitása viszont kis időlépés alkalmazását kívánja meg, amelynél az Euler és Runge-Kutta módszerek gyakorlatilag egyforma pontosságú megoldást adnak, miközben az RK módszer alkalmazásával a futásidő mintegy 40%-al nagyobb. Így, természetesen, ebben a rendszerben nem érdemes használni azt. Negyedrendű RK módszer esetén ugyanezt tapasztaltuk, de ott a számítási idő sokkal hosszabb volt. Megnyugtató viszont, hogy mivel az összehasonlított három eljárás eredményei nagyon jól egyeztek egymással, így az eredeti programmal korábban végzett számítási eredmények is megbízhatóak. A vizsgálatot csak álló hengerre végeztük el, de feltételezhetően ugyanez igaz mozgó henger esetén is.

Álló hengerre vonatkozóan a [11, 12] cikkek különböző hőmérsékletarányok esetén a Reynolds szám függvényében mutatja a felhajtóerő tényező rms értékeit, a dimenziótlan örvényleválási frekvenciát, St Strouhal számot és a Nusselt számot (dimenziótlan hőátadási tényező), jó egyezést mutatva szakirodalmi eredményekkel. Az effektív hőmérséklet bevezetésével a különböző hőmérsékletarányokhoz tartozó görbéket mindhárom esetben egyetlen görbére redukáljuk. A [27,38] dolgozatokban szisztematikusan azt vizsgáljuk, hogy fűtött henger körüli hőmérsékleteloszlás hogyan befolyásolja az áramló közeg (itt levegő) anyagjellemzőit; mely mennyiségeket tekinthetünk állandónak és melyeket hőmérséklet-függőnek.

2.2 Egy szabadságfokú hengerrezgések (2D-s vizsgálat)

Először megvizsgáltuk, hogy $Re=140, 160$ Reynolds számok, $f/St_0=0,8$ és $0,9$ frekvenciahányadosok mellett hossz- és keresztirányú hengerrezgés esetén hogyan változnak az erőtényezők időátlagai és effektív középértékei (továbbiakban rms értékei) a rezgési amplitúdó függvényében a szinkronizálódási tartományon belül [4]. A jelen és a későbbi vizsgálatok során is C_L és C_D felhajtóerő- és ellenállástényezőknél a tehetetlenségi erőt nem tartalmazó tényezőket vettük alapul (Baranyi, 2005). Azt találtuk, hogy a hosszirányú rezgés esetén a C_L és t_q (nyomatéki tényező) jellemzők hasonlóan viselkednek, mint a hosszirányban terhelt befogott rúd kihajlásból származó oldalirányú kitérése: teljes szimmetria esetén mindkét irányú kitérésnek azonos esélye van. E nemlineáris rendszerben két attraktor van és attól függően, hogy az áramlás paraméter-rendszere melyik attraktor vonzáskörzetébe tartozik, a megoldás az egyikhez vagy a másikhoz vonzódik. A C_L és t_q mennyiségek időátlagaiban így egyes amplitúdó értékeknél ugrásszerű változást találhatunk, ami az örvényszerkezet hirtelen változására utal. Ezt mutatja a változás környezetében elvégzett vizsgálat is (C_L időfüggvénye, (C_D, C_L) határciklus és örvénykontúrok). A C_D és C_{pb} (hátsó nyomástényező) mennyiségek időátlagaiban és egyetlen erőtényező rms értékében sem tapasztalható ez a változás, és ugyanez mondható el a keresztirányban rezgő hengerre vonatkozó összes erőtényezőről is a vizsgált amplitúdó tartományban.

Megvizsgáltuk azt is, hogy mi történik akkor, ha a számítás során kereszt- és hosszirányú rezgésnél időben vagy fokozatosan, vagy hirtelen megváltoztatjuk a rezgési amplitúdót és utána állandó értéken tartjuk azt [1]. Ezzel a módszerrel hosszirányú rezgésnél biztosítható, hogy a megoldás mindig ugyanazon attraktor vonzáskörzetében maradjon mind hirtelen, mind fokozatos amplitúdó változtatásnál, így az ugrásszerű változás elkerülhető. A keresztirányú rezgésnél most sem tapasztaltunk ugrásszerű változást.

Mint ismeretes, a párhuzamos áramlásba helyezett álló henger esetén $Re=47$ alatt stacionárius az áramlás, a fölött pedig a Hopf bifurkáció révén kialakul egy periodikus örvényleválás. A [2] dolgozatban azt találtuk, hogy $Re=47$ alatt keresztirányú rezgés esetén sokkal kisebb amplitúdó és Reynolds szám esetén elérhetünk periodikus örvényleválást, mint hosszirányú rezgésnél. E témából a témavezető a Magdeburgi Egyetemen szemináriumi előadást is tartott ([3]).

A [7] dolgozatban kimutattuk, hogy amennyiben egy hosszirányban rezgő henger körüli szinkronizálódott áramlást egy kis keresztirányú rezgéssel megzavarunk, akkor az összes erőtényező időátlagában és rms értékeiben is megjelenik az ugrás amennyiben azokat a hosszirányú rezgési amplitúdó függvényében ábrázoljuk (összhangban Baranyi, 2008-al). Amennyiben viszont egy keresztirányban rezgő henger körüli áramlást zavarunk meg egy kis amplitúdójú hosszirányú rezgéssel, akkor [1]-el összhangban nem történik örvényszerkezet változás.

A [9] dolgozatban a keresztirányban rezgő hengerre koncentrálni számos Reynolds számnál ($Re=60, 80, 100, 120, 160, 200, 220, 250, 300, 350$) és $f/St_0=0,8$ frekvencia-hányadosnál (a 0,8-as értéket azért választottuk, mert ennél az értéknél már viszonylag kis amplitúdónál is kialakul a szinkronizálódás) vizsgáltuk az erőtenyezők időátlagát és *rms* értékét a rezgési amplitúdó függvényében. Az eredmények összhangban voltak a korábbi eredményekkel ([4]), és itt lehetőség nyílt a Reynolds szám hatásának vizsgálatára is. A kanadai társszerzők $Re=200$ esetére elvégzett számítási eredményeivel kiválóan egyeztek eredményeink. Általános tapasztalat volt, hogy az Re növelésével a szinkronizálódás alsó határa kisebb amplitúdók irányába tolódott el. Az örvényszerkezet hirtelen változásai környezetében a korábbi vizsgálatok mellett most POD (Proper Orthogonal Decomposition) analízist is végeztünk, amely megerősítette az áramképek tükörszimmetrikus voltát.

A [17] dolgozat célkitűzése kereszt- és hosszirányú áramlás esetén a témavezető által kifejlesztett számítógépes eljárás és az Ansys Fluent kereskedelmi szoftvercsomag által nyert eredmények összehasonlítása volt. Igen megnyugtató volt, hogy mindkét hengermozgás esetén kiválóan egyeztek a számítási eredmények. A [16] és [19] dolgozatokban kiterjesztettük ezt az összehasonlítást további paraméterek, valamint a henger és a folyadék közti mechanikai energiacsere (Baranyi, 2008) eseteire is, ismét kiváló egyezést találva a két számítási eljárás eredményei között.

A [18] dolgozatban egy új, a pályázatban nem szereplő terület: a keresztirányban rezgő fűtött hengerre vonatkozó kezdeti eredményeinket mutatjuk be egy Reynolds szám és frekvencia-hányados esetén kényszerkonvekció feltételezésével. A vizsgált ellenállás-tényező időátlaga és *rms* értéke nő az A amplitúdóval (itt A független változó) és a T^* hőmérséklet aránnyal is (az állandó felületi hőmérséklet és a testtől távoli környezeti hőmérséklet hányadosa; itt paraméter). A dimenziótalan hőátadási tényező, Nu Nusselt szám is monoton nő az amplitúdóval, viszont csökken a T^* növelésével. A test és a folyadék közti E mechanikai energiacsere szintén csökken a T^* növelésével, de az amplitúdó növelésével egy helyi maximum elérése után csökkenni kezd és negatívvá válik. Számunkra a pozitív E érték a veszélyes, mert ilyenkor a test energiát nyer a folyadékból, amely nemkívánatos rezgéshez vezethet a rugalmasan megtámasztott esetben. A felületi hőmérséklet növelése csökkenti ezt a veszélyt. E kutatás hosszirányú hengerrezgés esetére történő kiterjesztését a [26,29] dolgozatok mutatják be, ahol a leglényegesebb különbség az, hogy a Nusselt szám a rezgési amplitúdónak nem monoton függvénye, hanem egy maximális érték elérése után az amplitúdó növelésével csökken az értéke.

A [8] konferencia előadás után a [22] folyóiratcikkekben közöltük azt a vizsgálatot, amelyben a kezdeti feltételt független változóként kezelve, s amely szemléletesen igazolja a hosszirányú rezgés esetén a két megoldás létezését, amelyek egymás tükörszimmetrikus megfelelői. Korábban, kihasználva a nemlineáris problémák azon tulajdonságát, hogy a megoldásuk erősen függ a kezdeti feltételtől, a különböző kezdeti feltételek megválasztásával a két megoldást tudtuk rekonstruálni valamely paraméter függvényében (Baranyi, 2008).

A [20, 25, 37] dolgozatokban párhuzamos áramlásba helyezett keresztirányú rezgőmozgást végző henger esetén három fontos paraméter (Re , A_y és f/St_0) hatását vizsgáltuk a különböző erőtenyezőkre, ill. az E mechanikai energiacsere. A vizsgálat legfontosabb eredménye az, hogy a háromdimenziós állapotterben közepes és annál kisebb A_y értékeknél E pozitív, amely azt jelenti, hogy ez az állapot a rugalmasan felfüggesztett henger esetén nagy amplitúdójú gerjesztett rezgéshez vezethet. A [37] cikk egy 1,581-es impakt faktorról (2012-es érték) rendelkező folyóiratban jelent meg.

A [38] PhD értekezésben, amelyet a projektbeli kutató, Bolló Betti védett meg 2013-ban szintén egy szabadságfokú mozgást végző henger körüli áramlások vizsgálatára korlátozódik. Jelentős új eredményeket értünk el a párhuzamos áramlásba helyezett rezgő fűtött (állandó felületi hőmérsékletű) henger körüli áramlás és hőátadás vizsgálata során (mint ahogyan azt már korábban említettük).

A [33] dolgozatban a kanadai társszerzőkkel a komplex Ginzburg-Landau (CGL) egyenlet segítségével az áramlásba helyezett mechanikusan mozgatott henger körüli áramlás modellezésére kifejlesztettünk egy alacsonyrendű modellt. A modell eredményei jól egyeznek a Navier-Stokes egyenletek megoldásán alapuló eredményeikkel. Az egyszerű modell lehetővé teszi az örvényleválás gyors (szemben a Navier-Stokes egyenletek nagy gépidőt igénylő megoldásával) szabályozását.

A [24] dolgozatban bemutatjuk a Floquet stabilitási analízis elvégzéséhez szükséges egyenletek származtatását és azok megoldási módját mind az Euler, mind a Runge-Kutta megoldóra vonatkoztatva. Sajnos ehhez a konferenciacikkhez számpéldát így nem tudtunk bemutatni, mert, mint már említettük, nagyon kemény erőfeszítéseink ellenére sem sikerült hatékonyan illeszteni a kifejlesztett numerikus módszert a korábban kifejlesztett és régóta használt, alaposan tesztelt számítógépes eljárásunkhoz.

2.3 Két szabadságfokú hengerrezgések (2D-s vizsgálat)

A gyakorlatban kétfajta két szabadságú mozgást figyeltek meg párhuzamos áramlásba helyezett rugalmasan megtámasztott hengernél. Az egyik esetben a hengerrezgés frekvenciája azonos a hossz- és keresztirányban; ekkor ellipszis pálya adódik (Baranyi, 2008; Kheirkhah et al., 2012). A másik tipikus eset, amikor a hosszirányú frekvencia kétszerese a keresztirányúnak; ebben az esetben Lissajous pályát kapunk, amelynek egy tipikus alakja a 8-as számjegy (vagy torzult 8-as) alakú pálya (Jeon és Gharib, 20001; Jauvtis és Williamson, 2004; Sanchis et al., 2008).

A [19] dolgozatban az *ellipszis* pályát követő hengerre vonatkozóan is jól egyeztek a Fluent és saját fejlesztési kód eredményei. A [22] cikkben a kezdeti feltétel vizsgálatot erre az esetre (ellipszis) is elvégeztük. A [34] dolgozatban az egyes hengermozgás jellemzői összehasonlítása kapcsán is foglalkoztunk ezzel az esettel, a [38]-ban pedig a Fluent és saját kódos számítások összehasonlításánál.

A [35,36] dolgozatokban egy olyan, párhuzamos áramlásba helyezett, *ellipszis* pályán mozgatott körhenger körüli szisztematikus, igen nagy volumenű numerikus vizsgálat eredményeit mutatjuk be a keresztirányú A_y amplitúdó függvényében a következő esetek összes lehetséges kombinációjára: $Re=150$ és 200 , $f/St_0=0,8$; $0,9$ és $1,0$ és $\mathcal{E}=A_x/A_y=0$; $0,1$; $0,2$; $0,3$, $0,4$ és $0,5$. Az \mathcal{E} 0 és $0,5$ közötti értékei lefedik a gyakorlatban leggyakrabban előforduló amplitúdó-arányt. Néhány, az eredményekből levonható konklúzió: az ellenállás-tényező időátlagát a pálya alakja (\mathcal{E}) alig befolyásolja, de annál jobban az időbeli változásának amplitúdóját (*rms* értéket); az E energiacsere a vizsgált paramétertartomány legnagyobb részén negatív (ott nincs rezgésvesztés); az E (pozitív) csúcsértéke Re és f/St_0 növelésével nő, de \mathcal{E} növelésével ("vastagabb" ellipszis) csökken; E csúcsértéke legnagyobb az $\mathcal{E}=0$ értéknél, amely a keresztirányú rezgés (mint az ellipszis pálya határeset, midőn a kistengely 0 -hoz tart).

A [6] dolgozatban mutattuk be a másik típusú két szabadságfokú ($f_x=2f_y$; 8-as számjegy alakú) hengerpályával kapcsolatos kezdeti eredményeinket. $Re=150$, 200 és 250 Reynolds számok esetén az A_x amplitúdó, ill. $Re=250$ esetén pedig az f_y/St_0 frekvenciahányados ($f_y/St_0 < 1.0$) függvényében vizsgáltuk az erőtényező időátlagát és *rms* értékét valamint az E mechanikai energiacserét abban az esetben, amikor a 8-s pálya felső hurkán az óramutató járásával megegyező (CW; clockwise). A vizsgált A_x tartományban nincs ugrásszerű változás az eredményekben, míg a vizsgált C_L és t_q időátlagaiban, ill. az E energiacsereiben az f_y/St_0 függvényében ugrásszerű változást találtunk, amely az örvényszerkezet megváltozására utal.

A Lissajous görbénél ($f_x=2f_y$) a hossz-és keresztirányú hengerrezgés közti fázisszög különböző értékei meghatározzák a pálya alakját és irányítását. A [14] dolgozatban egy olyan, gyakorlatban előforduló esetet vizsgálunk $Re=140$, 200 és 250 esetén, ahol a pálya egy lópatkóhoz hasonlít. Az f_y/St_0 frekvenciahányados függvényében felrajzolt erőtényező időátlagaiban és *rms* értékeiben, valamint az E értékekben is a vizsgált frekvenciahányados tartományon ($f_y/St_0 < 1.0$) mindhárom Reynolds számnál egy-egy ugrásszerű változás figyelhető meg. Az ugrás környezetének vizsgálata igazolta, hogy az örvényszerkezet 2P-ről (alul és felül is egy-egy örvénypár) 2S-re (alul és felül is egy-egy örvény; mint a Kármán-féle örvénysor) változik és a henger mögötti nyom szélesről keskenyre változik.

A [21] dolgozatban a Jeon és Gharib (2001) által javasolt fázisszög tartományban 4 különböző szög esetén (egy szabályos és 3 torzított 8-as pálya) vizsgáltuk az erőtényezőket és az E értéket az f_y/St_0 függvényében ($f_y/St_0 < 1,1$) $Re=250$ esetén. Azt tapasztaltuk, hogy az összes vizsgált fázisszög esetén az E az f_y/St_0 tartomány legnagyobb részén pozitív volt, ami veszélyes rezgéseket jelenthet a rugalmasan felfüggesztett esetben. Azt tapasztaltuk, hogy a két mozgás közötti fázisszög növelésével mind az ellenállás-tényező, mind az energiacsere csökken. Az "ugrás" környezetének vizsgálata most is jelentős örvényszerkezet változást mutatott.

A [15] cikkben és annak továbbfejlesztett változatában, a [23] dolgozatban $Re=200$, 250 és 300 esetén a frekvenciahányados függvényében ($f_y/St_0 < 1$) megvizsgáltuk mind a 8-as pálya felső hurkán az óramutató járásával azonos (CW), ill. azzal ellentétes (ACW; anticlockwise) irányítású eseteket. Azt tapasztaltuk, hogy a két irányítás esetén alapvetően különböző eredményeket kaptunk az erőtenyezőkre és az E energiacserére. A CW esetben a C_L időátlagát két, a $C_L=0$ tengelyre szimmetrikus görbe (mint a hosszirányú rezgésnél), kisebb ellenállás-tényező és negatív E értékek jellemzik, míg az ACW esetben mindhárom Re esetén C_L időátlaga 0, nagyobb az ellenállás-tényező és pozitív (!) E értékek tartoznak hozzá, amely miatt ez utóbbi eset rugalmasan felfüggesztett esetben rezgésre hajlamos (VIV). A 8-as pályával kapcsolatban nagy volumenű számítási eredmények vannak feldolgozás alatt, amelyeknél különböző frekvencia- és amplitúdó-hányadosok mellett a keresztirányú rezgési amplitúdó függvényében (hasonlóan az ellipszis pályához tartozó [35,36] dolgozatokhoz) vizsgáljuk az erőtenyezőket és az energiacserét. Rövidesen publikálni szeretnénk ezeket az eredményeket is.

2.4 Háromdimenziós vizsgálatok

Mint korábban említettük, a célkitűzésekben megfogalmazott nagy volumenű 3D-s számítások a túlzott gépidő miatt nem voltak reálisak. Az egyes paraméterek áramlásra gyakorolt hatásának vizsgálatára e helyett a 2D-s eljárásokat tartottuk célszerűnek alkalmazni. A [30] dolgozatban az álló hengerre vonatkozó 3D-s számításainkat 2 különböző háló esetén az OpenFoam nyílt felhasználású kóddal és a Fluent-tel végeztük. Ezek egymással és szakirodalmi értékekkel történő összehasonlítása jó eredményt adott. Az eljárást a [28] dolgozatban terjesztettük ki a főáramlásra merőleges irányban rezgő körhenger körüli áramlás vizsgálatára. Az OpenFoam és Fluent szoftverekkel végzett számítások eredményei jól egyeztek egymással, valamint a szerzők korábbi 2D-s eredményeivel valamint szakirodalmi értékekkel is.

2.5 Numerikus áramlás megjelenítés fejlesztése

A csoport hallgató tagja, Daróczy László a korábban a témavezető által Fortran nyelven kidolgozott számítógépes kódot C++ nyelvre átültette és grafikus kártyára adaptálta a GPGPU (General-Purpose computing on Graphics Processing Unit) programozási módszer felhasználásával. A numerikus eljárás számos áramlásmegjelenítési lehetőséget tartalmaz, amelyet már a számítás közben is aktivizálhatunk, így már kifejlődésében tanulmányozhatjuk a jelenségeket. A megjelenítés minőségére jellemző, hogy egy, az USA-ban megrendezett, ASME konferencián az egyik résztvevő, látván a slide-jaimat, komolyan gondolkodott azon, hogy megvásárolja a cége részére a szoftvert, mivel az áramlás megjelenítésünk minőségét sokkal jobbnak tartotta, mint ami a tipikus kereskedelmi szoftverekben található.

3. ÖSSZEGZÉS

Bár nem minden kitűzött célt sikerült maradéktalanul megvalósítani, más területeken messze túlszárnyaltuk a terveket. Úgy érezzük, hogy az OTKA projekt keretében egy új jelenség felfedezése kapcsán nagyon értékes eredmények születtek. Ezt mutatja, egyrészt az, hogy a magas presztizsú, szűk körű specialisták részére szervezett konferenciákra elfogadták előadásainkat. Bár a projektből csak két impakt faktoros cikk született (az egyik folyóirat impakt faktora 1,581), a kutatási eredményeket széles körben publikáltuk és további publikációk vannak folyamatban most is. A témavezető irányításával a projekt egyik tagja a projekt témakörébe tartozó kutatási területen 2013-ban sikeresen ("summa cum laude" minősítéssel) megvédte PhD értekezését. A témavezető és a projekt tagjai itt szeretnének köszönetet mondani az OTKA támogatásért.

A K 76085 sz. projekt keretében készült közlemények jegyzéke

- [1] Baranyi, L.: Sudden and gradual alteration of amplitude during the computation for flow around a cylinder oscillating in transverse or in-line direction. Proc. *ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference, Symposium on Flow-Induced Vibration*. Prague, (2009), on CD ROM, pp. 1-10, Paper No. PVP2009-77463
Also published in: American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessel and Piping Division (Publication) PVP 4, 2010, pp. 259-268.
- [2] Baranyi, L.: Triggering of vortex shedding by cylinder oscillation for Reynolds numbers under 47. Proc. *ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference, Symposium on Flow-Induced Vibration*. Prague, (2009), on CD ROM, pp. 1-8, Paper No. PVP2009-77611
Also published in: American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessel and Piping Division (Publication) PVP 4, 2010, pp. 317-324.
- [3] Baranyi, L.: Vortex shedding triggering by cylinder oscillation for very low Reynolds numbers. Institut für Strömungstechnik und Thermodynamics. University of Magdeburg. October 20, 2009. Presentation.
- [4] Baranyi, L., Daróczy, L.: Effect of oscillation amplitude on force coefficients of a cylinder oscillated in transverse or in-line directions. *Conference on Modelling Fluid Flow*, Vol. 1, Budapest (2009), pp. 323-330.
- [5] Baranyi, L., Szabó, S., Bolló, B., Bordás, R.: Analysis of low Reynolds number flow around a heated circular cylinder. *The Journal of Mechanical Science and Technology* **23**(7) (2009), 1829-1834. (Impact factor: 0.374)
- [6] Baranyi, L.: Numerical simulation of the flow around a circular cylinder following a figure-8-like path. Proc. *7th International Symposium on Fluid-Structure Interactions, Flow-Sound Interactions, and Flow-Induced Vibration and Noise, (within FEDSM2010-ICNMM2010 ASME Conference 2010)*, Montreal, Québec, Canada, (2010), on CD ROM, pp. 1-7, Paper No. FEDSM-ICNMM2010-30888
Also published in: American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FEDSM 3 (PARTS A AND B), 2010, pp. 185-191.
- [7] Baranyi, L.: Effect of in-line or transverse cylinder oscillations on laminar flow – a numerical study. Proc. *IUTAM Symposium on Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibrations* (Eds. T. Leweke and C.H.K. Williamson), Capri Island, Italy (2010), pp. 333-336.
- [8] Baranyi, L.: Effect of initial condition on the flow past a moving cylinder. Presentation at the *8th Euromech Fluid Mechanics Conference*, Bad Reichenhall, Germany, September 14, 2010. Conference: September 13-16, 2010.
- [9] Baranyi, L., Huynh, K., Mureithi, N.W.: Dynamics of flow behind a cylinder oscillating in-line for low Reynolds numbers. Proc. *7th International Symposium on Fluid-Structure Interactions, Flow-Sound Interactions, and Flow-Induced Vibration and Noise, (within FEDSM2010-ICNMM2010 ASME Conference 2010)*, Montreal, Québec, Canada, (2010), on CD ROM, pp. 1-10, Paper No. FEDSM-ICNMM2010-31183
Also published in: American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division (Publication) FEDSM 3 (PARTS A AND B), 2010, pp. 223-232.
- [10] Bolló, B.: Grid independence study for flow around a stationary circular cylinder. Proc. *24th MicroCAD, International Scientific Conference*, Section F, Miskolc, Hungary, (2010), pp. 1-6.
- [11] Bolló, B.: Heat effects on unsteady laminar flow past a circular cylinder. Proc. *16th "Building Services, Mechanical and Building Industry Days"*, International Conference, Debrecen, Hungary, (2010), pp. 102-109.
- [12] Bolló, B.: Low Reynolds number flow around and heat transfer from a heated circular cylinder. *International Review of Applied Sciences and Engineering* **1**(1-2) (2010), 15-20.
- [13] Bolló, B., Baranyi, L.: Computation of low-Reynolds number flow around a stationary circular cylinder. Proc. *7th Conference on Mechanical Engineering*, Budapest University of Technology and Economics, Faculty of Mechanical Engineering, Budapest (2010), pp. 891-896.
- [14] Baranyi, L.: Computation of low Reynolds number flow around an oscillated cylinder following a horseshoe-shape path. Proc. *ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Division Conference PVP2011*, Baltimore, Maryland, USA, (2011), pp. 1-10, Paper No. PVP2011-57471
Also published in: American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessel and Piping Division (Publication) PVP 4, 2011, pp. 277-286.
- [15] Baranyi, L.: Low-Reynolds number flow around a cylinder following a figure-8 path - effect of direction of orbit. Proc. *IUTAM Symposium on Bluff Body Flows* (Eds. S. Mittal and G. Biswas), Kanpur, India, (2011), pp. 21-24.
- [16] Baranyi, L., Bolló, B., Daróczy, L.: Simulation of low-Reynolds number flow around an oscillated cylinder using two computational methods. Proc. *ASME 2011 Pressure Vessels and Piping Division Conference PVP2011*, Baltimore, Maryland, USA, (2011), pp. 1-9, Paper No. PVP2011-57554

Also published in: American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessel and Piping Division (Publication) PVP 4, 2011, pp. 309-317.

- [17] Bolló, B., Baranyi, L.: Computation of low-Reynolds number flow around an oscillated circular cylinder. Proc. *25th MicroCAD, International Scientific Conference*, Miskolc, Hungary, Section D, 2011, pp. 19-24.
- [18] Bolló, B. and Baranyi, L.: Numerical simulation of oscillatory flow past and heat transfer from a cylinder. Proc. *Recent Researches in Mechanics: 2nd International Conference on Fluid Mechanics and Heat and Mass Transfer*, Corfu Island, Greece, 2011, pp. 130-135.
- Also published in: *Recent Researches in Mechanics - Proc. of the 2nd Int. Conf. on FLUIDSHEAT'11, TAM'11, Proc. 4th WSEAS Int. Conf. UPT'11, CUHT'11*, (2011), pp. 130-135.
- [19] Bolló, B., Baranyi, L.: Flow around an oscillating or orbiting cylinder – Comparative numerical investigation. Proc. *11th Hungarian Conference on Theoretical and Applied Mechanics, HCTAM 2011*, Miskolc, Hungary, 2011, pp. 1-7, On CD ROM, Paper Number: 84
- [20] Baranyi L., Daróczy L.: Áramlási paraméterek hatása rezgő henger és folyadék közti energiaátadásra (Flow parameter effects on energy transfer between an oscillating cylinder and fluid). *GÉP*, 2012/9 (2012), 13-16.
- [21] Baranyi, L.: Computation of flow around a circular cylinder undergoing two-degree-of-freedom forced motion at low Reynolds numbers. Proc. *10th International Conference on Flow-Induced Vibration*, Meskell & Bennett (eds), Dublin, (2012), pp. 361-368.
- [22] Baranyi L.: Kezdeti feltétel hatása rezgő henger körüli áramlásra (Effect of initial conditions on flow past an oscillating cylinder). *GÉP*, 2012/9 (2012), 7-12.
- [23] Baranyi, L.: Simulation of a low-Reynolds number flow around a cylinder following a figure-8-path. *International Review of Applied Sciences and Engineering* 3(2) (2012), 133-146. DOI 10.1556/IRASE.3.2012.2.7
- [24] Baranyi, L., Daróczy, L.: Floquet stability analysis of the wake flow of a circular cylinder of a low-Reynolds number flow. Proc. *26th MicroCAD International Scientific Conference*, Miskolc, Hungary, Section N, (2012), pp. 1-6, Paper Number: N5
- [25] Baranyi, L., Daróczy, L.: Numerical investigation of mechanical energy transfer between the fluid and the cylinder oscillating transverse to the main stream. Proc. *Conference on Modelling Fluid Flow*, Vad (ed), Vol. 1, Budapest (2012), pp. 269-276.
- [26] Bolló, B.: Hosszirányban rezgő folyadékba helyezett fűtött körhenger körüli áramlás vizsgálata. *GÉP LXIII.* (9) (2012), 25-28.
- [27] Bolló, B.: Fűtött körhenger körüli áramlás vizsgálata. *GÉP LXIII.* (1), 31-34.
- [28] Bolló B., Janiga G., Baranyi L.: Homogén folyadékáramlásba helyezett rezgő körhenger körüli áramlás vizsgálata. *Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban 2012, Elektronikus Műszaki Füzetek* 2012(11), 483-489.
- [29] Bolló, B., Baranyi, L.: Heat and energy transfer from a cylinder in an oscillatory low-Reynolds number flow. *Conference on Modelling Fluid Flow*, Vad (ed), Vol. 1, Budapest (2012), pp. 261-268.
- [30] Bolló, B., Janiga, G., Baranyi, L.: Three-dimensional computations for low-Reynolds number flows past a cylinder. Proc. *26th MicroCAD International Scientific Conference*, Miskolc, Hungary, Section N, (2012), pp. 1-6, Paper Number: N6
- [31] Daróczy L., Baranyi L.: Első- és másodrendű időbeli diszkretizáció körhenger körüli áramlás esetén (First- and second-order temporal discretization for computation of flow around a circular cylinder). *GÉP*, 2012/9 (2012), 17-20.
- [32] Daróczy, L., Baranyi, L.: Euler and second-order Runge-Kutta methods for computation of flow around a cylinder. Proc. *26th MicroCAD International Scientific Conference*, Miskolc, Hungary, Section N, (2012), pp. 1-6, Paper Number: N10
- [33] Mureithi, N., Baranyi, L., Huyhn, K.: Dynamics of reduced order models of the forced Karman cylinder wake. Proc. *Conference on Modelling Fluid Flow*, Vad (ed), Vol. II, Budapest (2012), pp. 1004-1011.
- [34] Baranyi L.: Rezgő henger körüli áramlás numerikus szimulációja (Numerical simulation of flow past an oscillating cylinder). Proc. *XXI. Nemzetközi Gépészeti Találkozó–OGÉT 2013*, Arad, Romania, (2013), 40-43.
- [35] Baranyi, L.: Simulation of low-Reynolds number flow around a circular cylinder following a slender elliptical path. Proc. *ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Division Conference PVP2013*, Paris, (2013), pp. 1-10, Paper No. PVP2013-97888
- [36] Baranyi, L.: Numerical Simulation of Mechanical Energy Transfer between Fluid and a Circular Cylinder Forced to Follow an Elliptical Path. Proc. *FLUCOME 2013, 12th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization*, Nara, Japan, 2013, pp. 1-10. Paper No. OS16-03-3

- [37] Baranyi, L., Daróczy, L.: Mechanical energy transfer and flow parameter effects for a cylinder in transverse oscillation. *International Journal of Heat and Fluid Flow* **43**, (2013), 251-258. (Impact factor: 1.581 (2012))
- [38] Bolló B.: Fűtött henger körüli áramlás és hőátvitel numerikus vizsgálata. *PhD disszertáció*, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Sályi István Gépészeti Tudományos Doktori Iskola, 2013.

A zárójelentésben hivatkozott (nem a K 76085 keretében készült) közlemények jegyzéke

- Al-Mdallal, Q.M., Lawrence, K.P., Kocabiyik, S., 2007, Forced streamwise oscillations of a circular cylinder: Locked-on modes and resulting fluid forces. *Journal of Fluids and Structures* **23**, 681-701.
- Baranyi, L., 2005, Lift and drag evaluation in translating and rotating non-inertial systems. *Journal of Fluids and Structures* **20**(1), 25-34.
- Baranyi, L., 2008, Numerical simulation of flow around an orbiting cylinder at different ellipticity values. *Journal of Fluids and Structures* **24**, 883-906.
- Barkley, D., Henderson, R.D., 1996, Three-dimensional Floquet stability analysis of the wake of a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics* **322**, 215-241.
- Bearman, P.W., Obasaju, E.D., 1982, An experimental study of pressure fluctuations fixed and oscillating square-section cylinders. *Journal of Fluid Mechanics* **119**, 297-321.
- Blackburn, H.M., Henderson, R.D., 1999, A study of two-dimensional flow past an oscillating cylinder. *Journal of Fluid Mechanics* **385**, 255-286.
- Jauvtis, N., Williamson, C.H.K., 2004, The effect of two degrees of freedom on vortex-induced vibration and at low mass and damping. *Journal of Fluid Mechanics* **509**, 23-62.
- Jeon, D., Gharib, M., 2001, On circular cylinders undergoing two-degree-of-freedom forced motions. *Journal of Fluids and Structures* **15**, 533-541.
- Kheirkhah, S., Yarusevych, S., 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.
- Leontini, J.S., Stewart, B.E., Thompson, M.C., Hourigan, K., 2006a, Wake state and energy transitions of an oscillating cylinder at low Reynolds number. *Physics of Fluids* **18**, 067101
- Leontini, J.S., Stewart, B.E., Thompson, M.C., Hourigan, K., 2006b, Predicting vortex-induced vibration from driven oscillation results. *Applied Mathematical Modelling* **30**, 1096-1102.
- Lu, X.Y., Dalton, C., 1996, Calculation of the timing of vortex formation from an oscillating cylinder. *Journal of Fluids and Structures* **10**, 527-541.
- Mureithi, N.W., Huynh, K., Rodriguez, M., Pham, A., 2010, A simple low order model of forced Karman wake. *International Journal of Mechanical Sciences* **52**(11), 1522-1534.
- Newman, D.J., Karniadakis, G.E., 1995, Direct numerical simulation of flow over a flexible cable. *Proc. 6th Int. Conf. on Flow-Induced Vibration*, London, pp. 193-203.
- Nishihara, T., Kaneko, S., Watanabe, T., 2005, Characteristics of fluid dynamic forces acting on a circular cylinder oscillated in the streamwise direction and its wake patterns. *Journal of Fluids and Structures* **20**, 505-518.
- Okajima, A., Nakamura, A., Kosugi, T., Uchida, H., Tamaki, R., 2004, Flow-induced in-line oscillation of a circular cylinder. *European Journal of Mechanics B/Fluids* **23**, 115-125.
- Poncet, P., 2002, Vanishing of mode B in the wake behind a rotationally oscillating circular cylinder. *Physics of Fluids* **14**(6), 2021-2023.
- Posdziech, O., Grundmann, R., 2007, A systematic approach to the numerical calculation of fundamental quantities of the two-dimensional flow over a circular cylinder. *Journal of Fluids and Structures* **23**, 479-499.
- Prasanth, T.K., Mittal, S., 2009, Flow-induced oscillation of two circular cylinders in tandem arrangement at low Re. *Journal of Fluids and Structures* **25**, 1029-1048.
- Sanchis, A., Sælevik, G., Grue, J., 2008, Two-degree-of-freedom vortex-induced vibrations of a spring-mounted rigid cylinder with low mass ratio. *Journal of Fluids and Structures* **24**, 907-919.
- Williamson, C.H.K., Govardhan, R., 2004, Vortex-Induced-Vibrations. *Annual Review of Fluid Mechanics* **36**, 413-455.
- Williamson, C.H.K., Roshko, A., 1988, Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder, *Journal of Fluids and Structures* **2**, 355-381.