

Áramlási veszteségek csökkentésére használt miniatűr örvénygenerátorok alkalmazhatóságának vizsgálata

Investigation of the applicability of miniature vortex generators for reducing fluid dynamic losses

KULCSÁR Márton¹, Dr. NAGY Péter Tamás²

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék, 1111 Budapest Műegyetem rkp. 3. D. épület 3. emelet, +36 1 463-1642, mkulcsar@hds.bme.hu, www.hds.bme.hu

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék, 1111 Budapest Műegyetem rkp. 3. D. épület 3. emelet, +36 1 463-1442, pnagy@hds.bme.hu, www.hds.bme.hu

Abstract

From a fluid mechanical standpoint, bodies can be categorized into two groups based on the mechanism causing most of resistance. In case of bluff bodies, pressure-based forces are higher while in the case of streamlined bodies the friction forces dominate. Our work is focused on the latter. In the proximity of a body's surface a boundary layer will develop, which at first is a thin laminar layer, but becomes a thick turbulent layer further downstream. Laminar flow is characterised by parallel streamlines. On the other hand, in turbulent flow streamlines interact with each other causing higher losses. With this in mind, it can be easily seen, that delaying the laminar-turbulent transition can lower the fluid dynamic losses. One of the possibilities to delay the transition is the usage of miniature vortex generators (MVG). These passive elements are made up of rectangular surface element pairs which induce counter rotating vortices. These vortices can create lower and higher speed streaks in the laminar boundary layer, which suppress the transitional mechanisms. This paper investigates the effects of the bond of the MVGs and their wear.

Keywords: MVG, drag reduction, laminar-turbulent transition delay, applicability

Kivonat

Áramlástanai szempontból az ellenállást okozó mechanizmus alapján a testeket két nagy csoportba oszthatjuk. Tompa testek esetén a nyomásból származó, még áramvonalas testek esetén a súrlódásból származó erők dominálnak. Munkánkban csak ez utóbbival foglalkozom a továbbiakban. A test felületének környezetében kialakul az úgynevezett határréteg, mely kezdetben vékony lamináris, majd vastag turbulens. Lamináris esetben az áramvonalak egymással párhuzamos haladnak a test felületén. Ezzel ellentétben turbulens áramlásban az áramvonalak kaotikusan, egymással ütközve haladnak, így megnövelik a súrlódásból származó veszteségeket. Ennek tudatában könnyen be lehet látni, ha késleltetni tudjuk a lamináris-turbulens átmenetet, csökkenteni lehet az áramlási veszteségeket. Az egyik módja az átmenet késleltetésének, miniatűr örvénygenerátorok (MVG) használata. Ezek a passzív elemek téglalap alakú felületelem párokból állnak, melyek egymással szembe forgó örvényeket hoznak létre. Ezek az örvények képesek lassabb és gyorsabb sávokra osztani a lamináris határréteget, amik gátolják az átmenetet elősegítő mechanizmusokat. Jelen cikk az MVG-k rögzítésének és használat során jelentkező kopásának hatásait vizsgálja.

Kulcsszavak: MVG, veszteségcsökkentés, lamináris-turbulens átmenet késleltetés, alkalmazhatóság

1. Bevezetés

Egy áramvonalas test feletti áramlásban a lamináris-turbulens átmenetet nagy mértékű veszteségnövekedéssel jár, a súrlódási erők növekedése miatt. Az átmenet késleltetésével emiatt nagy mértékű veszteségcsökkentés érhető el. Az átmenetnek két fő típusa van, az első esetben a határrétegben fellépő instabilitások növekedése okozza az átmenetet, még a másik, kevésbé ismert jelenség a bypass-tranzíció [1]. Az előbbi esetről általánosan elmondható, hogy az exponenciális növekedések jól leírhatóak lineáris stabilitáselmélettel egy adott amplitúdóig, amin felül fellépnek nem-lineáris mechanizmusok, a másodlagos

instabilitások. Az egyik legismertebb instabilitás a határrétegben az ún. Tollmien-Schlichting (TS) hullámok. Ez egy jól megértett mechanizmus és ezek csillapításával késleltetni lehet az átmenetet [2].

Az általunk vizsgált módja a TS hullámok csillapításának a határrétegben létrehozott lassabb és gyorsabb régiók létrehozása. Ennek a módszernek a működését mind numerikusan [3], mind pedig kísérletekkel [4] alátámasztották. A fizikai működésének hátterében az áll, hogy egy áramlásra merőleges irányú nyíróréteg keletkezik az áramlásban, ami csökkenti a zavarások kinetikus energiájának növekedését.

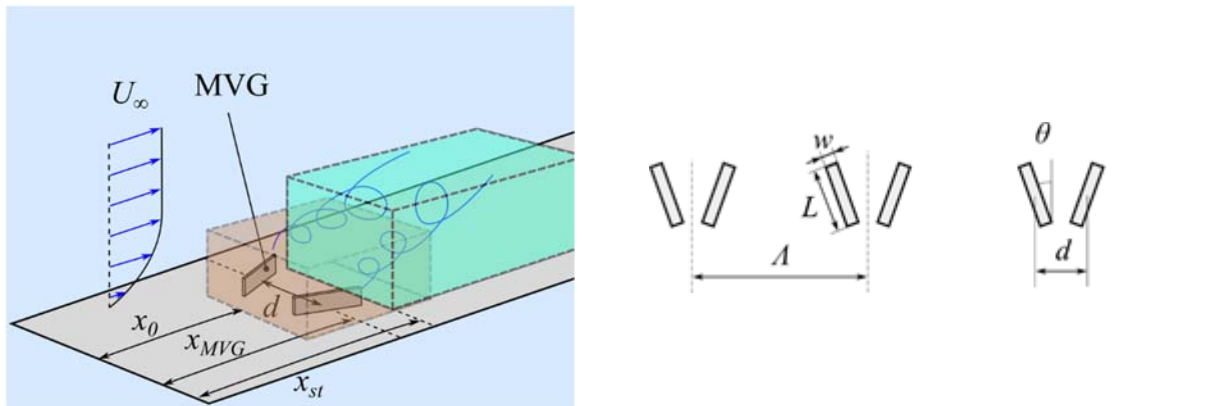
Ezeket a régiókat különböző módszerekkel létre lehet hozni. Ebben a cikkben miniatűr örvénygenerátorokkal (MVG) létrehozott sávokat vizsgáltunk. Ezek az MVG-k miniatűr felületi passzív elem párok, amelyek egymással szembe forgó örvényeket gerjesztenek, így sávokra bontva a határréteget. A létrehozott örvények és így a sávok, amelyek a veszteség csökkentésért felelősek az MVG-k sok paraméterétől függenek. Ez a cikk ezek közül az alkalmazás során fellépő kopást szimuláló lekerekítések hatásával foglalkozik.

Egy másik előre mutató probléma az MVG alkalmazhatóságát tekintve azok rögzítése a testeken, tekintve, hogy mind a gyártásnak mind pedig a felhelyezésnek rendkívül precíznek kell lenni a várt hatások eléréséhez. Erre jelenthet egy megoldást az általunk vizsgált módszer, mely során az MVG-eket egy szárnyprofilra helyeznénk additív gyártástechnológiák segítségével, majd ezeket a szárnyprofil csíkokat ragasztással lehetne rögzíteni egy test felületére. Ez a megoldás egy plusz elem, a szárny profil hozzáadásával jár így ennek a hatásainak vizsgálata is szükséges.

A vizsgálatok során először egy 3D CFD szimuláció segítségével kiszámoltuk az MVG-k által generált örvényes sebességmezőt a közel térben, majd ezt a kiterjesztett határréteg egyenlet (BRE) segítségével kiterjesztettük alvíz oldalra, végül pedig ezen az új tartományon úgynevezett. BiGlobal stabilitásvizsgálatot végeztünk.

2. Modellezés

A modellezés során összenyomhatatlan és newtoni közeg áramlását feltételezünk. A számítások az x, y, z koordináta rendszerben történtek, ahol x az áramlással párhuzamos, y a falra normális, z pedig az a harmadik, előzőekre merőleges irányt jelöli. A dimenziós mennyiségek kalapos, még a dimenziótlan mennyiségek általános karakterekkel vannak jelölve, erre azért van szükség, mert az áramlások stabilitásának vizsgálatánál megszokott a dimenziótlan mennyiségek használata. Az MVG paraméterei Sattarzadeh és Fransson [5] által kísérletileg vizsgált C04 konfigurációjával azonosak.



14. ábra - A vizsgált rendszer (CFD szimuláció – barna, BRE – zöld)

U_0 (ms^{-1})	ν (m^2s^{-1})	Λ (mm)	d (mm)	h (mm)	w (mm)	L (mm)	θ ($^\circ$)	x_{MVG} (mm)	x_0 (mm)	x_{st} (mm)	$x_{1,CFD}$ (mm)
6	$1,46 \times 10^{-5}$	13	3.25	1.3	0.3	3.25	15	222	213	235	240

15. táblázat - A vizsgált áramlás és az MVG paraméterei

A határréteg lineáris stabilitásvizsgálatához a mennyiségeket fel kell bontani az állandósult lamináris megoldásra és a perturbációra. így $\mathbf{U} = [U, V, W]^T$ és P az alap áramláshoz tartozó, még $\mathbf{u}' = [u', v', w']^T$ és p' a perturbációt leíró mennyiségek. Ezekkel a az áramlást leíró egyenletek a következő alakot veszik fel:

$$(\mathbf{U} \cdot \nabla)\mathbf{U} = -\nabla P + \frac{1}{Re}\Delta\mathbf{U} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (2)$$

A (1) és (2) egyenletben szereplő mennyiségek a távotéri sebesség, \hat{U}_0 és a határréteg hosszskála, $\hat{\delta}_0 = \sqrt{\hat{L}_0 \hat{v} / \hat{U}_0}$ segítségével vannak dimenziótlanná téve.

Ezek az egyenletek jól leírják az áramlást az MVG-k közelében, ahol mindhárom irányban vannak gyors változások, azonban az MVG pároktól távolabbra már feltételezhető, hogy az áramlással párhuzamos irányban már csak lassú változások lépnek fel. Továbbá tudjuk azt is, hogy az áramlásra merőleges és falra normális irányú sebességek kisebbek, mint az áramlásirányú komponens. Ezeket felhasználva egy új dimenziótlantást lehet elvégezni, amivel egyszerűbb alakra hozhatóak az egyenletek. $\varepsilon = 1 / \sqrt{\hat{L}_0 \hat{U}_0 / \hat{v}}$, $[\tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{Z}]^T = [\hat{x} / \hat{L}_0, \hat{y} / (\varepsilon \hat{L}_0), \hat{z} / (\varepsilon \hat{L}_0)]^T$, $[\tilde{U}, \tilde{V}, \tilde{W}]^T = [\hat{U} / \hat{U}_0, \hat{V} / (\varepsilon \hat{U}_0), \hat{W} / (\varepsilon \hat{U}_0)]^T$, $\tilde{P} = \hat{P} / (\varepsilon^2 \hat{\rho} \hat{U}_0^2)$ bevezetésével a következő egyenleteket kapjuk:

$$\tilde{U} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \tilde{X}} + \tilde{V} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \tilde{Y}} + \tilde{W} \frac{\partial \tilde{U}}{\partial \tilde{Z}} = \frac{\partial^2 \tilde{U}}{\partial \tilde{Y}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{U}}{\partial \tilde{Z}^2} \quad (3)$$

$$\tilde{U} \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \tilde{X}} + \tilde{V} \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \tilde{Y}} + \tilde{W} \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \tilde{Z}} = -\frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{Y}} + \frac{\partial^2 \tilde{V}}{\partial \tilde{Y}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{V}}{\partial \tilde{Z}^2} \quad (4)$$

$$\tilde{U} \frac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{X}} + \tilde{V} \frac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{Y}} + \tilde{W} \frac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{Z}} = -\frac{\partial \tilde{P}}{\partial \tilde{Z}} + \frac{\partial^2 \tilde{W}}{\partial \tilde{Y}^2} + \frac{\partial^2 \tilde{W}}{\partial \tilde{Z}^2} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial \tilde{X}} + \frac{\partial \tilde{V}}{\partial \tilde{Y}} + \frac{\partial \tilde{W}}{\partial \tilde{Z}} = 0 \quad (6)$$

Ezeket az egyenleteket kiterjesztett határréteg egyenleteknek (BRE) [6] nevezzük. Az új dimenziótlantás segítségével úgy skálázzuk újra a változókat, hogy azok Reynolds-szám függetlenek legyenek. A szimuláció során ezekkel az egyenletekkel számoltuk ki a változó mennyiségeket a CFD szimuláció utáni területeken. Fontos megjegyezni, hogy a stabilitásszámításokhoz újra kell skálázni az így kapott értékeket a határréteg hossz skálájára.

A határrétegbe való beavatkozás mértéke, avagy a sávok erőssége az örvények amplitúdójával jellemezhető. Ennek kiszámítására két módszer is használatban van [5]:

$$A_{ST}^{int}(x) = \frac{1}{U_0} \int_{-0.5}^{0.5} \int_0^{\eta_1} |U(x, \eta, \zeta) - U^\zeta(x, \eta)| d\eta d\zeta \quad (7)$$

Ebben az egyenletben $\eta = \hat{y} / \hat{\delta}(x)$ a dimenziótlan falra normális koordináta (a lokális határrétegvastagsággal dimenziótlantva), ahol η_1 a határrétegben úgy választott pont, hogy a sávok hatását már ne lehessen érzékelni, még $\zeta = \hat{z} / \hat{\Lambda}$.

$$A_{ST}^{diff}(x) = \frac{1}{2} \max_y \left[\max_z \{U(x, y, z) - \min_z U(x, y, z)\} \right] \quad (8)$$

Az utolsó lépés a szimulációban a lineáris stabilitásvizsgálat elvégzése. Ehhez a fejezet elején közölt jelölésekkel felírt Navier-Stokes (NS) egyenletet lehet használni:

$$\frac{\partial \mathbf{u}'}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{u}' + (\mathbf{u}' \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\nabla p' + \frac{1}{Re} \Delta \mathbf{u}' \quad (9)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u}' = 0 \quad (10)$$

Egy sávokra bontott határrétegben az áramlásirányú sebességkomponens változása alacsony, azt elhanyagolva kereshetjük a megoldást hullámalakban:

$$\mathbf{q}'(x, y, z, t) = \mathbf{q}(y, z) e^{i(\alpha x - \omega t)} + k. k. \quad (11)$$

Itt $q = [u, v, w, p \dots]$, α az áramlás irányú hullámszám, ω a körfrekvencia, i a képzetes egység, $k. k.$ pedig a komplex konjugáltja a kifejezésnek. Térbeli stabilitásvizsgálat esetén ω valós szám, α pedig a keresett komplex sajátérték. Fizikailag a hullámszám valós része a térbeli hullámzást, képzetes részének ellentettje pedig a hullámok térbeli növekedését írja le. Ezt behelyettesítve a (9) és (10) egyenletekbe a következő polinomiális sajátérték problémát kapjuk:

$$(\alpha^2 \mathbf{A}_2 + \alpha \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_0) \mathbf{q} = 0 \quad (12)$$

A perturbált és linearizált NS egyenletnek ezt a megoldási módszerét BiGlobal stabilitásegyenletnek hívjuk [6], és széleskörben alkalmazható áramlások vizsgálatára.

Az így kapott eredményeket az átmenet bekövetkezésének becslésére is lehet használni, amit az e^N módszer [7] segítségével tettem meg. Az ehhez szükséges N-faktor:

$$N(F) = \int_{x_1(F)}^{x_2(F)} -\alpha_i(F, x) dx \quad (13)$$

képlettel számolható, ahol x_1 az első x koordináta, ahol instabilitás lép fel, még x_2 az a hely, ahol az instabilitás maximális növekedését elérte. Ezt különböző $F = \hat{\omega} \hat{v} / \hat{U}_0^2 \cdot 10^6$ hosszlépték független

dimenziótlán frekvenciára kell kiszámolnunk. Az elmélet szerint az átmenet akkor fog bekövetkezni, amikor az N -faktor elér egy kritikus érték (általában $N_{krit} = 7 - 9$), ami jelen esetben $N_{krit} = 7$ volt.

A kopás szimulálására lekerekítéseket helyeztünk el az MVG minden élére, aminek sugara az MVG vastagságának egy harmada volt.

A ragaszthatóság vizsgálata miatt pedig szárnyprofil csíkkal egészítettük ki az MVG és a síklap találkozási pontját a felület megnövelése érdekében. Ezt egy z irányban egyenes NACA-0012 profil alapján modelleztük. Az MVG magassága ebben az esetben gyakorlatilag csökkent, mert csak egy része van a profil felett. A lemezen a profil úgy van elhelyezve, hogy az MVG-k és a profil középpontja egy egyenesre essenek, hossza pedig a számítás tartomány eleje és az MVG-k helye közti távolság.

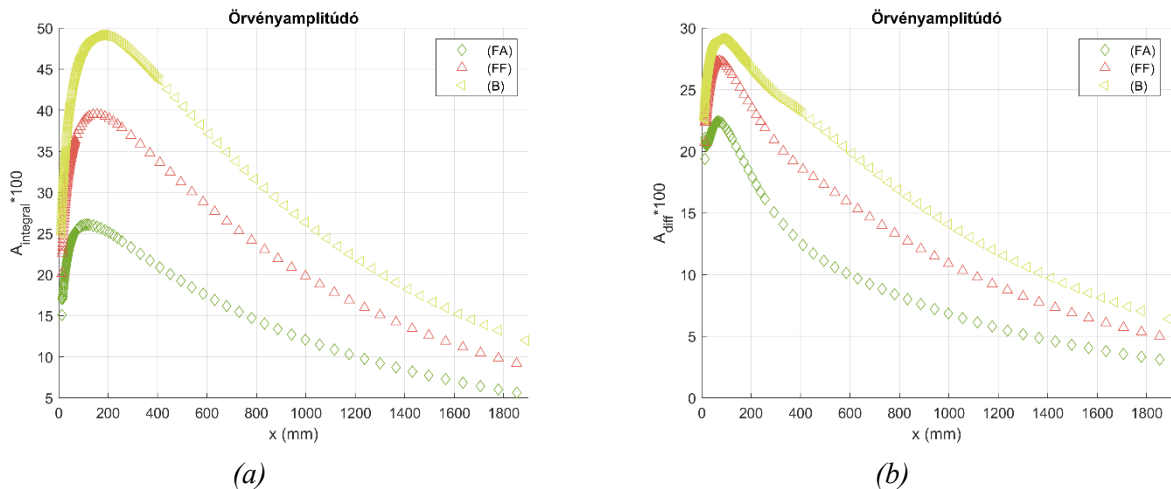
Az ismertetett metódus alapján, az alap áramlást két lépésben lehet kiszámolni. Az első lépés az MVG közel terének szimulációja, ez egy 3D CFD szimulációval történt Ansys CFX szoftver segítségével, ez egy véges térfogatos megoldó, az (1) és (2) NS egyenletekre, a szimuláció az 1. ábrán látható barna domain-en futott. A lekerekített modellek esetén strukturálatlan, míg a szárny profillal ragasztható modellek esetén strukturált hálón futott a szimuláció, minden esetben 5 000 000 elemszám közelében.

A második lépésben a (3) - (6) BRE egyenletek voltak megoldva egy kutatócsoporton belül fejlesztett FreeFEM [8] kód segítségével, ennek a tartományai is látható az 1. ábrán, zöld színnel.

Az alapáramlás kiszámítása után, az előzőhöz hasonlóan a (12) BiGlobal egyenletet is egy kutatócsoporton belül fejlesztett FreeFEM [8] kód segítségével oldottuk meg.

3. Eredmények

Elsőként azt vizsgáltuk, hogy a lekerekítések milyen hatással vannak az MVG által generált örvények amplitúdójára, ehhez a (7) és (8) egyenletek segítségével kiszámoltuk az amplitúdók evolúcióját az áramlás során. Ehhez három esetet szimuláltunk a (B) jelű eset az alap konfiguráció, aminek paramétere az 1. táblázatban láthatóak, az (FF) jelű eset jelöli az alapeset lekerekített változatát, még az (FA) jelöli a szárnyprofillal ellátott és lekerekített MVG-t, ezek láthatóak a 2. ábrán.



2. ábra – Örvényamplitúdók lekerekített MVG-k mögött (a) – integrál módszerrel (b) – differenciál módszerrel számítva

Az ábrán jól látható, hogy a lekerekítés az integrált örvényamplitúdó esetén nagy hatással van, még a differenciális esetben alig csökkenti a maximális amplitúdót. A tranzíciós Reynolds-számokat megnézve az látszik, hogy az amplitúdó ugyan csökken, de ez a stabilizáló hatást elfogadható mértékben befolyásolja. Ezzel ellentétben a két lekerekített esetet nézve az látszik, hogy a szárny profillal ellátott esetben mind az amplitúdó mind pedig Re_{Tr} már érzékelhető mértékben csökken.

	(B)	(FF)	(FA)
$Re_{Tr} (-)$	1623	1596	1542

2. táblázat – A tranzíciós Re lekerekített esetben

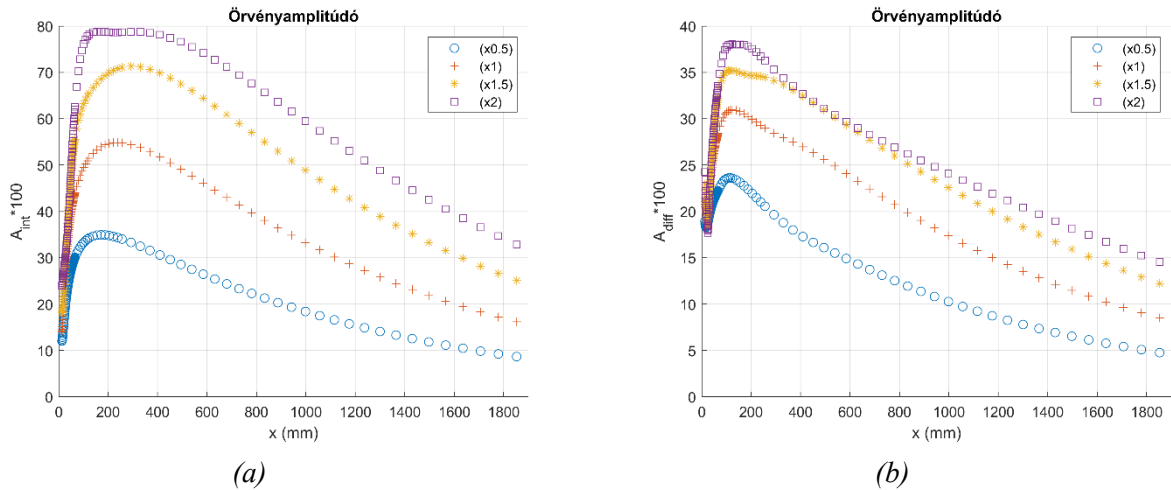
Az egyik ok, ami miatt ez a jelentős romlás létrejöhet a már fentebb is említett következménye a szárnyprofil használatának, ami eltakarja az MVG egy részét, így kvázi egy kisebb MVG tud csak örvényeket generálni. Ennek vizsgálatára létrehoztunk négy további esetet, ahol az MVG magasságát (1 táblázat h paraméter, az MVG felső síkja és lemez közti távolság szárnyprofillal ellátott esetben is) a szárnyprofil

maximális vastagságának $N/2$; $N \in [0; 4]$ -vel növeltem, egy egyenértékű magasságot keresve. Az így kapott eseteket a behelyettesítés után kapott értékek alapján neveztem el: $(x0.5)$, $(x1)$, $(x1.5)$ és $(x2)$.

Az előzőhöz hasonlóan az amplitúdókat és tranzíciós Reynolds-számokat vizsgálva arra a következtetésre juthatunk, hogy minél magasabb MVG-t használja egyre jobb eredményeket tudunk elérni.

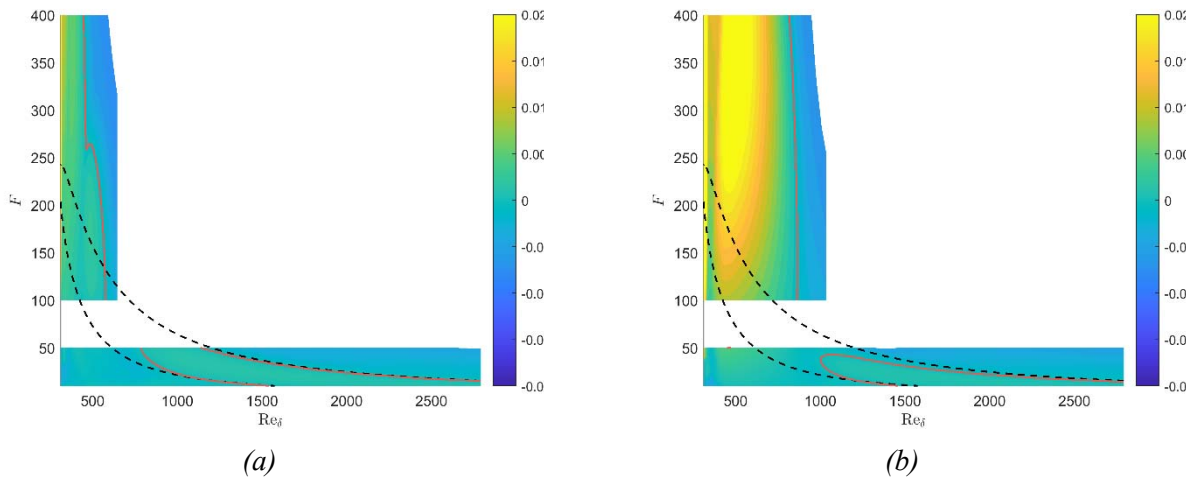
	$(x0.5)$	$(x1)$	$(x1.5)$	$(x2)$
$Re_{Tr} (-)$	1575	1662	1772	1866

3. táblázat – A tranzíciós Re szárnyprofilos esetben



3. ábra – Örvényamplitúdók szárnyprofilos MVG-k mögött (a) – integrál módszerrel (b) – differenciál módszerrel számítva

Ezzel a megoldással azonban hibát követnénk el, mivel a túl magas MVG-k lokálisan nagy zavarásokat okoznak, így hamar fel tudnak lépni másodlagos instabilitások, amik a kívánt hatással szemben gyorsítják az átmenetet. Ezt szemlélteti a 4. ábra.



4. ábra – Növekedési ráta $-\alpha_i$ a Reynolds-szám és a dimenziótlan frekvencia függvényében. Ahol $-\alpha_i > 0$ teljesül, instabil az áramlás. A piros vonalak az $-\alpha_i = 0$ görbék, a neutrális görbék. (a) – $(x1)$, (b) – $(x2)$ eseteket mutatja

A bal oldali (a) ábra mutatja a legjobb általunk vizsgált esetet, ebben az esetben növelni tudtuk a tranzíciós Reynold-számot anélkül, hogy a másodlagos instabilitások fellépnének.

4. Összefoglalás

Ebben a cikkben különböző MVG-kel ellátott határretek stabilitását vizsgáltuk az MVG-k gyakorlati hasznosíthatóságát szem előtt tartva. A használat okozta kopás hatásait lekerekítések segítségével szimuláltuk, az eredményeim alapján ennek a hatásai elhanyagolhatóak. Az egyik akadály a megvalósításhoz vezető úton az MVG-k rögzítése egy test felületén. Ennek kapcsán vizsgáltunk egy szárnyprofil csíkot, aminek a lapjára

additív technológiával lehetne MVG-ket gyártani. Ez a módosítás azonos MVG magasság esetén jelentősen csökkenteni tudja a módszer hatékonyságát, azonban találtunk olyan konfigurációt, amivel legalább olyan jó eredményeket tudunk elérni, negatív mellékhatások nélkül. További vizsgálatot igényel a szárnyprofil alakja és MVG-hez képesti elhelyezkedése, mivel ezen paraméterek befolyásolhatják a létrehozott örvényeket.

Köszönetnyilvánítás

A cikk megjelenését a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) K142675 kódszámú pályázat, valamint a CELSA/21/024 pályázat támogatta. A Budapest2 szuperszámítógéphez való hozzáférést köszönetet mondunk a Kormányzati Informatikai Fejlesztési Ügynökség HPC kompetenciaközpontjának.

7. Irodalomjegyzék

- [1] Y. S. Kachanov, *Physical mechanisms of laminar-boundary-layer transition*, Annual Review of Fluid Mechanics 26 (1994) 411–482.
- [2] Cossu C., Brandt L.: *On Tollmien–Schlichting-like waves in streaky boundary layers*, European Journal of Mechanics - B/Fluids, Volume 23, Issue 6, 2004, pp. 815-833.
- [3] Fransson J. H. M.: *Transition to Turbulence Delay Using a Passive Flow Control Strategy*, Procedia IUTAM, Volume 14, 2015, pp. 385-393.
- [4] Weingaertner A., Mamidala S. B., J. H. Fransson. *Application of Miniature Vortex Generators for Boundary Layer Transition Delay*, AIAA SCITECH 2023 Forum. January 2023, AIAA 2023-0097.
- [5] Sattarzadeh S.S., Fransson J.H.M. *On the scaling of streamwise streaks and their efficiency to attenuate Tollmien–Schlichting waves*. Exp Fluids 56, 58, 2015.
- [6] Szabó A, Nagy P.T., Vanierschot M., Paál Gy.: *Stability analysis of a streaky boundary layer generated by Miniature Vortex Generators*. In: Proceedings of Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'22), 2022, pp. 128-135
- [7] J. van Ingen, *The en method for transition prediction. historical review of work at tu delft*, in: AIAA paper 2008-3830, 2008
- [8] F. Hecht, *New development in freefem++*, Journal of Numerical Mathematics 20 (2012) 251–266.