

Miniatűr örvénygenerátorok vizsgálata áramvonalas testek veszteségcsökkentésére

Investigation of Miniature Vortex Generators for drag reduction of aerodynamic bodies

SZABÓ András¹, PAÁL György²

^{1,2}Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar, Hidrodinamikai Rendszerek Tanszék
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. D épület 3. emelet
Tel.: 06-1-463-16-80
E-mail: aszabo@hds.bme.hu¹, paal@hds.bme.hu²

Abstract

Delaying the laminar-turbulent transition of the flow along aerodynamic bodies has a huge potential for friction drag reduction. The so-called Miniature Vortex Generators (MVGs) have been experimentally confirmed to be able to delay the transition to turbulence, as they can attenuate the growth of the Tollmien-Schlichting waves, but their optimal parameters are unknown. Thorough a parametric study of numerical simulations, it is shown that the efficiency of the previously used MVGs can be substantially increased.

Keywords: laminar-turbulent transition, drag reduction, miniature vortex generator, flow stability

Kivonat

A lamináris-turbulens átmenet késleltetésével áramvonalas testek esetén jelentősen csökkenthető a súrlódási ellenállás. Az ún. miniatűr örvénygenerátorok kísérletileg igazoltan képesek késleltetni a turbulencia kialakulását a Tollmien-Schlichting hullámok csillapításával. Egy numerikus szimulációkkal végzett paramétertanulmány keretében megmutatjuk, hogy a korábban vizsgált örvénygenerátorok hatásossága jelentősen növelhető.

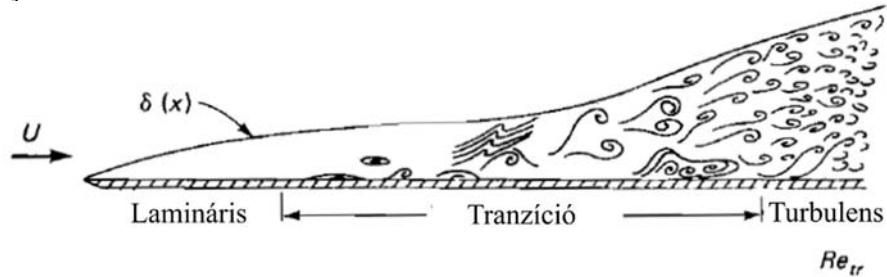
Kulcsszavak: lamináris-turbulens átmenet, áramlási veszteségcsökkentés, miniatűr örvénygenerátor, áramlások stabilitása

1. Bevezetés

Óriási mennyiségű energia fordítódik áramlási ellenállás leküzdésére a közlekedésben. Áramvonalas testek esetén az ellenállás erő főként a test mentén fellépő súrlódási erőből származik. A súrlódási erő a határrétegben lép fel, ami a zavartalan áramlás és a test fala közti átmeneti régió. Ahogy a belépő éltől kezdődően fejlődik a határréteg, az kezdetben lamináris, majd ahogy az áramlás irányában haladva a test menténvastagszik, bizonyos távolság után turbulens lesz. Ezt a folyamatot az 1. ábra illusztrálja. Ez a veszteségek szempontjából azért fontos, mivel a turbulens áramlásban az ellenállás erő egy nagyságrenddel nagyobb, mint egy laminárisban. Ebből következik a felismerés, hogy a lamináris-turbulens átmenet késleltetésével az ellenállás erő jelentősen csökkenthető.

Áramvonalas testek mentén alacsony turbulenciaszint esetén, ami jellemző repülési körülménynek számít, a lamináris-turbulens átmenet az ún. Tollmien-Schlichting (TS) instabilitási hullámok növekedésén majd szétesésén keresztül történik meg. Számos módszerrel próbálkoztak a kutatók, hogy a TS hullámok növekedését megakadályozzák, és így a turbulencia kialakulását késleltessék, azonban gyakorlatban alkalmazható módszert nem sikerült kifejleszteni. Egy új, rendkívül ígéretes módszer a miniatűr örvénygenerátorok alkalmazása. Ezek a határrétegben áramlás irányú gyors-lassú sávokat hoznak létre, és az ezekben a sávokban létrejövő keresztirányú nyírás csökkenti a TS hullámok energiáját, így csillapítva azokat [1]. Az örvénygenerátorok hatásossága szélcsatorna kísérletekkel is igazolt [2], és a közelmúltban újabb kísérletek kezdődtek a gyakorlati megvalósítás céljából [3]. Azonban fontos megjegyezni, hogy a jelenleg TS

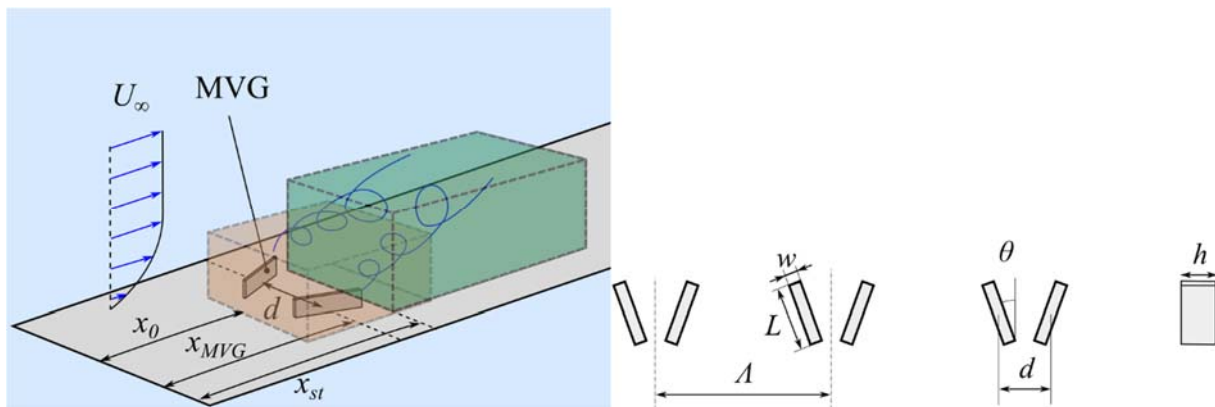
hullámok csillapítására használt örvénygenerátorok olyan ajánlások alapján lettek méretezve, amelyek lökeshullám-okozta leválás elkerülésére alkalmasak [4]. Ez alacsonyabb áramlási sebességre valószínűleg nem optimális. Továbbá fontos, hogy a szélcsatornakísérletek és a valódi áramlási körülmények közt jelentős eltérések lehetnek, amik befolyásolhatják az örvénygenerátorok hatásosságát. Ezt jól illusztrálja, hogy egy másik kutatócsoport, akik hasonló módszereket fejlesztettek nyílazott szárnyakra, azt tapasztalták, hogy a szélcsatornában jól működő technológia valódi repülési körülmények közt nem hatásos, ráadásul az eltérés oka sem derült ki. Ezért a kutatók az áramlási szimulációkon keresztül mélyebb megértését jelölték meg fő kutatási iránynak [5].



1. ábra. A lamináris-turbulens átmenet a határrétegben.

2. Modellezési módszerek

Egy síklap feletti, nyomásgradiens nélküli kialakuló összenyomhatatlan határréteget vizsgálunk. x , y , és z jelöli az áramlás, a falra merőleges irányt, u , v , valamint w az ezen irányú sebességkomponenseket, a nyomást pedig p . Az egyszerűség kedvéért a változókat kompakt módon a $\mathbf{q} = [u, v, w, p]^T$ vektorral is jelöljük. Amennyiben nem szerepel a mennyiség mellett mértékegység, dimenziótlan értékeket használunk; a dimenziótlanításhoz zavartalan áramlás sebességét (U), valamint a $\delta = \sqrt{x_0 \nu / U}$ határréteg hosszléptéket használjuk. A zavartalan áramlás sebessége $U = 6$ m/s, a kinematikai viszkozitás $1,4607 \cdot 10^{-5}$ m²/s, az x_0 változót később definiáljuk. A számításokat levegőre végeztük el, amelynek sűrűsége 1,2 m/s. A konfiguráció a 2. ábrán látható. Az örvénygenerátorok az idealizált síklap belépő élétől x_{MVG} távolságra helyezkednek el párokban. A párok közti távolság Λ , a páron belüli távolság d , és az áramlással bezárt szögük θ . Az örvénygenerátorok magassága, szélessége, valamint hossza rendre h , w valamint L . A paraméterek az 1. táblázatban találhatóak, ezek megfelelnek a Sattarzadeh és Fransson [6] által kísérletileg vizsgált C02 konfigurációnak. Ehhez képest változtattuk az örvénygenerátor paramétereit a paramétertanulmány során.



2. ábra. A vizsgált konfiguráció

Az örvénygenerátor paramétereit

1. táblázat

Λ (mm)	d (mm)	h (mm)	w (mm)	L (mm)	θ (°)	x_{MVG} (mm)	x_0 (mm)	x_{st} (mm)	$x_{1,CFD}$ (mm)
13	3,25	1,3	0,3	3,25	9	222	212	235	240

A probléma vizsgálatánál lineáris modális stabilitásvizsgálatot alkalmaztunk. Ekkor a teljes \mathbf{q} mezőt egy \mathbf{Q} egyensúlyi megoldásra (lamináris alapáramlás) és \mathbf{q}' perturbációk összegére bontjuk, és a két problémát

külön kezeljük. Az alapáramlás számítása két részből áll: az örvénygenerátor körüli részből, valamint a határréteg alvízoldali részből. Az örvénygenerátor körül 3D CFD számítással számoljuk ki az áramlást, ANSYS CFX szoftverrel, teljesen strukturált hálón. Ezt az 1. ábrán a barna doboz jelöli: a tartomány kezdete x_0 , a tartomány vége $x_{1,CFD}$. A CFD számítás peremfeltételeiről további információ az [7] hivatkozásban található. Az alapáramlásban a gyors-lassú zónák fejlődését az ún. határrégió-egyenlettel számítottuk, ami a határrétegegyenlet, de z irányban is a határréteg skálázást feltételezzük. Az egyenlet megoldásának részletei megtalálhatók a korábbi munkánkban [7].

Az áramlás stabilitását az ún. BiGlobális stabilitási egyenletekkel számítottuk. Ezeknél az egyenleteknél elhanyagoljuk az alapáramlás változását, így a megoldást

$$\mathbf{q}' = \hat{\mathbf{q}}e^{i(\alpha x - \omega t)} \quad (1)$$

alakban keresve, az instabilitásokat lokális haladó hullámok összegeként írjuk le. Az egyenletben α a hullámszám, ω a körfrekvencia, i a képzetes egység. Térbeli stabilitásvizsgálatot alkalmazva, ω valós és bemenő paraméter, α komplex sajátérték, amire a problémát megoldjuk. α valós része (α_r) a hullámszám, képzetes részének (α_i) ellentettje pedig a térbeli növekedési ráta. Az így kapott egyenletek alapja és megoldási módja megtalálható korábbi publikációinkban [7].

Minden egyes konfiguráció esetén az instabilitási egyenletek megoldását két részre osztottuk. Az egyik rész a stabilizálandó TS hullámok számítását célozta. A másik rész az úgynevezett másodlagos instabilitásokat követte le. Ezek olyan instabilitási hullámok, amelyek nem megfelelően tervezett örvénygenerátorok esetén destabilizálják az áramlást és siettetik a turbulencia kialakulását.

Az áramlás (de)stabilizáló hatását az ún. N faktorial vevszük figyelembe:

$$N = \int_{x_a}^{x_b} -\alpha_i(\xi) d\xi \quad (2)$$

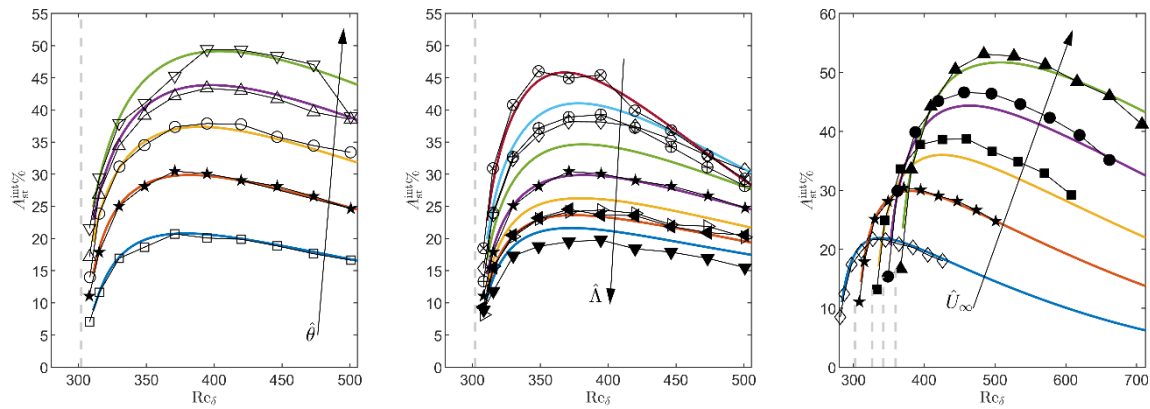
ahol ξ integrálási változó, x_a és x_b pedig úgy meghatározandó, hogy N értéke maximális legyen. Az N faktort minden frekvenciára és instabilitási módusra ki kell értékelni. A TS hullámok esetén az a pont a test mentén, ahol N=7 először előfordul, konzervatív becslést ad a turbulencia kialakulásának helyére. A másodlagos instabilitások esetén nem ismert hogy N milyen értékére alakul ki a turbulencia, így a legnagyobb N értékkel jellemezzük a destabilizálódást; N magas értékei elkerülendők.

3. Eredmények

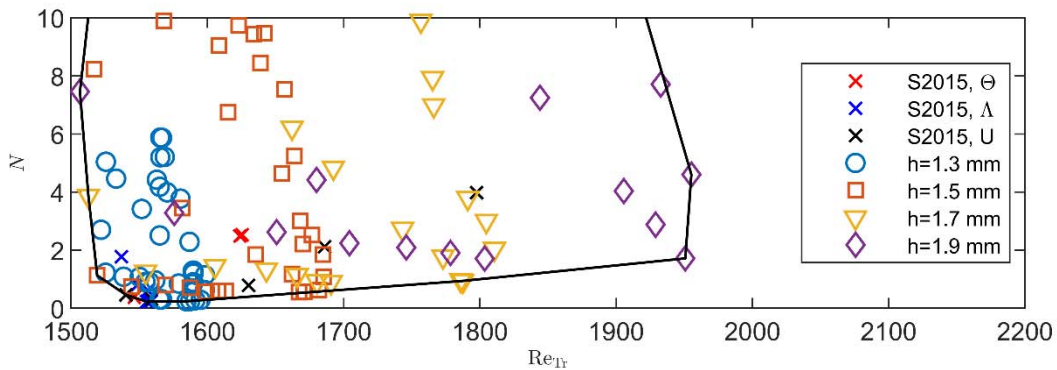
A 3. ábrán az örvényamplitúdó látható $Re_\delta = \sqrt{xU/\nu}$ mint dimenziótlan koordináta függvényében összehasonlítva szélcsatornamérésekkel; a pontos paramétereket lásd [6]. A bal, középső és jobb oldali ábrán a θ , Λ , valamint U paraméter változik; a folytonos vonalak a szimulációkat, a szimbólumok a méréseket jelölik. θ esetében az egyezés rendkívül jó, kivéve a legnagyobb szöget. Ebben az esetben a kezdeti eltérésre nincs magyarázat, azonban mivel később az egyezés jobb lesz áramlási irányban haladva, így ennek oka lehet mérési hiba. A tartomány végén az eltérés oka hogy a kísérletekben turbulens lett az áramlás a nagy szög okozta erős leválási buborék instabilitása miatt. Ez nincs modellezve az alapáramlás számításában, ezzel a stabilitásvizsgálat foglalkozik.

A Λ paraméter esetén az egyezés kevésbé jó, itt néhány esetben nagyobb eltérések tapasztalhatók. A kísérletezők szerint az együtt futó görbepárok (\diamond - \oplus , valamint \blacktriangleleft - \blacktriangleright) esetében a Λ periodicitás változtatásával kezdtek konstruktív valamint destruktív módon kölcsönhatni az örvénygenerátorok párok. A szimulációkban rendezett, folytonos trend figyelhető meg, az eltérés okára nem találtunk magyarázatot. Végezetül a sebesség (U) változtatása esetén megint rendkívül jó egyezést kapunk. Érdekeség, hogy nagy örvényamplitúdó (es sebesség) esetén az örvényamplitúdó csökkenése különbözik a kísérletekben és a számításokban. Ennek oka, hogy a határrégió-egyenletben az áramlás irányú második derivált el van hanyagolva, így az egyenlet kevésbé disszipatív. Összességében az egyezés a kísérletekkel rendkívül jónak mondható.

A BiGlobális stabilitási egyenleteket nem hasonlítottuk össze kísérletekkel, mivel a kísérletekben mért hullámok az összes instabilitási módust tartalmazzák és azok nem elkülöníthetők egymástól, így pontos kvantitatív összehasonlítás nem lehetséges [8]. A kódokat szakirodalmi eredményekkel verifikáltuk [9].



3. ábra. Az örvényamplitúdó $Re_\delta = \sqrt{xU}/\nu$ függvényében – összehasonlítás a kísérletekkel [6]. A ábrákon az alábbi paraméterek vannak változtatva balról jobbra haladva: szög, periodicitás, megfűvási sebesség. A szimbólumok a méréseket, a folytonos vonalak a kísérleteket jelölik



4. ábra. A szimulációk értékelése a tranzíció-késleltetés (Re_{Ti}) és a másodlagos instabilitás N faktor függvényében. A folytonos vonal a pontok konvex burkolója.

A 4. ábrán láthatóak a paramétertanulmány eredményei. Az x-tengelyen a tranzíciós Reynolds-szám látható – ez minél nagyobb, annál jelentősebb a veszteségcsökkentés. Az y-tengelyen a másodlagos instabilitások N faktora látható – ez minél kisebb, annál kevésbé valószínű, hogy az örvénygenerátor gyorsítja a turbulencia kialakulását. A paramétertanulmányban h értéke 1,3, 1,5, 1,7 é 1,9 mm volt, ezen kívül d/Λ értékei [0,2, 0,35, 0,5, 0,65, 0,8] voltak, valamint Λ értéke 7 és 26,5 mm közt változott 3,25 mm lépésközzel. Így a paramétertanulmány 140 szimulációból áll, ami két nagyságrenddel nagyobb a korábbi tanulmányokhoz képest [8]. A folytonos vonal a pontok konvex burkolója: ennek jobb-alsó sarka tekinthető a pareto frontnak. Látható, hogy az x-szel jelölt kísérletekhez képest jelentősen sikerült javítani az örvénygenerátorok teljesítményét: nem csak a tranzíciós Reynolds-számot sikerült jelentősen megnövelni, hanem még a másodlagos instabilitások növekedését is sikerült csökkenteni. A jobb teljesítményű örvénygenerátorok paraméterei közelítőleg a következők: $d/\Lambda = 0,5$ valamint $\Lambda/h = 15$. Ez értékek alapján a későbbi, több változót figyelembe vevő paraméter vizsgálatok már az optimumhoz közelebb eső örvénygenerátorokkal foglalkozhatnak.

4. Összegzés

Ebben a tanulmányban olyan örvénygenerátorokat vizsgáltunk numerikusan, amelyek segítségével áramvonalas testek mentén a lamináris-turbulens átmenet kitolható, és az áramlási veszteség jelentősen csökkenthető. A vizsgálatokat lineáris stabilitásvizsgálattal végeztük, amelyet hatékony modellezési technikákkal kombinálva lehetőség nyílt egy széleskörű paramétertanulmányra. A modellezési módszeren belül az örvényamplitúdót szélcsatorna mérésekkel hasonlítottuk össze, és jó egyezést találtunk. A paramétertanulmány során sikerült javítani az örvénygenerátorok hatásosságát, és ajánlást tenni ($d/\Lambda = 0,5$, $\Lambda/h = 15$) későbbi részletesebb vizsgálatokhoz.

A technológia továbbfejlesztéséhez szükséges az elhanyagolt fizikai hatásokat (nyomásgradiens, görbület, kompresszibilitás, bizonytalanságok) pontosabb modellekkel figyelembe venni. Ezen kívül fontos feladat az örvénygenerátor közelében az áramlás stabilitásának vizsgálata, mivel a jelenlegi vizsgálatban csak az örvénygenerátor alvázoldáinak stabilitását vizsgáltuk.

Köszönetnyilvánítás –

A cikk megjelenését a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) K142675 kódszámú pályázat támogatta, valamint a CELSA/21/024 pályázat támogatta. A kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-3-II-BME-112 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. A Budapest2 szuperszámítógéphez való hozzáférést köszönetet mondunk a Kormányzati Informatikai Fejlesztési Ügynökség HPC kompetenciaközpontjának.

Irodalmi hivatkozások

- [1] 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.
- [2] Fransson J. H. M.: *Transition to Turbulence Delay Using a Passive Flow Control Strategy*, Procedia IUTAM, Volume 14, 2015, pp. 385-393.
- [3] 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.
- [4] Shahinfar S., Fransson J., Sattarzadeh S., Talamelli A. *Scaling of streamwise boundary layer streaks and their ability to reduce skin-friction drag*. Journal of Fluid Mechanics, 733, 2013, pp. 1-32.
- [5] Saric W. S., West D. E., Tufts M. W., and Reed H. L.: *Experiments on Discrete Roughness Element Technology for Swept-Wing Laminar Flow Control*. AIAA Journal 57:2, 2019, 641-654
- [6] 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.
- [7] 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
- [8] Siconolfi L., Camarri S., Fransson J.: *Stability analysis of boundary layers controlled by miniature vortex generators*. Journal of Fluid Mechanics, 784, 2015, pp. 596-618
- [9] Martín J.A., Paredes P.: *Three-dimensional instability analysis of boundary layers perturbed by streamwise vortices*. Theor. Comput. Fluid Dyn. 31, 2017, pp. 505–517