

## **AKTÍV RÁCS KELTETTE TURBULENCIA JELLEMZŐINEK MEGHATÁROZÁSA HŐDRÓTOS ADATOK ALAPJÁN**

Szaszák Norbert – Szabó Szilárd – Bencs Péter

**Absztrakt:** Jelen tanulmányban a közel izotróp, homogén rács-turbulencia turbulens paramétereinek meghatározásra szolgáló összefüggéseket mutatjuk be. Szélcsatornába beépített turbulencia generáló rácsokat alkalmaznak azért, hogy közel izotróp, homogén, elhaló turbulenciát hozzanak létre. Az ilyen áramlások segítségével olyan mérések végezhetők, amelyeknél elvárt követelmény a meghatározott turbulens paraméterekkel bíró áramlás. Ebből adódóan elsőként az így előállítható turbulencia feltérképezése szükséges. E célból az állandó hőmérsékletű légsebességmérő technikát alkalmaztuk. Az általunk fejlesztett aktív rács után az így kimért pillanatnyi sebesség-értékeket a MATLAB® programban írt script segítségével dolgoztuk fel. A script segítségével többek között a következő mennyiségeket határozhattuk meg: egy- és háromdimenziós turbulencia intenzitás, turbulens kinetikus energia, izotrópia-arány, integrál hosszskála, turbulens energiaspektrum, disszipációs ráta, Kolmogorov-skálák, Taylor-mikroskála, Turbulencia-Reynolds szám, Taylor-Reynolds-szám. Ezek kiszámítási módja mellett a fejlesztett aktív rács különböző beállításai esetén mért alapáramlás irányú energiaspektrumokat is bemutatjuk.

**Abstract:** This paper deals with the determination of several turbulence quantities in case of nearly isotropic, homogeneous grid turbulence. Grids placed in wind tunnels upstream of the test section are used to produce flow with roughly isotropic and homogeneous, decaying turbulence. Such flows then can be applied for measurements which demand flow with predetermined turbulent properties. Therefore first, the characterization of the achievable turbulence has to be carried out. For this purpose, the so-called constant-temperature anemometry was applied. The time series of instantaneous velocity-component samples downstream of a novel type active grid were processed in MATLAB® script made by us for this purpose. By means of the script, the following turbulent properties can be derived: turbulence intensity in one and three dimensions, turbulence kinetic energy, isotropy ratio, integral time-scale, turbulence energy spectra, dissipation rate of turbulent kinetic energy, Kolmogorov microscales, Taylor microscale, Turbulence Reynolds number, Taylor-Reynolds number. The longitudinal energy spectra at different setups of our novel active grid is presented, as well.

**Kulcsszavak:** rács turbulencia, izotróp turbulencia, hődrótos anemometria, energia spektrum, Kolmogorov mikroskála

**Keywords:** grid turbulence, isotropic turbulence, hot-wire anemometry, energy spectrum, Kolmogorov microscales

### **Bevezetés**

A természetben és az ipari folyamatokban előforduló áramlások jelentős része turbulens. Ezen áramlások finomstruktúrájának megismerése és leírása laboratóriumi mérésekkel és numerikus szimulációkkal lehetséges. Az utóbbi esetén is elengedhetetlen a számítási eredmények mérési adatokkal való validálása. A mérések egyik fontos eszköze a szélcsatorna, ahol alapfeladat különböző turbulens tulajdonságokkal bíró áramlások létrehozása. Szélcsatorna-áramlások esetén turbulencia létrehozására alkalmasak az úgynevezett turbulencia-generáló rácsok. Ezek passzív vagy aktív típusúak lehetnek. A passzív rácsok mozgó elemek nélküli szerkezetek, amelyekkel viszonylag csak kismértékben növelhető a turbulencia (Kamruzzaman et al., 2013). Jóval nagyobb intenzitású és szélesebb skálájú

turbulencia érhető el az aktív rácsokkal (Makita, 1991), amelyek (külső energiaforrással, egyedi vezérléssel) mozgatott alkatrészekkel okoznak „zavart” az áramlásban. Ezek azonban bonyolult felépítésűek, ebből adódóan igen költséges szerkezetek. A jelenleg alkalmazott, bonyolult felépítésű eszközök mellett (Makita, 1991; Kang et al., 2003) egy költségghatékony megoldás lehet az általunk kifejlesztett szerkezet (Szaszák et al., 2017/1), mely a rácselemek mozgatásához (mozgó határréteg) az alapáramlás mechanikai energiájának egy részét hasznosítja. A rács fejlesztéséhez kapcsolódóan kidolgoztunk egy számítási eljárást, amely a mérési adatok alapján a létrehozott turbulencia – irodalomban ismert – lehető legtöbb jellemző paraméterét szolgáltatja. E számítás fő elemeit mutatjuk be, s illusztrációként az általunk kifejlesztett rács – a számítási eljárás segítségével kapott – jellemzőiből mutatunk be példát.

## 2. A turbulenciát leíró paraméterek

### 2.1. A turbulencia definíciója

A turbulencia tanulmányozásához elengedhetetlen a fizikai folyamatok világos és tömör meghatározása. Tsinober (2001) részletesen tanulmányozta és összegyűjtötte a turbulencia definíciójára vonatkozó meghatározásokat több kutató munkájából. A legtöbb előforduló leírás, megfogalmazás bizonytalan, például: „olyan mozgások, amelyekben szabálytalan ingadozás (keverés vagy örvénylő mozgás) figyelhető meg a fő áramlási irányra nézve” (Schlichting–Kestin, 1960); „A folyadék mozgás komplex és szabálytalan karakterisztikájú” (Bayly et al., 1988). A definíciószerű megfogalmazások közül az egyik legjobb Saffman-é (1981): „véletlenszerű kaotikus örvények”. Sajnos ez is meglehetősen ellentmondásos, mert a szavak, hogy véletlenszerű és kaotikus azt jelentenék, hogy a formális matematikai megoldás, amely feltétlenül determinisztikus, nem létezik. Talán a legpontosabb egyetlen rövid megfogalmazás arra, hogy mi a turbulencia az az, amit Bradshaw (2013) fogalmazott meg: „A Navier-Stokes egyenlet általános megoldása”. Az általános és rövid megfogalmazások után a napjainkban ismert, elfogadott leírás Tuoc-tól (2009) származik: „a system with a main cross flow containing secondary intermittent streaming, at some angle to the direction of the main flow and with which it interacts.” (magyarra nagyjából a következőképp fordítható le: egy olyan, fő keresztáramlással bíró rendszer, amelyben a keresztáramlás másodlagos váltakozó áramlást tartalmaz, s ez valamilyen szöveget zár be a főáramlás irányával, továbbá kölcsönhatásban is áll vele.).

### 2.2. A turbulencia kiértékelése

A fentiekből is jól látszik, hogy a turbulencia meghatározása nem egyszerű feladat, kiértékelése a mérési eredményekből összetett számítást igényel. Az alábbiakban megkíséreljük összefoglalni a turbulencia kiértékelésének főbb lépéseit. Az itt bemutatott számítási eljárást az általunk a szélcsatornába beépített turbulenciát generáló rács által létrehozott turbulens áramlás jellemzésére készítettük el. Méréseink során pontbeli méréseket végeztünk állandó hőmérsékletű hődrótos

méréstechnikával (CTA), kétdimenziós szondát használva, amellyel mérési pontonként, több kHz-es mintavételi frekvenciával gyűjtöttük be a pillanatnyi sebességek laterális ( $u$ ) és egy transzverzális ( $v$ ) komponenseit. Így egy-egy pontban megkaptuk az  $u$  és a  $v$  komponensek idősorát. A turbulens jellemzők meghatározásához ezeket az idősorokat használtuk fel, továbbá szakirodalmi ajánlások alapján a rácstól megfelelő (minimum 10 rácsállandónyi) távolságtól feltételeztük azt, hogy a lokális izotropia miatt a transzverzális sebességkomponensek szórásai megegyeznek:  $v_{std}=w_{std}$ . A továbbiakban e közelítést felhasználva vezettük le az összefüggéseket.

A turbulens kinetikus energia meghatározását mutatja be az (1) egyenlet:

$$k = \frac{1}{2} \cdot (u_{std}^2 + 2 \cdot v_{std}^2), \quad (1)$$

ahol:

$u_{std}$  a főáramlás irányú,  $v_{std}$  pedig az arra merőleges sebességkomponens szórásértéke.

Ez a mennyiség az egységnyi tömegű fluidum turbulens energiájára jellemző érték, tehát a nagyobb szórású idősor nagyobb turbulens energiájú áramlást jelez.

Az alapáramlást turbulencia szempontjából általánosságban jellemző érték a turbulencia fok, ami a szórás és az átlagsebesség arányából számítható. A szakirodalomban elterjedten használják az alapáramlás irányú turbulenciafokot, amelynek (2) a definíciós összefüggése:

$$T_u = \frac{u_{std}}{u_m} \cdot 100\%, \quad (2)$$

ahol:

$u_m$  az alapáramlás irányú sebességkomponens időátlagát jelenti.

Az áramlás mindhárom sebességkomponenséből számítható turbulenciafok esetén, definíció alapján a nevezőben az alapáramlás átlagsebessége szerepel, mivel az erre merőleges sebességkomponensek időátlagai nullák lennének. Így azt a (3) összefüggés írja le:

$$T_{u,v,w} = \frac{\sqrt{\frac{1}{3} \cdot (u_{std}^2 + 2 \cdot v_{std}^2)}}{u_m} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Az integrál időskála (ITS) az alapáramlás irányú sebességkomponens autokorrelációs függvényéből számítható. Ennek a számítására a (4) definíciós integrál-kifejezés szolgál:

$$ITS = \int_{t=0}^{t(u_{ac}=0)} u_{ac} dt, \quad (4)$$

ahol:

$u_{ac}$  az alapáramlás irányú sebességkomponens autokorrelációs értéke.

A (4) kifejezésben az integrálást a  $t=0$  s időpillanattól addig kell elvégezni, ameddig az autokorrelációs függvény ( $u_{ac}(t)$ ) először veszi fel a nulla értéket.

Az integrál hosszskála ( $ILS$ ) az áramlásban jelenlévő legnagyobb örvények méretére jellemző érték. Szélcsatorna-mérések esetén e mennyiség megközelítőleg a szélcsatorna belső terének átmérőjével közelíthető. Az integrál hosszskála meghatározására az integrál időskála és az alapáramlás átlagsebességének ismeretében az (5) összefüggéssel történik:

$$ILS = ITS \cdot u_m. \quad (5)$$

A turbulens áramlásban jelen lévő széles skálájú örvényeket a jellemző méretük szerint különböztethetjük meg. Az alapáramlás irányú és az arra merőleges sebességkomponens idősora Fourier transzformációval frekvencia-tartományba alakítható át, amelyet aztán spektrális teljesítmény-sűrűség függvénné alakíthatunk ( $PSD_u(f)$ ,  $PSD_v(f)$ ). Ez a függvény adja meg a turbulens áramlás jellemző energiaspektrumát az áramlásban jelen lévő frekvenciák függvényében a különböző dimenziókban. A szakirodalomban azonban a jóval többet mondó hullámszám ( $\kappa$ ) függvényében szokás ábrázolni az energiaspektrumot. A hullámszám arányos az áramlás egységnyi hosszúságú térrészében az adott skálájú (méretű) örvények számával, s kiszámításához a (6) kifejezést használtuk fel:

$$\kappa = \frac{2\pi}{u_m} \cdot f. \quad (6)$$

A (6) egyenlőségből adódóan a hullámszám dimenziója  $1/m$ .

A turbulens áramlásban jelen lévő különböző skálájú örvények közötti energiaspektrum eloszlásból igen fontos információkhoz juthatunk az adott turbulenciáról. Ezért az energiaspektrum egy kifejezetten fontos jellemzője a turbulenciának, amelyet a spektrális teljesítmény-sűrűség függvényből az alábbi (7) képlettel számíthatunk:

$$E_i(\kappa) = \frac{u_m}{2\pi} \cdot HPSD_i(f), \quad (7)$$

ahol:

$$i = \{u, v\}.$$

A háromdimenziós energiaspektrum-függvény ( $E_{3D}(\kappa)$ ) kiszámítása – az izotrópiát felhasználva – a (8) összefüggéssel lehetséges:

$$E_{3D}(\kappa) = E_u(\kappa) + E_v(\kappa) + E_w(\kappa). \quad (8)$$

A turbulens kinetikus energia disszipációs rátája ( $\varepsilon$ ) szintén a turbulencia fontos jellemzője, hiszen ennek segítségével határozhatjuk meg többek között a Kolmogorov-skálákat, amelyek a turbulens áramlásban jelen lévő legkisebb, disszipatív örvényeket jellemző mennyiségek. Ennek meghatározása az energiaspektrum ismeretében a (9) integrál-kifejezéssel lehetséges:

$$\varepsilon = 2 \cdot \nu \cdot \int_0^{\infty} (E_{3D}(\kappa) \cdot \kappa^2) d\kappa. \quad (9)$$

A disszipációs ráta ismeretében az  $\eta$  Kolmogorov hosszskála–amely az áramlásban jelen lévő legkisebb örvények méretére jellemző- meghatározására a (10) képletet szolgál:

$$\eta = \left( \frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}, \quad (10)$$

ahol:

$\nu$  az adott közeg kinematikai viszkozitási tényezője.

Az összefüggés alapján belátható, hogy e mennyiség univerzális, csupán a viszkozitás és a disszipációs ráta függvénye. Laboratóriumi szélcsatorna-mérések során, megfelelően nagy Reynolds-számú turbulenciájú áramlások esetén értéke  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  m között alakul.

Abban az esetben, amikor az áramlás Reynolds-száma eléggé nagy, a turbulencia energiaspektrumában ( $E_{3D}(\kappa)$ ) egy ún. tehetetlenségi tartomány figyelhető meg ( $E_{in}(\kappa)$ ), ahol is a nagyméretű örvények egyre kisebbekre esnek szét, de a méretek miatt a tehetetlenségi erők dominálnak a disszipatív erők mellett, így a disszipáció elhanyagolható. Erre a tartományra ( $ILS^{-1} \ll \kappa \ll \eta^{-1}$ ) jellemző az energiaspektrum-görbe  $-5/3$ -os kitevőjű meredeksége. Szakirodalmi ajánlás alapján (Kundu–Cohen 1990) – e tartomány a (11) összefüggéssel közelíthető:

$$E_{in}(\kappa) \approx A \cdot \varepsilon^{2/3} \cdot \kappa^{-5/3}, \quad (11)$$

ahol:

$A=1,5$  értékű, univerzális állandó.

Ahhoz, hogy a különböző mérőhelyeken vizsgált áramlások mérési eredményei összehasonlíthatóak legyenek, érdemes dimenzió-mentesíteni az egyes mennyiségeket. Ilyen módszert alkalmaznak például az energiaspektrumok esetén. A (12) összefüggés a Kolmogorov-hosszskálával dimenzió-mentesített hullámhosszt definiálja:

$$\kappa^* = \kappa \cdot \eta. \quad (12)$$

Az energiaspektrum-függvény dimenzió-mentesítéséhez azt olyan mennyiséggel kell elosztani, amelynek dimenziója megegyezik a függvény dimenziójával., Ezt a következő, (13) összefüggéssel valósítottuk meg:

$$E_{3D}^* = \frac{E_{3D}}{(\nu^5 \cdot \varepsilon)^{\frac{1}{4}}}. \quad (13)$$

A dimenzió-mentesített energiaspektrumra, s annak részeire mutattunk be példát a Szaszák et al., (2017/2) közleményben.

Az előzőekben kiszámolt mennyiségeket felhasználva a következő, turbulenciát leíró jellemzőket is meghatározhatjuk. Az áramlásban lévő nagyobb örvényeket jellemző hosszskála ( $LS$ ) definíciója Pope (2000) könyve alapján a következő:

$$LS = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}. \quad (14)$$

A nagy örvényeket jellemző hosszskála ismeretében számítható a Taylor-mikroskála ( $\lambda_g$ ). Ez a skála egy olyan közbülső skála, amely azokra a – Komogorov-hosszskálától még nagyobb – örvényekre jellemző, amelyek dinamikájára már jelentős hatással van a fluidum viszkozitása. A Taylor-mikroskála a következő összefüggéssel számítható:

$$\lambda_g = \sqrt{10} \cdot \eta^{\frac{2}{3}} \cdot LS^{\frac{1}{3}}. \quad (15)$$

A Turbulencia-Reynolds-szám ( $Re_L$ ) arányos a nagy örvényeket jellemző hosszskála és a turbulens kinetikus energia négyzetgyökének szorzatával, továbbá behelyettesítve a (14) kifejezést, adódik a (16) egyenlőség:

$$Re_L = \frac{k^{\frac{1}{2}} \cdot LS}{\nu} = \frac{k^2}{\varepsilon \cdot \nu}. \quad (16)$$

A  $Re_\lambda$  Taylor-Reynolds-szám a Taylor-mikroskálára vonatkoztatott dimenziómentes mennyiség. Rács-turbulencia esetén talán az egyik legfontosabb mennyiség, mivel ennek nagysága alapján lehet következtetni a turbulencia kifejllettségére. E mennyiség értéke kapcsolatban áll az energiaspektrumban megfigyelhető tehetlenségi-tartomány szélességével: minél nagyobb  $Re_\lambda$  értéke, annál szélesebb hullámszám-inervallumot ölel át az úgynevezett tehetlenségi tartomány. Cél tehát a teljesen kialakult turbulencia elérése, amikor is az áramlásban

a (nyomáson kívüli) fizikai mennyiségek gradiensei nullák. Kiszámítása Pope (2000) könyve alapján a (17) összefüggéssel lehetséges:

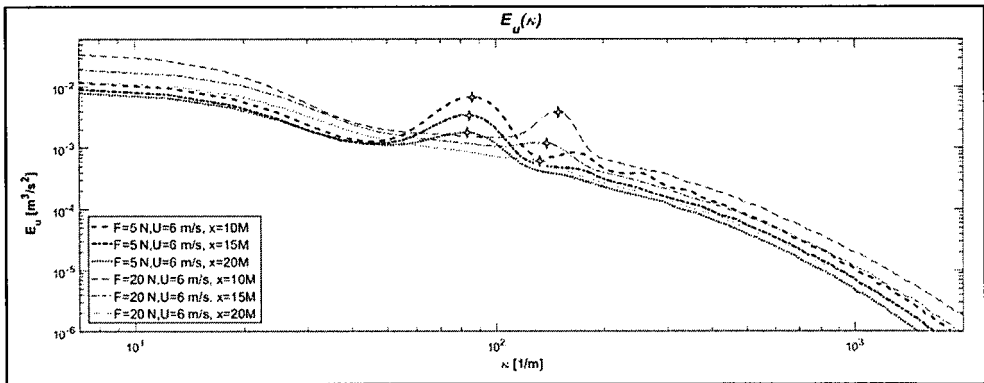
$$Re_\lambda = \left( \frac{20}{3} \cdot Re_L \right)^{1/2}. \quad (17)$$

Látható tehát, hogy a Taylor-Reynolds szám a Turbulencia-Reynolds-szám négyzetgyökével arányos. A  $Re_\lambda$  Taylor-Reynolds-számnak az általunk vizsgált turbulenciagenerátor után való változását a Szaszák et al., (2017/2) közleményben részletesen ismertettük.

### 3. Eredmények

A fenti számítások végrehajtására a MATLAB programcsomag felhasználásával számítógépi programot, scriptet állítottunk össze. Ennek segítségével a vizsgált turbulenciagenerátorral létrehozott áramlás turbulens paramétereinek sokoldalú kiértékelése vált lehetővé. Példaként a szélcsatornába beépített, általunk kifejlesztett, szabályozható feszítettségű szalag-rácsot (Szaszák et al., 2017/1) követően kialakuló turbulencia alapáramlás irányú energiaspektrumát mutatjuk be az 1. ábrán. A spektrumon bemutatott eredményekhez a méréseket a szélcsatorna középvezetékében  $U=6$  m/s referenciasebesség esetén, két különböző feszítőerő-beállításnál ( $F=\{5, 20\}$  N), a rács után  $x=\{10, 15, 20\}$  M távolságra végeztük el, ahol M a rácsállandót jelöli, ami esetünkben  $M=25$  mm.

12. ábra: Alapáramlás-irányú energiaspektrum



Forrás: A szerző saját szerkesztése.

Az energiadiagram alapján számos megállapítás tehető. A tengelyek dimenziói alapján megállapítható, hogy egy-egy görbe alatti terület nem más, mint a fajlagos turbulens kinetikus energia (alapáramlás irányú komponense). Ebből adódóan egy-egy mérési esetben annál nagyobb a fajlagos turbulens kinetikus energia, minél nagyobb a görbe alatti terület. Mivel a rács turbulencia jellemzően úgynevezett elhaló turbulencia, ezért a rácsból távolodva folyamatosan csökkennie kell a turbulens

kinetikus energiának. Ez a tendencia megfigyelhető mind az  $F=5$  N, mind pedig az  $F=20$  N feszítettségű szalagoknál is: az  $x$  koordináta növekedésével együtt csökken a görbék alatti terület. Továbbá az is megfigyelhető, hogy a vizsgált referenciasebességen a nagyobb feszítettségű rács nagyobb mértékű turbulenciát hozott létre a kevésbé megfeszített szalagokat tartalmazó mérési esethez képest. Így tehát belátható, hogy a szalagok feszítésével együtt a turbulens kinetikus energia is változik, tehát kapcsolat figyelhető meg a két fizikai mennyiség között. Ez a későbbi kutatásaink során vélhetően előnyösen alkalmazható lesz a kívánt turbulenciájú áramlás előállításához. További fontos észrevétel, hogy adott feszítettség esetén a görbékben egy-egy lokális maximum jelenik meg (az ábrán csillag piktogrammal jelölve). Ez a maximum a távolság növekedésével csökken, a ráctól messzebb már kevésbé jellemző. E kiemelkedésnek az okai véleményünk szerint a szalagok belebegő mozgásából adódóan az áramlásba bizonyos frekvencián (frekvenciatartományban) bevitt örvények lehetnek, amelyek így a frekvenciájuknak megfelelő hullámszám környezetében az energiaspektrum nagyobb amplitúdóját, kiugrását eredményezik. Ezek mellett azonban azt is megfigyelhetjük, hogy a nagyobb feszítőerő esetén ez a lokális maximum a nagyobb hullámszámok felé eltolódik. Ennek magyarázata szintén levezethető az előzőekben leírtakból: nagyobb feszítettség esetén az alkalmazott szalagok vélhetően nagyobb frekvencián rezegnek (ezt a későbbiekben kívánjuk vizsgálni), így azokról nagyobb frekvenciával válnak le örvények, tehát nagyobb hullámszámnál jelentkezik a lokális amplitúdó-kiugrás a spektrumon.

#### 4. Következtetések

Szélcsatornában történő mérésekhez készülő turbulenciagenerátorok feladata adott minőségű turbulenciával rendelkező alapáramlás létrehozása. Ahhoz, hogy a különböző típusú turbulenciagenerátorokat minősíteni lehessen, fontos az általuk létrehozott áramlás finomsztruktúráját jellemző paraméterek meghatározása. Az általunk összeállított számítási eljárás – a CTA mérés technikával mérési pontonként meghatározott  $u$  és  $v$  sebességkomponensek felhasználásával – a mérési pontokban a turbulencia számos meghatározó jellemzőjének kiszámítását tette lehetővé. A mérések és számítások eredőjeként a jellemzők térbeli eloszlása is meghatározhatóvá vált. Kiemelendő az eljárás komplexitása, azaz jelentős számú jellemző érték előállítása. Ezek segítségével különböző szempontok szerint jellemezhető a turbulens sebességtér és áttételesen az azt előállító turbulenciagenerátor minősége is. A számítások elvégzésére MATLAB® script készült. A kialakított számítási eljárást sikerrel alkalmaztuk különböző típusú generátorok jellemzésére és összehasonlítására. Példaként itt az általunk fejlesztett (Szaszák et al., 2017/1) aktív turbulenciagenerátor **alapáramlás irányú energiaspektrumát** mutattuk be adott alapáramlási sebesség, két feszítőerő és három különböző ráctól való távolság esetén. Az elemzés segítségével lehetőség volt megismerni a kialakuló turbulencia több fontos jellemzőjét, és azoknak a változtatott paraméterektől való függésének törvényszerűségeit.



## Köszönetnyilvánítás

A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

## Irodalomjegyzék

- Bayly, B. J., Orszag, S. A., Herbert, T. (1988): Instability mechanisms in shear-flow transition. *Annual review of fluid mechanics*, 20 (1): 359–391.
- Bradshaw, P. (2013): *An introduction to turbulence and its measurement: thermodynamics and fluid mechanics series*. Elsevier.
- Kamruzzaman, Md., Djenidi, L., Antonia, R. A. (2013): Behaviours of Energy Spectrum at Low Reynolds Numbers in Grid Turbulence. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering, World Academy of Science, Engineering and Technology*, 7 (12): 1385–1389.
- Kang, H. S., Chester, S., Meneveau, C. (2003): Decaying turbulence in an active-grid-generated flow and comparisons with large-eddy simulation. *Journal of Fluid Mechanics*, 480 (1): 129–160.
- Kundu, P. K., Cohen, L. M. (1990): *Fluid mechanics*. Academic Press, California.
- Makita, H. (1991): Realization of a large-scale turbulence field in a small wind tunnel. *Fluid Dynamics Research*, 8 (1): 53–64.
- Pope, S. B. (2000): *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Saffman, P. G. (1981): Vortex interactions and coherent structures in turbulence. *Transition and turbulence*: 149–166.
- Schlichting, H., Kestin, J. (1960) [Trans.]: *Boundary layer theory*, 4th ed. New York, MacGrawHill.
- Szaszák N., Bencs P., Szabó Sz. (2017/1): Experimental investigation of the effects of tensile force on the characteristics of turbulence downstream of a novel active grid. *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II: Proc. of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies*, CRC Press/Balkema, (2017), 261–266.
- Szaszák N., Szabó Sz., Bencs P. (2017/2): Determining turbulent properties in grid generated turbulence based on hot-wire data. *Proc. of the Conference on Innovative Technologies: IN-TECH 2017*. Ljubljana, 73–76.
- Tsinober, A. (2001): *An informal introduction to turbulence*. Springer Science & Business Media.
- Tuoc, T. K. (2009): *A theory of turbulence, Part 1: Towards solutions of the Navier-stokes equations*. arXiv preprint: 0910.2072.