

# HÍD METSZET ÁRAMLÁSTANI VIZSGÁLATA NAGY-ÖRVÉNY SZIMULÁCIÓVAL

Lohász Máté Márton\* - Lajos Tamás\*\*

## RÖVID KIVONAT

Az M8-as Duna-híd hosszirányban ismétlődő szeletének nagy-örvény szimulációját végeztük el Fluent 6.1.22 általános célú kereskedelmi szoftverrel. A BME Áramlástan Tanszékén részletes szélcsatorna mérés sorozatot végeztek egy híd szekció modellen. A turbulens áramkép rövid időbeli átlagolásával kapott számítási eredményeket a mérés eredményeivel összevetve jó egyezést találtunk a nyomáseloszlásban a híd alatt elhelyezkedő nagy depressziós tartománytól eltekintve. Ugyancsak jó egyezést kaptunk a hídról leváló örvények által okozott szélterhelés ingadozás frekvenciájában és amplitúdójában. Az átlagolt és időfüggő sebesség, az örvény és nyomásmezők vizsgálatából megállapítottuk, hogy mi befolyásolja leginkább a híd egészére ható időfüggő erőhatást.

## 1. BEVEZETÉS

Hidak szilárdságtani tervezésénél a híd statikus terhelése mellett nagyon nagy jelentősége van a dinamikus (időfüggő) terhelésnek is. A BME Áramlástan Tanszékén mérésorozatot végeztek az M8-as Duna-híd egy 1:70 léptékű szekció modelljén ezeknek az erőknek a meghatározására. A mérési módszer azonban csak korlátozott lehetőséget nyújt az áramlás mélyebb megértéséhez, az erőingadozások okának feltárására. Így a híd körüli áramlás nagy örvény szimulációját is elvégeztünk, amely lehetőséget adott arra, hogy az ingadozások okait feltárjuk.

## 2. A VIZSGÁLT ÁRAMLÁS

### 2.1. A számítási tartomány

A modell kialakítása során törekedtünk a szélcsatorna kísérletekben [4] használt 1:70 léptékű modellhez való legnagyobb mértékű hasonlóság elérésére. Itt csak a modellek közötti csekély eltérést ismertetjük.

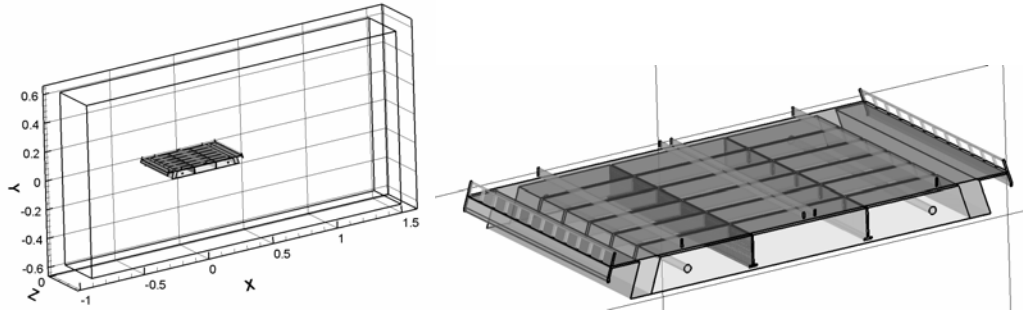
A kerékpárút mellett lévő korlát felső éle négyszög keresztmetszetű kör keresztmetszet helyett (1. ábra jobb oldala), az alsó, kisebb, áramlásirányú gerendákat I alak helyett az I rövidebb, vízszintes szárának szélességével megegyező szélességű hasábbal modelleztük.

---

\* okl. gépészmérnök, egyetemi tanársegéd, BME Áramlástan Tanszék

\*\* okl. gépészmérnök, a műszaki tudomány doktora, egyetemi tanár, BME Áramlástan Tanszék

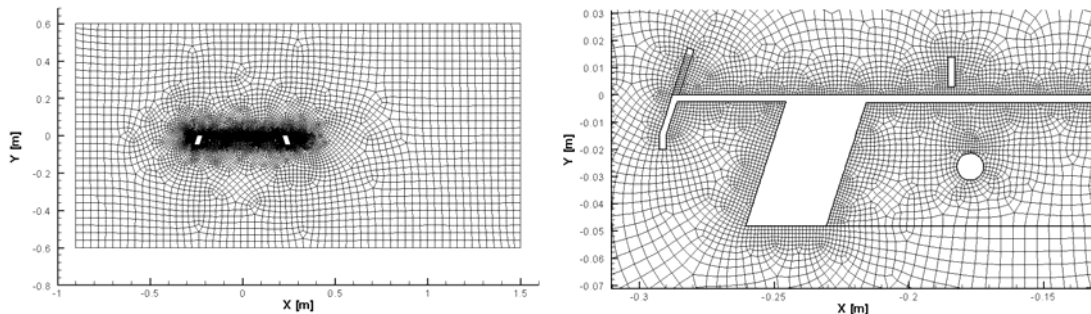
A számítási tartományt a körüláramlásokra irodalomban elfogadott irányelvek alapján választottuk. A számítási tartomány az 1. ábra bal oldalán, a híd geometriája az 1. ábra jobb oldalán látható.



1. ábra: A számítási tartomány és a híd geometriája

## 2.2. A numerikus megoldás

Az alkalmazott háló a hosszirányra merőleges síkban négyszög elemeket tartalmazó, strukturálatlan ezzel biztosítva, hogy a híd közelében 1 mm-es cellákat, a távlatban pedig 4 cm-es cellákat használhassunk (2. ábra), a turbulencia hosszléptékével összhangban. A híd nyomában is sűrűbb a háló a leváló örvények pontosabb számíthatósága érdekében. A blokk strukturált keresztirányú háló cella mérete 4 mm nagyságrendjébe esik. Ezzel a hálózási stratégiával az összes cellaszám 1.412.785. A hálózattal 7 körüli átlagos dimenziótlantávolságot biztosítunk, amely ha nem is optimális, de a korábbi tapasztalatok alapján ([7,8]) használható eredményt ad szabad nyíróréteg dominált áramlások esetén (amilyen a híd körüli áramlás is).



2. ábra: Az alkalmazott strukturálatlan háló

A híd alatt és felett a távlatot szimmetria peremfeltétellel modelleztük, keresztirányban periodikus peremfeltételt használtunk, melynek periódusa megegyezik a geometriai periodicitással. Fontos szempont emellett, hogy a két perióduson a turbulens mozgások korrelálatlanok legyenek, ez a hátrafelé néző lépcsőre vonatkozó irodalmi értékekkel összevetve (lásd például [6]) elégséges. A belépő peremfeltétel időben és térben állandó, 5 m/s sebességű áramlás, a kilépésre a Fluent-ben Outflow-

nak nevezett peremfeltételt használtunk. A falnál a csúszató feszültség meghatározására a logaritmikus és a lineáris sebességprofil kombinációját használjuk.

Az állandó sűrűségű és viszkozitású Navier-Stokes egyenletet a Fluent 6.1.22 cella központú, a változókat azonos helyen tároló („collocated”) a cellákat strukturálatlanul kezelő, a komponens egyenleteket egyenként sorban kezelő („segregated”) megoldójával végeztük. A mozgásegyenlet konvektív tagjának interpolálására másodrendű szélfelőli módszert használtuk, a nyomás interpolációjára a standard módszert. Időbeli diszkretizációra Gear másodrendű implicit módszerét használtuk. A sebesség-nyomás kapcsolatot a SIMPLE módszerrel [3] valósítottuk meg.

0,0002 sec-os állandó időlépéssel számoltunk, amely biztosította, hogy a számítási tartomány jelentős részében a CFL szám (közelítőleg hány cellát halad a folyadék egy időlépésben) értéke 1 alatt maradjon. Ez az irodalomban [2] javasolt érték.

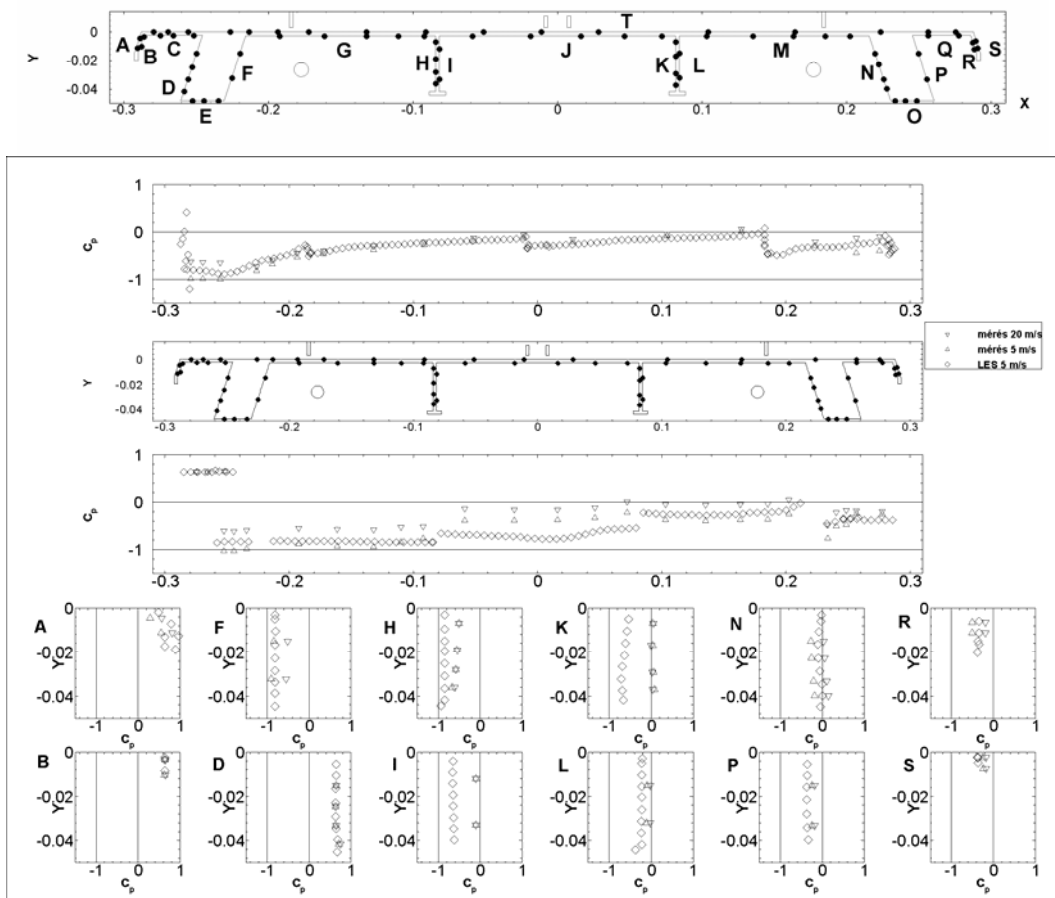
A számítást egyenletes sebességmegoszlásból indítottuk, így az első 0,25 sec számítás alatt az áramkép turbulenssé vált. Ezután indítottuk a jellemzők átlagolását, amelyet 0,75 sec-ig végeztünk. Az átlagolási idő alatt a levegő körülbelül 5 híd szélességű távolságot áramlik el a híd felett. Ez kevés pontos időbeli átlagok képzésére, de a számítás így is 3 hét időt igényelt 3 processzoros párhuzamos számítás segítségével.

## **2.2. A turbulencia modellezése (MILES)**

Az áramlást nagy örvény szimulációval (Large Eddy Simulation = LES) számítottuk. Jelen cikknek nem célja ezen módszer bemutatása, az érdeklődő olvasó számára jó áttekintés található [9]-ben. A LES alapvető koncepciója, hogy az áramlás felbontható nagy, a mozgási energia jelentős részét tartalmazó örvényekre, amelyeket időfüggő számítással határoznak meg, és kisméretű örvényekre, amelyeket egy megfelelő háló méret alatti (sub grid scale = SGS) modellel kell figyelembe venniük. [1] egy másik módszerként a monoton sémát használó nagy örvény szimulációt (monotonically integrated LES = MILES) javasolta. Ebben a koncepcióban monotonra korlátozott fluxusokat használó magas rendű szél felől súlyozó sémák numerikus disszipációját használjuk háló méret alatti (SGS) modelleként. Mi is ehhez hasonló módszert használtunk.

## **3. AZ EREDMÉNY VALIDÁLÁSA**

A numerikus szimuláció eredményeit a mérésekkel lehet validálni. A 3. ábra mutatja a  $v_\infty = 5$  m/s és 20 m/s megfúvási sebességnél mért és  $v_\infty = 5$  m/s megfúvási sebességnél számolt alaki tényező megoszlást a híd modell közép keresztmetszetében lévő, az ábrán bejelölt pontokban.



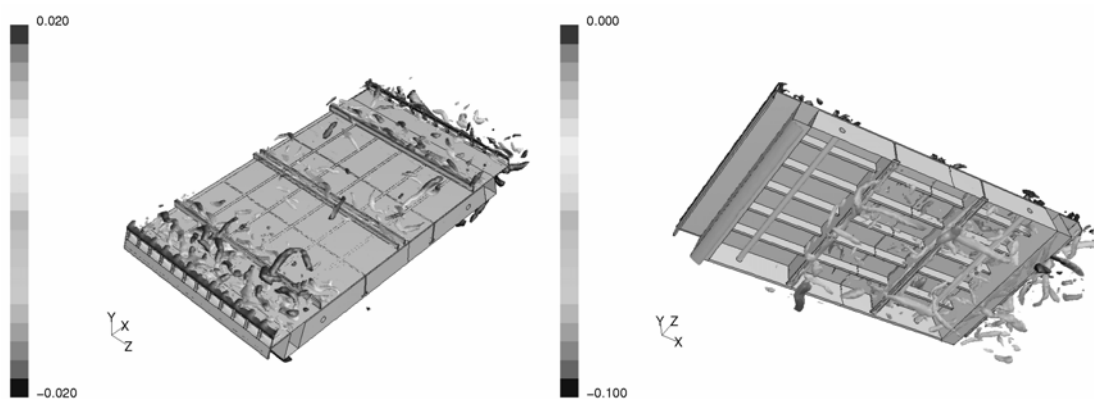
3. ábra: A mért és numerikus szimulációval kapott nyomásmegoszlás összevetése (kör számított eredmények  $v=5$  m/s, mért eredmények: háromszög  $v=5$  m/s, fordított háromszög  $v=20$  m/s)

A mért és számított értékeket összevetve megállapítható, hogy *a*) a híd modell felső részén, ahol a megfúvási sebesség (azaz a Reynolds szám értéke) csak kisebb mértékben befolyásolta az alaki tényező értékét, a számítási eredmények igen jól közelítik a mért értékeket, beleértve a szalagkorlátok által okozott helyi nyomásváltozásokat is, *b*) a híd alatt a számított és a Reynolds szám értékétől jobban függő mért értékek között nagyobb különbségek figyelhetők meg. Mindkét kerékpárút alatt és a főtartók alsó felületén igen jó egyezést tapasztaltunk. A főtartók és az I tartók között a számított értékek a két különböző sebességnél mért alaki tényezők közé estek, míg a két I tartó között a számított nyomásnál tapasztaltunk lényeges különbséget: a számolt értékek a mért értékeknél kisebb nyomást jeleztek. *c*) a 12 függőleges vagy közel függőleges felületek többségén, kilenc felületen (A, B, D, F, L, N, P, R, S felületek, ld. 3. ábra alsó része) kielégítő egyezést tapasztalunk, a többi felületen (H, I, K) viszont jelentős eltérések jelentkeztek.

Összességében az áramlás nagy örvény módszerrel végzett numerikus szimulációját a számított és mért nyomások összehasonlítása alapján kielégítő (és a feladat nehézségét is figyelembe véve meglepő pontosságúnak minősíthetjük).

#### 4. AZ EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

Az áramlás jellemzőit jól mutatják azok a képek, amelyek adott pillanatban megadják azon felületeket, amelyeken belül az örvényesség dominál a deformációhoz képest (a sebesség derivált tenzor második skalár invariánsának szintfelülete lásd [5]), így a különbségük értéke meghalad adott értéket (ezeket a továbbiakban örvényeknek nevezzük). Így pl. a 4. ábrán láthatók a híd modell felső és alsó részén keletkező örvények. Megállapítható, hogy az örvények a várakozásnak megfelelően az éleken keletkeznek: a híd modell áramlással szemben néző oldalán lévő lemez csík élén, a kerítés alsó és felső élén, a hossztartókon és a szalagkorlátokon. Ezen kívül megfigyelhető, hogy az örvények a rohamos sebességváltozással jellemezhető zónákban tovább erősödnek, ezért látunk sok örvényt a két kerékpárút felett és a hossztartók között a híd alatt.

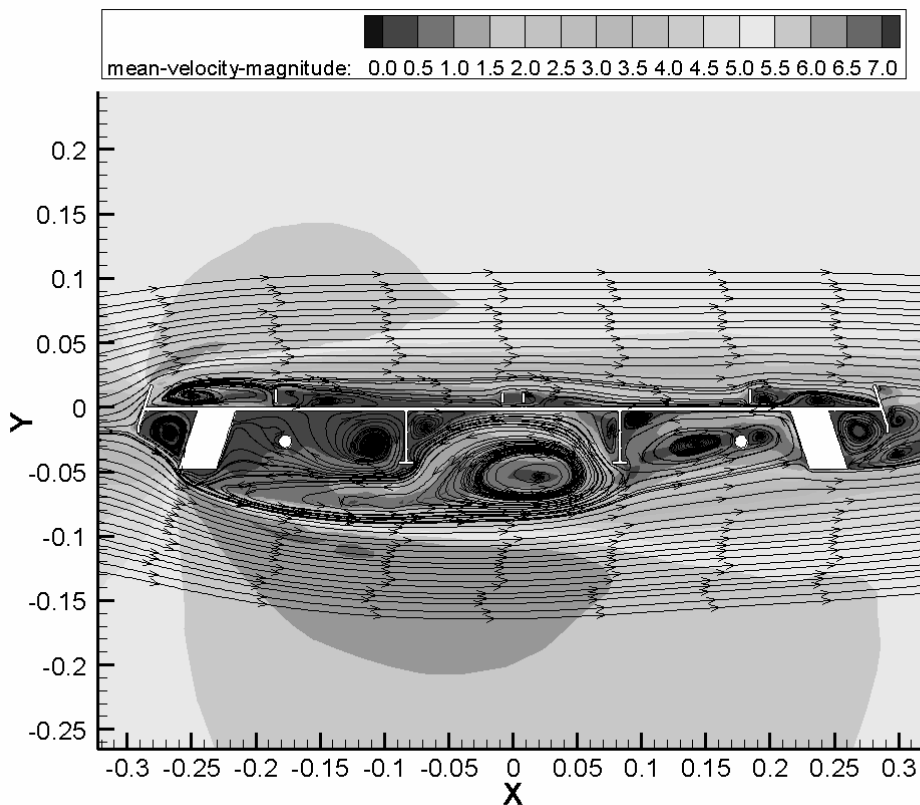


4. ábra: A híd modell felső és alsó részén keletkező örvények

Ha a tér pontjaiban időben átlagoljuk a sebesség abszolút értékét és a nyomást, megkapjuk az időbeni átlagsebességekre vonatkozó áramképet és az átlagos nyomás megoszlását. Az 5. ábrán az időbeni átlagsebesség a 6. ábrán az átlagnyomás megoszlása látható a híd modellre merőleges síkban. (Az ábrák tartalmazzák az átlagos sebességvektorokkal rajzolt áramvonalakat is.)

Látható, hogy a híd modell előtt a sebesség csökken, a nyomás nő, a várakozásnak megfelelően az áramlással szembenező, bal oldali felületen és a főtartón, valamint a kerékpárút alatti térben a külső nyomásnál nagyobb a nyomás. A széllel szembenálló lemezcsík felső élén, valamint a főtartó alsó élén (a híd belépőjein) a határréteg leválik és a modell felett és alatt kis nyomással jellemzett leválási buborék jön létre. A leválási buborékok mellett nagy sebességű és kis nyomással jellemzett áramlás figyelhető meg.

Az örvények az áramlásra merőleges éleken keletkeznek, ezért – bár jelentős részük a sebesség hely szerinti változása miatt részben „befordul” áramlás irányába – tengelyük jellemzően a híd tengelyével közel párhuzamos. Ezen kívül a nyomásra vonatkozó Poisson egyenletnek is az örvények detektálására szolgáló sebesség gradiens tenzor második skalárinvariánsa a forrástagja, ez magyarázza, hogy a nyomásmező simább mint az örvénymező. Ezért a nyomásmegoszlás időbeni lefolyását bemutató „filmekben” a nyomásmegoszlás is többé-kevésbé kétdimenziós. A nyomásmegoszlás időbeni változásában meghatározott periodicitás figyelhető meg a szél felőli főtartó mögött az alsó részen és a korlát mögött a felső részen.



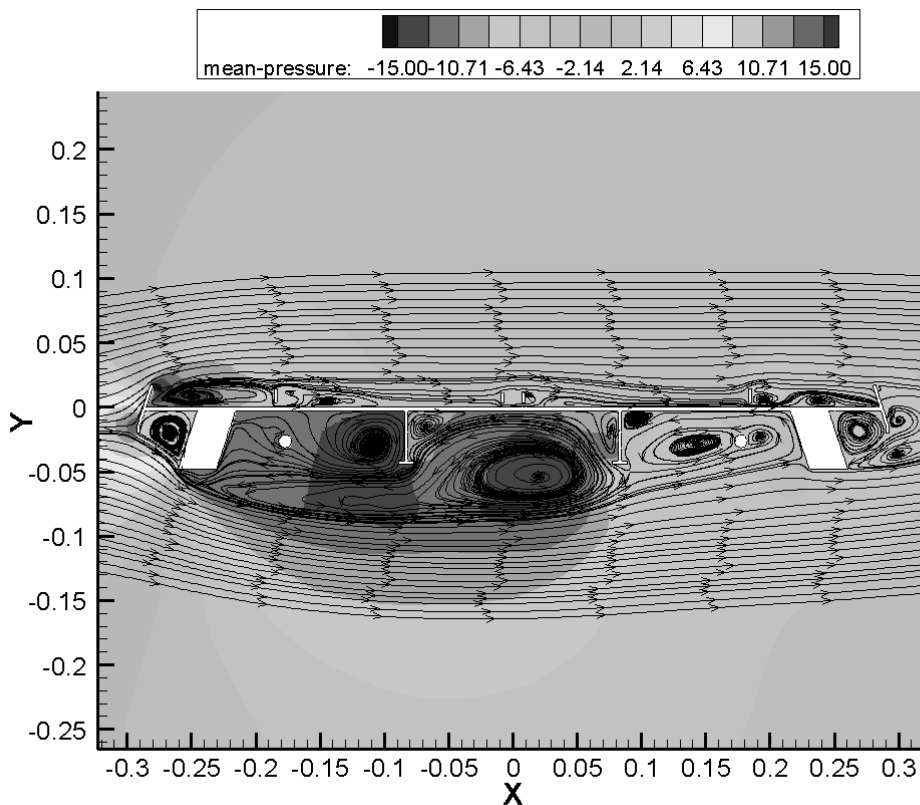
5. ábra: A sebesség abszolút értéke időbeni átlagának megoszlása (m/s) és az átlagsebességgel számolt áramvonalak

A híd modell felső részén a levált határréteg visszafekszik, az időbeli átlagnyomás közel megegyezik a külső nyomással. Helyileg sebességcsökkenést és kisebb méretű, kis nyomással jellemzett leválási buborékokat okoznak a szalagkorlátok modelljei.

A modell alsó, tagolt részén a főtartó mögött nagy kiterjedésű leválási zóna alakul ki, amelyben mind a sebesség, mind a nyomás kicsi. Az első I tartó előtt és a szél alatti főtartó mögött kisebb, a két I tartó között nagyméretű depressziós zóna figyelhető

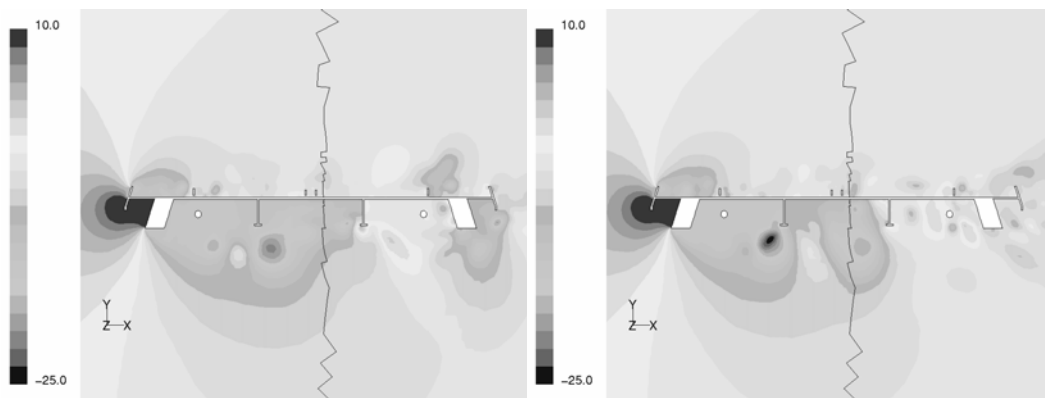
meg. A második I tartó és a szél alatti főtartó között a nyomás nagyobb, a külső nyomáshoz közelítő értékű.

A numerikus szimuláció eredményeként kapott „filmekből” kitűnik, hogy a híd alsó része alatt viszonylag nagy, de nem nagyon intenzív örvények keletkeznek és mozognak közel periodikusan, de a modell alsó felületétől viszonylag nagy távolságban vannak, így a nyomás változásából származó erő ingadozása nem túl jelentős. Az 7. ábra néhány, a híd modellre merőleges síkban számolt nyomásmegoszlást mutat, amelyen jól láthatók a híd alatt keletkező és mozgó depressziós zónák. A 8. ábra pedig az állandó nyomású felületek bemutatásával szemlélteti ugyanezeket a zónákat.

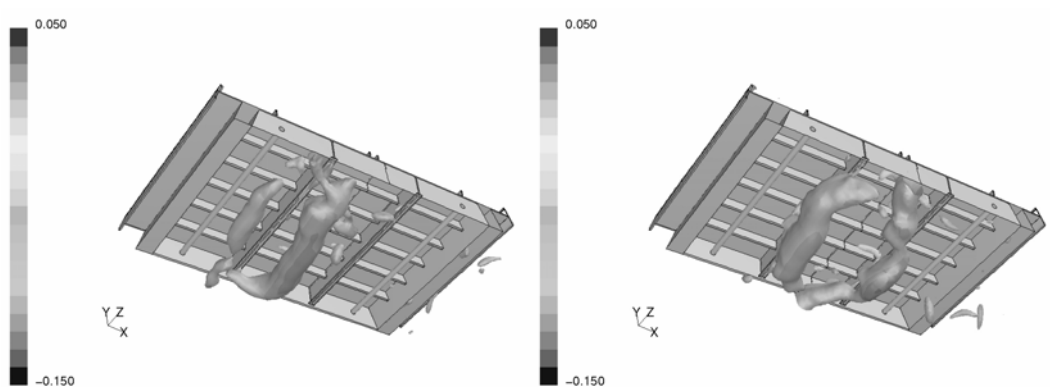


6. ábra: A nyomás időbeni átlagának megoszlása (Pa) és az átlagsebességgel számolt áramvonalak

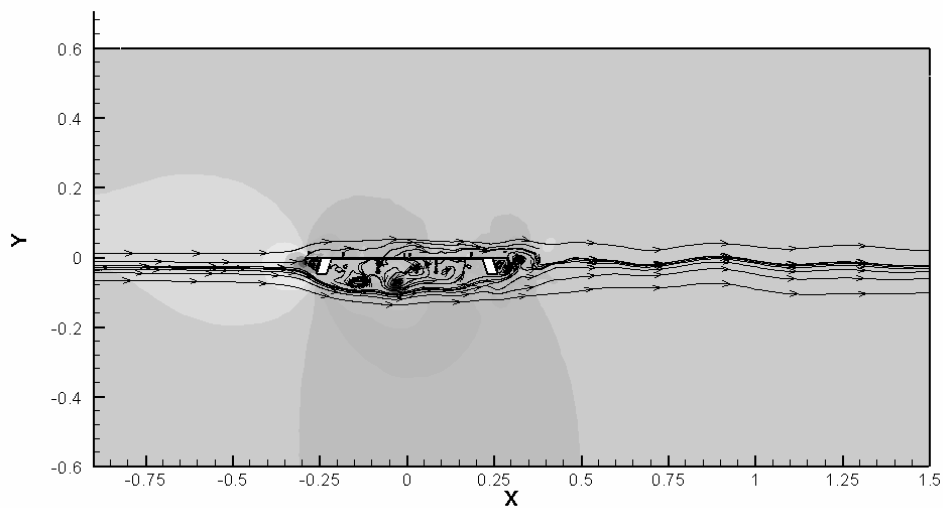
Általánosságban megállapítható, hogy a számítások szerint nem keletkeztek periodikusan leúszó, nagy energiájú örvények, ugyanakkor az erőtenyezők idősorai periodikus erőhatás keletkezését mutatták. Ez látszik a 9. ábrán is, amelyen a híd mögötti áramvonalak periodikus hullámokat mutatnak, amely csak akkor jöhet létre, ha a hídról az áramló levegőre periodikusan változó függőleges erő hat. (Ebből adódóan a levegőről a hídra is periodikusan ingadozó (felhajtó) erő hat).



7. ábra: Pillanatnyi nyomásmegoszlások a híd modell hossztengetlyére merőleges síkban



8. ábra: Az állandó nyomású felületek a híd modell alatt

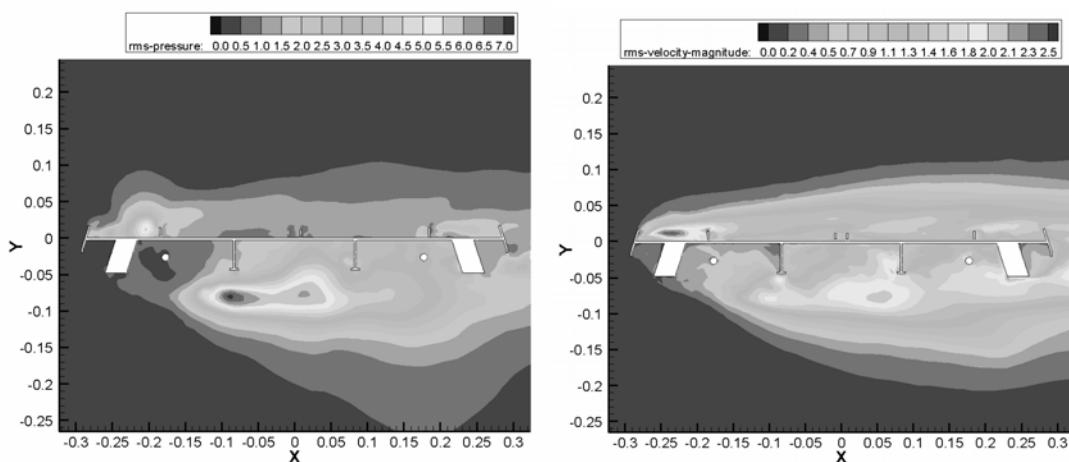


9. ábra Pillanatnyi áramvonalak és nyomásmegoszlás a híd körül



Az áramvonalak „hullámhossza” a híd szélességének 63%-a, azaz 0,37m. 5m/s megfúvási sebesség esetén ez a hídra ható, ingadozó felhajtó erő  $f = 5/0,37 = 13,5$  1/s frekvenciát jelent. A híd  $m = 0,045$  m magasságával, mint jellemző értékkel számolt Strouhal szám:  $Str = \frac{f \cdot m}{v_\infty} = \frac{13,5 \cdot 0,045}{5} = 0,121$  adódott, amely jól egybeesik mind a mérések eredményével [4], mind pedig a szakirodalom ajánlásaival.

A sebesség és ezzel összefüggően a nyomás időbeni változását jellemző mennyiség az ingadozó értékek szórásának mértékét kifejező rms érték. A nyomás és a sebesség rms megoszlás látható az 10. ábrán egy metszetben.



10. ábra: A nyomás és a sebesség rms megoszlása (Pa, m/s)

A legnagyobb nyomásingadozás a két I tartó között figyelhető, ami összhangban van a depressziós zónák vándorlásával, amely a 7. és 8. ábrákon látható. Megfigyelhetjük továbbá, hogy e helyen a sebesség is nagymértékben ingadozik. Ugyanakkor a szél felőli kerékpárút fölötti régióban a nyomás és a sebesség ingadozás maximumhelye nem esik egybe. A lengéstan tervezés szempontjából csak a híd felszínén lévő nyomásingadozások mérvadóak, sőt ezek közül is csak azok, amelyek frekvenciája a híd saját frekvenciájának közelébe eshet. Ezért azt érdemes vizsgálni, hogy a híd mely területén levő nyomásingadozás korrelál leginkább a híd egészére ható erő időfüggvényével.

## 5. ÖSSZEFOGLALÁS

Egy hídmetszet körüli áramlást számoltunk nagy örvény szimuláció segítségével. MILES megközelítést alkalmaztunk a bonyolult éles kontúrokat tartalmazó geometria körüli áramlás számítására, ezzel elkerülve a numerikus oszcillációk létrejöttét. Az eredményeket a BME Áramlástan Tanszéken végzett felületi nyomásmérésekhez hasonlítottuk és a híd alján lévő zónától eltekintve jó egyezést

találtunk. A számítás a híd körüli átlag sebesség és nyomásmezőt is szolgáltatta. Az időfüggő örvény mozgásokat is vizsgáltuk és azt találtuk, hogy hídon jelentkező időfüggő erőhatás nem periodikusan leúszó nagy energiájú örvények hatása, hanem a híd alatti a több örvény együtteseként kialakuló periodikusan változó depressziós zónákkal függ össze.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetet mondanak az Országos Tudományos Kutatási Alap (OTKA T 037651 számú) támogatásáért.

## HIVATKOZÁSOK

- [1] Boris J. P. - Grinstein F. F. - Oran S. S. - Kolbe, R. L.: New Insight into Large Eddy Simulation. *Fluid dynamics research* 10. (1992), pp 199-228.
- [2] Choi H. - Moin P.: Effects of the Computational Time Step on Numerical Solutions of Turbulent Flow, *Journal of Computational Physics*, 133, (1994), pp 1-4.
- [3] Ferziger J. H. - Perić M.: *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer (2002).
- [4] Goricsán I. - Balczó M. - Lajos T.: A Dunaújvárosi Duna-híd aerodinamikai vizsgálata: Szélesatorna kísérlet, *BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke Tudományos közleményei*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, (2005).
- [5] Hunt J. C. R. - Wray A. A. - Moin P.: Eddies, Stream, and Convergence Zones in Turbulent Flows *Center of Turbulence Research, Proceedings of the Summer Program*, (1988), pp 195-208.
- [6] Keating A. - Piomelli U. - Brethorst K. - Nešić S.: Large-Eddy Simulation of Heat Transfer Downstream of a Backward-Facing Step. *Journal of Turbulence*, 5, (2004), 020
- [7] Lohász M. M. - Rambaud P. - Benocci C.: LES Simulation of Ribbed Square Duct Flow with Fluent and Comparison with PIV Data, *Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'03) The 12th International Conference on Fluid Flow Technologies*, Budapest, Hungary, September 3-6 2003.
- [8] Lohász M. M. - Rambaud P. - Benocci C.: Flow Features in a Fully Developed Ribbed Duct Flow as a Result of LES, *ERCOFTAC Int. Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, ETMM6*, May 23-25, 2005, Sardinia, Italy, accepted
- [9] Sagaut P.: *Large Eddy Simulation for Incompressible Flows. An Introduction 2<sup>nd</sup> Edition*, Springer (2002).