

Szélszimulációk generálása és validációja kvázi-statikusan terhek meghatározásához

Generation and validation of wind simulations for quasi-static load determination

ing. KIS Ádám¹, prof. dr. ing. KISS Zoltán¹, conf. dr. PUSKÁS Attila¹

¹ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki kar
Strada Constantin Daicoviciu 15, 400020 Cluj-Napoca, +40741650698, kis_adam@outlook.com

Abstract

Computational fluid dynamics (CFD) wind simulations are playing an increasingly important role in structural engineering, however their reliable application requires proper validation. This study investigates the effects of mesh generation and turbulence models on quasi-static wind load determination to support the development of a digital wind tunnel integration into a structural design software environment using velocity- and pressure-based reference comparisons.

Keywords: computational fluid dynamics, wind simulation, load generation, OpenFOAM, structural design

Kivonat

A numerikus áramlástani szélszimulációk egyre fontosabb szerepet töltenek be a tartószerkezet-tervezésben, ugyanakkor megbízható alkalmazásuk validációt igényel. A tanulmány a hálógenerálás és turbulencia-modellek hatását vizsgálja kvázi-statikusan szélterhek meghatározásához, egy statikai szoftverkörnyezetbe integrálható digitális szélcsatorna fejlesztésének támogatására, sebesség- és nyomásalapú referencia-összevetések alkalmazásával.

Kulcsszavak: numerikus áramlástan, szélszimuláció, tehergenerálás, OpenFOAM, szerkezettervezés

1. BEVEZETÉS ÉS A VIZSGÁLT ESETEK DISZKRETIZÁLÁSA

A tanulmány célja egy olyan numerikus áramlástani validációs eljárás kidolgozása és bemutatása, amely szimuláció útján történő kvázi-statikusan szélterhek meghatározásának lehetőségét vizsgálja, figyelembe véve a statikai szoftver- és szabványkörnyezetbe történő számítási szempontból hatékony integrálhatóság követelményeit.

A vizsgálatok Reynolds-átlagolt Navier–Stokes (RANS) turbulenciamodellek alkalmazásán alapulnak. Ez a megközelítés az áramlási jellemzők időben átlagolt leírását használja, így az időben változó turbulens örvénystruktúrák explicit számítása helyett azok modellezése történik. Az ennél szofisztikáltabb eljárások számítási igénye ugyanis jelentősen meghaladja a gyakorlati mérnöki alkalmazásokban általánosan elfogadható szintet, már a „Large Eddy Simulation” (LES) esetén is, amely csak a nagyobb örvénystruktúrákat számítja explicit módon, nem beszélve a „Direct Numerical Simulation” (DNS) módszerről, amely a teljes turbulens áramlási mezőt közvetlenül oldja meg.

A vizsgálatok során két szélcsatorna-kísérlet reprodukálása történt. Elsőként, kalibrációs célból, az Architectural Institute of Japan (AIJ) benchmark példája [1][2] lett feldolgozva, főleg a hálófüggetlenség vizsgálatához, valamint öt különböző turbulenciamodell által számított sebességmezők értékeléséhez. A nyomásalapú validáció során a Tokiói Műszaki Egyetem (TPU) által publikált [3] kísérleti adatok és számítási paraméterek kerültek felhasználásra.

A szimulációk az OpenFOAM[®] nyílt forráskódú numerikus áramlástani eszközzel készültek, ahol a peremfeltételek meghatározása során a szélcsatorna-kísérletekben alkalmazott atmoszférikus határréteg profilnak megfelelően, Eurocode [4] alapú szélprofil került definiálásra a beáramlási oldalon.

Építőipari alkalmazások esetén kiemelt jelentőségű olyan eljárások fejlesztése, amelyekben a rögzíthető vagy automatizálható paraméterek felhasználói oldalon alapértelmezettnek tekinthetők, jelen esetben a gyakorló mérnök számára elsősorban csak a releváns geometriai és a szélhatás definiálásához kapcsolódó adatok megadása legyen szükséges. Ennek érdekében, előzetes kutatások [5] alapján, a hálózás folyamata két paraméterre lett egyszerűsítve: a „hálóméret a szerkezeten” és a „hálófinomítási tényező”. Az első a szerkezeten alkalmazott átlagos élhosszt definiálja, mind a speciálisan fejlesztett végelem háló — amely csak a szerkezeten számított eredményeket tárolja a szélteher-előállítás szempontjából megfelelő módon —, mind pedig a szimulációhoz szükséges véges térfogat háló esetén. A hálófinomítási tényező pedig azt szabályozza, hogy az épülettől távolodva a szimulációs tartomány beáramlási oldalán a véges térfogat cellák élhossza milyen mértékben duplázódjon. Ez lehetővé teszi, hogy az épület közvetlen környezetében sűrűbb háló kerüljön alkalmazásra, mint a távolabbi tartományokban, ezzel hatékonyabbá téve a számítási folyamatot.

Hálófűggetlenségi vizsgálatok

1. táblázat

Hálóméret a szerkezeten [mm]	8000	4000	2000	1000
Hálófinomítási tényező [-]	2	3	4	5
Hálógenerálás futási ideje [s]	18,3	65,3	61,2	108,9
Cella szám [-]	136432	150881	264786	495694
Szimuláció futási ideje [s]	65,3	57,9	151,1	343,4
Iterációk száma [-]	264	182	260	314
Rx+ [kN]	197	203,0	205,6	203,5
Ry+ [kN]	94,4	94,5	89,9	89,7
Rz+ [kN]	53,6	52,4	47,7	48,2

A fenti táblázat négy hálózási konfigurációt mutat be, amelyek azonos bemeneti hálóméret mellett (32 méter), azonos turbulenciamodell ($k-\epsilon$) alkalmazásával készültek. A számítási erőforrásigény mellett jól értelmezhető mérőszámot jelent a szerkezetre ható szélteherből származó erők eredője, külön értékelve a széltámadta oldalon ébredő nyomóerőt ($Rx+$), az oldalfali szélszívást ($Ry+$), valamint a tetőn kialakuló szívást ($Rz+$). Az eredmények alapján megfigyelhető, hogy még egyszerű geometria esetén is jelentős a hálósűrűség hatása, nemcsak az eredmények pontosságára, hanem a számítási teljesítményre is.

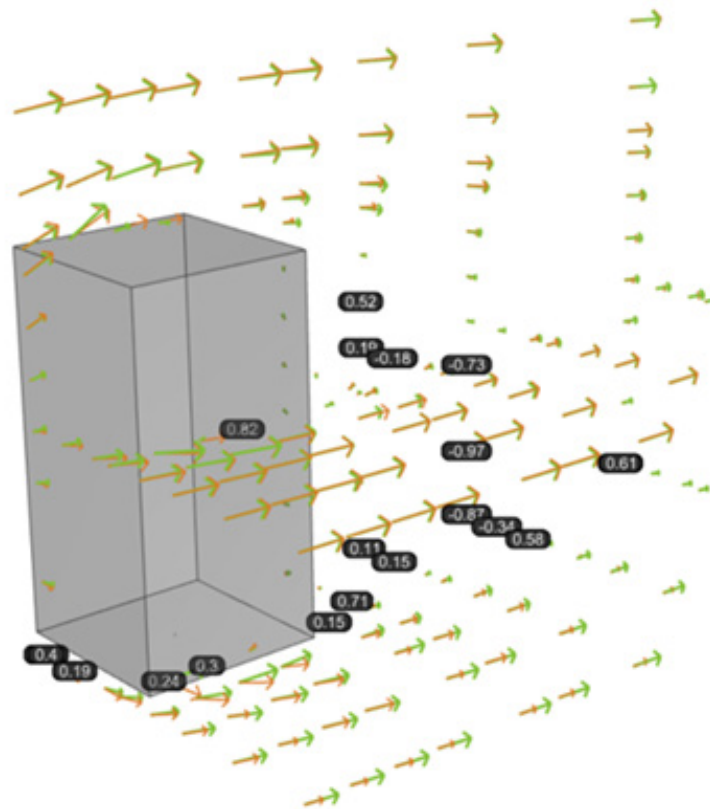
2. SEBESSÉGALAPÚ VALIDÁCIÓ

A vizsgálat során annak értékelése történt, hogy a különböző turbulenciamodellek milyen pontossággal képesek leírni az épület körül kialakuló áramlási struktúrákat. A további vizsgálatokhoz az „1000-5” hálókonzfiguráció került kiválasztásra, amely esetén az eredmények konvergenciája már megfelelőnek bizonyult. A vizsgálatok során öt különböző turbulenciamodell ($k-\epsilon$, $k-\omega$, $k-\omega$ SST, RNG $k-\epsilon$, Realizable $k-\epsilon$) került értékelésre a számított sebességmezők alapján.

Turbulencia modellek összehasonlítása

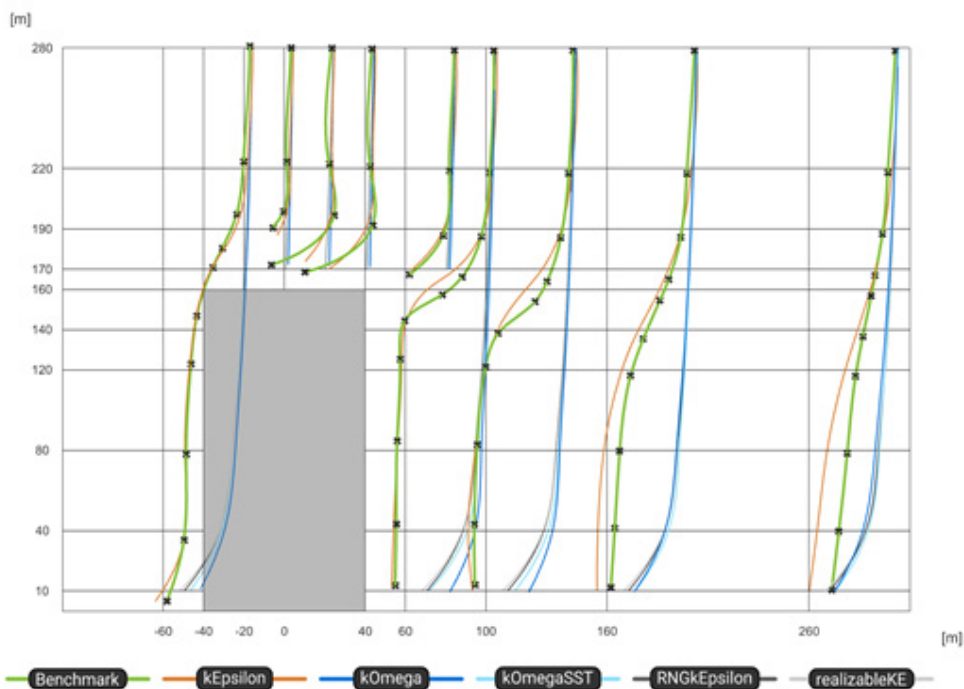
2. táblázat

Turbulencia modell	$k-\epsilon$	$k-\omega$	$k-\omega$ SST	RNGk	realizable $k-\epsilon$
Időtartam [s]	212	392	707	663	440
Iteráció [-]	260	413	1000	1000	342
Rx [kN]	205,6	315,59	179,88	176,23	180,22
Ry+ [kN]	89,9	97,7	92,9	96,9	95,7
Rz [kN]	47,7	50,0	52,74	58,6	54,3
ADD [%]	5,86	5,83	9,45	6,58	6,03



1. ábra. A sebességvektorok eltérései (zöld - benchmark, narancs - $k-\epsilon$ turbulencia modell)

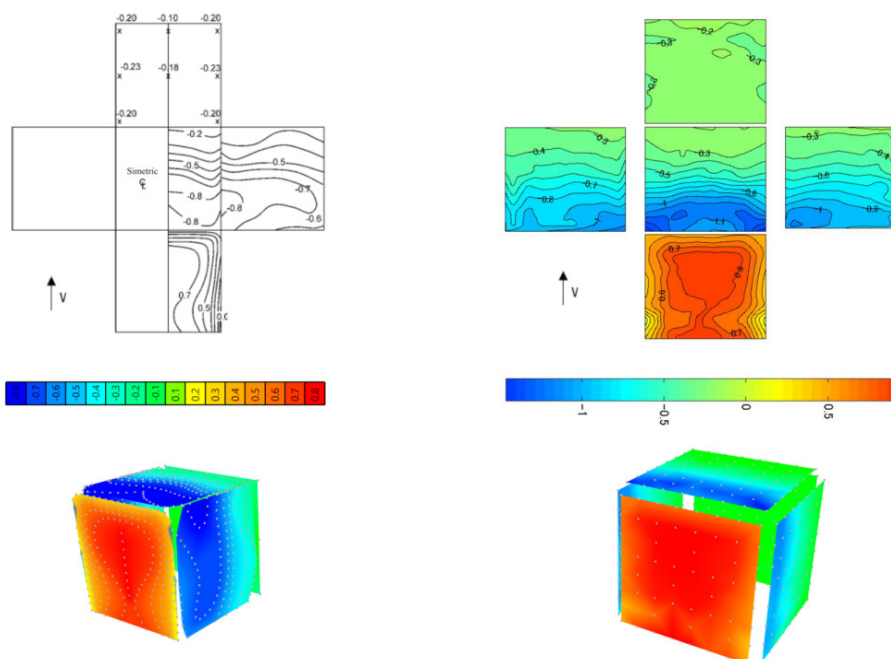
Az esetek között a sebességmezők átlagos irányeltéréseinek (ADD) összehasonlítása történt, amely a szimulációból származó és a referencia kísérleti sebességvektorok közötti eltérést jellemzi százalékosan. A mérőszám esetén a 0 párhuzamos, míg az 1 a merőleges vektorpárokat jelöli. A $k-\epsilon$ modellt kivéve az épület mögötti áramlási tartományban a kísérleti eredményektől eltérő viselkedés figyelhető meg, amely jól szemlélteti a RANS típusú turbulenciamodellek egyik fő korlátját. Ezek a modellek az áramlásleválás során jellemzően csak egyetlen domináns örvénysztruktúrát képesek reprodukálni, ami a legnagyobb eltérésekhez az épület mögötti régióban és a talaj közelében vezet.



2. ábra. A számítási tartományon belül, az épület közelében kijelölt karakterisztikus pontok elmozdulása a szimulált és skálázott sebességvektorok hatására

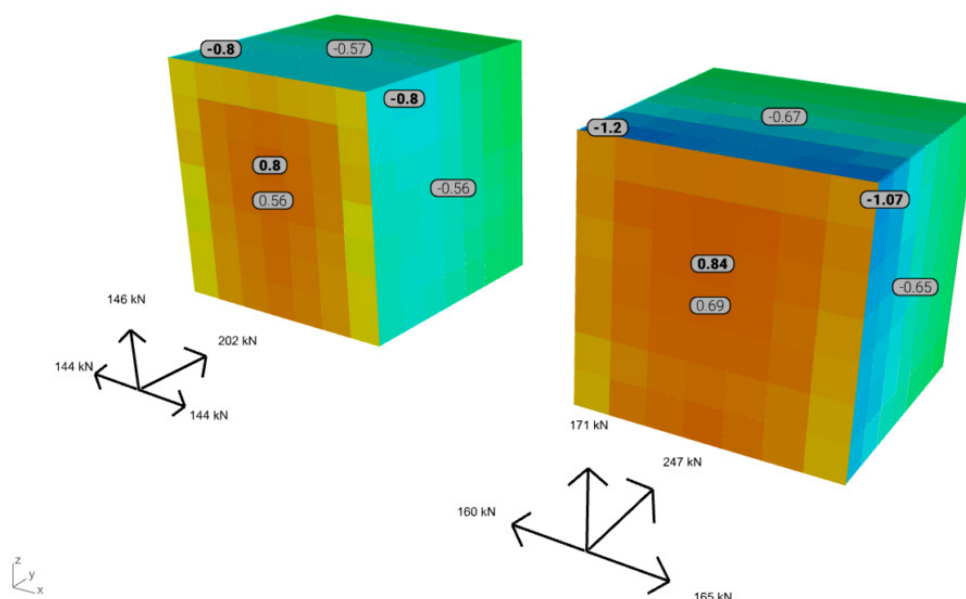
3. NYOMÁSALAPÚ VALIDÁCIÓ

A validáció elvégzéséhez a TPU-féle szélcsatorna mellett a Baines-féle [6], a ma használatos szabványok egyik alapját képező eredmények is ki lettek értékelve.

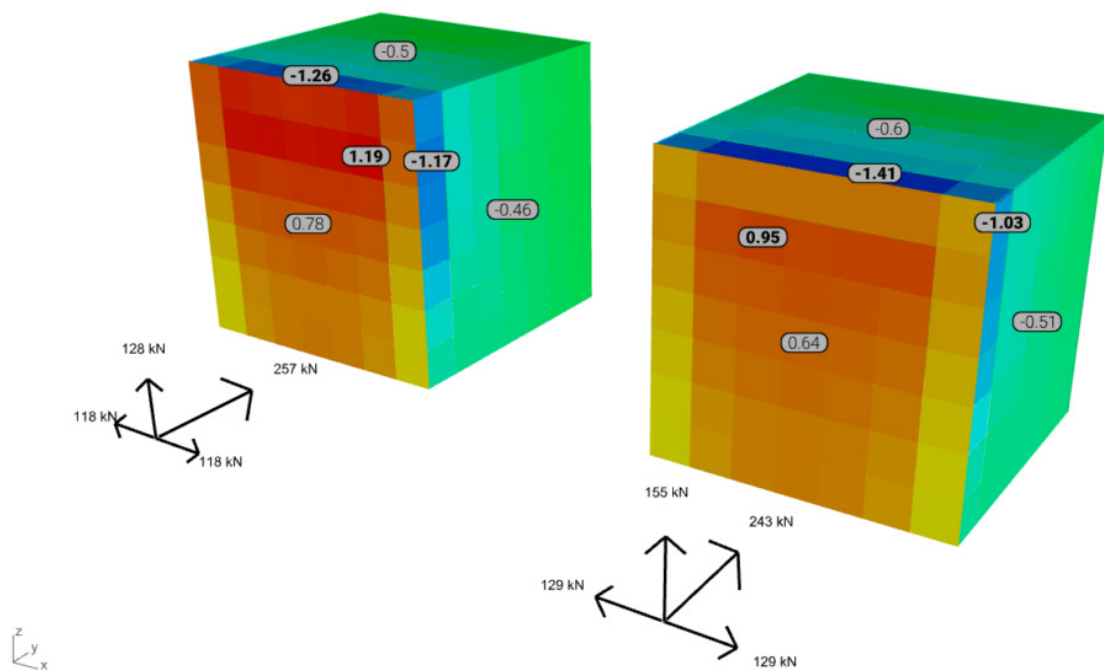


3. ábra. A Baines-féle (balra) és a TPU-féle (jobbra) eredmények eredeti ábrázolása

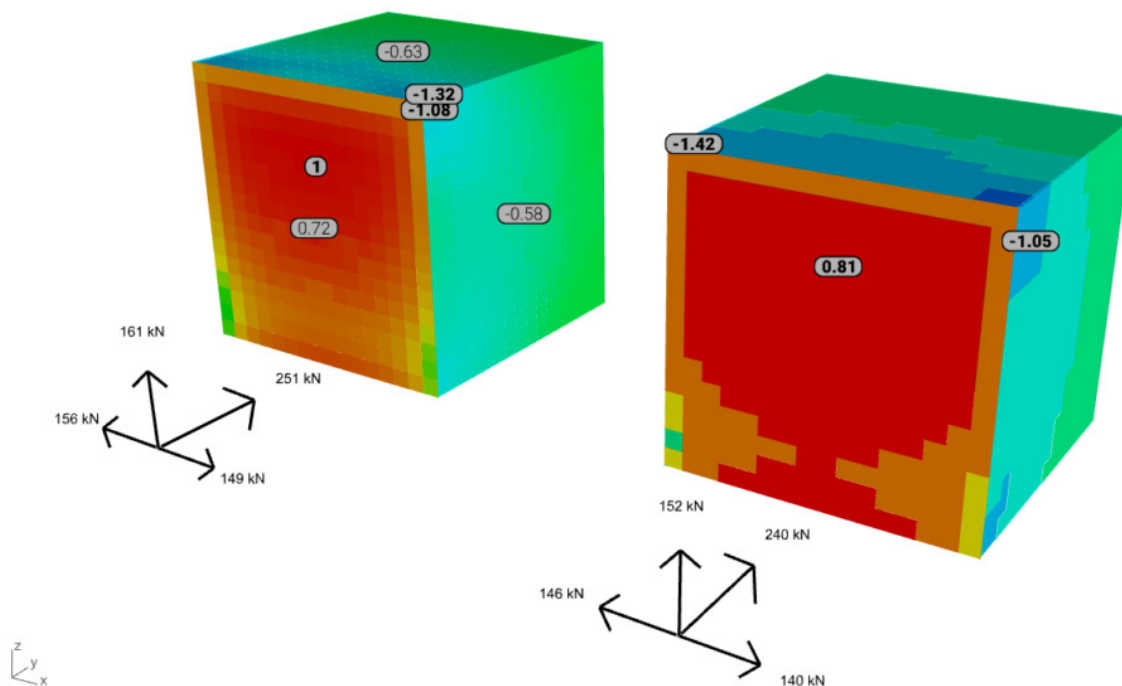
A TPU-féle kísérletből származó mérési pontok által alkotott háló átlagos élhossza (~2,28 m) került alkalmazásra, mint „hálóméret a szerkezeten”, így egy a szimulációhoz és utófeldolgozáshoz egyaránt alkalmas egységes háló jött létre. A számítási tartomány finomításához $r = 2$ hálófinomítási tényező került választásra, hogy a 16 m-es referencia-magasság alatt megfelelő bemeneti cellaméret alakuljon ki ($2,28 \cdot 2^r = 9,12 < 16$). A szélprofil meghatározásához a TPU-kísérlet alapján az Eurocode szerinti III. terepkategória került kiválasztásra, amely hasonló turbulenciaintenzitással számol. A szélesség alapértéke 28.3 m/s-nak lett felvéve annak érdekében, hogy 1 kN/m² torlónyomás adódjon, szükségtelenné téve a nyomási együtthatók (c_{pe}) és a felületi szélterhek (w_e) közötti átszámolást.



4. ábra. A Baines-féle (balra) és a TPU-féle (jobbra) eredmények feldolgozásából származó felületi terhek



5. ábra. A $k-\varepsilon$ -t (balra) és $k-\omega$ SST-t (jobbra) alkalmazó eredmények feldolgozásából származó felületi terhek



6. ábra. A $k-\omega$ SST-t alkalmazó eredmények feldolgozásából származó felületi terhek egy finomabb hálóval (balra) és az ennek megfelelő zónázott terhek (jobbra)

A fenti hat eset eredményére vonatkozó színezés a felületi terhek eredményei szerint vannak harmonizálva. A félkövér betűvel jelölt értékek a széltámadta, a felső és az egyik oldalsó felületre vonatkozó szélsőértékek, míg a keskeny betűtípus az átlagértéket jelöli, míg a tengelyrendszer a felületi terhek eredőit ábrázolja.

A kísérleti adatok pontjainak a hálóra történő vetítését követően megfigyelhető volt, hogy a Baines-féle eredmények általában alacsonyabb értékeket mutatnak. Ez az eltérés az élek és különösen a sarkok környezetében alkalmazott kevésbé sűrű háló, azaz a kevesebb mérési pontnak tudható be. A széltámadta oldalon ugyanakkor a maximális nyomástényező megközelítőleg 0,8, míg a szívási értékek is alapvetően jól közelítik a szabványos értékeket.

Az eredőket megfigyelve is kijelenthető, hogy a szimulációs eredmények inkább a TPU eredményeihez igazodnak. A nyomásalapú validálás szempontjából a $k-\omega$ SST mutat nagyobb egyezést, különösen akkor, ha a szerkezet cellaméretét 1 méterre finomítjuk.

Szerkezeti tervezés szempontjából ezek a terhek egy úgynevezett zónázási eljárást követően válnak igazán értelmezhetővé, amely során a közeli eredmények az Eurocode logikájához hasonló módon kerülnek összevonásra. Ez teszi lehetővé a szerkezeti elemzéshez közvetlenül felhasználható, valamint a szabványos terhekkel érdemben összevethető felületi terhek és reakciók előállítását. Ebből a megközelítésből a szimulált terhek két előnye is jól látható. A széltámadta oldalon a szélcatorna-kísérletekhez hasonló tehermegoszlás állítható elő, amely az Eurocode egyenletesen megoszló D zónájához képest csökkentett terhelést eredményez. Emellett az oldalfalak esetében a terhek magasság menti változása is figyelembe vehető, ami az Eurocode A, B és C zónáihoz képest kisebb terhelési területeket eredményez.

4. KONKLÚZIÓK

A bemutatott, egyszerű referencia geometriákon keresztül is jól szemléltethetők a CFD-alapú szélszimulációk mérnöki alkalmazhatóságának főbb kérdéskörei és a hozzájuk kapcsolódó kihívások. Megállapítható, hogy a megfelelő hálózás és turbulenciamodell megválasztása alapvető jelentőségű a folyamat szempontjából. A hálózati finomítás különösen fontosnak bizonyult a leválási régiók környezetében, ezért más geometriai eseteknél is indokolt iteratív hálózati függetlenségi vizsgálatok elvégzése. Kiindulási paraméterként általánosságban alkalmazható egy $e/10$ élhosszúság, párhuzamot vonva a szabványban definiált hosszparaméterrel, ezáltal a szimulációból származtatott terhek könnyebben értelmezhetők szabványos vonatkozásban. A sebességalapú validáció elsősorban kalibrációs szempontból bizonyult hasznosnak. A vizsgált turbulenciamodellek közül a $k-\varepsilon$ modell írta le legpontosabban az épület környezetében kialakuló áramlási jelenségeket. Mérnöki szempontból ugyanakkor a felületi nyomások eloszlása és intenzitása tekinthető meghatározónak, ebből a szempontból pedig a $k-\omega$ SST modell alkalmazása vezetett jobb eredményre.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A főszerző ezúton szeretne köszönetet mondani témavezetőinek a kutatás során nyújtott szakmai iránymutatásért. Külön köszönet illeti Consteel Solutions Kft. csapatát a fejlesztési környezet, a szakmai háttér és a kutatáshoz kapcsolódó tapasztalatok biztosításáért.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yoshikawa M., Shirasawa T., *AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96 (10-11), 1749-1761. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058>
- [2] Meng Y., Hibi K., *Turbulent measurements of the flow field around high-rise building*, J. of Wind Engineering, 1998, 76, 55-64.
- [3] Tokyo Polytechnic University, *Aerodynamic database for low-rise buildings*, 2007, <https://wind.arch.t-kougei.ac.jp/system/eng/contents/code/tpu>
- [4] EN 1991-1-4: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions, CEN, Brussels
- [5] Kis Á, Nagy A C, *Acélszerkezetek tervezése és szélszimulációja parametrikus környezetben*, Műszaki Tudományos Közlemények, 2021, 14, 51-59. <https://doi.org/10.33894/mtk-2021.14.08>
- [6] Baines W. D., *Effects of velocity distributions on wind loads and flow patterns on buildings*, Proceedings of the International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Teddington, U.K., 1963, 198–225.