

Egy szélérzékeny tetőszerkezet számítási érdekességei

Computational curiosities of a wind-sensitive roof structure

dr. NAGY-GYÖRGY Tamás, BOROS József, dr. CRIȘAN Andrei

Politehnica University of Timișoara, Faculty of Civil Engineering,
2nd T. Lalescu, 300223 – Timisoara, Romania.
Tel/fax: +40 256 403935. E-mail: tamas.nagy-gyorgy@upt.ro, www.ct.upt.ro

ABSTRACT

Present paper deals with the evaluation of wind load on the irregular structure of New Millennium Reformed Centre in Timisoara, designed by Imre Makovecz. There are presented the wind loads obtained based on the Romanian national standard as well as on a numerical approach by using computational fluid dynamics. The wind velocity was considered in accordance with the specifications of the current standard. The paper concludes with a comparison of the numerically obtained wind pressure and the values resulted using the simplified approach.

KIVONAT

A dolgozat a Makovecz Imre tervezte temesvári Új Ezredév Református Központ szabálytalan szerkezetének szélterhelésének értékelésével foglalkozik. Bemutatásra kerülnek a román nemzeti szabvány alapján kapott szélterhek, majd a folyadékok dinamikája segítségével számított numerikus megközelítést eredményei. Az figyelembe vett szélesség az aktuális szabvány specifikációival összhangban történt. A dolgozat a numerikusan kapott szélterhelés és az egyszerűsített megközelítés alkalmazásával kapott értékek összehasonlításával zárul.

Kulcsszavak: szélteher modellezése, folyadékok dinamikája, Makovecz, szélérzékeny szerkezet

1. BEVEZETŐ

Makovecz Imre, akit a magyar organikus építészet legjelentősebb képviselőjének tekintenek, az 1989-es román forradalom után Temesvárra látogatva felajánlotta támogatását a Temesvári Új Ezredév Református Központ terveinek kidolgozásához (1. ábra). A tervek végrehajtása 1999-ben kezdődött, de 3 évvel később, 2002-ben a finanszírozás hiánya miatt leállt.

Makovecz Imre stílusa egyedülálló. Organikus alkotásairól, valamint a funkcionalista és stílusos megközelítések iránti hozzáállásáról ismert [2], műveinek alapja a filozófiai és a szimbolizmus. Munkája középpontjában a szerkezet és a táj közötti szimbiotikus kapcsolat áll. Épületei általában egy szimmetriatengely mentén vannak elrendezve, de tartalmaznak aszimmetrikus elemeket is, megőrizve az emberi test arányosságát. Gyakran választotta a fát, mint építkezési anyagot, nemcsak esztétikai szempontok miatt, hanem mint szerkezeti elem, felhasználva a bionika alapelveit az építészetben.

Terveiben gyakran találkozhatunk különféle sugarú ívekből és karcú elemekből álló részeket, melyek összetett csomópontokban találkoznak. Ezen különleges, szabálytalan formák miatt, úgy a vízszintes, mint a függőleges síkokban, a földrengés, a hó- és a szélteher hatásait nehéz megbecsülni. A szerkezetek és a kapcsolatok optimalizálása érdekében a tervezés folyamán részletes végelem modellek használatára, vagy akár csökkentett méretű laboratóriumi vizsgálatokra is szükség van. Az ehhez fogható esetekben, a szabványok szerinti szerkezeti számítás és részletezés még a tapasztalt építőmérnökök számára is valódi kihívást jelent.

E dolgozatban a szélterhelés számítására alkalmazott, szabványokban található, egyszerűsített megközelítéssel eredményei kerülnek összehasonlításra numerikus modelltől kapott értékekkel.

A főépület, amely templomként szolgál, alapterülete nagyságrendileg 32 x 21 m, teljes magassága 28 méter. Az alsó 4 m vasbeton falelem, melyet a 24 m magasságú, rétegelt-ragasztott faszerkezetű tető fed. A szomszédos két szárnyas-torony alapja 5,8 x 5,8 m, falai 26 m-ig vasbetonból vannak, melyet egy 16 m magas faszerkezetű süveggel zár le. Így a tornyok teljes magassága 40 m. Ebben a vizsgálatban szereplő épületrész a Temesvári Új Ezredév Református Központ legfontosabb része. A komplexum becsült összértéke mintegy 8 millió euró, mely előreláthatólag a Temesvár2021 - Európa kulturális fővárosa esemény egyik legjelentősebb épülete lesz.

2. A SZÉLTEHER

A szerkezetet igénybe vevő átlagos szélereősséget a szél átlagos sebességéből és az áramlási mező által generált ingadozó szélereősségből számítják. Az ingadozó szélnyomás az idő függvényében változik és dinamikus jellemzői különböznek az épület felületének minden részén. A legtöbb épületnél a turbulenciák generálta fluktuáló (váltakozó) szélteher a domináns. A turbulencia mellett a szélnyomás eloszlása a felületeken (még téglalap alakúakban is) aszimmetrikus, még akkor is, ha a szél merőleges az épület felületére [3]. Ezenkívül, a szél intenzitásának eloszlása változik az egyes szélirányok, a földrajzi körülmények függvényében is.

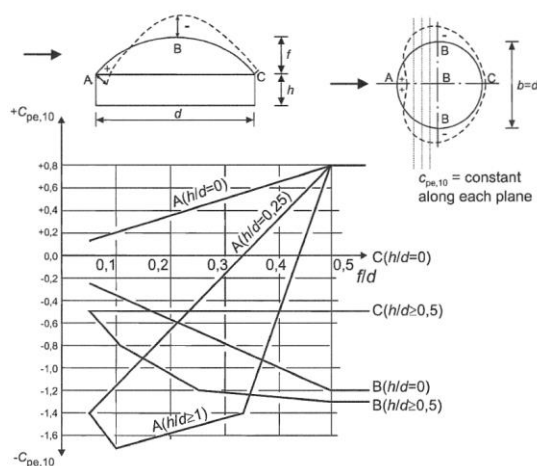
A szélnyomás vagy a szerkezetekre ható szélből eredő erő értékeléséhez az EN 1991-1-4: 2005 európai szabvány [4] és a CR 1-1-4/2012 román szabvány [5] különféle tényezőket (pl. a szerkezet elhelyezkedése, a terep egyenletlensége, környezet, szerkezeti alak, stb.) vesz figyelembe, a szélhatást egyszerűsített felületi nyomás vagy erőként, melyek hatásai megegyeznek a turbulens szél maximális hatásával. Ha a szerkezet geometriája összetett, akkor az összes különböző felületekhez tartozó, szélnyomást figyelembe vevő együttható felmérése meglehetősen nehézkes eljárássá válik.

A romániai szélszabvány [5] rendelkezései szerint a dinamikus szélnyomás referenciaértéke (átlagos torlónyomás) Temesváron $q_b = 0,6 \text{ kN/m}^2$, a $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ standard légsűrűség mellett. A nyomást a szélszabvány referenciaértéke alapján számítják, 50 éves átlagos ismétlődési intervallummal. A számításokhoz figyelembe vett beépítettségi kategória (terepkategória) III. típusú, amely szabályos növényzettel vagy épületekkel borított terep, vagy izolált akadályokkal rendelkező terep, melyek a magasság legfeljebb húszszorosán belül helyezkednek el (azaz külvárosi terep).



1. ábra

Temesvári Új Ezredév Református Központ – az eredeti koncepció



2. ábra

Ajánlott értékek a külső nyomási tényező értékek kupolára a EN 1991-1-4:2005 alapján

A szélnyomás-csúcsok hatásának felületre gyakorolt nem-egyidejű megjelenésének figyelembevételének érdekében, valamint a szerkezetre ható turbulencia hatására megjelenő rezgések szélnyomásra gyakorolt hatásának figyelembevétele érdekében egy szerkezeti tényezőt kell figyelembe venni. Ezenkívül a romániai elvek alapján, az épületeket fontossági-kitettségi osztályokba osztják (clase de importanță-expunere) ([5], 3.1. táblázat), attól függően, hogy milyen következményekkel járhat egy jelentős esemény. A vizsgált épületet II. osztályba lett besorolva, mivel az épület kapacitása meghaladja a 250 embert az érintett területen, így a $\gamma_{Iw} = 1,15$ szerkezeti

szélhatás-tényező lett választva. A szélnek a szerkezetre gyakorolt hatása az épület külső merevnek tekintett felületére ható felületi szélnyomás/szálszívás formájában volt számítva és az (1) képlettel kifejezve:

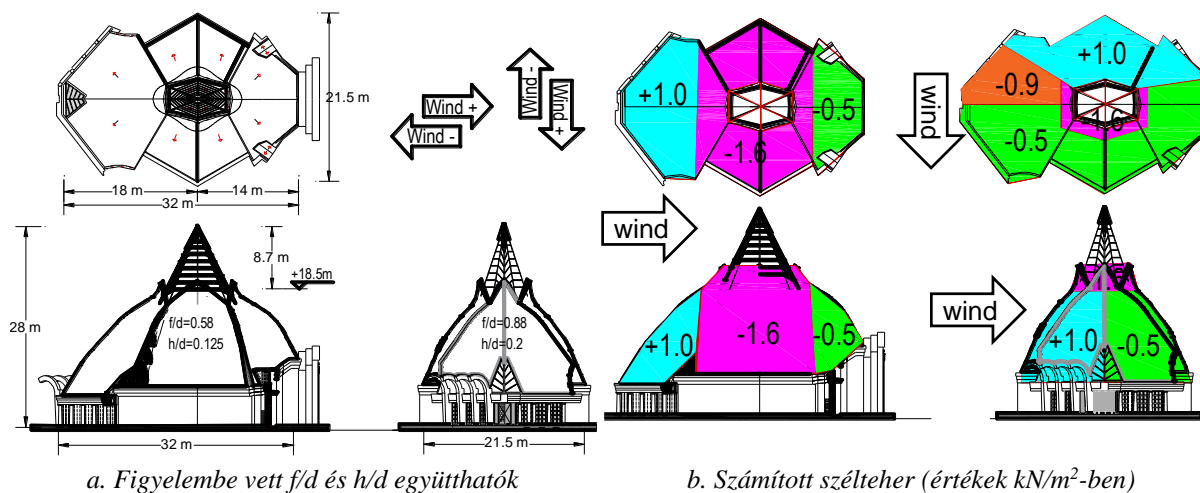
$$w_e = \gamma_{lw} \cdot q_p(z_e) \cdot c_{pe} \quad (1)$$

ahol c_{pe} a külső nyomási tényező, z_e a külső nyomás referencia-magassága. A dinamikus szélnyomás csúcserőteke z magasságban a talaj felett (2):

$$q_p(z_e) = c_e(z) \cdot q_b \quad (2)$$

A helyszíntényező (tereptényező) $c_e(z)$ egy részletes eljárással (is) számolható, a $c_r(z)$ érdességi tényező és a $c_{pq}(z)$ rövidtávú sebesség-ingadozást alapul véve. Ugyanakkor egyszerűsített grafikus módszer is alkalmazható ([5] 2.2. ábra), amelynek eredményeként $c_e(z)=2.4$ és így $q_p(z_e)=1.37 \text{ kN/m}^2$ lesz. A fő kihívás az (1) képletet használatkor a c_{pe} külső nyomási tényező meghatározása, figyelembe véve a szerkezet magasságát, hosszát, szélességét és ívtémérőjét, a 2. ábra szerint.

A 3. ábrán a szabvány szerinti egyszerűsített megközelítésen alapuló szélterhelési értékek eredményeit lehet követni [4], [5]. Könnyen megfigyelhető, hogy a szélnyomás ingadozása a kis méretű területekre korlátozódik és a helyi hatásokat nem lehet igazán értékelni. Ugyanakkor a kupola szélterelő hatását sem lehet figyelembe venni a szárnyas-tornyok szélterhelésének számításakor.



3. ábra

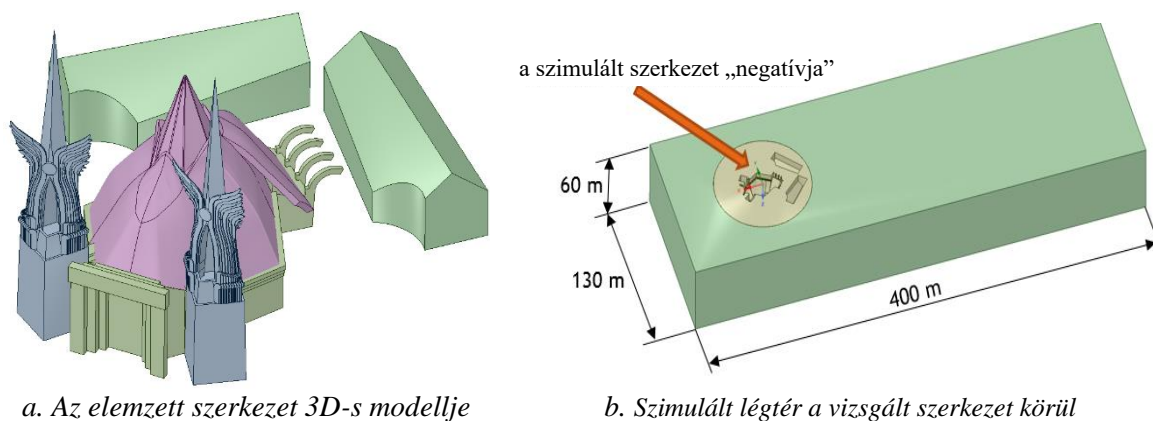
A szélterhek részletei a tervezési szabvány alapján

3. A NUMERIKUS SZÁMÍTÁS

Mivel a szabvány [5] korlátozott lehetőségeket kínál a komplex geometriájú építmények számításánál, valamint a [3] kijelenti, hogy ha két vagy több egymás közelébe lévő magas épületcsoportok esetén, az ezeken áthaladó széláram számottevően deformálódhat, jelentősebb dinamikus nyomást gyakorolva a szomszédos magasabb épületekre, ezeket a hatásokat egy numerikus megközelítéssel lehet megbecsülni, ami jelen esetben pedig folyadékok dinamikája (Computational Fluid Dynamics - CFD) segítségével történt.

Általánosságban elmondható, hogy a folyadékdinamikai elemzés négy fő lépésből áll, úgy mint 1) a geometria és a végelem-háló generálása; 2) a bemeneti értékek és a modell peremfeltételeinek beállítása; 3) a parciális differenciálegyenlet (PDE) megoldása és 4) az eredmények feldolgozása. A modell felállítása az elemzés egyik legfontosabb lépése [6], ami akkor ideális, ha a kapott egyenletek bonyolultsága minimális, miközben megragadja lényeges fizikai viselkedéseket.

A szerkezet burkolatára ható szélnyomás pontos meghatározásához és a szomszédos szerkezetek figyelembevételéhez, a szerkezet körüli levegőáramlás modellezéséhez az Ansys CFX R17.1 program lett használva [7]. A jelen tanulmányban a szerkezetet merevnek volt tekintve (nem-deformálódó szilárd anyag) (4a ábra), így az összes dinamikus hatás figyelmen kívül lett hagyva. A szimulációs tartomány a környező levegőmennyiség (60 m x 130 m x 400 m téglalap) és a szerkezet külső héjának metszésével lett kialakítva. A hálóképző lépéshez kapcsolódó számítási erőfeszítés csökkentése érdekében kör alakú metszet (4b. ábra, világosszürke rész) lett meghatározva, amely körülveszi a szerkezetet. Ez az egyszerű módosítás lehetővé tette a különféle szélirányok könnyű figyelembevételét anélkül, hogy a hálót minden egyes futásnál újra kelljen generálni.

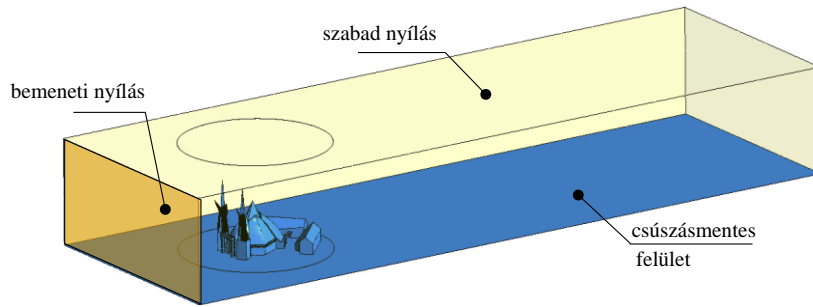


4. ábra

A vizsgált szerkezet és a szimulációs tartomány segítségével

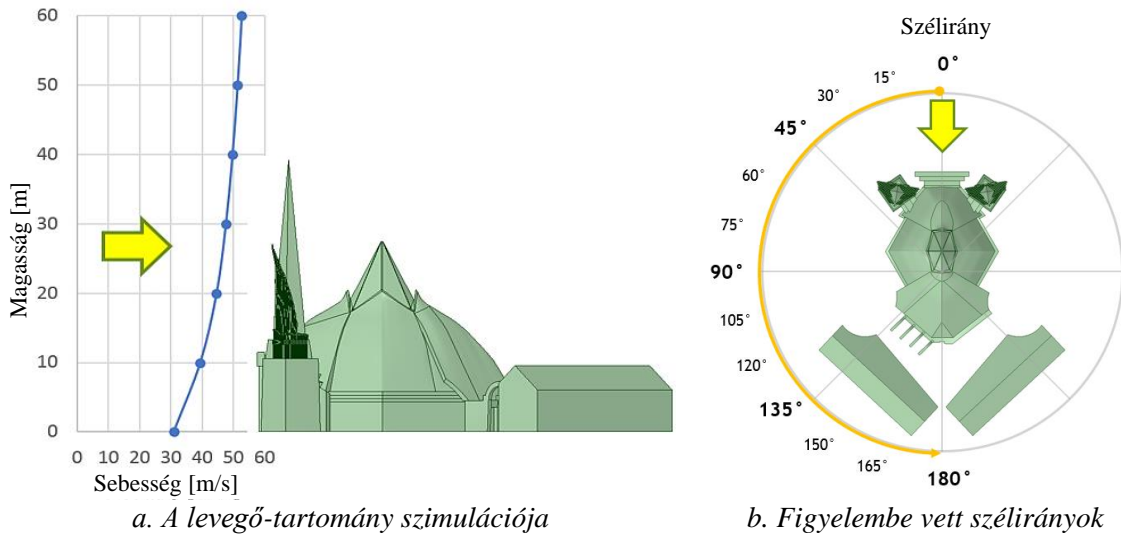
A szerkezet körüli levegőt összenyomhatatlan folyadéknak volt tekintve (mivel a várt szélesség 0,3 Mach alatt volt [8]), 25 °C-os állandó hőmérséklettel. Ez a feltételezés lehetővé tette a jó konvergencia-arányt az eredmények veszélyeztetése nélkül. A mindennapi helyzetekben tapasztalt folyadékáramlás turbulensnek tekinthető, azaz a folyadékmozgást az áramlási sebesség és a nyomás véletlenszerű változásai jellemzik. A turbulens áramlásnak nincs valódi meghatározása, de számos jellemzőjével rendelkezik [9], pl. szabálytalanság, diffúziós tulajdonság, háromdimenziós állapot, disszipáció, stb. Annak ellenére, hogy a turbulencia kaotikus, determinisztikus és a Navier-Stokes egyenletekkel leírható [10]. A turbulens áramlásnak széles skálája van. A különböző turbulenciamodellek komplexitása erősen eltérhet. Felhasználásuk attól függ, hogy milyen részleteket szeretnénk megfigyelni és vizsgálni a numerikus szimulációval. A turbulencia modellek teljes és átfogó leírása a [11] referenciában található.

Egy széláramlás szerkezet körüli szabad turbulenciáinak modellezésére egy $k-\varepsilon$ modell-transzfer lett kiválasztva. A modell a két változó PDE-jeit oldja meg, azaz a k kinetikus turbulencia energiáját és az ε energiaeloszlási sebességet. A $k-\varepsilon$ modell nagyon sokoldalú, és jól működik a külső összetett geometriák esetében. A különböző szélirányok figyelembevétele érdekében az elemzett szerkezet „negatív” modelljét tartalmazó hengeres rész (4b. ábra) rögzítve volt, míg a külső levegő-tartomány a hengeres tér tengelye körül volt forgatva. Az 5. ábra a légtér szempontjából figyelembe vett peremfeltételeket mutatja be. A bemeneti nyíláson egy normál sebességprofil lett beállítva (6a. ábra). A tartomány talajszintje csúszásmentes felületként, míg a többi határfelület (szabad) nyílásokként lett meghatározva. Ezeket a feltételeket használva 13 különböző szélirányt lett figyelembe véve (6b. ábra), a szél irányát forgási lépésekkel módosítva, 180°-os intervallumban, ugyanis a szerkezet szimmetrikusnak volt tekintve. Amint az várható volt, megállapítható, hogy a tornyok akkor vannak kitéve a legnagyobb széletheznek, amikor a szél előlről és hátulról fúj (7. ábra). Az is megfigyelhető, hogy a tornyok belső felületein (7b. ábra) a nyomás magasabb a kupola tetőjének szélhasító hatása miatt.



5. ábra

A levegő-tartománynak figyelembe vett peremfeltételek

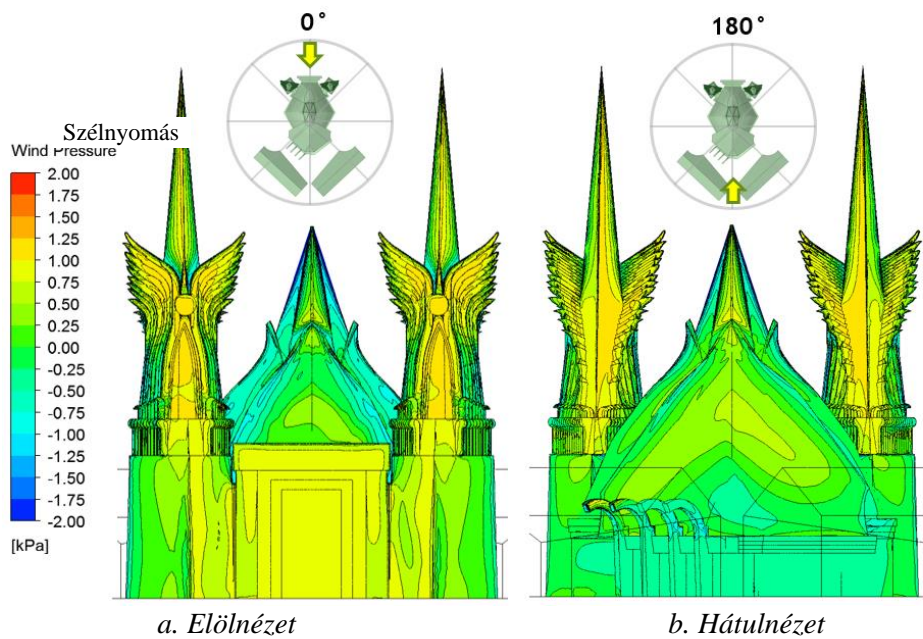


a. A levegő-tartomány szimulációja

b. Figyelembe vett szélirányok

6. ábra

Figyelembe vett szélirányok és szélesség-profil

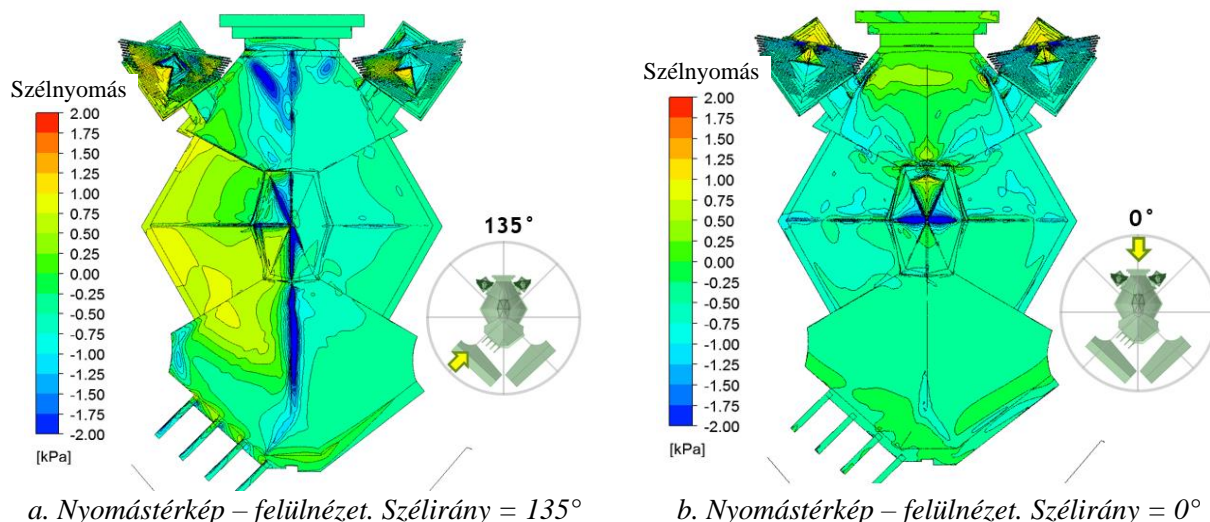


a. Előlnézet

b. Hátnézet

7. ábra

Szélteher 0° és 180° szélirányban



8. ábra

Szélnyomás 0° és 180°-os szélirányra (felülnézet)

A 8. ábra a tetőszerkezeten megjelenő nyomástérképet szemlélteti felülnézetből. A mélykék színű részek azok a területek, ahol a levegő áramlása leválik a felületről, negatív nyomást okozva jelentős szívó hatással, amely károsíthatja a szerkezet burkoló elemeit. Ezek az alacsony nyomású területeket megfigyelhetők minden szélirányban. A központi kupola nagyobb szélnyomásnak van kitéve, ha a szélirány 120-135° között van, a nyomás szintje azonban valamivel alacsonyabb, mint a tornyok esetében. A 8b. ábra a 0°-os szélirányból keletkező nyomástérképet mutatja felülnézetben, ahol alacsony nyomású területek figyelhetők meg úgy a tetőszerkezeten, mint a tornyok középső zónáiban.

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A cikk betekintést nyújt egy komplex geometriájú épületcsoport egyik részén végzett szélterhelés értékelésébe. Az európai [4] és a romániai [5] szabványok útmutatást adnak az alaprajzban és a magasság mentén szabályos alakú épületek szerkezeti tervezéséhez használt szélhatások meghatározására. A gyakorlatban, ha a szerkezet alakja bonyolult, a szélterhelés értékelése megnehezedik, a sok egyszerűsítés miatt a szélnyomás eloszlása bizonytalansághoz vezet. Különleges formájú vagy felületű szerkezetek esetén a legnehezebb feladat a külső nyomási tényező (c_{pe}) meghatározása.

A vizsgált szerkezetenél a kézi megközelítő számítással végzett módszer használatával a szélterhelés elvileg csak hossz- és keresztirányban számolható, a szomszédos szerkezetek hatásainak figyelembevétele, valamint egy részletes nyomástérkép létrehozása nélkül. E hiányosságok kiküszöbölésére numerikus eljárás alkalmazható, a fentebb bemutatott folyadékdinamikai módszer segítségével. Ez a megközelítés lehetővé tette több szélirány figyelembevételét viszonylag korlátozott számítási erőfeszítéssel (6. ábra). Lehetőség nyílt minden domináns szélirányra azon felületek azonosítása, ahol nyomáskoncentráció lép fel, továbbá lehetővé vált a nyomó- és a szívóterhelés együttes vizsgálata, a síkban és magasságban változó szélnyomásra. Ezenkívül a numerikus megközelítés lehetővé tette a közeli épületek figyelembevételét és ezek hatását a vizsgált szerkezetre, beleértve a tetőszerkezet szélhasító hatását is.

Fontos megemlíteni, hogy a romániai szabvány szerinti egyszerűsített kézi számítás konzervatív nyomásértékeket eredményezett a szerkezet felületein, kivéve a szerkezet élei körül kialakult területeket, ahol kiugró nyomáskoncentráció észlelhető (lásd a 7. és 8. ábrán is látható 2 kN/m²-t meghaladó terheléseket).

HIVATKOZÁSOK

- [1] Makovecz, I. (2015). Guide to Hungarian Organic Architecture, EPL, pp. 182.
- [2] Makovecz, I. (2013). Churches, pp. 332.
- [3] Architectural Institute of Japan (2006). Recommendations for Loads on Buildings.
- [4] EN 1991-1-4:2005+A1 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions, 2010.
- [5] CR 1-1-4/2012 - Cod de proiectare. Evaluarea actiunii vântului asupra constructiilor.
- [6] Sodja, J. (2007). Turbulence models in CFD, Ljubljana.
- [7] ANSYS® CFX, Release 17.1, Help System, ANSYS, Inc.
- [8] <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/machrole.html> (last accessed in 2019 febr.).
- [9] Tennekes, H., Lumley, J. L. (1972). A First Course in Turbulence. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [10] Davidson, L. (2018). An Introduction to Turbulence Models, Publication 97/2, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
- [11] Davidson, L. (2019). Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modelling, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
- [12] Kun L., Crisan A., Nagy-György T., Boros I. (2019). Wind effect modelling for a wind-sensitive structure in Timisoara, 18th Int. Technical-Scientific Conference - Modern Technologies for the 3rd Millennium, Oradea. pp. 223-228.