Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Vásárhelyi Pál Építőmérnöki és Földtudományi Doktori Iskola

Hidak és Szerkezetek Tanszék

Rácsos tornyok teljesítményalapú tervezése szélteherre

Tézisfüzet

Kenéz Ágnes

Témavezető:

Dr. Joó Attila László

2024

Budapest

Tartalomjegyzék

1 Bevezetés ... 2

1.1 Problémafelvetés ... 2

1.2 Motiváció ... 2

2 Kutatási stratégia ... 3

3 Rendelkezésre álló adatok ... 4

3.1 Sződligeti rácsos torony - esettanulmány ... 4

3.2 Az Országos Meteorológiai Szolgálat adatai ... 5

4 A PBWE keretrendszer ... 6

4.1 Extrémszélsebesség-modell ... 8

4.2 Szél – szerkezet kölcsönhatás ... 9

4.3 Szerkezeti analízis ... 10

5 Normálerők az alsó övrudakban a mérések alapján ... 11

6 Ellenállástényezők tárgyalása ... 12

7 A szerkezet megbízhatóságának tárgyalása ... 13

8 Érzékenységvizsgálat ... 14

9 Új tudományos eredmények ... 16

9.1 Tézisek ... 16

9.2 Vonatkozó publikációk ... 19

10 Jövőbeni kutatási lehetőségek ... 20

1 Bevezetés

1.1 Problémafelvetés

A szélterhelés modellezése, ami számos szerkezettípus integritását jelentősen befolyásolja és az egyik legjelentősebb hatás, nagy bizonytalansággal jár. A szerkezeti tervezés során kompromisszumot kell találni a biztonsági követelmények és a túltervezéssel járó többletköltségek között. Ezért rendkívül fontos a vonatkozó modellezési feltételezések vizsgálata és annak biztosítása, hogy a modell megfelelően leírja a valóságot. A szerkezeti tervezési szabványok, például az Eurocode tervezési képletei a fél-valószínűségi módszeren alapulnak, amely mind az ellenállás, mind a hatás oldalán parciális biztonsági tényezőket használ, ahol a tervezési értékeknek konzervatív becsléseknek kell lenniük. Egyes tanulmányok rámutattak arra, hogy egyetlen parciális biztonsági tényező alkalmazása az összes kedvezőtlen környezeti változó hatására nem feltétlenül ésszerű, mivel ezek a környezeti hatások különböző fizikai jelenségekből erednek, és különböző modellekkel jellemezhetők. Korábbi kutatások és a megfigyeléseink szerint az extrém szélviharok a tervezettnél lényegesen kisebb szerkezeti igénybevételt, károsodást okoztak a távközlési rácsos tornyokban. Ezért a következő kérdésekre keressük a választ: Mi okozza az Eurocode (EN 1993-3-1) szerint számított feszültségek és a mért értékek közötti eltérést? A modell mely paramétereit lehet változtatni, hogy a modell jobban illeszkedjen a valós viselkedéshez? Az EN 1993-3-1 szabvány szerinti egyenértékű statikus módszerben a szél-szerkezet kölcsönhatását leíró ellenállástényezőt eredetileg az 1977-ben végzett, 1:6 méretarányú szélcsatorna-vizsgálatokból vezették le. Úgy tűnik, hogy a formula jobban illeszkedik a jelenség leírásához a modell méretarányában, mint a teljes léptékű szerkezeteknél. Továbbá a szerkezeti teljesítményalapú valószínűségi modellezésében gyakran figyelmen kívül hagyják az extrémszélsebesség-modellek paraméterbecslési bizonytalanságának figyelembevételét, ami jelentős hatással lehet az extrém hatások modellezésére.

1.2 Motiváció

A számítástechnika fejlődése megnyitotta az utat a teljes-valószínűségi megközelítéseket és szimulációs technikákat alkalmazó tervezési eljárások előtt. A teljesítményalapú tervezés (PBD) olyan átfogó kockázatértékelést foglal magában, amely a szerkezeti biztonsági megfontolásokon túlmenően a következmények költségeit is magában foglalhatja. A teljesítményalapú tervezés szélteherre (PBWE) módszertan alkalmazása, amely lehetővé teszi a mérések figyelembevételét és a szerkezet valós idejű nyomon követését, képes csökkenteni a bizonytalanságokat és megelőzni a

szerkezetek túlméretezését. A PBWE egyre nagyobb népszerűségre tesz szert, mivel hatékonyan kezeli a különböző szélmérnöki problémákat, így széles körben elfogadott megközelítéssé vált a területen. Ezért a bemutatott kutatómunka a teljesítményalapú szélteherre tervezési keretrendszer (PBWD), monitoring rendszer és végeselemes modell integrációjára összpontosít, a szerkezeti megbízhatóság értékelése érdekében. Ezen túlmenően bevezetésre kerül a Bayes-módszer, amely hatékony megközelítés a különböző információforrások, köztük a különböző mérések és a szélhatás valószínűségi modelljeinek kombinálására, az EN 1991-1-4 szerinti szélsebesség alapértékének meghatározása érdekében. Ez az integráció tükrözi az Eurocode-ok második generációjának fejlődését, amelynek célja a legújabb ismeretek beépítése és a különböző régiók közötti harmonizáció erősítése. A szabvány felülvizsgálata tartalmazza a szélsebesség kiindulási alapértékének meteorológiai mérésekből történő levezetését, a szélhatások valószínűségi modelljeinek használatát, valamint a tervezési paraméterek szélcsatorna vizsgálatokból és numerikus szimulációkból történő meghatározását.

2 Kutatási stratégia

Első lépésként egy alapos szakirodalmi áttekintés foglalkozik a szélmérnöki szakterületen végzett korábbi kutatásokkal, az extrém szélviszonyok távközlési tornyokra gyakorolt hatására fókuszálva. Ez magában foglalja a szélsebesség alapértékével, a torony aerodinamikájával és az ellenállástényező jellemzésével kapcsolatos modellezési szempontokat. A kutatások különböző tudományterületeket ölelnek fel, például a meteorológiát, a valószínűségelméletet, az áramlástant és a szerkezeti analízist.

Ezt követően egy teljesítményalapú tervezési keretrendszert ismertetek a távközlési rácsos tornyok szélsőséges szélviszonyokra adott válaszának elemzésére. A keretrendszert a közép-magyarországi, Sződliget külvárosi területén található, szabadon álló rácsos torony vizsgálatára alkalmaztam. A torony tetején és közepén kanalas szélsebességmérők, valamint az alsó övrudakon nyúlásmérő bélyegeket telepítettek a torony szélterhelésre adott válaszának mérésére. A Sződligetről származó információkat kiegészítem az Országos Meteorológiai Szolgálat más meteorológiai állomásainak információival. Az extrémszélsebesség-eloszlás modellek különböző módszereit és paramétereit alkalmazom a szélsebesség kiindulási alapértékének becslésére a különböző mérési adatsorokból. A Bayes-módszert alkalmazom a különböző forrásokból származó információk szintetizálására.

A szél-szerkezet kölcsönhatását az EN 1993-3-1 szabvány szerinti egyenértékű statikai módszerrel modellezem. Ez az ellenállási tényező alkalmazását jelenti, és

Fenyvesi, O., Kenéz, Á., Kovács, É, Rácz, A. (2014) Szerkezeti könnyűbeton előregyártott hídszerkezeti elemekhez, XVIII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, Csíksomlyó, Románia, 2014.06.12-15., pp. 149-152

10 Jövőbeni kutatási lehetőségek

A szél-szerkezet kölcsönhatást leíró ellenállástényező a lehetséges jövőbeli kutatások egyik területe. Az EN 1993-3-1 szabvány szerinti egyenértékű statikus módszerben az ellenállástényező eredetileg az Egyesült Királyságban a Nemzeti Tengerészeti Intézet (NMI) által 1977-ben végzett, 1:6 méretarányú, csökkentett szélcsatorna-vizsgálatokból vezették le. Következésképpen úgy tűnik, hogy az szabvány által megadott képlet jobban igazodik a modell léptékben, mint a teljes léptékű körülmények között megfigyelt értékekhez. A szabvány különbséget tesz a szubkritikus és a szuperkritikus tartományban lévő kör keresztmetszetű elemek között, az átmeneti pontot $Re = 4 \cdot 10^5$-nél állapítja meg, miközben konzervatív módon kihagyja a kritikus tartományt. Figyelembe véve az ipar azon célját, hogy a pontos terhelési adatok megszerzésével takarékoskodjon az erőforrásokkal és csökkentse a költségeket, az 1970-es években az Egyesült Királyságban végzett méretarányos vizsgálatokból származó ellenállástényezőket részletesebben meg kell vizsgálni. A kihívást annak a Reynolds-számnak a meghatározása jelenti, amelynél a ellenállástényező jelentősen csökkennek. Ennek megoldásához elengedhetetlenek további vizsgálatok teljes léptékű szélcsatorna-tesztek elvégzésével és áramlástani numerikus szimulációk segítségével.

Egy másik jelentős terület a szélsebesség kiindulási alapértékének megállapítása. Az Európai Uniós irányelveknek megfelelően az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) a megfigyelési és mérési adatait (2002-től kezdődően) egy 2021-es nyílt adatszerveren keresztül szabadon elérhetővé tette. Az adatbázis lehetővé teszi a szélsebességek alapos vizsgálatát Magyarország különböző régióiban. Az adatok segítségével részletes összehasonlítás végezhető a hagyományos módszer, a blokk-módszer, valamint a küszöbérték feletti csúcsok módszer között. Továbbá a Cook (2019) által javasolt Eltolt-elliptikus-normál modell alkalmazása fizikailag elfogadhatóbb leképzést nyújthat a szélsebesség és szélirány többdimenziós és marginális eloszlásainak, ami hatékony stratégiát jelenthet a szél éghajlati modellezéséhez. A bemutatott számítási eljárás egy stacionárius ergodikus folyamat feltételezésén alapul, tehát a folyamatot időben állandónak tekintjük, konstans paraméterértékekkel. A jövőbeni kutatások nem-stacionárius elemzést vizsgálhatnak, amely figyelembe veszi az extrémértékek viselkedésének időbeli változásait, lehetővé téve a statisztikai tulajdonságok egyidejű változását. Ezen túlmenően Markov-lánc Monte Carlo-folyamattal lehet vizsgálni a rövid adatsorok kiterjesztését, szintetikus adatsorok generálásával a ténylegesen mért adatsorok statisztikája alapján.

9.2 Vonatkozó publikációk

Tudományos folyóiratcikkek:

Kenéz, Á., and Joó, A. L. (2023a). Performance-based Wind Engineering assessment of a telecommunication mast utilizing Bayesian extreme wind velocity model, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, (2023), https://doi.org/10.1007/s00477-023-02596-w, Impact factor: 4.2 (Q1)

Kenéz, Á., and Joó, A. L. (2023b). The impact of parameter estimation uncertainty in extreme wind speed models. Pollack Periodica, 18 (2023) 1, pp. 78-83, https://doi.org/10.1556/606.2022.00645, Impact factor: 0.26 (Q3)

Kenéz, Á., and Joó, A. L. (2020). Parameter estimation and threshold selection uncertainty in extreme wind speed distribution – A frequentist approach with generalized Pareto distribution using automatic threshold selection. Idojárás, 124(3), pp. 311-330, https://doi.org/10.28974/idojaras.2020.3.1, Impact factor: 0.86 (Q4)

Konferenciakiadványban megjelent cikk:

Kenéz, Á., and Joó, A. L. (2023c), Performance-based wind engineering assessment of a telecommunication mast. ce/papers, 6(3-4), pp. 1099-1104. https://doi.org/10.1002/cepa.2322

Kenéz, Á., and Joó, A. L. (2019), Extrém szélsebesség eloszlás paraméterbecslési bizonytalansága és hatása a tartószerkezetek megbízhatóságára - POT módszer automatikus küszöbválasztással, XIII. Magyar Mechanikai Konferencia, 2019.08.27-29.

Kutatási témától eltérő publikációk:

Szabó, G., Völgyi, I., Kenéz, Á., (2022) Vibration Assessment of a New Danube Bridge at Komárom", Periodica Polytechnica Civil Engineering, 66(4), pp. 1014–1022. https://doi.org/10.3311/PPci.19508, Impact factor: 1.3 (Q3)

Kenéz, Á., Jakab, S., Opoldusz, M., Joó, A. L. (2016) Vékonyfalú, hidegen alakított Z-szelemen átlapolt kapcsolatának vizsgálata, XX. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, Csíksomlyó, Románia, 2016.06.01-05., pp. 109-110

Lendvai A., Kenéz, Á., Rácz A., Joó, A. L. (2015) Acélcsarnokok burkolati merevsége - 3. rész: az Eurocode módszerének pontosítása. MAGÉSZ Acélszerkezetek 12: (1. különszám) pp. 78-83.

Kenéz, Á., Rácz A., Joó, A. L., Dunai, L. (2015) Acélcsarnokok trapézlemez burkolatának merevítő hatása, XIX. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia, Csíksomlyó, Románia, 2015.06.04-07., pp. 97-100

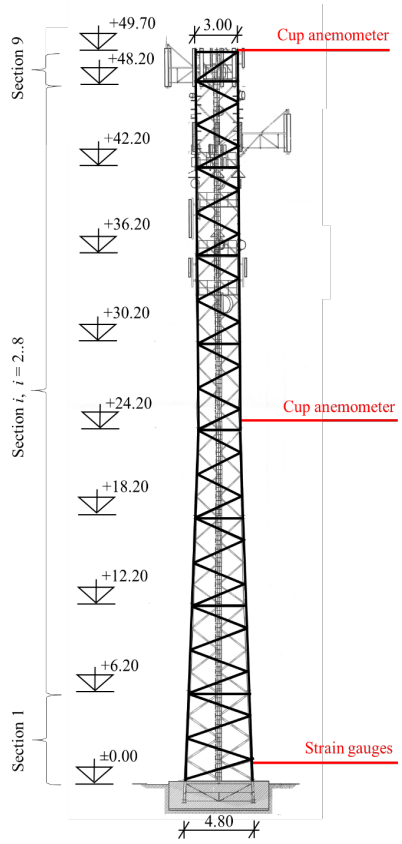
Fenyvesi, O., Kenéz, Á., Kovács, É, Rácz, A. (2014) Ipari hulladékok újrahasznosítása beton adalékanyagként, Meddő? Hulladék? Nem! Haszonanyag!, Budapest, Hungary, 2014.05.15., pp. 111-118

az eredményeket összehasonlítom a szélcsatorna-kísérletekből kapott légellenállási tényezőkkel. A szerkezeti válasz modellezésére egy gerendaelemeket tartalmazó végeselemes modellt fejlesztettem. Ez a modell figyelembe veszi az önsúlyt és az extrém szélhatásokat. Az alsó övrudakon végzett nyúlásmérésekből számított normálerőket összehasonlítjuk a numerikus modell eredményeivel, amelyek az EN 1993-3-1 szabvány szerint meghatározott, illetve a szélcsatorna kísérletekből származó ellenállástényezőket tartalmazzák.

3 Rendelkezésre álló adatok

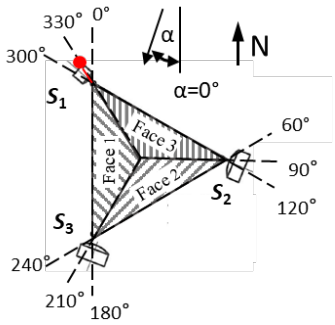
3.1 Sződligeti rácsos torony - esettanulmány

A PBWE keretrendszer alkalmazásával vizsgálatot végeztem egy szabadon álló, távközlési rácsos tornyon, amely a közép-magyarországi Sződliget külvárosi területén található. A háromszög keresztmetszetű rácsos torony teljes magassága 49,70 m. A szerkezetek szélessége a magasság mentén változik, a legnagyobb szélesség alul 4,80 m, míg felül 3,00 m-re csökken. A szerkezet fő méretei az 1. ábraán látható. Mind az övrudak és a rácsrudak kör keresztmetszetű zártszelvények, különböző átmérővel (76-159 mm) és falvastagsággal (2,9-12,5 mm); a szerkezeti acél S235 minőségű. A keresztmetszeti méreteket a 8. ábra mutatja be. A torony lineáris segédberendezésekkel, azaz létrával és kábelekkel felszerelt, és összesen 23 szektor- és mikrohullámú antennát telepítettek rá. A torony kanalas szélsebességmérőkkel, hőmérővel és nyúlásmérővel van felszerelve a szélterhelésre adott válaszának mérésére. A szélsebességet a 2011 augusztusa és



1. ábra A Sződligeti, vizsgált távközlési rácsos torony főbb méretei

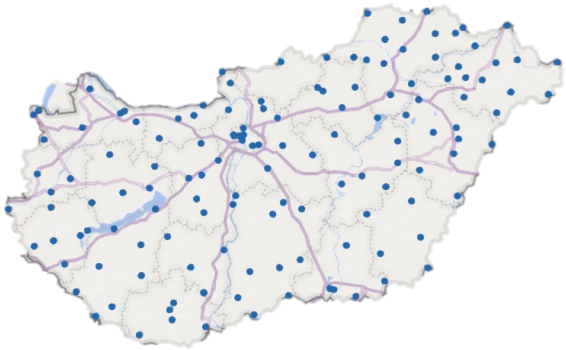
2015 márciusa közötti időszakban 0,9 s mintavételi gyakorisággal mérték a rácsos torony közepén és tetején, azaz a talajszint felett 25 m és 49,70 m magasságban. A hőmérséklet-kompenzációval ellátott, teljes hidas nyúlásmérőket az alsó övrudakon, a talajszint felett 4,8 m magasságban helyezték el. A rácsos torony északnyugati területét sűrű városi beépítés jellemzi. Az *a* szélirányra és az O159×13 csőkeresztmetszetű (S_1, S_2 és S_3) övrudakra vonatkozó jelöléseket a 2. ábra mutatja.



2. ábra Az *a* szélirány és az övrudak jelölései (S_1, S_2 and S_3);

3.2 Az Országos Meteorológiai Szolgálat adatai

Az Európai Unió irányelveivel összhangban az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) 2021. január 1-jétől egy nyílt adatszerver (https://odp.met.hu/) segítségével szabadon hozzáférhetővé teszi megfigyeléseit és mérési adatait (2002-től kezdődően). A kutatásban felhasznált meteorológiai állomások elhelyezkedését bemutató térképet a 3. ábra mutatja. Így a Sződligetből származó információk az ország különböző pontjairól származó mérési adatsorok bevonásával kiegészülnek. Az éves maximális szélsebesség adatokat 169 állomásról gyűjtötték össze, és ezek közül 67 állomás rendelkezik legalább 20 éves adatokkal. Másik lehetőségként megvizsgálom azt lehetőséget, hogy a Sződligetből származó információkat csak a legközelebbi meteorológiai állomásról, Pencről származó szélsbességmérési adatokkal egészítem ki.



3. ábra Országos Meteorológiai Szolgálat meteorológiai állomásai (OMSZ)

származó információk, valamint az éves maximumok módszer és legalább 20 éves adatsorból származtatott információk szintetizálására. Következésképpen az e paraméterekhez kapcsolódó episztemikus bizonytalanságot figyelmen kívül lehet hagyni.

Vonatkozó publikációk: Kenéz, Á., and Joó, A. L. (2023a), Kenéz, Á., and Joó, A. L. (2023b)

4. Tézis Az extrém szélviszonyoknak kitett, szabadon álló, távközlési rácsos tornyok megbízhatóságának értékelésére egy végeselemes módszeren (VEM) alapuló, Bayes-tétel alapú frissítéssel kiegészített, teljesítményalapú tervezési keretrendszert dolgoztam ki.

a) A keretrendszer alapvető elemei a következők:

i. Paraméterbecslés: A sztochasztikus extrém szélsebesség modell paramétereit, beleértve a szélsebességet, a szélirányt és az érdességi tényezőt, helyszíni adatgyűjtéssel határoztam meg.

ii. Küszöbértékek kiválasztása: A klasszikus éves maximumok módszere mellett a küszöbérték feletti csúcsok (POT) módszert alkalmaztam, amelyet a Thompson et al. (2009) által bevezetett automatizált küszöbértékválasztási technikával egészítettem ki, mely újszerű alkalmazást jelent szélmérési adatok esetén. Ezt a megközelítést hagyományos grafikus diagnosztika segítségével ellenőriztem. A módszert a vizsgálatok elvégzése előtt még nem alkalmazták szélsebesség adatokra.

iii. Bayes-tétel alapú frissítés: A Bayes-tétel alapú következtetés a különböző forrásokból származó adatok és a különböző extrém szélsebesség modellekből származó információk szintetizálására szolgál. Az alkalmazása a PBWE keretrendszeren belül újszerű megoldás.

iv. Szerkezeti válasz modellezése: A torony szerkezeti válaszának szimulálására végeselemes modellt alkottam. Ez megkönnyíti a szerkezettervező mérnökök számára a különböző tönkremeneteli módok és összetett jelenségek figyelembevételét.

v. Valószínűségszámítási elemzés: Véletlenszerű Latin hiperkocka mintavételezéssel és kvadratikus válaszfelületekkel támogatott Monte Carlo-szimulációt alkalmaztam. Ez a megoldás felgyorsítja és javítja a számítások hatékonyságát, biztosítva a nagyszámú mintán alapuló vizsgálatot.

b) A módszer alkalmazhatóságát egy Közép-Magyarországon található távközlési rácsos torony teljesítmény alapú elemzésén keresztül bizonyítottam.

c) Az MCS-hez és az RSM-hez tartozó becsült megbízhatósági mutatók átlagos eltérései, az EDP-k Gauss-eloszlását feltételező P_f alapján, 2% és 5% az SLS- és ULS-számítások esetében. Az SLS és ULS számítások maximális eltérései 9% és 17%.

Vonatkozó publikációk: Kenéz, Á., and Joó, A. L. (2023a), Kenéz, Á., and Joó, A. L. (2020)

ezekre a helyekre, az SLS esetében körülbelül három nagyságrendnyi, az ULS esetében pedig körülbelül nyolc nagyságrendnyi eltéréssel. A Kriging térbeli interpoláció alkalmazása az extrém szélsebességek számításához, valamint a Bayes-frissítés alkalmazása az adott helyszín megfigyelt adatainak felhasználásával megbízhatóbb és következetesebb becsült P_f értéket eredményez, amely összhangban van más vizsgált esetek becsült túllépési valószínűségeivel, ahol legalább 20 éves és több meteorológiai adatsort vesznek figyelembe. A Kriging térbeli interpoláció egy nagyságrenddel kisebb becsült P_f értékre vezet a referenciaesethez képest, amelyben a magyarországi meteorológiai állomások éves szélsebesség maximumok átlagának és szórásának felhasználásával számítottam az általános szélsőérték eloszlási paramétereket. Továbbá a magyar meteorológiai állomásokhoz kapcsolódó előzetes információk Bayes-frissítése, amely a vizsgált helyszínről származó megfigyelt adatokat is magában foglalja, körülbelül egy nagyságrenddel csökkenti a P_f értéket a referenciaesethez képest.

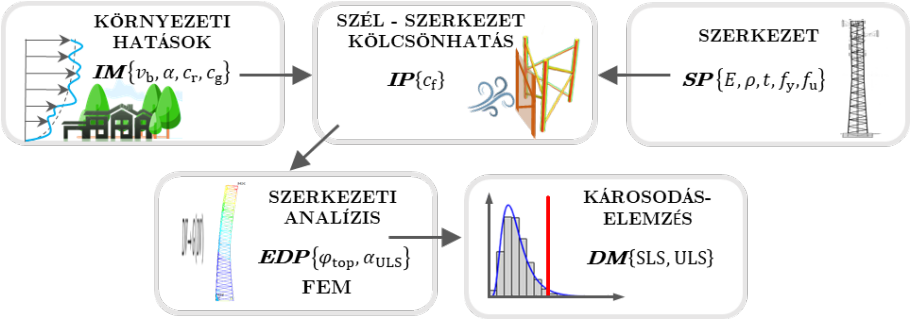
Vonatkozó publikációk: Kenéz, Á., and Joó, A. L. (2023a), Kenéz, Á., and Joó, A. L. (2023b)

3. Tézis A bemutatott teljesítményalapú szélmérnöki keretrendszerben, valószínűségszámítási elemzés keretében bemutattam a szélsebességek extrémérték-eloszlás skálaparaméterének jelentős hatását a kiválasztott mérnöki teljesítménymutató paraméterekre (*EDP*), különösen akkor, ha a küszöbérték feletti csúcsok (POT) módszert alkalmaztam automatikus küszöbválasztással, 500-nál kevesebb szélmérésből álló adathalmazzal, és az extrémérték eloszlás paramétereit maximum likelihood módszerrel becsültem. A 160 mintát tartalmazó véletlenszerű Latin hiperkocka mintavételezéssel és végeselemes modell alapú szerkezeti elemzéssel támogatott Monte Carlo-szimulációt alkalmaztam (MCS) a mérnöki teljesítménymutató paraméterekre illesztett kvadratikus válaszfelületeinek illesztésére és egy helyettesítő modell felvételére. Ezt követően $N = 10^6$ mintavételezésű Monte-Carlo-szimulációt végeztem az illesztett válaszfelületeken (RSM), hogy meghatározzam a határértékek túllépésének valószínűségét. A skálaparaméterhez tartozó becsült Spearman-féle rangkorrelációs együttható 0,27, a Sobol-index 0,08. Ezért a POT-eljárás során elengedhetetlen a skálaparaméterhez kapcsolódó episztemikus bizonytalanság figyelembevétele.

Ellenben az extrémérték-eloszlás σ skála és μ hely paraméterek statisztikailag nem bizonyulnak szignifikánsnak 2,5%-os szignifikanciaszinten, amikor Bayes-tétel alapú frissítést használunk a POT-eljárás és 500-nál kevesebb mintából álló adathalmazból

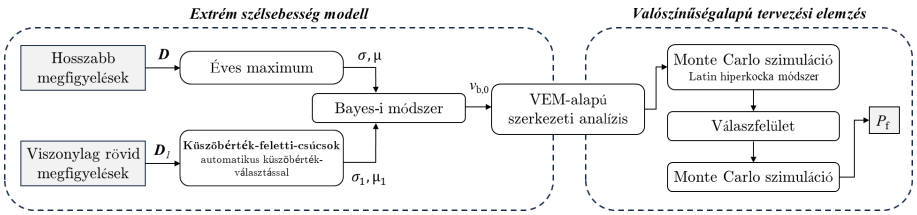
4 A PBWE keretrendszer

A szerkezeti teljesítmény kvantitatív értékelésének részletes vizsgálatát a 4. ábrán látható PBWE keretrendszer alapján végeztem. Az éghajlati szélviszonyt megfelelően és kellően részletesen leíró kulcsparamétereket kell megválasztani intenzitásmérő paraméterekként (*IM*). Sztochasztikus változóként kell figyelembe venni azon szerkezeti paramétereket (*SP*), pl. a vizsgált szerkezet mechanikai és anyagi tulajdonságait, amelyek bizonytalansága jelentősen hozzájárulhat a szerkezeti teljesítményhez. A hatás és a szerkezet közötti kölcsönhatási jelenséget a sztochasztikus változókként definiált kölcsönhatási paraméterekkel (*IP*) lehet leírni. A szerkezeti válasz valószínűségszámítási elemzésének elvégzéséhez meg kell választani a megfelelő mérnöki teljesítménymutató paramétereket (*EDP*). A szerkezeti károsodás számszerűsítése érdekében a károsodást mérő paramétereket (*DM*) egy vagy több *EDP* kombinációjával kell meghatározni.



4. ábra Az alkalmazott PBWE keretrendszer

A javasolt elemzési keretrendszer folyamatábrája az 5. ábrán látható, ahol D jelöli a mért adatokat, σ_i and μ_i jelöli a választott eloszlás skála- és helyparamétereit. A P_f szerkezeti tönkremenetel valószínűségét Monte Carlo-szimulációval, véletlenszerű Latin hiperkocka mintavétellel becsülöm.



5. ábra A javasolt elemzési keretrendszer folyamatábrája

A kimeneti változókhoz, mint például a torony tetejének φ_{top} elfordulásához a használhatósági határállapot (SLS) esetében, illetve az a_{ULS} teherszorzóhoz a teherbírási határállapot (ULS) esetében, kvadratikus válaszfelületeket illesztünk. A származtatott válaszfelületeken $N = 10^6$ mintavételű Monte Carlo-szimulációt végeztem, hogy megkapjam az *EDP*-k eloszlásfüggvényeit és a meghatározott határérték túllépésének valószínűségét. A határérték az SLS esetében a torony tetejének φ_{top} maximálisan megengedett elfordulására 0.5°, az ULS esetében pedig a teherszorzó határértéke 1. Ezután kell számítani a β megbízhatósági indexet, mint a megbízhatóság konvencionális mértékét. A valószínűségi tervezési változókat és a hozzájuk tartozó eloszlásfüggvényeket és paramétereket az 1. táblázat foglalja össze az SLS és ULS szimulációkhoz a JCSS (Joint Committee on Structural Safety, 2001) ajánlásai és a mérési eredmények alapján.

1. táblázat A PBWE elemzés valószínűségi tervezési változói

Határ áll.	Valószínűségi bemeneti változó		Eloszlás-függvény	Eloszlási paraméterek
SLS és ULS	Szélirány α		Gauss	$\alpha_{mean} = 299.719°$ $\sigma_\alpha = 18.621°$
	Szélsebesség kiindulási alapértéke $v_{b,0}$ ($\xi = 0$)	Skála σ	Gauss	(Mérésekből)
		Hely μ	Gauss	(Mérésekből)
	Ellenállástényező c_f		Gauss	CV = 0.15
	Érdességi tényező c_r		Gauss	CV = 0.20
	Széllökési tényező c_g		Gauss	CV = 0.17
	Rugalmassági modulus E		Lognormál	$E_{mean} = 210\ 000$ MPa $\sigma_E = 0.03 \times E_{mean} = 6300$ MPa
	Sűrűség ρ		Gauss	$\rho_{mean} = 7700 kg/m^3 \times 1.05 = 8085 kg/m^3$ $\sigma_\rho = 0.01 \times \rho_{mean} = 80.85\ kg/m^3$
	Falvastagság t		Gauss	$t_{mean} = t_{nom}$ $\sigma_t = 0.05 \times t_{mean}$
csak ULS	Folyáshatár f_y		Lognormál	$f_{y,mean} = 235MPa \times 1.00 \times e^{2.0 \times 0.07} - 20MPa = 250.3MPa$ $\sigma_{fy} = 0.07 \times f_{y,mean} = 17.5$ MPa
	Szakítószilárdság f_u		Lognormál	$f_{u,mean} = 1.5 \times f_{y,mean} = 375.5$ MPa $\sigma_{fu} = 0.04 \times f_{u,mean} = 15.0$ MPa

9 Új tudományos eredmények

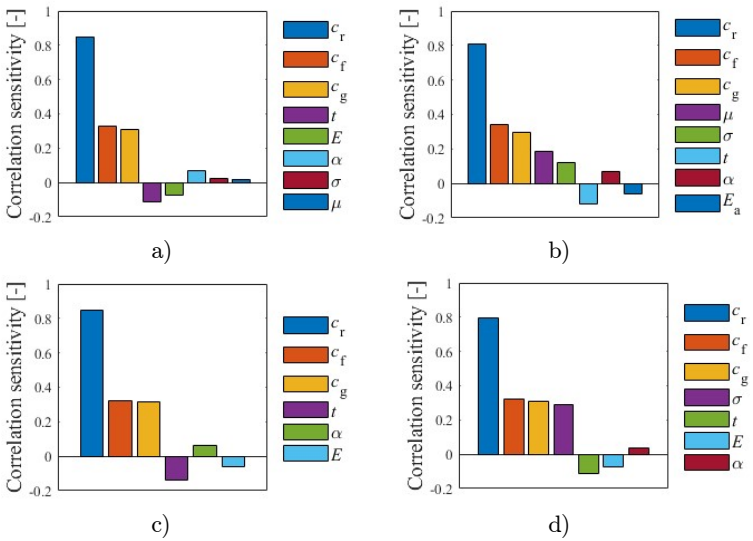
9.1 Tézisek

1. Tézis Az EN 1993-3-1 szabvány szerint számított toronyra ható szélterhet összehasonlítottam a Balczó et al. (2006) által végzett szélcsatorna-kísérletekből származó szélteher értékével. Ezek a vizsgálatok egy 1300 mm széles és 1600 mm hosszú, háromszög keresztmetszetű toronyszegmenst vizsgáltak, amely tűzihorganyzott kör keresztmetszetű zárt szelvényekből épült fel, az övrudak átmérője $D = 108$ mm, a rácsrudak átmérője $D = 75$ mm volt. Az EN 1993-3-1 szabványos képlet azonban konzervatív módon kihagyja a kritikus tartományt, és nem tartalmaz pontos meghatározásokat arra a Reynolds-számra vonatkozóan, amelynél az ellenállástényező csökken. Következésképpen eltérés van a szélcsatorna-mérésekkel meghatározott ellenállástényező és a szabványos érték között a 2,7-2,8· 10^5 Reynolds-számok esetében, ami megfelel az MSZ EN 1991-1-4:2007 magyar nemzeti mellékletben meghatározott szélsebesség kiindulási alapértéknek, ez a különbség 15-19%.

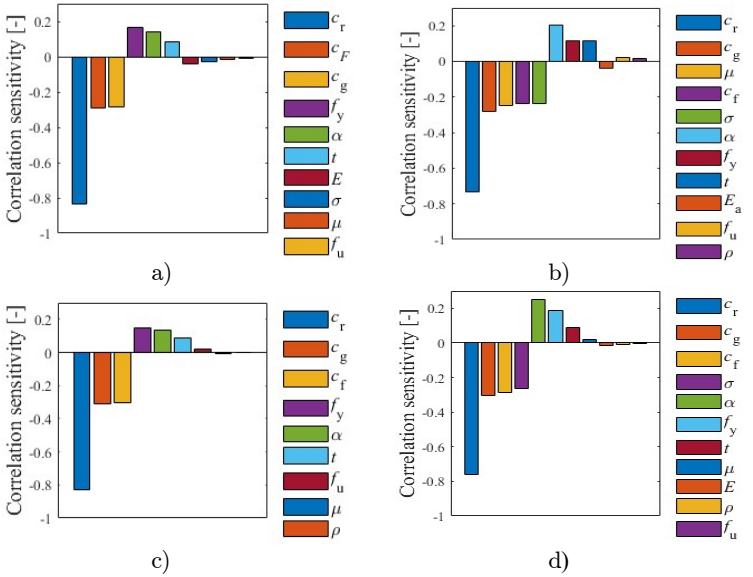
Összehasonlítottam egy teljes léptékű távközlési rácsszerkezetű torony alsó övrúdján végzett nyúlásmérésekből számított normálerőket és a determinisztikus numerikus modellekből származó eredményeket. Ezek a modellek az EN 1993-3-1 szabvány szerint számított, valamint szélcsatorna-kísérletekből származó ellenállástényezőket tartalmazzák. A szabványos és mért húzott övrúderők között 20-40 % eltérés figyelhető meg 20 és 30 m/s közötti szélsebesség esetén. Ezen eltérések mérséklése érdekében a szélcsatorna-vizsgálatok során megállapított szélterheket kizárólag a felső, 7-9. toronyszegmensre alkalmaztam, mivel ezek a szelvények megegyeznek a szélcsatorna-kísérletekben alkalmazottakkal. A torony alsó, 1-6. toronyszegmenst magában foglaló részéhez a szabványos szélerőket alkalmaztam. Ez a módosítás körülbelül 5-20%-ra csökkentette a különbségeket.

Vonatkozó publikációk: Kenéz, Á., and Joó, A. L. (2023a)

2. Tézis A vizsgálatban az EN 1993-3-1 szabvány szerint számított c_f ellenállás-/erőtényező helyett, szélcsatornakísérletből származó értékek alkalmazása jelentősen, mintegy két nagyságrenddel csökkenti a P_f becsült túllépési valószínűséget. A z_0 érdességi hossz helyszíni mérések alapján történő meghatározása az EN 1991-1-4 szabvány külvárosi terepekre javasolt érték helyett, a becsült P_f érték egy nagyságrendű csökkenéséhez vezet. A Sződligeten és Pencen megfigyelhető szélsebesség kiindulási alapértékek 57%-kal kisebbek, mint az összes magyarországi meteorológiai állomás figyelembevételével számított érték. Ez jelentősen kisebb becsült P_f értéket eredményez



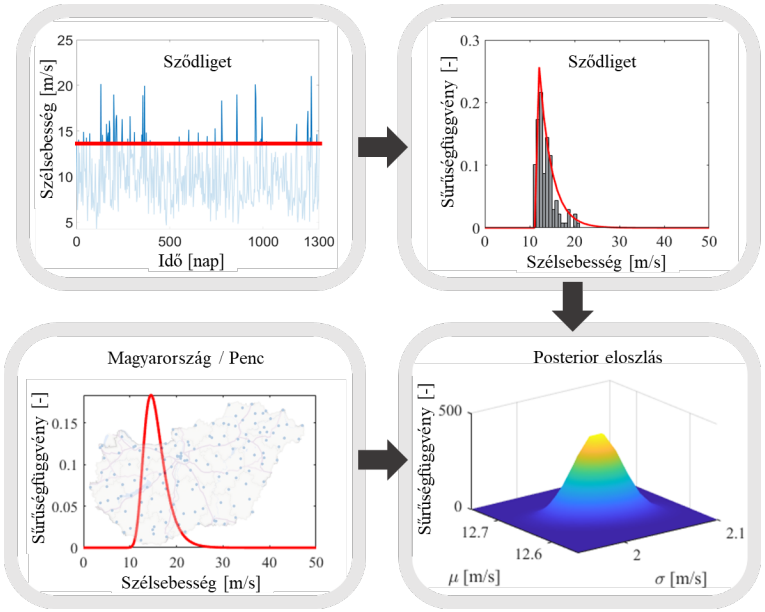
15. ábra Spearman-féle rangkorrelációs együtthatók SLS esetben a) Magyarország, b) Magyarország - Kriging c) Magyarország - Sződliget, és d) Sződliget



16. ábra Spearman-féle rangkorrelációs együtthatók SLS esetben a) Magyarország, b) Magyarország - Kriging c) Magyarország - Sződliget, és d) Sződliget

4.1 Extrémszélsebesség-modell

A disszertáció a szélsebességmodell paramétereinek Bayes-tétel alapú frissítését mutatja be, amely a torony helyszínén viszonylag rövid idő alatt gyűjtött mérésekből származó információkat kombinálja az OMSZ által az ország különböző pontjain végzett mérésekből származó, kiterjedtebb adathalmazzal (6. ábra). A rendelkezésre álló adatok korlátozott mennyisége miatt fennáll annak a veszélye, hogy az általánosított extrémérték-eloszlás (GEV) ξ becsült alakparamétere nagy statisztikai bizonytalanságot mutat, ami az extrém szélsebességek ésszerűtlen előrejelzéséhez vezethet. Emiatt, valamint a GEV-eloszlás σ skála és μ hely paramétereinek a Bayes-féle frissítési folyamat során a kétváltozós Gauss-eloszlással történő frissítésének megkönnyítése érdekében a ξ alakparamétert nullára választottam. Ezért a szélsebesség kiindulási alapértékét konzervatív módon becsültem. A Sződligeten a GEV-eloszlás paramétereinek meghatározására a küszöbérték feletti csúcsok (POT) módszert alkalmaztam, a rendelkezésre álló mérési adatsorok viszonylag rövid hossza miatt. A Thompson et al. (2009) által javasolt automatikus küszöbérték-választási technikát alkalmaztam, és hagyományos grafikus diagnosztika segítségével ellenőriztem.

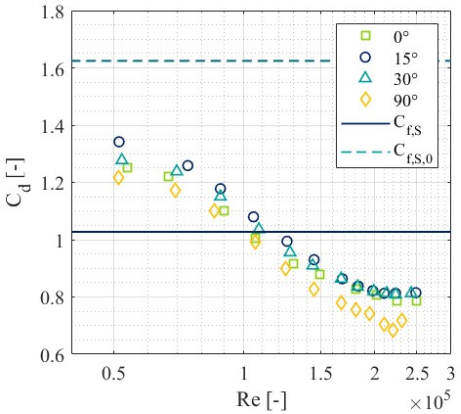


6. ábra POT módszer folyamatábrája Bayes-tétel alapú frissítéssel

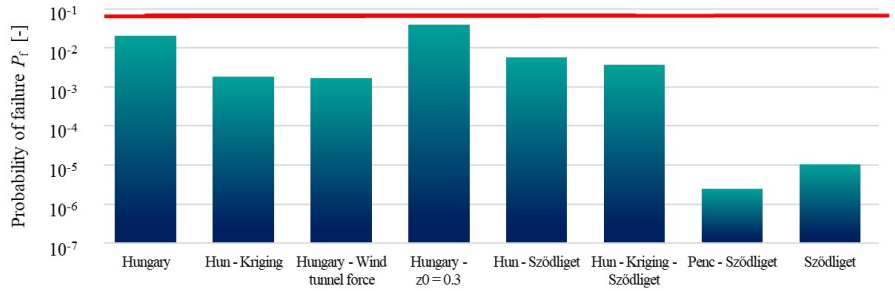
Ebben a tanulmányban az érdességi tényezőt a 25 m és 50 m magasságban mért szélsebességek alapján határoztam meg, a 10 m/s-nál nagyobb szélsebesség-átlagok logaritmikus profiljának felhasználásával, ahol az átlagolási időszak 10 perc, és a 10 m/s-os szélsebesség küszöbérték a 25 m magassághoz tartozik. Az adatelemzéshez, beleértve a valószínűségi eloszlások illesztését és a hipotézisvizsgálatok elvégzését, a MATLAB (R2022a) szoftvert használtam, a különböző eloszlások paramétereinek illesztését maximum likelihood módszerrel (MLE) végeztem.

4.2 Szél – szerkezet kölcsönhatás

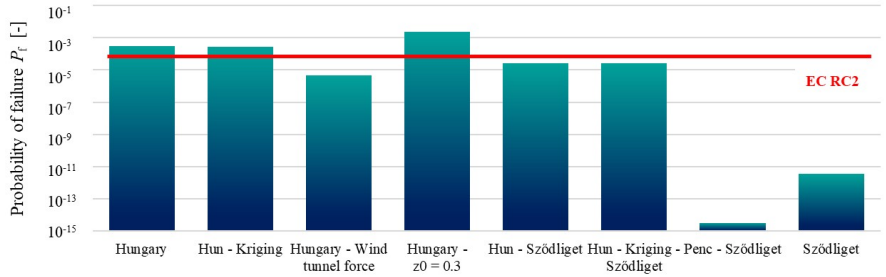
A szerkezetre ható egyenértékű statikus szélerő az EN 1991-1-4 és az EN 1993-3-1 szabványok alapján került számításra (CEN, 2006). A szerkezet teljesítményét a Balczó et al. (2006) által végzett szélcsatorna-vizsgálatokból kapott szélerő alkalmazásával is meghatároztam (7. ábra). A szélcsatorna-vizsgálatokban alkalmazott tűzihorganyzott toronyszegmensek övrúdjainak átmérője $D = 108$ mm, a rácsrudaké $D = 75$ mm volt. A segédberendezések nélküli szerkezet ellenállástényezője a szélirányától függően 0,87 és 1,03 között változik, az EN 1993-3-1 szabvány szerint számítva. Ezzel szemben a 2,7-2,8· 10^5 Reynolds-szám tartományban végzett szélcsatornamérések alapján 0,75 és 0,85 közé esik. El kell kerülni a teljes léptékű szerkezeteken és a kicsinyített modelleken végzett szélcsatorna-vizsgálatokból származó ellenállástényező közötti különbségekből eredő problémát. Ezek a különbségek nem csak az együttható nagyságában, hanem abban a szélsebesség-tartományban (Reynolds-szám) is megmutatkoznak, ahol ezek a különbségek jelentkeznek.



7. ábra A toronyszegmens ellenállástényezője a Reynolds-szám függvényében (Balczó et al. (2006) alapján)



13. ábra A használhatósági határérték túllépésének valószínűsége különböző esetekben és a P_f célérték az EN 1990 szabvány szerint (EC RC2)



14. ábra A teherbírási határérték túllépésének valószínűsége különböző esetekben és a P_f célérték az EN 1990 szabvány szerint (EC RC2)

8 Érzékenységvizsgálat

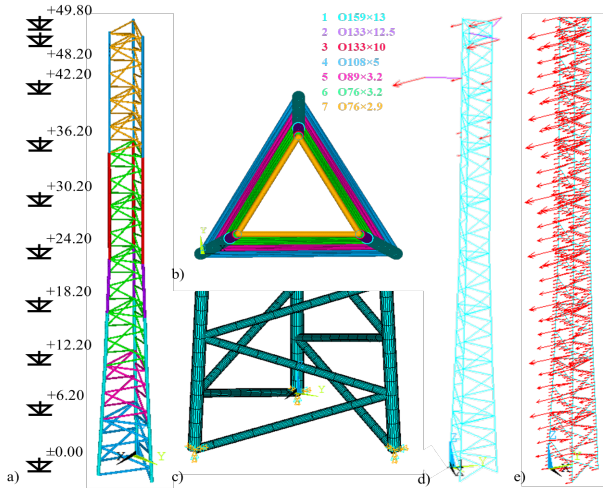
A választott *EDP*-k érzékenységét az egyes bemeneti változókra a Spearman-féle rangkorrelációs együtthatóval vizsgáltam (0-16. ábra). Kiemelendő, hogy a c_r érdességi tényező, a c_f erő együttható és a c_g széllökési tényező a magasabb relatív szórások miatt domináns hatással van az *EDP*-kre, míg az anyagparaméterek kisebb hatással vannak az *EDP*-kre. Az acél ϱ sűrűsége 2,5%-os szignifikanciaszinten minden esetben statisztikailag nem bizonyult szignifikánsnak. Ezenkívül megfigyelhető, hogy a σ jelentős hatással van az *EDP*-kre a Sződligeti adatok esetében, ahol csak a POT-módszert alkalmaztam. A magyarországi 20 éves mérési adatsorok esetében a σ és μ paramétereknek viszonylag kis hatása van. A Bayes-frissített esetben azonban ez a két paraméter statisztikailag nem bizonyult szignifikánsnak. Bár a jelen megállapítások a vizsgált adathalmazra és hasonló éghajlati viszonyokra érvényesek, a jelen dolgozatban bemutatott módszerek más szélmérnöki problémákra is alkalmazhatók.

7 A szerkezet megbízhatóságának tárgyalása

A használhatósági határérték túllépésének és a szerkezeti tönkremenetel P_f valószínűségét az RSM-szimulációk eredményeire illesztett lognormális eloszlás alapján számítottam (13. ábra-14. ábra). Az RC2 megbízhatósági osztályra vonatkozó biztonsági szint, más szóval a határérték túllépésének tervezett valószínűsége 50 éves referencia-időszakra $6{,}68 \cdot 10^{-2}$ az SLS, és $7{,}23 \cdot 10^{-5}$ az ULS esetében (EN 1990:2002, 2002). A szélcsatorna-vizsgálatokból származó c_f ellenállástényező felhasználásával a P_f körülbelül két nagyságrenddel csökken. Az EN 1991-1-4 szabvány szerint a külvárosi terepekre meghatározott $z_0 = 0{,}3$ érdességi tényező feltételezése a mérésen alapuló 0,877-es érték helyett a P_f körülbelül fél nagyságrenddel növekedik az SLS esetében és egy nagyságrenddel az ULS esetében. Sződligeten és Pencen, a magyarországi átlaghoz képest jelentősen alacsonyabb megfigyelt szélsebességek miatt, a P_f valószínűségek Sződliget és "Penc-Sződliget" esetre jelentősen alacsonyabbak. Az ezekhez tartozó P_f az SLS esetében körülbelül három nagyságrenddel, az ULS esetében pedig körülbelül nyolc nagyságrenddel alacsonyabb. Egy közeli, hosszabb mérési idővel rendelkező megfigyelőállomás nyers szélsebességadatainak előzetes információként való figyelembevétele történhet a biztonság kárára, amint az feltételezhető a "Penc-Sződliget" eseténél. Sződliget domborzati viszonyaira jellemző, hogy a város sík terepen fekszik, az urlkodó szélirányban mögötte a Duna folyik. Ezzel szemben Penc környéke dombos, erdős területek veszik körül, ami a domborzati viszonyok hatására hozzájárulhat a "Penc" és a "Penc - Sződliget" esetében a kisebb szélsebességekhez és a becsült meghibásodási valószínűségekhez. A Kriging térbeli interpoláció alkalmazása a vizsgált helyszíni szélsebesség értékek számításához más állomások adatsoraiból, sőt a helyszíni mérési információkkal való frissítésével megbízhatóbb és konzisztensebb eredményre vezet, amely összhangban van más vizsgált esetek becsült túllépési valószínűségekkel. A "Hun - Kriging" becsült túllépési valószínűségek valamivel kisebbek, az SLS esetében egy nagyságrenddel, mint a "Magyarország" esetben. A magyarországi átlaghoz kapcsolódó előzetes információk vagy feltételezések Bayes-tétel alapú frissítése a Sződligetről származó megfigyelt adatok beépítésével körülbelül egy nagyságrenddel csökkentheti a P_f tönkremenetel valószínűségét a "Magyarország" esetéhez képest.

4.3 Szerkezeti analízis

A szélterhelésnek kitett távközlési torony numerikus modelljét egy általános célú végeselemes szoftverben (ANSYS v19.0) fejlesztettem a szélterhelés okozta szerkezeti válasz számítása érdekében. A szerkezet fő méretei, valamint az öv- és rácsrudak méretei a 8. ábraán láthatók. A háromdimenziós végeselemes modellben kétcsomópontos gerendaelemeket (BEAM188) alkalmaztam, kvadratikus alakfüggvényekkel. A csomóponti szélerőterheket a csomóponti koordinátarendszerben definiáltam, amelyet minden egyes szimulált esetben az aktuális szélirány irányába forgatok. Ez a vizsgálat nem veszi figyelembe a jégből származó hatásokat, beleértve azok gravitációs hatásait vagy a szélhatásokra gyakorolt hatását. Továbbá az elemzés nem veszi figyelembe az egyoldalú napsugárzás és az ebből eredő hőmérsékletkülönbség hatását.

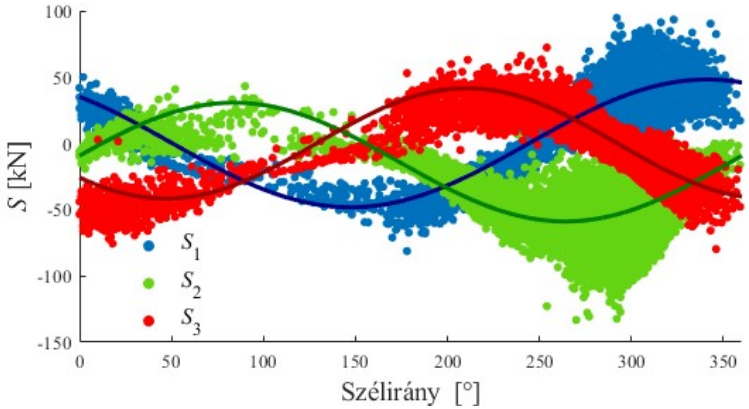


8. ábra A torony végeselemes modellje: a) szelvények, b) felülnézet, c) peremfeltételek, d) antennák és e) szerkezet és lineáris segédberendezések csomóponti terhei.

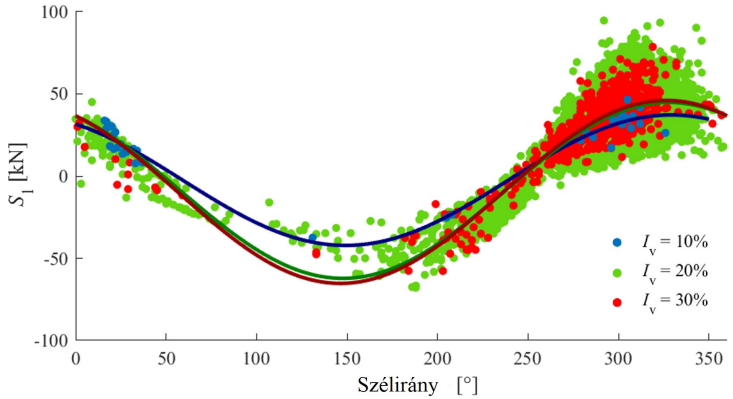
A modellben lineáris anyagmodellt alkalmazok az elfordulások és elmozdulások számítására használhatósági határállapotban (SLS). A teherbírás becslésére a teherbírási határállapotban (ULS) nemlineáris anyagtulajdonságok és egyenértékű geometriai imperfekciók vannak definiálva a geometriai és anyagilag nemlineáris, imperfekciókat tartalmazó vizsgálatban (GMNIA). A nagy alakváltozás hatásait minden szimulációban figyelembe vesszem. Az S235 szerkezeti acélminőségre a Gardner et al. (2019) és a prEN 1993-1-14 (CEN, 2020) szerinti kvad-lineáris, izotróp felkeményedő anyagmodell került definiálásra. A globális (a teljes torony lengési imperfekciója) és a lokális imperfekciókat (a merevítések és az övrudak kombinált kihajlási imperfekciója) is figyelembe veszi a modell.

5 Normálerők az alsó övrudakban a mérések alapján

Az övrudakban egytengelyű feszültségállapotot feltételezve a normálerőket a Hook-törvény alkalmazásával, az E Young-modulus (210000 MPa) és a vizsgálat övrudak keresztmetszeti területe (5963 mm^2) felhasználásával számítottam. Az S_1, S_2 és S_3 övrudak normálerőit v = 10, 15, 20, 30 m/s szélsebességnek és 10, 20, 30%-os turbulenciaintenzitásnak megfelelően szétválogattam. Ezután szinuszos függvényeket illesztettem ezekre az adatpontokra, és a háromszög keresztmetszetű torony számára érdekes szélirányokhoz tartozó, azaz a 270°, 300° és 330°, várható értékeket számítottam. Két példa látható a 9. ábra és a 10. ábra, $v = 15$ m/s szélsebesség esetére.



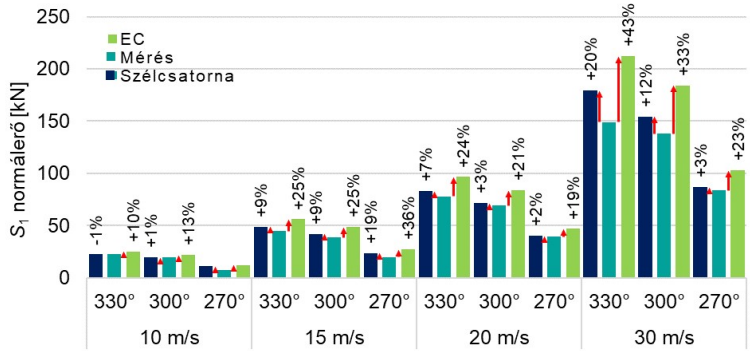
9. ábra Normálerő S a $v = 15$ m/s szélsebesség esetén



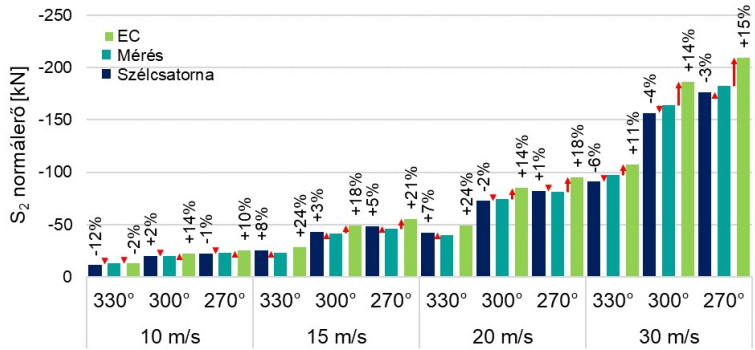
10. ábra S_1 normálerő, $v = 15$ m/s és 10, 20, 30% turbulenciaintenzitás esetén

6 Ellenállástényezők tárgyalása

Az EN 1993-3-1 szabványon alapuló, determinisztikus numerikus modell eredményeit, pontosabban az övrudakban fellépő normálerőket összehasonlítjuk a mérésekből nyert értékekkel. Az északnyugati uralkodó szélirány miatt az S_3 övrúderő a semleges tengely közelében van, ezért ezeket az értékeket nem mutatom be. Az S_1 övrúd esetében, amelyben húzóerő ébred, nagy szélsebességek esetén kb. $20-40\%$ különbség figyelhető meg (11. ábra). Az S_2 esetében, nagy szélsebességek mellett a különbségek kisebbek, $\sim 10-25\%$ (12. ábra). A szélcsatorna-vizsgálatok során mért szélerők felhasználásával a modell ezeket a különbségeket körülbelül 5-20%-ra tudta csökkenteni. Kisebb szélsebességek esetében a különbségek 14%-nál kisebbek.



11. ábra S_1 normálerő, $I_v = 20\%$ és különböző szélsebességek, szélirányok esetén



12. ábra S_2 normálerő, $I_v = 20\%$ és különböző szélsebességek, szélirányok esetén