



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építésztechnológiai Kar
Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék

Membránszerkezet széldinamikai vizsgálata

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

Készítette
Laza Álmos

Konzulens
Dr. Hegyi Dezső
Dr. Vigh László Gergely
Horváth Dávid András

2024. november 1.

Tartalomjegyzék

Absztrakt	i
1. Bevezetés	1
1.1. Ponyvaszerkezet történelmi áttekintés	1
1.2. Ponyva szerkezeti áttekintés	2
1.3. Aerodinamikai áttekintés	3
1.4. Numerikus áramlás modellezési áttekintés	5
2. Irodalom kutatás	7
3. Vizsgálati felépítés - stratégia	12
4. Merevtest szerű analízis	13
4.1. Mechanikai modell	13
4.1.1. Geometria	13
4.1.2. Alakmeghatározás	14
4.1.3. Anyagmodell	14
4.2. Áramlástechnikai modell	14
4.2.1. Szélcsatorna geometria	14
4.2.2. Hálózás	15
4.2.3. Folyadékparaméter	16
4.2.4. További paraméterek	17
4.3. Validálás	18
4.4. Vizsgálat	21
4.5. Hiányosságok	23
5. Fellazított szerkezeti analízis	24
5.1. Mechanikai modell	24
5.1.1. Geometria	24
5.1.2. Hálózás	24
5.1.3. Anyagmodell	26
5.2. Áramlástechnikai modell	26
5.2.1. Szélcsatorna geometria	26
5.2.2. Hálózás	27
5.2.3. További paraméterek	29
5.3. Vizsgálat	30
5.3.1. Folyamat	30
5.3.1.1. Szerkezeti oldal	30
5.3.1.2. Áramlástani oldal	32
5.3.1.3. Kapcsolt analízis	32
5.3.2. Eredmények	33

5.4. Hiányosságok	34
6. Értékelés és kitekintés	35
Irodalmak jegyzéke	iii
Ábrák jegyzéke	vi

Absztrakt

A kortárs építészetében nagy számmal jelennek meg ponyvaszerkezetek, hiszen ezek kis önsúlyuknak és mechanikai viselkedésüknek köszönhetően vékony, keresztmetszetileg optimális szerkezetek, amelyek kétszer görbült felületük miatt esztétikus megjelenéssel is rendelkeznek. Ilyen szerkezetek tervezése és méretezése azonban jelentős mérnöki feladatnak minősül, ugyanis kihívást jelent a nemlineáris viselkedés, nagy elmozdulások megjelenése és görbült alakok kezelése. A felsorolt problémák miatt a ponyvaszerkezeteket érő hatásokat legtöbbször kvázi-statisztikus állapotban vizsgálják, mint átlalában más épületeket is. Azonban ez nem minden esetben a megfelelő eljárás, például a szél dinamikai jelenségét kifejezetten időben lefutó (tranzien) állapotban kell elemezni.

Jelen dolgozat célja, hogy egy egyszerű geometriájú ponyvaszerkezet széldinamikai vizsgálatát numerikus úton elvégezze, kifejezetten a belebegés jelenségére koncentrálva. A vizsgálatban egy nyereg felületű (hypar alakú) ponyva jelenik meg, ami eltérő eljárásokkal, egy numerikus szélcsatorna kísérletben (*CFD - Computational Fluid Dynamics*) lesz tanulmányozva (Yue Wu 2015). A kísérlet elején, a ponyvaszerkezet merevtestszerűen kerül elemzésre az áramlástan közegében, majd az egyes elem fellágyítása után, egy kapcsolt, tranzien modell segítségével, lesz a szél-szerkezet közti kölcsönhatás vizsgálva. A kapcsolt vizsgálatnak köszönhetően a szerkezet deformációja befolyásolja a levegő áramlását, ami így a szerkezet elmozdulására is visszahat, tehát egy kétirányú kapcsolat alakul ki. Ettől a vizsgálattól azt várjuk, hogy adott szélsébséghez és feszítés esetén megbízhatóan megmutassa a belebegés jelenségét, amikor a szerkezet körüli örvényleválások miatt, a szerkezet egyre nagyobb alakváltozást szenved (Changjiang Liu 2017).

In contemporary architecture around the world, tarpaulin structures are increasingly appearing as thin, cross-sectionally optimised structures with a low self-weight and mechanical behaviour, and with an aesthetic appearance due to their double-curved surface. However, the design and dimensioning of such structures is a significant engineering job, as they can be challenging to deal with nonlinear behaviour, large displacements and curved shapes. Due to these problems, the load-effects appearing on these membrane structures have mostly been investigated in a quasi-static state, but this is not always the appropriate procedure, for example, the dynamic phenomenon of wind has to be analysed in a transient state.

The aim of this thesis is to numerically investigate the wind dynamics of a simple geometry canvas structure, focusing specifically on the phenomenon of flutter. A tarpaulin with a saddle surface (hyper shape) will be investigated using different procedures in a numerical wind tunnel experiment (*CFD - Computational Fluid Dynamics*) (Yue Wu 2015). At the beginning of the experiment, the tarpaulin structure will be analysed in a rigid-body manner in the flow medium, and after softening each element, the wind-structure interaction will be investigated using a coupled transient model. The coupled analysis allows the deformation of the structure to affect the air flow, which in turn affects the displacement of the structure, thus creating a bidirectional coupling. This test is expected to reliably show the phenomenon of flutter for a given wind speed and prestressing, where the structure suffers increasing deformation due to vortex shedding around the structure (Changjiang Liu 2017).

1. fejezet

Bevezetés

1.1. Ponyvaszerkezet történelmi áttekintés

A ponyvaszerkezetek gazdag formaviláguknak köszönhetően sajátos, különleges elemként jelennek meg az építészeti és mérnöki létesítmények között. Ezen szerkezeteket vékony, könnyű, csak húzás (némi nyírás) felvételére alkalmas anyagokból épülnek fel. Kis tömege miatt rendkívül alkalmas nagyfeszítávú szerkezetek megvalósítására, illetve hordozható szerkezetek megalkotására.

A textilekből kialakított szerkezetek családja már évezredekkel ezelőtt megjelent az emberiség történelmében, hiszen már az őskorban és az ókorban is építettek hasonló szerkezeteket (jurta, tipi [lásd 1.1. ábra]) [13], [5]. Először csak lakhatás céljából, kisebb feszítávú szerkezeteknél használtak membrán lefedést, később a rómaiaknál megjelentek a ponyvaszerkezetek az amfiteátrumok nézőterénél is, ezek voltak a velumok.



1.1. ábra. Tipi sátor

Az építőiparban (hőléggelőlóktól és egyébb ponyvát felhasználó technológiától most eltekintünk) a következő nagy lépést a cirkuszi sátrak jelentették, ahol kihasználták a ponyva nagy térfedő és összehajtható képességét, hogy mobil (könnyen szét- és összeszerelhető) szerkezetet hozzanak létre, amely képes nagy tömegek befogadására (például a vászónból épített Astley sátor, London 1770).

Miután megjelentek a mérnöki célra is megfelelő teherbírású műanyagok, elkezdtek terjedni a nagy léptékű, mérnöki ponyvaszerkezetek. A második világháború után Frei Otto, német építész, vált a ponyvaszerkezetek úttörője. Nevéhez fűződik például a tanzbrunneni pavilon (lásd 1.2. ábra), illetve a müncheni Olympia stadion térlefedése.



1.2. ábra. Frei Otto által tervezett ponyvaszerkezet, Tanzbrunnen (1957)

Magyarországon az 1970-es években indult el a feszített sátrak tervezése Majoros Gábor építésmérnök vezetésével a GYŐRITERV irodánál (1973) és azóta jelentős mennyiségű szerkezet épült hazánkban. Ezen szerkezetek főleg sprotlétesítmények, rendezvények térlefedéseként jelennek meg.

1.2. Ponyva szerkezeti áttekintés

A ponyvaszerkezetek nyomás nélkül, csupán **húzóerővel** képesek felvenni a rájuk jutó terheket. Teherbírásukat többféleképpen biztosíthatjuk, [10]:

- *feszített sátrak* - a ponyva peremén keresztül feszítőerőt juttatunk a rendszerbe és a hiperbolikus felületnek köszönhetően egyensúly lép fel,
- *légtartós sátrak* - a szerkezeten belülre (talaj és a ponyva közé), a környezetnél nagyobb nyomást hozunk létre és ez a túlnyomás biztosítja a teherbírást,
- *tömlős szerkezetek* - a légtartós sátrakhoz hasonlóan túlnyomás adja a teherbírást, de itt a ponyván belül (kerékpár belsejéhez hasonlóan) jön létre a nyomás,
- *TensAirity szerkezetek* - tömlős szerkezeti elemek, más, önmagában merev elemekkel, kerülnek összeépítésre.

Ebben a dolgozatban csak olyan feszített ponyvaszerkezetekkel foglalkozunk, ahol a ponyva a fő teherviselő elem, illetve a peremén keresztül kerül megfeszítésre.

Anyagukat tekintve, ezek a szerkezetek két elemből állnak, a *szövetből* és a *bevonatból*. Jellemzően a szövetet poliészter- vagy üvegszálból szövik (általában panamaszövet alkalmazva), így alakul ki a ponyván belül a lánccs és a vetülékirány, aminek köszönhető az anyag **ortotrop** viselkedése. Az elterjedt bevonattípusok a PVC és a TEFLON.

Kis vastagságuk miatt nyomást nem képesek felvenni ezek a szerkezetek, tehát a teherbírás biztosításához mindenképp kellő feszítőerővel kell őket ellátni. Ha a feszítőerő már nem képes biztosítani a szerkezet teherbírását, akkor nagy elmozdulásokkal próbál olyan feszültségi elrendezést elérni a szerkezet, ahol még képes a húzóerő kialakulni. Mechanikai szempontból az alábbi tulajdonságok a legfontosabb a szerkezet működésének leírásához:

- húzási ellenállás: a maximális húzófeszültség, amit még képes felvenni a ponyva anyaga,
- lineáris rugalmasság: az a tulajdonság, hogy alakváltozás után képes-e a szerkezet az eredeti helyzetébe visszakerülni,
- előfeszítés: kezdeti feszültségi állapotot, amit a szerkezetre engedünk, hogy a lehetőleg a teljes felület gyűrődésmentessége biztosított legyen

A mechanikai viselkedése miatt a szerkezet számítása eltér a hétköznapi tartóktól (gerenda, lemez), magasabbrendű elmélet alkalmazása szükséges, nemlineáris feladatmegoldást igényel.

1.3. Aerodinamikai áttekintés

Az építőmérnöki gyakorlatban rendszeresen foglalkozunk a szél terhelésével. Mivel a szél egy turbulens áramlás, az általános gyakorlatban leegyszerűsítjük a jelenséget és egy konstansnak vett szélességgel (abból származtatott szélnyomással) számolunk, így a mindennapi gyakorlatban egyszerűsítjük és gyorsítjuk a számítást. Ez azonban egy jelentős közelítés, de általános magasépítési szerkezeteknél ez megtehető. Amikor viszont egy különleges szerkezettel foglalkozunk, aminek különlegessége származhat az alakjából, önsúlyából, mechanikai viselkedéséből, akkor a szél dinamikus hatását nem biztos, hogy elszabad hanyagolni. Ilyen szerkezetek a toronyok, magas épületek, hidak, illetve ennek a dolgozatnak a fő témája, a ponyvaszerkezetek. A ponyvaszerkezet kis önsúlya és mechanikai viselkedése miatt kifejezetten kitett a szél dinamikai hatásainak.

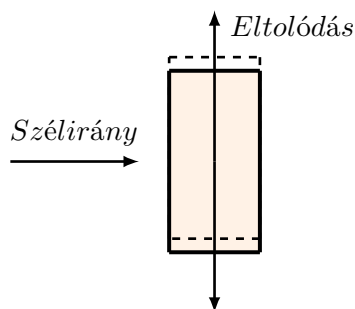
Ezeknél a különleges eseteknél figyelembe kell venni a szél aerodinamikai hatását, azon belül is az instabilitásokat. Három fő aerodinamikai erőt/hatást lehet megemlíteni, amelyek hatása fontos a szerkezet szempontjából.

1. Szívó és tolóerő: a szél irányával megegyező irányba hat, nagysága a szél sebességével és az érintett szerkezeti felülettel arányos.
2. Emelőerő: a szél irányára merőleges irányba hat, függőleges elmozdulást okozhat.
3. Turbulencia: a szél áramlásának turbulens volta miatt, a szerkezetre ható szélnyomás nagysága kiszámíthatatlan módon ingadozhat, így időben változó hatás alakul ki.

Ezekre a hatásokra akár szabvány, vagy szélcsatorna (valós vagy numerikus) kísérletek segítségével el lehet végezni a méretezést. Ezen kívül kihívást jelenthet az aerodinamikai instabilitás figyelembe vétele, amikor a szél által gerjesztett rezgések, oszcillációk kontrollálhatatlan mértékűre nőnek. Ez azt jelenti, hogy a szerkezet frekvenciája egybeesik az aerodinamikai hatások frekvenciájával és rezonancia alakul ki és így az elmozdulások amplitúdója jelentős mértékben megnő. Két fő aerodinamikai hatásról beszélhetünk az építőmérnöki gyakorlatban:

- táncolás
- belebegés

A **táncolás** egy olyan jelenség, amikor a keresztmetszet (vagy a szerkezet), a szél irányára merőlegesen mozog (lásd 1.3. ábra). Ez a jelenség alakfüggő, azaz a szerkezet keresztmetszete befolyásolja a jelenség kialakulásának valószínűségét, például kör keresztmetszetek (távvezeték) nem érzékenyek erre, de jéglerakódás után a keresztmetszet ovális-sá válhat, ami viszont növeli a táncolás bekövetkezésének valószínűségét, tehát elvesztheti stabilitását ([23]).



1.3. ábra. Táncolás jelensége

A **belebegés**, másik nevén divergencia, még egy olyan instabilitási mód, amely gyakran előkerül az építőmérnöki gyakorlatban. Egyik jól dokumentált példa erre a jelenségre, a Tacoma Narrows-híd (1940) és annak összeomlása.

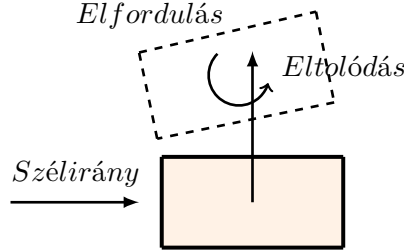


1.4. ábra. Tacoma-hídon látható belebegés

Általános esetben a belebegés jelenségének a definíciója, hogy a szerkezet két mozgási szabadságfoka (az áramlásra merőleges eltolódás és az elfordulás) kapcsolt instabil mozgást végez, az áramlás által vezérelve ([21]). Ahhoz hogy ez az összekapcsolt mozgás jelentkezzen, a szerkezet első hajlító és csavaró rezgésalakja közel legyen egymáshoz ([19]). Fontos ismérve még, hogy konstans szélesség hatására jöjjön létre a rezgés, ami "öngerjesztett" ([18], [17]). A mérnöki gyakorlatban, ha a belebegés jelenségét vizsgálni akarjuk, akkor az EUROCODE ([2]) ad támpontot, amiben a kritikus szélességet kell kiszámolni. Azonban nem minden esetben kell a jelenséggel foglalkozni, annak csak ritkán van számottevő hatása. A szabvány szerint a belebegés csak akkor mértékadó, ha egyidejűleg teljesülnek az alábbi feltételek:

- síklemez szerű keresztmetszet (szélesség nagyobb mint a magasság négyszerese),

- a keresztmetszet csavarási középpontja, a szél irányától nézve, a szélső éltől legalább $1/4$ szélességre van (például súlypont),
- a legkisebb hajlító sajátfrekvencia kétszeresénél kisebb a csavaró sajátfrekvencia, de nagyobb mint a legkisebb hajlító sajátfrekvencia.



1.5. ábra. Belebegés jelensége

Amennyiben olyan szerkezetünk van, amelyre a szabvány nem tér ki (nem szabályozza), akkor a jelenséget szélcsatorna kísérlettel, vagy a belebegési egyenlet megoldásával lehet vizsgálni (lásd 1.1. egyenlet).

$$\ddot{y} + 2\xi_y\omega_0\dot{y} + \omega_0^2 y = F_y(t) + H_1\dot{y} + H_2\theta + H_3\dot{\theta}$$

$$\ddot{\theta} + 2\xi_\theta\omega_0\dot{\theta} + \omega_0^2 \theta = M(t) + A_1\dot{y} + A_2\theta + A_3\dot{\theta} \quad (1.1)$$

1.4. Numerikus áramlás modellezési áttekintés

Folyadéktér numerikus analízise (CFD) egy olyan tudományág, ahol a folyadék vagy gáz áramlását vizsgálják. Hasonlóan az építőmérnöki gyakorlatban ismert végesesemes módszerhez (VEM, [28], [27]), a CFD szimulációkban is diszkrét helyeken oldjuk meg a függvényeket. A különbség, hogy itt nem magát a szerkezetet kell véges elemekre felbontani, hanem az azt körülvevő folyadék/gáz teret, amiben az áramlás történik. Nem a szerkezet mozgását követjük, hanem a tér rögzített pontjaiban vizsgáljuk a gáz áramlását.

A CFD az 1960-as évekhez vezethető vissza, ekkor alapozták meg az áramlásdinamikai szimulációkat (többek között Neumann János). Ezután 1987-ben Chorin indította el a projekciós módszert, amivel jelentősen felgyorsult a numerikus szimuláció fejlődése. 1990-es években pedig már megjelentek a kereskedelmi szoftverek (ANSYS), amivel a numerikus szimulációk már elérhetővé váltak a mérnökök számára.

A Navier-Stokes differenciálegyenletek ([23]) (lásd 1.3. egyenlet) a legfontosabbak a CFD analízis leírásában:

$$\frac{\delta \mathbf{v}}{\delta t} + \mathbf{v}^T \text{div}(\mathbf{v}) = \mathbf{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v} \quad \text{és} \quad \frac{\delta p}{\delta t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1.2)$$

ahol:

- $\mathbf{v}(x, y, z, t)$: sebességmező
- $p(x, y, z, t)$: nyomás
- $\rho(x, y, z, t)$: sűrűség
- ν : viszkozitás

Ezeket az egyenleteket a numerikus analízis során diszkretizált elemekre oldjuk meg, azután a kis részekből állítjuk össze a teljes eredményt. A hálóelemeknek be kell tartania az energia, tömeg és momentum megmaradásainak törvényeit. ([15], [25]) Ezeknek az időbeli változását az alábbi egyenlet mutatja be.

$$\frac{Q^{n+1} - Q^n}{\Delta t} + \nabla \cdot (Q^n \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\nu \nabla Q^n) + S \quad (1.3)$$

Az egyenlet négy részre osztható:

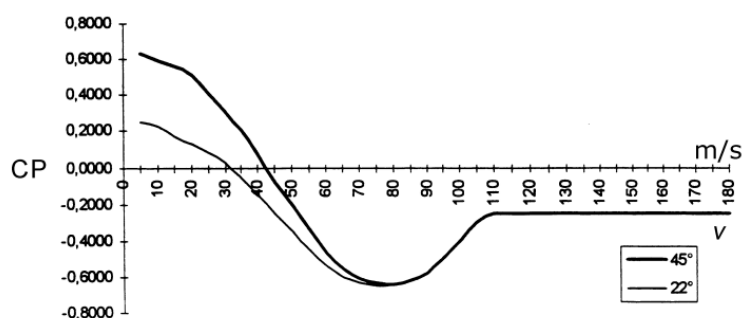
- $\frac{Q^{n+1} - Q^n}{\Delta t}$: idő szerinti derivált, a Q , mint fizikai mennyiség (energia, tömeg, momentum), változását mutatja be az n .ik időlépésről az $n + 1$ -re,
- $\nabla \cdot (Q^n \mathbf{u})$: a Q mennyiség elszállításának (advekciónak), folyadék áramlásának sebessége által $\mathbf{u}$, nagyságát mutatja be a,
- $\nabla \cdot (\nu \nabla Q^n)$: a Q mennyiség diffúzióját szemlélteti ez a tag,
- S : külső forrást jelöl.

2. fejezet

Irodalom kutatás

A következőkben néhány olyan irodalom tartalmát tekintjük át, melyek iránymutatásul szolgáltak a dolgozat elkészítéséhez.

EN szabványok, 2005, [1], [2] - A ponyvaszerkezetekre jutó szélteher meghatározását szabvány alapján el. Az *EN 1991-1-4* általánosan foglalkozik a szélteher meghatározásával, míg az *EN 13782* kifejezetten sátrakra és ponyvaszerkezetekre koncentrálnak. A statikus terhelésre közelítő megoldást kaphatunk a szabványból, ha a referencia szélesség nem haladja meg a 28 m/s értéket, azaz $\hat{v}_{ref} < 28 \text{ m/s}$. Ez a közelítő megoldás nyomásértékeket közöl velünk (a szabvány mellékletében aerodinamikai tényezőket ad még meg), de a szerkezet stabilitási kérdésével nem foglalkozik, hanem a tervezőre bízta, hogy a belebegés, táncolás és egyéb aerodinamikai stabilitási kérdéseket megvizsgálja.



2.1. ábra. Példa az EN 13782 szabvány egyik közelítő (aerodinamikai) tényező megadására, 22° vagy 45° dőlésnél alkalmazható

A belebegés jelenségének kizárására az *EN 1991-1-4* E melléklete ad útmutatást, amiben egy lemez szerű szerkezet belebegését, három kritérium segítségével kizárja (ha a három közül az egyik nem igaz, akkor nem lesz veszélyes a belebegés jelensége):

- nyújtott keresztmetszet, magasság-szélesség aránya
- csavarási tengely és középpont helyzete
- sajátfrekvenciák aránya egymáshoz képest

Ezen kívül a szabvány azt is meg tudja adni egyszerűbb geometriák esetén, hogy mekkora szélebbességnél alakulnak ki örvényleválások, lásd 2.1. egyenlet.

$$v_{\text{crit}} = \frac{b \times n_i}{St} \quad (2.1)$$

ahol:

- v_{crit} : kritikus szélebbesség
- b : referencia szélesség
- n_i : sajátfrekvencia
- St : Strouhal szám

Ezzel az eljárással az a probléma, hogy nem általános geometriánál a Strouhal szám meghatározása jelentős problémát tud okozni. Viszont egyből rámutat arra a veszélyes helyzetre, amikor a szerkezet frekvenciája és az örvényleválás frekvenciája egybe esik, ugyanis ilyenkor rezonancia alakul ki, ami a szerkezet tönkremeneteléhez vezethet. Fontos megjegyezni, hogy a rezonancia a kritikus szélebbesség $\pm 20\%$ környezetében is megjelenhet a frekvenciakapcsolódás (lock-in) jelenség következtében ([23]).

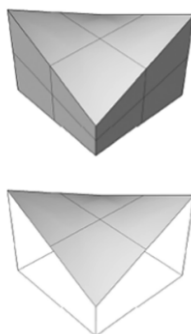
Hincz Krisztián, Gamboa-Marrufo Mauricio, 2012, [16] - A cikk fő célkitűzése, hogy egy szabályos 12-szög alaprajzú (leghosszabb átló hossza 10 m), külső és belső peremgyűrű közé feszített ponyvaszerkezet alaki tényezői meghatározásra kerüljenek. Ezeket a tényezőket két statikai vázon (fix belső perem, mozgó árbóc és peremgyűrű) három módon (egyszer szélcsatornás kísérlet alapján, kétszer pedig szabványok [MSZ EN 13782, MSZ 15021/1-86 {érvényét veszítette}] nyújtotta eljárások alapján határozták meg.

A szabvány alapján történő számításnál több feltevéssel is éltek a szerzők, például a 2.1. ábrán látható görbék helyett, interpoláció segítségével előállított görbét alkalmaztak a vizsgált modell átlagos (32°) lejtéséhez. A vizsgálatukból kiderül, hogy a szélcsatorna (pontos) eredményeitől jelentősen eltérő eredményeket adnak a szabványok, a maximális eltérések:

- *MSZ EN 15021/1-86 szabvány alapján* láncirányban 30%, míg vetülékirányban 6% az eltérés a biztonság **kárára**,
- *MSZ EN 13782 szabvány alapján* láncirányban 70% az eltérés a biztonság **javára**, míg vetülékirányban 35% a biztonság **kárára**.

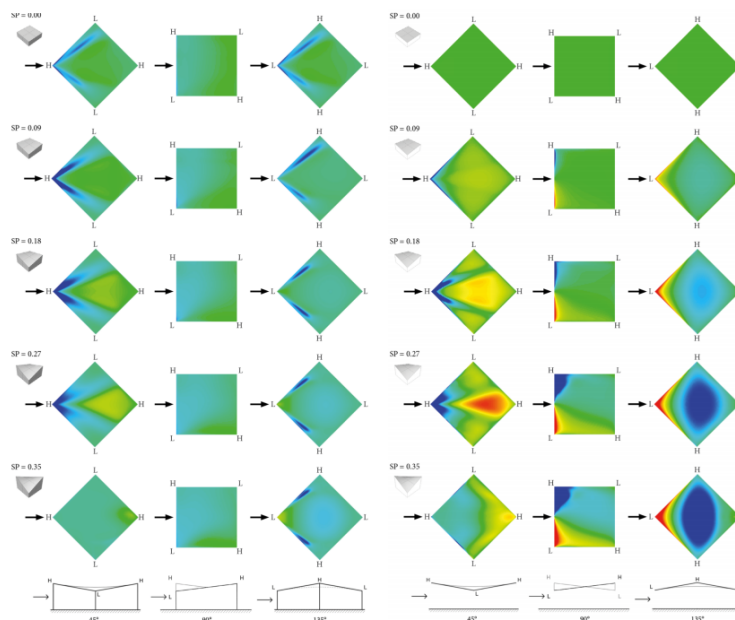
Budhaditya De, Ajay Kumar, Sudib Kumar Mishra, 2024, [9] - Ebben a cikkben is egy hasonló geometriával rendelkező szerkezetet vizsgáltak. Alaprajzi értelemben 9 oldallal és 18,3 méteres szélességgel, magasságilag pedig 10,7 méteres teljes magassággal rendelkezik a szerkezet. Két esetet vizsgáltak, egyrészt nyitott elrendezést, amikor a ponyvaszerkezet tetején lyuk van és a lefedett tér nem rendelkezik függőleges térelválasztással, másrészt pedig egy zárt elrendezést, amikor a szerkezet teteje és oldala is zárt. A célkitűzés, hogy nyomástényezőket határozzanak meg a szerkezeten numerikus modellezés segítségével, amiben a LES (Large Eddy Simulation) módszert használták. A modell verifikálásához a következőkben leírt irodalomban kapott eredményeket (egy hiperbolikus alakú szerkezeten) használták fel. Végeredményül meghatároztak nyomástényezőket a szerkezetre, illetve megállapították, hogy az elrendezés (nyitott vagy zárt) és a magasság-támaszköz aránya jelentősen befolyásolja a nyomástényező értéket és valószínűségi eloszlását (normál vagy nem).

Jimmy Colliers, Joris Degroote, Marijke Mollaert, Lars De Laet, 2019, [8]
- Itt egy hiperbolikus felületet, lásd 2.2. ábra, vizsgáltak a szerzők, szintén nyitott, illetve zárt elrendezésben.



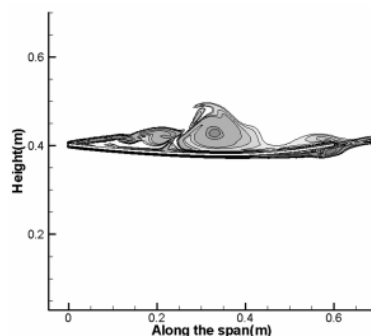
2.2. ábra. A vizsgált szerkezet alakja, felül zárt elrendezés, alul nyitott

A vizsgálat két részből állt, először egy szélcsatornában vizsgáltak 1:25 méretarányban megépített makettet, majd ennek az eredményeit felhasználva alkották meg a numerikus modellt, amit ANSYS Fluent-ben vizsgáltak. A cikkben kitérnek a szerzők arra is, hogy a ponyvafelület görbesége milyen hatással van a szélteherre. Összesen 5 tetőelrendezést néztek meg, ezek a tető dőlésszögében térnek el egymástól, mindet nyitott és zárt szerkezetként is, illetve 3 szélirány esetében is. Ezért egy olyan adatbázist hoztak létre az ilyen alakú ponyva tetőszerkezetek alaki tényezőiről, ami nagy segítséget nyújtott a jelen dolgozat elkészítésében. Ezt foglalja össze a 2.3. ábra.



2.3. ábra. Alaki tényezőkről előállított adatbázis

Zhaoqing Chen, Liang Yin, Lixiang Tang, Shuang Wang, 2021, [7] - Szélcsatornás és numerikus kísérlettel vizsgálták egy nyitott elrendezésű, egy irányban feszített membrán szerkezet aero-elasztikus instabilitását. A jelenség pontos megértéséhez nem csak a kiválasztott anyaggal kísérleteztek, hanem **merev-test szerű analízist** is végeztek (mind szélcsatornában, mind CFD modellezés segítségével). Ezen modellek segítségével meg tudták határozni, hogy az örvényleválás hogyan jelenik meg a szerkezet körül, lásd 2.4. ábra.



2.4. ábra. Örvényleválás

Az örvényleválások felismerésével meg tudták határozni azt a kritikus sebességet, amivel a szerkezeten rezonancia alakulhat ki az örvényleválásból. Ezt több eltérő feszítés mellett is elvégezték.

Changjiang Liu, Xiaowei Deng, Zhoulian Zheng, 2017, [20] - Nyereg, ortotróp ponyvaszerkezet, szél gerjesztette, nemlineáris instabilitását vizsgálták ebben a cikkben. Modellezési kísérletek helyett az írok analitikus megoldást nyújtottak pár esetre differenciálegyenletek segítségével. Itt levezették a geometria előállítását (kétszergörbült felület), a dinamikus mozgást vezérlő egyenleteket, a szél által generált terheket és a kritikus szélsebességet. Eredményül azt találták, hogy a belebegés akkor domináns aerodinamikai instabilitás, ha a két átló nagysága közel van egymáshoz. Ezen kívül megállapították, hogy az analitikus megoldásuk közel, 10%-os eltéréssel, került a valós kísérleti eredményekhez.

Yue WU, Zhao-qing Chen, Xiao-ying SUN, 20, [26] - Egy zárt elrendezésű, feszített nyeregfelület alakú ponyvatetőt vizsgáltak ebben a cikkben. A zárt szerkezetet több irányból is vizsgálták áramlástanilag ($0 - 90^\circ$ között) és ezekhez kritikus szélességeket határoztak meg. Ez a szélesség nagy mértékben függ a feszítés nagyságától, ezért két különböző feszítés mellett is elvégezték a vizsgálatot.

Marin Lauber, 2023, [19] - Ebben a doktori értekezésben kapcsolt CFD analízist hajtottak végre, ami azt jelenti, hogy a szerkezet (membrán) és az áramlási közeg közötti kapcsolatot modellezték, ahol az egyik része kihat a másikra. Az értekezésben a denevérek membránszerkezetei vannak a középpontban. A szerző különös figyelmet fordít a vékony, rugalmas szerkezetekben létrejövő nemlineáris és dinamikus alakváltozásra.

A kutatás során a denevérszárny mechanikai modellezése, a folyadékszimulációk (tekintettel a folyadékdinamikára és a folyadéktér-membrán kapcsolatára) is megjelenik. A szimulációt kísérleti adatok alapján, valódi denevérek repülésének megfigyelésével érvényesítik. A modellben megjelenik a nemlineáris deformáció, amivel jobban megérthető a rugalmas szerkezet alkalmazkodása aerodinamikai hatásokhoz, ami főleg a repüléstechnika területén hasznos.

V. Aune, G. Valsamos, F. Casadei, 2023, [4] - A tanulmány a folyadék-szerkezet közti kapcsolatot vizsgálja extrém körülmények között, különösen robbanás hatását vékony acéllemezen. Előre kialakított, repedésekkel rendelkező acéllemezt vizsgáltak a kutatók,

amiben jelentős alakváltozás (képlékeny) és törések jelentkezhetnek. A célkitűzése a dokumentumnak, hogy összehasonlítsa a kapcsolt és a nem kapcsolt analízis eredményeit.

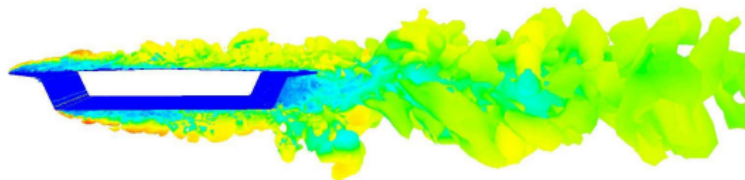
A kutatásban az EUROPLEXUS szoftvert használták a szimulációhoz. Ebben sikerült adaptív hálófinomítást alkalmazniuk, ami azt jelenti, hogy a számítás során automatikusan felismeri a szoftver azokat a pontokat, ahol sűrűbb háló alkalmazása szükséges és frissíti a háló sűrűségét. Ezzel a technikával jelentős mértékben csökkent a számítási igénye a szimulációnak.

Végeredményül megállapították a kutatók, hogy a kapcsolt analízis (amikor a szerkezeti válasz visszahat az áramlásra) jelentősen pontosabb eredményeket tud szolgáltatni, mint a nem kapcsolt analízis. A kapcsolt analízis jobban meg tudja közelíteni a kísérleti eredményeket, habár ez jelentős számítási igénnyel is jár.

Szabó Gergely, 2013, [12] - A doktori disszertációban egy hídpálya aerodinamikai stabilitását vizsgálta a szerző, numerikus és kísérleti módon. A kutatás során elsősorban a széldinamikai terhelésre voltak kíváncsiak.

A kutatás elején, a hídpálya aerodinamikai tulajdonságait kísérleti úton határozták meg, amiben kisléptékű szélcsatorna vizsgálatokat hajtottak végre. Itt a szerkezet választását vizsgálták szélhatásra, különös tekintettel a belebegés jelenségére.

Ezután numerikus analízissel, finomított végelelem módszer alkalmazásával, vizsgálták a jelenséget, amiben az örvényleválások és a szerkezet körüli áramlás is megjelent.



2.5. ábra. Áramkép

Az eredmények alátámasztják azt, hogy az aerodinamikai stabilitás a szélesebbességgel és a hídgeometriával szorosan kapcsolatban áll.

Hunyadi Mátyás, 2012, [21] - A dolgozatban hidak merevítőtartóinak elmozdulásait vizsgálta turbulens szél hatására, figyelembe véve a belebegés jelenséget. Célkitűzésük az volt, hogy a jelenséget jobban megértsék és a gyakorlati szerkezettervezést elősegítsék.

A kutatásban először a szerkezet sajátfrekvenciáját vizsgálták, ezután pedig a szél turbulens, nemlineáris hatását. Időlépcsős dinamikai vizsgálatból kapott szélörvény frekvenciát, a szerkezet sajátfrekvenciájával összehasonlítva tanulmányozták a szerkezet választását.

3. fejezet

Vizsgálati felépítés - stratégia

Ebben a dolgozatban a célkitűzésünk az, hogy egy nyeregfelület alakú membránszerkezetet áramlástanban vizsgáljunk úgy, hogy a szerkezet-szél dinamikai kölcsönhatását figyelembe tudjuk venni. Ehhez az ANSYS szoftvercsaládban végzünk el számítógépes kísérleteket.

Először egy általános szélcsatorna vizsgálatot (CFD) hajtunk végre, az ANSYS Fluent szoftverrel, amiben a szerkezetünk merevtest-szerűen lesz jelen. Itt az a célunk, hogy a szerkezet körüli áramlást megértsük, a vizsgált szerkezeti elrendezést több szempontból is modellezzük, illetve az egyes paraméterek (szélirány, szélsébség) fontosságát lássuk. Az itt felállított modellünk helyességét validáljuk is alaki tényezők segítségével ([8]).

Ezután már egy sokkal pontosabb modellen folytatjuk az analízisünket, fellazítjuk a pontyva anyagát, tehát ebben a modellen már nem merev testként fog viselkedni. Emellett már nem csak szélcsatorna vizsgálatot hajtunk végre, hanem összekapcsoljuk a szerkezeti és áramlási vizsgálatot. A membránszerkezet nagy alakváltozása és nemlineáris viselkedése miatt, a szerkezeti analízist tranziens (időben változó) szerkezeti modellen vizsgáljuk, az ANSYS Mechanical szoftver segítségével. Az áramlást továbbra is a Fluentben vizsgáljuk, de az első eljárással ellentétben, ennél az analízisnél, az áramlási és szerkezeti vizsgálatot összekapcsoljuk (coupled), tehát a kétirányú kapcsolat kialakul, amivel a tranziens szerkezeti és áramlástanban vizsgálat eredménye egymásra kihatással lesz.

Mind a két vizsgálatnál a dolgozat felépítése úgy fog kinézni, hogy először a szerkezeti oldalt mutatjuk be (mechanikai adatok, geometria), ezután pedig az áramlástechnikai modellt. Az utóbbinál kitérünk a szélcsatorna geometriájára, a speciális hálózási kérdésekre, folyadék- és egyéb paraméterekre. A bemenő adatok után szemléltetjük a kapott eredményeket. Végezetül pedig röviden bemutatjuk, hogy az adott vizsgálat milyen modellezési nehézségekkel, hiányosságokkal rendelkezik.

A dolgozat végén összefoglalóan értékeljük az elvégzett analíziseket, illetve kitekintünk arra is, hogy hogyan lehetne ezeket javítani és fejleszteni jövőbeli projektek során.

4. fejezet

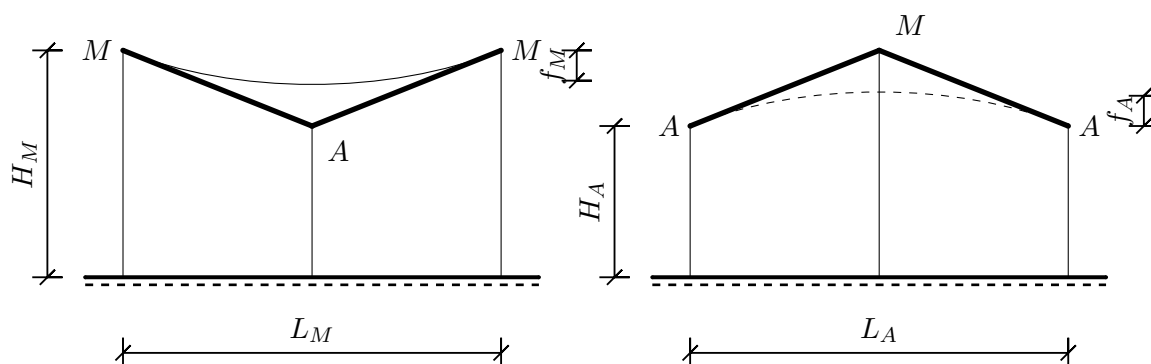
Merevtest szerű analízis

4.1. Mechanikai modell

4.1.1. Geometria

Egy szabadon álló, nyereg felületű, ponyvaszerkezetet vizsgálunk, aminek az alakját a lehető legegyszerűbben vettük fel, a számítás könnyítése érdekében. Ez azt jelenti, hogy négyzetes alaprajzú, az alacsony-alacsony (A) és a magas-magas (M) sarkai ugyanolyan magasak vannak. A ponyvaszerkezetet további egyszerűsítés miatt olyan szerkezetnek feltételezzük, hogy mind a négy peremén egy merev testhez (nem szabadon álló kötéltől) van csuklósan rögzítve. A felület pontos leírásához az alábbi geometriai méretek szükségesek, amik értelmezését a 4.1. ábra mutatja be:

- l_M, l_A : a magasabb és az alacsonyabb csúcsai közötti távolság, tehát az alaprajzi átló mérete, jelen esetben 10 m ,
- f_M, f_A : a magasabb és az alacsonyabb csúcs magassági távolsága a felület (nyereg) középpontjától, jelen esetben $1,35\text{ m}$,
- H_M : a magasabb csúcs magassága a felszíntől mérve, jelen esetben 5 m ,
- H_A : az alacsonyabb csúcs magassága a felszíntől mérve, jelen esetben $2,3\text{ m}$.



4.1. ábra. A szerkezet jellemző méreteit bemutató nézetek

Ezek a geometriai méreteken kívül két paraméter meghatározása fontos még, ezek pedig:

1. a szerkezet belógásának és fesztávjának aránya, jelen esetben 0,27

$$SP_M = \frac{2f_M}{l_M} \quad \text{és} \quad SP_A = \frac{2f_A}{l_A} \quad (4.1)$$

2. a szerkezet magasságának és fesztávjának aránya, jelen esetben 0,23

$$HP_M = \frac{h_A}{l_M} \quad \text{és} \quad HP_A = \frac{h_A}{l_A} \quad (4.2)$$

4.1.2. Alakmeghatározás

A ponyvaszerkezetek tervezésénél az egyik legfontosabb feladat a szerkezet alakjának meghatározása, az alakmeghatározás. Itt figyelembe kell venni peremfeltételeket, anyagi tulajdonságokat és fellépő feszültségeket is. Jelen vizsgálatban ezzel részletesen nem foglalkozunk, de megemlítjük, hogy *Dr. Hegyi Dezső* saját fejlesztésű szoftver segítségével már egy valós, kétszer görbült geometriát tudunk importálni a számításunkba.

4.1.3. Anyagmodell

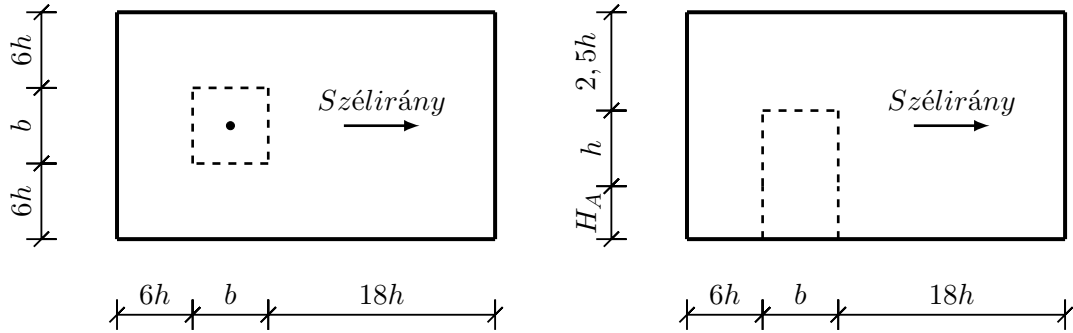
Az első szélcsatorna kísérletben a ponyvaszerkezet nem szerkezetként jelenik meg, hanem egy végtelen merev és végtelen vékony akadályként (felülete tökéletesen sima), így az anyagmodelljéről nem beszélhetünk mechanikai értelemben.

4.2. Áramlástechnikai modell

4.2.1. Szélcsatorna geometria

A *CFD* vizsgálat során fontos paraméter, hogy kellően nagy térben vizsgáljuk a szél-szerkezet kapcsolatát, tehát kellően nagy szélcsatorna numerikus modelljét kell megalkotnunk. Ahhoz, hogy a jelenség kellően pontos leírása lehetővé váljon és ezzel együtt ne legyen szükség túl nagy gépigényre, az alábbi geometriájú (lásd 4.2. ábra, ahol szaggatott vonallal a ponyvaszerkezet befoglaló mérete is látható) szélcsatornában vizsgáljuk a ponyvaszerkezetet. A szélcsatorna méretválasztásához az is hozzá tartozott, hogy a validálásnál összehasonlítható méretünk legyen a forrással.

- h : a magasabb és az alacsonyabb csúcsok közötti magassági távolság jelen esetben 2,7 m,
- b : a szerkezetet befoglaló négyzet alaprajzi szélessége, jelen esetben 10 m.

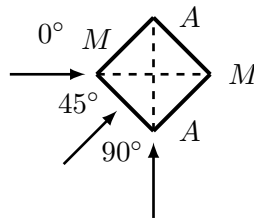


4.2. ábra. A szélcsatorna geometriai méreteit bemutató alaprajzi és hosszirányú nézetek

Az áramlási tér téglatest alakú (hossza: $74,8\text{ m}$, szélessége: $42,4\text{ m}$, magassága: $11,75\text{ m}$), melynek méreteit a 4.2. ábrán látható módon, a ponyva magasságának arányában határoztunk meg. A szél irányában a szélcsatorna oldalait meg lehet különböztetni: *beáramlási*, *kiáramlási* és *határoló oldalak*.

Mivel a valóságban a szél bármelyik irányból fújhat és azt előre megítélni, hogy mely szélirány lesz mértékadó, szinte lehetetlen, ezért 3 elkülönített irányból is megvizsgáljuk a szél hatását a szerkezetre, lásd 4.3. ábra. A három irányt a következőkben az alábbiak szerint fogjuk nevezni:

- 0° : a magas-magas sarkok által meghatározott függőleges síkba eső szélirány,
- 90° : az alacsony-alacsony sarkok által meghatározott függőleges síkba eső szélirány,
- 45° : a ponyvaszerkezet peremére merőleges függőleges síkba eső szélirány



4.3. ábra. Vizsgált szélirányok

Azt is megemlítjük, hogy a szélcsatorna alján, a föld egyenetlenségét nem modellezzük, ez a közelítés szintén a számítás egyszerűsítését hivatott szolgálni.

4.2.2. Hálózás

A numerikus vizsgálat során diszkrétizálnunk kell az áramlási teret ([11]), tehát kis elemekre kell bontanunk. Ahhoz, hogy kellően pontos eredményeket kapjunk, de a számítási igény kezelhető nagyságban maradjon, a szélcsatorna modelljét 4 elkülöníthető részre bontottuk (ezek a részek megegyeznek a 3 különböző szélirány vizsgálatánál):

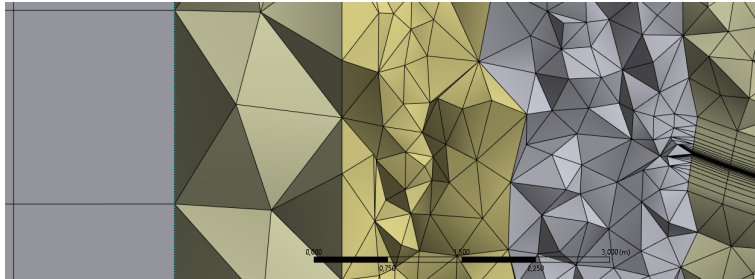
1. a ponyvaszerkezet körül helyezkedik el egy $15 \times 15 \times 7,5$ méteres térfogat, ez kapja a lecsűrűbb/legkisebb elemméretű ($0,4\text{ m}$ nagyságú tetraéder) hálózást, hiszen ezen a területen keressük a legpontosabb eredményeket,
2. a következő térfogatnál már nagyobb méretű elemek találhatók ($1,7\text{ m}$ nagyságú tetraéder) és ez a rész, a ponyvaszerkezet közepénél lévő origótól, a beáramlási oldal irányába $9,2\text{ m}$, míg a kiáramlási oldal irányába $13,5\text{ m}$ hosszúsággal rendelkezik,

3. a legnagyobb elemméretet ($2,3\text{ m}$ oldalhosszúságú téglatest), a kezdő és a végső rész (a felsorolás 2. eleme és a be-, kiáramló oldalak közötti területek) tartalmazza,
4. ahhoz, hogy a szerkezet közvetlen közelében is pontos eredményeket kapjunk, szükségünk van az úgynevezett *inflációs* eljárásra, ami azt jelenti, hogy a szerkezet környezetét külön, egészen kis méretű, egyedi hálózással látunk el. Ebben az esetben $0,003\text{ m}$ kezdeti magasságú, 14 rétegből álló, 1,3-es növekedési tényezőjű rétegződést alkalmazunk, ami azt jelenti, hogy a szerkezetet, 14 hálózási réteg veszi körbe, melyeknél az egyes rétegek nagysága a kezdeti magasságról, a növekedési tényezővel nő.



4.4. ábra. Az inflációs eljárás által létrehozott hálózás sematikus ábrázolása

Ezzel a hálózási felbontással már kellően pontos eredményeket kaphatunk és a számítás nagysága is kordában tartható, hiszen összesen nagyságrendileg $\approx 450\,000$ db elemmel sikerült a hálózást elvégezni. A hálózás egy részletét a 4.5. ábra mutatja, ahol balról látható a 3., majd a 2. és 1. hálózási réteg, illetve jobb oldalt, a ponyva hiperbolikus alakja körül megjelennek az inflációs rétegek is. Látható, hogy az inflációs réteg a szerkezet éleinél nem "szép" módon csatlakozik a többi réteg hálózásához, ami a vizsgálat során élmenti zavarokat kelthet. A limitált hálózási elemszám (szoftver oktatási verziója miatti csökkentés) miatt azonban ez a probléma nem kerülhetett kezelésre ebben a vizsgálatban.



4.5. ábra. Szélcsatorna hálózásának mintája

4.2.3. Folyadékparaméter

Az áramlástan szempontból az adott tulajdonságú, folyadékként modellezett, szél viselkedését többek között a Reynolds-szám írja le ([28],[27]). Esetünkben, a három szélirányhoz és a három szélesebességhez eltérő Reynolds-számok tartoznak, amit a 4.1. táblázat mutat be és a 4.3. képlet alapján számítjuk ([25]).

$$Re = \frac{\rho v_{ref} L}{\mu} \quad (4.3)$$

ahol:

- ρ : a levegő sűrűsége, 20°C -on nézve, jelen esetben $1,204\text{ kg/m}^3$,
- v_{ref} : a referencia szélesebesség, jelen esetben 10; 20; 40; 80 m/s ,

- L : szerkezeti méret az áramlás irányában, jelen esetben 10; 7,1 m ,
- μ : a levegő dinamikus viszkozitása, $20^\circ C$ -on nézve, jelen esetben $1,825 \cdot 10^{-5} \text{ kg}/m \cdot s$.

Irány	Szélesség				Szerkezeti hossz
	10	20	40	80	
[fok]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m]
0	$6,597 \cdot 10^6$	$1,319 \cdot 10^7$	$2,639 \cdot 10^7$	$5,278 \cdot 10^7$	10
90	$6,597 \cdot 10^6$	$1,319 \cdot 10^7$	$2,639 \cdot 10^7$	$5,278 \cdot 10^7$	10
45	$4,684 \cdot 10^6$	$9,368 \cdot 10^6$	$1,874 \cdot 10^7$	$3,747 \cdot 10^7$	7,1

4.1. táblázat. Vizsgált esetek Reynolds-számai

A Reynolds-szám segítségével tudjuk jellemezni az áramlás várható viselkedését. Zárt csövekben történő áramlásnál tudjuk, hogy 2000 alatti Reynolds-szám esetében lamináris, 4000 fölöttinél pedig turbulens áramlás jelentkezik. Ez a határ kültéri, építőmérnöki szerkezetek esetében, áramlásnál közelítőleg $10^3 - 10^4$ Reynolds-számnál jelenik meg. Látható, hogy a 4.1. táblázatban minden esetben ezen határ fölött van a vizsgált áramlást jellemző Reynolds-szám, tehát turbulens áramlásra kell számítani a továbbiakban ([25]).

4.2.4. További paraméterek

A *CFD* vizsgálat pontos elvégzéséhez még további paramétereket is meg kell határozni, melyek a számítás pontosságát, eredményét és számítási igényét befolyásolják. Ezeket a paramétereket az alábbiakban foglaljuk össze:

- *viszkózus anyagmodell*: SST $k-\omega$,
- *hidraulikus átmérő*: jelen esetben 18,4 m ,

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (4.4)$$

ahol:

- A : beáramlási oldal felülete, jelen esetben 498,2 m^2 ,
- P : a beáramlási oldal kerülete, jelen esetben 108,3 m ,
- *turbulencia intenzitási tényező*: közelítésképpen egy állandósult, csővezetékben lévő áramlás közelítő képlete alapján lehet felvenni, jelen esetben 2%,

$$I = 0,16 Re^{-\frac{1}{8}} \quad (4.5)$$

- *nyomás-sebesség sémája*: coupled,
- *számítási paraméterek*: lásd 4.2. táblázat,

Szélesebesség	Időlépés	Lépésszám	Iteráció időlépésenként	Vizsgált idő
$[m/s]$	$[s]$	$[db]$	$[db]$	$[s]$
10	0,04	400	30	16
20	0,02	800		
40	0,01	1600		
80	0,005	3200		

4.2. táblázat. Számítási paraméterek

4.3. Validálás

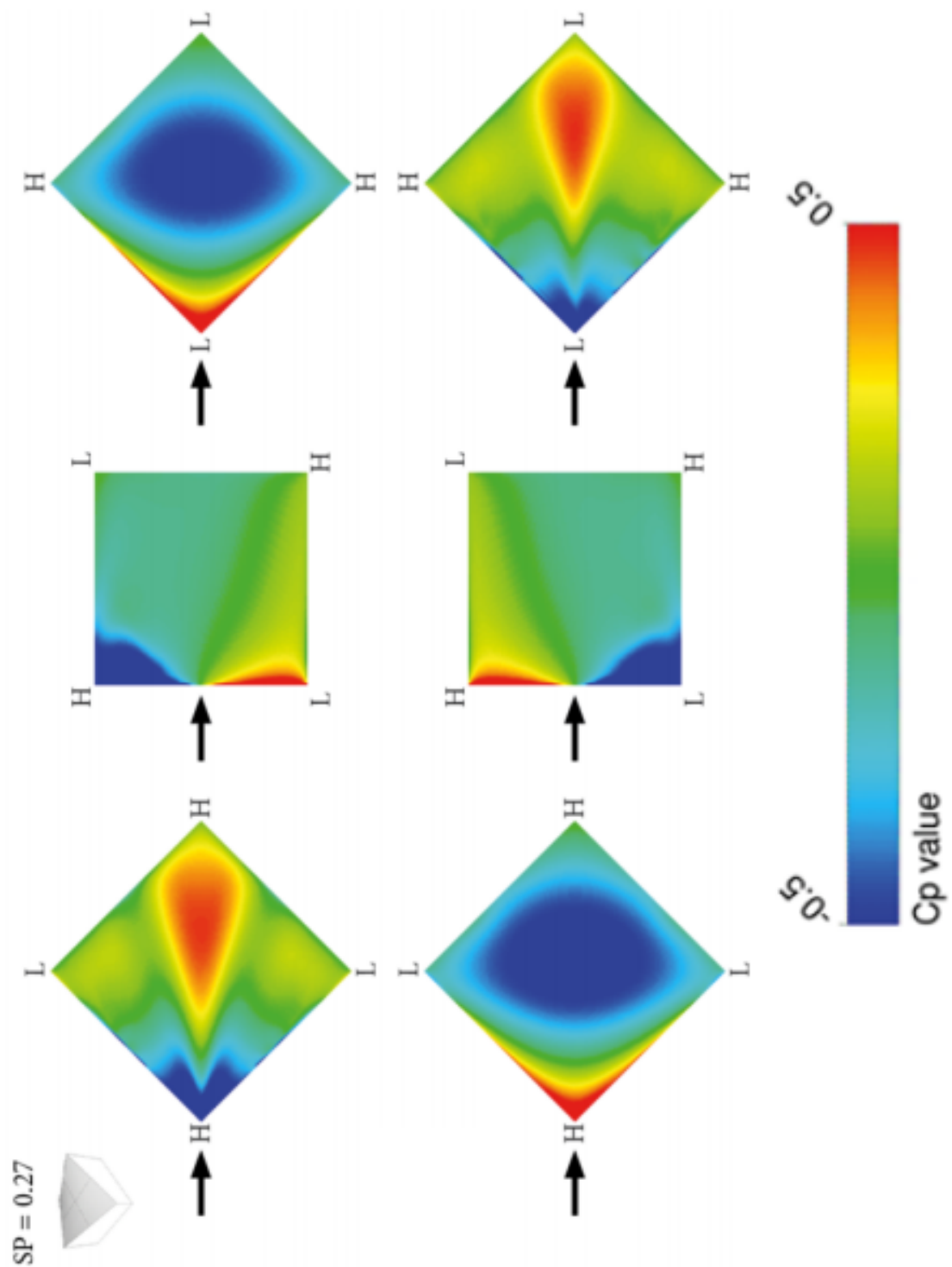
A szélcsonna modellünk működőképességéről úgy győződünk meg, hogy a szerkezetünkhöz kapcsolódó szakirodalomban található, valamilyen szélcsonna kísérlethez kapcsolódó eredményeket rekreálunk. Egy statikus vizsgálatot veszünk alapul esetünkben ([8]).

A hivatkozott cikkben a szerzők, membrán tetők nyomási tényezőinek meghatározását végezték el valós és numerikus szélcsonna modell segítségével. A tetőket vizsgálták úgy, hogy alatta "beépített" tér található (tehát nem tud a szél átfújni alatta, illetve nyitott tetőként is (mint amit mi is vizsgálunk). Geometriailag hasonló feltételezéssel éltek (négyzet alaprajzi elrendezés, egységes csúcsponti magasságok, stb.), illetve több olyan elrendezést is vizsgáltak, ahol a belógás és fesztáv arányát változtatták. Ezek az elrendezések között található olyan, ami megegyező aránnyal rendelkezik (SP_M és $SP_A = 0,27$), mint az általunk vizsgált ponyvatető. Ennek köszönhetően jó hasonlítási alapot jelent számunkra.

Habár geometriailag jó egyezést mutatunk a referencia modellel, több paraméterünk is különbözik, így némi eltéréssel számolhatunk, de ennek jelentősen nem szabad befolyásolnia a globális viselkedést. Azon eltérő paraméterek listája, amelyről tudjuk, hogy különböznek:

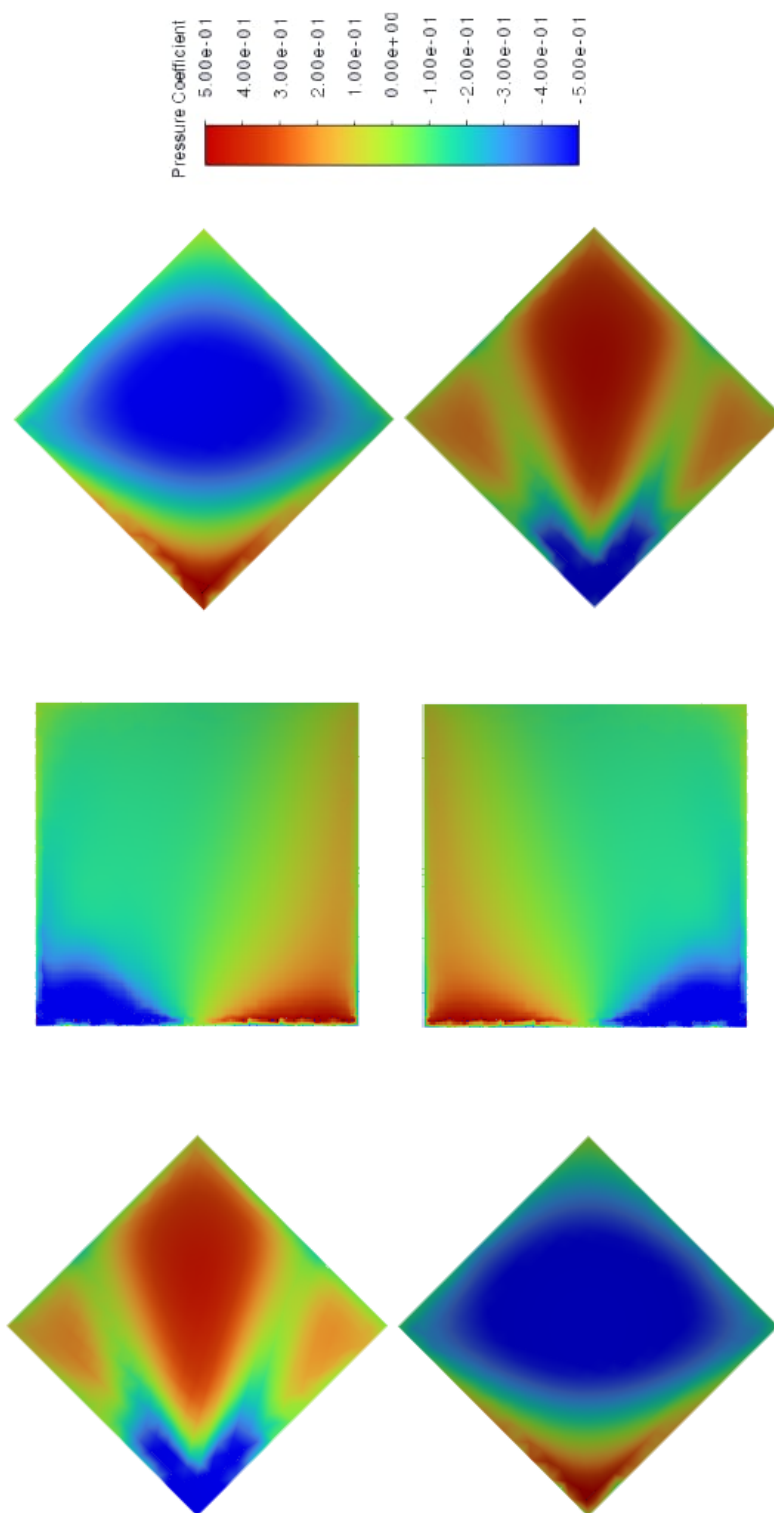
- *szélesebesség*
- *turbulencia intenzitás*
- *hálózás*
- *folyadék paraméterek*

Az alábbi ábrán látható az általuk mért C_p -tényezők eloszlása. A felső ábrán, a felület felső felületén fellépő nyomások láthatóak, míg az alsón, a felület alján lévő. A jobb láthatás miatt az ábra 90°-al el lett forgatva.



4.6. ábra. Átlagos C_p -tényező eloszlás a felület tetején (felső ábra) és az alján (alsó ábra), a szél támadási irányától függően (balról jobbra haladva 0° , 45° , 90°), a referencia szakirodalom szerint.

Ezek után az általunk kapott eredményeket mutatjuk be, az előzőekhez hasonló elrendezésben.



4.7. ábra. Átlagos C_p -tényező eloszlás a felület tetején (felső ábra) és az alján (alsó ábra), a szél támadási irányától függően (balról jobbra haladva 0°, 45°, 90°), az általunk kapott modellezés szerint.

Látható, hogy a 4.6. és a 4.7. ábrák egymással jelentős hasonlóságot mutatnak. Mind értéküket tekintve, mind pedig eloszlását nézve megközelítőleg ugyan azt az eredményt kaptuk, mint amit a szakirodalomban valós szélcsatorna modellel bizonyítottak be.

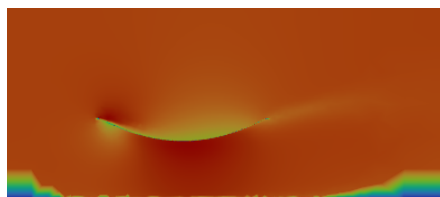
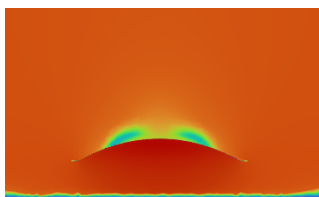
Így azzal a feltételezéssel élhetünk, hogy az általunk felépített szélcsatorna modell, a benne lévő hálózással és a folyadék-, illetve egyéb paraméterekkel képes a valóságot leírni (a feltételezett közelítéseket figyelembe véve), **alkalmas** arra, hogy a további numerikus modellezésre felhasználjuk.

4.4. Vizsgálat

A szélcsatorna segítségével 12 darab vizsgálatot végzünk el, amiben egyrészt a szél támadási irányát és a sebességét változtatjuk. Az egyes változtatások között a szél tulajdonsága nem fog változni, csupán a lépésközök fognak különbözni, hiszen magasabb sebességnél, kisebb időlépésenként célszerű a vizsgálatot elvégezni, a pontos eredmény érdekében.

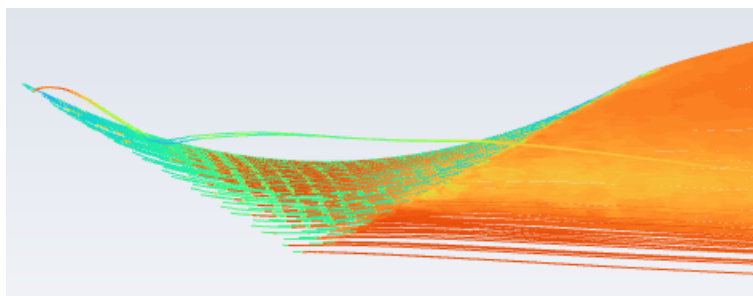
A számítás végére, az örvényleválás megítélésére, több eredményt is ki tudunk nyerni, melyek közül mi három módszert alkalmazunk:

1. A ponyvaszerkezet közepén, két függőleges síkot veszünk fel és ezeken, videófelvétel segítségével vissza tudjuk követni, a szélesebbesség változását a szélcsatornán belül. Az 4.8. ábrán, a második kép alján látható, hogy a föld közelében 0 a szélesebbesség, a kép széle felé a nagy ugrást, a hálózás méretének növelése okozza.



4.8. ábra. Szélesebbesség változása, az első képen a szél irányából nézve, a másodikon pedig erre merőlegesen (a szélirány: balról jobbra), 0° és 80 m/s -os vizsgálat

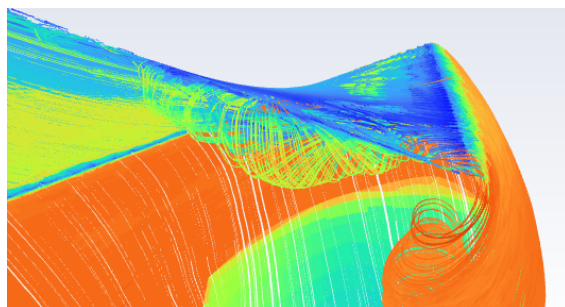
2. Mérhető adat az, hogy a szerkezeten mekkora a maximális felhajtóerő értéke, amit minden időlépésben mérhetünk és kimenthetünk. Ezt az adatsort, egy frekvenciaanalízissel megvizsgálva egy olyan diagrammot kapunk, amiben már nem időfüggő az adat, hanem frekvencia függő (*FFT*).
3. A szelet diszkrétizálva is megjeleníthetjük, így látszódik, hogy az egyes "szélelem" milyen útvonalon haladhat.



4.9. ábra. Szél útvonalai, 0° és 80 m/s -os vizsgálat

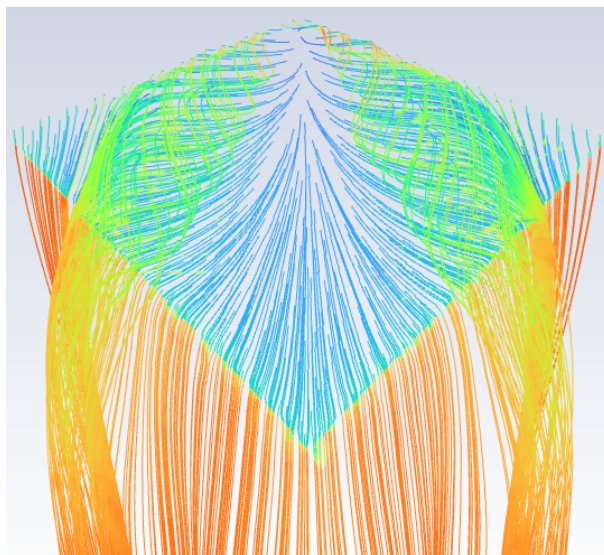
Ezeket az eredményeket felhasználva vizsgáltuk az örvényleválást. A vizsgálatnak kettős eredménye lett:

- Egyrészt nem fedeztünk fel jól látható, váltakozó oldali örvényleválást (Kármán-féle) semmilyen szélirány és semmilyen szélsébség mellett. Az [FFT] diagrammokon főleg a szélsébség turbulens változását találtuk csak meg, de ez nem volt olyan nagy, hogy örvényleválásnak nevezhessük. Változást a szélsébség videófelvételén sem találtunk.
- Másrészt azonban örvények kialakultak a szerkezet körül, de ezek nem voltak instabilak, hanem kvázi egy egyensúlyi helyzetbe álltak be és folyamatosan jelen voltak a vizsgálat során. Ezek a stabil örvények is csak nagyobb (40 m/s és afölött) szélsébség mellett jelentkeztek.



4.10. ábra. Szél örvénylő útvonala, a ponyvaszerkezet sarkánál (körrel jelölve az első ábrán), 45° és 40 m/s -os vizsgálat

Ilyen stabil örvényleválásra mutat még példát az 4.11. ábra, ahol a 90° és 40 m/s -os vizsgálatnál, a felület alsó felén két szimmetrikus örvény alakult ki.



4.11. ábra. Szél útvonala, 90° és 40 m/s -os vizsgálat

Ebből a két eredményből arra a következtetésre jutottunk, hogy maga az örvényleválás jelen van a szerkezeten, de ezt a széldinamikai folyamatot olyan modellen nem lehet pontosan vizsgálni ponyvaszerkezetek esetében, ahol a szerkezet nem mozdulhat el a szél hatására.

4.5. Hiányosságok

Ebben a fejezetben egy olyan vizsgálatot mutattunk be, ami az egyik lehető legegyszerűbben tudja numerikusan modellezni a szél dinamikai hatását a szerkezetre. Ennek az egyszerűségnek köszönhetően viszonylag gyorsan kaphatunk eredményt, de emellett több hátránya is megjelenik, ezeket az alábbiakban soroljuk fel a teljesség igénye nélkül:

- A szerkezet merev test szerű viselkedése miatt nem láthatjuk a szerkezet választ (elmozdulásait, a benne ébredő feszültséget) a szélteherre, így a kutatott jelenség sem tud teljes formájában előállni.
- Jelentős egyszerűsítés az is, hogy a ponyvát megtámasztó szerkezetet nem tartalmazza a vizsgálat, hiszen ez is befolyásolja a szél áramlását a ponyva környezetében.
- Áramlástanilag, a szél turbulens viselkedésének modellezésére használt eljárások közül többet is megvizsgálni szükséges lenne, a legalkalmasabb kiválasztásához.
- Pontosítani lehet még az áramlástani számítást, ha nem konstans beáramló szélesség kerül alkalmazásra, illetve a felületi súrlódás nagyobb mértékben szerepel a modellben (egyrészt a ponyva anyagán, másrészt a talajon).
- Mivel a ponyva vastagsága elhanyagolhatóan kicsi, így az áramlási tér hálózásánál problémát okoz. Az örvényleválás pontos modellezéséhez egy olyan hálózási eljárás kidolgozása szükséges, ami kezelni tudja a szerkezet pereménél megjelenő elemek esetleges torzulását.

5. fejezet

Fellazított szerkezeti analízis

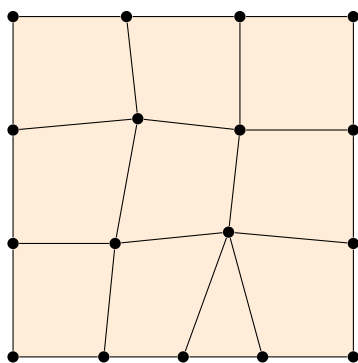
5.1. Mechanikai modell

5.1.1. Geometria

Ebben az analízisben továbbra is a korábban már ismertetett geometriát fogjuk vizsgálni.

5.1.2. Hálózás

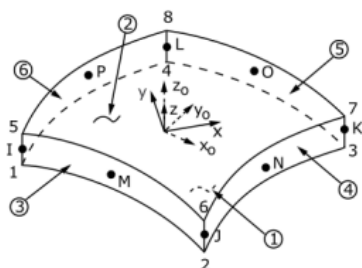
Ebben a vizsgálatban figyelembe vesszük a szerkezet elmozdulásait, így diszkretizálnunk kell a számítás előtt a membránfelületet is. A teljes felületen pontos eredményt kell kapnunk az elmozdulásra és feszítésre, ezért homogén hálózással osztjuk fel a felületet. Általánosságban $100mm$ élhosszúságú négyzetes hálót alkalmaztunk, ami "quadrilateral" domináns és kvadratikuss elemrendű. Ez azt jelenti, hogy főleg négyzetes elemekből fog állni a hálónk, de a kétszergörbült felület miatt esetlegesen háromszög elemek is megjelenhetnek (ezzel minimalizálva a torz négyzet elemek darabszámát és javítva a háló minőségét), lásd 5.1. ábra. A kis elemméretre azért van szükség, hogy az áramlási tér hálójához illeszkedni tudjon a szerkezeti háló, amivel csökkenthető a hálók közötti szükséges interpolálás.



5.1. ábra. Felületi háló sematikus ábrája

A hálónk 8 csomópontú, Shell281-as elemekből fog állni, ami vékony és moderáltan vastag héjak modellezésére alkalmas. Általános esetben minden csomópontban 6 szabadságfok van definiálva, ami: a 3 irányú eltolódás (x , y , z); a 3 irány körüli elfordulás (xx , yy , zz). Membrán szerkezetek esetében viszont a hajlítási merevség elhanyagolható, tehát csak transzlációs szabadságfokok jelennek meg.

Ezek az elemek mind a nagy elmozdulásokat, mind a nemlineáris viselkedést is képesek pontosan kezelni, ezért is választottuk a saját feladatunkhoz. A Shell281-es elem általános geometriáját az alábbi ábra mutatja be.

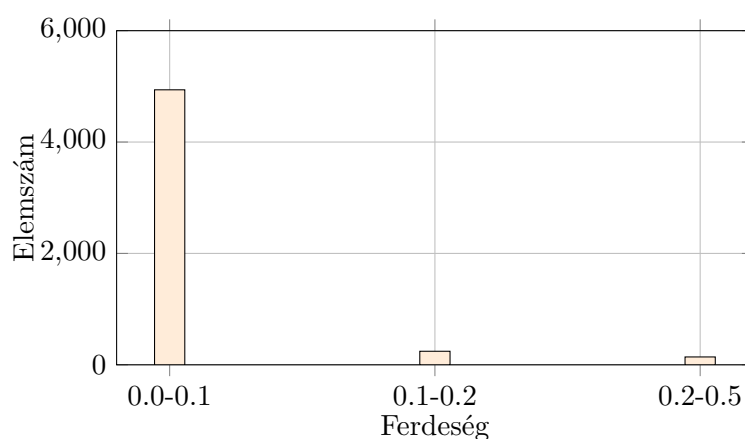


5.2. ábra. 8 csomópontú Shell281-es végelem általános geometriája, ANSYS

A hálózás minőségét a ferdeséggel (*skewness*) ellenőrizzük. A ferdeség egy olyan jellemző, ami az egyes diszkretizált hálóelem torzulását minősíti. Egy tökéletes elem (négyzet, egyenlő oldalú háromszög) ferdesége nulla és ahogy az elem egyre torzabb, úgy nő a ferdeség értéke, tehát a nulla a tökéletes geometria és minél nagyobb a ferdeség értéke, annál torzabbak az elemek. Általános esetben a 0,5-ös érték alatt az elemek elfogadhatóak, míg a 0,85-0,9 körüli érték már problémás lehet. Ezeket az értékeket úgy kapjuk meg, hogy az ideális geometria belső szögeitől (egyenlő oldalú háromszög esetében például a 60° -tól) megnézzük mennyire térnek el az általunk generált háló elemeinek a belső szögei.

A nagy ferdeség azért okoz gondot, mert ekkor a numerikus számításban, a bázisfüggvények pontatlanul közelítik a valóságot. Ezen kívül konvergencia problémákat is okozhat, ezért a fizika pontos megragadásához kevésbé torz elemek használata erősen ajánlott.

A saját hálónk 5328 elemből áll, ebből 5322 az négyzet-elem, míg 6 db háromszög-elem. A háromszög-elemek ferdesége 0,1 körüli, tehát **megfelelők**. A négyszög-elemeknél már nagyobb szórása van a ferdeségnek, amit az alábbi ábra ismertet. Azonban leolvasható, hogy az elemek 80%-át maximálisan 0,1-es ferdeség jellemez, illetve egy elem sem haladja meg a 0,5-ös határt, így ezekről az elemekről is elmondható, hogy a ferdeségük **megfelelő**.



5.3. ábra. A 8 csomópontos négyzet elemek ferdesége

5.1.3. Anyagmodell

Mivel ebben a vizsgálatban már foglalkozunk a ponyva viselkedésével, ezért az anyagmodelljét is definiálnuk kell ennek az ortotróp, nemlineáris működésű anyagnak. A vizsgálathoz felhasznált főbb tulajdonságokat az alábbi táblázat tartalmazza ([14], [22], [24] és [3]).

Paraméterek		Érték	Mértékegység
Megnevezés	Rövidítés		
Súly	g	400	kg/m^3
Rugalmassági modulus	E	3000	MPa
Nyírási modulus	G	1500	MPa
Poisson tényező	ν	0,3	-
Hőtágulási együttható	α	2e-06	$^{\circ}\text{C}^{-1}$

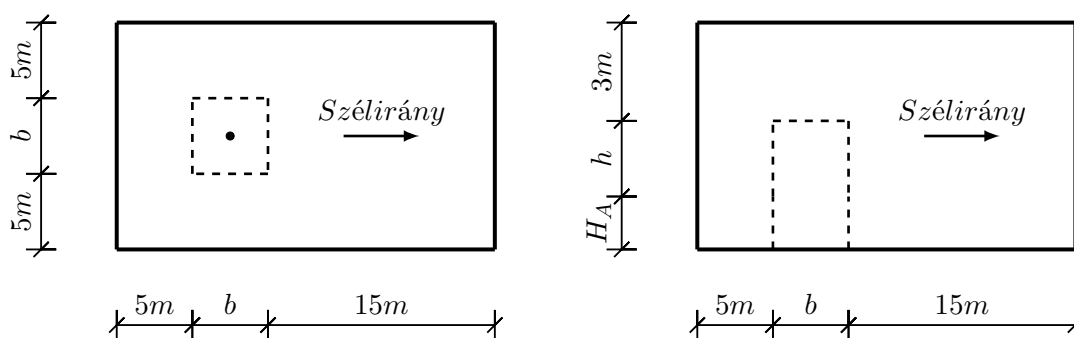
5.1. táblázat. Anyagi paraméterek jellemzői

5.2. Áramlástechnikai modell

5.2.1. Szélcsatorna geometria

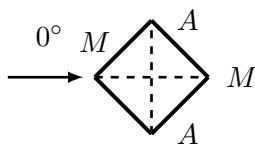
Az első vizsgálattól eltérő szélcsatorna geometriát fogunk ebben az analízisben használni, így pontosabb hálózást tudunk majd a szerkezet környékén elérni. Az új numerikus szélcsatorna sematikus ábráját a 5.4. ábra tartalmazza, amin szaggatott vonallal a szerkezetünk befoglaló térfogata látható. A csatorna egy 30m hosszúságú, 8m magasságú és 20m szélességű téglatest, benne adott helyzetben a ponyvaszerkezet.

- h : a magasabb és az alacsonyabb csúcsok közötti magassági távolság, jelen esetben 2,7 m,
- b : a szerkezetet befoglaló négyzet alaprajzi szélessége, jelen esetben 10 m.



5.4. ábra. Az új szélcsatorna geometriai méreteit bemutató alaprajzi és hosszirányú nézetek

Tekintettel arra, hogy az első vizsgálatban érdemi különbséget nem találtunk abban, hogy a szerkezetre melyik irányból hat az áramló közeg, illetve a megnövekedett számítási igény miatt csupán egy irányban vizsgáltuk meg a szél-szerkezet közti kapcsolatot, az előző fejezetben látott jelölések szerint ez a 0° (lásd 5.5. ábra). Az előző vizsgálatához hasonlóan a talaj érdességét nem vettük figyelembe.



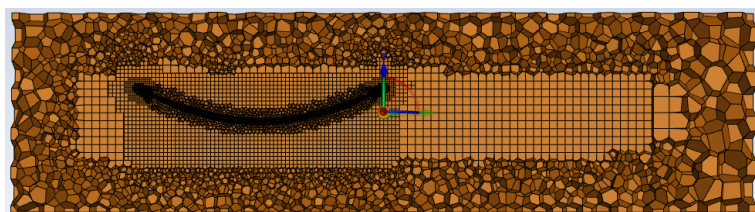
5.5. ábra. Vizsgált szélirány

5.2.2. Hálózás

Ennél az analízisnél is az a célunk, hogy olyan diszkretizációt alkalmazzunk, amivel pontosan tudjuk a fizikai jelenséget modellezni, azonban az előző vizsgálatához képest jelentősen megnöveljük a hálózati elemek számát, így próbálva elősegíteni a vékony szerkezet élének környezetében létrejövő örvények pontos vizsgálatát.

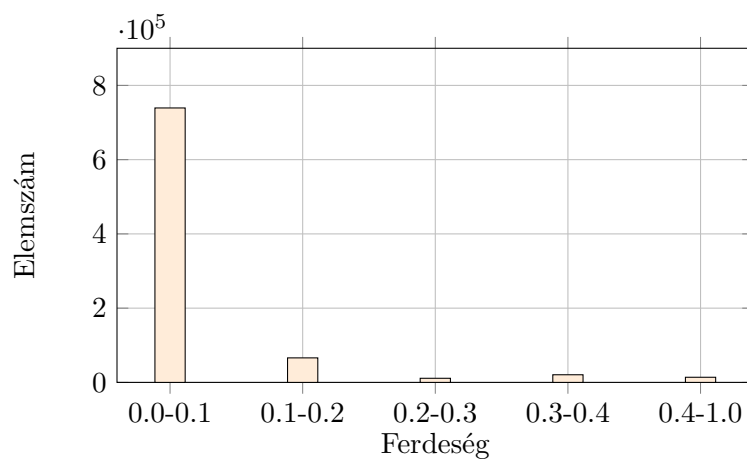
- Először a **felületi** hálót állítjuk elő. Meg kell határozni a szélcsatorna minden egyes oldalára, hogy ott mekkora elemek lehetnek. A beáramlási- és kiáramlási oldalon $1m$ -es maximális, a szélcsatorna többi oldalára pedig $1, 2m$ nagyságú elemeket írtunk elő. A ponyvaszerkezetünk felülete az áramlási közegben is megjelenik, mint felület, ezért ezt is el kell hálózni. Az adatátadás elősegítése érdekében ugyanakkora általános elemméretet írtunk ide is elő, mint amit a szerkezetes tranziens modellben alkalmaztunk ($0, 1m$), azonban a perem környéki jelenségek leírása miatt, további finomításra volt szükség, ezért a peremeknél $0, 01m$ nagyságú elemeket hozunk létre.
- A felületi és térbeli háló közötti **átmeneti réteget**, az inflációs réteg segítségével tesszük lehetővé. Az inflációs réteg ebben az analízisben 17 szintből áll, $1, 2$ növekedési rátával rendelkezik és a kezdeti szint vastagsága $0, 001m$.
- Ezután már **térbeli** hálóról beszélhetünk. A szerkezet környékét egy befoglaló téglalattal vettük körbe, amiben $0, 2m$ nagyságú "hexcore" elemeket alkalmaztunk. A téglalatt méreteit a szerkezet geometriai méretéhez viszonyított aránnyal adtuk meg, tehát $\pm X, \pm Y$ és $\pm Z$ irányban $0, 01$.
- Még egy hasonló téglalattot alkottunk meg, ahol már nagyobb térfogatot fedtünk le és kisebb, $0, 4m$ nagyságú, elemeket alkalmaztunk. A téglalatt méreteihez felhasznált arányok:
 - alul és felül $0, 1$,
 - oldalt $0, 05$,
 - beáramlási oldalon $0, 2$,
 - kiáramlási oldalon $1, 0$.
- Az eddig felsorolt hálózási eljárások mind lokális felülírási szabályként jelennek meg a modellünkben, azaz a globális beállítást írják felül. Általánosan azt írtuk elő, hogy az elem mérete legyen $1, 2m$ és a fajtája "poly-hexcore". Ez egy általános szabály, azokon a helyeken jelenik meg, ahol a lokális finomítások szabályai nem írják felül, illetve

két szabály átmenetében elfogadható az adott globális elemméret. A végeredményt az alábbi ábra mutatja.



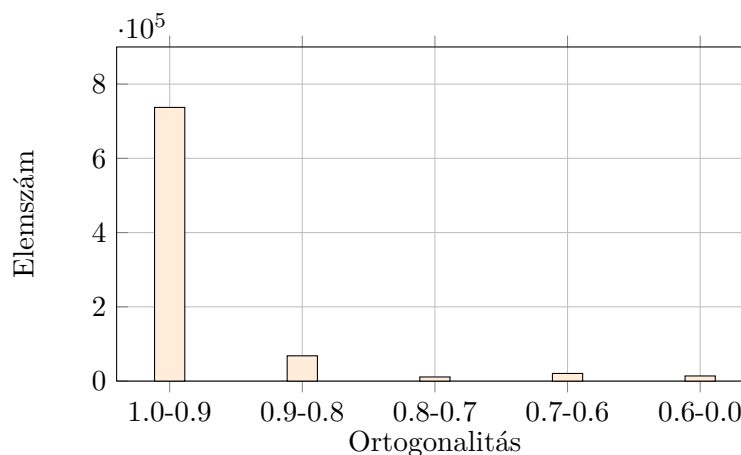
5.6. ábra. Szélcsatorna hálózási mintája, szélirány balról jobbra

Ahhoz, hogy a hálózás minőségéről megbizonyosodjunk, ismét meg kell vizsgálnunk a hálózati elemeket. A mechanikai modellnél a ferdeséget vettük alapul, ez az áramlási tér hálózásának osztályozására is megfelelő eljárás. A teljes térfogatot 850.822 elemmel töltöttük fel. Az alábbi diagram alapján látható, hogy az elemek 87%-a 0 és 0,1-es ferdeség között van, tehát **megfelelnek**.



5.7. ábra. Az áramlási tér hálózásának ferdesége

Azonban nem csak ezzel az egy eljárással lehet a hálózás minőségét vizsgálni. A következőben az orthogonális minőséget mutatjuk be. Ez egy olyan minőségi mutató, ami azt vizsgálja, hogy az egyes elemek állása milyen jól van összehangolva az áramlás irányával és a szomszédos elemekkel. Ezt úgy számítja a program, hogy megnézi az egymás melletti elemek és elemfelületek által bezárt szöget. Optimális esetben a rendszer ortogonális, tehát két egymás melletti felület 90° -t zár be egymással, ekkor az ortogonális minőség 1, a legrosszabb esetben pedig a két felület nem merőleges egymásra, ekkor 0 értéket vesz fel.



5.8. ábra. Az áramlási tér hálózásának ortogonalitása

Általános feladatoknál a 0,95-1 szakasz tökéletesnek mondható, 0,7-0,95 között még jó, 0,2-0,7 között közepes minőségű (néhány esetben még elfogadható, de okozhat konvergencia és pontossági problémákat), 0,2 alatt pedig szegényes a háló minősége. Az alábbi diagram alapján láthatjuk, hogy a hálónk **megfelelő**.

5.2.3. További paraméterek

Az analízishez tartozó további, fontosabb paramétereket az alábbi táblázat tartalmazza.

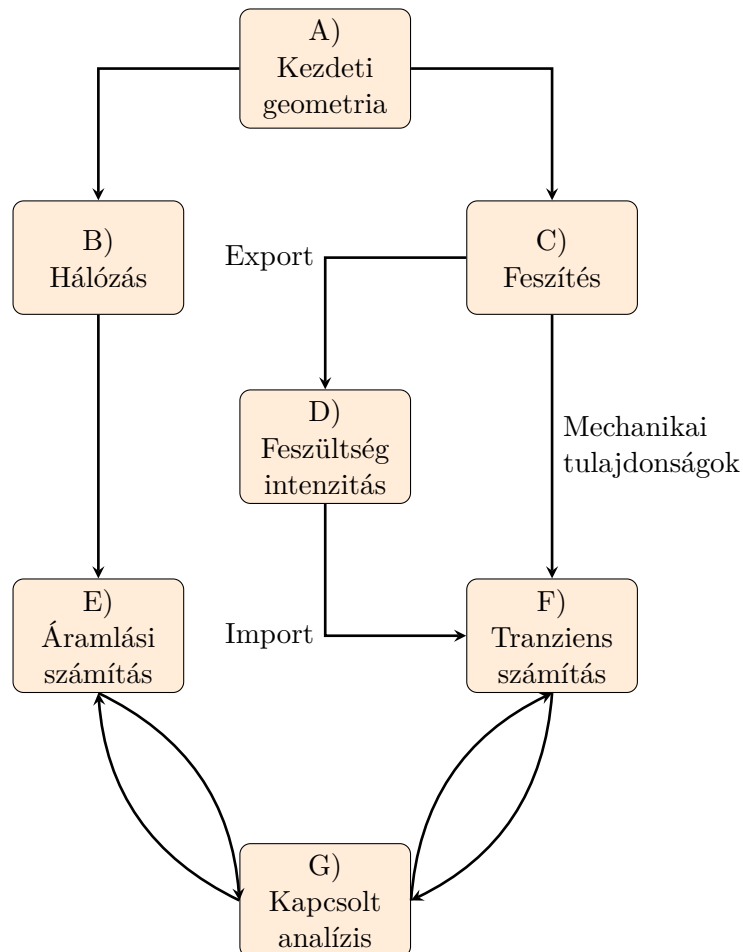
Paraméter	Érték	Mértékegység	Paraméter	Érték	Mértékegység
Szélesség	8,0	m/s	URF	0,1	-
Időlépés	0,005	s	Iteráció	10-30	-
Átlagos előfeszítés	0,25	-	Hidraulikus átmérő	11,4	m

5.2. táblázat. További paraméterek

5.3. Vizsgálat

5.3.1. Folyamat

Az analízis folyamatát fogjuk az alábbiakban ismertetni, miközben az adott résznél feljövő apró beállításokat és fontosabb paramétereket is bemutatjuk, melyek segítségével elő tudott állni a végleges modell. A vizsgálat folyamatábráját a 5.9. ábra szemlélteti.



5.9. ábra. Analízis munkafolyamata

5.3.1.1. Szerkezeti oldal

Először a szerkezeti oldalon látható lépéseken megyünk végig.

A):

Az analízist azzal kell kezdeni, hogy a szerkezet kétszer görbült geometriáját felvesszük, aminek meghatározásáról már korábbi pontban írtunk. A geometriával és a hozzá tartozó anyagi tulajdonságokkal létrehozható a szerkezeti oldalon a mechanikai modell, ami egy membrán szerkezet.

C):

Tudjuk, hogy a ponyvák a valóságban csak húzással képesek a rájuk ható terhet viselni, amit előfeszítéssel érnek el a gyakorlatban, tehát nekünk is szükséges valamilyen előfeszítést működtetnünk a szerkezetünkön, amit többféleképpen is megtehetünk szoftveresen:

- támaszelmozdulás

- sajátfeszültség
- peremteher
- hőmérsékleti teher

Számunkra a hőmérsékleti teher volt a kézenfekvő, hiszen a négy peremén csuklósan megtámasztott szerkezetnél: a támaszelmozdulás numerikus hibát okozna a sarokpontokon; peremteher nem okozna feszültséget a szerkezet közepén ha a támaszra definiálnánk. A hőmérsékleti teher viszont azért tud működni, mert a teljes szerkezetet lehet lehűteni, ami kvázi egyenletes zsugorodást okoz, amiből feszültség keletkezik. A jelenség térbeli, de a kezdeti feszültség meghatározásához síkbeli megnyúlással számolhatunk.

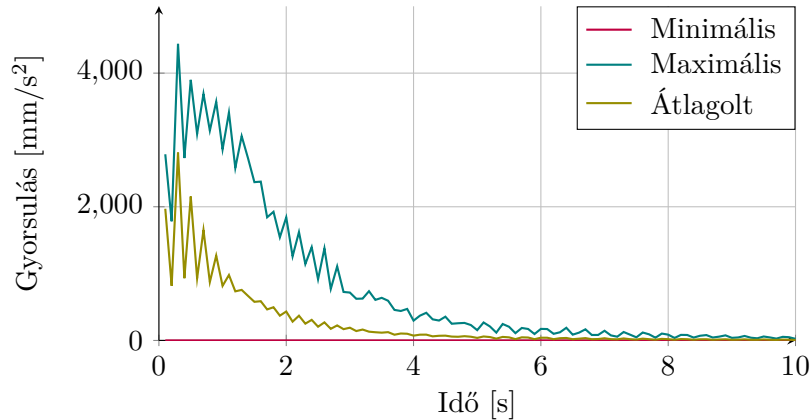
$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T \quad \text{és} \quad \sigma = \epsilon \cdot E \quad (5.1)$$

ahol:

- Δl : hosszváltozás
- α : hőtágulási együttható
- l_0 : kezdeti hossz
- ΔT : hőmérsékletváltozás
- σ : feszültség
- ϵ : nyúlás
- E : rugalmassági modulus

A számításunkban tehát adott hőmérséklet változást előírva, adott feszültségi szintre tudjuk feszíteni a szerkezetet. Az alábbi ábra mutatja a vizsgált feszítési állapotot. A feszítés nagysága és a belebegés megjelenésének valószínűsége között kapcsolat van, minnél jobban meg van feszítve a szerkezet, annál nagyobb szélsébség mellett jelenik meg a belebegés, ezért a feszítés mértéke kritikus a vizsgálat szempontjából. Ipari ökölszabályokat figyelembe véve, a feszítést úgy határoztuk meg, hogy a szerkezeten ne jelenjen meg 1 kN/m -es feszítőerő. Ami 2 mm -es vastagság mellett, 0,4 MPa feszültséget jelent.

A feszítési feszültség meghatározásánál a gravitációs terhet is figyelembe vettük. Mivel a szerkezetünk nagy alakváltozásokat szenvedhet terhelés hatására, ezért az előfeszítést előidéző hőmérsékleti teher és a gravitációs teher definiálása után adtunk időt a szerkezetnek felvennie a végleges geometriáját és feszültségelrendeződését. Ez az idő 10 másodpercet jelentett, amiben kellő ideje volt a szerkezetnek a relaxációhoz, amit abból látunk, hogy a szerkezet gyorsulása "Z" irányban beáll nullára (lásd 5.10. ábra).



5.10. ábra. Függőleges, "Z" irányú, gyorsulás a szerkezeten

D):

A feszítést egy részmodellen határoztuk meg, amiből ezt exportáljuk. Az exportálásnál az adott csomópontban lévő feszültség komponenseit, σ_x , σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz} , kimenjtük. Ezeket a feszültségkomponenseket pedig a továbbiakban, kezdeti feszültségként importálva tudjuk működtetni a szerkezeten. Erre a lépésre azért van szükség, hogy a hőmérsékleti teher semmikép se tudjon az áramlásban jelenlenni (hőmérséklettől függ például a levegő anyagparamétere, ami jelentős lehűlésnél elronthatja a számításunkat). Mivel azonban, minden esetben megegyező geometriát és hálózást alkalmazunk, a feszültségek importálása semmilyen adatvesztéssel nem jár.

F):

A szerkezetes oldal legvégén egy tranziens modul áll, amibe az eddig használt geometria, mechanikai tulajdonságok és a feszítés is importálva van. Ebben a modulban annyi kiegészítés van még, hogy definiálni kell azt a felületet, amin keresztül a kapcsolat az áramlással történik.

5.3.1.2. Áramlástan oldal

Ezután az áramlástan lépések következnek.

B):

Először a numerikus szélcsatorna légtérét kell behálózni, az előzőekben bemutatott módon.

E):

A háló a FLUENT modulba kerül be, ami az áramlás számításáért felel. Hasonlóan a szerkezetes oldalhoz, itt is meg kell határozni, hogy mely felületen kerül átadásra a kiválasztott mennyiség, illetve, hogy a szerkezeti oldalról kapott elmozdulás mely felület elmozdulását jelenti.

5.3.1.3. Kapcsolt analízis

A szerkezeti és áramlástan oldal végül egy kapcsolási modulban kerül összekötésre.

G):

Ennek a modulnak a feladata, hogy a mindkét oldal számítását irányítsa, illetve irányítsa a kapcsolt felületen történő adatátadást: áramlási oldalról erőt nyer ki és ad át a szerkezeti oldalnak, majd onnan elmozdulást juttat vissza. A modul az időlépések kezelésében is részt vesz.

Két fontos paraméter tartozik ide, aminek megfelelő beállítása szükséges a számítás futtatásához és a kellő pontosság eléréséhez. Az első ilyen paraméter a relaxációs tényező

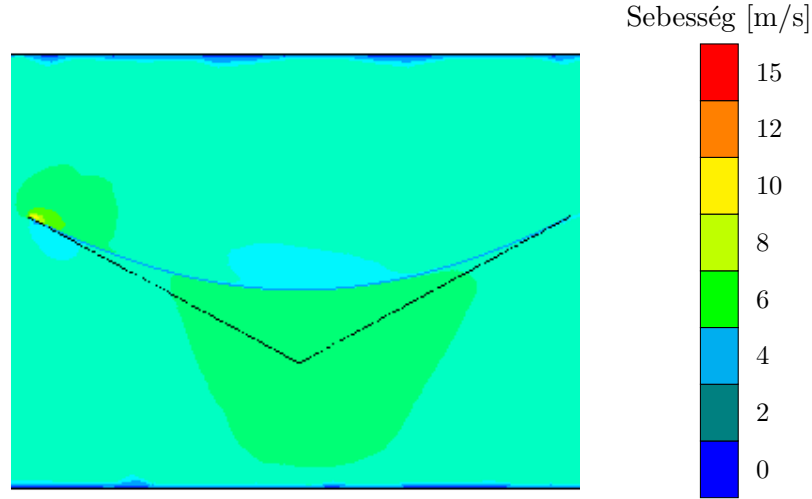
(*under relaxation factor* - *URF*). A tényező az iteratív megoldási folyamat stabilizálásához szükséges kapcsolt analíziseknél. Az URF-nek a jelentése, hogy egy újabb iterációban mekkora részben veszi figyelembe az analízis a korábbi értékeket, ezzel csillapítva a megoldás eltérését. Általánosságban 0-1 közötti értékeket vehet fel (lehet 1-nél nagyobb, ekkor már túlrelaxációnak hívjuk), ahol 1 gyors konvergenciát de kisebb stabilitást, a 0 pedig lassabb konvergenciát de nagyobb stabilitást biztosít a számításnak. A tényező jelentőségét az alábbi egyenlet mutatja be ([6]), ahol láthatjuk egy új mennyiség ($\phi_P^{\text{új,használt}}$) számításának lépését.

$$\phi_P^{\text{új,használt}} = \phi_P^{\text{rég}} + URF(\phi_P^{\text{új,feltételezett}} - \phi_P^{\text{rég}}) \quad (5.2)$$

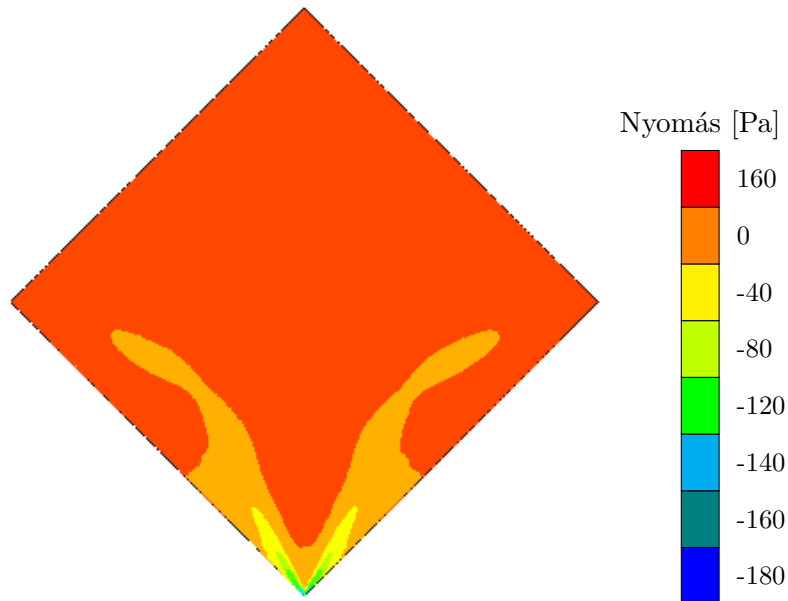
A második fontos tényező a konvergencia célértéke, ami azért felelős, hogy meghatározza, mekkora eltérés fogadható el két iterációs lépés között ahhoz, hogy konvergensnek tekinthessük a megoldást. Minnél kisebb ez a tényező, annál pontosabb a számítás, azonban a számítási idő megnő. Általános esetben 1e-5 és 1e-6 körüli értékeket szokás felvenni.

5.3.2. Eredmények

A kapcsolt analízis végén csupán a statikus szélterhelést kaptuk meg, örvényleválás és a belebegés jelensége még nem jelent meg az analízisben. Habár ez még nem megoldása a kitűzött célunknak, de látható, hogy a kapcsolt analízis működik és meg tudja mutatni az áramlást a szerkezet körül pontosabban, mint ha a szerkezet alakváltozásait elhanyagolnánk. Az alábbi két ábrán az áramlási térben lévő szélesebesség változását mutatjuk be a szerkezet körül, illetve a rá ható nyomáseloszlást, az számítás kezdetétől 1,5 másodpercre (lásd 5.11. és 5.12. ábra).



5.11. ábra. Szélesebesség a ponyvaszerkezet körül, a szél irányával (balról jobbra) párhuzamosan nézve, a szerkezet szimmetria tengelyében, $T = 1,5$ s, [m/s]



5.12. ábra. Felületi nyomás a ponyvaszerkezeten, $T = 1,5$ s, [Pa]

5.4. Hiányosságok

Ebben a fejezetben egy olyan vizsgálatot mutattunk be, ami már pontosabban írja le a valóságot, mint az előző fejezetben bemutatott merevtest vizsgálat. Habár a pontosságban előrébb léptünk, ennek a modellezési eljárásnak is vannak hiányosságai, amit az alábbiakban sorolunk fel.

- A nagyszámú hálózási eleme és a nemlineáris számítás miatt, a vizsgálat futási ideje jelentős mértékben megnőtt, tehát nagyobb számítási kapacitással kell rendelkezni, ahhoz, hogy ezt a vizsgálatot elvégezzük, így az egyes paraméter változásának hatását nehezebb megismerni.
- A hálózás habár sűrűbb a kritikus helyeken, mint a merevtestes analízisben, a peremen lévő hibákat ez sem kezeli tökéletesen.
- Azzal, hogy a nemlineáris működést belevittük a modellezésünkbe, azt is elértük, hogy jelentősen bonyolódott a megoldandó feladat, így a modellezés során jóval több hiba fordulhat elő, mint a merevtestes eljárásnál, illetve a hibák javítása is nehezebbé válik, mint az első vizsgálatnál.
- Hasonlóan a merevtestes analízishez, a megtámasztó szerkezetek és a felületi érdekesség ebből az analízisből is hiányzik. Ezen kívül a turbulencia modell és a szélprofil vizsgálata sem került felülvizsgálatra.
- Habár nem célja ennek a dolgozatnak, a jelenség megértéséhez nem csak a folyadékparamétereket kéne változtatni, hanem parametrizálva kéne kezelni a ponyva geometriáját is, ezzel például azt is megvizsgálva, hogy a magasan és alacsonyan lévő sarokpontok közti távolság (így a szerkezet görbülete) mennyire befolyásolja az aerodinamikai instabilitás előállását.

6. fejezet

Értékelés és kitekintés

A dolgozat célja az volt, hogy a membránszerkezet szélhatásra történő belebegésének jelenségét vizsgálja. A bonyolult rendszert először leegyszerűsített formájában vizsgáltuk, ahol a membrán mechanikai viselkedéséből következő nehézségeket kizártuk azzal, hogy a szerkezetet merevtestként működtettük a numerikus szélcsatorna kísérletben. Ebből az analízisből azt kaptuk eredményül, hogy a szerkezet körüli áramlás turbulens, azonban periodikusan leváló örvények nem keletkeznek a felület mentén.

Következő lépésként már figyelembe vettük a szerkezet viselkedését, így modellezésre került a ponyvaszerkezet. Ebben az analízisben sem sikerült még az aerodinamikai instabilitást elkapni, csupán az áramlás kvázi statikus oldalát láthattuk.

A jelenség pontos megértéséhez, jelen dolgozaton túlmutatóan, még pontosabb modellre van szükség. Ezt többek között azzal lehet elérni, hogy a bemutatott analízisek végén felsorolt hiányosságok kijavításra kerülnek (turbulencia modell, hálózás a perem környékén, kiegészítő szerkezetek stb.). Ezen kívül kiemelt fontossággal él a geometriai paraméterek vizsgálata, ami magába foglalja a szélirányt, illetve a felület görbeségét is. Ezekkel a kiegészítésekkel lehetne a belebegést pontosan vizsgálni.

Irodalomjegyzék

- [1] EN 1382: Temporary structures - tents - safety, 2005.
- [2] EN 1991-1-4: Actions on structures - part 1-4: General actions - wind actions, 2005.
- [3] Mike Ashby: Material property data for engineering materials, 2021.
- [4] V. Aune–G. Valsamos–F. Casadei: Coupled simulations of extreme fluid-structure dynamics. *X International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering*, 2023.
- [5] Alejandro Bahmón: *The Magic of Tents: Transforming Space*. 2004, Harper Paperbacks.
- [6] André Bakker: Lectures on applied computational fluid dynamics, 2008.
- [7] Zhaoqing Chen–Liang Yin–Lixiang Tang–Shuang Wang: Aero-elastic behavior of open-type one-way tensioned membrane structure models. *AIP Advances* 11, 105201 (2021), 2021.
- [8] Jimmy Colliers–Joris Degroote–Marijke Mollaert–Lars De Laet: Mean pressure coefficient distributions over hyperbolic paraboloid roof and canopy structures with different shape parameters in a uniform flow with very small turbulence. *Engineering Structures* 205 (2020) 110043, 2019.
- [9] Budhaditya De–Ajay Kumar–Sudib Kumar Mishra: Large eddy simulation of wind loading on an anticlastic conical tensile membrane. *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics* 246 (2024) 105658, 2024.
- [10] Hegyi Dezső–Gáspár Orsolya–Fehér Eszter: *Különleges tartószerkezetek*. 2022, TERC Kereskedelmi és Szolgáltató Kft.
- [11] Horváth Dávid: Report, 2021.
- [12] Szabó Gergely: Hídpályák kísérleti és numerikus alapú aerodinamikai stabilitásvizsgálata, 2013.
- [13] Jennifer Giller: Reinventing the tent, an exploration of fabric construction, 2011-2012.
- [14] M. Glück–M. Breuer–F. Durst–A. Halfmann–E. Rank: Computation of fluid-structure interaction on lightweight structures. *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics* 89 (2001) 1351-1368, 2021.
- [15] ANSYS Inc.: Ansys fluent theory guide, 2009.
- [16] Hincz Krisztián–Gamboa-Marrufo Mauricio: *Egyárbocos ponyvaszerkezet statikai vizsgálata szélteher esetén*. 2012, Akadémia Kiadó.

- [17] Kollár Lajos: *Hidak és Magasházak belebegési problémái*.
- [18] Kollár Lajos: *A szél dinamikus hatása magas építményekre*. 1979, Műszaki könyvkiadó.
- [19] Marin Lauber: Computational fluid-structure interaction of membranes and shells with application to bat flight, 2023.
- [20] Changjiang Liu – Xiaowei Deng – Zhoulian Zheng: Nonlinear wind-induced aerodynamic stability of orthotropic saddle membrane structures. *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics* 164 (2017) 119-127, 2017.
- [21] Hunyadi Mátyás: A belebegés hatása hidak merevítőtartójának elmozdulásaira turbulens szélben, 2012.
- [22] Zhenyu Qiu – Wujun Chen – Chengjun Gao – Yu Hu: Experimental and numerical study on nonlinear mechanical properties of laminated woven fabrics. *Construction and Building Materials* 164 (2018) 672–681, 2018.
- [23] Németh Róbert: Szerkezetek dinamikája - előadásjegyzet, 2023.
- [24] Jörg Uhlemann – Natalie Stranghöner – Klaus Saxe: Stiffness parameters for architectural fabrics: An analysis of two determination procedures. *Structural Engineering International* 25:1, 9-19, DOI: 10.2749/101686614X14043795570291, 2018.
- [25] Frank M. White: *Fluid Mechanics Fifth edition*. 2008, McFraw-Hill.
- [26] Yue WU – Zhao qing Chen – Xiao ying SUN: Research on the wind-induced aeroelastic response of closed-type saddle-shaped tensioned membrane models. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A* 2015 16(8):656-668, 2015.
- [27] O.C. Zienkiewicz – R.L. Taylor: *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics Sixth edition*. 2005, Elsevier Ltd.
- [28] O.C. Zienkiewicz – R.L. Taylor: *The Finite Element Method The Basis Fundamentals Sixth edition*. 2005, Elsevier Ltd.

Ábrák jegyzéke

1.1. Tipi sátor	1
1.2. Frei Otto által tervezett ponyvaszerkezet, Tanzbrunnen (1957)	2
1.3. Táncolás jelensége	4
1.4. Tacoma-hídon látható belebegés	4
1.5. Belebegés jelensége	5
2.1. Példa az EN 13782 szabvány egyik közelítő (aerodinamikai) tényező meg- adására, 22° vagy 45° dőlésnél alkalmazható	7
2.2. A vizsgált szerkezet alakja, felül zárt elrendezés, alul nyitott	9
2.3. Alaki tényezőkről előállított adatbázis	9
2.4. Örvényleválás	10
2.5. Áramkép	11
4.1. A szerkezet jellemző méreteit bemutató nézetek	13
4.2. A szélcsatorna geometriai méreteit bemutató alaprajzi és hosszirányú nézetek	15
4.3. Vizsgált szélirányok	15
4.4. Az inflációs eljárás által létrehozott hálózás sematikus ábrázolása	16
4.5. Szélcsatorna hálózásának mintája	16
4.6. Átlagos C_p -tényező eloszlás a felület tetején (felső ábra) és az alján (alsó ábra), a szél támadási irányától függően (balról jobbra haladva 0° , 45° , 90°), a referencia szakirodalom szerint.	19
4.7. Átlagos C_p -tényező eloszlás a felület tetején (felső ábra) és az alján (alsó ábra), a szél támadási irányától függően (balról jobbra haladva 0° , 45° , 90°), az általunk kapott modellezés szerint.	20
4.8. Szélsebesség változása, az első képen a szél irányából nézve, a másodikon pedig erre merőlegesen (a szélirány: balról jobbra), 0° és 80 m/s -os vizsgálat	21
4.9. Szél útvonalai, 0° és 80 m/s -os vizsgálat	21
4.10. Szél örvénylő útvonala, a ponyvaszerkezet sarkánál (körrel jelölve az első ábrán), 45° és 40 m/s -os vizsgálat	22
4.11. Szél útvonala, 90° és 40 m/s -os vizsgálat	22
5.1. Felületi háló sematikus ábrája	24
5.2. 8 csomópontú Shell281-es végelem általános geometriája, ANSYS	25
5.3. A 8 csomópontos négyzet elemek ferdesége	25
5.4. Az új szélcsatorna geometriai méreteit bemutató alaprajzi és hosszirányú nézetek	26
5.5. Vizsgált szélirány	27
5.6. Szélcsatorna hálózási mintája, szélirány balról jobbra	28
5.7. Az áramlási tér hálózásának ferdesége	28
5.8. Az áramlási tér hálózásának ortogonalitása	29
5.9. Analízis munkafolyamata	30
5.10. Függőleges, "Z" irányú, gyorsulás a szerkezeten	32

5.11. Szélsébség a ponyvaszerkezet körül, a szél irányával (balról jobbra) párhuzamosan nézve, a szerkezet szimmetria tengelyében, $T = 1,5$ s, [m/s] . . .	33
5.12. Felületi nyomás a ponyvaszerkezeten, $T = 1,5$ s, [Pa]	34