

Adatlap¹ témahirdetési javaslatához a Csonka Pál Doktori Iskola Tanácsa részére

Témavezető² neve: Hegyi Dezső
e-mail címe³: hegyi.dezso@epk.bme.hu

Téma címe (magyar és angol nyelven):
Ponyvaszerkezetek belebegés vizsgálata
Fluttering of textile membranes

A **téma** rövid leírása⁴ (magyar és angol nyelven):

A ponyvaszerkezetek olyan könnyű konstrukciók, melyek érzékenyek lehetnek a szélből származó dinamikus hatásokra. A szerkezet körül áramló levegő a peremekről leválva periodikusan változó örvényléseket (un. Kármán-féle örvényeket) hozhat létre. Szerencsétlen esetben ennek a frekvenciája közel esik a szerkezet valamelyik sajátfrekvenciájához, és rezonancia alakul ki, mely károsítja vagy tönkre teszi a szerkezetet. Ez a veszély lapos és fellazult felületek esetén áll elő leginkább.

Számos mérnöki szerkezettípus esetén dolgoztak ki eljárásokat arra, hogy a szél örvényleválása okozta dinamikus hatásokat vizsgálják. A ponyvaszerkezetek területe azonban még feldolgozatlan, egy-két speciális és egyszerű geometriára közöltek eddig megoldást. Ennek oka, hogy a ponyvaszerkezetek rendszerint bonyolult térbeli alakot vesznek fel, ami nehézséget jelent a szél hatásának és a szerkezet merevségének vizsgálata szempontjából is. Azonban az utóbbi időszakban kifejlesztett numerikus eljárások hatékony eszközöket biztosítanak arra, hogy hatékonyan lehessen vizsgálni ezeket a jelenségeket.

A tervezett kutatás célja az, hogy tipikus összetett geometriájú szerkezetekre, mint amilyenek a nyereg felületek, árbcos forgáshiperboloid felületek és ezek kombinációi megvizsgálja a szél dinamikus hatását. A vizsgálat eredményei alapján olyan módszert szeretnénk kidolgozni, mely más szerkezetekhez hasonlóan a szerkezet merevségi és dinamikai tulajdonságai, valamint az alakja alapján adna meg kritikus szélesebességet, mely belebegést okozhat a szerkezetben. Ily módon a komplex numerikus vizsgálat helyett a mérnöki gyakorlatban elterjedt eszközökkel lehetne vizsgálni a belebegés veszélyét a

¹ Az adatlapot egy példányban *kinyomtatva és aláírva* a Szilárdságtani Tanszék titkárságára, *elektronikus változatban* pedig a Doktori Iskola titkárának (Fehér Krisztina, feher.krisztina@eptort.bme.hu) kell eljuttatni. A témahirdetés elfogadása esetén az adatlap felkerül a Csonka Pál Doktori Iskola (<http://cspdi.bme.hu/felveteli/temahirdetesek>), a témahirdetés rövid leírása pedig az Országos Doktori Tanács (<http://www.doktori.hu/>) honlapjára.

² A témahirdetés elfogadása automatikusan a témavezető akkreditációját is jelenti az azévi felvételi eljáráshoz.

³ Kérjük, olyan elérhetőséget adjon meg, ahová biztonsággal küldhetünk hivatalos értesítéseket.

⁴ A téma rövid leírása (szóközökkel) 1000-3000 leütés hosszú. A jelentkező hallgatókat bővebben tájékoztató változatot, (mely a téma fent megadott releváns nemzetközi irodalmára tételesen hivatkozik) kérjük a mellékletben megadni.

ponyvaszerkezetek esetén is. Mindez segítséget nyújthat új szerkezetek tervezése és meglévő szerkezetek felülvizsgálatához is.

The textile membranes are light weight structures, which could be sensitive for the dynamic effect of the wind. Karman vortexes can form at the edges of the surfaces easily. If the frequency of these vortexes is close to the eigen frequencies of structure, interference can be developed, and the structure can be damaged. The almost flat and slack surfaces are sensitive for this effect.

There are methods to analyze the effect of the Karman vortexes for several kind of structures. The field of the textile membranes is still not ready, only a few simple solutions can be found for some simplified configurations. The textile membranes are complex in geometry, so the study of the effect of the wind and the stiffness is complex too. On the last decades effective tools have been developed to analyze such problems.

The target of the research is to analyze the dynamic effect of the wind on complex but typical textile membranes, like saddle surfaces, hyperboloids of revolution with mast, and combinations of these. Then the results should be used to investigate methods, like methods used to analyze other type of structures: a critical wind speed can be determined by the stiffness and dynamic properties and the shape of the structure. In this way rather simple engineering tools could be used to analyze structures. Finally, this method can help to verify the safety of new or existing structures.

A **téma** meghatározó irodalma⁵:

- Kollár Lajos: *A szél dinamikus hatása magas építményekre*. 1979, Műszaki könyvkiadó.

- Kollár, Lajos: Hidak és magasházak belebegési problémái. *ÉPÍTÉS-ÉPÍTÉSZETTUDOMÁNY*, 9 (2-3). pp. 121-153. 1977.

- 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.

- 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.

- 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.

- M. Glück – M. Breuer – F. Durst – A. Halfmann – E. Rank: Computation of fluidstructure interaction on lightweight structures. *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics* 89 (2001) 1351-1368, 2021.

- Hincz Krisztián – Gamboa-Marrufo Mauricio: *Egyárbocos ponyvaszerkezet statikai vizsgálata szélteher esetén*. 2012, Akadémia Kiadó.

- Marin Lauber: Computational fluid-structure interaction of membranes and shells with application to bat flight, 2023.

⁵ Minimum 5, maximum 10 cikket vagy monográfiát kérünk felsorolni, amik között feltétlenül szerepelnie kell a legfrissebb, legismertebb eredményeknek.

- 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.
- 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.

A **téma** hazai és nemzetközi folyóiratai⁶:

- Computers and Structures (WOS)
- Structures (WOS)
- Engineering Structures (WOS)
- Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics (WOS)
- Journal of Fluids and Structures (WOS)
- Engineering Failure Analysis (WOS)
- Építés- Építészettudomány (Scopus)

A **témavezető** fenti folyóiratokban megjelent 5 közleménye:

- Hegyi D., Armuth M., Halmos B., Marotzy K.: *The effect of wind on historical timber towers analyzed by plastic limit analysis in the focus of a collapse*. Engineering Failure Analysis, 134 Paper: 105852, 19 p. 2022.
- Szabó S., Kövesdi A., Vasáros Zs., Csicsely Á., Hegyi D.: *The cause of damage and failure of the mud-brick of the Khan in New-Gourna*. Engineering Failure Analysis, 128 paper 105567 pp 21, 2021.
- Hegyi D.: *Numerical stability analysis of arch-supported membrane roofs*. Structures, (28) pp. 785-795., 2021.
- Hegyi, D. - Sajtos, I.-Geiszter, Gy. - Hincz, K.: *8-node Quadrilateral Double-Curved Surface Element for Membrane Analysis*. Computers and Structures 84. pp 2151-2158. 2006.
- Hegyi D. - Sajtos I.: *Új rugalmas anyagtvörvény műszaki textíliákhoz*. Építés- Építészettudomány XXXVII-2009/1-2. pp. 95-106.

A **témavezető** utóbbi tíz évben megjelent 5 legfontosabb publikációja:

- Hegyi D., Armuth M., Halmos B., Marotzy K.: *The effect of wind on historical timber towers analyzed by plastic limit analysis in the focus of a collapse*. ENGINEERING FAILURE ANALYSIS 134 Paper: 105852, 19 p. 2022.
- Szabó S., Kövesdi A., Vasáros Zs., Csicsely Á., Hegyi D.: *The cause of damage and failure of the mud-brick of the Khan in New-Gourna*. Engineering Failure Analysis, 128 paper 105567 pp 21, 2021.
- Hegyi D.: *Numerical stability analysis of arch-supported membrane roofs*. Structures, (28) pp. 785-795., 2021.
- Karadi D., Sipos AÁ., Halász M., Hliva V., Hegyi D.: *An elastic phenomenological material law of technical textile with a nonlinear shear behaviour*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 40:19-20 pp. 759-769., 2021.
- Hegyi, D. - Pellegrino, S.: *Viscoplastic tearing of polyethilen thin film*. Mechanics of Time-Dependent Materials, 19. 187-208. 2015

⁶ Minimum 5, maximum 10 folyóirat megadását kérjük, melyek között feltétlenül szerepelnie kell a PhD fokozatszerzés szempontjából elengedhetetlen (Web of Science, Scopus és/vagy Sci illetve Iconda) minősítésű idegen nyelvű folyóiratoknak is. Kérjük, ezeket a periodikákat a felsorolásban jelöljék meg.

A **témavezető** eddigi doktoranduszai⁷:
(név/felvétel éve/abszolutórium megszerzésének éve/PhD fokozat éve)
- Karádi Dániel Tamás, felvétel: 2019, abszolutórium: 2021

Melléklet: a téma bővebb leírása (magyar és angol⁸ nyelven)

Budapest, 2025. január 29.



Témavezető aláírása

⁷ Kérjük, a témavezetési tevékenységre vonatkozó adatokat abban az esetben is adja meg, ha témavezetőként a DI már korábban akkreditálta.

⁸ A téma bővebb leírása angol nyelven csak akkor szükséges, ha a témavezető vállalja külföldi hallgató fogadását.

Részletes kutatási terv

Ponyvaszerkezetek belebegés vizsgálata

Az épületek körül áramló levegő a peremeken örvények formájában válik le. Keskeny vagy vékony szerkezetek esetén az örvények gyakran periodikusan válnak le, ami veszélyes lehet a szerkezetekre, ha a periodikus hatás frekvenciája közel esik a szerkezet saját frekvenciájához. Ekkor rezonancia alakul ki, mely nagy alakváltozásokat és feszültségeket okozhat és tönkre teheti a szerkezetet.

A ponyvaszerkezetek peremei mentén könnyen kialakulhatnak örvényleválások. A ponyvák viszonylag lágy szerkezetek kis önsúllyal, így a sajátfrekvenciájuk alacsony és kis erő hatására is nagy elmozdulásokat szenvednek. Mindezek okán érzékenyek a belebegésre. Kétféle belebegés alakul ki rendszerint: a peremek mentén kis felület lebeg nagy frekvenciával, vagy a teljes szerkezet alacsony frekvenciával „ring”. Utóbbi kevésbé veszélyes, a tapasztalatok szerint a peremek gyors mozgása szokott lokális károsodáshoz vezetni. A lassú, ringó lengés a lágyabb szerkezetekre jellemző, a peremek lebegése a fellazult vagy szerelés alatt álló szerkezetekre.

A gyakran alkalmazott vagy más szempontból jelentős épületekre már évtizedekkel ezelőtt kidolgoztak közelítő és pontosabb eljárásokat, melyek a szerkezet merevségi és dinamikai tulajdonságai, valamint az alakja alapján határoznak meg egy kritikus szélsébséget, mely rezonanciát okozhat. Tornokok, toronyházak, hidak, azaz karcsú szerkezetek álltak korábban a kutatások középpontjában, mert ezek a leginkább érzékeny rendszerek. De kábelekre is kidolgoztak eljárásokat, valamint a zászlók belebegésének vizsgálatára is vannak megoldások. A ponyvaszerkezetek vizsgálata azonban még kezdetleges fázisban van.

A ponyvaszerkezetek alakja összetett és a dinamikai viselkedésük leírása is bonyolult. A kis merevségük és súlyuk miatt pedig nagy alakváltozásokat szenvednek már kisebb szélökések hatására is. Az elmúlt évtizedekben létrehoztak olyan numerikus eljárásokat és szoftvereket, melyek egy-egy elemét tudják kezelni a fenti nehézségeknek, de ezek együttes kezelése még ma is nagy kihívást jelent. A szerkezet vizsgálatra ma a legelterjedtebb eljárás a végeselem módszer (FEM) alkalmazása, a szél áramlásának vizsgálatára pedig a CFD (Computational Fluid Dynamics) alkalmazása. Vannak szoftverek, melyekbe mindkét eljárás be van építve (pl. az Ansys), de ezek párhuzamos kezelése nehézségekbe ütközik. A probléma nehézségét az adja, hogy az áramló közeg modellezéséhez használt CFD eljárás Euler-féle leírás módot használ, ahol a hálózat elrendezése kötött, és azon belül a közeg mozgását vizsgáljuk. Ezzel szemben a FEM eljárások Lagrange-féle leírást használnak, ahol a hálózat az anyaghoz kötött, és azzal együtt mozog. A kétféle eljárás összekapcsolása így számos modellezési nehézséget rejt magában.

Laza Álmos építőmérnök MSc hallgató *Membránszerkezetek széldinamikai vizsgálata* címmel készített TDK dolgozatot 2024 évben (témavezetők: Hegyi Dezső (Szil. és Tartó. Tsz.), Vigh Gergely László (Hidak és Szerk. Tsz.) és Horváth Dávid (Áramlástan Tsz.)), mely dolgozatban sikeresen épített össze egy szerkezetet a körülötte áramló közeggel együtt, és sikerült szimulálnia a szél dinamikus hatását a ponyvaszerkezeten. A szimuláció verifikációja labor körülmények között előkészítés alatt van az Áramlástan Tanszék szélcsatornájában. Ezek az eredmények jelentik a kiindulási pontot a tervezett kutatáshoz.


A numerikus vizsgálatok egyik nehézsége a fentiekén túl, hogy nagy a számítási kapacitás igény. A debreceni szuperszámítógép segítségével lehetett egy néhány másodperces folyamatot

modellezni. Mivel a rezonancia jelensége adott szélsősebesség mellett alakul ki, a szimulációkkal meg kell találni ezt az értéket. A számítási mennyiség csökkenthető, ha a labor kísérletek és korábbi szimulációk alapján közelítő számításokat tudunk végezni a kritikus sebesség felvételére. Várhatóan a szerkezetek sajátfrekvenciája alapján meg lehet majd becsülni, hol érdemes keresni a belebegéshez tartozó szél áramlási sebességeket.

A ponyvaszerkezetek merevsége és sajátfrekvenciája nehézkesen számítható a fejlett végelelemes eljárásokkal is, mert ezeket a szoftvereket nem a megfeszített kis merevségű membránok vizsgálatára optimalizálták. A korábbi fejlesztéseinek eredményeként a Szilárdságtani Tanszéken rendelkezésünkre áll egy olyan membrán számító eljárás, mely alkalmas a megfeszített ponyvaszerkezetek merevségének és sajátfrekvenciájának számítására is különböző megtámasztások (merev és kábel peremek, árbocok, ívek) mellett. Ezzel az eljárással hatékonyan lehet vizsgálni a szerkezet dinamikai tulajdonságait.

A fentiek tükrében a tervezett kutatás célja megismerni és megérteni a ponyvaszerkezetek belebegését szélteher hatására. A jellegzetes szerkezeti alakokhoz és elrendezéséhez szeretnénk felvenni az ún. Strouhal-számot, melynek segítségével általában számolni szokták a szerkezethez tartozó kritikus szélsősebességet a szerkezet merevségi és dinamikai tulajdonságai segítségével. Mindez segítséget nyújthat arra, hogy a tervező mérnökök hatékonyan tudják vizsgálni a ponyvaszerkezetek érzékenységét a szélteher dinamikus hatására.

Budapest, 2025. január 29.


Dr. Hegyi Dezső
egyetemi docens

Irodalom:

- Kollár Lajos: *A szél dinamikus hatása magas építményekre*. 1979, Műszaki könyvkiadó.
- Kollár, Lajos: Hidak és magasházak belebegési problémái. *ÉPÍTÉS-ÉPÍTÉSZETTUDOMÁNY*, 9 (2-3). pp. 121-153. 1977.
- 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.
- 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.
- 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.
- M. Glück – M. Breuer – F. Durst – A. Halfmann – E. Rank: Computation of fluidstructure interaction on lightweight structures. *Journal of Wind Engineering Industrial Aerodynamics* 89 (2001) 1351-1368, 2021.
- Hincz Krisztián – Gamboa-Marrufó Mauricio: *Egyárbocos ponyvaszerkezet statikai vizsgálata szélteher esetén*. 2012, Akadémia Kiadó.
- Marin Lauber: Computational fluid-structure interaction of membranes and shells with application to bat flight, 2023.
- 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.
- 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.