

A 75305 azonosító számú, „Feszített kötél- és ponyvaszerkezetek optimalizálása” tárgyú OTKA pályázat részletes zárójelentése

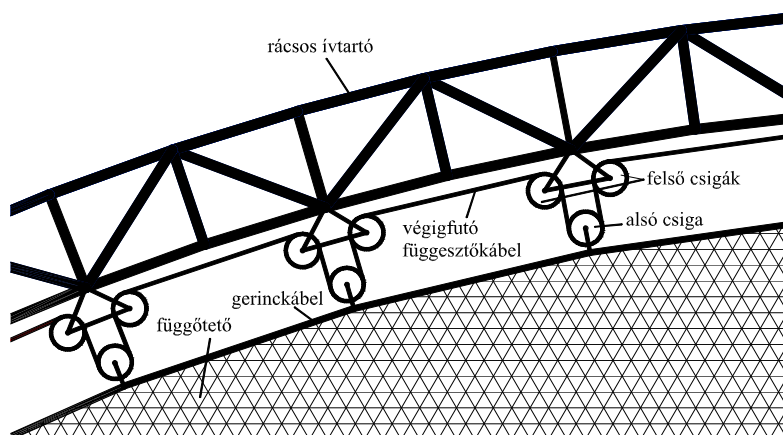
Vezető kutató: Dr. Hincz Krisztián

Az ívtartókra feszített kötél- és ponyvaszerkezetek esztétikus és gazdaságos megoldást kínálnak nagy területű létesítmények belső alátámasztás nélküli lefedésére (1. ábra). Jelen kutatás egy magyar szabadalommal, az ívekre csigasorokkal feszített függőtető statikai vizsgálatával foglalkozik. A csigasoros függesztőrendszer célja egyrészt a függőtető megfeszítésének egyszerűbbé, gyorsabbá tétele, másrészt az ívtartókban fellépő hajlítónyomatékok minimalizálása, ezáltal a szerkezet súlyának csökkentése és a statikailag lehetséges feszítáv növelése. Kolozsváry szabadalmának [1] lényege, hogy a függőtető speciális elrendezésű csigasorokkal kapcsolódik az ívtartókhoz és a csigasorok a függőtetőre ható terheket (közel) szimmetrikus elrendezésű, az ívek mentén (közel) állandó intenzitású ívterhekké konvertálják. Körív alakú tartók és sugárirányú függesztések esetén a közel állandó nagyságú ívterhek a hajlítónyomatékok jelentős csökkenését eredményezik a függőtető tartóívekhez rövid, független kábelekkel történő („hagyományos”) függesztéséhez képest.



1. ábra: Egy rácsos ívre hagyományos módon, rövid, független kábelekkel feszített ponyvaszerkezet (Bank of Amerika Pavilion, Boston, MA, USA)

A szabadalom alapelve az, hogy a függőtetőt ívenként egy-egy, csigákon végigfutó, hosszú kábellel rögzítik a tartóívekhez (2. ábra). Függesztési pontonként két-két csigát az ívhez, egy-egy csigát a függőtető gerinckábeléhez rögzítenek. Az alaphoz rögzített függesztőkábel végigfut egy felső, egy alsó és egy újabb felső csigán, majd hasonlóan a többi függesztési ponthoz tartozó 3-3 csigán végig az ívtartó teljes hossza mentén.



2. ábra: A csigasoros függesztőrendszer oldalnézetben

Ideális (súrlódásmentes) csigák és sugárirányú függesztések esetén a körív alakú tartók meteorológiai terhekből származó hajlítónyomatékait zérusra lehetne csökkenteni. A csigák súrlódása és az ívterhek sugáriránytól való, a függőtető elmozdulásaiból származó eltérése azonban jelentősen csökkentheti a csigasoros függesztés hatékonyságát. A gyakorlatban tehát az a kérdés, hogy mennyivel csökkenthetők a tartóívekben fellépő hajlítónyomatékok a hagyományos függesztéshez képest (amikor a gerinckábel felfüggesztési pontjai közvetlenül vagy rövid, egymástól független kábelekkel vannak a tartóív csomópontjaihoz rögzítve).

A kutatás megkezdésekor a kereskedelmi forgalomban kapható végeselemes szoftverek nem voltak alkalmasak csigasorosok modellezésére. Ezért a kutatás első lépésében kidolgoztam a csigasorokkal ívekre függesztett kötélhálók statikai analíziséhez szükséges numerikus eljárásokat. Először egy idealizált, súrlódásmentes csigákat feltételező közelítő eljárást [2], majd egy pontosabb, a csiga és a csap közötti súrlódást is figyelembe vevő eljárást dolgoztam ki [3]. (Tudtommal a mai napig nincs más olyan szoftver, ami alkalmas lenne csigasoros függesztésű kötélhálók statikai analízisére a csigák súrlódásának figyelembevételével.)

A rácsos ívtartókra csigasorokkal feszített kötélhálók numerikus analízise a következő lépésekben történik:

- a) A rácsos ívtartók és a kötélháló topológiájának meghatározása.
- b) Az ívtartók feszültségmentes alakjának felvétele és a kötélháló elméleti alakjának meghatározása. Az elméleti alak a kötélháló egy lehetséges egyensúlyi alakja, amely megfelel a kiindulási adatként megadott kötélterő-eloszlásnak (például konstans kötélterőknek).
- c) A kábelek feszültségmentes (leszabási) hosszának meghatározása.
- d) A szerelési alak és a hozzá tartozó kötél- és rúderők meghatározása. Szerelési alak alatt a megfeszített, de külső terhektől mentes szerkezet egyensúlyi alakját értjük. A szerelési alak meghatározása a kábelek leszabási hossza, az anyagjellemzők és a csigasorokon végigfutó függesztőkábelekben felvett feszítőerők alapján történik.
- e) A szerkezet elmozdulásainak és belső erőinek meghatározása külső terhek hatására.

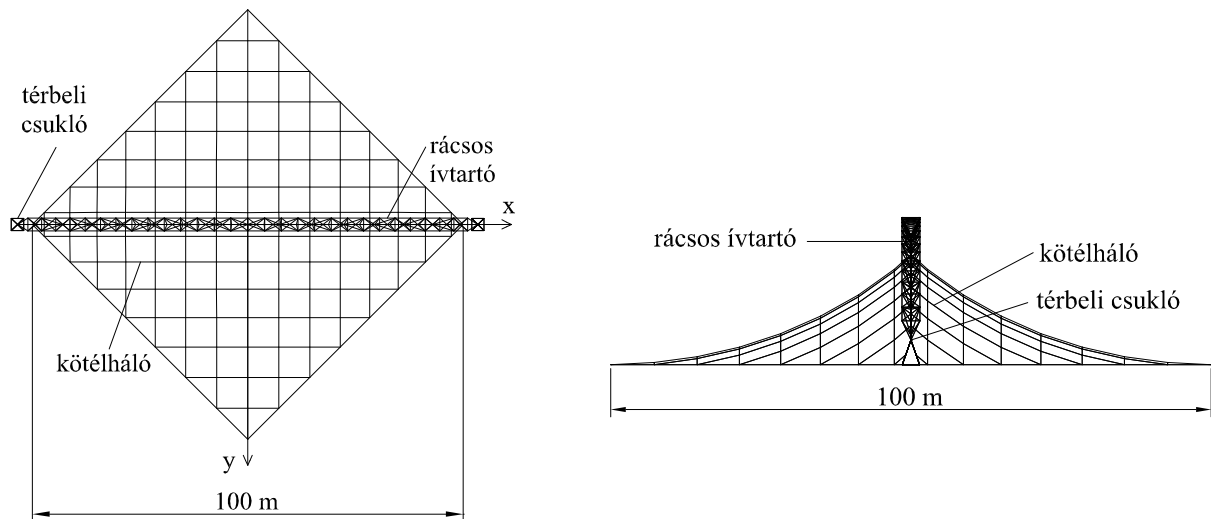
A statikai analízis *b*, *d* és *e* lépései során a dinamikus ellazítás (Dynamic Relaxation Method, DRM) [4], [5] nevű fokozatosan közelítő eljárást használom a szerkezetek egyensúlyi helyzeteinek meghatározásához. A csigasoros függesztésű szerkezetek számítása egy új elemtípus bevezetését tette szükségessé. A kidolgozott „csigasor elem” alapja tulajdonképpen egy új belső iteráció a dinamikus ellazítás minden iterációs lépésén belül a végigfutó függesztőkábel csigák mentén történő elmozdulásainak meghatározására. A csigák mozgását a függesztőkábel csigák közötti szakaszai feszültségmentes hosszainak változásával modellezem. Az eljárást részletesen bemutatom a [3] cikkben.

A kidolgozott eljárások segítségével különböző topológiájú és geometriájú, különböző fesztávú függőtetőket vizsgáltam (3., 4. és 5. ábrák). A vizsgált szerkezetek fő részei a következők:

- rácsos ív(ek), jellemzően három-, esetenként négyövéű rácsos íveket vizsgáltam,
- függesztőrendszer (hagyományos független kábeles vagy csigasoros),
- kötélháló,
- támaszok.

A kötélháló alulról domború hókábelekből, felülről domború szélkábelekből és gerinckábelekből áll. A kötélháló a gerinckábelek töréspontjaiban van felfüggesztve.

A statikai analízis során a kötélélemekben, rúdelemekben és a csigasorok sokcsomópontú kábeleiben fellépő erőket a dinamikus ellazítás segítségével határozom meg. A rácsos ívekben fellépő normálerőket, nyírőerőket és nyomatékokat a függesztési pontok között a rácsos tartó rúdjaiban működő erőkből számítom.

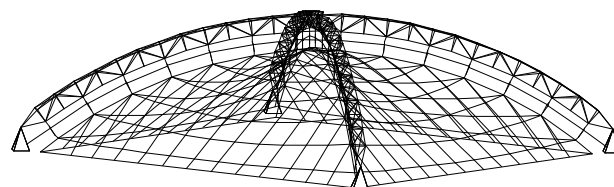
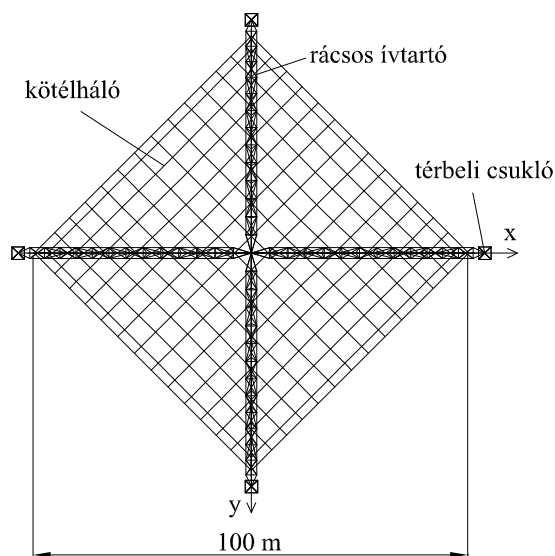


3. ábra: Egyetlen rácsos ívtartóra feszített, négyzet alapterületű függőtető (alaprész és oldalnézet)

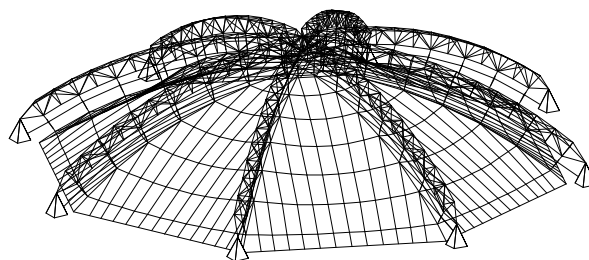
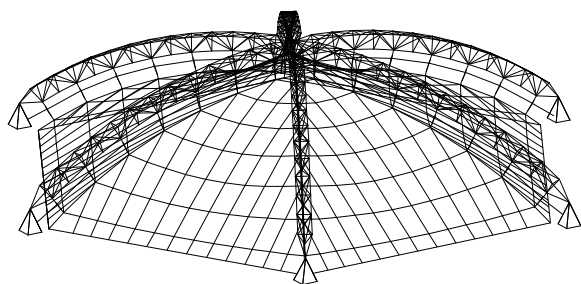
A numerikus vizsgálatok során először egyetlen rácsos ívtartóra feszített szerkezeteket vizsgáltam [6]. 25 m, 50 m és 100 m fesztávú rácsos ívtartó és négyzet alaprajzú kötélháló esetén vizsgáltam az ívekre ható függesztőerőket, a rudakban fellépő erőket és az ívben a rúderökből számított igénybevételeket. Négyféle hőteher és kétféle szélteher mellett vizsgáltam a csigasoros függesztőrendszer működését. A szerkezetben működő erőket meghatároztam különböző súrlódási tényezők mellett és rögzített csigákkal is. Ez utóbbi modell a független kábeles függesztésnek felel meg. Az eredmények azt mutatták, hogy a csigasoros függesztés alkalmazása hőteher esetén növeli, szélteher esetén csökkenti a tartóívben fellépő normálerőket a független kábeles függesztéshez képest. Az ívtartóban fellépő nyíróerőt és az ívtartó síkjában fellépő hajlítónyomatékot minden esetben csökkenti a csigasoros függesztés alkalmazása. Az ívtartó síkjára merőleges hajlítónyomaték és a csavarónyomaték maximuma minden vizsgált teher esetén lényegesen kisebb volt, mint az ívtartó síkjában fellépő hajlítónyomaték maximuma. A vizsgált szerkezeteknél az ívtartóban fellépő normál- és nyíróerő a fesztáv második, a hajlítónyomaték a fesztáv harmadik hatványával volt arányos. A súrlódás függvényében felrajzolt normálerő, nyíróerő és hajlítónyomaték függvények jellege és alakja a függőtető méretétől gyakorlatilag független volt. A legnagyobb normálerő a függőtetőn egyenletesen alkalmazott hőteher, a legnagyobb hajlítónyomaték a féloldalas (a tartóívre merőleges szimmetriasík egyik oldalán konstans, a másik oldalán zérus nagyságú) hőteher esetén jelentkezett. Féloldalas hőteher és hagyományos függesztés esetén olyan nagy hajlítónyomatékok léptek fel, hogy a rácsos ívtartó alsó övében húzóerők is megjelentek. A csigasoros függesztés esetén lényegesen egyenletesebb az övekben működő erők eloszlása, az övekben kapott maximális nyomóerő a súrlódási tényező függvényében 20 - 30 %-kal volt kisebb, mint hagyományos függesztés esetén.

A következő lépésben az ívtartók számának hatását vizsgáltam a szerkezet viselkedésére [7]. 1, 2, 3 és 4 tartóívre feszített függőtetőket vizsgáltam. A függőtető által lefedett terület mind a négy esetben szabályos sokszög alakú volt, melynek (leghosszabb) átlója 100 m volt. Az összehasonlíthatóság érdekében a négy szerkezet különböző elemeinek keresztmetszetét úgy határoztam meg, hogy azok négyzetméterre eső súlya szerkezetenként azonos legyen. A súrlódási tényező függvényében vizsgáltam az ívterhek, a tartóívekben fellépő normálerők, nyíróerők és hajlítónyomatékok, az övrudakban fellépő erők és a függőtető elmozdulásainak alakulását. A legfontosabb tapasztalat az volt, hogy a csigasoros függesztés hatékonysága (a hajlítónyomatékok csökkentése a hagyományos függesztéshez képest) nagymértékben függ a csigáknál fellépő csapsúrlódástól és gyakorlatilag független tartóívek számától. Például $\mu=0,005$ nagyságú súrlódási tényező esetén a tartóívek síkjában fellépő hajlítónyomaték több mint 80%-kal, az övekben fellépő nyomóerő több mint 30%-kal volt alacsonyabb csigasoros függesztés alkalmazásával. Ugyanakkor a szerkezet elmozdulásainak vizsgálata azt mutatta, hogy a tartóívek száma jelentősen befolyásolja

a szerkezet elmozdulásait. A maximális elmozdulás minden szerkezetnél a féoldalal hőteherből származott. Hagyományos függesztés esetén a vizsgált szerkezetek közül a legkisebb maximális elmozdulás a 4 ívtartóra feszített szerkezet esetén jelentkezett. Ennek oka, hogy ennél a szerkezetnél a legrövidebbek a hókábelek. Csigasoros függesztés esetén az alsó csigák elmozdulásának hatása annál nagyobb, minél kisebb a súrlódási tényező. A csigák elmozdulása viszont nagymértékben függ a kötélnél sugárirányú merevségétől a gerinckábel felfüggesztési pontjaiban. Minél több ívtartóra van feszítve a kötélnél, annál simább a felület a gerinckábeleknél (annál kevésbé szignifikáns a gerinc) és annál kisebb a kötélnél sugárirányú merevsége. Ez azt eredményezte, hogy csigasoros függesztés és viszonylag kis súrlódási tényező ($\mu < 0,02$) esetén a 4 ívtartóra feszített kötélnél esetén jelentkeztek a legnagyobb elmozdulások.



4. ábra: Két rácsos ívtartóra feszített, négyzet alapterületű függőtető



5. ábra: Három és négy rácsos ívtartóra feszített függőtető

A kutatás következő lépésében az ívtartók görbületének hatását vizsgáltam a szerkezetek erőjátékára és elmozdulásaira. Az 1 és 2 ívtartóra feszített szerkezetek vizsgálatának fontosabb eredményeit [8], a 3 és 4 ívtartóra feszített kötélnél vizsgálatának tapasztalatait [9] tartalmazza. A vizsgálat során az ívtartók középvonalának a vízszintes síkkal a támaszoknál bezárt α szögét 30° és 50° között 5° -os lépésekben változtattam, ami természetesen befolyásolja a szerkezet belmagasságát is. Az eredmények azt mutatták, hogy a nagyobb α szög és a hozzá tartozó nagyobb görbület esetén a függesztőerők maximuma jellemzően nagyobb, az ívben fellépő normálerők maximuma pedig mindig kisebb volt. Az ívtartóban fellépő hajlítónyomatékok alakulása a görbület függvényében teher típusonként és szerkezetenként változó volt. Az adott szerkezet övrúdjaik hosszát megszorozva az övrúdokban fellépő maximális rúderővel és az így kapott szorzatot α függvényében ábrázolva meghatározható egy optimális α szög és hozzá tartozó görbület. Az α szög optimális értéke az ívtartók számának növelésével csökken, 1 ívtartó esetén az optimum 45° közelében, 4

ívtartó esetén 35° közelében volt. A maximális csomóponti elmozdulások csigásoros függesztés esetén α szög növelésével nőttek.

Az elvégzett numerikus vizsgálatok két legfontosabb tapasztalata az volt, hogy a kidolgozott numerikus eljárások mindig stabil konvergenciát mutattak, másrészt a csigásoros függesztés kis súrlódási tényező esetén minden esetben jelentősen kisebb hajlítónyomatékokat eredményezett az ívtartókban, mint a hagyományos függesztés. A kidolgozott eljárások segítségével más, csigákat tartalmazó szerkezetek pl. daruk statikai vizsgálata is elvégezhető, illetve olyan feszített kötél- vagy ponyvaszerkezetek építési fázisai is vizsgálhatók, ahol a csigák csak az építés során vannak jelen és nem részei az elkészült szerkezetnek.

A kutatás során két olyan, az OTKA pályázat tárgyához kapcsolódó témával is foglalkoztam, ami nem volt előre tervezhető, ezért nem szerepelt a kutatási tervben. Az egyik kutatás témája egy egyetlen ívtartóra feszített, négyzet alapterületű függőtető (3. ábra) szélterheinek vizsgálata volt. A különböző építési szabványok jellemzően nem adják meg a hiperbolikus felületek nyomástényezőit. Magyarországon az elmúlt évtizedekben gyakran az MSZ 15021/1-86 számú szabvány által zárt és részben nyitott építmények külső sík felületeire előírt függvényt alkalmaztuk oly módon, hogy a felület pontjaiban meghatároztuk a felületi normális és a szélirány által bezárt szöget és annak függvényében számítottuk ki az adott pontbeli alakí tényezőt. Az ilyen módon tetszőlegesen sok pontban meghatározható fiktív alakí tényezők durva közelítést jelentenek. Az EN 13782 számú szabvány talán az első, ami hiperbolikus felületekkel is foglalkozik. Két nagyon egyszerű teheresetet ír elő hiperbolikus felületekre, az első esetben konstans $-0,7$ nagyságú nyomástényezővel, a második esetben konstans $0,3$ nagyságú nyomástényezővel az egész felületen. (A körsátrakkal külön foglalkozik a szabvány.) A kutatás során lehetőség adódott a mexikói Yucatán Autonóm Egyetem szélcsatorna laboratóriumában meghatározni egy ívtartóra feszített függőtető 3 különböző szélirányhoz tartozó nyomástényezőit. A kutatást Mauricio Gamboa-Marrufoval közösen végeztük. [10] cikkben bemutattuk magát a szélcsatorna-kísérletet és a felületen kapott nyomástényezőket. A mért nyomástényezők alapján meghatároztuk a kötélnálban fellépő kötélerőket, majd ezeket összehasonlítottunk a szabványok közelítő nyomástényezői alapján számított kötélerőkkel [11]. Az eredmények azt mutatták, hogy a szabványok alapján felvett nyomástényező-mezők lényegesen eltérnek a mért nyomástényező-mezőktől, ugyanakkor a kötélnál szél és hókábeleiben fellépő erők maximumait (a vizsgált szerkezet esetén) nagyon jól közelítették a két különböző szabvány alapján számított kötélerők maximumai. A szélkábeleknél az egyik, a hókábeleknél a másik szabvány alapján számított értékek adtak jobb közelítést. A kutatás eredményei alapján azt a javaslatot tehetjük, hogy feszített kötélnál vagy ponyvaszerkezet tervezése esetén, ha nincs mód szélcsatorna-kísérletek alapján meghatározni a nyomástényezőket, akkor mindkét szabvány alapján határozzuk meg a nyomástényezőket és az ezek alapján számított kötélnál- vagy metszeterők maximumait vegyük figyelembe. (Hasonló vizsgálatokat végeztünk egy árboccal alátámasztott szerkezet esetén is [12], ott azonban nagyobb volt a különbség a mért és a szabványok alapján számított nyomástényezőkből kapott metszeterők maximumai között.)

A másik előre nem tervezett, de az OTKA kutatás tárgyához kapcsolódó kutatási irány a csigásoros függesztésű, ívtartós gyaloghidak numerikus vizsgálata. Az Olivier Baverellel (Ecole des Ponts Paristech) közösen végzett kutatás keretein belül vizsgáltuk a csigásoros függesztésű gyaloghidak alkalmazásának lehetőségét és hatékonyságát különböző elrendezésű függesztőrendszerek esetén. Az ívtartókban fellépő hajlítónyomaték csigásoros függesztés és $\mu=0,005$ nagyságú súrlódási tényező esetén $85\%-93\%$ -kal volt kisebb, mint független függesztőkábelek esetén. Ugyanakkor viszont az elmozdulások lényegesen nagyobbak voltak csigásoros függesztés esetén. A kutatás első eredményeit [13]-ban mutattuk be. (A jelenleg is folyó kutatás célja az ívtartó és a hídpálya optimális alakjának és a függesztőrendszer optimális elrendezésének a meghatározása az elmozdulások csökkentése érdekében.)

Végül megemlítek egy olyan kutatási irányt, ami a kötélnálók révén kapcsolódik az OTKA kutatás tárgyához. Két BSc hallgatóval, Juhász Mártonnal és Paksa Péterrel vizsgáltunk azonos alaprajzú,

de eltérő megtámasztású kötélhálókat. Vizsgáltuk a peremek alakjának és a kábelek feszültségmentes (leszabási) hosszának meghatározása során alkalmazott zsugorítás mértékének hatását a kábelerőkre és a kötélháló elmozdulásaira [14].

Irodalomjegyzék

- [1] **Kolozsváry Á.**, Roof Arches Without Bending Moments, *Patent*, WO/2006/136867, 2006.
- [2] **Hincz K.**, Arch-supported tensile structures with very long clear spans, *Journal of the International Association of Shell and Spatial Structures*, 48, 89-98., 2007.
- [3] **Hincz K.**, Nonlinear analysis of cable net structures suspended from arches with block and tackle suspension system, taking into account the friction of the pulleys, *International Journal of Space Structures*, 24 (3), 143-152., 2009.
- [4] **Barnes, M. R.**, Form-finding and analysis of prestressed nets and membranes, *Computers and Structures*, 30, 685-695., 1988.
- [5] **Day, A. S.**, An introduction to dynamic relaxation, *The Engineer*, 218-221., 1965.
- [6] **Hincz K.**, Parametric analysis of cable net roofs suspended from arches with block and tackle suspension system, *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*, Valencia, 2105-2115, 2009.
- [7] **Hincz K.**, Geometry and stiffness in the case of arch supported tensile roofs with block and tackle suspension system, *Proceedings of the International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures*, Barcelona, 273, 12 oldal, 2011.
- [8] **Hincz K.**, Numerical Analysis of Structures with Block and Tackle Suspension, *Proceedings of the IASS-APCS Symposium: From Spatial Structures to Space Structures*, Seoul, 197, 7 oldal, 2012.
- [9] **Hincz K.**, Optimization of Arch Supported Tensile Roofs, *Proceedings of the Eleventh International Conference on Computational Structures Technology*, Dubrovnik, 241, 14 oldal, 2012.
- [10] **Gamboa-Marrufo M., Hincz K., Tun Cruz V.**, Medición de presiones aerodinámicas en una estructura de membrana., *Ingenieria-Revista Academica de la Facultad de Ingenieria* 15:(3), 167-175, 2011.
- [11] **Hincz K., Gamboa-Marrufo M.**, Wind analysis of an arch supported tensile roof, *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures Symposium*, Shanghai, 13 oldal, 2010.
- [12] **Hincz K., Gamboa-Marrufo M.**, Egyárbocos ponyvaszerkezet statikai vizsgálata szélteher esetén, *Építés-Építészettudomány*, 40 (1-2), 67-77, 2012.
- [13] **Hincz K., Baverel O.**, Investigation of an arched footbridge funicular against any loads, *Proceedings of the IABSE-IASS Symposium*, London, 8 oldal, 2011.
- [14] **Juhász M., Paksa P., Hincz K.**, Kötélháló paraméteres vizsgálata, *Építés-Építészettudomány*, 37 (1-2), 79-93, 2009.