

ÖSSZECSUKHATÓ-KINYITHATÓ RÚDSZERKEZETEK MÉRNÖKI ALKALMAZÁSA

Friedman Noémi - Farkas György***

RÖVID KIVONAT

A XXI. század megújuló építészeti koncepciórendszerében egyre nagyobb hangsúlyt kap az anyagfelhasználás, a gyártási, szállítási és kivitelezési energiafelhasználás és az építészeti környezeti károk korlátozása. Ennek megfelelően a szerkezetépítésben az újítások a növekvő kapacitású számítógépeknek köszönhetően elterjedő numerikus módszerek alkalmazásával folyamatosan fejlődő építőanyag-gyártási és kivitelezési technológiákkal karöltve haladnak az egyre filigránabb szerkezetek minimális energiafelhasználású megvalósítása felé. Ennek az új fejlődési iránynak köszönhetően immár a mérnöki alkalmazásban is tért hódítanak az amúgy csak úrkutatásban elterjedt összehajtogatható szerkezetek.

A feszítéssel stabilizálható hajtogatható rúdszerkezetek mindegyikének alapja az ollós csomópontú rúdpár, amelynek különböző geometriájú összefűzésével számos összecukható alakzatot kaphatunk. A tanulmány a hajtogatható szerkezetek alapegységeiből kiindulva mutat példát ezekre az alakzatokra, valamint ezeknek a mérnöki életben felhasználható alkalmazási lehetőségeire (pl. kihajtható oszlopok, összecukható hidak.. stb.). A cikk külön hangsúlyt fektet a kinyitható kupolatetők szerkezeti megoldásaira és ezek lefedési lehetőségeire.

I. BEVEZETÉS

A természetben alaposabban körültekintve sokféle összehajtogatható illetve összezáruló szerkezettel találkozhatunk [1]. Ilyenek pl. a falevelek, egyes rovarok szárnya, a kitáguló vírusköpenyek, de ma már több emberalkotta mérnöki szerkezet is létezik. Ezekkel egyelőre elsősorban az úrkutatásban találkozhatunk, mert itt kell a szállítandó szerkezet súlyáért és térfogataért, valamint a felállítási időért a legnagyobb árat fizetni. A XXI. sz. megváltozott koncepcióihoz igazodva egyre nagyobb igény mutatkozik az összehajtogatható szerkezetek építészetben való alkalmazására is. Ilyenek a pneumatikus szerkezetek, kinyitható kupolatetők, kihúzható hidak, árnyékoló szerkezetek, ideiglenes kiállítási csarnokok, stb.

Mindezidáig elsősorban egy-egy speciális alkalmazási igényhez készültek kísérleti megoldások. Az egyre növekvő igény azonban a kutatókat az ilyen szerkezetek mechanikai viselkedésének pontosabb megértésére és általános számítási módszerének kidolgozására, valamint az alkalmazási lehetőségek kiterjesztésére ösztönzi.

* okl. építőmérnök, doktorandusz, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

** okl. mérnök, Dr. habil., egyetemi tanár, BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke

A jelenleg folyó kutatások nagyrészt az „ollós” szerkezetű (lásd később) valamint a vékony membránszerkezetek összehajtogathatósági feltételeinek kidolgozásával, az összehajtás során létrejövő szinguláris konfigurációk (kinematikus bifurkáció) feltárásával és változó geometriájú rúdszerkezetek morfológiai optimalizálásával valamint a nyitási-csukási fázisok numerikus számítási lehetőségének vizsgálatával foglalkoznak. Ennek a tanulmánynak az elsődleges célja az összecukható rúdszerkezetek konstruálása elvi alapjainak bemutatása és a mérnöki életben való alkalmazási lehetőségek felvázolása, elsősorban az angliai Deployable Structures Laboratory (Összecukható Szerkezetek Laboratóriuma) kutatási eredményeire alapozva.

Az első fejezet az ollós, kihajtogatható szerkezetek általános ismertetésével, szerkezeti felépítésének leírásával és néhány kihajtogatható alakzat bemutatásával nyújt betekintést az összehajtható szerkezetek világába.

A második fejezet egyszerűbb, már kidolgozott mérnöki alkalmazási lehetőségeket vázol fel a felmerülő stabilitási problémák leírásával és az ilyen szerkezetek általános paramétereinek értékelésével.

Tanulmányunk utolsó fejezetét egy különálló kutatási területnek, a kinyitható kupolatetőknek szenteltük.

2. OLLÓS SZERKEZETŰ KIHAJTOGATHATÓ SZERKEZETEK

A legtöbb összecukható és kinyitható szerkezet alapja rudak ollószerű összekötéséből áll. Az ilyen csomópont az összekötött elemek egy adott tengely körüli elfordulását megengedi, míg az összes többi relatív elfordulást illetve elmozdulást megakadályozza. Amennyiben az egyszabadságfokú csuklók mellett (vagy helyett) gömbcsuklót is alkalmazunk, úgy számos 3 dimenziós alakzatot tudunk egy egyszerű összekapcsolt rúdkötegből kihajtogatni. A kihajtogatott rúdszerkezetet addicionális húzott elemekkel (pl. feszítőkábel, megfeszített ponyvával) lehet merevé és így teherbíróvá tenni.

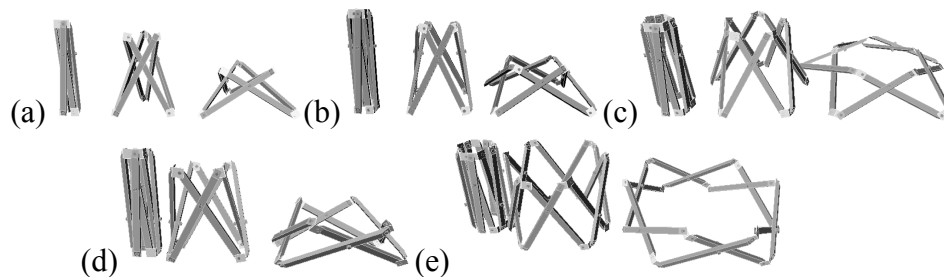
Tornyok, hidak, kupolatetők ilyen módú kihajtogathatósága egy egyszerű és igen gyors kivitelezést tesz lehetővé, amely nemcsak az úrkutatásban fontos szempont, de a földön is jelentős szállítási és építési költség valamint kivitelezési idő spórolható meg általa.

2.1. Az ollós szerkezetű kihajtogatható szerkezetek alapegysége

Az ollós szerkezetű kihajtogatható szerkezetek első szintű alapegysége két rúd, amelyek egy négyszög átlóit definiálják, és amelyeket egy ollós csomópont köt össze, az egyik tengely körüli relatív elfordulást megengedve. Ezért is hívjuk ezt az alapegységet ollónak (mivel a két rúd szárai mint egy olló össze tudnak záródni illetve ki tudnak nyílni) és az ezekből az egységekből álló szerkezetet ollós szerkezetnek.

Ilyen ollókból legalább hármat gömbcsuklókkal összekapcsolva az összehajtogatható szerkezetek alapgyűrűjét kapjuk, amelyet második szintű alapegységnek nevezünk. Ahhoz, hogy térbeli alakzatot tudjunk hajtogatni, az elsődleges alapegységek által kifizített négyszögeknek trapézoknak kell lenniük.

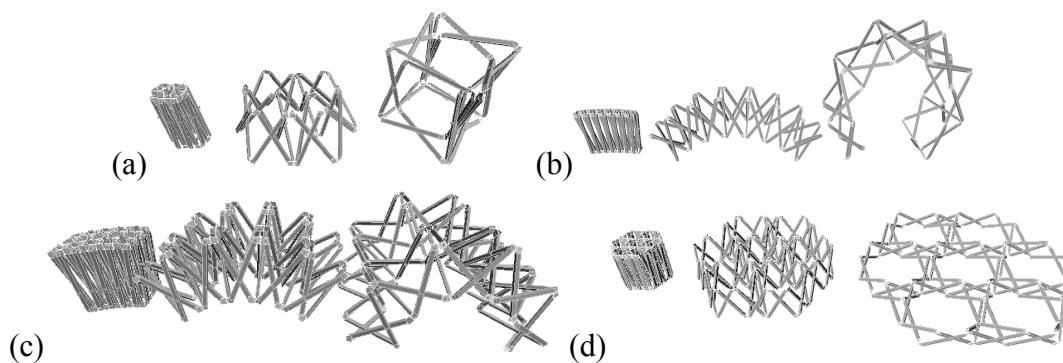
A másodlagos egységek két osztályba sorolhatók [2]. Az egyik a „piramis” típusú alapegység (1.a, 1.b, 1.d ábrák) amelynek „ollói” a térben kihajtott alakzatban mindig befelé dőlnek (1.c és 1.e ábrák). Az ilyen elemekből összekapcsolt szerkezetek általában csak kiegészítő húzott elemekkel tehetők stabilák. A másik gyűrűs alapegység a „rézsútos” egység, amely mindig páros számú, váltakozva befelé illetve kifelé dőlő ollóból áll.



1. ábra: Példa ollós szerkezetek alapegységeire (a), (b), (d): piramis típusú egység, (c), (e): „rézsútos” egység

2.2. Példa kihajtogatható alakzatokra

A különböző típusú alapegységekből tengernyi kihajtogatható alakzat nyerhető. Például a piramis egységeket gyűrűsen csatlakoztatva kétrétegű poliéderek hajtogathatók (2.a ábra), a „rézsútos” egységek sorba csatlakoztatásával íveket (2.b ábra), míg ezek egymás mellé fűzésével teljes boltozatot lehet hajtani (2.c ábra). Vegyesen piramis és „rézsútos” elemeket használva síklemez is hajtogatható (2.d ábra).



2. ábra: Kihajtogatható alakzatok (a): kétrétegű poliéder, (b) ív, (c): boltozat, (d): lemez

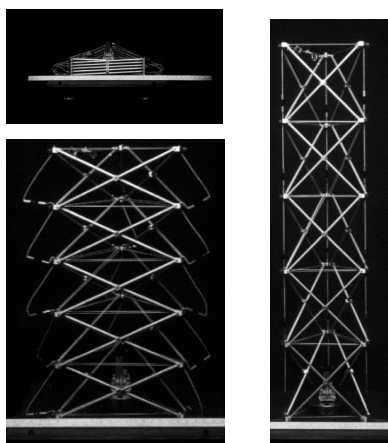
3. EGYSZERŰ ALKALMAZÁSI TERÜLETEK

Az ollós szerkezetek atyja talán Pinero spanyol mérnök volt, akinek elméletét később Escrig és Zeigler fejlesztették tovább. Az ilyen ollós szerkezetek legnagyobb problémája, hogy kinyitásuk-összecsukásuk nehezen automatizálható, kontrollálható,

legtöbbször csak manuálisan lehetséges, valamint a végső állapot stabilitását is általában körülményes biztosítani. Az következőkben néhány egyszerűbb alkalmazási területet mutatunk be, ahol sikerült ezeket a problémákat szellemesen megoldani.

3.1. Felhúzható toronyszerkezet

Piramis típusú gyűrűket függőlegesen összeépítve háromdimenziós rúdszerkezetből álló tornyot kapunk. Z. You úgy építette az űrkutatáshoz készített toronyszerkezetét, hogy annak szétnyitását egyetlen, a szerkezet



csomópontjain, csigákon keresztül, folyamatosan vezetett kábellel lehessen vezérelni [3]. A végpontján motorosan vezérelt dobhoz csatlakozó aktív kábelt megfelelő csomópontokon keresztül vezetve majd a kábel felcsévélésével az oszlop automatikusan kinyílik. Ahhoz, hogy az oszlop végleges állapotában stabil legyen az oszlop egymás fölötti csomópontjait a végleges állapotnak megfelelő hosszúságú kábelekkel össze kell kötni. Az összecsucott állapotban még laza rövidkábelek a kinyitás során egyre feszesebbek lesznek, míg el nem érjük a kívánt geometriát, amikor a szerkezet beáll a végigmenő hosszúkábel és a rövidkábelek által előfeszített immár stabilis állapotba. A 3. ábrák egy háromszög alaprajzú, megegyező méretű egységekből álló, másfél

3. ábra: You 1,50 m oszlopa

méter magasra kinyitható oszlopra mutatnak példát.

Az oszlop könnyű szállíthatósága és egyszerű kivitelezhetősége mellett nagy előnyt jelenthet még, hogy kedvező a dinamikus terhekkel szembeni ellenállása is. A kábelek feszítése ugyanis - hasonlóan a feszített vasbeton oszlopoknál tapasztaltakhoz [4] – kedvezően befolyásolja az oszlop teherbírési jellemzőit és egyes dinamikai paramétereit.

3.2. Összecsucukható hídszerkezet

Az előző pontban bemutatott szerkezet vízszintesen összekapcsolva áthidalóként is alkalmazható (pl.: Harnanizuki Park gyalogos hídja – 4. ábra). Ez a szerkezet gyors kivitelezhetősége és egyedi esztétikája miatt kedvező megoldás különösen akkor, ha a hidat csak ideiglenesen, esetleg időszakosan használják.



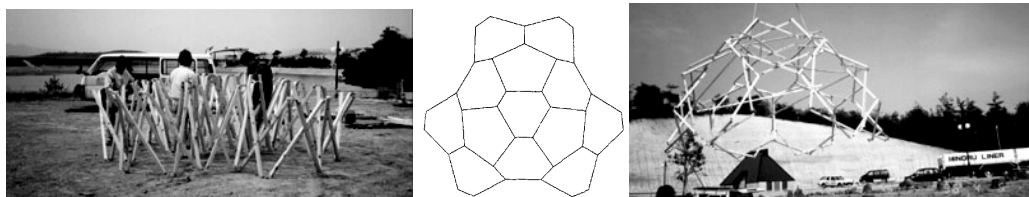
4. ábra: gyalogos híd (Harnanizuki Park)

4. ÖSSZEHAJTHATÓ ÉS KINYITHATÓ KUPOLATETŐK

4.1. Összehajtható kupolatetők

Az alábbi képek (5. ábrák) egy fél focilabdává hajtható kétrétegű kupolatetőre mutatnak példát, amit oktaéder alapú egységek vízszintes csatlakoztatásával oldottak meg, 48 db egybevágó „ollóból”. A kupolatető szintén a Hamanizuki Park terét díszíti.

Hobermann amerikai mérnök egy hasonló szerkezetet gyerekjátékként árul „magic sphere” néven: a tenyéren elférő játékszer gyerekméretű gömbbé hajtogatható.

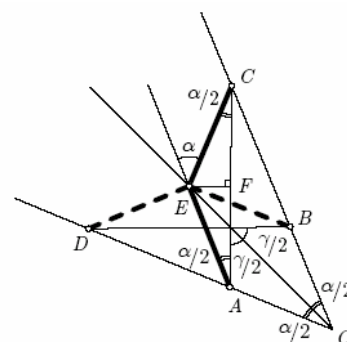


5. ábra: Kinyitható kupola (Hamanizuki Park `96) kinyitás előtt, után és alaprajzi sematikus vázlat

4.1. Kinyitható kupolatetők

Az előzőekben mutatott kihajtogatható kupolák – bár igen ötletesek – de a gyakorlatban nehézkesen vagy egyáltalán nem alkalmazhatóak bonyolult hajtogatásuk és nehézkes geometriájuk miatt. Ezzel is magyarázható, hogy hasonló szerkezetekkel csak játékboltban illetve kiállítási tárgyként találkozhatunk.

Mérnöki alkalmazásban előrehaladást az olló szerkezetű kinyitható kupolatetők irányába a Hoberman által felfedezett „szögbezáró” elem felfedezése jelentette (6. ábra). Ez az elem két egybevágó (folytonos illetve szaggatott vonalakkal jelölve), elemenként két, egymáshoz mereven kapcsolt egyforma hosszú, α szöget bezáró rúd. A két egybevágó szögbezáró elem egymással γ szöget bezárva az E pontban ollós csomóponttal kapcsolódik egymáshoz. Amennyiben az



6. ábra: A szögbezáró elem pár

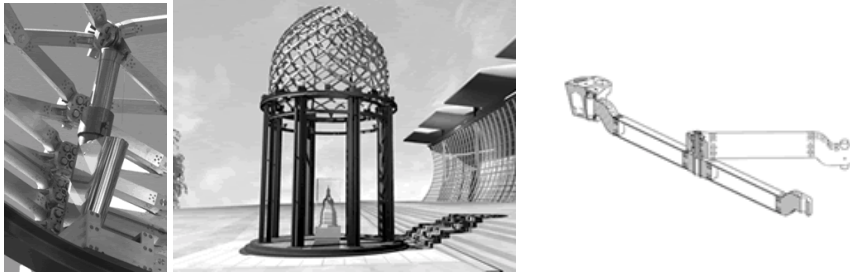
$$AE = CE, \text{ és} \tag{1}$$

$$\alpha = 2 \cdot \arctan(EF/AF) \tag{2}$$

feltételek teljesülnek, a szögbezáró elemekből zárt, kitáguló alakzatot lehet formálni [6,7]. A két elem ugyanis úgy csukódik össze, illetve nyílik ki, hogy közben az A,B illetve a C, D rúdvégpontok mindvégig radiális vonalon mozognak, és így a

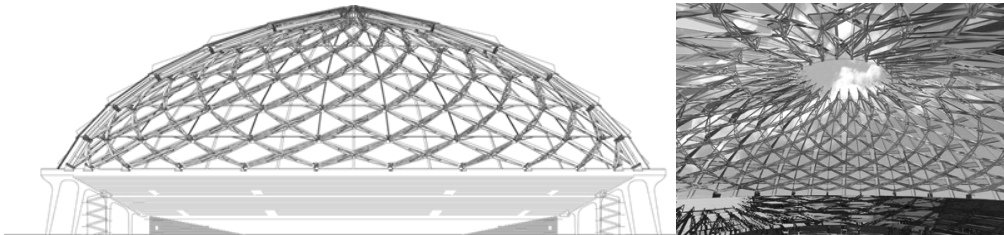
$$\tan(\alpha/2) = (CE - AE)/(AC)\tan(\alpha/2) + 2EF/AC$$

egyenlőség (1) és (2) miatt γ értékétől függetlenül mindig teljesül. Ennek alapján készült Hoberman írisz kupolája (EXPO 2000 – Hannover -7. ábra) és más, hasonló kinyitható kupolatetőre készített szerkezeti terve (pl. 8. ábra) is.



7. ábra: Hoberman kinyitható kupolateteje (Hannover, EXPO 2000)

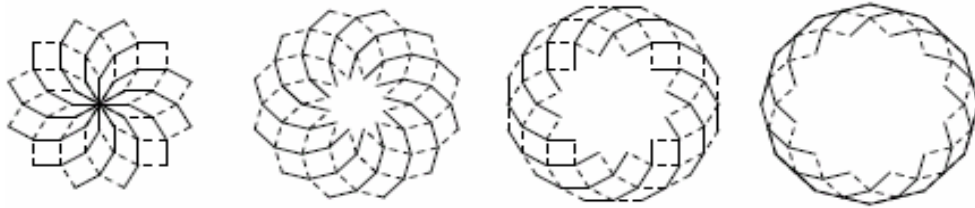
Hobermannak sikerült a kinyitható kupolatetőknél felmerülő két legkényesebb problémára is megoldást találnia, nevezetesen a mozgó szerkezet fix alaphoz való rögzítésére, valamint a tetőlefedés megoldására. Ugyanis a szögbezáró elemek 6. ábra szerinti O középpontját elforgatva fix peremcsomópontokat lehet biztosítani, így klasszikus alapozási rendszert lehet alkalmazni. A kupola lefedését Hoberman a



8. ábra: Hoberman terve kinyitható kupolatetőre (Projects Exhibit 1994, New York, USA)

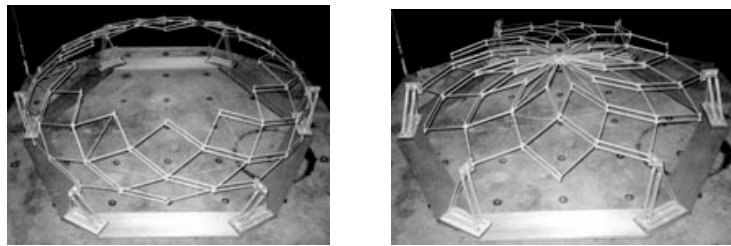
kinyíló szerkezet torzuló paralelogrammáikhoz kapcsolódó merev, kinyíláskor egymásra csúszó lapok sorozataként, illetve egy összehajtódó membránfelületként képzelte el. A Hannoverben kiállított kupolatető legnagyobb hátránya a nagyszámú rúd és merev elem, valamint ezek szerkezeti csomópontjainak bonyolult kivitelezhetősége volt.

Ezt a hátrányt sikerült enyhítenie S. Pellegrinonak és Z. You-nak, akik a fent említett szögbezáró elemek különálló sokaságának bonyolult összekapcsolása helyett nem két, hanem több (9. ábra példáján elemenként 4db) mereven kapcsolt egymással szöget bezáró rúd kétrétegű alkalmazását javasolták, amelyeket egyszerű hengeres csomópont köt össze. A merev elemek két rétege (lásd a 9. ábrán szaggatott és folytonos vonalak) különböző irányban fordulnak el kinyíláskor, a szaggatottal jelölt elemek az óramutató járásával ellenkezően, a folytonosan jelöltek pedig azzal megegyezően.



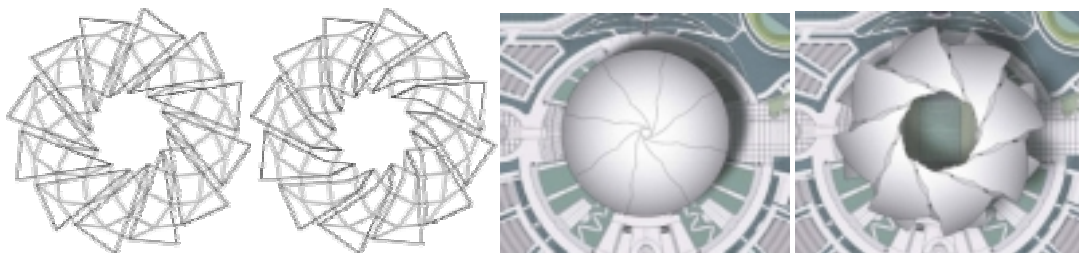
9. ábra: S. Pellegrino és Z. You szétnyitható gyűrűs szerkezetének kihajtás közbeni fázisai

A vázolt síkbeli alakzat háromdimenziós kiterjesztését javasolta Z. You a szerkezeti csomópontok térbeli felületre, például félgömbre való vetítésével, íves rudak és a vetítési síkra merőleges hengeres csomópontok alkalmazásával. Z. You kísérleti modelljét mutatja a 10. ábra.



10. ábra: Térbeli, gyűrűsen kihajtható szerkezet modellje

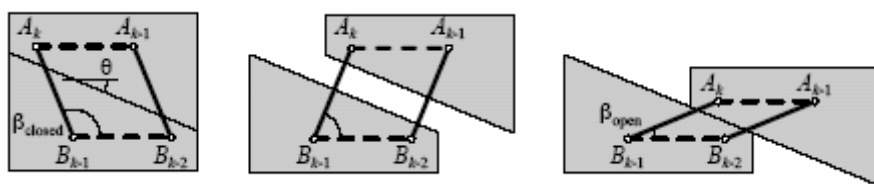
A kinyíló kupolatetők bonyolultan kivitelezhető egymásra csúszó merev lapokból álló illetve összehajtódó membrán lefedési lehetőségére P.E. Kassabian javasolt eltérő megoldást olyan merev lapok alkalmazásával, amelyek kinyíláskor nem csúsznak egymásra, viszont mind az összezárt mind a kinyitott állapotban egy folyamatos, szakadásmentes felületet képeznek. Ha minden merev lap csak egy mereven csatlakozó szögbezáró elemsorozathoz van rögzítve, akkor a szerkezet mozgását a lapok nem akadályozzák. F. Jensen által kidolgozott példákat mutatnak a 11. ábrák.



11. ábra: Változatok kupolatető lefedési lehetőségeire (F. Jensen)

A lefedés lényege, hogy a torzuló paralelogramma egy-egy merev rúdpárjához csatlakozó merev lapokat megfelelő szögben kell elvágni [8] (12. ábra). Egyenes élű elemeket alkalmazva ez a következő feltételeket jelenti:

$$\theta = ((\pi - \beta_{\text{closed}} - \beta_{\text{opened}})/2)$$



12. ábra: Torzuló paralelogrammához kötött két merev lap geometriája, amely a rudak mozgását nem akadályozza

Jensen különböző görbélű záródási vonallal is dolgozott ki modelleket (13. ábra), amelyet két rétegben, így az előzőekben látott különböző irányban elforduló merev elemekhez csatlakoztathatóan alakított ki.

A kinyitható kupolatetőkhez kidolgozott szerkezeti megoldások más attraktív létesítményekhez is hasznosíthatók. Erre egy sor építészeti alkalmazási lehetőséget dolgozott ki Carolina Rodriguez [9] látványos háromdimenziós modelleken is illusztrálva ötletes árnyékoló-szerkezeteit, szétnyitható térlefedéseit.



13. ábra: F. Jensen kétrétegű merev lapokból álló modellje

HIVATKOZÁSOK

- [1] Hachem, C. – Karni, E. – Hanaor, A.: Deployable Structures in Nature: Examples, analysis and realization – *Journal of the IASS* Vol.45 (2004) n.3 Dec. n.146
- [2] ATAKE Space Design Laboratory Co., Ltd. Japan - *New variations on scissor technique*, <http://www.asahi-net.or.jp/~tg5K-atk/alephst.htm>, <http://www.atake-sdl.com/marabwhtm/marabwf2.htm>
- [3] Kwan, A.S.K. - You, Z.: Active and passive cable elements in deployable masts, *Int. J. Space Structures*, 8, 29-40 (1993).
- [4] Völgyi, I. – Farkas, Gy. (2004), Behaviour of prestressed concrete pillars under dynamic loads, *5th International PhD Symposium in Civil Eng.* Vol.2. pp 905-912
- [5] Zhong You research projects, Oxford University Civil Engineering, <http://www-civil.eng.ox.ac.uk/people/zy/research/cns.html>
- [6] Pellegrino, S. – You, Z. (1993), Foldable ring structures, In: G.A.R. Parke and C.M. Howard, eds, *Space Structures 4* Vol. 4, Thomas Telford Publishing, London, 783-792 old.
- [7] You, Z. – Pellegrino, S. (1997), Foldable bar structures, *International Journal of Solids and Structures*, 34(15), 1825-1847
- [8] Jensen, F. - Pellegrino, S. (2004), Expandable Blob Structures, *IASS Symposium 2004 – Extended Abstract - Shell and Spatial Structures from Models to Realization*
- [9] Rodriguez, C. - Chilton, J. - Wilson, R.: Kinetic grids with Swivel Diaphragm, *IASS Symposium 2004 – Extended Abstract - Shell and Spatial Structures from Models to Realization*