

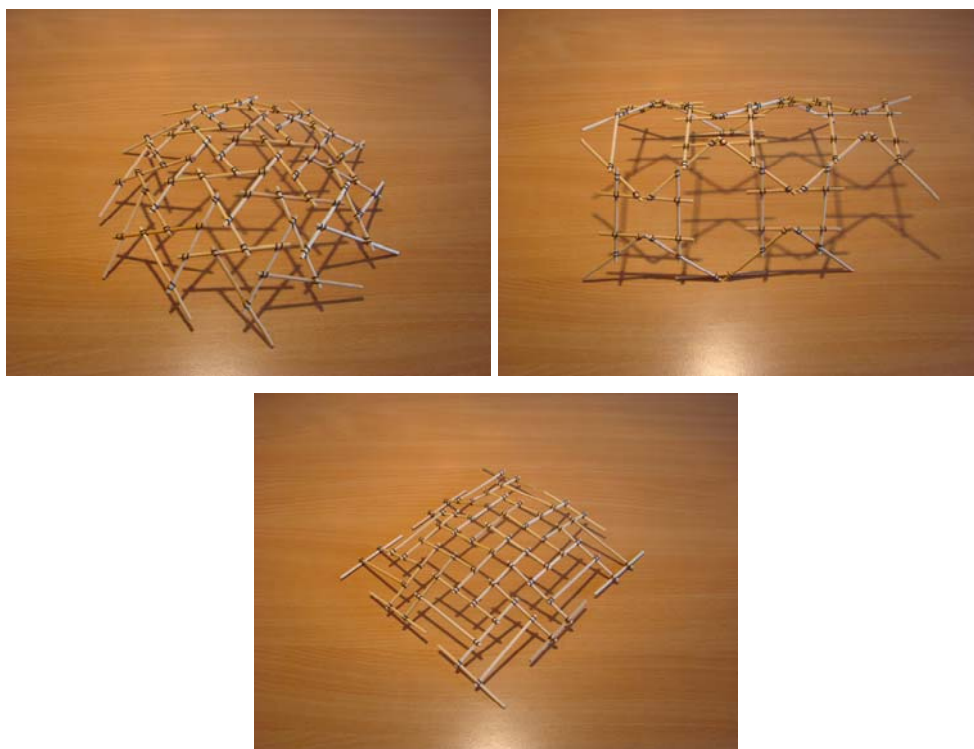
Pécsi Tudományegyetem

Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Kar

Épületszerkeztan tanszék



Parametrikus építészet – Nexorade szerkezetek



Készítette: Mózes Szilvia

Építészmérnök hallgató V. évf.

Konzulsens: Dr. Széll Attila Béla

egyetemi docens

Pécs, 2015

Tartalomjegyzék

1.	BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS.....	3
2.	TÖRTÉNETI HÁTTÉR	5
3.	SZERKEZETI RENDSZER SAJÁTOSSÁGA.....	8
3.1.	Geometria	11
3.2.	Paraméterek változtatása	12
3.3.	Anyagok	12
3.4.	Kapcsolatok	13
3.5.	A fa használata.....	14
4.	NEXORADE ÉPÍTÉSI RENDSZER FELÉPÍTÉSE	16
4.1.	Kapcsolati rendszer	16
5.	KÍSÉRLETEZÉSEK	18
5.1.	Figyelembe veendő paraméterek	19
5.2.	Tervezés menete	20
5.3.	Méretezés.....	20
5.4.	Makettezési módszer	21
5.4.1.	Anyagválasztási lehetőségek	21
5.5.	Tervezési módszer bemutatása	22
5.5.1.	Szoftveres modellezés	24
5.5.2.	Terhelési vizsgálat	25
5.6.	Pálcika modellezés	28
5.6.1.	Első példa	28
5.6.2.	Második példa	29
6.	EREDMÉNYEK.....	30
6.1.	Összegzés	30
6.2.	További tervek.....	30
7.	MELLÉKLETEK	31
8.	IRODALOMJEGYZÉK	34
9.	NYILATKOZAT	34

1. BEVEZETÉS ÉS CÉLKITŰZÉS

Ki készítette az első önhordó szerkezetet? Honnan származik az ötlet? Nehéz lenne kideríteni mikor és hol került kialakításra az első kölcsönös szerkezet. Ennek két fő oka van: az első az, hogy nagyon kevés ember írja le ezeket a struktúrákat úgy, mint önhordó szerkezet; a második ok, hogy az ötlet bár nagyon régi a történelmi szerkezetek, amelyeket elfogadtak kölcsönös szerkezetnek többnyire faanyagból épültek (jóval azelőtt, hogy az acél és a beton ismert lett az emberiség előtt), amelyek az évszázadok során tönkrementek vagy tűzvészben elvesztek.

Reciprocal Frame (RF) – Parametrikus építészet: A parametricizmus során leegyszerűsítve az építész topologikus formák vektorokkal leírt pontjait transzformálja, és ezek a transzformációk a tervező által felállított, az adott tervezési feladatnak megfelelő kritériumoknak – lépések sorozatának – megfelelően generálnak új térbeli alakzatokat. Alkalmazhatóak makro szintű, az egész alakzatra vonatkozó, és mikro szintű, az alakzatot alkotó elemeket átformáló eljárások. Az első esetben a felület egyes pontjainak, a második esetben a struktúrát alkotó elemeknek a paraméterei változnak a transzformáció következtében. Amikor a formát alkotó elemek paramétereinek megváltozásával generálunk új formát, parametrikus építészetnek nevezzük. [1]

Egyik fajtája a nexorade szerkezetek: önhordó három-dimenziós szerkezetek, amely legalább három azonos alkotóelemből épülnek fel, kialakítva egy zárt területet. Ezek a szerkezetek lehetővé teszik bármilyen forma megvalósítását, így létrehozva a kívánt felületet, amely meglehetősen stabil.

Ezen nexorade struktúrákat nevezzük összefoglalóan önhordó szerkezeteknek, melynek elemei kölcsönösen egymásra terhelnek. Ezen szerkezetek jelentős terhelések viselésére alkalmasak, nagy terek kiselemes lefedésére lettek tervezve. Amely tervezése bonyolult és összetett feladat.

Nem könnyű írásos dokumentációkat találni róla, az egységes elnevezésük hiánya miatt. A témáról a magyar szakirodalomban nem áll rendelkezésre összegyűjtött írásos anyag.

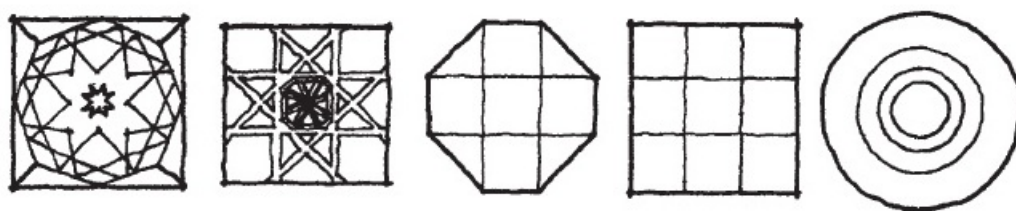
A dolgozatom témájának éppen ezért a nexorade szerkezetek vizsgálatát választottam. Célom megismertetni, valamint egyszerű, könnyen áttekinthető formában bemutatni a szerkezet sajátosságait, kapcsolati rendszerét, dimenziójának lehetőségeit és tervezését.

A szerkezet lehetőségeit megvizsgálva, különböző alakzatok létrehozása. Ezek lehetséges alkalmazása az építészetben. Olyan egyszerű elemekből felépülő összetett kupola tervezési folyamatának bemutatása, amely modularizálható, kivitelezése egyszerűsíthető és tervezése, anyaghasználata, modellezhetősége bárki számára.

2. TÖRTÉNETI HÁTTÉR

Mint ahogy azt korábban már kifejtettem, nagyon nehéz (ha nem lehetetlen) megállapítani, hogy hol épült az első kölcsönös szerkezet. Nagyon valószínű, hogy nem csak egy kultúra használt ehhez hasonló szerkezeteket. Az egyetlen írott anyag a szerkezetről hasonlít az önhordó szerkezet jelenlegi formájához, ez Japánban található. Bizonyított (Ishii, 1992/3), hogy a tizenkettedik században a buddhista szerzetes Chogen (1121-1206) hozta létre a fa gerendák spirális elhelyezésének technikáját, amelyeket templomoknál és szentélyek felépítésénél használtak. Sajnos már nincsenek fenn maradt épületek, melyeket ezen a módon építettek. A faserkezetek megsemmisültek tűzben, háborúban vagy a rothadásuk miatt elvesztek. Fontos azonban hangsúlyozni, hogy a technika, amelyet Chogen használt azonos az önhordó konstrukció szerkezeti elvével, és ezt ma is alkalmazzák a tetőkhöz, továbbá újjépítésű épületeknél Japánban.

Ezen templomok geometriai formái a mandalákra emlékeztetnek (1. ábra), a buddhista meditációkhoz használt istenségek szimbólumaira, így a neve „mandala tető”. A „mandala” egy szanszkrit szó, jelentése „bűvös kör” (Gombrich, 1979), mely egy geometriai minta, ami magában foglalja a körök és négyzetek szimbolikus jelentéssel bíró elrendezését. Ezek egyike a legrégebbi vallási szimbólumoknak, festett díszítésként láthatjuk vallási épületek mennyezetén, mint például, Kínában a Tu-huang.

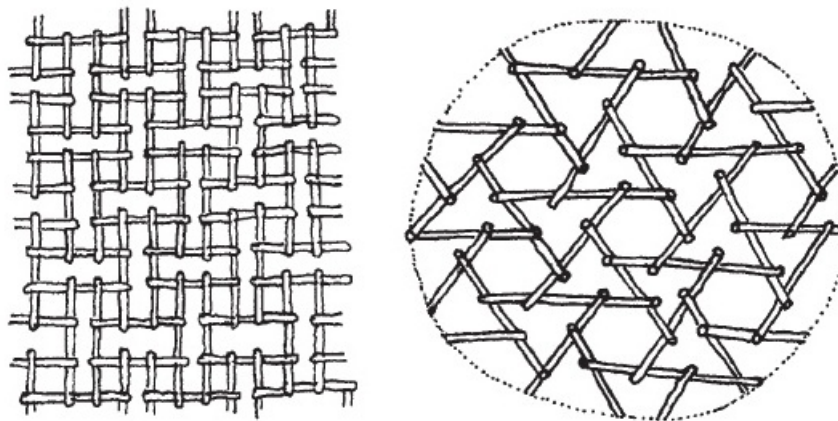


1. ábra Mandala geometria

Ha megnézzük a nyugati építészet történelmét nyilvánvaló, hogy a középkorban a legtöbb épület fa padlóval épült. A kisebb épületek (mint a családi házak és gazdasági épületek) elsősorban fából, míg a fontosabb épületek (mint a templomok vagy paloták) falai kőből épültek fa padozatot használtak a falak közötti áthidalásokra és a szintkülönbségek kialakítására. Mivel az épületek egyre nagyobbak lettek, terjedelmes

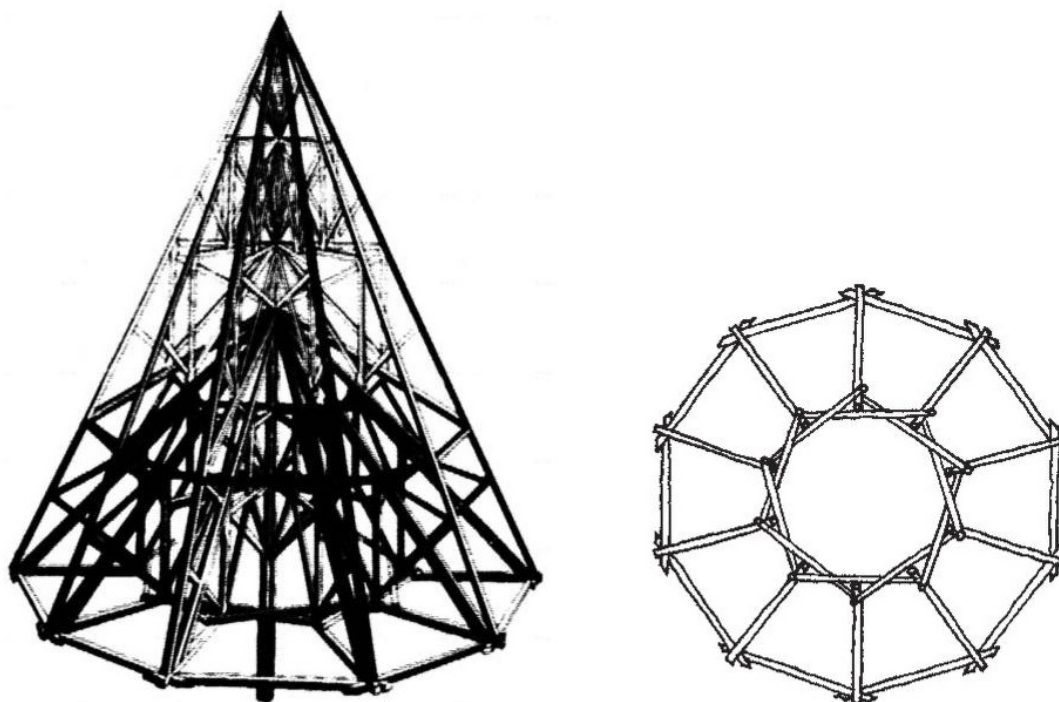
szobákkal, szükség volt olyan gerendákra, melyekkel át tudták hidalni a nagy távolságokat. Gyakran előfordult, hogy ezeket a gerendákat messziről kellett szállítani, de ha ez nem volt lehetséges alternatív megoldásokat kellett találni. A középkori padozatot néha négy gerenda támasztotta meg, melyek rövidebbek voltak, mint a fesztáv. Ezek a szerkezetek általában sík kialakításúak, de a három-dimenziós szerkezetek is megtalálhatóak. Érdekes, hogy ezek a „középkori kialakítású szerkezetek” hasonló módon működnek az önhordó szerkezetekhez. Ez valójában a síkbeli változata egy kölcsönös szerkezetnek, belső kapcsolatokkal áthelyezve az erőket.

Leonardo da Vinci (1452-1519) az egyik ismert legnagyobb reneszánsz gondolkodó, aki tanulmányokat végzett fizika, anatómia, orvostudomány, csillagászat, erődítmény, csatorna-készítés, építészeti és mérnöki tudományokból, érdekelt volt olyan rendszerekben, amelyek nagyon hasonlóak az önhordó szerkezetekhez. Vázlata a Madridi kódex I. kötetében bemutatja négy gerenda síkbeli rácsozatát (2. ábra). Leonardo is tett kutatásokat gerenda rácsozatokról, melyeket bemutattak jegyzeteiben, a kódex Atlanticóban.



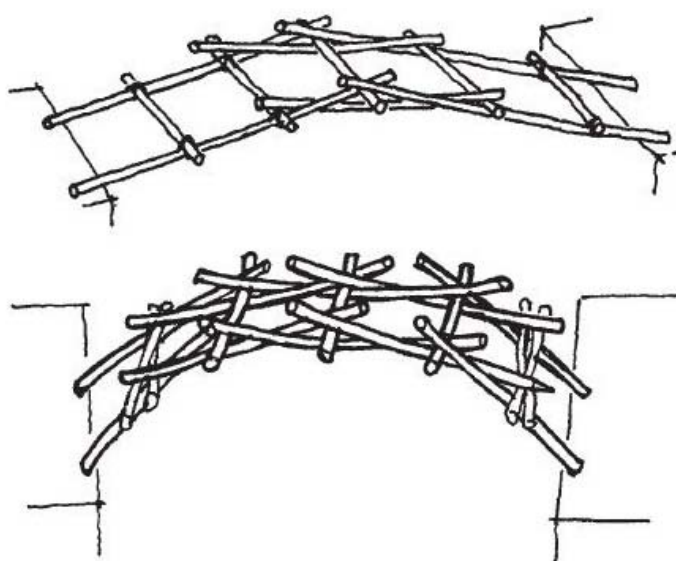
2. ábra Síkbeli rácsozatok da vinci vázlataiból

Ezekből példa az „ideiglenes hidak” (Anon, 1956), mely eredetileg a Kódex Atlanico-ban lett bemutatva. Megépítésük viszonylag rövid gerendákból történt, melyek egymást támasztják alá. A hidak ezen típusai használatosak a hagyományos kínai építészetben is. Hasonló kortárs példa a bambusz gyalogos híd Rio de Janeiro-ban.



3. ábra Lincoln katedrális tetőszerkezete

Leonardo íves gerendái nagyon hasonlóak a Lincoln katedrális káptalani gyűléstermének koszorú gerendáihoz (3. ábra). Az egyetlen különbség az, hogy az utóbbi egy teljesen körbeérő gerenda, míg a Leonardo hidak olyan gerendákból állnak, melyek szegmens ívet alkotnak (4. ábra). Mindkét struktúra, bizonyos mértékben, hasonló az önhordó szerkezethez.



4. ábra Leonardo hidak

3. SZERKEZETI RENDSZER SAJÁTOSSÁGA

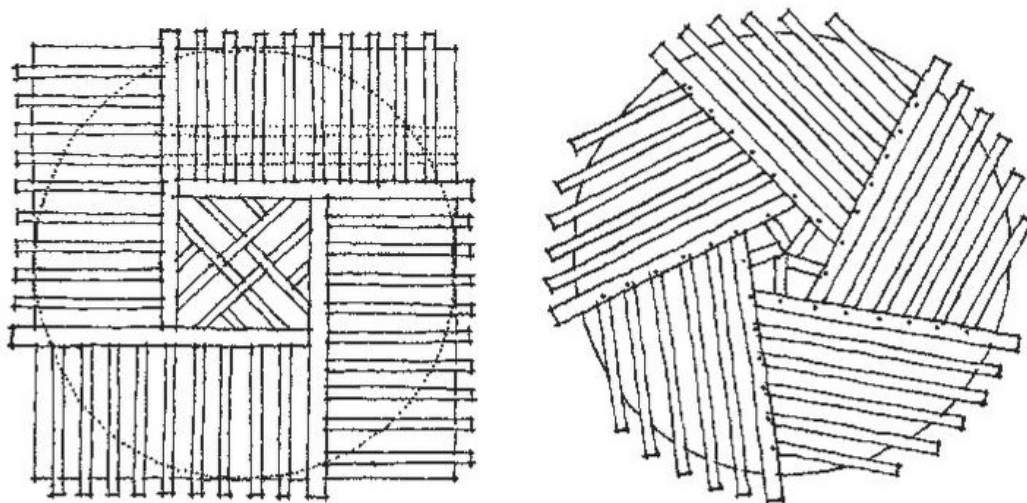
A szerkezeti elemek elrendezését mutatom be, amely megformálja az önhordó keretet, létrehozva ezzel a három-dimenziós térszerkezetet.

Az önhordó szerkezet paramétereinek változtatásával - mint a hossz és a gerendák száma, a belső és külső sokszög átmérője, valamint a gerenda dőlése - a tervező képes számos különböző alakot elérni. Ezen túlmenően, megvan a lehetőség az egyszeres vagy többszörös kölcsönös szerkezeti egység használatára, amely növeli a rendszer sokoldalúságát és különböző építészeti megnyilvánulásokat képes létrehozni.

Miután meghatároztuk, hogy egymásra kölcsönösen támaszkodó gerendákból épül fel a szerkezet, egy zárt körben helyezzük el őket. Nyilvánvalóan azt várnánk, hogy az ilyen szerkeztű épület kör alakú, de ettől eltérő formák is léteznek. Napjainkban azonban a legtöbb hasonló szerkeztű épület sokszög vagy köralakúra tervezett.

A szabályos formák tervei esetében, az összes RF¹ elem azonos, ez lehetőséget nyújt a moduláris felépítésre, amely jobb minőségű és gyorsabb építhetőséget biztosít.

A kör alaprajzú formák voltak az elsők, amit építettek. A történelem során sok népi épület (sárkunyhók, barlanglakások és hasonlóak) volt ilyen alaprajzú. Továbbá, a kör és szabályos sokszög formákat gyakran alkalmazzák bizonyos középületek fajtáinál, mint a templomok, koncerttermek, sportlétesítmények és múzeumok.



5. ábra Gerenda rácsozat négyszög és kör alakú alaprajzra

¹ Reciprocal Frame – kölcsönös szerkezet

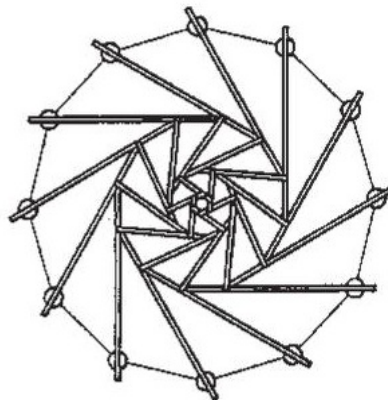
Az ilyen formák meglehetősen merev geometriai alakzatok. Az önhordó szerkezet spirális hatása, a középponttól eltolt gerendákkal, további korlátot jelent, mely nyilvánvalóvá teszi a tér felosztásának módját, válaszfalakat használva, melyek követik a gerendák vonalát. Ezért az önhordó szerkezetek legjobb alkalmazása a nyitott terű funkciók és a belső felosztás nélküli terek. Ez nem azt jelenti, hogy a szétválasztott tereknél nem alkalmazhatunk kölcsönös szerkezetet, csak több figyelmet és körültekintést igényel a tervezésük.

Ha megnézünk egy eddig épített önhordó konstrukciót, világossá válik, hogy a szerkezet vizuális hatása, a kölcsönös spirális gerendákkal nagyon erős.

A kölcsönös szerkezet nem várt módon kínálja a geometriai sokféleséget, bármely tetőformára lehet használni: akár ovális, teljesen szabálytalan vagy összefüggő formáknál. Bár a mai napig nincsenek megépült szabálytalan szerkezetek, annak ellenére, hogy ezek kivitelezhetőek lennének.

Az önhordó szerkezetek másik csoportja, mely több kölcsönös egységből áll, komplex RF szerkezeteknek nevezzük (6. ábra). Ezeket a szimpla RF egységek kombinációja alakítja ki, amelyek a középpont közelében vannak elhelyezve (a belső sokszög) ahelyett, hogy a kerület mentén haladnánk, mint az összetett rácsozatok esetében.

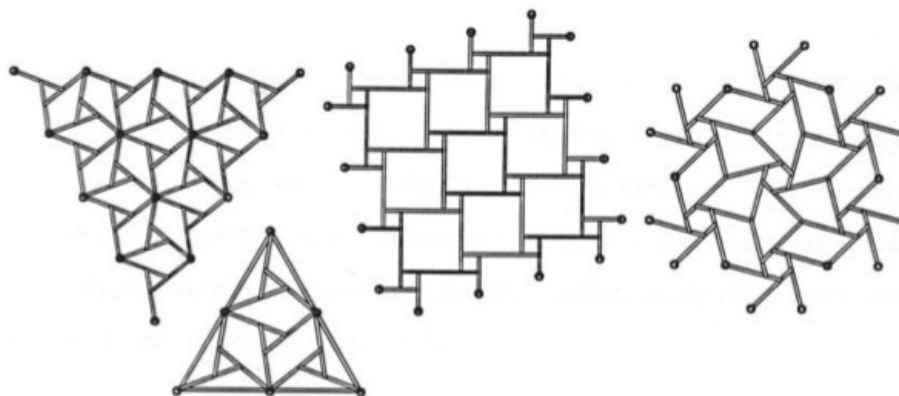
Az komplex RF-ek egy példája Ishii, Spinning House önhordó tetője, csak úgy, mint a Seiwa Burnaku Bábszínház kiállító csarnoka. Az utóbbi példa egy dupla tartó egység a külső köríven, amely spirálisan elhelyezett gerendákat tartalmaz, órajárással megegyező és ellentétes irányban, kialakítva egy szép és földrengés biztos épületet. A dupla szerkezet növeli a tető strukturális redundanciáját és segít úrrá lenni az esetleges beomláson.



6. ábra Komplex szerkezet

A kutatások célja az volt, hogy a szerkezet lehetőségeit megvizsgálva különböző alakzatokat lehessen létrehozni. A szerkezet paramétereinek megváltoztatásával, a furcsa formák nagy számban kialakíthatóak. Ez a hatalmas lehetőség, a különböző alakzatok létrehozásával egyedülálló lehetőséget nyújt a tervezőnek, egy új kifejezés kialakítására a különböző térszerkezeteknél.

A Sheffield-i egyetemen végzett kutatás során megvizsgálták a RF szerkezetből létrehozható különböző formák lehetőségeit és, hogy ezek hogyan alkalmazhatóak az építészetben. A bemutatott képeken - az egyszeres és többszörös önhordó gerendákról és összetett térszerkezetekről - a fizikai modelleken és vázlatokon át megismerhetjük, hogy milyen sokféle szerkezet alakítható ki. Ha ezek használjuk egy épülettervezésnél, akkor további munkát igényelnek. Le kell egyszerűsíteni a szerkezetet egy hatékony struktúra eléréséhez, ezen kívül, a választott anyagtól függően, meg kell tervezni a megfelelő csatlakozásokat is.



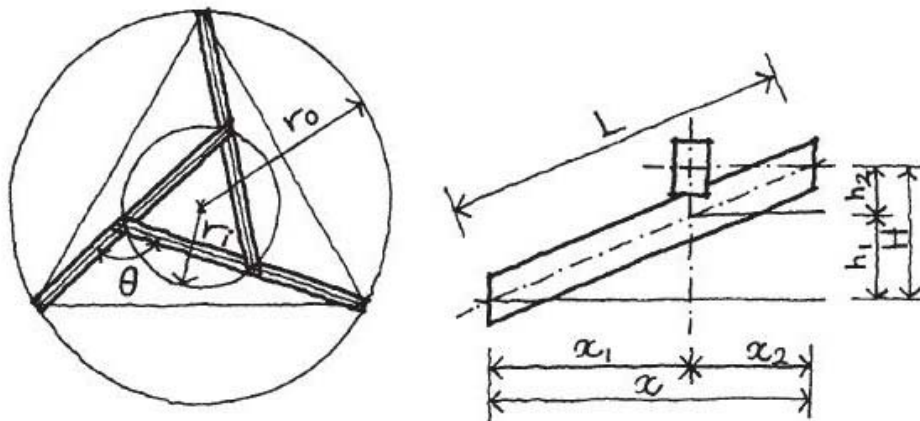
7. ábra Példák összetett gerendázatra

A dolgozatban, olyan struktúrákat mutatok be azonos gerendákból, melyek zárt körben elhelyezve, kölcsönösen megtámasztják egymást. Ha a meghatározást kiterjesztjük, hogy többet tartalmazzon ezekből a kölcsönösen megtámasztó, együttműködő elemekből, akkor megkapjuk a többszörösen önhordó szerkezeteket. A többszörös szerkezetet két fajta csoportra oszthatjuk: többszörös és komplex szerkezetekre. A többszörösen kölcsönös gerendákat bővítéssel alakíthatjuk ki úgy, hogy külön elemeket adunk az egyes egységekhez, melyek a rácsos szerkezetet alkotják.

3.1. Geometria

Az önhordó keret egy komplex három-dimenziós szerkezet. Fontos a szerkezet geometriája és paraméterei, amelyek meghatározzák a megértését, annak, hogy lehetővé váljon egy önhordó szerkezetű épület tervezése és kivitelezése (8. ábra). A paraméterek, melyek meghatározzák a tartó egységeket, kör- és sokszög alakú geometriára a következők:

- Gerendák száma (n)
- A külső alátámasztások sugara (r_o)
- Gerendák metszéspontjainak sugara (r_i)
- A külső alátámasztás és a metszéspontok függőleges távolsága (H)
- A gerendák középvonalának függőleges távolsága a metszéspontokban (h_2)
- A gerendák ferde hossza (L)



8. ábra A szerkezet geometriai paraméterei

Ezen paraméterek egymásra utaltságának származtatási alapja a trigonometria, mint ahogy Chilton és Choo (1992) javasolta, egyenletekből meghatározható. Ezekben az egyenletekben, θ a gerendák felülnézeti elforgatási szöge, x a gerenda tervezett vetületi hossza, és x_1 és x_2 a metszéspont és a gerenda végeinek vetületi távolsága.

1. $\theta = 360/n$
2. $x_2 = 2r_i \cdot \sin \theta/2$
3. $x = x_1 + x_2$
4. $h_i = H \cdot x_i/x$
5. $h_2 = H - h_1$
6. $L = (x^2 + H^2)^{1/2}$

3.2. Paraméterek változtatása

A bevágás mérete ugyancsak függ a gerendák szélességétől és a dőlésszögüktől. A bemetszés gyengíti a felsőbb gerendát a nyíróerő egy pontján és a közös megerősítést teszi szükségessé.

Az önhordó gerendák méreteit egyértelműen meghatározzák a tető terhelései (önsúly, szél, hó és bizonyos körülmények közt a földrengések terhei), valamint az áthidalandó távolság.

3.3. Anyagok

Az önhordó szerkezeteket, elméletileg bármely fő építőanyagból ki lehet alakítani (acél, fa, beton). Ugyanakkor, a háromdimenziós struktúra komplex geometriája és az alacsony önsúly szükségessége, azt jelenti, hogy az (előregyártott) beton nem igazán előnyös anyag. Ha a tervező világosan átlátja a szerkezet geometriáját, akkor a fa elemeket a műszaki dokumentációja alapján könnyen le- és ki- lehet vágatni, majd készen a beépítés helyszínére szállítani.

Az acél alkalmazásánál a főelemek közötti kapcsolat kialakítása lehet bonyolultabb, a tervezés és gyártás során.

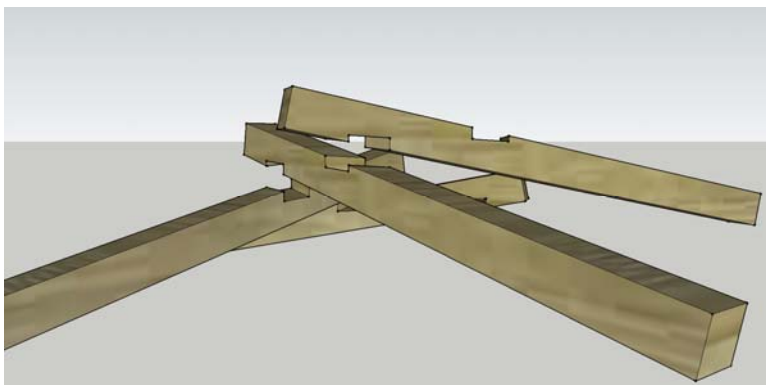
A legtöbb önhordó szerkezetű épület, melyet napjainkig építettek, mind 3-12 m fesztávolságú, ezért nem meglepő tehát, hogy a legtöbb közülük közönséges fából vagy ragasztott réteges fából készült. Az egyetlen megépült példa acélból, ami a mai napig ismert Ishii Spinning Háza, Tokyóban. Betonból az egyetlen tervezett RF szerkezet, a Mill Creek lakótelep Louis Kahntól, ami sajnos soha nem épült meg.

3.4. Kapcsolatok

A kapcsolatok tervei a gerendák között, valamint a gerenda-oszlop vagy gerenda elemek csatlakozása a koszorúhoz, mind fontosak a szerkezet megfelelő viselkedéséhez. A kapcsolat kialakítása is kulcsfontosságú a könnyű gyárthatóság és összeszerelés eléréséhez.

A gerendák közti kapcsolat, fa alapanyag esetén, megvalósítható a gerendák hornyolásával és azok egymáshoz rögzítésével a bevágásnál (9. ábra). A bevágás egy kritikus ponton gyengíti a gerendát, ott ahol nagy a nyíróerő. A megváltozott irányvonal módosíthatja a kapcsolat típusát. A hornyolást meglehetősen bonyolult és nagy figyelemmel kell kialakítani. A fa szarufákat előre be kell vágni. Ha nem érhető el a teljes pontosság, a tető nem lesz együttműködő.

Az egymásba illesztett gerendák átlapolják egymást. A napjainkig a legtöbb RF épület ilyen kapcsolatokkal épült.



9. ábra A gerendák egymásba illesztése

Az önhordó gerendák kapcsolatának másik módja a súrlódás használata, és az egymáson való elhelyezésük, amely szerkezetileg sokkal hatékonyabb, mint a korábban

említett hornyolás. Kan, a New Farmhouse épület tervezője az egyetlen, aki ezt a típust használta a kapcsolatoknál.

A harmadik lehetőség egy rögzített kapcsolat használata és az elemek kiékelése ott, ahol érintkeznek egymással (10. ábra). Ez szerkezetileg nagyon hatékony lenne, mivel nem csökkenti a szakasz vastagságát. Továbbá, ez a fajta kapcsolatot könnyebb lenne elkészíteni, mivel nincs szükség előzetes vágásokra a bonyolult hornyolásokhoz.

Ezt a kapcsolatot azonban csak kiselemes modelleknél használták, a mai napig nem épült belőle teljes méretű épület.



10. ábra Az elemek kiékelése

A bemutatott kapcsolatok négyszögletű fa gerenda elemek összekapcsolására alkalmasak. A kör-fa profilokhoz a kötözött bambusz kapcsolat használható, vagy keresztül lehet fúrni az elemeket és fém kapcsokkal csatlakoztatni.

Amikor különböző anyagokból építünk kölcsönös szerkezetet, mint például acél vagy beton, a kapcsolatokat úgy kell kialakítani, hogy megfeleljen a használt anyagnak.

3.5. A fa használata

Japán híres a fa használatáról az építészetben. A japán hagyomány során, a fák voltak az istentisztelet tárgyai és a 'fák isteni természetét emelték a művészethez, amely érezhető a fából való építészetben' (Process- Architecture, 1981). Fő használata a faszerkezetnek egy pillér-gerenda szerkezet volt, valószínűleg földrengés elleni

védekezéshez. A faanyagú építést Japánban a tökéletességig fejlesztették, különösen az illesztések részleteit, amelyek kifinomult módszerei a földrengés energiájának elnyelésére.

Amióta csak írásos feljegyzések vannak a japán történelem eseményeiről, találunk bennük leírásokat földrengésekről. Japán a világ földrengések által leginkább sújtott területén fekszik. Így ennek a szerkezetnek a használata földrajzi szükségszerűség ezen a területen. Az építészetben olyan megoldásokat kellett találni, melyek a nagy mechanikai behatásoknak ellenáll és könnyen újraépíthető.

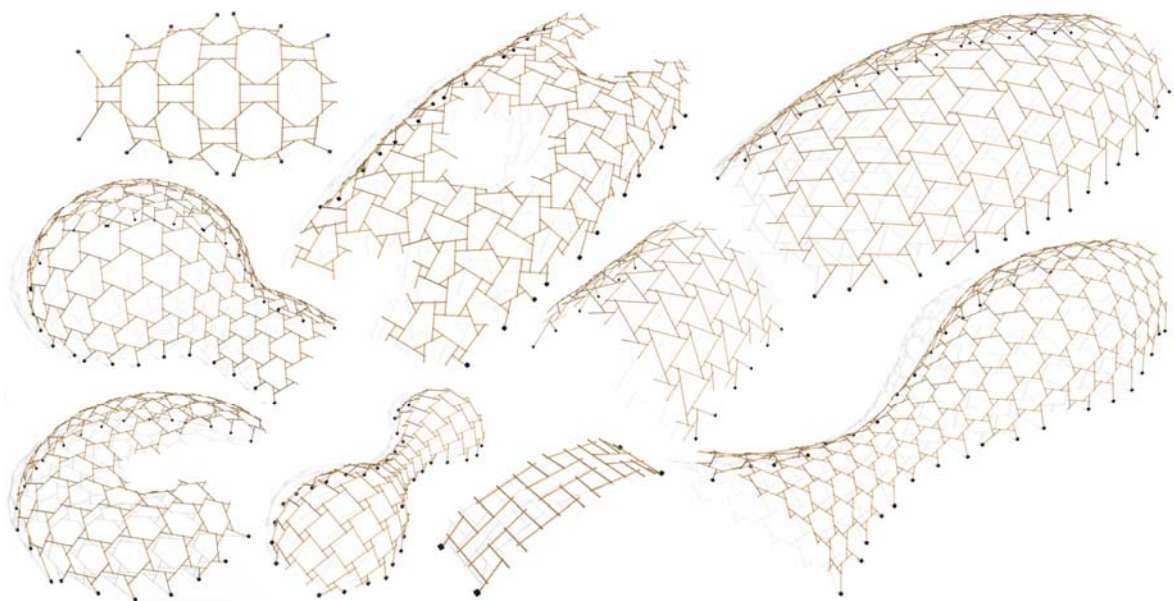
A fát mindig különös gonddal használták, egyik oka valószínűleg a vallás. Meggyőződésük volt, hogy ha egy fa anyagú templom tűzvészben elvész, akkor az épületben használt fa lelke a mennybe emelkedik. A fa egy 'élő' dolog volt, ezért amikor építésben használták mindig a növésnek megfelelő irányban építették be.

4. NEXORADE ÉPÍTÉSI RENDSZER FELÉPÍTÉSE

Nexorade szerkezetek: Önhordó három-dimenziós szerkezetek, amely három vagy több alkotóelemből épülnek fel, kialakítva egy zárt egységet.

Az önhordó háromdimenziós szerkezet esetében a kezdő modulnak tartalmaznia kell legalább három alkotót (a háromszög kialakítása az első a minimális felülethez) melyek úgy vannak elrendezve, hogy egy zárt rendszert alkotnak, és elemei kölcsönösen kiegészítik egymást. [2]

Ezek a szerkezetek lehetővé teszik bármilyen forma megvalósítását, így megkapva a végső körvonalat, amely meglehetősen stabil. Az önhordó szerkezetek jelentős terhelések viselésére alkalmasak. Egy elem esetleges törése az egész rendszert veszélyezteti, ez általában így van az együttműködő szerkezeteknél.

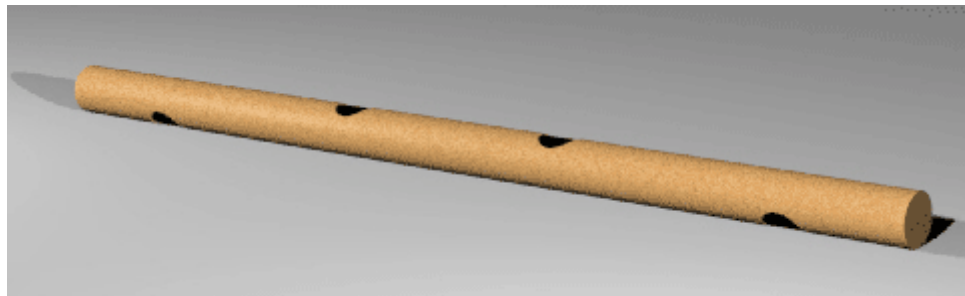


11. ábra Nexorade szerkezetek

4.1. Kapcsolati rendszer

A kapcsolatok kialakításának egyszerű módja egyetlen 'előírás', mely szabályozza a szerkezetet. Egy úgynevezett 'plusz – mínusz – mínusz – plusz' (+ - - +) szabály. Ez azt jelenti, hogy az egyes elemek a szerkezetben négy helyen kapcsolódnak négy másik elemhez, és a csatlakozásuk attól függ, hogy melyik oldalon – alul vagy felül – helyezkedik el a másik elem. Az elemek végén, a másik elem hornyolása felett kell lennie, és a középső hornyolásoknak egy másik elem alatt kell lenniük. Tehát egy másik módja a

szabály értelmezésének a 'fölötte - alatta - alatta - fölötte'. Hasznos emlékeztető, hogy a rovátkák az elemen mindig felfelé legyenek, hogy a tetejére lehessen csatlakoztatni a másik elemet. (12.ábra)



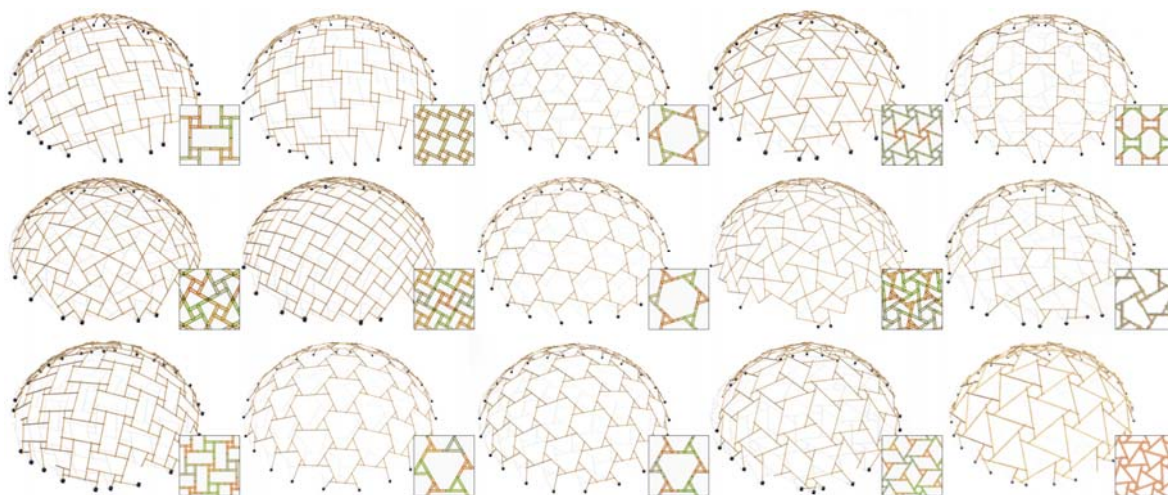
12. ábra Kapcsolódási helyek

5. KÍSÉRLETEZÉSEK

A digitális (azon belül is a parametrikus) módszer - furcsa módon - elengedhetetlen kelléke a kézi makett volt. A parametrikus módszertan nehézsége pont abban áll, hogy a tervező szabadjára engedi a formát, hagyja, hogy a számítógép bevitt paraméterek alapján elvégezze a modellezést. A folyamat megértése látszólag egyszerű (hiszen csak paraméterek változnak), a tervezői szemlélet váltása viszont rendkívül bonyolult.

A tervezés során bármilyen geometrikus formát le lehet modellezni, majd azt felhasználva szerkezeti terveket készíteni. (13.ábra)

Az összetett geometriájú, matematikai képletekkel leírható formák alkalmazása a számítógépes gyártási folyamatoknak és kivitelezésnek köszönhetően vált lehetségessé.



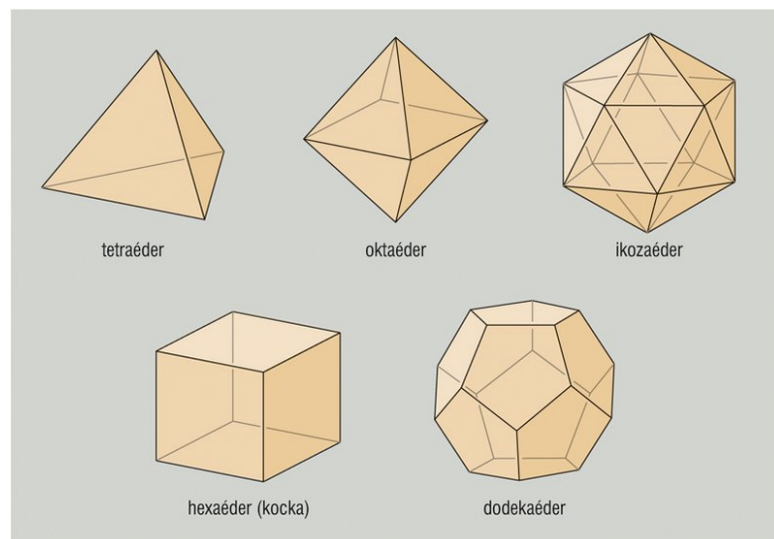
13. ábra Kitöltő mintázatok variációi

Bármilyen felület elkészíthető. Ha bonyolult, szabálytalan a szerkezet, minden egyes darab más és más lehet. Ebben az esetben mindegyikről külön statikai számítás, illetve dokumentáció elkészítése szükséges, mindegyiknek külön történik a gyártása. Hátránya, ha különbözőek az elemek, meg kell pontosan határozni az elemek helyszínre érkezésének, illetve elkészülésének sorrendjét, figyelemmel kell kísérni, hogy minden egyes elem a helyére legyen beépítve, mivel a szerkezet elemeiben minimális eltérések vannak. Ha két elem felcserélésre kerül, vagy egy elemet fordítva helyeznek el, már az is torzíthatja a tervezett formát, kapcsolatokat, végső esetben a szerkezet megépíthetőségét is meggyúsíthatja.

Választásom a 'kupolák'-ra esett, mert ezek a legegyszerűbb formák mind természetileg, mint matematikailag, és nagyon sok helyen megtalálható a gömb szerkezet. Visszavezetve a középkoron át egészen az eszkimókig, akik az igluk építésénél, még ha nem tudatosan is, de már alkalmazták ezt a technikát.

A gömb a szabályossága miatt az egyik legnehezebben létrehozható forma. Igénybevételi ellenálló képessége sokkal jobb, mint más formáknak. A modellezésnél, a gömböt leegyszerűsítve szabályos testté transzformálva kezdhethetjük el a szerkezet tervezését. Legegyszerűbb szabályos test a tetraéder, ezt követi a kocka, dodekaéder, ikozaéder stb. (14. ábra)

A tetraéder szerkezeteket már régebben is használták állványzathoz, sátrakhoz, pavilonokhoz. Ez a szerkezet még nagyon távol áll a gömbtől, ezért egy ennél bonyolultabb testet, a dodekaédert választottam. Ezen keresztül szeretném bemutatni egy ilyen kupola (gömb) tervezését.



14. ábra Arkhimédészi testek

5.1. Figyelembe veendő paraméterek

- Nexorade szerkezetek, és ezek alapvető szabálya és szerkesztése, a '+---+' módszer
- A létrehozandó kupola középsugara (a csatlakozási pontok, ezáltal egy gömbfelületre illeszthetőek, ez lesz a kupola legmeghatározóbb paramétere)

5.2. Tervezés menete

A tervezés során először egy dróthálós modellt kell létrehozni, mely nem testekből csak vonalakból áll, ezen láthatóak az egyszerűsített gömb méretei, amelyek alapján megtervezhetőek az alkotó elemek.

A tervezésnél, a geometriai tulajdonságok és a gömb szimmetriája miatt, lehetőségünk van 1 db szimmetrikus elem létrehozására, melyből az egész modell felépíthető. Ez elősegíti a moduláris gyártást, illetve leegyszerűsíti a tervezést, a gyártást, valamint a kivitelezést is.

5.3. Méretezés

Az ismert terhelés függvényében, a dróthálós modellünk vonalait testekké transzformáljuk, amely megalkotja a szerkezetet. Az informatika fejlődésének köszönhetően, különböző szoftverek állnak rendelkezésünkre, melyek segítségével egy szerkezet teherviselését meg lehet határozni. A dróthálós modell segítségével megalkothatjuk, azt az elemet, amelyből a kupola fel fog épülni. A drótháló testté transzformálása során csak paramétereket adunk meg:

- az anyag vastagsága,
- a héjvastagság.

Ezen paramétereket nem a megszokott módon, kézi számítással, hanem egy szoftver segítségével határozzuk meg.

A szoftver a drótvázás modell és a terhelés ismeretében, addig változtatja ezeket a paramétereket, amíg el nem jut a legkedvezőbb megoldásig. Ezen paraméterek alapján, már láthatóvá válik a szerkezet virtuális mása, és segítségével létre hozhatjuk az alkotó elemet,

Miután megterveztük ezt az elemet, el lehet készíteni a makettet.

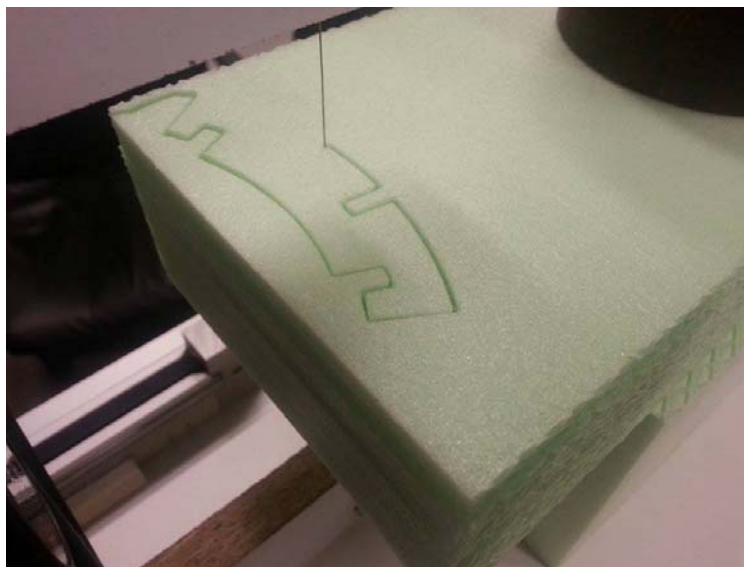
5.4. Makettezési módszer

5.4.1. Anyagválasztási lehetőségek

- 3d nyomtatás (pl.: abs) előnye: gyakorlatilag könnyen reprodukálható azonos elemek, akár az egész szerkezet egyben is kinyomtatható, mechanikai szilárdsága elegendő, hátránya viszont a magas költség.
- Fa. Előnye: azonos lehet a makett anyag a megépítendő valódi szerkezetével, de hátrányai, hogy drága, megmunkálása komplikált, kézi módszerekkel körülményes azonos méretbe előállítani, ilyen mennyiségű elemet (30-60 db/ kupola).
- Karton: előnye, hogy viszonylag olcsó, de hátránya, hogy nem elég merev, sérülékeny, kivágása is meglehetősen körülményes.
- Extrudált polisztirol hab: előnye, hogy olcsó, könnyű, mechanikai hatásoknak kellő mértékben ellenáll és egyszerű technológiával reprodukálhatóak az azonos elemek. Hátránya, hogy a vágáshoz használt hevített szálal állandó sebességgel kell mozgatni a pontos precíz éléhez.

A választásom ezek alapján az XPS-re esett, mert egy egyszerű felhevített huzallal könnyedén darabolható, és egyszerre akár több darabot is kivághatunk.

Az anyagválasztásnak köszönhetően a makettek készítésénél, a karon lévő számítógéppel vezérelt NC gép segítségével tudtam az elemeket létrehozni.

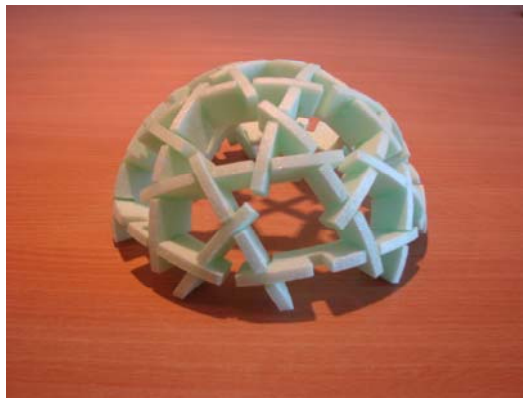


15. ábra Alkotóelem kivágása

A szoftver által meghatározott paramétereknek megfelelően, elkészült az alkotóelem műszaki rajza, mely alapján létrehoztunk egy G-kódot. Ennek segítségével a számítógéppel vezérelt NC gép képes kivágni az adott formát. A gép felbontásának és pontosságának köszönhetően, az így kivágott alkotóelemek nagy pontossággal megegyeznek. (a gép felbontása és ismétlési pontossága is 0,05 mm)

Ezekből az alkotóelemekből, a drótváz segítségével és a nexorade szabályok megtartása mellett összeállítható a tervezett szerkezet, kupola, illetve gömb (16. ábra). Az alkalmazott XPS habnak köszönhetően nem csak kupolát, hanem teljes gömböt is létrehozhatunk. (Fából ez az anyag rugalmatlansága miatt nem lehetséges.)

Az így összerakott gömbökön terhelési vizsgálatokat is végeztem, ezzel a módszerrel a szoftver számítási megbízhatóságát is le lehet ellenőrizni.



16. ábra A vizsgált kupola

5.5. Tervezési módszer bemutatása

A kupola méretétől és egyéb elvárásoktól függően, különböző szabályos testekből indulhatunk ki. Az alaptest befolyással lesz a kupola struktúrájára, de ezen belül a mintázat változtatható. Az alaptestet lapjaira bontva, olyan egységeket kell létrehozni, amelyek középpontosan szimmetrikusak és egymás mellé helyezve kölcsönösen kapcsolódnak.

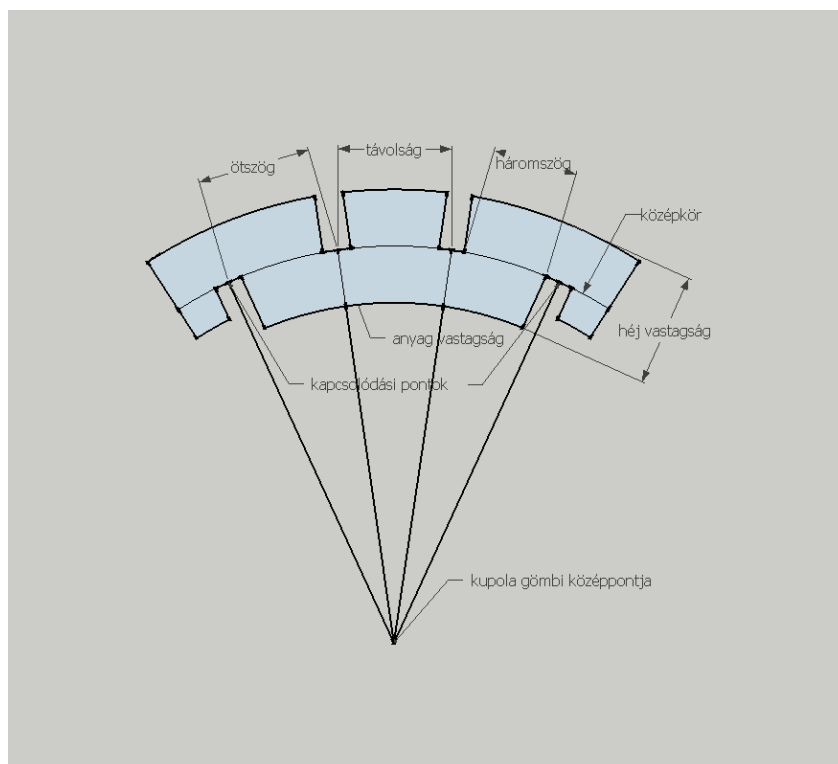
A dodekaéderből kiindulva minden lapunk szabályos ötszög, ezt kell lefedni egy olyan alap szerkezettel, amely a fenti kritériumoknak megfelel. Ezt legegyszerűbben az oldalak eltolásával és azok meghosszabbításával érhetjük el. Természetesen, ha szükség van rá, ennél bonyolultabb szerkezeteket is létrehozhatunk, ezáltal rövidebb alkotókkal nagyobb felületeket tudunk létrehozni, de ezekre is a szimmetria és kapcsolati szabályok kell teljesüljenek. Az így keletkező nexorade ötszögeket csatlakoztatva, a csatlakozási

pontokba háromszögek jönnek létre, mivel a dodekaéder minden csúcsába három él fut be. Így alakítható ki a legegyszerűbb nexorade szerkezet. A létrejövő háromszögek középpontjai egy szabályos dodekaéder csúcsait fogja kiadni, melyek a kupola középgömbjén helyezkednek el. A mintázat kialakítása azon múlik, hogy az ötszög oldalait mennyire toljuk el. Az ötszög méreteit és a csatlakozó háromszögek méreteit, a nyújtás mértékével és a kapcsolódási pontok helyzetével változtathatjuk.

Az általam tervezett kupolánál a szimmetria és a szabályosság előtt tisztelegve, az ötszögek és háromszögek oldalhosszát és a sokszögek távolságát is azonosra választottam. Ezzel egy természet közeli térkitöltést hoztam létre, nem különösebben nagy áttörésekkel.

Miután ezeket a paramétereket meghatároztuk, megtudjuk szerkeszteni az elemek középvonalát. Az elem középvonala egy körív lesz, melyre egymás mellé fel kell mérni a háromszög oldalhosszát, a háromszög és ötszög távolságát, illetve az ötszög oldalhosszát. Ez a négy pont fog kapcsolódni a többi elemmel. A középvonal síkidommá transzformálásakor az alapján kell eljárnunk, hogy melyik oldalon, milyen felületet szeretnénk létrehozni. Ha mindkét oldalon (kívül és belül is) egyenes alkotókat választunk, akkor egy olyan szerkezetet kapunk, melyen megfigyelhetjük a nexorád szerkezetek sajátosságait. Íves alkotót használva a szerkezet gömbi tulajdonságokat mutat. Ebből adódóan, ez az elem lehet körívszelet, körcikkszelet, vagy egy egyszerű téglalap. A csatlakozási pontok kialakításánál figyelembe kell vennünk a meghatározott paramétereket és az alapszabályokat. A kapcsolódási pontokat az elem körív középpontjával összekötve alakíthatjuk ki. Ezen vonalak szimmetrikus eltolásával az elemvastagságnak megfelelően, részeket metszhetünk ki az előbb szerkesztett síkidomból (17. ábra).

A dodekaéder köré írható gömb sugarából meghatározhatjuk az alkotóelem hosszát, amelyet három részre kell osztani. Amennyiben ezek közül a háromszögek és ötszögek oldalhosszát azonosra választjuk, a keletkező elem szimmetrikus lesz (a háromszög és ötszög távolsága nem kell megegyezzen a szimmetriához).



17. ábra Az alkotóelem paraméterei

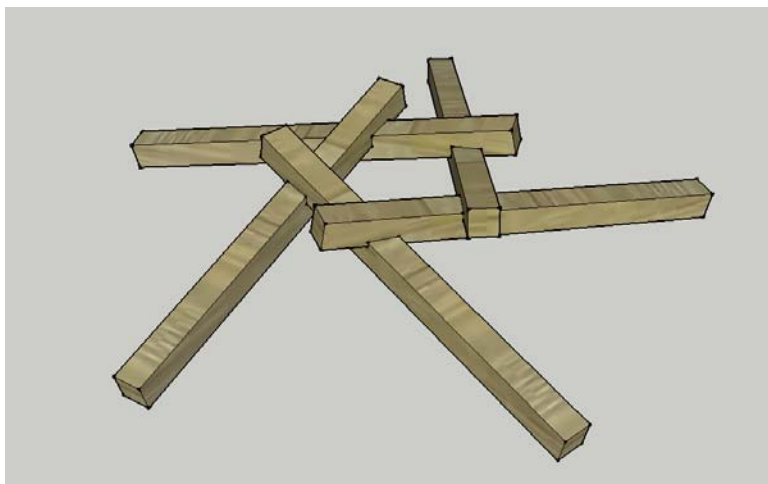
5.5.1. Szoftveres modellezés

Ezek a szerkezetek Grasshopper programmal tervezhetők és modellezhetők. Ez egy grafikus algoritmus szerkesztő program, amely a Rhino 3D modellező program egyik eszköze.

A magyar építészkutatás egy elhanyagolt területe a digitális, algoritmikus tervezés. A Grasshopper nevű program a parametrikus szerkezeti és látványtervezés legkönnyebben elsajátítható és egyben egyik leghatékonyabb eszköze, amely egészen új lehetőségeket ad az építészek kezébe. Legyen szó akár szokatlan alakzatok vagy terek formakereséséről vagy szerkezetek optimalizálásáról, a parametria ismeretek lassan elengedhetetlen részét képezik a tervezésnek. [3]

Mivel ezt bárki számára felhasználható anyagnak szántam, ezért ingyenes szoftvereket használtam a tervezéshez, mint a Google Sketchup (18. ábra). Ebből a programból a körvonalat exportálva hozhatjuk létre azt a G-codet, amely segítségével kivághatjuk az elemeket. Akár több lapot egymásra helyezve is elvégezhetjük a vágást, így gyorsan elkészülnek az elemek, melyekből ezután el lehet kezdeni a szerkezet összeállítását. A szerkezeti elemeket külön és összeépített állapotban is terhelési

méréseknek vettem alá. Mivel nem precíziós mérésről van szó, hanem kutatási mérésről, így egy mindenki számára elérhető alternatív módszert alkalmaztam.



18. ábra Google Sketchup modell

5.5.2. Terhelési vizsgálat

A kupola elkészülte után az alsó elemek rögzítéséről kell gondoskodni a terhelési mérések megkezdése előtt. Az előbb említett módszerrel XPS habból egyszerűen létrehozhatunk egy koszorút, mely megtámasztja a szerkezetet, és így hasonló erők ébrednek, mint ha ténylegesen egy épület kupolájaként lenne beépítve.

A mérés során arra voltam kíváncsi, hogy az így létrehozott szerkezet a saját tömegéhez képest mekkora erőt visel el, roncsolódás nélkül. Egy hagyományos épületnél a tetőszerkezetnek a saját súlyához mérhető erőket kell csak elviselnie, de itt legalább egy nagyságrenddel nagyobb teherviselési képességre számítottam a makett kis tömege miatt.

Első mérésként meg kell határozni a makett tömegét. Ez történhetne a felhasznált anyag térfogata és az alapanyag sűrűsége ismeretében, de ehelyett egy digitális mérleggel mértem meg a tömegét. Ennél a makettnél ez a tömeg igen csekély, mindössze 4 gramm, mely 30 db alkotóelemből áll.

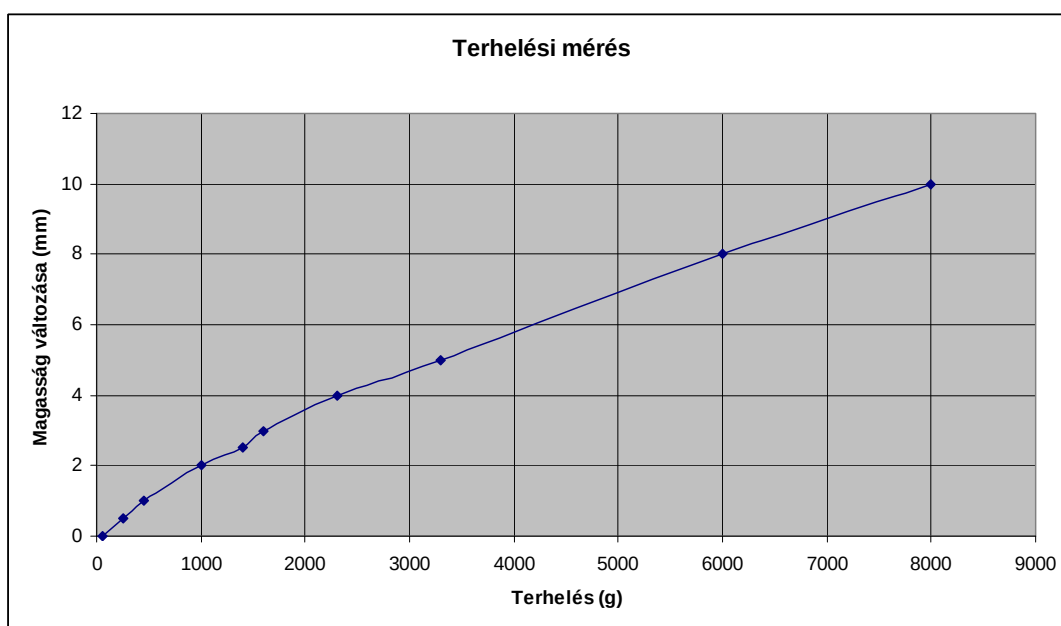
Miután a koszorút a makett köré helyeztem, elkezdtem terhelni és figyeltem a viselkedését. Először kis lépésekben terheltem, majd látván a viselkedését és a teherbírását nagyobb lépésekben növeltem. Egy valódi kupola terhelése természetesen nem hasonlít az én általam elvégzett mérésre, mert az épületeknél megoszló terhelésekről beszélhetünk (például: hó teher). Jelen mérésnél a kupola felső alkotó elemét terheltem, amely egy igen

szélsőséges eset, és sokkal jobban igénybe veszi a szerkezetet, mint a megosztott terhelés. Először egy poharat helyeztem a makett tetejére, melynek a tömegéből számolható a terhelő erő, majd ebbe a pohárba kezdtem vizet tölteni. Az eredményeket az alábbi táblázatban foglaltam össze. Később a terhelés növeléséhez a poharat egy nagyobb térfogatú üvegre cseréltem, mellyel jóval nagyobb terhelést tudtam modellezni. Az eredmény nagyon meglepett, már azután is, hogy a pohár megtelt, a szerkezet gyakorlatilag a saját tömegének a 100 szorosát elviselte. Ezek után már csak az volt a kérdés hogy mikor érkezik el a kritikus pont, és melyik lesz a leggyengébb, legnagyobb igénybevételnek kitett elem.

Mérés száma	Terhelés súlya	Alakváltozás mértéke	Az elmozdulás %-os aránya	Megjegyzés
1. mérés	57 gr	0 mm	0 %	Nem látható változás
2. mérés	250 gr	0,5 mm	0,67 %	Nem látható változás
3. mérés	450 gr	1 mm	1,3 %	Rugalmas változás
4. mérés	1000 gr	2 mm	2,6 %	Rugalmas változás
5. mérés	1400 gr	2,5 mm	3,3 %	Rugalmas változás
6. mérés	1600 gr	3 mm	4,0 %	Jól megfigyelhető az anyag rugalmas alakváltozása
7. mérés	2300 gr	4 mm	5,3 %	Rugalmas változás
8. mérés	3300 gr	5 mm	6,7 %	Rugalmas változás
9. mérés	6000 gr	8 mm	1,06 %	Rugalmas változás
10. mérés	8000 gr	10 mm	1,33 %	Maradandó változás

Bebizonyosodott, hogy a szerkezet együttesen veszi fel a terheket:

- 1000-szeres terhelés mellett, a szerkezet deformálódott, de a terhelés megszüntetése után visszanyerte eredeti formáját,
- 2000-szeres terhelés mellett, a szerkezet maradandóan deformálódott, de még mindig nem törött össze.



19. ábra Terhelési mérés szemléltetése

A mérés alapján a grafikonon jól látszik a terhelés és a méretváltozás közti lineáris összefüggés. (19. ábra)

A terhelés alapján ezt az eredményt vártuk, de a pontos tulajdonságok meghatározása érdekében további mérések váltak szükségessé. A szimuláció további finomításával pontosabban meghatározható, hogy mekkora lesz az elviselhető terhelés.

5.6. Pálcika modellezés

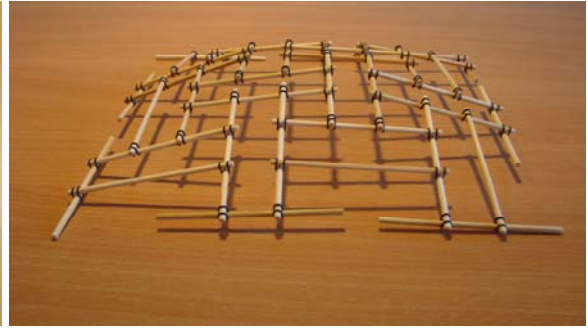
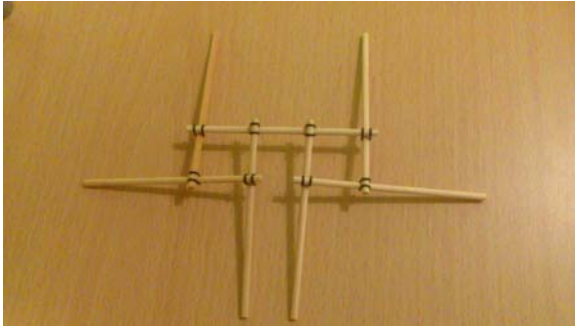
A legjobb, ha a modellt padlószőnyegen vagy egy asztalterítővel fedett asztalon építjük. A fa padlók és asztalok túl csúszósak lehetnek.

Minden mintának van egy kezdő alapja, két kiinduló forma javasolt, egy háromszög vagy egy négyszög. Más alakzatokkal is lehet kezdeni, de ezek tartják meg a legkönnyebben a minta szép és helyes összehangoltságát. A négyszögből épített formák sokkal stabilabbak, mint a háromszögből épített. [4]

Ez minden, amit tudni kell a szerkezet megépítéséhez, és minden újabb darabot ugyanúgy kell hozzáadni. Helyezze az új elem végét egy másik elem hornyolására, emelje meg bármelyik elemet, melyet megtámasztja az új elem bevágása. A trükk, hogy ne vesszünk el a mintában és különösen a szabályhoz való ragaszkodás: mindig fölötte – alatta – alatta – fölötte.

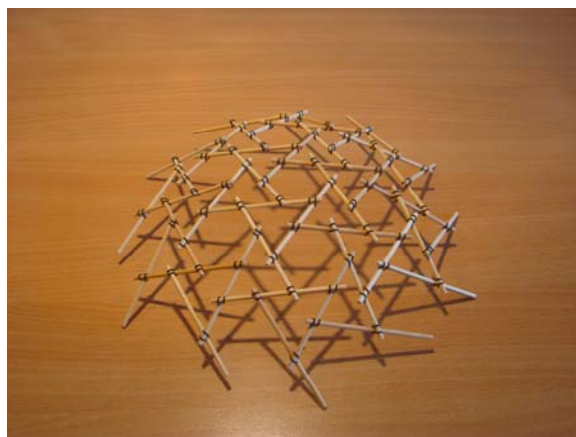
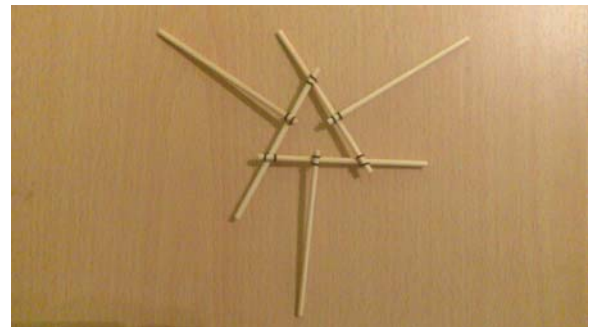
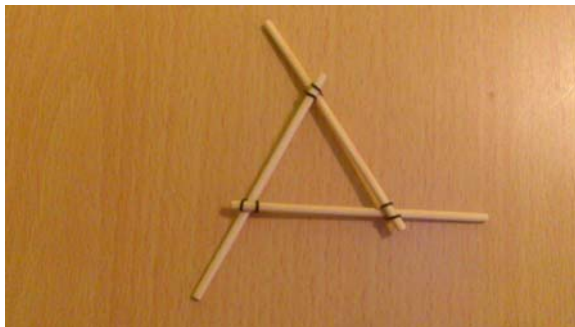
5.6.1. Első példa

A vázlat bemutat egy mintát, amely váltakoztatja az egy egységű négyzetet, az egy-egység széles és három egység hosszú téglalappal. Úgy tűnik, ez a legpraktikusabb lefedési módja egy téglalap területnek. Egy egységnyi négyzet megépítésével kell kezdeni. Az egyik pálcika szabad végéhez kell építeni egy újabb négyzetet, amely már az ellenkező irányba fog fordulni. Ha az eredeti négyzethez hozzáépítjük a pálcikákat, az óramutatóval ellentétes irányba lesznek, továbbépítve a második négyzetet az óramutató járásával megegyező irányt adja ki. Továbbra is az eredeti négyszöget kell kialakítani és ezt folytatni kisebb négyszögekkel.



5.6.2. Második példa

A harmadik példánál egy két-egységű háromszöget vettem alapul. Kezdve egy háromszöggel és az új pálcikákat úgy elhelyezve a háromszög oldalainak köztes részén úgy, hogy azok párhuzamosak legyenek a már elhelyezett pálcákkal. Ezek újabb háromszögeket adnak ki, az új háromszögek szélső elemeihez csatlakoztatva az eredetivel ismét párhuzamos elemeket, a háromszögek közt kialakulnak az ötszögek. A minta mindig úgy ismétlődik, hogy az ötszögeket háromszögek veszik körül.



6. EREDMÉNYEK

6.1. Összegzés

Egy egyszerű kupola megtervezésén keresztül, sikerült bemutatni azt a módszert, melyet felhasználva arkhimédészi testeket alapul véve, tetszőleges kupolákat hozhatunk létre. Az így létrehozott kupolák matematikailag egyszerűen leírhatók és könnyen modellezhetők. A szerkezet legnagyobb előnye, hogy egyféle alkotóelemből hozhatjuk létre az egész kupolát.

Miért jó ez?

- Kevesebb a dokumentáció,
- Nagy mennyiségben gyártva olcsóbb,
- Sokkal egyszerűbb a gyártása,
- Logisztikailag sokkal könnyebben biztosítható a szükséges építőanyagot megléte,
- Ütemtervezésnél egyszerűsíti a helyzetet, mert egy elemből épül fel,
- Az építés helyszínén nincs szükség az elemek megkülönböztetésére,
- Mivel a szerkezet egyféle elemből épül fel, logisztikai szakemberre nincs szükség.

6.2. További tervek

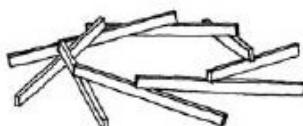
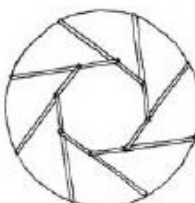
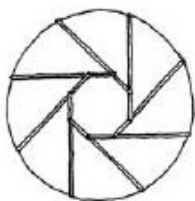
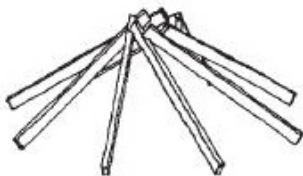
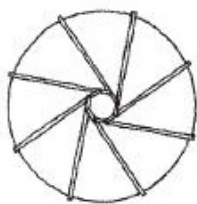
A kutatásom további céljai a jövőben, többek között tanulmányozni, hogy lehetséges-e nem arkhimédészi testekre kiterjeszteni a módszert, ha igen ezek tervezési menetének vizsgálata.

A szabályos test lapjainak kitöltési mintázatainak vizsgálata, ezáltal újabb modellek létrehozása. Ezeknél a különböző modellezési módszerek használata.

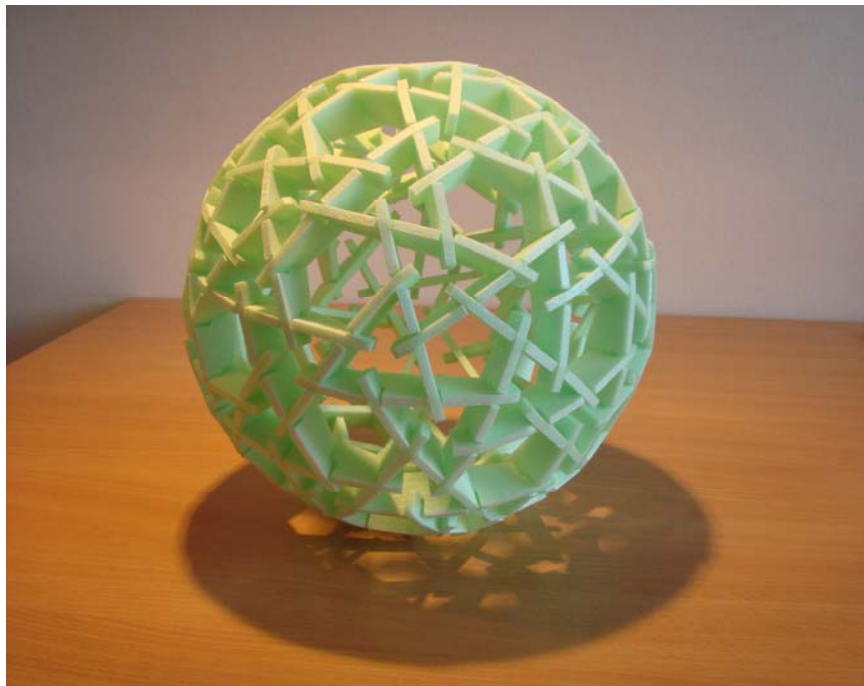
Az anyaghasználat tanulmányozása, lehetséges-e a szerkezet elemeit különböző anyagok kombinációjával kialakítani. Könnyíti-e ez a szerkezet súlyát, illetve megváltoztatja-e a terhek eloszlását.

7. MELLÉKLETEK

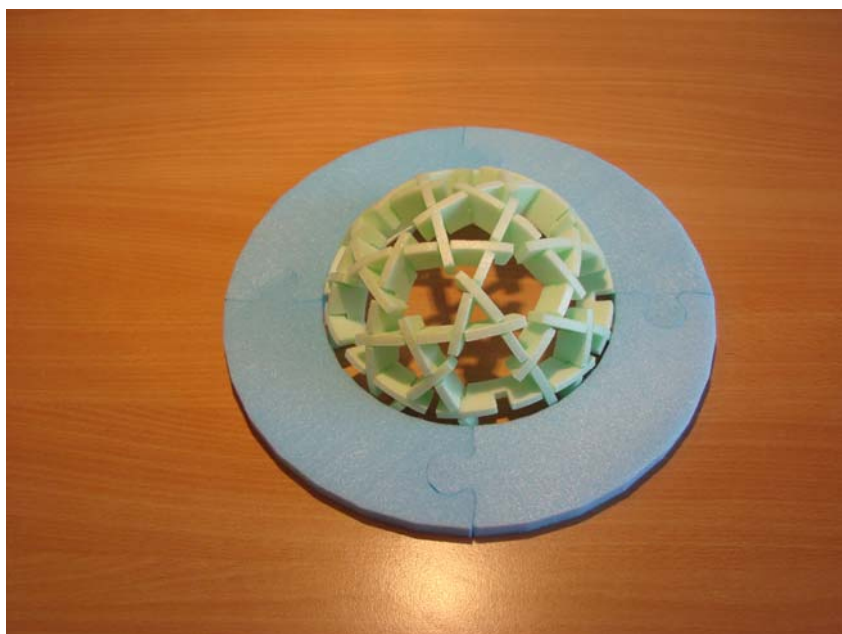
Kapcsolatok a hajlásszög és a belső sugár között:



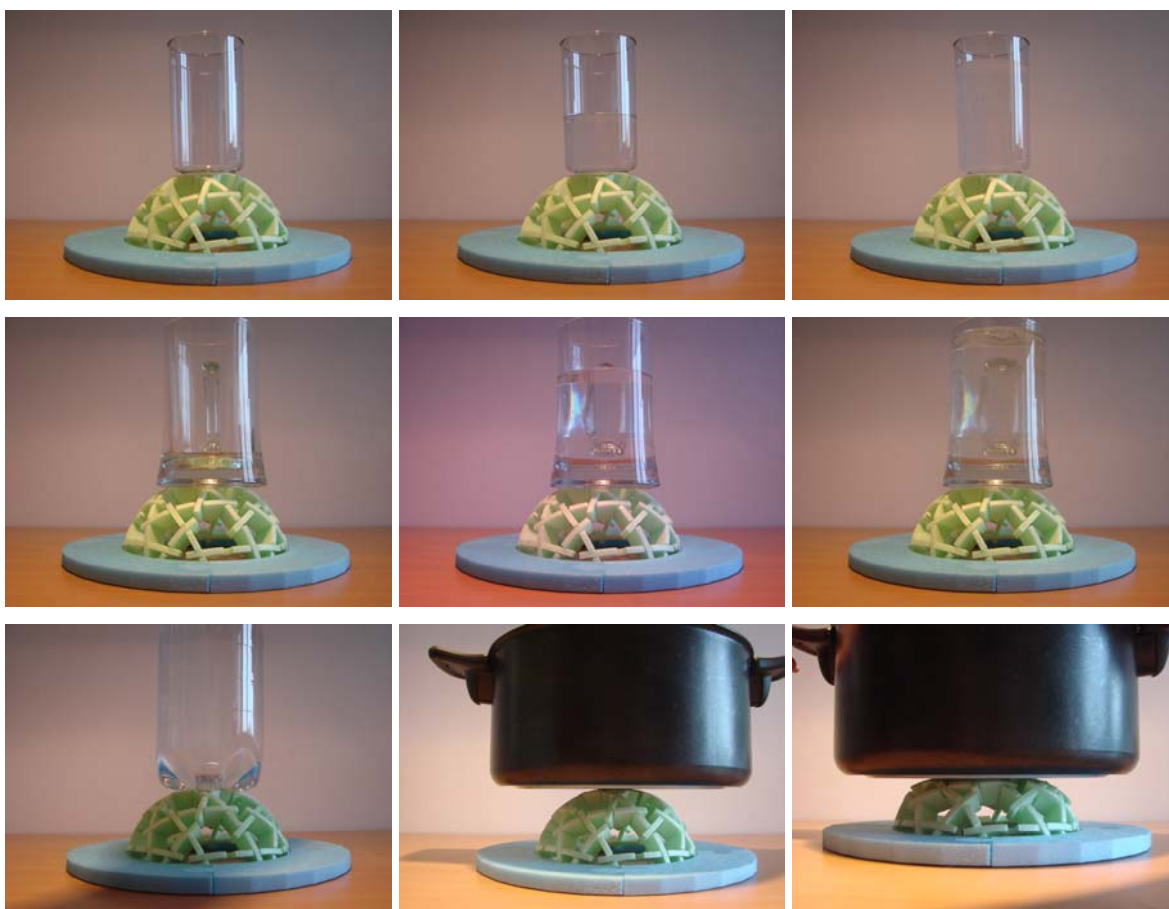
Az alkalmazott módszerrel készített gömbök:



A vizsgált kupola a koszorúval:



Terhelési vizsgálat:



8. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] <http://www.parametricism.co.uk/blog/project-tag/nexorade/>

Olga Popovic Larsen: RECIPROCAL FRAME ARCHITECTURE (2008)

<http://tensegritywiki.blogspot.hu/2010/10/nexorades-and-tensegrity.html>

- [2] <http://www3.ntu.edu.sg/home/cwfu/papers/recipframe/>

- [3] <http://www.eszak.org.hu/munkaink/grasshopper-workshop>

- [4] <http://www.rinusroelofs.nl/structure/davinci-sticks/examples/examples.html>

<http://smia-experimental.com/2014/03/12/workshop-2013/>

O. Baverel, C. Douthe, J.-F. Caron: Nexorade : a structure for free form architecture (2006)

<https://archiscriptor.wordpress.com/tag/soft/>

OLIVIER L. S. BAVEREL: NEXORADES: A FAMILY OF INTERWOVEN SPACE STRUCTURES

<http://www.arch2o.com/plywood-pavilion-houses-graduate-exhibition-nathan>

melenbrink-samo-pedersen-and-shibu-raman/

9. NYILATKOZAT

Aláírással igazolom, hogy a Tudományos Diákok Körének dolgozatát saját munkám, a felhasznált irodalmat korrekt módon kezeltem és a munkára vonatkozó jogszabályokat betartottam.

Pécs, 2015. január 6.

.....
Mózes Szilvia