

Doktori (PhD) értekezés
Soproni Egyetem
Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar
Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola
Vezető: Prof. Dr. Németh Róbert egyetemi tanár

Doktori program: Rosttechnikai és nanotechnológiai tudományok
Programvezető: Prof. Dr. Winkler András
Tudományág: anyagtudomány és technológiák

**BIOKOMPOZITOK ÉPÍTÉSZEI ALKALMAZÁSA:
*EGY KÍSÉRLETI ÉPÍTMÉNY ELŐKÉSZÍTÉSE***

Készítette: Nagy Máté

Témavezető: Dr. habil Katona Vilmos

Sopron
2021

Kivonat

Biokompozitok építészeti alkalmazása: egy kísérleti építmény előkészítése

Jelen dolgozatban a kompozitok építészeti szerepét vizsgáljuk, majd leszűkítjük a vizsgálatot a biokompozitokban rejlő lehetőségekre. A kompozitok széles körű elterjedése nem csak átformálta az építészet évezredes arányrendszerét, de új építészeti formák elterjedéséhez is vezet. A kompozitok alkalmazása az acéllal erősített betonnal kezdődik, mellette jelenik meg a könnyűszerkezetes építészet, ami eleinte ragasztott fát, majd egyre többféle faalapú kompozitot használ fel, később pedig megjelennek a szálerősítésű kompozitok (FRP). A növényi szálakkal erősített kompozitok (NFRP) előnye, hogy könnyűek, kedvező hő és hangszigetelő képességgel rendelkeznek, környezetbarátak és olcsóbbak a többi kompozitnál. Napjainkban már rendelkezésre állnak biológiai eredetű és biológiailag lebomló polimerek, így növényi szálak felhasználásával lehetőség nyílik szerkezeti biokompozitok gyártására, beépítésére bár ezek még kísérleti szakaszban tartanak.

A dolgozatban esettanulmányok sorát vizsgáljuk meg, különféle könnyűszerkezeti kompozitok, elsősorban FRP alkalmazására, ezzel alkotva képet az építészetben betöltött szerepükről. Ezt követően elkészítünk egy saját biokompozit gyártmányt jutaszövet és politejsav (PLA) réteges fektetésével. Roncsolásos vizsgálattal és mikroszkópos megfigyeléssel igyekeztük feltárni a kísérleti gyártmányok szilárdsági tulajdonságait és kialakítani egy ideális gyártástechnológiát. Az esettanulmányok és az anyagkísérletek tükrében pedig kialakítunk egy formakeresési módszert, amivel elemes, könnyű héjszerkezet tervezhető.

Abstract

Architectural Application of Biocomposites: Preparation of an Experimental Structure

Present study discusses the role of composite materials in architecture focusing on the possibilities of biocomposite applications. Spread of composite materials not just reshaped the ancient proportions of architecture but also leads to new architectural forms. Application of composites begun with reinforced concrete and went on with lightweight construction. Lightweight materials were initially laminated timber and other wood-based composites, but later fiber reinforced polymers (FRP) appeared. Natural fiber reinforced polymers (NFRP) are lightweight, have good heat and sound insulation, environmental friendly and cheaper than other composites. Nowadays, bio-based and bio-degradable polymers are already available. Therefore with the application of plant fibers, there is an opportunity to manufacture structural biocomposites. Even so, most of them are still in experimental state.

This study reviews a series of case studies on application of various lightweight composite materials, mostly FRP applications, to form an image on the role of these materials in architecture. We also created an experimental biocomposite product by the press lamination of hessian and polylactic acid (PLA). To investigate the mechanical abilities of specimens and to develop the manufacturing technology, destructive tests and microscope observations were executed. Finally, we developed a form finding method for lightweight shell construction design in the light of case studies and experimental production.

Tartalomjegyzék

1	Bevezető	5
2	Kompozitanyagok szerepe az építészetben	7
2.1	A hajlított építészet	7
2.2	FRP kompozitok térnyerése az építőiparban	12
2.3	Technológiai és építészeti kísérletek FRP építményekkel	14
2.4	FRP kompozitok a járműiparban	17
2.5	NFRP kompozitok a járműiparban	18
2.6	NFRP belsőépítészet és bútor	19
2.7	NFRP kísérleti tartószerkezetek	25
3	Biokompozitok áttekintése	27
3.1	Biokompozit fogalom	27
3.2	Természetes szálak	28
3.2.1	Jutaszál	31
3.3	Biopolimerek	32
3.3.1	Politejsav	34
3.4	Növényi szállal erősített biopolimer kompozit	35
3.4.1	NFRP biokompozit szilárdsága	35
3.4.2	NFRP biokompozit technológiai lehetőségei	37
4	Egyenletes teherelosztású könnyűszerkezet lehetősége	41
4.1	Könnyűhék szerepe	41
4.2	A Formakeresés hagyományos módszerei	42
4.3	Formakeresés további módszerei: papírhajtogatás	50
4.4	Szalaghék	52
4.5	Szakaszosan nyomott hártya	54
4.6	Biokompozit alkatrészek kötése	56
4.6.1	Biokompozit híd kötései	56
4.6.2	Csavarkötés	57
4.6.3	Bepattanó kötések	58
4.6.4	Hegesztés és forrasztás	59
4.6.5	Fogazás	59
4.6.6	Varratok	60
5	NFRP héj tervezése	62
6	Következtetések	68
7	Tézisek	70
8	Tézisekhez tartozó közleményjegyzék	72

9	Köszönetnyilvánítás	73
10	Felhasznált irodalom	74
11	Képek, ábrák és táblázatok jegyzéke	83
12	Melléklet: Kísérleti gyártás és vizsgálatok összefoglalása	86
12.1.1	Gyártási paraméterek	86
12.1.1.1	Kötőanyag kezelés	87
12.1.1.2	Rostok szétesése tejsav hatására	87
12.2	Mechanikai vizsgálatok	88
12.2.1	Húzó igénybevétel	88
12.2.1.1	Kísérleti elrendezés	88
12.2.1.2	A1, A2 és A3 minták	88
12.2.1.3	C1, C2	90
12.2.1.4	Ellenőrzőminták	91
12.2.2	Hárompontos hajlítás	92
12.2.3	Nyomó szilárdság vizsgálata	93
12.2.4	Konfidenciaintervallum	96
12.3	Mikroszkópos megfigyelés	100
12.3.1	Próbatestek sértetlen felszíne	100
12.3.2	Roncsolt felületek tanulmányozása	100
12.3.2.1	Nagy szilárdságú próbatest	101
12.3.2.2	Alacsony szilárdságú próbatest	102

1 Bevezető

Az anyag és a forma elválaszthatatlanok egymástól, az anyag pedig mindig önazonos forma kialakítására törekszik – fejt ki Arisztotelész a Fizika című természetfilozófiai művében. Arisztotelész formaelméletét biológiai megfigyelések hatása alatt fejleszti ki és a folyamatot *entelecheiának*, önkiteljesítésnek nevezi. A szerves természet mellett a szervetlen természetet is a formák rendszere jellemzi, ami részben az anyagok szerkezetéből, részben pedig a rájuk ható erőkből következik. Ilyenek például a szilárd anyagok kristályszerkezete, az időjárás építő és romboló hatása a felszíni formákra és az olyan összetett folyamatok, mint a cseppkőképződés. Az építészet és tárgykultúra formanyelvének fejlődését viszont első sorban a hasznosság és különféle esztétikai szempontok alakítják. Ennek ellenére az emberi kéz alkotásainál megfigyelhető a „csinált és a keletkezett” elemek keveredése, ami végső soron azt jelenti, hogy nem csak az ember alakítja az anyagot, de az anyagok is alakítják az embert. Az új anyagok elterjedésével pedig új formakeresési módszerek terjednek el az építészetben és a tárgykultúrában.

Az elmúlt évtizedekben rengeteg építészeti kísérletet hajtottak végre, és ezek közül jópárat az anyagok és technológiák fejlődése inspirálta. Ezek jobbra egy-egy műszaki újítás kiaknázásra alkalmas szerkesztési elvek, építési módszerek felismerését röviden az építészeti formanyelv kialakítását tűzik ki célul. A műszaki anyagok között jelenleg a kompozitok elterjedése a legnagyobb hatású, mint az acéllal erősített beton, ragasztott fa és üveg, illetve a különféle könnyűszerkezeti anyagok. A mesterséges anyagok térnyerése pedig rengeteg kérdést vet fel, hiszen legtöbbjükkel nincsenek hosszú távú tapasztalatok. Az új anyagok és technológiák elterjedése pedig nem csak mérnöki, hanem egészségügyi, környezetvédelmi és gazdasági kérdéseket is felvet, emiatt elengedhetetlen egyfajta holisztikus szemléletmód.

A biokompozitok alkalmazása széles körben elterjedt az elmúlt két évtized során a csomagolóiparban és a járműgyártásban, valamint az orvostudományban. Sokan egy fenntartható gazdaság zálogát látják bennük, mert szerves, megújuló alapanyagból készülnek, munkát adnak fejlődő mezőgazdasági régiók lakóinak, elhasználódnak pedig lebomlanak kímélve a környezetet. Az egyes alkalmazásokat elsősorban energiatudatosság és életciklus tervezés indokolja, mint különféle eldobható eszközök, vagy kisebb tömegű, olcsó szerkezeti elemek.

Az építészeti alkalmazások is felbukkannak, első sorban a könnyűszerkezetes építészet területén, és számos kísérleti építményt is létrehozott, ami az új könnyűszerkezeti kompozitok megismerését segíti és azok alkalmazási lehetőségeit kutatja. A biokompozitok kutatása elválaszthatatlan a kerámiaszálas és a faalapú kompozitoktól, mert hasonlóak a fizikai tulajdonságaik és a feldolgozási technikájában nagy átfedés mutatkozik. Míg a faalapú kompozitok az építészet és a bútortudomány területén elterjedtek és főleg lemez gyártmányok készülnek belőlük, a kerámia-kompozitokat kezdetől fogva a járműgyártáshoz használták. A gyártástechnológiára is jellemző az íves, térgörbe

formák kialakítása. A kompozitok történetével egyidős a minimális szerkezetek kutatása, és a könnyű és ultrakönnnyű szerkezetek építéséhez jelenleg is főként ezeket használják. Építészeti szempontból pedig a könnyűhéjak fejlődése sok újdonságot hozott az ezredfordulót követő évtizedekben.

Jelen dolgozat célja egy biokompozitból készült könnyűhéj előkészítése, amihez sajátos, szerkezeti és technológiai szempontból ideális formakereső modellt alkotunk meg. Az első fejezetben áttekintjük a kompozitok szerepét az építészetben. Összegyűjtöttük a történeti előzményeket és esettanulmányokat készítettünk a megvalósult példákról és eddig publikált kísérletekről. A továbbiakban részletesen áttekintjük a biokompozitokat, először fogalmi, majd technológiai szempontból. Erre azért van szükség, mert különböző források, gyakran eltérően használják a fogalmat, így szükségesnek látjuk egy saját munkadefiníció megalkotását.

A biokompozitok áttekintése után formakeresési módszereket keresünk egy lehetséges könnyűszerkezetes héj számára. A héjszerkezetek fejlődéstörténete szorosan összefügg a kompozitok fejlődésével, és a mechanikai szempontból ideális, takarékos, de mégis szilárd geometria keresése jellemzi. A héjszerkezet fejlődése tehát jelentős részben formakutatáson alapszik.

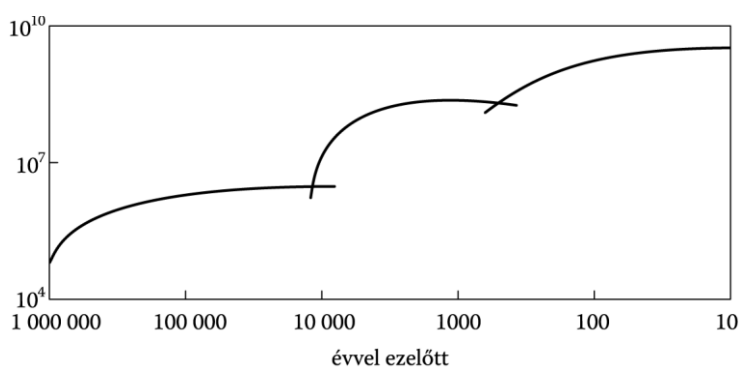
A kutatás során laboratóriumi kísérleteket is végeztünk, hogy bizonyítsuk a biokompozitok elméleti áttekintésének helyességét. Jutaszövet és PLA felhasználásával készítettünk kísérleti gyártmányokat és ezeket különféle vizsgálatoknak vetjük alá, hogy megismerjük a tulajdonságaikat. A próbatészek roncsolásos mechanikai vizsgálata és mikroszkópos megfigyelése alapján tökéletesítettük a kezdetben javasolt gyártástechnológiát.

Az utolsó fejezetben egy formakeresési módszert javasolok biokompozitból készült könnyűszerkezetes héj számára. Ehhez pedig az általunk készített kísérleti gyártmány tulajdonságait vesszük alapul. Először fizikai modell készült, hogy ezt megvizsgálva kisserkeszthessünk egy digitális modellt, ami később használható lesz a pavilon kisserkesztésére.

2 Kompozitanyagok szerepe az építészetben

2.1 A hajlított építészet

A történelem letűnt korszakait a legnagyobb természetességgel nevezték el a leletek uralkodó anyagairól kő, réz, bronz vagy vaskornak. Ezekből az anyagokból gyakran megmunkáló szerszámok és fegyverek készültek, vagyis az elnevezés közel sem a legtöbbet használt, mint inkább a legnagyobb teherbírású matériára utal. Ezzel szemben az építészet keveset változott a csiszolt kőkorszaktól az ipari forradalomig, főleg anyaghasználat szempontjából. Magyarországon például 1930-ban a lakóházak kétharmada volt vályogház, 2011-ben pedig ez az arány még mindig 25% körüli [KSH 2011]. Ugyanakkor, hogyha az elmúlt évszázadot egy anyagról kellene elnevezni, akkor az a szintetikus anyagok kora, vagy kompozit-korszak lenne. A hadiipar, fő anyagai az üveg és szénszál erősítésű műanyagok, az építésben pedig az acélbeton, üveg, ragasztott fa és különféle könnyűszerkezeti anyagok hódítottak teret.



1. ábra: A demográfiai növekedés ciklusai [Lőrinc 2016]

Az elmúlt két évszázad az anyagok és technológiák forradalmát hozta magával ezzel együtt pedig az építészeti forma is drámai átalakuláson ment át. Az ipari forradalmak és a demográfiai fordulat sosem látott mértékben alakítja át az emberiség arcát, hasonló léptékű változások mennek végbe, mint évezredekkel ezelőtt a neolitikus forradalom idején, amikor a vadászó-gyűjtögető népek letelepednek és gazdálkodásba fognak. Ekkor kezdődött meg az első városok építése, amivel kialakul a mai értelemben vett építészet és tárgykultúra. Hogyha megfigyeljük a demográfiai növekedés ciklusait (1. ábra), két törést látunk, amiből az első a neolitikus forradalom kezdete, a második pedig az ipari forradalom. A föld népességének robbanásszerű növekedése egyben az emberi életmód radikális változását is jelzi, mind társadalmi, kulturális mind technikai folyamatok kíséretében. Hogyha összehasonlítjuk a három korszak építészetét anyaghasználat szempontjából, az eredmény figyelemre méltó. [Lőrinc 2016]

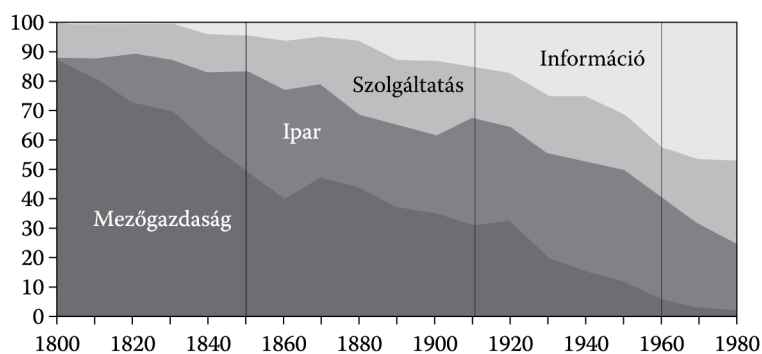
A vadászó-gyűjtögető illetve nomád népek főként sátor jellegű építményeket emelnek, ahol a szerkezetben a húzó igénybevételek dominálnak, és ez a tárgykultúráról is elmondható. Ezt nevezzük húzott építészetnek, ami főként növényi és állati eredetű szálakból készült sodronyokat,

szöveteket, bőroket valamint rúdelemeket használ, legfontosabb illesztési módszere pedig a kötés, amit ekkor még valóban kötéllel végeznek. Philip Drew ausztrál építészeti elméleti szakértő régészeti leletek, antropogiai gyűjtések alapján foglalja rendszerbe a sátrak és függőhidak építészetét és a *tesile architecture*, vagyis húzott építészet elnevezést javasolja ezekre. [Drew 1980]

A letelepedett népek építészete ezzel szemben az anyagok nyomószilárdságát aknázza ki. Ennek mintájára nevezem a letelepedett népek építészetét nyomott építészetnek, amit nagy nyomószilárdságú anyagok, kő, vályog, és téglák jellemeznek. A nyomott építészet fejlődése főként a kihajlás és a nyírások kiküszöbölése körül forog, olyan találmányokkal, mint a boltozat, támpillérek, támívek alkalmazása. Az eszt kiegészítőhúzott elemek, vonóvasak, bronzkapcsok általában rejve, mankóként vagy protézisként helyezkednek el az épületek tömegében. A piramisoktól a gótikus székesegyházakig egyre nagyobb fesztávok és egyre vékonyabb falak épülnek, de anyaghasználatát tekintve az építészet évezredek alatt csak csekély mértékben változott [Fátray 2011] [Déry 2020] [Katona 2021].

A XVIII. század második felétől viszont elterjednek a nagy mennyiségű és egyre olcsóbb fém alapanyagok. A nagy húzószilárdságú fém a hagyományos építészetet kiegészítve lehetőséget nyújt összetett igénybevételek felvételére, amivel nagymértékben megnő az épületek szilárdsága. Az új anyagok nagyobb fesztávot képesek lefedni sokkal kisebb keresztmetszettel. Ezek után már csak egy lépés az első széles körben alkalmazott szerkezeti kompozit, az acélbeton megjelenése. Az építészet évezredek arányrendszerében ezzel új fejezet nyílik. *„Ebből azután az következik, hogy az új művek karcsú, de sokkalta biztosabb vasbeton építőelemei nem keltik fel bennünk a biztosságnak és ünnepélyességnek azt az érzését, amit a tízszerre vastagabb, de tulajdonképpen gyöngébb kőszervezetek.”* Ovassuk Megyaszy István 1909-es, a Művészetben megjelent tanulmányában. Ezzel pedig az építész-feltaláló valójában az elkövetkezendő évszázad egyik legnagyobb építőművészeti kihívását foglalmazta meg [Baku et al. 2018].

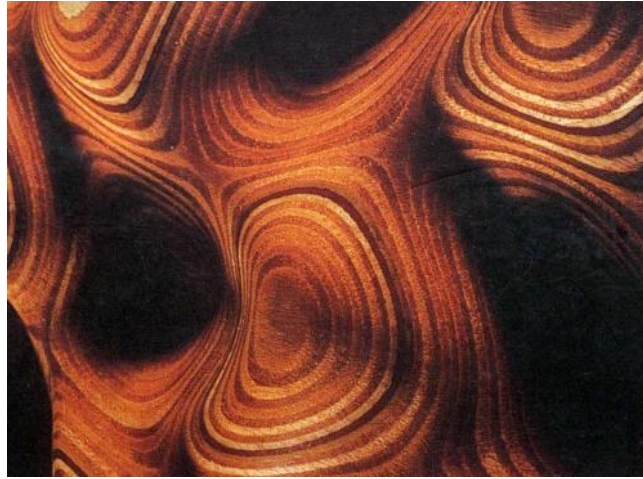
Robbanásszerű változást a háború utáni gazdasági fellendülés hoz, amit az ipari termelésre és fogyasztásra alapoztak. Ez jelentős hatást gyakorol az építészetre, hiszen elterjednek a gyáriparban előre gyártott épületszerkezetek, mint a betonpanel. A termelést pedig tovább ösztönzi a lakáséhség, ami Magyarországon már a háború előtt is fennállt. A kibontakozó hidegháború gazdasági versenyt hozott a két világrend között, a harc egyik fegyverneme pedig a kiállításépítés volt. A legnívósabb kereskedelmi kiállítások (expók) egyike a semleges Bécsben kapott helyet. Itt mutatják be az amerikai építőipar újításait, mint az üvegszállal erősített polyvinil chloride hullámlemez (1955), alumínium homlokzati rendszereket (1952) és különféle műanyag termékeket. A filozófiai szembenállást pedig tovább fokozza, hogy az amerikai ipar korszerű alapanyagainak és technológiáinak egy részét éppen a második világháború során fejlesztették ki hadászati célra [Platzer 2019].



2. ábra: Foglalkoztatottak az Egyesült Államokban gazdasági szektoronként, 1800–1980 [Lóric 2016]

A háborút követő, termelés alapú gazdaság végét 1973-es olajválság hozza el, ami megrázta a teljes világgazdaságot amivel megkezdődik az információs társadalom kiépülése (2. ábra). A megelőző évben került sor az Egyesült Államokban a Pruitt-Igoe lakótelep robbantásos bontására, ami a háború utáni ipari építészet végét jelzi az építészet történetében. Új tendenciák jelennek meg, felértékelődnek a regionális értékek és divatba jön az egyedi gyártás, valamint háttérbe szorul az elmúlt két évtized túlracionalizált építészeti stílusa. Ettől kezdve éli reneszánszát a faépítészet és a könnyűszerkezetes építés is megerősödik, ami további kompozitanyagok elterjedéséhez vezet, mint az OSB (*Oriented Strand Board*) vagy az LVL (*Laminated Veneer Lumber*). Ezek az átalakulások persze sokkal mélyebben érintették a járműipart, ahol a 80-as évektől egyre több fémalkatrészt vált fel műanyag, vagy valamilyen kompozit gyártmány, később pedig megjelennek a növényi alapú kompozitok. A járműipari fejlesztések egy része jelenik meg később az építészetben is [Zardini 2010].

A 20. századi építészek sokáig elzárkóznak az ábrázoló építészettől, vagyis hogy műszaki és kulturális hagyományok jelképeit jelenítsék meg a homlokzaton vagy belsőtérben és a tiszta építészeti tömeg felé fordulnak főként a konstruktív vagy kubista művészet hatása alatt. Ennek ellenére sokáig az örökül kapott építészeti eszközöket alkalmazzák, Mies van der Rohe oszloppal és pillérrel, Le Corbusier a tetővel, homlokzattal és oszloppal foglalkozik. Emellett viszont lehetőség nyílik a födémről fallá és oszloppá majd tetővé rugalmasan alakuló homogén tömeg építésére. Kezdetben acél és erősített beton építmények készültek ebben a szellemben, később elterjed a ragasztottfa és könnyűszerkezetes megoldások, mint rétegelt falemezek, fóliák, kezelt szövetek és szálerősítéses műanyagok. Ezzel megnyílik az út a „hajlított” építészet felé, hiszen az épületszerkezetek is alkalmassá váltak összetett igénybevételel felvételére, és az épületek tömegét is egyre nagyobb homogenitás jellemzi [Wesselényi-Garay 2007, Drew 2019, Katona 2018].



1. kép: Bernard Cache *Earth Moves* kötetének borítóképe (Cache 1995)

Deleuze francia filozófus korszakalkotó munkája a *The Fold – Leibniz and the Baroque*, eredeti nyelven 1988-ban jelent meg. A mű barokk művészetet, mint korszellemet vizsgálja, a felvilágosodás és a modern természettudomány tükrében. A korszakot a korábbi statikus világszemlélet helyett egy folyton mozgásban levő, rejtett mozgatóktól vezérelt világkép jellemzi. A barokk építészet sajátosságai a hullámzó épülettömegek és az átszúrt tér. Deleuze ebben az időben főként filmkritikai témában publikált, ami nagyban befolyásolja a szemléletmódot, amivel a témát vizsgálja. A Fold kortárs építészeti jelentőségére egy későbbi műben az *Earth Moves - The Furnishing of Territories*-ben Bernard Cache hívja fel a figyelmet. Cache építész előképzettséggel lesz Deleuze tanítványa, és az *Earth Moves* bonyolult elméleti rendszerét folyamatosan képszerű megfogalmazással és geometriai diagramokkal, valamint saját bútorterveiről és örvénylő felszínű műalkotásairól készült fényképekkel illusztrálja (1. kép)1. kép. Cache az Objectile belsőépítész irodával számos kísérletben vett részt a CNC gyártás korai kiaknázására. A könyvben szereplő képek között főként számítógépes gyártással fából vagy rétegelt lemezből készült egyedi, organikus, gömbölyded formálású zárt tömböket és reliefeket látunk [Cache 1995, Bun 2009].

Cache térelméletében többletjelentést hordoznak a redők illetve hullámok, ezen kívül még fontos szerepet játszik a „rés” fogalma, amit leginkább a filmes vágáshoz hasonlíthatunk. Ne felejtjük el, hogy az elmúlt fél évszázad művészetére mekkora hatást gyakorolt a fényképezés és a film, mint társműfaj, és ez alól az építészet sem kivétel. A vágás egy új territórium megteremtését vonja maga után, a végtelen terepből leválasztó falakkal létrehozunk egy új zárt territóriumot, majd egy újabb vágás az ablak segítségével újradefiniáljuk a külső térrel való viszonyát. Ebben az összefüggésben az építészet a vágás művészete, és fő tevékenysége a keretek összekapcsolása, a „lehetségesség megteremtése” céljából. Az ívelés egy állandóan mozgó, születésben levő teret teremt, ami, nem egy keretek közé szorított kész műalkotás, hanem inkább egy végtelen folyamat fotószerűen kiragadott öntörvényű részlete. Deleuze szavait idézve a forma már nem követi a funkciót, a „*forma keresztezi a funkciót*” [Bun 2009].

Az építészeti tér és az építészeti tömeg folytonos, szabad áramlása oly mértékben jellemző a kilencvenes évek és az ezredforduló építészetére, hogy Cache művének angol megjelenését követően 1993-ban az Architectural Design magazin Greg Lynn szerkesztésében kiadta a *Folding in Architecture* kiadványát, ezzel kanonizálva az építészetben a "folding" fogalmát. A több kiadást megélt műben más neves szerzők mellett Deleuze is megjelenik egy tanulmánnyal. Az építészetben Peter Eisenmann Musee du Quai épülete Párizsban (2. kép), illetve a Coop Himmelb(l)au Münchener BMW épületét emelik ki illusztrációként (3. kép), már az újabb kiadásban [Lynn 2004, Katona 2020].



2. kép: Musee du Quai (eisenmanarchitects.com)



3. kép: BMW Welt (archdaily.com)

Vizsgáljunk meg magunk is egy példát a 2010-es évekből! Zaha Hadid Architects tervei alapján 2013-ban átadott Serpentine-Sackler Gallery egy XIX. századi szigorú küllemű puskaporraktárban kialakított kortárs művészeti galéria, amit dinamikus ívelésű kávéház hozzáépítés ékesít (3. kép). Ha részletesen megvizsgáljuk, a meghökkentő épülettömeg kialakítását, azt tapasztaljuk, hogy a kávéházat kívülről egyedi szabású teflonbevonatú üvegszál borítja, a tető belső oldalán pedig szilikon bevonatú üvegszál függ. A csonkolt csúcshártya felső öveit tölcser formájú fémrácsok emelik, az alsó szegély pedig kettős köracél koszorúhoz kapcsolódik, ami három ponton támaszt a talajra. A tölcserék védőburkolata festett FRP. A fényes fehér, hangsúlyos vonalú ereszték szintén előre gyártott FRP elemekből áll. A hozzáépítés tömege nyilvánvalóan Frei Ottótól megismert feszített hártyák szerkesztési módszerét követi, de egyenes rúdelemek helyett ívelt kialakítású épületszerkezetek feszítik meg a hártyát, amik áramlástani formákhoz hasonló idomok, vagyis a merevítők is a hártyák formavilágát utánozzák. Összefoglalva a kávéház fémvázra szerelt kompozitokból álló könnyűszerkezet [Turpin et al. 2014].

A ZHA Serpentine-Sackler Gallery-jét érdemes összevetni az iroda egy másik munkájával, a Heydar Aliyev Center azerbajdzsáni kulturális központtal (5. kép), amit szinte az előbbivel egy időben 2012-ben nyitottak meg. Az épület egy feszülten hullámzó drapéria képét mutatja. Míg a Serpentine-Sackler Gallery bővítése valódi hártyákat tartalmaz, némi fém kiegészítő szerkezettel, addig a Heydar Aliyev Center egy ívelt szerkesztésű rácsos tartó, amit 17.000 darab, üvegszál erősítésű poliészter lap borít be. Sajnos e hősiesség mészaki teljesítmény titokban marad a szemlélő számára. Tekintsük



4. kép: *The Serpentine Sackler Gallery* (Luke Hayes, archdaily)



5. kép: *Heydar Aliyev Center* (Iwan Baan, archdaily)

bár az épület külső tömegét, akár a belső tereit, azok egyaránt egy akadálytalanul hullámzó homogén testnek mutatkoznak. Itt a kompozit lapok térleválasztó burkolatként helyezkednek el egy hullámzó tömegű fémszerkezeten. Mindkét esetben fémvázhoz kapcsolódnak, bár a szerkezetek aránya jelentősen eltér. Mindenesetre az épülettömeg elképzeltetlen lenne a sokoldalú, ellenálló, de hajlékony alapanyag nélkül.

2.2 FRP kompozitok térnyerése az építőiparban

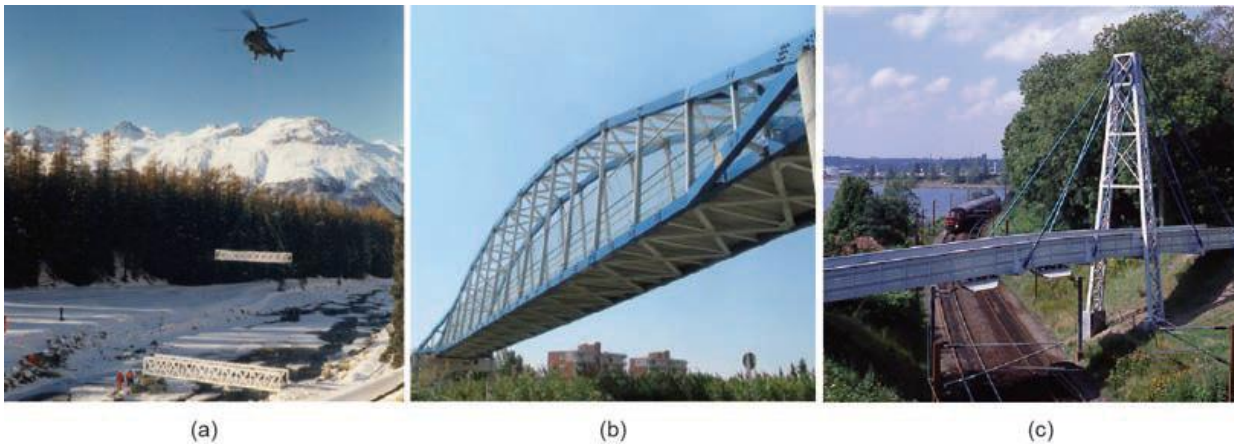
A továbbiakban esettanulmányok sorát tekintjük át abból a célból, hogy képet alkossunk a könnyűszerkezeti kompozitanyagok építészeti szerepéből. Elsősorban szálerősítésű polimerek (FRP) alkalmazását vizsgáljuk meg, mivel technológiai szempontból ezek állnak a legközelebb a biokompozitokhoz. A vályog és az acélbeton nehéz kompozit szerkezetet eredményez, a faalapú kompozitok pedig általában faipari hagyományokat tükröznek. A szálerősített kompozitok és velük végzett legújabb kísérletek nemcsak műszaki, de esztétikai szempontból is újszerű távlatokat nyitnak meg az építészet számára.

Az FRP kompozitból készült hidak tömege fele egy hasonló acélhídénak, egyötöde a betonból épült megfelelőjének. Ez pedig kihat a szállítási és építési költségekre is. Az előre gyártott, és előre szerelt szerkezetek pedig lehetőséget adnak a helyszíni munkaórák számának csökkentésére. A fenti lehetőségeket kiaknázva a 90-es évek második felében kezdek elterjedni az FRP kompozitok az építőiparban.

1997-ben adták át egy teljesen FRP-ből készült gyalogoshidat Harlingenben (Hollandia), ami a holland Infrastruktúra és Környezet Minisztériuma (Rijkswaterstaat) kezdeményezésére épült, a Poly Products cég gyártotta (6. kép). A híd kézi réteg-ragasztással készült. Szerkezete egy merevítőbordákkal erősített, U-keresztmetszetű. Szilárdságát jelentős részben a tömör korlát biztosítja. A hidat csarnokban gyártották le, majd egyben szállították a beépítés helyszínére. Egy



6. kép: Gyalogoshíd Harlingenben. [Smits 2016]



(a)

(b)

(c)

7. kép: a – Pontresina Svájc; b – L leida, Spanyolország; c – Kolding, Dánia [Smits 2016]

alkatrészből áll, első pillantásra hagyományos bordázott lemez benyomását kelti, a hídfőket leszámítva mentes az illesztésektől.

Készültek hidak húzva sajtolt kompozit profil elemek felhasználásával, például Pontresinában (Svájc), egy 25 m hosszúságú, 3300 kg tömegű híd ível át a Flaz folyó fölött, teherbírása 500 kg/m². A kész beton hídfőkre helikopter segítségével emelték rá a két elemből álló előre gyártott hidat, ami a két hídfőn túl a hossz tengely felénél még egy ponton támaszkodik (7. kép).

1997-ben Dániában épült meg a skandináv térség első FRP gyalogos és kerékpáros hídja, ami 40 m hosszú és egy forgalmas vasútvonal fölött ível át Koldingban. Az aszimmetrikus építmény fölé egy 18,5 méteres torony magasodik, amiből négy pár kábel függeszti a hidat. A szerkezet kötőelemei rozsdamentes acélból készültek.

Spanyolországban, Lleida közelében adtak át egy FRP elemekből épült gyalogos hidat 2004-ben. Az építmény 3 m széles és 38 m hosszú és egy forgalmas vasútvonal fölött ível át. A híd nemzetközi elismerésben részesült a "Footbridge Award 2005" seregszemlén "technológia" kategóriában. A hidat két ív tartja, melyek dőlése körülbelül 10 százalék befelé. A híd 9 m hosszú elemekből állították össze a helyszínen. Mindhárom fenti építmény a Fiberline cég húzvasajtolt üvegszál kompozit profiljaiból épült. A vasúti alkalmazásoknál mindig szempont a rövid helyszíni munka és

a villamos szigetelő képesség, ezért nyertek teret a FRP előre gyártott szerkezetek az acéllal és betonnal szemben.

Hollandiában az elmúlt évtizedben nőtt meg az érdeklődés az FRP gyalogos és kerékpáros hidak iránt. A Fiberline cég szabadalma az InfaCore® technika, ami FRP zárt szelvényekre épül. Felhasználásával hibrid felépítésű vasúti és autós hidak is épültek. Teljes egészében FRP gyalogos és kerékpáros hidak sorozatát építették meg Rotterdamban, ahol a város 32 ilyen hidat rendelt meg a cégtől [Smits 2016].

Elterjedtek még vasbeton hidakhoz alkalmazott FRP szegélyelemek is, mint fly-over Waarderpolder Haarlemben (2007), Juliana Híd Zaanstadban (2013), Nelson Mandela Híd Alkmaarban, (2016), vagy a Rijssen-Wierdennél épült vadállatok áthaladására szolgáló zöldalagút szegélyei (2013).

Külső héjmerevítésű szerkezetek ismeretesek hajó, repülőgép és más járművek gyártásából. Az elemekből felépülő szerelt építménnyel szemben egy másik lehetőség az egybeöntött külső héjmerevítés (monocoque). Egybeöntött héjú FRP híd a Szitakötőhíd, ami a Royal HaskoningDHV Architects tervei szerint épült Harderwijk város Drielanden kerületében 2014-ben [Smits 2016].

Kevés ház épült teljes egészében FRP-ből, ezek közül egy kísérleti alkotás az „*Eye Catcher Building*”. Az 1999-es Swissbau kiállításon állították ki, majd a kiállítást követően lebontották és újra felépítették Baselben. Az épület 15 m magas, 5 emeletes és 10 × 12 m alapterületen áll. Az alkatrészek a Fibreline Composites hűvösasztalozásos eljárással készült készletből rendelt gyártmányai, vagyis nem egyedi alkatrészekről van szó. A szükséges mechanikai vizsgálatokat és számításokat az ETH-n végezték el. Az *Eye Catcher Buildingen* kívül ismertek még moduláris, lemez elemekből készült építmények, mint a *Hambleside-Danelaw Building Products* cég terméke, ami acél profilokat illesztett szendvicselemez, vagy a *Holland Composites Industrials* rendszere a Space Box [Evernden et al. 2009].

2.3 Technológiai és építészeti kísérletek FRP építményekkel

2012 óta kísérleti építmények készülnek a Stuttgarti Egyetem az Épületszerkezetek és Szerkezettervezés (ITKE) valamint a Számítógépes Tervezés (ICD) intézetek együttműködésében FRP könnyűszerkezetből. Az ITKE-ICD kutató pavilonok rendszerint egymást követve egy évig állnak ugyanazon a helyen, majd elbontják őket, a kialakításukat pedig tudományos kutatás előzi meg. A kutatómunka és kísérletek anyagtudomány, gyártástechnológia és műszaki informatika újításait képviselik, valamint biológiai szerkezetek tanulmányozását.

A 2012-ben épült pavilon (8. kép) AFP eljárással készült, érdekessége, hogy tömör pozitív mag helyett a terítőfej egy fémvázra fonta rá a szálakat, amit gyártás után eltávolítottak. Az építészetben megszokott, hogy egyedi formát kell gyártani, ezért öntőformák és szerszámok készíttetése

messzemenőleg gazdaságtalan. A kiviteli költségek csökkentése végett tanácsos minél kevesebb segédstruktúrát alkalmazni. A 2012-es pavilon szövetstruktúráját az amerikai homár (*Homarus americanus*) ollópáncéljának tanulmányozása szerint szerkesztették meg. A szálak nyolc rétegben, rétegenként eltérő száliránnyal kerültek egymásra az ötágú csillagot formázó, forgatható szövőkeretre, így a gyártás átmenetet képez az AFP és a száltekerceselés között. A végeredmény egy monolitikus héj, anyaga vegyesen szén és üvegszál, epoxy gyanta mátrixon. A kész, többrétegű fonatot 8 órán át hőkezelik 80 °C-on, hogy a polimermátrix térhálósodásával elérje a végső szilárdságot. A szerkezet 8 m átmérőjű, 3,5 m magas, vastagsága mindössze 4 mm, míg a gyártásnál hozzávetőleg 30 km szálát használtak fel. A pavilon jelentősége, hogy csúcstechnikát alkalmaz építészeti célokra, amihez a gyártási paraméterek mellett megteremti az informatikai hátteret. A technológiát biológiai inspirációk segítségével alakítja ki, ami nem idegen az FRP szerkezetektől, de ebben az esetben a virág-szerű tömegformával vissza is utal rá [Reichert et al. 2014].

A 2013-14-es ITKE-ICD kutatópavilon (9. kép), szintén üveg és szénszálakból fonott szerkezet, de kiselemes felépítésű. Általános sokszög alapú hiperbolikus paraboloid tölcéséből készült, ennek köszönhető, hogy az egyenes tengely mentén kifeszített szálak ívelt felületet alkotnak. A szerkezet kidolgozásához bogarak kitinpáncéljának szerkezetét elemezték. A Rózsabogár (*Cetonia aurata*) szárnyfedelei kétrétegűek, és a rétegek ívelt oszlopokkal kapcsolódnak egymáshoz, ami ugyan nagy keresztmetszetet eredményez, de kis tömeg mellett magas szilárdságot nyújt. A pavilon elemeit két robotkar összehangolt munkájával szőtték meg szövőkeretek segítségével. A legnagyobb építőelem 2,6 m átmérőjű, de a tömege mindössze 24,1 kg. Az elemek 6 réteg szálát tartalmaznak, amiből az első réteg üvegszál. Az üvegszál réteg alakítja ki az alkatrész geometriáját, erre épülnek fel a felső rétegek szénszálakból. A szénszál rétegek szerepe az üvegszál megerősítése, elhelyezkedésüket FEM segítségével tervezték meg. Az épület 50 m²-területet fed le, össztömege mindössze 593 kg [Knippers et al. 2015].

A 2014–15-ös kísérleti építményt (10. kép) szintén a mag (segédstruktúra) újragondolása motiválta. Ebben az esetben az előimpregnált szálak szintén AFP eljárással, hattengelyes robotkar segítségével egy légnomással tartott membrán belső falára kerülnek, mint bennmaradó magra. A membrán egy 0,2 mm vastag ETFE (etilén/trifluor-etilén kopolimer) fólia lapokból készült buborék, ami elterjedt kültéri fólia anyag, homlokzatok kialakításához és lefedésekhez is használható. Az epoxi gyantával elő-impregnált szénszálak rombold rendszerrel készülve átveszi a légtartás szerepét. Így a héj öntartóvá válik, az alsó, szál erősítés nélküli részeket eltávolítják, ezzel kapva egy -a 2012-es kísérletre emlékeztető- monolitikus héjat. A gyártástechnológia különlegessége, hogy míg a merev héjakra vagy keretekre felépülő szerkezet esetében a robotkarok útját koordinátákkal kell meghatározni, ebben az esetben a lágy mag a terítőfej mozgásának hatására elmozdul. Ennek a problémának a kiküszöbölésére egy érzékelőt építettek be a robotkarba, ami a fólia feszültségeit vizsgálja, és valós időben korrigálja a terítőfej nyomvonalát. A szerkezet tömege 260 kg, az

erősítéshez 45 km szénszálat használtak fel és 7,5 m fesztávon ível át. A kísérleti pavilon koncepcióját egy vízben élő pókfajta (*Argyroneta aquatica*) inspirálta, ami a víz alá egy kis bűvárharangot visz magával, amit belülről selyemszálakkal erősíti magához [Schieber et al. 2015].

2016–17-ben ismét szén és üvegszál vegyes alkalmazásával kísérlezték a Stuttgarti Egyetemen, egy kikonzolidosodó szövetet gyártottak le két robotkar és egy drón segítségével (11. kép). Mérete $12 \times 2,6 \times 3,1$ m, alapterülete $26,5 \text{ m}^2$ és a gyártásához 184 km szálát használtak fel, tömege hozzávetőleg 1000 kg [Paoletti 2017].

Áttekintvén az FRP-t alkalmazó ITKE – ICD kutatópavilonokat, megállapíthatjuk, hogy kivétel nélkül egyenletes tehereloszlású, úgynevezett könnyűszerkezetes héjakat látunk. A technológiák egy részét nagyteljesítményű kompozitokat alkalmazó iparágaktól veszik át, mint repülőgépek és



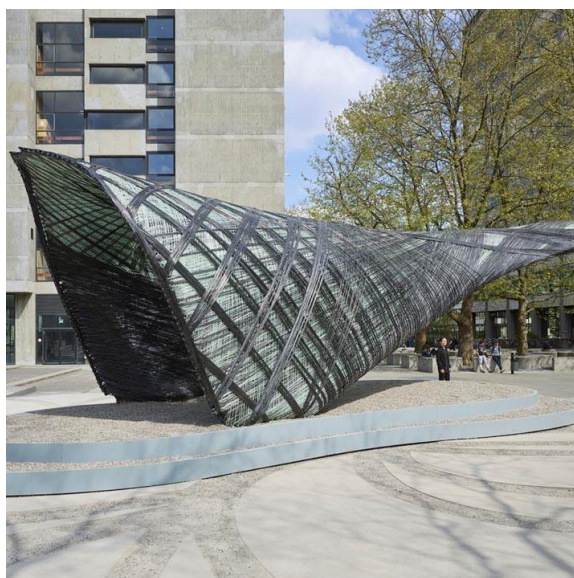
8. kép: 2012-es ITKE-ICD kutatópavilon [Reichert et al. 2014]



9. kép: 2013-14-es ITKE-ICD kutatópavilon [Knippers et al. 2015.]



10. kép: ITKE-ICD pavilon 2014–15 [Schieber et al. 2015]



11. kép: ITKE-ICD pavilon 2016–17 [Paoletti 2017]

űreszközök, hajók, rakéták gyártása, mint a robotkarral végzett digitális gyártás (például AFP eljárás). Szerkezet optimalizálást végeznek végeelem analízissel, és roncsolásos anyagvizsgálatot az általuk készített kompozitokon. Bár az alkalmazott gyártástechnológiák egyike sem előzmény nélküli, alkalmazásuk mindig újszerű és újításokkal jár együtt. Összességében elmondhatjuk, hogy míg az építőiparban elterjedt, vagy elterjedő FRP megoldások rendszerint valamilyen meglévő technológiát követnek, ezért korábban látott szerkezetekre emlékeztetnek, ami például acél vagy más anyagokra jellemző. Az itt áttekintett munkák ezzel szemben a szálerősítésű kompozitokra sajátosan jellemző „anyagszerű” alkalmazás lehetőségeit vizsgálják az építészet számára.

2.4 FRP kompozitok a járműiparban

Cambridgeben az Aeronautical Research & Development Corporation 1965-ben készített egy kísérleti autocovert, ami ugyan sosem repült, csak a földi tesztelésig jutott el, de a légcsvár, leszállókerék és a repülőgéptörzs üvegszálakompozitból készült. A repülésben a szerkezet tömege nagy jelentőséggel bír, ezért kezdtek el a magas szilárdságú, de könnyű üveg, majd szénszálakompozitok átvenni az alumínium helyét a repülőgépgyártásban. A kompozitok fejlődésének három szakaszát különítjük el aszerint, hogy hiba esetén milyen mértékben veszélyeztetik a repülést. A korai szakaszban csak burkolatok és belsőtéri elemek (harmadrendű alkatrészek) gyártásához alkalmazták őket, de a 60-as évek végén megjelentek a másodlagos alkatrészek is: szpojler, oldalkormány, magassági kormány, fékszárny. Az 1980-as években vezetik be a fő szerkezeti elemeket elsőként a Boeing 737 vízszintes vezérsíkjánál, de a 90-es években a kompozitok tömegaránya jellemzően 10% alatt marad, míg a 2010-es évekre 60%-ot is eléri, például az AH-66 esetében.

A NASA 1980-ban kezdett el szénszálból és epoxy gyantából kompozitot fejleszteni elsődleges repülőgépszárny számára a LCPAS (Large Composite Primary Aircraft Structure) program keretében. Az eredményeket katonai gépeken tesztelték, szinte azonnal. Polgári repülésben a Boeing 737 gépbe szereltek elsőként szénszálerősítést. 2000 óta szélturbinák építéséhez is használnak GFRP-t, például a Vestas cég V90-es modelljében.

A 2010-es években példaképpen a Boeing 787-es tömegének 50%-át alkotják kompozitok. A repülőgéptest és a szárnytest laminált szénszálerősítésű epoxigyantából készült. Az oldalkormány, magassági kormány, motorburkolatok szénszálakompozit szendvicslemezről állnak. Üvegszálakat alkalmaznak szárnyburkolatokhoz, vezérsíkokhoz, és a szárnyat a testtel összekötő burkolathoz. A belépőelemek továbbra is fémötvözetekből készülnek, kihasználva a fémek remek hővezető képességét, magas igénybevételnek kitett kötőelemek és a leszállókerék alkatrészeinek anyaga pedig a titánium [Roesler et al. 2007].

Az USA-ban először 1979-ben haladta meg az összes gyártott műanyag az acélt térfogat szerint,

amiben szerepet játszanak a kőolaj válságok. Mivel az autók tömege nagymértékben befolyásolja az üzemanyag fogyasztást, ezért egyre nagyobb arányban helyettesítik a fém alkatrészeket műanyaggal [Gandhi et al. 1992]. Az 1984-es GM Pontiac Fiero például acél vázzal készül, de műanyag külső burkolattal. A Chevrolet Cavettohoba pedig üvegszálalaprugót építettek be 1981-ben, ami a fémalkatrész tömegének $\frac{1}{3}$ -át nyomja. Az 1997-es Tokyo Motor Show-n a polgári autózás messze túlnyomó többségét kitevő agglomerációs közlekedés került a középpontba. Bemutatták a Toyota e-com, a Nissan Hypermini kétüléses elektromos autókat, a Mitsubisi és M&R Automotive Products alumínium vázas elektromos autóját, a Subaru Eltent és a Daihatsu Move EV-h hybrid autókat. Bár a környezetvédelem, a túlterhelt városi közlekedési hálózat, az érzékeny piaci kereslet igénye nem vesztett időszerűségéből, a 90-es évek könnyű jármű koncepcióját igazán csak a Smart autók vitték tovább az európai utakon. A Smart a Mercedes és az SMH cég együttműködésének keretei között jött létre. Az SMH 1983-ban alakult svájci vállalat, órákkal, elektronikával, precíziós eszközzel foglalkoznak, a brandjei közé tartozik a Swatch, Omega, Tissot, és kutatás fejlesztési cégek szerszámkészítés és napenergia terén. Amikor a svájci óragyártás veszteségeket szenvedett a japán kvarcórák elterjedése miatt, akkor hozták létre a Swatch márkát. ami alacsonyabb áron, szélesebb vásárló kör számára kínál órákat, amit többek között új anyaghasználattal és sorozatgyártási technikával valósítottak meg. A Smart-ot nevezik Swatch autónak is, mert nagyon hasonló elveket valósítanak meg vele, mint fémminimum, és a műanyag burkolati elemek és alkatrészek variálhatósága [Mobility 1998].

2.5 NFRP kompozitok a járműiparban

Az NFRP kompozitok térnyerése a járműiparból indult ki. Henry Ford szerint *“a leginkább környezetbarát dolog, amit egy benzin üzemű kocsival tehetünk, hogy könnyebb testet gyártunk neki.”* A kisebb tömeg nagyobb teljesítményt és gazdaságosabb fenntartást tesz lehetővé, de a növényi alapanyagok alkalmazása a gyártási költségeket is csökkenti. A növényi alapanyagok – idesorolva a fát is – a kezdetektől fogva kísérik a járműgyártás történetét.

A Ford cég 1942-ben szabadalmaztatott egy járműkarosszériát, ami fémvázra szerelt műanyag lapokból készült. Henry Ford már ebben az időben kísérletezett könnyűjármű létrehozásával, amit kender vagy szójabab autónak hívnak, de sajnos kevés pontos részletet lehet tudni róla. Számunkra az is elegendő, hogy már ekkor is foglalkoztatta a járműtervezőket a természetes alapanyagból készülő könnyűszerkezetű jármű megépítésének gondolata [BFRC 2011].

Járműipari kompozitok történetét elemezvén nem mehetünk el szó nélkül az NDK sikerautója, a Trabant mellett sem, amiből 1957 és 1991 között több mint 3 millió darabot gyártottak. A szocialista tábor családi kisautójának készült a Volkswagen Bogár, BMW Isetta és a Citroen Kacsza hatása alatt. Különlegessége, hogy a karosszéria Duroplasztból készült, ami nem-szött gyapjúszál-erősítésű fenolgyanta, vagy kresolgyanta. Az egyes részek: tető, sárvédő, külső ajtóburkolat, motor és

csomagterfedél, vázra szereltek, és szükség esetén cserélhetőek. Figyelembe véve a motor pazarló fogyasztását és a gyenge karosszéria biztonsági kockázatát a Trabant etikai szempontból kritikus mérnöki alkotás, más szemszögből vizsgálva viszont az elemekre bontható kompozit héj a 90-es évek és az ezredforduló könnyűjárműveit előlegezi meg [Legeze 2013, Meissner 1978].

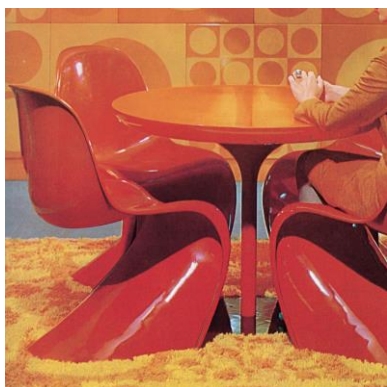
A járműipar jelenleg széles körben alkalmaz NFRP lemezeket belső burkolatként vagy másodlagos teherhordó szerkezetként, például az 1994-es Mercedes-Benz E-class modeljébe jutaszövettel erősített kompozit belső ajtólapot építenek be, az A-class-ban pedig az üvegszálalváz elemeket helyettesíti len/PP kompozit. A 2007-ben bevezetett Jaguar XF modelljében a belső ajtólemezek szintén len/PP kompozitból készülnek, amit a Composites Evolution cég készített egy üvegszál/PP alkatrész kiváltására, mivel a lenszálalváz változat az eredeti alkatrész tömegének 35%-át nyomja. Land Rover Defender számára szintén PP/lén felhasználásával készültek belső burkolati lemezek, melyek 50%-kal könnyebbek az eredeti acélhoz képest. Bár a külső burkolati lemezek, karosszéria idomok és utasokat védő szerkezetek továbbra is üveg és szénszálalváz kompozitokból, valamint acélból készülnek, a különböző belső burkolati elemek, elválasztók esetében biokompozitok alkalmazásával csökken a jármű össztömege, ettől a jármű gyorsabbá, dinamikusabbá, vagy takarékosabb fogyasztásúvá válik [Tompson 2013, Marsh 2003].

Brazíliában 2010-ben készült egy figyelemre méltó összehasonlító elemzés az üveg, illetve jutaszállal erősített autóalkatrészek környezetvédelmi adottságairól. Esettanulmánynak egy homokfutó motorháztetejéről készítettek jutavászon másolatot. Az NFRP alkatrész hat réteg biaxiális jutaszövetből áll, mely rétegek 45°-os elforgatással kerültek egymásra. A motorháztető 0,35 m² felületű, mátrixanyagként poliészter gyantát alkalmaztak. Azon túlmenve, hogy alkalmas szilárdságot értek el, a tanulmány felhívja a figyelmet a kisebb tömegű alapanyag további előnyeire. Mivel az alapanyagok tömege is kisebb, már szállítás és anyagmozgatás közben is energiát takarítunk meg. Ebben az esetben, mivel teherautókon szállítják az alapanyagot, kedvezőbb üzemanyag fogyasztás is, vagyis a kompozit gyártás közben is környezetbarátabb [Alves et al. 2010].

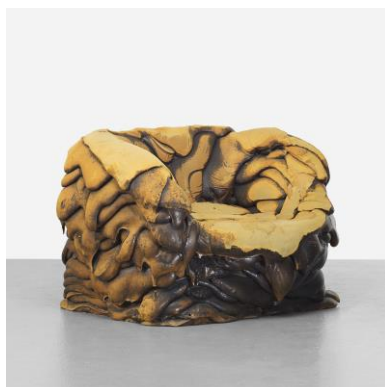
2.6 NFRP belsőépítészet és bútor

Szintetikus anyagok a bútortervezésben is elterjednek, amit azért tekintünk át különös figyelemmel, mert az építészeti kísérletezés kedvelt léptéke a belsőépítészet és bútor, a székek pedig egyfajta kiemelt szerephez jutnak, mivel a kánon nem csak ülőbútorokként, hanem tervezői gondolkodásmódot kifejező szimbólumként tekint rájuk. 1960-ban jelenik meg az első fröccsöntött poliuretán héjból készült Pantonszék (12. kép). Később követik az olyan kísérleti gyártással készült bútordarabok, mint a csöpögtetett szék (13. kép) és a "Golgotha" szék (14. kép). A csöpögtetett szék (1964) Gunnar Aagaard Andersen dán építész, szobrász alkotása, a művész hasonló, közvetett alkotó folyamattal létrehozott (és nem készített) tárgyalkotási kísérletei közé illeszkedik. A csöpögtetett szék PU hab párnákból épül fel, melyek öntőforma nélkül, szabadon egymásra

„csepegtetve” alkotják a karosszék tömegét. Az 1972-re datált Golgotha szék Gaetano Pesce, olasz építész, tervezőművész nevéhez fűződik. A bútor egy műgyantával merevített lógatott üvegszövet, amit PET-tel töltöttek meg. Mindárom szék megtalálható a New York-i Museum of Modern Art (MoMA) gyűjteményében. Szintetikus alapanyag mellett az utóbbi két szék közös tulajdonsága, hogy az alkotó nagyvonalúan hagyja érvényre jutni az anyag saját esését, így – bár szintetikus alapanyagról beszélünk – az alapanyag természetes viselkedéséből kiinduló formaalkotásnak tekinthetjük [MOMA 1997, LuMu 1996, Lacoste 1970].



12. kép: Panton szék, 1960
(www.vitra.com)



13. kép: A csöpögtetett szék, 1964
(www.wright20.com)



14. kép: „Golgotha” szék, 1972
(www.wright20.com)

Jelen tanulmány főként a kortárs tervezőművészetre összpontosít, de jeleznünk kell, hogy a történeti építészet, különösen a belsőépítészet nagy mennyiségű biológiai eredetű anyagot alkalmazott a fa és különféle textíliák mellett. Növényi vagy állati eredetű kötőanyagokat, ragasztókat (enyv, csiriz) keverték festékekhez, alapozó rétegekhez, vakolatokhoz, és különféle falikárpitok, tapéták ragasztásához is természetes ragasztókat alkalmaztak, ezen kívül különleges, enyves vakolatokat is ismerünk, melyeket jellegzetes „márványhatású” fényük miatt használtak. Példaképpen oxidált lenolajból és más természetes összetevőkből álló mátrixon alkalmazták a zsákvásznat (jutaszövet), mint hézagmentes padlóburkolat. A linóleum kopásállósága a tölgyfa padlóval vetekszik, így elterjedt beltéri anyag volt 1863-tól egészen az 1960-as évekig. Ekkor az olcsóbb PVC padló váltotta fel. A PVC előnye, hogy nedves környezetben is tartós. A köznyelvben tévesen máig emlegetik linóleumként a hézagmentes, műanyag lapokból készült padlót, pedig az eredeti linóleum valójában egy korai biokompozit volt [Powell 2003].

Az alábbiakban részben vagy egészében biokompozitokból készült alkotásokat vagy technológiákat tekintünk át, felsorolás szerűen az építészet, belsőépítészet és bútortervezés területéről. Olyan munkákat válogatunk melyek részben, vagy teljes egészében nem-fatest eredetű növényi szálakból, és biopolimerből készültek.

John Christler Hoiby norvég építész a Cornell University-n kifejlesztett egy kétrétegű, áttört térelválasztó rendszert, kétszeresen görbült lemezekből. A diplomamunka az Építészeti illetve a Textil és Ruházat Tanszék együttműködésben készült. *Fiber Wall* nevű alkotás különlegessége, hogy

olyan lemez előgyártmányból épül fel, amit szizál rostból, lenvászomból valamint szójabrotein alapú gyantából gyártanak hőpréssel [Brownell 2008].

Woven Image ausztrál textilipari cég kommunikációjára jellemző a környezettudatos gondolkodás. A holland *Layer Studio*val együttműködésében terveztek egy beltéri elválasztó rendszert, 330 mm-es háromszögletű kenderlapokból (15. kép). A térelválasztó hatszögletű rendszerben építhető és műanyag váz merevíti, a lemezek gombmágneseikkel kapcsolódnak a vázhoz. Térelválasztás mellett akusztikai szerepet is betölt.

A stuttgarteri ITKE intézetből publikáltak vegyes, mezőgazdasági hulladék eredetű rostokkal erősített beltéri anyagokat (16. kép). Az erősítőszálak szalmából, kókuszrostból és fűrészpor, valamint pellet égetéséből származó fekete hamuból állnak. A Trashell termék szerves alapú epoxy gyantából készül, és a rostok tömegaránya 20%. Ez egy 300 × 300 × 25 mm méretű előregyártott kis elemes beltéri burkolati lemez. Beszámolnak továbbá a Bio-flexi nevű alapanyagról, ami szabad formálású bútorok és beltéri felületek burkolására alkalmas. A bio-flexi egy rostlemez, rugalmas mátrixanyaggal ellátva. Javasolt az egyik oldalán fafurnér lemezzel ellátni, majd formára hajlítást követően hozzáilleszteni az ellenoldali lemezt. A harmadik publikált biokompozit termék a PLA mátrixú Plant culture lemez, ami szintén beltéri anyag. Különlegessége, hogy mátrixon és kötőanyagon kívül UV-védő és tűzgátló fázist tartalmaz, ezért beépítésre kész építőipari alapanyagról van szó [Dahy 2017].



15. kép: Layer Design „Scale” kenderpép térelválasztó rendszere (layerdesign.com 2021. 03. 31.)



16. kép: Bio-flexi [Dahy 2017]



17. kép: Hemp Chair (www.aisslinger.de/hemp-chair 2021. 03. 31.)



18. kép: Toul Stoul [Jute-Lab 2015]



19. kép: Flax Chair [Label breed 2016]



20. kép: Artichair [Brownell 2017]

A 2011-es milánói design héten mutatták be a Werner Aisslinger tervei alapján készült kenderszéket (17. kép). A Hemp Chair az 1960-ban kiadott Panton szék hagyományait folytatja. Az eredeti Panton szék egy műanyag öntvény, míg az Aisslinger féle darab kenderpépből készült. A héjszerű, ívelt formájú széket merevítő borda-szerű "behajtások" erősítik. Gyártása egy kísérlet a járműgyártásban alkalmazott eljárások bútortipari alkalmazására a BASF céggel együttműködve. Kenderpépet az *Acrodur®* nevű polycarboxilsav-triethanol-aminből álló vizes bázisú kötőanyaggal kezelik, amit kompozitokhoz fejlesztettek ki [Legrenzi et al. 2011].

A francia Studio Joran Briand Associes 2012-ben mutatta be a *Toul Stoul* nevű támla nélküli ülőbútor prototípusát (18. kép). A prototípus Bangladesben, alapanyag gyártókkal kooperációban készült, jutaszövet erősítésű poliészter gyantából, mérete 5 × 42 × 50 cm. A kísérleti gyártás a *Gold of Bengal* szervezettel karöltve valósult meg. A bútor megnyerte a 2013-as VIA díjat, majd ugyanebben az évben bemutatkozott a milánói és párizsi design vásáron [Jute-Lab 2015].



21. kép: Biokompozit pad az amszterdami Schipol repülőtéren. Az anyagszerkezet a festéktől kitakart „ablakon” át figyelhető meg. [Biobasedbank 2016]

A 2016-os holland Design Hét *Future Award* győztese az anyagkísérleteiről és alapanyag-tanulmányairól ismert Christien Meindertsma egy lencszövettel erősített PLA mátrixú biokompozit székekkel (19. kép). Flax Chair a Label Breed iroda számára készült szoros együttműködésben a természetes szálakra specializálódott Enkev céggel. A szék három melegen formára sajtolt alkatrészből áll, egy ülőlappból és két lábalelemből. Tömegében merőben hagyományos rétegelt fafurnér és fém vagy favázás székeket utánozza. Az ülőlap csak anyagában különbözik a már ismert alaksajtolt rétegelt lemez ülőlappoktól, az állványzat viszont rúdelemekből felépülő váz hajlított lemez mimézise. Az alkatrészek geometriája egy gyártástechnikai érdekességre vezethető vissza, mivel a szék alkatrészei egyetlen 60 × 100 cm méretű táblából kihozhatóak leeső darabok nélkül [Label breed 2016].

Articsóka feldolgozás hulladékát használja fel az Artichair (20. kép). Spiros Kizis tervei alapján készült székből, karosszékből és dohányzóasztalból álló bútorcsalád, idompréselt kagyló-szerű biokompozit alkatrészt illeszt egy tömörfa lécvázra. A kompozit anyaga 60% növényi rost, 40% növényi alapú gyanta. Az articsóka növényt élelmiszeripar és bioüzemanyag gyártás számára termesztik, a szék alapanyagához a növény fel nem használt részét alkalmazzák [Brownell 2017].

Amsterdami Schipol repülőtéren és a közeli Haarlemmermeer településen helyeztek el nyolc darab biokompozit kültéri ülőbútort 2016-ban (21. kép). A padok egy külső len és kenderszálakkal erősített biokompozit héjből és egy belső biobeton magból állnak, a magot *Miscanthus sinensis* rostokkal erősítették meg. A biokompozit héjat a delfti Inholland Hogeschool egyetem kompozit laboratóriumában készült, Martijn van Meijel irányítása alatt. A biobetont a Strukton cég biztosította, ők általában utak és vasutak mellett építenek zajvédő falakat ebből az anyagból, ebben az esetben a kis tömegű kompozit köpeny lesúlyozása volt a cél. A pad fantázianeve Jaizkibel, egy kétszeresen görbült felületű patkó formájú tárgy, tervezője, Itsaso Gonzalez úgy alakította a formát, hogy több különböző testhelyzetben lehessen pihenésre használni a bútort [Biobasedbank 2016].

A *Gold of Bengal* kötelékében kutatásokat végző Jute Lab számos műgyantából és jutaszövetből készült bútort készített a 2010-es években. 2017 nyarán mutatták be Bangladesben egy német francia együttműködés eredményeképpen a karosszékből és dohányzóasztalból álló kompozitbútorcsaládot. A karosszék egy kagylószerű ívelt forma, lécvázra állítva, míg a dohányzóasztal egy hajlított kompozitlap, mindkettő jutaszövettel készült [theindependent 2017].

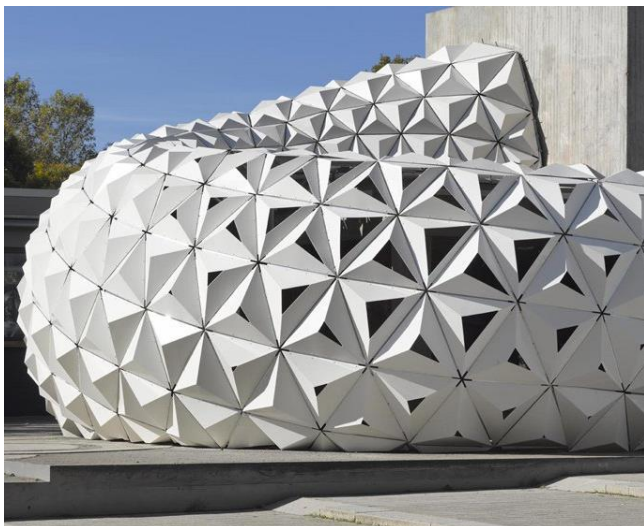
Bangladesi Atomenergia Bizottság kezdeményezésére jutaszövettel erősített kompozit termékek széles skáláját hozták létre: álmennyezeti paneleket, tetőfedő lapokat, konyhai mosogatót, kül- és beltéri bútorokat, szaniter alkatrészeket, dekoranyagokat, munkavédelmi felszereléseket: sisakot, lábszárvédőt, mellkasvédőt, valamint a Jutin nevű bordázott építőipari lemezt [Khan et al 2015]. A Jutin, ahogy nevéből kiolvasható bádoglemez kiváltására készült könnyűszerkezeti építőanyag. Hullámlemezeket készítettek belőle [Khan et al. 2010].

2011 és 2013 között a Stuttgarti Egyetem ITKE intézetében kutatást végeztek biopolimer alapú homlokzatburkolat készítésére (22. kép). Az egyetemmel együttműködésben fejlesztette ki a Tecnaró cég az Arboblend® műanyag granulátumot, ami egy több mint 90%-ban megújuló alapanyagból készül, megfelel az építőipar szilárdsággal, tűzállósággal és fenntarthatósággal szemben támasztott elvárásainak. Összetételét tekintve polihidroxialkanotok (PHA), polikaprolakton (PCL), bio-PET, keményítő, politejsav (PLA), bio-PE, bio-PA, lignin, természetes gyanta, viasz és olaj, zsírsavak, cellulóz adalékok és növényi erősítőszálak alkotják. A granulátumból lap előgyártmányok készültek, a lapokból pedig háromszög alapú, 3,5 mm falvastagságú gúlákat préseltek a Bauer Thermoforming cég segítségével. A gúlákról aztán forgácsolással választják le a lemez túllógó részeit, illetve a gúlákat egy részének kivágják a csúcsát, hogy áttöréseket hozzanak

létre a felületen. Az így keletkező hulladék felaprítva aztán újra lapelőgyártmányba kerül. A gúlákból ezt követően egy 145 m² felszínű, kétszer görbült felületű patkó formájú héjat építettek, fém kötőelemek beépítésével. A kifeszülő héj 4000 N/m² terhelést képes hordozni, ezzel önhordó homlokzati burkolatnak számít, valamint ellenáll az időjárás viszontagságainak [Köhler-Hammer et al. 2014].

Dweib és munkatársai (2006) beszámolnak egy 1:3 méretarányú nyeregterítő megépítéséről, ami különböző méretű előregyártott biokompozit panelekből áll. A lapok magja gerendaszerű poliizocianurát (PIR) hab alkatrészek, Elofam T300 termékből készült, az Elliott Company Indiana gyártmánya és általában szendvicslemezek maganyagának használják. Kémiai szerkezete a PUR-hoz hasonló, de mechanikai szempontból ellenállóbb. A kompozit lap kérgét egy szójabab-olaj alapú mesterséges gyantából, úgynevezett AESO-ból képzett mátrix alkotja, amit cellulóz-rostok erősítenek. A rostokat 3 mm vastag hullámkartonból állították elő. A gyanta hozzáadását vákuuminjektálással végezték. A kompozitból három próbatestet vizsgáltak tovább időjárásállóság szempontjából. Két mintát bemázoltak kültéri felületkezelőanyaggal, a harmadik mintát kezeletlenül hagyták, így töltötték el közel egy évet a szabadban. Az egyik esetben poliészter gélt alkalmaztak, a másik mintát Minwax® Helmsman® Spar Urethane kültéri faanyagvédő szerrel kezelték. Egy év után a nyers felületű minta elszíneződött, és leválások indultak meg rajta, míg mindkét kezelt minta sértetlenül vészelte át a vizsgálatot.

A Stuttgarti Bio-Mat intézet 2020-ban közzétett kísérleti eredményeket sajátos geometriával készült biokompozit bútorok gyártásáról (23. kép). Ahogy az ITKE/ICD kísérleti pavilonok esetében láttuk, hogy a szálak kompozitok kedvező alkalmazásához elengedhetetlen a speciális, anyagszerű formálás. Az ehhez szükséges költséges sablonok, sajtólószerszámok elkészítését kiküszöbölve készültek biokompozit ülőbútor prototípusok. Az AFP eljáráshoz hasonló TFP (*Tailored Fiber Placement*) és CFW (*Coreless Filament Winding*) technikát alkalmazzák síkból térbe fejthető előgyártmányok készítéséhez. Az alapanyag növényi szálakból készül, sodrony és epoxy gyanta (30%) lineáris kompozit. Síklemezre kerül egy folytonosan fektetett szálköteg, ami a bútor palástját hálózatszerűen borítja be, a terítéket pedig elkészülvén térbe fordítják, majd kézi rögzítéssel óvják meg a szétnyílástól. Az eredményen ránézésre kosárfonásra emlékeztet [Rihaczek et al. 2020, Martins et al. 2020].



22. kép: AbroSkin [Köhler-Hammer et al. 2014]



23. kép: Bio-Mat szék [Rihaczek et al. 2020]

2.7 NFRP kísérleti tartószerkezetek

Eindhovenben, a műszaki egyetem kampuszán, 2016 őszén adtak át egy gyalogos és kerékpáros hidat, ami a 14 méteres hosszával ível át a Dommel folyó fölött (24. kép). A híd 1 darabból álló külső vázmerevítésű szerkezet, anyaga len valamint kenderrost erősítésű bio-epoxy gyanta egy PLA habból készült magon. A munka egy nagyobb volumenű kutatás részét képezi, az eindhoveni és defti műszaki egyetemek együttműködésében, ami biokompozitok építészeti lehetőségeit vizsgálja. A híd előregyártott, egyedi technológiával készült műtárgy.

A szegmensek magvát Synprodo gyártmányú PLA hab alkotja, amire több rétegben növényi szálakat ragasztottak. A mag keresztmetszete változó, a feszítáv közepénél trapéz alakú, magassága 900 mm, a járófelület 1100 mm szélességű. A feltámasztási pontoknál a keresztmetszet elvékonyodik. Összeállítva egyirányú, nem szőtt kender és lencszálakkal borították, valamint a mag alsó lapján illetve a járófelületet lezáró élek körül kétirányú lencszövet került rá, a kész NFRP kéreg vastagsága az oldallapon 10 mm, a tető és fenéklapon 20 mm. A félkész gyártmányt fóliába csomagolják, amiből aztán kiszívják a levegőt. Vákuum alatt Sicomin típusú bio-epoxy gyantát injektálnak a zsákba, amihez egy kötőanyagot adtak hozzá (összetevői: 77,5 % Greenepoxy 56 és 22,5% 4770 hardener). A kötőanyag exoterm kémiai reakciót indít meg, a felszabaduló hő hatására az alapanyagok létrehozzák a biokompozitot. A műhelycsarnokból a kész hidat egyben szállították a helyszínre és daruval emelték be. A kész hidat lefestették, a nedvesség és UV védelem érdekében. Mivel nincsenek tapasztalatok a kompozit időtállóságáról, ezért a hidat az építést követően érzékelő-rendszerrel szerelték fel, ami a szilárdság vizsgálására szolgál. Az eindhoveni gyalogos híd jelentősége, hogy kizárólag biokompozit alkatrészekből épült, melyek kültéri, teherhordó szerepet töltenek be, a maga nemében tehát úttörő alkotásról van szó [Smits et al. 2016a, 2016b, Tazelaar 2017].

A Stuttgarti Egyetemen 2018-ra készült el a Bio-Mat kutatópavilon, ami egy 3,6 m magas gömbcsegely alakú három feltámasztási ponton nyugvó szalaghéj (25. kép). A feltámasztási pontok közötti fesztáv 9,5 m, alapterülete pedig 55 m². A héjat koszorúként fogja közre három szegmensíves RR tartó. Felületét egy háromtengelyű szalagháló borítja. Az egyes elemek rövidek, síkgörbék, és fafurnérral borított rugalmas biokompozit rostlemezéből állnak, amit vákuum formázással készítettek. A tengelyek találkozásainál rétegelt fafurnérlemez lapok között hat szalag csatlakozik egymáshoz, ezeket csavarkötéssel illesztették össze. Az építéshez 121 alkatrészt szereltek össze a földön négy nagy háromszöggé és ezeket kézi erővel illesztették az íves tartókra összeállítva az ívháromszög felületét. A BioMat pavilon igazolja, hogy bár a biokompozitok viszonylag kis szilárdságú, lágy anyagok, a megfelelő geometria és csomópontkialakítás azonban lehetővé teszi, hogy építészeti léptékű fesztávokat hidaljunk át velük [Dahy 2019].



24. kép: Gyalogoshíd biokompozitból [Tazelaar 2017]



25. kép: Bio-Mat pavilon [Dahy 2019]

3 Biokompozitok áttekintése

3.1 Biokompozit fogalom

A biokompozitok iránti érdeklődés már évtizedek óta fokozódik, kezdetben az orvostudomány majd jármű gyártás és sportszerek területén hódított teret, de mára megjelent az építészet, és tervezőművészet területén is. Hogy mit értünk biokompozit alatt, az mégis tág fogalom maradt, hiszen különböző szakterületek más és más értelemben használják, hol szűkebb, hol tágabb megközelítésben. Ezekben a meghatározásokban két feltételt támasztanak velük szemben, az egyik, hogy szerves alapúak, a másik hogy lebomlóak legyenek (1. táblázat). Ez a két feltétel azonban további pontosításra szorul.

Kémiai megközelítésben a molekulákból felépülő szénvegyületeket tekintjük szervesnek. A XIX. századig úgy tartották, hogy szerves anyagokat csak az élőlények életereje, a „vis vitalis” teremtheti meg. A XIX. században aztán megkezdődött a szerves anyagok mesterséges előállítása, így a szervesség fogalma kitágult, ezért kortárs fogalmaink szerint szerves anyagok közé tartozik a kompozitokhoz gyakran használt epoxigyanta, polipropilén, polietilén, poliamidok, valamint más szintetikus, nem lebomló polimerek.

Tovább árnyalja a képet a természetes és szintetikus szerves vegyületek összehasonlítása. A fent felsoroltak mellett szintetikus polimer még a politejsav (PLA), amit viszont keményítőből vagy más természetes anyagokból készítenek, részben biológiai, részben kémiai úton, továbbá biológiailag lebomló. A PLA-ra az összes idézett szakirodalom biopolimerként tekint és az ilyen anyagok közül a legelterjedtebb. Ebből fakad, hogy nem csak szerkezetük, de eredetük szerint is meg kell különböztetnünk a szerves anyagokat.

A „vis vitalis” modern értelmét a szén körforgása határozza meg, hiszen ez az elem a szerves vegyületek fő alkotója. A szén körforgása akkor rajzolódik ki, amikor végigkísérjük a szénatomok útját a táplálékláncon. A növények a légkörből veszik fel a szén-dioxidot, és az a fotoszintézis során épül be szerves anyagba. Növények hozzák létre a cellulózt, a lignint, a keményítőt. A szénatomok aztán végighaladnak a táplálékláncon, így az állatok testében létrejönnek a fehérjék, amiből például a gyapjú és selyem épül fel. A szén egy része persze nem jut tovább, mert ezt az élőlények kilélegzik, és egyből visszakerül a légkörbe. Az a szén, ami mégsem kerül vissza a körforgásba a talajba jut, mint szerves maradvány. Ezeket lebontó szervezetek alakítják át szén-dioxidá, vagy további szerves anyaggá, így előbb-utóbb ismét a légkörbe vagy a tápláléklánca kerül. A biokompozitok alapanyagát tehát ebből a rendszerből kell kitermelnünk.

A másik feltétel a lebonthatóság, ami szintén kérdéseket vet föl, hiszen például az autógyártásban népszerű lencsövet és polipropilén kompozit. A PP már részben, vagy teljesen biológiai alapanyagból is előállítható, mégsem bontható le biológiai úton, és a lencsál sem tud lebomlani a

kompozitban, hiszen a mátrix sem levegőt, sem nedvességet nem enged a rostokhoz férkőzni. Bio-PP nádcukorból készül, a bio-epoxigyantát pedig szójaolajból szintetizálják, mégis mindkettő természetes úton lebonthatatlan. Ezen felül lebontható anyagok között is különbség mutatkozik, a bomlási folyamat feltételei szerint. A mikroorganizmusok bontási tevékenységét befolyásolja a hőmérséklet, páratartalom vagy nedvességtartalom, napfény, és levegő jelenléte. Szempontok közé tartozik a bomlás környezete: komposzt, ami lehet ipari vagy házi, a talaj, ami jelentheti azt, hogy talajban elásva, vagy esetleg a talajfelszínen is, vizes közegben, tengervízben, vagy szennyvízcsatornában is végbemegy-e a folyamat. Ebből az következik, hogy különbséget kell tennünk az ipari lebontást igénylő és a természetben is lebomló anyag között.

A fent áttekintetteket összefoglalva tehát megállapítjuk, hogy a biokompozitok olyan kompozitok, amik biológiai eredetű, szerves anyagokból állnak és biológiai úton lebonthatóak. Bár a források sok esetben megelégszenek a fenti ismérvek részleges teljesítésével, jelen tanulmányban célul tűzöm ki, hogy mind eredet, mind lebomlás tekintetében maximálisan biológiai kompozitot alkossak. A kísérleti gyártást a 12. Melléklet: *Kísérleti gyártás és vizsgálatok összefoglalása* fejezetben mutatom be a dolgozat végén. A fejezet hátralévő részében a biokompozitok alapanyagait és a hozzájuk kötődő technológiai lehetőségeket tekintjük át [Tazelaar 2017, Nagy et al. 2016].

1. táblázat: Szerves vegyületek csoportosítása eredetük szerint

FOSSZILIS EREDETŰ	BIOLÓGIAI EREDETŰ	
ásványi eredetű alapanyagból, mesterséges úton előállítható szerves vegyületek	biológiai szerves anyagokból mesterségesen előállított vegyületek	természetben előforduló szerves anyagok, vegyületek
<i>epoxigyanta</i> <i>polipropilén (PP)</i> <i>polietilén (PE)</i> <i>poliamidok (PA)</i> <i>polivinilklorid (PVC)</i> <i>polisztirol (PS)</i> <i>polietilén-tereftalát (PET)</i> <i>politetrafluoretilén (PTFE)</i>	<i>politejsav (PLA)</i> <i>viszkóz</i> <i>kazein</i> <i>bio-epoxi</i> <i>bio-PET</i>	<i>kaucsuk</i> <i>fehérje</i> <i>cellulóz</i> <i>lignin</i> <i>keményítő</i> <i>polihidroxialkanoát (PHA)</i>

3.2 Természetes szálak

Eredetük szerint három forrásból származó természetes erősítő szálak különböztetünk meg, a lágynövényi, a fatest eredetű és állati eredetű szálakat.

Állati eredetű a selyemlepke (*Bombyx mori*) hernyója által termelt selyem és a gyapjú, ezek fehérjékből épülnek fel. A selyem egy értékes textilipari alapanyag, csak nagyon speciális esetben képzelhető el, mint szerkezeti kompozit, mindazonáltal ismerünk kísérletet ipari hulladék hasznosítására, kompozit gyártás céljára. A hulladék selyemből készült kompozit a más NFRP kompozitokkal összevethető, kielégítő szilárdságú alapanyag [Han et al. 2006]. A hernyóselyemnél

jelentősen ritkább a pókselyem. Mivel csak kis mennyiségben elérhető, különleges célra használják, gyógyászati vagy precíziós műszaki szerepet kap. A pókfonál különlegesen erős, számos kísérletet ismerünk szintetizálására, a kétezres évektől már kereskedelmi forgalomban is kapható szintetikus pókselyemből készült termék. A hernyó- és pókselyem mellett létezik még a kagylóselyem is, amit egy védett kagylófajta termel önmaga rögzítésére. Ezt a három állati szálát mirigyváladék eredetű szálaknak nevezzük.

Az állati eredetű szálak másik csoportja a szőrök, ezek közül a legeltejedtebb a gyapjú, ami a juhok testét borító összefüggő bunda. Kompozit gyártás szempontjából figyelemre méltó a nemez, ami hagyományosan juhgyapjúból készül és ipari alkalmazása is gyakori. A nemez felületét alkotó pikkelyek megfelelő nedves kezelés után megnyílnak és mozgatás hatására összeakadva sűrű, izotróp felépítésű, úgynevezett „nemszött” szövetet alkotnak.

A fatest eredetű kompozitok csoportosíthatóak aszerint, hogy milyen méretű és alakú alkotóelemekből állnak. Fatest eredetű cellulózból készül a WPC (*Wood-Plastic Composite*), de szervetlen kötésű lapokhoz is felhasználható, ahogy a mikroméretű faforgácsok is. Farostból és faforgácsból készülhetnek lemez vagy idompréselt gyártmányok. Ezek jobbára szálirány nélküli, rövid szálakkal erősített kompozitnak számítanak. A fafurnér esetében más a helyzet, a furnérok hasítása (vagy hámozása) során fennmarad a fatest hossz tengely menti száliránya. Bár a rostok kereszt irányban is kötöttek, a hossz tengely mentén jelentősen nagyobb szilárdságot mutatnak akár a rendezett hosszúszású kompozitok, ennek köszönhető, hogy a furnérok rétegragasztásával gyártott kompozitokban a lemezeket rendszerint eltérő száliránnyal fektetik, ezzel a természetes fánál nagyobb szilárdságú és homogénebb lemez alapanyagot készítve, például LVL, PSL (*Parallel-strand lumber*) tartó, vagy rétegelt falemez. Tartós és szilárd ipari alapanyag gyártható tömbösített faanyagból, hogyha ez a rostirányok figyelembe vételével történik. Ezzel a módszerrel növelhető a szilárdság, páraváltozással és időjárással szembeni ellenállás, tartósság, valamint a nyersanyag kedvezőbb kihozatala érhető el. Mivel a fatest a természetben is építészeti léptékű szerkezeteket alkot, nem csoda, hogy a belőle készült kompozitok nagy szilárdságúak lehetnek. Hátránya a lágy, évente betakarítható növényi alapanyagokkal szemben, hogy lényegesen hosszabb a természeti ideje.

Lágy növényi alapanyagok aszerint csoportosíthatóak, hogy a növény melyik anatómiai egységéből készülnek. Magszálak közé tartozik a pamut, ami a gyapotnövény magvát burkoló finom szálakból készül. Háncsrostok a len, kender és a juta, amik a textilipar mellett népszerű kompozit alapanyagok is. Levélrostját használják fel a szizálnak. Gyümölcs eredetű a kókuszrost.

2013-ban 33 millió tonna természetes szálát gyártottak világszerte, amitől 26 millió tonna pamut, 3,3 millió tonna juta, 1,2 millió tonna gyapjú, 900.000 tonna kókuszrost, és 1,6 millió tonna további fajta, úgy mint abaka, len, kender, kapok, rami, szizál és selyem [Townsend 2016].

A textiliparban gyakran keverékeket készítenek a szálakból, illetve biokomponens szálakat gyártanak, gazdasági megfontolásból vagy abból a célból, hogy további tulajdonságokkal ruházzák fel a szöveteket. Biokomponens szálak rendszerint szintetikus eredetűek, ismert kétrétegű, mag-köpeny elrendezésű, mátrix-fibrilla és csillag elrendezésű. Mag-köpeny kialakítás, mátrix-fibrilla és csillag elrendezés hőre lágyuló polimer szálak beültetését teszi lehetővé, melyek hőkezelés során összetapasztják az erősítőszálakat. Szálkeverékekkel szintén hőre lágyuló szálakat sodorhatunk az erősítőszálak közé, ezzel növelve az egymáshoz tapadásukat. Mindkét módszer alkalmas arra, hogy kiegészítse a granulátumban vagy fóliában, melegalakítással hozzáadott mátrixot. A sodrony és a szövet mély rétegeiben helyezzük el, kedvezőbb területet érünk el, ami erősebb szál-mátrix határfázis kialakulását eredményezi. A fenti lehetőségek figyelembevételével textilipari módszerrel funkcionális kialakítású lineáris kompozit alapanyag készíthető elő.

Líneáris előgyártmányon kívül két- vagy háromdimenziós funkcionális előgyártmány lehetőségét is figyelembe kell vennünk, hiszen járműiparban már alkalmaznak ilyet. A kompozittechnológiában elterjedtek az úgynevezett BMC, SMC és GMT előgyártmányok.

Az SMC (*Sheet Molding Compound*) egy paplan, amit hőre lágyuló lap alkatrészek gyártásához készítettek elő. Egyidejűleg tartalmazza az erősítőszálakat és a mátrix alapanyagát jelentő hőre lágyuló szálakat. Az SMC készülhet rövid- vagy hosszúszású kivitelben, az autópiacon leggyakoribb a nemszótt, nemezszerű kivitel. Itt kell megemlítenünk a GMT (glass-mat thermoplastic) alapanyagot, ami egy tekercsben gyártott üvegszövet hőre lágyuló fázissal ellátva. Az ilyen előgyártmányok jelentősége kettős, egyrészt, ahogy a bikomponens szálak és sodronyok esetében megállapítottuk, a mátrix egyenletesebb eloszlását biztosítják, egyszerre mind időt takarítva meg a melegalakítás helyszínén, másfelől lehetőséget nyújtanak a kompozit egyedi kialakítására. SMC gyártásakor kézi vagy textilipari eljárással alakíthatunk ki az igénybevételeknek megfelelő eltérő szálirányú öveket, vagy a szál-mátrix tömegarány változását az alkatrészen belül.

Míg SMC előgyártmány lemez alkatrészek kialakítására alkalmas, így térgörbe alakokhoz csak korlátozottan használható fel, a BMC (bulk molding compound) ezzel szemben kifejezetten összetett formák gyártására alkalmas. A BMC egy vattaszerű előgyártmány, amiben rövid erősítő- és hőre lágyuló műanyagszálak keverednek egymással. Hátránya az SMC-vel szemben, hogy csak rövid szálakat tartalmaz. Főként fröccsöntéshez vagy sajtoláshoz alkalmazzák, de kézi fektetés is elképzelhető [Shahzad et al. 2016, Kumar et al. 2014].

A korai, természetes anyagokból készült kompozitok, mint vályog, nagyobb szilárdságú és tűzálló acél, beton, üveg előretörésével háttérbe szorultak. Az 1999-es NATO konferencián viszont felmerült a természetes szálak alkalmazása a jármű és hadiipar számára, mint kisebb tömegű és olcsó megoldás. Új helyzetet teremt, hogy az NFRP alapanyagai mezőgazdasági termékek. A növényi rost tehát üzleti lehetőséget nyújt mezőgazdasági régiók számára, ezért az ezredforduló óta a FAO

is szorgalmazza a természetes szálak alternatív felhasználásainak kutatását, tekintetbe véve, hogy a termőterületek jelentős része a harmadik világban fekszik. 2000-ben megalapult az International Jute Study Group (IJSG), ami az ENSZ gazdasági szervezetének a részét képezi, 2009 a természetes szálak éve volt, 2010-ben pedig megalapult a Future Fibers, a FAO szervezete, ami a német mezőgazdasági minisztérium támogatásával jött létre (Ministry of Food, Agriculture and Consumer Protection). A szálak főként a textilipart szolgálják ki, de a fentiekből jól látható, hogy a mezőgazdasági anyagok termelése és kereskedelme az elmúlt évtizedben a stratégiai ágazatok felé közeledett [Kozolovski et al. 1999].

2. táblázat: Növényi erősítőszálak mechanikai tulajdonságainak összehasonlítása [Nabi Saheb et al. 1999]

	Tömeg (g/cm ³)	Húzószilárdság (MPa)	Young - modulusz (GPa)
Juta	1,3	393	55
Szizál	1,3	510	28
Len	1,5	344	27
Kender	1,07	389	35
Üvegszál	2,5	3400	72

3.2.1 Jutaszál

Jutaháncrostból készül az egyik leghosszabb és legszélesebb körben alkalmazott természetes szál, egyben a legolcsóbbak közé is tartozik (2. táblázat). Jutából két fajtát ismerünk, *Corchorus olitorius*, amit toszsa jutának, míg a *Corchorus capsularis*, amit fehér jutának neveznek a kereskedelmi forgalomban. A juta növény legfontosabb termőhelye a Gangesz–Delta, a több mint 1,5 millió hektár termőterületen Banglades és India osztozik. Ezek egyben a jutából készült termékek legnagyobb exportőrei is. 2012-ben a jutatermelés 3.461.964 tonna volt világszerte, amiből 55,23%-ot India, 41,94% Bangades termelt meg, őket követi 1,3%-kal Kína, a fennmaradó 1,53%-on osztozik a világ többi része, kiemelten, Nepál, Vietnám, Mianmar, Zimbabwe, Tájféld, Egyiptom és Brazília. Főként sodronyt, zsinórt, szövetet és zsákokat készítenek belőle vagy szőnyeggyártáshoz használják fel, mint hordozószövet [IJSG 2014].

A jutaszál hossza 1 és 4 m közötti, átmérője 17–20 mikron, fő összetevői a cellulóz és a lignin. A szálak rostokból épülnek fel, amiket mikrorostok alkotnak. A mikrorostok hozzávetőleg 8°-os szöget zárnak be a rostok tengelyére. Ez a szög minél kisebb, annál kedvezőbben alakul a kompozit szilárdsága. Kémiai összetételét tekintve 61–70% cellulóz, 13,6–20,4% hemicellulóz, 12–13% lignin 0,5–2% hamu, ~0,2% pektin, ~0,5% viasz, és ~12,6% nedvesség alkotja. Szilárdsági tulajdonságoknak a magas cellulóztartalom kedvez. XPS spektrometriás vizsgálattal 55,4% C,

39,38% O, 0,87% Ca és 4,71% N tartalom állapítható meg. Sűrűsége 1,3–1,5 g/cm³, húzószilárdsága 398–800 MPa, Young modulusza 10–30 GPa, rugalmas nyúlása 1,5–1,8% [Khan et al. 2015].

Az iparban előforduló NFRP kompozitok leggyakrabban kender, len vagy jutaszálakat tartalmaznak, ezek egymástól csak kis mértékben különböznek, akár mechanikai, akár kémiai tulajdonságaik tekintetében. Mivel a lehető legnagyobb szilárdság elérésére törekszünk, szövet erősítést ültetünk be a kísérleti gyártmányokba, ezért szem előtt kell tartanunk, hogy szövet előgyártmány piaci forrásból kedvező feltételek mellett álljon rendelkezésre. Saját munkánkhoz azért választottuk a jutaszálakat, mert mezőgazdasági, háztartási felhasználás miatt az összes természetes szál közül kereskedelmi forgalomban a legkönnyebben beszerezhető, akár kis tételben is. A textilipar nagy mennyiségben használja fel a lenszövetet, de ezt anyagot ruhagyártáshoz mindig fehérítik, ami kompozitgyártás szempontjából felesleges. Kenderből általában sodronyok (kenderspárga, kenderkötél) készülnek, ezért a kenderszövetet gyártatni kell. Mivel erősítőszövet egyedi kialakítása a fent tárgyaltak szerint további előnyöket nyújt, ipari léptékű felhasználáshoz tehát a len, kender és juta azonos súllyal szerepelnek, de a len és kender helyi anyag az import jutaszövettel [Riedel et al. 2003].

3.3 Biopolimerek

A biopolimer egy gyűjőfogalom, ami természetes eredetű, biológiai úton lebomló polimereket tömörít. Lehet egy polimer biogén, hogyha élő szervezet állítja elő (pl.: PHA, keményítő, fehérjék), de ide soroljuk a biológiai eredetű anyagok feldolgozásával gyártott polimereket is, (pl.: PLA) Biopolimer egyaránt lehet állati, növényi, gomba vagy baktérium eredetű, mindezt összefoglalva nevezik idegen szóval biobázisúnak is. Az előállítás kiinduló anyaga lehet például keményítő, szacharóz, lignocellulóz vagy növényi olaj. Itt kell megemlíteni a természetes gumit, és belőle készült további alapanyagokat, mint latex vagy keménygumi.

Léteznek alapanyaguk szerint hibrid polimerek, ezek részben növényi, részben fosszilis eredetűek, például a PET, ami 20%-ban növényi alapanyagból állítható elő, és a PUR, aminek 10-től akár 100%-ig változhat a növényi alapanyagtartalma, hogyha a polimer széntartalmát vesszük figyelembe. A PET-et csomagolóipar, a PUR-t az építőipar alkalmazza nagy mennyiségben, így az összes részben biogén alapanyagból készülő polimer közül a legelterjedtebbek (3. táblázat) 3. táblázat: részben vagy teljesen biológiai eredetű polimerek összehasonlítása [Aeschelmann et al. 2016].

Jelen dolgozatban feltételként támasztjuk a biopolimerrel szemben, hogy biológiai úton teljes mértékben lebomló, azaz biodegradábilis legyen, de tágabb értelemben ide sorolnak nem lebomló biogén polimereket is, mint például bio-polietilén, vagy bio-poliamid.

3. táblázat: részben vagy teljesen biológiai eredetű polimerek összehasonlítása [Aeschelmann et al. 2016]

	biológiai eredetű széntartalom	lebomlása természetben*	jellemző felhasználás
cellulóz-acetát (CA)	50%	nem lebomló	műselyem
epoxigyanták	30%	nem lebomló	szerkezeti kompozitok
etilén-propilén-dién (EPDM)	50-70%	nem lebomló	gumi alkatrészek járműipar számára
poliamidok (PA)	40-100%	nem lebomló	védőburkolat, nejlon, aramidok
polibutilén-adipát- ko-tereftalát (PBAT)	50%	biológiailag lebomló	csomagolás
polibutilén-szukcinát (PBS)	100% vagy kevesebb	biológiailag lebomló	csomagolás, biokompozit belső burkolat (mitsubishi)
polietilén (PE)	100%	nem lebomló	csomagolás, villamos vezetékek köpenye
polietilén-tereftalát (PET)	20%	nem lebomló	palack
poli-hidroxi-alkanoát (PHA)	100%	biológiailag lebomló	csomagolóanyag eldobható eszközök
politejsav (PLA)	100%	biológiailag lebomló	csomagolóanyag, eldobható eszközök
poli(trimetilén f r- tereftalát) (PTT)	27%	nem lebomló	autóipar, villamosipar
poliuretán (PUR)	10-100%	nem lebomló	hőszigetelés
keményítő keverékek	25-100%	biológiailag lebomló	csiríz, textilkeményítő

*: jelenleg figyelmen kívül hagyjuk a természetben nem előforduló baktériumot felhasználó ipari lebontás lehetőségét.

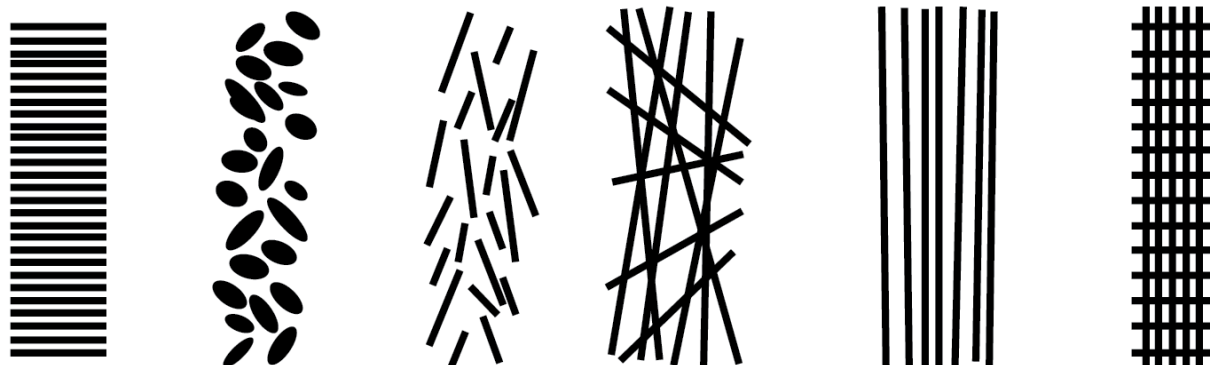
3.3.1 Politejsav

Jelen tanulmányban vizsgálatainkat azokra a polimerekre szűkítjük, melyek nem csak hulladékként, hanem szemétként is jó eséllyel lebomlanak. Feltételként támasztjuk továbbá, hogy az előállítás alapanyaga mentes legyen a fosszilis széntől. Így marad a PHA, amit baktériumok termelnek direkt bioszintézissel, és akár hideg tengervízben is lebomlik [Endres et al. 2011], a keményítő keverékek amik tradicionális ragasztó és merevítő anyagok, valamint a PLA, ami természetes alapanyagokból szintetikusán előállítható és alkalmas körülmények között könnyedén bomlik le. Mivel a PLA-t az iparban széles körben alkalmazzák, ezért relatív könnyen beszerezhető, valamint részletes ismeretek állnak rendelkezésre szerkezeti kompozitok mátrixaként való alkalmazásokról így továbbiakban a PLA tanulmányozására szorítkozunk.

A PLA egy elterjedt, piaci úton könnyen beszerezhető biopolimer. Legnagyobb szerepe, hogy merev és rugalmas csomagolóanyagokat gyártanak belőle. A gyártási kapacitás 2014-ben 195.000 tonna volt világszerte, ez 4%-kal haladja meg a 2012-es értéket. 26 vállalat gyártja 36 üzemben, az ára pedig közel megfelel a fosszilis alapú műanyagoknak. Piacvezetőnek az Egyesült Államok-béli NatureWorks-öt tekintik [Aeschelmann et al. 2016].

A PLA monomere a tejsav ($C_3H_6O_3$), ami előállítható vegyi szintézissel, vagy tejsavbaktériumos fermentációval (3. ábra). A tejsavbaktérium a legtöbbet kutatott baktériumok közé tartozik. A *Lactobacillus* olyan mikroorganizmusok csoportja, amelyek képtelenek önállóan megteremteni a saját növekedési faktoraikat, ezért sajátos táplálást igényelnek. Az, hogy pontosan melyik baktériumot alkalmazzuk, az attól függ, hogy mi az erjesztésre váró anyag. *Lactobacillus delbreuckii* alfajok közül a *bulgaricus* tejből állít elő tejsavat, a *delbreuckii* pedig szacharózból. Az *L. helveticus* képes laktózból és galaktózból is erjesztetni, az *L. amylophylus* és az *L. amylovirus* keményítőtől, az *L. lactis* glükózból, szacharózból, és galaktózból, az *L. pentosus* pedig papíripari iszap fermentálására használják. További mikroorganizmusok is képesek tejsavat termelni, mint *Rhizopus oryzae*, *Saccharomyces cerevisiae* és *Kluyveromyces lactis*. A fermentáció kiinduló anyaga lehet többek között melasz (szacharóz), tejsavó (laktóz), keményítő (maltóz, glükóz), tehát ipari melléktermékek és megújuló anyagok [Narayanan et al. 2004].

A tejsavból gyűrűfelnýtásos vagy polikondenzációs polimerizációval kénsav jelenlétével válik PLA. Lehetőség nyílik mikrohullámú polikondenzációra, ebben az esetben a katalizátor elhagyható [Bodnár et al. 2002]. PLA előállítható továbbá glükózból génmódosított *Escherichia coli* baktérium segítségével direkt bioszintézissel, PHA-hoz hasonló módon [Jung et al. 2010].



rétegelt

szemcsés

rendezetlen
rövid szálakrendezetlen
hosszú szálak

rendezett szálirányú

szőtt

4. ábra: Példák az erősítő anyag elrendezésére

A kompozitok szilárdsága függ az összetevők, a mátrix és az erősítőanyag szilárdságától és elrendezésétől (4. ábra), valamint a kettőt összekötő határfázistól.

A szálak tulajdonságain felül nagy jelentőséggel bír a szálak elrendezése. Hogyha a szálak egyirányba rendezettek, akkor az anyag anizotróp tulajdonságúvá válik. Így a szálirányban fokozott szilárdságot mutat, arra merőlegesen viszont jelentősen gyengébb. Ezért alkalmaznak rétegesen felépülő kompozitoknál (példáult rétegelt-ragasztott falemez) eltérő szálirányt az egyes rétegekben. A szilárdság tovább növelhető, hogyha az erősítőszálak kötésben állnak egymással, vagyis szövetet alkotnak. A szövetek jellemzően két, egymásra merőleges irányúak, de háromtengelyű megoldás is elképzelhető. A szövetek között találunk úgynevezett nemszött szöveteket is, például nemez. A nemszött szöveteknél a szálak rendezett összefonása helyett valamilyen más kötési mód áll fenn, általában rendezetlen felépítésű izotróp tulajdonságú textilt alkotva. A szövet lehetővé teszi a szilárdság növelését, viszont akadályozza a kompozit rugalmas alakváltozását és korlátozza a gyártástechnológia lehetőségeit, különösen kétszeresen görbült felületek kialakításánál. A természetben előforduló szálak felépítésű anyagok (szövetek) elrendezése mégis ötvözni igyekszik a hosszú szálerősítés és az izotróp anyagok előnyeit. Az egymásra rétegesen felépülő egyirányú szövetek kis elfordulással alkotnak helikoid, vagy paraboloid rendszereket, anyagminimum mellett biztosítva a maximális szilárdságot [Neville 1993] [Vincent 1982].

Jutával és PP-nel kísérletezett Khan és munkatársai [2015], a szilárdság javítása több módszert is ajánl, mint besugárzás UV vagy gammasugárzással, ami keresztkötéseket hoz létre a mátrixban. Oxidálást, ami érdekessé teszi a felületet, ezzel növelve a határfázis felületét, lúgos kezelést NaOH oldatban, ami szintén érdekíti a felületet és megtisztítja a szálakat. Az efféle kezelések hátránya, hogyha nem megfelelően végzik őket, akkor meggyengítik a szálakat. Kockázatmentes megoldás,

hogya adott eloszlásban magasabb szilárdságú szálakat keverünk az erősítőanyaghoz, például üveg vagy szénszálat. Ezt hibrid-szálerősítésnek nevezzük.

A PLA erősítésének lehetőségéről számol be Halász [2014], cellulóz nano- és mikrokristályok segítségével, illetve montmorillonit nanolemezekkel. A kompozit létrehozásához poli(etilén glikol)-t használt. A kísérletek során megállapították, hogy PLA mátrixon poli(etilén glikol)-lal kezelt, cellulóz mikrokristályokkal erősített kompozit *„nagy szívósságú, jó vízgőzzárású, megfelelő átlátszóságú és hőstabilitású”*.

3.4.2 NFRP biokompozit technológiai lehetőségei

Jelentős különbség a természetes és mesterséges szálerősített kompozitok technológiai lehetőségei között nem mutatkozik. Ami mégis befolyásolja a megmunkálást, az a természetes szálak alacsony gyulladáspontja. Mivel az általunk figyelembe vett biopolimerek (pl.: PLA) mindegyike hőre lágyuló, ezért a továbbiakban a hőre lágyuló szálerősített kompozitok gyártástechnológiáját tekintjük mérvadónak. A rövidszál-erősítésű, hőre lágyuló polimerek gyártási technológiája semmiben sem különbözik a képlékeny alakítású, kémiai reakcióktól mentes eljárásoktól. A hőre lágyuló műanyagok képlékeny alakítása során csak fizikai folyamatok játszódnak le, például halmazállapot változás, az alapanyag és a késztermék kémiai felépítése azonos, nem keletkeznek zavaró melléktermékek és a hulladék is újrahasznosítható.

Ilyen eljárás a kalanderezés, ami a lemezhengerezés polimertechnikai megfelelője. Ezzel az eljárással hengerek között lemez gyártmányokat lehet készíteni, illetve polimer réteget lehet készíteni hordozó felületekre, például textíliára. Ez az eljárás ideális biokompozit lapok előállítására.

A következő technika az extrudálás, ami nagyon hasonlít a sajtoláshoz. Ezzel a módszerrel tetszőleges hosszúságú, állandó keresztmetszetű gyártmányok készülnek, például csövek vagy összetett ablakprofilok. Az extrúzió menete, hogy a kiindulási anyagok, például műanyag granulátumot képlékeny állapotba hozzák, homogenizálják, nyomás alatt keresztülvezetik egy szerszámon, ami formára alakítja, végül a mérettartóság biztosítása mellett lehűtik. A kiindulási anyag lehet már eleve rövid erősítőszálakat tartalmazó granulátum.

A fröccsöntés érdekessége, hogy nem egy fém feldolgozásban ismert eljárásról alapszik, hanem sajátosan műanyagok elterjedésével kialakult eljárás. A fröccsöntés abban különbözik a hagyományos gravitációs öntéstől, hogy nyomás alatt hajtják végre, nagy folyékonyságú ömledékkel nagyon rövid idő alatt. A megfelelő berendezés segítségével nagy forma precizitás érhető el tág mérettartományban. Fröccsöntéssel készült rostokkal erősített polimer termékek széles skálája található a piacon, akár WPC, akár NFRP alapanyagból, ezek azonban messze túlnyomó részben inorganikus polimer mátrixszal készülnek, de PLA kompozit fröccsöntésére is

léteznek már receptek [Srithep et al. 2013]. Mivel az erősítőszálak rontják a folyóképességet, ezért a fröccsöntési eljárás nehézségekbe ütközhet, különös tekintettel bonyolult, vagy nagy precizitást igénylő formák kialakításánál. Ez a probléma korlátozza az NFRP kompozitok megmunkálását extrúziós fúvással, fröccsfúvással, és rotációs öntéssel.

Melegalakítással félkész gyártmányokat, például lemezeket munkálhatunk meg. Ilyenkor a munkadarabot rendszerint sugárzó hővel melegítjük, de nem olvasztjuk meg, hanem képlékeny állapotba hozzuk, ezt követően helyezzük a szerszámba, vagy a szerszámra. Hogyha szívással illesztjük a terítéket a szerszámhoz, akkor vákuumszívásról beszélünk. A melegalakítási eljárások különösen nagy jelentőséggel bírnak hosszúszál-erősítésű, illetve szövettel erősített kompozit esetében. A formaadás geometriai korlátja, hogy térbeli alaknak a terítékből kihajthatónak kell lennie, hiszen míg a tiszta polimer vagy rövidszálal polimer lapok térgörbe forma esetében vékonyodni, vastagodni is képesek, hosszúszálak esetében a szálak mozgásának lehetősége korlátozott, szövet esetében pedig minimális, különösen rugalmatlan szálak esetében. Mindazonáltal ésszerűen kialakított szerszám geometriája önmagában is képes elvégezni a szálak előfeszítését, hogyha a konstrukció azt megkívánja.

Az FRP kompozitok gyártására –melyet az alábbiakban áttekintünk- nagymértékben jellemzőek a reaktív eljárások, esetenként melegalakítással párosítva. Reaktív egy módszer, hogyha a kiindulási anyagok kémiai felépítése, összetétele eltér a kimeneti anyagokétól. Gyakran oldószerek, katalizátorok, kötőanyagok, és ogliomerek reakcióiról van szó, ami rendszerint kipárolgással jár. Mindazonáltal az FRP-nél megszokott oldószeres eljárások bizonyos technológiai kompromisszumok megkötésével gyakran átdolgozhatóak hővel alakításos módszerré.

A legegyszerűbb kompozit gyártási módszer a kézi felhordás, ezzel készültek az első üvegszálal kompozit hajótestek. Ebben az esetben rétegenként kerül egymásra a szál és a plasztikus állagú mátrix teríték, nyomás nélkül, szobahőmérsékleten. Az eljárás nagy előnye, hogy megfigyelhető a belső rétegek minősége, valamint egyedi kialakítás lehetőségét nyújtja a teljes keresztmetszeten. A szerkezet magasan igénybevett részein, sarokpontokon, hajtásélek közelében a kompozit megvastagítható, vagy bordákat, merevítő betéteket illetve nagyobb szilárdságú öveket építhetünk be, de kialakítható szendvicsszerkezet, akár szakaszosan is, kikönnyítésként. A kézi felhordáshoz használnak fából, fémből, gipszből készült szerszámot, de az így elkészült kompozitot lehetőség szerint utólag hőkezelik. Mivel az eljárás tág teret enged a tervezőnek a rétegek méretezésére, szálirányok és szöveti felépítések meghatározására, ezért a korai kézi laminálású kompozitoknál kialakult műszaki hagyományok jutnak érvényre a nagy teljesítményű, csúcstechnológiás kompozitok gyártásánál, üreszközök, repülőgépek, magas minőségű sporteszközök, fegyverek gyártásánál.

Önálló technikaként vagy a kézi felhordást kiegészítve alkalmaznak fújt eljárást. A fújt eljárás elve, hogy oldószerrel hígított gyantát fújnak fel a szerszám –akár függőleges– felületére, amibe helyben feldarabolt erősítőszálas szalag-szakaszok vegyülnek. A barcelonai IAAC-on (Institute for Advanced Architecture of Catalonia) a Stigmergic Fibers program keretében végeztek építészeti kísérleteket rövidszálas kender fújásos felhordásával, de ebben az esetben a szerszámot egy pálcákból álló váz helyettesíti [IAAC 2013]. A fújásos technika hátránya, hogy a mátrixanyag fújható halmazállapota nagy mennyiségű oldószerrel biztosítható, ami munkabiztonsági és környezetvédelmi kihívást jelent.

A polimer szilárdságát és a szál-mátrix határfázis erősségét azzal növelhetjük, hogyha gyártás közben nyomást gyakorolunk a kompozitra. Az egyik lehetőség, hogy egy rugalmas lapot szívunk a munkadarabra, ami a szerszám egyik oldalát helyettesíti. A szívóerő alkalmas arra, hogy gyantával töltsse fel a szerszámot, ezért ezt az eljárást vákuum-injektálásnak nevezik. Vákuum-injektálással készült az eindhoveni egyetemen átadott kísérleti biokompozit híd és a Schiphol repülőtéren elhelyezett biokompozit padok Amsterdamban [Biobasedbank 2016].

Tekercseléssel eljárással gyártanak nyomásálló csöveket és tartályokat, szerkezeti rudakat. A szál- és szalagtekercselés módszere, amit általában forgástestek megformálására használnak, úgy működik, hogy a szálát vagy szalagot egy nagy ellenállású fém szerszámra csévélik fel, vagy alakos szerszám esetében olcsó, eldobható anyagot használnak, tartályok gyártásánál bennmaradó szerszámot, ami a tartály belső burkolatát képezi. A tekercseléskor lehetőség nyílik a szálak irányának megválasztására, az alkatrészt érő igénybevételek figyelembe vételével, ahogy azt kézzel fektetett kompozitoknál is tapasztaltuk. Ezzel a módszerrel rendkívül kedvező tömeg-szilárdság arányú alkatrészek készíthetők. A szál többszöri, oda-vissza tekercselésével épül fel a többrétegű, rétegenként eltérő szálirányú szerkezet. Az eljárást elvégezték már hőre lágyuló mátrixanyaggal is, a feltekercselés helyén ráolvasztva a mátrixot, ezért biopolimerek alkalmazását is számításba vehetjük, természetes szövetből készült szalaggal, vagy cérnával.

A tekercseléssel eljárás egyik változata a fonatolás vagy körszövés. Ez egy textilipari eljárás alapszik, lényege, hogy szárazon készül el egy üreges zártszelvény erősítését szolgáló fonat. A fonatot végül egy alagúton átjuttatva vonják be mátrixszal, de lehetőség van már az erősítőszálak szövődékébe elhelyezni hőre lágyuló polimer szálakat. A szövődékbe fektetett szálak aztán utólagos hőkezelés során olvadnak fel és hozzák létre a kompozitot. A fonatolt eljárás szintén lehetőséget nyújt a kompozit egyedi felépítésének kialakítására.

A húzvasajtolás abban különbözik a sajtolástól, hogy folytonos szálát, szálakat, vagy szalagot húznak az ömledékbe, ami hagyományosan mátrix oligomer, de lehet hőre lágyuló műanyag is. Különlegessége a technikának, hogy a szálak a folyamat során végig húzásnak vannak kitéve, ezzel előfeszített szerkezetet hozva létre. Húzva sajtolást használják például erősítőszálas granulátum

gyártásához is, ebben az esetben hőre lágyuló mátrixba húznak bele szálakat, az így létrejövő pálcát pedig feldarabolják. Ilyen elven készíthetünk kompozit lemezeket is, sőt az építőipari üvegszál hullámlemez is ezzel a módszerrel készülnek, ilyenkor két fogaskerék-szerűen összeforgó formázólánc hengerei alakítják ki a hullámokat.

A fent megismert gyártási módokon kívül lehetőség van az úgynevezett AFP (*Automatic Fiber Placement*), vagyis automatizált szálfektető eljárásra, amit nagyobb méretű, egyszersmind nagy teljesítményű gyártmányok, repülőgéptestek, sport hajók építéséhez használnak. Az AFP eljárás lényege, hogy mátrixszal (oligomerrel) bevont szálak vezetnek keresztül egy, a szálak elhelyezésére szolgáló terítőfejen, amit ipari robot mozgat. A mátrixot helyi hőforrás - például lézer - olvasztja meg, és terítés után szinte azonnal megköt. Az impregnált szálak rendszerint egy pozitív magra kerülnek, és utólagos hőkezeléssel érik el végleges szilárdságukat [Gáti et al. 2011] [Czvikovszky et al. 2007].

4 Egyenletes teherelosztású könnyűszerkezet lehetősége

4.1 Könnyűhéjak szerepe

A héjszerkezetek fejlesztése acéllal erősített betonhéjakkal kezdődött a XX. század elején, és az újítás szinte azonnal áterjedt a könnyűszerkezetes építészet területére. Az előbbire példa Eugène Freyssinet és Pier Luigi Nervi munkássága, a könnyűhéjakra pedig egy korai példa Fritz Zollinger 20-as években szabadalmaztatott deszkákból álló tetőrendszere, aminek magyar változata Oikosztető néven ismert. A héjak anyagminimumra tervezett, takarékos műszaki megoldásként terjedtek el. Vagy óriásszerkezetek építésére használják, ahol az önsúlyt és a szerkezeti keresztmetszeteket optimalizálják ezzel a módszerrel, vagy ideiglenes alkotásokat építenek belőlük, melyek könnyű, gyors összeállíthatóságot és bonthatóságot feltételeznek. Napjainkra viszont több, pusztán dekoratív alkalmazás is elkészült, ahol a látványos szerkezet miatt döntenek egy fából készült rácshéj alkalmazása mellett, például a Nine Bridges Country Club esetében (Shigeru Ban Architects). A héjjal tervezésénél elemi szerepet kap a megfelelő héjforma megválasztása, ezért a héjak fejlesztése jelentős részben formakutatás [Nagy et al. 2020].

Mind kompozittechnológiára, mind a héjszerkezetek építésére jellemzőek a természeti párhuzamok. Mivel a szerves természet fő építőanyagai a szénvegyületekből felépülő rostok, a kompozitok fejlődése során számos természeti analógia segíti a tervezést. A héjszerkezetek fejlődése szintén természeti és tapasztalati elvek mentén folyt, a hártyák és hártyaszerkezetek pedig megtalálhatóak az élő szervezetekben is. Frei Otto a kovamoszatokat tanulmányozta, a Stuttgarti Egyetemen épült kísérletek is rendere? tervezési analógiákat merítenek a természetből. 2011-ben egy Echinoidea meszes vázának szerkezete szerint terveztek kettős héjú rétegelt lemez építményt, 2012-ben az Amerikai Homár ollójának héjzatát vizsgálták meg egy monocoque (illesztés nélküli) héj szöveteinek elrendezéséhez. Később a Rózsabogár (*Cetonia aurata*) szárnyfedeleit tanulmányozták és az ott megfigyelt, kétrétegű, ívelt oszlopokból álló redszert alkalmazták 2013–14-ben kiselemes FRP könnyűhéj, 2015–16-ban pedig egy rétegelt lemez építményhez. 2014–15-ben egy vízben élő pókfajta (*Agyroneda aquatica*) búvárharangja szerint építettek monocoque GFRP héjat. A 2016–17 ben két selyemhernyófajta (*Lyonetia clerkella* és *Leucoptera erythrinella*) hálóját vizsgálták meg egy konzolos FRP szövet tervezéséhez.

Élő szervezetek által létrehozott szerves szálak elterjedtek a természetben. Figyelemre méltó, hogy a biokompozitokhoz széles körben használt erősítőszálak (kender, len, juta és más lágyszárú növények) fő alkotója, a cellulóz kémiai szempontból nagy hasonlóságot mutat a kitinnel. A kitin a cellulóztól mindössze egy funkciós csoport különbözteti meg, a cellulóz hidroxilcsoportját a kitinben egy NH-CO-CH₃ csoport helyettesíti. A kitin gombatestek és rovarpáncélok anyaga, tehát természetes héjak építőanyaga [Vincent 1982].

A Nyugat-Magyarországi Egyetemen (jelenleg: Soproni Egyetem) épült egy kísérleti könnyűhég, amit 2000-ben adtak át (26. kép). A hég fából készült, kupola formájú, háromszögrácscsal fedett, 4×9 cm keresztmetszetű vörösfenyő elemekből áll. A rúdelemek hossza 130 és 150 cm közötti. A kupola egy 5,7 m sugarú gömb szelete, magassága 3 m, és 65 m^2 alapterületet fed le. Felülnézetben hatszögletű épület háromágú pillérekkel támaszkodik a talajra, a háromszög rácscsompópontjaiban – ahol hat rácselem fut össze – hat kapcsolólemezről és az ezeket összefogó két hengeres kialakítású alkatrészből álló kötőelem helyezkedik el. A kupola építését egy roncsolásmentes faanyagvizsgálati módszer tesztelésére használták, ami az alapanyag szilárdságának előzetes becslését teszi lehetővé, egyszersmind karcsú és esztétikus építészeti alkotás lehetőségét nyújtva. Ebben az esetben egy körszimmetrikus, fából készült könnyűszerkezetes rácshéjról van szó, amire számos példát ismerünk, ezekkel a héjakkal szemben közös elvárás az anyagtakarékosság és a nagyvonalú építészeti forma [Divós et al. 2000].

A fenti párhuzamokat figyelembe véve tekintjük át az egyenletes tehereloszlású szerkezetek lehetőségeit, arra keresve a választ, hogy hogyan építhetünk biokompozit anyagból ilyen szerkezetet.



26. kép: Szent József kupola a Soproni Egyetemen [Faipar 2010/2]

4.2 A Formakeresés hagyományos módszerei

A kompozitok szoros összefüggésben terjedtek el az anyagtakarékos – minimális tömegű illetve kis keresztmetszetű – szerkezetek kutatásával. Érdekes tehát áttekintenünk, hogy milyen szerkesztési elvek vezették az acéllal erősített beton, impregnált ponyvák, vagy faanyag, faalapú lemezek, vagy papír építészeti alkalmazását (5. ábra, lásd a 4.2. fejezet végén)

Michell a századfordulót követően publikált egy geometriai módszert minimális tömegű rácsszerkezetek tervezésére, 1917-ben pedig megjelent *Thompson, On Growth and Form* című műve, amiben megállapítja, hogy a természeti szerkezetek anyagminimumra törekszenek. Thompson

munkája szinte azonnal elterjedt a mérnöki tudományban, és ábráit máig előszeretettel használják biomimetikus témájú cikkek, illusztrálására. Figyelemre méltó, hogy a két szerző munkája kiegészíti egymást és meghatározza a természeti formák kutatásának irányelveit. Takarékos szerkezetekre törekvő mérnöki gondolkodás azon túl, hogy technikai újításokat alapoz meg, újszerű formanyelvet teremt, ahol esztétikai és technikai igények szorosan kapcsolódnak egymáshoz.

Takarékos szerkezetek tervezésének egyik tapasztalati módszere a kötél vagy láncívek alkalmazása. Hogyha egy kötél két végét rögzítjük, a kötél a saját tömege alatt meghajlik, és olyan alakzatot vesz fel, amiben nem érvényesül nyomás, csak húzás. Galileo Galilei úgy gondolta, hogy a két pontból függesztett kötél parabola alakot vesz fel, de ezt később megcáfolták. A kötélgörbét (vagy láncgörbét) 1690-91-ben írta le Huygens, Leibnitz és Bernoulli. A görbe érdekessége, hogyha a láncot kimerévítjük és megfordítjuk, az ideális húzóformából ideális nyomóforma válik. Ez a megfigyelés a XIX. század óta ösztönzi fordított láncgörbe alakú dongák építését, például égre nyitott, acélvázak üvegházak, vasúti pályaudvarok esetében. A katalán építész Antoni Gaudí (1852–1926) számos alkalommal készített lánchálóból fejjel lefelé fordított modellt az épületeiről. A boltozatokra ható terheket további súlyokkal modellezte, így torzítva a szabályos lánchálót, de megtartva annak előnyös tulajdonságát, ezen kívül alkalmazott hiperbolikus paraboloid alakú boltozatokat és elágazó pilléreket is. Építéstechnikai kísérletek mellett az újszerű, művészi megfogalmazást teremtett, természeti motívumokkal és ornamentális felületekkel, száz évvel megelőzve a korát [Lockwood 1961, Lluís i Ginovart et al. 2017].

A hiperbolikus paraboloid kulcsszerepet játszik a héjszerkezetek, például a korai betonhéjak tervezésében. A betonhéjak a két világháború között dongák és kupolák reneszánszát hozták magukkal, de Aimond és Lafaille, a francia légügyi minisztérium munkatársai 1935–36-ban jelentettek meg eredményeket, a torzfelületek kedvező geometriájáról, anyagtakarékos betonhéj tervezés számára. A legegyszerűbben hiperbolikus paraboloid hozható létre, hiszen ennek minen alkotója egyenes vonal, ami megkönnyíti a zsaluzást. A formát legegyszerűbben úgy hozhatjuk létre, hogy egy négyszögnek egy, vagy két szemközti csúcsát felemeljük a síkról. Gyakorlatban az első hiperbolikus paraboloid héjak 1938–39-ben, a Csepeli Szabadkikötő bővítésekor épültek, Menyhárd István tervei alapján. A 12 darab 20×20 méteres négyzet alaprajzú raktár két típusra osztható: koporsótető, ami négy torznégyszög összeillesztése, felülnézeten kereszt alakú tetőgerincet képezve, homlokzatokon hagyományos nyeregtetős épület képét nyújtva, a másik típus az esernyőtető, ez egy közepén letámasztott, sátoztető szerű megoldás, egyenes ereszsíkkal, szintén torznégyszögekből áll.

Hiperbolikus paraboloid betonhéjak világszerte épültek a háború után, sőt a geometriát szinte azonnal átültették faépítészetre is, bár az elgondolások javarészt továbbra is hagyományos nyereg és sátoztető épületek átiratai maradnak, kialakul néhány új tömegforma is [Booth 1997].



27. kép: Expo 1958 Philips Pavilion (Wikipedia Commons, Wouter Hagens)



28. kép: St. Mary templom, Kenzo Tange tervei szerint, 1964 (www.archdaily.com; Scarlet Geen)

A nemzetközi építészeti kánonban Iannis Xenakis tervei szerint épült Philips pavilon (27. kép) a hiperbolikus paraboloid betonháj első megjelenése, amit a brüsszeli világkiállításon adtak át 1958-ban. Az első időtálló középület, amit ezzel a szerkezettel fednek le, Kenzo Tange 1964-ben átadott tokiói St. Mary temploma (28. kép). A templomépület 25 m magas főtömege négy ilyen nyeregfelületből áll. A földről elrugaszkodó, égbeszökő vasbetonhájjal a japán építész jelzi, hogy a templom az ég felé törekszik, egyszerűen földöntúli belső teret alakít ki benne. Itt jelenik meg elsőként beton nyeregfelület a templomépítészetben [Kósa 1973].

A vonszolási görbét Leibnitz határozta meg és elnevezte traktrixnak. Különlegessége, hogy aszimptotája körül megforgatva olyan testet kapunk, aminek felszíne folytonosan negatív görbületű. Ez a tölcsérszerű test mellett, hogy alkalmas a nem-euklidészi, "hiperbolikus sík" modellezésére, hasonmása számos alkalommal bukkan fel kortárs építészetben, mint tartószerkezet. Vonszolási felületeket remekül modellezhetünk gumilappal vagy rugalmas szövettel, például harisnyával. Az így kapott tölcsérek a hártványon és hártvaszerkezeteken keresztül léptek be az építészetbe, melyek működését legegyszerűbben szappanbuborék kísérletekkel érthetjük meg [Lockwood 1961].

Első kísérlet: egy buborékfújó gyűrűvel gyűjtünk ki egy szappanhártyát, majd ejtsünk rá egy cérnából kötött hurkot. A hurok szabálytalanul úszkál a hártya tetején, de hogyha kiszúrjuk a hártya hurkon belülré eső részét, a hurok kör alakúra feszül ki és behúzódik a gyűrű közepére. Hogyha a cérnagyűrűt elkezdjük kiemelni a hártyából, eljutunk a traktrix felülethez. Második kísérlet: egy háromágú bot végeit lazán kössük össze, majd mártjuk bele a szappan oldatba: a cérnák kifeszülnek és egy csúcsai felé elkeskenyedő ívháromszöget alkotnak. A harmadik kísérletben egy szögletes buborékfújóra kötünk egy laza cérnát. Hogyha szappan oldatba mártjuk, a cérna először ugyan úgy sétál a hártya felszínén, mint az első kísérlet esetében, hogyha viszont befújunk a területbe, a cérna kifeszül és a hártyán egy borda jön létre. Ezek a bordák elágazhatnak vagy keresztezhetik egymást.



29. kép: Ark Nova, 2013 (*The Telegraph*)



30. kép: Montreal Velodrome építése (1973-1976)
[Xercavins et al. 2011]

A természetben a buborékokon kívül hártaként viselkedik a vízcseppek felülete, de a lágy falú sejtek is. Hártákat használnak folyadék vagy gáztartálynak, zsaluzóballonnak, hőlégballonnak, úszómedencék téli lefedéséhez, vagy ideiglenes légtartásos építményekhez, például Arata Isosaki és Amish Kapoor közös alkotása, az Ark Nova, amit 2013-ban, a Japán cunami utáni újjáépítés éveiben utazó hangversenyeremnek építettek (29. kép).

Pelikán József Szerkezettervezés című könyvében megkülönbözteti egymástól a hártát és a hártyszerkezetet, mert ez utóbbi a hártya ideális geometriáját követi ugyan, de képes ellenállni a nyomásnak, például mert farácsból, vagy acélbetonból készült, azaz hártya formájú héjszerkezetről van szó. Erre azért van szükség, mert a valódi membránban, hogyha megszűnik a gáz vagy folyadéknyomás, akkor összecuklik, például amikor egy gáztartályt leeresztenek, továbbá, a hárták rosszul reagálnak az aszimmetrikus, vagy pontszerű igénybevételekre, mint például szélteher vagy a kivitelezés közben fellépő terhelések. A valódi hártát a belső nyomás tartja meg, és mindig minimális felület keletkezik, csak terhelés hatására torzul el, és mivel állandó húzás ébred benne. Pelikán arra is felhívja a figyelmet, hogy a tényleges hártya, ha kör alaprajza szerkesztjük gömbszelet alakú, a hártyszerkezet ideális formája viszont forgás paraboloid [Pelikán 1970].

A szálerősített kompozitok szilárdságát növelhetjük az erősítőfázis előfeszítésével. Az elképzelés előfeszített beton szerkezetekhez kötődik, az eljárást Eugène Freyssinet (1879–1962) francia mérnök szabadalmaztatta 1928-ban. Kezdetben előregyártott beton elemeket (pl.: villamossági oszlopok) gyártottak ezzel a módszerrel, de az újítást további szabadalmak követték, többek között egy, a helyszíni előfeszítést lehetővé tevő eljárás. Freyssinet figyelemre méltó eredményeket ért el beton szerkezetekkel, nevéhez fűződnek az Orly repülőtér látványos léghajóhangárjai (1923), és számos rekord fesztávú híd. Kiemelkedő alkotás 1976-os montreáli nyári olimpiára készült Velodome (30. kép), amit Roger Taillibert építésszel együttműködve terveztek Freyssinet tanítványai. A Velodome megépítéséhez több technológiát alkalmaztak amit Freyssinet fejlesztett, ezért – bár a mester személyesen már nem vehetett részt a munkában – az életművét sűrítő alkotásnak tekintjük. Az épület egy tompa görbületű ívnégyszög alakú héj, amit hat boltív tart fenn, négy alátámasztáson. A lefedés területe 16.000 m², a héj organikus formája egy 172 × 130 m méretű

négyzetbe férne bele. A velodrom az olimpia idején kerékpár versenyeknek és cselgáncs mérkőzéseknek adott otthont, 1989 és 92 között pedig átalakították állatkertté, ahol tájszeletekben mutatják be Amerika élővilágát, „Montreal Biodome” néven. Számunkra azért figyelemre méltó, mert az előfeszített technológiák választékos és merész alkalmazása mellett jellegzetes „biomorfi” építészeti arculatot teremt. [Xercavins et al. 2011]

Frei Otto (1925–2015) a második világháborút követően kezdi meg építészeti tanulmányait, munkásságát a könnyűszerkezeteknek szenteli, olyan folyamatok felderítésén dolgozik, amelyek anyagtakarékos építési formához vezetnek. Véleménye szerint a formák már megvannak, az építésznek csak fel kell fedeznie őket. Így jut el a láncháló, majd szappanbuborék és gumimodellekhez. A szappanhártya kísérleteket fotogrammetriai módszerrel dokumentálja, és a felvételek alapján szerkeszti ki az építészeti formákat. Háló és gumilap esetében mérőmodelleket épít, formakeresési céllal.

Frei Otto 1954 és 63 között foglalkozik tiszta membránokkal, ebben az időben épül meg a Szövetségi Kertészeti Kiállítás zenepavilonja (Kassel, 1955), ami egy gyapjúszövetből álló torznégyszög alakú ponyva. Két szemközti csúcsát ferde árbóc tartja fenn, a másik két csúcsot pedig a földhöz rögzítették (31. kép). A szabásminta egy szappanhártya modell alapján készült, ahol a torznégyszög éleit cérnaszálak helyettesítik, a modelltől fotogramm alapján vették le a méreteket. A gyapjúszövet ponyva 1–1,5 méter széles szalagokból áll, és szövési irányban 25%, keresztirányban 10% nyúlással kell számolni. Az 1957-es kertészeti kiállítás kapujához üvegrost szövetet használnak, ez 1 méter széles sávokból áll, amik az illesztéseknél átfedik egymást. A kapuzat fesztávolsága 34 méter és 19 cm átmérőjű acélcső merevíti. Az üvegszál szövet nyúlása itt legfeljebb 3–4 %. Az 1972-es müncheni nyári olimpiára épült csarnok fedése steppelt paplan, ebben az esetben két membrán közé szigetelés került, hő és hangtechnikai megfontolásból (32. kép).



31. kép: Kertészeti Kiállítás zenepavilonja, Kassel, 1955 [Drew 1976]



32. kép: Német Pavilon, Expo '67, Montréal [Drew 1976]

Hártyából két féle van: feszített és lógatott, kétszeresen görbült forma viszont csak rugalmas anyag esetében lehetséges, illetve, hogyha szövet szálai lazák és képesek eltávolodni egymástól. 1958-ban, St. Louisban, a Washington University építészeti karán került sor a kötéllel szegélyezett gumilap kísérletekre. A lapokat a sarkainál fogva felfüggesztették, majd gipsz segítségével megszilárdították. Az így kapott alakzatot aztán kiöntötték üvegszál erősítésű polimer műgyantával. A modellről rétegelt lemez változat is készült. John Koch később Berlinben folytatja a kísérleteket Frei Ottóval, itt készülnek tüll modellek is, amiket poliésztergyantával merevítenek meg. Később drótrácsok is készültek. Különleges formálású rácsszerkezet-modellek sorozatán kívül készült egy 5 méter magas, 15 méter sugarú kísérleti kupola Essenben 40 × 60 mm keresztmetszetű oregon fenyőből.

Az 1967-es montreali világkiállításon két rácshéjkupola épült Frei Otto közreműködésével egy auditorium 17 × 15 méter területtel és a hozzá tartozó előcsarnok 20 × 4,5 méter területtel. A kupolák láncháló modellek elemzése alapján épültek, derékszögű, 50 cm tengelytávolsággal 33 × 22 mm keresztmetszetű hemlokfenyő deszkákból. A rácsra két réteg 6 mm vastag rétegeltlemez kerül, a külső borítás egyoldalán impregnált, színezett gyapotszövet. A kétrétegű, egymásra derékszöget bezáró deszkarácsnak csak a saját tömegét és a kivitelezés közben fellépő terheket kell megtartania, az időjárás aszimmetrikus igénybevételeinek rétegeltlemez megerősítés segítségével áll ellen.

Frei Ottót a takarékos nagy fesztávú szerkezetek elsősorban gyakorlatias szempontból motiválták, ezzel együtt kialakított bizonyos esztétikai nyelvezetet is. A kupolákat hegyes vagy tompa, pontszerű alátámasztásokkal emeli meg, vonalak mentén hullámokat vagy tarajokat alkalmaz, a héjak elfogyását gyakran a hártya modellekből átvett mozgalmas, gyorsuló íveléssel zárja le. Két fő tömegforma a lomha púphéj és a hegyes lezáratlan ívelésű figyelemfelkeltő alakzatok. A merevítést szolgáló összetartó árbócok és kábelek törékeny, finom alakja a formák tovább gyorsulását eredményezi és kontrasztot állít a ponyvák nagy építészeti tömegével. 1963-ban épült dortmundi jégpálya fedésénél egy légárbócot alkalmaz, ami egy levegőben lebegni látszó oszlop, valójában alacsonyabban álló tartószerkezetekről függeszkedik, hogy felemelje a ponyvát. A megoldást viszont látjuk Shigeu Ban Kobei papírtemplomának tetőszerkezeténél (1995), valamint egybeesik Kenneth Snelson korai tensegrity (lásd: 4.5. fejezet) modelljeinek elvével a 60-as évekből. A tömegek felszínét általában textíliák összeillesztését szolgáló sávozás borítja, ami kiemeli a héjak ívelését, rácshálóknál pedig a rácsszerkezet mintázata díszíti a tereket. A merész tömegformáláson túl, Frei Ottó munkái osztoznak a modern építészek formai puritanizmusában. Munkásságát végigkíséri az anyagokkal való kísérletezés, az ívelt, generatív formákat gyakran kezelt szövetekkel vagy szövetszerűen felépülő rácsokkal és rétegelt-ragasztott táblákkal építi meg [Drew 1976].

Bár az NFRP biokompozitok tartószerkezeti alkalmazása várat magára, hasonló természetű építőanyagot dolgozott ki Shigeru Ban, a 2014-ben Pritzker díjat nyert építész. Ban papírhengereket használ ideiglenes, épületek emelésére többek között menekültek számára. A papírhenger olcsó,

ipari felhasználásban gyakran alkalmazott kompozit gyártmány, ezért könnyen hozzáférhető, továbbá megújuló alapanyagból, vagy ipari hulladékból készül, újrahasznosítható és lebomló. Shigeru Ban 1986-ban kezdte el vizsgálni kartonspirálhenger tartószerkezeti lehetőségeit, kitérve a mechanikai tulajdonságokra, és a vízzel, illetve tűzzel szembeni ellenállásra. A papírépítészetnek számos előzménye van, például szükséglakások 1944-ben, vagy Buckminster Fuller kísérleti kupolája 1950-es években valamint az ezredfordulón is világszerte feltűntek papírépítmények, mint a westborough általános iskola gyermekmegőrző épülete (Egyesült Királyság, 1992–2002), Cottrell, Vermeulen építészek tervei szerint, vagy az ideiglenes színház Apeldoomban (Hollandia, 1993) amit Hans Ruijsenaars tervezett. Az ismert példák tükrében Ban-t tarjuk a legmerészebb és legsokoldalúbb papír-építésznek [Dooren et al. 2008].

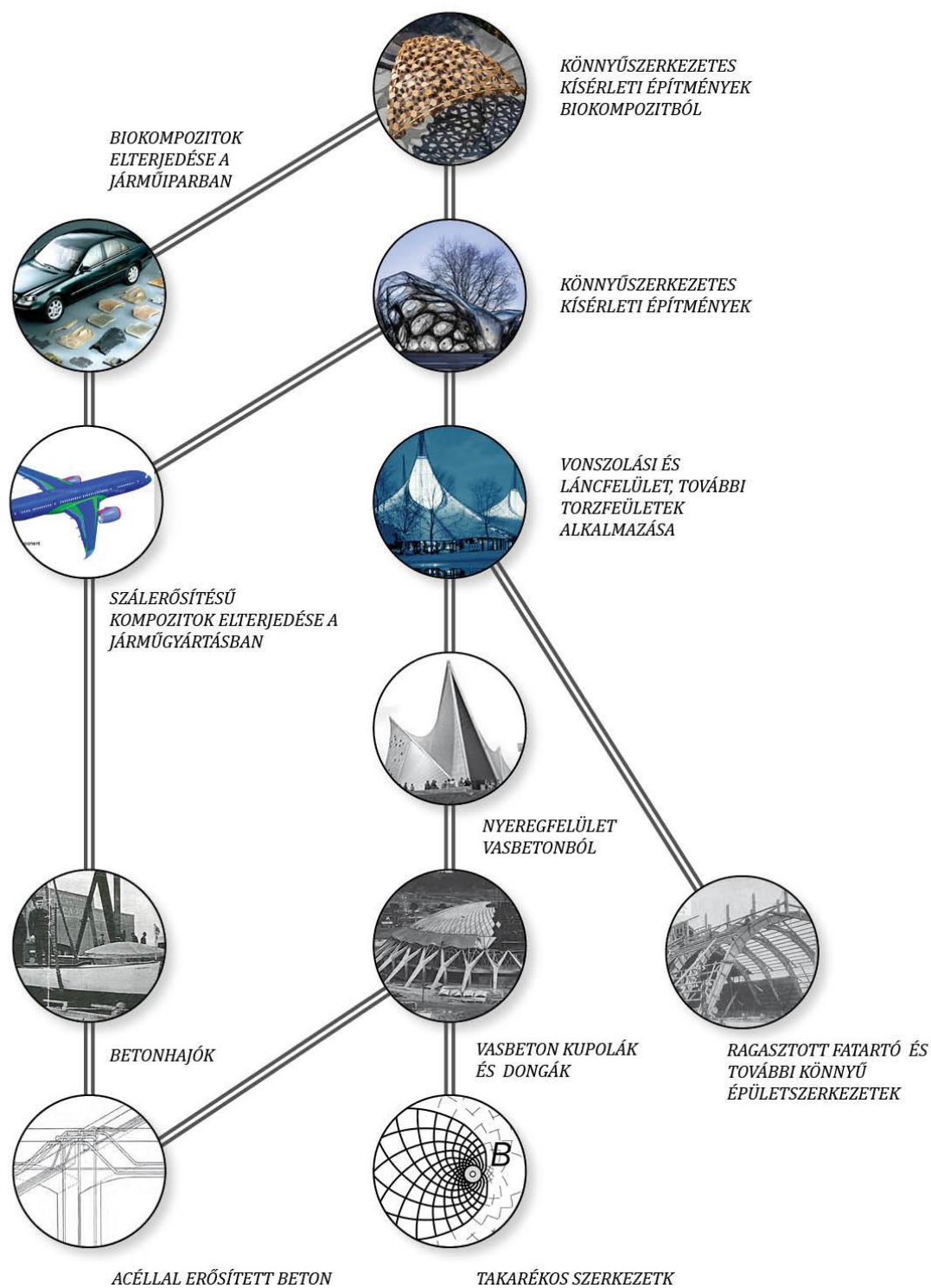


33. kép: Hannoveri Expo pavilon, Frei Ottóval közös alkotás (Hiroyuki Hirai)



34. kép: Ideiglenes iroda a Pompidou központ tetején (Didier Boy de la Tour)

1990-ben épült az első Ban-féle ideiglenes papír építmény, az Odawara Pavilon (Kanagawa, Japán), ahol rejtett fém tartószerkezet egészíti ki a kartonhengert, mert ekkor még nem került sor az építőanyag hatósági engedélyezésére. Később további ideiglenes szerkezetek épültek Japánban, Kobén 1995-ben függőlegesen felsorakoztatva építettek falat a hengerekből, Ruandában a polgárháború idején, 1999-ben pedig csővázás sátrak készültek. 2000-ben a törökországi földrengést követően, 2001-ben Indiában, szintén függőleges sorolású „gerendafalat” állítottak össze. 2008-ban Kínában egy átmeneti iskolát, 2010-ben Haitin épültek vázas szerkesztésű papírépületek. Olaszországban, 2011-ben egy koncertterem, 2013-ban pedig Új-Zélandon a karton katedrális. A felsorolt építmények közös feladata, hogy átmenetileg otthontalanná vált embertömegeknek nyújtson szállást, vagy közösségi teret a katasztrófákat követő újjáépítések befejezéséig, bár a kobei papírtemplom a tervezett három év helyett tíz éven keresztül állt, akkor bontották le, amikor a gyülekezet már nem fért el a falai között. Ban a 2000-es németországi expó pavilon építésénél Frei Ottóval dolgozott együtt. A hullámzó rácshéj papírhengerekből épült fel és a bontást követően újrahasznosításra került (**Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**). A Shigeru Ban Architects 2004-ben saját használatra is épített egy ideiglenes irodát Párizsban, ott három éven keresztül dolgoztak (**Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**). A papírhenger megfelel tehát, mind időszaki, mind tartós kihívásoknak, lakhatási és közfunkciónak egyaránt [SBA 2010].

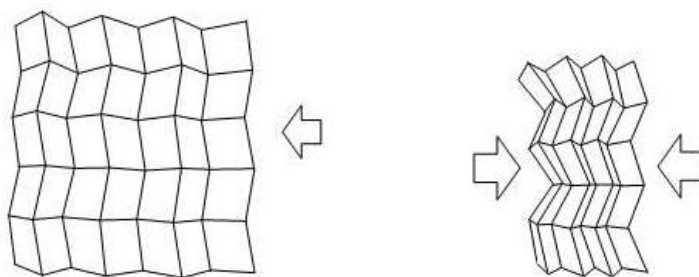


5. ábra: A héjak formai és technológiai fejlődése gráffal szemléltetve. Az ábra Kaesz Gyula 1978-as munkája nyomán készült, amiben fa diagramon szemlélteti különféle bútorok működésbeli és formai fejlődését [Zalavári 2020].

4.3 Formakeresés további módszerei: papírhajtogatás

A mára hagyományosnak számító módszereken kívül több formakeresési technikát is ismerünk, ami alkalmas könnyű és utrakönnyű szerkezetek tervezéséhez. Térbeli lemezművek modellezésének elterjedt módszere a papírhajtogatás. Számos kísérletet ismerünk papírhajtogatásból származtatható szerkezetek tervezésére, fából, faalapú lemezekből, vagy más lemez előgyártmányból, például szendvicspanelek. Ennek oka a szerkezeti arányokban keresendő, és a papírból épített modellen jól láthatóak a terhek hatására fellépő alakváltozások. A papírhajtogatás továbbá eszmei módszer egységes burkolatú, például szálcement vagy fémlemez borítású épülettömegek modellezésére.

A papír művészi hajtogatásának gazdag hagyománya maradt ránk, mind keleten, mind nyugaton. Európában játékokat és funkcionális alkalmazásokat ismerünk, mint borítékok, könyvkötés vagy mives csomagolások, a távol-keleten ezzel szemben több száz évre visszamenő művészeti tradíció maradt fenn. Az origami mai arcát jelentős részben Akira Yoshizawa (1911–2005) japán papírművésznek köszönhetjük. Yoshizawa 1954-ben megjelent Új Origami Művészet című kötetében tűnik fel először a papírhajtogatás lejegyzésére szolgáló, diagramszerű képi nyelv, innen származik például az a hagyomány is, hogy a vágásokat szaggatott vonallal jelöljük. Ekkor még a papírhajtogatást, mint hagyományos művészeti technikát, és kezűgyességet fejlesztő játékot mutatja be a könyvben.



6. ábra: Miura féle hajtogatás [Miura 1993]

Koryo Miura, japán asztrofizikus, űrben kinyíló napvitorla tervezéséhez alkotott meg egy, azóta róla elnevezett origami-mintát. A minta legyezőhajtogatásból indul ki, majd a zárt legyezőt tört szögben váltakozó irányban megtörve folytatódik (6. ábra). A vetület így egyenes tengelyeket keresztező cikk-cakk vonal lesz, ami azzal a különleges képességgel ruházta fel a lapot, hogy összecukott állapotból a két szemközti sarkánál fogva egyetlen mozdulattal kihajtható majd összecukható lesz. A Miura mintájának persze vannak előképei: papír világítótesteknél is hagyományosan elterjedtek a különféle terülminták és térképeket is ismerünk, ahol a praktikus kihajthatóság miatt alkalmaznak hajtogatás. 1996-ban az N2-es japán kísérleti műholdat szerelték fel Miura rendszerű napvitorlával, ezzel egy magasabb szintre emelve az origami műszaki alkalmazását.



35. kép: Fold Finding Origami Pavilion alumínium szendvicslemezekből áll [Friedman 2016]

A cikkcakkos hajtásminta egy változatát figyelhetjük meg szitakötők szárnyerezetén. A szitakötők szárnyán néhol a hosszanti ereket rövid, keresztirányú érszakaszok keresztezik, ahogy azt a Miura hajtásnál láttuk. A hosszú cikkcakkos részeket sokszögekkel fedett mezők választják el egymástól. A jelenség magyarázatát a szitakötő születésekor érzük tetten: a bábban a lágy szárny egymásra fekvő rétegekben várja, hogy kinyújtóztassák, akár egy gondosan előkészített ejtőernyő. Az újszülött szitakötő szárnya azonban csökevényesnek látszik, és csak szakaszosan nyeri el végleges alakját. A szárny egykori hajtáséleit olvashatjuk le tehát a hosszanti cikkcakkos szakaszokon, vagyis a Miura mintát a szitakötő is pontosan arra a célra használja, mint az úrkutatók [Nishiyama 2012].

A papír hajtogatása során éleket hozunk létre, ezzel tengelyek mentén megnövelve a lap sűrűségét. Műszaki szempontból figyelemre méltó, hogy további szerkezetek, anyagok beépítése vagy forgácsolás nélkül képesek vagyunk irányítani a papír mozgását, megváltoztatni a mechanikáját. Az origami minták elkészítésével vékony sík lemezt alakíthatunk összetett térbeli formává, és befolyásolhatjuk a lap merevségét vagy elhajlását. Ezért a papírhajtogatás művészetét tekinthetjük anyagprogramozásnak.

A papírhajtogatás műszaki alkalmazására számos példa ismert, amiket három csoportra oszthatunk. Összecsukható képességű napvitorlák, orvosi eszközök, vagy tábori építmények működése származtatható az origamiból. Merevség növelésére használják a hajtogatást könnyűszerkezetű szendvicslemezeknél vagy repülőgéptörzsekben, de építészetben is előfordul, amikor esztétikus eszközzel szeretnénk egy tartó vagy födém állékonyságát növelni. A harmadik esetben lökéscsillapításra alkalmaznak origami mintát például autók vagy csomagolások esetében [Schenk et al. 2011].

Hajtogatási technikák kísérleti építészeti alkalmazásának kiváló példája a Detmold University of Applied Sciences 2016-ban született „Fold Finding” kutatás, aminek végeredményeként 8 db alumínium kompozit lemezből digitális eljárással origami mintával merevített pavilon épült (35. kép). A két kapu-szerűen kapcsolódó tölcser alumínium lemez és habosított PET anyagú szendvicspaneleit CNC technikával „karcolták be” hajtáséleket képezve. Az eredmény egy kis keresztmetszetű önhordó héjszerkezet gyors és pontos összeépítéssel [Friedman 2016].

Vasbeton építészetben egyáltalán nem újszerű papírhajtogatással tervezni. Korábban már idézett Dr. Pelikán József-féle Szerkezettervezés című könyvében (1970) az egyirányú lemezművek állékonyságát elemezve hívja fel a figyelmet arra, hogy egyes elgondolások egyetlen lapból kihajtogatva remekül „modellírozhatóak”. Bár felhívja a figyelmet a síkbafejtethezőség szilárdságtani hátrányára, vagyis, hogy erőhatásra kinyílhat, ezért támasztó felületeket vagy diafragmák beépítését javasolja. Pelikán külön kitér az egyenlő szárú háromszögekkel felosztott lapból modellezhető lemezműre: „A hajtogatással származtatott lemezmű is kellő merevségű lehet, ha háromszögei nem túl tompaszögűek. Például az ugyanazon körbe szerkesztett szabályos hatszög és szabályos háromszög oldalaiból szerkesztett háromszögű hálózat már elég merev lemezművé képezhető ki.” A hazai gyakorlatban sem példátlanok a hajtogatott betonháj fedések, például Budapesten az Egressy utcában álló 14 tantermes faipari szakközépiskola éttermi szárnya, amit Tiry György tervezett 1967-ben, a KÖZTI munkatársaként. Az épületegyüttes szép arányú, mértékletes tömegét egészíti ki a gyülekező helyül is szolgáló reprezentatív épületszárny [Lantos 2015].

4.4 Szalagháj

Szalaghájakon olyan szerkezetet értünk, ahol az egyes alkotóelemek kettő vagy több fő alkotóirányban helyezkednek el és keresztezve egymást, együtt egy lemezként viselkedő testet alkotnak. Az ilyen épületek különleges csomóponti rendszerrel és egyedi erőjátékkal bírnak. A szalagokat merev csomópontokkal illesztve áttört lemezhez hasonló szerkezetet kapunk, hogyha a csomópontok egy részét csuklósan alakítjuk ki, növeljük a szerkezet rugalmasságát, és megfelelő elrendezés esetén kinetikus szerkezethez jutunk, akár összezsugorítható építményt hozva létre. Dr. Fekete Zoltán 2014-ben az NYME-n (jelenleg SOE) benyújtott értekezése részletes betekintést nyújt a szalaghájak építésébe. Faszalagok végeelem modellezésével (FEM) állapítja meg, hogy *„...a szalagháló 2 cm × 12 cm keresztmetszettel a 4 cm × 4 cm lécszalag keresztmetszetű rácsháj teherbírásával nagyságrendben egyenértékű.”*

Fekete megállapítja, hogy az általa vizsgált derékszögű négyzethálós szerkesztésű szalagháj maximális szilárdsága akkor érhető el, ha egy koszorúra épül. A koszorú lehet valamilyen merev szerkezet vagy például kábelgyűrű. További javaslatot tesz a vázat merevítő lapok vagy kötélzet beépítésére átlós irányban [Fekete 2014].



36. kép: "home for all" játszóház [Arup 2015]



37. kép: Gifu Media Cosmos [Toyo Ito 2015]

A 2015 februárjában átadott "home for all" játszóház adományokból és szakértők önkéntes munkájával épült fel Japánban, Szoma városában (36. kép). Szoma elszenvedője volt a 2011-es természeti katasztrófáknak és atomerómű szerencsétlenségnek. Az épület célja, hogy a helyi gyerekek és szülők számára biztosítson helyet a játékhoz fedett körülmények között. A tervezésben Toyo Ito & Associates, Architects, a Klein Dytham Architecture az ARUP Japan vett részt, a kivitelezést a Shelter cég végezte. Az épület 2015-ben elnyerte a *World Architectural Festival (WAF)* díját kulturális épületek kategóriájában [KDA]. Figyelmünket az újtó szellemű tetőzet keltette fel, ami egy Ito Tojo által tervezett könyvtár a 'Minna no Mori' Gifu Media Cosmos mintájára épült (37. kép). A *Media Cosmos* mennyezete egy hullámzó felület, ami fa deszkák szövetéből épül fel, míg a játszóház kör alaprajzú kupola [Toyo Ito 2015].

A kupola 16 m átmérőjű ívelt háromszögrács, 20×120 mm keresztmetszetű deszkák egymásra rétegzésével épült. A deszkák anyaga japán vörösfenyő, erre a fafajra kedvező hajlékonysága miatt esett a választás. A fűreszárut helyszínen hajlították meg. A deszkák rétegszáma a feltámasztás felől az ereszhez közeledve fokozatosan csökken. A belső térben a kupola 60 mm vastagságú kereszt-ragasztott pillérekre támaszkodik. A pillérek díszes kivitelűek, stilizált faként jelennek meg a játszóházban.

A 2010-es ITKE-ICD kísérleti pavilon, persze sokkal merészebben aknázza ki a szalaghéjban rejlő lehetőségeket (38. kép). Anyaga rétegelt furnérlemez, amit a helyszínen hajlítottak formára. Hogy a különleges tórusz jellegű geometriát a helyszínen gördülékenyen készíthessék el, a szalagok változó szélességgel készülnek, ezzel szabályozva a hajlítás változó sugarát. [Molitz et al. 2012].

Az összetett formálású fonott szerkezetű rácshéjépítés csúcsteljesítménye a metzi Pompidou központ, amit 2010 tavaszán adtak át és a tető kialakítását egy kínai fonott kalap ihlette (39. kép). A tervezést Shigeru Ban Architects Europe és Jean de Gastines Architects, mérnöki munkát az Ove Arup és a Terrel végezte. A jellegzetes szalaghéj hatszög-háromszög archimédészi síklefedés

hajlításával jön létre. Héjazatot félig-áttetsző teflonbevonatú üvegszál szövet képezi (PTFE). Az épület múzeumként üzemel, melynek fő tereit három egymásra helyezett 90×15 méter területű hasáb foglalja magában [Lewis 2011].

A faszerkezet 6 rétegű, előre gyártott rétegelt-hajlított gerendákból áll, melyeket a Holzbau Amann gyártott, és fa idegencsappal kötődnek egymáshoz. Az összetett geometriát járműgyártással foglalkozó szakemberek segítségével modellezték. Tervezés során számítógépes formaoptimalizálást is végeztek az Arup cég munkatársai. A Pompidou központhoz kifejlesztett technológiát később a *Heasly Nine Bridges Golf Clubnál* pörgetik ki, amit Yeouban, Dél-Koreában adtak át ugyanazon évben (40. kép). Ez egy szögletes alaprajzú héj, ami jelentős szimetriákat mutat, itt öt rétegben 3500 íves gerenda illeszkedik egymáshoz lapolt csomóponttal. Ezt az összetett rendszert referenciafelületek és számszerű paraméterek segítségével modellezték [Scheurer 2011].



38. kép: ITKE-ICD pavilon 2010 [Molitz et al. 2012]



39. kép: Pompidou központ, Metz [Centre 2011]



40. kép: Heasly Nine Bridges [SBA 2010]

4.5 Szakaszosan nyomott hártya

Olyan szerkezeteket nevezünk tensegritynek, a tensile integrity szavak összevonásával, amelyekben folytonos húzás mellett csak szakaszos nyomás ébred. A nyomott rúdelemek tehát kábelek szövődékében függenek egymással nem érintkezve. Első pillantásra azt a benyomást keltheti egy tensegrity szerkezet, hogy a rúdelemek levegőben lebegnek. A szellemes szerkezet nagyon könnyű, de tömegéhez és keresztmetszetéhez képest szilárd. A szerkesztési elv a 60-as években született meg, Snelson, Emmerich és Fuller nevéhez fűződik. Buckminster Fuller nevezte el 1962-ben és az úgynevezett geodéziai kupolák tervezésére használta fel az újítást, míg Snelson konstruktív szobrászként egyedi formanyelvet teremtett vele. A tensegrity logikai modelljét a természetben is megfigyelték, sejtvázak és emlősállatok vázrendszerén ahol a merev csontok lágy szövetekbe illeszkedve veszik át a terheket [Gan 2020].

A szerkezet alkalmazása ugyanakkor nem előzmények nélküli, például 1951-ben Londonban emeltek egy több mint száz méter magas installációt a Festival of Britain idejére, ami nem érintette a talajt, hanem az alsó csúcsa három alátámasztási pontról függeszkedett. Később az árbóc-szerű megoldás visszaköszön több építészeti alkotásnál, például a 2011-ben átadott Kobei ideiglenes

papírtemplom ponyva fedését is egy függesztett rúdelem tartja közepen (41. kép). A függesztési pontokat a tető koszorújához szerelték. Hasonló elvű és nem kevésbé ötletes megoldás a körgyűrűs kábelkupola (42. kép), amit nagy fesztávolságú lefedésekhez használnak. A koszorúról nem csak egy árbócot függesztenek, hanem egy újabb koszút és így tovább. A Florida Suncoast Dome (Saint Petersburg, USA), 1989-ben épült Körgyűrűs tensegrity szerkezetű kupola, átmérője 210 méter [Robinson 1989].

A fenti példák jellegzetessége, hogy a rúdelemek a húzott alkatrészekkel szöget zárnak be, önálló alkatrészként kapcsolódnak a szerkezethez. A következő példa egy kísérleti építmény, és azért figyelemreméltó, mert a rúdelemek a ponyva síkjában fekszenek, szervesebb egységet alkotva a húzott alkatrésszel, mitöbb, egy elemként jelennek meg az építészeti térben. A Tokyo University of Science-en 2011-ben építettek egy tensegrityn alapuló kísérleti pavilont, ami azért figyelemreméltó, mert kábelek beépítése helyett a húzóerőket egy rugalmas poliészter szövet veszi fel (43. kép). A sátor 26 m hosszú, legnagyobb szélessége 7,5 m, magassága 3,25 m. A nyomóerőket 131 darab, a vászonhoz illesztett 25 mm átmérőjű alumínium cső veszi fel, a ponyva vastagsága 0,7 mm. Egyedisége abban áll, hogy a hagyományos kábeltetők esetében a térelválasztást egy tartószerkezetre terített ponyva végzi, míg ebben a lefedés egyben tartószerkezet is [s.n. 2012]. A tensegrity szerkezetek azért keltették fel a figyelmünket, mert a lehető legnagyobb mértékben húzásra veszik igénybe az anyagot, aminek a szöveterősítésű biokompozitok nagymértékben ellenállnak. Bár alapvetően vázokról van szó, Snelson megjegyzi, hogy a szerkezeteit beborítva origami modelleket kapunk. A tokiói pavilon esetében az eltolással egymás mellé szerkesztett párhuzamos rúd-sorok jellegzetes rombusz alakú mintát hoznak létre a szövet meggyűrűsével, egy azonos tegelyekre szerkesztett origami héj lehetőségét kínálva föl.



41. kép: Kobei ideiglenes papírtemplom, 2011 [SBA]



42. kép: Florida Suncoast Dome, Saint Petersburg, USA, 1989 [Robinson 1989]



43. kép: MOOM pavilion a Tokyo University of Science-en 2011-ben [s.n. 2012]

4.6 Biokompozit alkatrészek kötése

Mivel kísérleti anyaggal dolgozunk, nincsenek kialakult hagyományok az egyes alkotóelemek kötésére, leszámítva a két korábban említett példát. Saját kísérleti gyártmányunk feldolgozása során viszont bebizonyosodott, hogy az általunk fejlesztett juta/PLA kompozit faipari gépekkel megmunkálható, ezért faanyagnál puhább, de hőre lágyuló, és szövetes felépítésű anyagok illesztéséhez kísérleti pavilonok és más építményeknél alkalmazott megoldásokat tekintünk át a továbbiakban.

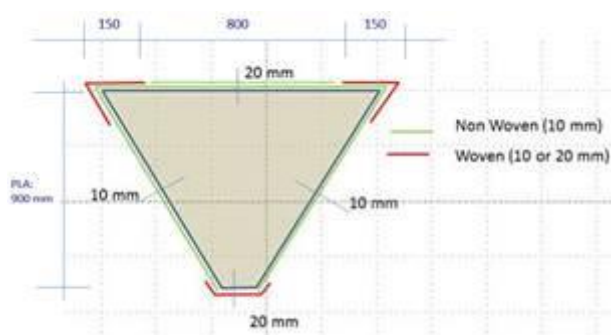
4.6.1 Biokompozit híd kötése

Az első ismert NFRP biokompozitból készült kültéri tartószerkezet az Eindhovenben 2016-ban átadott biokompozit híd. Ez a híd egybeöntött héjú, így a támasztási pontok és a korlát rögzítésétől eltekintve illesztésmentes. A korlátelemegek szintén kompozitból készültek, és M8 × 100-as facsavarok kötik őket a híd testéhez. A csavarok áttörik az egybeöntött héjat és a belső PLA habból kialakított magban fekvő 245 × 70 mm keresztmetszetű tömörfa alkatrészben állnak. A beültetett fa alkatrész megóvja a vékony kompozit héjat és a puha PLA habot az elnyíródástól.

A híd építését megelőző kutatások során javaslat született az ilyen, egybeöntött héjú, szendvics-szerkezetű alkatrészek illesztésére csavarkötéssel. A két csatlakozó alkatrészt, a lap síkjára merőleges irányú fülek egészítik ki, melyeket anyás csavarral kötöttek össze. A csavarok tengelye 30 mm-re esik a héj síkjától. Mivel az 1 m széles híd teherbírása 5000 N/m², az illesztésnél 5000 N/m vonal menti teherrel számolnak. A 60 mm széles prototípusok tönkremenetele 4 pontos hajlítási vizsgálat során 1200 N erő hatására vette kezdetét. Így a füles illesztés megfelelőnek bizonyult a hídelemek illesztésére [Biobasedbank 2016].



44. kép: Biokompozit híd próbaelege
[Biobasedbank 2016]



45. kép: Biokompozit híd keresztmetszet vázlata
[Biobasedbank 2016]

4.6.2 Csavarkötés

Húzva extrudált, üvegszálal FRP alkatrészek illesztésére bevett módszer az anyás csavarok beépítése, például a dániai Kolding-ban 1997-ben átadott Fiberline gyalogos híd esetében. Ennek köszönhetően számos modell és számítás áll rendelkezésre, amiből a csavarkötéssel illesztett FRP szerkezetek viselkedésére következtethetünk, valamint rendelkezünk a fennálló építményekkel kapcsolatos gyakorlati tapasztalatokkal.

A csavarkötés a legelterjedtebb kötési módok közé tartozik, esetünkben a legfőbb szerephez helyszíni beépítésnél jut. Az NFRP alapanyag csavarállóságát széteszló csavarrendszerrel növelhetjük, ilyenkor az egyes csavarokra jutó teher egyenetlenül oszlik meg, a külső és belső csavarok között akár 58% eltérés is lehet, viszont a kötésen keresztül átadott teher nagymértékben megoszlik a szövetek között. Nagy átmérőjű csavarállaték alkalmazása tovább osztja a terhet. Az allatét javasolt külső átmérője a menetes szár átmérőjének kétszerese. A harmadik szempont ami - bár a kompozitok szilárdságát általában befolyásolja - az erősítőszálak elrendezése. Bár az egy irányba rendezett szálak összpontosítják a húzó szilárdságot az adott irányba, csavarkötésnél nagymértékben növelik az elnyíródás kockázatát. Ilyan esetben tehát rendezetlen, több irányba rendezett, vagy szótt kialakítású szálerősítés az ideális [Feo et al 2012].

FRP és polimer alkatrészek szerelt kötésére alkalmaznak menetmetsző csavarokat, jellemzően lemezcsavart, vágóéllal ellátott aszimmetrikus csavart, vagy nem kör keresztmetszetű csavart. Szükség esetén az alkatrészt egy tubus beépítésével védik a kiszakadástól. Egyedi gyártású, például kézi fektetésű vagy melegalakítással készült kompozit esetében a tubus már a gyártás során beépíthető. Tervezett csavarhelyek körül az erősítőszálak kedvező rendezése nagymértékben megnöveli a csavarállóságot. Szövettel erősített kompozitnál a paplanban – textilipari eljárással – hímzést helyezhetünk el, ezzel további szöveteket igénybevétele irányba orientálva helyezük el.

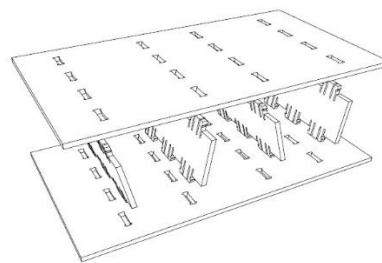
Kültéri faszerkezetek vizsgálatánál szembeötlő, hogy a faanyag tönkremenetele gyakran csavarozások környezetéből indul ki. Ennek oka, hogy a csavarok közelében könnyen repedések indulnak meg, illetve a helytelenül beszerelt csavarnál megsérülhet a felület, valamint nagyméretű allatétek gátolják az ilyen szerelési hibák kiszellőzését, röviden nedvességgyűjtő helyek alakulnak ki, ami csökkenti a szerkezet élettartamát. A csavarkötések technológiai kockázata azonos súllyal jelentkezik biokompozit szerkezet esetében, hiszen míg inorganikus mátrixszal készült NFRP-ben műanyag védi a természetes szálakat, a biopolimer azonban maga is kitett a nedvesség és biológiai károsítók hatásának.



46. kép: Ro&ad Architekten Biokompozit koporsó [Lugt 2007



47. kép: Biokompozit fedés modellje [Mangliár 2016]



48. kép: Bepattanó fakötés [Robeller 2014]

4.6.3 Bepattanó kötések

Műanyag gyártmányoknál szokásos az összepattintható rögzítés. Az összepattintható csomópontok az anyag rugalmasságát kihasználva érnek el egy alakkal zárt állapotot. Előnye a gyors és precíz illesztés, szerszámok használata nélkül. A csavarkötéshez képest a szerelési idő mindössze 15%.

Bepattintható kötéssel épültek már különféle FRP műtárgyak, mint nagyfeszültségű távvezeték oszlopok, vagy közlekedési táblákat tartó hidak. Ennek köszönhetően gyakorlati tapasztalatok és kész módszerek állnak rendelkezésre bepattanó kötések tervezésére szál erősített kompozit anyagból. Mivel a műanyagiparban már régóta elterjedt megoldásról van szó, így a különféle gyártócégek, mint a Bayer vagy BASF tervezési segédletekkel, sőt, ingyenes szoftverrel segítik a bepattanó csomópontok tervezését, némely esetben szál erősített alapanyagra is kiterve. Bár a hagyományos kötések fröccsöntéssel előállított idomból állnak, több bepattanó kötési mód is ismert, mint bepattanó horog, torziós bepattanó kötés, hengeres vagy gömb kialakítású bepattanó kötés, ezért lehetőség nyílik a kompozitok szerkezetéhez legjobban illő geometria kiválasztására, hogy az erőátvitel a lehető leggörbülékenyebb legyen, és a kötés geometriája a gyártástechnológiával is összhangban álljon [Vernelle 2012, Composite Support 2008].

Road Architekten rendezett hosszú bambusz szálakból és PLA-ból készíttette el egy koporsó prototípusát (46. kép). A koporsó érdekessége, hogy egyetlen, elliptikus formájúra vágott terítékből készült, és a középtengely felől sugárszerűen kiinduló fogakra oszlik. Ezek a fogak, mint egy virág szirmai zárulnak össze a test körül. Figyelemreméltó a szirmok találkozásánál záró illesztés kialakítása, ami azok kézi összefűzését teszi lehetővé. A bevágásokat nagy átmérőjű furatok zárják le a továbbhasadás megelőzésére. Ez a megoldás nyilvánvalóan nem alkalmas tartószerkezeti célokra, viszont burkolati vagy szerkezeti lemezek átmeneti illesztésére igen.

A Soproni Egyetem Simonyi Károly Kar Alkalmazott Művészeti Intézetében (AMI) a 2016-os "Living Stone" diplomamunka keretében készült egy modell jutaszövet erősítésű PLA-ból, a fent megismert fűzött lemez illesztéssel (47. kép). A modell egy általános sokszögekből álló testet mutat be, ami elképzelt könnyűszerkezetes épület formakeresési tanumányául szolgál. A bevágásokat lezáró furatokba csavar került, ezzel véglegesítve az illesztést [Lugt 2007, Mangliár 2016].

Fából készült és fa alapú lemezek is illeszthetőek bepattanó kötéssel (48. kép). Egy kétrétegű kísérleti lemezű készült 2014-ben, amit több hasonló szerkezet modellje követett. A szerkezet 21mm Kerto-Q panelekból áll és 2,5 m-es fesztávon ível át. A lemezek ollós bepattanó kötésekkel illeszkednek egymáshoz [Robeller 2014].

4.6.4 Hegesztés és forrasztás

Hőre lágyuló műanyagok – a fémekhez hasonlóan – képlékeny állapotba hozva, nyomás alatt hegeszthetőek. Az ideális hegesztés homogén anyagot teremt, a határterület semmiben sem különbözik az attól távolabb eső részekétől. Ez persze akkor valósítható meg, hogyha a két összeillesztendő alkatrész fizikai és kémiai szempontból egyforma. Könnyű belátni, hogy hosszú szálak vagy szövettel erősített kompozit alkatrészeknél ez megvalósíthatatlan, rövid szálak esetében viszont megközelíthető. Mivel NFRP kompozit hegesztése csak a mátrix illesztését biztosítja, a hosszú szálak folytonosságát és a textilkötést nem, így csak kis szilárdságú kötést eredményez. Azonban más eljárással illesztett csomópontok utólagos behegesztése is lehet indokolt, hiszen az illesztési hézagok nedvességgyűjtő helyek, ahonnan kiindulhat a szerkezet tönkremenetele. Hegesztéses technikában rejlik valódi előny, hogy a hőre lágyuló alkatrészek felülete folytonosan köthető egymáshoz [Sharma et al. 2020].



49. kép: ITKE-ICD pavilon 2011 [Fleischmann et al. 2011]



50. kép: Origami kőnyűháj [Robeller 2015]

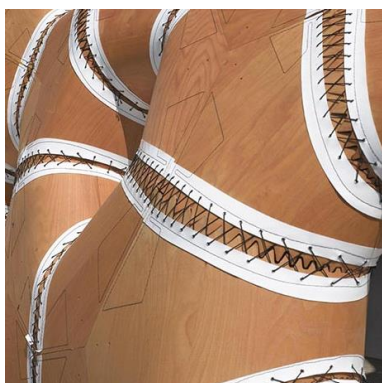
4.6.5 Fogazás

A 2011-ben bemutatott stuttgarti ITKE-ICD pavilon egy kétrétegű, szabálytalan sokszög alapú csonka gúlából felépülő hég (49. kép). A biomorf formát egy tengeri sün (*Echinoidea*) meszes váza ihlette. A szabálytalan sokszögek a szerkezeti igénybevételeknek kitett részein sűrűsödnek. A 6,5 mm vastag rétegelt lemez lapok illesztéséhez ferdeszögű egyenes fogazást alkalmaz, amit a magyar szaknyelv koporsófogazásnak nevez. Az így összeálló nagyobb építőelemeket viszont csavarkötéssel illeszti egymáshoz a helyszínen. A kutatópavilon csomópont megoldása

hagyományos fakötés továbbfejlesztése, ami azért kelti fel az érdeklődésünket, mert nagymértékben szétosztja a csomópontban ébredő igénybevételeket a csatlakozó alkatrészekben, valamint figyelemre méltó az alkalmazott lemez alapanyag vékony keresztmetszete is [Fleischmann et al. 2011].

Origami hajtogatásból származtatható könnyűhéjat építettek az IBOIS (Laboratory for Timber Constructions) kutatói (50. kép). A kísérleti építmény 21 mm vastagságú LVL lapokból készült és CNC technológiával alakították ki a lapillesztéseket. A 192 kg önsúlyú szerkezet 3 méteres fesztávot hidal át. A kísérleti héj geometriája Yoshimura hajtogatáshoz áll közel [Robeller 2015].

Figyelembe vettük még a lemezek vagy szalagok hosszitoldására alkalmas ékcsapolós módszert, ami számunkra azért kedvező, mert a lehető legnagyobb felületen oszlatja el a terheket. Vékony lemez alkatrészek esetében pedig ragasztás helyett szóba kerülhet a hegesztéses illesztés. Hátránya, hogy a szálak továbbra is megszakadnak, ezért egy húzásra igénybe vett ékcsapos csomópont gyenge pontként jelentkezik a szerkezetben. Általánosságban megállapíthatjuk, hogy rendezett szál- és szöveterősítésű kompozit alkatrészek esetében az alakkal kötő fakötések biztosítják a csomópont maximális szilárdságát [Franke et al. 2014].



51. kép: ITKE-ICD kísérleti pavilon 2015–16. [Schwinn et al. 2016]



52. kép: fafurnérból összevarrt fal [Garufi et al. 2019]



53. kép: Couture karossék, Färg and Blanche, 2015. [Schwinn et al. 2016]

4.6.6 Varratok

Vegyük figyelembe a kompozit lapok textilszerű kötésének lehetőségét is, amire a korszerű ipari varrógépek lehetőséget nyújtanak. Rétegragasztott fafurnér lapok összevarrásával épült a 2015–16 ITKE-ICD kísérleti pavilon, melyek vastagsága 3 és 6 mm közötti (51. kép). A pavilon 151 előregyártott építőelem összeépítésével készült el 12 nap alatt, az elemek átmérője 50 és 150 cm közötti és három rétegelt lemez előgyártmányból készült, amit egymáshoz varrtak. Az építőelemek a helyszínen kézzel fűzték össze, egy vastagabb zsinór segítségével. Az elemek összeállítását segíti, egyszermind a szilárdságot növeli egy V alakú fogazás az elemek csatlakozó élén. A 780 kg össztömegű szerkezet 85 m² területet fed le, 9,2 m fesztávolsággal. Az építőelemeket egy hagyományos elrendezésű ipari varrógép segítségével gyártották. A térgörbe ívelésű munkadarabokat viszont robotkar segítségével forgatták a varrógép alá [Schwinn et al. 2016].

A Stuttgarti egyetem ICD intézete és RAW (Monash Laboratory for Materials and Processes) valamint a sensiLab (Monash University, Melbörn) együttműködésében a 2016-os, ausztráliában megrendezett RobArc konferencia kísérő workshopainak egyikét szervezte, amely során robotkarral segített varrással egy további hajlított, rétegelt fafurnérlapokból összeállított könnyűszerkezetet építettek (52. kép). Ebben az esetben KUKA KR10–1100 robotkarok alkalmazásával. Az építmény ebben az esetben nem egy torzfelületű héjszerkezet, hanem egy U-alakban ívelt fal, ami elnyújtott téglalap alakú, enyhén meghajlított lemezekből áll. A fal persze nem függőleges, hanem enyhén kifelé hajlik egy kétszeresen görbült felület torzójaként [Garufi et al. 2019].

A fenti példákon kívül csak még egy kortárs esetet ismerünk faelemek összevarrására, a Couture karosszéket, ami a barcelónai Färg and Blanche tervezőpáros terméke 2015-ből (53. kép). Ebben az esetben körülbelül 4 mm vastagságú lemezeket varrnak össze egy karosszék ívelt háttámálójává [Schwinn et al. 2016].

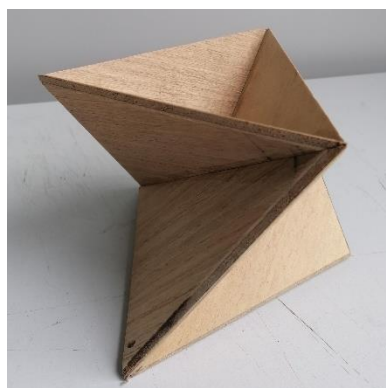
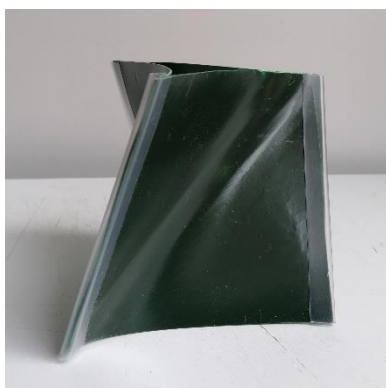
A fafurnérok mikroszerkezete szövetes felépítésű, ezért hasonlít az NFRP biokompozitokéra, tehát a megoldást feltehetőleg kritikátlanul alkalmazhatjuk NFRP előgyártmányokon. Előreláthatólag bőrvarrásra alkalmas ipari varrógépet kell használni erre a célra. A varrott csomópont elegáns és anyagszerű megoldással kecsegtet, de egyelőre nélkülözi az ipari hátteret, valamint kizárhatjuk a helyszíni alkalmazást, csak előregyártott alkatrészek esetében használhatjuk. Elképzelhető, hogy az alkatrészek kis elemméretig összevarrásra kerülnek, majd a helyszínen csavarkötéssel, vagy a 2015-16-os ITKE–ICD pavilonnál látott cipőfűsző-szerű módszerrel kerülnek összeállításra.

5 NFRP héj tervezése

A hosszú szálakkal erősített kompozitok jelentősen nagyobb szilárdságot mutatnak húzó igénybevétellel szemben, mint nyomás alatt. Hogyha szeretnénk a lehető legnagyobb szilárdságot elérni egy szálakból felépülő szerkezetnél, akkor arra kell törekednünk, hogy minél nagyobb arányban húzás ébredjen a szerkezetben és minél kevesebb nyomás. Ezért egy olyan modell tervezésére vállalkozunk, amiből döntően húzásra igénybevehető szerkezetet származtatható. Az elképzelt kísérleti építményt pedig az általunk készített biokompozit lemez előgyártmányból tervezzük meg. A biokompozitból készült formakísérletek a fejezet végén láthatóak: 63. kép-67. kép.

A tensegrity szerkezetek azért keltették fel a figyelmemet, mert a lehető legnagyobb mértékben húzásra veszik igénybe az anyagot, aminek a szöveterősítésű biokompozitok nagymértékben ellenállnak. Bár alapvetően vázokról van szó, Snelson megjegyzi, hogy a szerkezeteit beborítva origami modellt kapunk, vagyis az alapvetően váz természetű rendszert lemezművé formálhatjuk, ami az általunk készített kísérleti kompozit lapokból is elkészíthető. A tokiói MOOM pavilon esetében az eltolással egymás mellé szerkesztett párhuzamos rúd-sorok Yoshimura hajtogatáshoz hasonló mintát hoznak létre a szövet meggyűrésével [Snelson 2012].

Bár Snelson maga is közöl ábrát, a meghökkentő állítás ellenőrzésére egy három rúdból és az azokat összekötő húzott elemekből álló „elemi” tensegrity cella modelljét készítettem el. A rúdelemekhez alumínium csövet, a húzott elemekhez pedig gumiszalagot használtam (54. kép). A modell geometriáját követve készült egy hajlított műanyag lapokból álló idom (55. kép). A lapokat vákuumszívással készítettük el. A kiinduló geometria alapján készítettem rétegelt lemez felhasználásával egy síklapokból álló lemezművet is, ezzel kiserkesztve a tensegrity modellnek megfelelő „origami” modellt (56. kép), a kettő átmenete pedig egy hajlított lapokból álló „köztes forma”.



54. kép: elemi tensegrity cella modellje

55. kép: hajlított lapokból álló modell

56. kép: origami modell

Hogy a kísérletet építészeti célokra is alkalmazzam, egy boltozat pontosabban egy dongahéj modelljét építettem meg, hiszen a dongahéj a legegyszerűbben szerkeszthető héjszerkezet. Első lépésként formakereső modelleket építettem. Hogyha a tokiói pavilionhoz hasonló módon rugalmas textillel borítunk be egy vázat, akkor térgörbe felületet kapunk. Jelen esetben olyan hajlított lapokból szeretnénk dolgozni, amit nem lehet sérülés nélkül térgörbe formájúvá alakítani, ezért a rugalmas túllt kartonlappal helyettesítem majd a formakereső modellnél.

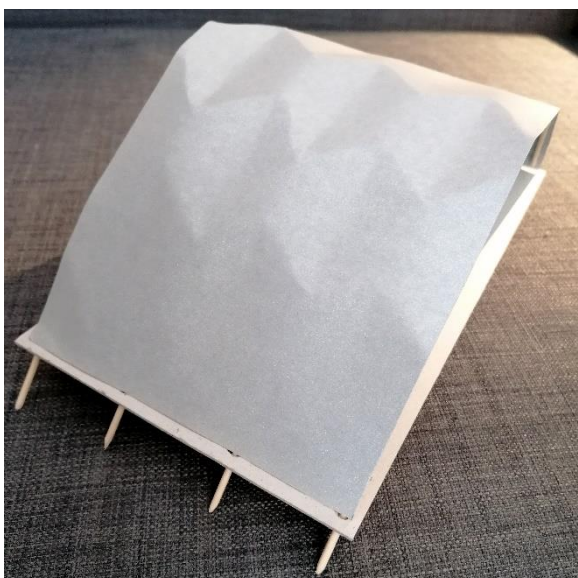
Egy dongát építettem tehát rúdelemek és gumigyűrűk felhasználásával (60. kép). A rúdelemek tengelye párhuzamos, egymáshoz képest eltolással függenek a párhuzamos rúd sorok. A mintát a MOOM pavilon elrendezése szolgáltatja. A donga két válla mereven illeszkedik a hordozófelülethez, de szerelés közben egyértelművé válik, hogy bár a gumigyűrűkre felfűzött rudak képesek boltozatot alkotni, a gumiszalagok rendszere áttört hártaként viselkedik. A gumigyűrűk állandó feszültségben tartják a hálót, összerántva a boltozat szegélyét. Ezt egy vékony, de széles fémszalag beépítésével ellensúlyoztam, ami normál irányban jelentéktelen szilárdságú, élírányban viszont képes ellentartani a gumigyűrűk húzásának. A boltozat szilárdan megáll, bár érintésre megremeg, aszimmetrikus és pontszerű terhelésekre pedig érzékenyen reagál, ahogy azt a hártakról szóló irodalom már előre közölte. Ezzel viszont igazolást nyer, hogy az egymást nem érintő, kábelekről függesztett rúdelemek rendszerével lehetséges felmenő szerkezetet, sőt, boltozatot építeni.

Mivel az első modell rudakból és szalagokból álló váz, ezért következő lépésben megkíséreltem az erőjátékot lemezszerkezettel rekonstruálni. Ehhez karton lapra rúdelemeket illesztettem, párhuzamos tengelyek mentén, egymással eltolásban, hogy a rúdelemek tengelye egybeessen az előző modell rúdelemeinek tengelyével. A lapot meghajlítva kirajzolódik egy szabályos, de ívelt méhsejt minta. A lap élek helyett ívek mentén hajlik a hajtásélek pedig enyhén görbülnek (57. kép; 59. kép).

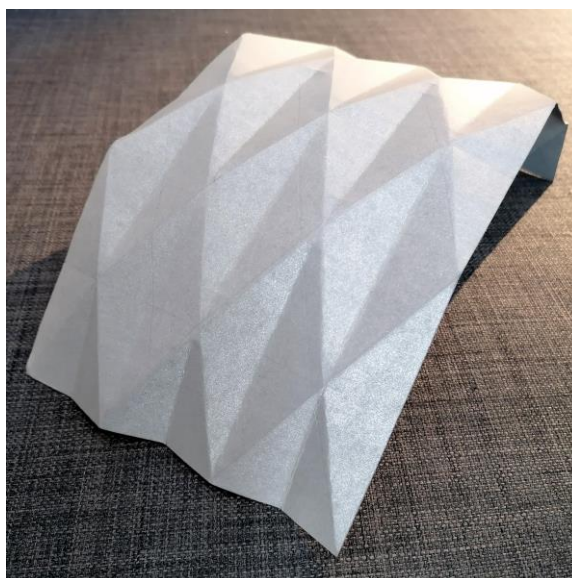
Figyelemreméltó, hogy a rúdelemek tengelye párhuzamos a Yoshimura papírhajtogatás minta völgy hajtáséleinek tengelyével, bár rövidebb azoknál, mivel a rudak nem kapcsolódnak egymáshoz (58. kép). Az ívek mentén található felületek előnye, hogy eloszlik az élekre eső feszültség, ami az origamiból származtatott szerkezetnél gyenge szakaszokat jelentene [Curletto et al. 2016].

Az így kapott összetett felület remekül alkalmazható építészeti célra. A felület egybevágó, egyszerűen hajlított hatszögletű elemekre bontható. Ennek köszönhetően lemez alkatrészből sérülés nélkül kihajlítható illetve szerszám segítségével préselhető. A módszer szilárdsági tulajdonságok mellett tehát technológiai feltételeknek is kedvez. Rúdelemek ebben az esetben készülhetnek fémből, fából, bambuszból, sőt, nagyobb keresztmetszetű, vagy nagyobb szilárdságú kompozit alapanyagból is.

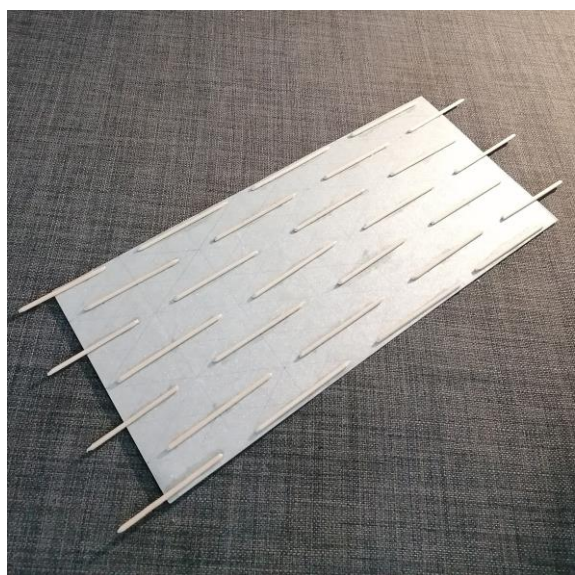
A nagy, folytonos hajlított lemezt egy további modellkísérletben egybevágó elemekre bontottam (61. kép). Minden elem egy téglalap alakú terítékből indul ki, amit a hossz tengelye mentén rúdelem merevít. Az elemek négy sarka lehajlik, és a bal oldalukról egy fül áll ki, hogy illesztési átfedést biztosítson. Ez a modellkísérlet egy kiseleemes biokompozit héj tervezéséhez nyújt ideális kiindulópontot. Egy az egyes méretű modellenél csavarkötést javasolok (62. kép). Természetesen további kérdések merülnek fel ezzel, mint a tűzállóság és a nedvességgel szembeni ellenállás, valamint a további csatlakozó szerkezetek, esetleges burkolatok, valamint funkcionális szerkezetek illesztése, ami mind elengedhetetlen a tényleges építészeti alkalmazás számára. A modellek alapján továbbá, könnyűszerrel kidolgozható szabad geometriájú könnyűhéj egy jövőbeni kísérleti építmény számára [Nagy et al. 2020].



57. kép: hajlított kartonpapír modell.



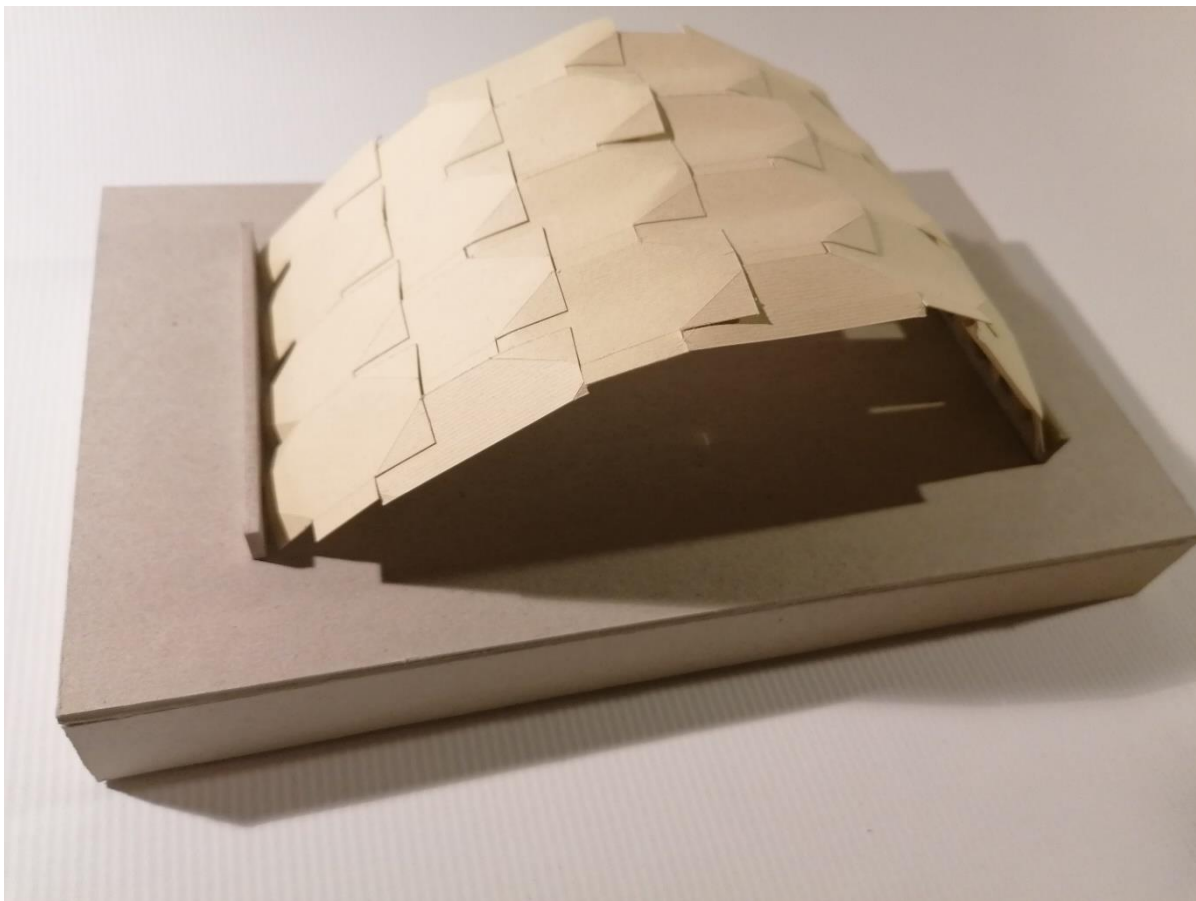
58. kép: hajlított Yoshimura hajtogatás



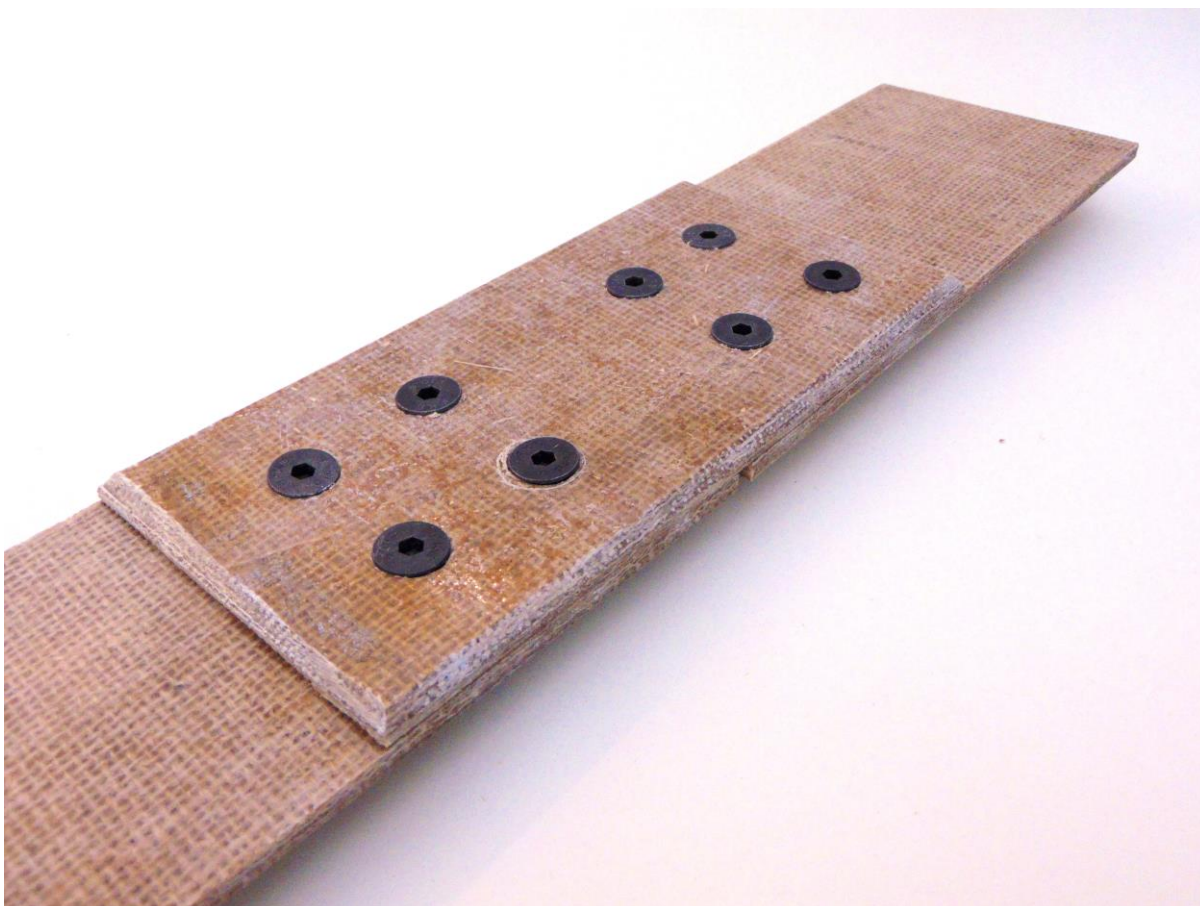
59. kép: a kartonmodell munkaközi képe



60. kép: tensegrity rendszerű kábeltető modell



61. kép: elemes dongahéj modellje



62. kép: biokompozit csomópont modellje



63. kép: íves hajlítású biokompozitlap



64. kép: legyezőmintába hajtogatott biokompozitlap



65. kép: biokompozit L-profil



66. kép: biokompozit cső fűzött illesztéssel



67. kép: biokompozit szalagok

6 Következtetések

A kompozitok elterjedésével együtt alakul ki a hajlított építészet, amire jellemző, hogy összetett igénybevételeknek ellenálló szerkezeteket alkalmaz. Ennek az igénynek pedig az eltérő mechanikai tulajdonságú anyagokból készült kompozitok felelnek meg a legjobban. Ezzel megszületik a folytonosan áramló épülettömeg lehetősége, a hagyományos építészeti elemek, mint fődém, fal, oszlop, szervesen simíthatóak egymásba. Ezen felül a hagyományos épülettömegek alkalmazása is megváltozik, hiszen szerkezetileg homogén lehet a hagyományosan eltérő elemekből hierarchikusan felépülő épület, ami pedig gyakran megjelenik az épületek kivitelén. Az újszerű építőanyagok nagyobb szilárdságot biztosítanak, jelentősen kisebb keresztmetszettel, aminek következtében az épületek arányai a XX. század során jelentősen megváltoznak.

A könnyűszerkezeti kompozitok a XX. század fordulójától terjedtek el az építészetben, intenzív térhódításra pedig a 80-as évektől kerül sor. Közéjük tartozik a ragasztott fa, különféle fa alapú kompozitok és kerámiaszál erősítésű alapanyagok. Az előregyártott kompozitból készült építőelemek a betonnál és az acélnál kisebb tömegűek, gyors helyszíni szerelést tesznek lehetővé, és további kedvező tulajdonságaik lehetnek az acélhoz képest, mint villamos és hőszigetelő képesség. Az építőiparban alkalmazott kerámiaszálalás kompozit alapanyagok általában lemez gyártmányok, vagy hűzvasajtott profil elemek, de a kompozitokra sajátosan jellemző gyártási módszer a kézi fektetés vagy más szóval laminálás. Ennek során előre elkészített sablonok segítségével inhomogén, anizotróp alkatrészeket hozhatunk létre. Ez a kézműves eljárás mind a mai napig nagymértékben befolyásolja a kompozitok alkalmazását.

A bio-kompozitok elterjedését részben a fenntartható fejlődés ösztönözte. A lebonthatóságuk miatt alkalmazzák őket a csomagolóiparban, ahol a hulladékfeldolgozás és a környezetszennyezés mérséklése ösztönzi a PLA-ból és más szerves alapanyagból készülő csomagolóipari termékek gyártását. A másik fő felhasználó az autóipar, ahol a kerámiakompozitokat fém alkatrészek kiváltására terveztek, hogy ezzel csökkenjen a járművek tömege végső soron pedig a fogyasztás. A biokompozit szerkezeti elemek bár kisebb szilárdságúak, mint az inorganikus kerámia kompozitok, viszont könnyebbek és olcsóbbak, valamint kedvező hőszigetelő képesség jellemzi őket. Így a kompozit és műanyag alkatrészek némelyikét váltják ki velük. Az építőipar számára gyártott biokompozitok egy része ilyen járműipari fejlesztések „spin-off projektje”.

Az építészetben különféle könnyűszerkezeti megoldásokat készíthetünk biokompozitból. Könnyűhéjak fejlesztésére több kísérleti építményt emeltek az elmúlt évtizedben polimer-kerámia és fa alapú kompozitok felhasználásával. Ezeknek a kísérleteknek a közös tulajdonsága, hogy olyan formakeresési módszert dolgoznak ki, ami mechanikai és technológiai szempontból ideális geometriát nyújt. Ultrakönnyű szerkezetek rendszerint egyenletes teherelosztásúak és gyakran a hagyományostól eltérő szerkesztési módszerekből származtathatóak, mint papírlap hajtogatás,

amivel lemezműveket tervezhetünk, a szalagháló, ami általában ragasztott faszekezetek tervezéséhez használnak, valamint a rúdelemekből és kábelekből álló tensegrity, ami fémszerkezetekhez tervezéséhez használható a legjobban.

Az általunk elkészített kísérleti biokompozit gyártmányok kielégítő szilárdságot mutatnak csomagolóipari, bútorigipari és építészeti alkalmazások számára egyaránt. A mechanikai vizsgálatok és mikroszkóppal végzett megfigyelések alátámasztják, hogy a kompozit anyag tulajdonságai nem csak az anyagi összetételtől, de a gyártástechnológiától is nagymértékben függenek. A szálak elhelyezkedése szintén nagymértékben befolyásolja a kompozit szilárdságát. Mivel a vizsgálatok során jelentősen magasabb szilárdságot tapasztaltunk húzó igénybevétellel szemben, ezért olyan szerkezet tervezése mellett döntöttünk, ami döntően húzásra veszi igénybe az anyagot.

Az általunk tanulmányozott formakeresési technikák közül a tensegrity az, ami a legnagyobb mértékben húzásra veszi igénybe az alanyot. Bár a tensegrity alapvetően húrokból és rúdelemekből áll, a vázakat beborítva felületszerkezethez jutunk. A megfelelő ponyvával pedig a húrozás is kiváltható. Ennek ismeretében hajlékony lapra illesztett rúdelemekből készítettünk modellt, a rúdelemek helyzetét egy kiterített tensegrity háló alapján határoztuk meg. Ezt a rudakkal felszerelt lapot meghajlítva egy boltozatot kaptunk. A boltozott felület egybevágó elemekre bontható, a rúd elemeket pedig elkészíthetjük arra alkalmas fém, fa, vagy kompozit előgyártmányból.

7 Tézisek

1. Az építészet korszakai anyaghasználat szempontjából

Az építészet története anyaghasználat szempontjából három korszakra tagolódik. Ezek a korszakok szoros összefüggésben állnak az emberi életmód két nagy mérföldkövével, az úgynevezett „neolitikus forradalommal” és az „ipari forradalom” kezdetével. Míg az ősepítészet rendszerint húzott jellegű, a letelepedett népek építésze első sorban az anyagok nyomószilárdságát aknázza ki. Az ipari forradalomtól kezdve viszont egyre több vegyes szerkezeteket alkalmaznak, illetve elterjed az acéllal erősített beton, amit további kompozitok követnek. Ezzel, anyaghasználat szempontjából az építészet új korszakába lép, aminek során összetett igénybevételnek jól megfelelő kompozit anyagok veszik át a főszerepet.

2. Kompozitanyagok elterjedésének hatása az építészeti formára

Mivel a XX. századtól elterjedő különféle kompozitok nagyobb mértékben állnak ellen összetett igénybevételeknek, ezért nagyobb fesztávok lefedésére nyílik lehetőség és kisebb keresztmetszeteket alkalmaznak. Ennek következtében felborul az építészet évszázadokon át megszokott arányrendszere, és kifejlesztik a héjszerkezeteket, ami által új, korábban ismeretlen építészeti formák jelennek meg. Elterjed továbbá a falból tetővé, födémme, oszloppá vagy pillérré dinamikusan átalakuló építészeti tömeg. Ezt a jelenséget nevezzük hajlított építészetnek és ez a jelenség elképzelhetetlen kompozit anyagok alkalmazása nélkül.

3. Biokompozit kísérleti gyártása és mechanikai vizsgálatok

Jutaszövet és PLA réteges hőprésselésével csomagolóipari, bútorigipari és építészeti alkalmazások számára alkalmas biokompozit nyerhető. A mechanikai vizsgálatok és mikroszkóppal végzett megfigyelések azonban alátámasztják, hogy a kompozit anyag tulajdonságai nemcsak az anyagi összetételtől, de a gyártástechnológiától is nagymértékben függenek. A szálak elhelyezkedése szintén nagymértékben befolyásolja a kompozit szilárdságát. Mivel a vizsgálatok során jelentősen magasabb szilárdságot tapasztaltunk húzó igénybevétellel szemben, azért olyan szerkezet tervezése mellett döntöttünk, ami főként húzásra veszi igénybe az anyagot.

4. Könnyűhéjszerkezet tevezésének lehetősége biokompozit alapanyagból

Rúdelemekkel, vagy diafragmákkal kiegészítve kis keresztmetszerű könnyűhéjszerkezet építhető alakajtott biokompozit lemezekből. Az ideális héjforma kialakításához egy speciális hibrid módszert alkalmazunk, ami szakaszosan nyomott, úgynevezett „tensegrity” váz, valamint egy origami modell egyesítésével jön létre. Mivel a szálerősített kompozitok jelentősen nagyobb szilárdságot mutatnak húzó igénybevétellel szemben, ezért célszerű egy folytonosan húzott, szakaszosan nyomott modellt építeni, hogy az alapanyag szilárdságát a legnagyobb mértékben kiaknázzuk. Ezt követően második lépésben a vázat egybeborítva felületszerkezetet kapunk. A magas nyomószilárdság fenntartására érdemes megtartani a vázrendszer részét képező rúdelemeket az eredeti helyükön, a kábelezés viszont teljes egészében elhagyható. A rúdelemek ugyanakkor normál irányú merevítőlapokkal is kiválthatóak. A kábelezés iránya viszont jelzi a mindenkori húzó igénybevételek tengelyét, ezért a héjszerkezet elemeinek gyártásánál érdemes a kábelmodell tengelyével párhuzamos szálirányt alkalmazni.

8 Tézisekhez tartozó közleményjegyzék

Nagy, M., Katona, V. (2020) *Soft folding: A morphogenetic approach to bio-based fibrous construction materials*, New Design Ideas Vol. 4, No. 2. pp. 85–97.

Nagy, M., Csóka, L. and Katona, V. (2019) *The role of symmetry in reciprocal frame structures*, Symmetry: Culture and Science, 30 (1), 15–24.

Nagy, M., Csóka L., U Nagy G. (2016): *Mechanical Testing of Natural Fiber Reinforced Biocomposit based on Jute Fibre and PLA for architectural purpose*. In Ács, Kamilla; Bencze, Noémi; Bódog, Ferenc; Haffner, Tamás; Hegyi, Dávid; Horváth, Orsolya Melinda; Hüber, Gabriella Margit; Kis Kelemen, Bence; Lajkó, Adrienn; Mátyás, Mónika; Szendi, Anna; Szilágyi (Ed.), *V. Interdiszciplináris Doktorandusz Konferencia Konferenciakötet = 5th Interdisciplinary Doctoral Conference Conference Book* (pp. 342–354.). Pécsi Tudományegyetem Doktorandusz Önkormányzat.

Nagy, M., Csóka L., U Nagy G. (2016): *Építészet és anyagkutatás összefüggéseinek áttekintése, különös tekintettel a szálerősítésű biokompozitokra* In: Koncz, István; Szova, Ilona (szerk.) PEME 12. PhD-konferencia Budapest, Magyarország, Professzorok az Európai Magyarországiért Egyesület (2016) 199 p. pp. 136–141., 6 p.

9 Köszönetnyilvánítás

Jelen dolgozat, és az alapjául szolgáló kutatások 2015 és 2020 között készültek a Soproni Egyetemen (kezdetben Nyugat-Magyarországi Egyetem). Ezen a helyen mondok köszönetet mindenkinek, aki munkával, jó tanáccsal, vagy türelemmel segédkezett. Néhányukat név szerint is szeretném kiemelni:

A témavezetői feladatokat kezdetben Dr. Csóka Levente vállalta. A biokompozit kísérleti gyártmányok elkészítése és a mechanikai vizsgálatok, valamint ezek kiértékelése útmutatása szerint készült el.

A mikroszkópos felvételek Dr. Fehér Sándor segítségével készültek.

A kompozitok építészeti szerepét tárgyaló fejezet alapját egy jelentősen rövidebb terjedelmű szemináriumi dolgozat képezi, ami Dr. Márfa Molnár László "A modern technológia története és a posztindusztriális társadalom" című kurzusának keretei között született meg.

A hajlító vizsgálat kiértékelését segítő konfidenciaintervallum becslés Dr. Horváth-Szováti Erika segítségével készült el.

A húzó és hajlító vizsgálatok valamint a kísérleti gyártmányok Koroknai László intézeti mérnök segítségével készültek az NRRC Polimertechnológiai Laboratóriumában.

Az ejtődárdás és nyomómószilárdsági vizsgálatok Ábrahám József intézeti mérnök segítségével készültek, a Faanyagtudományi Intézet eszközein.

10 Felhasznált irodalom

- 20th Century Art (1996), Museum Ludwig, Cologne, Taschen, Köln ISBN 3822886475
- Addington M. D., Schodek D. L. (2005): *Smart Materials and New Technologies: For the Architecture and Design Professions*. Architectural Press Elsevier, Oxford, 2005. ISBN 0750662255
- Aeschelmann H., Carus M. (2016): *Bio-Based Building Blocks and Polymers: Global Capacities and Trends 2016-2021*. Nova Institut GmbH
http://bio-based.eu/?did=77837&vp_edd_act=show_download (2017. 01. 04.)
- Alves C., Ferrao P. M. C., Silva A. J., Reis L. G., Freitas M., Rodrigues L. B., Alves D. E. (2010): Ecodesign of Automotive Components Making Use of Natural Jute Fiber Composites, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 18, pp. 313-327.
- Arup http://www.arup.com/projects/home_for_all_japan (2016. 06. 26)
- Athanasίου K. A., Agrawal C. M., Barber F. A., Burkhart S. S. (1998): Orthopaedic Applications for PLA-PGA Biodegradable Polymers. *Arthroscopy*, Vol. 14, Issue 7, pp. 726-737.
- Axel R. (2007): *Smart Materials in Architecture – Interior Architecture and Design*, Birkhauser, Basel, Berlin, London 2007. ISBN 376437327X
- Baku E.; Vető D. (201): A vasbeton művészi formája a szakralitás szolgálatában: Medgyaszay István templomépítészete. In: *Medgyaszay István Emlékkonferencia*, konferenciafüzet, szerk.: Marosi M., MMA Kiadó, Budapest.
- Simon, B.; Knippers, J.; Krieg, O. D.; Menges, A.; Schwinn, T.; Sonntag D. (2016): Textile Fabrication Techniques for Timber Shells: Elastic bending of custom-laminated veneer for segmented shell construction systems. *Advances in Architectural Geometry 2016*. eds.: Sigrid Adriaenssens, Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Achim Menges, Mark Pauly Hochschulverlag AG an der ETH, Zürich.
- Ben Lewis (2011): Centre Pompidou - Metz: Engineering the Roof." *The Structural Engineer* Vol. 89 Issue 18.
- Benson Ford Research Center, s. n. (2011) *Soybean Car*.
<http://www.thehenryford.org/research/soybeancar.aspx> (2018. 01. 29.)
- Biobased Bank <http://biobasedbank.nl/> (2018 01. 29.)
- Booth L. G. (1997): The Design and Construction of Timber Hyperbolic Paraboloid Shell Roofs in Britain: 1957 – 1975, *Construction History*, Vol 13., pp. 67—90.
- Brownell B. (2008): Fiber Wall. In: *Transmaterial 2: A Catalog of Materials that Redefine our Physical Environment*, 1st Edition, Princeton Architectural Press, New York. p. 176. ISBN 9781568987224
- Brownell B. (2017): *Transmaterial Next: A Catalog of Materials that Redefine Our Future*. 1st Edition, Princeton Architectural Press, New York. p. 106. ISBN 9781616895600
- Bun Z. (2009): Hogyan lett a folding, avagy ezredvégi építészetelmélet Cache mestermunkájának tükrében. *Utóirat. A Régi-új Magyar Építőművészet melléklete* 9 (3) 2009, pp 22-33.
- Cache, B. (1995): *Earth Moves – The Furnishing of Territories*, tr: Boyman, A. ed: Speaks, M., Writing Architecture series, Massachusetts Institute of Technology.

- Caluwaerts K, Despraz J, Iscen A, Sabelhaus AP, Bruce J, Schrauwen B, SunSpiral V. (2014): *Design and control of compliant tensegrity robots through simulation and hardware validation*, J. R. Soc. Interface 11: 20140520. <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2014.0520>
- Centre Pompidou Metz, Yearbook 2010, *The Japan Architect* Vol. 80. 2011 winter, ISBN 9784786902291, p. 100–103.
- Composite Support & Solutions Inc. (2008): *Snaplock Fiber Reinforced Composites Technology Applied to Overhead Sign Structures* (No. CA07-0246) Composite Support & Solutions Inc., San Pedro
- Correa, D., Menges A. (2015): 3D Printed Hygroscopic Programmable Material Systems. In: *Materials Research Society Symposium Proceedings* eds: J.E. Sabin, M. Paz Gutierrez, C. Santangelo Vol. 1800 2015 pp. 24-31.
- Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J. (2007): *A polimertechnika alapjai*. Kempelen Farkas Hallgatói Információs Központ, Budapest. ISBN 963420855X
- Dahy H. (2017): Biocomposite materials based on annual natural fibres and biopolymers – Design, fabrication and customized applications in architecture, *Construction and Building Materials*, Vol. 147. pp. 212–220.
- Dahy, H. (2019): Natural fibre-reinforced polymer composites (NFRP) fabricated from lignocellulosic fibres for future sustainable architectural applications, case studies: Segmented-shell construction, acoustic panels, and furniture. *Sensors (Switzerland)*, Vol. 19 Issu 3. <https://doi.org/10.3390/s19030738>
- Data Bank of Jute, Kenaf and Allied Fibers*, International Jute Study Group, http://www.jute.org/FINAL_DATA.BANK.pdf (2018. 01. 24.)
- Déry A. (2020): *Öt könyv a régi építészetéről 1. Az építés anyagai*, TERC, Budapest.
- Divós F., Gyemizse P. (2000): *Fakulpola a Nyugat–Magyarországi Egyetemen*. Nyugat–Magyarországi Egyetem, Sopron
- Dooren E.; Verheijen F. (2008): Cardboard in Architecture; an Overview. In: *Cardboard in Architecture*, ed.: Eekhout M., Verheijen F., Visser R., Research in Architectural Engineering Series, Vol. 7. IOS Press, Amsterdam pp. 21–48. ISBN 9781586038205
- Drew, P. (1976): *Frei Otto Form und Konstruktion*, Verlag Gerd Hatje, Stuttgart tr: Kubinszky Mihály 1979, Műszki Könyvkiadó Budapest, ISBN 9631026795
- Drew, P. 1970. *Tensile Architecture*. Routledge, Abington, UK.
- Dweib M.A., Hu B., Shenton H.W., Wool, R.P. (2006): Bio-based composite roof structure: Manufacturing and processing issues. *Composite Structures* Vol. 74 (2006) pp. 379–388
- Endres, H. J.; Siebert-Raths A. (2011): Basics of PHA, *Bioplastics Magazine*, 03/11 Vol. 6, pp. 43-45.
- Erényi I. (1990): *Menyhárd István - Egy úttörő alkotó mérnök, tudós és pedagógus élete*, Akadémiai Kiadó, Budapest, ISBN 9630555905
- Evernden M., Mottram J. T. (2009): A Case For Houses In The Uk To Be Constructed Of Fibre Reinforced Polymer Components. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009)* 6-9 September 2009, eds.: Peter Walker, Khosrow Ghavami, Kevin Paine, Andrew Heath, Mike Lawrence, Enrico Fodde, University of Bath ,Bath, UK
- Fátrai Gy. (2011): *Épített örökségünk: Az építő tevékenység kialakulása, fejlődése, eredményei*. Digitális tananyag, Széchenyi István Egyetem, Győr.

- Fekete, Z. (2014): *Elemes felületszerkezet kifejlesztése és információs modellezése*, PhD thesis, Nyugat-Magyarországi Egyetem, SKK, Cziráki József Faanyagtudomány és technológiák Doktori Iskola, p. 65.
- Feo L., Marra G., Mosallam A. S. (2012): Stress analysis of multi-bolted joints for FRP pultruded composite structures. *Composite Structures* Vol. 94 (2012) pp. 3769–3780.
- FIBERCORE IP B.V (NL): *Method For Forming Of A Tubular Semi-finished Product From Fibre-reinforced Plastic Material*, autor: PEETERS J. H. A., Holland szabadalmi bejelentés NL2013887 (A) – 2016-09-20
- Fleischmann, M., Menges, A. (2011): ICD/ITKE Research Pavilion: A case study of multi-disciplinary computational design. In: Gengnagel, C., Kilian, A., Palz, N. and Scheurer, F. (eds.), *Computational Design Modeling, Proceedings of the Design Modeling Symposium Berlin*, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, pp. 239-248. DOI: 10.1007/978-3-642-23435-4_27 ISBN: 978-3642234347
- Franke S., Schusser A., Müller A. (2014): Analysis Of Finger Joints From Beech Wood. *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE) 2014*, Quebec City, Kanada
- Friedman T. (2016): *Fold Finding*, Detmold University of Applied Sciences, Hochschule Ostwestfalen- Lippe lásd még:
<http://www.talfriedman.com/66191/8340905/gallery/origami-pavilion>
- Gandhi, M.V., Thompson, B.D. (1992): *Smart Materials and Structures*, Springer Science & Business Media. ISBN 0412370107,
- Garufi, D., Wagner, H., Bechert, S., Schwinn, T., Wood, D., Menges, A., & Knippers, J. (2019): Fibrous Joints for Lightweight Segmented Timber Shells. In: *Research Culture in Architecture X*. International Conference on Cross-Disciplinary Collaboration. eds.: Cornelia Leopold, Christopher Robeller and Ulrike Weber. FATUK - Faculty of Architecture, Technische Universität Kaiserslautern (pp. 53–64).
<https://doi.org/10.1515/9783035620238-006>
- Gáti B., Koncz I. (2011): *Repülőgépek Szerkezete*, egyetemi jegyzet, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Közlekedésmérnöki Kar
- Gkaidatzis R. (2014): *Bio-based FRP structures: A pedestrian bridge in Schiphol Logistics Park*. Master thesis final report, MSc Architecture, Urbanism and Building Sciences, Department of Building Technology Faculty of Architecture and The Built Environment, TU Delft
- Hajnal I. (1944): A jövő gépe: az anyagok belső szerkezetében rejlő erők dolgoztatása In: *Technika, Művelődés*, szerk.: Glatz Ferenc, História, Budapest 1993, ISBN 9638311991
- Halász K. (2014): *Montmorillonit nanolemez, valamint cellulóz mikro- és nanokristály erősítőanyagok hatása a politejsav-mátrix tulajdonságaira*. Doktori (PhD) értekezés, Nyugat-magyarországi Egyetem, Simonyi Károly Műszaki, Faanyagtudományi és Művészeti Kar, Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola
- Heslehurst R. B. (2013): *Design and Analysis of Structural Joints with Composite Materials*. DEStech Publications, Lancast ISBN 9781605950341
- Hiel C. (2014): Materials and Manufacturing In: *The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering*. ed.: Zoghi M., CRC Press, Boca Raton ISBN 9781420003741

<http://www.theindependentbd.com/post/103269> (2017 12. 06.)

<https://www.labelbreed.nl/collaborations/christien-meindertsma-enkev/flax-chair/> (2017 11. 09.)

IAAC Blog (2013): *Stigmergic Fibers – A new approach to material behaviour*

<http://legacy.iaacblog.com/maa20122013digitaltectonicfabricationecologiesterm3/2013/08/stigmergic-fibers-a-new-approach-to-material-behaviour/> (2020.09.02.)

Joshi, S. V., Drzal, L. T., Mohanty A. K., Arora, S. (2004): Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* Vol. 35, pp. 271-267.

Jung, Y. K., Kim, T. Y., Park, S. J. and Lee, S. Y. (2010), *Metabolic engineering of Escherichia coli for the production of polylactic acid and its copolymers*. *Biotechnol. Bioeng.*, 105: 161–171. doi:10.1002/bit.22548

Jute Lab <http://jute-lab.org/2015/08/27/stool-tool-by-joran-briand/> elérés: 2017 12. 06.

Katona, V. (2018): Symmetries and Proportions in Architecture. *Symmetry: Culture and Science*, Vol. 29, No. 3, pp. 325–327. https://doi.org/10.26830/symmetry_2018_3_325

Katona, V. (2020): Geometry and architecture: Parametricism, morphology, design methodology. *Symmetry: Culture and Science*, Vol. 31, No. 3, p. 229. https://doi.org/10.26830/symmetry_2020_2_229

Katona, V. (2021) Relief Method: The Analysis of Architectonic Façades by Fractal Geometry. *Buildings*, Vol. 11. No. 1, Paper 16. <https://doi.org/10.3390/buildings11010016>

Khan J. A., Khan M. A. (2015): The Use of Jute Fibers as Reinforcements in Composites. In: *Biofiber Reinforcement in Composite Materials*, eds.: Faruk O., Sain M., Woodhead Publishing, Cambridge, 2015. pp. 30-34.

Klein Ditham Arcitecture:

<http://www.kleindytham.com/homeforall/jsebg3a1xbngceogkuq76al2te7o9n> (2016. 06. 26)

Knippers, J., La Magna R., Menges A., Reichert S., Schwinn T., Waimer F. (2015): ICD/ITKE Research Pavilion 2013, In: *Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational Architectural Design*, No.: 237

Kósa Z. (1973): *Kenzo Tange*, Akadémiai Kiadó, Budapest, ISBN 78008220, 21. oldal

Kovács, Diamantné, Zs. (2008): *Szálásanyagok alapanyagai, előállítása, késztermékek laboratóriumi vizsgálati módszerei I*. Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, Budapest

Kozłowski R., Mackiewicz M. (1999): *Inventory Of World Fibers And Involvement Of FAO In Fibre Research*, in: 5th International Conference of Frontier of Polymers and Advanced Materials. NATO Advanced Research Workshop on Polymers and Composites for Special Applications, p. 9-10.

Köhler-Hammer, C.; Knippers, J. (2014): Arbo Skin Fassaden-Mock up: Fassaden aus dauerhaften und rezyklierfähigen Biokunststoffen. *Fassade / Facade, Schweizerische Fachzeitschrift für Fenster- und Fassadenbau*, Vol. 1/2014, S. 9 - 12.

Kumar K., Ghosh L. S., Estrada L, Estrada H. (2014): Manufacturing Process of QA/QC In: *The International Handbook of FRP Composites in Civil Engineering* ed.: Zoghi M., CRC Press, Boca Raton ISBN 9781420003741

- Lantos E. (2015): Oktatási és nevelési épületek In: *Közti 66 - Egy Építésziroda Története 1. [1944-1991]*, szerk: Ferkai A., Vince Kiadó, Budapest, ISBN 9789633030691ö, p. 285.
- Le Duigou, A.; Castro, M.; Bevan, R.; Martin N. (2016): 3D printing of wood fibre biocomposites: From mechanical to actuation functionality. *Materials & Design*, Vol. 96. pp. 106-114.
- Lengrenzi S., Gotti N.(2011): Instant Design 01 Milan Design Week 2011, *Big Ben design Blog*, p. 219. ISBN 9788863690880
- Lluis i Ginovart, Josep; Costa-Jover, Agustí; Coll-Pla, Sergio; López Piquer, Mónica (2017): Layout of Catenary Arches in the Spanish Enlightenment and Modernism. *Nexus Network Journal*, Vol. 19, No. 1, 85–99.
- Lockwood E. H. (1961): The tracktrix and Catenary In: *A Book of Curves*, Cambridge Univerity Press, ISBN 9780521055857, p. 119-124.
- Lőrinc L. (2016): *Életmódtörténet – Anyagi kultúra 1500-tól napjainkig*. Akadémiai Kiadó Zrt. Budapest
- Lynn, G. (2004): *Foreword* in: *Folding In Architecture*, A rivised edition, Wiley-Academy Singapore, ISBN13 978-0470092187
- Martins, V. C., Cutajar, S., van der Hoven, C. V., Baszyński, P., & Dahy, H. (2020): FlexFlax stool: Validation of moldless fabrication of complex spatial forms of natural fiber-reinforced polymer (NFRP) structures through an integrative approach of tailored fiber placement and coreless filament winding techniques. *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 9, Paper 3278. <https://doi.org/10.3390/app10093278>
- Megyaszy I. (1909): *A vasbeton művészi formájáról*, *Művészet* 8, 1. sz. 1909.
- Menges A., Reichert S. (2015): Performative Wood – Physically Programming the Responsive Architecture of the HygroScope and HygroSkin projects In: *Material Synthesis: Fusing the Physical and the Computational Architectural Design*, No.: 237, pp. 66 – 74.
- Miben élünk? A 2015. évi lakásfelmérés főbb eredményei*, Központi Statisztikai Hivatal, 2016. augusztus http://www.ksh.hu/docs/hun/xftp/idoszaki/pdf/miben_elunk15.pdf (2017.03.22.)
- Miura K., Nagatomo N. (1993): *Sora Seiru [Solar Sails]*, Maruzen, Tokyo
- Molitz, F.; Knippers, J.; Lienhard, J.; Menges, A.; Schleicher S. (2012): Material Behavior: Embedding Physical Properties in Computational Design Process *Material Computation*, Architectural Design No.: 216, p. 44-51
- Molnár, S., (2004): *Faanyagismeret*, Mezőgazdasági Szaktudas Kiado, Budapest ISBN 963 9553 17 4, p. 128.
- Moom Tensegrityc Membrane Structure*, (s.n.) The Japan Architect , Vol. 84. winter, 2012. pp. 84–85.
- Museum of Modern Art* (1997), New York Abradale Press, New York, ISBN 0810915089
- Nabi Saheb D., Jog J. P. (1999): Natural fiber polymer composites: A review. *Advances in Polymer Technology*, Vol. 18, No. 4, pp. 351–363.
- Nagy, M., Katona, V. (2020) Soft folding: A morphogenetic approach to bio-based fibrous construction materials, *New Design Ideas* Vol. 4, No. 2. pp. 85–97.

- Nagy, M., Csóka, L. and Katona, V. (2019) The role of symmetry in reciprocal frame structures, *Symmetry: Culture and Science*, Vol. 30 No 1, pp. 15–24.
- Nagy, M., Csóka L., U Nagy G. (2016): Mechanical Testing of Natural Fiber Reinforced Biocomposit based on Jute Fibre and PLA for architectural purpose. In: Ács, Kamilla; Bencze, Noémi; Bódog, Ferenc; Haffner, Tamás; Hegyi, Dávid; Horváth, Orsolya Melinda; Hüber, Gabriella Margit; Kis Kelemen, Bence; Lajkó, Adrienn; Mátyás, Mónika; Szendi, Anna; Szilágyi (Ed.), *V. Interdiszciplináris Doktorandusz Konferencia Konferenciakötet = 5th Interdisciplinary Doctoral Conference Conference Book* (pp. 342–354.). Pécsi Tudományegyetem Doktorandusz Önkormányzat.
- Nagy, M., Csóka L., U Nagy G. (2016): Építészet és anyagkutatás összefüggéseinek áttekintése, különös tekintettel a szálerősítésű biokompozitokra. In: Koncz, István; Szova, Ilona (szerk.) *PEME 12. PhD-konferencia Budapest, Magyarország, Professzorok az Európai Magyarországiért Egyesület* (2016) 199 pp. 136–141.
- Narayanan N, Roychoudhury P. K., Srivastava A. (2004): L (+) lactic acid fermentation and its product polymerization, *Electronic Journal of Biotechnology*, Vol. 7 No. 2, pp. 167–179. ISSN: 0717-3458
- Neville, A. C. (1993): *Biology of Fibrous Composites: Development Beyond the Cell Membrane*, Cambridge University Press, Cambridge ISBN 0521410517
- Niaounakis, M. (2015): *Biopolimers: Processing and Products*, Elsevier Inc. ISBN: 9780323279383, p. 4.
- Nishiyama, Y. (2012): Miura Folding: Applying Origami to Space Exploration. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, Vol. 79. No. 2.
- Ok Han, S., Muk Lee, S., Ho Park, W., Cho, D. (2006): Mechanical and thermal properties of waste silk fiber-reinforced poly(butylene succinate) biocomposites. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 100 Issue 6. pp. 4972–4980. doi:10.1002/app.23300
- Pál Károlyné (2011): Komposztáljuk, visszaforgassuk vagy elégezzük a biopolimerek hulladékát? *Műanyagipari szemle* 2011/2
<http://www.muanyagipariszemle.hu/2011/02/komposztaljuk-visszaforgassuk-vagy-elegessuk-a-biopolimerek-hulladekat-17.pdf> 2017.01.04.
- Paoletti, I. (2017): ICD/ITKE Research Pavilions, *Arketipo*, No. 108, 2017, pp. 28-43.
- Pelikán J. (1970): Szerkezettervezés, Műszaki Kiadó, Budapest
- Pickering K.L.; Aruan Efendy M.G.; Le T.M. (2016): A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites: Part A*, Vol. 83. pp. 98–112.
- Plackett D., Andersen T. L., Pedersen W. B., Nielsen L. (2003): Biodegradable composites based on l-poly lactide and jute fibres. *Composites Science and Technology* Vol. 63. pp. 1287–1296. DOI:10.1016/S0266-3538(03)00100-3
- Platzer, M. (2019): *Cold War and Architecture – The Competing Forces that Reshaped Austria after 1945*, Park Books, Architekturzentrum Wien (AZ W), Wien, 2019. ISBN 978-3-03860-175-3
- Powell J., Svendsen L. (2003): *Linoleum*. Gibbs Smith, Salt Lake City. ISBN 1586853031
- Radnóti Imre: *Szálásanyagok és fonalak kézikönyve*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1967

- Reichert S., Schwinn T., La Magna R., Waimer F., Knippers J., Menges A. (2014): Fibrous structures: An integrative approach to design computation, simulation and fabrication for lightweight, glass and carbon fibre composite structures in architecture based on biomimetic design principles. *Computer-Aided Design* Vol. 52. (2014) pp. 27–39. ISSN: 0010-4485
- Riedel U., Nickel J. (2003): Applications of Natural Fiber Composites for Constructive Parts in Aerospace, Automobiles, and Other Areas. *Biocomposites – General Aspects and Special Applications*. ed.: Steinbüchel A. Wiley VCH, Weinheim ISBN 9783527302901
- Rihaczek, G., Klammer, M., Basnak, O., Petrš, J., Grisin, B., Dahy, H., Carosella, S., Middendorf, P. (2020): Curved foldable tailored fiber reinforcements for moldless customized bio-composite structures. proof of concept: Biomimetic NFRP stools. *Polymers*, Vol. 12 No. 9. <https://doi.org/10.3390/polym12092000>
- Robeller, C., Paul, M., Weinand, Y. (2014): Snap-Fit Joints CNC-Fabricated, Integrated Mechanical Attachment for Structural Wood Panels. In: D. Gerber, A. Huang, & S. Jose (Eds.), *Acadia 2014 Design Agency, Proceedings of the 34rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*. USC School of Architecture, Los Angeles. (pp. 189–198).
- Robeller, C., Weinand, Y. (2015): Interlocking Folded Plate – Integral Mechanical Attachment for Structural Wood Panels. *International Journal of Space Structures*, Vol. 30. 111–122. <https://doi.org/10.1260/0266-3511.30.2.111>
- Roesner W. G., Branko S., Kismarton M. U. (2007): *Composite Structures: The First 100 Years*. Boeing <http://ae.metu.edu.tr/~ae469/Composites%20100%20years.pdf> (2017.03.22.)
- Schenk M., Guest S. D. (2011): Origami Folding: Structural Engineering Approach. In: *Origami 5 Fifth International Meeting of Origami Science, Mathematics and Education*, CRC Press, Boca Raton, London, New York.
- Scheurer, F., Stehling, H., (2011): Lost in Parameter Space? *Mathematics of Space, Architectural Design* No.: 212 pp. 71-79.
- Schieber G., Koslowski V., Knippers J., Menges A. (2015): Integrated Design and Fabrication Strategies for Fibrous Structures. In: *Modelling Behaviour – Design Modelling Symposium 2015*, eds.: Thomsen M. R., Tamke M., Gengnagel C., Faircloth B., Scheurer F., Springer, pp. 237-245. ISBN 9783319242088
- Schwinn, T; Krieg, O. D.; Menges, A. (2016): Robotic Sewing: A Textile Approach Towards the Computational Design and Fabrication of Lightweight Timber Shells. In: *ACADIA 2016: Posthuman Frontiers – Data, Designers, and Cognitive Machines – Proceedings of the 36th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)* ed.: Ann Arbor 27-29 October, 2016, pp. 224-233 ISBN 978-0-692-77095-5
- Shahzad A., Nasir S. U. (2016): Mechanical Properties of Natural Fiber/Synthetic Fiber Polymer Hybrid Composites. In: *Green Biocomposites: Manufacturing and Properties*, ed.: Jawaid M., Sapuan S. M., Allothman O. Y., Springer International Publishing, Cham pp. 355–396 ISBN 9783319466095
- Sharma, A., Choudhury, M., & Debnath, K. (2020): Experimental investigation of friction stir welding of PLA. *Welding in the World*, Vol 64. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-00890-7>
- Shigeru Ban Architects <http://www.shigerubanarchitects.com/> (2016. 06. 26)

- Smits J. (2016): Fiber-Reinforced Polymer Bridge Design in the Netherlands: Architectural Challenges toward Innovative, Sustainable, and Durable Bridges. *Engineering Vol. 2 Issue 4*. pp. 518–527. ISSN: 2095-8099
- Smits, J.; Gkaidatzis, R.; Blok, R.; Teuffel, P. M. (2016): Bio-based composite pedestrian bridge. Part 1: design and optimization. In K. Kawaguchi, M. Ohsaki, & T. Takeuchi (Eds.), *Spatial Structures in the 21st Century – Proceedings of the IASS Annual Symposium 2016*, Tokyo, Japan
- Snelson K. (2012): The Art of Tensegrity. *International Journal of Space Structures*, Vol. 27. No 23, pp. 71–80.
- Srithep Y., Nealey P., Turng L. (2013): Effects Of Annealing Time And Temperature On The Crystallinity And Dynamic Mechanical Behavior Of Injection Molded Polylactic Acid (PLA). *Polymer Engineering & Science*, Vol. 53. Issue 3. pp. 580–588. ISSN 15482634
- Sutherland, J. (2010): Revival of structural timber in Britain after 1945. *Construction History*, Vol. 25, pp. 101-113. Retrieved June 24, 2020, from www.jstor.org/stable/41613962
- Tazelaar K. (2017): *Bio-Composieten – Ontwerpen met vezels en 'bio' polymeren, Case study Bio-Brug*. Inholland University. ISBN 9789077812532
- Tompson, R. (2013): *Sustainable Materials, Processing and Production*, Thames & Hudson, London, ISBN 978-0-500-29071-2, p. 100.
- Townsend T., Sette J. (2016): Natural Fibres and the World Economy. In book: Figueiro, R; Rana, S. (Eds.): *Natural Fibres: Advances in Science and Technology Towards Industrial Applications*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo. pp. 381–390.
- Toyo Ito & Associates (2015): *Minna No Mori Gifu Media Cosmos, Gifu, Japan. Domus*, No. 995, ISSN 0012-5377 p. 64.
- Turpin M., Neighbour C., Baldock R. (2014): The Serpentine Sackler Gallery. *The Structural Engineer: journal of the Institution of Structural Engineering*, Vol. 92, No. 6, ISSN 14665123, pp. 16-25
- Vallée T. (2004): *Adhesively Bonded Lap Joints of Pultruded GFRP Shapes*. Doktori értekezés, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
- van der Lugt P. (2007): *Dutch Design Meets Bamboo*. Zoo Producties 2007, Eindhoven, p. 9. ISBN 9074009492
- Vernelle N. (2012): *Snap-Fit Joints for Plastics - A Design Guide*. Bayer Material Science, Pittsburg, USA
- Vincent J. (1982): Fibres. In: *Structural Biomaterials*, The Macmillan Press, London, 1982. p. 70–73. ISBN 9780333261262
- Vyzoviti, S. (2003): *Folding Architecture: Spatial, Structural and Organizational Diagrams*. BIS Publishers, Amsterdam, ISBN: 9063690592
- Wesselényi-Garay A. (2007): *Az építészet mimézise*. Doktori értekezés, Nyugat Magyarországi Egyetem, Cziráki József Faanyagtudomány és Gyártástechnológiák Doktori Iskola, p. 14.

- Xercavins P., Demarthe D., Shushkewich K. (2011): Eugène Freyssinet His Incredible Journey to Invent and Revolutionize Prestressed Concrete Construction. *36th Conference on Our World In Concrete & Structures*. (14 - 16 August 2011, 14 - 16 August 2011) CI-Premier PTE LTD, Singapore
- Zalavári, J. (2020): *Designjátékok - A forma tervezésének játéka és játszmái*. Scolar Kiadó, Budapest.
- Zardini, M. (2010): A Crisis That Made Architecture Real. *Perspecta*, No 42, pp. 79–82.

11 Képek, ábrák és táblázatok jegyzéke

Képjegyzék

1. kép: Bernard Cache Earth Moves kötetének borítóképe (Cache 1995)	10
2. kép: Musee du Quai (eisenmanarchitects.com).....	11
3. kép: BMW Welt (archdaily.com)	11
4. kép: The Serpentine Sackler Gallery (Luke Hayes, archdaily).....	12
5. kép: Heydar Aliyev Center (Iwan Baan, archdaily)	12
6. kép: Gyalogoshíd Harlingenben. [Smits 2016].....	13
7. kép: a – Pontresina Svájc; b – L leida, Spanyolország; c – Kolding, Dánia [Smits 2016].....	13
8. kép: 2012-es ITKE-ICD kutatópavilon [Reichert et al. 2014].....	16
9. kép: 2013-14-es ITKE-ICD kutatópavilon [Knippers et al. 2015.].....	16
10. kép: ITKE-ICD pavilon 2014–15 [Schieber et al. 2015].....	16
11. kép: ITKE-ICD pavilon 2016–17 [Paoletti 2017]	16
12. kép: Panton szék, 1960 (www.vitra.com)	20
13. kép: A csöpögtetett szék, 1964 (www.wright20.com)	20
14. kép: „Golgotha” szék, 1972 (www.wright20.com)	20
15. kép: Layer Design „Scale” kenderpép térelválasztó rendszere (layerdesign.com 2021. 03. 31.)	21
16. kép: Bio-flexi [Dahy 2017]	21
17. kép: Hemp Chair (www.aisslinger.de/hemp-chair 2021. 03. 31.)	21
18. kép: Toul Stoul [Jute-Lab 2015]	21
19. kép: Flax Chair [Label breed 2016]	21
20. kép: Artichair [Brownell 2017].....	21
21. kép: Biokompozit pad az amszterdami Schipol repülőtéren. Az anyagszerkezet a festéktől kitakart „ablakon” át figyelhető meg. [Biobasedbank 2016]	22
22. kép: AbroSkin [Köhler-Hammer et al. 2014]	25
23. kép: Bio-Mat szék [Rihaczek et al. 2020].....	25
24. kép: Gyalogoshíd biokompozitból [Tazelaar 2017]	26
25. kép: Bio-Mat pavilon [Dahy 2019].....	26
26. kép: Szent József kupola a Soproni Egyetemen [Faipar 2010/2].....	42
27. kép: Expo 1958 Philips Pavilion (Wikipedia Commons, Wouter Hagens)	44
28. kép: St. Mary templom, Kenzo Tange tervei szerint, 1964 (www.archdaily.com; Scarlet Geen)	44
29. kép: Ark Nova, 2013 (The Telegraph)	45
30. kép: Montreal Velodrome építése (1973-1976) [Xercavins et al. 2011]	45
31. kép: Kertészeti Kiállítás zenepavilonja, Kassel, 1955 [Drew 1976].....	46
32. kép: Német Pavilon, Expo '67, Montréal [Drew 1976].....	46
33. kép: Hannoveri Expo pavilon, Frei Ottóval közös alkotás (Hiroyuki Hirai).....	48
34. kép: Ideiglenes iroda a Pompidou központ tetején (Didier Boy de la Tour).....	48
35. kép: Fold Finding Origami Pavilion alumínium szendvicslemezekből áll [Friedman 2016]...	51
36. kép: "home for all" játszóház [Arup 2015].....	53
37. kép: Gifu Media Cosmos [Toyo Ito 2015]	53
38. kép: ITKE-ICD pavilon 2010 [Molitz et al. 2012]	54
39. kép: Pompidou kozpont, Metz [Centre 2011].....	54
40. kép: Heasly Nine Bridges [SBA 2010]	54
41. kép: Kobei ideiglenes papírtemplom, 2011 [SBA].....	55
42. kép: Florida Suncoast Dome, Saint Petersburg, USA, 1989 [Robinson 1989]	55

43. kép: MOOM pavilon a Tokyo University of Science-en 2011-ben [s.n. 2012].....	55
44. kép: Biokompozit híd próbaeleme [Biobasedbank 2016].....	56
45. kép: Biokompozit híd keresztmetszet vázlata [Biobasedbank 2016].....	56
46. kép: Ro&ad Architekten Biokompozit koporsó [Lugt 2007].....	58
47. kép: Biokompozit fedés modellje [Mangliár 2016].....	58
48. kép: Bepattanó fakötés [Robeller 2014].....	58
49. kép: ITKE-ICD pavilon 2011 [Fleischmann et al. 2011].....	59
50. kép: Origami könnyűháj [Robeller 2015].....	59
51. kép: ITKE-ICD kísérleti pavilon 2015–16. [Schwinn et al. 2016].....	60
52. kép: fafurnérokból összevarrt fal [Garufi et al. 2019].....	60
53. kép: Couture karosszék, Färg and Blanche, 2015. [Schwinn et al. 2016].....	60
54. kép: elemi tensegrity cella modellje.....	62
55. kép: hajlított lapokból álló modell.....	62
56. kép: origami modell.....	62
57. kép: hajlított kartonpapír modell.....	64
58. kép: hajlított Yoshimura hajtogatás.....	64
59. kép: a kartonmodell munkaközi képe.....	64
60. kép: tensegrity rendszerű kábeltető modell.....	64
61. kép: elemes dongaháj modellje.....	65
62. kép: biokompozit csomópont modellje.....	65
63. kép: íves hajlítású biokompozitlap.....	66
64. kép: legyezőmintába hajtogatott biokompozitlap.....	66
65. kép: biokompozit L-profil.....	66
66. kép: biokompozit cső fűzött illesztéssel.....	66
67. kép: biokompozit szalagok.....	67
68. kép: A1, A2 és A3 próbatestek szakadási képe.....	90
69. kép: C1 próbatestek szakadási képe.....	91
70. kép: C2 próbatestek szakadási képe.....	91
71. kép: kezelés nélküli jutaszövet ellenőrző minta szakítás után. Sztereó mikroszkópos felvétel.	92
72. kép: jutaszövet próbatestek szakadásképe.....	92
73. kép: A C2-es előgyártmány nyomó szilárdsági vizsgálatának törésképei.....	95
74. kép: a próbatest sértetlen felszíne száláttörésekkel.....	100
75. kép: próbatest sértetlen felstzíne.....	100
76. kép: A próbatest roncsolt felstzíne sztereomikroszkóp alatt.....	101
77. kép: SEM felvétel egy próbatest roncsolt felületéről.....	101
78. kép: SEM felvétel a próbatest roncsolt felületéről pikkelyes leválással.....	101
79. kép: Szálkihúzóds képe sztereomikroszkópos felvételen.....	102
80. kép: kihúzóds szálak sztereomikroszkópos képe.....	102
81. kép: Szálkihúzóds SEM felvételen.....	102
82. kép: Rostok roncsolt szakasza SEM felvételen.....	102

Ábrajegyzék

1. ábra: A demográfiai növekedés ciklusai [Lőrinc 2016].....	7
2. ábra: Foglalkoztatottak az Egyesült Államokban gazdasági szektoronként, 1800–1980 [Lőrinc 2016].....	9
3. ábra: Politejsav szerkezeti képlete	35
4. ábra: Példák az erősítő anyag elrendezésére	36
5. ábra: A héjak formai és technológiai fejlődése gráffal szemlélítve. Az ábra Kaesz Gyula 1978-as munkája nyomán készült, amiben fa diagramon szemlélteti különféle bútorok működésbeli és formai fejlődését [Zalavári 2020].....	49
6. ábra: Miura féle cikk-cakkos hajtogatás [Miura 1993].....	50
7. ábra: A1, A2 és A3 minták tönkremenetele húzó igénybevétel hatására	89
8. ábra: C1 és C2 minták tönkremenetele húzó igénybevétel hatására	91
9. ábra: B próbatest jellemző hajlítási görbéje.....	93
10. ábra C1 és C2 minták tönkremenetele hajlító igénybevétel hatására	93
11. ábra: C2-es előgyártmányból készült minták tönkremenetele nyomó igénybevétel alatt. A kiemelt görbe az átlagos értéket jelzi.	95

Táblázatok

1. táblázat: Szerves vegyületek csoportosítása eredetük szerint.....	28
2. táblázat: Növényi erősítőszálak mechanikai tulajdonságainak összehasonlítása [Nabi Saheb et al. 1999].....	31
3. táblázat: részben vagy teljesen biológiai eredetű polimerek összehasonlítása [Aeschelmann et al. 2016].....	33
4. táblázat: Kísérleti gyártmányok gyártási paramétereinek összehasonlítása	87
5. táblázat: Egyes előgyártmányokra jellemző átlagos értékek a húzószilárdsági vizsgálat eredményei alapján.....	89
6. táblázat: Egyes előgyártmányokra jellemző átlagos értékek a hármponos hajlítási vizsgálat eredményei alapján.....	92
7. táblázat: C2-es előgyártmányból készült minták nyomószilárdsági vizsgálati eredményeinek átlagos értékei	95

12 Melléklet: Kísérleti gyártás és vizsgálatok összefoglalása

Felhasználva az irodalomkutatást és az esettanulmányokat saját szerkezeti kompozitot készítettünk jutából készült zsákváson és PLA felhasználásával. Az így készült gyártmányokat mechanikai vizsgálatoknak és mikroszkópos megfigyelésnek vetettük alá, hogy tökéletesítsük a gyártástechnológiát. Ezen kívül néhány kísérleti munkadarab is készült a gyártmányokból a továbbfeldolgozás lehetőségeinek vizsgálatára. A tapasztalatok igazolják az irodalom közléseit, bár fény derült eltérésekre és értékes tapasztalatokat szereztünk a biokompozitok feldolgozásáról.

12.1.1 Gyártási paraméterek

A kémiai összetétel nem jellemez behatóan egy összetett anyagot, annak tulajdonságai nagymértékben függenek a gyártástechnológia részleteitől. Jelen munkában mégis alkalmazzuk a mátrix hozzávetőleges tömegarányát megkülönböztetésre. A tömegarányt százalékban adjuk meg egységnyi minta teljes tömegéhez képest. A minták jellemzésénél továbbá figyelembe vesszük az erősítőszövet rétegszámát, valamint a vastagságot. A vastagság mindig átlagos érték, mivel az alapanyagot jelentő jutaszövet sűrűsége is ingadozó, illetve a granulátum felhasználásával készült minták esetében a PLA fázis sűrűsége sem állandó.

Az összetétel mellett a préselési hőmérséklet, a préselési idő és a présnyomás játszik szerepet a gyártásban. Ezeket a paramétereket [Plackett et al. 2003] alapján határoztuk meg, de a jutaszövet kontrollminták szakítóvizsgálatának tükrében korrigáltuk a préselési hőmérsékletet. Mivel a kompozit húzószilárdsága a kiindulási anyaghoz képest csökkent, a kezdeti 210 °C-t 190 °C-ra csökkentettük. Granulátumos kísérleteknél a háromlépcsős préselési eljárást egyszerűsítettük egylépcsőssé. A présnyomás minden esetben 3 Bar. A minták azonosítására egy betű-szám kombinációt alkalmaztunk, ahol a betű arra utal, hogy a minta hányadik ütemben készült.

A PLA mátrixanyagot kétféle előgyártmányból készítettük, az első esetben 130 g/m² tömegű, 0,8 mm átlagos vastagságú cellulóz-nanokristály erősítésű fóliát (PLA/CNC) préseltünk az erősítőszálhoz, a második esetben granulátummal dolgoztunk. Megfigyeltük, hogy a granulátum lényegesen egyenetlenebb terülésű, és alacsony tömegarány mellett nem terül szét folytonosan. Granulátumos kísérletek során előpréselés helyett előlágýtottuk a szövetre szórt mátrixanyagot, hogy a présnyomás képlékeny állapotban érje. A kísérleti gyártáshoz egységesen 300 g/m² tömegű jutaszövetet használtunk, aminek az átlagos vastagsága 0,94 mm.

4. táblázat: Kísérleti gyártmányok gyártási paramétereinek összehasonlítása

sorszám	mátrix tömegarány	erősítőszövet rétegszáma	átlagos vastagság (mm)	mátrix előgyártmánya	préshő (°C)	présidő (min:sec)
A1	46%	2	0,72	fólia	150 210 60	0:15 3:00 1:00
A2	30%	2	0,78	fólia	150 210 60	0:15 3:00 1:00
A3	30%	1	0,44	fólia	150 210 60	0:15 3:00 1:00
B	30%	5	1,50	fólia	150 190 60	0:15 3:00 1:00
C1	60%	6	6,20	granulátum	190	3:00
C2	60%	8	2,09	granulátum	190	3:00

12.1.1.1 Kötőanyag kezelés

A szilárdságot kötőanyag alkalmazásával kívántuk növelni. A próbatesteket három csoportra osztottuk. Az első csoportba tartozókat PDDA oldattal, a második csoportot tejsav (Lactic acid) oldattal kezeltük, a harmadik csoportba eső próbatesteket pedig kezeletlenül készítettük el. A kötőanyag kezelését mindkét esetben a jutaszöveten hajtottuk végre és az így kezelt alapanyagból készítettünk kompozit lemezeket. Az első mechanikai vizsgálatok alkalmával kiderült, hogy a kötőanyag kezelésünk szilárdsági szempontból hatástalan, azonban a tejsavval kezelt csoporton egy váratlan jelenséget figyeltünk meg, ami a minták rostszerkezetének szétesésével jár.

12.1.1.2 Rostok szétesése tejsav hatására

Tejsavba áztatott jutaszövet minták szálainak szétesését tapasztaltuk 210 °C hőmérsékleten 30 bar nyomás alatt. A minták 15 percen át áztak 88%-os tejsav és csapvíz 1:5 arányú oldatában, majd 14-16 napon át jól szellőző, környezetben száradtak. Azok a minták, amelyek 7 nappal az impregnálás után kerültek hőpréselés alá nem reagáltak számottevően.

A kísérletet megismételtük nád, szalma és fafurnér (bükk, tölgy, juhar, dió) próbatestekkel, hogy megismerjük a kezelés hatását más növényi alapanyagokkal is. Nád és szalma mintát 15 percig, a fafurnérokat 40 percig áztattuk az oldatba, majd 14 nap elteltével hőpréseltük őket. Nád és szalma próbatestek a jutaszövethez hasonlóan reagáltak. Fafurnér esetében a kezelés hatástalannak bizonyult, mindössze némi elszíneződést tapasztaltunk.

Kontrollmintákat készítettünk, ezek közül az egyik csoportot nem kezeltük tejsavoddal, hanem egyből 210 °C-on 30 bar alatt kezdtük préselni. A kontrollminták másik csoportját az eredeti próbatestekkel megegyező kezelésben részesítettük, de csak 150 °C-on préseltük. A rostszerkezet tönkremenetele mindkét esetben elmaradt.

12.2 Mechanikai vizsgálatok

A kísérleti gyártmányok szilárdságát roncsolásos szilárdsági vizsgálattal ellenőriztük, amihez próbatesteket készítettünk elő. Bár az építészeti alkalmazások során jellemzően összetett igénybevételek ébrednek, de egyszerű igénybevételekkel is következtethetünk a kísérleti anyag jövőbeni szilárdságára. Négy különböző vizsgálatot végeztünk el: egy húzószilárdsági próbát, egy nyomószilárdsági és egy hárompontos hajlítási próbát valamint egy ejtődárdás vizsgálatot, ami a próbatestek ellenállását méri dinamikus igénybevétellel szemben. Hogy mélyebb ismereteket szerezzünk a kompozit természetéről, különféle, eltérő gyártástechnológiával készült próbatesteket hasonlítottunk össze, az eredményeket pedig azonnal felhasználtuk a gyártástechnológia javítására. A számszerű adatokon és diagramokon kívül a próbatestek roncsolt felszínének vizsgálatával is további adatokhoz jutottunk. Főként faanyag, és különféle csomagolóanyagok mechanikai tesztelésére használt gépeket és beállításokat választottunk, a minták kiértékelése is fa, papír és kompozit vizsgálatok tapasztalatainak tükrében került sor.

12.2.1 Húzó igénybevétel

12.2.1.1 Kísérleti elrendezés

A méréshez Instron 5566 típusú berendezést használtunk, ami 0,1 másodpercenként szolgáltatott mérési adatokat. A fejeket sima felületű befogó pófákkal láttuk el, a két befogás 10 mm/min sebességgel távolodott el egymástól.

12.2.1.2 A1, A2 és A3 minták

Ezeket a próbatestek nem lemez előgyártmányból készültek, hanem szalagokat vágunk ki jutaszövetből, gondosan ügyelve, hogy a minta hosszanti tengelyével párhuzamos szálak sértetlenek maradjanak. Minden szalag öt párhuzamos szálát tartalmaz, ennek következtében a szélességük nagyon változó. A szalagok közé PLA-CNC fóliát helyeztünk, majd hőpréseltük őket. Az így előkészített próbatestek mérete $10 \times 180 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$. Minden előgyártmányból hat próbatest készült, így összesen 18 minta tönkremenetelét vizsgáltuk meg.

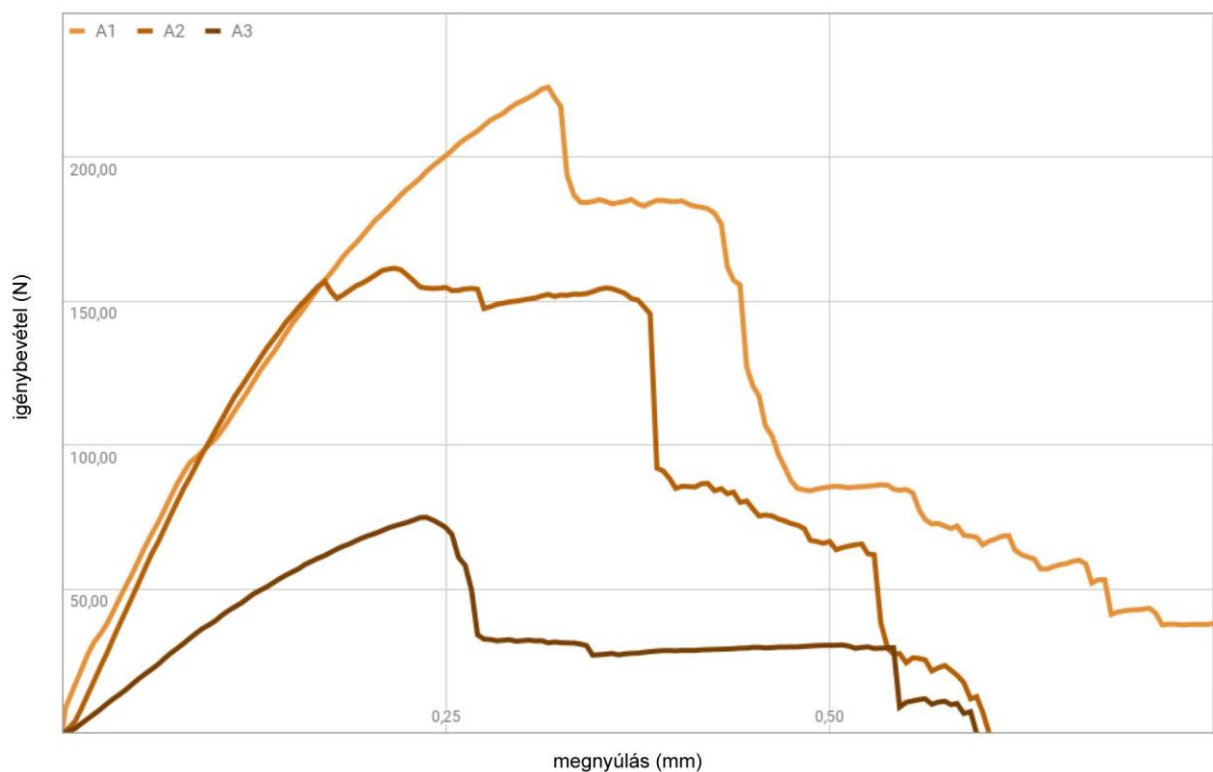
Az A1 és A2 minták esetében a mátrix tömege egymáshoz képest kétszeres, húzószilárdságukban viszont nem mutatkozik nagy eltérés. Az erősítőszál tömege és rétegszáma ellenben azonos, így megállapíthatjuk, hogy a polimermátrix csak kis mértékben járul hozzá a kompozit húzószilárdságához.

A minták alakváltozását az igénybevétel függvényében ábrázoló diagramja meglehetősen beszédes. Megfigyelhetjük rajta, hogy a görbe több lépcsőben esik vissza 0-ra, egyes esetekben a "lépcsők" száma egybeesik a rétegek számával. Ebből a rétegek fokozatos elválására következtetünk, ami a szál-mátrix határfázis gyengeségére utal.

A próbatestek tönkremeneteli képe általában szakaszosan válozik a rövid és hosszú szálás szakadási kép között. Az erősebb értéket mutató szélsőséges minták esetében tompa szakadási képet látunk.

5. táblázat: Egyes előgyártmányokra jellemző átlagos értékek a húzószilárdsági vizsgálat eredményei alapján.

előgyártmány sorszáma	legnagyobb terhelés (N)	átlagos keresztmetszet (mm ²)	legnagyobb feszültség (MPa)
A1	156,33	10,65	14,75
A2	142,21	10,63	13,80
A3	78,53	5,18	13,00
C1	1101,68	61,55	46,33
C2	2851,44	21,20	51,96
jutaszalag	152	7,48	20,32



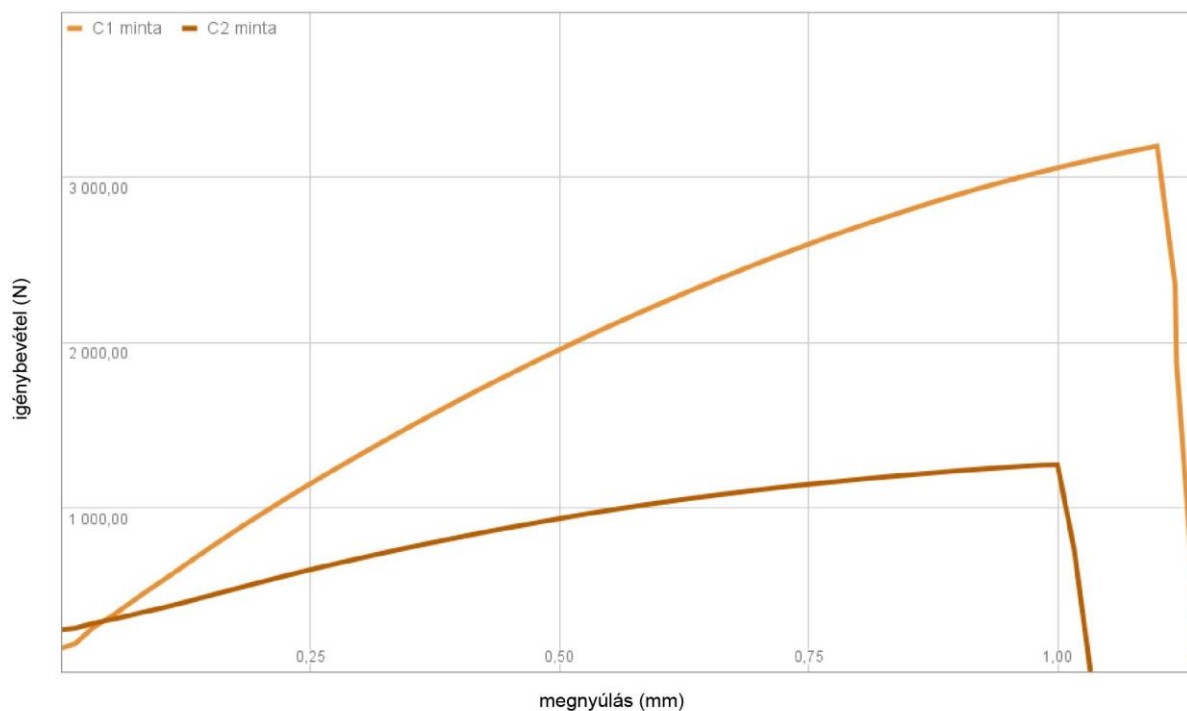
7. ábra: A1, A2 és A3 minták tönkremeneteli húzó igénybevétel hatására



68. kép: A1, A2 és A3 próbatetek szakadási képe

12.2.1.3 C1, C2

A C1 és C2 mintákhoz 10×180 mm méretű próbatetek készültek lemez előgyártmányból, ügyelve arra, hogy a szálirány a minták tengelyével párhuzamos legyen. A minták tönkremenetele alapján készült igénybevétel-megnyúlás görbén A1, A2, A3 mintákhoz képest nagyságrendileg magasabb maximális igénybevétel mellett sima, cápauszony formájú görbét figyelhetünk meg, egyetlen csúccsal. Ebből szoros szál-mátrix kölcsönhatásra következtetünk. A próbatetek szakadási képe tompa és rövid szálak szakaszokból álló rajzolatot mutat, ami szintén arra utal, hogy a rostok nem tudnak nagyobb szakaszon elválni a mátrixról, így a sodronyok nagyobb arányban dolgoznak együtt.



8. ábra: C1 és C2 minták tönkremenetele húzó igénybevétel hatására



69. kép: C1 próbatetek szakadási képe



70. kép: C2 próbatetek szakadási képe

12.2.1.4 Ellenőrzőminták

Ellenőrzés céljából vizsgáltuk meg a jutaszövet ellenállását húzási igénybevétellel szemben. A vizsgált szalagokat 5 sodronyszál szélességben vágtuk le. A sodronyok keresztmetszete átlagosan $D=0,5$ mm, így a szövet keresztmetszetét ennek ötszörösének tekintjük, ami $7,48$ mm². Azt tapasztaltuk, hogy a szalagok húzószilárdsága meghaladja az A1, A2, és A3 mintákét. A vászon vizsgálatánál továbbá, jellegzetes lépcsős tönkremenetelt figyeltünk meg, ami hasonlít a gyenge kompozitminták tönkremenetelére. A jutaszövet próbatetek átlagosan $3,15$ mm nyúlást követően $20,32$ MPa terhelésen szakadtak el. Szakadási képen a húzás tengelyével párhuzamos irányú

sodronyok hosszan kinyúlnak, és elvékonyodnak, ami a sodronyokon belüli szálak eltérő ütemű tönkremenetelére utal. A keresztirányú sodronyok tartják kötésben az igénybevétellel egyirányúakat, a szakadási képen jól látszik, hogy tönkremenetelkor megszűnik a keresztirányú sodronyok rendezettsége.

Szövetből levágott szalagok szakítását követően a sodrony szilárdságát is vizsgáltuk. A sodronyok hozzávetőleg 0,5 mm átmérőjűek és 2,27 mm-rel nyúltak meg a tönkremenetelt megelőzően, ami átlagosan 5,33 MPa-nak megfelelő igénybevétel hatására következik be. Ez az érték az öt szálból álló szalag szilárdságának közel egynegyede.



71. kép: kezelés nélküli jutaszövet ellenőrző minta szakítás után. Sztereoó mikroszkópos felvétel.



72. kép: jutaszövet próbatetek szakadásképe

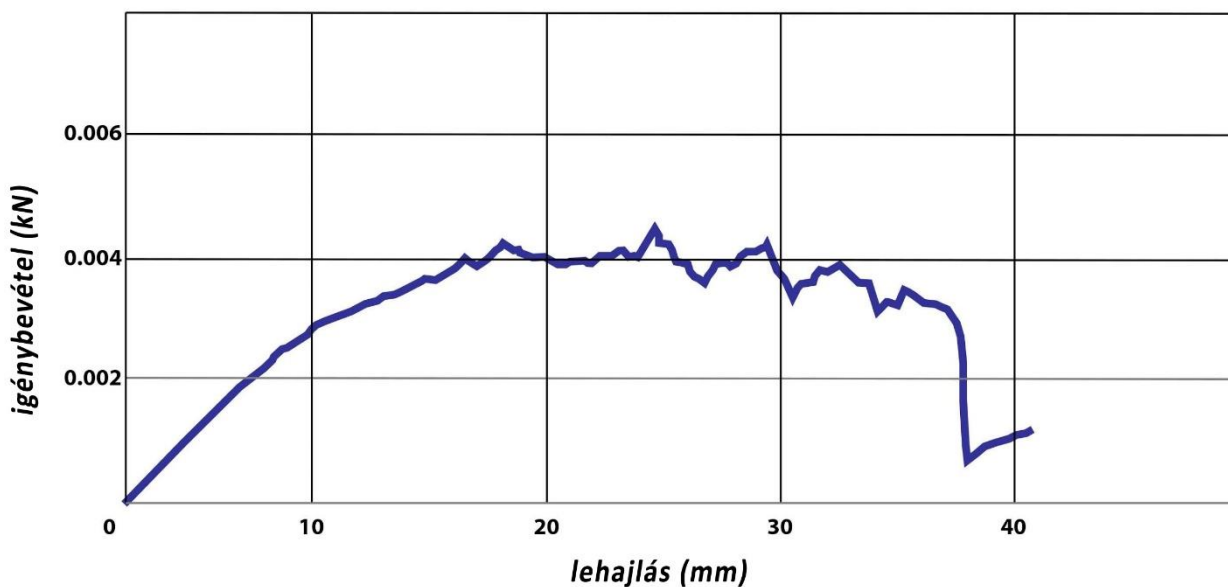
12.2.2 Hárompontos hajlítás

Hajlító vizsgálat 10 × 100 mm felületű próbatesteken végeztük, a két feltámasztási pont távolsága 80 mm volt, a szerszám 50 mm/min sebességgel mozdult el. A vizsgálathoz Instron 5566 típusú berendezést használtunk.

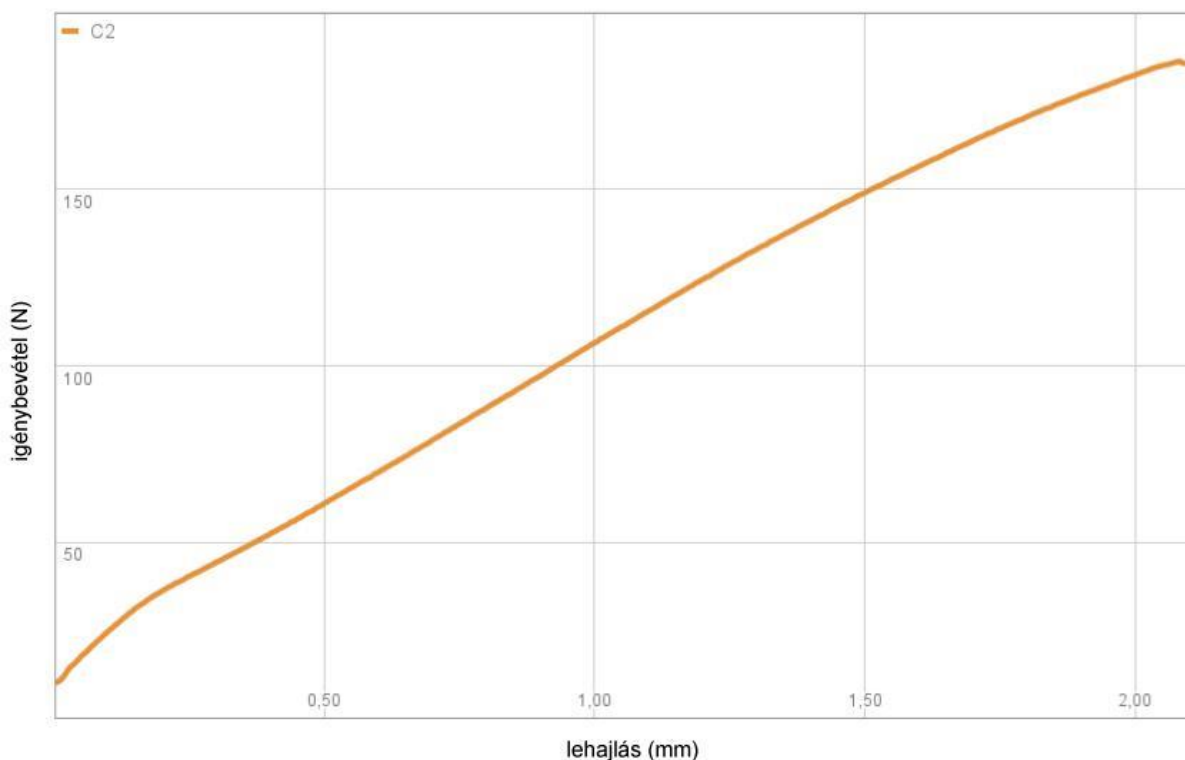
6. táblázat: Egyes előgyártmányokra jellemző átlagos értékek a hárompontos hajlítási vizsgálat eredményei alapján.

előgyártmány jele	legnagyobb terhelés (N)	átlagos keresztmetszet (mm ²)	legnagyobb feszültség (MPa)	behajlás (mm)
B	3,96	11,92	0,33	19,45
C2	165,51	21,20	7,80	1,84

A B előgyártmány tönkremenetelét ábrázoló diagramon öt csúcsot figyeltünk meg. A próbatetek ötrétegűek, ezért, a húzó igénybevételi vizsgálathoz hasonlóan, ütemes tönkremenetelre következtetünk, ami a rétegek elválásából fakad.



9. ábra: B próbatest jellemző hajlítási görbéje



10. ábra C1 és C2 minták tönkremenetele hajlító igénybevétel hatására

12.2.3 Nyomó szilárdság vizsgálata

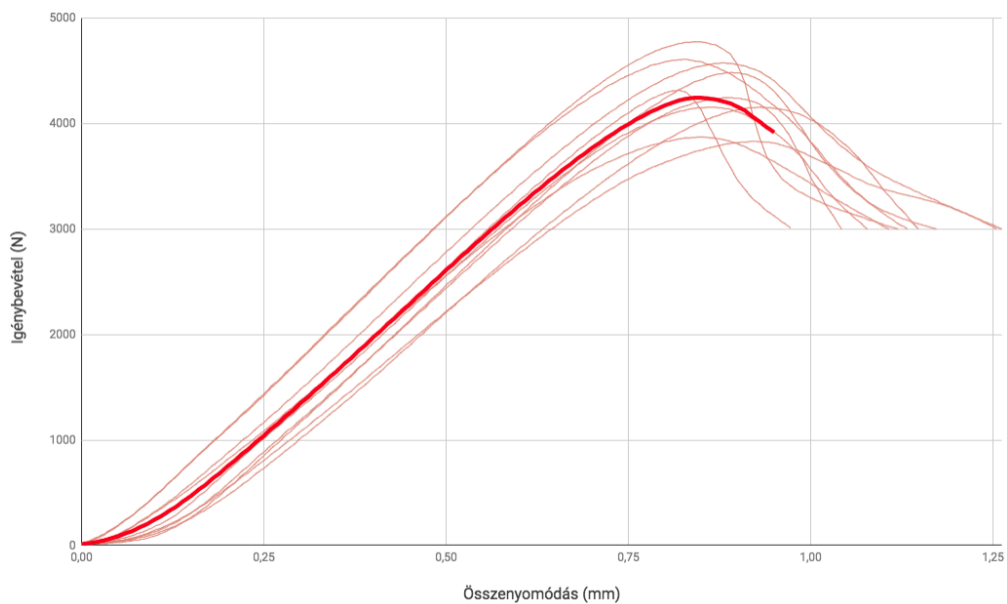
A nyomószilárdságra egy, a C2-es mintából készült, 29 próbatest tönkremenetét mérő vizsgálat alapján következtetünk. A próbatestek keresztmetszete $5,55 \times 10,25 (\pm 0,25)$ mm, hosszúságuk $13,25 (\pm 0,25)$ mm, az igénybevétel pedig mindig él irányban, tehát a rétegek síkjával párhuzamosan érte a mintákat. Méréshez, merev fejpárral felszerelt Tinius Olsen H10KT típusú berendezést

alkalmaztunk. A próbatestek átlagosan 4272,72 N erő hatására mentek tönkre, átlagosan 6,52% hosszirányú rövidülés után. Az átlagos nyomószilárdság 75,07 MPa.

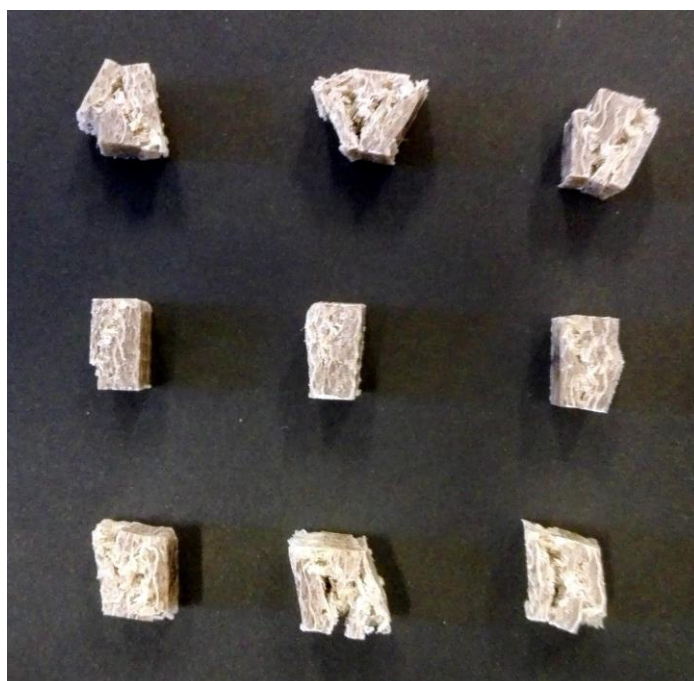
A próbatestek szabadszemmel megfigyelhető törésképe faanyagvizsgálatoknál a rostokkal párhuzamos igénybevétel hatására kialakult mintázatokat idézi. A próba mintát is ide számolva harminc próbatest három csoportra oszlik. 19 esetben ék alakú repedést figyeltünk meg, nyolc esetben egysíkú elnyíródást tapasztaltunk, három esetben pedig a próbatest hozzávetőleg 15°-os kitérés mellett a rétegekkel párhuzamosan hasadt végig.

7. táblázat: C2-es előgyártmányból készült minták nyomószilárdsági vizsgálati eredményeinek átlagos értékei

vastagság	szélesség	hosszúság	max erő (N)	elmozdulás (mm)	elmozdulás (%)	nyomószilárdság (MPa)
5,554	10,251	13,247	4272,72	0,86	6,52%	75,07



11. ábra: C2-es előgyártmányból készült minták tönkremenetele nyomó igénybevétel alatt. A kiemelt görbe az átlagos értéket jelzi.



73. kép: A C2-es előgyártmány nyomó szilárdsági vizsgálatának törésképei.

12.2.4 Konfidenciaintervallum

Hárompontos hajlítási vizsgálat során a próbatestek ellenállását mértük meg hajlító igénybevétellel szemben. Mivel a próbatestek szerkezete inhomogén, ezért egy részüket megfordítottuk, hogy megfigyeljük, mutatkozik-e különbség a "színoldal" és a fonák között, ahogy az más, összetett keresztmetszetű anyagoknál tapasztalható. Mivel a két csoport szélső értékei átnyúlnak egymás adattartományába, a két adatsor kapcsolatát statisztikai módszerrel vizsgáltuk meg. A mérések során, tönkremenetel előtt tapasztalható legnagyobb igénybevétel értékét és az így kigyűjtött adatokból adódó sokaság tulajdonságait alább foglaljuk össze.

Konfidenciaintervallum becslés alapján arra következtetünk, hogy a két átlag különbsége a mérési pontatlanságból adódik. Ebből kifolyólag az átlagos hajlítószilárdság meghatározásához a teljes – húsz próbatest felhasználásával nyert – adatsor értékeit alkalmazzuk.

MÉRÉSI ADATOK	
Legnagyobb igénybevétel (N)	
A	B
<i>minta színe török</i>	<i>minta fonákja török</i>
186,1896	160,9452
193,9273	149,8001
188,3257	157,6519
166,4044	186,2926
195,7326	128,7755
166,7032	145,8999
153,0070	170,1720
165,2791	172,7894
140,1067	181,9741
	134,1198
	166,2174

SOKASÁG ADATAI

$\bar{x}_A = 172,85$	$\bar{x}_B = 159,51$
$x_{A(min)} = 140,1067$	$x_{B(min)} = 128,775$
$x_{A(max)} = 195,7326$	$x_{B(max)} = 186,2926$
$S_A = 18,22$	$S_B = 17,66$
$S_A^2 = 331,98$	$S_B^2 = 311,93$
$n_A = 9$	$n_B = 11$

$$F_{(8,10)0,975} = 3,855$$

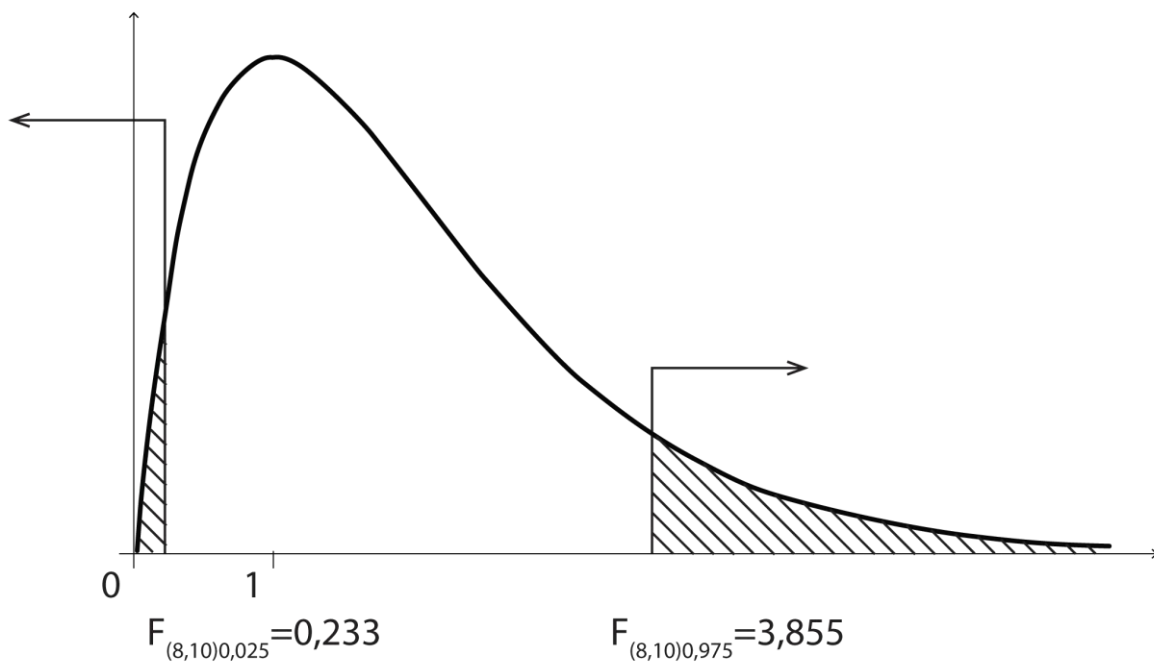
$$F_{(8,10)0,975} = 3,855$$


$$F_{(8,10)0,025} = \frac{1}{F_{(10,8)0,975}} = \frac{1}{4,295} = 0,233$$

$$P\left(\frac{S_A^2}{S_B^2} \cdot \frac{1}{F_{1-\frac{\alpha}{2}}(v_1, v_2)} < \frac{\sigma_A^2}{\sigma_B^2} < \frac{S_A^2}{S_B^2} \cdot \frac{1}{F_{\frac{\alpha}{2}}(v_1, v_2)}\right) = 0,095$$

$$P\left(\frac{331,98}{311,93} \cdot \frac{1}{3,855} < \frac{\sigma_A^2}{\sigma_B^2} < \frac{331,98}{311,93} \cdot \frac{1}{0,233}\right) = 0,095$$

$$P\left(0,276 < \frac{\sigma_A^2}{\sigma_B^2} < 4,568\right) = 0,095$$



 elutasítási tartomány

Mivel a konfidencia intervallum tartalmazza az 1-et, $\sigma_A^2 \approx \sigma_B^2$.

1) Nullhipotézis: $H_0: \mu_A - \mu_B = 0$

2) Ellenhipotézis: $H_1: \mu_A - \mu_B \neq 0$

Mivel kétoldali próba, ezért két kritikus érték van.

3) Szignifikanciaszint: $\alpha = 0,05$

4) Kritikus értékek: $v = n_A + n_B - 2 = 9 + 11 - 2 = 18$

$$-t_{(18)0,025} = -2,101; t_{(18)0,025} = 2,101$$

5) Próbastatisztika:

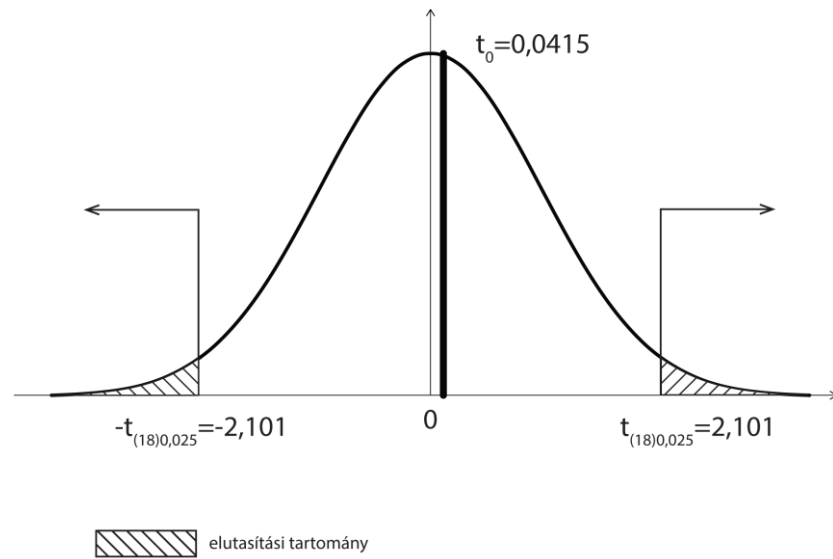
$$S_p = \sqrt{\frac{(n_A - 1) \cdot S_A^2 + (n_B - 1) \cdot S_B^2}{n_A + n_B - 2}} = \sqrt{\frac{(9 - 1) \cdot 331,98 + (11 - 1) \cdot 311,93}{18}}$$

$$= \sqrt{\frac{2655,84 + 3119,3}{18}} = 320,84$$

$$S_{\underline{x}_A - \underline{x}_B} = S_p \cdot \sqrt{\frac{1}{n_A} + \frac{1}{n_B}} = 320,84 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} + \frac{1}{11}} = 321,2894$$

$$t_0 = \frac{(\bar{x}_A - \bar{x}_B) - d_0}{S_{\bar{x}_A - \bar{x}_B}} = \frac{13,34 - 0}{321,2894} = 0,0415$$

$$t_0 = 0,0415$$



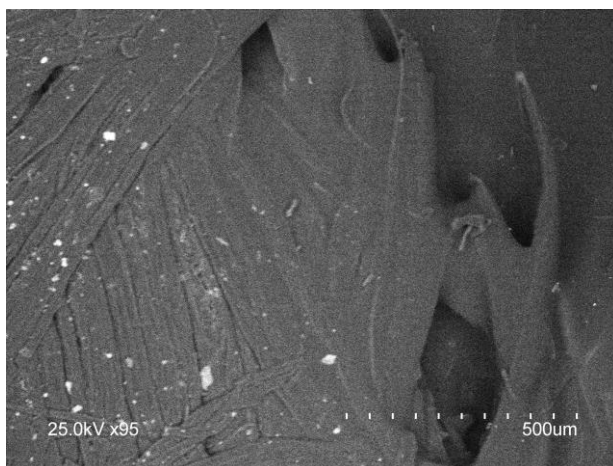
6) Döntés: Elfogadjuk a nullhipotézist.

7) Következtetés: Az adott minta alapján, $\alpha = 0,05$ szignifikancia szinten nem áll módunkban elutasítani azt a feltételezést, hogy nincs különbség az A és a B eset között.

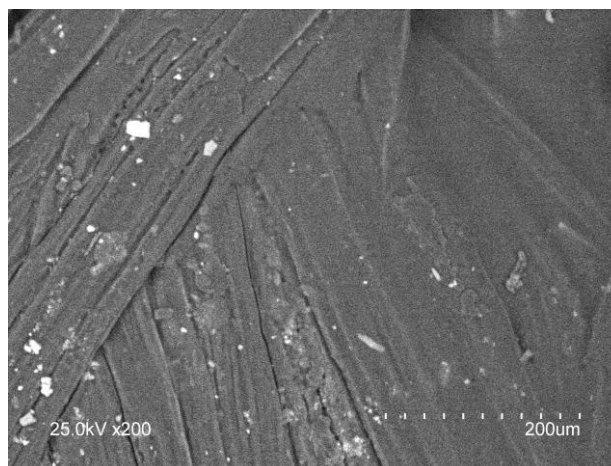
12.3 Mikroszkópos megfigyelés

12.3.1 Próbatestek sértetlen felszíne

A SEM felvételek alapján kitűnik, hogy a próbatestek felülete barázdált, megfigyelhető rajta a szálak iránya. A mátrix viszonylag vagy pontossággal követi a rostok felületét, sőt, helyenként a rostok át is törik azt.



74. kép: a próbatest sértetlen felszíne száláttörésekkel



75. kép: próbatest sértetlen felstzíne

12.3.2 Roncsolt felületek tanulmányozása

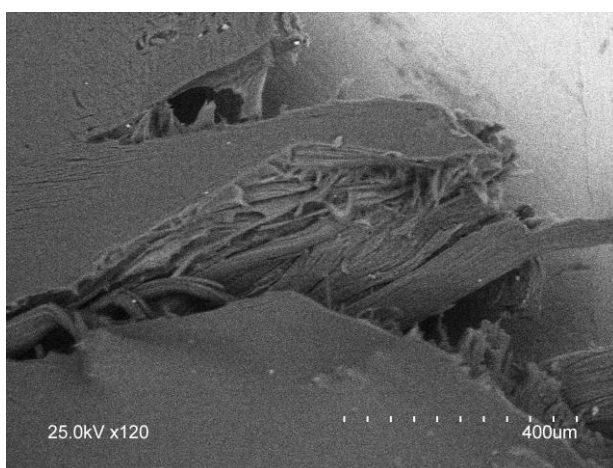
Arra a kérdésre szeretnénk választ kapni, hogy mi különbözteti meg az átlagnál ellenállóbb minták felépítését a gyenge mintáktól, ezért a szilárdsági vizsgálatoknál felhasznált próbatestek roncsolt felületét tovább tanulmányoztuk. Felvételeket készítettünk sztereó mikroszkóp és pásztázó elektronmikrosztóp (SEM) segítségével. Az A1, A2 és A3 minták közül válogattunk olyan próbatesteket, amik a húzószilárdsági mérések során szélsőséges értéket hoztak. Összehasonlításként megvizsgáltuk a gyártmány sértetlen felületét, illetve a szövetben ollóval átvágott sodronyt. A felvételek segítségével szeretnénk megfigyelni a tönkremenetel módját, a szilárdság további növelése céljából.

A mikroszkópos megfigyelés lényegében a szabad szemmel végzett vizsgálatok eredményét erősíti meg: a kisebb szilárdságú próbatestek esetében nagyobb mértékű száلكihúzódások figyelhetőek meg. Ezzel szemben a nagyobb szilárdságú minták mikrófelületei is tompább törésképet mutatnak, a keresztmetszeten belül azonban szintén megfigyelhető a rostok kitüremkedése. Ebből arra következtetünk, hogyha további kísérletek során érdemes lesz a szövetek mikroszerkezetét is fejleszteni, például PLA szálak elhelyezésével a sodronyon belül, melyek hő hatására megolvadnak, ezzel egyenletesebb területet biztosítva a mátrixnak.

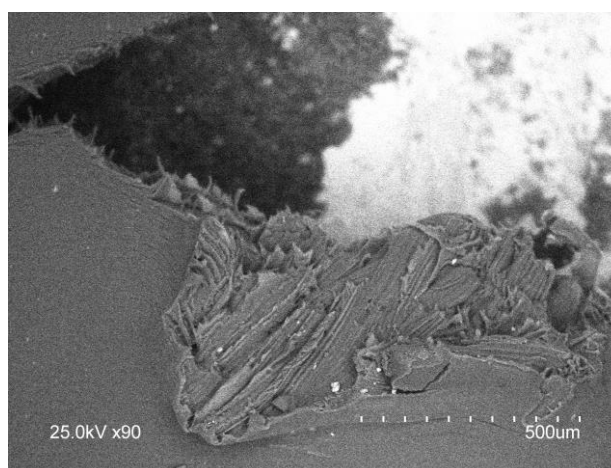
12.3.2.1 Nagy szilárdságú próbatest



76. kép: A próbatest roncsolt felészíne sztereomikroszkóp alatt

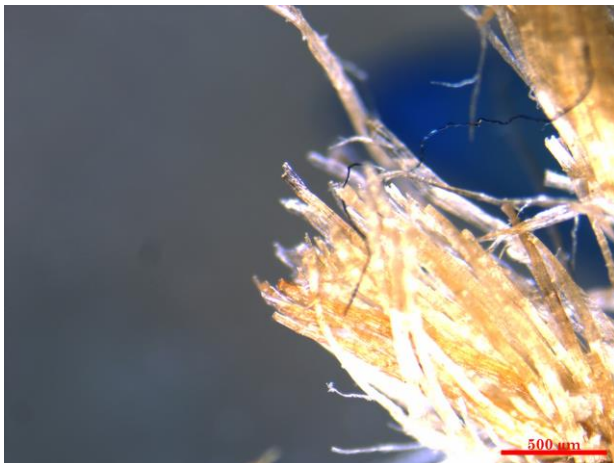


77. kép: SEM felvétel egy próbatest roncsolt felületéről.



78. kép: SEM felvétel a próbatest roncsolt felületéről pikkelyes leválással

12.3.2.2 Alacsony szilárdságú próbatest



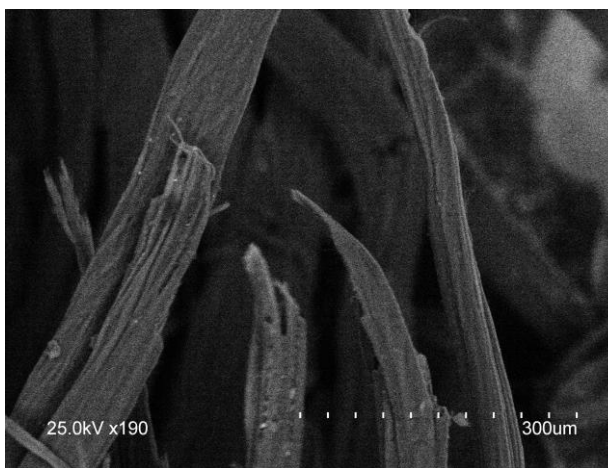
79. kép: Szálkihúzóds képe sztereomikroszkópos felvételen



80. kép: kihúzódt szálak sztereomikroszkópos képe



81. kép: Szálkihúzóds SEM felvételen



82. kép: Rostok roncsolt szakasza SEM felvételen