



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Polimertechnika Tanszék

Formula SAE versenyautó polimer kompozit akkumulátorház tervezése és gyártása TDK dolgozat

A dolgozat bemutatását a TÁMOP - 4.2.2.B-10/1--2010-0009 "Új
tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" című
program támogatta

Konzulens:

Kling Sándor
doktorandusz

Név: Gacsai Krisztián

Neptun kód: CD7550

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés.....	- 5 -
2.	Előzmények, irodalomkutatás	- 7 -
2.1.	A Formula Student versenysorozat rövid bemutatása.....	- 7 -
2.2.	BME FRT FSE	- 7 -
2.3.	A polimer kompozitok anyagtudománya	- 8 -
2.3.1.	Szálak erősítőanyagok	- 10 -
2.3.2.	A polimer kompozitok mátrix anyagai	- 16 -
2.3.3.	Polimer kompozit termékek gyártástechnológiái	- 19 -
2.4.	Kompozitok numerikus méretezése	- 21 -
2.5.	Felhasználási területek	- 23 -
3.	Felhasznált anyagok, mérési módszerek	- 29 -
3.1.	Felhasznált anyagok	- 29 -
3.2.	Próbatestek gyártása.....	- 29 -
3.3.	A húzási tulajdonságok meghatározása	- 30 -
3.4.	Rétegek közötti nyíró vizsgálatok	- 33 -
3.5.	Nyomási jellemzők meghatározása.....	- 34 -
3.6.	Négypontos hajlítás.....	- 36 -
4.	Mérések kiértékelése	- 38 -
4.1.	Húzó vizsgálat.....	- 38 -
4.2.	Rétegek közötti nyíró vizsgálat.....	- 40 -
4.3.	Nyomó vizsgálat.....	- 40 -
5.	Mérési eredmények összehasonlítása a VEM számításokkal.....	- 43 -
5.1.	Húzó vizsgálat.....	- 44 -
5.2.	Négypontos hajlító vizsgálat	- 48 -
6.	Termékkészítés	- 52 -
6.1.	Az akkumulátorházra vonatkozó Formula Student Szabályzat	- 52 -
6.2.	Az akkumulátorház formaterve.....	- 52 -
6.3.	Az akkumulátorház szilárdságtani modellezése.....	- 55 -
6.4.	Szerszámkészítés.....	- 61 -
6.5.	Az akkumulátorház gyártásának az ismertetése.....	- 62 -
6.6.	A termék alkalmazása FS versenyautóban.....	- 66 -
7.	Összefoglalás	- 67 -
8.	Német nyelvű összefoglaló.....	- 68 -

9.	Köszönetnyilvánítás	- 69 -
10.	Irodalomjegyzék	- 70 -

Jelölés- és rövidítésjegyzék

BME	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
EP	Epoxi
FEM	Final Element Method (Véges Elemes Módszer)
FRT	Formula Racing Team
F1	Forma 1
FS	Formula Student
G	Gélesedési idő
H	Teljes kikeményedési idő
LED	Light Emitting Diode
LiFePO ₄	Lítium Vas Foszfát
PE	Polietilén
PVC	Polyvinylchlorid
SAE	Society of Automotive Engineers
UD	Unidirekcionális
UHMWPE	Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene (Nagymolekulatömegű PE)
UP	Telítetlen poliészter
VDC	Volt Direct Current (Volt egyenáram)
VEM	Véges Elemes Módszer

1. Bevezetés

A polimer kompozit anyagok ipari mértékben történő felhasználása a 70-es 80-as évektől kezdve fokozatosan bővül. Az innovációnak a háttérében elsősorban az a tény áll, hogy a szálerősített struktúrák kitűnő sajátságokkal jellemezhetők. Kis sűrűségüknek köszönhetően elképesztően csekély tömegű szerkezetek hozhatók létre belőlük. Mindez úgy, hogy közben a szilárdsági, valamint a merevségi tulajdonságok kimagaslóan magas értékűek lesznek.

A szakdolgozatom témája a BME Formula Racing Team elektromos Formula Student versenyautó polimer kompozit akkumulátorházának a tervezését, valamint annak a gyártását ismerteti. Az előző évben épült, első elektromos versenyautó esetében ez az elem még könnyűfém-ből, alumíniumból készült. Idén tehát mindenképpen nagy kihívást jelentett, a kompozit technológia alkalmazása ezen a területen is. Különösen azért, mert a háznak a hivatalos verseny szabályzatban leírtak miatt, elektromosan teljesen szigetelni kellett, meggátolva így az esetlegesen előforduló baleseteket, emberi sérüléseket.

Villamos hajtású járműről lévén szó, az akkumulátorcelláknak illetve a teljes energiaellátó rendszernek kiemelt jelentősége van. Így érthető, hogy miért merülhetett fel az innováció területén elvárható igényként a csapat részéről is, ez a fontos fejlesztés.

Mielőtt neki álltam az akkumulátorház tervezésének, próbatesteken szabványos vizsgálatokat végeztem. A mérések kiértékelésével meghatároztam a felhasznált alapanyagok mechanikai anyagjellemzőit. Ezeket a sajátságokat felhasználva, elkészítettem a szabványos próbatesteket a szimulációs programban is, majd elvégeztem a véges elem analízisüket. Ezt követően összevettem a valós eredményeket a szoftverben vizsgáltakkal. A cél az volt, hogy hitelesítsem a méréseket. Összehasonlítottam a kapott anyagtulajdonságokat a valós és a számolt esetekben.

A 3D-s modell előállítás után véges elem módszerrel méreteztem szilárdságilag a szerkezetet. Kihasználva a kompozit szerkezetek azon hasznos tulajdonságait, hogy a mechanikajellemzők rendkívül széles határok között változtathatók.

A rétegrend meghatározást követően, negatív fémszerszámban készítettem egy prototípust, azért, hogy a végleges termék gyártása előtt a gyakorlatban is meggyőződjek a koncepció üzemképességéről.

Az akkumulátorház készítésekor gyártástechnológiaként a vákuumzsákos injektálást alkalmaztam, amivel magasabb száltartalmat és jobb felületi minőséget értem el. Erősítőszálnak szénszálat, mátrixanyagnak epoxi gyantát, maganyagnak PVC habot, elektromos szigetelő rétegnek pedig üvegszálat alkalmaztam a termék készítésekor.

2. Előzmények, irodalomkutatás

2.1. A Formula Student versenysorozat rövid bemutatása

A Formula Student az egyik legelismertebb nemzetközi konstruktóri versenysorozat, ahol diákokból, egyetemi és főiskolai hallgatókból álló egyesületek mérik össze tudásukat. A feladat együléses versenyautó építése. Emellett pedig maguknak kell megteremteni a projekt működéséhez szükséges anyagi háttérrel is.

A versenysorozat célja így tehát nem csupán a tökéletes versenyautó fejlesztése, hanem a jövő mérnökgenerációjában lakozó lehetőségek kiaknázása. A műszaki készségek mellett a csapattagok így bepillantást nyerhetnek olyan létfontosságú területekre is, mint a logisztika, a menedzsment illetve a csapatmunka.

A megmérettetések lehetőséget biztosítanak a hallgatóknak arra, hogy fejlesszék, majd bebizonyíthassák szakmai tudásukat, valamint elkötelezettségüket a mérnöki pálya iránt. A diákok prezentációkon keresztül ismertetik a bírakkal autójuk műszaki megoldásait, költségtervét valamint üzleti modelljét. Miután pedig az autók sikeresen megfelelnek a Formula Student által előírt szabályzatnak, a csapatok a pályán is megmérkőznek egymással.

A versenyautók menetdinamikai tulajdonságait négy versenyszámban hasonlítják össze. A statikus számok az összetett pontszám 40%-át, míg a dinamikus számok a 60%-át adják, így az igazán versenyképes eredmény eléréséhez mindkét területen kiegyensúlyozott teljesítményre van szükség [1].

Futamokat napjainkban már a világ minden táján rendeznek, többek között az Egyesült Államokban, Brazíliában, valamint a csendes-óceáni régióban is, a kontinensen belül pedig Németországban, az Egyesült Királyságban, sőt 2010-től hazánkban is.

2.2. BME FRT FSE

A 2009-es év kezdetén született meg egy elektromos autó építésének ötlete. Az új projekttel foglalkozó csoport az FRT Formula Student Electric névvel indult útjára, majd elkötelezett tevékenységgel a 2011-es idényre elkészült az első tisztán villamos hajtású versenyautója az egyetemnek. A 2012-es évben épült FRCE-02 nevű versenyautó az egy évvel azelőtti, a 2011-es robbanómotoros gépjármű alapjaira

támaszkodva, teljesen új villamos hajtáslánccal lett továbbfejlesztve. A csapat célja azonban nem titkoltan az, hogy az elektromos autó felvegye a versenyt benzines riválisaival úgy, hogy közben a lehető leginnovatívabb, környezetbarát energiaforrás táplálja [2].

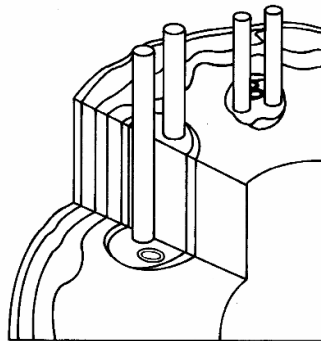


1. ábra: A 2012-es elektromos versenyautó

2.3. A polimer kompozitok anyagtudománya

A kompozit szerkezeti anyagok alkalmazásának az elterjedése nem a modernkor tudományának az eredménye. Valójában a természet egy sok millió éven át tartó fejlesztésének a következménye.

A szálalás már a növényekben is megjelent évmilliókkal ezelőtt. A virágok teherbíró részének, a szárnak a metszeti képén jól kivehető a szálalás tipikus struktúrája a 2. ábrán.



2. ábra: Szálalásos megoldása a természetnek [3]

Manapság a társított anyagstruktúrák a műszaki célú szerkezeti anyagok legdinamikusabban fejlődő családját képezik. Létrejöttük azzal indokolható, hogy az eszközök terhelése az előforduló esetek legnagyobb részében nem egyforma a tér minden irányában. Az igénybevétel pontosan meghatározható irányok mentén érvényesül. Ezekben a kitüntetett irányokban viszont jelentősen jobb mechanikai tulajdonságok szükségesek. A polimer mátrixú kompozit olyan anyag, amely két vagy több összetevőből épül fel, ezen alkotók pedig eltérő fizikai, kémiai mechanikai anyag-tulajdonságokkal rendelkeznek. Az összetevők pedig a következők:

- a kisebb szilárdságú, alacsony sűrűségű mátrixanyag
- a nagy rugalmassági modulusú, nagyobb szilárdsággal bíró erősítőanyag

A mátrixanyag, körülfogja a szálak erősítőanyagot, elosztva így a terhelést, amit főleg az erősítőszál vesz fel az igénybevétel alatt. A két anyag között pedig kitűnő adhéziós kapcsolat áll fent.

Egy tervező számára azonban elengedhetetlen, hogy pontosan ismerje valamennyi előnyét illetve hátrányát a felhasznált szerkezeti anyagoknak, hogy őket egymással összehasonlítva, az adott körülményekhez legjobban illőt megtalálja. Az előnyös tulajdonságokat a középpontba helyezve, a hátrányok hatását pedig a lehető legkisebb mértékűre csökkentve.

A szálerősített polimer kompozitok rengeteg előnyös tulajdonsággal rendelkeznek. Csak a legnagyobb jelentőséggel bíróakat emelve ki ezek közül említhetjük meg a következőket:

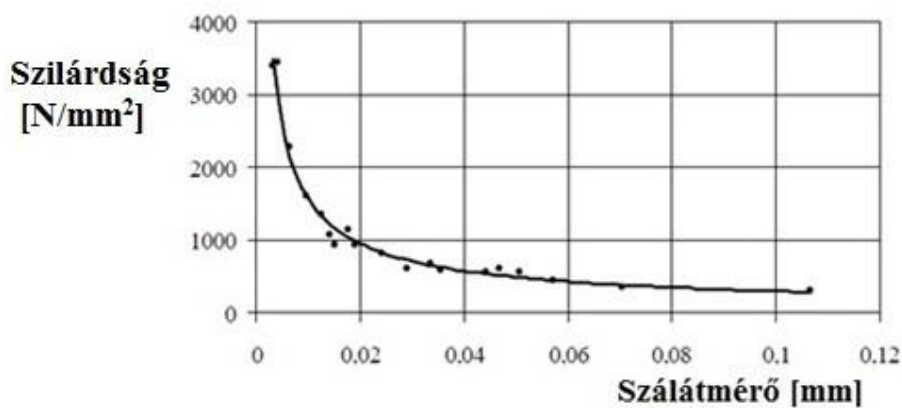
- magas szilárdság és merevség, mindemellett rendkívül kis sűrűség
- könnyű alakíthatóság
- magas korrózióállóság
- az elektromos tulajdonságok a tökéletes szigetelőtől a vezetőig változtathatóak
- jó hőszigetelő sajátosság
- kiváló energiaelnyelő képesség

A fémekkel összevetve viszont, hátrányként merülnek fel a jelenleg magas alapanyag költségek. Ez a tény pedig a jelenlegi gazdasági helyzetben, ahol központi teendő a kiadások csökkentése, jelentősen leszűkíti a lehetséges alkalmazási területeket [3].

2.3.1. Szálas erősítőanyagok

A komponens fő feladata a terhelés felvétele az alkatrészekben. Ennek az abszolválásához pedig elengedhetetlenek a magas szilárdsági illetve merevségi mutatók, amik a roppant erős atomi kötések eredményei. A tapasztalatok alapján viszont kijelenthető, hogy a legtöbb anyag erősítőszál formában jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, mint a kiindulási állapotában. A különböző erősítőszálak között viszont jelentősek az eltérések a mechanikai tulajdonságok terén, ami a központi jellemzők különbözőségéből adódik.

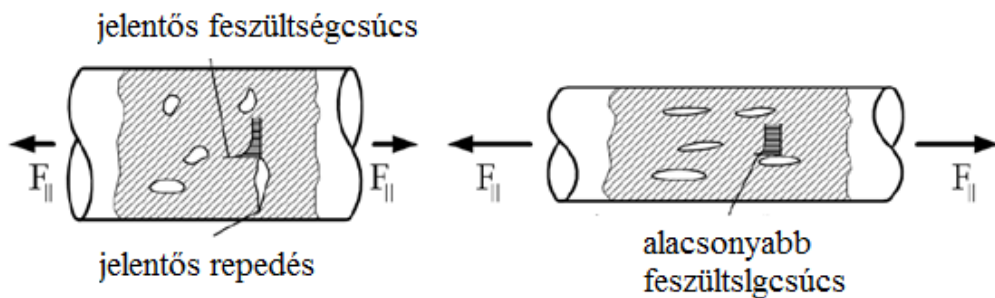
Ilyen kulcsfontosságú sajátság többek között a szálak átlagos átmérője is. Minél kisebb az erősítőszálak átlagos átmérője, annál magasabb értékű az anyag szilárdsága, amint a 3. ábráról leolvasható.



3. ábra: A szálátmérő a szilárdság függvényében [3]

A kis szálátmérő pedig magára a gyártási folyamatra is kedvezően hat, hiszen az alacsonyabb hajlító merevség következtében könnyebben formálhatóak a szálak, ami a kisebb rádiuszok esetében jelentősen meggyorsíthatja a munkát [3].

További meghatározó tulajdonság az erősítő szálakban található repedések irányultsága. Húzás hatására a szál hosszanti tengelyére merőleges résekben jelentős feszültségmaximum keletkezik, ami a széleken akár szakadáshoz is vezethet. Ezzel szemben a száliránnyal párhuzamos üregekben, ugyancsak húzó igénybevétel hatására ez a jelenség lényegesen ritkábban tapasztalható. Így ebben az esetben annak a veszélye is kisebb, hogy a szál elszakadjon a terhelés hatására. A jelenséget a 4. ábra szemlélteti.

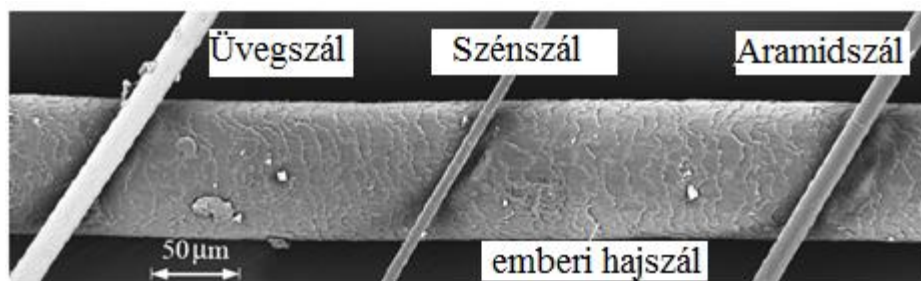


4. ábra: Az üregek irányultságának a hatása [3]

Az erősítőszálakat négy nagy kategóriába szokás felosztani. Ezek a csoportok a következők:

- természetes szálak, pl. szizál, emberi haj, selyem
- szerves erősítőszálak, pl. Polipropilén, Polietilén, Aramid, szén
- szervetlen erősítőszálak, pl. bazalt, üveg, kvarc
- fémszálak, pl. alumínium, réz, nikkel, acél

A jelenleg legnagyobb jelentőséggel rendelkező erősítőszálak mikroszkópi képét mutatja az 5. ábra.



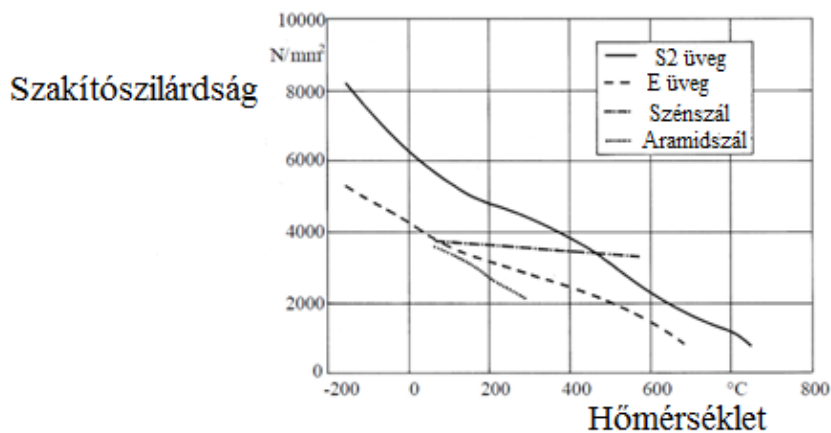
5. ábra: Nagy felbontási elektronmikroszkóp kép a különböző erősítőszálakról [3]

Üvegszál

Tulajdonképpen az első erősítőszál, amelyet mesterségesen állítottak elő. Ipari gyártása 1938-ban indult, az USA-ban. Az üveg egy szervetlen erősítőszál, ami magas szilárdságát a szilícium és az oxigén között kialakult, rendkívül erős kovalens kötéseknek köszönheti. Így tehát 2/3 részben szilícium-oxidokból, valamint további fémoxidokból épül fel. Egy speciális fonófejen áthúзва az üveg ömledéket történik az erősítőszál előállítása. Az így kapott elemi szálak átlagos átmérője 8-17μm közötti érték. Ezt követően pedig még felületkezelés szükséges. Az írezés után ellenállóbbá

válk a feldolgozás közben fellépő eseteges károsodásokkal szemben az erősítőszál. Valamint epoxi vegyületek, vinilszilánok felvitelével az üvegszál és a polimer mátrix közötti kapcsolat erősödik, melynek háttérében az új elsődleges kötések kialakulása húzódik meg [3].

Az üvegszál a maximális szilárdságát $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on éri el. Ezen a hőmérsékleten a szilárdság lényegesen magasabb a szobahőmérsékleten mérhető értéknél, amely a 6. ábráról leolvasható. Ezért előszeretettel alkalmazzák az alacsony hőmérsékletnek kitett alkatrészek esetén is az üveget [3].



6. ábra: A hőmérséklet növekedés hatása a szakítószilárdságra 24h-s tárolás elteltével [3]

Az üvegszál jelenleg a legnagyobb mennyiségben felhasznált erősítőszál, pozitív valamint negatív tulajdonságai a következők:

Előnyei:

- alacsony ár, összevetve az egyéb erősítőszálakkal
- magas szakadási nyúlás
- kitűnő elektromos valamint hőszigetelő képesség
- nem ég könnyen
- alacsony nedvszívó képesség

Hátrányai:

- alacsony rugalmassági modulus
- relatíve nagy sűrűség, ebből kifolyólag pedig nagyobb tömeg

Szénszál

A jelenleg rendelkezésre álló erősítőszálak közül a szénszál rendelkezik a legkimagaslóbb tulajdonságokkal. A viszonylag alacsony rugalmassági modulusának köszönhetően, az üvegszál nem nyújtott bizonyos alkatrészek számára kellő nagy merevséget. Ezért indult a kutatás egyéb lehetőségek után is. A keresett anyagoknak egyrészt alacsony sűrűséget kellett felmutatniuk, a lehető legkisebb tömeg elérése érdekében. Ezt az elvárást pedig a periódusos rendszer első két sorában található elemek elégítették ki, mint pl. a Bór, a Szilícium vagy a Szén. Fontos az atomok közötti erős kapcsolat, a magas szilárdsági illetve merevségi mutatók teljesítéséhez. Kezdetben a bórszál alkalmazása volt a legelterjedtebb a polimer kompozit ipar számára. Csakugyan figyelemfelkeltő merevséggel valamint szilárdsággal bírt, viszont feldolgozása, a meglehetősen vastag akár 50 μ m-es szálátmérő miatt igen nehézkesnek bizonyult. Ezért a karbon, a rá jellemző 5-10 μ m-es erősítőszálátmérővel valamint az ugyancsak kimagasló tulajdonságaival szinte egyeduralkodóvá vált az iparban.

A prekursor, a szénszálgyártás előterméke akár több, különböző fajtájú polimer szálból is összetevődhet. Elvárás az előtermékkel szemben, hogy az elszenesítés, azaz a karbonizálás valamint a grafitosítás közben ne olvadjon meg, illetve a folyamat végén a kívánt struktúra jöjjön létre [3].

A szénszál erősítés használatának az előnyei:

- rendkívül könnyű, az alacsony sűrűségének köszönhetően
- magas rugalmassági modulus
- saválló
- kimagasló szilárdsági értékek
- a röntgensugárzással szemben áteresztő, amit főleg az orvostudomány használ ki
- alacsony hő tágulási együttható
- jó hővezető képesség

Hátrányai:

- jelentős alapanyag költség
- merev

Aramidszál

A 70-es években a piaci bevezetésekor, az aramidszál volt az első nagyteljesítményű polimer alapú erősítőszál, mellyel szemben már akkor, hatalmas elvárásokat

támasztottak. A kereskedelmi elnevezésekben Kevlar, Twaron illetve Technora néven ismert aromás poliamid szálak folyékony kristályos oldatból fonódtak, melyek később nagy hőmérsékletű orientáció, azaz nyújtás során nyerték el végleges szilárdságukat. Az előállítási folyamat pedig egy úgynevezett, Avivage védőréteg felvitelével zárult le. Ennek a speciális bevonatnak köszönhetően érhető el később ugyanis a maximális tapadás az epoxigyanta illetve az erősítőszál között [3].

Az aramidszál erősítés alkalmazásának az előnyei:

- a szénszálnál is kisebb sűrűség
- különböző merevségben is beszerezhető
- rendkívüli szívósság, ütésállóság
- kimagasló dinamikai tulajdonságok
- lángállóság

Hátrányai:

- alacsony nyomószilárdsági értékek
- jelentős nedvességfelszívó képesség
- UV érzékeny
- tartós terhelés esetén kúszás tapasztalható
- a szívósság miatt speciális ollók szükségesek a feldolgozáshoz

Egyéb erősítőszálak

A nagy molekulatömegű, úgynevezett UHMWPE (Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene) oldatból nagyfokú szálképzés után, igen kis sűrűségű, tehát könnyű polietilén szálakat lehet készíteni. A legismertebb márkanevek közé a Spectra illetve a Dyneema tartozik [4].

Felhasználásnak az előnyei:

- rendkívül alacsony sűrűség
- magas szívósság
- kopásálló

Hátrányai:

- alacsony nyomószilárdság
- kis szilárdság
- jelentős kúszás

Egy további lehetséges alternatíva, melynek a jelentősége az elkövetkező években rohamosan növekedni fog, a természetes szálak használata. Ugyanis ezeket az erősítőszálakat megújuló energiaforrásokból állítják elő a kompozit ipar számára. A választék már jelenleg is rendkívül széles. Manapság a legjelentősebb érdeklődés a növényi eredetű szálakat veszi körül, amelyek nagy mennyiségben alacsony, versenyképes áron is elérhetőek [3].

A növényi szálak alkalmazásának az előnyei:

- alacsony sűrűség a többnyire üreges szálak miatt
- meglehetősen jó hangszigetelő képesség
- alacsony előállítási költségek
- érintésük nem okoz bőrirritációt

Hátrányai:

- a magas feldolgozási hőmérséklet hatására csökken a szilárdsága a szálaknak
- könnyen ég
- jelentős nedvszívó képesség

A különböző erősítőszálak legfontosabb mechanikai tulajdonságait szemlélteti a 7. ábra.

Szál típus	Sűrűség	Szakító szilárdság	Rugalmassági modulusz	Szakadási nyúlás
	ρ [g/cm ³]	σ [GPa]	E [GPa]	ε [%]
Üvegszál	2,5-2,8	3,2-4,6	70-85	1,8-5,7
Szénszál	1,7-2	2-7	200-700	0,5-1,5
Aramidyszál	1,44	2,8-3,8	60-130	2,2-4
Polietilén szál (Spectra)	0,97	2,3-3,6	73-120	2,8-3,9
Acélhuzal	7,6	4	240	1,4

7. ábra: A különböző erősítőszálak mechanikai tulajdonságai [5]

2.3.2. A polimer kompozitok mátrix anyagai

A mátrix anyagok feladatai a szálerősített struktúrákban a következők:

- az erősítőszálak irányultságának a rögzítése a kívánt geometriai helyzetbe
- a szál hosszanti tengelyétől eltérő hatásvonalú terhelések felvétele
- a szálak védelme az összenyomódástól illetve az egyéb külső környezeti behatásoktól
- az egyes rétegek összekapcsolása majd ezáltal a fellépő erők továbbítása az egyik rétegről a másikra

Azonban a mátrix anyag lényegében a leggyengébb láncszeme a polimer kompozit szerkezeteknek. Jelentősen befolyásolja a végleges rendszernek a következő tulajdonságait:

- sűrűség
- merevség
- szilárdság
- hővezető képesség
- égési tulajdonság

Ezért rendkívül fontos a megfelelő mátrix anyagnak a kiválasztása. A polimer mátrixok három nagy csoportra oszthatóak:

- hőre keményedők
- hőre lágyulók
- elasztomerek

A legrégebbi, valamint a legelterjedtebb csoportot a hőre keményedők alkotják. A folyékony halmazállapotból térhálós struktúrájú szilárd halmazállapotba történő átalakulás után azonban többé már nem olvashatók vissza. Az iparban, a nagyteljesítményű polimer kompozitok előállításához jelenleg a két leggyakrabban előforduló hőre keményedő típus, a telítetlen poliészter gyanta valamint az epoxi gyanta [3].

Felhasználásuknak az előnyei:

- magas rugalmassági modulus
- hőmérséklet emelkedés hatására növekszik a merevség
- a szobahőmérsékleten történő feldolgozás során folyékony halmazállapot
- viszonylag alacsony árfekvés

Hátrányai:

- az ipari mértékben történő újrahasznosítás még nem megoldott
- nem hegeszthető

A hőre lágyuló polimerek (pl. polipropilén, poliamid, polikarbonát) feldolgozása a következő lépésekből épül fel:

- olvasztás
- alakadás
- hűtés

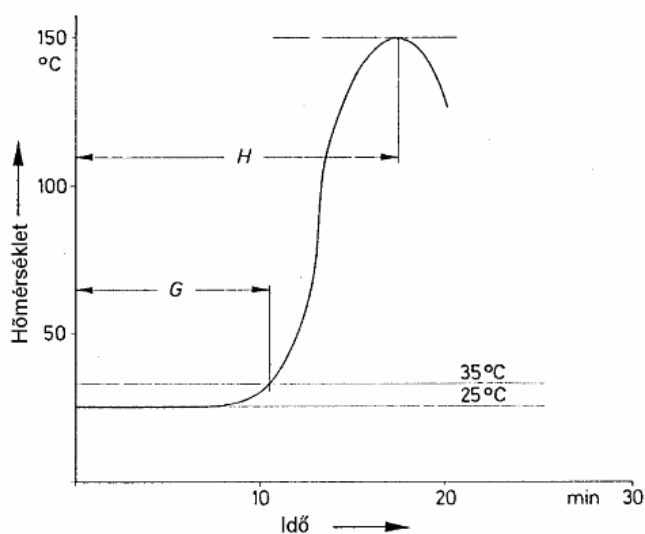
A felsorolt eljárások reverzibilisek, így a folyamat végén nem alakul ki a térhálós szerkezet. Az esetek többségében rövid szálakhoz alkalmazzák a hőre lágyuló mátrixanyagokat. Feldolgozásuk extrúzióval vagy fröccsöntéssel valósul meg. A hőre keményedőkkel ellentétben hegeszthetőek és a megolvasztásukkal az újrahasznosításuk is költségtakarékosan megvalósítható.

Az elastomerek esetében a különbséget a hőre keményedőkkel szemben az jelenti, hogy a molekulaláncok között nem alakul ki a kellően erős kapcsolat. Ennek következtében pedig magasabb hőmérsékleten gyakran deformálható a szerkezet. Az elastomerek sem hegeszthetőek a hőre keményedőkhöz hasonlóan.

Poliészter

A telítetlen poliészter a polimer kompozit iparban, a legnagyobb mennyiségben, a legáltalánosabban használt gyantatípus. Az alapjait a térhálós poliészter előállításának Staudinger valamint Heuer dolgozta ki, 1934-ben. 1939-ben pedig már elindult az USA-ban az ipari mennyiségben történő gyártása is. A telítetlen megnevezés azt fejezi ki, hogy a kétértékű karbonsavak szén-szén kettős kötést, úgynevezett telítetlen kötést tartalmaznak. A poliészter gyanta termelése polikondenzációval valósul meg, kétértékű telítetlen valamint telített karbonsavból és kétértékű alkoholból. A kiindulási állapotában nagy viszkozitású poliészter gyantát a felhasználás előtt feloldják, egy sztirol nevű szerves oldószer hozzáadásával. A sztirol tehát egyrészt a viszkozitást redukálja, másrészt pedig elősegíti a poliészter láncok közötti kettős kötések kialakulását melléktermék keletkezése nélkül. Az UP (telítetlen poliésztergyanta) annál reakcióképesebb, minél több polimerizálható kettős kötést tartalmaz. Ennél fogva a reakcióképesség fokozásával növekszik a gyanta rugalmassági modulusa, a keménysége, a ridegsége valamint a kémiai ellenálló képessége [3].

A poliésztergyanták tárolása csak korlátozott ideig lehetséges, ugyanis némi idő elteltével magától beindul a kémia reakció, gélesedni kezd az oldat. Azonban ez az időtartam szobahőmérsékleten nem várható ki, ezért a gyanta alkalmazásakor hozzá gyorsítót és katalizátort adnak. Az iniciátor bekeverése után a térhálósodáshoz vezető polimerizációs láncreakció kisvártatva, a G: gélesedési idő leteltével beindul. A folyamat alatt egy exoterm, hő képződéssel járó reakció játszódik le. A H: teljes kikeményedési idő mindössze pár percet vesz igénybe. A folyamat alatt az idő függvényében a hőmérséklet alakulását a 8. ábra mutatja.



8. ábra: Az UP térhálósodásának exoterm hő effektusa [5]

A poliésztergyanta alkalmazásának előnyei:

- kedvező ár, összevetve az egyéb gyantatípusokkal
- jó kémiai ellenálló képesség
- csekély vízfelvétel
- széles típusválaszték

A poliésztergyanta alkalmazásának hátrányai:

- kevésbé jó mechanikai tulajdonságok
- jelentősebb zsugorodás

Epoxygyanta

Az epoxygyanta rendelkezik a jelenleg forgalomban levő gyanták közül messze a legjobb mechanikai tulajdonságokkal és a környezeti hatásokkal szembeni ellenálló képességekkel. Ezért a nagyigénybevételnek kitett kompozit alkatrészekhez a legelterjedtebb ennek a gyantatípusnak az alkalmazása [4].

Az epoxygyanta alkalmazásának előnyei:

- kismértékű zsugorodás
- kiváló tapadás
- jó elektromos szigetelő képesség
- hasznosítható ragasztóként is
- kis viszkozitás, szobahőmérsékleten is könnyen kitölti a rendelkezésre álló teret

Az epoxygyanta alkalmazásának hátrányai:

- drága
- hosszabb ideig tartó térhálósodás, összevetve a telítetlen poliészterrel

2.3.3. Polimer kompozit termékek gyártástechnológiai

A réteges felépítés következtében a kompozit termék merevségét illetve szilárdságát úgy tökéletesíthetjük, hogy a legkimagaslóbb tulajdonságokat az igénybevétel erővonalai mentén érjük el

A tervezési feladat fő lépései a következők:

- a fő terhelési irányok meghatározása
- a rétegek méretezése
- a rétegrend megvalósítása
- egyéb gyárthatósági tényezők, mint a szériaszám és a költségek megállapítása

A konstrukciós feladat fő lépéseinek a meghatározása után következhet a gyártástechnológia kiválasztása. Kompozit gyártmányok előállítására rendkívül sok technológia áll rendelkezésre, a legfontosabbak előnyös és hátrányos tulajdonságai a következők [6].

Eljárás	Előny	Hátrány
Kézi laminálás	- gyakran alkalmazott - viszonylag egyszerű - alacsony költségek - széles alapanyag választék	- szakképzett dolgozót igényel - jelentős sztirol emisszió - kis, közepes széria
Szórás	- elterjedt eljárás - alacsony szerszámköltség - nagyméretű termékek készíthetők költséghatékonyan	- a laminátok magas gyantatartalom esetén túlsúlyosak lehetnek - jelentős sztirol emisszió - utóhengerlés szükséges a buborékok eltávolítására
Sajtolás	- nagy sorozatoknál alkalmazott eljárás - fűthető fém szerszám - rövid ciklusidő - előgyártmányokat használ (prepreg, premix)	- magas szerszám és berendezés költség
Tekercselés	- gazdaságos, gyors technológia - szabályozóhengerek segítségével a gyantatartalom korrigálható - a tekercselési szög az igénybevételnek megfelelően előre számítható	- csak domború elemek gyárthatók - a termék felülete utólagos megmunkálást igényel
Pultrúzió	- gyors, gazdaságos - pontosan előre beállítható száltartalom - jó mechanikai tulajdonságok, magas száltartalmú termékek készíthetők - alacsony sztirol emisszió	- csak állandó vagy közel állandó keresztmetszetű termékek készíthetők - magas berendezés költség
Injektálás	- magas száltartalom, jó mechanikai tulajdonságok - alacsony sztirol emisszió - kiváló felületi minőségű termék	- csak alacsony viszkozitású, speciális injektáló gyanta alkalmazható - magas szakképzettséget igényel - bonyolult szerszámgeometria esetén átimpregnátlan területek

1. táblázat: Gyártástechnológiák pozitív, negatív tulajdonságai

2.4. Kompozitok numerikus méretezése

Ahhoz, hogy egy kompozit terméknek meghatározhassuk a mechanikai tulajdonságait vagy akár a tönkremenetelének a várható helyét, tisztában kell lennünk az erősítőszál és a mátrix anyag tulajdonságaival [7].

A szál és a mátrix relatív mennyiségének a kiszámítását a következő képletek segítségével valósíthatjuk meg:

$$v_f = \frac{V_f}{V_k} \text{ és } v_m = \frac{V_m}{V_k}, \quad (2.1)$$

ahol v_f a szálhányad, v_m a mátrixhányad, V_f a száltérfogat, V_m a mátrixtérfogat és V_k a kompozit térfogata. Mindig teljesül, hogy $v_f + v_m = 1$.

A kompozit lemez hosszirányú rugalmassági modulusa meghatározható a keverékszabállyal:

$$E_1 = v_f E_f + (1-v_f) E_m, \quad (2.2)$$

ahol E_1 a kompozit lemez hosszirányú rugalmassági modulusa, E_f az erősítőszál rugalmassági modulusa és E_m a mátrixanyag rugalmassági modulusa. A fordított keverékszabály alkalmazásával pedig számítható a lemez szálakra merőleges irányú rugalmassági modulusa:

$$\frac{1}{E_2} = v_f \frac{1}{E_f} + (1-v_f) \frac{1}{E_m}, \quad (2.3)$$

ahol E_2 a lemez szálirányra merőleges rugalmassági modulusa. A lemez Poisson tényezője és a sűrűsége is meghatározható a keverékszabály alkalmazásával:

$$\nu_{12} = v_f \nu_f + (1-v_f) \nu_m \text{ és } \rho_k = \rho_f v_f + \rho_m (1-v_f), \quad (2.4)$$

ahol ν_{12} a kompozit lemez Poisson tényezője, míg ν_f a szál, ν_m pedig a mátrix Poisson tényezője és ρ_k a kompozit lemez sűrűsége, ρ_f a szál sűrűsége, ρ_m a mátrix sűrűsége. A lemez nyírórugalmassági modulusa a fordított keverékszabály felhasználásával:

$$\frac{1}{G_{12}} = v_f \frac{1}{G_f} + (1-v_f) \frac{1}{G_m}, \quad (2.5)$$

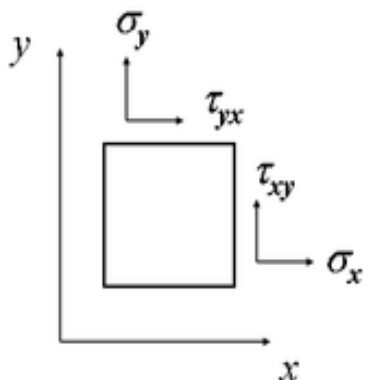
ahol G_{12} a kompozit lemez nyírórugalmassági modulusa, G_f a szál nyíró rugalmassági modulusa, G_m a mátrix nyíró rugalmassági modulusa és

$$G_f = \frac{E_f}{2(1+\nu_f)} \text{ és } G_m = \frac{E_m}{2(1+\nu_m)}. \quad (2.6)$$

Síkbeli feszültségi állapotban, ahol $\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$, teljesül, hogy

$$[Q] = [S]^{-1} \quad (2.7)$$

ahol a $[Q]$ a merevségi mátrix, az $[S]$ a rugalmassági mátrix. A síkbeli feszültségi állapotot mutatja a 9. ábra.



9. ábra: A síkbeli feszültségi állapot szemléltetése

A kompozit lemez húzómerevségi mátrixa a következő képlet alapján számolható:

$$[A_{ij}] = \sum_{k=1}^n (z_k - z_{k-1}) [\bar{Q}_{ij}]_k \quad (2.8)$$

ahol $[A_{ij}]$ a lemez húzómerevségi mátrixa. A lemez hajlékonysági mátrixa pedig az inverze a húzómerevségi mátrixnak.

$$[a] = [A]^{-1} \quad (2.9)$$

ahol $[a]$ a lemez hajlékonysági mátrixa. A kompozit lemezben ébredő feszültségek meghatározhatók, ha ismerjük a lemez nyúlásait:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

ahol ϵ_x^0 az x irányú, ϵ_y^0 az y irányú megnyúlása a lemeznek. Ezt felhasználva, a feszültségek már számíthatóak a következő képlet alkalmazásával:

$$\underline{\sigma} = [\bar{Q}] \underline{\epsilon} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

ahol $\underline{\sigma}$ a feszültség vektor. A kompozit lemez hajlítómerevségi mátrixa:

$$[D_{ij}] = \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_{ij}]_k \frac{(z_k^3 - z_{k-1}^3)}{3} \quad (2.12)$$

ahol $[D_{ij}]$ a lemez hajlítómerevségi mátrixa [8].

2.5. Felhasználási területek

Az 1960-as évektől folyamatosan növekszik azoknak az iparágaknak a száma, ahova már betörték a szálerősített rendszerek. Maguk az elvárások viszont sohasem egyeztek meg pontosan a különböző ágazatokban, így a polimer kompozitok fejlődése is eltérő ütemben zajlott.

A legdinamikusabb innovációval a légi- valamint az űrrepülés rendelkezik. Az ötlet, hogy egy repülőgép társított rendszerű anyagokat tartalmazzon már majdnem egy évszázada megszületett. Az első világháború alatt, 1916 májusában benyújtotta szabadalmát Robert Kemp (USA). Mátrixanyagként fenol gyantát, erősítőszálnak pedig azbesztet valamint farostokat ajánlott. Pontos terveket is készített a szárnyak valamint a propellerek struktúrájáról, az egyes alkatrészek gyártástechnológiáját pedig alakadó formákban, külső nyomás segítségével képzelte el. Összességében pedig hosszabb élettartamot ígért a hagyományos megoldásokhoz képest. Csupán egyetlen negatívumot hozott fel az ötletével szemben, ugyanazt, ami majd 100 évvel később is hátráltatja a technológia elterjedését: a jelentős költségeket [3].

Az első kompozit repülőgép, amely repült is, Nägele és Eppler nevéhez fűződik 1957 novemberéből, a Phönix, amely a 10. ábrán látható. Melynek a tömege az alkalmazott technológiának köszönhetően alacsony, a merevsége viszont ettől függetlenül mégis nagy maradt. Mindezek mellett pedig kiváló korrózióállóság és könnyű karbantarthatóság jellemzi.



10. ábra: Az fs-24 Phönix (1957)

A katonai repülőgépek valamint a hadászati helikopterek mindig is a húzóágazatát képviselték a repülőgép iparnak. Az 1960-as, 70-es években a fő erősítőszálként a rendkívül merev bór szálak elterjedése jelentette a fő fejlesztést.

Később ezt az anyagot kiváltotta a műszakilag hasonló tulajdonságokkal rendelkező, ellenben a költségek terén jóval kedvezőbb szénszál.

A légi- valamint az űrrepülés esetében a polimer kompozit elemek alkalmazásának az elterjedése egyértelműen a súlycsökkentésnek tudható be. Kezdetekben főleg csak burkoló elemként kerültek felhasználásra ezek az anyagok, a technológia rohamos fejlődésével viszont idővel a mechanikai terheléseknek kitett szerkezetek egy része is gyárthatóvá vált társított szerkezetű rendszerekből [3].

Egy másik jelentős felhasználási területe a szálerősített anyagoknak a hajóipar. Nem kevesebb, mint 70%-a a yachtoknak valamint a sportmotorcsónakoknak ezekből az anyagokból épült. A kitűnő korrózióállóság vagy a könnyű formaadás mind annak a folyamatnak a felgyorsítója, hogy a tradicionális fa nyersanyagok használata mára már elavult technológiának számítson. Ennek az építési módnak köszönhetően egyrészt alacsonyabbra süllyeszthető a vízi járműveknek a súlypontja, ami által jelentősen növekszik a stabilitás, másrészt a keletkezett súlycsökkenés miatt növekszik a járművek elérhető csúcssebessége is.



11. ábra: Kompozit motorcsónak

További tekintélyes alkalmazási területe a polimer kompozitoknak a sporteszközök világa. Korábban ezek a konstrukciók többnyire mind fából készültek, kihasználva annak az előnyös mechanikai tulajdonságait. Mára viszont ezeket az eszközöket mind az új anyagcsoportból gyártják. A magasabb szilárdsági valamint merevségi értékek mellett, kiemelendő pozitívum, hogy ezek a kompozit anyagok jelentősen kevesebb karbantartást igényelnek a fához képest.

Az utóbbi évtizedekben pedig óriási fejlesztési verseny indult az autóiparban is. Mint az már megszokott, számos egyéb technikai újdonsághoz hasonlóan ez az innováció is először a motorsportban jelent meg.

Az elején, hasonlóan a repülőgépgyártásban korábban már leírtakhoz, ezen a területen is inkább a fém, burkoló elemeket helyettesítettek a különböző kompozit anyagokkal, amelynek hátterében természetesen a lehető legjelentősebb súlycsökkentés produkálása állt. Motorháztetőket, pótkeréktartók fedelét, lengőkarokat, aerodinamikai elemeket, sebességváltó házakat cseréltek ki a kis sűrűségű polimerekre.



12. ábra: Kompozit sebességváltóház és hátsó futómű

A legszámottevőbb előrelépések egyértelműen a Forma 1 világából származnak. Kiemelendő, az önhordó, szénszálas kompozit karosszéria, az úgynevezett monocoque megtervezése, majd annak a megvalósítása a gyakorlatban is.

Az 1960-as 70-es években az együléses versenyautók pilótafülkéjét könnyűfémekből, alumíniumból építették. Úttörőnek számított a Lotus csapat, amely elsőként mutatta be az alumínium önhordó karosszériát 1962-ben.

Az angol McLaren F1-es csapat nevéhez fűződik ennek a rendszernek a tovább fejlesztése, az első polimer kompozit monocoque-nak a megvalósítása a motorsport királykategóriájában [9]. 1981.03.06-án Silverstone-ban a John Barnard által tervezett McLaren MP4/1 kódjelű autó ezen a napon mutatkozott be. Az MP4/1-es a 13. ábrán látható [10].



13. ábra: McLaren MP4/1

Erősítőszálként Prepreg-et, főleg szénszálat illetve aramidot alkalmaztak. A térhálósítás magas hőmérsékletű, a légkörinél nagyobb belsőnyomású kemencében, úgynevezett autóklávban zajlott le, a felesleges gyantát elvezetve, ezáltal a szerkezet szilárdságát tovább növelve, a tömeget pedig csökkentve.



14. ábra: A kompozit technológia csúcsa

Tanulva a múlt hibáiból, hála a szigorú versenyszabályzatoknak, illetve a rendszeres ellenőrzéseknek az autósportban ma a legfontosabb helyen, a pilóta biztonsága szerepel.

Az előírt biztonsági intézkedéseknek a betartása viszont rendkívül magas technológiai színvonalat követel meg a csapatoktól. Az orrkúp törésteztje látható a 15. ábrán.



15. ábra: Frontális ütközési teszt

Ennek köszönhetően pedig, azok a balesetek, amelyek 20 évvel ezelőtt még egészen biztosan végzetesek lettek volna a versenyző számára, mára nagy valószínűséggel túlélhetőek.



16. ábra: Kubica félelmetes ütközése, Montreal, 2007

A McLaren istálló elsőként mutatta be a Forma 1-ben az önhordó, kompozit utas cellát. Azt, hogy vállalat majd három évtizeddel később is kiemelkedő szakmai tudással illetve technológiai fejlettséggel rendelkezik a polimer kompozitok alkalmazása terén,

mi sem bizonyítja jobban, mint az egyik legújabb sportautója, a McLaren MP4-12C, amely a 17. ábrán látható.



17. ábra: Az MP4-12C monocoque utascellája

Látható, hogy a motorsport mellett mára már az utcai sportautók világába is betörték a méregdrága, nagy energiaelnyelő képességű kompozit elemek. Azonban ez a terjeszkedés, még mindig csak a jéghegy csúcsát érinti. Hiszen ezek többnyire csak prototípusok illetve kis darabszámban gyártott termékek, amik eltörpülnek az autóipar gyáróriásai által évente előállított gépjárművek számához képest. Belátható, hogy az autóiparban csak akkor fogják tudni komolyan felvenni a versenyt a különböző könnyűfémekkel szemben a szálerősített struktúrák, amikor sikerül a költségüket egészen annyira lefaragni, hogy az a nagyközönség számára már elérhetővé, megfizethetővé váljon.



18. ábra: Cockpit a 2012-es FRT autóban

3. Felhasznált anyagok, mérési módszerek

3.1. Felhasznált anyagok

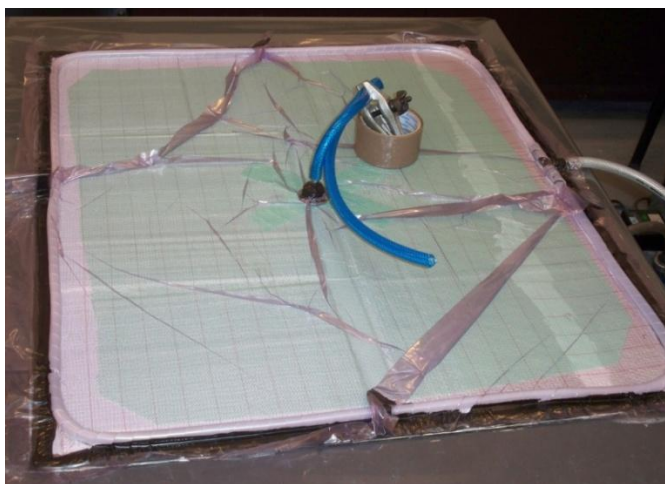
A konstruktőrnek nélkülözhetetlen a felhasznált alapanyagok anyagtulajdonságainak a pontos ismerete, mielőtt hozzálátna a termék tervezési fázisához. Ezeket az anyagjellemzőket meghatározhatjuk a szabványok által előírt mérésekkel illetve véges elem analízissel. Így a szabványos próbatestek nyersanyagaként ugyanazokat az alapanyagokat alkalmaztam, amiket később az akkumulátorház készítése során is használtam. A felhasznált anyagok a 2. táblázatban láthatók.

Erősítőszál				Mátrix
Forgalmazó	Típus	Szerkezet	[g/m ²]	Típus
Zoltek Hungary	PANEX 35	Unidirekcionális (UD)	182	SR 8100 Epoxi
Alvin-Plast Kft.	3K	Szövet	200	

2. táblázat: A felhasznált anyagok

3.2. Próbatestek gyártása

Gyártástechnológiaként a vákuumzsákos injektálást alkalmaztam a laminátok készítésekor. A termékeket 80⁰C-on, 6 óra hosszanutótérhálósítottam a Heraeus UT20 levegő cirkulációs szárítószekrényben. A tabok rögzítését a Sikadur 330 típusú kétkomponensű ragasztóval valósítottam meg, melynek a kötési ideje 35 ⁰C hőmérsékeleten 6 óra. A ragasztó A és B komponensét 4:1 arányban kevertem össze. A próbatestek injektálása a 19. ábrán látható.



19. ábra: Az injektálás elrendezése

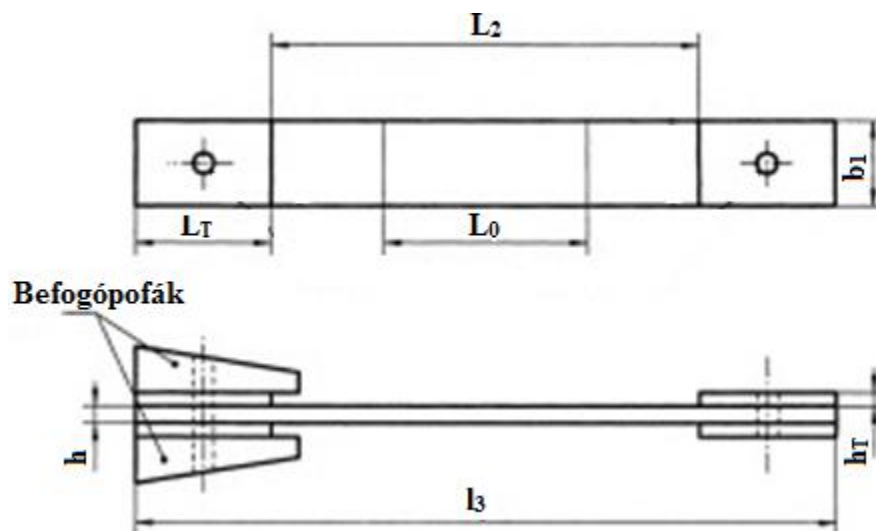
3.3. A húzási tulajdonságok meghatározása

A húzó vizsgálatokat az MSZ EN ISO 527 szabvány alapján végeztem. Az eljárás során a próbatestet a hosszirányú főtengelye mentén állandó, 2 mm/min vizsgálati sebességgel addig húzzuk, amíg a próbatest eltörik, vagy a feszültség illetve a hosszváltozás elér egy korábban meghatározott értéket. Vizsgáljuk a próbatestre ható erőt és az elmozdulást. Ahhoz, hogy a mérés hiteles eredményt szolgáltatson, legalább öt, a szabvány által meghatározott geometriájú, próbatestet kell vizsgálni mindegyik irányban és vizsgált tulajdonságra. A vizsgálatokat video extenzométer használatával végeztem, amellyel lehetőségem volt a hossz és a keresztirányú alakváltozásokat is pontosan jegyezni. A berendezés a 20. ábrán látható.



20. ábra: A video extenzométer

A 21. ábrán a húzó próbatest vázlata látható, az 3. táblázatban pedig ismertetem a próbatest típusok főbb befoglaló méreteit [11].



21. ábra: A húzó próbatestek szabványos vázlata, forrás: [11]

Jelölés	Megnevezés	Hosszirányú [mm]	Keresztirányú [mm]
L_3	próbatest hossz	250	250
L_2	tabok közötti távolság	150	150
b_1	szélesség	15	25
h	vastagság	1	2
L_0	felmérendő távolság nyúlásmérő használat esetén	50	50
L_T	tab hossz	>50	>50
h_T	tab vastagság	0.5-2	0.5-2

3. táblázat: A húzó próbatestek szabványos befoglaló méretei

A húzó vizsgálatokat különböző rétegrendű próbatest típuson végeztem. Az első esetben 3 rétegű laminátokat alkalmaztam ahol az erősítőszál orientációja hosszirányú. Ezt a típust a továbbiakban így fogom jelölni: (0₃). A második alkalommal keresztirányú próbatesteket használtam, melyek 6 rétegből készültek. A rétegrend a második esetben (90₆). A harmadik típust 3 réteg szövetből gyártottam. Emellett készítettem (0/30₂/90) és (0/60₂/90) rétegrendű mintákat is.

A méréseket a Zwick Z050 típusú univerzális szakítógépen végeztem. Az elemzés alatt a berendezés a hosszanti és a keresztirányú alakváltozásokat valamint a szakítóerőt jegyezte. A szabvány alapján a szakítószilárdságot a következő képlet felhasználásával határoztam meg:

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A} \quad (3.1)$$

ahol σ_t a szakítószilárdság, az F_{max} a szakítási erő, A a keresztmetszet felülete. A rugalmassági modulus megállapításához az alábbi képletet alkalmaztam:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.2)$$

ahol σ_2 és σ_1 a görbe egy tetszőleges szakaszán a végponthoz tartozó F_2 és a kezdőponthoz tartozó F_1 erőkből származó feszültségek. ε_2 és ε_1 a görbe ugyanennek a szakaszának a végponthoz és a kezdőponthoz tartozó hosszanti elmozdulásához tartozó nyúlások.

A nyúlások meghatározását a következő összefüggésekből végeztem:

$$\varepsilon_{hosszirány} = \frac{\Delta L_{hossz}}{L_0} \quad (3.3)$$

$$\varepsilon_{keresztirány} = \frac{\Delta L_{szélesség}}{b} \quad (3.4)$$

ahol $\varepsilon_{keresztirány}$ a próbatest szálorientációra merőleges irányú és $\varepsilon_{hosszirány}$ a próbatest a száliránnyal megegyező nyúlása a terhelés hatására. A ΔL_{hossz} a próbatest hosszanti alakváltozása, L_0 a video extenzométerrel vizsgált 50mm hosszú tartomány és $\Delta L_{szélesség}$ a keresztirányú alakváltozás, b a kiindulási szélesség.

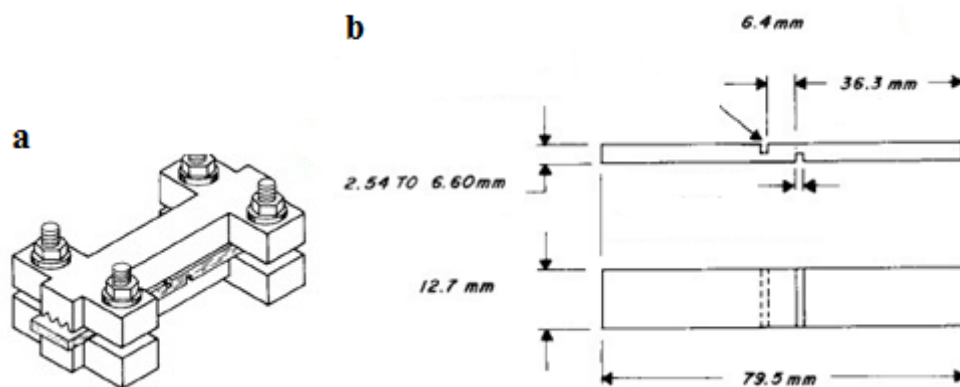
Így a Poisson tényező számolható a (3.5) formula alapján:

$$\nu = \frac{\varepsilon_{keresztirány}}{\varepsilon_{hosszirány}} \quad (3.5)$$

ahol ν , a Poisson tényező.

3.4. Rétegeközi nyíró vizsgálatok

A szálerősített próbatestek rétegeközi nyíró vizsgálatait az ASTM D 3846 szabvány alapján végeztem. A mérések előtt a próbatestek szemközti oldalain vágógéppel bemetszéseket hoztam létre, hogy a tönkremenetel a középső erősítő rétegek között következzen be. A vizsgálatok során, a kihajlás elkerülése végett, a laminátokat a szabvány által előírt támasztó szerkezetekbe helyeztem, amely a 22/a ábrán látható [12]. A laminátok szabványos méretét a 22/b ábra ismerteti.



22. ábra: a.) A szabvány által előírt támasztószerkezet, b.) A befoglaló méretek [12]

A rétegeközi nyíró vizsgálatokat két különböző rétegrendű próbatest típuson végeztem. Az első esetben 6 rétegű laminátokat alkalmaztam amelyekben a próbatest hosszanti oldali párhuzamos az erősítőszál orientációval, (0_6). A második típust 6 réteg szövetből gyártottam.

A vizsgálatokat a Zwick Z050 típusú univerzális szakítógépen végeztem, állandó 1,5 mm/min vizsgálati sebességgel. A berendezés a hosszirányú elmozdulást és a szakítóerőt mérte. A mérés elrendezése a 23. ábrán látható.



23. ábra: A rétegeközi nyíróvizsgálat

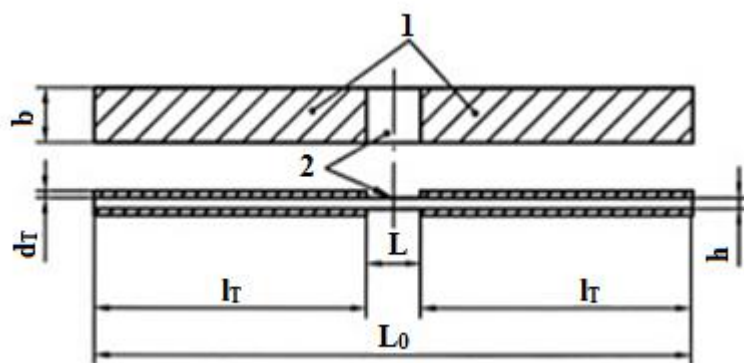
A szabvány alapján a nyírófeszültséget a következő képlet felhasználásával határoztam meg:

$$\tau_t = \frac{F_{max}}{A} \quad (3.6)$$

ahol τ_t a nyírófeszültség, az F_{max} a szakítási erő, A a keresztmetszet felülete.

3.5. Nyomási jellemzők meghatározása

A szálerősített laminátumok nyomó vizsgálatát az MSZ EN ISO 604-es szabvány alapján végeztem, mely tartalmazza a vizsgált kompozitok mechanikai tulajdonságainak a meghatározására vonatkozó hivatalos eljárásokat. A nyomóvizsgálatok fő célja, a nyomódiagram felvétele, valamint a szilárdsági anyagjellemzők definiálása (13). A szabványos próbatest vázlata a 24. ábrán, a befoglaló méretek a 4. táblázatban láthatók.



24. ábra: A szabványos nyomó próbatest, forrás: [14]

Jelölés	Megnevezés	A típus [mm]
L_0	próbatest hossz	110
h	vastagság	2
b	szélesség	10
L	tabok közötti távolság	10
L_T	tab hossz	50
d_T	tab vastagság	1

4. táblázat: a nyomó próbatest szabványos befoglaló méretei

A nyomó vizsgálatokat három különböző rétegrendű próbatest típuson végeztem. Az első esetben 4 rétegű laminátokat alkalmaztam amelyekben a próbatest hosszanti oldali párhuzamos az erősítőszál orientációval, (0_4) . A második alkalomban a szálirányra merőleges próbatesteket használtam, melyek 4 rétegből készültek. A rétegrend a második esetben (90_4) . A harmadik típust 6 réteg szövetből gyártottam.

A mérések a Zwick Z050 típusú univerzális szakítógépen végeztem, állandó 2 mm/min vizsgálati sebességen. Az elemzés alatt a berendezés a elmozdulást és szakítóerőt jegyezte. A szabvány alapján a szakítószilárdságot a következő képlet felhasználásával határoztam meg:

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A} \quad (3.7)$$

ahol σ_t a szakítószilárdság, az F_{max} a szakítási erő, A a keresztmetszet felülete. A rugalmassági modulus megállapításához az alábbi képletet alkalmaztam:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.8)$$

ahol σ_2 és σ_1 a görbe egy tetszőleges szakaszán a végponthoz tartozó F_2 és a kezdőponthoz tartozó F_1 erőkhez való feszültségek. ε_2 és ε_1 a görbe ugyanennek a szakaszának a végponthoz és a kezdőponthoz tartozó elmozdulásához tartozó nyúlások. A nyúlás értékének a meghatározását a következő összefüggés felhasználásával végeztem:

$$\varepsilon_{hosszirány} = \frac{\Delta L_{hossz}}{L} \quad (3.9)$$

ahol $\varepsilon_{hosszirány}$ a próbatest szálorientációval megegyező irányú nyúlása a terhelés hatására. A ΔL_{hossz} a próbatest hosszanti alakváltozása, L a vizsgált 10mm hosszú tartomány.

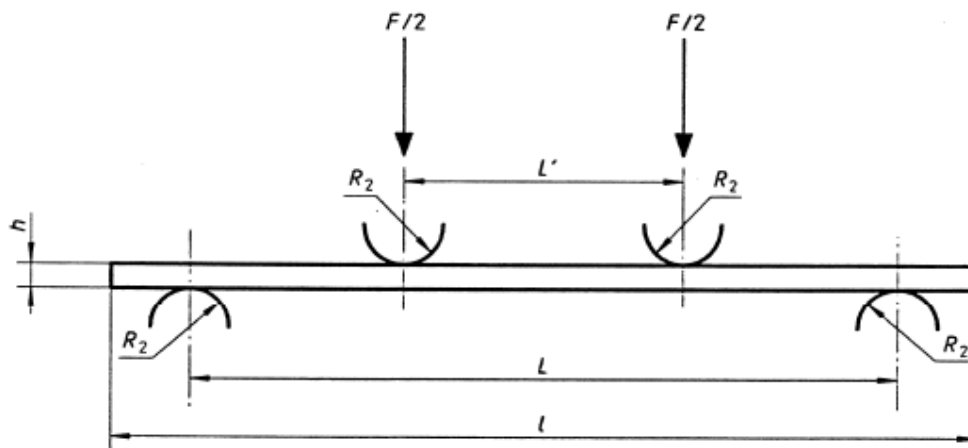
3.6. Négypontos hajlítás

A kompozit próbatestek négypontos hajlító vizsgálatát az MSZ EN ISO 14125 szabványnak megfelelően végeztem. A vizsgálat során mértem az összetartozó lehajlás és nyomóerő értékeket. A laminátok szabványos méreteit az 5. táblázat szemlélteti [15].

Jelölés	Megnevezés	Class 2 [mm]
l	próbatest hossz	80
h	vastagság	>4
b	szélesség	15
L	alátámasztási távolság 1	66
L'	alátámasztási távolság 2	22

5. táblázat: a szabványos hajlító próbatestek fő paraméterei

A négypontos hajlító vizsgálatokat a Zwick Z020 típusú univerzális szakítógépen végeztem, állandó 2 mm/min vizsgálati sebességgel. A mérési elrendezés a 25. ábrán látható.



25. ábra: a négypontos hajlító berendezés vázlata, forrás: [15]

A hajlító vizsgálatokat (0_90/0/maganyag/0/0_90) rétegendű szendvicsszerkezetű próbatesteken végeztem. Maganyagnak 8mm vastag PVC habot alkalmaztam.

Az elemzés alatt a szakítószilárdságot a maximális nyomó erőből számoltam:

$$\sigma_t = \frac{FL}{bh^2} \quad (3.10)$$

ahol σ_t a szakítószilárdság, F a mérés intervalluma alatt jegyzet maxmimális erő, b a próbatest szélessége, h a próbatest vastagsága. A rugalmassági modulust a (3.11) képlet alapján határoztam meg:

$$E = \frac{0,21 L^3}{b h^3} \left(\frac{\Delta F}{\Delta s} \right) \quad (3.12)$$

ahol L a az alátámasztás távolsága, Δs a különbsége s'' és s' lehajlásoknak, ΔF az s'' lehajlásnál mért F'' erő és az s' lehajlásnál mért F' erő különbsége.

A nyúlás értékének a meghatározását a következő összefüggés felhasználásával végeztem:

$$\epsilon_{\text{hosszirány}} = \frac{4,7 s h}{L^2} \quad (3.13)$$

ahol $\epsilon_{\text{hosszirány}}$ a próbatest szálorientációval megegyező irányú nyúlása a terhelés hatására, s a lehajlás értéke, h a próbatest vastagsága, L az alátámasztási távolság.

4. Mérések kiértékelése

4.1. Húzó vizsgálat

A mérési eredmények kiértékelését a 3.3. fejezet alapján végeztem, minden típusból 5-5 próbatestet vizsgáltam. Az eredményeket a 6. táblázatban ismertetem.

Próbatest típus	l_0 [mm]	A [mm ²]	σ_t [MPa]	E [GPa]	ϵ_{hossz} [-]	$\epsilon_{kereszt}$ [-]	ν [-]
0°	49,47	12,06	650,82	66,28	0,0121	0,0033	0,28
90°	49,18	31,87	43,96	7,52	0,0069	0,0008	-
0/90°	49,15	14,96	438,63	57,73	0,0077	0,0012	0,16

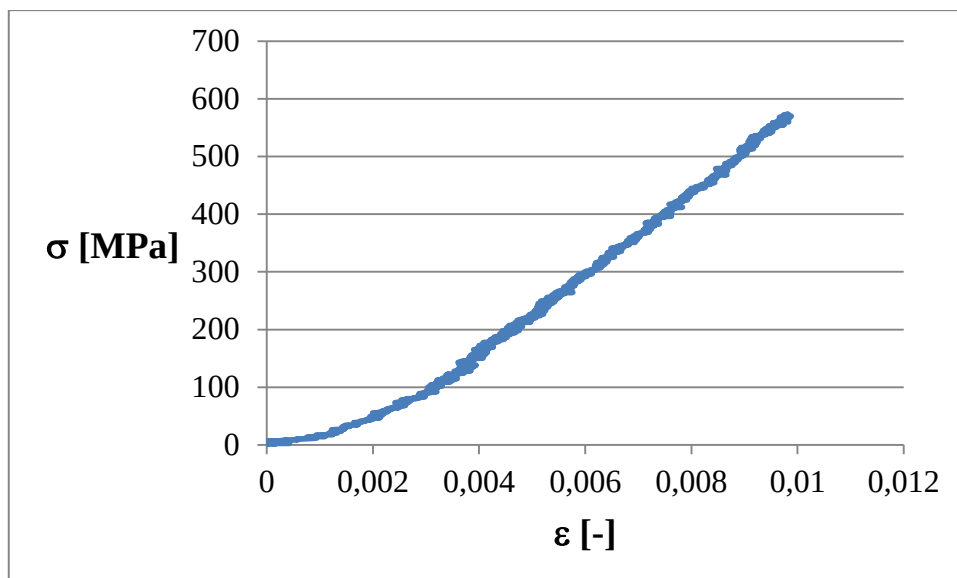
6. táblázat: a próbatestek húzóvizsgálatának az összesítése

A laminátokhoz hasonlóan a PVC maganyagot is húzóvizsgálatnak vettem alá, 5 mm/min állandó vizsgálati sebességgel. Ezután kiértékeltem a kapott eredményeket. Az anyagjellemzőket a 7. táblázat szemlélteti.

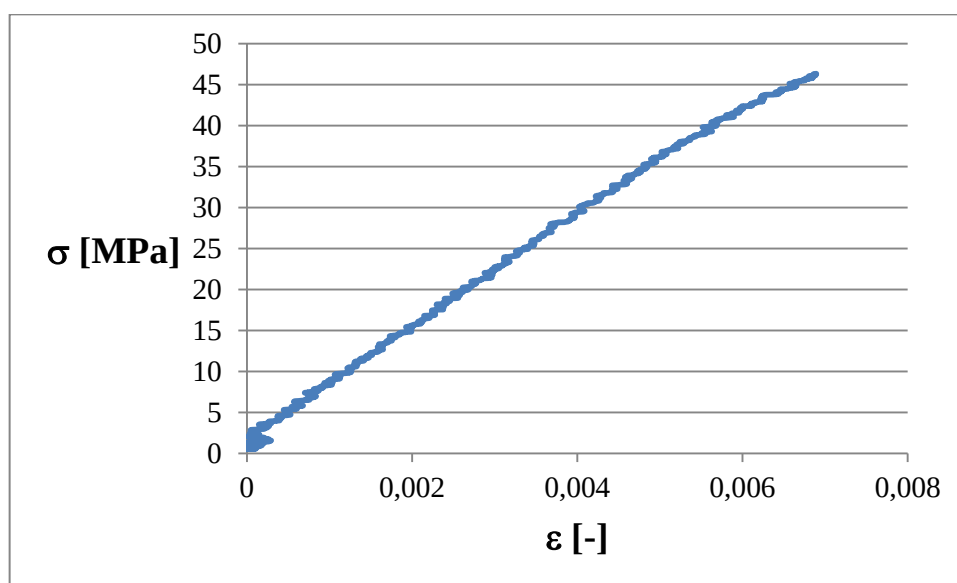
l_0 [mm]	σ_t [MPa]	E [GPa]	ϵ [-]
200	1,51	0,04	0,0528

7. táblázat: PVC maganyag húzóvizsgálatának az összesítése

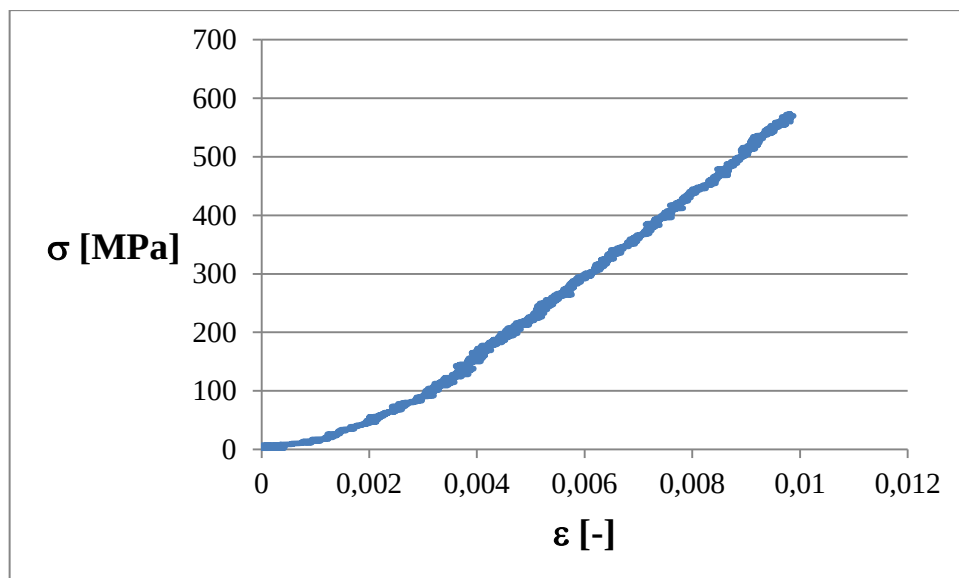
A szakító vizsgálatok jellegzetes szemléltetése a feszültség-nyúlás (σ - ϵ) diagram. A következő ábrákon ábrázoltam a 3 különböző próbatest típus egy tipikus diagramját.



26. ábra: A hosszirányban erősített próbatetek egy jellegzetes σ - ϵ diagramja



27. ábra: A keresztirányban erősített típusú próbatetek egy jellegzetes σ - ϵ diagramja



28. ábra: A szövet próbatestek egy jellegzetes σ - ε diagramja

4.2. Rétegeközi nyíró vizsgálat

A mérési eredmények kiértékelését a 3.4. fejezet alapján végeztem, mindkét típusból 5-5 próbatestet vizsgáltam. Az összesített eredményeket a 8. táblázatban ismertetem.

Próbatest típus	A [mm ²]	τ_t [MPa]
0 ⁰	94,38	17,98
0/90 ⁰	107,02	27,68

8. táblázat: a próbatestek rétegeközi nyíróvizsgálatának az összesítése

4.3. Nyomó vizsgálat

A mérési eredmények kiértékelését a 3.5. fejezet alapján végeztem, mindhárom típusból 5-5 próbatestet vizsgáltam. Az összesített eredményeket a 9. táblázatban ismertetem.

Próbatest típus	A [mm ²]	σ_t [MPa]	E [GPa]	$\varepsilon_{\text{hossz}}$ [-]
0°	16,72	234,52	6,11	0,031
90°	16,11	52,65	2,34	0,021
0/90°	15,64	196,31	6,58	0,028

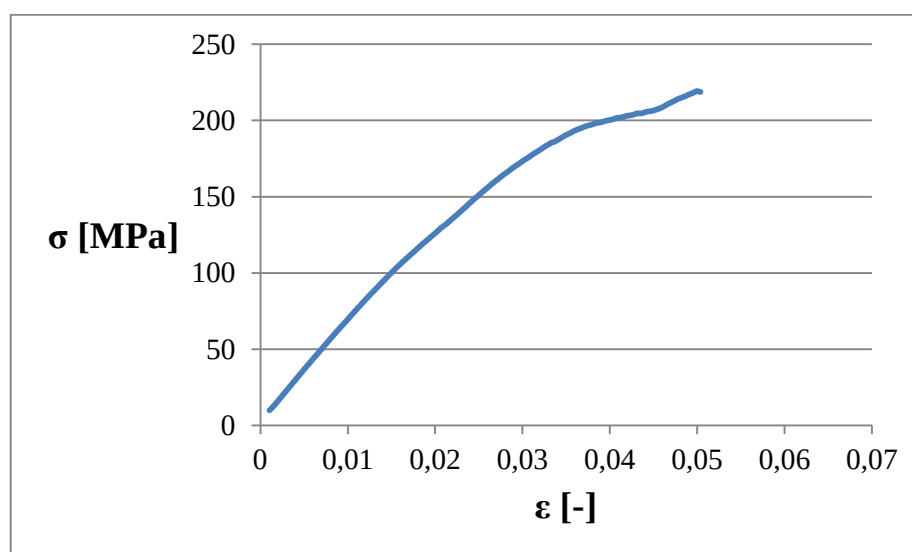
9. táblázat: a próbatestek nyomóvizsgálatának az összesítése

A laminátok mellett elvégeztem a PVC maganyag nyomóvizsgálatát is. Az eredményeket a 10. táblázat összesíti.

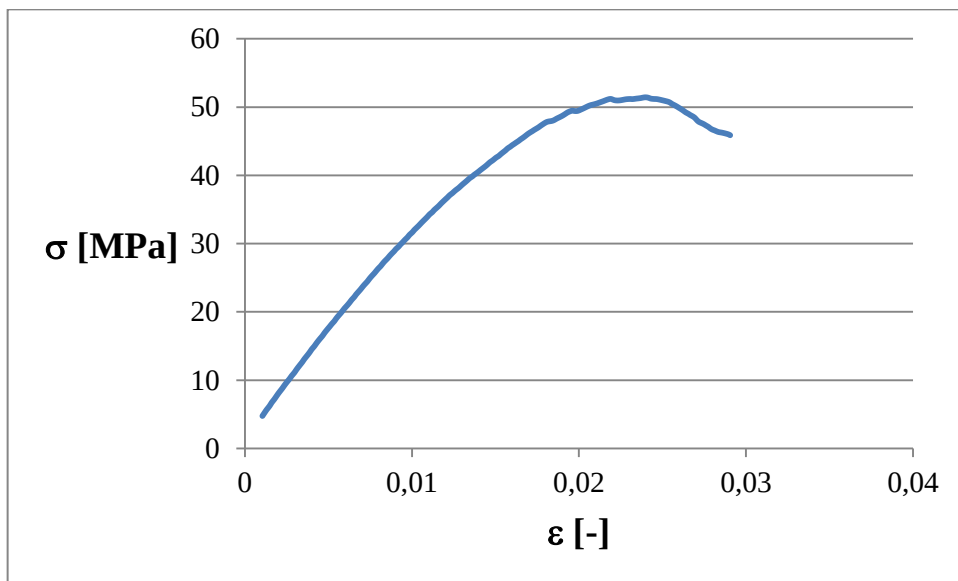
l_0 [mm]	σ_t [MPa]	E [GPa]	ε [-]
8,2	0,59	0,001	0,15

10. táblázat: Maganyag nyomóvizsgálatának az összesítése

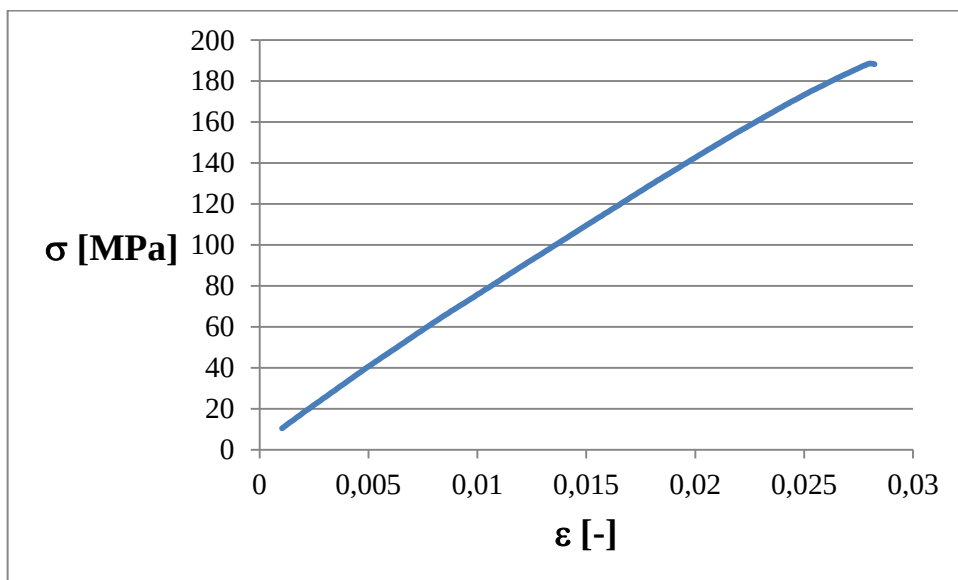
A húzó vizsgálatokhoz hasonlóan a nyomóvizsgálatoknak is jellegzetes szemléltetése a feszültség-nyúlás (σ - ε) diagram. A következő ábrákon ábrázoltam a 3 különböző próbatest típus egy tipikus diagramját.



29. ábra: A hosszirányban erősített laminátok egy jellegzetes σ - ε diagramja



30. ábra: A keresztirányban erősített próbatestek egy jellegzetes σ - ϵ diagramja



31. ábra: A szövet próbatestek egy jellegzetes σ - ϵ diagramja

5. Mérési eredmények összehasonlítása a VEM számításokkal

A különböző laminát típusokon elvégzett mérések kiértékelése után, véges elemes módszerrel (VEM) szimuláltam ugyanezekkel a rétegrendekkel illetve szálirányokkal rendelkező próbatesteken a szakító és a hajlító vizsgálatokat. A cél az volt, hogy hitelesítsem a méréseket. A 3. fejezetben leírt mérések kiértékelésével rendelkezésemre álltak a szükséges anyagjellemzők. Ezeket a sajátosságokat felhasználtam a VEM szoftverben történő vizsgálatokhoz. A Hyper Works program segítségével húzó és hajlító igénybevételt szimuláltam.

A véges elemes analízis előtt, elkészítettem a szabványos geometriával rendelkező hajlító és húzó próbatestek felületmodelljét. A modellek IGES formátumban történő elmentése után, importáltam a fájlokat a Hyper Works véges elem szimulációs programba. Ezt követően elvégeztem a FEM vizsgálat megkezdéséhez szükséges előkészületeket. A vizsgálatot, a méréseknél korábban leírtakhoz hasonlóan (0_90/0/maganyag/0/0_90) rétegrendű hajlító lamináton és (0/60₂/90), (0/30₂/90) rétegrendű húzó próbatesteken hajtottam végre.

A véges elem háló elkészítése után definiáltam az egyes anyagjellemzőket, amiket korábban a mérések kiértékelésével határoztam meg. Az anyagtulajdonságoknak a maganyagnál a homogén, az erősítőszálak esetében inhomogén anyagot választottam. A szénszál erősítésű kompozit esetében a homogén anyagtulajdonságot nem alkalmazhattam, hiszen pl. a szálátmérő korántsem azonos mindenhol a rovingokban. A következő táblázatokban ismertetem a programban az egyes anyagtípusokhoz deklarált anyagjellemzőket, amiket korábban a mérésekkel határoztam meg.

Anyag típus	E [MPa]	G [MPa]	ν [-]	ρ [t/mm ³]	h [mm]
PVC maganyag	40	18	0,323	5e-011	8,2

11. táblázat: Maganyag anyagjellemzői

ahol E a hajlító rugalmassági modulus, G a nyíró rugalmassági modulus, ν a Poisson tényező, ρ a sűrűség, h a rétegvastagság.

Anyag típus	E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	G_{12} [MPa]	ν_{12} [-]	$\sigma_{T,0}$ [MPa]	$\sigma_{T,90}$ [MPa]	$\sigma_{C,0}$ [MPa]	$\sigma_{C,90}$ [MPa]	h [mm]
UD	66280	7520	6000	0,28	650	44	234	52	0,26
Szövet	57730	57730	5000	0,16	483	483	196	196	0,24

12. táblázat: Erősítőszálak anyagjellemzői

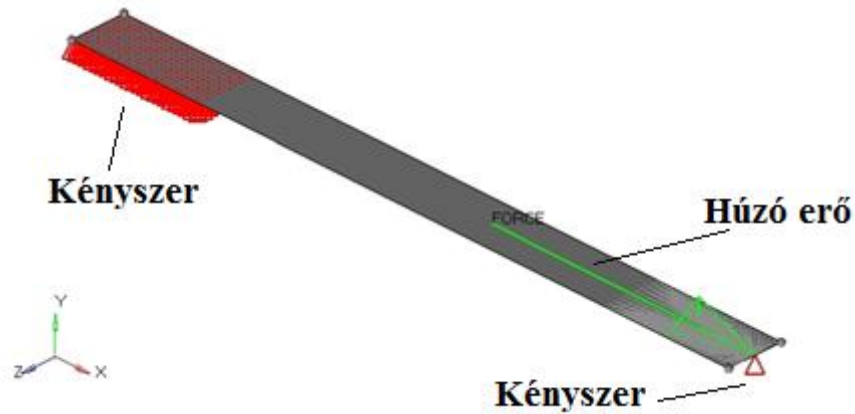
ahol E_1 a szálorientáció irányában, E_2 a szálirányra merőleges irányban a hajlító rugalmassági modulus, G_{12} a nyíró rugalmassági modulus, ν_{12} a Poisson tényező. Az $\sigma_{T,0}$ a szálorientáció irányában, $\sigma_{T,90}$ a szálirányra merőleges irányban a húzó szakítószilárdság, $\sigma_{C,0}$ a szálorientáció irányában, $\sigma_{C,90}$ a szálirányra merőleges irányban a nyomó szakítószilárdság.

Az anyagtulajdonságok meghatározása után létrehoztam a húzó és hajlító próbatesteken a vizsgálatok során fellépő kényszereket, terheléseket.

5.1. Húzó vizsgálat

A 3.3. fejezetben leírt, szabványos mérési elrendezésnek megfelelően lemodelleztem a rendszert. A befogásokat kényszerekkel helyettesítettem, a tabok hosszával megegyező, 50 mm-es szakaszokon. A próbatest alsó részén mind a 6 db szabadságfokot lekötöttem, meggátolva így a szegmens elmozdulását a befogópofához képest. A további ábrákon piros színnel jelöltem a szoftverben a kényszereket. A laminát felső részén hasonlóan jártam el az előbb leírtakhoz, azzal a kiegészítéssel, hogy létrehoztam az x irányú húzó erőt is. Itt a tab felületével megegyező 20×50 mm² felszínű részt egy merev egységnek állítottam be, megakadályozva így az elcsavarodást az igénybevétel hatására. Az erőt ennek a merev egységnek az általam kiválasztott „csúcspontjába” redukáltam. Az erőt a további ábrákon zölddel jelöltem. A rész mozgását meggátoló kényszereket is a „csúcspontban” hoztam létre. Szemben a

próbatest másik végével, itt nem kötöttem le mind a 6 db szabadságfokot. Az erő hatásvonalával megegyező irányban szabadon hagytam az elmozdulást. A mérési elrendezést a 32. ábra szemlélteti.



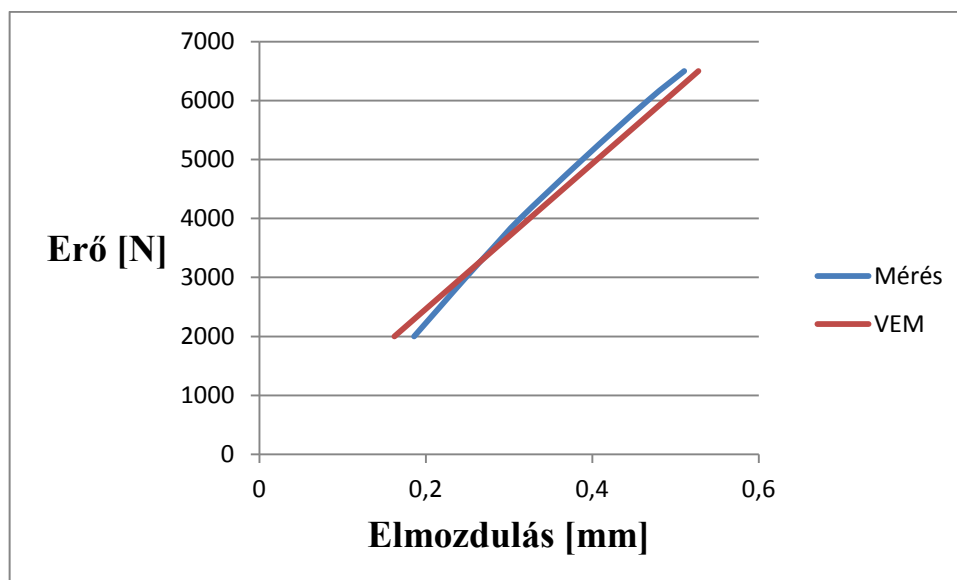
32. ábra: A húzó vizsgálat elrendezése

Mind a kettő próbatest típust 8 különböző értékű erővel terheltem. A szabványos húzó méréseket video extenzométer segítségével végeztem, ahogy azt már a 3.3. fejezetben leírtam. A készülék a laminátok 50mm hosszú, középső szakaszán jegyezte az elmozdulásokat. Ennek megfelelően a VEM vizsgálatok során is csak ezen a szakaszon vizsgáltam az alakváltozást. A kapott eredményeket összevettem a különböző rétegrendű próbatestek egy-egy görbéjével. Az összehasonlítás a 13. táblázatban látható.

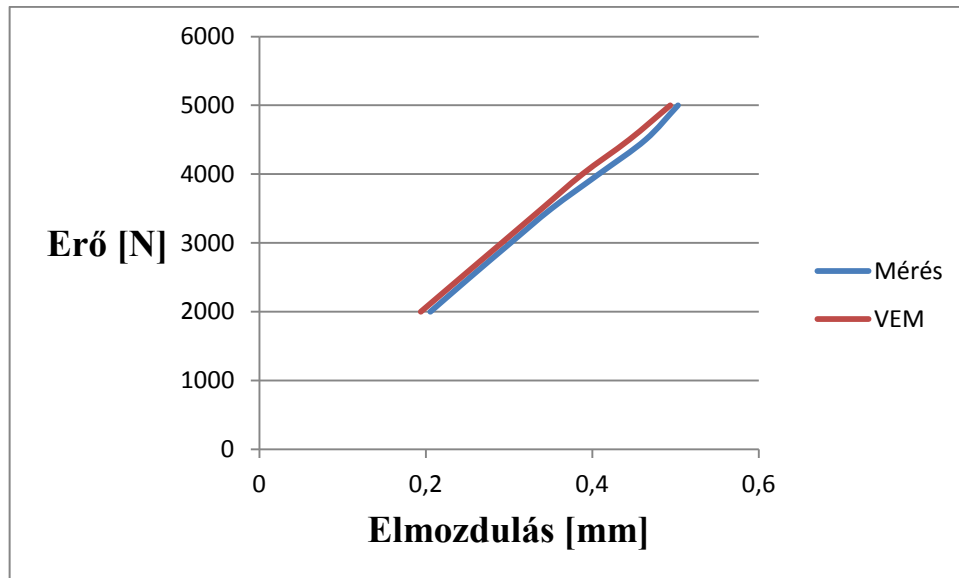
(0/30/30/90)			(0/60/60/90)		
F [N]	$\Delta l_{\text{mérés}}$ [mm]	Δl_{VEM} [mm]	F [N]	$\Delta l_{\text{mérés}}$ [mm]	Δl_{VEM} [mm]
2000	0,1445	0,1325	1500	0,1514	0,1456
2500	0,1912	0,1824	2000	0,2054	0,1941
3000	0,2092	0,1986	2500	0,2532	0,2425
3500	0,2415	0,2317	3000	0,3018	0,2911
4000	0,2768	0,2649	3500	0,3511	0,3396
5000	0,3591	0,3311	4000	0,4078	0,3881
6000	0,4493	0,4224	4500	0,4639	0,4443
6500	0,4822	0,4436	5000	0,5029	0,4937

13. táblázat: A mérési eredmények összevetése a VEM számításokkal

A könnyebb áttekinthetőség érdekében az eredményeket diagramokon is szemléltetem a következő ábrákon.

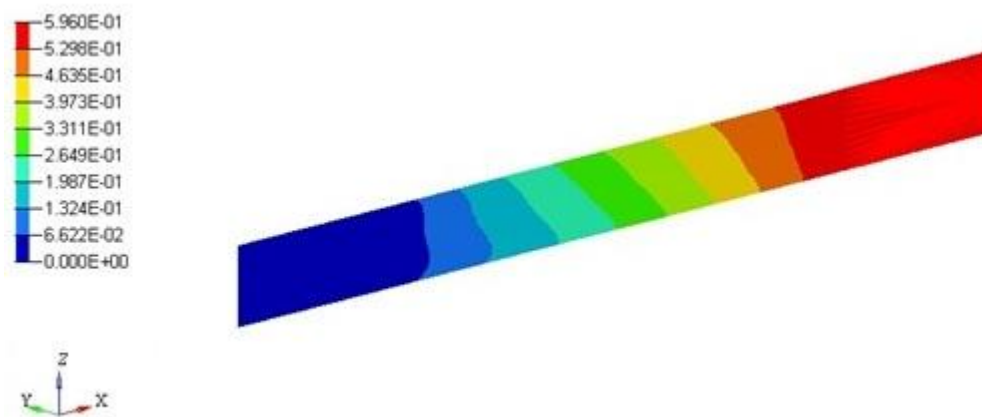


33. ábra: Az eredmények a (0/30/30/90) rétegendű próbatesten



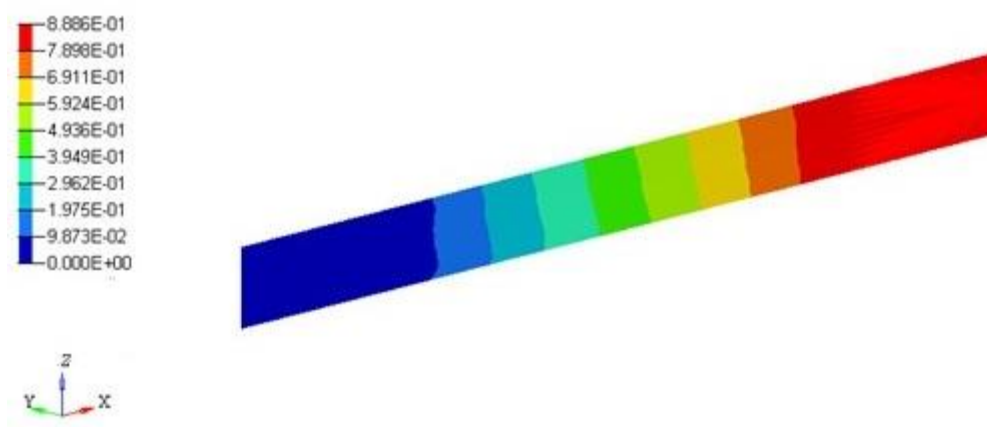
34. ábra: Az eredmények a (0/60/60/90) rétegendű próbatesten

A következő ábrán ismertetem a (0/30/30/90) rétegendű próbatesten elvégzett VEM szimulációkat.



35. ábra: F=3000 N hatására az elmozdulás

A 36. ábra a (0/60/60/90) rétegrendű próbatest elmozdulását illusztrálja, ugyancsak 3000 N terhelő erő hatására.

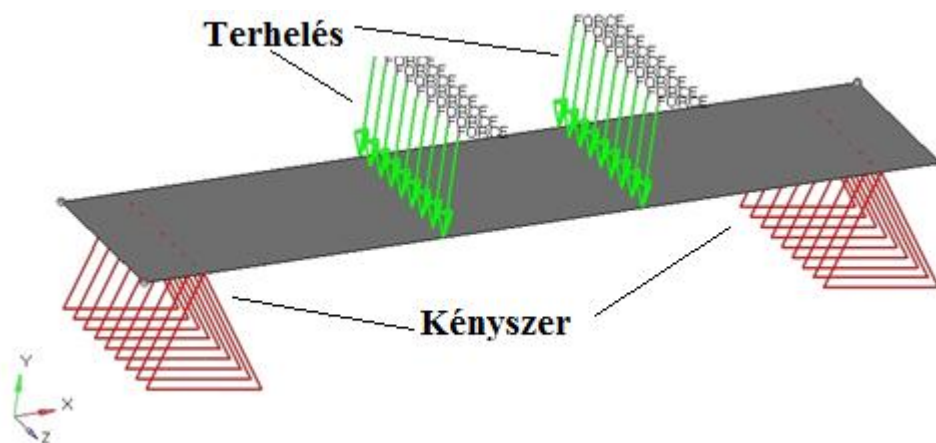


36. ábra: $F=3000$ N hatására az elmozdulás

A különböző rétegrendű laminátokat illusztráló ábrákon jól kivehető a köztes rétegek erősítőszál orientációja. A (0/30₂/90) rétegrendű próbatest a valóságnak megfelelően kevesebb alakváltozást szenvedett ugyanazon a terhelésen, mint a (0/60₂/90) rétegrendű típus. Ennek hátterében az a tény áll, hogy a 30⁰-os esetben az erősítőszálak jobban az erő hatásvonalának irányába esnek, ezáltal nagyobb igénybevételt képesek elviselni. A vizsgált terheléseken a FEM vizsgálat során mindig kisebb elmozdulást kaptam, mint amit a méréseknél kiértékeltem. A legnagyobb eltérés 9 %-nak adódott.

5.2. Négypontos hajlító vizsgálat

A 3.6. fejezetben leírt, szabványos mérési elrendezésnek megfelelően lemodelleztem a szerkezetet. Az alsó megtámasztásokat kényszerekkel helyettesítettem. A két alátámasztás távolságát az MSZ EN ISO 14125 szabvány alapján 66 mm-nek választottam. Az alátámasztások esetében a függőleges, y irányú elmozdulást gátoltam meg a megfelelő szabadságfok lekötésével. Az y irányban lefele haladó pórákat erőkkkel helyettesítettem. A mérési elrendezés a 37. ábrán látható.



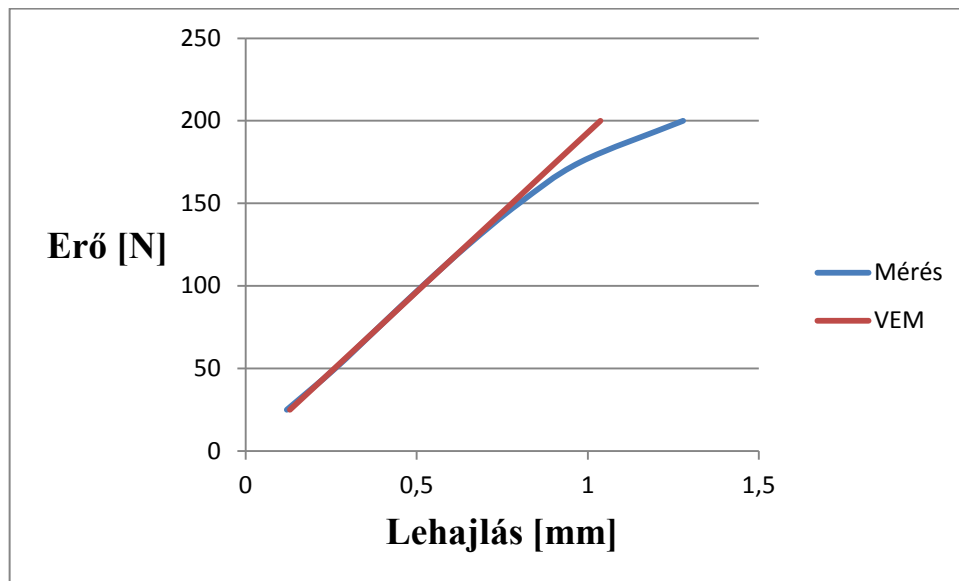
37. ábra: A négypontos hajlítás elrendezése

A próbatesteket ugyancsak 8 különböző nagyságú erővel terheltem. A kapott eredményeket összevettem a mérés során kiértékeltekkel. Az összehasonlítás a 14. táblázatban látható.

(0_90/0/maganyag/0/0_90)		
F [N]	$\Delta s_{\text{mérés}}$ [mm]	Δs_{VEM} [mm]
25	0,1193	0,1292
50	0,2614	0,2591
75	0,3888	0,3893
100	0,5166	0,5183
125	0,6513	0,6481
150	0,7991	0,7788
175	0,9784	0,9076
200	1,1387	1,0377

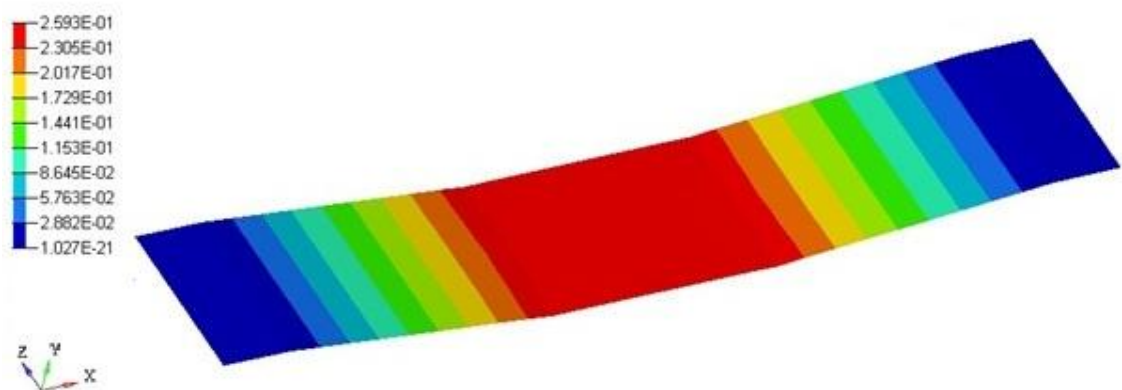
14. táblázat: A mérési eredmények összevetése a VEM számításokkal

A vizsgálat összesítése a 38. ábrán látható.



38. ábra: Az eredmények a (0_90/0/maganyag/0/0_90) rétegrendű próbatesten

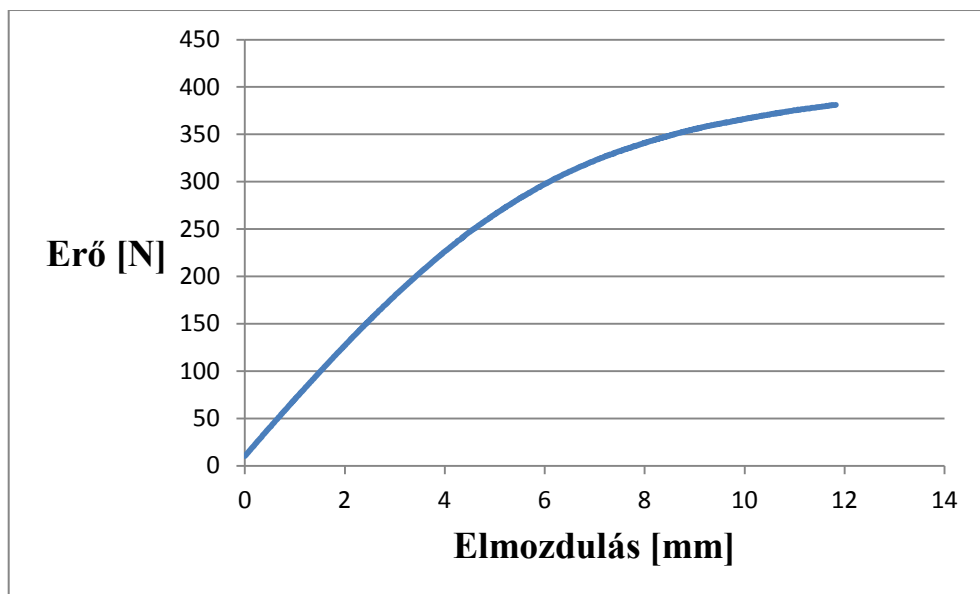
A következő ábrán szemléltetem a próbatesten elvégzett FEM szimulációkat. A könnyebb érzékelhetőség érdekében a deformáció mértékét 10-szeresre növeltem.



39. ábra: 50 N hatására a laminát lehajlása

A vizsgálat során a legnagyobb eltérés ugyancsak 9 %-nak adódott. Az eredmények viszont a hajlító elemzés során jobban szórtak, amit véleményem szerint elsősorban a maganyag gyanta áteresztőképessége okozott. A próbatestek injektálásakor készítettem 1 mm átmérőjű furatokat a PVC maganyagon, a beáramló gyanta könnyebb átjutásáért.

Azokban a laminátokban ahova kevesebb furat került, a PVC hab több gyantát szívott fel, így kevesebb mátrixanyag jutott az erősítőrétegekhez. Ez gyengébb mechanikai tulajdonságokat eredményezett a későbbiekben. Valamint további okként megemlítem, hogy magasabb terheléseken észleltem a habnál a nyakképződés jelenségét. Az érintett esetekben az erő-elmozdulás görbe veszített a meredekségéből, egyre inkább „ellaposodott”. A jelenség a 40. ábrán látható.



40. ábra: A maganyag erő-elmozdulás diagramja

Összegzés

Elvégezve a VEM vizsgálatok kiértékelését, kijelenthető hogy a szoftver alkalmazható, összetettebb kompozit termékek szilárdsági méretezésére is. A legnagyobb eltérés a tanulmányozott esetekben 9%-nak adódott, így a 10%-os biztonsági tényező figyelembevételével a hiba már kiküszöbölhető. Sőt, úgy gondolom, hogy ez az érték még tovább redukálható. Egyrészt a mátrixanyag anyagjellemzőinek pontos meghatározásával, szabványos mérések elvégzésével. Valamint a FEM analízis során, a felhasznált erősítőszál változatok nyírórugalmassági modulusának az iparban alkalmazott átlagértéket vettem. Így a nyíró rugalmassági modulus terén is lehetséges előrelépés, alaposabb vizsgálatok elvégzésével.

6. Termékkészítés

6.1. Az akkumulátorházra vonatkozó Formula Student Szabályzat

Az akkumulátorház tervezése közben mindvégig szem előtt tartottam a hivatalos versenyszabályzatban definiáltakat [16]. Kritérium, hogy a házat merev, tűzálló anyagból kell készíteni, maga a doboz pedig nem lóghat túl a négy gumibroncs külső pereme által meghatározott síkon. A rögzítést a vázhoz kell megoldani, úgy hogy a ház, benne a cellákkal még a dinamikus versenyszámok alatt is stabil helyzetben maradjon. Továbbá, az akkumulátorpakkot védeni kell a hátulról illetve az oldalról történő esetleges külső behatásoktól. A magas rendszerfeszültségre való tekintettel gondoskodni kell róla, hogy a házban található akkumulátorcellák a külvilágtól teljesen el legyenek szigetelve, és a doboz külső felületén legyen egy figyelemfelkeltő jelzés, mint pl. egy LED, ami világít, ha a külső csatlakozón a feszültség meghaladja a 40 VDC-t. A dobozon nyílások csak a kábelezés és a szellőzés miatt lehetnek. Legkevesebb 750 mm² területű matrica használata kötelező az akkumulátorház kívülről jól látható felületén, ami utal a magas villamos feszültségre. A matrica képe a 41. ábrán látható.



41. ábra: A magas feszültséget jelző matrica

6.2. Az akkumulátorház formaterve

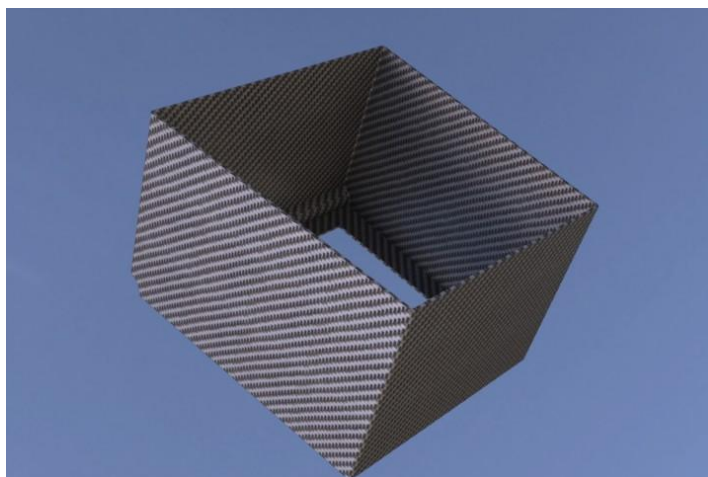
A 2012-es elektromos autó az egy évvel korábbi belsőégésű motoros jármű alapjaira épült. A költségek csökkentése miatt többek között a vázgeometria is adott volt, így már ebbe a meglévő rendszerbe kellett „belepakolni” az idei elektromos hajtáshoz szükséges össze egységet. Miután körvonalazódott a teljes hajtáslánc

elrendezés, az akkumulátorház tervezés a ház, rendelkezésre álló befoglaló méreteinek a meghatározásával indult.



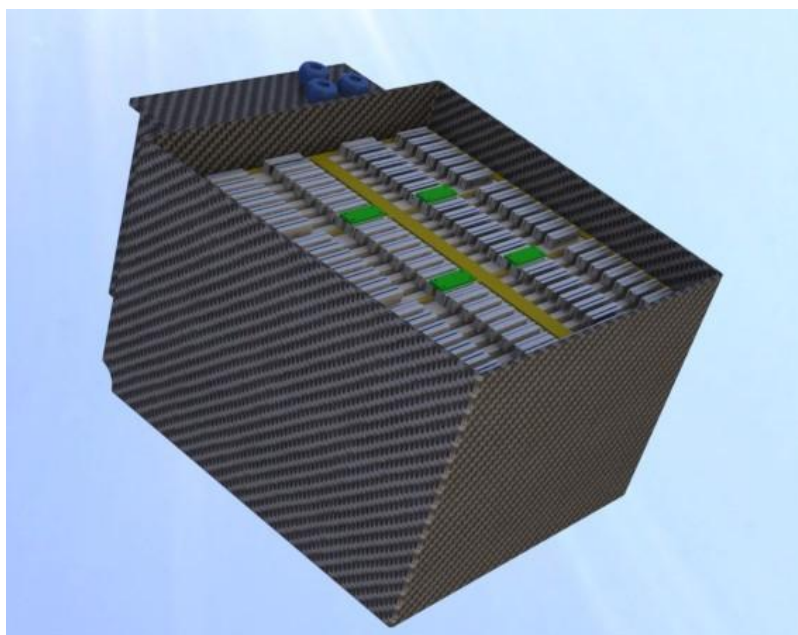
42. ábra: Az első látványterv a 2012-es elektromos autóról

A munkát a következő 3-4 hétben közösen végeztem az energiaellátás csoport tagjaival. Az idei évben a csapatnak lehetősége volt egy teljesen új akkumulátor cella típust alkalmaznia a villamos versenyautóban, mely lényegesen kisebb akkumulátorbokszt igényelt az egy évvel korábbi változathoz képest. Az első kezdetleges 3D modell még teljes egészében szénszálas polimer kompozitból állt. A polimer viszont remek hőszigetelő, ami ebben a helyzetben hátrányos tulajdonságnak számított. Félő volt ugyanis, hogy nyáron a hőségben versenyző autóban az akkumulátorbokszt nem tud elég hőt leadni a környezetének, így túlmelegednek, ezáltal károsodnak a benne található cellák. Az esetleges probléma elkerülése miatt módosítottam a koncepciót, a ház fedelét és az alsó oldal egy részét alumínium lapra cseréltem. Az kompozit akkumulátorház geometriája a 43. ábrán látható.



43. ábra: A szénszál-as polimer kompozit akkumulátorház

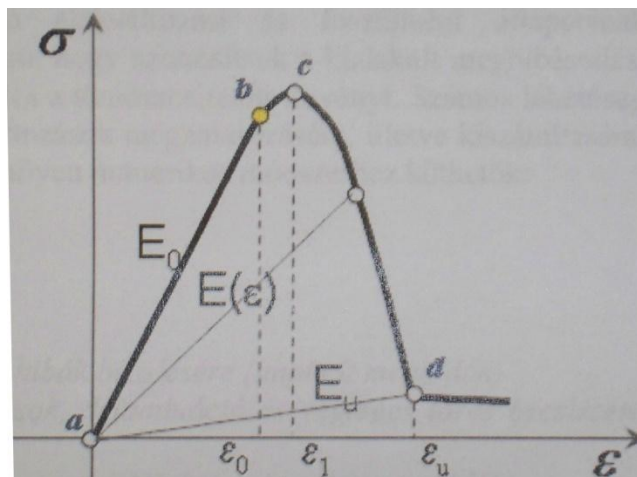
Teherviselő egységről lévén szó szemben az esztétikai elemekkel, a házmodellezése alatt mindvégig törekedtem arra, hogy a lehető legegyszerűbb, legbiztosabban legyártható geometria keletkezzen. A gyors szerelhetőség érdekében a felső fedelet könnyen eltávolíthatónak terveztem. Az elektromos szigetelő képesség megtartásából a bontható kötést műanyag csavarok alkalmazásával valósítottam meg. Így az esetleges elektronikai problémák helyreállítása akár a helyszínen, az akkumulátorház mozgatása nélkül is elvégezhető. A végleges akkumulátorbokszt kiegészült egy úgynevezett „kisházzal” is, amely a biztonsági relét tartalmazta. A teljes energiaellátó egységet a 44. ábra ismerteti.



44. ábra: A komplett energiaellátó rendszer

6.3. Az akkumulátorház szilárdságtani modellezése

A gyártástechnológiák részletes ismerete mellett a kompozit szerkezetek szilárdságtani analízise is szükséges ahhoz, hogy a készterméket biztonságosan lehessen használni. A kompozit szemben a fém rugalmas-képlékeny viselkedésével rugalmas-rideg sajátságot mutat. Ebből kifolyólag nélkülözhetetlen, hogy a kompozit gyártmányok kezdeti meghibásodásának megállapítására valamint a tönkremeneteli mechanizmus definiálására reális eljárások álljanak rendelkezésre [17]. Laminált kompozit készítmények károsodását zömmel a terhelés iránya és az egyes erősítőszál rétegek szál-orientációja befolyásolja. Szálerősített kompozit struktúrák esetén az esetek többségében négy sajátos tönkremeneteli fajta következhet be. Ilyen a mátrix anyagban keletkező hézag, az erősítőszál-mátrix adhézió gyengülése, a szál sérülése valamint a szomszédos rétegek elválása, a delamináció jelensége. A meghibásodási mechanizmus négy könnyen elhatárolható szakaszból épül fel, amit a 45. ábra szemléltet.



45. ábra: A meghibásodási mechanizmus feszültség-nyúlás diagramja [17]

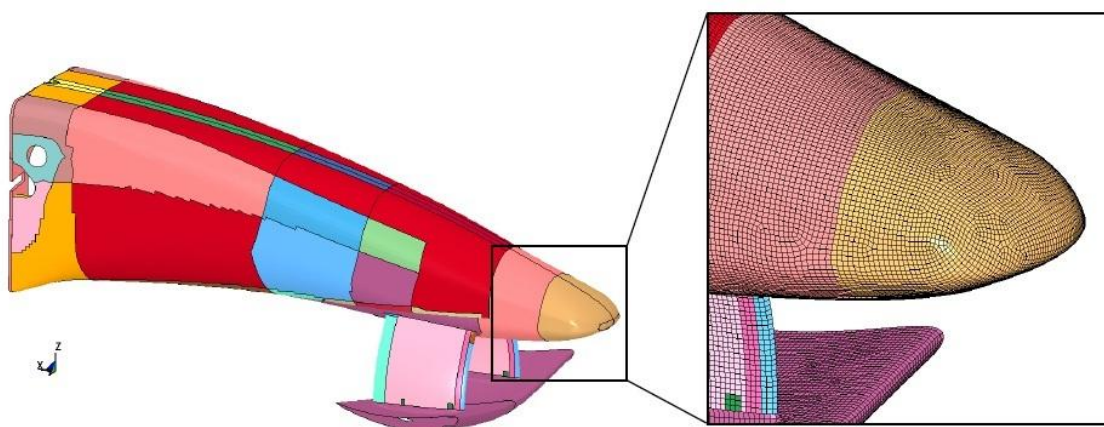
- [a-b] szakasz: a rugalmas deformáció
- [b]: a tönkremenetel megjelenése a terhelések következtében
- [b-d] szakasz: a károsodás terjedése
- [d]: a teljes tönkremenetel megvalósulása

A véges elemes vizsgálat alatt a megoldó a tönkremeneteli kritériumok felhasználásával definiálja az úgynevezett határpontot, ahol a meghibásodás megjelenik. A meghibásodási modellek, melyeket a véges elemes programok alkalmaznak, amikor a terhelés, törést okoz a struktúrában [17]:

- maximum feszültség és maximum alakváltozás
- kvadratikus tönkremeneteli kritériumok (Tsai-Wu, Hashin stb.)
- további kritériumok (Puch, Hoffman stb.)

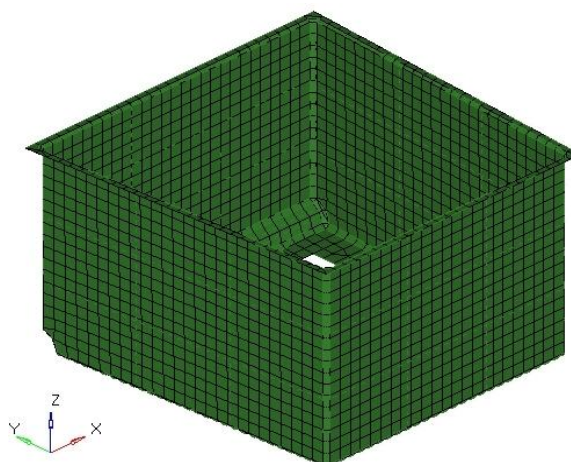
A kompozit termékek szilárdságtani méretezésekor nélkülözhetetlen a tanulmányozott alkatrész igénybevétel hatására létrejött alakváltozási és feszültségi állapotának a deklarálása. Ennek tudatában tudjuk igénybe venni a meghibásodási kritériumokat és a tönkremeneteli törvényt. A kialakult feszültségek és alakváltozások leírására a következő módszerek állnak a mérnökök rendelkezésére:

- mérések
- analitikus formulák
- klasszikus kompozit koncepció
- véges elem analízis
 - o lineáris kompozit modellek (az első lamina hibák becslésére)
 - o komplex kompozit modellek (delamináció és végleges törés leírására)
 - o összetett véges elem modellek (ütközési folyamatok vizsgálatára)



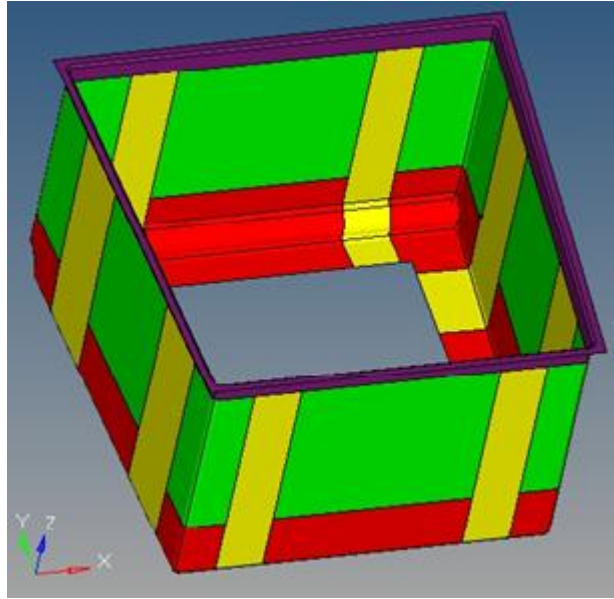
46. ábra: F1-es orrkúp modell a frontális ütközés szimulációjához [18]

Az akkumulátorház szilárdságtani méretezését az Altair Hyperworks véges elem szimulációs szoftver, 2011-es verziójával végeztem. Vizsgáltam a szerkezetben az igénybevétel hatására kialakult alakváltozási állapotot. Az 5. fejezetben leírtakhoz hasonlóan, a végleges 3D modellt, felületmodellként IGES formátumban elmentettem, majd importáltam a fájlt a FEM programba. A szoftverben a vizsgálatot a végeselem háló elkészítésével kezdtem. A modell hálózása során 4mm-es elem méretet alkalmaztam. A behálózott akkumulátorház a 47. ábrán látható.



47. ábra: A behálózott akkumulátorház

A hálózás kivitelezése után létrehoztam a szerkezetben felhasználandó anyagokat, maganyagnak PVC habot, erősítőszálnak karbon szövetet és UD-t. Ezt követően az 5. fejezetben leírtakhoz hasonlóan, meghatároztam az egyes anyagjellemzőket. Azokat a mérések után kiértékelt értékeket állítottam be a tulajdonságoknak, amiket a szabványos próbatestek húzó illetve hajlító szimulációja során korábban validáltam. Az anyagtulajdonságoknak az erősítőszálak esetében inhomogént, a maganyagnál homogént választottam. Az akkumulátorház szilárdsági méretezésekor a legjelentősebb igénybevételnek, a házra ható össztömegből származó nehézségi erőt tételeztem fel. Emellett figyelembe vettem az oldalirányú mozgás során a házra ható terhelést. Ennek megfelelően ezeket a terheléseket vettem figyelembe a szerkezet rétegrendjének a kialakításakor. A korábbi, kompozit termékek készítése során szerzett tapasztalataimat felhasználva hoztam létre a „kiindulási” rétegrendekeket. A 48. ábrán pirossal jelzett alsó területen ($0_{90^0}/0^0/45^0/\text{maganyag}/-45^0/90^0/0_{90^0}$), a ház oldalain látható sárga sávokon ($0_{90^0}/45^0/0/\text{maganyag}/-45^0/90^0/0_{90^0}$), a lila peremen és a környékén ($0_{90^0}/0^0/45^0/\text{maganyag}/-45^0/90^0/0_{90^0}$), az egyéb zöld részeken ($0_{90^0}/0^0/45^0/90^0/-45^0/0_{90^0}$) felépítést határoztam meg. Valamennyi esetben a legbelső réteg, üvegszövet az elektromos szigetelés végett. Ebben az esetben a ház össztömege 0,95 kg lett a szoftverben.



48. ábra: Az első próbálkozás a különböző rétegrendek kialakítására

A versenyautóban az akkumulátorház rögzítését a vázcsövekhez terveztem. A váz csoport tagjaival egyeztetve, a felfogatást hajlított fém profilok alkalmazásával képzeltek el. Ennek megfelelően, a kompozit ház hajlított profilokhoz történő kapcsolódását kényszerek megadásával helyettesítettem a megfelelő helyeken. A vizsgálatok során mind a 6 szabadságfokot lekötöttem. A kényszereket a szoftverben rózsaszínnel jelöltem, elhelyezésük az 50. ábrán látható. A két terhelési esetet ezután külön-külön vizsgáltam, nagyságukat a következő képletek segítségével határoztam meg.

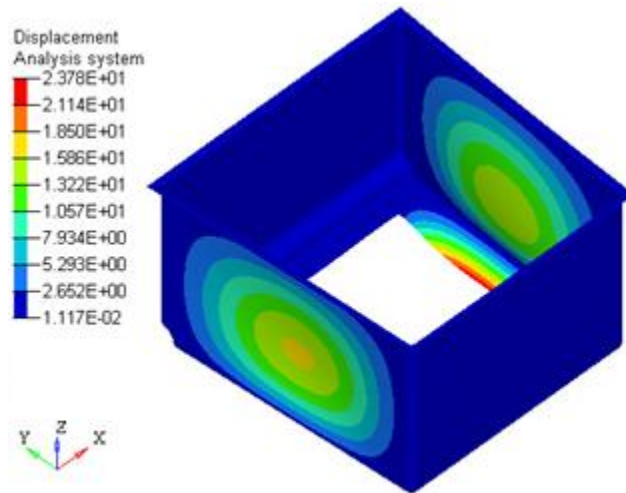
$$F_{\text{gravitáció}} = 2 \quad G = 2 \quad m_{\text{össz}} \quad g = 2 \quad (m_{\text{cellák}} + m_{\text{AL fedél}} + m_{\text{motorvezérlő}}) \quad g \quad (6.1)$$

$$F_{\text{oldalirányú}} = 1.5 \quad G = 1.5 \quad m_{\text{össz}} \quad g = 1.5 \quad (m_{\text{cellák}} + m_{\text{AL fedél}} + m_{\text{motorvezérlő}}) \quad g \quad (6.2)$$

ahol $F_{\text{gravitáció}}$ a nehézségi erő, $m_{\text{cellák}} = 45$ kg az akkumulátorcellák össztömege, $m_{\text{AL fedél}} = 1$ kg a ház alumínium fedele, $m_{\text{motorvezérlő}} = 15$ kg az elektromos motorok vezérlője.

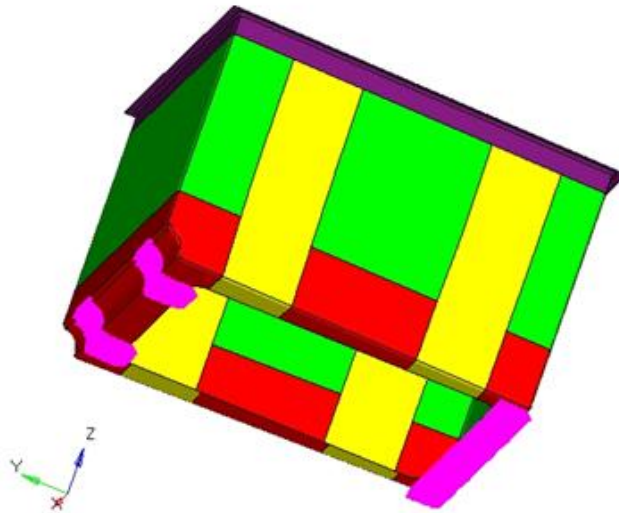
Az autóban található teljes energiaellátó rendszer össztömege, beleértve az akkumulátorcellákat, a kábelezést stb. kb. 45 kg. A méretezés során mindvégig szem előtt tartottam, hogy az akkumulátorház károsodása az elektromos autóval történő versenyzés során, rendkívül súlyos következményeket vonhat maga után. Elvégezve a számításokat, a nehézségi erőnek 1200 N, az oldalirányú erőnek 900 N adódott. Az első esetben az erő irányát, függőlegesen lefelé mutatónak tételeztem fel, így a programban a

z tengely mentén, negatív irányban irányulónak. Elvégezve a szimulációt az ház a „kiindulási” rétegrendekkel nem viselte el a függőleges irányú terhelést, 23,78 mm-es elmozdulást szenvedett. Az akkumulátorház elmozdulását a 49. ábra szemlélteti.



49. ábra: Az első VEM vizsgálat eredménye a nehézségi erővel történő terhelésnél

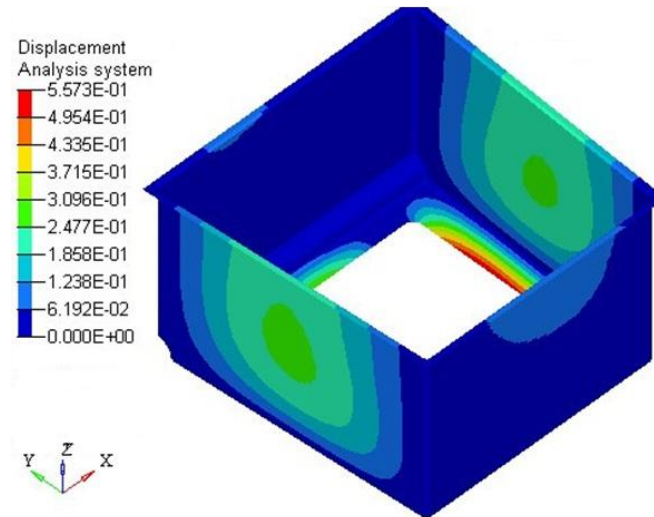
A végleges rétegrendek kialakítását több iterációs lépés után értem el. Az optimalizált rétegrendeket illetve a működő kényszereket ismerteti az 50. ábra.



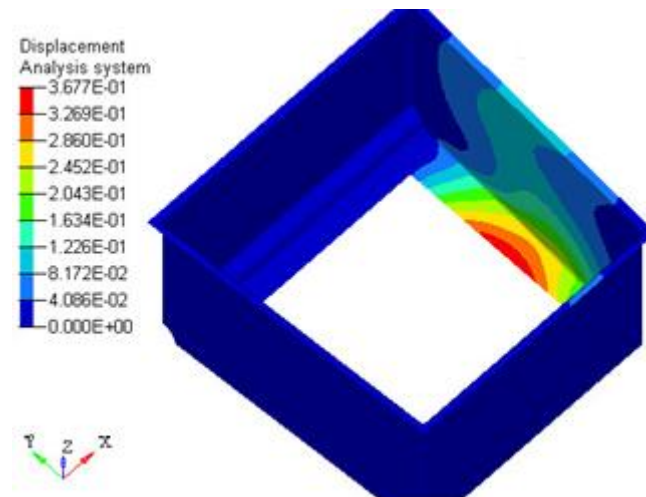
50. ábra: A kompozit akkumulátorház felépítése

Az 50. ábrán a sárga sávokon $(0_0/90^0/45^0/90^0/0^0/\text{maganyag}/-45^0/0^0/90^0/0_0/90^0)$, a piros területen $(0_0/90^0/0^0/45^0/90^0/\text{maganyag}/-45^0/0^0/0_0/90^0)$, a lila részen

(0_{90°}/0_°/45_°/maganyag/-45_°/90_°/0_{90°}) míg a maradék zöldfelületen (0_{90°}/0_°/45_°/90_°/-45_°/0_{90°}) rétegrendű felépítést határoztam meg. A ház össztömege így 1,255 kg. A véges elem analízis eredményét szemléltetik a következő ábrák.



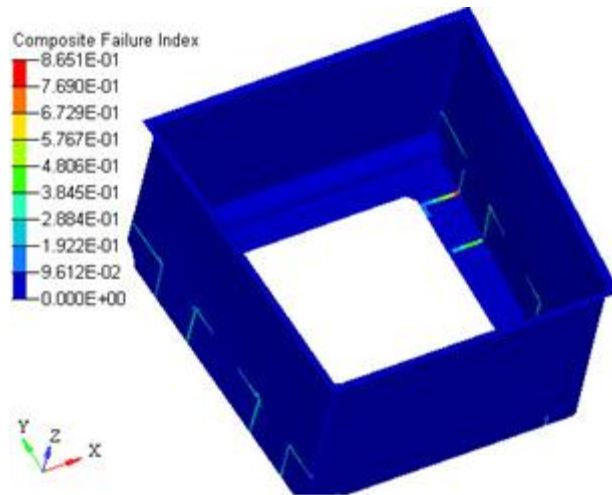
51. ábra: Az akkumulátorház elmozdulása a nehézségi erővel terhelve a szerkezetet



52. ábra: Az akkumulátorház elmozdulása oldalirányú terhelés esetén

Az ábrákról leolvasható, hogy a nehézségi erővel történő terhelés során a maximális elmozdulása a kompozit terméknek 0,557 mm, az oldalirányú terhelés esetén 0,367 mm. Az elmozdulás mellett vizsgáltam a tönkremenetelt is a szoftver segítségével. A

vizsgálat során a Failure Index maximális értéke 0,861 adódott, ami a határpont alatt van. A vizsgálat eredménye az 53. ábrán látható.



53. ábra: A tönkremenetel vizsgálata

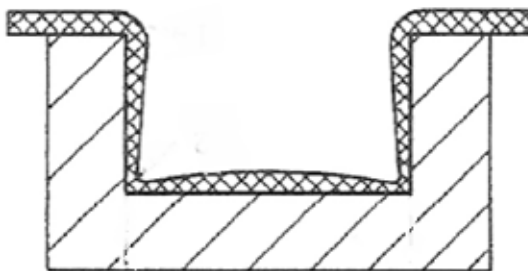
Összegzés

A méretezés során vizsgáltam a terhelés hatására bekövetkező alakváltozását a kompozit akkumulátorháznak. A vizsgálat befejeztével kijelenthető, hogy a termék szilárdságilag megfelel az elvárásoknak. A legnagyobb elmozdulás a nehézségi erővel történő terhelés esetén 0,557 mm-nek, az oldalirányú terhelés esetén 0,367 mm-nek adódott. Továbbá tanulmányoztam a szerkezet tönkremeneteli mechanizmusát. A Failure Index értéke kisebbnek adódott mint 1, így károsodás nem következett be az igénybevétel hatására.

6.4. Szerszámkészítés

A termékkészítés egyik legelső szakasza a szerszámgyártás. Azonban a szerszám típusát, a gyártástechnológiáját vagy az alapanyagát már jóval korábban meg kellett határoznom. A szerszám anyagának a kiválasztásakor figyelembe vettem, hogy a kisszériás gyártás miatt olcsó, könnyen beszerezhető anyagot alkalmazzak. Ugyanakkor tisztában voltam vele, hogy a végleges kompozit termék felületét jelentősen befolyásolja a szerszám felület minősége. Így a fém használata mellett döntöttem. Tekintettel arra, hogy a negatív szerszámból a termék úgymond kizsugorodik valamint a

gyártmány látható, külső felülete érintkezik a szerszámmal, negatív szerszámmal dolgoztam. A negatív szerszám elrendezést az 54. ábra szemlélteti.



54. ábra: a negatív szerszám típus [19]

A szerszám gyártását a csapat műhelyében végeztem. A korábban elkészített méretarányos teríték alapján kivágtam az acéllemezről a formát, majd az oldallapokat lehajlítottam a kívánt helyzetbe. A csatlakozó éleket kívülről, hegesztéssel kötöttem össze. Oldalferdeségnek a kompozit termékek esetén ajánlott $4-5^\circ$ -t használtam a termék szerszámüregből való könnyebb eltávolítása érdekében. A szerszámkészítés során célszerű a szükséges lekerekítési sugarat megvalósítani. A termékkel érintkező, belső élék megfelelő mértékű lekerekítését glett alkalmazásával hoztam létre. A szerszámkészítés folyamatát a csatlakozó felületek felpolírozásával zártam le.

6.5. Az akkumulátorház gyártásának az ismertetése

A szerszám esetleges hibáinak a kimutatására gyártottam egy próbadarabot az akkumulátorházból. Gyártástechnológiának ekkor a kézi laminálást alkalmaztam. A próbadarabot szén erősítőszálból és poliészter gyantából készítettem. A rétegrendet ennél a darabnál a korábbi tapasztalataim alapján határoztam meg. Az első gyártmány sikeres elkészítése után következett a végleges darab előállítása.

Az akkumulátorház gyártását a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Polimertechnika Tanszék Kompozit laboratóriumában végeztem. Gyártástechnológiának a vákuumzsákos injektálást használtam, a magasabb száltartalom valamint a jobb felületi minőség eléréséhez. A szerszámot először 2 réteg pórustömítővel, majd 3 réteg formaleválasztóval láttam el. Az egyes rétegek felvitele közötti időszakot az erősítőszál rétegek és a maganyag kivágásával töltöttem. Ezt a

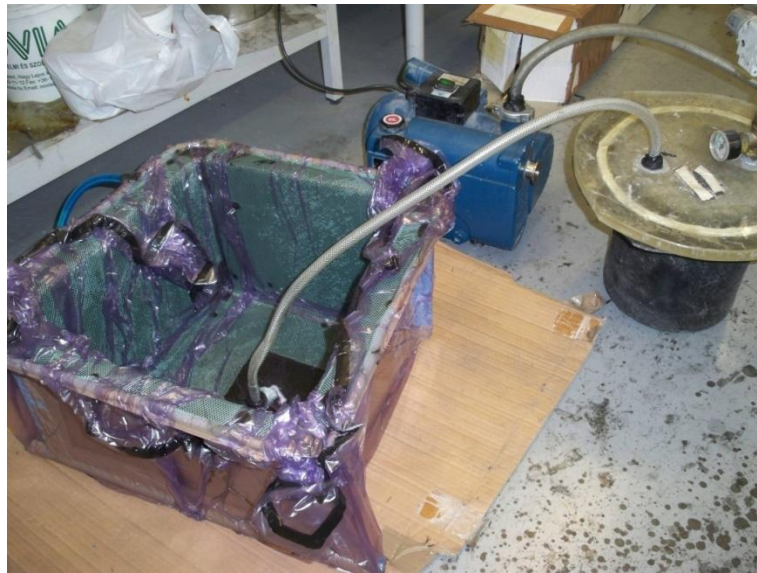
feladatot a kinyomtatott teríték alapján az elektromos olló segítségével könnyen és gyorsan megoldottam. Erősítőszálként 200g/m^2 -es unidirekcionális karbont (UD) és szén szövetet, maganyagnak 5 mm vastagságú PVC habot használtam. A maganyag méretre szabása után 2mm átmérőjű furatokat készítettem rá, a könnyebb gyanta áthaladás érdekében. Injektálás alkalmazásakor a kivágott darabokat a kívánt rétegrendnek megfelelően közvetlenül a szerszámba fektethetjük. Az egyes rétegek szárazon történő rögzítését direkt erre a célra kifejlesztett speciális sprayvel vittem véghez. A folyamatot az 55. ábra illusztrálja.



55. ábra: Az erősítőszál rétegek felhelyezése a szerszámba

Az alkalmazott gyártástechnológia egyik speciális kelléke a letépő szövet. Ez a vékony textil azt a célt szolgálja, hogy a termék térhálósítása után az injektálás további eszközeit könnyebb legyen a kész munkadarabról leválasztani. Az egyes letépő szövet darabokat 10-20mm átfedéssel rögzítettem, azért hogy a kész kompozit gyártmányt a teljes felületen biztosan lefedje a textilanyag. A letépő szövet felhelyezése után következik a zöld gyantavezető háló fixálása. A gyantavezető háló elősegíti a gyanta áramlását az injektálás során. A gyantabevezetés helyén ésszerű 40-50mm széles csíkban két réteget is elhelyezni a megvezető hálóból, a beáramló gyanta kellően magas sebességre történő felgyorsításához. A vákuumzsákos injektálás legkörülményesebb szakasza, a vákuumfólia felhelyezése ezen a ponton következik. A vákuumzsák egyrészt rendkívül sérülékeny, csak maximális precizitással szabad vele dolgozni. Másrészt a fólia anyaga nem elég rugalmas ahhoz, hogy a bonyolult sarkoknál kellően

megnyúljon, teljesen rásimuljon a felületre. Az így kialakult hézag alatti területen csak lényegesen gyengébb minőséget érhetünk el. Csökkennek egyrésről a mechanikai tulajdonságok, valamint a termék külső felületének a színvonala is. Ennek a problémának a kiküszöbölésére gyűrődéseket, anyagtöbbletet alakítottam ki a zsákon, a szükséges részeken. Ezután a vákuumfóliát kétoldalú ragasztóval rögzítettem az alakadó szerszám felületéhez, a szerszám széleken pedig körbevezetve a kerület mentén gyantaadagoló spirált használtam a gyanta gördülékenyebb bejutása érdekében. Kettő csatlakozót alkalmaztam az injektálás során. Az egyiket a vákuumszivattyúnak, ami létrehozta a vákuumot a munkatérben, a másikat a gyanta bevezetéshez. Injektáláskor a vákuum szívóhatására a gyanta átimpregnálja az erősítőrétegeket, a felesleges gyanta pedig a szívócsonkon keresztül a gyantacsapdába jut. Az akkumulátorház gyártásakor a szívócsonkot a ház közepén helyeztem el. Gyantának az SR 8100 típusú epoxi gyantát használtam, ami egy speciális, kis viszkozitású injektáló gyanta. 22g térhálósítót adtam 100g gyantához. A gyanta két komponensének a összekeverése alapos munkát igényel. 4-5 perc keverés után 2-3 percig magára hagytam az oldatot, majd még 2-3 percig kevertem. A vákuumzsákos injektálást az 56. ábra szemlélteti.



56. ábra: A kompozit akkumulátorház injektálása

Az injektálás és a térhálósodás befejeztével szétszedtem a berendezést, majd nekiálltam a termék eltávolításának a szerszámból. A szétbontást nagyon óvatosan kell végezni, ellenkező esetben a gyártmány felületi sérüléseket szenvedhet. A szerszámbontó ékek alkalmazásával sikerült elválasztani, majd kiszedni az

akkumulátorházat a szerszámból. Sajnos kisebb felszíni károsodásokkal is járt ez a procedúra, így kénytelen voltam a rongálódásokat utólag kijavítani. A felszíni hibák korrigálása az 57. ábrán látható.



57. ábra: A kisebb felületi sérülések eltüntetése

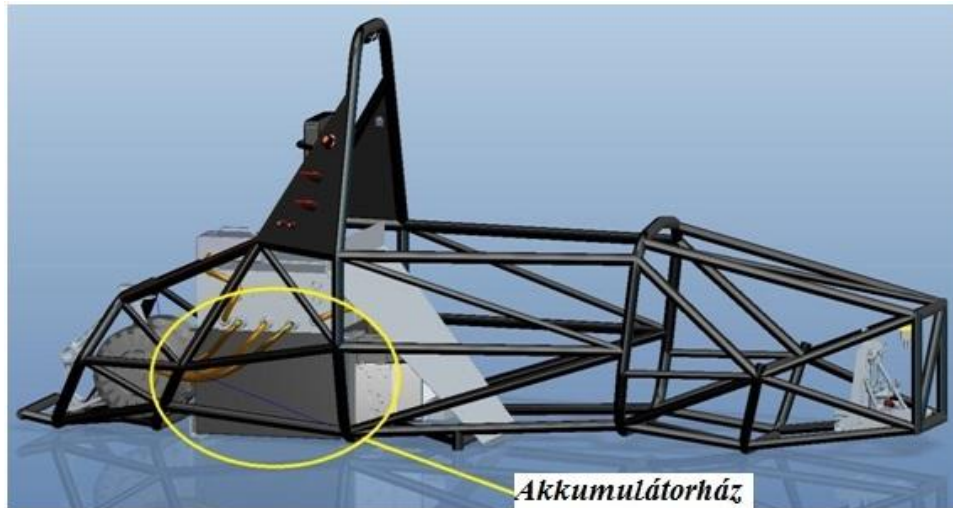
A jobb mechanikai tulajdonságok eléréseért utó térhálósítottam a végleges terméket. Az utó térhálósítás a szárítószekrényben, 80°C -on 6 órán át tartott. A produktum szárítószekrényből való kiszedése után méretre vágtam a szalagfűrészsel az akkumulátorház peremét, majd felcsiszoltam a felületeket. Lezárásként a végleges felületi minőség eléréséhez két rétegben lelakkoztam a terméket. A komplett energiaellátó rendszert az 58. ábra illusztrálja.



58. ábra: A 2012-es elektromos autó energiaellátó rendszere

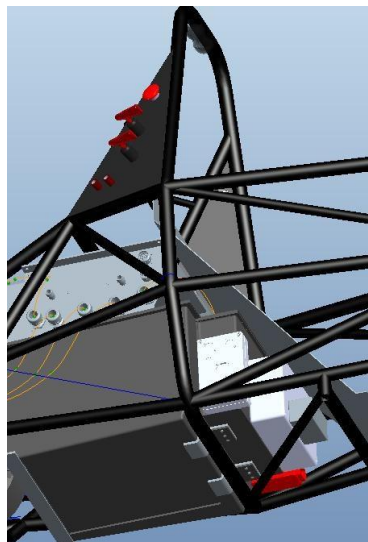
6.6. A termék alkalmazása FS versenyautóban

Az akkumulátor ház a 2012-es évben közvetlenül a pilóta és az elektromos motorok között helyezkedik el, az autó hátsó részében. A házban összesen 84 db LiFePO4 cella található. A cellákkal valamint a kábelezéssel együtt a teljes rendszer tömege 45 kg, ebből a ház kompozit egysége mindössze 1,2 kg.



59. ábra: Az akkumulátorház helyzete az autóban

A rögzítés, a hivatalos versenyszabályzatnak megfelelően a vázhoz történt, a csövekhez hegesztett hajlított profilok segítségével. A kötést, a szerelhetőség miatt csavarokkal valósítottam meg.



60. ábra: Az akkumulátorház felfogatása a vázhoz

7. Összefoglalás

A dolgozatom ismerteti a tervezését és a gyártását az elektromos Formula Student versenyautó polimer kompozit akkumulátorházának.

A termék méretezése előtt méréseket végeztem az anyagtulajdonságok pontos meghatározásához. A vizsgálatokhoz próbatesteket készítettem. Erősítőszálnak szén unidirekcionális szövetet (UD) valamint szövetet, mátrixanyagként pedig epoxi gyantát alkalmaztam. Készítettem csak UD-ből, csak szövetből illetve az ezeket tartalmazó szendvicsszerkezetekből is próbatesteket. A szabványos próbatestek mellett készítettem speciális rétegrendű laminátokat, amelyeken szakító valamint hajlító vizsgálatokat végeztem, emellett végelelemes módszerrel (VEM) szimuláltam ugyanezekkel a rétegrendekkel illetve szálirányokkal rendelkező próbatesteken a szakító és a hajlító vizsgálatokat. Összehasonlítottam a kapott anyagjellemzőket a valós és a számolt esetekben.

Az akkumulátorház számítógépes tervezése a 3D-s modell elkészítésével indult. Ezt a kiindulási modellt felhasználva méreteztem a végleges geometriájú kompozit házat, amit a Hyper Works szimulációs programmal végeztem.

A méretezést követően az akkumulátorház fém szerszámának majd a termék prototípusának az elkészítése következett. A szerszám tökéletesítése után, felhasználva a próbadarab gyártása során elsajátított tapasztalatokat, előállítottam a végleges terméket. A gyártási módnak a vákuum-injektálást választottam, amellyel magas száltartalmat és homogén anyagminőséget tudtam elérni.

Elmondhatjuk, hogy az autóba történő beszerelés óta több mint 150 km versenytempóban történő autózás után, a polimer kompozit akkumulátorház még mindig teljes mértékben ellátja a feladatát az elektromos autóban, amellett hogy 2 kg-al könnyebb az előző évi konstrukciónál.

Úgy gondolom, hogy a dolgozatban ismertetett jelenlegi konstrukció, jelentős előrelépést jelent a 2011-es megoldáshoz képest. A 2013-as verzió viszont egyértelműen tartogat még mérnöki kihívásokat. Egyrészt a rétegrendek további optimalizálása súlycsökkentést, a korszerűbb szerszám alkalmazása igényesebb felületi minőséget eredményezhet. Másrészt további teherviselő szerepek átvállalása is megvalósítható az egyéb alkatrészekről.

8. Német nyelvű összefoglaló

Meine Arbeit enthält die Planung und die Herstellung von dem Composite Batterietrog unseres elektrischen Formula Student Bolieden.

Vor der Planung habe ich durch Messungen die Eigenschaften von verwendetem Materiale klar definiert. Exemplaren haben wir erst für Mess-Testen hergestellt. Die Verstärk-faser wurden aus unidirektionalen Textilien (UD) und Kohlefaser-Gewebe, die Matrixmaterialien wurden aus Epoxid Harz hergestellt. Einige Exemplare wurden rein aus UD, oder rein aus Gewebe oder aus Sandwich-Struktur hergestellt. Die Laminaten wurden in Labor durch Zugfestigkeitstesten und Biegetesten untersucht. Die Laminaten wurden danach in PC mit Finite Elemente Methode Simulation auch „untersucht“. Beiden Ergebnisse (Messung und Simulation) wurden vergleicht.

Der Batterietrog Planung wurde mit Herstellung einem 3D / Solid Works Modell gestartet. Durch Verwendung dieses Modells wurde der tatsächliche Trog skaliert. Dazu wurde Hyper Works Simulation Programm verwendet.

Nachdem Skalierung wurde erst der Metall Werkzeug hergestellt, danach wurde mit Hilfe der neue Werkzeug der erste Prototyp von Trog hergestellt. Die Erfahrungen wurden ausgewertet, der Werkzeug wurde verbessert und der Batterietrog wurde hergestellt. Die Herstellungs verfahren war die Vakuum-Sack Injektion, welche in dieser Falle zur hohe Faserinhalt und homogen Materialqualität führte.

Seitdem der Batterietrog eingebaut wurde, hat der Formula Student Bolieden 150 km in Rennen gelaufen. Die eingebaute Polimer Composite Batterietrog funktioniert einwandfrei.



61. ábra: FRCE02

9. Köszönetnyilvánítás

Elsősorban szeretném megköszönni Kling Sándornak, a tanszéki konzulensemnek a segítségét. A felmerülő problémák esetén mindig számíthattam rá.

Továbbá köszönettel tartozok a Budapesti Műszaki Egyetem Polimertechnika Tanszékének, hogy a kompozit termékek gyártása során használhattam a Kompozit labort valamint a munkámhoz szükséges berendezéseket.

10. Irodalomjegyzék

- [1] <http://www.formulastudent.com/aboutus/history> (2012.09.05.)
- [2] <http://ftr.bme.hu/> (2012.09.08.)
- [3] Helmut Schürmann: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Springer-Verlag, Heidelberg (2007).
- [4] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetem Kiadó, Budapest (2007).
- [5] Polimertechnika Tanszék: Kompozitok mérési segédlet (2010).
- [6] <http://novia.hu/?a=feldolgozas-technologiak> (2012.09.16.)
- [7] Kling S. Diploma dolgozat. BME Formula Student versenyautó kormányának tervezése és gyártása. BME (2010).
- [8] Czigány T., Szebényi G.: Polimer kompozitok technológiája. BME, BSC (2011).
- [9] <http://www.f1technical.net/f1db/cars/476/mclaren-mp4-1> (2012.09.20.)
- [10] <http://www.mclaren.com/history> (2012.10.03.)
- [11] MSZ EN ISO 527-5: Műanyagok. Húzó tulajdonságok meghatározása (1997).
- [12] ASTM D 3846-02: In-Plane Shear Strength of Reinforced Plastics (2001).
- [13] http://www.i9nstron.co.hu/wa/solutions/iso_604_compressive_properties_plastics.aspx (2012.10.20.)
- [14] MSZ EN ISO 604: Műanyagok. A nyomási jellemzők meghatározása (2003).
- [15] MSZ EN ISO 14125: Szálerősítésű műanyag kompozitok. Hajlítási tulajdonságok meghatározása (1998).
- [16] <http://www.formulastudent.com/docs/fs2012-docs/fs2012-rules-final.pdf?sfvrsn=0> (2012.10.21.)
- [17] Csiszár A. Kompozit szerkezetek szilárdságtani modellezése. Tanulmány. Meshining Engineering Kft. (2012).
- [18] S.Heimbs: Crash Simulation of an F1 Racing Car Front Impact Structure. In 7th European LS-DYNA Conference (2009).
- [19] Polimertechnika Tanszék: Melegalakítás mérési segédlet (2010).