



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

BALOGH FANNI

TDK DOLGOZAT

TERVEZHETŐ TÖNKREMENTELŐ KOMPOZITOK
KÁROSODÁSAINAK ELEMZÉSE AKUSZTIKUS EMISSZIÓS
MÓDSZERREL

Témavezető:

Dr. Szabó Gábor

Egyetemi Docens

Konzulens:

Marton Gergő Zsolt

Doktorandusz

Konzulens:

Dr. Romhányi Gábor

Egyetemi Docens

BUDAPEST, 2024

TARTALOMJEGYZÉK

Jelölések jegyzéke	iv
1. Bevezetés	2
2. Szakirodalmi áttekintés	3
2.1. Kompozitok tönkremenetele	3
2.1.1. Tönkremenetelt befolyásoló tényezők	4
2.1.2. Károsodási formái	6
2.2. Tönkremenetel módosítása és lokalizálása	8
2.2.1. Szívós viselkedést elősegítő eljárások	8
2.2.2. Rétegek közötti tulajdonságok módosításával	11
2.2.3. Tönkremenetel lokalizálása	14
2.2.4. PCL	15
2.3. Roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek	20
2.3.1. Akusztikus emisszió	21
3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések	25
3.1. Felhasznált alapanyagok	25
3.1.1. Erősítőanyag	25
3.1.2. Mátrix anyag	25
3.1.3. Rétegek közötti anyag	25
3.2. Alkalmazott berendezések	25
3.2.1. FDM nyomtató	25
3.2.2. Univerzális anyagvizsgáló gép (szakítógép)	25
3.2.3. Univerzális anyagvizsgáló gép (szakítógép)	26
3.2.4. Akusztikus emissziós mérőberendezés	26
3.3. Vizsgálati módszerek	26
3.3.1. Szakítóvizsgálat	26
3.3.2. Akusztikus emissziós vizsgálat (AE)	26
4. Kísérleti/fejlesztési rész	28
4.1. Károsodási módok jellemzése akusztikus emisszióval	28
4.1.1. Szálszakítás	28
4.1.2. Mátrix-szál elválás	30
4.1.3. Mátrixrepedés	31
4.1.4. Roving szakadás	32
4.1.5. Impregnált roving szakítás	34

4.1.6.	<i>Rétegelválás</i>	36
4.1.7.	<i>Értékelés</i>	38
4.2.	<i>Termék gyártás</i>	38
4.2.1.	<i>PCL réteg</i>	38
4.2.2.	<i>Vákuumzsákos gyantainfúzió</i>	39
4.3.	<i>Eredmények</i>	39
4.3.1.	<i>Szakítóvizsgálat</i>	39
4.3.2.	<i>Lokalizáció vizsgálata</i>	40
4.3.3.	<i>Referencia</i>	41
4.3.4.	<i>1[mm]x0,4[mm]</i>	42
4.3.5.	<i>2[mm]x0,2[mm]</i>	44
4.3.6.	<i>2[mm]x0,4[mm]</i>	45
4.3.7.	<i>2[mm]x0,8[mm]</i>	47
4.3.8.	<i>3[mm]x0,4[mm]</i>	48
4.3.9.	<i>Összegzés</i>	50
5.	<i>ÖSSZEFOGLALÁS</i>	51
5.1.	<i>Magyar nyelvű összefoglaló</i>	51
5.2.	<i>További megoldásra váró feladatok</i>	52
6.	<i>Felhasznált források</i>	53

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
E	Rugalmassági modulusz (Young's modulus/elastic modulus)	GPa
T	hőmérséklet (temperature)	°C

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
σ_B	Szakítószilárdság (tensile strength)	MPa
ε	Relatív nyúlás (relative strain)	%

Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
AE	Akusztikus emisszió (Acoustic emission)
ABS	Akrilnitril-butadién-sztirol (Acrylonitrile butadiene styrene)
BVID	Nehezen észrevehető, ütés okozta károsodás (Barely visible impact damage)
CF	Szénszál (Carbon fiber)
CT	Komputertomográfia (Computed tomography)
DIC	Digitális képkorreláció (Digital image correlation)
EP	Epoxi gyanta (Epoxy resin)
FDM	Ömledékrétegzéses nyomtatás (Fused deposition modeling)
FFF	(Fused filament fabrication)
IRT	Infravörös termográfia (Infrared thermography)
NDT	Roncsolásmentes vizsgálat (Non-destructive testing)
PA	Poliamid (Polyamide)
PAN	Poliakrilnitril (Polyacrylonitrile)
PCL	Polikaprolakton (Polycaprolactone)
PLA	Politejsav (Polylactic acid)
PMMA	Polimetil-metakrilát (Polymethyl methacrylate)
SEM	Pásztázó elektronmikroszkóp (Scanning electron microscope)
SHM	Üzem közbeni állapotjellemzés (Structural health monitoring)
UD	Unidirekcionális (Unidirectional)

1. BEVEZETÉS

A kompozit anyagok az utóbbi évtizedekben egyre inkább előtérbe kerültek, és ma már számos iparágban – az autóiipartól kezdve a légi közlekedésig – kiemelt szerepet játszanak. Különlegességük abban rejlik, hogy a gyártók különböző összetevőket kombinálva képesek elérni olyan tulajdonságokat, amik egyetlen anyaggal nehezen lennének elérhetők. A kompozitok kiválóan megfelelnek a nagy teljesítményt és alacsony súlyt igénylő alkalmazásokhoz, ahol a hagyományos anyagok nem biztosítanak hasonló eredményeket. Azonban, amilyen sokoldalúak, olyan kihívást is jelentenek: ezek az anyagok hajlamosak a hirtelen tönkremenetelre, állapotvizsgálatuk pedig a komplex szerkezetük miatt nehézkes, ami a további terjedésük egyik fő akadálya.

Éppen ezért egyre nagyobb az igény olyan kompozit anyagokra, amelyek előre meghatározott módon képesek elérni az élettartamuk végét – ez az úgynevezett tervezett tönkremenetel. Ez nemcsak biztonságosabbá, de kiszámíthatóbbá is tehetné a használatukat, hiszen előre tudnánk, hogy milyen körülmények között és hogyan kezdődik meg a károsodás és a tönkremenetel folyamata. Ahhoz viszont, hogy elérjük ezt a pontot, alaposan meg kell ismernünk a kompozitok tönkremeneteli módjait, különös tekintettel arra, hogy pontosan lokalizáljuk és előre jelezzük a károsodás kezdőpontját és természetét.

A munkám során arra törekedtem, hogy roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerrel – akusztikus emisszió – feltárjam, hogyan és hol keletkeznek repedések, delaminációk és egyéb károsodási formák ezekben az anyagokban. Az akusztikus emissziós (AE) technika alkalmazásával a kompozit anyagok tönkremeneteli módjait alaposabban megismerhettem, különösen azzal a céllal, hogy megállapítsam, milyen mértékben lokalizálható a tönkremenetel a vizsgált próbatestekben. A kutatás során módosított próbatestekkel dolgoztam, hogy jobban megértsem, hol és hogyan keletkeznek a károsodások az anyagban. Az AE lehetővé tette, hogy részletesen elemezzem a tönkremeneteli folyamat különféle tulajdonságait, beleértve a repedések és egyéb károsodások létrejöttét, fejlődését és lokalizációját. Ezek az információk nemcsak az aktuális vizsgálatokat gazdagítják, hanem alapot nyújtanak a kompozit anyagok jövőbeni tervezéséhez és biztonságosabb felhasználásához.

A kutatás során kidolgozott részletes elemzési módszerek remélhetőleg hozzásegítenek ahhoz, hogy a kompozit anyagok ipari alkalmazása megbízhatóbbá váljon, és ne csak a mechanikai teljesítmény, hanem a hosszú távú biztonság és előrejelezhetőség is az erősségeik közé tartozzon. Az így nyert eredmények a jelen kihívásain túl a jövő mérnöki megoldásaiban is új lehetőségeket kínálhatnak, hozzájárulva a kompozitok még szélesebb körű, kiszámíthatóbb használatához.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A kompozit anyagok többfázisú rendszerek, amelyek eltérő tulajdonságú komponensek, egy erősítő fázis (szén- vagy üvegszál) és egy mátrixanyag kombinációjával készülnek, ezáltal egyesítve az összetevők előnyeit. A tönkremenetel során a fázisok közötti kötés gyengül, repedések és rétegelválás alakulhat ki, amelyek befolyásolják az anyag teljesítményét és élettartamát.

2.1. Kompozitok tönkremenetele

Ahhoz, hogy a tönkremenetel témaköre teljeskörűen átlátható legyen, fontos megérteni a károsodás és tönkremenetel közötti különbséget. A károsodás olyan anyagi vagy szerkezeti hiba, amely lokális változást eredményez, és befolyásolja az alkatrész anyagi vagy mechanikai tulajdonságát. Tönkremenetel alatt pedig azt értjük, amikor az alkatrész már nem képes ellátni az alapvető funkcióját. Szénszálas kompozitok esetében általában a szerkezeti teherbírást tekintjük elsődleges funkciónak, azonban más tulajdonságokra is vonatkozik, mint például elektromos vezetőképeség vagy hővezetés. [1,2]

A kompozitok és a fémek tönkremenetele jelentősen eltér egymástól. Fémek esetében először egy rugalmas alakváltozás lép fel, amely amíg nem éri el a folyáshatárt reverzibilis, tehát a feszültség megszűnése esetén a deformáció mértéke nullára csökken. Azonban, ha a feszültség eléri a folyáshatárt akkor a fém képlékeny alakváltozást szenved, amely irreverzibilis. Az anyag megnyúlik, majd elszakad. Elmondható tehát, hogy a fémeknél plasztikus alakváltozással megy végbe a tönkremenetel, amely szívós jelleget mutat és fokozatos energiafelszabadulással jár.

A hőre lágyuló polimerek tönkremenetele hasonlít a fémekéhez, de nincs egyértelmű folyáshatáruk a kezdeti rugalmas szakasz után. Bár mindkét anyagcsoport hasonló deformációs viselkedést mutat, a polimerek viszkoelasztikusak, ami azt jelenti, hogy alakváltozásuk három összetevőből áll: azonnali rugalmas, késleltetett rugalmas és maradó deformáció. Ezek aránya időfüggő, és mindhárom jelen van a polimerek alakváltozása során. [1,2]

A hőre nem lágyuló mátrixú kompozitok, mint például a szénszálas epoxigyanta mátrixú kompozitok, közel lineáris alakváltozást mutatnak képlékeny szakasz nélkül, és rideg, katasztrofális tönkremenetellel járnak, amely jelentős, hirtelen energiafelszabadulással jár. Ezek a kompozitok alacsony szakadási nyúlással rendelkeznek, amit elsősorban az erősítőszál szakadási nyúlása határoz meg: üvegszál esetében ez 1,8-5,7%, míg szénszál esetében 0,5-1,5%. A kompozitok szilárdságát is az erősítőszál határozza meg, mivel a mátrix szilárdsága és modulusa alacsonyabb. A kompozit szakadási nyúlása így nagyrészt az erősítőszálak szakadási nyúlásával egyezik meg. A térhálós, hőre nem lágyuló mátrixok minimális alakváltozásra képesek a keresztkötések miatt, de ez is meghaladja az erősítőanyag nyúlását. [1,2]

A kompozitok károsodási mechanizmusai nem olyan jól ismertek, mint a fémeké. A kompozit anyagokban és szerkezetekben hibák keletkezhetnek a gyártási folyamat során vagy a szerkezet/alkatrész élettartama alatt. [1,2]

A gyártási folyamat számos hibát okozhat a kompozitokban. A leggyakoribb hiba a porozitás, amely a mátrixban lévő üregek jelenlétét jelenti. A porozitást helytelen vagy nem optimális keményítési paraméterek okozhatják. Egy másik gyártási hiba az idegen anyagok beépülése a mátrixba, amely lehet például hátlap fólia vagy zsíros ujjlenyomat. [1,2]

2.1.1. Tönkremenetelt befolyásoló tényezők

A kompozitok tönkremenetelét számos tényező befolyásolhatja. Az egyik legfontosabb tényező a szál és a mátrix között kialakuló adhézió. A cél az, hogy a jó tapadás és a határfelület mellett az adhézió a lehető legnagyobb felületen jöjjön létre. Ez az adhézió az alapfeltétele a kompozitok terhelhetőségének. A fajlagos felület korong, illetve hosszú, vékony szál esetén maximális. A korong alakú erősítőanyagot jellemzően nanokompozitokban alkalmazzuk, a szál formájú erősítőanyag alkalmazása a jelentősebb polimer kompozitok esetében. [3]

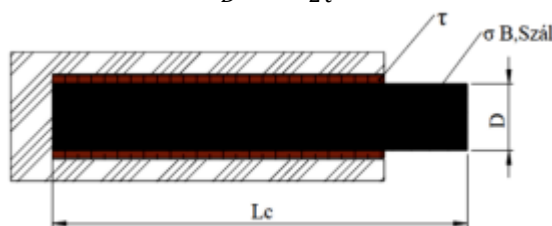
A fajlagos felületet az alábbi egyenlettel lehet meghatározni:

$$\frac{A}{V} = \frac{2r^2\pi + 2r\pi l}{r^2\pi l} = \frac{2}{l} + \frac{2}{r} \quad (1)$$

ahol r a sugár, l pedig a hossz.

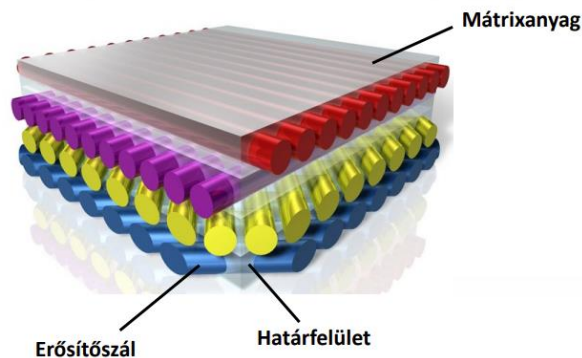
A kompozitok tönkremenetelét nagyban befolyásoló tényező az erősítő szál hossza. Amennyiben a szálhossz nem éri el a kritikus szálhosszt, úgy nem lesz képes a maximális terhelést felvenni, vagyis azelőtt, hogy elérné a szál szakítószilárdságát ki fog csúszni a mátrix anyagból. Ez a kritikus szálhossz meghatározható az ún. Kelly-Tyson összefüggéssel. Ehhez szükséges ismernünk a szál átmérőjét (D), az elemi szál szakítószilárdságát ($\sigma_{B,szál}$), illetve a határfelületi nyírószilárdságot (τ): [3]

$$\frac{L_c}{D} = \frac{\sigma_{B,szál}}{2\tau} \quad (2)$$



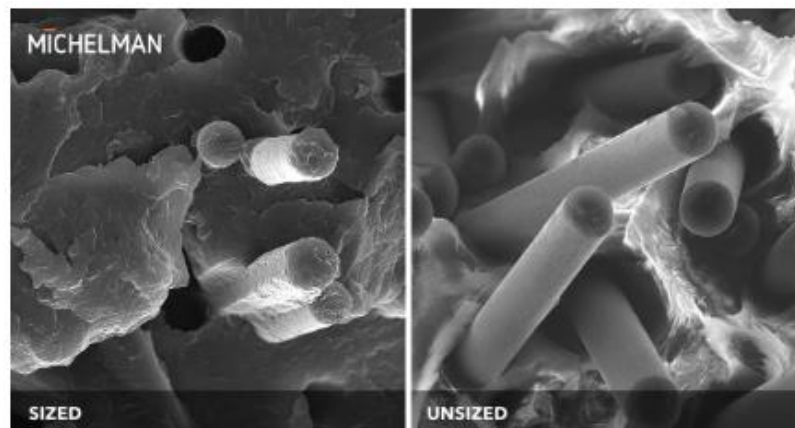
2.1. Ábra Kelly-Tyson összefüggés tagjai [3]

Ez az összefüggés, valamint jelenség olyan kompozitok esetében jelentős, amikor a bennük lévő erősítőszál nem fut végig folytonosan az alkatrészen, tehát nem végtelen hosszúságú. Ezeket rövidszálas kompozitoknak nevezzük, melyeket jellemzően fröccsöntéssel vagy extrúzióval állítanak elő. [3]



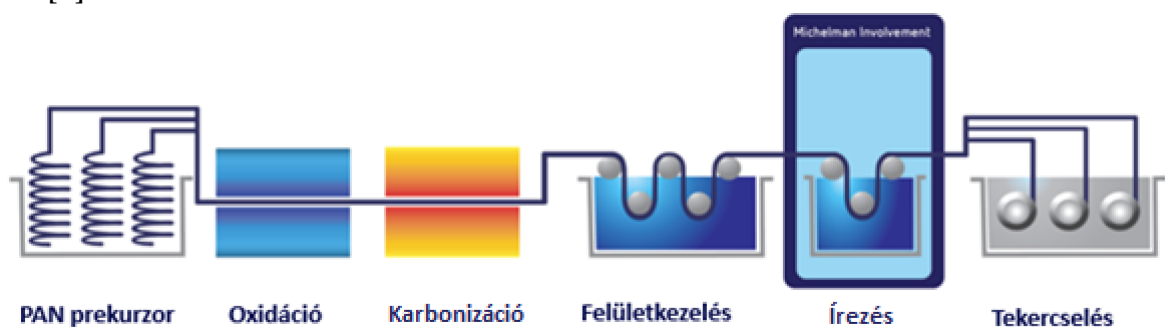
2.2. Ábra Adhézió elemei [4]

Az adhézió „mennyisége” mellett a minősége is kiemelkedően fontos. Ahhoz, hogy jobb minőségű adhézió jöjjön létre, szükséges a szálak felületének kezelése, ugyanis a gyártás utáni, kezeletlen szálakat gyengébb adhézió jellemzi. A felület módosítására különböző eljárások léteznek. A felületkezelés történhet kapcsolószer felhasználásával, a szálfelület vegyszeres kezelésével vagy a szálfelület kisüléssel való kezelésével. Leggyakrabban először a szálnak a felülete kerül módosításra, majd a szálát kapcsolószerrel vonják be, ez az ún. sizing (írezés). [4]



2.3. Ábra Kapcsolószerrel bevont, valamint nem bevont szál közötti különbség [5]

A sizing egy vékony homogén bevonat, amelyet a szálfelületére visznek fel a gyártás során. Ezek a bevonatok jellemzően kapcsolószerből, filmképzőkből, adalékokból, illetve oldószerből állnak. Az oldószer a folyamat végén eltávolításra kerül. [6]



2.4. Ábra Szénszál gyártás folyamata [6]

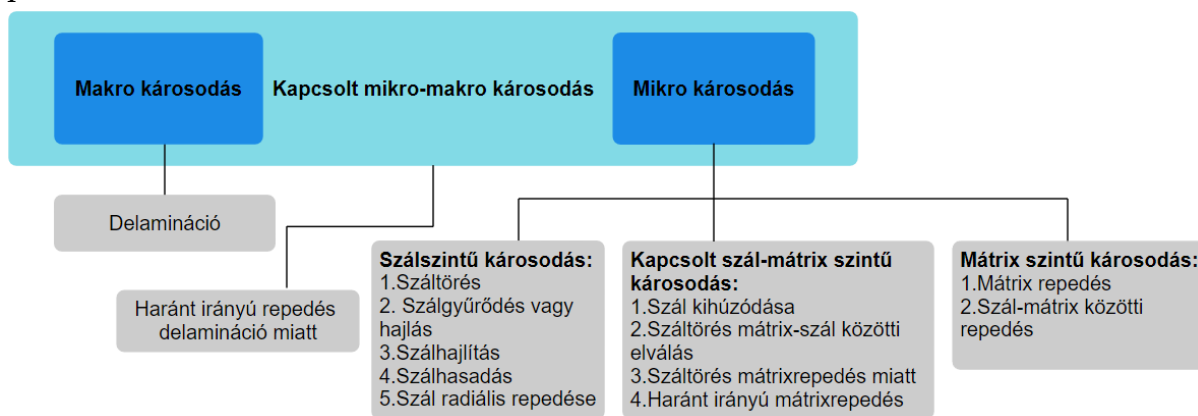
A kialakított bevonat megvédi a szál felületét a kopástól, megakadályozza a szálak törését, valamint egyben tartja a szálköteget. Emellett a szálak vágását is könnyíti, csökkenti a szálpor képződést, valamint az aprító kések élettartamát is növeli. Szövött erősítőanyagok esetében pedig megfelelő rugalmasságot biztosít a törések elkerüléséhez a szövés során. [6]

Az írezés a kompozit szerkezet szempontjából is számos előnnyel jár. Javítja annak mechanikai és kémiai tulajdonságait, mivel fontos szerepet tölt be a mátrix és az erősítőanyag határfelületén létrejövő adhézióban, jelentősen javítja azt. A termikus és a hidrolitikus stabilitás, korrózióállóság, hő és olajállóság, ütésállóság, szakító- és hajlítószilárdság, nyomószilárdság, fáradási teljesítmény, elektromos vezetőképesség is javul. [6]

Fontos, hogy mindig a felhasznált szálnak és mátrixanyagnak megfelelő írezőanyagot válasszuk ki. Nem mindegy, hogy hőre lágyuló, vagy hőre nem lágyuló mátrixanyagot használunk, azon belül is függ attól, hogy milyen a polimer típusa, a szál kiserelési formája, illetve a gyártási folyamat is befolyásolhatja a választást. [6]

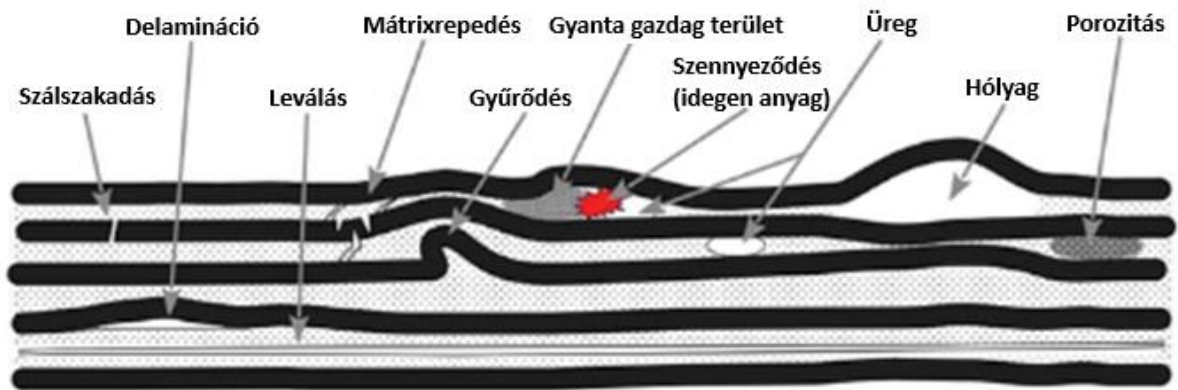
2.1.2. Károsodási formái

A kompozitok esetében számos módon végbe mehet a károsodás. A károsodások eredhetnek az erősítőanyagból, a mátrixból vagy a kettő közötti nem megfelelő kapcsolatból. Megkülönböztetünk mikro és makro szintű károsodásokat, ezek csoportosítása a 2.5. ábrán látható. [7]



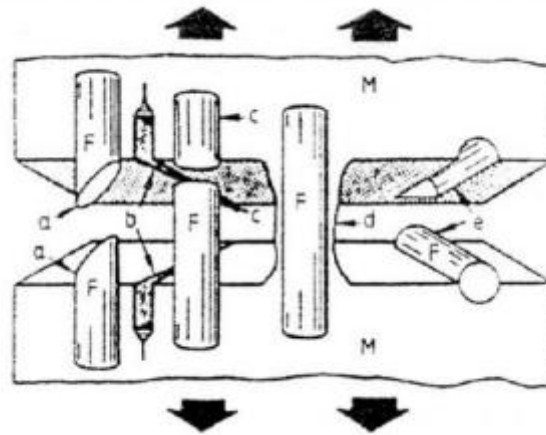
2.5. Ábra Tönkremeneteli típusok csoportosítása [7]

A hibahelyek létrejöhetnek gyártás során, valamilyen igénybevétel következtében, illetve jelen lehetnek az alapanyagban is. A 2.6 ábrán látható számos károsodási mód.



2.6. Ábra Károsodási módok [8]

Az alábbi 2.7 ábrán az igénybevétel hatására bekövetkező károsodások kerülnek részletesebben bemutatásra.



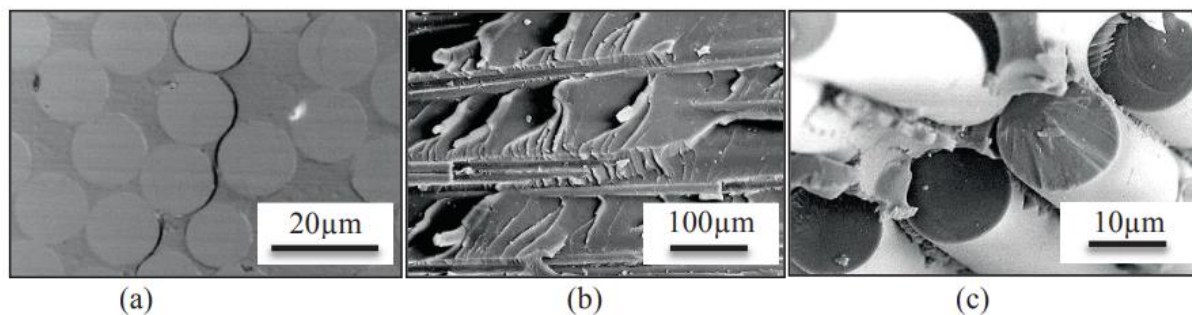
2.7. Ábra Polimer kompozitok károsodási formái: a) szálszakadás, b) mátrixtépődés, c) száلكihúzóódás, d) mátrix deformáció, e) réteg elválás (M:mátrix, F:erősítőszál) [9]

A kompozit anyagok károsodása jellemzően először az alacsonyabb szilárdságú területeken, például a mátrix-szál határfelületeken és a mátrixban kezdődik. Ezeket a kis távolságokon belüli töréseket intralamináris repedéseknek nevezzük. Az ilyen károsodások főként ott jelennek meg, ahol a szálak nem a terhelés irányába esnek, amikor a mátrix deformációja eléri a szakadási nyúlását. Ezek a repedések általában párhuzamosak és szabályosan eloszlottak, és a deformáció sebességével növekedhetnek, de csak csekély hatással vannak az anyag végső szilárdságára. [10]

Rétegelt kompozitok esetén az intralamináris károsodás mellett interlamináris (rétegek közötti) károsodás, azaz delamináció (réteg elválás) is előfordulhat. Amikor repedések alakulnak ki egy rétegben, a szomszédos rétegek megállítják azok terjedését. Az intralamináris repedés csúcsánál fellépő feszültségek miatt a repedések a két szomszédos réteg közötti határfelületen terjednek tovább. A delamináció kialakulhat a rétegek merevségbeli eltérései, gyártási hibák vagy ütési események miatt is. [10]

Amikor a mátrix károsodása eléri egy kritikus szintet, a végső fázisban a szálak törése következik be, amit transzlamináris tönkremenetelnek nevezünk. Ez a

károsodás főként a végső tönkremenetel szakaszaiban fordul elő, különösen ott, ahol a szálak orientációja nagyjából megegyezik a feszültség irányával. Általában az alkatrészek nagy terhelésnek kitett részein figyelhető meg. A 2.8 ábrán látható pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) felvételek bemutatják a három fő tönkremeneteli módot: a) interlamináris tönkremenetel; b) intralamináris tönkremenetel; c) transzlamináris tönkremenetel. [10]



2.8. Ábra Tönkremeneteli formák (SEM) [10]

2.2. Tönkremenetel módosítása és lokalizálása

Mint ahogy a fentiekben említésre került, a szénszálas kompozitok gyakran előjel nélkül, véletlen helyen, robbanásszerűen mennek tönkre. Azonban ez felhasználásuknak határt szab. Ahhoz, hogy a kompozitok alkalmazási területe növekedhessen, szükséges a tönkremenetelnek a kontrollálása, lokalizálása. Ezzel növelhető a biztonság és a hatékony alkalmazhatóság.

Amennyiben a károsodást vagy tönkremenetelt sikerül egy előre meghatározott területre lokalizálni, azzal lehetőség nyílik annak monitorozására. Azt a területet, melyre a tönkremenetel lokalizálásra kerül, szenzorokkal megfigyelés alatt lehet tartani. Ennek segítségével folyamatos információ kapható a termékről és annak állapotáról. Ezzel megelőzhetőek esetleges balesetek, mivel időben cserélhető vagy javítható a problémás alkatrész.

Az alábbiakban bemutatásra kerülnek olyan módszerek, amelyekkel kompozitok esetében kedvezőbb tönkremenetelt lehet elérni. Ez létrejöhet szívós viselkedést elősegítő eljárásokkal, tönkremenetel lokalizálásával, esetleg egy kívánt tönkremeneteli formát biztosító módszerekkel.

2.2.1. Szívós viselkedést elősegítő eljárások

A szívósítás célja az anyag repedésterjedéssel szembeni ellenállóképességének növelése. A repedés akkor kezd terjedni, ha a repedés energiája meghaladja az anyag repedési ellenállását. A szívós viselkedés fokozatos energiefelszabadulást biztosít, ami lehetővé teszi a károsodási folyamat megfigyelését és a tönkremenetel előrejelzését, illetve megelőzését. [11]

A szálerősítésű polimer kompozitok nem képesek hagyományos értelemben vett szívós viselkedésre, mivel nem tudnak képlékeny alakváltozást produkálni. Azonban megfelelő módosításokkal elérhető egy képlékenyszerű alakváltozás, amely során a feszültség-alakváltozás görbe két szakaszra osztható: egy lineárisan rugalmas és egy nemlineáris, képlékeny deformációhoz hasonló szakaszra. Ezt a jelenséget pszeudo-duktilis viselkedésnek nevezzük, mivel a nemlineáris viselkedést nem a képlékeny deformáció, hanem más jelenségek okozzák. [11]

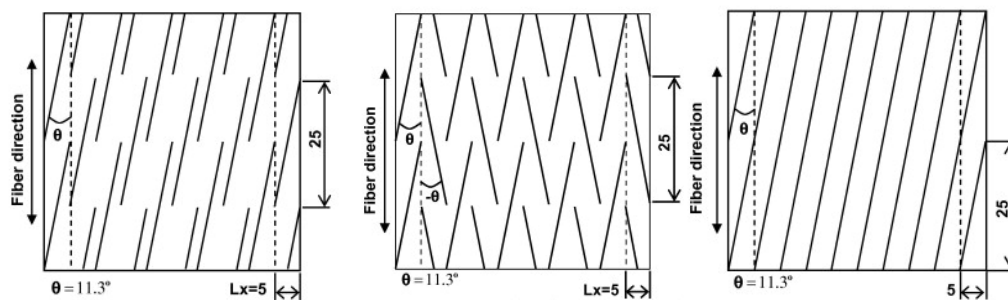
A pszeudo-duktilis kompozitok előállításának több módját is kidolgozták, amelyek három csoportba sorolhatók attól függően, hogy a kompozit melyik fázisát módosították: az erősítőanyagot, a mátrixot vagy a határfelületi adhéziót. Mindhárom módszerrel sikerült szívósabb, pszeudo-duktilis kompozitokat létrehozni. [11]

2.2.1.1. Erősítőanyag módosításával

A szénszálas kompozitok duktilitásának növelése érdekében gyakran alkalmazzák a hibridizációt, amely során a szénszál erősítőanyagot egy nagyobb deformációs képességű anyaggal kombinálják. Az 1970-es években Bunsell és Harris [12], valamint Summerscales és Short [13] kutatásai kimutatták, hogy a hibrid kompozitok képesek kihasználni az egyes erősítőanyagok előnyös tulajdonságait, miközben csökkentik azok hátrányait. Például a szénszálas erősítést üvegszállal kombinálva a kompozit egyszerre rendelkezik a szénszál alacsony sűrűségével és nagy szilárdságával, valamint az üvegszál nagy szakadási nyúlásával.

Swolfs és társai [14] kutatásai kimutatták, hogy az üvegszálas-szénszálas kompozitok esetében a rétegrend jelentős hatással van az anyag tulajdonságaira. Ejtődárdás és hárompontos hajlító vizsgálatok során megállapították, hogy az üvegszál tartalom növelésével a szakítószilárdság és a modulus csökken. Azok a minták, amelyek külső rétegükben üvegszálas erősítést tartalmaznak, a legjobb energiaelnyelő képességgel rendelkeznek, és fokozatos tönkremenetelt mutatnak. Ez azt jelenti, hogy míg a szénszálak alacsonyabb szakadási nyúlásuk miatt töredezni kezdenek, az üvegszálak továbbra is deformálódnak, így növelve a kompozit duktilitását.

A szénszálas kompozitok szívósításának egyik módszere a szálerősítés folytonosságának megszakítása. A szálak különböző mintázatban történő lokális megszakítása lehetővé teszi a rendszer nagyobb deformációját, mivel a szálszakadások magasabb alakváltozási szinten jelennek meg, így növelve a kompozit energiaelnyelő képességét. Li és társai [15] különböző vágásminták hatását vizsgálták szénszál erősítésű prepregen. A 2.9 ábrán a különböző vágásminták láthatók.



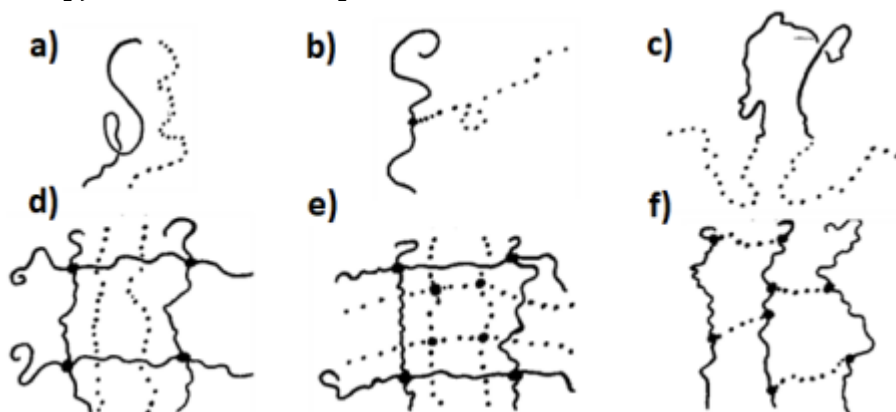
2.9. Ábra Különböző vágásminták: Átlós megszakítás, Biaxiális kialakítás, Folytonos megszakítás [15]

Azonban ezek szakítószilárdsága alacsonyabb volt az eredeti, vágások nélküli kompozitokhoz képest. A módszer hátránya, hogy bár szívósabb viselkedést eredményez, a kompozit szakítószilárdsága jelentősen csökken.

Több kutatás is foglalkozott adhéziógyengítő anyagok szívósságra gyakorolt hatásával. Az első eljárást Mullin és társai [16] fejlesztették ki. A szénszálat poliuuretánnal, illetve ezüsttel és ólommal vonták be. A CVD eljárással felvitt fémek nem javították a szívósságot, azonban a PUR jó eredményeket mutatott. Az eljárást Atkins és társai [17] továbbfejlesztették azzal, hogy változó erősségű adhézióval rendelkező szálakat hoztak létre. Az eljárással 400%-os javulást értek el a rétegek közötti törési szívósságában úgy, hogy a szakítószilárdság kevesebb mint 10%-kal csökkent. A módszer továbbfejlesztésére jelenleg is folynak kutatások.

2.2.1.2. Mátrixanyag módosításával

A hőre nem lágyuló mátrixanyagok esetében a bennük lévő térhálókötések egy merev, de törékeny anyagot eredményeznek. Ennek hátránya, hogy a létrejött repedések könnyedén tovább tudnak terjedni. Azonban lehetőség van arra, hogy ezen tulajdonságuk javuljon. Ezt különböző mátrixanyagok kombinálásával lehet elérni. A hőre nem lágyuló mátrixhoz különböző adalékanyagok, például gumi vagy termoplasztikus polimer, hozzáadásával a rideg viselkedés javítható. Ezeket a két vagy több komponensű mátrix rendszereket keverékeknek nevezzük, melyek struktúrájuk alapján különböző csoportokba sorolhatóak.[18]



2.10. Ábra a Kétkomponensű polimer keverékek: a) blend; b) ojtott kopolimer; c) ojtott blokkkopolimer; d) részleges-IPN; e) IPN; f) Kereszt-kötésekkel kapcsolódó kopolimer [18]

Blendek esetén nem jön létre a két komponens között kémiai kötés. Kopolimerek esetében azonban nemcsak fizikai kapcsolat, hanem kémiai kötések is összetartják az alkotó elemeket. IPN esetében az alkotók egy 3D rendszert alkotnak és az összetevői térhálósak, részleges-IPN esetén pedig a rendszer komponensei között lineáris polimer is megtalálható. [18]

Blendek előállítása esetében a leggyakrabban előforduló lehetőség az epoxigyanta keverése termoplasztikus polimerrel. A mátrixgyantába a termoplasztikus polimert szál vagy granulátum útján keverik bele. Ezután a keveréket magas hőmérsékletre melegítik, ekkor a mátrixanyag térhálósodásával egyidőben a termoplasztikus polimer megömlik. A blendek előnye, hogy nem csökkentik a szilárdságot, valamint a rugalmassági modulust, valamint károsodás esetén ismételt melegítés hatására a hőre lágyuló polimernek köszönhetően egy kisebb teherbírású, de nagyrészt ép kompozit kapható. [18]

Gumiszármazékok hozzáadásával kopolimer rendszereket lehet létrehozni. Ennek alapvető feltétele, hogy a hozzákeverendő gumi kompatibilis legyen a mátrixanyaggal. Ha ez nem valósul meg, akkor nem tud létrejönni a megfelelő kapcsolat a két fázis között. Mivel legtöbbször nem kompatibilis anyagokat szükséges összekeverni, ezért a hozzákeverendő gumi felületét felületaktív szerekkel kezelik, melynek köszönhetően a két fázis között elsőrendű kötések is létre tudnak jönni. [18]

AZ IPN rendszerek 3D rendszerek. A bennük jelenlévő két vagy több fázis egymásba hatolásával, egymásba gabalyodásával jönnek létre. A komponensek között elsőrendű kötés nincs, azonban a fázisok folytonosak, így szétválasztani nem lehet őket. [19]

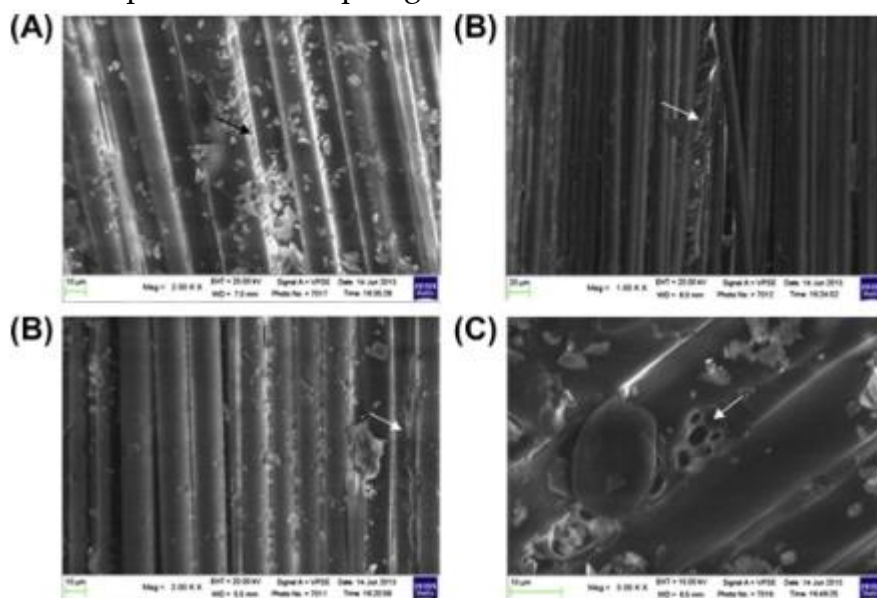
A részleges-IPN esetében a bekevert termoplasztikus anyag valójában nem oldódik fel, csak a nagy térhálósodási hőmérsékleten megolvad és lokálisan eloszlik a rendszerben. [19]

2.2.2. Rétegek közötti tulajdonságok módosításával

A kompozitok egyik hátrányos tulajdonsága, hogy található bennük bizonyos számú és méretű kezdeti, jellemzően mikrométerű hiba. A gyártási hibákon kívül ezeknek az anyagoknak egy kritikus gyengesége a rétegek közötti (interlamináris) kapcsolódás, amely gyengébb lehet, mint az egyes rétegek szívóssága. A rétegek közötti tulajdonságok javítása különösen fontos a repetésterjedéssel szembeni ellenálóképesség. Alacsony terhelés esetén is megjelenhet delamináció és/vagy mátrix mikrorepedések. Bár ezek kismértékűek, de elegendőek ahhoz, hogy jelentősen csökkentsék a szerkezet terhelhetőségét. Ezen behatásokkal szembeni ellenálóképességet közbenső rétegek (interlayer) alkalmazásával lehet növelni. Ezek a rétegek szívósabb anyagból vannak, mint a kompozit erősítő anyaga, ezáltal nagyobb deformáció képességet és nagyobb energiaelnyelő képességet nyújtanak a kompozitnak. A közbenső réteg számos féle anyag lehet, például vékony

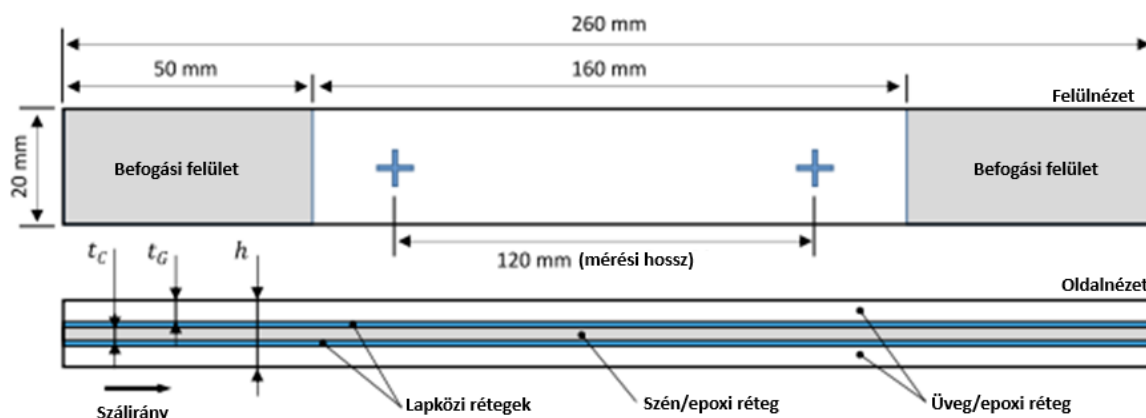
termoplasztikus réteg (fólia), nanoszálak réteg, vagy más típusú erősítő anyag, amely a kompozit fő erősítőanyagánál szívósabb tulajdonságokkal rendelkezik. [11]

Saghafi és társai [20] különböző anyagokból állítottak elő nanoszövetedékeket. A vizsgálataikhoz PCL-ből, PA 6.6-ból, valamint ennek a két anyagnak a keverékéből készítettek nanoszövetedéket elektrosztatikus szálképzéssel. A cél a törési szívósság növelése volt. A kísérleteik során a létrehozott nanoszövetedékek hatását vizsgálták epoxi mátrixú, üvegszál erősítésű kompozitok rétegek közötti tulajdonságaira. Azt tapasztalták, hogy míg a PA6.6-ból készített nanoszövetedékek csak a második módú, azaz csúsztató terhelés esetén mutattak javulást, addig a PCL-ből készült nanoszövetedékek az első módú, vagyis nyitó terhelés esetében is javulást eredményeztek. Morfológiai vizsgálatok során kiderült, hogy a térhálósodási hőmérsékleten a PCL nanoszálak megolvadtak és keveredtek az epoxival, ezzel fellépett egy fázisszeperáció, a PCL pedig második fázisként funkcionált.



2.11. Ábra SEM képek a delamináció törési felületéről: (A) Referencia, (B) PCL-erősített, (C) PCL-erősített (egy másik pozícióban), és (D) Fázisszétválás a PCL-erősített esetben[20]

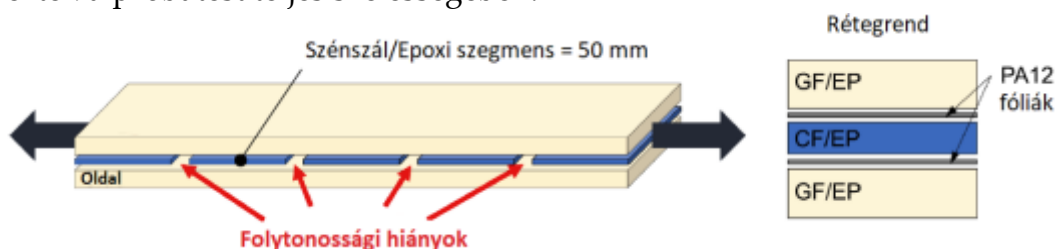
Marino és Czel [21] vizsgálataik során fokozatos tönkremenetelt szerettek volna elérni, a kompozitokra jellemző katasztrofális tönkremenetel helyett. Ezt termoplasztikus polimer közbenső réteg alkalmazásával kívánták elérni. A hibrid kompozit próbatestek szénszál-epoxi, valamint üvegszál-epoxi prepregekből készültek. A rétegek közé pedig ABS fóliát, valamint gyantafilmet helyeztek el. A próbatesteken szakítóvizsgálatot végeztek, ezzel mérve a második módú interlamináris törési szívósságot.



2.12. Ábra Próbatesszt paraméterei [20]

Az elszakított próbatessztet elektronmikroszkóppal is megvizsgálták. Azt tapasztalták, hogy a fóliát nem tartalmazó próbatessztet, ahogyan várható volt, katasztrofális tönkremenetelt mutattak. Ebben az esetben a szélességében a szálak teljesen elszakadtak, ugyanis a szénszálnak alacsonyabb a szakadási nyúlása, mint az üvegnek. Ez teljes delaminációt okozott a szén-, illetve üvegszál réteg között. Azoknál a próbatessztetknél, amelyek ABS fóliát tartalmaztak, a mérés hasonló eredményt adott. Azonban az epoxigyanta réteggel ellátott próbatessztetknél szívósabb viselkedést tapasztaltak. Az epoxi réteg hatására megváltozott a kompozit tönkremeneteli módja. A kompozit a szénszál réteg globális töredezésével és vegyes károsodással ment tönkre, mivel a repedésnek nagyobb térfogatú mátrixanyagon kell áthaladnia a rétegek közötti elválás létrejöttéhez. Ez növelte a kompozit szívósságát. Ezzel szemben az ABS fólia fázisszeperációs, részleges-IPN rendszert alkotott az epoxival, és a delamináció kizárólag az ABS rétegben alakult ki, vélhetően az ABS alacsony nyírószilárdsága miatt. A szerzők feltételezik, hogy magasabb nyírószilárdságú és szívósabb polimer alkalmazásával növelhető a kompozit szívóssága.[21]

Marino és Czel [22] folytatták a kutatásukat a témában. ABS helyett PA12 fóliát alkalmaztak, valamint a szénszál rétegbe folytonossági hiányokat, kivágásokat helyeztek a próbatesszt teljes szélességében.



2.13. Ábra Hibrid kompozit próbatessztet felépítése folytonossági hiányokkal [22]

A próbatessztetket itt is szakítóvizsgálatnak vetették alá, majd autoklávba helyezték a károsodott próbatessztetket, majd ismételt szakítóvizsgálatot végeztek.

A PA12 fólia kétféle szerepet játszik a kompozit anyagokban. Egyrészt, közbelső réteggént növeli a kompozit szívósságát, másrészt lehetőséget nyújt a kompozit hőkezeléssel történő javítására is. A kompozit interlamináris törési szívóssága

jelentősen nőtt: a korábbi $2,0 \text{ kJ/m}^2$ -es érték megduplázódott, elérve a $4,0 \text{ kJ/m}^2$ -t. A sérült kompozit javítása úgy történik, hogy a PA12 fólia megolvad (178°C felett és $0,7 \text{ MPa}$ nyomás mellett), kitölti a delaminált rétegek közötti teret, majd megszilárdulva erős kötést hoz létre. Ennek köszönhetően a javított kompozitok mechanikai tulajdonságai teljesen visszaállnak az eredeti szintre, a javítás hatásfoka 100%-os. Emellett a javított kompozitok továbbra is megőrzik szívós és pszeudo-duktilis viselkedésüket. [22]

Zhang és társai [23] a szénzál/epoxigyanta prepregok szívósítását polimetil-metakriláttal (PMMA) vizsgálták, amit tintasugaras nyomtatással vittek fel különböző mintázatokban. A PMMA részecskék lassították a repedésterjedést és rugalmasan elnyelték az energiát, miközben gyenge adhézió miatt fázisszeparáció jött létre a mátrix és a PMMA között. Ez megnövelte a töretfelületet, eltérítve a repedést. A vizsgálatok kimutatták, hogy a legjobb szívósság hexagonális mintázattal érhető el, míg a téglalap és vonal mintázatok kevésbé voltak hatékonyak a repedés útjának befolyásolásában.

2.2.3. Tönkremenetel lokalizálása

Gyakorlati alkalmazásokban a kompozitok tönkremenetelének lokalizálása előnyös lehet, mert biztonságosabbá teszi a törést és lehetővé teszi a károsodás valós idejű nyomon követését szenzorok segítségével. A lokalizált károsodás megkönnyíti a javítást is, mivel a sérült területet könnyebben lehet foltozni vagy helyben térhálósítva javítani. A kompozitokban előforduló nano- és mikroméretű hibáknál fontos, hogy a lokalizáció során csak minimális negatív hatással legyenek a mechanikai tulajdonságokra, miközben nagyobb mértékű gyengítést alkalmaznak a kívánt helyen.

A kompozitokban rétegek közötti anyagok elhelyezésével mesterséges folytonossági hiányokat hozhatunk létre, amelyek a károsodás lokalizálását segítik elő. A delamináció hatása függ a terhelés típusától: húzó igénybevételnél a szilárdság csak 10-15%-kal csökken, míg nyomásnál jelentős szilárdság- és moduluscsökkenés tapasztalható. Nyíró igénybevételnél a hatás mérsékelt. Ez a technika főként húzó alkatrészeknél, mint kábelek és rudak, valamint bizonyos nyírásnak, hajlításnak vagy csavarásnak kitett alkatrészeknél alkalmazható. [21]

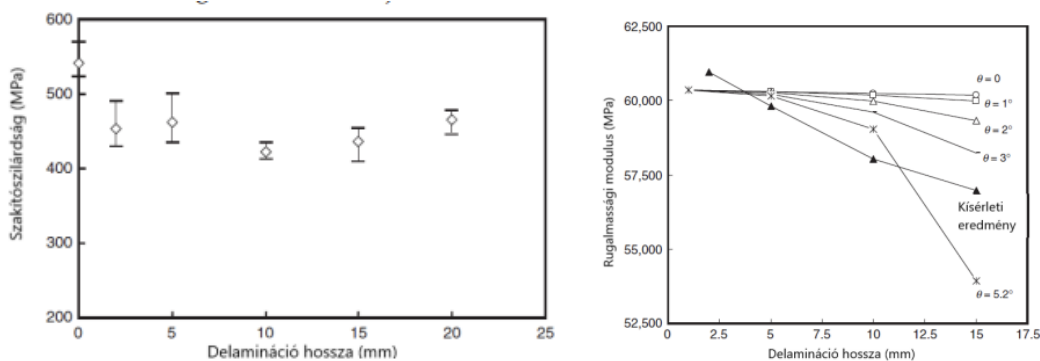
Egyes közbenső rétegek, mint például a polimer fólia, nemcsak a szívósság növelésére, hanem a károsodás lokalizálására is alkalmasak, lehetővé téve a tönkremenetel előre meghatározott helyen történő bekövetkezését. [21]

A mesterséges delaminációkat számos kutatásban vizsgálták a polimer mátrixú szálerősítésű kompozitok tulajdonságainak és tönkremenetelének megértése érdekében, valamint a pontosabb anyagmodellek készítése céljából.

Clarke és Pavier [24] 1993-ban mesterséges hibahelyeket hoztak létre kompozitokban, PTFE (Teflon) és alumínium fólia alkalmazásával. Eredményeik szerint egy réteg PTFE fólia hatékonyan idéz elő rétegelválást, hasonlóan az alacsony

sebességű becsapódásokhoz. Későbbi vizsgálataik során Pavier és társai [25] a delamináció geometriáját és elhelyezkedését vizsgálták nyomó igénybevételnél, és kimutatták, hogy a delamináció méretének növelésével a nyomószilárdság csökken. A kihajlás volt a jellemző tönkremenetel, amely a delamináció pozíciójának függvényében lehetett lokális (csak a delamináció feletti rétegek) vagy globális (a delamináció feletti és alatti rétegek is). A delamináció továbbterjedését nem tapasztalták tönkremenetel előtt.

Reis és munkatársai [26] a delamináció hatását vizsgálták CF/EP laminátok mechanikai tulajdonságaira, PTFE fóliát alkalmazva mesterséges delaminációk létrehozására. Szakítóvizsgálatokkal megfigyelték, hogy a delamináció hossza alig befolyásolja a szakítószilárdságot és a fáradásos szilárdságot. Ugyanakkor a rugalmassági modulus csökkent a delamináció méretének növekedésével, ami a delamináció szögeltérésének és hosszának köszönhető. A végelemes modellek megerősítették ezeket az eredményeket, amely során a mérési adatokkal összhangban hasonló modulus értékeket kaptak.



2.14. Ábra Szakítószilárdság, valamint a rugalmassági modulus a delamináció hosszának függvényében [26]

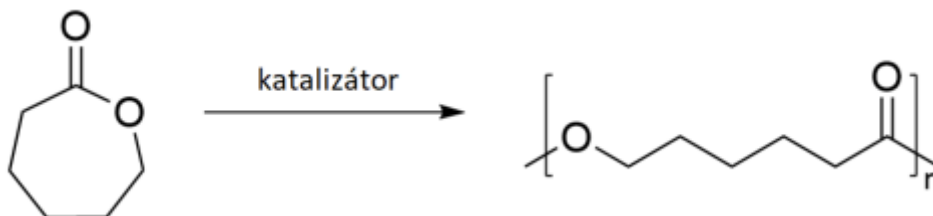
Juarez és Leckey [27] innovatív módszert dolgoztak ki mesterséges delaminációk és porozitás létrehozására szilícium-dioxid aerogél használatával. Az aerogél, amely 95-99% levegőt tartalmaz és rendkívül alacsony sűrűségű, jobban reprodukálja a valós delaminációt, mint a hagyományos PTFE fólia. Az aerogélből készült mesterséges delaminációk alkalmasak roncsolásmentes vizsgálatokra, például ultrahangos mérésekre, mivel hasonló jeleket adnak, mint a valós delaminációk. Ezen kívül az aerogél por lehetővé teszi a kompozitok mikroméretű üregeinek szabályozott szimulálását, amit eddig nem lehetett megvalósítani.

2.2.4. PCL

A polikaprolakton (PCL) egy biológiailag lebomló, részben kristályos alifás polieszter, amelyet az 1930-as években fedeztek fel. Kezdetben nem nyerte el a népszerűséget gyenge mechanikai és termikus tulajdonságai miatt. Napjainkban azonban egyre inkább előtérbe kerül bizonyos speciális alkalmazásokban, például az orvostechikai területen. [28-31]

2.2.4.1. Előállítás

A polikaprolakton (PCL) előállítása az ϵ -kaprolakton gyűrűfelnýtásos polimerizációjával történik, katalizátor, például széntartalmú oktanoát alkalmazásával.



2.15. Ábra PCL előállítás ϵ -kaprolaktánból [29]

A PCL olvadási hőmérséklete 58-65 °C között mozog, ami az egyik legalacsonyabb érték a mesterséges polimerek között. Üveges átmeneti hőmérséklete -60 °C, szakítószilárdsága körülbelül 12-30 MPa, rugalmassági modulusza körülbelül 400 MPa, míg a szakadási nyúlása 400-900% között változik. Alacsony hőállósága miatt gyakran kombinálják más polimerekkel, mint például PLA, PC, PEO és kukoricakeményítő, hogy javítsák tulajdonságait.[28-31]

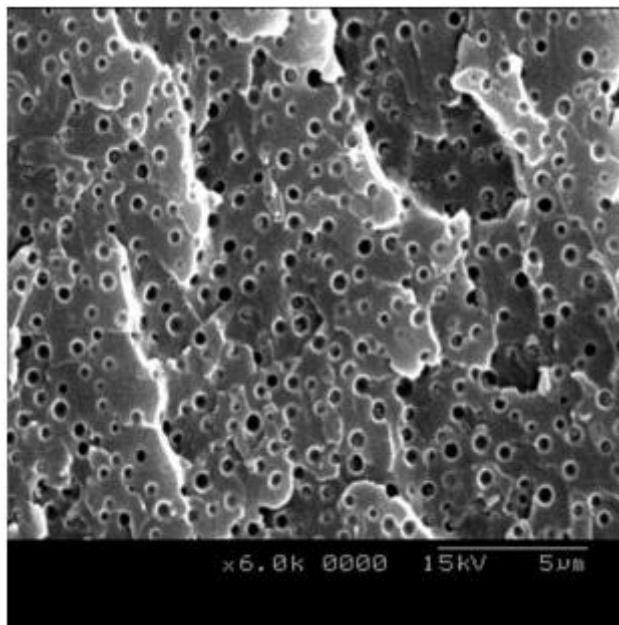
A PCL fő alkalmazási területe az orvostechika, ahol szövetek és sejtek implantálására, valamint gyógyszeres kapszulák beültetésére használják, mivel a testben található enzimek teljes mértékben lebontják. Emellett elterjedt az élelmiszeriparban is, például csomagolási megoldásokban, valamint az additív gyártás során. [28-31]

2.2.4.2. Összeférhetősége az epoxigyantával

Yang és munkatársai [32] PCL és PDMS triblokk kopolimer oldódását vizsgálták DGEBA (Bisfenol-A-Diglicidil-éter) típusú epoxigyantában, különféle morfológiai és mechanikai vizsgálatokkal, mint például Fourier-transzformációs infravörös spektroszkópia (FTIR), differenciális pásztázó kalorimetria (DSC), pásztázó elektronmikroszkópia (SEM) és dinamikus mechanikai analízis (DMA). Eredményeik alapján a PCL és az epoxigyanta nem elegyedik, fázisszeparáció lép fel. A PCL arányának növelésével azonban javultak a keverékek törési szívósság és hajlítószilárdság értékei, ami arra utal, hogy a keverék technológiailag kompatibilis rendszerként viselkedik, és nagyobb szívósságot biztosít, mint a tiszta epoxigyanta.

Siddhamalli [33] kutatásában az epoxigyanta PCL polimerrel történő szívósítását vizsgálta, megállapítva, hogy a PCL nem elegyedik a DGEBA epoxigyantával, ami fázisszeparációt eredményez. 30% PCL tartalomnál kettős folytonos szerkezet alakult ki, ami a legerősebb kötést biztosítja a fázisok között, ezáltal a legjobb mechanikai tulajdonságokat nyújtja. Ejtődárdás kísérletek során megfigyelték, hogy az elnyelt energia mértéke nőtt a PCL arányának emelkedésével, ami a két anyag jó technológiai összeférhetőségét bizonyítja.

Karger-Kocsis és társai [34] kutatásuk során két különböző üvegesedési átmeneti hőmérsékletű epoxigyanta PCL-lel történő gyógyítását vizsgálták. Megállapították, hogy a PCL eloszlott fázisként jelenik meg a gyantában, fázisszeparációt okozva. Alacsonyabb PCL tartalom (12,5 wt%) esetén eltérő morfológiájú rendszerek alakultak ki, míg magasabb arány (50 wt%) esetén részleges-IPN rendszert figyeltek meg. A gyógyítási vizsgálatok során megállapították, hogy 80 °C felett a PCL hatékony gyógyító hatást fejt ki, és a részleges-IPN rendszerű keverékek gyógyítási hatásfoka jelentősen magasabb volt az alacsonyabb PCL tartalmú eloszlatott fázisú rendszerekhez képest.



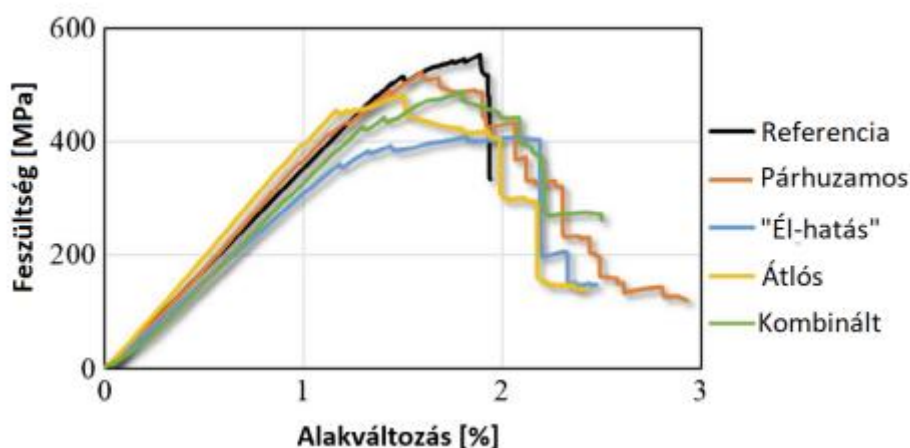
2.16. Ábra PCL és epoxi SEM képe [20]

Elmondható tehát, hogy a PCL valójában nem oldódik az epoxiban, hanem fázishatárt hoz létre, megfelelő részarányok esetén kettős folytonos, részleges-IPN szerkezet alakul ki.

2.2.4.3. PCL alkalmazás rétegek közötti anyagként

A Szebényi és társai [35] kutatásában az additív gyártástechnológia alkalmazását vizsgálták a polimer kompozitok erősítőanyagai és mátrixa közötti határfelület módosítására. A hagyományos fóliás módszer szilárdságcsökkenést okozott, míg a 3D nyomtatás lehetővé tette a lokális inter-layer zónák kialakítását. A kísérleteik során szénszál/epoxi kompozitokat módosítottak 3D nyomtatással készült PCL rétegekkel, ami javította a szívósságot a tönkremenetel során. A hárompontos hajlítóvizsgálat azt mutatta, hogy a PCL réteg növelte a fokozatos tönkremenetelt, míg a hajlítószilárdság és hajlítómodulus nem változott számottevően. A Charpy-féle ütővizsgálat során a PCL mintázat nem befolyásolta a kompozit ütésállóságát. A kutatók vizsgálták a PCL önjavító képességét is, és megállapították, hogy megfelelő hőkezeléssel a teherbírás részlegesen visszanyerhető.

Szebényi és társai [36] előző kutatásukat folytatva pszeudo-duktilis polimer kompozitokat hoztak létre 3D nyomtatott PCL rétegek közötti anyag alkalmazásával, és vizsgálták a mintázat geometriájának hatását. Négy különböző mintázatot (párhuzamos, "él-hatás", átlós és összetett) használtak, és 6 rétegű CF/EP kompozit próbatesteket gyártottak. A hárompontos hajlító vizsgálatok során a módosított kompozitok nagyobb szakadási nyúlást és szívósabb viselkedést mutattak, különösen a párhuzamos mintázat esetében.



2.17. Ábra Hajlítóvizsgálat eredményei [36]

A csepplehúzó vizsgálatok azt mutatták, hogy a PCL réteg lokálisan gyengítette a határfelületi adhéziót, ami repedés-kiindulási pontokként működött, így stabil repedésterjedést eredményezett. A módosított kompozit több energiát tudott elnyelni, mivel a károsodási folyamat során először lokális mikro-delaminációk jelentkezhettek, ami meghosszabbította a repedés útját. [36]

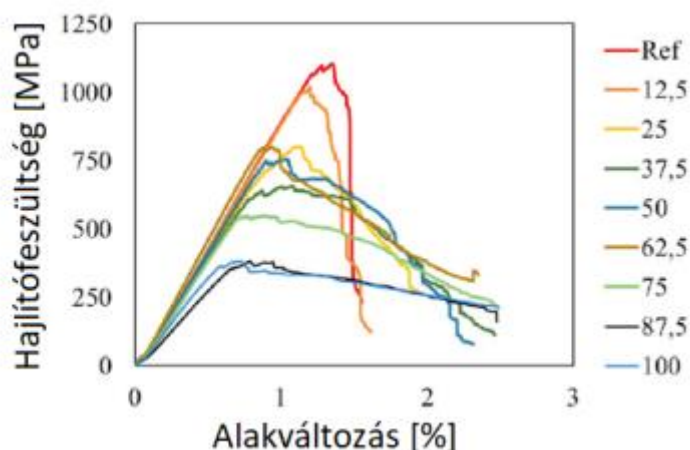
A térhálósítás hőmérsékletének hatását is vizsgálták, és megállapították, hogy szobahőmérsékleten a mintázat méretei változatlanok maradtak, míg emelt hőmérsékleten a PCL körbevette az erősítőszálakat, részben elegyedve az epoxigyantával. Eredményeik alapján a mintázat geometriája jelentős hatással bír a kompozit tönkremeneteli viselkedésére, különösen a mintázat orientációja miatt. [36]

Magyar és társai [11] is pszeudo-duktilis kompozitok létrehozását vizsgálták nyomtatott PCL rétegek közötti anyaggal, biaxiális és átlós mintázatokkal alkalmazva, különböző kitöltési arányokkal (12,5-100%). 6 rétegű UD CF/EP próbatesteket gyártottak, minden réteg közé PCL mintázatot helyezve.

A biaxiális mintázat segítette a repedések terjedését, lokális delaminációkat hozva létre, ami csökkentette a szálszakadások mértékét. Kísérleteik során kvázi-statisztikus és dinamikus méréseket végeztek, beleértve hajlító- és end notched flexure (ENF) vizsgálatokat. Megállapították, hogy a PCL tartalom növekedésével arányosan emelkedett a második módú kritikus törési szívósság (G_{IIC}), 100% kitöltés esetén akár 50%-kal is. A referencia próbatestek hirtelen tönkrementek a G_{IIC} csúcs elérése után, míg a PCL mintázattal rendelkező próbatestek stabil repedésterjedést mutattak, amely

segítette a katasztrofális tönkremenetel megelőzését a mintázat lokális károsodásain keresztül. [11]

A kutatás során hárompontos hajlító vizsgálatokat végeztek, amelyek feszültség-alakváltozás görbéit elemezték. A referencia próbatestek a feszültségmaximum elérése után nem mutattak további ellenállást, míg a PCL rétegek közötti mintázattal módosított kompozitok képlekenyebben viselkedtek, a görbe ellapult, jelezve a fokozatos tönkremenetelt. A PCL növelte a repedésterjedéshez szükséges energiát, és alacsony PCL arányok esetén (50% alatt) a szilárdság nem csökkent számottevően. [11]



2.18. Ábra Három pontos hajlítóvizsgálat feszültség-deformáció görbéi [11]

A PCL termoplasztikus tulajdonságait kihasználva önjavítást is vizsgáltak, amely lehetővé tette, hogy a kompozit alkatrész ideiglenesen üzemben maradjon, visszanyerve az eredeti modulus 50%-át és a hajlító- és ütőszilárdság 30%-át. [11]

A szakirodalom alapján a PCL-t főként pszeudo-duktilis kompozitok létrehozására használták, de a tönkremenetel lokalizálásának kérdése nem kapott figyelmet.

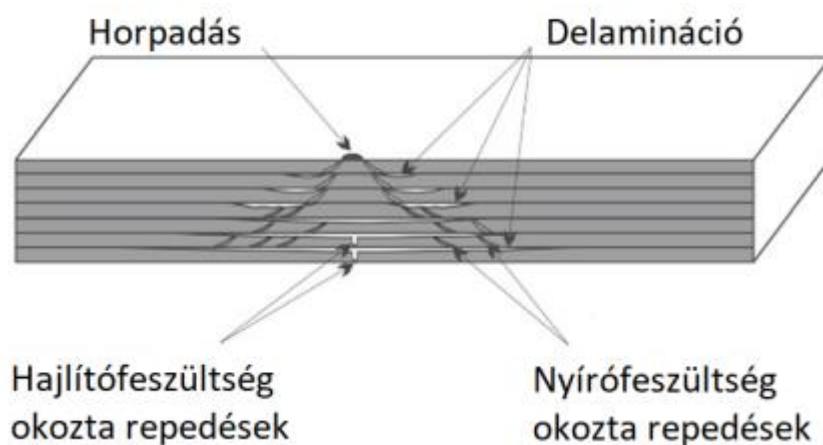
Marton és társai [37] a kompozitok előre tervezett tönkremenetelével foglalkozó kutatásukban olyan eljárást fejlesztettek ki, amely a tönkremeneteli hely és mód megtervezését célozza. Kutatásuk során polimer kompozitokat állítottak elő, amelyek lokálisan gyengített tapadású zónát tartalmaznak. Ennek elérése érdekében az erősítőanyag felületére polikaprolakton (PCL) rétegek közötti anyagot vittek fel FFF (fused filament fabrication) eljárással, ami egyedülálló lehetőséget kínál az anyag tönkremenetelének kontrollálására és lokalizálására.

A vizsgálatok során ütő- és szakítóvizsgálatokat végeztek a kompozit mintákon, különböző vastagságú PCL rétegek közötti anyaggal. Eredményeik szerint a vastagabb, 0,8 mm-es interréteg jelentősen növelte a kompozit szakítószilárdságát, ugyanakkor csökkentette a törési energiát, míg a vékonyabb rétegek közötti anyagok kisebb hatással voltak a törési módra. Az eredmények rámutattak arra, hogy a PCL rétegek közötti anyag bevezetése lehetővé tette a tönkremeneteli hely és mód befolyásolását, ami növeli a kompozitok alkalmazhatóságát biztonságkritikus alkatrészek esetében, így hozzájárulhat azok megbízhatóságának javításához. [37]

2.3. Roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek

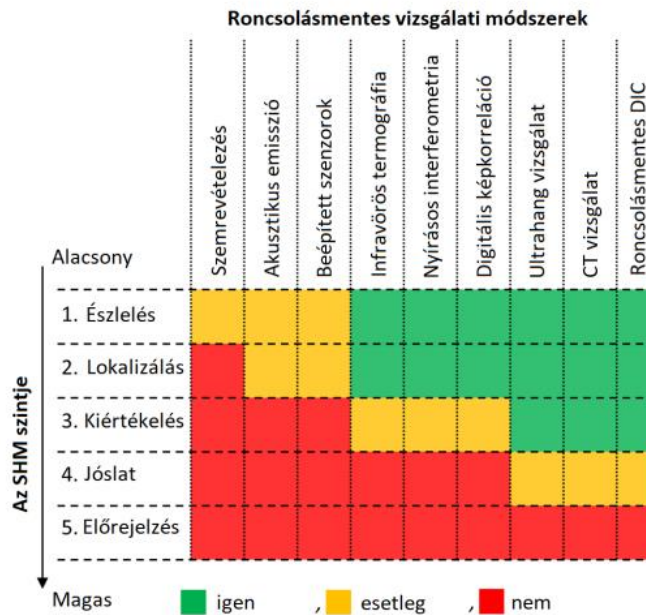
A roncsolásmentes anyagvizsgálatok lehetőséget adnak az anyag belső szerkezetének feltárására anélkül, hogy azokat károsítanánk. Az olyan módszerek, mint a röntgen, az ultrahangos és a termográfiai vizsgálatok, lehetővé teszik a rejtett hibák azonosítását, amelyek az anyagok tönkremeneteléhez vezethetnek. [38]

A szálerősítésű polimer kompozitoknál gyakoriak a nehezen észlelhető ütés okozta károsodások (BVID), amelyek szabad szemmel alig láthatók, de a belső rétegekben súlyos problémákat okozhatnak, mint delamináció és szálszakadás, melyek végül komoly szerkezeti károkhoz vezethetnek. A mérnöki gyakorlatban jellemző megoldás a túlméretezés, ám ez növeli a költségeket és a tömeget. Ígéretes alternatívák a szívósított vagy önjavító kompozitok fejlesztése.[38]



2.19. Ábra Tipikusan nehezen észrevehető becsapódás okozta károsodások (BVID) kompozit szerkezetekben [38]

A modern technológia fejlődésével a roncsolásmentes vizsgálatok (NDT) egyre elterjedtebbek, lehetővé téve a szerkezetek rendszeres és akár üzem közbeni ellenőrzését. Ezt a tudományágat üzem közbeni állapotjellemzésnek (SHM) nevezzük, amelyben anyagtudományi és mechanikai ismeretek is szükségesek. Az SHM ötfokozatú szintjei fokozatosan egyre részletesebb információt nyújtanak a károsodás helyéről, jellegéről, sőt bizonyos esetekben a szerkezet várható élettartamáról és a károsodás jövőbeli viselkedéséről is. [38]



2.20. Ábra Roncsolásmentes vizsgálati módszerek besorolása az SHM szintek alapján [38]

Dolgozatomban az akusztikus emissziós technikát alkalmaztam, amely különösen hatékony a keletkező repedések és mikroszerkezeti változások érzékelésében. Az alábbiakban ennek részletesebb bemutatása történik.

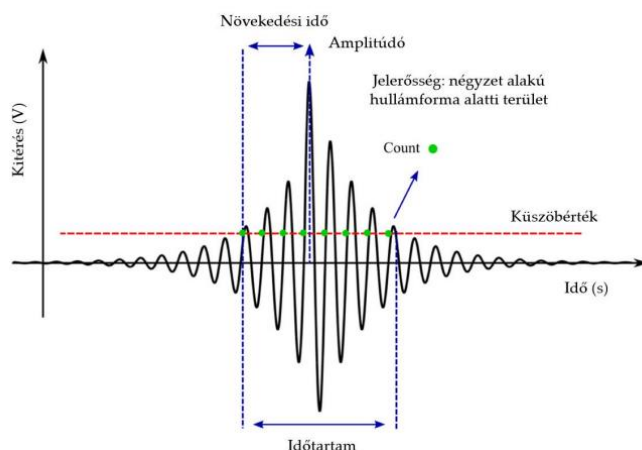
2.3.1. Akusztikus emisszió

Az akusztikus emissziós (AE) vizsgálatok kiemelkedő szerepet játszanak az anyagok szerkezeti integritásának és állapotának felmérésében, különösen a belső hibák, mint például repedések, törések és mikroszerkezeti változások időben történő észlelésében. E módszer lényege, hogy lehetővé teszi az anyagok folyamatos monitorozását anélkül, hogy azok működését megszakítanánk. Az AE egy nemlineáris jelenség, amely során a deformáció, törés vagy egyéb szerkezeti változások akusztikus hullámokat generálnak, jellemzően a 100 kHz és 1 MHz közötti frekvenciatartományban. Ezeket az eseményeket érzékelők rögzítik, lehetővé téve a hibák aktivitásának és a terhelés mértékének nyomon követését. [38,40,41]

Az anyagok mechanikai igénybevételnek kitéve előbb rugalmasan, majd képlékenyen deformálódnak, miközben energia szabadul fel a lokális változások miatt, amelyek gyakran anyaghibák megjelenését jelentik, mint például mikrorepedések vagy mátrixrepedések. Az energia felszabadulása rugalmas feszültség-hullámok formájában történik, amelyek vibrációt okoznak az anyagban, és 100-1000 kHz tartományban észlelhetőek. Az AE jellegzetes aspektusa, hogy a mérések során az érzékelők által regisztrált jelek az idő függvényében, transziens formában rögzíthetők, így kiszűrhetjük a folyamatos jeleket, az "alapzajt", amely a környezeti tényezőkből adódik. Ennek eredményeként a sérülések okozta kiugró jelek kerülnek előtérbe, amelyeket a vizsgálat során analizálni tudunk. [38,40,41]

A jelek feldolgozása és elemzése során az AE technikusok különböző paramétereket, például amplitúdót, frekvenciát, időtartamot és kibocsátási gyakoriságot vizsgálják. A hullámalak paramétereinek ismerete elengedhetetlen a vizsgálandó jelek szétválasztásához. Ezek a paraméterek a következőket foglalják magukban (mértékegységekkel együtt):

- Küszöbérték (dB): A küszöbérték alatti intenzitással rendelkező jelek kiszűrésre kerülnek.
- Amplitúdó (dB): A jel kitérésének legnagyobb értéke.
- Időtartam (μ s): Az első és utolsó küszöbérték átlépés között eltelt idő.
- Felfutási idő (μ s): Az első küszöbérték átlépése és az amplitúdó közötti időtartam.
- Rezgésszám (counts): A küszöbérték hullámalak által való átlépésének száma (pozitív irányban).
- Jelerősség (aJ): A négyzet alakú hullámforma alatti terület a hullámforma időtartama alatt.
- Csúcsfrekvencia (kHz): A gyors Fourier-transzformáció segítségével előállított frekvenciaeloszlás legnagyobb értékéhez tartozó frekvencia. [39]



2.21. Ábra Átlagos hullámalak és paramétere [39]

A Fourier-transzformáció alkalmazásával a jelek frekvenciatartományban történő elemzésével könnyen azonosíthatóvá válnak a különböző hibatípusok, így például a repedések és rétegleválások. Az AE vizsgálatok során a hullámok energiája rendkívül alacsony, ezért a piezoelektromos érzékelők által rögzített jeleket erősítjük, hogy a lehető legpontosabb eredményeket kapjuk. [38,40,41]

Az AE vizsgálat előnyei közé tartozik, hogy képes észlelni a károsodást, anélkül, hogy a próbatestet pontról pontra végig kellene pásztázni. Ez különösen fontos a működésben lévő alkatrészek valós idejű, folyamatos monitorozása során. Hátrányaként azonban említhető, hogy az AE csak az igénybevétel hatására keletkező új hibákat képes detektálni, így a már meglévő, de nem változó károsodásokat nem tudja kimutatni. Ráadásul a károsodás lokalizációja nehézkes, mivel számos, megfelelően elhelyezett szenzorra van szükség. [38,40,41]

A kompozit anyagok esetében a tönkremeneteli módok AE módszerrel történő azonosítása igencsak kihívást jelent, mivel a kompozitok tönkremenetele komplex, és egyszerre több tönkremeneteli mód is jelen lehet. Ebből adódóan a különböző károsodások jelei egymásra helyeződnek, így a tönkremeneteli módok megfelelő beazonosítása nehézségekbe ütközhet. A tönkremeneteli módok pontosabb azonosítását Barile és társai kutatása is hangsúlyozza, ahol mesterséges intelligencia segítségével analizálták az AE jeleket, és elérték, hogy az emissziós jeleket 97,9% hatásfokkal tudták besorolni négy különböző tönkremeneteli módba. [38,40,41]

Összességében az akusztikus emissziós vizsgálat hatékony eszköz a kompozitok vizsgálatában, különösen a tönkremeneteli módok és a belső hibák időben történő detektálásában, így hozzájárul a megbízhatóbb és biztonságosabb kompozit anyagok elterjedéséhez. Az AE és más roncsolásmentes vizsgálati módszerek kombinálása, mint például a digitális képkorreláció (DIC), tovább növelheti a vizsgálatok hatékonyságát, és lehetővé teszi a károsodások pontosabb lokalizációját és azonosítását, mint ahogyan azt a Szebényi és társai [42] által végzett kutatások is mutatják.

A károsodási mechanizmusok AE jeleinek megkülönböztetése kihívást jelent, mivel valós kompozit szerkezetekben egy terhelés alatt egyszerre több károsodás is előfordulhat, és ezek AE jelei egyszerre érkezhetnek a szenzorhoz. Ennek leküzdésére gyakran terveznek olyan próbatesteket, amelyekben egy adott károsodás domináns, így az adott károsodás jellemzői minimális interferenciával mérhetők. Például de Groot és társai [43] kísérletek sorozatát végezték el, amelyek között szerepelt a tiszta gyanta és különböző szögekben készített szén/epoxi rétegek húzóvizsgálatai. Az eredmények szerint a tiszta gyanta és a 90°-os próbatestek csak mátrixrepedést okoztak, míg más próbatestekben további károsodási módok is megjelentek.

Gutkin és társai [44] különböző típusú vizsgálatokat hajtottak végre CFRP próbatesteken öt különböző károsodási mechanizmus AE frekvenciáinak meghatározására, ezek közé tartozik a mátrixrepedés, szálszakadás, szál/mátrix leválás, delamináció és száلكihúzóadás. Saeedifar és társai [45] kettős átlapoló kötésekön végeztek vizsgálatokat, hogy megkülönböztessék a különböző károsodási mechanizmusok AE jeleit. Az AE jellemzők egyéni meghatározása nagy kísérleti erőfeszítést igényel, és adatbázisra van szükség minden károsodási mechanizmus AE tulajdonságainak tárolására.

A különböző károsodási mechanizmusok AE jeleinek csoportosítását négy módon végezhetjük: manuális adatszétválasztással, nem felügyelt klaszterezéssel, felügyelt klaszterezéssel vagy jel-feldolgozással. Több kutató (pl. Nikhbakht és társai, [46]) manuálisan csoportosította az AE adatokat csúcsfrekvencia alapján különböző károsodási módokhoz. Ugyanakkor bizonyos esetekben több AE paraméter egyidejű használata szükséges a megbízható azonosításhoz, különösen összetett kapcsolatok esetén. Ebben az esetben a klaszterezést gépi tanulási technikák segíthetik, mint a k-means vagy a fuzzy c-means (FCM).

Egy másik megközelítésként Rajendraboopathy és társai [47] mesterséges neurális hálót (ANN) alkalmaztak, amelyet 18 üvegszál/epoxigyanta próbatesten végzett húzóvizsgálat adataival tanítottak, majd az AE adatok alapján jósolták meg a próbatestek maximális szilárdságát. Arumugam és társai [48] hasonló módszert alkalmaztak karbon/epoxi laminátumokon, és az ANN modelljük 0,4–15% pontossággal jósolta meg a maradék szilárdságot.

Michal és társai [49] kutatásukban különböző tönkremeneteli módok azonosítását és jellemzését célozták meg, melyhez két széles spektrumú érzékelőt használtak az adatok kölcsönös ellenőrzésére. Kísérleteik során a méréseket gyantán és szénszálak kötegeken, valamint unidirekcionális és bidirekcionális rétegmintákon végezték. A mérések spektrális klaszterezési megközelítéssel kerültek elemzésre, ahol a k-means algoritmus egy felügyelt változatát használták. A SEM analízissel összevetett klaszterezés eredményes volt a mátrixrepedések, delaminációk és a szál/mátrix leválási mechanizmusok jellemzésében.

A kísérleti adatok mintázatfelismerési technikák alkalmazásával kerültek feldolgozásra, ahol az AE jelek különböző paramétereinek kiválasztása jelentős hatással volt a klaszterezési eredményekre. A fontos paramétereket a Laplace-pontszámok [50] alapján azonosították, és a klaszterezési folyamat során csak azokat az elemeket használták fel, amelyek pontszáma meghaladta a 0,9-et. A k-means mellett spektrális klaszterezést is alkalmaztak, ami hatékonyabbnak bizonyult a hagyományos megközelítésekénél. A klaszterek optimális számát a sziluett együttható [51] alapján határozták meg, ami 0,62-t és 0,72-t eredményezett, jelezve a megfelelő klaszterminőség elérését. Az eredmények alapján az AE jel energiák és a csúcsfrekvenciák kapcsolatának vizsgálata segített különböző tönkremeneteli mechanizmusok, mint például a szálak kihúzóadásának és törésének elkülönítésében.

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

Az alábbiakban bemutatásra kerülnek a mérésekhez használt alapanyagok, valamint gyártó- és mérőberendezések.

3.1. Felhasznált alapanyagok

3.1.1. Erősítőanyag

PX35 FBUD300 unidirekcionális (UD) szénszálas kelme, felületi sűrűség: 309 g/m², Panex35 50k rovingok, átlagos szálátmérő: 8 μm (Zoltek Zrt.) [52]

3.1.2. Mátrix anyag

ipox MR 3010 és ipox MH 3124 kétkomponensű, közepes viszkozitású, öntő-, lamináló-gyanta rendszer. MR 3010, módosított biszfenol-A/F gyanta (A komponens), MH 3124, módosított cikloalifás amin térhálósító szer (B komponens). 100:33 keverési arány, keverék viszkozitása 25°C-on: 500 mPa, fazékidő 25°C-on: ~30 perc (ipox Chemicals Kft.) [53]

3.1.3. Rétegek közötti anyag

eMate PCL filament, 0,5 kg/tekercs kiszerezés, filament átmérő 1,75 mm, nyomtatási hőmérséklet 70-100°C (eSUN Industrial Co.) [54]

3.2. Alkalmazott berendezések

3.2.1. FDM nyomtató

CraftBot Plus. Munkatér mérete: 250x200x200 mm; fúvóka átmérője: 0,2/0,4/0,8/1,0 mm; nyomtatószál átmérője: 1,75 mm; nyomtatási sebesség: 50-200 mm/s. (CraftUnique Kft.)

3.2.2. Univerzális anyagvizsgáló gép (szakítógép)

Zwick Z250. Sebességtartomány: 0,001 – 600 mm/perc; terhelhetőség: ±250 kN. Tartozékok: Ékpályás szakító pofa (100kN). (ZwickRoell GmbH)

3.2.3. Univerzális anyagvizsgáló gép (szakítógép)

Zwick Z20. Sebességtartomány: 0,001 – 750 mm/perc, terhelhetőség: -20 - +20 kN, Tartozékok: Szakító pofa (10,100kN). (ZwickRoell GmbH)

3.2.4. Akusztikus emissziós mérőberendezés

Mistras Slim PCI2 (Mistras Group SA). Tartozékok: Mistras típusú erősítők; Micros30s mikrofonok (Physical Acoustic Corporation)

3.3. Vizsgálati módszerek

3.3.1. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálatból számos fontos mechanikai tulajdonság határozható meg, mint például szilárdság, szakadási nyúlás, rugalmassági modulusz.

A mérések elvégzéséhez 250x20mm-es próbatestek kerültek gyártásra. A próbatestek 6 réteg UD szénkerméből épülnek fel. Az összes réteg orientációja 0°, vagyis húzó igénybevétel irányára párhuzamos. A 3-4. réteg közé elhelyezésre került egy nyomtatott PCL réteg, mely méretei a mérések során különbözőek voltak.

A befogási hossz 150 mm, a szakításai sebesség pedig 5 mm/perc volt. A próbatestek méretei a vizsgálat előtt lemérésre kerültek. Fontos a kapott adatok összevethetősége érdekében, hogy az elhelyezett PCL rétegtől távolabb kerüljön lemérésre a keresztmetszet, mivel az a mechanikai tulajdonságokat befolyásolja.

A próbatestek elszakítása után meghatározásra került a szakítószilárdság az alábbi képlettel:

$$\sigma_B [MPa] = \frac{F_{max}[N]}{A_0[mm^2]} \quad (1)$$

, ahol F_{max} a maximális erő, A_0 a próbatest keresztmetszete.

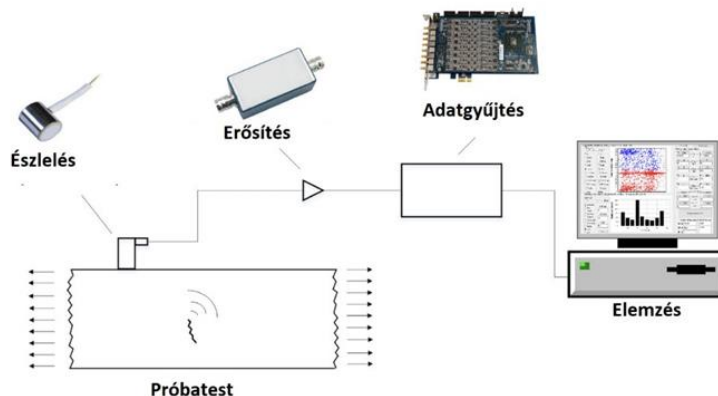
A szakadási nyúlás meghatározására a következő képlet alkalmazható:

$$\varepsilon_B [\%] = \frac{L_B - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (3)$$

, ahol L_B a szakadáskor mért megnyúlt hossz, a L_0 pedig a kezdeti befogási hossz.

3.3.2. Akusztikus emissziós vizsgálat (AE)

Az akusztikus emissziós vizsgálat elvégzéséhez elsősorban szükség van egy olyan szenzorra (nagy érzékenységgű mikrofon), amely alkalmas az akusztikus, hullám jellegű jelek detektálására, a kapott jeleket felnagyító erősítőre, valamint a jelek feldolgozására alkalmas szoftverre. Az 3.1.ábra az akusztikus emissziós vizsgálat elrendezését mutatja be.



3.1. Ábra Akusztikus emissziós vizsgálat sematikus ábrája

A mérés során alkalmazott paraméterek:

Hangterjedési sebesség a kompozitban	4545,45 m/s
Mikrofonok közötti távolság	100 mm
Holtidő	5 ms
Küszöbérték	30 dB

3.1. Táblázat Akusztikus emissziós méréshez alkalmazott paraméterek

A kompozit próbatestek mérésére 2 mikrofon, míg a roving, valamint impregnált roving szakítás esetén 1 mikrofon került alkalmazásra. A mikrofonok csipesszel kerültek felrögzítésre a próbatestekre. A méréshez szükséges csatolóközeget alkalmazni a jelek hatékonyabb továbbítása érdekében, ez a méréseknél szilikonzsír volt.

A kiértékelés a berendezést gyártó cég szoftverében, a Noesis -ben került elvégzésre.

4. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ

A következő fejezetben részletesen bemutatásra kerülnek az elvégzett kiértékelési folyamatok, a próbatestek gyártásának folyamata, valamint az elvégzett méréseknek az eredményei.

4.1. Károsodási módok jellemzése akusztikus emisszióval

A kompozit próbatestek vizsgálata során elengedhetetlen ismerni az anyagban végbemenő különböző tönkremeneteli módok jellegzetességeit és tulajdonságait. Ezen tulajdonságok azonosítására korábban is történtek kutatási erőfeszítések; Szebényi és munkatársai [55] tanulmányozták a különböző tönkremeneteli mechanizmusokat, és meghatároztak néhány alapvető jellemzőt. Bulman Vencel szakdolgozata [56] szintén e téma irányába nyújt értékes adatokat. Az általuk elvégzett mérések eredményeit részletes elemzés alá vetettem, hogy mélyebben megértsük és egyértelműen elkülöníthessük az egyes károsodási módok sajátosságait.

A Bulman Vencel által elvégzett vizsgálatokon (elemiszálszakítás, csepplehzás, gyanta próbatest szakító vizsgálata) kívül két további mérést is elvégeztem. Mivel az elemi szálak szakítása, nem biztos, hogy megfelelően jellemzi a szálszakadást, ezért roving, illetve impregnált roving szakítást végeztem. A roving szakítással jobban tudjuk mérni a szálszakadási folyamat egymásutánosságát, illetve a szálszakadási folyamat összetettségét jobban lehet jellemezni. A mérési görbék az 1.számú mellékletben találhatóak.

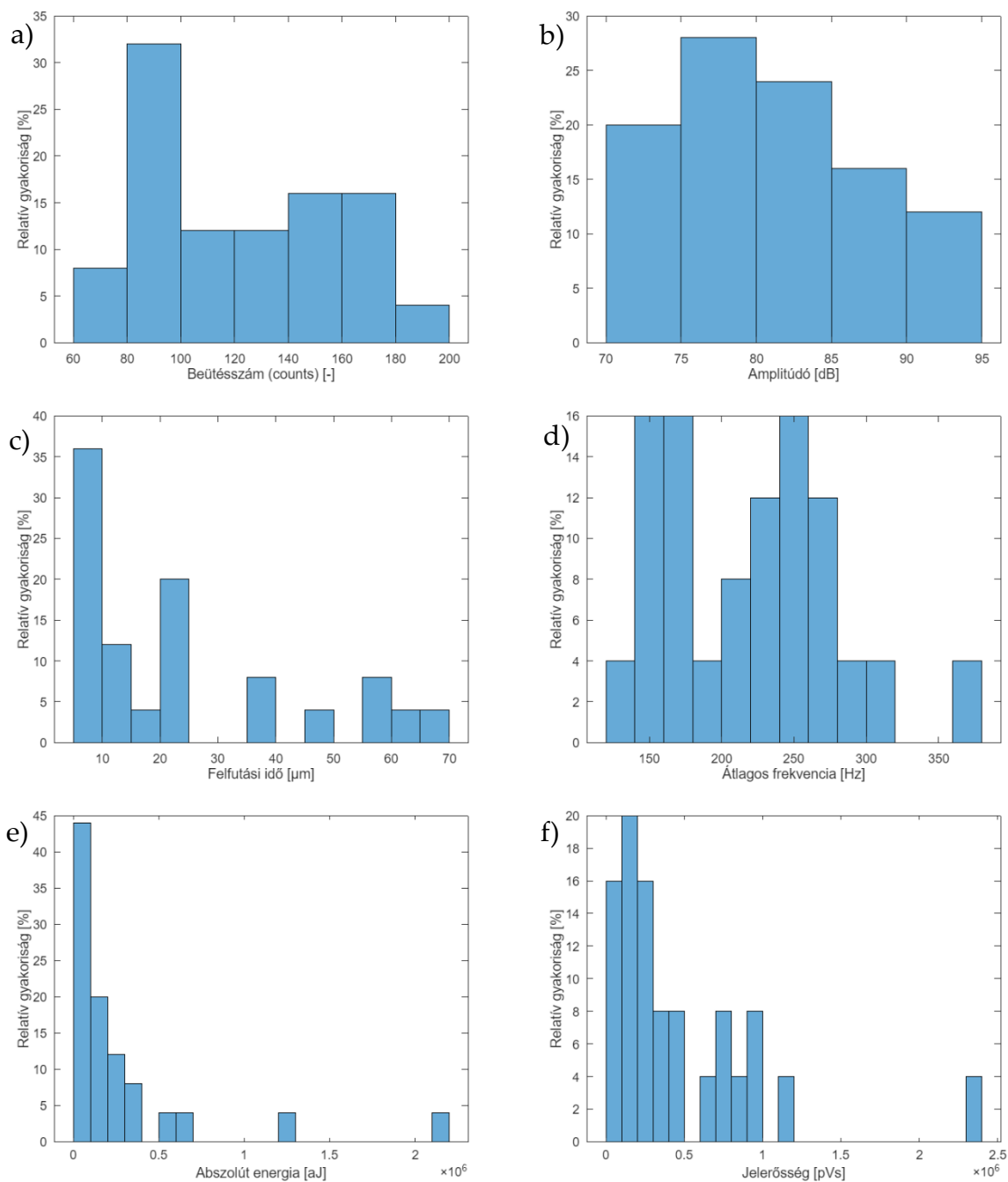
A különböző tönkremeneteli módok karakterisztikus jeleinek tulajdonságainak meghatározására az adatokat hisztogramon ábrázoltam. A vizsgált tulajdonságok: felfutási idő, beütésszám, amplitúdó, átlagos frekvencia, jelerősség és abszolút energia. A vizsgált paraméterek esetében a kapott adatoknál meghatároztam különböző percentilis értékeket ((Q2-Q98), Q10-Q90, Q15-Q85, Q25-Q75), melyekkel a kapott adatok középső 50-70-80-(96)%-ba eső jelek határértékeit kaphatjuk meg. Ezeket táblázatos formában szemléltetem.

A mérést akusztikus emissziós módszerrel végeztem, a kapott adatokat a kiértékelő programban elemeztem és elvégeztem a megfelelő szűréseket.

A kiértékeléseket MATLAB-ban végeztem el. A kiértékelés kódja az 2. számú mellékletekben megtalálható.

4.1.1. Szálszakítás

Az alábbiakban a szálszakadásra jellemző tulajdonságok láthatóak. Az 4.1.ábrán láthatóak a jellemző hisztogramok. A kapott eredményeket táblázatos formában összegeztem. Ez a 4.1.táblázatban tekinthető meg.



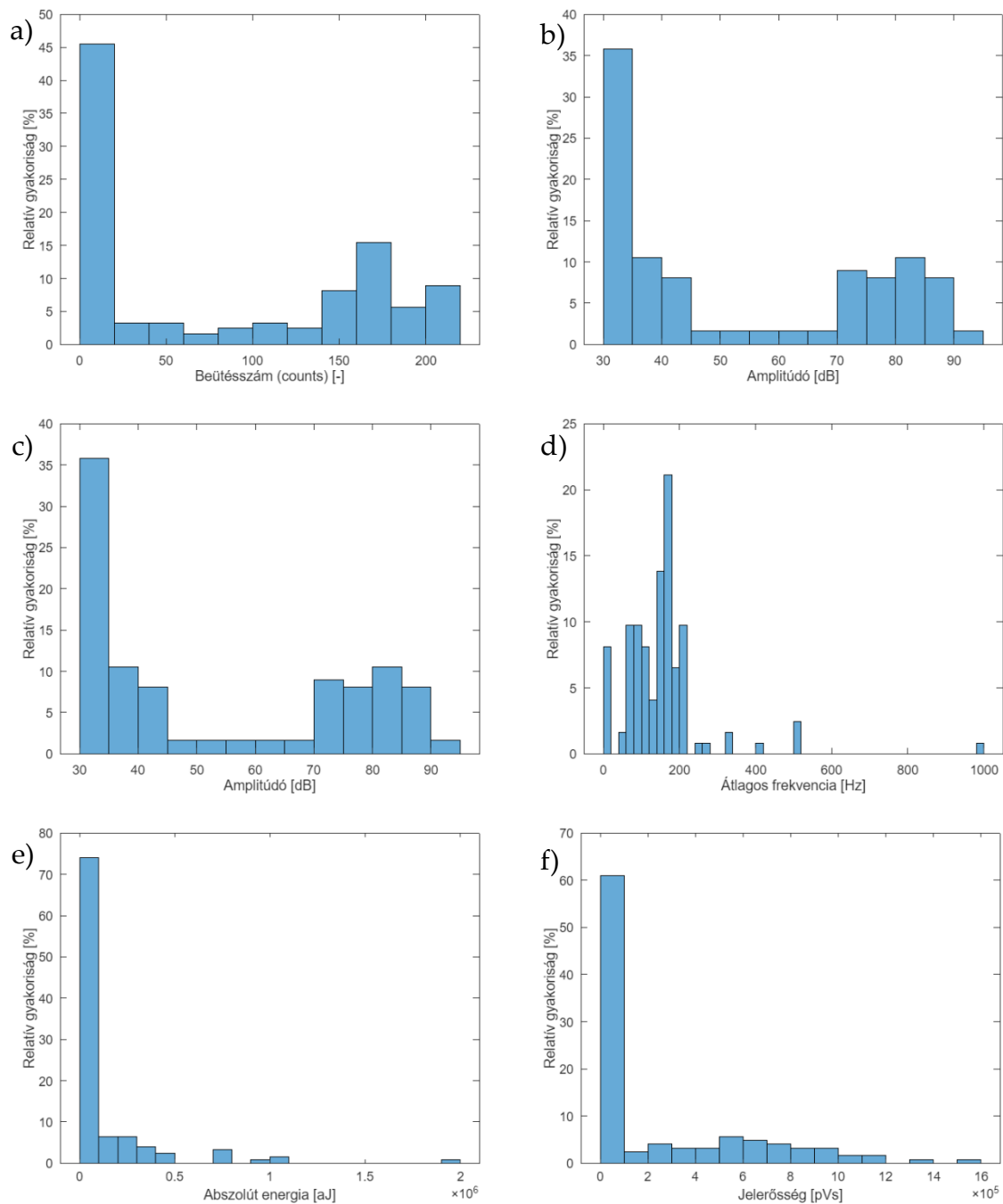
4.1. Ábra Szálszakítás jellemző hisztogramjai: a) beütésszám, b) amplitúdó c) felfutási idő d) átlagos frekvencia e) abszolút energia f) jelerősség

	Oszlop	Q10_Q90	Q15_Q85	Q25_Q75
1	Felfutási idő	7.00-58.00	7.00-52.50	8.00-37.50
2	Beütésszám	81.00-168.00	85.00-166.00	90.25-153.50
3	Amplitúdó	71.00-91.00	72.25-88.50	75.75-85.00
4	Átlagos frekvencia	148.00-294.00	155.75-268.00	167.00-259.00
5	Jelerősség	93592.30-943014.25	109851.85-890456.66	157861.14-766021.22
6	Abszolút energia	14094.79-692027.13	15125.62-512761.05	30737.58-295045.91

4.1. Táblázat Szálszakítás jellemző tulajdonságait összefoglaló táblázat

4.1.2. Mátrix-szál elválás

Az alábbiakban a mátrix-szál elválásra jellemző tulajdonságok láthatóak. Az 4.2.ábrán láthatóak a jellemző hisztogramok. A kapott eredmények táblázatos formában a 4.2.táblázatban található.



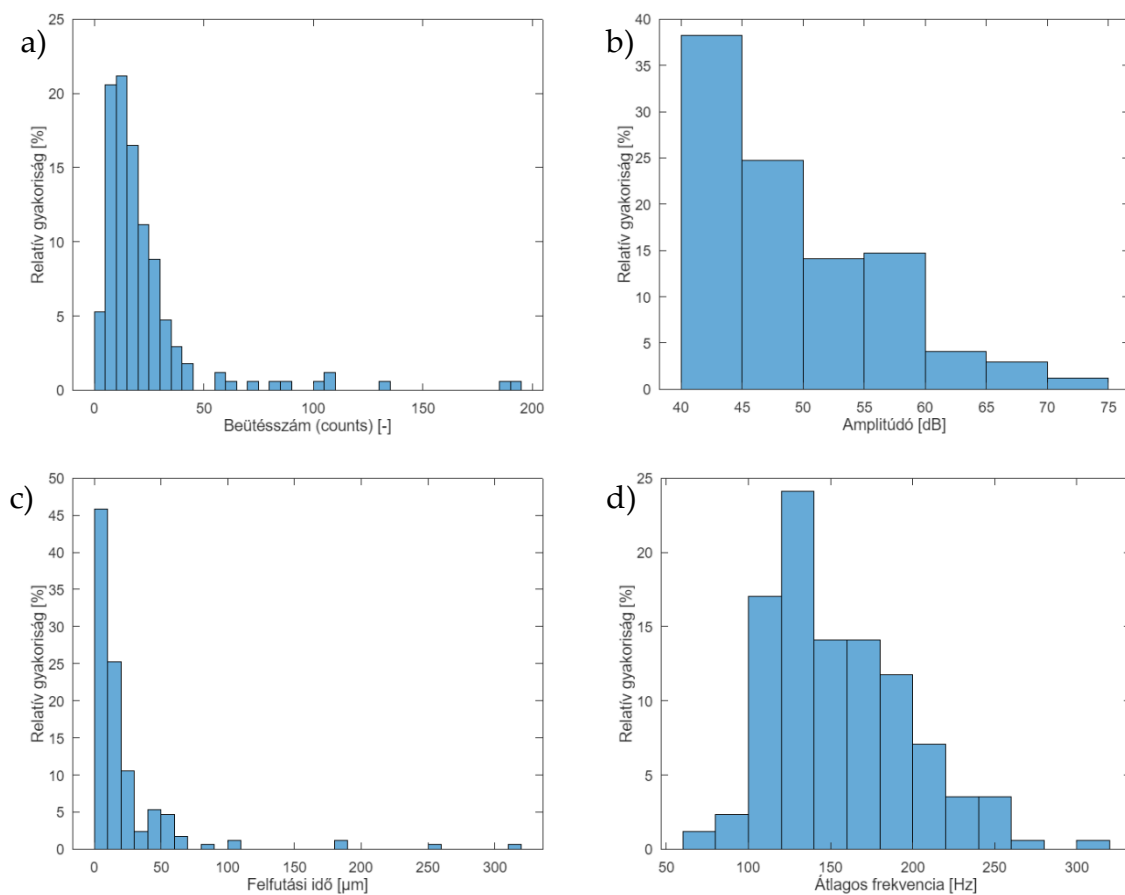
4.2. Ábra Mátrix-szál elválás jellemző hisztogramjai: a) beütésszám, b) amplitúdó c) felfutási idő d) átlagos frekvencia e) abszolút energia f) jelerősség

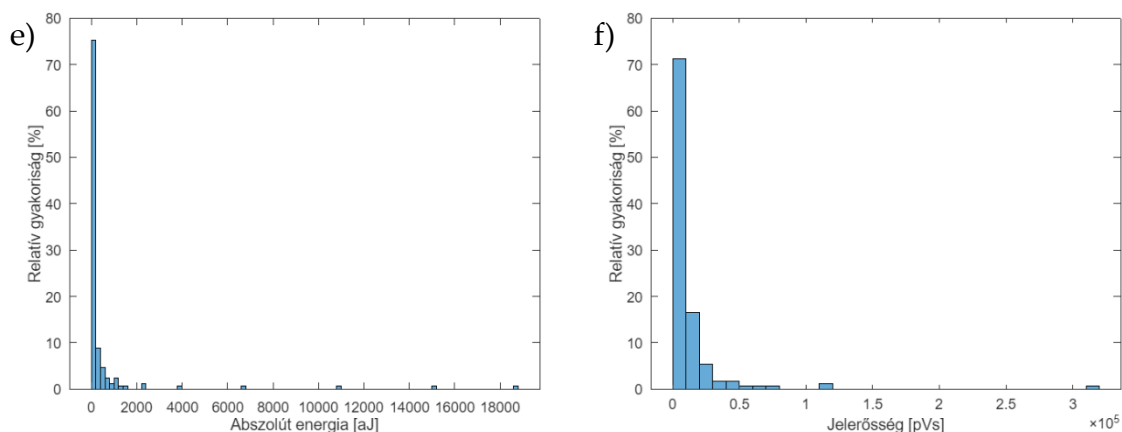
	Oszlop	Q10_Q90	Q15_Q85	Q25_Q75
1	Felfutási idő	0.00-79.00	1.95-52.00	7.50-36.75
2	Beütésszám	1.00-191.60	1.95-178.10	3.25-167.00
3	Amplitúdó	30.00-84.40	31.00-82.00	32.00-77.75
4	Átlagos frekvencia	58.20-208.00	70.95-202.00	91.25-178.00
5	Jelerősség	45.14-837204.88	160.28-712560.55	779.27-529358.79
6	Abszolút energia	0.13-361003.25	0.39-257459.52	2.01-106389.22

4.2. Táblázat Mátrix-szál elválás jellemző tulajdonságait összefoglaló táblázat

4.1.3. Mátrixrepedés

Az alábbiakban a mátrixrepedésre jellemző tulajdonságok láthatóak. Az 4.3.ábrán láthatóak a jellemző hisztogramok. A kapott eredmények táblázatos formában a 4.3.táblázatban találhatóak.





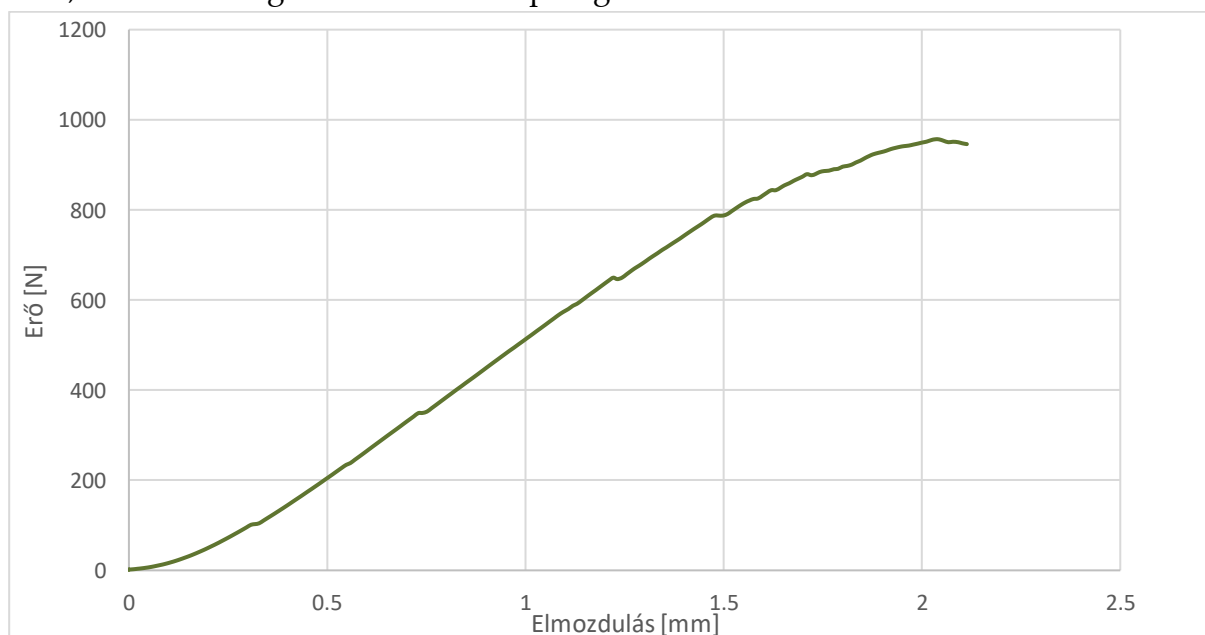
4.3. Ábra Mátrixrepedés jellemző hisztogramjai: a) beütésszám, b) amplitúdó c) felfutási idő d) átlagos frekvencia e) abszolút energia f) jelerősség

	Oszlop	Q10_Q90	Q15_Q85	Q25_Q75
1	Felfutási idő	3.50-51.00	5.00-41.00	6.00-24.00
2	Beütésszám	7.00-38.00	8.00-31.00	9.00-25.00
3	Amplitúdó	41.00-59.00	41.00-58.00	42.00-53.00
4	Átlagos frekvencia	108.00-213.50	115.00-200.00	122.00-182.00
5	Jelerősség	1421.30-23520.08	1698.85-17067.80	2159.40-11156.90
6	Abszolút energia	7.63-702.16	10.15-407.54	15.41-179.75

4.3. Táblázat Mátrixrepedés jellemző tulajdonságait összefoglaló táblázat

4.1.4. Roving szakadás

Az impregnált roving szakítás egy jellemző szakítógörbéje a 4.4.diagrammon látható, a szakítóvizsgálat kiértékelését pedig a 4.4.táblázat tartalmazza.

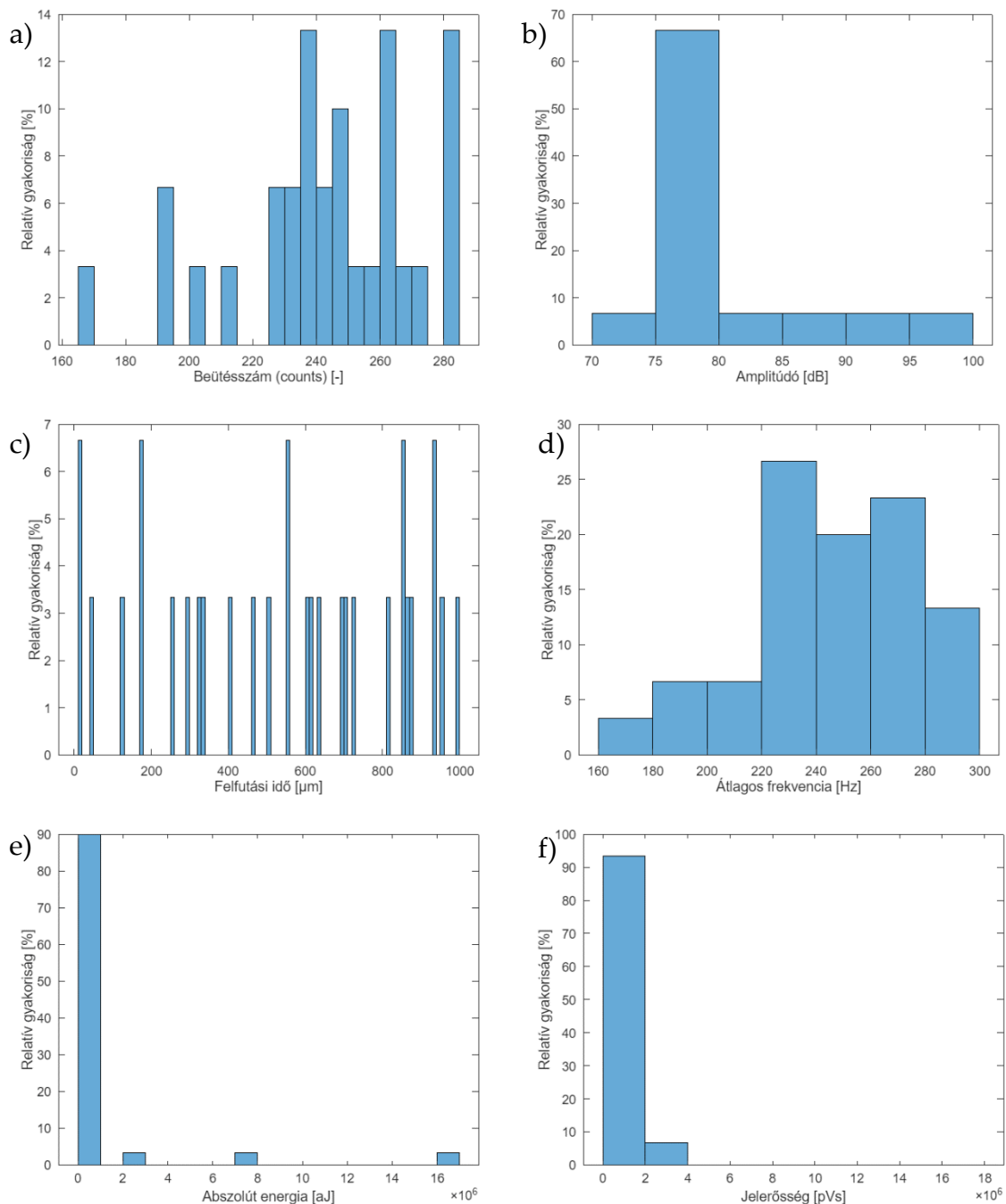


4.4. Ábra Roving szakadás egy jellemző görbéje

Maximum nyúlás átlaga [mm]	2.25
Fmax átlag [N]	1760.65

4.4. Táblázat Roving szakítás kiértékelése

Az alábbiakban a roving szakadásra jellemző tulajdonságok láthatóak. Az 4.5.ábrán láthatóak a jellemző hisztogramok. A kapott eredmények táblázatos formában a 4.5.táblázatban találhatóak.



4.5. Ábra Roving szakadás jellemző hisztogramjai: a) beütésszám, b) amplitúdó c) felfutási idő d) átlagos frekvencia e) abszolút energia f) jelerősség

	Oszlop	Q10_Q90	Q15_Q85	Q25_Q75
1	Felfutási idő	83.50-935.00	171.00-871.00	293.00-850.00
2	Beütésszám	197.00-280.00	213.00-272.00	230.00-263.00
3	Amplitúdó	75.00-92.00	76.00-89.00	76.00-81.00
4	Átlagos frekvencia	197.00-280.00	213.00-272.00	230.00-263.00
5	Jelerősség	333872.82-1652293.35	371011.16-1257353.40	413842.31-909086.06
6	Abszolút energia	41403.05-1876682.96	43852.02-602451.56	60726.98-228336.31

4.5. Táblázat Roving szakadás jellemző tulajdonságait összefoglaló táblázat

4.1.5. Impregnált roving szakítás

Az impregnált roving szakítás egy jellemző szakítógörbéje a 4.6. diagrammon látható, a szakítóvizsgálat kiértékelését pedig a 4.6. táblázat tartalmazza.

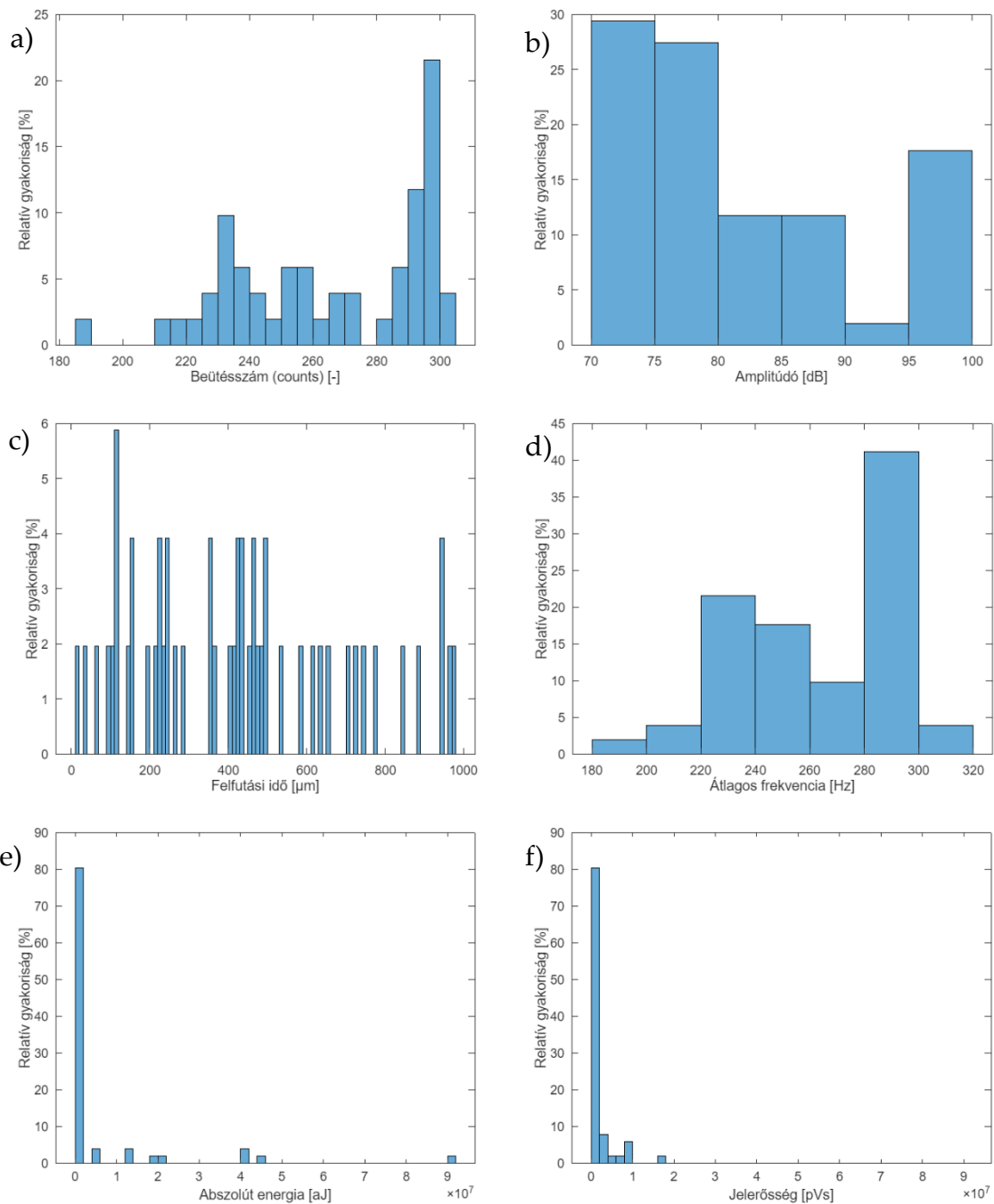


4.6. Ábra Impregnált roving szakítás jellemző szakítógörbéje

Maximum nyúlás átlaga [mm]	2.2453875
Fmax [N]	1760.6475

4.6. Táblázat Impregnált roving szakítás kiértékelése

Az alábbiakban az impregnált roving szakadásra jellemző tulajdonságok láthatóak. Az 4.7. ábrán láthatóak a jellemző hisztogramok. A kapott eredmények táblázatos formában a 4.7. táblázatban találhatóak.



4.7. Ábra Impregnált roving szakadás jellemző hisztogramjai: a) beütésszám, b) amplitúdó c) felfutási idő d) átlagos frekvencia e) abszolút energia f) jelerősség

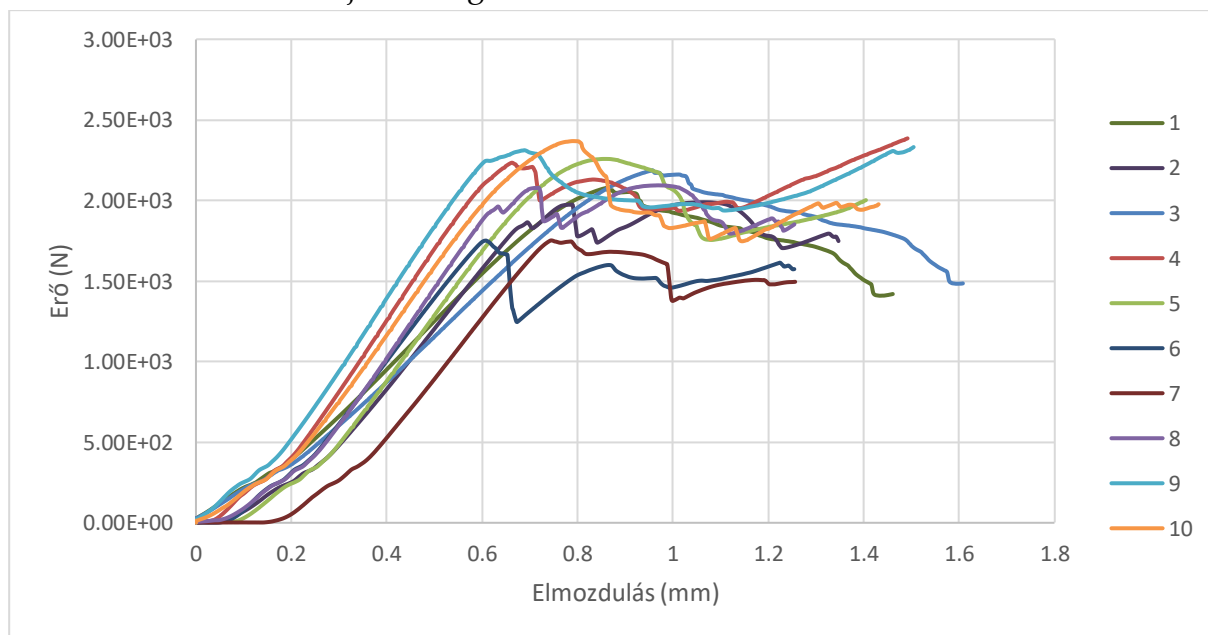
	Oszlop	Q10_Q90	Q15_Q85	Q25_Q75
1	Felfutási idő	108.60-857.80	119.20-739.90	213.50-607.00
2	Beütésszám	226.80-298.00	232.00-297.00	238.00-294.75
3	Amplitúdó	74.00-99.00	74.00-98.55	74.00-85.75
4	Átlagos frekvencia	226.80-298.00	232.00-297.00	238.00-294.75
5	Jelerősség	431108.36-5473813.60	523308.48-2895760.19	572630.66-1292062.38
6	Abszolút energia	72889.35-20598142.00	82659.82-10951284.13	99957.94-619385.70

4.7. Táblázat Impregnált roving szakadás jellemző tulajdonságait összefoglaló táblázat

4.1.6. Rétegelválás

A rétegelválásra jellemző tulajdonságok meghatározásához rövid támaszközű hajlítóvizsgálatot végeztem. A kapott adatokból a fentiekben meghatározott tönkremeneteli módokra jellemző adatokat kiszűrtem, így megkapva egy olyan adatsort, amely a rétegelválásból érkező adatokat tartalmazza.

A rövid támaszközű hajlítóvizsgálatnál 10 próbatestet vizsgáltam. A hajlítógörbék a 4.8.ábrán láthatóak. A hajlító vizsgálat kiértékelését a 4.8.táblázat tartalmazza.

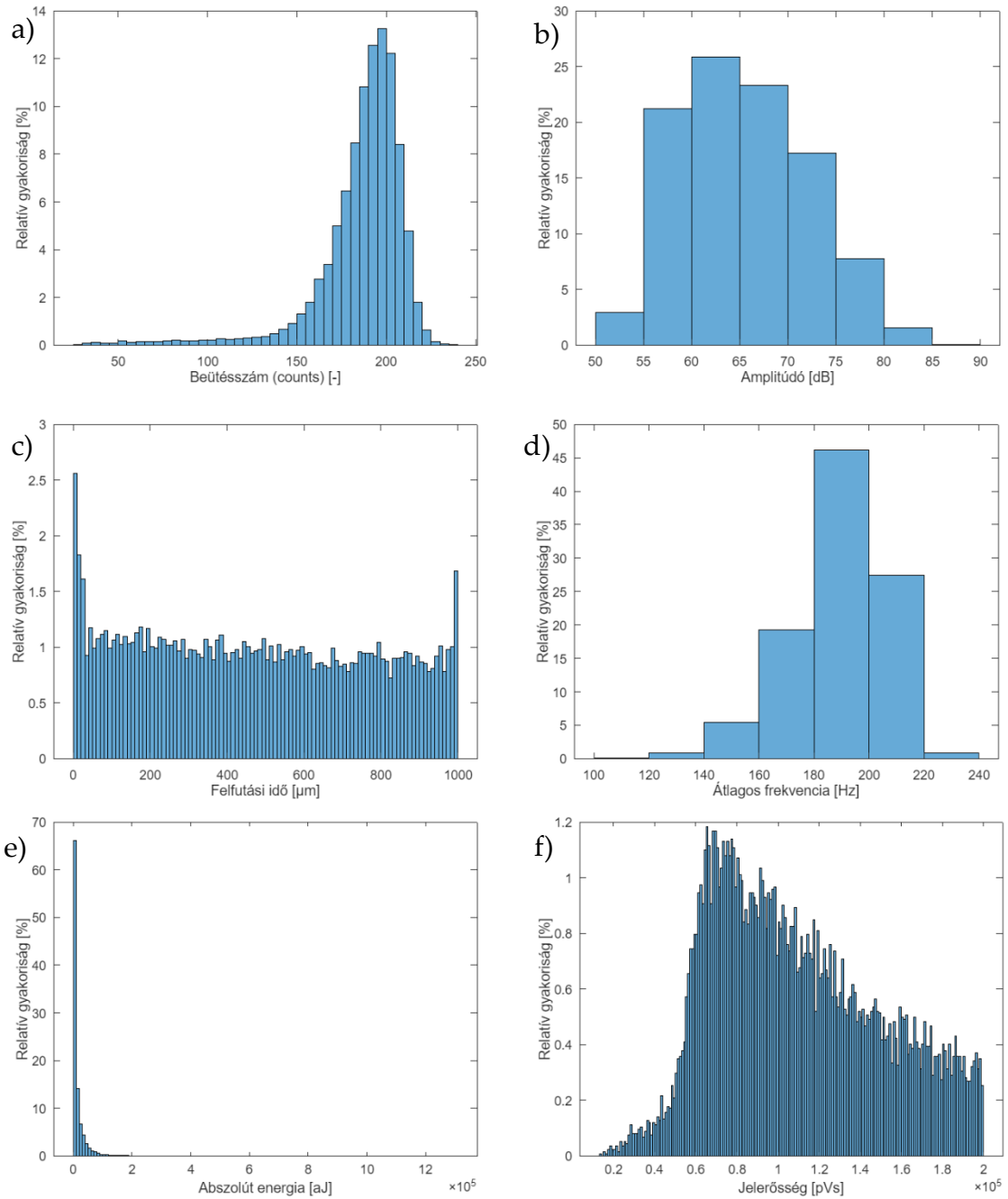


4.8. Ábra Az SBS vizsgálat görbéi

	Rétegek közötti szakítószilárdság [MPa]
1	38.52
2	50.06
3	56.39
4	42.30
5	41.47
6	48.80
7	52.90
8	44.03
9	40.72
10	47.25
Átlag	46.25
Szórás	5.80
Relatív szórás	12.54

4.8. Táblázat SBS vizsgálat kiértékelése

A 4.9.ábrán a rétegelválás jellemző hisztogramjai láthatóak, a 4.9.táblázatban pedig a jellemző tulajdonságok összefoglalását tartalmazza.



4.9. Ábra Rétegelválás jellemző hisztogramjai: a) beütésszám, b) amplitúdó c) felfutási idő d) átlagos frekvencia e) abszolút energia f) jelerősség

	Oszlop	Q10_Q90	Q15_Q85	Q25_Q75	Q2_Q98
1	Felfutási idő	68.00-896.00	114.00-841.25	207.00-731.75	7.00-987.00
2	Beütésszám	161.00-208.00	169.00-205.00	178.00-201.00	97.00-216.00
3	Amplitúdó	57.00-74.00	58.00-72.00	60.00-70.00	54.00-79.00
4	Átlagos frekvencia	165.00-208.00	171.00-205.00	179.00-201.00	147.00-216.00
5	Jelerősség	64550.20-270019.56	70318.51-236529.02	82387.36-187887.63	46434.42-377841.31
6	Abszolút energia	1170.03-36071.94	1405.01-26132.88	2020.53-15137.97	851.19-86555.41

4.9. Táblázat Rétegelválás jellemző tulajdonságait összefoglaló táblázat

4.1.7. Értékelés

A kiértékelés során minden károsodási módnál a Q10-90 csoportot alkalmaztam, azonban rétegelválás esetén kiegészítésként egy szélesebb Q2-98 csoportot is használtam. Itt a Q10-90 csoport a szinte biztosan rétegelválásokat jelzi, míg a Q2-98 a feltételezhetően rétegelválásokra utal. Az eredmények alapján elmondható, hogy a szálszakadásra az alacsony felfutási idő, a magas amplitúdó, valamint a széles tartományú, de magas átlagos frekvencia jellemző. Ezzel szemben a mátrix szál elválásnál az alacsony abszolút energia és a beütésszám dominál. A mátrix repedés esetében nagyon alacsony abszolút energia, alacsony amplitúdó, beütésszám, felfutási idő és jelerősség figyelhető meg. A roving közepes felfutási idővel, magas amplitúdóval és magas átlagos frekvenciával rendelkezik, míg az impregnált roving magas felfutási idővel, amplitúdóval, átlagos frekvenciával és beütésszámmal bír. A rétegelválás magas átlagos frekvenciát, alacsony-közepes amplitúdót, közepes jelerősséget és magas beütésszámot mutat. Ezen paraméterek alapján megkülönböztethetők az egyes jelek, amelyek így alkalmazhatóak szűrési feltételekként, valamint a kompozitok összetett károsodási mechanizmusainak azonosítására és elkülönítésére.

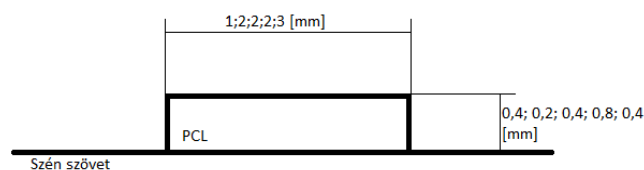
4.2. Termék gyártás

A következőkben bemutatásra kerül a további, rétegekben módosított próbatesteken történő vizsgálatokhoz szükséges próbatestek gyártási folyamata.

4.2.1. PCL réteg

A 3-4. réteg közötti PCL csíkot a 3. réteget alkotó szénszálas kelmére additív gyártástechnológiával vittem fel. Ezáltal a felvitt PCL réteg és a szénszálas kelme között megfelelő adhézió alakul ki, amely a gyártás további lépései során is fent marad. A kelme mérete 250x180mm. A nyomtatás során fontos a megfelelő geometria megválasztása azért, hogy ne okozzon alacsony terhelési szinten is delaminációt. A nyomtatott PCL réteg az anyag geometriájának teljes szélességében végig fut.

A mérések során különböző szélességű és vastagságú PCL réteget alkalmaztam. A méreteket a 4.10. táblázat tartalmazza.



4.10. Ábra PCL réteg geometriája

Szélesség [mm]	Vastagság [mm]
1	0,4
2	0,2
2	0,4
2	0,8
3	0,4

4.10. Táblázat PCL rétegek geometriai jellemzői

4.2.2. Vákuumzsákos gyantainfúzió

A próbatesteket vákuumzsákos gyantainfúzióval gyártottam. A próbatestekhez 6 réteg szénszál kelmét alkalmaztam, a PCL réteg a 3-4. réteg között került elhelyezésre. Ezenkívül készült PCL réteg nélküli referencia próbatest is. Az infúzió során 0,6 bar vákuumot alkalmaztam, mely minimum 30 percig szivattyúval került tartásra, majd a szelepeket elzárva a térhálósodás passzív vákuum alatt, szobahőmérsékleten ment végbe.

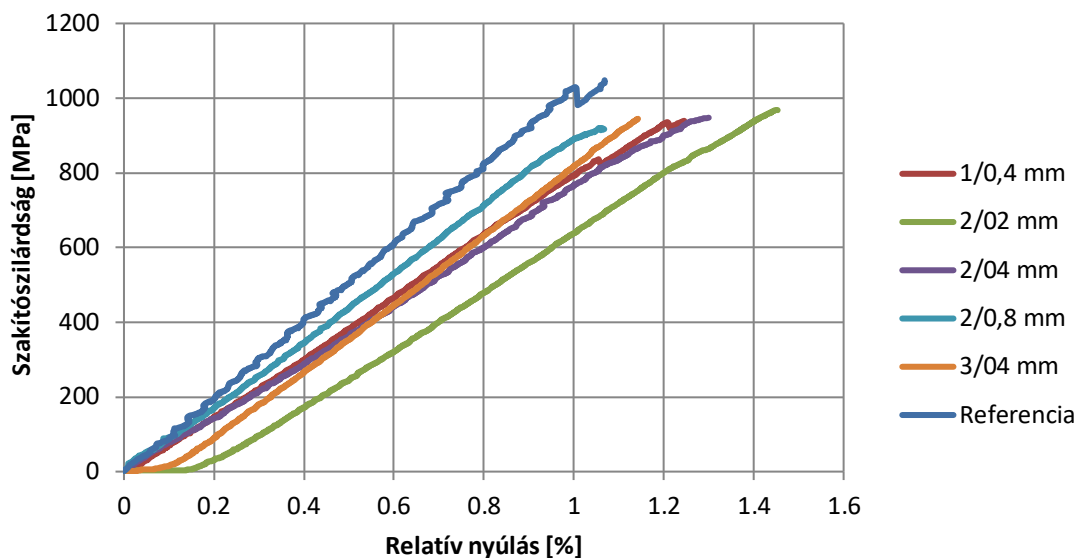
Forma bontás után, az elkészült lemezt 250x20 mm-es próbatestek kerültek kivágásra, majd ezek megfelelően előlettek készítve szakítóvizsgálatra.

4.3. Eredmények

A mérések során a szakítóvizsgálat közben akusztikus emissziót alkalmaztam, mellyel lehetőség van a tönkremenetel során a próbatestekből érkező jelek lokációjának megállapítására. A mérések kiértékelése során a különböző méretű PCL rétegek közötti anyagoknak a károsodások és a tönkremenetel lokalizációjára és módjára gyakorolt hatásait vizsgáltam.

4.3.1. Szakítóvizsgálat

Az elkészített próbatesteket szakítóvizsgálatnak vetettem alá. Minden különböző geometriájú PCL réteggel ellátott próbatestből, illetve módosítatlan referencia mintából is 5 mérést végeztem. Az alábbiakban látható a 4.11. ábrán egy-egy jellemző szakítógörbe, valamint a 4.11. táblázat tartalmazza a szakítóvizsgálat kiértékelését.



4.11. Ábra Jellemző szakítógörbék

	Szakítószilárdság [MPa]	Szórás	Relatív szórás [%]
1_04	921.43	10.54	1.14
2_02	966.03	10.9	1.13
2_04	938.54	40.58	4.32
2_08	922.21	51.37	5.57
3_04	943.11	21.74	2.30
Referencia	990.2	78.25	7.90

4.11. Táblázat Szakítóvizsgálat eredményei

4.3.2. Lokalizáció vizsgálata

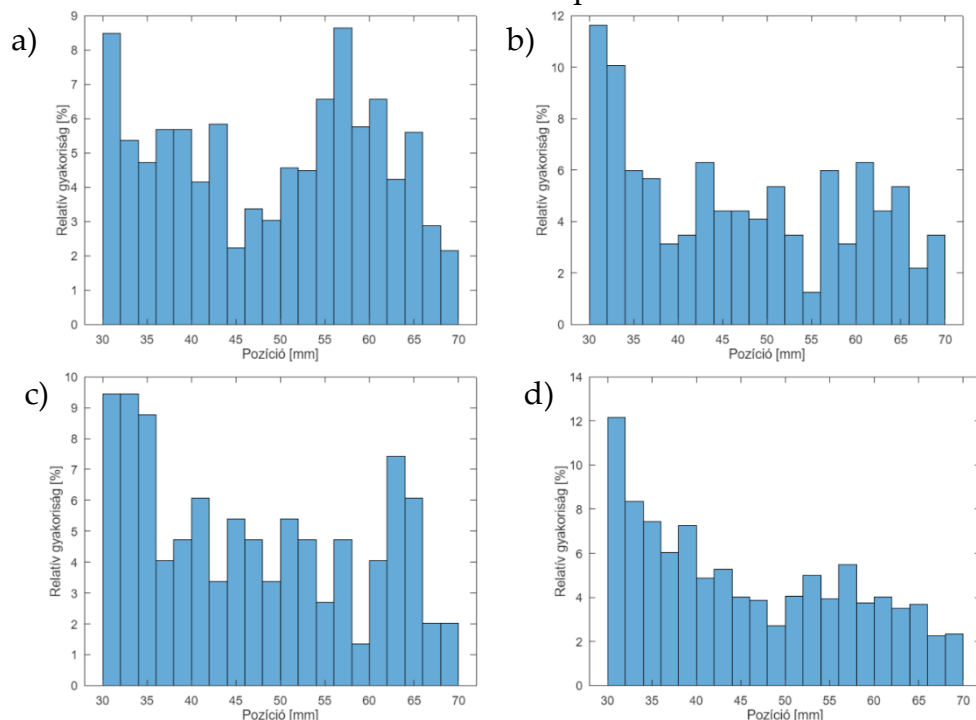
A mérések során számos jel érkezik, amelyek megfelelő szűrése és rendszerezése alapvető fontosságú a kiértékelés megbízhatósága érdekében. A nyers adatok feldolgozásának első lépéseként elengedhetetlen a tönkremenetelt követően keletkező, valamint a 40 dB alatti (zaj) jelek kiszűrése. Ezt követően a lokáció meghatározásához szükséges adatokat kell megadni: a hang terjedési sebességét, amely a vizsgálat során 4545,45 m/s volt, valamint a csillapítási paramétereket. A mérés pontossága érdekében a mikrofonok elhelyezkedésének adatait is rögzíteni kell, amelyek minden próbatest esetében 100 mm-es távolságra voltak. A lokációs adatok meghatározása után lehetőség nyílik a pozíció-idő diagram ábrázolására, amely a jel forrásának térbeli elhelyezkedését szemlélteti az idő függvényében. A kiértékelést a PCL rétek körüli 40 mm-es szakaszon végeztem, ezáltal kizárhatóak az esetlegesen a befogóból érkező zajok.

A tönkremeneteli módok elemzéséhez elengedhetetlen a különböző károsodási típusok csoportosítása. Ezt az előzetesen meghatározott tönkremeneteli típusokra jellemző tulajdonságok alapján végezzük, melyek segítségével kiszűrhetők a szálszakadásra és mátrixrepedésre utaló jelek. A fennmaradó jeleket két további kategóriába soroltam a korábban meghatározott percentilis határok szerint: a 2-98 percentilis közé eső jeleket a „valószínűleg rétegelválás” kategóriába, míg a 10-90 percentilis közé esőket a „szinte biztosan rétegelválás” kategóriába. Az így létrehozott csoportok különböző ábrázolási módokon jeleníthetők meg: a jelsűrűséget eseményszám-eloszlás hisztogramok szemléltetik, míg az idő–pozíció diagramok az időbeli károsodás-lokáció összefüggéseit ábrázolják.

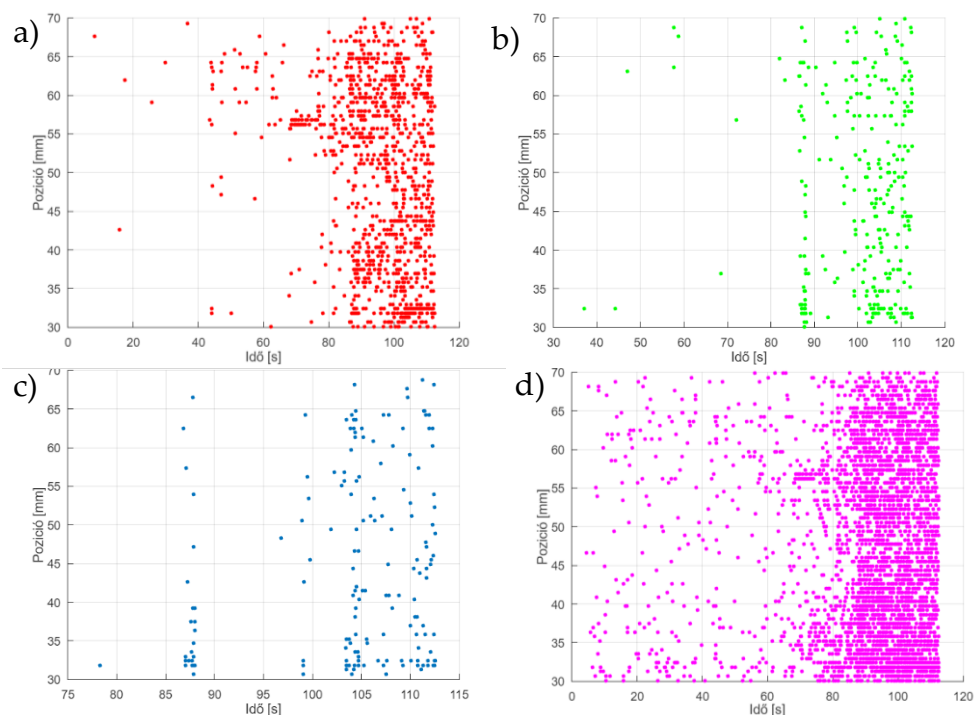
A továbbiakban az egyes PCL rétegvastagsággal rendelkező és referencia próbatestek eredményeit ismertetem az említett szűrési és ábrázolási technikák alkalmazásával. A kiértékelés MATLAB kódja a 3.számú mellékletben található.

4.3.3. Referencia

Az alábbi diagramokon a referencia próbatestek adatai láthatók. A 4.12.ábrán a jelsűrűsödés hisztogramjait ábrázolja, a 4.13.ábrán pedig a lokáció-idő diagramok láthatóak a különböző tönkremeneteli csoportokra vonatkoztatva.



4.12. Ábra Jelsűrűsödés hisztogramok a referencia próbatest esetében: a) szálszakadás, szál-mátrix elválás, b)Q2-98 rétegelválás, c) Q10-90 rétegelválás d) mátrixrepedés

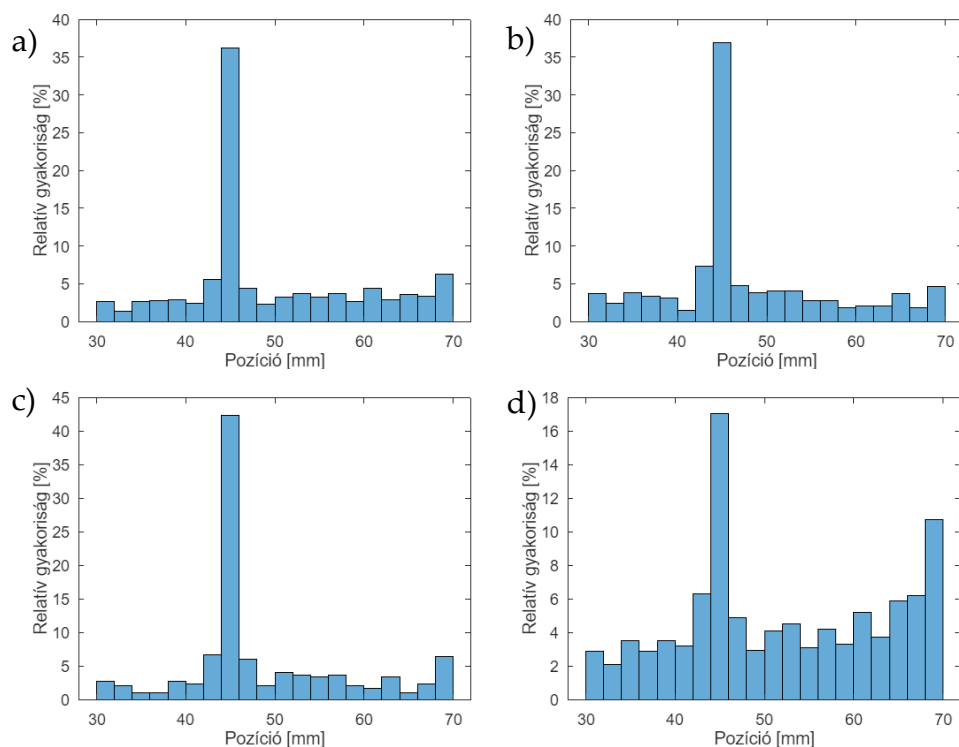


4.13. Ábra Pozíció-idő diagrammok a referencia próbatest esetében: a) szálszakadás, szál-mátrix elválás, b) Q2-98 rétegeltválás, c) Q10-90 rétegeltválás d) mátrixrepedés

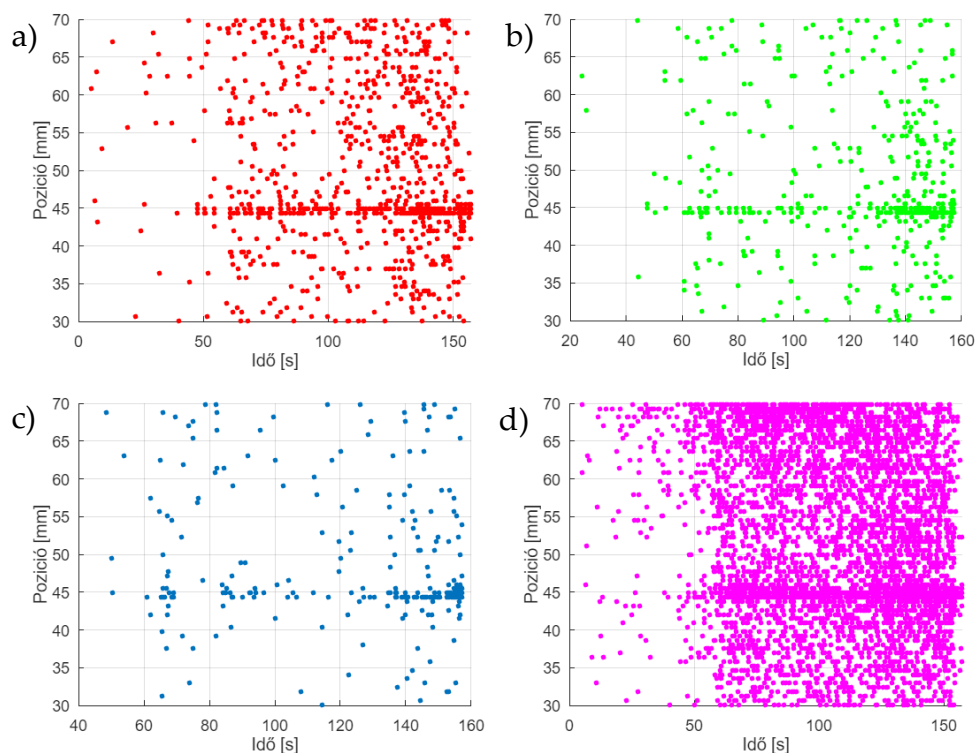
Mind a hisztogramokon, mind pedig a lokáció-idő diagrammokon megfigyelhető, hogy a károsodások és a tönkremenetel helye teljesen véletlenszerű, lokalizált jelleget nem mutat, jelsűrűsödés nem figyelhető meg.

4.3.4. 1[mm]x0,4[mm]

Az alábbi diagrammokon az 1 mm széles 0,4 mm vastag PCL réteggel ellátott próbatestek adatai láthatók. A 4.14.ábrán a jelsűrűsödés hisztogramjait ábrázolja, a 4.15.ábrán pedig a lokáció-idő diagrammok láthatóak a különböző károsodási csoportokra vonatkoztatva.



4.14. Ábra Jelsűrűsítés hisztogramok az 1x04mm próbatest esetében: a) szálszakadás, szál-mátrix elválás, b)Q2-98 rétegelválás, c) Q10-90 rétegelválás d) mátrixrepedés



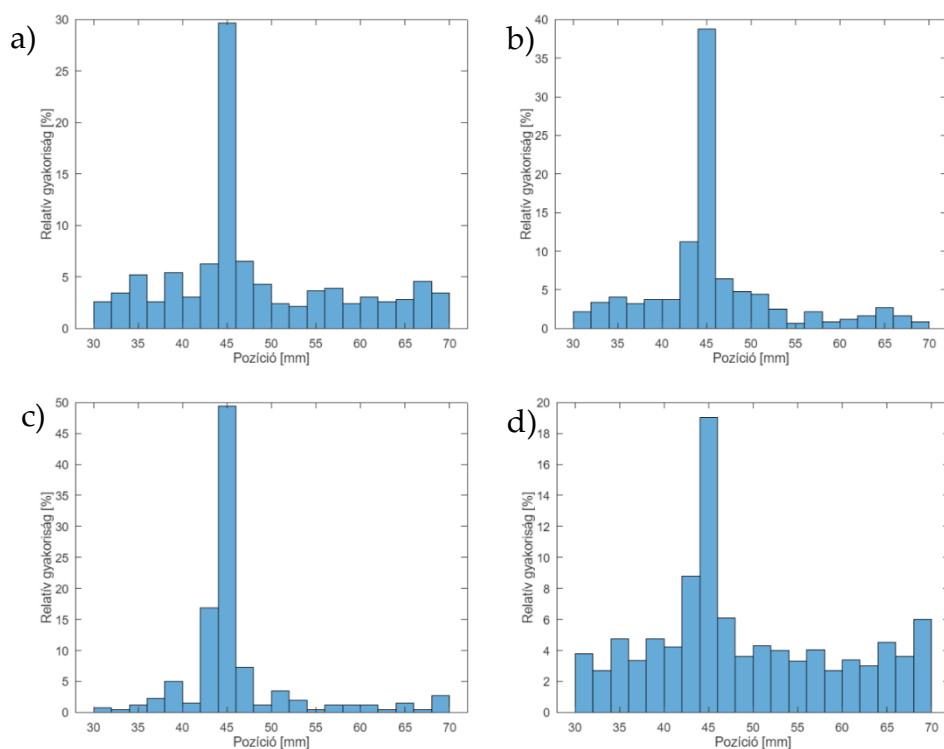
4.15. Ábra Pozíció-idő diagrammok az 1x04mm próbatest esetében: a) szálszakadás, szál-mátrix elválás, b)Q2-98 rétegelválás, c) Q10-90 rétegelválás d) mátrixrepedés

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a kis méretű PCL réteg esetében is jól megfigyelhető, hogy a károsodások főként a PCL réteg környezetében

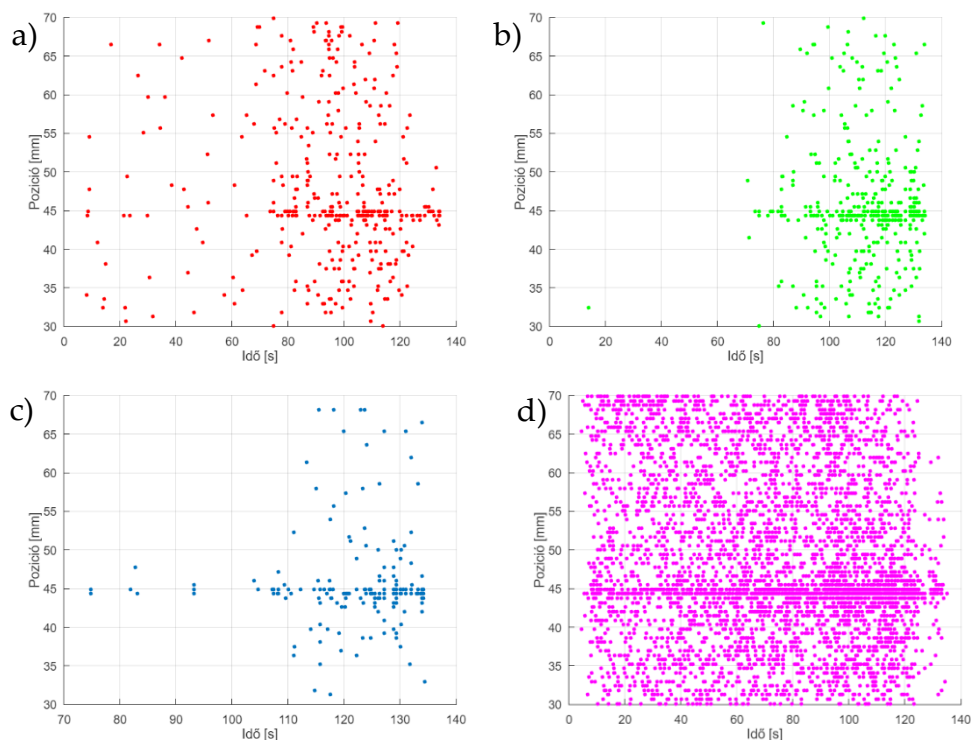
koncentrálódnak. Az összes károsodás viszonylag jól lokalizált, ugyanakkor a delamináció jellegű károsodások csak a tönkremenetel közvetlen környezetében jelentkeznek. A szálszakadás és a szál-mátrix elválás szintén jól lokalizálhatónak tűnik, akárcsak a mátrixrepedés. A vizsgált próbatestek szemrevételezéses analízise is arra utal, hogy a tönkremenetel lokalizált jellegű volt, azonban nem kísérte rétegelválás.

4.3.5. 2[mm]x0,2[mm]

Az alábbi diagrammokon az 2 mm széles 0,2 mm vastag PCL réteggel ellátott próbatestek adatai láthatók. A 4.16.ábrán a jelsűrűsödés hisztogramjait ábrázolja, a 4.17.ábrán pedig a lokáció-idő diagrammok láthatóak a különböző károsodási csoportokra vonatkoztatva.



4.16. Ábra Jelsűrűsödés hisztogramok az 2x0.2mm próbatest esetében: a) szálszakadás, szál-mátrix elválás, b) Q2-98 rétegelválás, c) Q10-90 rétegelválás d) mátrixrepedés

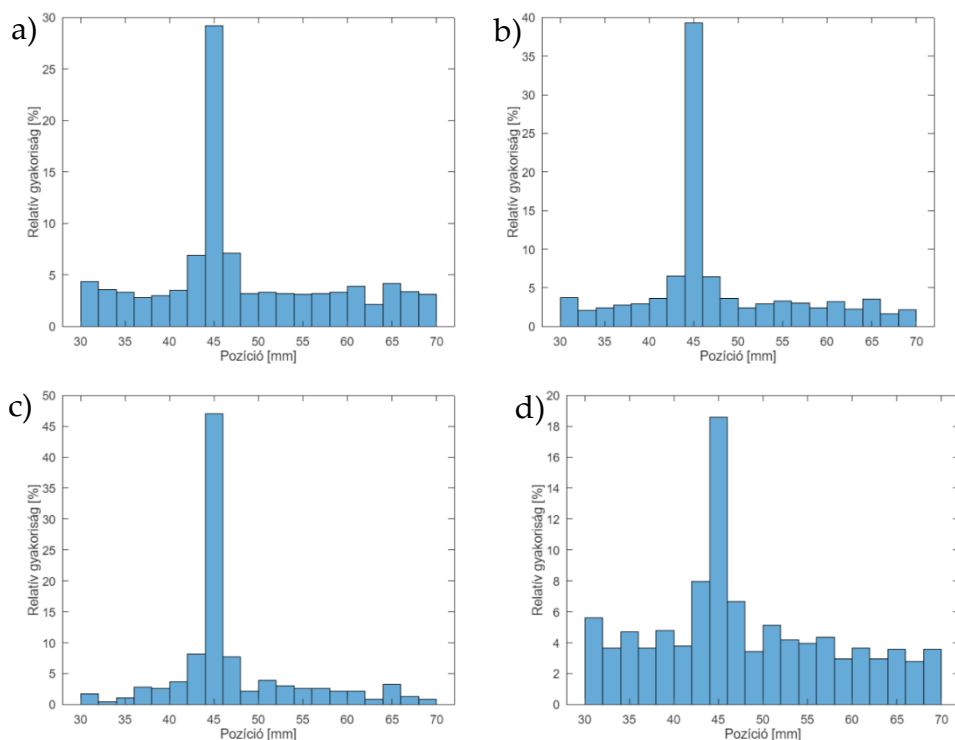


4.17. Ábra Pozíció-idő diagrammok a 2x02mm próbatest esetében: a) szálszakadás, szál-mátrix elválás, b) Q2-98 rétegelválás, c) Q10-90 rétegelválás d) mátrixrepedés

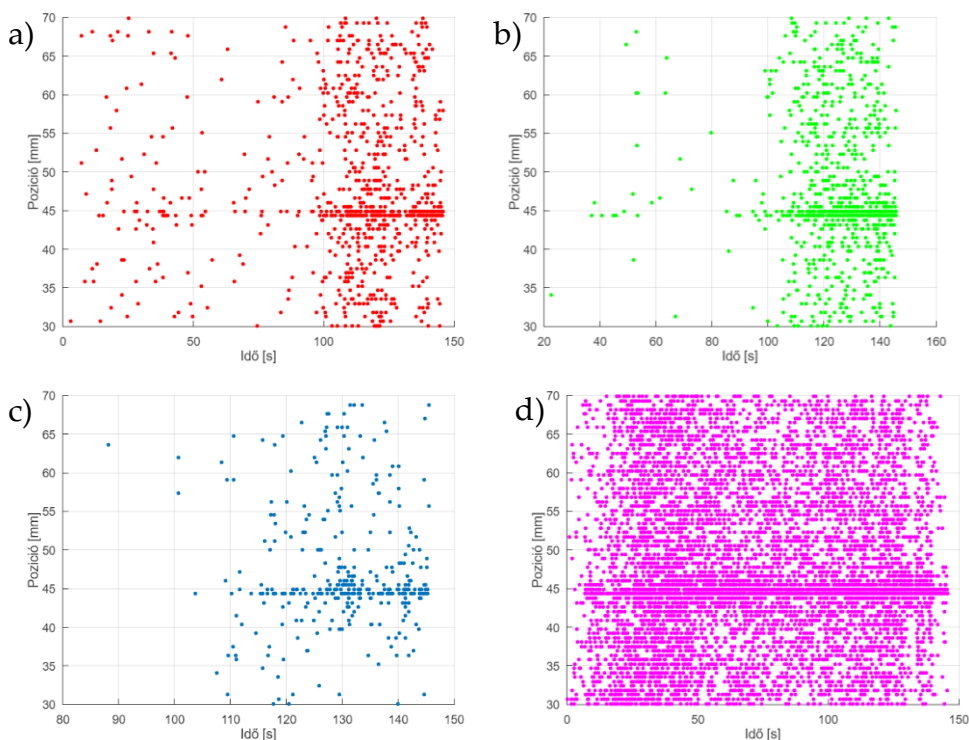
A vizsgálatok alapján a károsodások főként lokalizált jellegűek, ideértve a szál-mátrix elválást, szálszakadást és mátrixrepedést, míg a rétegelválás későbbi fázisban jelenik meg. A tönkremenetel nem delaminációs jellegű. A próbatestek többsége a PCL réteg környezetében károsodott, előfordultak azonban olyan esetek is, ahol a tönkremenetel ettől eltérő pozícióban következett be. A károsodások lokalizációja jól megfigyelhető, de a tönkremenetel kevésbé egyértelműen behatárolt.

4.3.6. 2[mm]x0,4[mm]

Az alábbi diagrammokon az 2 mm széles 0,4 mm vastag PCL réteggel ellátott próbatestek adatai láthatók. A 4.18.ábrán a jelsűrűsödés hisztogramjait ábrázolja, a 4.19.ábrán pedig a lokáció-idő diagrammok láthatóak a különböző tönkremeneteli csoportokra vonatkoztatva.



4.18. Ábra Jelsűrűsödés hisztogramok az 2x04mm próbatest esetében: a) szálszakadás, szál-mátrix elválás, b) Q2-98 rétegelválás, c) Q10-90 rétegelválás d) mátrixrepedés



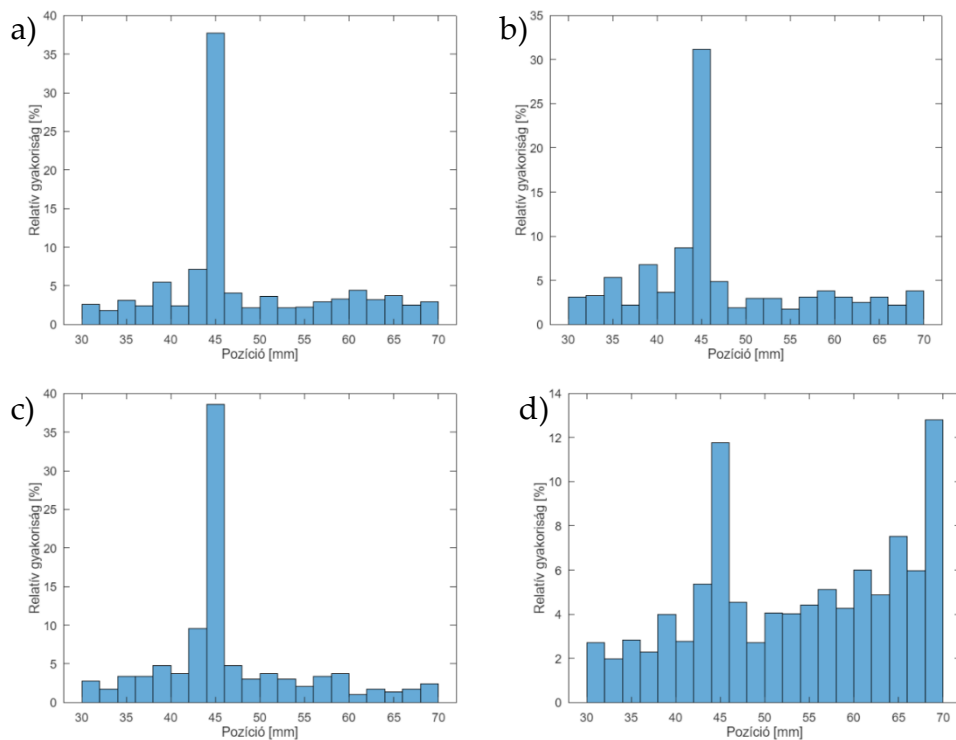
4.19. Ábra Pozíció-idő diagrammok a 2x04mm próbatest esetében: a) szálszakadás, szál-mátrix elválás, b) Q2-98 rétegelválás, c) Q10-90 rétegelválás d) mátrixrepedés

Az eredmények azt mutatják, hogy a rétegelválás az előző megfigyelésekhez képest korábban jelentkezik, különösen a PCL réteg közelében, ahol a delaminációs

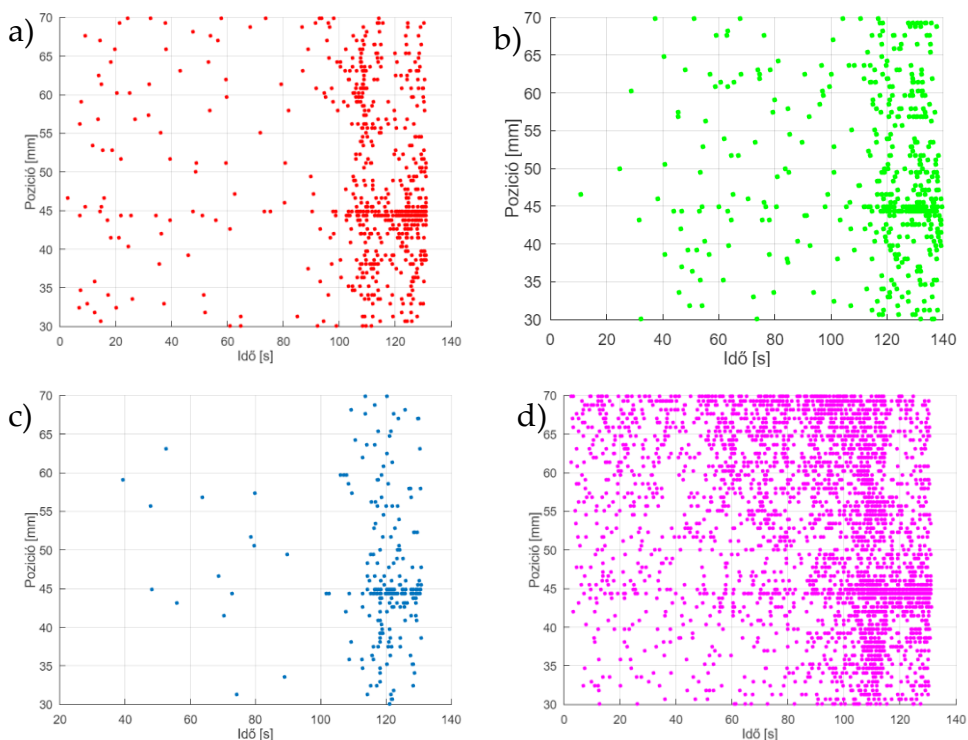
károsodások száma is növekedést mutat. Emellett a jelek pozíció szerinti eloszlása kiterjedtebb delaminációs károsodás jelenlétére utal.

4.3.7. 2[mm]x0,8[mm]

Az alábbi diagrammokon az 2 mm széles 0,8 mm vastag PCL réteggel ellátott próbatestek adatai láthatók. A 4.20.ábrán a jelsűrűsödés hisztogramjait ábrázolja, a 4.21.ábrán pedig a lokáció-idő diagrammok láthatóak a különböző tönkremeneteli csoportokra vonatkoztatva.



4.20. Ábra Jelsűrűsödés hisztogramok a 2x08mm próbatest esetében: a) szálszakadás, szál-mátrix elválás, b) Q2-98 rétegelválás, c) Q10-90 rétegelválás d) mátrixrepedés



4.21. Ábra Pozíció-idő diagrammok a 2x08mm próbatest esetében: a) szálszakadás, szál-mátrix elválás, b) Q2-98 rétegelválás, c) Q10-90 rétegelválás d) mátrixrepedés

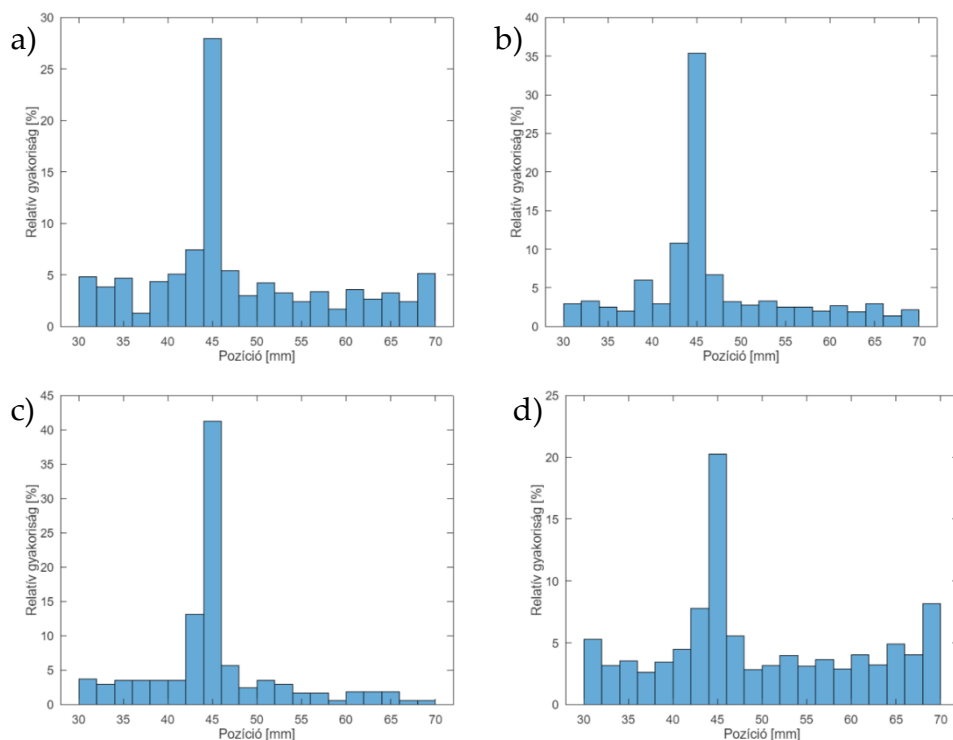
A Q2-98 cluster csoportot alkotó jelek átmenetet képeznek a mátrixrepedés és a delamináció folyamata között. Ennek az átmenetnek az oka, hogy a rétegek között lokális gyanta-dúsulás figyelhető meg. Az ebbe a csoportba eső jelek valószínűsíthetően delaminációs folyamatokat tükröznek.

A Q2-98 csoportban tapasztalt jelhalmozódás különösen jelentős a tönkremenetelt megelőzően, ami azzal magyarázható, hogy a delamináció folyamata elsőként ezekben a mátrix-dúsulásokban zajlik. Ezt a jelenséget a vizuális vizsgálat is alátámasztja, hiszen a próbatestek többsége delamináció jelleggel ment tönkre.

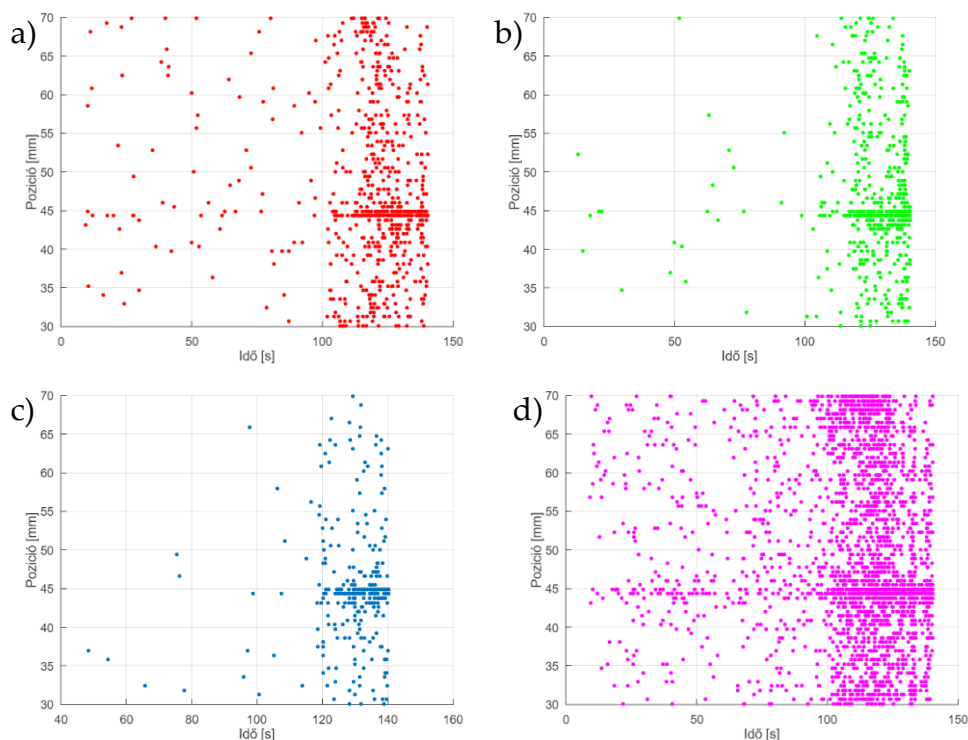
Emellett megfigyelhető, hogy a 2x0,8 mm vastag PCL réteg már elegendő vastagságot képvisel ahhoz, hogy látható (mikroszkópos) gyanta-dúsulást eredményezzen. Ennek következtében a PCL körüli dúsabb gyanta rétegben indul el és terjed a repedés, ami hozzájárul a kompozit szerkezet fokozatos tönkremeneteléhez.

4.3.8. 3[mm]x0,4[mm]

Az alábbi diagrammok az 3 mm széles 0,4 mm vastag PCL réteggel ellátott próbatestek adatai láthatók. A 4.22.ábrán a jelsűrűsödés hisztogramjait ábrázolja, a 4.23.ábrán pedig a lokáció-idő diagrammok láthatóak a különböző tönkremeneteli csoportokra vonatkoztatva.



4.22. Ábra Jelsűrűsödés hisztogramok a 3x04mm próbatest esetében: a) szálszakadás, szál-mátrix elválás, b) Q2-98 rétegelválás, c) Q10-90 rétegelválás d) mátrixrepedés



4.23. Ábra Pozíció-idő diagrammok a 3x04mm próbatest esetében: a) szálszakadás, szál-mátrix elválás, b) Q2-98 rétegelválás, c) Q10-90 rétegelválás d) mátrixrepedés

A szál-mátrix elválás, valamint a delamináció is lokalizált jeleget mutat, azonban az előzőekhez képest később kezdődik a jelsűrűsödés.

4.3.9. Az eredmények értékelése, összegzése

A mérések eredményei alapján elmondható, hogy hatékonyan lokalizálhatóak a károsodások és a tönkremeneteli folyamatok a kompozit anyagokban. A PCL réteg alkalmazása jelentős segítséget nyújt az állapotfelügyeletben, mivel lehetővé teszi, hogy a figyelmet a tönkremenetel legvalószínűbb zónájára irányítsuk.

A geometriai hatások vizsgálata során kiderült, hogy keskeny minták esetében is jól lokalizálhatóak a károsodások és a tönkremeneteli jelenségek. A minta szélességének növelésével viszont egyre hangsúlyosabban megjelennek a delaminációs károsodások, szemben a lokális szál-mátrix elválásokkal és a szálszakadásokkal. A keskenyebb minták hajlamosabbak hibahelyként viselkedni, míg a vastagabb minták esetében a PCL-lel módosított zóna egyre jobban együtt tud dolgozni a kompozittal. Ezt az is alátámasztja, hogy a vizsgálat során csak később, a tönkremenetelhez közelebb nő ugrásszerűen a jelek száma

A PCL vastagságának növelése jelentős hatással van a károsodási és tönkremeneteli folyamatokra. A 0,2 mm-es PCL vastagság esetén felfedezhető a lokalizált jelleg, azonban ebben az esetben a károsodások lokalizáltak, a tönkremenetel nem, valamint nem delamináció jellegű tönkremenetel ment végbe, míg vastagabb PCL rétegek esetében a lokalizálás hatékonysága fokozódik, és a delamináció válik dominánssá. A vastagabb PCL-mintákon makroszkopikus szinten is kiterjedt delaminációs tönkremenetel figyelhető meg.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

5.1. Magyar nyelvű összefoglaló

TDK dolgozatomban a kompozit anyagok akusztikus emissziós eljárás (AE) általi részletes elemzésére és kiértékelésére összpontosítottam, különösen a károsodási módok azonosítására és lokalizációjára. Az alapfelvetésem az volt, hogy a kompozit anyagok különböző károsodási formái eltérő akusztikus emissziós jellegzetességekkel bírnak, ami lehetőséget ad a károsodás pontos beazonosítására és nyomon követésére.

A kutatás során négy különböző károsodási módot vizsgáltam: szálszakadás, mátrixrepedés, szál-mátrix elválás és rétegelválás. Az akusztikus emissziós adatokat részletes elemzésnek vettem alá, amelynek köszönhetően átfogóbb és pontosabb képet kaptam a károsodási mechanizmusokról. Az eredményeknek köszönhetően későbbi vizsgálatok során, a különböző károsodási módok csoportosítása, esetlegesen a károsodások önálló vizsgálata jelentősen pontosabbá és egyszerűbbé vált.

A TDK dolgozatom második része a PCL-lel módosított próbatestek vizsgálatára fókuszál. Az előzőekben meghatározott károsodásokra jellemző tulajdonságok alapján lehetőség adódott részletesebb vizsgálatra, pontosabb szűrésekre. A vizsgálat során elkülönítettem a különböző károsodási módokat, ezáltal sokkal pontosabb információt kaptam, azok végbemeneteléről a kompozit szerkezeten belül.

A kutatásom során speciális próbatesteket készítettem, amelyekben különböző geometriájú PCL rétegeket alkalmaztam. Ezzel a módszerrel részletesen vizsgálhattam a károsodások és a tönkremeneteli folyamatok lokalizációját, figyelembe véve, hogy a geometriák milyen hatással vannak ezekre a jelenségekre. Az elsődleges célom az volt, hogy feltárjam a károsodások pontos helyét, vagyis, hogy a próbatesteken belül hol indul meg a tönkremenetel, illetve meghatározzam, hogy a különböző geometriájú PCL rétegek képesek-e hatékonyan lokalizálni nemcsak a károsodási folyamatokat, hanem a tönkremenetel helyét is.

Ezen túlmenően arra is összpontosítottam, hogy a tönkremeneteli jelenségek milyen típusúak, különösen, hogy delamináció-szerű károsodásról van-e szó. A PCL rétegek és a próbatestek geometriája révén nyert részletes adatok lehetőséget adtak annak vizsgálatára is, hogy a tönkremenetelre utaló jelek mikor kezdtek megjelenni a kísérletek során, ezzel képet nyújtva a tönkremeneteli folyamat kezdeti szakaszairól és időbeli lefolyásáról.

A PCL rétegek alkalmazásával végzett vizsgálatok alapján így nemcsak a károsodások és tönkremeneteli folyamatok térbeli elhelyezkedését tudtam pontosabban meghatározni, hanem betekintést nyertem abba is, hogy az adott geometriai elrendezések milyen módon befolyásolják a károsodások jellemzőit és azok időbeli megjelenését. Ezen megközelítés további előnye, hogy a károsodási módok azonosításánál figyelembe vehettem a megjelenési időpontokat is, amelyek kritikus

információkat nyújtanak a tönkremenetel fejlődési fázisairól és potenciális következményeiről.

Eredményeim segítenek abban, hogy a jövőbeli vizsgálatok során a kompozitok tönkremenetelét jobban előre lehessen jelezni és kezelni, így hozzájárulva a biztonságosabb és megbízhatóbb kompozit alkatrészek kifejlesztéséhez.

5.2. További megoldásra váró feladatok

A kompozit anyagok akusztikus emisszióval történő vizsgálata, különösen a tönkremenetel helyének meghatározása területén, számos további kutatási irányt kínál. Az egyik fontos lehetséges fejlesztés a több, különböző módosított zóna létrehozása és alkalmazása. Ezzel pontosabb adatok nyerhetők a tönkremeneteli jelenségekről, és mélyebb megértés szerezhető arról, hogyan befolyásolják a lokális zónák a terhelés és a repedés terjedésének dinamikáját. Emellett érdemes lenne lehatárolt delaminációs zónákat létrehozni, amelyek segíthetnek pontosabban nyomon követni, hol indul meg a delamináció és milyen ütemben halad.

Végül, a többféle vizsgálati módszer kombinálása is ígéretes lehet. Az akusztikus emisszió mellett például a termográfia, ultrahangos vagy röntgenes vizsgálatok bevonása még teljesebb képet adhat a tönkremeneteli folyamatokról. Egy ilyen kombinált megközelítéssel egyszerre több oldalról figyelhetnénk az anyagot, így még pontosabban meghatározhatnánk a károsodások és a tönkremenetel helyét és okait – és talán egy lépéssel közelebb kerülhetnénk a biztonságosabb, megbízhatóbb kompozit anyagok fejlesztéséhez.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Polimerek anyagszerkezetana és technológiája, Térhálós polimer mátrixú kompozitok labor mérési útmutató, BME (2021)
- [2] Heslehurst R. B.: Defects and damage in composite materials and structures. CRC Press, Boca Raton, Ausztrália (2014).
- [3] Polimertechnika terméktervezőknek, Kompozitok laborsegédlet, BME (2021)
- [4] Anyagok az energetikában, Kompozitok előadás anyag, BME (2021)
- [5] <https://www.michelman.com/markets/reinforced-plastic-composites/fiber-sizing/> (2024.11.10)
- [6] https://www.ramspec.eu/wp-content/uploads/2018/10/4_Michelman.pdf (2024.11.10)
- [7] Structural Health Monitoring in Composite Structures: A Comprehensive Review by Sahar Hassani, Mohsen Mousavi and Amir H. Gandomi
- [8] <https://www.addcomposites.com/post/defects-and-damage-in-composite-materials-and-structures>
- [9] Kompozit szerkezetek és tervezésük, Előadásanyag, BME (2023)
- [10] Thomas Jollivet, Catherine Peyrac, Fabien Lefebvre: Damage of composite materials, Procedia Engineering, Elsevier (2013)
- [11] Magyar B., Czigány T., Szabó G.: Metal-alike polymer composites: The effect of inter-layer content on the pseudo-ductile behaviour of carbon fibre/epoxy resin materials. Composites Science and Technology, 215, 109002 (2021)
- [12] Bunsell A. R., Harris B.: Hybrid carbon and glass fibre composites. Composites, 5, 157-164 (1974)
- [13] Summerscales J., Short D.: Carbon fibre and glass fibre hybrid reinforced plastics. Composites, 9, 157-166 (1978)
- [14] Swolfs Y., Geboes Y., Gorbatikh L., Pinho S. T.: The importance of translaminal fracture toughness for the penetration impact behaviour of woven carbon/glass hybrid composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 103, 1-8 (2017)
- [15] Li H., Wang W.-X., Takao Y., Matsubara T.: New designs of unidirectionally arrayed chopped strands by introducing discontinuous angled slits into prepreg. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 45, 127-133 (2013)
- [16] Mullin J. V., Mazzio V. F.: The effects of matrix and interface modification on local fractures of carbon fibers in epoxy. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 20, 391-394 (1972)
- [17] Atkins A. G.: Imparting strength and toughness to brittle composites. Nature, 252, 116-118 (1974)
- [18] Thomas D. A., Sperling L. H.: Chapter 11 - interpenetrating polymer networks. Polymer blends, Academic Press, Vol. 1-33 (1978)

- [19] Jenkins A. D., Kratochvíl P., Stepto R. F. T., Suter U. W.: Glossary of basic terms in polymer science (iupac recommendations 1996). *Pure and Applied Chemistry*, 68, 2287-2311 (1996)
- [20] Saghafi H., Zucchelli A., Palazzetti R., Minak G.: The effect of interleaved composite nanofibrous mats on delamination behavior of polymeric composite materials. *Composite Structures*, 109, 41-47 (2014)
- [21] Marino S. G., Czél G. : Development and characterisation of reparable, film-interleaved, pseudo-ductile hybrid composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 169, 107496/1-107496/13 (2023)
- [22] Marino S. G., Kuželová Košťáková E. , Czél G. : Development of pseudo-ductile interlayer hybrid composites of standard thickness plies by interleaving polyamide 6 nanofibrous layers. *Composites Science and Technology*, 234, 109924/1-109924/14 (2023)
- [23] Zhang, Y., Stringer, J., Hodzic, A., & Smith, P. (2017). Toughening Mechanism of Carbon Fibre Reinforced Polymer Laminates Containing Inkjet Printed Poly(methyl methacrylate) Microphases. *Journal of Composite Materials*, 52(11).
- [24] Clarke M.P, Pavier M.J.: Artificial damage techniques for low velocity impact in carbon fibre composites. *Composite Structures*, 25,113-120 (1993)
- [25] Short G.J., Guild F.J., Pavier M.J.: The effect of delamination geometry on the compressive failure of composite laminates. *Composites Science and Technology*, 61, 2075–2086 (2001)
- [26] Reis P.N.B., Ferreira J.A.M., Antunes F.V, Richardson M.O.W.: Effect of Interlayer Delamination on Mechanical Behavior of Carbon/Epoxy Laminates. *Journal of Composite Materials*, 43, 2609-2621 (2009).
- [27] Juarez P., Leckey C.A.C.; Aerogel to simulate delamination and porosity defects in carbon-fiber reinforced polymer composites. *AIP Conference Proceedings*, 1949(1), 120008 (2018)
- [28] McKeen L.: The effect of heat aging on the properties of sustainable polymers. *Plastics Design Library, The Effect of Long Term Thermal Exposure on Plastics and Elastomers* (második kiadás), William Andrew Publishing, 313-332 (2021).
- [29] Zhang X., Peng X., Zhang S.W.: Synthetic biodegradable medical polymers: Polymer blends. *Science and Principles of Biodegradable and Bioresorbable Medical Polymers*, Woodhead Publishing, 217-254 (2017).
- [30] Long J., Jinwen Z.: Biodegradable Polymers and Polymer Blends. *Plastics Design Library, Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics*, William Andrew Publishing, 109-128 (2013).
- [31] Deshmukh K., Basheer Ahamed M., Deshmukh R.R.: Biopolymer Composites With High Dielectric Performance: Interface Engineering. *Biopolymer Composites in Electronics*, Elsevier, 27-128 (2017).

- [32] Yang J., Zhou Q., Shen K., Song N., Ni L.: Controlling nanodomain morphology of epoxy thermosets templated by poly(caprolactone)-blockpoly(dimethylsiloxane)-block-poly(caprolactone) aba triblock copolymer. *RSC Advances*, 8, 3705-3715 (2018).
- [33] Siddhamalli S. K.: Toughening of epoxy/polycaprolactone composites via reaction induced phase separation. *Polymer Composites*, 21, 846-855 (2000).
- [34] Karger-Kocsis J.: Self-healing properties of epoxy resins with poly(ϵ caprolactone) healing agent. *Polymer Bulletin*, 73, (2016).
- [35] Szebényi G., Czigány T., Magyar B., Karger-Kocsis J.: 3D printing-assisted interphase engineering of polymer composites: Concept and feasibility. *Express Polymer Letters*, 11, 525-530 (2017)
- [36] Szebényi G., Magyar B., Czigány T.: Achieving Pseudo-Ductile Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites via Interfacial Engineering. *Advanced Engineering Materials*, 23, 2000822/1-2000822/7 (2021)
- [37] Marton G. Zs., Fendrik Á., Szebényi G.: Manufacturing of composites with designed failure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1313, 012014/1-012014/9 (2024)
- [38] Hliva V., Szebényi G.: Non-Destructive Evaluation and Damage Determination of Fiber-Reinforced Composites by Digital Image Correlation. *Journal of Nondestructive Evaluation* 42, 43 (2023).
- [39] Saeedifar M., Zarouchas D.: Damage characterization of laminated composites using acoustic emission: A review. *Composites Part B*, 195 (2020).
- [40] Romhány G., Czigány T., Karger-Kocsis J.: Failure Assessment and Evaluation of Damage Development and Crack Growth in Polymer Composites Via Localization of Acoustic Emission Events: A Review. *Polymer Reviews*, 57, 397-439 (2017)
- [41] Barile C., Casavola C., Pappaletta G., Kannan V.P.: Damage monitoring of carbon fibre reinforced polymer composites using acoustic emission technique and deep learning. *Composite Structures*, 292, 115629 (2022).
- [42] Szebényi G., Hliva V., Magyar B.: Development of interphase engineering techniques for the ductility improvement in CF/EP composites - Comparison of NDT methods for delamination localization. *Materials Today: Proceedings*, 34, 113-116 (2020).
- [43] P.J. de Groot, P.A.M. Wijnen, R.B.F. Janssen, Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites *Compos Sci Technol*, 55 (4) (1995), pp. 405-412
- [44] R. Gutkin, C.J. Green, S. Vangrattanachai, S.T. Pinho, P. Robinson, P.T. Curtis On acoustic emission for failure investigation in CFRP: pattern recognition and peak frequency analyses, *Mech Syst Signal Process*, 25 (4) (2011), pp. 1393-1407
- [45] M. Saeedifar, M.N. Saleh, S.T. De Freitas, D. Zarouchas, Damage characterization of adhesively-bonded Bi-material joints using acoustic emission, *Compos B Eng*, 176 (2019), p. 107356

- [46] M. Nikbakht, J. Yousefi, H. Hosseini-Toudeshky, G. Minak, Delamination evaluation of composite laminates with different interface fiber orientations using acoustic emission features and micro visualization, *Compos B Eng*, 113 (2017), pp. 185-196
- [47] S. Rajendraboopathy, T. Sasikumar, K.M. Usha, E.S. Vasudev, Artificial neural network a tool for predicting failure strength of composite tensile coupons using acoustic emission technique, *Int J Adv Manuf Technol*, 44 (3) (2009), pp. 399-404
- [48] V. Arumugam, R.N. Shankar, B.T.N. Sridhar, A.J. Stanley, Ultimate strength prediction of carbon/epoxy tensile specimens from acoustic emission data, *J Mater Sci Technol*, 26 (8) (2010), pp. 725-729
- [49] Šofer, M., Šofer, P., Pagáč, M., Volodarskaja, A., Babiuch, M., & Gruň, F. (2023). Acoustic Emission Signal Characterisation of Failure Mechanisms in CFRP Composites Using Dual-Sensor Approach and Spectral Clustering Technique. *Polymers*, 15(1), 47.
- [50] He, X.; Cai, D.; Niyogi, P. Laplacian score for feature selection. *Adv. Neural Inf. Process. Syst.* 2005, 18, 507–514.
- [51] Chaimontree, S.; Atkinson, K.; Coenen, F. Best clustering configuration metrics: Towards multiagent based clustering. In *Advanced Data Mining and Applications*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2010; pp. 48–59.
- [52]https://zoltek.com/wp-content/uploads/2017/09/TDS_PX35_UniDirectional_Fabric.pdf (2024.11.10)
- [53]https://shop.novia.hu/wp-content/uploads/2019/05/ipoxMR3010_MH3124_E_2013_02.pdf (2024.11.10)
- [54]https://www.esun3d.com/uploads/eSUN_eMate-Filament_TDS_V4.0.pdf (2024.11.10)
- [55] Szebényi G., Marton G. Zs., Romhány G.: Damage localization in designed failure composites. in 'ECCM21 – 21st European Conference on Composite Materials Nantes, Franciaország. 2024.07.02-2024.07.05.,156-160 (2024)
- [56] Bulman Vencel, Szakdolgozat, Szénszálerősítésű kompozitok károsodási módjainak meghatározása akusztikus emisszióval, BME, 2023