



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

NÉMETH DOROTTYA

TDK DOLGOZAT

ÚJRAHASZNOSÍTOTT SZÉNSZÁLLAL ERŐSÍTETT HIBRID
SZERKEZETŰ KOMPOZITOK VIZSGÁLATA

Témavezető:

Dr. Tamás-Bényei Péter

adjunktus

Konzulens:

Sántha Péter

doktorandusz

BUDAPEST, 2023

Újrahasznosított szénszállal erősített hibrid szerkezetű kompozitok vizsgálata

(Examination of recycled carbon fibre reinforced hybrid composites)

Németh Dorottya
n.dorottya91@gmail.com

**Konzulensek: Sántha Péter, PhD hallgató, Polimertechnika Tanszék,
Dr. Tamás-Bényei Péter egyetemi adjunktus, Polimertechnika Tanszék**

A jelenleg rendelkezésre álló újrahasznosítási technológiák már lehetővé teszik az erősítőanyagok kompozit hulladékból történő valamilyen szintű visszanyerését, ezek felhasználásával pedig körkörössé tehető az anyagáram a kompozit iparban [1]. A reciklált szénszálak újrafelhasználásával az alapanyagárok csökkenthetők, így lehetőség nyílik az erősítőszálak alkalmazására új területeken. Rétegtrend tervezésnél az újrahasznosított szénszál szövedék rétegek beépítésével a hibrid kompozitok szívóssága, csillapítóképessége és a tönkremenetel módja nagymértékben változtatható [2]. Az előbbi paraméterek meghatározók a kompozit szerkezetek hosszútávú viselkedésénél, ezáltal befolyásolják a termékek élettartamát.

Munkám során bemutatom az életciklus elemzés részegységeit és különböző típusait, emellett kitérek a szénszál erősítésű kompozitokkal alkotott kapcsolatára. Ezután a szénszál kompozitok hulladékkezelési technológiáit, valamint a szénszál újrahasznosítási módszereit tárgyalom. Végül összefoglalom a hibrid kompozitok fajtáit, jellemző mechanikai tulajdonságait, továbbá különböző kutatások eredményeit, különös tekintettel a szilárdság, a modulus és a tönkremeneteli alakváltozás értékeire. Ezt követően ismertetem a kompozitok törésmechanikáját.

Dolgozatom célja az újrahasznosított szénszállal erősített hibrid kompozitok vizsgálata, amely során különböző területi sűrűségű rCF paplanok, valamint unidirekcionális szénszövet felhasználásával hibrid kompozitokat készítettem. Az elkészült kompozit lemezeket repedésterjedési és fárasztási vizsgálat alá vettem, hogy meghatározzam a mechanikai tulajdonságaikat és megtaláljam a felhasználás szempontjából optimális rétegtrendet.

- [1] S. Pimenta and S. T. Pinho, 'Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook', *Waste Management*, vol. 31, no. 2, pp. 378–392, Feb. 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2010.09.019.
- [2] D. Quan, U. Farooq, G. Zhao, C. Dransfeld, and R. Alderliesten, 'Recycled carbon fibre mats for interlayer toughening of carbon fibre/epoxy composites', *Materials & Design*, vol. 218, p. 110671, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.matdes.2022.110671.

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	1
2. Szakirodalmi áttekintés	2
2.1. Szénszálás kompozitok hulladékkezelési technológiái.....	2
2.1.1. Mechanikai újrahasznosítás	3
2.1.2. Termikus újrahasznosítás.....	5
2.1.3. Kémiai újrahasznosítás.....	6
2.2. Életciklus elemzés (Life Cycle Assessment).....	8
2.2.1. A cél és a tárgykör meghatározása.....	9
2.2.2. Életciklus leltárelemzés (Life Cycle Inventory).....	10
2.2.3. Életciklus hatásértékelés (Life Cycle Impact Assessment)	10
2.2.4. Életciklus értelmezés.....	11
2.2.5. Életciklus elemzés módszerei	11
2.2.6. Kompozit ipari esettanulmányok.....	11
2.3. Hibrid kompozitok	16
2.3.1. HiPerDiF technológia.....	16
2.3.2. Hibrid kompozitok összehasonlítása	22
3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések	26
3.1. Felhasznált alapanyagok	26
3.1.1. Szénszálás anyagok	26
3.1.2. Egyéb alapanyagok	26
3.2. Próbatetek gyártása	26
3.2.1. Tisztán rCF alapú kompozitok	26
3.2.2. Hibrid kompozitok	27
3.3. Alkalmazott berendezések	27
3.4. Vizsgálati módszerek	27
3.4.1. Szakítóvizsgálat	27
3.4.2. Hárompontos hajlítóvizsgálat	28
3.4.3. ENF vizsgálat	28
3.4.4. Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM).....	29
3.4.5. Optikai mikroszkóp.....	29
4. Kísérleti eredmények.....	30
4.1. Mechanikai vizsgálatok	30
4.1.1. Szakítóvizsgálat	30
4.1.2. Hajlítóvizsgálat	33

4.1.3. ENF.....	35
4.2. Morfológiai vizsgálatok.....	37
4.2.1. Pásztázó elektronmikroszkóp	37
4.2.2. Optikai mikroszkóp	40
5. ÖSSZEFOGLALÁS	44
5.1. Magyar nyelvű összefoglaló	44
5.2. Idegen nyelvű összefoglaló	44
6. Felhasznált források	46
7. Melléklet.....	49

Jelölések jegyzéke

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
a_0	kezdeti repedés hossza	mm
a_c	kritikus repedés hossza	mm
b	próbatest szélessége	mm
C_0	kezdeti engedékenység	mm/N
C_c	kritikus engedékenység	mm/N
G_{IIC}	kritikus törési szívósság	kJ/mm ²
L	alátámasztási távolság	mm
P_c	maximális erő	N

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
δ_c	maximális erőnél mért alakváltozás	mm

Rövidítések

Rövidítés	Megnevezés
ADFRFC	igazított folytonos szálak kompozit (aligned discontinuous fibre composite)
BMC	bulk moulding compound
CD	keresztirány (cross direction)
CF	szénszál (carbon fibre)
CFRC	szénszál erősítésű kompozit (carbon fibre reinforced composite)
CFRP	szénszál erősítésű polimer (carbon fibre reinforced polymer)
CH ₄	metán (methane)
CO	szén-monoxid (carbon monoxide)
CO ₂	szén-dioxid (carbon dioxide)
CSM	vágott szálak paplan (chopped strand mat)
DIC	digitális képkorreláció (digital image correlation)
ENF	bemetszett végű hajlítás (end notched flexure)
EOL	életciklus vége (end of life)
FRF	frekvenciafüggvény (frequency response function)
GF	üvegszál (glass fibre)
GWP	globális felmelegedési potenciál (global warming potential)
H ₂	hidrogén (hydrogen)
HCN	hidrogén-cianid (hydrogen cyanide)

HiPerDiF	High Performance Discontinuous Fibre
HiPerDuCT	High Performance Ductile Composite Technology
LCA	életciklus elemzés (life cycle assessment)
LCI	életciklus leltárelemzés (life cycle inventory)
LCIA	életciklus hatásértékelés (life cycle impact assessment)
MD	gépirány (machine direction)
N ₂	nitrogén (nitrogen)
NH ₃	ammónia (ammonium)
NO _x	nitrogén-oxidok (nitrogen oxides)
PBM	pressure bag molding
PED	elsődleges energiaigény (primary energy demand)
PTFE	poli(tetrafluor-etilén) (polytetrafluoroethylene)
rCF	újrahasznosított szénszál (recycled carbon fibre)
SEM	pásztázó elektronmikroszkóp (scanning electron microscope)
UD	unidirekcionális (unidirectional)
vCF	szűz szénszál (virgin carbon fibre)
VOC	illékony szerves vegyületek (volatile organic compounds)
WF	sima szövésű szövet (woven fabric)

1. BEVEZETÉS

A szénszál erősítésű kompozitok (CFRC) jelentős szerepet töltenek be a repülőgépiparban, az autóiparban, az építőiparban és az energetikában olyan kedvező tulajdonságaik miatt, mint a kis tömeg és a kiváló mechanikai tulajdonságok. A szénszálak (CF) kedvező szilárdság/tömeg arányuk miatt a kompozitokat erősebbé teszik, miközben a tömegüket nem növelik. Továbbá jó hő-, kopás és korrózióállósággal rendelkeznek. Különböző kiserelésekben érhetők el, többek között őrölve, hosszú, rövid, illetve vágott szál, valamint szövetek és kelmék formájában [8].

Munkám során bemutatom az életciklus elemzés részegységeit és különböző típusait, emellett kitérek a szénszál erősítésű kompozitokkal alkotott kapcsolatra. Ezután bemutatom a szénszál kompozitok hulladékkezelési technológiáit, valamint a szénszál újrahasznosítási módszereit. Végül összefoglalom a hibrid kompozitok fajtáit, jellemző mechanikai tulajdonságait, továbbá különböző kutatások eredményeit, különös tekintettel a szilárdság, a modulus és a tönkremeneteli alakváltozás értékeire.

Dolgozatom célja az újrahasznosított szénszállal erősített hibrid kompozitok vizsgálata, amely során a különböző rétegrendek egymásra helyezésével létrehozott kompozitok mechanikai tulajdonságainak – főként a szívósság és a repedésterjedés – változását mérem a szűz szénszállal erősített kompozitokhoz képest. Ezen kívül a hibrid kompozitok morfológiáját is vizsgálom.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Az irodalomkutatás során összefoglaltam a szénszál hulladékkezelési technológiáit, valamint az újrahasznosítási módszereit, többek között a mechanikai, a termikus és a kémiai módszert. Továbbá részletes áttekintést készítettem az életciklus elemzésről, a részegységeiről és a szélszál kompozitokkal kapcsolatos alkalmazásáról. Ezután átfogó kutatást végeztem a hibrid kompozitok fajtáiról, tulajdonságairól és az iparban betöltött szerepükről.

2.1. Szénszál kompozitok hulladékkezelési technológiái

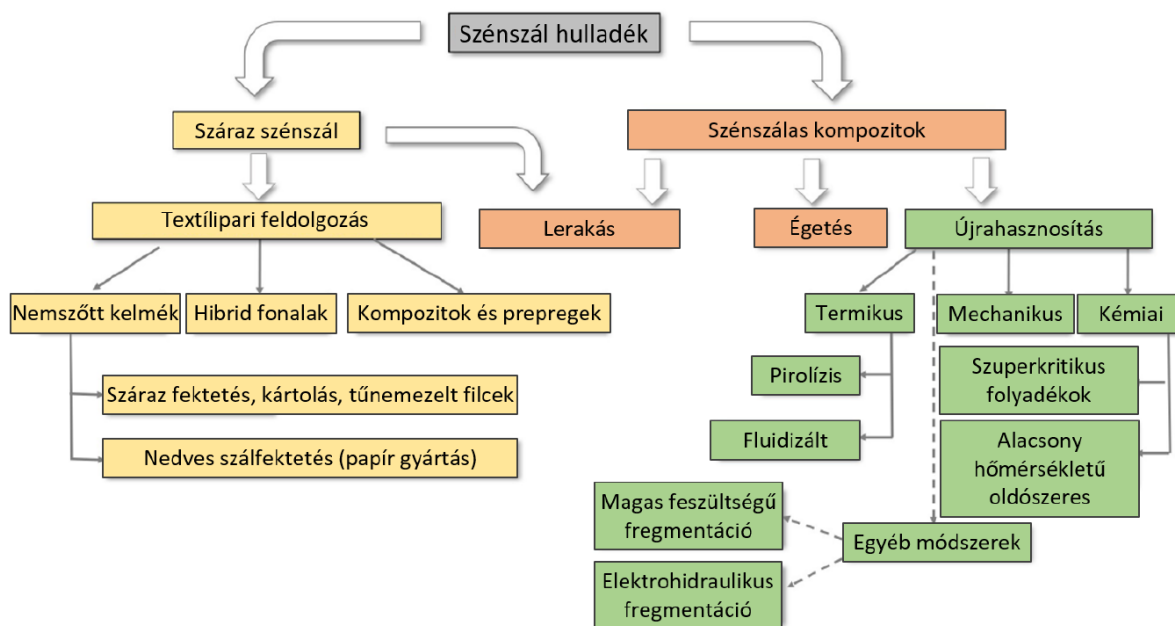
A CFRP alkalmazásának ugrásszerű növekedése és terjedése már évtizedekkel ezelőtt megtörtént, azonban a termékek életciklusa jellemzően 20-30 év. Ezért a korábbi alkalmazások, valamint a folyamatos előállítás és a gyártás bővülése miatt nagy mennyiségű szénszál erősítésű kompozit hulladék várható az elkövetkező években. Bizonyos becslések szerint [7] évente 3000 tonna CFRC hulladék keletkezik az USA és Európa területén, így 2030-ra várhatóan körülbelül 6000-8000 kereskedelmi repülőgép éri el az életciklusa végét (EOL). Ezért rendszereket kell kidolgozni a kapcsolódó gyártási folyamatokból és az EOL-termékekből származó hulladékok kezelésére [6].

Pakdel és társai [8] szerint a szénszál hulladék három fő típusba sorolható. Az első a gyártás során keletkező szénszálmaradványok, amelyek mechanikai jellemzői hasonlóak a vCF-hez, a második az előgyártmányok maradványai és a harmadik a félkész termékek, valamint a szénszál erősítésű kompozitokból visszanyerhető szálak. A CFRC-k tekintetében három módszer létezik a hulladék kezelésére. Ezek az ártalmatlanítás (hulladéklerakás), az energetikai hasznosítás (égetés) és az újrahasznosítás. A hulladéklerakás az egyik legolcsóbb ártalmatlanítási módszer, azonban egyáltalán nem környezetbarát. Az égetéssel van lehetőség az energia egy részének visszanyerésére, azonban eközben nagy mennyiségű szennyező anyag kerül a környezetbe. Ez hosszútávon szintén nem tekinthető fenntartható megoldásnak. Újrahasznosítás során a polimer mátrixból visszanyerhető a szál, majd az újrahasznosított szálak ismét felhasználhatók a gyártás során. Azonban ez kompozitok esetében függ a mátrix fajtájától. Míg a termoplasztikus mátrix ismét megolvasztható és felhasználható új termék gyártásához, addig a térhálós újrahasznosítása ennél bonyolultabb. A CF visszanyerésére három módszer létezik, ezek a mechanikai, a termikus és a kémiai újrahasznosítás.

A szénszál iránti megnövekedett kereslet hatására nagy mennyiségű CFRC hulladék várható az elkövetkező években. Ezek újrahasznosítására azonban vannak különböző lehetőségek. A szűz szénszál egyik legnagyobb hátránya a magas előállítási költség. Ezt a gyártáshoz szükséges magas energiamennyiség életciklus elemzéssel is kimutatható. A CF gyártás energiaszükséglete – körülbelül 250 MJ/kg – nagymértékben meghaladja pl. az üvegszálét (GF). Ezen kívül a folyamat során olyan

melléktermékek keletkeznek, mint a hidrogén-cianid (HCN), ammónia (NH₃), szén-monoxid (CO), szén-dioxid (CO₂), nitrogén-oxid (NO_x) és egyéb illékony szerves vegyületek (VOC). Ezek károsak a környezetre, így a gyártás során kezelni kell. Az rFC újrahasznosításához szükséges energia jelentősen kisebb [8].

A CFRC-k tekintetében három módszer (1. ábra) létezik a hulladék kezelésére: ártalmatlanítás (hulladéklerakás), energetikai hasznosítás (égetés) és újrahasznosítás. A hulladéklerakás az egyik legolcsóbb ártalmatlanítási módszer, azonban ez nem jelent megoldást a folyamatosan növekvő hulladékmennyiségre. Az égetéssel van lehetőség az energia egy részének visszanyerésére, de ez csak a mátrix anyag égéséből származik. Ez hosszútávon szintén nem tekinthető fenntartható megoldásnak. Újrahasznosítás a polimer mátrixból visszanyerhető a szál, majd az újrahasznosított szálak felhasználhatók ismét a gyártás során. Azonban a kompozitok újrahasznosítása függ a polimer típusától és a mátrix fajtájától is. Amíg a termoplasztikus mátrix újraolvasztható és felhasználható új termék gyártásához, addig a térhálós újrahasznosítása ennél bonyolultabb. A CF visszanyerésére három módszer létezik, ezek a mechanikai, a termikus és a kémiai újrahasznosítás [8].

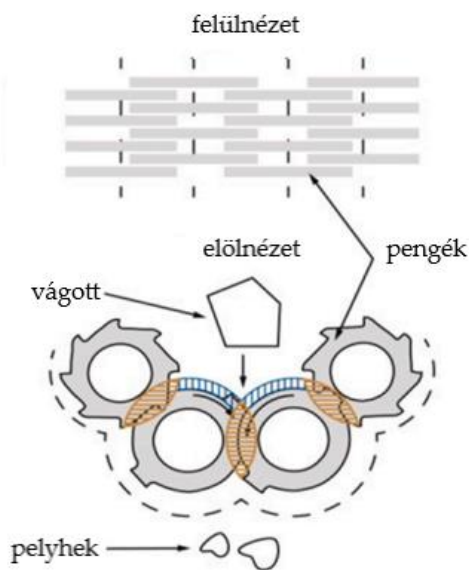


1. ábra – CFRP újrahasznosítás módszerei [8]

2.1.1. Mechanikai újrahasznosítás

A mechanikai újrahasznosítás egy gyakran alkalmazott, hatékony módszer a kompozit hulladék kezelésére. Előnye a gyors feldolgozás és a könnyű elosztás méret szerint. Hátránya, hogy megtöri a CF hosszát és a szálak felületén gyantamaradványok maradnak. Ez pedig csökkenti az újrafelhasználhatóságot. A feldolgozás történhet a kompozit alkatrész aprításával (shredding), zúzásával (crushing), darálásával (grinding) vagy őrlésével (milling). Újrahasznosítás során több lépcsőben történik a

méretcsökkenés. A CFRP hulladékot először aprítóval 50-100 mm-es darabokra vágják, ehhez általában többtengelyes aprító- és vágómalmokat (2. ábra) használnak. Az keletkező darabok méretét a pengék közötti távolság, a forgási sebesség befolyásolja és a CFRP koptató hatása befolyásolja. Ez elősegíti a fém alkatrészek eltávolítását, valamint a térfogatcsökkentéssel a szállítási költség is csökkenthető. Ezután második lépésben tovább aprítják a hulladékot, jellemzően 0,05-10 mm méretűre. Ezt egy méret szerinti szétválogatás követi, amely során a különböző sűrűségű sziták és ciklonok segítségével az őrlményt frakciókra választják szét. A folyamatból származó végtermékeket három kategóriába soroljuk: finom szál, finom por és durva reciklátum. A finom por rendszerint nagyobb arányban tartalmazza a kompozit polimer mátrixát és az adalékanyagokat. A folyamat során kapott kis szemcseméretű por felhasználható a kalcium-karbonát kiváltására új kompozitok esetében. Mivel nagy mennyiségben tartalmaz kis sűrűségű polimert, így a kalcium-karbonátnál kisebb sűrűséggel rendelkeznek. Ez előnyt jelent, hiszen az új kompozit tömege alacsonyabb lesz. Hátránya, hogy nagy mennyiségben alkalmazva jelentősen megnöveli a viszkozitást, ami a feldolgozás során problémákhoz vezet, továbbá rontja a kompozit mechanikai tulajdonságait. Ezzel szemben a nagyobb szemcseméretű végtermékekben magasabb az erősítőszál aránya. A finom szálak, amelyeket itt újrahaznosított szénszálaknak nevezünk, a nyersszál-anyag bizonyos hányadának helyettesítésével új kompozitokban erősítőanyagként újra felhasználhatók. Hátránya, hogy kis mennyiségben alkalmazva rontja a kompozit mechanikai tulajdonságait. Ennek oka, hogy egyrészt a nagyobb méretű reciklált szálak hibahelyet jelenhetnek, másrészt a rCF és a mátrix közötti adhézió gyengébb, mint az vCF és a mátrix közötti. Ez azonban megfelelő felületkezeléssel javítható. Jellemzően kompozitokba, betonba, aszfaltba vagy bevonatokba keverve alkalmazzák a mechanikai újrahaznosítással visszanyert szálakat [8,9,21].



2. ábra – Egy többtengelyes aprítógép felülnézeti és előlnézeti ábrája [8]

2.1.2. Termikus újrahasznosítás

A művelet során magas hőmérsékleten a térhálós mátrix depolimerizálódik és a mátrix bomlása után az erősítőszálak megmaradnak. Előnye, hogy szinte bármilyen kompozit esetében alkalmazható ez az eljárás. A CF visszanyerésére alapvetően két módszer létezik: a pirolízis és a fluidágyas módszer [8,21].

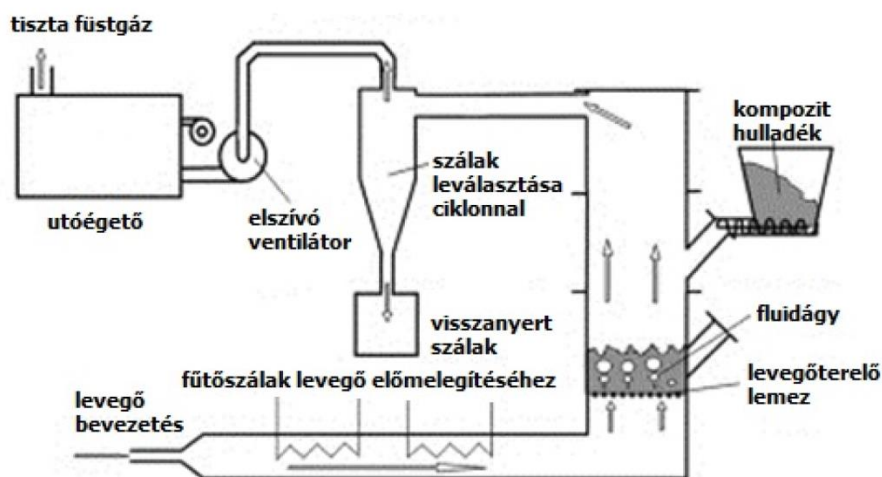
Pirolízis során (3. ábra) a polimer mátrixot inert atmoszférában (általában nitrogén (N_2)), szabályozott hőmérsékleten (350-1000 °C) és légköri nyomáson depolimerizálják egy pirolizáló reaktorban. A folyamat során a mátrix szilárd anyagokra (szálak és töltőanyagok), piroolajra (benzol, toluol és fenolok), pirogázra (hidrogén (H_2), metán (CH_4), szén-monoxid (CO), szén-dioxid (CO_2)) és poliaromás láncokra bomlik. A hulladék típusától függően a szilárd anyagok részaránya 50-75 tömeg%, a folyadékoké 10-50 tömeg%, a gázoké pedig 5-15 tömeg%. A keletkező folyadékoknak és gázok összegyűjthetők és felhasználhatók. Az alacsonyabb fűtőértékű (15-20 MJ/kg) gázokat elégetik és a keletkező hő felhasználásával fűtik a pirolizáló berendezést. A magasabb fűtőértékű (30-40 MJ/kg) folyékony anyagokat pedig jellemzően vegyipari alapanyagként hasznosítják. Az újrahasznosított szálak mechanikai tulajdonságait jelentősen befolyásolja a folyamat hőmérséklete. Alacsony hőmérséklet kevésbé degradálódnak a szálak, ehhez katalizátorokat alkalmaznak. Ez a katalitikus eljárás szén- és üvegszál erősítésű kompozit hulladékok, továbbá szálerősített prepreg hulladékok esetén is alkalmazható. Így a reciklált szálak felületén csak kevés polimer mátrix marad, így az újrahasznosítás során lehetőség van a megfelelő szál-mátrix adhézióra. A szálak degradációjának további csökkentése kis mennyiségű oxigén bevezetésével érhető e. Ez megkönnyíti az elszenesedett maradék eltávolítását a szálakról [8,10,11,21].



3. ábra – A pirolízis folyamata [211]

A fluidágyas hőkezelés folyamatát a 4. ábra szemlélteti. Először a CFRP hulladékot mechanikai módszerrel – jellemzően 6 és 20 mm közötti méretűre – aprítják. Ezt az őrlémenyt egy fluidágyas reaktorba vezetik, ahol a szilika homok szemcsék nagyhőmérsékletű (400-650 °C) és nagysebességű légáram hatására fluidizált állapotba kerülnek. A szilika homok elősegíti a felaprított törmelékből az epoxigyantát

bomlását, így felszabadíthatók a beágyazott szálak. Továbbá a fluidizáló levegő képes kioldani a felszabaduló szálakat, azonban a nem szerves szennyeződések (pl. fém) az ágyban maradnak. A hőmérséklet megválasztásánál elsődleges szempont, hogy alkalmas legyen a polimer bomlásához, tiszta szálakat eredményezve. A túl magas hőmérséklet az a szálak tulajdonságainak romlásához vezet. A megfelelően megválasztott hőmérsékleten a gyanta bomlástermékei oxidálódnak, így visszanyerhető az energiatartalom. A szálakat ezután eltávolítják a gázkamrából ciklon vagy gáz-szilárd elválasztó berendezés segítségével, majd összegyűjtik. A visszanyert szálak átlagos hossza 6-10 mm. Az eljárás előnye, hogy egyaránt alkalmas vegyes és szennyezett kompozit hulladékok feldolgozására, továbbá festett felületek, fém alkatrészek jelenléte és szendvicskompozitok maganyaga sem jelent problémát. Az így visszanyert szálakat jellemzően BMC (bulk moulding compound) eljárással készült kompozitoknál és nem szőtt erősítést igénylő esetekben alkalmazzák [8,12,21].



4. ábra – Fluidágyas kezelés folyamata [21]

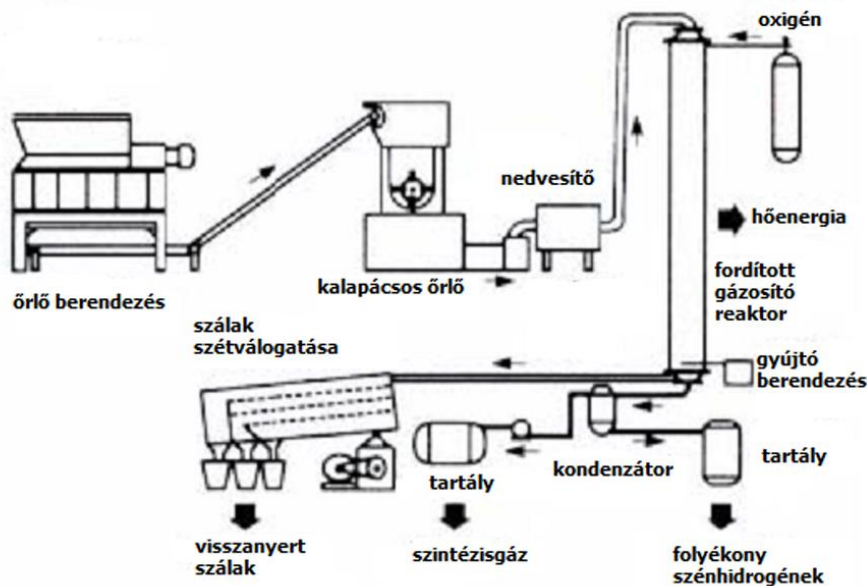
2.1.3. Kémiai újrahasznosítás

A kémiai újrahasznosítás során a mátrix és a szál szétválasztása oldószer segítségével történik. A módszer előnye, hogy a szálak hossza nem csökken és a mechanikai tulajdonságok nem romlanak, azonban ez a módszer még csak laboratóriumi körülmények között végezhető el. Így a technológiai körülmények miatt költségesnek módszernek számít [8].

A kémiai újrahasznosítás egyik fajtája a szolvólízis. Ennek során a polimer mátrixot szuperkritikus állapotú oldószer segítségével bontják le. Az végtermékek jellemzően megtisztított szálak, szervesetlen töltőanyagok, depolimerizált mátrix és monomerjei. Az oldószer típusától függően megkülönböztetünk hidrolízist (víz segítségével), alkoholízist (alkoholok segítségével), glikolízist (glikolok segítségével) és acidolízist (savak segítségével). Vízzel és alkohol esetében nagy nyomást és magas hőmérsékletet vagy lúgos katalizátorokat (nátrium-hidroxid, kálium-hidroxid) alkalmaznak, hogy a reakció gyorsabban végbemenjen. A folyamat során a víz és az alkohol visszanyerhető,

viszont a keletkező lúgos sók eltávolítása nehézségeket okoz. A szuperkritikus és szubkritikus folyadékok alkalmazása jellemző módszer a kompozit hulladékok esetében. A szuperkritikus folyadékok köztes tulajdonságokkal rendelkeznek a gáz és a folyadék között, folyadékszerű sűrűség és gázszerű viszkozitás jellemzi. A szuperkritikus állapotban jellemző nagy diffúziós képesség és oldhatóság elősegíti a polimerek bomlását és részleges oxidációját. Térhálós polimerek bontására főként vizet és alkoholokat használnak. A víz előnyei közé tartozik az alacsony ár, a könnyű újrahasznosíthatóság és újrafelhasználhatóság. A víz kritikus hőmérséklete 374 °C, kritikus nyomása pedig 22,1 MPa. A szuperkritikus vizet alacsony viszkozitás, hatékony hő- és tömegátadás, valamint nagy diffúziós sebesség jellemzi. Az utóbbi elősegíti, hogy gyorsan behatolhasson a CFRC mikroüregeibe. Ez lehetővé teszi az epoxigyanta hatékonyabb lebontását. Továbbá a szuperkritikus víz dielektromos állandója hasonlít a nem poláros oldószeréhez, így a szuperkritikus víz teljes mértékben elegyedik a szerves vegyületekkel. A szubkritikus víz és a kritikus közeli víz kiváló oldószernek bizonyul, mivel olcsó, nem mérgező és környezetbarát. A kritikus közeli víz jellemzően magas diffúziós együtthatóval, az alacsony sűrűséggel és alacsony dielektromos állandóval rendelkezik. A szuperkritikus alkoholok előnye, hogy a költsége és a toxicitása is alacsony, újrahasznosítható, valamint alkalmas szerves és szervetlen vegyületek oldására is, továbbá jó minőségű reciklált szálakat eredményez. Ezenkívül az alkoholok könnyebben hozhatók kritikus állapotba, valamint a szuperkritikus alkoholok nagy mennyiségű hidrogént képesek előállítani, ezzel elősegítve a bomlási reakciót [8,14,21].

Egy másik ismert módszer a fordított gázosítás (5. ábra), amely során magas hőmérsékleten és víz és oxigén kontrollált adagolásával szintézisgázzá (hidrogén és szén-monoxid keveréke) és kis molekulatömegű folyékony szénhidrogének keverékévé alakítják a polimert, így a szálakat tisztítottan, műanyag maradék nélkül nyerik vissza. Az eljárás során a reaktorba felülről vezetik be a vízzel átitatott, őrölt kompozitot, valamint az oxigént. Ezalatt a láng frontja alulról felfelé halad, a reciklátumot pedig alul vezetik el. A kinyert szálakat méret szerint szétválogatják. Az folyamat végén a reciklált szálakon maradt gyanta maximum 10% lehet, továbbá a szálak nem degradálódhatnak. A gyanta mennyisége akkor a legkisebb, ha a kompozit víztartalma a gázosítás előtt magas és az oxigén áramlási sebessége kicsi. A magas víztartalom miatt kémiai reakciók hatására a polimerből gáz halmazállapotú termékek keletkeznek, míg a kis áramlási sebesség elég időt biztosít a konverzió végbemeneteléhez a gyanta meggyulladás nélkül. A módszer előnye, hogy a szálakat tisztán, műanyag maradék nélkül nyerik vissza, viszont hátránya, hogy folyékony termék nem használható fel az eredeti mátrix helyettesítésére. [21].



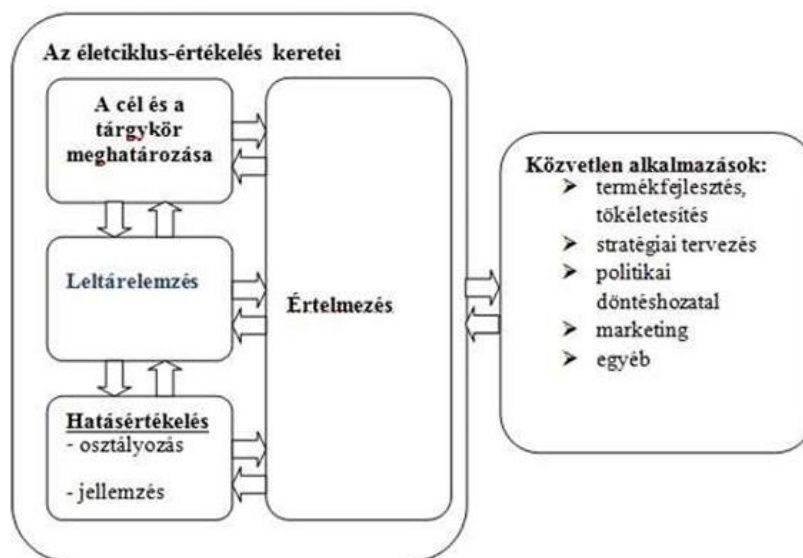
5. ábra – A fordított gázosítás folyamata [21]

2.2. Életciklus elemzés (Life Cycle Assessment)

A környezetvédelem és a környezettudatosság meghatározó szerepet tölt be az emberek mindennapjaiban. Ennek hatására egyre nagyobb jelentőséggel bírnak azok a módszerek, amelyek meghatározzák az előállított és fogyasztott termékekkel összefüggésben megjelenő lehetséges környezeti hatásokat, illetve ezen hatások megelőzésére is törekednek. Az említett módszerek egyik leggyakrabban alkalmazott fajtája az életciklus értékelés (LCA). Az életciklus elemzés során feltérképezik egy adott termék vagy szolgáltatás környezeti tényezőit, a szállítást, valamint az iránta való kereslet következtében fellépő is környezeti hatásokat. Ezeket a hatásokat egészen a előállítástól a termék életútjának végéig vizsgálják, így lehetőség nyílik az adott termék vagy szolgáltatás egész életútjának feltárására. Jellemzően az erőforrások felhasználását, az emberi egészséget, illetve az ökológiai egyensúlyt veszélyeztető hatásokat vizsgálják. A feltérképezés folyamata során az LCA arra törekszik, hogy átfogó képet adjon egy termék vagy szolgáltatás által okozott környezeti terhekről [1,2].

Az életciklus elemzés négy részre osztható, ezt szemlélteti a 6. ábra is. Az első szakasz az LCA elemzés céljainak és a vizsgálat területeinek kijelölésére szolgál. Ezt követi az életciklus leltárelmézés, ahol felállítják a termék életciklusának modelljét és rendszerezik a belépő, illetve a kilépő információkat. Harmadik lépésben következik a hatásértékelés, itt az előző lépésben kapott információk hatásait értékelik az életciklus során be- és kiáramló anyagok környezeti jelentősége alapján. Végül pedig értelmezik és rögzítik az eredményeket. A legutolsó szakasz arra szolgál, hogy az életciklus elemzés során kapott adatokat összegezzék és elemezzék. Ezek segítségével levonható a végső megállapítás, ezzel elősegítve a döntéshozatalt. A termékek

életciklusának szakaszai: az anyagkitermelés, az elsődleges anyagok előállítása, a gyártás, a felhasználás és a végső ártalmatlanítás. Vannak visszaáramló lépések is, mint az újrafelhasználás, az újragyártás és az újrahasznosítás [1,3].



6. ábra – Az életciklus elemzés keretei [1]

A LCA a kitermelést, az alapanyagfeldolgozást, a gyártást, a szállítást, a felhasználást, az újrahasználatot, a karbantartást és az újrahasznosítást (7. ábra) is magában foglalja. Ezen felül az LCA az anyagok és az energia fő be- és kimeneti tényezőit nyomon követi, az energia- és anyagfelhasználást számszerűsíti, valamint a környezeti hatásokat értékeli, így segítséget nyújt a termék- és folyamatértékeléshez [3].



7. ábra – Az LCA komponensei [4]

2.2.1. A cél és a tárgykör meghatározása

Az LCA első szakaszában a meghatározott célnak összhangban kell lenni a felhasználási szándékkal, valamint meg kell szabni a vizsgálat mélységét és az

eredmények bemutatásának formáját is. Az életciklus értékelés határainak kijelölését és az elemzés részletességét befolyásolja, hogy milyen célokat tűzünk ki, illetve milyen célokra használjuk fel az elemzés során kapott eredményeket. Az LCA tanulmány készítése során lehetőség nyílik a tárgykör módosítására, amennyiben tovább információk kerülnek bevezetésre. A rendszer funkciók az LCA tanulmány által kerülnek meghatározásra, ezeken a funkciókon belül pedig lehatárolhatók az egyes funkciós egységek. Ezek teszik lehetővé a be- és kimenetek egymáshoz való viszonyítását, hiszen egy termék vagy szolgáltatás összehasonlítása azonos funkciós egység alapján kell történjen. A rendszerhatárok megadják, hogy az LCA tanulmány milyen elemeket tartalmazzon, valamint az életciklus mely részeit vegyük figyelembe. Ezen kívül azt is meg kell határozni, hogy mely folyamat egységeket vesszük figyelembe és melyeket hagyjuk figyelmen kívül a rendszerhatárok megállapítása során. A rendszerhatárok megadásához használt kritériumokat minden esetben meg kell nevezni és meg kell indokolni. Ezek jellemzően a tanulmány céljától függenek. Ezen felül szükség van az adatok minőségi követelményeinek meghatározására is az LCA céljának figyelembevételével. Ezek az adatok lehetnek átlagos vagy konkrét adatok, de mindegyik esetében fontos, hogy hitelesek és reprodukálhatók legyenek [1].

2.2.2. *Életciklus leltárelemzés (Life Cycle Inventory)*

Az életciklus leltárelemzés (LCI) a kimenő és bemenő adatok számszerűsítésére szolgál. Ezek az adatok jellemzően a rendszerrel kapcsolatos erőforrás felhasználásra, a talaj, víz és levegő emissziókra vonatkoznak. Az LCI az adatgyűjtéshez és számításához szükséges eljárásokat tartalmazza. Az adatgyűjtéshez, valamint a számításához elengedhetetlen az adatok minősítése és az adatgyűjtés gyakorlati határainak rögzítése. A tanulmányhoz felhasznált adatok származhatnak statisztikából, adatbázisokból, kutatóintézetekből vagy felmérésekből, azonban a felhasználás szempontjából optimális adatokat a termék vagy szolgáltatás előállítója tudja nyújtani az életciklus leltárelemzés elkészítéséhez [1].

2.2.3. *Életciklus hatásértékelés (Life Cycle Impact Assessment)*

Az életciklus hatásértékelés (LCIA) az LCA harmadik szakasza, amely a környezeti hatásokat értékeli. Az LCA tanulmány értelmezése az életciklus leltárelemzés során kapott adatokból lehetséges, majd a leltárelemzés során kapott környezeti terheléseket számszerűsítik és ezek az adatok adják az életciklus hatásértékelés alapját. LCIA során döntő fontosságúak az ökológiai, valamint az emberi életet és egészséget érintő hatások. Az életciklus hatásértékelésnek négy szakaszát különböztetjük meg. Az első az osztályozás, ahol a leltáradatokat hozzárendeljük az egyes kategóriákhoz. Ezután következik a jellemzés, ahol az adatok modellezése történik meg. Harmadik lépésben

a normalizálás lehetővé teszi az eredmények összehasonlítását. Végül a súlyozás az eredmények összefoglalásáért felel [1].

2.2.4. *Életciklus értelmezés*

Az életciklus értelmezés az LCA utolsó szakasza, amely a leltárelemzés és a hatásértékelés szakaszában kapott eredményeket összegzi és összeveti a célkitűzésben megfogalmazott elképzelésekkel. Ezután megvizsgálják, hogy a cél és a tárgykör definiálása, valamint az összegyűjtött adatok minősége megfelel-e az LCA elején meghatározott célkitűzésnek. Az életciklus értelmezés fontos feladata a leltárelemzés során kapott eredmények érthető bemutatása a tanulmány céljainak figyelembevételével [1].

2.2.5. *Életciklus elemzés módszerei*

Általában két LCA módszert különböztetnek meg a termékek életciklusának vizsgálatára. Az egyik a folyamatszintű elemzés, a másik a gazdasági input-output elemzés. A folyamatelemzés a gyakrabban használt módszer, ez az erőforrás-felhasználásának és a gyártási folyamat környezeti kibocsátásainak értékelésére szolgál. Mindkét módszer alkalmas a termékek, anyagok és folyamatok környezeti terhelésének megállapítására, azonban mindegyik rendelkezik hibával. A folyamatelemzés jellegzetesebb módszer, mint az input-output elemzés, azonban munka- és időigényes. Ezen kívül pontosabb képet nyújt a technológiákról, de az elemzés során fontos hozzájárulások kimaradnak. Ezzel szemben az input-output elemzés szélesebb határok között mozog, ugyanakkor ez a módszer is rendelkezik hibával. Összefoglalva, a folyamatszintű elemzés nagy térbeli és időbeli felbontással rendelkezik, de a határain kívül eső hatásokat nem veszi figyelembe, ami alulbecsléshez vezethet. Ebből az okból kifolyólag a folyamatelemzés csonkolási hibával jár. Az életciklus-értékelés hibáinak kiküszöbölésére több megoldás is létezik, többek között az LCA kiterjesztése, az eszköztár használata és a hibrid elemzés. A hibrid elemzés ötvözi a folyamatelemzést és az input-output elemzést, ezzel kijavítva mindkét módszer hibáját. Az alkalmazott elemzési módszerek nem teljesen illeszkednek egymáshoz, mindazonáltal a hibrid elemzés jó alapot biztosít a hibák kezelésére [3].

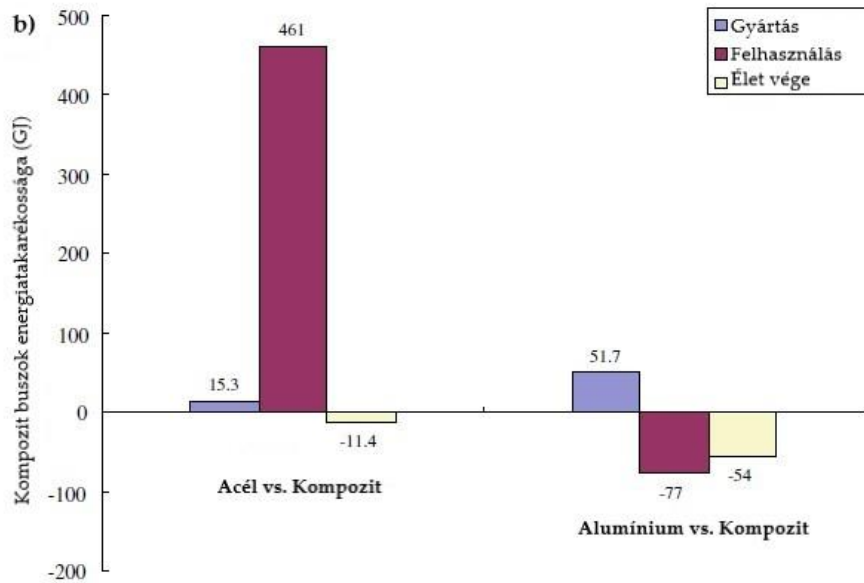
2.2.6. *Kompozit ipari esettanulmányok*

A szénszál erősítésű kompozitok témakörében is számos tanulmány foglalkozott az életciklus elemzésével.

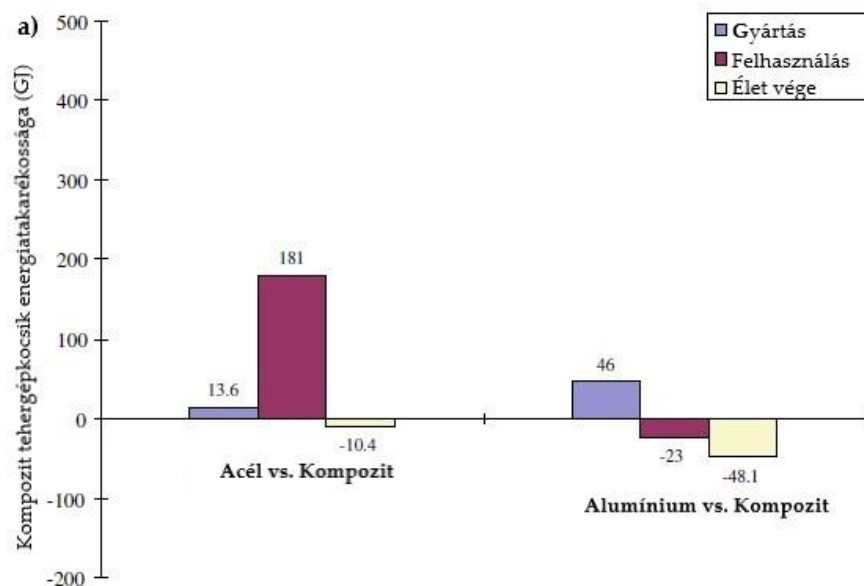
Forcellese és társai [5] különböző gyártástechnológiák életciklusra gyakorolt hatását vizsgálták szénszál-erősítésű polimerből készült (CFRP) autóiipari alkatrészek

esetében. Összehasonlító elemzést végeztek PBM (pressure bag molding) és autoklávós hőkezeléssel történő formázás (bag molding with autoclave) esetében. Négy különböző elrendezést vizsgáltak: autoklávós formázást alumínium szerszámmal, autoklávós formázást CFRP szerszámmal és poliuretán ősmintával, autoklávós formázást CFRP szerszámmal és közepes sűrűségű farostlemez (MDF) ősmintával, valamint PBM technológiát alumínium szerszámmal. A LCA tanulmány a nyersanyag-kitermelésre, szénszál- és gyantagyártásra, előkezelésre, szállításra, szerszámgyártásra, szállításra és a CFRP-alkatrész gyártásához kapcsolódó valamennyi fázisára terjedt ki. Végeredményül azt kapták, hogy az alumínium szerszámmal történő autoklávós térhálósítás a legkevésbé környezetterhelő, míg a kompozitformával és poliuretán ősmintával történő autoklávós kikeményítés a leginkább környezetterhelő folyamat. Ezek alapján a CFRP gyártása során érdemes kerülni a kompozit szerszámok használatát, ha az életciklus terhelést csökkenteni akarják.

Song és társai [3] a pultrúziós eljárással gyártott szálerősítésű kompozitok életciklusa során felhasznált energiáját elemezték autóiipari alkalmazásokban. A vizsgálat során a kompozit szerkezetek életciklusra gyakorolt környezeti hatásait az energiafelhasználás számításával végezték. Vizsgálták az alapanyag előállítás, a gyártás, a felhasználás és az élettartam végének szakaszát. Acél, alumínium és kompozit járműveket hasonlítottak össze a teljes életciklus során. A tanulmányban a folyamatelemzést és a gazdasági input-output elemzést ötvözték. Az így létrejött hibrid modell segítségével vizsgálták a pultrudálási folyamat közvetett és közvetlen energiafogyasztását az alapanyag gyártás és a gyártás során. Megállapították, hogy a használati szakaszban az energiafogyasztás jelentős mértékű, ezért a könnyebb anyagok kedvezőbbek az energiamegtakarítás szempontjából. A kompozit buszok energiamegtakarítása (8. ábra) a gyártási fázisban -32,8 GJ az acél esetében, míg 3,66 GJ az alumínium esetében. Hasonló eredmények mutatkoznak a kompozit teherautók (9. ábra) esetében is. Végző soron arra a következtetésre jutottak, hogy a pultrudált alkatrészek alkalmazása buszok és teherautók esetében több energiát takarít meg, mint az acél alkatrészek. Viszont kevesebbet, mint az alumínium alkatrészek.



8. ábra – Az acél alumíniummal és kompozitokkal való helyettesítéséből származó életciklus-alapú energiamegtakarítás autóbuszok esetében [3]

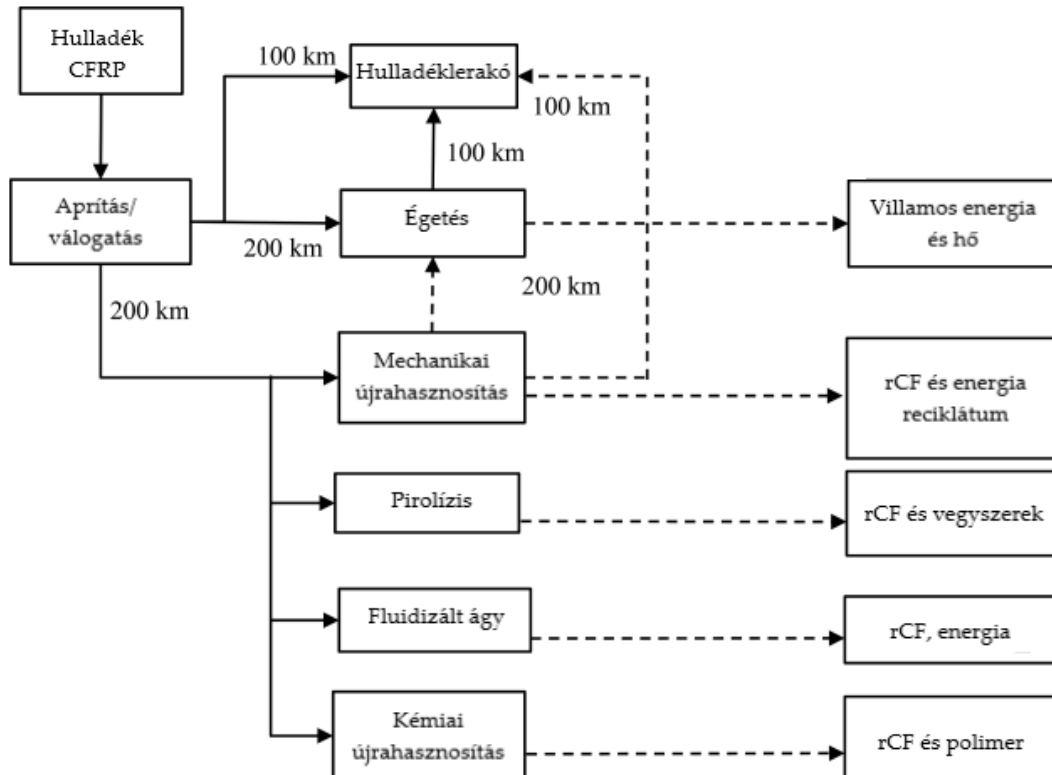


9. ábra – Az acél alumíniummal és kompozitokkal való helyettesítéséből származó életciklus-alapú energiamegtakarítás tehergépkocsik esetében [3]

Az újrahasznosítás akkor életszerű, ha az újrahasznosítással az előállításnál jóval alacsonyabb kibocsátást érünk el. Kawajiri és társai [6] két különböző CFRP újrahasznosítási módszert, a pirolízist és a szolvólízist vizsgálták. A környezeti hatások eredményét mindkét módszer esetében összehasonlították a szűz szénszál (vCF) előállításával. Az eredmények azt mutatták, hogy mind a pirolízis, mind a szolvólízis csökkentették a környezeti hatásokat. A pirolízisből származó ÜHG-kibocsátás 0,57 kgCO₂eq/kg, a szolvólízisből származó pedig 0,54 kgCO₂eq/kg volt. Mindkét módszerből származó ÜHG-kibocsátás alacsonyabb volt, mint a szűz CF előállításából származó (24,0 kgCO₂eq/kg). Vizsgálták az újrahasznosított szénszálak

szakítószilárdságát is. A pirolízissel visszanyert szénszálak szakítószilárdsága 2000 MPa, míg a szolvólízissel visszanyert szénszálak szakítószilárdsága 3200 MPa volt. Azaz a pirolízissel visszanyert szénszálak szakítószilárdsága 80%-a volt a vCF-nek, míg a másik újrahasznosítási módszer esetében ez több, mint 90% volt. A visszanyert szénszálak hossza és felületi minőségi azonban megváltozott, ezért nehéz pontosan megállapítani a szakítószilárdságot. Bár ez az érték kevesebb, mint más kutatások eredményeként kapott értékek, de még mindig elég jónak tekinthető. Ezen kívül vizsgálták a két újrahasznosítási módszerekből származó üvegházhatású gázok kibocsátását.

Meng és társai [13] CFRP anyagok hulladékkezelési lehetőségeinek részletes életciklus elemzését végezték el a környezeti hatások – mint a primerenergia-fogyasztás és a 100 év alatti globális felmelegedési potenciál – figyelembevételével. A kutatás során a hagyományos hulladéklerakó, az égetés és a legelterjedtebb újrahasznosítási technológiák – mechanikai újrahasznosítás, fluidágyas kezelés, pirolízis, kémiai újrahasznosítás – összehasonlítását végezték el a relatív környezeti terhelések meghatározása érdekében. Hulladéklerakás és égetés esetében "kaputól a sírig" tartó modelleket alkalmaztak, beleértve a hulladékfeldolgozást (szétszerelés, aprítás) és a szállítást. A szállítás hulladéklerakás esetén 100 km, míg égetés esetén 200 km volt. Újrafeldolgozás esetében "kaputól a kapuig" tartó modelleket alkalmaztak, amely magában foglalta az újrahasznosított szénszálból (rCF) történő kompozit előállítását. A szállítás ezek esetében is 200 km volt. A tanulmányban figyelembe vett hulladékkezelési útvonalakat az 10. ábra mutatja. A funkcionális egység minden technológia esetében 1 tonna CFRP hulladék volt. Ezeket elsősorban a repülőgépiparban keletkező gyártási hulladékból vagy az életciklus végén keletkező hulladékból származtak. A CFRP hulladék jellemzően 55 tömegszázalék szálból és 45 tömegszázalék mátrixból állt. Az életciklusmodellekből vizsgált két fő mérőszám az elsődleges energiaigény (PED) és a globális felmelegedési potenciál (GWP) volt.



10. ábra – CFRP hulladékkezelési útvonalak [13]

Valamennyi újrahasznosítási eljárás esetében a CFRP hulladékokat az anyagkezelő létesítményekbe szállítják, ahol aprítják és szétválogatják. Ezután 200 km-t szállítják az újrahasznosító létesítményekig, ahol megtörténik az újrahasznosítás. A mechanikai újrahasznosításból származó hulladékmaradványokat hulladéklerakóba helyezik vagy elégetik. Ezekhez további 100 km, illetve 200 km szállítás szükséges. A folyamat végeztével látható, hogy milyen és mekkora mennyiségű végtermékek keletkeztek. Ezen felül a **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.** a szükséges energiamennyiségeket is mutatja az egyes folyamatok során [13].

Az eredmények azt mutatták, hogy a hulladéklerakóknál a GWP értéke csak 0,13 CO₂eq/kg volt. Ezzel ellentétben az égetés jelentős mennyiségű – 3,12 CO₂eq/kg – üvegházhatásúgáz-kibocsátást eredményez. Ez főként az égetési folyamatból származik, mivel a CFRP széntartalma CO₂ formájában kerül a környezetbe. A mechanikai újrahasznosítás és a hulladéklerakó együttes használata 0,11 CO₂eq/kg üvegházhatásúgáz-kibocsátást, a mechanikai újrahasznosítás égetéssel pedig 1,8 CO₂eq/kg-ot eredményezett. A pirólízis esetében összesen 2,9 CO₂eq/kg értéket mértek 1 kg CFRP hulladékra vetítve, ami elsősorban a villamos energiából és a gázfogyasztásból származik. A fluidágyas és kémiai újrahasznosítási folyamatok esetében lényegesen kisebb – 1,56 CO₂eq/kg, illetve 1,53 CO₂eq/kg – összeértékeket mértek. Az PED értéke szintén a hulladéklerakásnál volt a legkevesebb, 1,11 MJ/kg. Ez az érték égetés során 1,71 MJ/kg lett. Mechanikai újrahasznosítás és hulladéklerakás együttevén 1,2 MJ/kg, míg égeséggel 1,12 MJ/kg összeértéket eredményezett. A pirólízis, a fluidágyas kezelés és a kémiai újrahasznosítás esetében ez az érték 37,36

MJ/kg, 10,25 MJ/kg, illetve 38,39 MJ/kg volt. Összességében az LCA-eredmények azt mutatják, hogy a hagyományos hulladékkezelési eljárások (hulladéklerakó, égetés) rosszabbul teljesítenek az életciklus PED és GWP tekintetében. A hulladéklerakással történő mechanikai újrahasznosítás kisebb GWP értéket mutatott az égetéssel történő mechanikai újrahasznosításhoz képest [13].

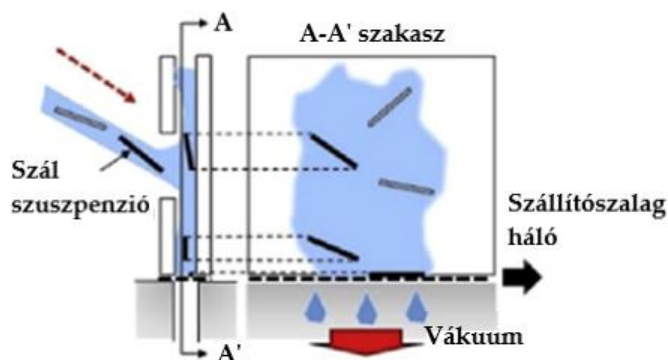
2.3. Hibrid kompozitok

A kompozitok hibridizációja többféle módon valósulhat meg. A hibrid kompozit elnevezés többnyire olyan kompozitot jelent, amelyben egynél több erősítő- vagy töltőanyag és/vagy egynél több mátrix található. Azonban akkor is beszélhetünk hibrid kompozitról, ha ugyanazon anyagú, de más struktúrájú az erősítőanyag. Az hibrid erősítőstruktúra fonal vagy roving szinten többfajta elemi szál keverésével, rétegen belül különböző rovingok keverésével vagy a teljes szerkezetben hibrid rétegrenddel érhető el. Jellemzően bizonyos tulajdonságok javításának vagy a költséget csökkentésének céljából alkalmazzák. Többféle erősítőanyag alkalmazása esetén különbség lehet az összetételben (például szénszálak mellett üveg- vagy aramidszálak alkalmazása) vagy a szálformában (rövid és folytonos szálakat együttes alkalmazása). Amennyiben a második komponens a szál mellett részecske típusú töltőanyag, akkor azt vagy a szálhoz, vagy a mátrixhoz keverik hozzá. Ezen kívül alkalmazhatnak még nanorészecskéket a tulajdonságok javítása érdekében. Egynél több mátrixanyag alkalmazása esetén, két lehetőség áll fenn. Az egyik, hogy a szálát közvetlenül az egyik mátrix veszi körül és ezzel érintkezik a másik mátrix. A másik, hogy a két mátrixot összekeverjük és ez érintkezik az erősítőszállal. Az előbbire példa az olyan kompozit, amely egyaránt tartalmaz termoplasztikus és nem termoplasztikus műanyagokat. Ebben az esetben az erősítőszál közvetlenül egy alacsony viszkozitású, hőre keményedő gyantával érintkezik és ezt vonják be egy nagyobb viszkozitású, hőre lágyuló polimerrel. A hibrid kompozitok egy speciális fajtája a szendvics szerkezetű kompozitok. A szendvicsszerkezet olyan két, egymással párhuzamos, sík vagy görbült nagy szilárdságú lemez (övlemez, héj), amely között kis sűrűségű, kis szilárdságú, a fedőlemezeknél vastagabb anyag (maganyag) helyezkedik el oly módon, hogy a három réteg egy mechanikai egységet képezzen. Előnyük a kedvező szilárdsági tulajdonságok, azonban hátrányt jelent a megnövekedett másodrendű nyomaték, ami növeli a hajlítómerevséget és szilárdságot [22].

2.3.1. HiPerDiF technológia

Az újrahasznosított szénszállal erősített kompozitok hibridizációja ígéretesnek bizonyul, hiszen így csökkenthető az anyagköltség. Ezen előnyös tulajdonság kutatására számos tanulmány született. A közelmúltban kifejlesztett HiPerDiF (High Performance Discontinuous Fibre) módszer Yu nevéhez köthető [15]. A módszert a HiPerDuCT (High Performance Ductile Composite Technology) projekt keretében

fejlesztették ki a nem folytonos szálakból álló kompozitok előállítására. A technika lehetővé teszi a nem folytonos szálak orientálását. A szálorientációs mechanizmust alapja, hogy a szuszpenzióban lévő szálak egy lemezhez ütköznek, majd orientációjuk a vízszög irányával keresztirányban megváltozik. Ennek feltétele, hogy a két lemez közötti távolság kisebb legyen, mint a szálak nem folytonos hossza. A működési elvet a 11. ábra mutatja [17, 18].

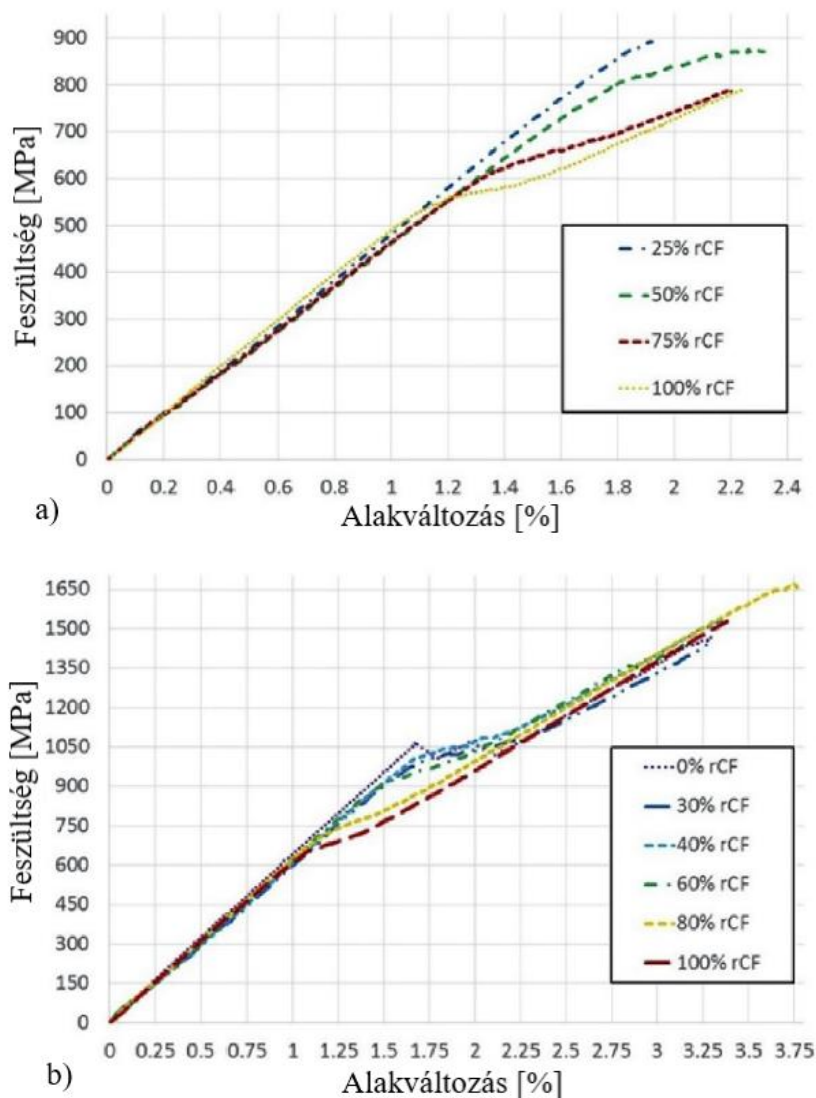


11. ábra – HiPerDiF módszer működési elve [16]

Az eljárás során a szálakat folyékony közegben – jellemzően vízben – diszpergálják. Ezt egy fúvókán keresztül felgyorsítják, hogy a szálak részben egymáshoz igazodjanak. Ezután a szuszpenziós sugár a párhuzamos lemezekből álló, szabályozható réssel rendelkező orientáló fej felé irányul. A folyadék hirtelen ütközése miatt a szálak a szuszpenziós sugárral keresztirányba igazodnak, Ehhez azonban az szükséges, hogy a rés a szálhossz legfeljebb 1/3-a legyen. Ezt követően a szálak egy perforált szállítószalagra esnek, amely a rés irányával párhuzamosan fut. A szalag alatt egy szívólemezt helyeztek el, amely eltávolítja a vizet és fenntartja a szálak orientációját. Az szálakat ezután infravörös sugárzással szárítják, amely előkészíti a struktúrát a gyantával való impregnáláshoz. Ez az eljárás nagymértékben orientált és nagy térfogati száltartalmú (v_f) CFRP-ket tesz lehetővé. A mérési eredmények alapján a 41%-os v_f -tartalmú kompozitok esetében a szálak 65%-a volt a $\pm 3^\circ$ közötti tartományban, míg az 55%-os v_f -tartalmú kompozit minták esetében a szálak 67%-a esett ebbe a tartományba. Továbbá, nagy szilárdságú szálak – 225 GPa modulusú és 4350 MPa szilárdságú – alkalmazásával megközelítették a folytonos szálak mechanikai tulajdonságait. Abban az esetben, amikor a kompozitok v_f -tartalma 41% volt, a modulus 80,6 GPa-t, a szilárdság pedig 816 MPa-t ért el. Viszont 55%-os v_f -tartalmú kompozitok esetében a modulus értéke 115 GPa, a szilárdságé 1509 MPa volt. A HiPerDiF technológia előnye, hogy jó mechanikai tulajdonságokat és nagymértékű igazodást tesz lehetővé a visszanyert szénszálak újragyártásával készült egyirányú kompozitokban [17-19].

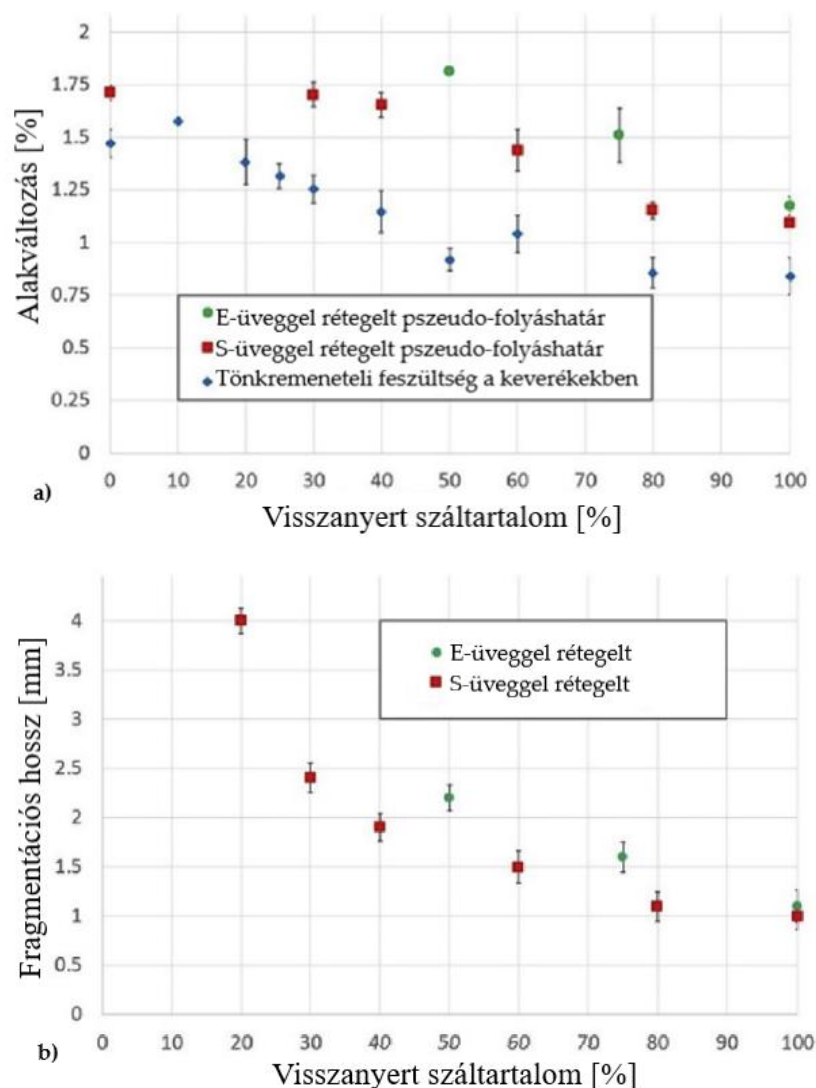
Longana és társai [16] szűz és újrahasznosított szénszál keverékével szénszál textíliákat állítottak elő. Ezeket erősítőanyagként E-üveg és S-üveg UD kelmék közé helyezték. A laminátokat úgy hozták létre, hogy két réteg száraz rCF/vCF keveréket beágyaztak négy réteg folytonos UD üvegszál prepreg közepébe. E-üveg esetében

25%, 50% és 75%-ban használtak rCF/vCF preformokat, valamint tisztán rCF-et alkalmaztak. S-üveg esetébe 30%, 40%, 60% és 80%-ban alkalmaztak rCF/vCF preformokat, ezen kívül tisztán rCF vagy vCF felhasználásával is készítettek laminátokat. Az E-üveggel laminált próbatetek feszültség-alakváltozás görbáját az 12. ábra mutatja. A 25%-os rCF tartalmú próbatest közel lineárisan rugalmas viselkedést mutatott, majd ridegen tört. Az rCF tartalmának növelésével ez a viselkedés nemlineárisra vált, továbbá megfigyelhető, hogy mikor kezdett el töredezni a belső rCF-vCF réteg. Az S-üveggel készült laminátok feszültség-alakváltozás görbáját az 12. ábraán láthatók. Itt is hasonló viselkedés mondható el, mint az E-üveg esetében. Kiseb rCF tartalom esetében a próbatest közel lineárisan rugalmas viselkedést mutat, majd az rCF tartalom növekedésével ez átmegy nemlineárisba. Azonban az S-üveg nagyobb merevséggel rendelkezik, mint az E-üveg, így a belső, kis alakváltozású réteg töredezése után a külső réteg nagyobb terhelések és nyúlások érhetők el a teljes tönkremenetel előtt.



12. ábra – HiPerDiF módszerrel előállított E-üveggel (a) és S-üveggel (b) laminált különböző összetételű hibrid kompozitok feszültség-alakváltozás görbéi [16]

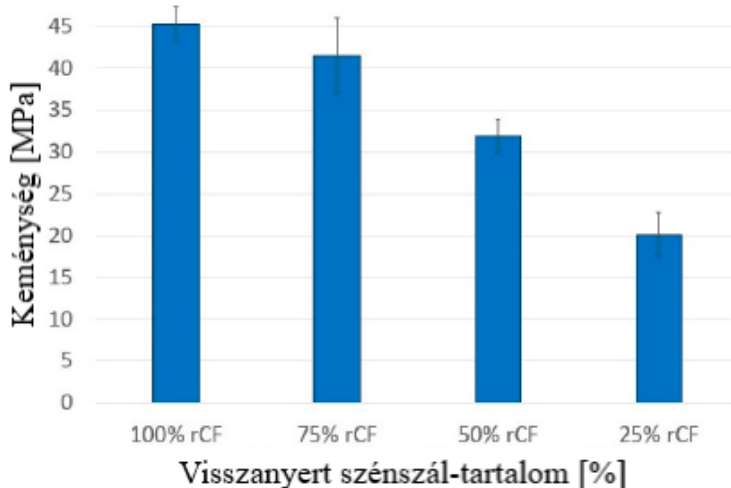
A pseudo-folyáshatárt – az az alakváltozási szint, amelynél a töredezési folyamat jelentős számú töréssel jön létre – az 13. ábra szemlélteti. A pseudo-folyáshatár magas értéke annak tudható be, hogy a nagy nyúlású szálak megvédik az alacsony nyúlású szálakat a feszültségkoncentrációtól. Továbbá a fragmentációs hossz az rCF tartalom növekedésével csökkentek, ezt a 13. ábra szemlélteti. Az eredmények azt mutatják, hogy az rCF tartalom nem befolyásolja a merevséget, azonban a nemlineáris viselkedésre hatással van. Továbbá az rCF tartalom szabályozásával megadható a pseudo-folyáshatár helyzete a feszültség-alakváltozás görbén, amely lehetővé teszi a nemlineáris viselkedés beállítását, valamint a pseudo-duktilis alakváltozás meghatározását [16].



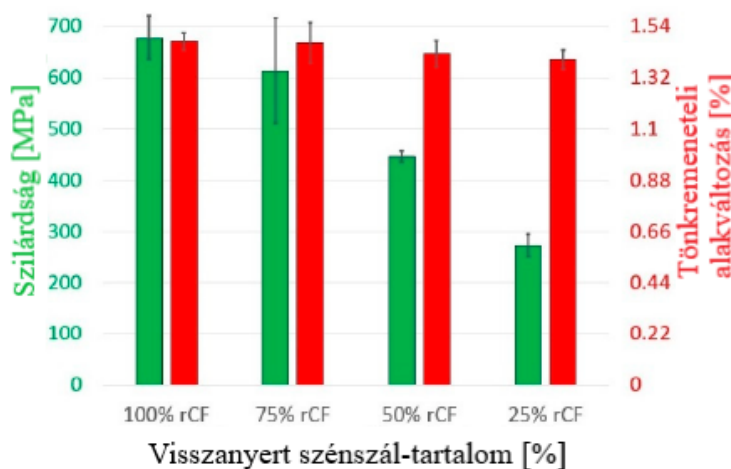
13. ábra – A rétegelt próbatetek törési viselkedése az rCF tartalom függvényében: a) A rétegelt próbatetek összehasonlítása; b) Fragmentációs hossz [16]

Egy másik kutatásban [20] pirolízissel visszanyert szén- illetve lencszálakat használtak, amelyeket autoklávus eljárás során epoxigyanta segítségével impregnáltak. Ebben az esetben is a HiPerDiF eljárást alkalmazták, hogy igazított, folytonos szálak kompozitokat hozzanak létre, 75/25%, 50/50%, 25/75% len/rCF és

100% rCF tartalommal. A prepreget előkészítették, majd vákuumzsákba helyezték és 135 percig 135 °C-on és 6 bar nyomáson autoklávban térhálósították. A kompozit térfogati száltartalma körülbelül 35% volt. A mérési eredmények (14. ábra) azt mutatták, hogy az rCF tartalmának növelésével a merevség a szilárdság is nőtt, míg a tönkremenetelnél mérhető alakváltozás közel állandó értéken maradt. Ezek alapján elmondható, hogy a mechanikai tulajdonságokra az rCF van a legnagyobb hatással.



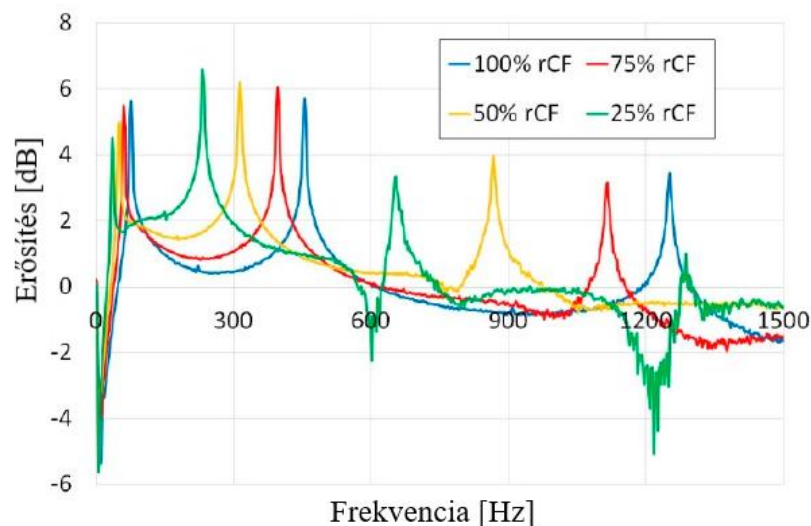
a)



b)

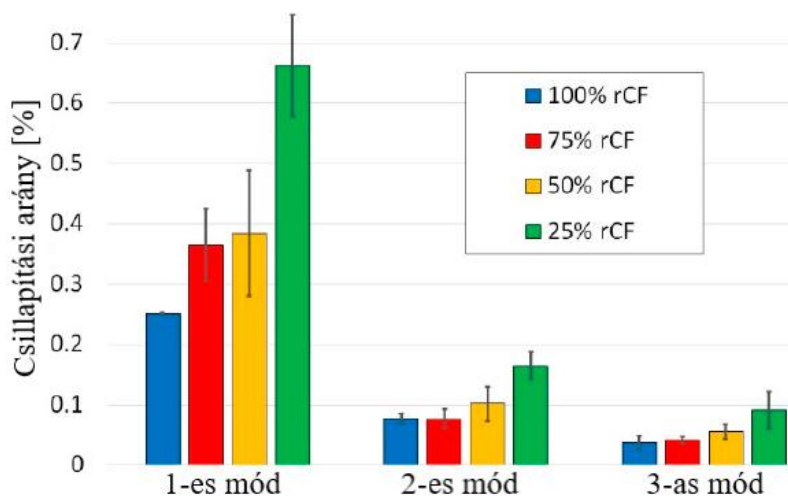
14. ábra – Vegyes len/rCF hibrid kompozitok szakítóvizsgálatának eredményei a keménység (a) és a szilárdság, illetve tönkremeneteli alakváltozás (b) függvényében [20]

A mechanikai tulajdonságokon kívül azonban egyéb tulajdonságokat is befolyásolnak a rövid rCF szálak. A 15. ábra a frekvenciaválasz függvényeit mutatja. Megfigyelhető, hogy a kisebb rCF tartalmú próbatestek esetében a sajátkőrfrekvencia alacsonyabb volt. Mivel az újrahasznosított szénszáltartalom csökkenése a tömeg és a merevség kismértékű csökkenésével jár (14. ábra), így a sajátkőrfrekvencia változása összefügg az rCF tartalom változásával [20].



15. ábra – Példák a frekvenciaválasz függvényekre [20]

A rezgéscsillapítás becslése a félteljesítmény-sávszélesség módszerével, más néven csúcsfelvételezéssel történt a mért frekvenciaválaszfüggvények (FRF) alapján. Mindhárom üzemmód azonos tendenciát mutatott (16. ábra), azaz a lenrost tartalmának növelése vagy az rCF tartalmának csökkentése a csillapítási tulajdonságok javulásához vezet. 25% esetében jelentős a csillapítás növekedése, míg a másik három arány közel azonos érték közelében mozog [20].



16. ábra – Csillapítási arányok [20]

2.3.2. Hibrid kompozitok összehasonlítása

A következőkben különböző, hibrid kompozitokkal kapcsolatos vizsgálatok eredményeit foglalom össze, különös tekintettel a szakító- és hajlítószilárdság, valamint szakító és hajlító modulus, továbbá a tönkremeneteli alakváltozás eredményeire. A vizsgált cikkek számszerű eredményeit az 1. táblázatban foglaltam össze. A táblázatban a maximális értékeket félkövérrel jelöltem.

	Szakító/hajlító szilárdság [MPa]		Szakító/hajlító modulus [GPa]		Tönkremeneteli alakváltozás [%]	
	0°	90°	0°	90°	0°	90°
Bachmann [23]						
30% len/70% epoxi	131,2	85,6	7,9	4,4	2,9	2,9
30% rCF/70% epoxi	491,5	279,9	11,8	11,7	2	2,4
22,5% len/7,5% rCF/70% epoxi	225,3	114,2	12,5	5,6	2,3	2,5
22,5% len/7,5% rCF/70% epoxi szendvicsszerkezet	286,7	165,5	16,8	7,8	1,8	2,4
Wei [24]						
rCF/0% GF/PA6	430		17		2,7	
rCF/1% GF/PA6	420		18		2,5	
rCF/2% GF/PA6	425		18,5		2,55	
rCF/5% GF/PA6	395		17,5		2,45	
Gan [25]						
E-üveg CSM	187,2		10,6		3,1	
E-üveg CSM/CT (random)	107,8		16,2		1,2	
E-üveg CSM/CT (igazított)	172,3		20,1		1,9	
E-üveg WF	317,6		17		3	
E-üveg WF/CT (random)	133,3		22,2		1,2	
E-üveg WF/CT (igazított)	189,6		27,6		2,4	
Longana [20]						
100% rCF/0% len	670				1,5	
75% rCF/25% len	620				1,49	
50% rCF/50% len	450				1,41	
25% rCF/75% len	370				1,37	

Tse [26]			
100% rCF/0% len/PLA	133,8	12,2	2,3
75% rCF/25% len/PLA	202,6	14	2,1
50% rCF/50% len/PLA	198,7	13,1	2
25% rCF/75% len/PLA	179	10,5	2,3
0% rCF/100% len/PLA	11,6	6,2	2,5

1. táblázat – A vizsgált cikkek eredményeinek összefoglalása

Bachmann és társai [23] aprított lenszál és pirolizált rCF felhasználásával készítettek nemszött kelméket, amelyekből epoxi gyanta hozzáadásával készítették el a laminátokat. Tisztán rCF, valamint len alapú kelméket hoztak létre, majd ezekből laminátokat készítettek, ahol a kelme 30 v%-ot, míg az epoxi 70 v%-ot tett ki. Továbbá készítettek 22,5 v% lent, 7,5 v% rCF-t és 70 v% epoxit tartalmazó laminátot, valamint ugyanilyen arányban szendvics szerkezeteket, ahol a külső rétegekben az rCF és a len aránya 3:1 volt. Mindegyik elrendezésből 0° és 90°-ban vágta ki próbatesteket. Referenciaként a tisztán lenszállal erősített laminát érte el a legalacsonyabb hajlító mechanikai tulajdonságokat az összes vizsgált laminát közül. A legmagasabb hajlító szilárdsággal és modulussal rendelkező laminát kizárólag rCF-et tartalmazott. 90°-os irányban alacsonyabb hajlítási tulajdonságokat mértek, mint 0°-os irányban. Ez azzal magyarázható, hogy a szálak jobban igazodnak gép irányban (MD), mint keresztirányban (CD). A szendvicsszerkezetnél mért hajlítószilárdság és modulus értéke magasabb volt a laminátban egyenletesen eloszló rCF/len keverékhez képest, amely a próbatestek szerkezetéből adódik. A legnagyobb tönkremeneteli alakváltozást a tiszta rCF tartalmú laminát érte el, ez mind a 0°-os irány, mind a 90°-os irány esetében igaz volt. A tisztán lenszálakból készült referencia laminátoknak voltak a legalacsonyabb mechanikai tulajdonságai, a tisztán rCF-ből készült próbatesthez képest degresszívebb viselkedést mutatott. A len és az rCF hibridizációjával készült próbatestek tönkremeneteli alakváltozása a tiszta rCF és a tiszta len próbatestek közé esett, azonban a szendvicsszerkezet tönkremeneteli alakváltozása a len-tartalmú lamináthoz hasonló eredményeket mutatott.

Wei és társai [24] ebben a tanulmányban GF-eket használtak rCF helyettesítésére 0%, 1%, 2% és 5%-os térfogati frakciókban. Mátrixként rövid, 6 mm hosszúságú PA6 szálakat használtak. Az erősítőszálakat és a mátrixszálakat papíripari technológiával keverték össze, majd sajtolási eljárással formázták. Az eredményeik alapján GF hozzáadásával gyengült a próbatestek ellenálló képessége. A hajlítószilárdság 5,44%-kal csökkent, amikor a GF értéke 0%-ról 1%-ra nőtt. 11,1%-os csökkenés látható, amikor a GF értéke 5%-ra nőtt. A próbatestek hajlító modulusa nem csökkent lineárisan a CF-tartalom csökkenésével, éppen ellenkezőleg, kis mennyiségű GF esetén kissé megnőtt ez az érték. Ez azonban csak kis mennyiség esetén igaz, azaz a GF-tartalom nem lehet több 5%-nál. A feszültség-alakváltozás görbék azt mutatták, hogy a kompozitok a rideg törési módot követve mentek tönkre és ezen a GF-tartalom nem

változtatott. A kompozit anyagok tönkremeneteli alakváltozása a GF-tartalomtól függetlenül nagyjából 2,5% körüli értéken mozogtak.

Gan és társai [25] egy száraz szálígazítási módszert fejlesztettek ki. Ezzel folytonos szénszálak kötegekből (CT) és kétféle E-üveg erősítésből – 300 g/m²-es, véletlenszerűen orientált, vágott szálak paplanok (CSM), illetve 270 g/m²-es, sima szövésű szövetek (WF) – állítottak elő hibrid kompozitokat. Mindkét E-üveg erősítés esetén készítettek igazított és random szerkezeteket. Az igazított kompozit szerkezetek rétegrendje [CSM/CT/CSM/CT/CSM], valamint [WF/CT/WF/CT/WF] volt. A random laminátok ugyanolyan alapanyagokból és rétegrenddel készültek, mint az igazított hibrid kompozitok, azonban itt a véletlenszerű szénszálkötegeket kézzel helyezték el ugyanolyan területi vastagságban, mint az igazított szerkezetek esetében. Az összehasonlítás érdekében két nem hibrid laminátot is gyártottak, amelyek három réteg E-üveg CSM-ből, illetve három réteg E-üveg sima szövésű WF-ből álltak. Az igazított hibrid és a nem hibrid kompozitok eredményeinek összehasonlítása azt mutatta, hogy az előbbieket tönkremenetelük progresszív, míg az utóbbiaké katasztrofális. A nem hibrid E-üveg CSM (187 MPa) és az igazított hibrid E-üveg CSM/CT laminátok (172 MPa) szilárdsága közötti kis különbség arra utal, hogy mindkettő hasonló mátrix-dominált tönkremeneteli móddal megy tönkre. A progresszív tönkremenetel jobban megfigyelhető volt a hibrid E-üveg WF/CT laminátban. Hasonlóan az igazított hibrid E-üveg CSM/CT lamináthoz, többszörös mikrorepedések indultak el a kötegvégeken, ami a csúcshosszúsághoz képest kis feszültségcsökkenést eredményezett. Az igazított szénszálaknak köszönhetően az igazított hibrid E-üveg CSM/CT és WF/CT laminátok modulusa 90,0%-kal, illetve 62,7%-kal nőtt a nem hibrid laminátokhoz képest. A szilárdság esetében azonban 7,9%-os, illetve 40,3%-os csökkenést mutattak az igazított hibrid laminátok a nem hibrid rétegektől lemezekhez képest. A random CSM/CT és az igazított CSM/CT laminátok tönkremeneteli mechanizmusa hasonló volt, azzal a különbséggel, hogy a repedések a random CSM/CT laminát esetében sokkal könnyebben terjedtek a vastagságon keresztül, mivel a véletlenszerűen orientált kötegek között rövidebb átfedések vannak. Továbbá a random hibrid CSM/CT laminát a modulus esetében 19,3%-os, míg a szakítószilárdság esetében 37,5%-os csökkenést mutatott az igazított hibrid CSM/CT lamináthoz képest. A random hibrid WF/CT laminát esetében több mikrorepedés indult meg egyszerre a véletlenszerű orientáltság miatt, de ezek nehezen terjedtek az útjukban álló véletlenszerű szénszálak miatt. A random hibrid WF/CT laminát modulusa és szakítószilárdsága 19,6%-kal, illetve 29,7%-kal csökkent az igazított hibrid WF/CT lamináthoz képest.

Longana és társai [20] a már ismert HiPerDiF módszert alkalmazva állítottak elő igazított, folytonos szálak kompozitokat, 75/25%, 50/50%, 25/75% len/rCF és 100% rCF tartalommal. Ezekhez pirolízissel visszanyert szén- illetve lenszálakat használtak, amelyeket autoklávus eljárás során epoxigyanta segítségével impregnáltak. A szakítóvizsgálati próbatetek esetében négy igazított, nem folytonos szálakból álló réteget helyeztek egymásra, hogy a próbatest névleges vastagsága 0,4 mm legyen. A

szakítóvizsgálat eredményei azt mutatták, hogy az anyag merevsége és szilárdsága közvetlen kapcsolatban van az rCF-tartalommal, míg a tönkremeneteli alakváltozás közel állandó – $1,46 \pm 0,06\%$ – értéket mutatott. Ezek alapján elmondható, hogy a próbatestek mechanikai tulajdonságait elsősorban a terhelés nagy részét hordozó rCF-ek szabályozzák.

Tse és társai [26] munkájuk során erősítőanyagként pirolízissel visszanyert rCF-et és lenszálakat használtak, míg a mátrix szálal formában lévő PLA volt. Ezekből diszperzió révén hozták létre a 100/0%, 75/25%, 50/50%, 25/75%, valamint 0/100% rCF/len tartalmú hibrid kompozitokat. A hajlítóvizsgálat eredményei alapján elmondható, hogy a rCF-tartalmú kompozitok hajlító modulusa és szilárdsága magasabb volt, mint a tisztán lentartalmú kompozitoké. Azonban a tisztán rCF-tartalmú kompozit értékei elmaradtak a lenszálakat is tartalmazó kompozitok értékeitől. Ez annak tudható be, hogy a lenszálak hozzáadása hozzájárult a kompozit nemlineáris alakváltozásához, vagyis a len tartalom növelésével a kompozit nagyobb igénybevételnek való ellenálló képessége is megnőtt a len duktilis viselkedése miatt. A tisztán rCF-tartalmú minta magasabb tönkremeneteli alakváltozást ért el, mivel a magas hézagtartalom szabálytalanságokat hozott a kompozit összetételébe, ami változó hajlító viselkedést eredményezett. A lenszát is tartalmazó minták ennél alacsonyabb értéket értek el, azonban a tisztán len tartalmú minta tönkremeneteli alakváltozása mutatta a legmagasabb értéket, mivel ez a minta teljes egészében lenszálakból állt.

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

Ebben a fejezetben bemutatom a munkám során felhasznált alapanyagokat és gyártási folyamatokat, valamint a mérések során alkalmazott berendezéseket. Ezt követően a vizsgálati módszerek részletes bemutatása következik.

3.1. Felhasznált alapanyagok

A kompozit próbatestek gyártásánál készítettem tisztán rCF alapú és hibrid kompozitokat is. A következőkben a gyártás során felhasznált alapanyagokat mutatom be.

3.1.1. Szénszálas anyagok

Munkám során a németországi Tenowo újrahasznosított szénszálas paplanjait használtam, amelyek 100, 200, 300 g/m²-es formában érhetők el. Ezen kívül hibrid kompozitok gyártásához a Zoltek 220 g/m²-es unidirekcionális (UD) szénszálát alkalmaztam.

3.1.2. Egyéb alapanyagok

Kompozitok gyártása során az IpoX MR 3010 epoxi gyantát, valamint az IpoX MR 3124 térhálósító komponenst használtam 1:3 keverési arányban.

A mikroszkópiához szükséges minták elkészítéséhez az IpoX MR 3012 epoxi gyantát és az IpoX MR 3124 térhálósító komponenst alkalmaztam 1:3 keverési arányban.

3.2. Próbatestek gyártása

3.2.1. Tisztán rCF alapú kompozitok

A gyártási folyamat során vákuumzsákos laminálást alkalmaztam és különböző vastagságú kompozitokat hoztam létre. A Tenowo újrahasznosított szénszálas alapanyagainak felhasználásával 3x100 g/m²-es, 2x200 g/m²-es, valamint 1x300 g/m²-es kompozit lemezeket készítettem. Mindhárom esetben azonos irányban történt a rétegek egymásra helyezése. Ezekből 0°-os és 90°-os irányban vágtam ki a próbatesteket.

3.2.2. Hibrid kompozitok

A hibrid kompozitokat szintén vákuumzsákos laminálással készítettem el, ahol különböző rétegrendű kompozitokat hoztam létre. A folyamat során a Tenowo 200 g/m²-es rCF paplanját és a Zoltek UD szénszálal anyagát használtam. Ezekből a következő rétegrendeket hoztam létre: [0/0_r/0/0_r] [[0/0_r/0_r/0], [0/90_r/0/90_r] [[0/90_r/90_r/0],

Ezután az ENF vizsgálatához szükséges hibrid kompozitokat is elkészítettem. Az előző lépéshez hasonlóan a Tenowo 200 g/m²-es rCF paplanját, valamint a Zoltek UD szénszálalját használtam, összesen 4 rétegben. A második és a harmadik réteg közé egy 50 mm-es széles, 20 μm vastag poli(tetrafluor-etilén) (PTFE) fóliát helyeztem el. A rétegrendek létrehozása a már felsoroltakhoz hasonlóan történt.

Végül a kompozit lemezekből kivágtam a vizsgálatokhoz szükséges próbatesteket.

3.3. Alkalmazott berendezések

Utótérhálósítás céljából a kompozit lemezeket 80°C-os szárítószekrénybe helyeztem 4 órára.

A szakítóvizsgálat és az ENF (end notched flexure) vizsgálat során a Zwick Z250 anyagvizsgáló berendezést alkalmaztam. A vizsgálatok értékeléséhez Zwick TestXpert II 3.41 programot használtam. Ezen kívül szakítóvizsgálat során nyúlásmérést is alkalmaztam, ehhez a Mercury Monet DIC optikai nyúlásmérő volt segítségemre. Az eredmények értékeléséhez Mercury RTv2.6 programot használtam.

A hárompontos hajlítóvizsgálat során a Zwick Z005 MT anyagvizsgáló berendezést használtam a hozzátartozó hárompontos hajlító feltétellel. A vizsgálatok értékeléséhez Zwick TestXpert II 3.41 programot használtam.

A töretfelületeket a JEOL JSM 6380LA pásztázó elektronmikroszkóp segítségével elemeztem. A vizsgálat előtt a minták felületét vékony aranyréteggel vontam be a JEOL JFC-1200 aranyozó-berendezés segítségével.

További morfológiai vizsgálatokat végeztem a Keyenc VHX-5000 optikai mikroszkóppal. A mintaelőkészítéshez a Struers LaboPol-5 polírozógépet használtam.

3.4. Vizsgálati módszerek

3.4.1. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálat során a szabványban leírt geometriájú próbatestet két végénél befogva, meghatározott mérési körülmények (hőmérséklet, nedvességtartalom) mellett egytengelyű húzó igénybevétel mellett állandó sebességgel nyújtjuk, eközben mérjük és regisztráljuk a hosszváltozás függvényében fellépő húzóerőt. A vizsgálat rendszerint a próbatest szakadásáig (szakítóvizsgálat) tart. Az eredmények értékelése során, a próbatest méreteit figyelembe véve fajlagos anyagjellemzőket határozunk

meg, amelyek lehetővé teszik például bonyolultabb geometriájú alkatrészek műszaki tervezését és méretezését is [27].

A vizsgálat során a Zwick Z250 berendezést használtam, valamint a még pontosabb nyúlásmérés érdekében Mercury Monet DIC (digital image correlation) optikai nyúlásmérő berendezést. A méréseket az MSZ EN ISO 527-4 szabványnak megfelelően végeztem el. Az erőmérő cella 20 kN, a mérési sebesség pedig 5 mm/perc volt. A próbatestek keresztmetszete a szabványnak megfelelően 10x4 mm, míg az befogási hossz 115 mm volt.

A mérés során tisztán rCF alapú és hibrid kompozit próbatesteket is vizsgáltam.

3.4.2. Hárompontos hajlítóvizsgálat

A hajlítás során a szabványban leírt geometriájú próbatestet két végénél feltámasztva, közepét meghatározott mérési körülmények (terhelési sebesség, hőmérséklet, nedvességtartalom) mellett nyomó igénybevétellel terheljük, eközben mérjük és regisztráljuk a deformáció (lehajlás) függvényében fellépő erőt. A hárompontos hajlító vizsgálat kiértékelése során meg kell határoznunk a jellemző szilárdságot (ami a maximális teherviselő képességgel arányos) és a hajlító rugalmassági modulust (ami pedig az anyag merevségét jellemzi) [28].

A vizsgálat során a Zwick Z005 MT berendezést használtam a méréshez szükséges hárompontos feltétellel. A méréseket az MSZ EN ISO 14125:2011 szabványnak megfelelően végeztem el. Az erőmérő cella 5 kN, a mérési sebesség pedig 5 mm/perc volt. A próbatestek keresztmetszete a szabványnak megfelelően 10x4 mm, míg az alátámasztási távolság 64 mm volt. A mérés tönkremenetelig tartott.

A mérés során tisztán rCF alapú és hibrid kompozit próbatesteket is vizsgáltam. A hibrid kompozitok esetében készültek szimmetrikus és váltakozó rétegrendű kompozit próbatestek. A szimmetrikus rétegrendek esetében csak egy oldalról, azonban váltakozó rétegrend esetében mindkét oldalról végeztem méréseket. Erre azért volt szükség, hogy egyik esetben az UD, másik esetben az rCF legyen a nyomott oldalon.

3.4.3. ENF vizsgálat

Az ENF vizsgálat egy speciális hárompontos hajlítóvizsgálat, ahol a próbatestek gyártásánál egy tervezett hiba (teflon fólia) kerül az előre meghatározott rétegek közé, esetemben a 2. és 3. réteg közé. Ez a PTFE fólia mesterséges rétegelválást eredményez, ezáltal vizsgálni lehet a II. módú rétegeközi igénybevétel hatását [29].

Az ENF vizsgálatokat az ASTM D7905/D7905M-14-ös szabvány alapján, hárompontos hajlító elrendezésben végeztem el. A mérés segítségével a termoplasztikus anyag rétegeközi tulajdonságokra gyakorolt hatását vizsgáltam. A kezdeti hiba létrehozásához teflon fóliát alkalmaztam, amelynek vastagsága 20 μm

volt. A vizsgálati sebesség 5 mm/perc, az alátámasztás távolsága 120 mm volt. A próbatestek hossza 163 mm, átlagos szélessége 25,4 mm volt. A méréshez használt próbatestek négy rétegből álltak. Oldalukat fehérre festettem, hogy jobban követni lehessen a repedés terjedését [29].

A vizsgálat során szimmetrikus és váltakozó rétegrendű hibrid kompozit próbatesteket mértem. A hárompontos hajlító vizsgálatához hasonlóan a váltakozó rétegrendek esetében mindkét oldalról elvégeztem a méréseket.

3.4.4. Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM)

A mechanikai vizsgálatok során kapott töretfelületeket a JEOL JSM 6380LA pásztázó elektronmikroszkóp segítségével vizsgáltam. A mintaelőkészítés során a minták felületét vékony aranyréteggel vontam be a JEOL JFC-1200 aranyozó-berendezés segítségével. Az aranyozás célja, hogy a felületeket vezetővé tegyük, ezzel elkerülve a minták töltődését [30].

3.4.5. Optikai mikroszkóp

További morfológiai vizsgálatokhoz a Keyenc VHX-5000 optikai mikroszkópot használtam. Mind a hibrid kompozitok csiszolatait, mind az ENF próbatestek repedésterjedését vizsgáltam. A mintaelőkészítéshez a Struers LaboPol-5 polírozógépet használtam.

4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

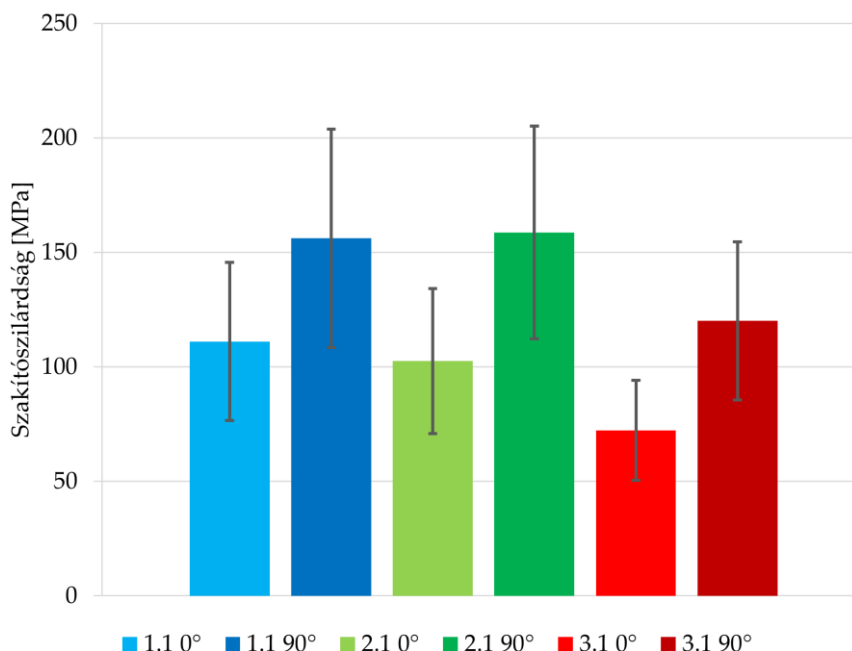
Kutatásom során a tisztán rCF alapú kompozitok, valamint a hibrid kompozitok tulajdonságait vizsgáltam. Ehhez először mechanikai, majd morfológiai vizsgálatokat végeztem, hogy meghatározzam a rétegrendek közötti különbséget és az ideális rétegrendet.

4.1. Mechanikai vizsgálatok

Mechanikai vizsgálatok során szakító-, hajlító- és ENF vizsgálatokat végeztem, ezek eredménye az alábbi pontokban látható.

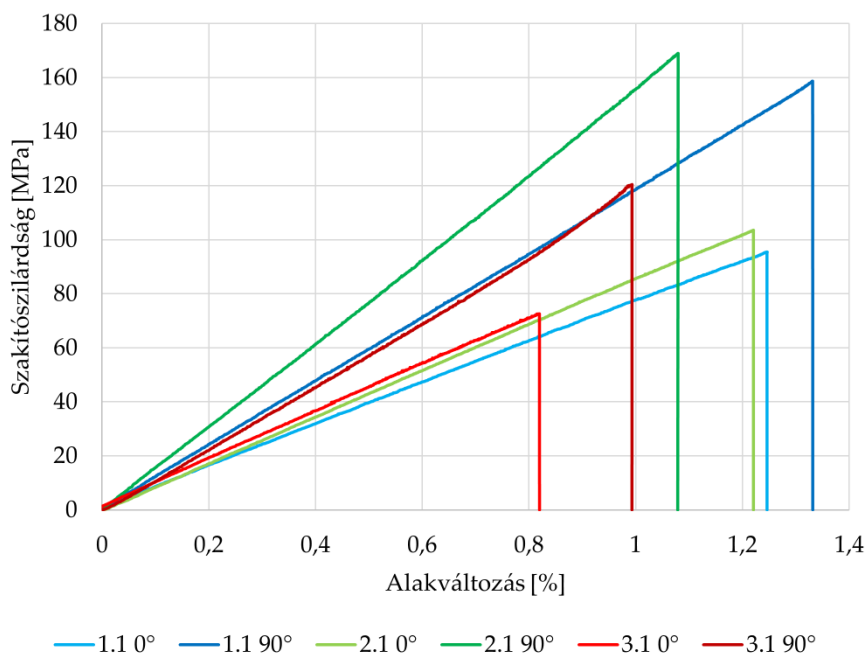
4.1.1. Szakítóvizsgálat

A szakítóvizsgálatok során először a tisztán rCF alapú, majd a hibrid kompozitokat vizsgáltam. Az előbbi esetében 3x100 g/m²-es (később 1.1), 2x200 g/m²-es (később 2.1) és 1x300 g/m²-es (később 3.1) kompozitokat készítettem és daraboltam 0°, valamint 90°-os irányban. A mérési eredményeket a 17. ábra mutatja, a pontos értékek és szórások a 3. táblázatban láthatók. Ezen jól látható, hogy a gyártási irányra merőleges darabolás során kapott próbatestek magasabb szakítószilárdsággal rendelkeztek, mint a gyártási irány szerinti próbatestek. Továbbá az 1.1 90° és a 2.1 90° jelölésű próbatestek kimagasló eredményeket értek el a többi kompozithoz képest.



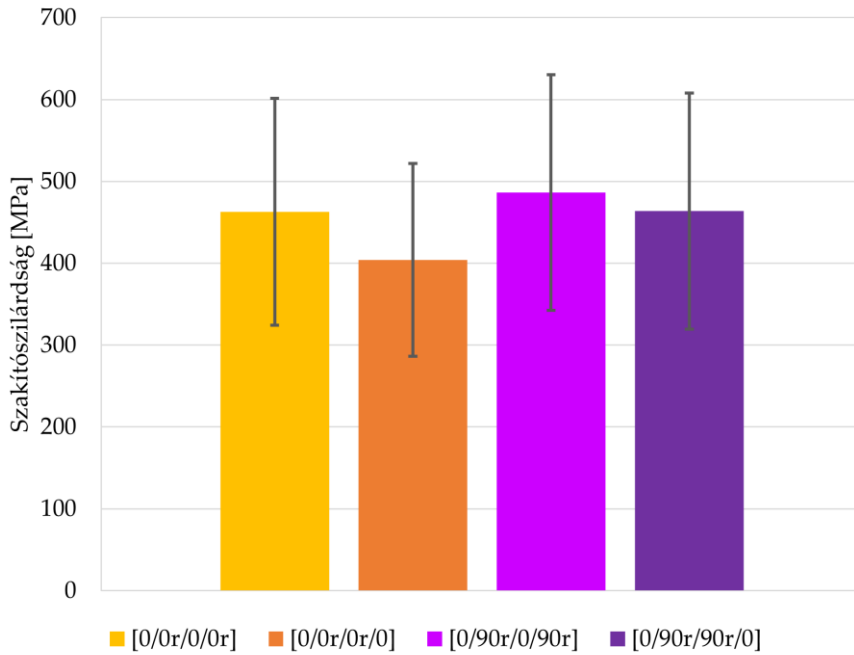
17. ábra – Tisztán rCF alapú kompozitok szakítószilárdsága

A DIC mérés eredményeit a 18. ábra mutatja. Ezek alapján az különböző területi sűrűségeknél a megnyúlás 90°-os irányban minden esetben nagyobb volt, mint 0°-os irányban. A DIC mérés eredményei is azt igazolják, hogy az 1.1 90° és az 2.1 90° jelölésű próbatetek szakítószilárdsága volt a legmagasabb. Ezen kívül látható, hogy az 1.1 90°-os próbatetek alakváltozása volt a legnagyobb.



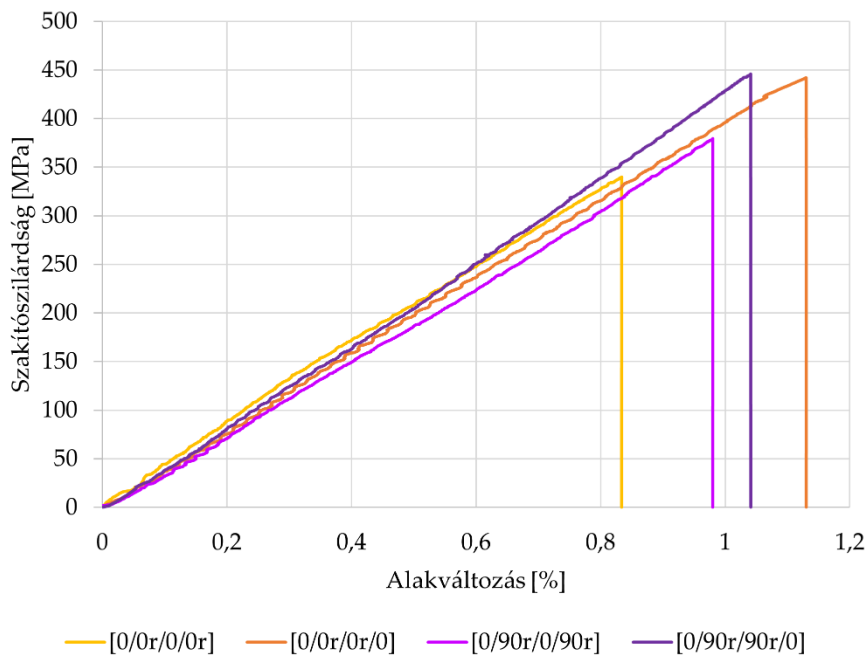
18. ábra – Tisztán rCF alapú kompozitok DIC méréseinek átlaggörbéi

Ezután a hibrid kompozitokat vizsgáltam, az eredményeket a 19. ábra mutatja, a pontos értékeket és a hozzájuk tartozó szórást a 4. táblázat tartalmazza. Itt a különböző rétegrendek és irányok nagyjából egyforma értékeket mutattak, de a tisztán rCF alapú kompozitokhoz képest jóval nagyobb volt a szakítószilárdság.



19. ábra – Hibrid kompozitok szakítószilárdsága

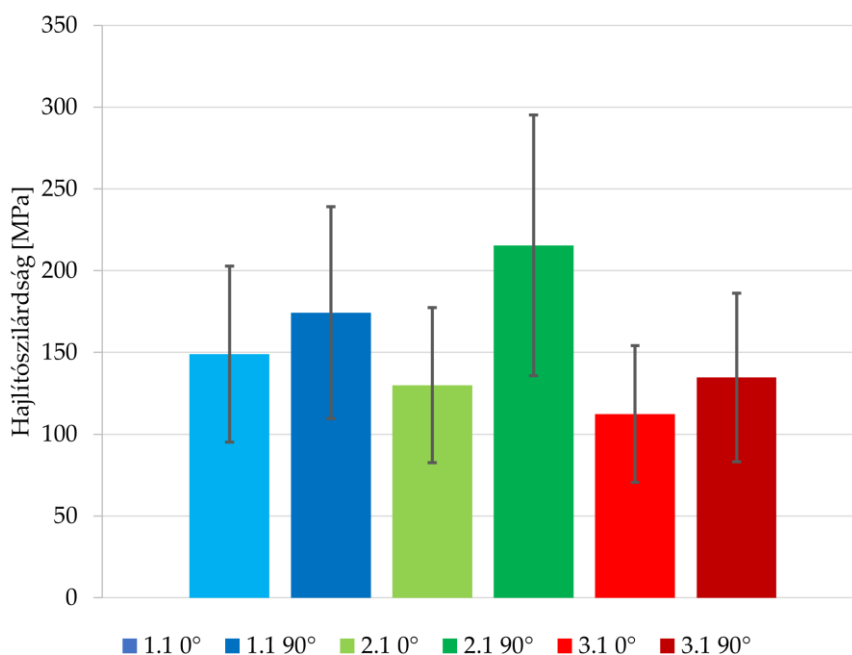
A DIC mérés eredményeit a 20. ábra mutatja, amely alapján szintén elmondható, hogy a különböző rétegrendek szakítószilárdsága között nem volt lényeges különbség. Az ábra alapján látható, hogy a [0/0_r/0/0_r] rétegrend alakváltozása volt a legnagyobb.



20. ábra – Hibrid kompozitok DIC méréseinek átlaggörbéi

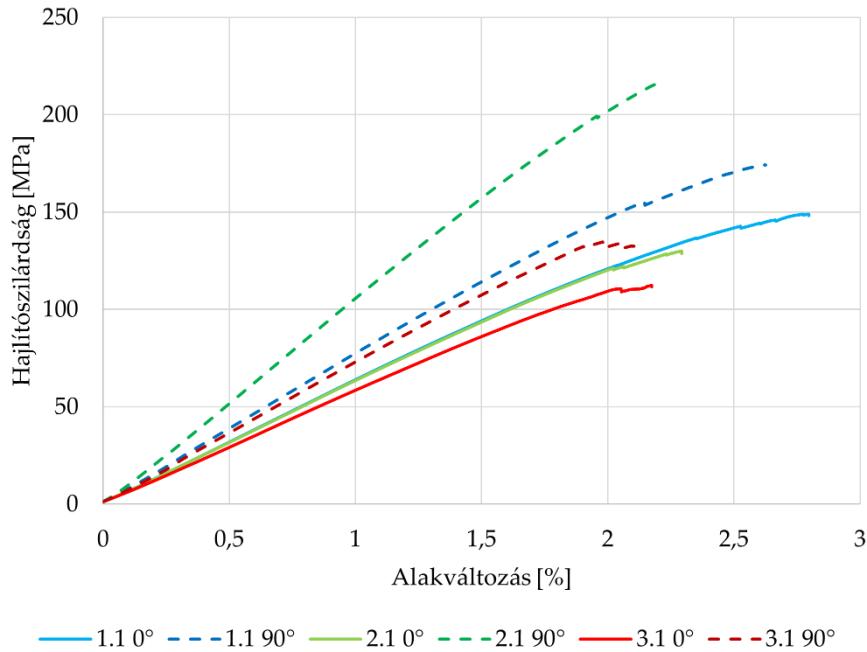
4.1.2. Hajlítóvizsgálat

A hajlítóvizsgálatok során először szintén a tisztán rCF alapú **21. ábra**, majd a hibrid kompozitokat vizsgáltam. A tisztán rCF alapú kompozitok esetében (21. ábra) a már fent említett módon, a 3x100 g/m²-es kompozitot 1.1, a 2x200 g/m²-es kompozitot 2.1 és a 1x300 g/m²-es kompozitot 3.1 jelöléssel illetttem. Az elrendezésekhez tartozó pontos értékek és a szórásokat a 5. táblázat tartalmazza. A vizsgálat eredményei alapján elmondható, hogy a 0°-os elrendezésű kompozitok alacsonyabb, míg a 90°-os elrendezésűek nagyobb hajlítószilárdsági értékeket értek el. Itt is látható, hogy a 2.1 90°-os elrendezés a többi kompozitokhoz képest kimagasló volt és nagyobb igénybevétel hatására ment tönkre.



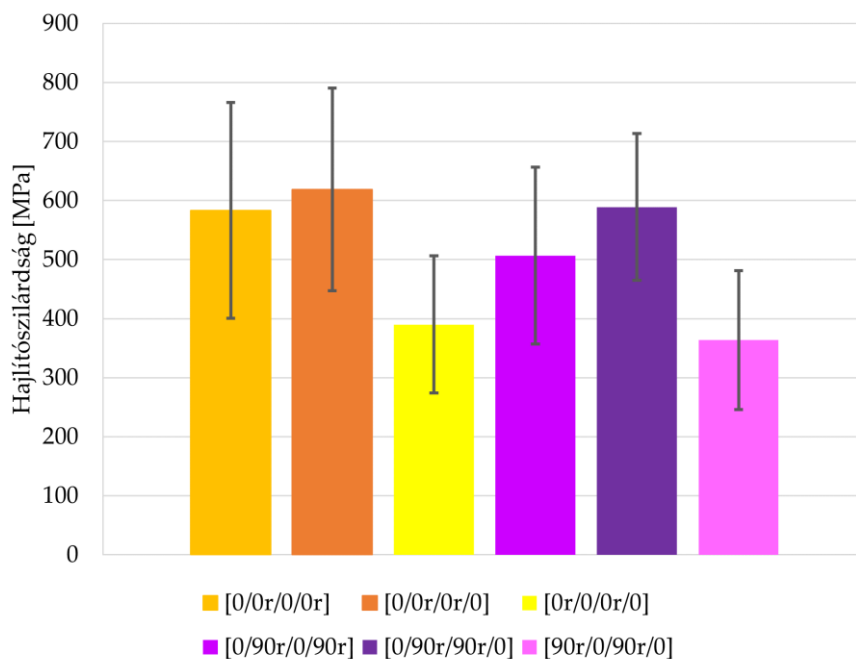
21. ábra – Tisztán rCF alapú kompozitok hajlítószilárdsága

Az egyes elrendezésekben kapott görbék átlagát a 22. ábra szemlélteti. Itt is látható, hogy a 90°-os elrendezésű próbatetek hajlítószilárdsága nagyobb volt, mint a 0°-os rendezésű próbateteké. Továbbá a legnagyobb hajlítószilárdság a 2.1 90°-os próbatest esetében volt. A legnagyobb alakváltozást pedig az 1.1 0°-os próbatetek szenvedték, de nem sokkal marad el tőle a 90°-os elrendezés sem.



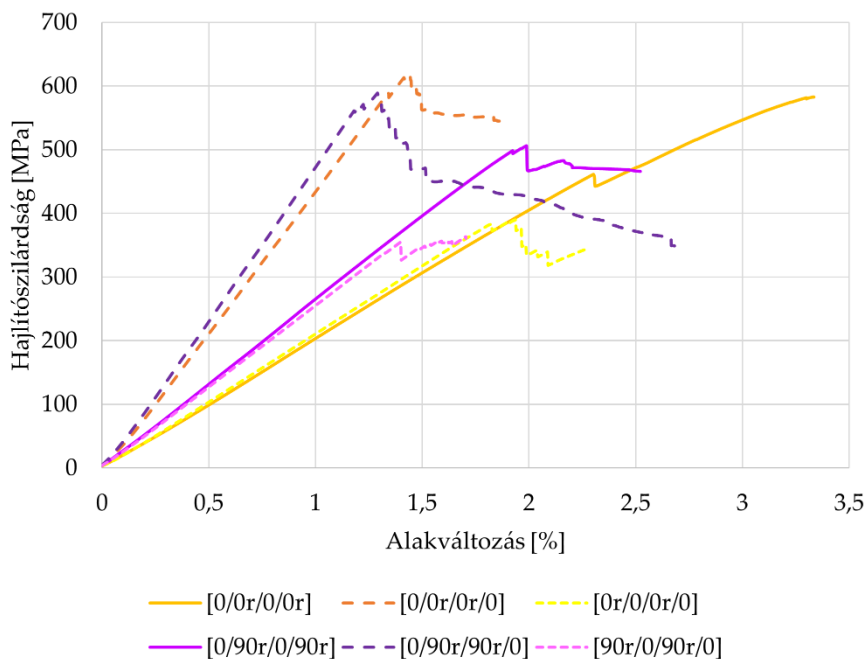
22. ábra - Tisztán rCF alapú kompozit próbatestek hajlítóvizsgálatának átlaggörbéi

Hibrid kompozitok esetében (23. ábra) mindegyik elrendezésnél a szimmetrikus rétegrend érte el a legmagasabb hajlítószilárdsági értéket. A váltakozó rétegrendeket mindkét oldalról vizsgáltam, vagyis egyik esetben az újrahasznosított, másik esetben az UD réteg volt a nyomott felület. Az eredmények alapján látható, hogy a $[0/90_r/0/90_r]$ és a $[0/0_r/0/0_r]$ rétegrendek nagyobb hajlítószilárdsági értékeket értek el, mint a fordított esetben. A rétegrendekhez tartozó hajlítószilárdsági értékek és szórások a 6. táblázatban találhatóak.



23. ábra – Hibrid kompozitok hajlítószilárdsága

A különböző rétegrendeknél kapott hajlítószilárdsági görbék átlagát a 22. ábra szemlélteti. Ez alapján is látható, hogy a legnagyobb hajlítószilárdságot a $[0/0_r/0_r/0]$ és a $[0/90_r/90_r/0]$ rétegrendek érték el. A legnagyobb alakváltozás pedig a $[0/0_r/0/0_r]$ rétegrend esetében történt.

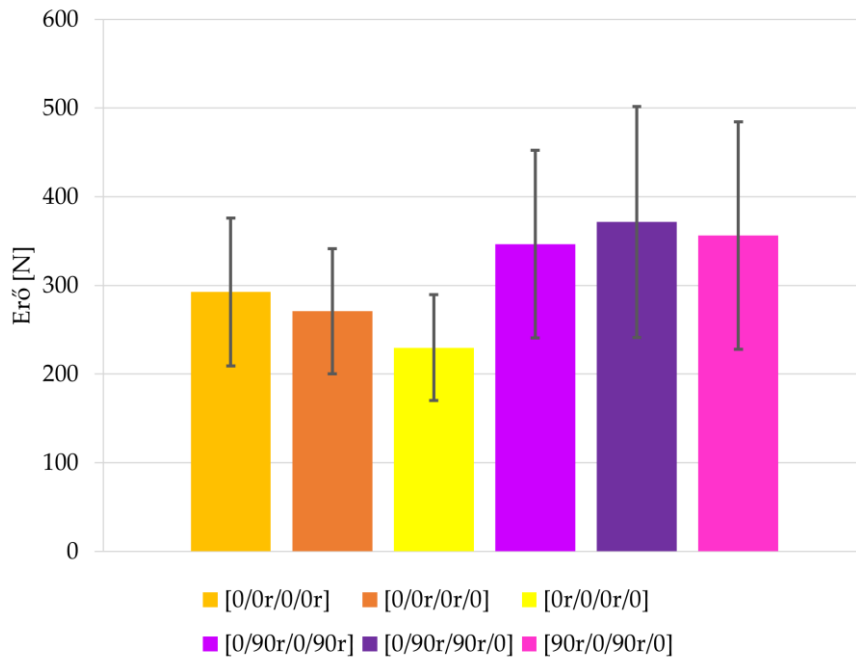


24. ábra – Hibrid kompozit próbatetek hajlítóvizsgálatának átlaggörbéi

4.1.3. ENF

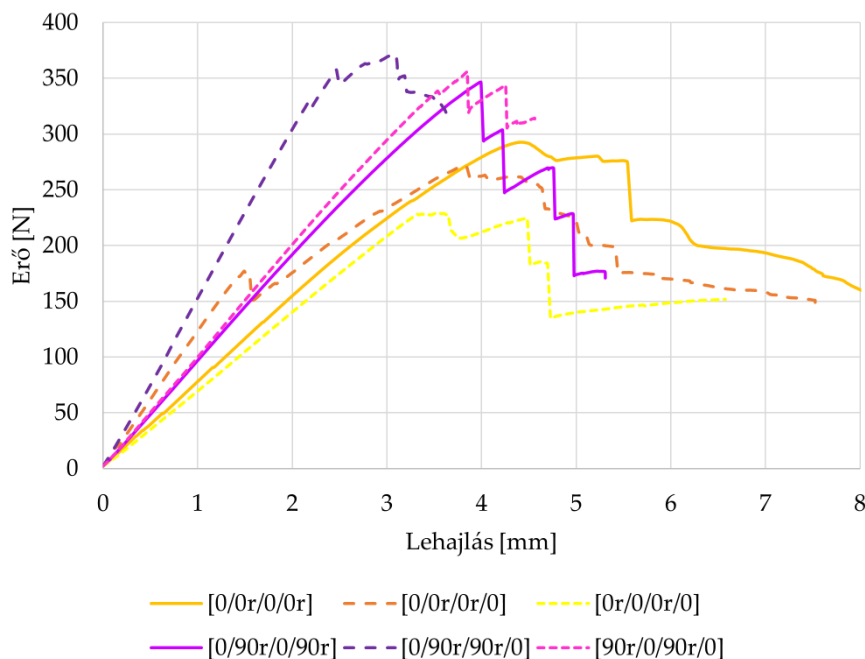
A hárompontos hajlító vizsgálatokhoz hasonlóan az ENF vizsgálatok során is szimmetrikus és váltakozó rétegrendű kompozit próbatesteket vizsgáltam és váltakozó rétegrend esetében mindkét oldalról elvégeztem a vizsgálatokat. Az eredményeket a 25. ábra mutatja. Látható, hogy a 90° -os elrendezés esetében nagyobb erő hatására indult meg a repedés, mint a 0° -os elrendezésnél. A pontos erőértékek és szórások a 7. táblázatban láthatók.

Az eredmények mellett azonban fontos megemlíteni, hogy a mérések jelentős részében a tönkremenetel nem a tervezett hiba mentén történt, hanem a próbatestekre merőlegesen. Azonban a $[0/0_r/0/0_r]$ és a $[0/90_r/0/90_r]$ elrendezés esetében a repedés minden esetben a tervezett hiba mentén indult meg és a 2. és 3. rétegrend között futott végig.



25. ábra – Hibrid kompozitok ENF eredményei

A különböző rétegrendű próbatetek átlaggörbéit a 26. ábra mutatja. Ez alapján is elmondható, hogy a 90°-os elrendezésnél nagyobb erő kellett a repedés megindulásához, azonban a 0°-os elrendezés nagyobb lehajlási értékeket ért el.



26. ábra – Hibrid kompozit próbatetek ENF vizsgálatának átlaggörbéi

A mérés során vizsgáltam a kompozit próbatetek kritikus törési szívóssági értékét (G_{IIc}). A II. index az igénybevételi módra utal. A kritikus törési szívósság azt a törési szívósság értéket adja meg, amit meghaladva a repedés elkezd instabilan terjedni [29, 31]. A próbatetek kritikus törési szívósság az (1) képlettel számítható ki:

$$G_{IIc} = \frac{9P_c^2 a_c^2 C_c}{2b(2L^3 + 3a_c^3)} \quad (1)$$

ahol P_c (N) a maximális erő értéke, C_c (mm/N) a kritikus engedékenység, a_c (mm) a kritikus repedési hossz, b (mm) a próbatest szélessége és L (mm) az alátámasztások közötti távolság. A kritikus repedési hossz a (2) képlettel számítható:

$$a_c = \sqrt[3]{\frac{C_c}{C_0} a_0^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_c}{C_0} - 1 \right) L^3} \quad (2)$$

ahol a_0 (mm) a kezdeti repedés hossza, C_0 (mm/N) a kezdeti engedékenység. Az engedékenység (3) képlettel számítható:

$$C_c = \frac{\delta_c}{P_c} \quad (3)$$

ahol δ_c (mm) a maximális erőnél mért alakváltozás.

Az hibrid kompozitokhoz tartozó kritikus törési szívósság értékeit a 2. táblázat tartalmazza. Látható, hogy a szimmetrikus rétegrendek G_{IIc} értéke egy nagyságrenddel kisebb. Továbbá megfigyelhető, hogy az azonos elrendezéseknél 0° esetében a kritikus törési szívósság értéke mindig nagyobb, mint 90° esetében.

	[0/0r/0/0r]	[0/0r/0r/0]	[0r/0/0r/0]	[0/90r/0/90r]	[0/90r/90r/0]	[90r/0/90r/0]
G_{IIc} [kJ/m ²]	0,452	0,026	0,316	0,234	0,022	0,125

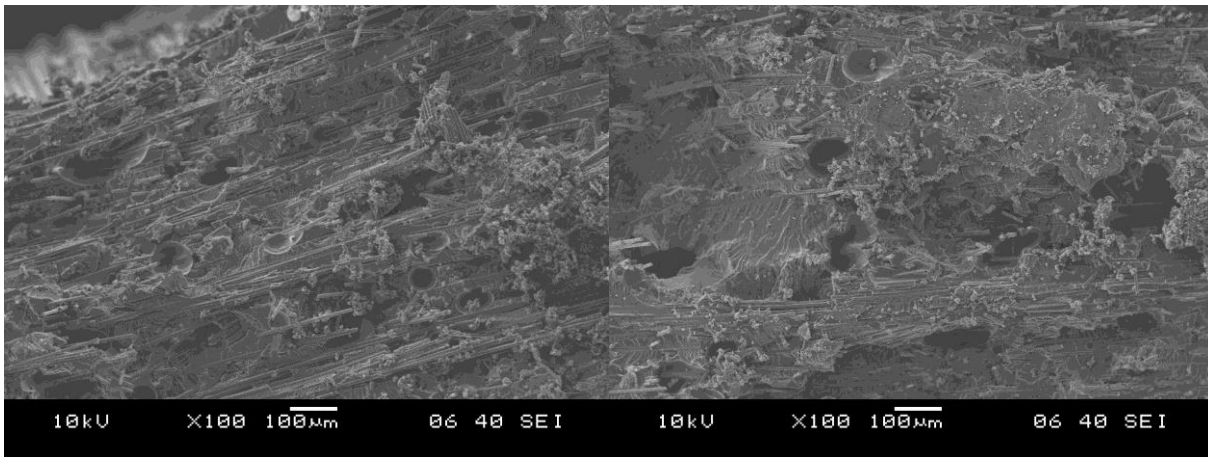
2. táblázat – Hibrid kompozitok kritikus törési szívóssága

4.2. Morfológiai vizsgálatok

Az rCF alapú kompozitokat pásztázó elektronmikroszkóppal, a hibrid kompozitokat és az ENF próbatesteket optikai mikroszkóppal vizsgáltam.

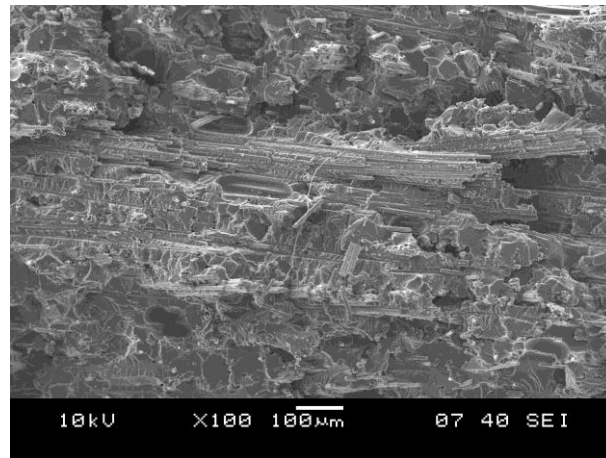
4.2.1. Pásztázó elektronmikroszkóp

A vizsgálat során a tisztán rCF alapú kompozit próbatestek töretfelületeit elemeztem. A 27. ábra és a 28. ábra alapján látható, hogy a 90° -os elrendezés esetében több elemi szál látható, vagyis ez a domináns szálirány. A felvételeken látható, hogy a mátrixban találhatóak zárványok. A területi sűrűség növekedésével a zárványok száma is növekedett, ami gyártási hibára utalhat. A képeken látható repedezett felület szívós mátrix tönkremenetelre utal.



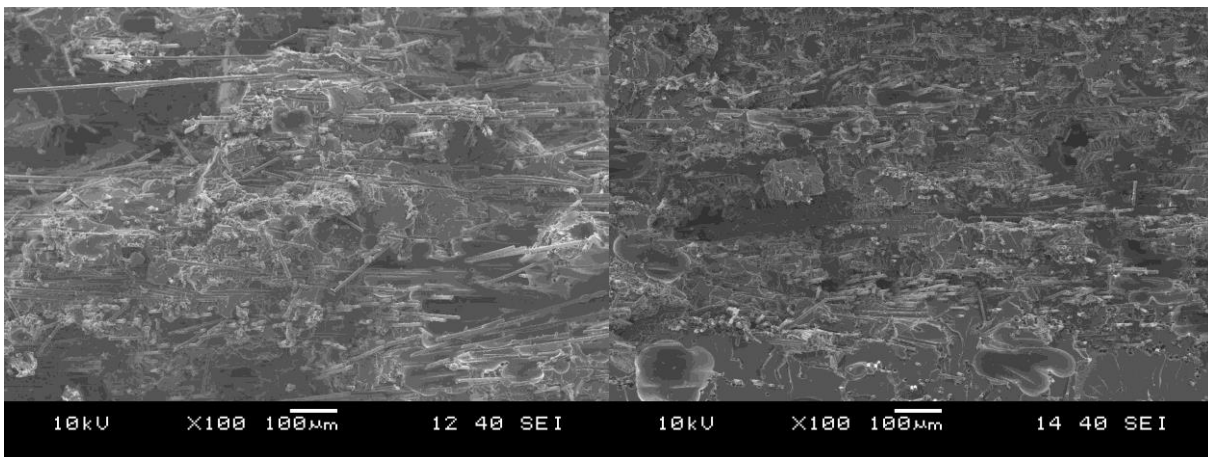
a)

b)



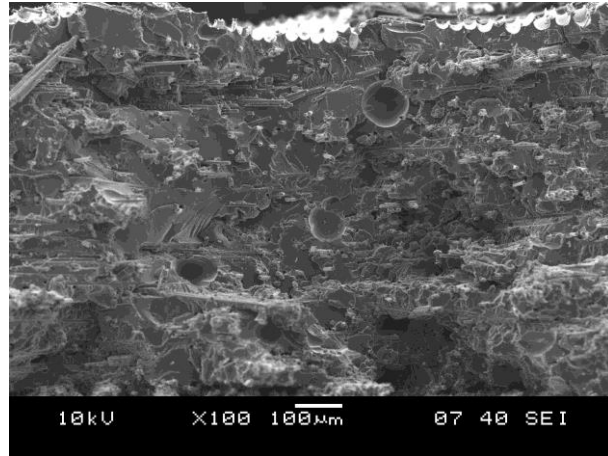
c)

27. ábra – 1.1° (a), 2.1° (b) és 3.1° (c) elrendezés felvételei 100x-os nagyításban



a)

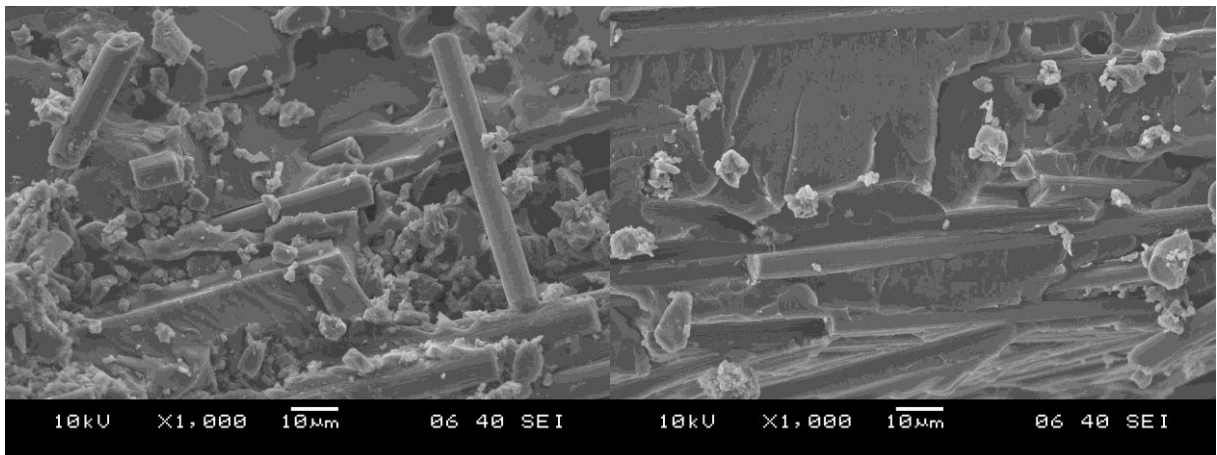
b)



c)

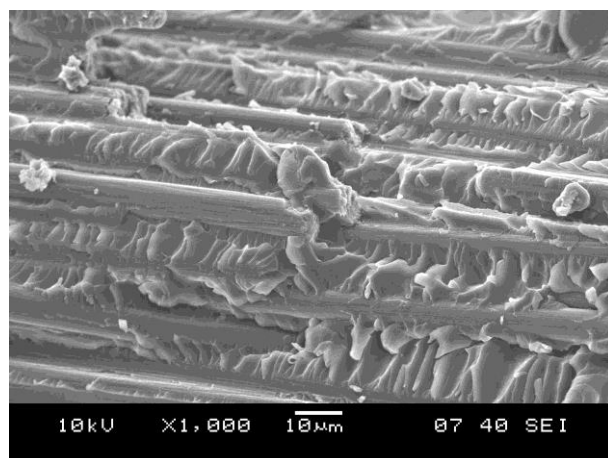
28. ábra – 1.1 90° (a), 2.1 90° (b) és 3.1 90° (c) elrendezés felvételei 100x-os nagyításban

A 29. ábra és a 30. ábra alapján látható, hogy a szálak felülete sima, ami arra utal, hogy az rCF paplan vágási hulladékból készült. Pirolizált szálak esetében a szálak felülete barázdáltabb lenne. A szál-mátrix adhézió a felvételek alapján megfelelőnek mondható, mivel tönkremenetel során a szálak elszakadtak. A területi sűrűség növekedésével az adhézió is egyre jobb lett, ez főként a 0°-os elrendezésben látható.



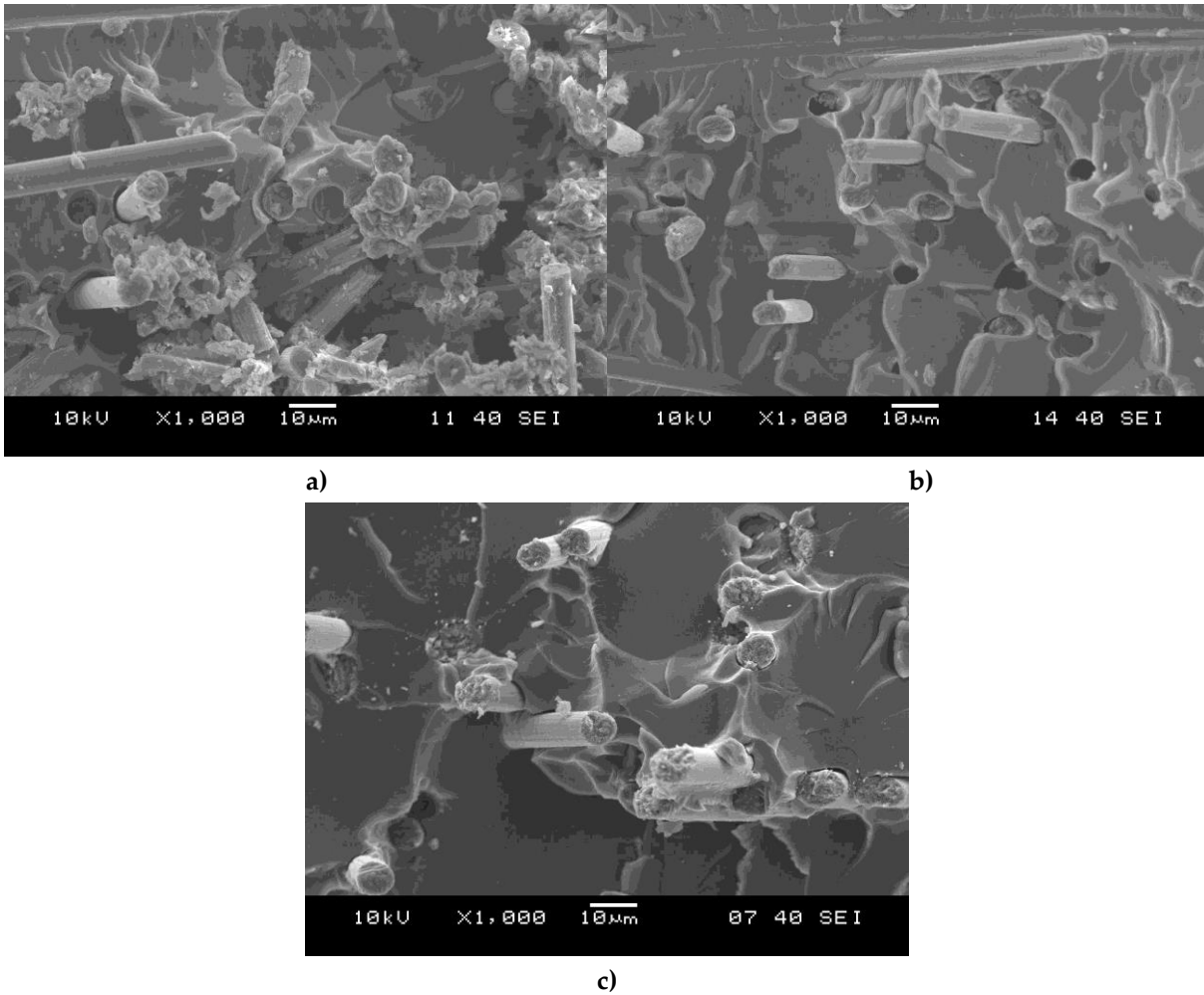
a)

b)



c)

29. ábra – 1.1 0° (a), 2.1 0° (b) és 3.1 0° (c) elrendezés felvételei 1000x-os nagyításban

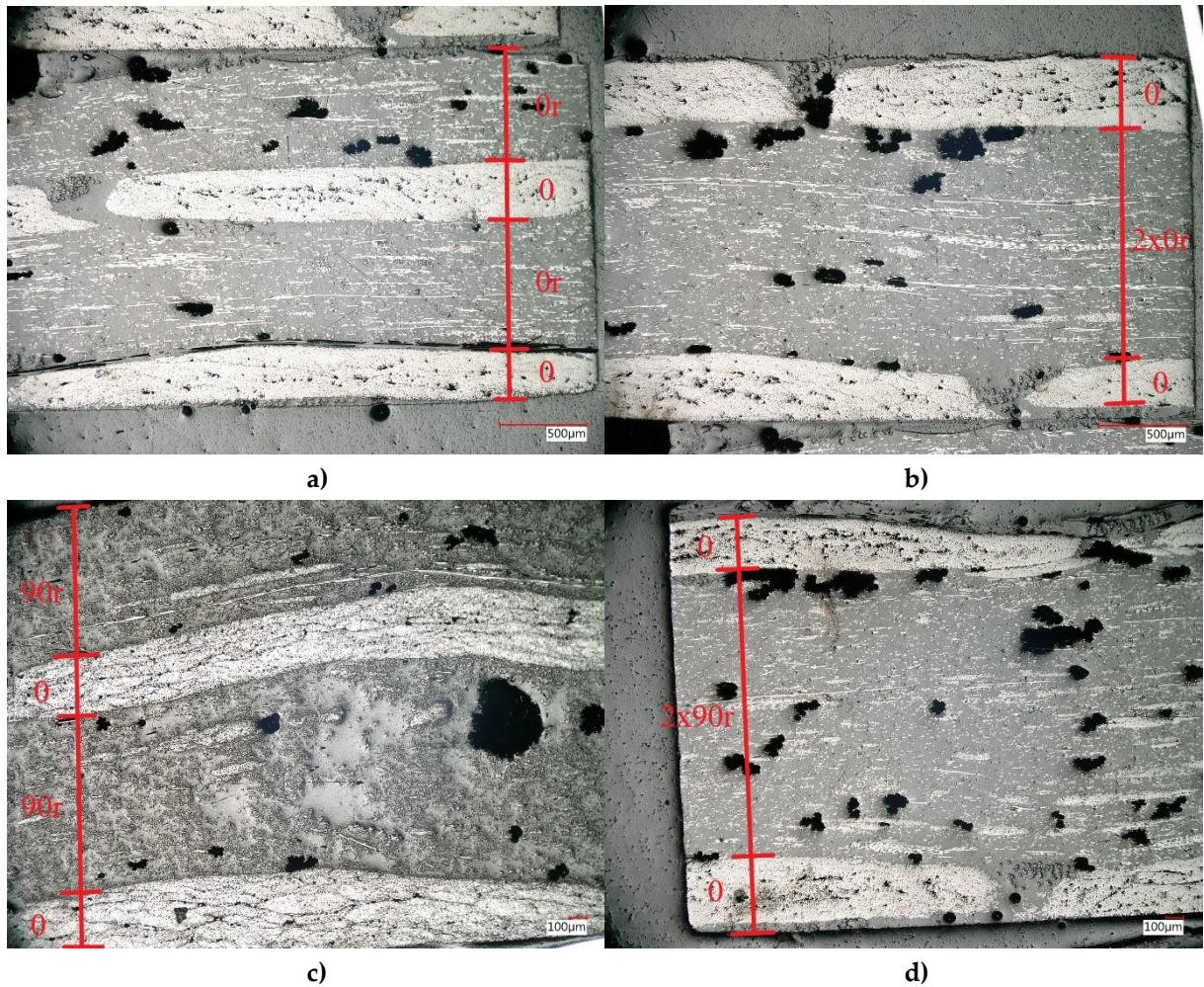


30. ábra – 1.1 90° (a), 2.1 90° (b) és 3.1 90° (c) elrendezés felvételei 1000x-os nagyításban

4.2.2. Optikai mikroszkóp

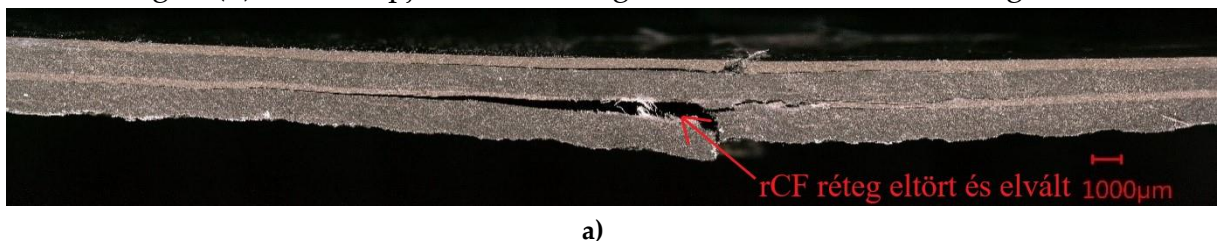
A hibrid mintákon mikroszkópi vizsgálatot is végeztem. A 31. ábra a különböző rétegrendek képeit mutatja. Az ábra 31. ábra a) és b) részei a 0°-os, a c) és d) részei pedig a 90°-os elrendezést szemléltetik. Mindegyik képen jól elkülöníthető egymástól az UD és az rCF réteg. Továbbá az újrahasznosított rétegek orientációján is megfigyelhető, hogy amíg az első két ábra a gyártási iránnyal megegyező, addig a c) és d) ábra a gyártási irányra merőleges rétegeket tartalmaz.

A rétegek határait pirossal jelöltem az ábrákon. Látható, hogy az UD rétegek vastagsága eltér a rCF rétegek vastagságától. Ez abból adódik, hogy az előbbi réteget jobban leszívta a vákuum. Továbbá elmondható, hogy a szimmetrikus rétegrendek esetében a két rCF réteg között nem látszik a réteghatár. Az ábrákon látható fekete foltok szálkötegek.



31. ábra – Hibrid kompozitok töretfelületeinek mikroszkópi képei: a) [0/0r/0/0r], b) [0/0r/0r/0], c) [0/90r/0/90r], d) [0/90r/90r/0]; pirossal jelölve a rétegek határa és fajtája

Ezután az ENF vizsgálat során tönkrement próbatesteket is vizsgáltam, az eredményeket a 32. ábra, a 33. ábra és a 34. ábra mutatja. A 32. ábra jól szemlélteti, ami már a vizsgálati eredmények kiértékelésénél is szóba került, hogy ebben az elrendezésben a repedés nem indult meg a próbatest szélétől, hanem a nyomott pontban a próbatest félbetört. Törés során jellemzően az alsó rCF réteg elvált a felette lévő UD rétegtől (a), de bizonyos esetekben az alsó UD réteg is eltört és elvált a felette lévő rCF rétegtől (b). Ezek alapján az rCF réteg, mint húzott szál, nem megfelelő.

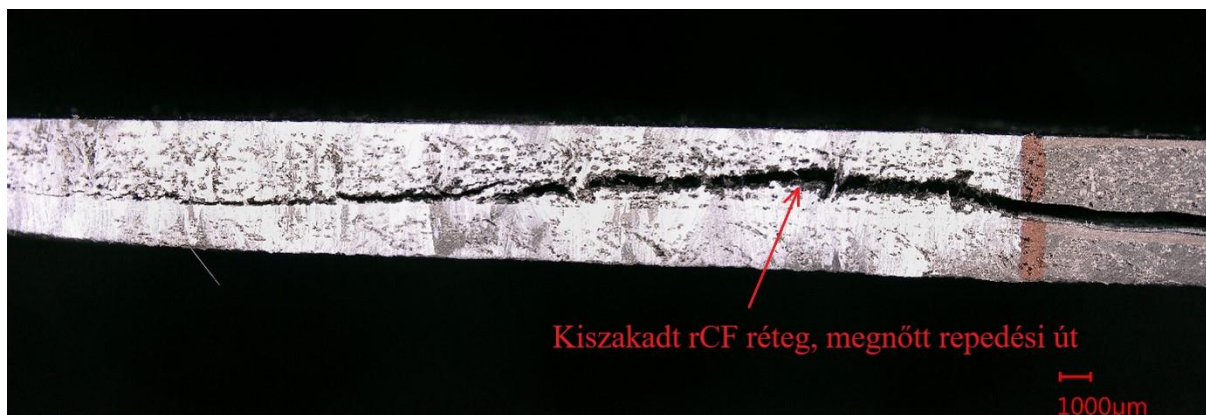




b)

32. ábra – ENF próbatetek mikroszkópi felvételei: a) [0/0/0/0/0], b) [0/90/0/90/0]; eltört és elvált rétegek pirossal jelölve

A 33. ábra a másik oldalról nyomott rétegeket mutatja, itt az rCF volt a felső, nyomott réteg. Ebben az esetben azonban a repedés a mesterséges hibahelytől indult és jellemzően a második és harmadik réteg között futott végig (b). Előfordult azonban, hogy a repedés nem mindig a két középső réteg között futott, hanem az rCF réteg kiszakadt, ezzel egyenlőtlen és megnőtt repedési úthosszra eredményezve (a). Azonban a repedés minden esetben hosszú volt. Így ennél az elrendezésnél az ENF mérés sikeresnek tekinthető.



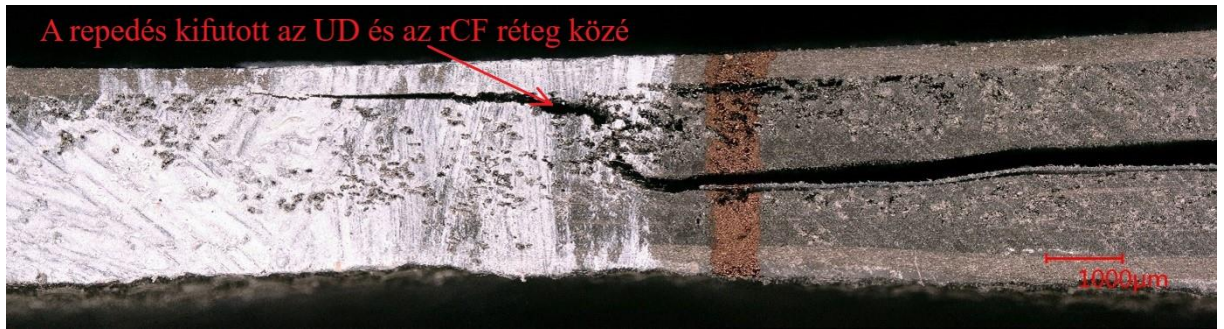
a)



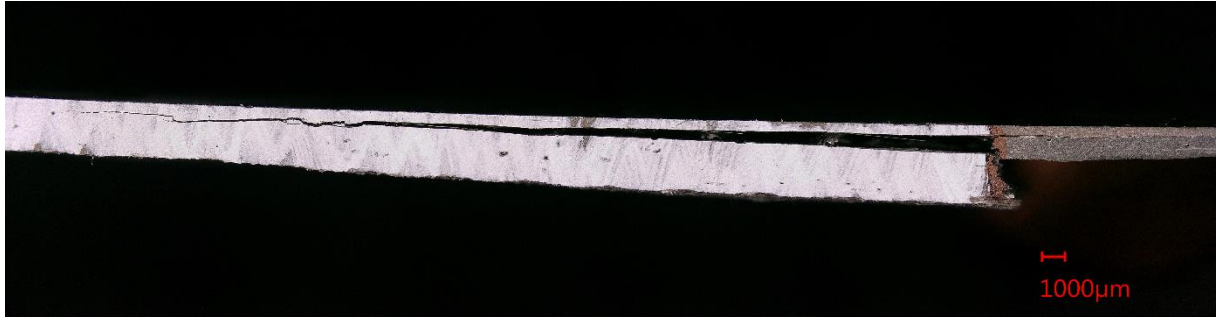
b)

33. ábra – ENF próbatetek mikroszkópi felvételei: a) [0/0/0/0/0], b) [90/0/90/0/0]; repedési út pirossal jelölve

A 34. ábra a szimmetrikus rétegrendeket szemlélteti. Itt mindkét esetben egy harmadik féle tönkremenetel figyelhető meg. A repedés a mesterséges hibahelyen indult meg, azonban nem a két középső réteg között futott végig, hanem kifutott a harmadik és negyedik réteg közé. Továbbá nem haladt végig a repedés a teljes próbatesten. Ezek alapján a repedés mindig csak az UD és a rCF rétegek közt tudott haladni és a repedési úthossz mindegyik próbatestnél rövid volt.



a)



b)

34. ábra – ENF próbatetek mikroszkópi felvételei: a) [0/0_r/0_r/0], b) [0/90_r/90_r/0]; repedés útja pirossal jelölve

5. ÖSSZEFOGLALÁS

5.1. Magyar nyelvű összefoglaló

Munkám során vizsgáltam a tisztán rCF alapú, illetve az újrahasznosított szénszállal erősített hibrid kompozitok mechanikai és morfológiai tulajdonságait.

Tisztán rCF alapú kompozitok esetében szakító- és hajlítóvizsgálatnál is nagyobb szilárdsági értékeket mutatott a 90°-os elrendezés a 0°-os elrendezéshez képest. A pásztázó elektronmikroszkóppal végzett vizsgálat eredményei azt mutatták, a területi sűrűség növekedésével a zárványok száma is növekedett. Ezen kívül a 90°-os elrendezés esetében több elemi szál látható, vagyis ez volt a domináns szálirány. A képeken látható, hogy szálak felülete sima, ami arra utal, hogy az rCF paplan vágási hulladékból készült.

Hibrid kompozitok szakítóvizsgálatánál a váltakozó rétegrendek nagyobb szakítószilárdsági értékeket mutattak. Hajlítóvizsgálatnál azonban a szimmetrikus rétegrendnél kaptam jobb értékeket. Hibrid kompozitok esetében ENF vizsgálatokat is végeztem, ahol a különböző elrendezések különböző repedésterjedést, illetve tönkremenetelt mutattak. A $[0_r/0/0_r/0]$ és a $[90_r/0/90_r/0]$ rétegrendeknél a repedés a tervezett hiba mentén indult el és futott végig. Az ENF próbatesteket optikai mikroszkóppal is vizsgáltam. Mindegyik elrendezésnél más tönkremenetel volt megfigyelhető. A $[0/0_r/0/0_r/]$ és a $[0/90_r/0/90_r]$ rétegrendeknél a próbatestek félbetörték, míg a $[0_r/0/0_r/0]$ és a $[90_r/0/90_r/0]$ elrendezés esetében a repedés a tervezett helyen indult meg és a repedési úthossz hosszú volt. Szimmetrikus rétegrendeknél a repedés a tervezett helyen indult meg, de kifutott a próbatest szélére és a repedési úthossz rövid volt.

Ezek alapján elmondható, hogy a hibrid kompozitok minden esetben jobban teljesítettek a tisztán rCF alapú kompozitoknál, de a különböző mechanikai igénybevételeknél különböző rétegrendek mutattak jobb értékeket.

5.2. Idegen nyelvű összefoglaló

My work examined the mechanical and morphological properties of rCF-based composites and recycled carbon fibre reinforced hybrid composites.

For rCF-based composites, both tensile and flexural strength values were higher for the 90° arrangement compared to the 0° arrangement. Scanning electron microscope results showed that as the areal density increased, the number of inclusions also increased. In addition, more fibres were visible in the 90° arrangement, this was the dominant fibre direction. The images show that the surface of the fibres is smooth, indicating that the rCF was made from cutting waste.

In the tensile test of hybrid composites, alternating layers showed higher tensile strength values. However, better values were obtained for the symmetric layers in the

flexural test. I also did ENF tests for hybrid composites, where different layouts showed different crack propagation and failure modes. For the $[0r/0/0r/0]$ and $[90r/0/90r/0]$ layouts, cracking started and ran along the intended failure. The ENF specimens were also examined by optical microscopy. Different failure modes were observed for each of the layouts. In the $[0/0r/0/0r/]$ and $[0/90r/0/90r]$ layouts, the specimens were half cracked, while in $[0r/0/0r/0]$ and $[90r/0/90r/0]$ layouts the crack started at the intended location and the crack path length was long. For symmetrical layers the crack started at the intended place but ran out to the edge of the specimen and the crack path length was short.

Based on these results, it can be said that the hybrid composites always did better than the pure rCF-based composites, but different layouts showed higher values for different mechanical loads.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

1. Bakosné Dr. Böröcz M.: Az életcikluselemzés módszerének használata és karbonlábnyom számítás alapjai. Szent István Egyetemi Kiadó, Gödöllő (2016).
2. Arvesen A., Hertwich E. G.: Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: A review of present knowledge and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **16**, 5994-6006 (2012).
3. Song Y. S., Youn J. R., Gutowski T. G.: Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites. *Composites: Part A*, **40**, 1257-1265 (2009).
4. Brusseau M. L.: Sustainable development and other solutions to pollution and global change. *Environmental and Pollution Science (Third Edition)*, 585-603 (2019).
5. Forcellese A., Marconi M., Simoncini M., Vita A.: Life cycle impact assessment of different manufacturing technologies for automotive CFRP components. *Life cycle impact assessment of different manufacturing technologies for automotive CFRP components*, **271**, 122677 (2020).
6. Kawajiri K., Kobayashi M.: Cradle-to-Gate life cycle assessment of recycling processes for carbon fibers: A case study of ex-ante life cycle assessment for commercially feasible pyrolysis and solvolysis approaches. *Journal of Cleaner Production*, **378**, 134581 (2022).
7. McConell V. P.: Launching the carbon fibre recycling industry. *Reinforced Plastics*, **54**, 33-37 (2010).
8. Pakdel E., Kashi S., Varley R., Wang X.: Recent progress in recycling carbon fibre reinforced composites and dry carbon fibre wastes. *Resources, Conservation and Recycling*, **166**, 105340 (2021).
9. Li X., Bai R., McKechnie J.: Environmental and financial performance of mechanical recycling of carbon fibre reinforced polymers and comparison with conventional disposal routes. *Journal of Cleaner Production*, **127**, 450-460 (2016).
10. Oliveux G., Dandy L. O., Leeke G. A.: Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science*, **72**, 61-99 (2015).
11. Pandey D. S., Katsaros G., Lindfors C., Leahy J. J., Tassou S. A.: Fast Pyrolysis of Poultry Litter in a Bubbling Fluidised Bed Reactor: Energy and Nutrient Recovery. *Sustainability*, **11**, 2533 (2019).
12. Meng F., McKechnie J., Turner T. A., Pickering S. J.: Energy and environmental assessment and reuse of fluidized bed recycled carbon fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **100**, 206-214 (2017).
13. Meng F., Olivetti E. A., Youyang Z, Chang J. C., Pickering S. J., McKechnie J.: Comparing Life Cycle Energy and Global Warming Potential of Carbon Fiber

- Composite Recycling Technologies and Waste Management Options. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **6**, 9854-9865 (2018).
14. Tian Z., Wang Y., Hou X.: Review of chemical recycling and reuse of carbon fiber reinforced epoxy resin composites. *New Carbon Materials*, **37**, 1021-1045 (2022).
 15. Yu H., Potter K. D.: Method and apparatus for aligning discontinuous fibres. 1306762.4, *Egyesült Királyság* (2013).
 16. Longana M. L., Yu H., Jalavand M., Wisnom M. R., Potter K. D.: Aligned discontinuous intermingled reclaimed/virgin carbon fibre composites for high performance and pseudo-ductile behaviour in interlaminated carbon-glass hybrids. *Composites Science and Technology*, **143**, 13-21 (2017).
 17. Yu H., Potter K. D., Wisnom M. R.: A novel manufacturing method for aligned discontinuous fibre composites (High Performance-Discontinuous Fibre method). *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **65**, 175-185 (2014).
 18. Yu H., Longana M. L., Jalavand M., Wisnom M. R., Potter K. D.: Pseudo-ductility in intermingled carbon/glass hybrid composites with highly aligned discontinuous fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **73**, 35-44 (2015).
 19. Yu H., Longana M. L., Jalavand M., Wisnom M. R., Potter K. D.: Hierarchical pseudo-ductile hybrid composites combining continuous and highly aligned discontinuous fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **105**, 40-56 (2018).
 20. Longana M. L., Ondra V., Yu H., Potter K. D., Hamerton I.: Reclaimed Carbon and Flax Fibre Composites: Manufacturing and Mechanical Properties. *Recycling*, **3**, 52 (2018).
 21. Ronkay F., Dobronszky K., Toldy A.: *Műanyagok újrahaznosítása*. Printer Kiadó, Budapest (2014).
 22. Varga Cs.: *Műanyag kompozitok – 2. rész*. Pannon Egyetem (2012).
 23. Bachmann J., Wiedermann M., Wierach P.: Flexural Mechanical Properties of Hybrid Epoxy Composites Reinforced with Nonwoven Made of Flax Composites Reinforced with Nonwoven Made of Flax. *Aerospace*, **5**, 107 (2018).
 24. Wei H., Nagatsuka W., Ohsawa I., Sumimoto K., Takahashi J.: Influence of small amount of glass fibers on mechanical properties of discontinuous recycled carbon fiber-reinforced thermoplastics. *Advanced Composite Materials*, **28**, 321-334 (2019).
 25. Gan K. W., Ho Y. W., Ow Z. Y., Israr H. A., Wong K. J.: Aligned discontinuous carbon fibre tows in hybrid composites and their tensile behaviour: An experimental study. *Journal of Composite Materials*, **53**, 3893-3907 (2019).

26. Tse B., Yu X., Gong H., Soutis C.: Flexural Properties of Wet-Laid Hybrid Nonwoven Recycled Carbon and Flax Fibre Composites in Poly-Lactic Acid Matrix. *Aerospace*, **5**, 120 (2018).
27. Polimerek szakítóvizsgálata. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék (2019).
28. Polimerek hajlítóvizsgálata. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék (2014).
29. Magyar B.: Tervezhető határfelületi adhéziójú polimer kompozitok fejlesztése. Doktori értekezés. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék (2022).
30. Szakács J.: Hibrid kompozitok fejlesztése és tulajdonságaik elemzése. PhD értekezés. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék (2018).
31. Kusaka T., Watanabe K., Hojo M., Fukuoka T., Ishibashi M.: Fracture behavior and toughening mechanism in Zanchor reinforced composites under mode II loading. *Composites Science and Technology*, **69**, 2323–2330 (2009).

7. MELLÉKLET

	1.1 0°	1.1 90°	2.1 0°	2.1 90°	3.1 0°	3.1 90°
Átlagos szakítószilárdság [MPa]	111	156	102	158	72	120
Szórás [MPa]	34,5	47,7	31,6	46,5	21,8	34,5

3. táblázat – Tisztán rCF alapú kompozitok szakítószilárdsági eredményei

	[0/0r/0/0r]	[0/0r/0r/0]	[0/90r/0/90r]	[0/90r/90r/0]
Átlagos szakítószilárdság [MPa]	463	404	486	464
Szórás [MPa]	138,5	117,8	143,9	144,3

4. táblázat – Hibrid kompozitok szakítószilárdsági eredményei

	1.1 0°	1.1 90°	2.1 0°	2.1 90°	3.1 0°	3.1 90°
Átlagos hajlítószilárdság [MPa]	149	174	130	215	112	135
Szórás [MPa]	53,8	64,7	47,4	79,7	41,7	51,5

5. táblázat – Tisztán rCF alapú kompozitok hajlítószilárdsági eredményei

	[0/0r/0/0r]	[0/0r/0r/0]	[0r/0/0r/0]	[0/90r/0/90r]	[0/90r/90r/0]	[90r/0/90/0]
Átlagos hajlítószilárdság [MPa]	583	619	390	486	506	364
Szórás [MPa]	182,9	171,8	116,4	143,9	149,9	117,9

6. táblázat - Hibrid kompozitok hajlítószilárdsági eredményei

	[0/0r/0/0r]	[0/0r/0r/0]	[0r/0/0r/0]	[0/90r/0/90r]	[0/90r/90r/0]	[90r/0/90/0]
Átlagos erő [N]	293	271	230	347	371	356
Szórás [N]	83,3	70,5	59,7	105,9	130,1	128,3

7. táblázat – Hibrid kompozitok ENF vizsgálatának eredményei