

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR
GYÁRTÁSTUDOMÁNY ÉS -TECHNOLÓGIA TANSZÉK

MAGYAR GERGELY
TDK DOLGOZAT

**Bazalt- és szénszállal erősített polimer (BFRP és CFRP) kompozitok
összehasonlító forgácsolhatósági vizsgálata**

Témavezető:

Dr. Geier Norbert
adjunktus

Budapest, 2021

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés.....	1
1.1. Célkitűzések.....	1
1.2. Áttekintés.....	2
2. Szakirodalmi áttekintés	3
2.1. Anyag és mechanikai tulajdonságok	3
2.1.1. Bazaltszál és BFRP.....	4
2.1.2. Szénszál és CFRP.....	8
2.1.3. Szálanyagok és kompozitok összehasonlítása.....	9
2.2. Forgácsolhatóság	10
2.2.1. CFRP anyagok forgácsolhatósága.....	11
2.2.2. BFRP anyagok forgácsolhatósága.....	13
3. Kísérleti körülmények, felhasznált anyagok és módszerek	16
3.1. Felhasznált anyagok	16
3.2. Kísérletterv	17
3.3. Kísérleti környezet és körülmények	19
3.4. Kísérletek megvalósítása	22
3.5. Kiértékelési és jellemzőgenerálási módszerek	24
3.5.1. Forgácsolási erő kiértékelése.....	24
3.5.2. Sorja adatok kiértékelése	27
3.5.3. Felületi érdesség adatok feldolgozása	29
3.5.4. Felület vizsgálata pásztázó elektronmikroszkóppal	29
4. Eredmények ismertetése és értelmezése	32
4.1. Forgácsolási erő.....	32
4.2. Sorja.....	37
4.3. Felületi minőség	40
4.3.1. Felületi érdesség	40
4.3.2. Felületi integritás	44
4.4. Összehasonlítás, optimalizálás és kitekintés	50
5. Összefoglalás.....	52
6. Felhasznált források	54

1. BEVEZETÉS

1.1. Célkitűzések

A műszaki gyakorlatban egyre nagyobb teret hódítanak a különböző szálerősített polimer kompozitok, melyek közül a leggyakrabban alkalmazott, illetve legtöbbet kutatott anyagok a szén-szállal (CFRP), illetve üvegszállal (GFRP) erősített kompozitok. A gyakorlatban leginkább olyan iparágakban történő alkalmazásuk jelentős, ahol kis tömeg mellett kiváló mechanikai tulajdonságokra van szükség. Ezen anyagok alkalmazása a járműiparban, sporteszközyártásban, energiaiparban, vagy akár az űrtechnológiában is megjelenik [1]. Az anyagtudomány leginkább naprakész területein is folyamatosan növekvő igény jelentkezik a fenntartható, illetve természetes alternatívát nyújtó megoldásokra [2]. Ilyen lehetőség rejlik a bazaltban is [3].

A bazalt egy természetben nagy mennyiségben fellelhető vulkanikus eredetű kőzet. Számos kiváló anyagtechnológiai jellemzővel rendelkezik, például nagy kémia stabilitással, jó akusztikus és termikus elnyelő képességgel, illetve a kompozitok szempontjából az egy további fontos tulajdonsága, hogy jól lehet belőle szálakat képezni [4]. Ezen szálak felhasználásával készített polimer kompozitok az élet számos területein megjelennek a sporteszközöktől kezdve, a járműveken át egészen az energiaiparban fellelhető szélerőművek lapátjaiig [5].

A polimerkompozit munkadarabok általában nem önálló kész eszközök, hanem általában valamilyen szerkezet egyes elemeiként látják el funkciójukat. A gyártásukat követően további, jellemzően forgácsolással járó megmunkálásokat igényelnek, hogy megkapják összes végleges –a tervezésük során meghatározott– geometriai jellemzőjüket. Ezek a megmunkálások jellemzően szereléshez szükséges furatok készítése, csatlakozó felületek alak és helyzetűréseknek megfelelő kialakítása vagy akár a gyártás során jelentkező többlet mátrixanyag eltávolítása [6]. Ezen anyagok jó fajlagos mechanikai tulajdonságaiból és összetett szerkezetükből adódóan forgácsolásuk megvalósítása is komplikáltabb a hagyományosan forgácsolt acél vagy alumínium ötvözetekéhez képest [7]. Éppen ezért egyes polimerkompozitok (például a CFRP vagy a GFRP) forgácsolhatósága napjainkban is egy aktívan kutatott tudományterület [8][9]. Számos anyagtechnológiai kutatást végeztek már annak az érdekében, hogy megmutassák, hogy a bazaltszállal erősített polimer kompozitok akár vetélytársai is lehetnek a leggyakrabban alkalmazott polimer kompozitoknak, azonban a forgácsolhatóságával kapcsolatos szakirodalom igen csak korlátozott mennyiségben lelhető fel [10].

Ezen fent említett okok alapján választottam kutatásom témájául a bazaltszállal erősített polimer kompozitok (BFRP) forgácsolhatóságának vizsgálatát. A forgácsolhatóság egy egzakt mérőszámokkal nem rendelkező fogalom. Egy anyag forgácsolhatóságának meghatározásához több megközelítést is alkalmazhatunk (szerszámkopás vizsgálata, forgácskeletkezés stb.), de hogy gyakorlatban is releváns képet kapjunk, érdemes egy már ismert anyag forgácsolhatósági tulajdonságaival történő összehasonlítás [11]. A vizsgálatok során éppen ezért a BFRP mellé referenciaként a CFRP kompozit anyagot választottam.

1.2. Áttekintés

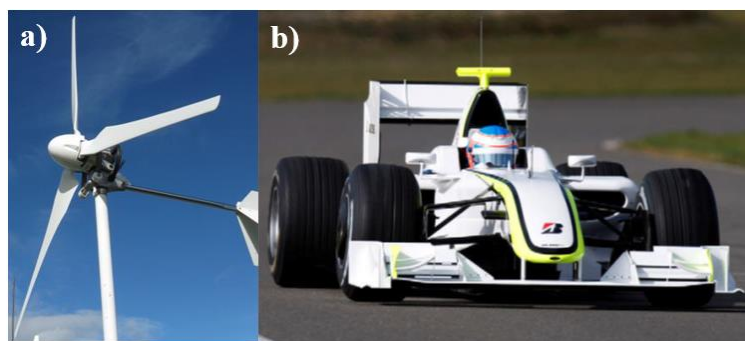
Az első fejezetben a téma rövid bevezetését, témaválasztásom motivációját ismeretem. Ezután a második fejezetben a BFRP és CFRP kompozitok, illetve ezen anyagok erősítő szálainak a tulajdonságaival foglalkozom a témában fellelhető szakirodalom összefoglalásával. A szakirodalomban való mélyebb szintű tájékozódás segített abban, hogy a további fejezetekben ismertett kísérlettervezési és kiértékelési módszereket a témához illesztve végezzem el. Továbbá tudatosította bennem, hogy a választott témám egy csekély mértékben kutatott, azonban nagy potenciállal rendelkező témakör fontos eleme. A harmadik fejezetben ismertetem a kísérletek során felhasznált anyagokat, a kísérlettervezéshez használt módszereket, a kísérleti körülményeket, illetve az eredmények megalkotásához szükséges jellemzőgenerálási módszereket. A negyedik fejezetben a kísérletek eredményeit ismertetem, illetve megmagyarázom az adott jelenségeket. Végül a dolgozat az elvégzett munka rövid összefoglalásával zárul.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A következő fejezetben ismertetem a vizsgált kompozitok anyagtechnológiai sajátosságait. Mivel kutatásom egyik oka, hogy a BFRP kompozitok forgácsolhatósága egy eddig csak korlátozott mértékben kutatott téma, ezért az irodalomkutatás során a CFRP kompozitok forgácsolhatóságát, illetve a BFRP kompozitok általános anyagtechnológiai jellemzőit dolgozom fel mélyrehatóbban.

2.1. Anyag és mechanikai tulajdonságok

A kutatásom során polimer mátrixú szálerősített kompozitokkal foglalkoztam. Az anyagtudomány polimerkompozit anyagokkal foglalkozó ága még manapság is egy dinamikusan fejlődő terület, azonban ezen anyagok felhasználása nem újkeletű. Az amerikai hadsereg már az 1940-es években már alkalmazott polimer mátrixú kompozitokat. Az első ilyen felhasznált anyag üvegszálerősítésű poliészter mátrixú kompozit volt, amelyből katonai radarok és repülőgépek üzemanyagtartályok elemei készültek. Ez az alkalmazás tört utat az GFRP kompozitoknak, melyet hamarosan további erősítő, illetve mátrixanyagok is követtek [1]. Manapság az élet szinte minden területén megjelennek ezen anyagok a közlekedés, sporteszközök, energiaipar, űrtechnológia és a lista még hosszan sorolható lenne. Jellegzetes kompozitból készült termékek figyelhetők meg a következő képen (2-1. ábra). Napjainkban a leggyakrabban alkalmazottak a szén-, illetve üvegszállal erősített kompozitok, de számos egyéb szálerősítésű anyag alkalmazására van lehetőségünk. A növekvő igények kielégítése mellett egyre nagyobb hangsúly van a fenntartható fejlődésen, így idővel megjelentek a megújuló, környezetbarát anyagok felhasználásával készült polimerkompozitok. Egy ilyen környezetbarát anyag a bazalt is, a továbbiakban ezen anyagból készült szálak, illetve a szálak felhasználásával készült kompozitok témakörét igyekszem bemutatni.



2-1. ábra. Jellegzetes kompozit szerkezetek: **a)** szélturbina lapátjai [12], **b)** Formula 1-es versenyautó karosszériájának elemei [13]

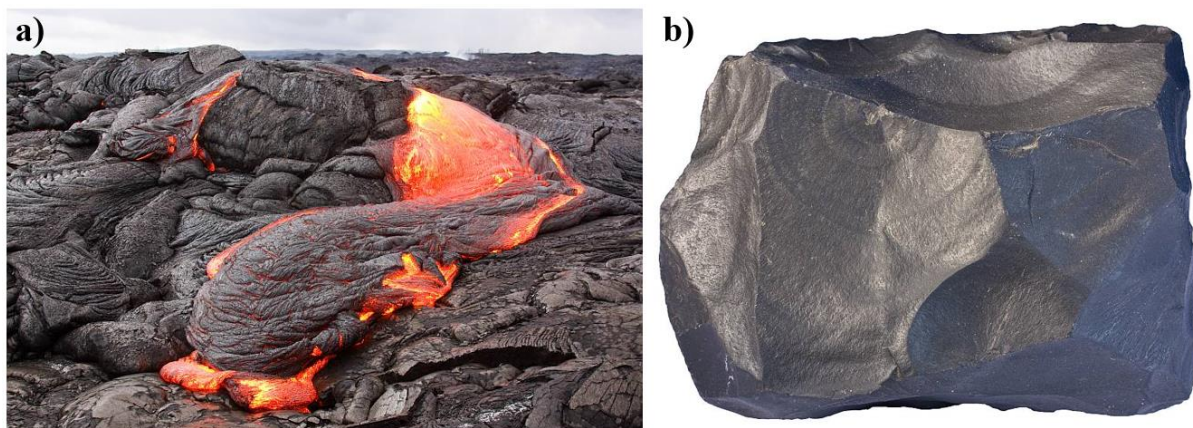
2.1.1. BAZALTSZÁL ÉS BFRP

A 21. századi technológia fejlődés egyik meghatározó iránya a fenntarthatóság. Nincs ez más-ként a szálerősített polimerkompozit anyagok felhasználásának területén sem. ezen a területen a fenntarthatóság igényeit kielégítő megoldásul szolgálnak a természetes eredetű szálanyagok. Ilyen anyagok lehetnek cellulóz alapú, különböző növényi származékokból, például bambusz-ból, kókuszdió- vagy dióhéjából kialakított szálanyagok, de alkalmazzák a kutatásom témájául is szolgáló bazaltszálakat is [14][15]. Ilyen szálanyagok figyelhetők meg a következő képen (2-2. ábra). A bazalt ásványból készült szálak már készítése nem új keletű dolog, hiszen egy 1924-ben kiadott szabványból kiderül, hogy a francia Paul Dhé előállt a bazalt szálhúzásának ötletével és gyártástechnológiájának kidolgozásával [16].



2-2. ábra. Természetes eredetű szálak: **a)** bambuszszálak [17], **b)** bazaltszálak [18]

A bazaltszál „zöld”, vagyis környezetbarát iparban alkalmazott anyagként is ismeretes. A bazalt a természetben fellelhető vulkanikus eredetű –vagyis fagyott lávából származó– ásványi kőzet, mely olvadáspontja 1500-1700°C-os hőmérsékelt között változik, összetételétől függően [15]. Természetes alakjában a következő ábrán figyelhető meg (2-3. ábra). A bazalt teljes mértékben természetes és inert anyag, vagyis nem lépnek mérgező reakcióba a levegővel vagy vízzel, továbbá nem gyúlékony és robbanásveszélyes. Más vegyi anyagokkal érintkezve nem vált ki olyan kémiai reakciókat, amelyek károsíthatják az egészséget vagy a környezetet, nem rákkeltő és nem mérgező [16]. A bazaltszál a fenntartható anyagok közé sorolható, mivel természetes eredetű anyagból készülnek és előállításuk során nem használnak kémiai adalékanyagokat, valamint oldószereket vagy más veszélyes anyagokat [19]. Mindezen tulajdonságait összegezve elmondható, hogy a bazalt egy 21. századi kihívásoknak megfelelő, fenntartható és biztonságos anyag.

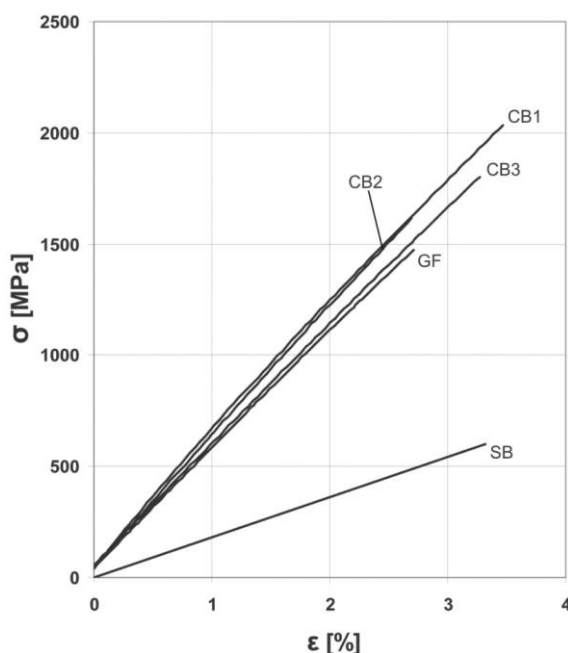


2-3. ábra. Bazalt a természetben: **a)** bazalt lávafolyam, **b)** tipikus bazalt kőzet [20]

A bazaltszál nyersanyaga világszerte rendelkezésre áll és viszonylag alacsony energiafelhasználással, az üveg- és különösen a szénszálaknál alacsonyabb árszinten állítható elő [21]. A rövid hosszúságú szálak előállítása úgy nevezett „melt spinning” vagy más szóval Junkers-eljárással történhet. Ezen eljárás során az olvadt ásványt sugárirányban nagy sebességű szálképző korongokra futtatják, és a fejlődő szálakat nagy sebességű axiális légsugár segítségével fűjják le a korongokról [22]. Ezen felül másfajta fűvások technológiával is készülhetnek, de ezek hátránya, hogy a kapott szálak nem rendelkeznek túl jó mechanikai tulajdonságokkal, jellemző szálátmérőjük 8-10 μm . A folyamatos bazaltszálakat az üvegszálakhoz hasonlóan szálhúzásos módszerrel állítják elő. A bazaltot egy ródium-platina edényben megolvasztják, majd az ugyanabból az anyagból készült szálképzőhöz irányítják. Itt a gravitáció segítségével átvezetik az 1300-1400°C-os szálképzőn az anyagot, majd feltekercselik. Akár percenként 2000-5000 m szálát is lehetséges így legyártani jellemzően 10-12 μm -es átmérőjű szálakat [3][23]. Ez az eljárás nagyon hasonlít az üvegszálak előállításához, de a bazalt esetében nincs szükség adalékanyagokra. Ez csökkenti a mérgező anyagoknak való kitettség kockázatát [24].

Fizikai tulajdonságaik vizsgálata során a bazaltszálakat leggyakrabban az üvegszálakkal szokták összevetni. A bazaltszál az üveghez képest kisebb sűrűségű, előbbi átlagosan 2,65-3,05 g/cm^3 , míg utóbbi jellemzően 2,55-2,62 g/cm^3 -es értékek között változik. Szakítószilárdságuk azonosan 1500-3800 MPa-os érték között változik, míg rugalmassági modulusa a bazaltszálnak magasabb. Az üvegre jellemző 76-78 GPa-os értékkel ellentétben a bazaltszálakra a 80-95 GPa-os rugalmassági modulus értékek jellemzőek. Továbbá a bazaltszálak szélesebb hőmérsékleti tartományban is alkalmazhatók. Az üvegszálak általában -60–360°C, míg a bazaltszálak jóval tágabb -260–880°C-os hőmérsékleti tartományban is alkalmazhatók mechanikai tulajdonságaik jelentős romlása nélkül. Ezen értékek hosszú száltípus esetén értelmezendők. Elmondható

tehát, hogy a bazaltszálak az üvegszálakhoz hasonló, sőt általában kedvezőbb fizikai tulajdonságokkal rendelkeznek, nagy előnyeik, a környezetbarát és rendkívül olcsó gyártástechnológia mellett [18][22]. Deák és Czigány [23] különböző kémia összetételű és hosszúságú bazaltszálak mechanikai tulajdonságait vetették össze üvegszál tulajdonságaival. Vizsgálataik során a rövid hosszúságú bazaltszálakat leszámítva, a bazaltszál szakítószilárdsága magasabb volt, mint az üvegszálé. A következő diagramon (2-4. ábra) az SB magyar gyártmányú, rövid hosszúságú bazaltszálhoz, a CB1 orosz, a CB2 izraeli, a CB3 ukrán gyártmányú nagy szálhosszúságú bazaltszálhoz, míg a GF szlovák gyártmányú nagy szálhosszúságú üvegszálhoz tartozó szakítódigramot szemlélteti. A diagram tengelyein az ε megnyúlás és a σ a húzófeszültség értékek szerepelnek.

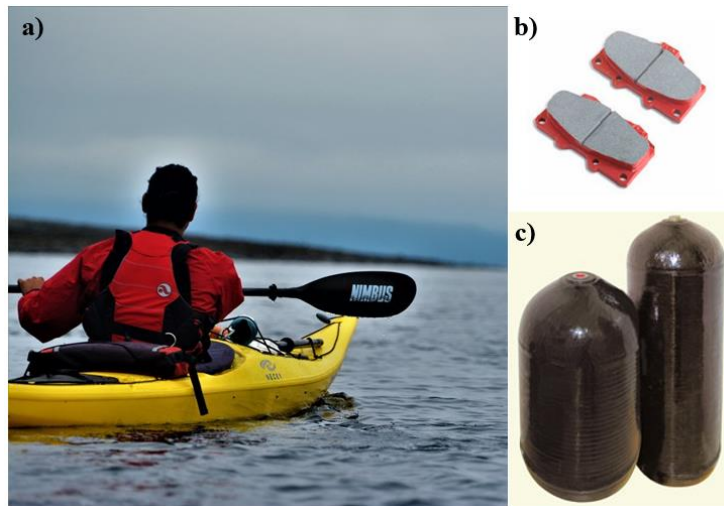


2-4. ábra. Különböző bazaltszálakhoz és egy üvegszálhoz tartozó szakítódigram [23]

A szálak tulajdonságaiban való elmélyedés után konkrét kompozit anyagok tulajdonságainak a megismerése a következő lépés ahhoz, hogy pontos képet kaphassunk a BFRP kompozitok alkalmazhatóságáról. Lopresto és munkatársai [25] a BFRP kompozit vizsgálata során üvegszállal erősített polimer (GFRP) kompozitot használtak referencia anyagnak. Paplan struktúrájú bazalt-, illetve üvegszállal erősített polimer kompozitot alkalmaztak epoxi mátrixanyaggal. Az eredmények összehasonlítása során megállapították, hogy azon területeken, ahol a GFRP kompozitok alkalmazása jelenleg is elterjedt, ott pusztán a mechanikai tulajdonságokat figyelembe véve lehetőség van a GFRP kompozitok BFRP kompozitokra való cserélésnek. A BFRP esetén 35-42%-kal magasabb rugalmassági modulust, valamint jobb nyomó- és hajlítószilárdságot,

míg a GFRP esetében magasabb szakítószilárdságot állapítottak meg. Carmisciano és munkatársai [26] is hasonló megállapításra jutottak szintén paplanstruktúrájú, bazalt-, illetve üvegszál erősítésű vinil-észter mátrixú kompozitok rugalmassági és elektromos tulajdonságainak vizsgálata során. Vizsgálataik végén szintén arra a megállapításra jutottak, hogy a BFRP kompozitok alkalmazása felválthatja a GFRP anyagok alkalmazását, viszont az optimális bazaltszálakhoz tartozó közetkeverék meghatározása további kutatásokat igényelhet. Czigány [27] a bazaltszálerősítést vizsgálta hibridkompozitok esetén. Vizsgálataiban szén-, üveg-, illetve kenderszál erősítőanyagokat kombinált bazaltszálakkal polipropilén mátrixanyaggal. Megállapította, hogy míg a kenderszállal erősített hibridkompozit esetén csak csekély mértékű, addig a szénszál és üvegszál erősítésű kompozitok esetén jelentős mértékű javulás tapasztalható bazaltszállal történő kombinálás esetén. Ezzel igazolta, hogy a szén-, és üvegszálhoz képest jelentősen olcsóbb bazaltszálak alkalmazhatók hibridkompozitokban a mechanikai tulajdonságok növelése és a költségek csökkentése érdekében.

Az eddig ismertetett tulajdonságok miatt a bazaltszál, illetve a BFRP kompozitok alkalmazása a mindennapok számos területén előfordulhat (2-5. ábra). A bazaltszálakat már manapság is gyakran alkalmazzák elsősorban hőálló öltözékek, illetve építőipari felhasználásokra [18]. Az építőipari felhasználás során a beton mellett adalékanyagként bazaltszálakat alkalmaznak, így javítva a szerkezet mechanikai tulajdonságait [28]. A BFRP kompozitok gyakorlati alkalmazása ugyan elvétve előfordul, de tömeges alkalmazása egyelőre várat magára. A jövőben reális esély van arra, hogy a jó mechanikai tulajdonságai és környezetbarát előállításai miatt felváltsa a jelenleg leggyakrabban alkalmazott polimer kompozitokat (CFRP, GFRP) azon iparágakban, ahol ezek már elterjedtek, többek között a sportszergyártás, energiaipar, járműipar vagy akár az űripar [21][22].



2-5. ábra. Bazaltszál erősítésű kompozitok a mindennapokban: **a)** kajak evezőlapát [29], **b)** fékbetétek [30], **c)** nyomástartó edények [30]

2.1.2. SZÉNSZÁL ÉS CFRP

Korábbi fejezetekben említettem, hogy a gyakorlatban leginkább alkalmazott erősítőanyag polimer kompozitok esetén a szénuszál. Ezen belül is az egyik leggyakrabban alkalmazottak a poliakrilonitril (PAN) alapú szálak. A szálak fizikai tulajdonságai gyártástechnológiájuktól függően bizonyos keretek között változhat. A szálak átmérője 5-10 μm között, sűrűségük 1,75-2 g/cm^3 -es tartományban változhat. Kis méretükhöz és sűrűségükhöz kiváló mechanikai tulajdonságok társulnak. Szakító szilárdságuk 3-7 GPa, míg rugalmassági modulusuk 200-500 GPa-os értékek között változhat [31][32].

A szénuszálak gyártása öt lépésben történik, PAN szintetizálása, szálhúzás, stabilizálás, karbonizálás (vagy grafitizáció) és felületkezelés. Egyes szálak gyártása során az öt lépés több elemében is eltérhet, ezért is változhatnak viszonylag nagy mértékben az egyes szálak tulajdonságai [33]. A bazaltszálnál ismertetett képest egy jelentősen összetettebb és költségigényesebb eljárásról van szó, de cserébe változatos anyagi jellemzőket tudunk előállítani.

A CFRP kompozitokat számos területen alkalmazzák, ahol alacsony fajlagos tömeg mellett kell relatív jó mechanikai tulajdonságokat elérni. Ezért is a leggyakoribb alkalmazásai a közlekedésben figyelhetők meg, repülőgépek, hajók, személygépjárművek egyes szerkezeti elemeinek formájában. De ezen felül az energiaiparon keresztül az űrtechnológián át az egészségügyi protézisekig a tudomány és a mindennapi élet számos területén megfigyelhető a CFRP anyagok jelenléte. Két példát szemléltet a következő ábra (2-6. ábra).



2-6. ábra. CFRP anyagok előfordulása: **a)** CFRP hajótest [34], **b)** CFRP kézprotézis[34]

2.1.3. SZÁLANYAGOK ÉS KOMPOZITOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Polimerkompozitok számos mátrix-, illetve erősítőanyaggal előfordulhatnak. Az eddig leírtak alapján a gyakorlatban az üveg- és szénzál erősítőanyagúak fordulnak elő gyakrabban. A korábbi két alfejezetben ismertetett tulajdonságok összefoglalására szolgál a 2-1. táblázat, amelyben az üvegszál (GF), a bazaltszál (BF), a szénzál (CF), kenderszálhoz (HF) és a kevlárszálhoz (KF) tartozó irodalmi értékek olvashatók.

2-1. táblázat. Szálanyagok tulajdonságai [18][36][37]

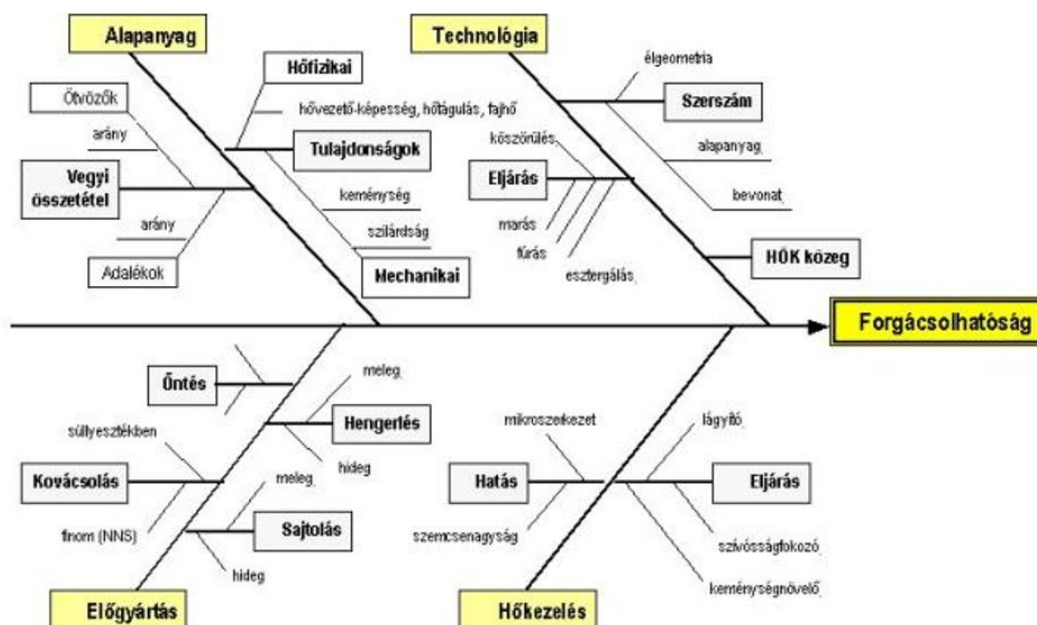
Tulajdonság	GF	BF	CF	HF	KF
Sűrűség (g/cm ³)	2,55–2,62	2,65–3,05	1,78	1,4–1,6	1,44
Szakítószilárdság (MPa)	3100–3800	3000–3500	2500–3500	200–1040	1758–3034
Rugalmassági modulus (GPa)	76–78	79,3–93,1	230–240	30–60	124131
Szakadási nyúlás (%)	4,7	3,2	1,2	1-3,5	2,3
Alkalmazás hőmérséklete (°C)	-60 – 350	-260 – 880	<2000	-	<250

A táblázatban olvasható adatok szintén fenntartásokkal kezelendők, hiszen korábban a bazalt- és a szénzálak gyártástechnológiájáról is írtam, melyből kiderül, hogy a különböző gyártási mechanizmus, felületkezelés vagy egyéb eljárásokban való eltérés jelentős hatással lehetnek a szálanyag mechanikai tulajdonságaira [33]. Jelen értékek minden anyagtípus esetén különböző kutatásokból származó egy-egy reprezentatív értéket szemléltetnek. Gyakorlati felhasználás esetén célszerű a szál gyártója által megadott katalógusok adatai alapján tájékozódni az adott anyag paramétereit illetően. Elmondható, hogy a bazaltszál a gyakorlatban gyakran alkalmazott szén és üvegszálakhoz hasonló értékeket mutatnak, míg egy viszonylag gyakran

alkalmazott kenderszálhoz képest jóval előnyösebb tulajdonságokkal rendelkeznek. Ismételt megmutatkozik releváns felhasználhatóságának lehetősége kiváló mechanikai tulajdonságainak, környezetbarát és költséghatékony gyártástechnológiájának köszönhetően [3].

2.2. Forgácsolhatóság

A forgácsolhatóság egy komplex, az anyag minőségével összefüggő jellemző. Ez a jellemző az anyag forgácsolás közbeni viselkedéséről, illetve a megmunkálás során létrehozott felület minőségéről szolgáltat információt [38]. Egy anyag forgácsolhatóságának jellemzésekor fontos tisztában lenni a vizsgált anyag vegyi összetételével, valamint szövetszerkezetének és hőkezeltiségének tulajdonságaival. Általánosságban elmondható, hogy egy anyag forgácsolhatósága kedvező, ha a megmunkálás közben fellépő forgácsolási erő kicsi, a forgácsalak képződése kedvező (például elkerülhető a folyóforgács), az előállított felületi minőség megfelel az előírásoknak, illetve a szerszám éltartama is kedvezően alakul [39]. A következő halszáldiagram (2-7. ábra) egy egyszerűsített összefoglalását mutatja, hogy milyen tulajdonságokból áll össze a forgácsolhatóság. A kompozit anyagok forgácsolhatósága nehezebben vizsgálható az hagyományos anyagokhoz képest, a kompozitanyagok anizotróp és inhomogén tulajdonságaiból, illetve az erősítőszálak nagymértékű szerszámkoptató hatásából adódóan. A kompozitanyagok nagymértékű elterjedése azonban szükségesnek mutatja ezen anyagok forgácsolhatóságának részletesebb vizsgálatát [40].



2-7. ábra. Forgácsolhatóságot meghatározó főbb tényezők [41]

2.2.1. CFRP ANYAGOK FORGÁCSOLHATÓSÁGA

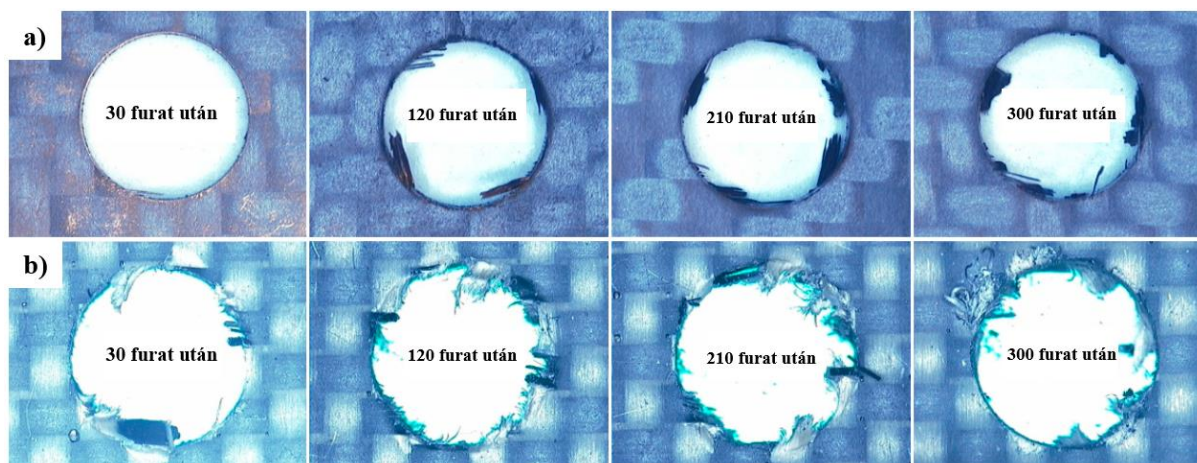
A CFRP anyagok forgácsolásának leggyakoribb módja a fúrás az élmarás és a vízvágás. A fúrás és marás során a folyamatot leginkább meghatározó tényezők a szerszám alakja és élessége (homlokszög és élsugár), valamint a forgácsolási paraméterek, úgymint előtolás, forgácsolási sebesség és marás esetén fogásmélység és fogásszélesség [42]. Mivel kutatásom során fúrási kísérleteket végeztem, így a fejezet további részében a CFRP anyagok fúrásának sajátosságaival, a fúrás során kialakuló anyaghibákkal, illetve a forgácsolhatóság minősítésének paramétereivel foglalkozom.

A fúrás az alkatrészek szereléséhez szükséges geometriai elemek kialakításra alkalmazott egyik leggyakoribb eljárás. Nincs ez másként a CFRP anyagok esetén sem, így ezen eljárások során keletkező hatások vizsgálata egy napjainkban is széles körben kutatott téma [43]. A CFRP anyagok forgácsolhatóságát –a fúrás technológiáját alkalmazva– számos paraméterrel jellemezzük úgymint, a forgácsolási erő és nyomaték, a szerszámkopás, a felületi érdesség, a szerszámanyag és a szerszámgeometria hatása, valamint a fúrásindukált geometriai hibák (például sorja, delamináció, furat körköröségi hibája, stb.) [44]. Ezen szempontokat figyelembevéve a kutatásom során végzett kísérletek alatt vizsgáltam a fúrás során jelentkező forgácsolási erőt és nyomatékot, illetve a keletkező sorját és a furatok felületi minőségét.

Fúrási kísérletek esetén a forgácsolási erő vizsgálata elengedhetetlen, hogy pontos képet alkothassunk a várható szerszámkopásról, delamináció mértékéről és a felületi minőségről [45]. A forgácsolási erő növekedésével a szerszám nagyobb igénybevételnek van kitéve, így kopása is felgyorsul, illetve a kopottabb szerszám nagyobb forgácsolási erőt eredményez. Továbbá a nagyobb forgácsolási erő hozzájárul a furat geometriai hibáinak és delaminációjának kialakulásához [46]. Mindezeket figyelembevéve a forgácsoló erő, a szerszámkopás és az egyes hibák kialakulása szervesen összefügg, így a kísérletek során ezen tulajdonságok együttes vizsgálata szükséges.

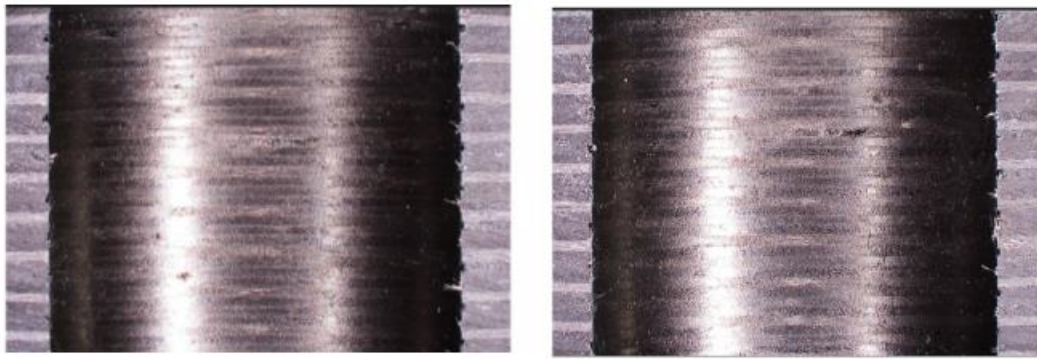
A CFRP anyag fúrása során keletkező sorja az anyag szilárdságát ugyan nem gyengíti, viszont több potenciális veszélyforrás lehetőségét hordozza magában jelenléte [47]. A sorja és a mikrorepedések további nagyobb méretű repedések vagy delamináció kialakulását eredményezhetik. A nagy méretű sorja megnehezítheti, vagy meg is gátolhatja az alkatrész szerelési folyamatát, illetve az ebből következő kiegészítő sorja eltávolító megmunkálások további költségek megjelenését eredményezik [48]. Általánosan elmondható, hogy a sorja mennyisége, karakterisztikája és előfordulásának helye a megfelelő forgácsolási paraméterek megválasztásával

kontrollálható [49]. Lee és munkatársai [50] CFRP, illetve szén-aramid erősítésű (C-AFRP) hibridkompozitok forgácsolása során vizsgálták a sorja kialakulását, illetve a szerszámkopást. Megállapították, hogy míg a C-AFRP kompozit mechanikai tulajdonságai kedvezőbbek a hagyományos CFRP-hez képest, addig a sorja kialakulása sokkal jelentősebb a hibridkompozit esetén. Továbbá a kutatásukban dokumentált furatokon megfigyelhető (2-8. ábra), hogy a szerszám kopásával a furatokon képződő sorja mennyisége is folyamatosan nőtt. Ennek oka, hogy a kevésbé éles szerszám már nem tud olyan hatékonyan forgácsolni, így nagyobb valószínűséggel maradnak vágatlan szálak, amik sorját képeznének a furat körül.



2-8. ábra. Szerszámkopás hatása a sorja kialakulására: **a)** sorja kialakulása CFRP anyag esetén, **b)** sorja kialakulása C-AFRP anyag esetén [50]

A felületi minőség leírására szolgáló egydimenziós paraméterek (például R_a átlagos felületi érdesség, R_z egyenetlenség-magasság) a mérnöki gyakorlatban gyakran előírt mérőszámok, így ezen jellemzők vizsgálata is rendkívül fontos [51]. A CFRP kompozitok esetén legnagyobb hatása a felületi minőségre a szálvágási szögnek (θ) van. A felületi minőség szempontjából a kritikus tartomány a 135° -os szálvágási szöghöz tartozó rész, illetve annak $\pm 18^\circ$ -os körzete [52]. Az itt kialakuló felületi minőség sokkal rosszabb, mint az egyéb szálvágási szögektől tartozó részeken. A CFRP anyagok fűrése során jellemző felületet szemléltetik a következő képek (2-1. ábra).



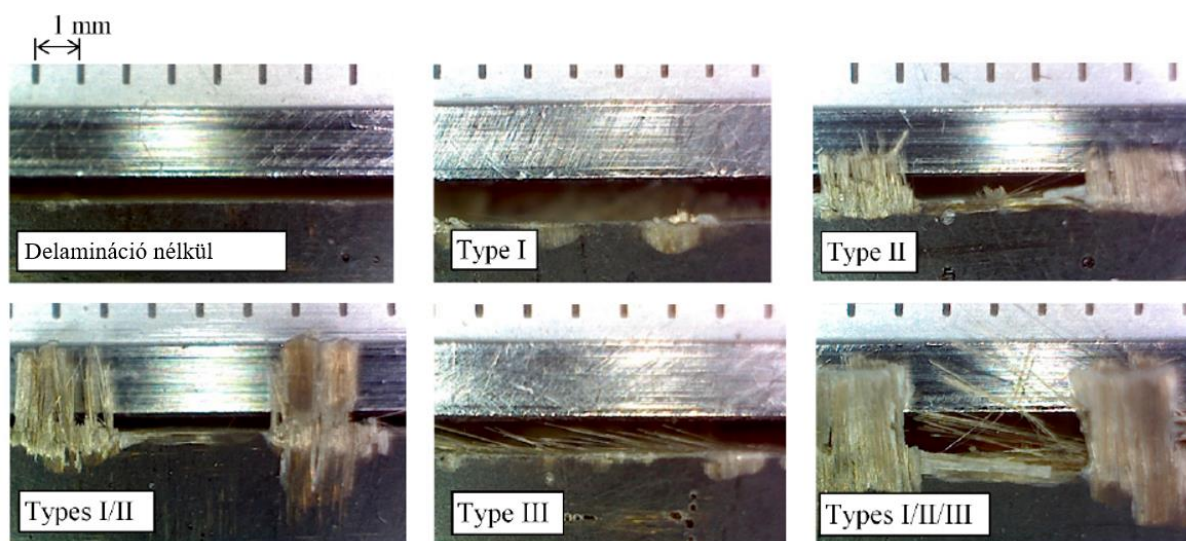
2-9. ábra. CFRP furatok jellemző felülete [53]

2.2.2. BFRP ANYAGOK FORGÁCSOLHATÓSÁGA

A bazaltszárlól, mint polimerkompozitok erősítőanyagáról, illetve BFRP kompozitokról számos anyagtudományi kutatás lelhető fel. Ezen kutatások foglalkoznak az anyag mechanikai tulajdonságaitól kezdve, a hőállóságán és a vezetőképességén keresztül számos tulajdonságukra, azonban ezen anyagok forgácsolhatóságáról csak nagyon korlátozott mennyiségben található szakirodalom. Mivel az anyagtudományi vizsgálatok már bizonyították, hogy egy költségkímélő, illetve környezetbarát alternatívája lehet a CFRP vagy GFRP kompozitoknak, így a felhasználhatóság szempontjából releváns forgácsolhatósági vizsgálatok elvégzése is indokolt.

Ebben a témában az első ilyen, komolyabb tudományos műszaki folyóiratkiadónál fellelhető kutatás 2017-ből származik, amelyben Navarro-Mas és munkatársai [54] a BFRP kompozitok élmarása során jelentkező szerszámkopást vizsgálták. Vizsgálataik során paplan erősítő struktúrájú, epoxi mátrixanyagú BFRP kompozitot alkalmaztak. A megmunkálás használt szerszám egy váltólapkás kétélű marószerszám volt. Kutatásuk során megállapították, hogy az általuk alkalmazott szerszám, illetve forgácsolási körülmények alkalmasak lehetnek BFRP kompozitok nagyüzemi marásának kivitelezésére. Továbbá varianciaanalízis segítségével meghatározták, hogy a szerszámkopás szempontjából leginkább releváns folyamatparaméter a forgácsolási sebesség. Ezen kutatás kiegészítéseként 2018-ban szintén Navarro-Mas és munkatársai [55] publikáltak eredményeket az élmarás során fellépő delamináció vizsgálatáról, az korábban ismert kísérleti körülményekkel teljesen azonos körülményekkel. Az élmarások elvégzése után a Colligan és Ramulu által [56] meghatározott módon a keletkező delaminációkat három csoportba sorolták. Egyes típusú delamináció (Type I), amikor a szálak a mátrix felülettől befelé

törnek el, kettes típusú delamináció (Type II), amikor a vágatlan szálak a felületből kifelé állnak, illetve hármastípusú delamináció, amikor a vágatlan szálak a felülettel párhuzamosan helyezkednek el. Ezen különböző típusú delaminációkat szemlélteti a következő képsorozat (2-10. ábra). Kutatásaik eredményeként megállapították, hogy az általuk alkalmazott kísérlet paraméterekkel 240 m vágási hosszig a keletkező delamináció mértéke nem jelentős, illetve mértéke leginkább a forgácsolási sebességtől és a szerszámkopástól függ. A három korábban említett típus közül a leggyakoribb a kettes típusú, vagyis a kifelé álló szálakkal jellemezhető delamináció voltak.



2-10. ábra. BFRP élmarása során jelentkező delamináció típusok [55]

A témában fellelhető legfrissebb publikáció ugyancsak Navarro-Mas és munkatársainak [57] a nevéhez fűződik. Szintén a korábban említett kutatás folytatásáról van szó, ebben a publikációban a delaminációt leíró paraméterek meghatározásával foglalkoznak BFRP kompozitok esetén. A kísérleti körülmények és eszközök jelen esetben is ugyanazok voltak. Kutatásuk eredményeként meghatározták, hogy három delamináció típus közül a kettes a leginkább releváns a felhasználás szempontjából, illetve az kisebb fogankénti előtolás esetén ezen delamináció mértéke kisebb, mivel a szerszám több alkalommal végez körül fordulást úgy, hogy fogásban van.

A három ismertett kutatáson felül a BFRP kompozitok forgácsolhatóságának témakörében, a komolyabb folyóiratkiadóknál (például Elsevier, Springer, Taylor&Francis) nincs fellelhető publikáció, illetve ezen három cikk sem tesz említést további kutatásokról. Ezen kutatások rendkívül hasznosak és nagy jelentőségük van a BFRP kompozitok forgácsolhatóságának szempontjából, hiszen ezekben foglalkoztak először kutatók a témakörben. Azonban korábban

kitértem rá, hogy a forgácsolhatóság vizsgálata során fontos az összehasonlítás, mivel a forgácsolhatóság nem egy egzakt mérőszámokkal leírható fogalom, hanem több tulajdonság együttese adja. Éppen ezért célszerű a BFRP anyagok forgácsolhatóságát valamilyen referencia anyaggal összehasonlítani, például a gyakorlatban egyik leggyakrabban alkalmazott, illetve egyik legtöbbet kutatott CFRP anyaggal. Tovább ezen három publikációban csak élmárási kísérleteket végeztek a kutatók, de a polimerkompozit anyagok bemutatása során írtam róla, hogy ezen alkatrészek általában valami szerkezet elemei a gyakorlatban, így furatok készítése is indokolt a gyártásukat követően. Ezen okoknál fogva a BFRP anyagok fúrási vizsgálata indokolt, hogy a BFRP anyagok elterjedését támogassam.

3. KÍSÉRLETI KÖRÜLMÉNYEK, FELHASZNÁLT ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

Ebben a fejezetben a kutatásom során végzett kísérletekhez használt kísérletterveket, illetve azok készítését, a kísérletekhez kialakított környezetet, a kísérletek megvalósítása során jelentkező eseményeket, illetve a kísérletek során gyűjtött adatok kiértékelési módszereit ismertetem.

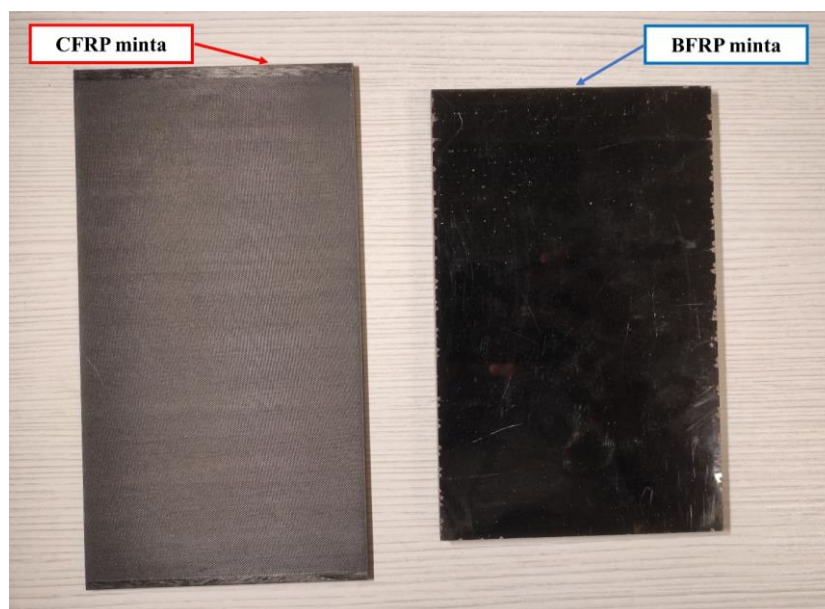
3.1. *Felhasznált anyagok*

A kísérletek során két különböző kompozit munkadarabot alkalmaztam, melyek erősítőszálaik anyagában, a szálak elhelyezésének struktúrájában és a mátrixanyagukban is eltértek egymástól. Az egyik anyag egy bazaltszövet erősítésű epoxi gyanta mátrixú kompozit anyag volt. A vizsgált munkadarabot a BME-Polimertechnika tanszékén készítettem kézi laminálás gyártástechnológiával. A gyártás során először a bazaltszövetet a kívánt méretre daraboltam, majd a rétegenként felhordtam az epoxi gyantát, egy henger segítségével egyenletesen eloszlattam a mátrixanyagot a munkadarab teljes felületén. Miután az összes réteget egymásra építettem és felhordtam a mátrixanyagot, az epoxi gyanta mátrixanyagnak egy napot hagytam, hogy létrejöjjön a térhálósodás. Ezután a munkadarabot 3 órán keresztül 60°C-on hőkezelttem, hogy végbe menjen az utótérhálósodás. Végül a munkadarab szélén található nem felhasználható, vékony anyagréteget eltávolítottam körfűrész segítségével, illetve a darab végső méreteit kialakítottam, oly módon, hogy a kísérletek során használt fúrókészülékbe behelyezhető legyen. A kísérletek során használt másik munkadarab egy egyirányban szénszállal erősített vinil-észter mátrixanyagú kompozit volt. Ez egy kereskedelmi forgalomban kapható polimerkompozit anyag, így gyártása is automatizált tömeggyártási körülmények között történik. A kísérletekhez való felhasználás előtt a munkadarab befoglaló méretre darabolását kellett elvégeznem szintén oly módon, hogy a munkadarab a fúrókészülékbe illeszthető legyen. A két vizsgált anyag tulajdonságairól nyújt egy összefoglaló képet a 3-1. táblázat.

3-1. táblázat. Alkalmazott anyagok tulajdonságai

Tulajdonságok	BFRP	CFRP
Erősítőanyag	bazaltszál	szénszál
Mátrixanyag	epoxi gyanta	vinil-észter gyanta
Erősítő struktúra	szövet/paplan	egyirányba álló szálak
Gyártástechnológia	kézi gyártás	gépi gyártás

Elmondható, hogy a választott anyagok alapján nemcsak az erősítőszálakból adódó különbségek vagy hasonlóságok összehasonlítására lesz lehetőségem, hanem további tulajdonságok vizsgálatára is van lehetőségem. A két munkadarab a következő ábrán (3-1. ábra) figyelhető meg.



3-1. ábra. Felhasznált alapanyagok

3.2. Kísérletterv

A kísérletterv létrehozása során a célom az volt, hogy a korlátozott erőforrások (idő, alapanyag) ellenére a lehető legpontosabb képet alkothassam a két különböző kompozit forgácsolhatóságának egymáshoz való viszonyáról. Ezen okok miatt Central Composite kísérletterv Face-Centered (CCF), vagy más szóval „lapközepes” altípusát alkalmaztam. A vizsgálatok során egy kategorikus és két folytonos vizsgálati faktort alkalmaztam. A kategorikus faktor a munkadarabok alapanyaga, míg a folytonos faktorok az előtolási sebesség, illetve a forgácsolási sebesség

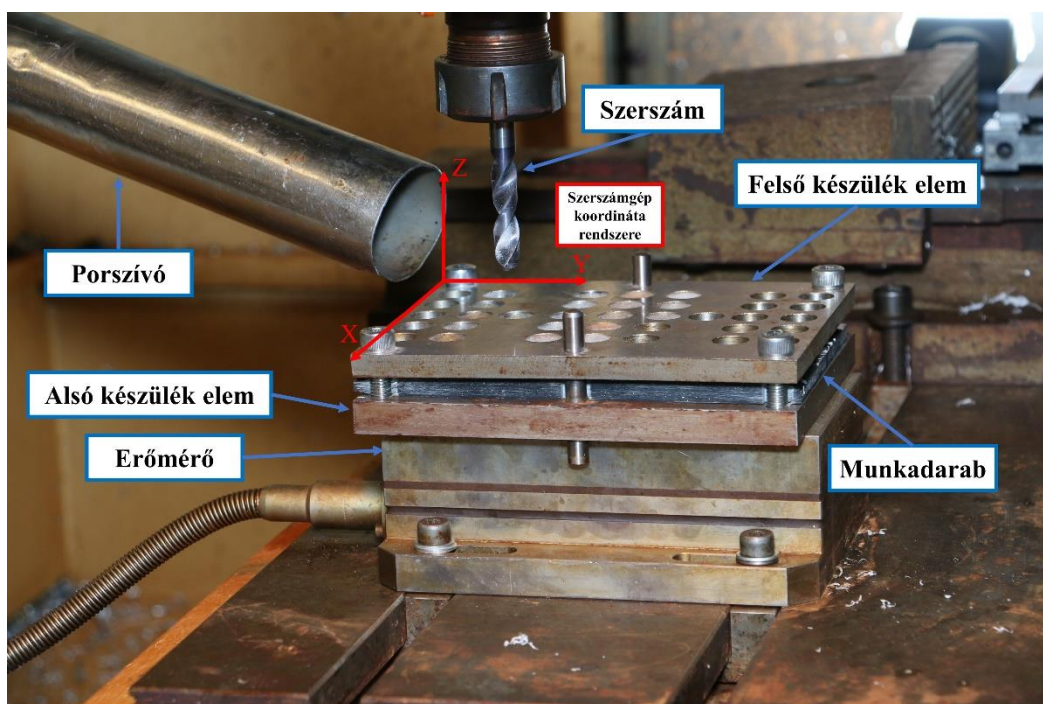
voltak, melyeket három-három szinten vizsgáltam. A folytonos paraméterek szintjeinek meghatározása során a szerszámhoz tartozó katalógusi ajánlásokat, illetve szakirodalomban található vizsgálati szinteket vettem alapul. A kísérlettertvenben a két folytonos szint középső elemeiből kapott beállítás kombinációja ($f=0,1$ mm/ford, $v_c=100$ m/min) anyagonként ötször volt ismételve, a többi kombináció anyagonként egy-egy alkalommal lett elvégezve. Annak érdekében, hogy valamilyen a szintek folyamatos növeléséből vagy csökkentéséből származó tendencia miatt téves eredmények előfordulásának lehetőségét kizárjam, a szintek előfordulásának sorrendjét randomizáltam. A kísérleti mátrix a 3-2. táblázatban látható.

3-2. táblázat. Kísérleti mátrix

<i>Ssz.</i>	<i>Mdb. anyaga</i>	<i>Előtolás (mm/ford)</i>	<i>Forgácsolási sebesség (m/min)</i>
1	BFRP	0,05	50
2	BFRP	0,15	100
3	BFRP	0,15	50
4	BFRP	0,10	100
5	BFRP	0,10	100
6	BFRP	0,10	100
7	BFRP	0,10	150
8	BFRP	0,15	150
9	BFRP	0,10	50
10	BFRP	0,05	100
11	BFRP	0,05	150
12	BFRP	0,10	100
13	BFRP	0,10	100
14	CFRP	0,05	50
15	CFRP	0,15	100
16	CFRP	0,15	50
17	CFRP	0,10	100
18	CFRP	0,10	100
19	CFRP	0,10	100
20	CFRP	0,10	150
21	CFRP	0,15	150
22	CFRP	0,10	50
23	CFRP	0,05	100
24	CFRP	0,05	150
25	CFRP	0,10	100
26	CFRP	0,10	100

3.3. Kísérleti környezet és körülmények

A vizsgálatok során fúrási kísérleteket végeztem, melyek egy Kondia B640 típusú háromtengelyes CNC megmunkálóközponton kerültek megvalósításra. A kísérletek során a szálerősített kompozit anyagokra jellemző tipikus forgács és porképződés miatt száraz megmunkálást végeztem. A gép meghibásodásának és a kezelő személyzet egészségkárosodásának elkerülése érdekében a kísérletek során elszívást alkalmaztam egy nagyteljesítményű Nilfisk GB733 ipari porszívó segítségével. A kísérletekhez használt szerszám egy Tivoly Polaris 150 Sim Dim 6537K (cikkszám: 82415011000) típusú, titán alumínium-nitrid bevonatú, nagy csúcsszögű, tipikusan acélok és kompozitok megmunkálásához ajánlott fúrót alkalmaztam.



3-2. ábra. Kísérleti környezet

A kísérletek során a munkadarabok megfogását egy a tanszéken használt fúrókészülék biztosította, amely tipikusan hasonló jellegű kísérletekhez lett tervezve. Ennek köszönhetően a készülék illeszkedik a kísérletek során felhasznált KISTLER 9257BA típusú háromtengelyes erőmérőhöz. Az erőméréshez szükséges volt továbbá egy KISTLER 5070 típusú többcsatornás töltéserősítő, illetve két darab National Instruments USB-4431 adatgyűjtő kártya. Valamint az erőmérőből rendszerből érkező adatokat egy LabVIEW szoftverben írt programmal gyűjtöttem.

Az erőmérés előkészítése során fontos lépés a mérési tartomány, illetve a mintavételezési frekvencia beállítása. A CFRP anyagokra jellemző irodalmi értékekre alapozva, illetve mivel a BFRP anyaggal kapcsolatban még nem volt várható érték, így egy viszonylag szélesebb, 0-500

N közötti tartományt adtam meg, hogy elkerüljem az esetleg tartományból való kilépés lehetőségét. A mintavételezés frekvencia meghatározása során szempont volt, hogy a fűrés során legfeljebb 5 fokos szögelfordulás után történjen a mintavételezés, hogy kellően pontossággal alkothassam meg a forgácsolási erő karakterisztikáját. A kísérletek során különböző szinteken vizsgáltam a forgácsolási sebességet ezért, hogy a korábban említett szempont minden szintre teljesüljön, illetve, hogy a fűrészek között ne kelljen módosítani a mintavételezési frekvenciát, a legnagyobb forgácsolási sebesség értéknek megfelelő mintavételezési frekvenciát alkalmaztam minden esetben. A mintavételezési frekvencia meghatározása a következő egyenletek felhasználásával történt:

$$n_{sz,max} = \frac{v_{c,max} \cdot 1000}{\pi \cdot d_{sz}} = 4774,65 \frac{1}{min} \quad (3.1)$$

$$f_{sz,max} = \frac{n_{sz,max}}{60} = 79,58 \text{ Hz} \quad (3.2)$$

$$f_{m,min} = f_{sz,max} \cdot \frac{360}{\Delta\varphi} = 5729,58 \text{ Hz} \quad (3.3)$$

$$f_m > f_{m,min} \rightarrow f_m = 6000 \text{ Hz} \quad (3.4)$$

$n_{sz,max}$: szerszám maximális fordulata,

$v_{c,max}$: maximális forgácsolási sebesség,

d_{sz} : szerszám átmérője,

$f_{sz,max}$: maximális szerszámfordulat frekvenciája,

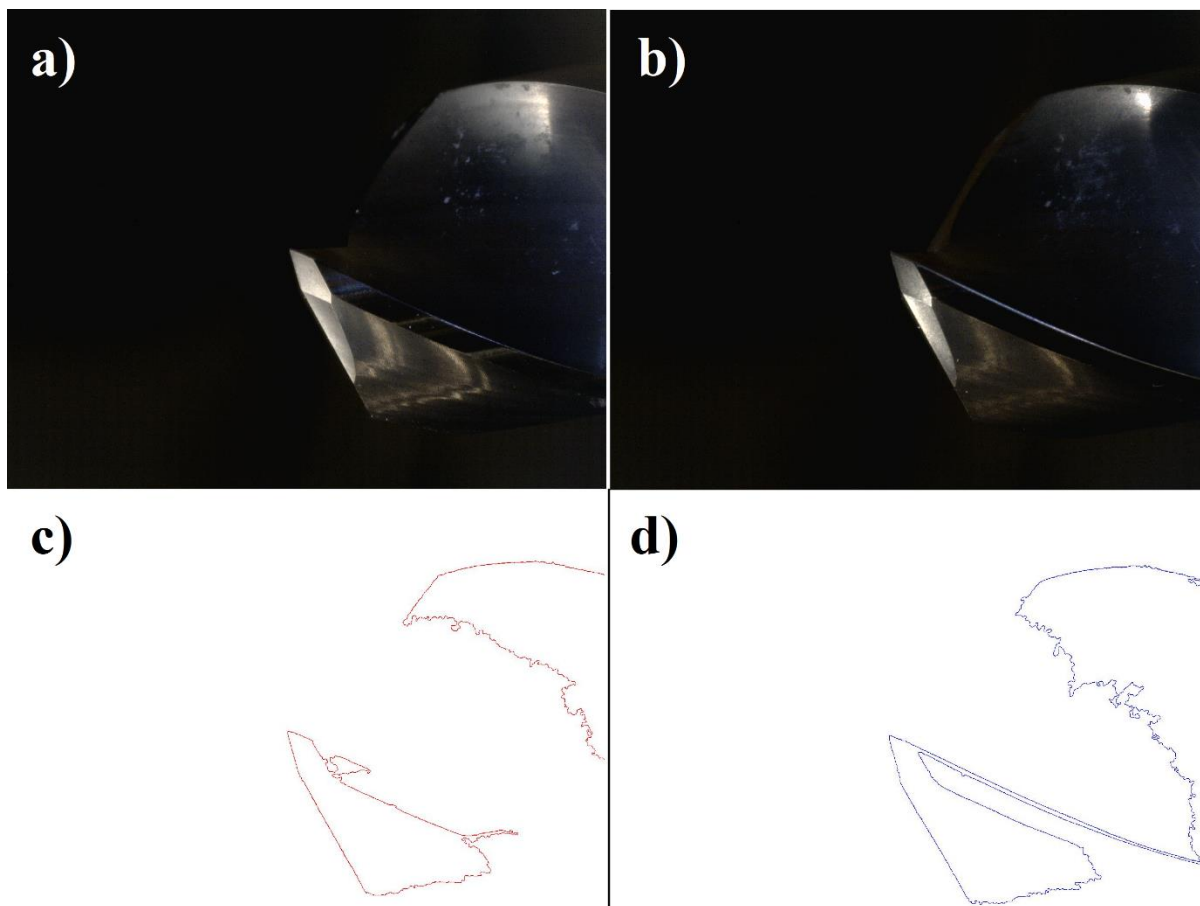
$\Delta\varphi$: szerszám szögelfordulása,

$f_{m,min}$: minimális mintavételezési frekvencia,

f_m : választott mintavételezési frekvencia.

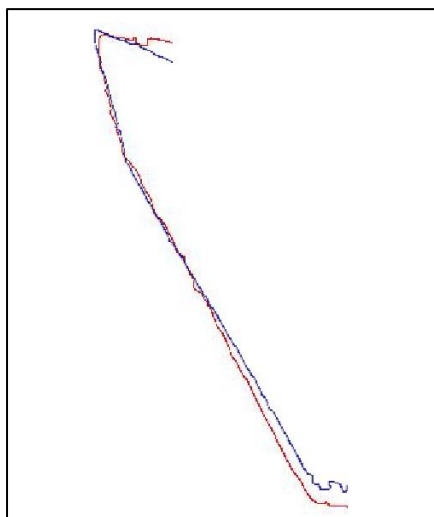
A forgácsolási kísérletek során számottevő hatása lehet a kísérletek eredményeire a szerszámkopásnak. Az alkalmazott kísérlettervnek köszönhetően viszonylag kevés forgácsolást kellett végezni, azonban továbbra is fennállt a szerszámkopás lehetősége. Ezen okból kifolyólag a kísérletek előtt, között, illetve után a szerszám kopása is dokumentálásra került. Erre a célra egy Dino-Lite AM413ZT típusú digitális mikroszkópot alkalmaztam. A mikroszkóppal készí-

tett képeken egy Wolfram Mathematica szoftverben írt program segítségével végeztem éldektálás. A kísérletek kezdetén, illetve végén készített képeken detektált éleket összehasonlítva megállapítottam, hogy a szerszámkopás hatása a további vizsgálatok során elhanyagolható. A szerszámkopás dokumentálásának eredménye a következő képen (3-3. ábra) figyelhető meg.



3-3. ábra. Szerszámkopás dokumentálása: **a)** szerszám állapota a kísérletek előtt, **b)** szerszám állapota a kísérletek után, **c)** kísérletek előtti képeken detektált élek, **d)** kísérletek utáni képeken detektált élek

A következő kép (3-4. ábra) segíti a szerszám kopottsági állapotának vizualizációját a detektált élek releváns részeinek együttes ábrázolásával. A piros színű elemek a kezdeti éleket, míg a kék színű elemek a kísérletek utáni éleket szemléltetik.



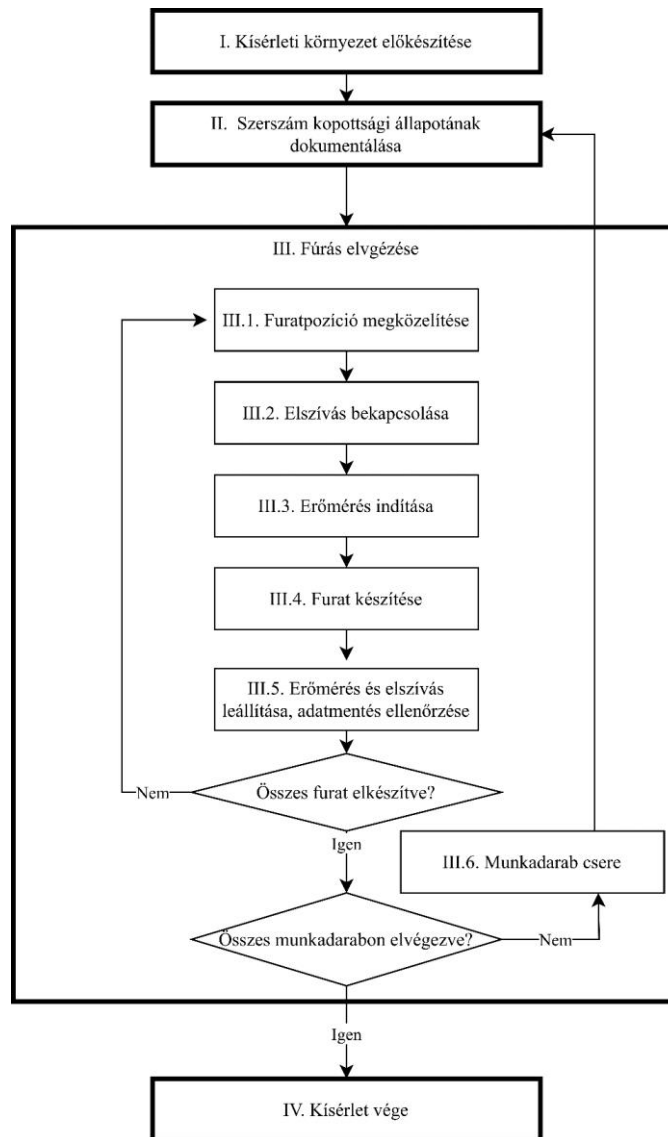
3-4. ábra. Detektált élek együttes ábrázolása

3.4. Kísérletek megvalósítása

A kísérletek során minden tervszerűen történt. Fúrási folyamatok megismétlésére nem került sor. A kísérletek során történt eseményekről a mellékletben megtalálható a kísérleti jegyzőkönyvből tájékozódhatunk bővebben. A kísérletek elvégzése több ember együttes munkáját igényelte. A feladatok elvégzését, illetve támogató hozzáállásukat ezúton is szeretném megköszönni. A feladatok, illetve a kísérleti személyzet:

- jegyzőkönyv vezetése: Magyar Gergely,
- szerszámgép kezelése: Hodosán Zsolt,
- erőmérés: Gödri András,
- porszívó kezelése: Hauschild Péter,
- fényképek készítése: Poór Dániel,
- tanácsadás és előkészítés: Dr. Geier Norbert, Pereszlai Csongor.

A kísérletek menetének megértését a következő blokkdiagramm (3-5. ábra) segíti.



3-5. ábra. Kísérletek menetének folyamatábrája

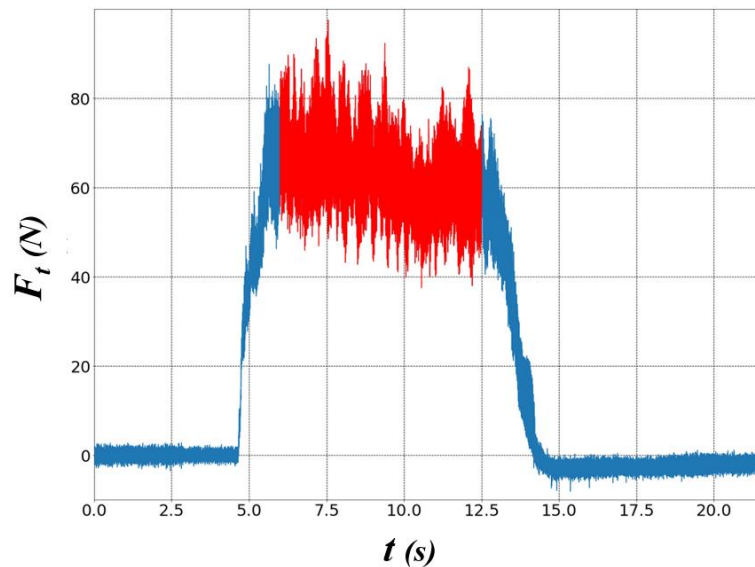
Az I. szakaszban a kísérleti környezetet készítjük elő, úgymint erőmérő cella és készülék összeszerelése, mérőeszközök kalibrálása, tesztelése, nullpont felvétel, szerszámbemérés, megmunkálóprogram tesztelése. A II. szakaszban kell elkészíteni a szerszámkopás változásának dokumentáláshoz szükséges fotókat. A III. szakaszban történik a fúrasi kísérletek elvégzése, melyeket külön allépésekben is részleteztem az ábrán. A folyamat véget ér, amennyiben minden munkadarabon elkészült az összes kívánt furat és minden szükséges adatot begyűjtöttünk.

3.5. Kiértékelési és jellemzőgenerálási módszerek

A fűrási kísérletek elvégzése során egy, míg a kísérletek után két paraméter vizsgálatát végeztem el. Ezen paraméterek a forgácsolási erő mérése, a keletkezett sorja vizsgálata, illetve a furatok palástfelületének felületi érdessége voltak. A következőkben ismertetem, hogy a gyűjtött adatokat milyen módon értékeltem ki.

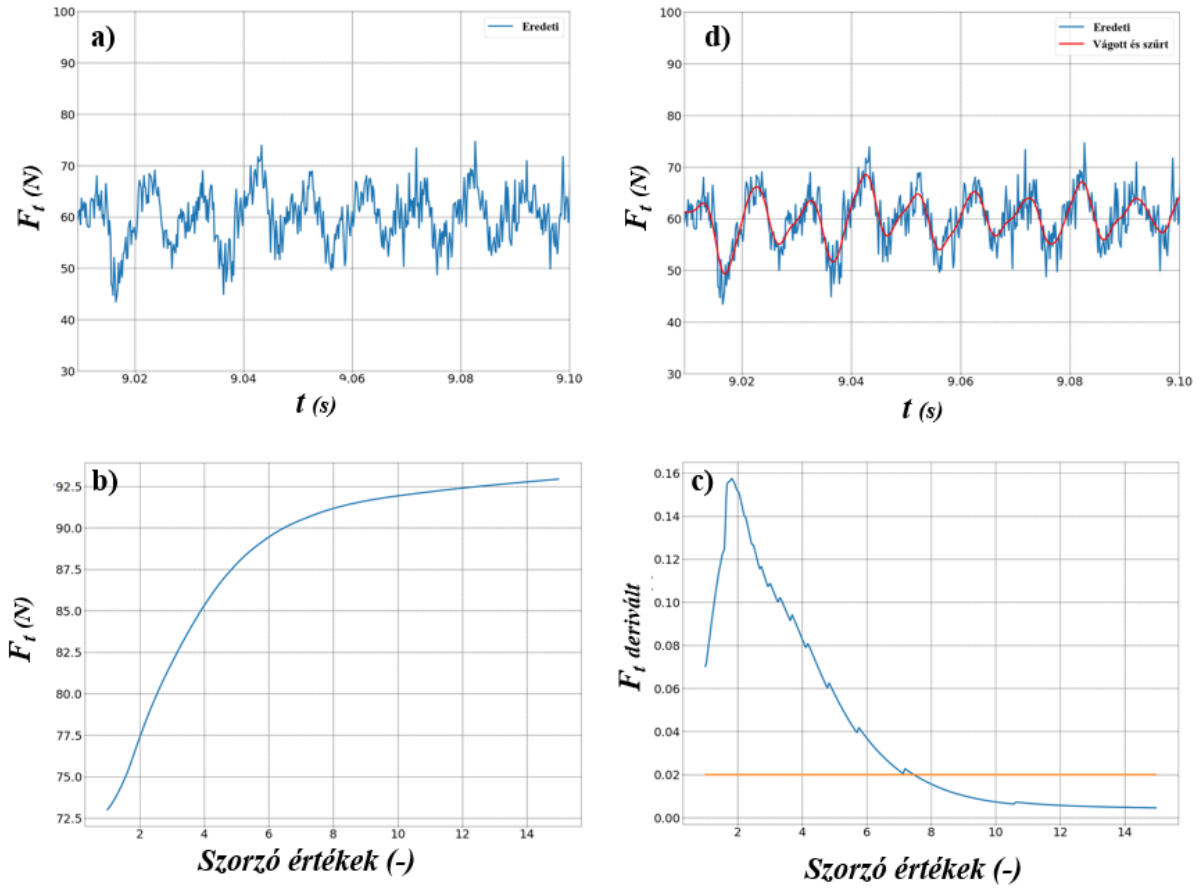
3.5.1. FORGÁCSOLÁSI ERŐ KIÉRTÉKELÉSE

Az erőmérő cellából származó adatokat egy LabVIEW szoftverben írt program segítségével gyűjtöttem, amely tömörített (.tdms) kiterjesztésű fájlokba gyűjtötte a különböző csatornákról érkező jeleket. A feldolgozás első lépése ezen adatok olyan formátumba (például .txt) való konvertálása volt, amellyel könnyebben el lehet végezni a szükséges szűréseket, illetve vizsgálatokat. Erre a feladatra szintén egy LabVIEW programot alkalmaztam, amely a háromirányú erőkomponenseket, illetve a fűrás forgási irányával megegyező irányú nyomatékkomponenst egy .txt kiterjesztésű fájlba konvertálta. A további vizsgálatokhoz a Jupyter Notebook szoftvert alkalmaztam, amelyben Python programnyelvben írt kódok segítségével végeztem el az adatsorok beolvasását, megvágását, szűrését, vizualizációját és vizsgálatát. A feladatok elvégzéséhez elsősorban a NumPy, a Matplotlib, a SciPy és a pandas könyvtárak egyes moduljait alkalmaztam. Első lépésként az adatok vágását végeztem el. Ezt a feladatot manuálisan hajtottam végre, minden adatsornál csak azon részeket vizsgáltam, amelyek nem tartalmazzák a tranziens jelenségeket, vagyis a mérések során a forgácskeresztmetszet állandó. A vizsgálatok során alkalmazott program teljes forráskódja a mellékletben megtekinthető. A következő képen (3-6. ábra) kék színnel láthatjuk a teljes mérési adatsort megjelenítve, míg piros színnel a vizsgálatok során felhasznált adatsort pirossal.



3-6. ábra. Eredeti és vágott adatsor ábrázolása

Az adatok szűrésére Butterworth aluláteresztő szűrőt alkalmaztam. Ezen szűrő alkalmazásánál kulcs lépés a határfrekvencia (f_h) meghatározása. Ezen határfrekvencia meghatározásához a szerszám frekvenciáját vettem alapul. Amennyiben a határfrekvenciát ezen szerszám frekvencia valamilyen többszöröseként határozom meg, a szűrt értékben a többszörös egész részének megfelelő mennyiségű felharmonikusa fog jelentkezni a valós jelnek, így a nagy frekvenciájú zaj kiszűrhető. Mivel több különböző szerszámfrekvenciát alkalmaztam a vizsgálatok során, így nem egy konkrét határfrekvenciát határoztam meg, hanem a határfrekvencia és a szerszámfrekvencia közti kapcsolatot megadó szorzóértéket (c_{hf}) határoztam meg. Minél nagyobb szorzóértéket alkalmazunk, a forgácsolási erő diagram annál jobban „kisimul”. Ennek oka, hogy nem csak a nagyfrekvenciás zajt szűri ki a szűrő, hanem a vizsgálat szempontjából még releváns hatással bíró felharmonikus értékeket is. A választott határfrekvencia meghatározásához a „kisimulás” hatására történő maximális axiális erő (F_t) változását vettem alapul. Megfigyelhető, hogy a szorzóérték változtatásával ez a maximális erő érték egy ideig drasztikusan, majd egyre mérsékeltebb módon növekszik. A szorzóérték meghatározásához vettem a szorzóérték, illetve a maximális axiális erő függvényének a deriváltját. Úgy ítélt meg, hogy ahol a függvénynek a teljes tartományra vonatkoztatott átlag értékének felénél kisebb az értéke, ott a szűrő hatására már nincs jelentős mennyiségű megváltozása a maximális axiális erő értékének. Mivel ezt az értéket több helyen is felvette a derivált függvény, így vettem ezeknek a pontoknak az átlagát és egy ehhez közeli értéket választottam a szorzó értékének. Így az erő értékéről, illetve a fűrés karakterisztikájáról kellően pontos képet kapunk a nagyfrekvenciájú zaj kiszűrése mellett. Ennek a vizsgálatnak a folyamatát szemlélteti a következő kép (3-7. ábra).



3-7. ábra. Határfrekvencia szorzó meghatározása: **a)** eredeti adatsor egy része, **b)** maximális erő megváltozása a szorzóérték függvényében, **c)** maximális erő megváltozása a szorzóérték függvényének derivált függvénye, a választott határértékkel kiegészítve, **d)** az eredeti és a szűrt adatsorok egy része

A határfrekvencia így a 3.6 képlet szerint számolható egyedileg minden adatsorra. A Butterworth féle aluláteresztő szűrő formális képletét ezen axiális erő adatsorok szűrésére alkalmazva a 3.6 képlet ismerteti. A szűrés után meghatároztam az adott erőjel értékek maximumát, átlagát (3.7 képlet), illetve szórását (3.8 képlet), majd további vizsgálataim során ezeket az adatokat használtam fel.

$$f_h = f \cdot c_{hf} \quad (3.6)$$

$$F_{t,ki} = \frac{F_{t,be}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_h}\right)^{2 \cdot N}}} \quad (3.7)$$

$$F_{t,avg} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} F_{t,i}}{N} \quad (3.8)$$

$$F_{t,std} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} |F_{t,i} - F_{t,avg}|^2}{N}} \quad (3.9)$$

f : az adott axiális erő adatsort jellemző frekvencia,

f_h : az adott axiális erő adatsor határfrekvenciája,

c_{fh} : a határfrekvencia meghatározásához használt konstans,

$F_{t,ki}$: az adott axiális erő adatsor szűrt kimeneti értékei,

$F_{t,be}$: az adott axiális erő adatsor szűrendő kimeneti értékei,

$F_{t,avg}$: az adott axiális erő adatsor átlaga,

i : általános futó index (egész szám),

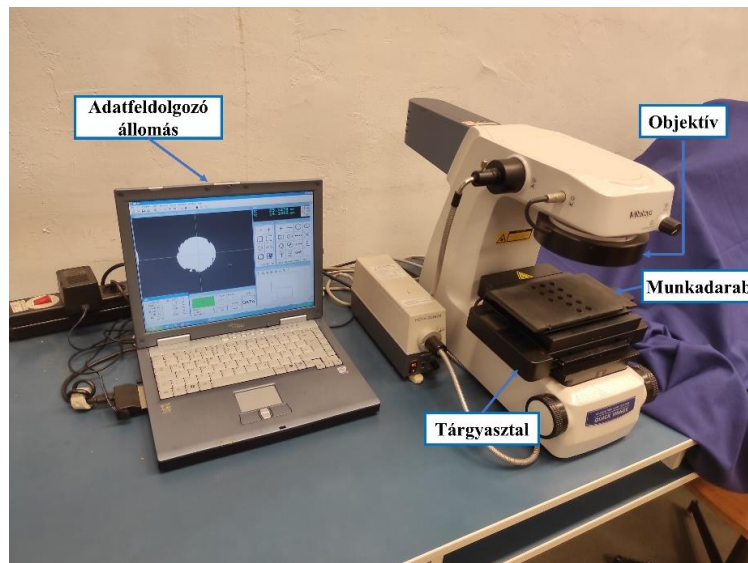
$F_{t,i}$: az adott axiális erő adatsor i -edik eleme,

N : az adott axiális erő adatsor elemeinek száma,

$F_{t,std}$: az adott axiális erő adatsor értékeinek szórása.

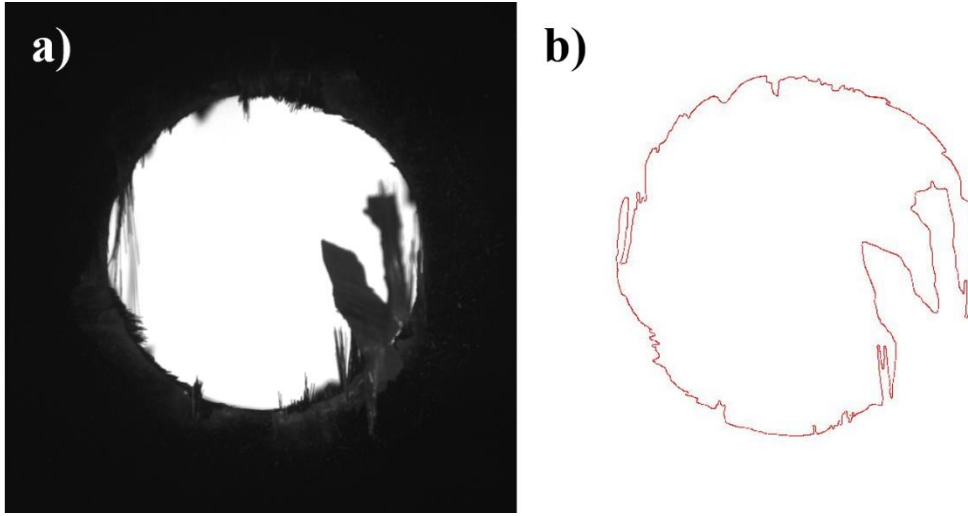
3.5.2. SORJA ADATOK KIÉRTÉKELÉSE

A fúrás során keletkező sorja a furatok minőségének egy meghatározó tényezője. Vizsgálataim során igyekeztem ezen paramétert is kellő részletességgel körül járni. A furatokról egy Mitutoyo 361-804 szériaszámú optikai mikroszkóppal készítettem képeket. A vizsgálatokhoz kialakított környezet a következő képen (3-8. ábra) figyelhető meg.



3-8. ábra. Furatok fotóinak készítése optikai mikroszkóppal

A furatokhoz tartozó jelentősebb sorja-mérőszámokat egy Wolfram Mathematica szoftverben írt program¹ segítségével határoztam meg. A következő ábra (3-9. ábra) egy furatot és a programban feldolgozott verzióját szemlélteti.



3-9. ábra. Sorja kontúrjának detektálása: **a)** furat optikai mikroszkóppal készített fotója, **b)** furat detektált kontúrja Wolfram Mathematica szoftverben

A programban detektált kontúr felhasználásával már meghatározhatók a furatok jellemzésére alkalmas sorja mérőszámok. Ezen mérőszámok a sorjafaktor (F_b , 3.10 képlet) és a kontúr sorjafaktor (F_{bc} , 3.11 képlet) voltak.

$$F_b = \frac{A_{nom} - A_{free}}{A_{nom}} \cdot 100 = \frac{A_{sorja}}{A_{nom}} \cdot 100 \quad (3.10)$$

$$F_{bc} = \frac{C_{sorja} - C_{nom}}{C_{nom}} \cdot 100 \quad (3.11)$$

F_b : sorjafaktor,

A_{nom} : furat névleges területe,

A_{free} : furat sorjamentes területe,

A_{sorja} : sorja területe,

F_{bc} : kontúr sorjafaktor,

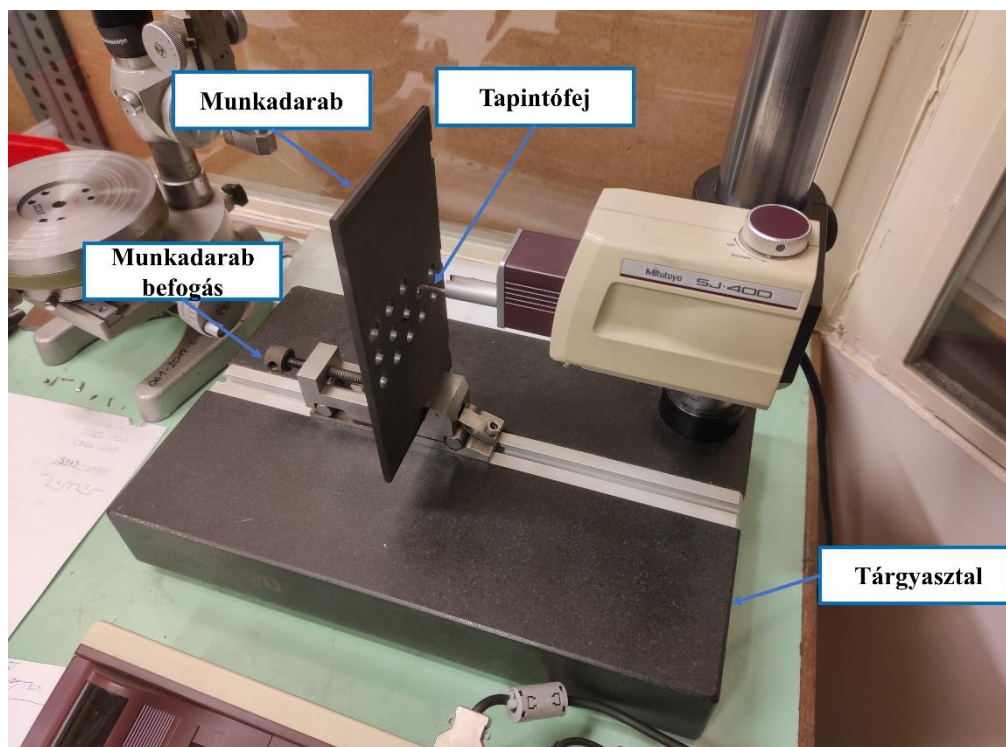
C_{sorja} : sorjával rendelkező furat kontúrjának hossza,

C_{nom} : furat kontúrjának névleges hossza.

¹ A programot Pereszlai Csongor készítette.

3.5.3. FELÜLETI ÉRDESSÉG ADATOK FELDOLGOZÁSA

A furatok utolsó tulajdonsága melyet méréssel határoztam meg, a furatok palástfelületének felületi érdessége volt. Erre a célra egy Mitutoyo SJ-400-as felület érdességmérőt alkalmaztam. A mérési hossz 2,5 mm volt, illetve minden furaton 5 mérést végeztem. A viszonylag magas átlagos felületi érdesség és rövid mérési hossz miatt nem szabványos mérést alkalmaztam, azonban a vizsgálatok során a megfelelő karakterisztika megalkotásához nem volt szükséges a szabványokhoz (pl. ISO 1997-hez) való ragaszkodás. A mérések során a berendezés meghatározta az átlagos felületi érdesség (R_a), egyenetlenség-magasság (R_z), illetve további felületi érdesség mérőszámokat is (R_q , R_t , R_p , R_v). A következő ábra (3-10. ábra) szemlélteti az alkalmazott mérési környezetet.



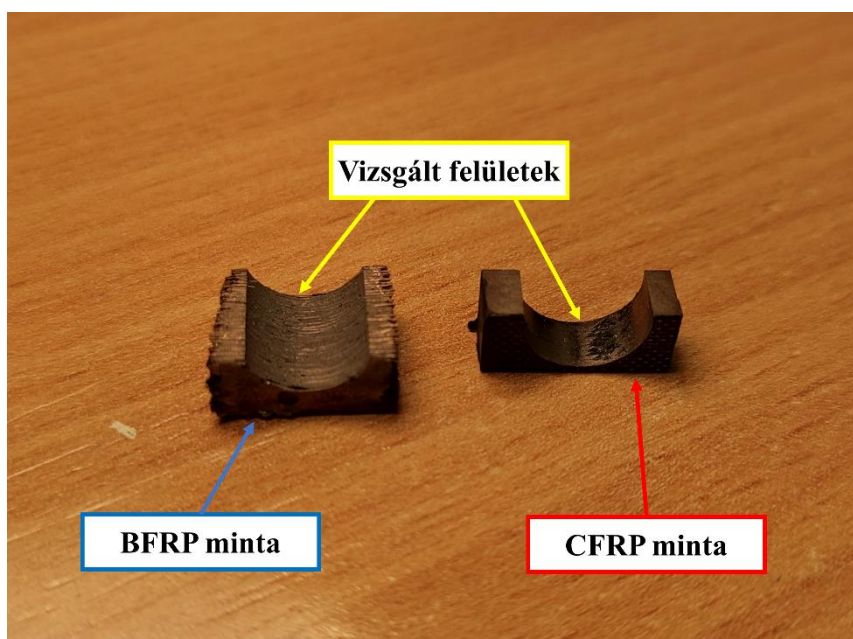
3-10. ábra. Felületi érdesség mérés környezete

A kompozit alkatrészek szerelése során a felületi érdesség általában nem a leginkább releváns tényező, viszont egy forgácsolási folyamat során értékes adatok hordozhat. Ezért is tartottam fontosnak, hogy a kísérletek után ezen paramétert is vizsgáljam.

3.5.4. FELÜLET VIZSGÁLATA PÁSZTÁZÓ ELEKTRONMIKROSZKÓPPAL

A forgácsolt felület mikrogeometriai tulajdonságai számos releváns információt hordoznak magukban, melyekkel értékes következtetéseket lehet levonni az anyagok forgácsolhatóságáról

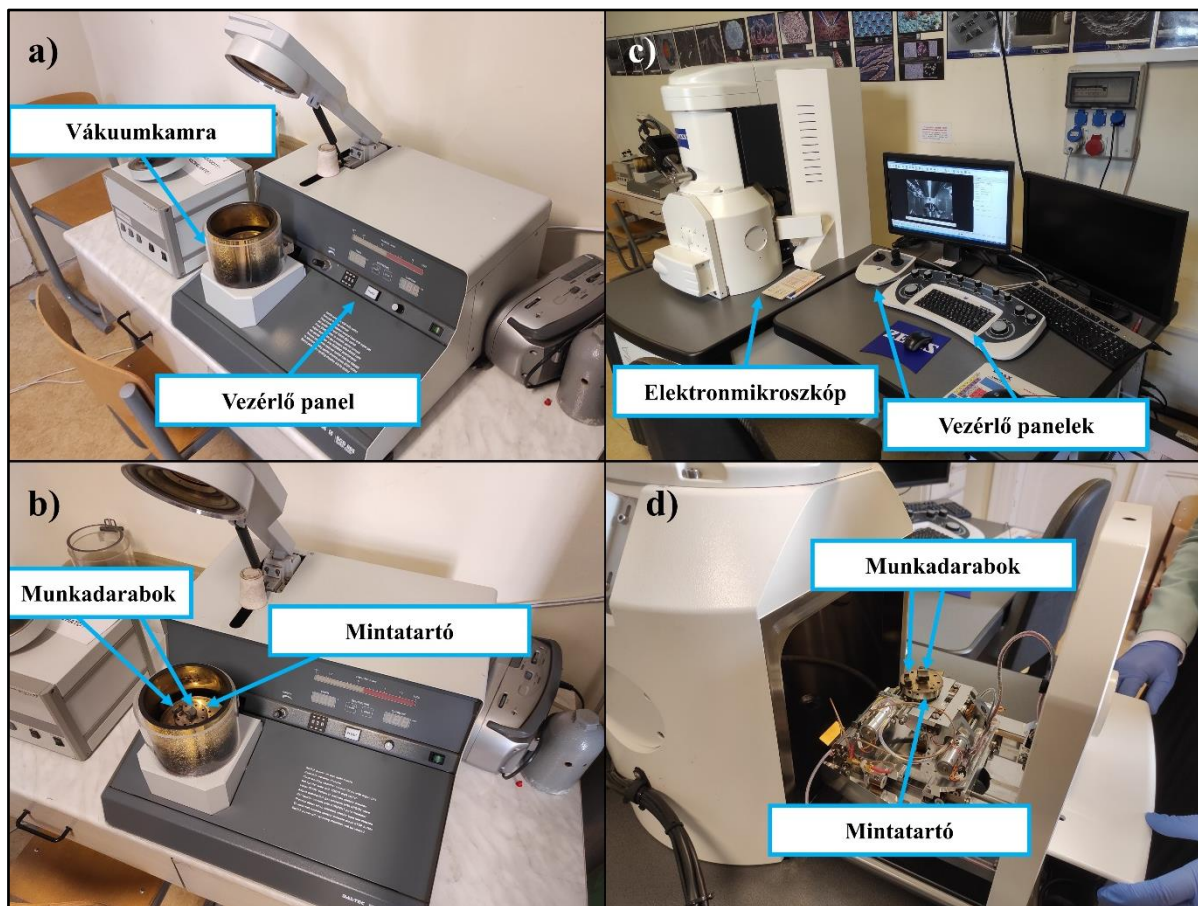
Például töret felületek kialakulás, szálak roncsolódási mechanizmusai vagy mátrix anyag változásai a forgácsolás következtében. A mikrogeometriai tulajdonságok vizsgálatára a felületi érdesség mérésén felül pásztázó elektronmikroszkópiával történő vizsgálatokat is alkalmaztam. A vizsgálatok során készített képek segítségével többek között a korábban már említett tulajdonságok vizsgálatát is el tudtam végezni, így átfogó képet kaptam az anyagok forgácsolhatóságáról. A képek készítéséhez egy olyan kísérleti beállítást választottam, ahol az előtolás, illetve a forgácsolási sebesség is a középső szintre volt definiálva. Erre a célra a 6-os számú furatot választottam mindkét típusú anyag esetén. Az előkészített (darabolt és bevonatolt) vizsgálati munkadarabok a következő ábrán (3-11. ábra) láthatók (előkészítésüket később taglalom).



3-11. ábra. Pásztázó elektronmikroszkóppal vizsgált munkadarabok

A vizsgálatokhoz egy Zeiss Evo MA 10 típusú pásztázó elektronmikroszkópot alkalmaztam. Mivel a munkadarab mátrixanyaga polimer, így a vizsgálat előtt szükséges volt a felületének aranyozással történő előkészítése. Erre a célra egy Bal-tec STD 005-ös típusú porlasztós bevonatkészítő berendezést használtam. A bevonat készítés célja egy olyan aranyréteg felhordása volt, amely kellő vezetőképességet biztosít ahhoz, hogy az alapvetően nagyobb részben szigetelő minta felületén ne halmozódjon fel túl sok töltés. Amennyiben erre az aranyozásra nem került volna sor, a pásztázás során csak egy fehér képet kaptunk volna releváns információ nélkül. Az aranyréteg felhordása két 30 másodperces ciklusban történt 45 mA-es áramerősség mellett. Az aranyréteg vastagságát a felhordással töltött idő, illetve a beállított áramerősség együttesen határozza meg. Azért történt két ciklus felhordás, mivel a munkadarabok

szemrevételezése során több viszonylag nagyobb (szabad szemmel is észlelhető) barázdát véltem felfedezni így, hogy a teljes felület aranyozása biztosan végbe menjen, történt egy ismétlődő, második felhordás. A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatok során használt eszközök a következő ábrán (3-12. ábra) figyelhetők meg.



3-12. ábra. Elektronmikroszkópos vizsgálatok során használt eszközök: **a)** Bal-tec STD 005 porlasztásos bevonatkészítő berendezés, **b)** Bal-tec STD 005 porlasztásos bevonatkészítő berendezés munkadarabokkal, **c)** Zeiss Evo MA 10 típusú pásztázó elektronmikroszkóp, **d)** Zeiss Evo MA 10 típusú pásztázó elektronmikroszkóp munkadarabokkal

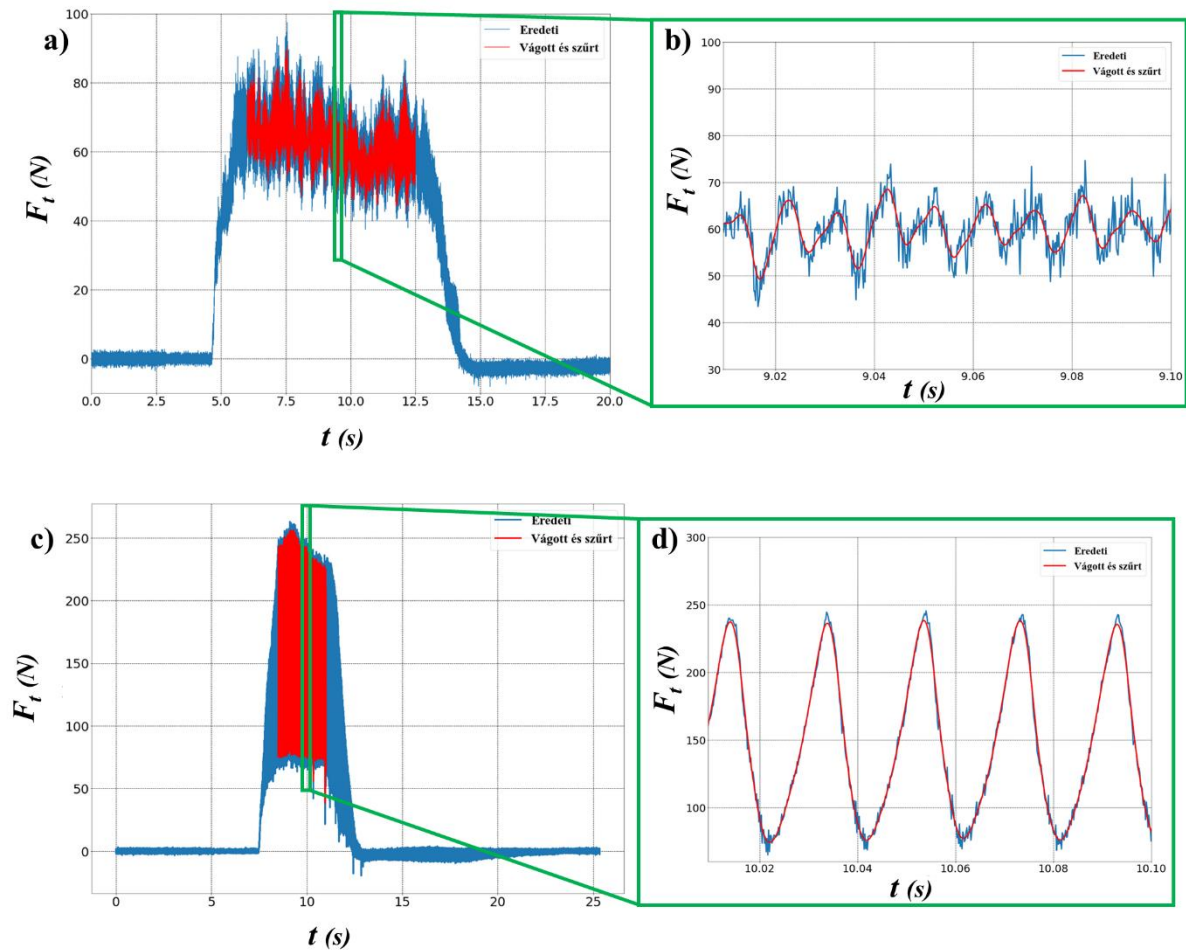
4. EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE ÉS ÉRTELMEZÉSE

Ebben a fejezetben a kísérletek során gyűjtött, majd feldolgozott eredményeket értékelem, illetve értékelem. Illetve a fejezet végén a különböző hatásokat összehasonlítom, illetve az optimális technológiai paraméterekre is ajánlást teszek.

4.1. Forgácsolási erő

A következőkben ismertetem a forgácsolási erő vizsgálata során kapott eredményeket, úgymint a két különböző anyag forgácsolása során mért nyers, illetve vágott és szűrt adatsorokat, a vágott és szűrt adatokból, az adatsort jellemző paramétereket ($F_{t,max}$, $F_{t,avg}$, $F_{t,std}$). Magyarázatot adok a paraméterek során megfigyelt jelenségekre. Tovább az adatsorokat legmarkánsabban jellemző paraméter –az átlag erő komponens– esetén válaszfelület módszerrel meghatározom ezen paraméter, illetve a megadott faktorok közötti összefüggéseket, illetve a paramétert leginkább befolyásoló főhatásokat.

A két vizsgált munkadarab nemcsak anyagában, hanem a szálerősítés struktúrájában is eltér. Az egyirányban szálerősített CFRP kompozit munkadarab esetén ezért forgácsolás során a fellépő forgácsolási erőre jelentős hatása van a vágott szál irányának. Ez a hatás a paplan struktúrájú BFRP esetén is jelen van azonban, mivel két irányban is irányítottan helyezkednek el a szálak, a forgácsolás során mindig az egyik orientációjú szálal könnyebben, míg a másikat kevésbé könnyen lehet forgácsolni. Ebből kifolyólag ez a struktúra sokkal jobban hasonlít az izotrop anyagokra, mint az egyirányban szálerősített változat. Ez a jelenség a forgácsolási erő változásában is kimutatható. A következő ábra (4-1. ábra) szemlélteti a két különböző anyag forgácsolása során fellépő forgácsolási erő változását az idő függvényében.



4-1. ábra. Első furatok erőlefutása BFRP és CFRP anyagok esetén: **a)** eredeti, illetve vágott és szűrt adatsorok teljes intervallumon történő ábrázolása BFRP esetén, **b)** eredeti, illetve vágott és szűrt adatsorok $t \in [9,01-9,10]$ s, $F_t \in [30-100]$ N intervallumon történő ábrázolása BFRP esetén, **c)** eredeti, illetve vágott és szűrt adatsorok teljes intervallumon történő ábrázolása CFRP esetén, **d)** eredeti, illetve vágott és szűrt adatsorok $t \in [10,01-10,10]$ s, $F_t \in [500-300]$ N intervallumon történő ábrázolása CFRP esetén

A 4-1. ábra b) és d) részének vizsgálatával a korábban leírt jelenség jól megfigyelhető. Míg a CFRP anyag forgácsolása során egy szabályosan változó struktúra megfigyelhető, addig a BFRP anyag esetén ilyen szabályosság nem jelentkezik. A diagramot tovább vizsgálva észrevehető, hogy a CFRP anyag esetén jóval nagyobb a maximális forgácsolási erő, illetve az is, hogy a már szűrt jel sokkal nagyobb határok között váltakozik a BFRP-hez képest. A forgácsolási erő karakterisztikájának megfigyelése után az adatsorokat jellemző paraméterek számszerű vizsgálatát taglalom. A 4-1. táblázatban olvashatók az adott azonosítójú furatokhoz tartozó forgácsolási erő adatsorok átlaga, maximális értéke, illetve szórása.

4-1. táblázat: Forgácsolási erő adatok.

BFRP				CFRP			
<i>Ssz.</i>	$F_{t,max}$ (N)	$F_{t,avg}$ (N)	$F_{t,std}$ (N)	<i>Ssz.</i>	$F_{t,max}$ (N)	$F_{t,avg}$ (N)	$F_{t,std}$ (N)
1	90,85	62,94	6,97	1	256,60	148,41	56,26
2	138,54	104,67	11,37	2	385,82	219,60	93,18
3	131,89	97,21	11,33	3	344,94	209,59	75,72
4	121,48	89,40	10,21	4	336,52	186,68	79,99
5	122,60	87,73	10,08	5	338,94	189,16	81,86
6	115,50	87,69	9,89	6	340,69	189,98	80,01
7	124,28	93,18	9,43	7	347,90	190,92	82,30
8	141,99	104,01	11,39	8	406,12	227,61	95,40
9	113,16	82,36	10,11	9	311,12	185,87	68,41
10	89,08	65,78	7,28	10	259,26	147,77	56,80
11	91,92	69,04	6,69	11	267,12	151,72	58,99
12	119,17	85,91	9,61	12	339,23	190,79	82,48
13	123,53	86,84	9,51	13	340,92	191,86	82,08

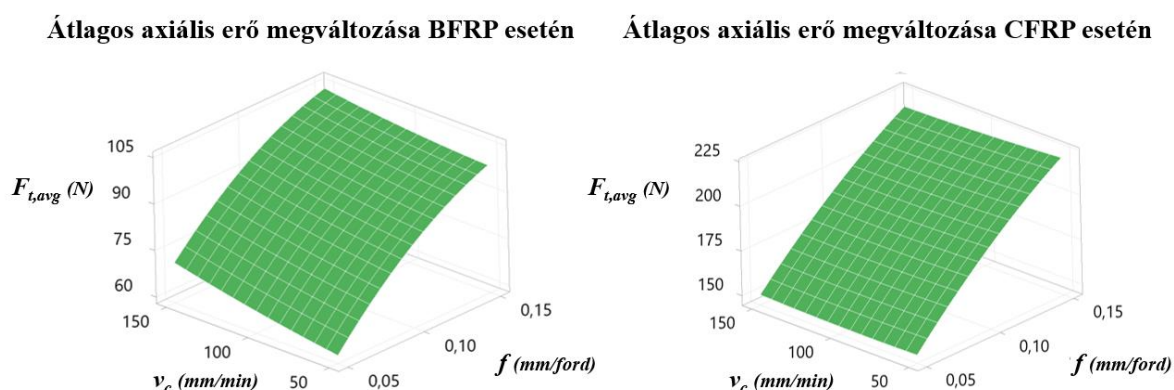
Az értékeknél megfigyelhető, hogy az a CFRP értékei az átlag esetén körülbelül kétszeresei, a maximális erő esetén háromszorosai a BFRP-hez tartozónak, míg a CFRP adatsorok szórása nagyjából nyolcszorosa a BFRP adatsorok szórásának. Ezen paraméterek közti különbségek magyarázatát több dologban kell keresni. Az átlag erőhöz tartozó értékek közti különbséget okozhatja a mátrix anyagok közti különbség, illetve a szénszálak és a bazaltszálak alapvető mechanikai tulajdonságainak eltérése. A jelek szórása közti hatalmas eltéréssel már részben foglalkoztam korábban. Itt a fő ok a két anyag szálirányultsági struktúrája. Az egyirányban szálerősített CFRP esetén olyan jelentős a szálirány hatása, hogy kis túlzással megszakított forgácsolás jelenségéről beszélhetünk. Egyes irányokban a szálak el kell vágni a forgácsoló élnek, míg más irányokban csak a mátrixanyagot kell forgácsolni és a szálakat csak eltolja az él. Ezt a jelenséget később a pásztázó elektronmikroszkóppal készített képek vizsgálata során bővebben taglalom. A maximális értékek közötti eltérést a korábban említett két tulajdonság együttesen okozza. A továbbiakban a folyamatot leginkább jellemző paraméter, az átlagos forgácsolási

erő és a kísérleti faktorok közötti kapcsolatok jellemzésével foglalkozom. A következő két képlet a válaszfelület módszer alkalmazásával adja meg az átlagos forgácsolási erő értékét az előtolás és a forgácsolási sebesség függvényében. (A továbbiakban ismertetett eredményekhez tartozó ANOVA táblázat a melléklet **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**ában található)

$$\text{BFRP} \quad F_{t,avg} = 22,2 + 801f + 0,074v_c - 1953f \cdot f + 0,000277v_c \cdot v_c - 0,514 f \cdot v_c \quad (4.1)$$

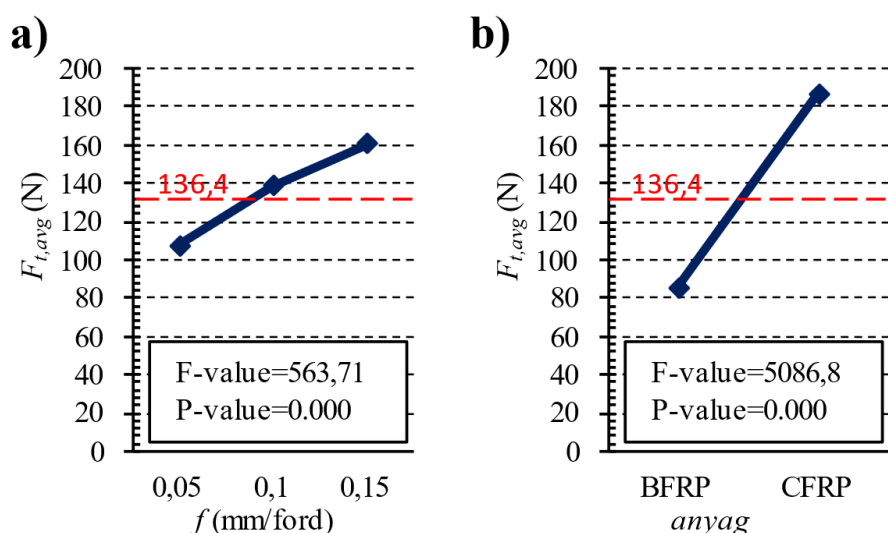
$$\text{CFRP} \quad F_{t,avg} = 98,64 + 1138f - 0,019v_c - 1953f \cdot f + 0,000277v_c \cdot v_c - 0,514 f \cdot v_c \quad (4.2)$$

A könnyebb megértés érdekében vizualizáltam a faktorok közötti összefüggéseket. A két anyag esetén egy-egy 3D felületet ábrázoltam Minitab szoftver segítségével. A következő ábra (4-2. ábra) megvizsgálása után gyorsan le tudjuk szűrni a két anyag esetén a karakterisztikák közötti hasonlóságokat.



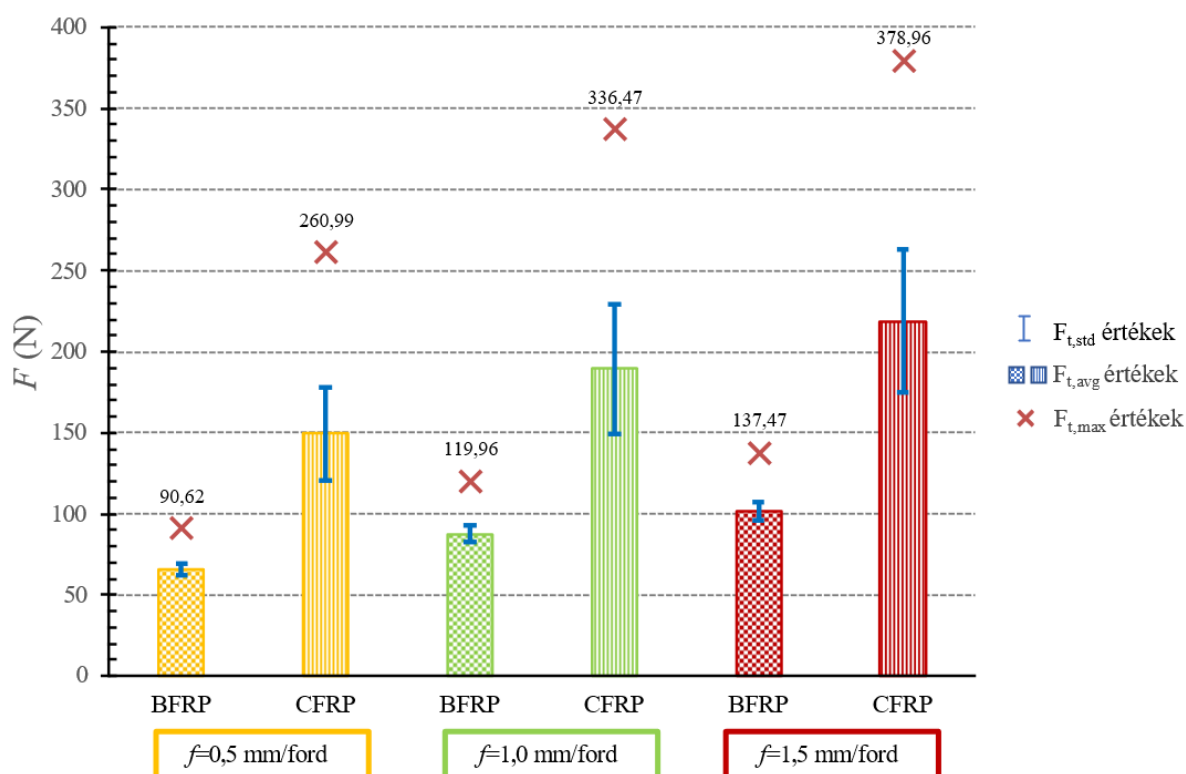
4-2. ábra. $F_{t,avg}$ megváltozása BFRP és CFRP anyagok esetén az f és a v_c függvényében

Elmondható, hogy a BFRP és a CFRP anyag is nagyon hasonló jellegű felületet adnak eredményül. Első megfigyelés után elmondható hogy mindkét esetben az előtolás változásának van jelentősebb hatása az átlagos forgácsolási erő megváltozására továbbá az, hogy habár a két felület nagyon hasonló alakú, a két anyag esetén az $F_{t,avg}$ -hez tartozó tengely értékei jelentősen eltérnek. Továbbá az is látható, hogy a forgácsolási sebesség változása, habár a BFRP esetén valamivel meredekebb, mint a CFRP esetén, de közel sem olyan jelentős a meredeksége, mint az eltolásé. Ezen megfigyelések alapján $F_{t,avg}$ -re szignifikáns hatással az előtolás és az anyag vannak. A főhatás diagramok a következő ábrán (4-3. ábra) tanulmányozhatók.



4-3. ábra. $F_{t,avg}$ szignifikáns főhatásai: **a)** előtolás hatása, **b)** anyagtípus hatása

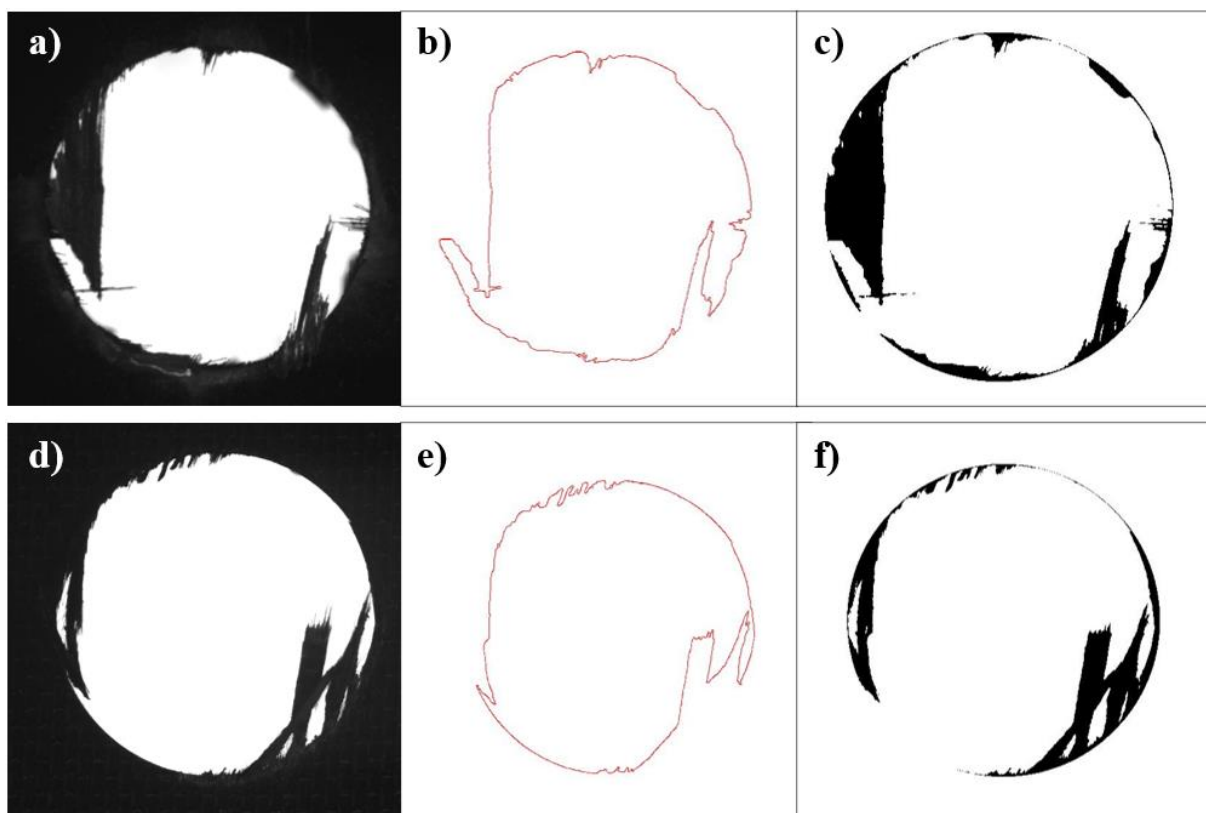
A korábban írt gondolatok igaznak bizonyultak. A vizsgálat során erősen szignifikáns hatásnak bizonyult az anyag, illetve az előtolás hatása. A szerszám éltartam, illetve a megmunkáló gép szempontjából cél a forgácsolási erő minimalizálása. Ebből kifolyólag, ha konstrukciós szempontból nincs különbség a két anyag alkalmazása között, a forgácsolási erő kialakulását tekintve előnyösebb a BFRP kompozit anyag választása, kis előtolás mellett. A korábban taglalt eredményekről nyújt egy átfogó összefoglalást a következő ábra (4-4. ábra), ami az előtolási szintek, illetve az anyagok szerint csoportosítva ábrázolja a korábban kifejtett eredményeket.



4-4. ábra. $F_{t,avg}$, $F_{t,max}$, $F_{t,std}$ átlagainak ábrázolása előtolás szerint csoportosítva

4.2. Sorja

Forgácsolás szempontjából egy jelentős szempont a sorja keletkezésének vizsgálata. Habár a kész alkatrészek minőségén alapvetően nem ront, szerelésüket megnehezíti, illetve eltávolítása során további károkat okozhat az alkatrésznek. A kísérletek során készített furatokon is jó megfigyelhető volt a sorja. A következőkben ismertetem a sorja vizsgálata során kapott eredményeket, mérőszámokat és az egyik leggyakrabban alkalmazottra, a sorjafaktorra elvégzett válaszfelület módszerrel készített statisztika elemzések eredményeit ismertetem. A következő ábra (4-5. ábra) szemlélteti a furatokon lévő sorja jelenségét, illetve a képek feldolgozása során Wolfram Mathematica szoftverben készített további elemeket.



4-5. ábra. Az 1-es beállításhoz tartozó furatokon kialakult sorja: **a)** BFRP furat fotója, **b)** BFRP furat és sorja detektált kontúrja Mathematica szoftverben, **c)** BFRP sorja geometriája Mathematica szoftverben, **d)** CFRP furat fotója, **e)** CFRP furat és sorja detektált kontúrja Mathematica szoftverben, **f)** CFRP sorja geometriája Mathematica szoftverben

A forgácsolási erővel ellentétben a sorja esetén nem lehet olyan egyszerűen következtetéseket levonni egy ábra karakterisztikájának szemrevételezésével. Éppen ezért a 4-2. táblázatban ismertetem a kapott mérőszámok (F_b , F_{bc}) értékeit

4-2. táblázat. Sorja mérőszámok értékei

BFRP			CFRP		
Ssz.	F_b (%)	F_{bc} (%)	Ssz.	F_b (%)	F_{bc} (%)
1	15,26	60,75	1	13,58	60,24
2	16,69	87,44	2	5,02	55,07
3	20,60	112,08	3	6,33	66,87
4	11,75	98,23	4	4,64	45,08
5	16,37	99,68	5	6,17	72,45
6	12,41	42,47	6	5,20	40,06
7	15,56	65,10	7	7,29	39,89
8	12,54	87,08	8	3,65	59,47
9	7,19	58,41	9	3,44	69,09
10	8,57	65,42	10	13,38	104,82
11	9,44	71,54	11	11,19	91,92
12	10,62	134,33	12	10,72	49,99
13	13,44	87,46	13	9,05	54,94

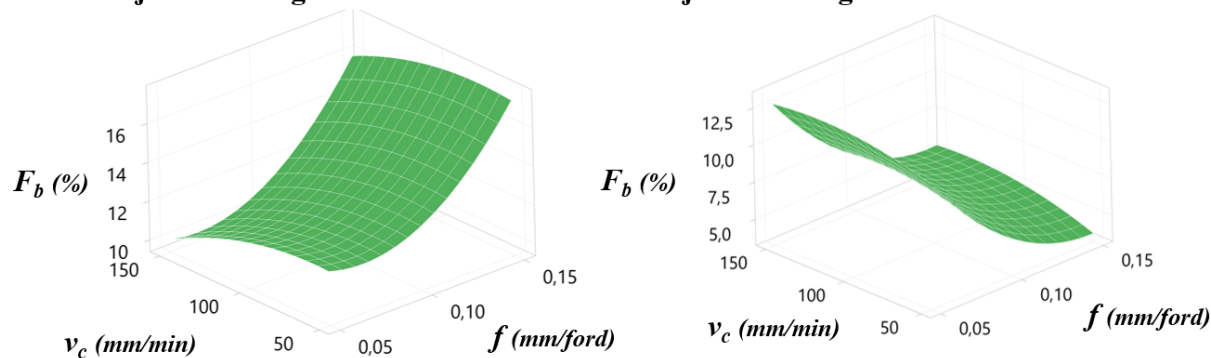
A táblázat áttekintésével már könnyebben véleményt tudunk alkotni a két anyag furatain jelentkező sorja mértékéről. Elmondható, hogy összességében, a BFRP anyag esetén a mérőszámok értéke általában magasabb, mint a CFRP esetén, de akadnak kivételek is (például 10-es, 11-es, 12-es sorszámú furatok). Mivel az egyik leggyakrabban alkalmazott, illetve viszonylag egyszerűen megkapható mérőszám a sorjafaktor, így válaszfelület módszerrel történt statisztikai elemzéseket erre a mérőszámra végeztem el. A 4.3-as és 4.4-es képletek a sorjafaktor és a kísérleti faktorok közti összefüggéseket adják meg a két anyag esetében (A továbbiakban ismertetett eredményekhez tartozó ANOVA táblázat a melléklet **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**ában található).

$$\text{BFRP} \quad F_b = 15,09 - 117f + 0,027v_c + 827f \cdot f + 0,000260v_c \cdot v_c - 0,064 f \cdot v_c \quad (4.3)$$

$$\text{CFRP} \quad F_b = 19,82 - 249f + 0,058v_c + 827f \cdot f + 0,000260v_c \cdot v_c - 0,064 f \cdot v_c \quad (4.4)$$

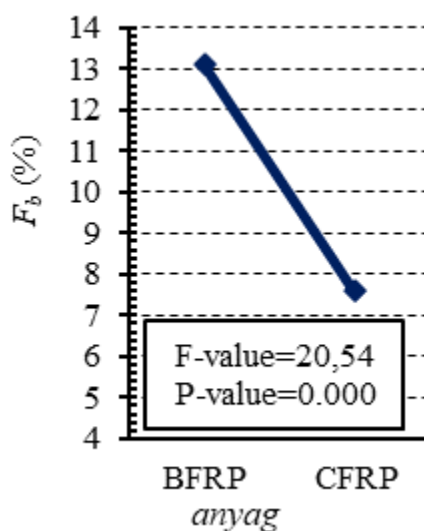
A forgácsolási erőhöz hasonlóan itt is elkészítettem a paraméterek által meghatározott válaszfelületeket, azonban a kapott eredmény már nem volt olyan informatív, mint a korábbi esetben. Az elkészített felületek a következő ábrán (4-6. ábra) figyelhetők meg.

Sorjafaktor megváltozása BFRP esetén Sorjafaktor megváltozása CFRP esetén



4-6. ábra. F_b megváltozása BFRP és CFRP anyagok esetén az f és a v_c függvényében

A két ábra alapján levonható következtetés az, hogy sem az előtolás, sem a forgácsolási sebesség változása nincs szignifikáns hatással a sorja kialakulására. Azonban a forgácsolási erőnél tapasztaltakhoz hasonlóan a vizsgált mérőszám esetében a tengelyeken található értékek már merőben eltérnek a két anyag esetén. A várható szignifikáns főhatás tehát ezek alapján mindössze az anyagtípus faktor. Ennek a főhatás diagramja látható a következő ábrán (4-7. ábra).



4-7. ábra. Anyag szignifikáns főhatása F_b -re

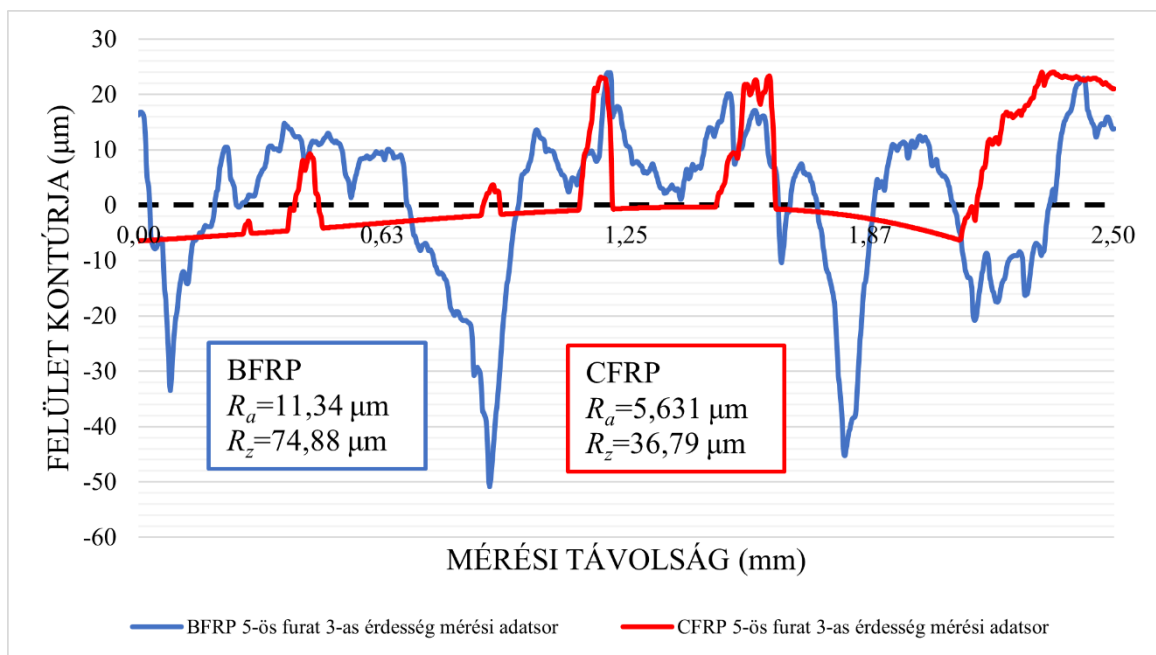
A sorja vizsgálatát követően almondható, hogy a CFRP kompozit forgácsolása során kisebb mértékben fog jelentkezni sorja. Viszont a forgácsolási paraméterek beállításával nem tudunk releváns hatással lenni a sorja kialakulására. Jelen szempontot vizsgálva, amennyiben konstrukciós és gazdasági szempontból a két anyag között nem tapasztalható releváns különbség, a sorja kialakulását figyelembe véve a CFRP anyag alkalmazása az előnyösebb.

4.3. Felületi minőség

A felületi minőség vizsgálata során két megközelítésből állapítottam meg tulajdonságokat a forgácsolt felületek mikrogeometriai tulajdonságairól. Az első módszer a furatok palástfelületének felületi érdességének mérése volt, míg a második a forgácsolt felületek vizuális megfigyelése volt pásztázó elektronmikroszkóp segítségével. Az első módszerrel a gyakorlatban gyakrabban alkalmazott mérőszámok meghatározásával vontam le következtetéseket a két kompozit forgácsolása után kialakult felület tulajdonságairól, míg a második módszerrel sokkal kisebb, akár elemi szálak forgácsolhatóságának kérdéseivel is foglalkoztam.

4.3.1. FELÜLETI ÉRDESSÉG

A vizsgált paraméterek közül talán legkevesebb gyakorlati jelentőséggel a felületi érdesség bír. Általában a kompozit alkatrészek forgácsolása során különböző szereléshez szükséges furatok, egyéb geometriai alakzatok elkészítése szükséges. A szerelés során a forgácsolt felület felületi érdessége nem egy kritikus szempont, viszont egy fontos és meghatározó tulajdonság, ha alapvetően egy anyag forgácsolhatóságát vizsgáljuk. A következőkben ismertetem a vizsgált felületek jellemzőit, a gyakorlatban leginkább alkalmazott mérőszámokat, illetve a leggyakrabban vizsgált átlagos felületi érdesség paraméterre elvégzett válaszfelület módszerrel történő statisztikai elemzéseket ismertetem. A következő ábrán (4-8. ábra) látható két azonos beállítással készült furat palástfelületének kontúrja.



4-8. ábra. Felületi érdesség mérés eredménye mindkét anyag esetén

A fenti ábrát megvizsgálva gyorsan egy általános képet alkothatunk a két anyag felületi topológiájának eltérő karakterisztikájáról. A BFRP anyag esetén a többirányba álló szálak miatt több emelkedés és esés figyelhető meg a mért felületen, míg a CFRP anyag esetén jóval kevesebb ilyen található. A forgácsolt mátrixanyag általában sima felületén csak az elvált kiálló szálak okoznak egyenetlenségeket a CFRP esetén.

A felületi érdesség mérése során nagyon fontos ismételt megemlíteni az egyirányban szál-erősített CFRP anyag anizotrópiájának témakörét. A furatokon akár szabad szemmel is kivehető, hogy a szálirány függvényében a furatok felületi minősége jelentősen eltér. A felületi integritással foglalkozó fejezetben számos ábra fogja ezt szemléltetni. Jelen vizsgálatok során nem volt céлом dedikált szálirányokhoz tartozó felületi minőségek meghatározása, mindössze egy átfogó képet szerettem volna alkotni a kapott felületek minőségéről, hogy össze tudjam hasonlítani a BFRP kompozittal, ahol ilyen hatás a felületen nem jelentkezik. Éppen ezért a mérések során a szálirányt elhanyagoltam és a felületen nagyjából egyelő léptékkal eltérve, de véletlenszerűen felvéve vizsgáltam részeit a furatok palástfelületének. Ez már kellő alapot nyújtott az összehasonlításához. Az egyes furatokhoz tartozó leggyakrabban alkalmazott mérőszámokról a 4-3. táblázatból tájékozódhatunk.

4-3. táblázat. Felületi érdesség mérőszámok értékei

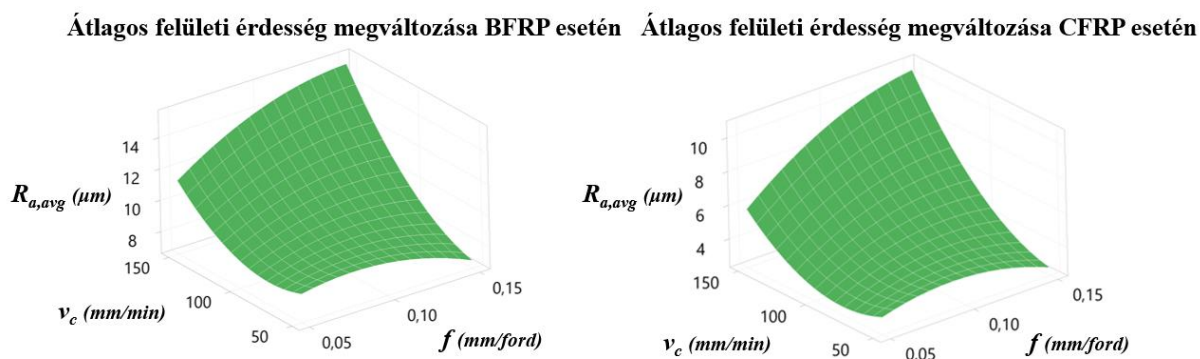
BFRP				CFRP			
Ssz.	$R_a (\mu m)$	$R_z (\mu m)$	$R_q (\mu m)$	Ssz.	$R_a (\mu m)$	$R_z (\mu m)$	$R_q (\mu m)$
1	7,31	47,89	9,34	1	2,16	26,02	3,77
2	8,07	52,83	10,41	2	5,90	44,91	7,63
3	5,75	35,64	7,19	3	3,41	20,87	4,55
4	10,80	59,02	13,14	4	5,02	30,33	6,30
5	8,85	58,83	11,06	5	5,30	37,78	6,82
6	12,33	71,22	16,29	6	5,88	34,69	7,55
7	12,88	77,92	16,37	7	7,33	41,84	9,08
8	17,93	90,64	21,54	8	4,06	25,12	4,91
9	11,41	69,15	14,22	9	3,67	18,43	4,40
10	10,30	64,07	13,28	10	7,01	45,87	9,59
11	10,22	64,92	13,58	11	6,07	38,90	7,61
12	6,73	54,28	9,21	12	4,75	30,13	5,91
13	10,06	60,79	13,12	13	5,45	25,55	6,26

A táblázat megvizsgálása után számszerű adatokkal is alá tudjuk támasztani, amit a szemrevételezés során tapasztalhatunk. Általánosságban elmondható, hogy a CFRP anyagok esetén jóval kisebbek a felületi érdességet meghatározó mérőszámok értékei. Ennek oka a korábban már taglalt tulajdonságokban lelhető fel, mint a paplan és egyirányban erősített, illetve a mátrix anyagok és szálanyagok közti különbségek. A továbbiakban a korábban bemutatott két paraméterhez hasonlóan ismertetem a válaszfelület módszerrel kapott eredményeket. A két anyaghoz tartozó, átlagos felületi érdesség értékek átlagát az előtolás és a forgácsolási sebesség függvényében leíró képletek olvashatók a 4.5-ös és 4.6-os képletekben. (A továbbiakban ismertetett eredményekhez tartozó ANOVA táblázat a melléklet **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**ában található)

$$\text{BFRP} \quad R_{a,avg} = 10,9 + 31,9f - 0,1199v_c - 360f \cdot f + 0,000610v_c \cdot v_c + 0,531 f \cdot v_c \quad (4.5)$$

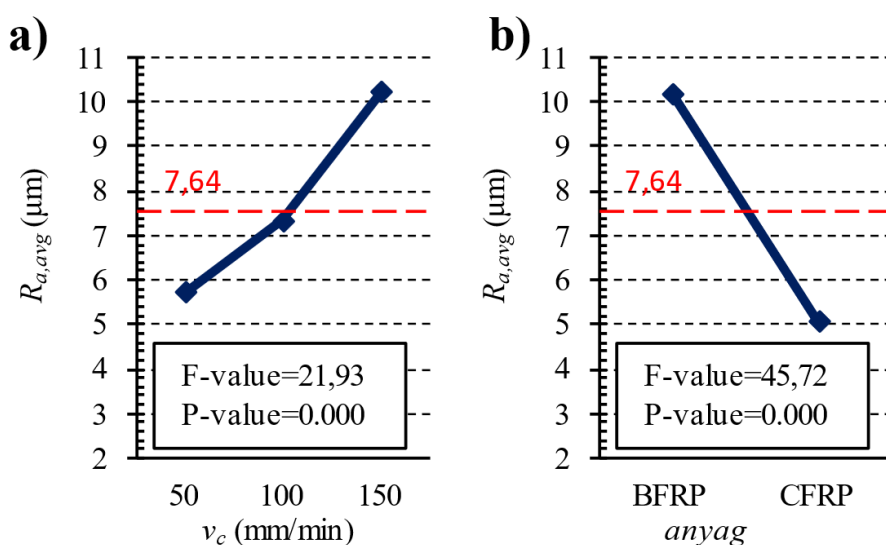
$$\text{CFRP} \quad R_{a,avg} = 5,63 + 39,7f - 0,1242v_c - 360f \cdot f + 0,000610v_c \cdot v_c + 0,531 f \cdot v_c \quad (4.6)$$

A két korábban ismertetett esethez hasonlóan a képletekből alapvetően nem tudunk gyorsan következtetéseket levonni a mérőszám és a faktorok közti viszonyról. Emiatt ebben az esetben is elkészítettem a faktorokhoz és a vizsgált mérőszámhoz tartozó válaszfelületeket, melyek a következő ábrán (4-9. ábra) láthatók.



4-9. ábra. $R_{a,avg}$ megváltozása BFRP és CFRP anyagok esetén az f és a v_c függvényében

A két felület a forgácsolási erőhöz hasonlóan itt is azonos karakterisztikákat mutat a két anyag esetén. A forgácsolási paraméterek közül a markánsabb hatása egyértelműen a forgácsolási sebességnek van, míg megfigyelhető, hogy az átlagos felületi érdességhez tartozó tengelyen ebben az esetben is eltérő értékek szerepelnek, így feltételezhetően szignifikáns hatása az anyagnak, illetve a forgácsolási sebességnek lesz az átlagos felületi érdesség tekintetében. A kiértékelt főhatás diagramok a következő ábrán (4-10. ábra) figyelhetők meg.



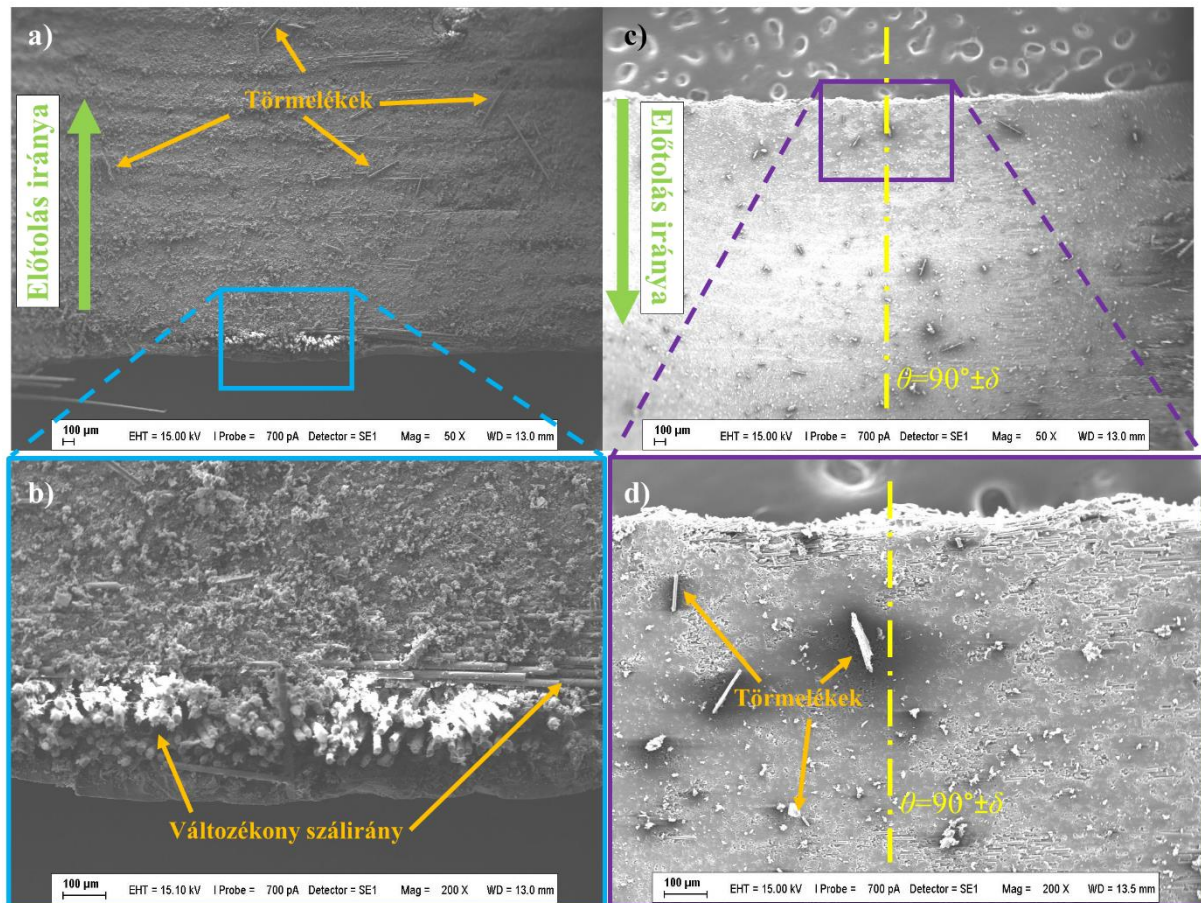
4-10. ábra. $R_{a,avg}$ szignifikáns főhatásai: **a)** forgácsolási sebesség hatása, **b)** anyagtípus hatása

A korábbi feltételezések ebben az esetben is fedték a valóságot. A főhatás diagrammokról leolvasható, hogy a forgácsolási sebesség növelésével a várható felületi is durvább lesz, illetve a CFRP anyag alkalmazásával jobb felületi érdességgel rendelkező felületet kapunk, mint a BFRP anyag esetén. Vagyis amennyiben a konstrukciós és gazdasági szempontok ismét megengedik a szabad választást, a felületi érdesség szempontjából előnyösebb a CFRP anyag használata alacsony forgácsolási sebesség alkalmazása mellett.

4.3.2. FELÜLETI INTEGRITÁS

Az eddigi vizsgálatokkal a készült furatok jellemzésére különböző mérőszámokat határoztam meg, amelyeknek a bemeneti faktorok függvényében mutatott változásai alapján igyekeztem következtetéseket levonni a két anyag egymáshoz viszonyított forgácsolhatóságáról. A következő fejezetben egy ettől eltérő módszert alkalmaztam, ahol a számszerű adatok meghatározása helyett a forgácsolt felületek nagy nagyításban készített képei alapján vontam állapítottam meg a kialakult felületek jellegéről, a forgácsolási és tönkremeneteli mechanizmusokról, illetve a munkadarabok gyártási anyagminőségéről is. A következőkben a pásztázó elektronmikroszkóppal készített képeket mutatom be, melyeken a lényeges tulajdonságokat (például előtolás iránya, szálvágási szög „ θ ” értéke, stb.) illetve jellemző elemeket (például törmelékek, üregek, töretfelületek, stb.) külön feltüntettem.

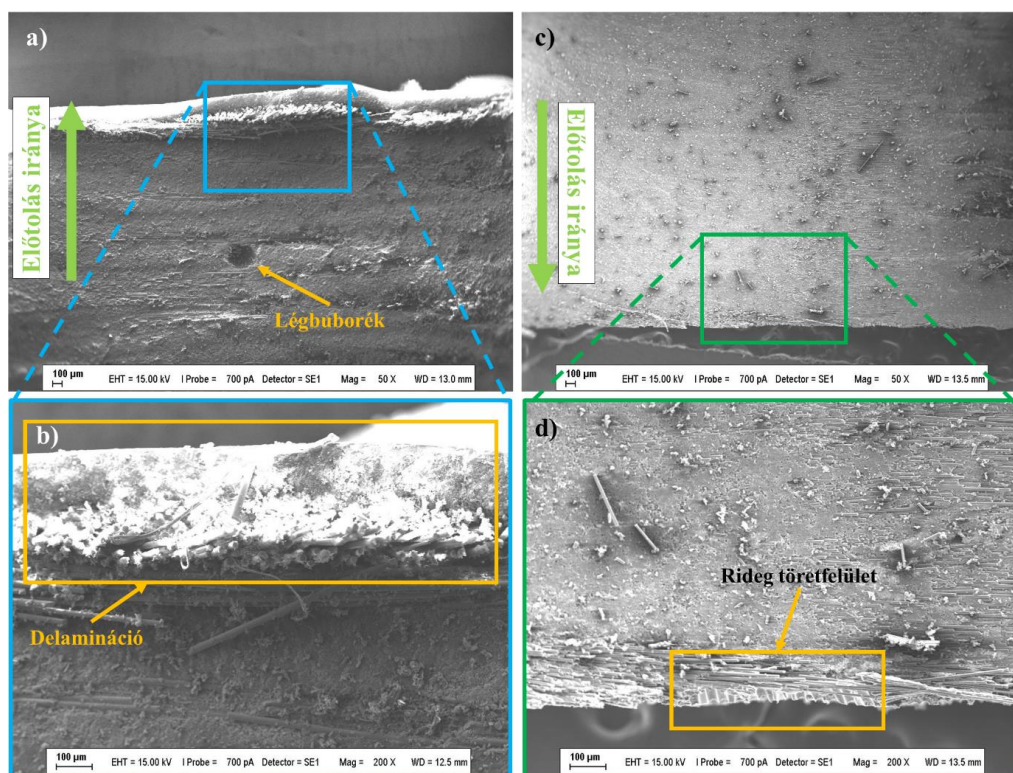
Az első képsorozaton (4-11. ábra) a furatoknak azon oldalát vizsgálom, amelyik irányából a szerszám behatolt az anyagba. Ezt a képleíráson belépő oldalként neveztem el. A 4-11. ábra a) és c) részén jól megfigyelhető egy általános két a két anyagon kialakult forgácsolt felületek minőségét illetően. Elmondható, hogy összességében a CFRP anyag forgácsolt felülete kevésbé érdes, viszont a szálvágási szög változásával a felület tulajdonságai is erősen változnak, míg a BFRP anyag felültének tulajdonságai a felületen nagyjából azonosak, azonban egy érdekes, több hibával rendelkező felület jellemzi az anyagot. Törmelékek jelenléte mindkét anyag esetében megfigyelhető. A BFRP anyag esetén a paplan struktúrából adódóan a munkadarab szélén a szálak a furat beleső része felé mutatnak, míg a CFRP anyag esetén ez a jelenség nem mutatkozik meg. Ez részben magyarázatot ad arra, hogy a BFRP anyag esetén miért volt jellemzőbb a magasabb fokú sorja képződés. A CFRP anyag esetén, habár a felület belső részének a struktúrája nagyban függött a száliránytól, az anyag szélén nem tapasztalható nagy mértékű eltérés.



4-11. ábra. Furatok belépő oldali, pásztázó elektronmikroszkóppal készült képei: **a)** BFRP anyag belépő oldal 50-szeres nagyításban, **b)** BFRP anyag belépő oldal 200-szoros nagyításban, **c)** CFRP anyag belépő oldal 50-szeres nagyításban, **d)** CFRP anyag belépő oldal 200-szoros nagyításban

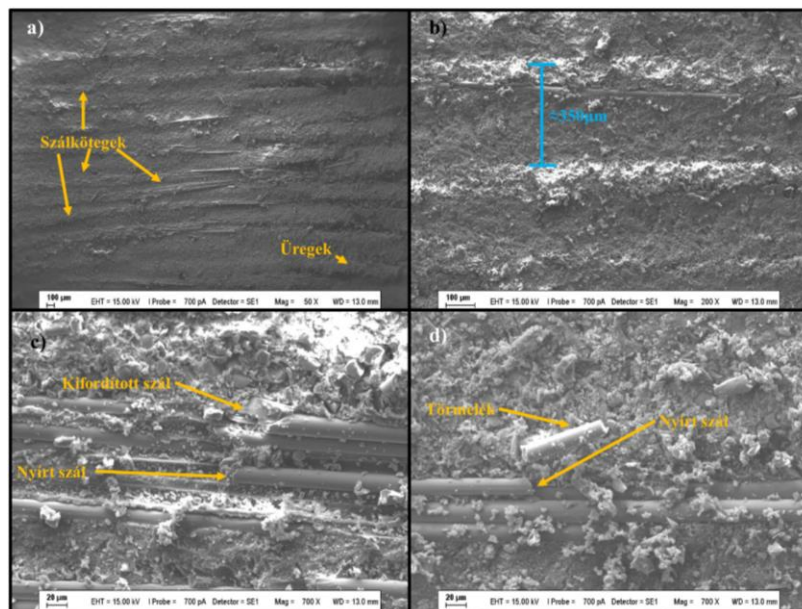
A második képsorozaton (4-12. ábra) a furatoknak azon oldalát vizsgálom, amelyik irányából a szerszám kilép az anyagból. Ezt a képleíráson kilépő oldalként neveztem el. A szálerősített kompozit anyagok fúrása során általában a nagyobb anyaghibák a furat ezen oldalán szoktak keletkezni. Ez jelen esetben is így volt. Egy ettől független gyártási hiba a 4-12. ábra a) részén megfigyelhető egy légbuborék formájában. Ennek a hibának a feltehető oka, hogy a kézi laminálás során nem sikerült az összes levegőt eltávolítani az anyagból, így a mátrixanyag térhálósodása során az ott maradt ezzel anyagihiányt okozva az anyag belső részén. A CFRP anyag egy tömeggyártási technológiával készült anyag, így azon esetben ilyen hibák előfordulás kevésbé jellemző, mint a kézi laminálás esetében. A 4-12. ábra b) és d) részein azonban már tipikusan kilépő oldali hibákat figyelhetünk meg, a BFRP anyag esetén delaminációt, míg a CFRP anyag esetén a mátrixanyag egy rideg töretfelületét. A BFRP anyag esetén tapasztalható delamináció egy a szálerősített polimer kompozitra jellemző hibafajta. Oka, hogy az erősítőanyag rétegei

közti kapcsolat nem tud elegendő merevséget biztosítani ahhoz, hogy a szerszám elforgácsolja, hanem az előtolás irányú erő tolja maga előtt az anyagot, a rétegek szétválnak és a kapott forgácsolt felületen a szétvált rétegek ilyen formában maradnak meg a forgácsolás megszűnése után. Ez a jelenség is összefüggésben állhat a sorja képződéssel, illetve a belépési oldalnál tapasztalhatóan itt is a szálak a furat belső része felé mutatnak. A CFRP anyag esetén a rideg töretfelület a vinil-észter mátrixanyag ridegségéből adódik. A töretfelület környékén valószínűleg kevesebb erősítőszál lehetett és több mátrixanyag, így a forgácsolás során az előtolás irányú erő a maradék anyagot letörte ahelyett, hogy a szerszám el tudta volna forgácsolni azt. Kilépő oldal esetén is hasonló megállapításokat tehetünk, mint a belépő esetén. A furat belső részének a felülete függ a száliránytól CFRP esetén, míg BFRP esetén nem. Azonban a kilépés közvetlen környezetének tulajdonságai itt sem függenek a száliránytól. A belső részek hasonlóak a belépési oldalhoz közeli belső részhez. A BFRP anyag felülete érdekesebb, több törmelék és kiálló szál figyelhető meg, mint a CFRP esetén, illetve a felület minősége a CFRP esetén nagyban függ a szálvágási szögtől.



4-12. ábra. Furatok kilépő oldali, pásztázó elektronmikroszkóppal készült képei: **a)** BFRP anyag kilépő oldal 50-szeres nagyításban, **b)** BFRP anyag kilépő oldal 200-szoros nagyításban, **c)** CFRP anyag kilépő oldal 50-szeres nagyításban, **d)** CFRP anyag kilépő oldal 200-szoros nagyításban

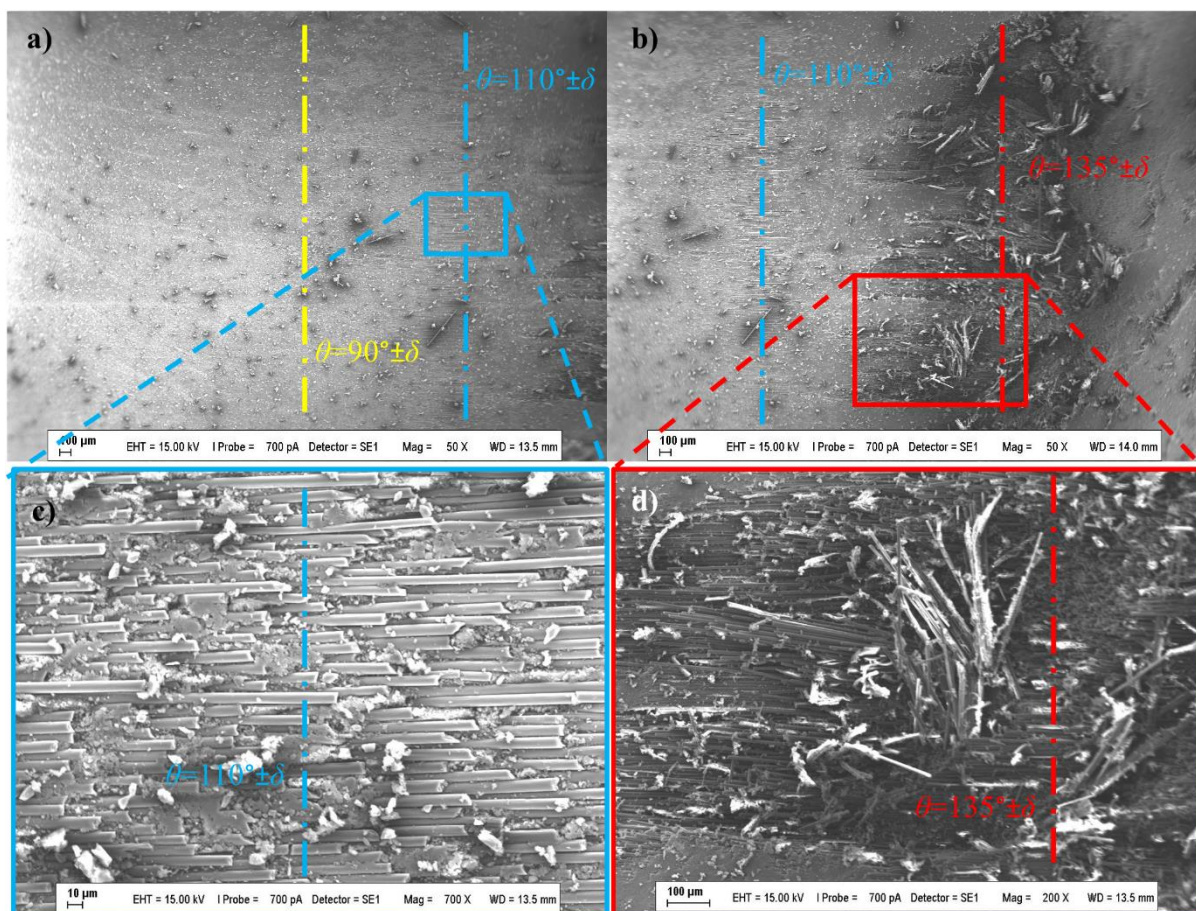
A 4-13. ábra mutatja be a BFRP anyag belső részeit 50-szeres, 200-szoros és 700-szoros nagyításban. Ez utóbbi során már elemi szálak és a mátrixanyag közötti adhézió is megfigyelhető. A négy ábrán megfigyelhető látható részekben a szerszám minden pontban azonos mennyiségű anyagot távolít el. Érdekes jelenség a 4-13. ábra a) és b) részein megfigyelhető sávok, amelyek az erősítő paplan rétegei. Habár a paplan struktúra esetén nincs számottevő hatása a száliránynak, itt annyiban megfigyelhető, hogy a forgácsolás során bizonyos részeiben az anyagnak a szerszám elvágja az erősítő szálakat, bizonyos részeken leforgácsolja a szálakról az erősítőanyagot és a szálkötegek láthatóvá válnak, bizonyos részeken pedig a szálak kihúzódnak és üregek alakulnak ki a felületen. Ezen részek nem okoznak nagyban eltérő felületi struktúrát, összességében egy hasonló minőségű felületet kapunk mindegyik esetben, illetve az anyag gyakorlati felhasználása során ez a jelenség nem okoz semmilyen jelentős hatást. Az 4-13. ábra c) és d) részein már az elemi szálak és a mátrixanyag és a szál közötti adhézió is megfigyelhető. Az elemi szálakon megfigyelhető a forgácsolással kialakított általában nyírt felület. Viszont egy érdekes jelenség is, mely során a szerszám a szálát nem nyírt, hanem behatolt a szálba és nem a teljes keresztmetszet került elvágásra, hanem a szál egy részét csak kifordította. Ennek a jelenségnek a magyarázata a forgácsolás és a szálirány kapcsolatában kereshető. Viszont továbbra is elmondható, hogy a paplan erősítőstruktúrájú BFRP esetén ennek a száliránynak jelentős befolyásoló hatása se a forgácsolhatóságra, se a gyakorlati felhasználhatóságra nincs, de mindenképpen érdekes jelenség.



4-13. ábra. BFRP furat belső része: **a)** BFRP furat belső része 50-szeres nagyításban, **b)** BFRP furat belső része 200-szoros nagyításban, **c)** BFRP furat belső része 700-szoros nagyításban, **d)** BFRP furat belső része 700-szoros nagyításban

A 4-14. ábra mutatja be a CFRP anyag belső részeit 50-szeres, 200-szoros és 700-szoros nagyításban. Itt is az előző példához hasonlóan minden pontban azonos az elméleti forgácskeresztmetszet, illetve a nagy nagyításnak köszönhetően itt is megfigyelhető az elemi szálak és a mátrixanyag közti adhézió is akár. Ebben az esetben elmondható, hogy a szálvágási szög jelentős hatással van a forgácsolás után kialakult felületre. Az egyirányban szálerősített CFRP anyagok forgácsolásával számos kutatás foglalkozik, így nem célom a megfigyelt jelenségeket nagy mélységben megmagyarázni, azonban a forgácsolt felület tulajdonságai miatt pár dolgot ki szeretnék emelni. Az ábrákon balról jobbra haladva igen jelentős változás figyelhető meg a forgácsolt felület minőségében. Ennek oka a szálvágási szög változása. 90° -os szálvágási szög esetén az erősítőszálak elnyírásra kerülnek és nem fejtenek ki különösebb hatást a felületi minőségre. Ez a 4-14. ábra a) részén megfigyelhető. Az ábrákon jobbra haladva a szálvágási szög egyre nő, a 110° körüli értéknél a forgácsolás során BFRP anyag egyes részeihez hasonlóan itt is csak a mátrixanyag eltávolítása történik meg és az elemi szálak jól megfigyelhetők. Jellemzően itt is nyírt felületeket lehet megfigyelni. Mivel a szénszálak átmérője kisebb, mint a bazaltszálaké, itt a felület vizsgálata során nem találtam kifordított szálakat. A 4-14. ábra b) és d) részein az ábrának viszont egy egész más tulajdonságokkal rendelkező részét figyelhetjük meg a forgácsolt felületnek. A 135° -os szálvágási szög környékén forgácsolás során a szerszám a az erősítő szálakat elvágja, majd tolja maga előtt és kifordítja a mátrixanyagból, ezzel egy rendkívül érdes egyenetlen felületet létrehozva. Ez a rész felelős a forgácsolási erő kiértékelés során már taglalt jelenséghez, hogy a CFRP anyag forgácsolása során sokkal nagyobb szórással rendelkeznek a mért adatsorok. Ennek oka, hogy a 135° körüli tartományon kívül az anyag sokkal könnyebben forgácsolható, mint ebben a tartományban. Amikor a szerszám elkezd tolni maga előtt a szálakat, sokkal nagyobb erőhatások lépnek fel, mint a többi esetben. Így erős túlzással ugyan, de úgy is tekinthetünk erre, mint egyfajta megszakított forgácsolásra. Továbbá ez a terület ad magyarázatot az érdeességmérésnél leírtakra is, hogy miért ennyire eltérő a felületi érdeesség a különböző részein a furatnak. A CFRP anyag esetén a legjobb felületi minőséget a 90° -nál kisebb szálvágási szögektől kapjuk. Ezeken a területeken a törmelékeket leszámítva egy nagyon sima, egységes felület figyelhető meg. Ennek oka az, hogy a forgácsolás során a szerszám a mátrixanyagot elkeni a felületen ezzel hozza létre ezt a nagyon sima struktúrát. A 4-13. ábra c) részét, illetve a 4-14. ábra c) részét megvizsgálva elmondható, hogy a két kompozit esetén a mátrixanyag és az erősítő szálak közötti adhézió mértéke nagyon hasonló. Vagyis a gyártástechnológiák közti különbség hatása nem volt releváns tényező ebből a szempontból. Többször kitértem a dolgozat során, hogy a leggyakoribb oka a gyakorlatban a polimerkompozit anyagok

fúrásának a szereléshez szükséges furatok kialakítása. Elmondható, hogy ezeknek a hatásoknak a gyakorlati felhasználás során jelentős hatásuk nincs.



4-14. ábra. CFRP furat belső része: **a)** CFRP furat belső része 50-szeres nagyításban ($\theta \approx 90-110^\circ$), **b)** CFRP furat belső része 50-szeres nagyításban ($\theta \approx 110-135^\circ$), **c)** CFRP furat belső része 700-szoros nagyításban ($\theta \approx 110^\circ$), **d)** BFRP furat belső része 200-szoros nagyításban ($\theta \approx 135^\circ$)

A mikrogeometriai vizsgálatok elvégzését összefoglalva elmondható, hogy a két kialakult felület közti különbségek fő okai, a struktúra, a mátrixanyag és a szálak átmérője közti különbségek. A CFRP anyag esetén egy kevésbé érdes felületet kapunk, mint a CFRP esetén, a 135° -os szálvágási szög körüli régiót leszámítva. A vinil-észter mátrixanyag esetén volt jellemző volt az anyag elkenése, míg az epoxi esetén ez nem volt jellemző, sokkal nagyobb szemcsék voltak megfigyelhetők. Illetve a szálakon a CFRP esetén minden esetben nyírt felület volt a megfigyelhető, míg a BFRP esetén a vastagabb szálak miatt láthatóak voltak kifordított elemi szálak is.

4.4. Összehasonlítás, optimalizálás és kitekintés

A következőkben az eddig megvizsgált paramétereket összegzem, illetve optimumkeresést végzek, hogy meghatározzam az optimális paraméter szinteket. A két anyag közti hasonlóságok és különbségek összefoglalásában segít az 4-4. táblázat.

4-4. táblázat. Vizsgált paraméterek összefoglalása anyag szerint

TULAJDONSÁGOK	BFRP	CFRP
FORGÁCSOLÁSI ERŐ	Minden esetben kedvezőbb, egyenletesebb jel	Minden esetben kevésbé kedvező, nagy szórású jel
SORJA	Általában kevésbé kedvező	Általában kedvezőbb
FELÜLETI ÉRDESSÉG	Minden esetben kevésbé kedvező, de egyenletes	Minden esetben kedvezőbb, de irányfüggő
MÁTRIXANYAG	Általában érdekesebb, nagyobb szemcsék	Általában simább, elkent felület
SZÁLVÁGÁS	Szinte mindig nyírt felület	Irányfüggő, nyírt felület vagy kitolt szálak

A táblázatból kiolvasható, hogy mindkét anyag rendelkezik kedvezőbb, illetve kevésbé kedvező tulajdonságokkal, így kizárólag ebből nem lehet meghatározni az optimális anyagot. Ahhoz, hogy megtudjam melyik anyagot előnyösebb alkalmazni, illetve milyen előtolás, illetve forgácsolási sebesség szintek mellett, optimumkeresést kell végeznem. Ezt a módszert csak a mérőszámokkal rendelkező paraméterekre tudom elvégezni, vagyis azokat a paramétereket felhasználva, amelyekkel korábban statisztikai elemzéseket végeztem. Ezek a paraméterek az átlagos axiális erő, a sorjafaktor és az átlagos felületi érdeesség voltak. Az optimumkeresés során az átlagos forgácsolási erő és a sorjafaktor minimalizálására törekszünk, míg az átlagos felületi érdeességnél a $6,3\mu\text{m}$ -es célértéket keresem, hiszen ez a paramétert nem szükséges minimalizálni. Mivel a gyakorlati alkalmazások során a felületi érdeesség bír a legkisebb jelentőséggel, így az optimumkeresés során 0,5-es értékű súlytényezőt alkalmaztam az átlagos felületi érdeesség paraméterre, míg az átlagos axiális erő és a sorjafaktor súlytényezőjének az értéke 2 volt.

A bementi paraméterek alapján az optimális anyag a forgácsolás során a BFRP anyag $0,5\text{ mm/min}$ értékű előtolás és 150 m/min forgácsolási sebesség mellett. Így elmondható, hogy kompozit anyagok alkalmazása során, ha a BFRP és a CFRP anyagok között konstrukciós és

gazdasági szempontból nincs különbség akkor a BFRP anyag alkalmazása optimális forgácsolhatóság szempontjából. A forgácsolási paraméterek megválasztása során elsősorban a mérvadó mindig az adott szerszámgyártó katalógusában található érték legyen, de az optimális várható eredmény szempontjából törekedjünk a lehető legkisebb előtolás és a lehető legmagasabb forgácsolási sebesség értékeket választani a megmunkálás beállításainak.

Az összehasonlító vizsgálat során tehát vizsgáltam a forgácsolási erőt, a sorját, illetve a felületi minőséget. Ezek a vizsgálatok a forgácsolhatósági összehasonlíthatósághoz alapvetően elegendő információval szolgálnak azonban, ha további tulajdonságokra, illetve a most vizsgált paraméterek kialakulásának okaira mélyrehatóbb választ szeretnénk kapni, további vizsgálatok elvégzése lehet szükséges. A kutatás a jövőben kiegészíthető lehet a két különböző anyagú munkadarabon szakító, illetve hajlító vizsgálatok elvégzése, melyekkel választ kaphatok a most elvégzett és kiértékelt vizsgálatok okaira.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatásom során BFRP és CFRP kompozitok összehasonlító forgácsolhatósági vizsgálatát végeztem el fúrási kísérletek segítségével. A megfelelő szakirodalmi tájékozódás után elkészítettem a szükséges kísérletterveket, illetve BFRP kompozit munkadarabot legyártottam. A kísérletek során a forgácsolási erő, illetve nyomatékértékeket mértem, majd a kísérletek után a furatokon kialakult sorját és felületi minőséget vizsgáltam. A sorját optikai mikroszkóp, míg a felületi minőséget felületi érdességmérés és pásztázó elektronmikroszkóp segítségével dokumentáltam. A forgácsolási erő kiértékelésére Python programozási nyelv több könyvtárának felhasználásával meghatároztam az adatsorokat leginkább jellemző mérőszámokat. A furatokon jelentkező sorja mértékének meghatározásához az optikai mikroszkóppal készített fotókat egy Wolfram Mathematica szoftverben írt program segítségével feldolgoztam, így megkaptam a szakirodalomban leggyakrabban alkalmazott sorjamérőszámokat. A furatokon végzett felületi érdességméréssel meghatároztam a gyakorlatban leggyakrabban alkalmazott felületi érdesség mérőszámokat. A három fent említett mérőszám csoportból egyet-egyet kiválasztva válaszfelület módszer alkalmazásával statisztikai elemzéseket végeztem, hogy meghatározzam a furatok tulajdonságait meghatározó főhatásokat. A furatok felületének mikrogeometriai vizsgálatai során további tulajdonságokat tudtam megállapítani a két anyag forgácsolása során végbemenő folyamatokról. Az egyes mérőszámokon elvégzett statisztikai elemzések után, a három mérőszám együttesét vizsgálva optimumkeresést végeztem, majd anyagválasztási és technológiai ajánlásokat tettem. A kutatás végeztével megállapítottam, hogy amennyiben az anyagválasztás során konstrukciós és gazdasági szempontból a BFRP és a CFRP anyagok egyenértékűnek tekinthetők, úgy kizárólag a forgácsolhatóságot figyelembe véve a BFRP anyag alkalmazása előnyösebb. Megállapítottam, hogy furatok készítése során a szerszámgyártó által megadott katalógus ajánlásai szerinti határokon belül, a furatok minőségének és a szerszámra ható hatások optimális szintje érdekében alacsony előtolást és nagy vágósebességet célszerű alkalmazni.

Az elvégzett munkámmal hozzájárultam a BFRP kompozitok alkalmazhatóságának kutatásához. A kapott eredmények is mutatják, hogy a jelen körülmények között a BFRP kompozitoknak van létjogosultsága, mint alkalmazhatóság, mint fenntarthatóság szempontjából. Habár a világot jelenleg talán leginkább foglalkoztató kérdésének, a fenntarthatóság kérdésének megoldásához közvetlenül nem járul hozzá, azonban a kérdés megoldásának irányába mutató törekvéseknek nagymértékben eleget tesz a dolgozatban ismertetett kutatás.

A jövőben a kutatás kiegészítésének/továbbfejlesztésének lehetőségei:

- az alkalmazott anyagon további anyagszerkezeti vizsgálatok elvégzése, mellyel bővebb magyarázatot adhatnék a dolgozatban ismertetett jelenségekre,
- a gyakorlatban már alkalmazott bazalt/üveg, illetve egyéb hibrid polimerkompozitok forgácsolhatóságának vizsgálata,
- egyéb megújuló (például bambusz, banán, dió vagy egyéb növényi eredetű szálerősítésű) polimerkompozitok forgácsolhatósági vizsgálata,
- forgácsképződési mechanizmusok ortogonális kísérletekkel történő vizsgálata.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Wang, R., Zheng, S., Zheng, Y., „Introduction to polymer matrix composites” *Polymer Matrix Composites and Technology*, 1–548., 2011. doi:10.1533/9780857092229.1
- [2] Czigány, T., „Basalt Fiber Reinforced Hybrid Polymer Composites”, *Materials Science Forum*, 473-474, 59–66., 2005. doi:10.4028/www.scientific.net/msf.473-474.59
- [3] Czigany, T., „Trends in fiber reinforcements—the future belongs to basalt fiber”, *Express Polymer Letters*, 1, 59, 2007. doi:10.3144/expresspolymlett.2007.11
- [4] Gots, V. I., Berdnyk, O. Y., Rogozina, N. O., Maystrenko, A. A., „Production of modified basalt fibre for heat-insulating products manufacturing”, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 708, 012082, 2019. doi: 10.1088/1757-899x/708/1/012082.
- [5] Tamás, P., Czigány, T., „Bazaltszövettel erősített mono- és hibridkompozitok, mint a szélerőművek ígéretes anyagai”, *MŰANYAG ÉS GUMI*, 51 (5). pp. 194-199, 2014.
- [6] Ismail, S. O., Dhakal, H. N., Popov, I., Beaugrand, J., „Comprehensive study on machinability of sustainable and conventional fibre reinforced polymer composites”, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(4), 2043–2052., 2016. doi:10.1016/j.jestch.2016.07.010
- [7] Hejjaji, A., Singh, D., Kubher, S., Kalyanasundaram, D., Gururaja, S., „Machining damage in FRPs: Laser versus conventional drilling”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 82, 42–52., 2016 doi:10.1016/j.compositesa.2015.11
- [8] Geier, N., Szalay, T., Takács, M., „Analysis of thrust force and characteristics of uncut fibres at non-conventional oriented drilling of unidirectional carbon fibre-reinforced plastic (UD-CFRP) composite laminates”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018. doi:10.1007/s00170-018-2895-8
- [9] Sonkar, V., Abhishek, K., Datta, S., Mahapatra, S. S., „Multi-objective Optimization in Drilling of GFRP Composites: A Degree of Similarity Approach”, *Procedia Materials Science*, 6, 538–543., 2014. doi:10.1016/j.mspro.2014.07.068
- [10] Navarro-Mas, M. D., Meseguer, M. D., Lluch-Cerezo, J., García-Manrique, J. A., „Comparison of Different Parameters to Evaluate Delamination in Edge Trimming of Basalt Fiber Reinforced Plastics (BFRP)” *Materials*, 13(23), 5326, 2020. doi:10.3390/ma13235326
- [11] Davim, J. P., „Machinability of Advanced Materials”, *Wiley*, 2014. doi:10.1002/9781118576854
- [12] Holmes, M., „Natural fibre reinforced plastic blades used for rooftop wind turbine”, 2014., <https://www.materialstoday.com/carbon-fiber/news/natural-fibre-reinforced-plastic-blades-used-for/>

- [13] Savage, G., „Formula 1 Composites Engineering”, *Engineering Failure Analysis*, 17(1), 92–115., 2009. doi:10.1016/j.engfailanal.2009.04
- [14] Zuccarello B. „Static and Dynamic Mechanical Properties of Eco-friendly Polymer Composites”, In: *Inamuddin, Thomas S., Kumar Mishra R., Asiri A.: Sustainable Polymer Composites and Nanocomposites*. Springer, 2019, doi:10.1007/978-3-030-05399-4_9
- [15] Jamshaid H. „Basalt fiber and its applications” *J Textile Eng Fashion Technol.* 2017;. doi:10.15406/jteft.2017.01.00041
- [16] Jamshaid, H., Mishra, R., „A green material from rock: basalt fiber – a review”, *The Journal of The Textile Institute*, 107(7), 923–937., 2015 doi:10.1080/00405000.2015.1071940
- [17] Roslan, S. A. H., Rasid, Z. A., Hassan, M. Z., „Bamboo reinforced polymer composite - A comprehensive review”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 344, 012008, 2018, doi:10.1088/1757-899x/344/1/012008
- [18] Li, Z., Ma, J., Ma, H., Xu, X., „Properties and Applications of Basalt Fiber and Its Composites”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 186, 012052, 2018, doi:10.1088/1755-1315/186/2/012052
- [19] Fiore, V., Scalici, T., Di Bella, G., Valenza, A., „A review on basalt fibre and its composites”, *Composites Part B: Engineering*, 74, 74–94., 2015, doi:10.1016/j.compositesb.2014.12
- [20] <https://www.sandatlas.org/basalt/>
- [21] Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K. Y., Park, S.-J., Hui, D., „A short review on basalt fiber reinforced polymer composites”, *Composites Part B: Engineering*, 73, 166–180., 2015., doi:10.1016/j.compositesb.2014.
- [22] Czigány T, Vad J, Pölöskei K. „Basalt fiber as a reinforcement of polymer composites”, *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*. 2005;49:3-14.
- [23] Deák, T., Czigány, T., „Chemical Composition and Mechanical Properties of Basalt and Glass Fibers: A Comparison”, *Textile Research Journal*, 79(7), 645–651., 2009. doi:10.1177/0040517508095597
- [24] Lapena, M. H., Marinucci, G., „Mechanical Characterization of Basalt and Glass Fiber Epoxy Composite Tube”, *Materials Research*, 21(1)., 2017. doi:10.1590/1980-5373-mr-2017-0324
- [25] Lopresto, V., Leone, C., De Iorio, I., „Mechanical characterisation of basalt fibre reinforced plastic”, *Composites Part B: Engineering*, 42(4), 717–723., 2011. doi:10.1016/j.compositesb.2011.01

- [26] Carmisciano, S., Rosa, I. M. D., Sarasini, F., Tamburrano, A., Valente, M. „Basalt woven fiber reinforced vinylester composites: Flexural and electrical properties”, *Materials Design*, 32(1), 337–342., 2011. doi:10.1016/j.matdes.2010.06.042
- [27] Czigány, T., „Special manufacturing and characteristics of basalt fiber reinforced hybrid polypropylene composites: Mechanical properties and acoustic emission study”, *Composites Science and Technology*, 66(16), 3210–3220., 2006. doi:10.1016/j.compscitech.2005.07
- [28] Branston, J., Das, S., Kenno, S. Y., Taylor, C., „Mechanical behaviour of basalt fibre reinforced concrete”, *Construction and Building Materials*, 124, 878–886. 2016. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08
- [29] Mason, K., „The still-promised potential of basalt fiber composites”, *CompositesWorld*, 2019.
- [30] <https://basfiber.com/application/automotive>
- [31] Dawon, J., Min E., Jiwon C., Se Y., Sungho L., „Strategies for the production of PAN-Based carbon fibers with high tensile strength” *Carbon*, 186, 644-677, 2021. doi: 10.1016/j.carbon.2021.10.061
- [32] Chand, S., „Review Carbon fibers for composites”, *Journal of Materials Science*, 35, 1303–1313, 2000. doi:10.1023/A:1004780301489
- [33] Choi, D., Kil, H.-S., Lee, S., „Fabrication of low-cost carbon fibers using economical precursors and advanced processing technologies”, *Carbon*, 2018. doi:10.1016/j.carbon.2018.10.028
- [34] Gardiner, G., „First all-electric production yacht features carbon fiber construction”, 2019. <https://www.compositesworld.com/articles/first-all-electric-production-yacht-features-carbon-fiber-construction>
- [35] Adee, S., „WINNER: THE REVOLUTION WILL BE PROSTHETIZED”, 2009. <https://spectrum.ieee.org/winner-the-revolution-will-be-prosthetized>
- [36] Pardini, L. C., Manhani, L. G. B., „Influence of the Testing Gage Length on the Strength, Young’s Modulus and Weibull Modulus of Carbon Fibres and Glass Fibres”, *Materials Research*, 5(4), 411–420., 2002. doi:10.1590/s1516-14392002000400004
- [37] Bhoopathi, R., Ramesh, M., Naveen Kumar, M., Sanjay Balaji, P., Sasikala, G., „Studies on mechanical strengths of hemp-glass fibre reinforced epoxy composites”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 402, 012083., 2018. doi:10.1088/1757-899x/402/1/012083
- [38] Gale, W. F., Totemeier, T. C., „Smithells Metals Reference Book”, *Butterworth-Heinemann*, 2004. doi:10.1016/b978-075067509-3/50033-6
- [39] Grzesik, W., Machinability of Engineering Materials. *Handbook of Manufacturing Engineering and Technology*, 241–264., 2017. doi:10.1016/b978-0-444-63711-6.00013

- [40] Teti, R., „Machining of Composite Materials”. *CIRP Annals*, 51(2), 611–634., 2002. doi:10.1016/s0007-8506(07)61703-X
- [41] <http://www.forgacsolaskutatas.hu/elmelet/forgacsolhatosag/>
- [42] Uhlmann, E., Sammler, F., Richarz, S., Heitmüller, F., Bilz, M., „Machining of Carbon Fibre Reinforced Plastics”, *Procedia CIRP*, 24, 19–24., 2014. doi:10.1016/j.procir.2014.07.135
- [43] Rajakumar, I. P. T., Hariharan, P., Vijayaraghavan, L., „Drilling of carbon fibre reinforced plastic (CFRP) composites - a review”, *International Journal of Materials and Product Technology*, 43(1/2/3/4), 43., 2012. doi:10.1504/ijmpt.2012.047647
- [44] Zadafiya, K., Bandhu, D., Kumari, S., Chatterjee, S., Abhishek, K., „Recent trends in drilling of carbon fiber reinforced polymers (CFRPs): A state-of-the-art review”, *Journal of Manufacturing Processes*, 69, 47–68., 2021. doi:10.1016/j.jmapro.2021.07.029
- [45] Wan, M., Li, S.-E., Yuan, H., Zhang, W.-H., „Cutting force modelling in machining of fiber- reinforced polymer matrix composites (PMCs): a review”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018. doi:10.1016/j.compositesa.2018.11
- [46] Hintze, W., Clausen, R., Schütte, C., Kroll, K., „Evaluation of the total cutting force in drilling of CFRP: a novel experimental method for the analysis of the cutting mechanism”, *Production Engineering*, 12(3-4), 431–440, 2018. doi:10.1007/s11740-018-0807-2
- [47] Poór, D. I., Geier, N., Pereszlai, C., Xu, J., „A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation, characterisation and challenges”, *Composites Part B: Engineering*, 223, 109155, 2021. doi:10.1016/j.compositesb.2021.10
- [48] Kim, J., Kim, Y.-B., Seo, J. W., Park, H. W., „Deburring drilled holes in CFRP composites with large pulsed electron beam (LPEB) irradiation”, *Journal of Manufacturing Processes*, 40, 68–75, 2019. doi:10.1016/j.jmapro.2019.03.001
- [49] Aurich, J. C., Dornfeld, D., Arrazola, P. J., Franke, V., Leitz, L., Min, S., „Burrs— Analysis, control and removal”, *CIRP Annals*, 58(2), 519–542, 2009. doi:10.1016/j.cirp.2009.09.004
- [50] Lee, J. H., Ge, J. C., & Song, J. H., „Study on Burr Formation and Tool Wear in Drilling CFRP and Its Hybrid Composites”, *Applied Sciences*, 11(1), 384, 2021. doi:10.3390/app11010384
- [51] Geier, N., Paulo Davim, J., Szalay, T., „Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: a review”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 105552, 2019. doi:10.1016/j.compositesa.2019.10

- [52] Gao, C., Xiao, J., Xu, J., Ke, Y. „Factor analysis of machining parameters of fiber-reinforced polymer composites based on finite element simulation with experimental investigation”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(5-8), 1113–1125, 2015. doi:10.1007/s00170-015-7592-2
- [53] Liu, Y., Li, Q., Qi, Z., Chen, W., „Defect suppression mechanism and experimental study on longitudinal torsional coupled rotary ultrasonic assisted drilling of CFRPs”, *Journal of Manufacturing Processes*, 70, 177–192, 2021. doi:10.1016/j.jmapro.2021.08.042
- [54] Navarro, M. D., Meseguer, M. D., Sánchez, A. I., Gutiérrez, S. C., „Tool wear study in edge trimming on basalt fibre reinforced plastics”, *Procedia Manufacturing*, 13, 259–266, 2017. doi:10.1016/j.promfg.2017.09.067
- [55] Navarro-Mas, M., García-Manrique, J., Meseguer, M., Ordeig, I., Sánchez, A., „Delamination Study in Edge Trimming of Basalt Fiber Reinforced Plastics (BFRP)”, *Materials*, 11(8), 1418, 2018. doi:10.3390/ma11081418
- [56] Colligan, K.; Ramulu, M. „The effect of edge trimming on composite surface plies”, *Manuf. Rev.*, 5, 274–283, 1992.
- [57] Navarro-Mas, M. D., Meseguer, M. D., Lluch-Cerezo, J., García-Manrique, J. A., „Comparison of Different Parameters to Evaluate Delamination in Edge Trimming of Basalt Fiber Reinforced Plastics (BFRP)” *Materials*, 13(23), 5326, 2020. doi:10.3390/ma13235326