

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

MARKÓ BALÁZS

Forgácsolásindukált rétegekőzi sorja kőserleti vizsgálata Al/CFRP és
CFRP/Al lemezekben

Konzulens:

Dr. Geier Norbert
Adjunktus

Budapest, 2023

NYILATKOZAT

Alulírott, *Markó Balázs* (Y6JD1F), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2023. 10. 31.

Markó Balázs

Tartalomjegyzék

Mellékletek jegyzéke.....	v
Ábrajegyzék	vi
Előszó	I
Jelölések jegyzéke	II
1 Bevezetés	1
1.1 Célkitűzés	1
1.2 Áttekintés.....	1
2 Al/CFRP szendvicsszerkezetek forgácsolási sajátosságai és sorjavizsgálati módszerei	3
2.1 Al/CFRP szendvicsszerkezetek tulajdonságai	3
2.2 Al/CFRP szendvicsszerkezetek forgácsolási kihívásai	3
2.2.1 UD-CFRP kompozitok forgácsolási tulajdonságai.....	4
2.2.2 Alumíniumötvözetek forgácsolási tulajdonságai.....	5
2.2.3 Fém/CFRP szendvicsszerkezetek forgácsolási tulajdonságai	6
2.3 Sorja jellemzése.....	8
2.4 Sorja mérése	8
2.5 Sorja vizsgálata furatoknál.....	10
2.6 Következtetések és a célkitűzés pontosítása	13
3 Az újszerű sorjabecslő módszer bemutatása	14
3.1 Sorjabecslő módszer működése és algoritmusa	14
3.2 A sorjavizsgálati módszer alkalmazási korlátai	15
4 Felhasznált anyagok, eszközök és módszerek	18
4.1 Felhasznált anyagok	18
4.2 Kísérleti környezet és kísérletterv	18
4.3 Méréseszközök és szoftverek.....	19
5 Eredmények és következtetések	20
5.1 Erőmérés eredménye.....	20
5.2 Sorjabecslő módszer kivitelezése a mérési adatok alapján.....	22
5.2.1 Paraméterek összefüggésének keresése a sorjabecslő módszernél.....	22
5.2.2 Mért adatokra görbeillesztés a sorjabecslő módszer alapján	25
5.2.3 Becslő módszerrel nem leírható tartományokra illesztett görbék.....	29
5.3 Sorjabecslő módszerrel kapott eredmények	29

6	Összefoglalás és kitekintés.....	33
6.1	Összefoglalás	33
6.2	Kitekintés.....	35
7	Felhasznált források	36

Mellékletek jegyzéke

- 1. sz. melléklet:** Kísérleti és mérési jegyzőkönyv
- 2. sz. melléklet:** Erőmérés eredménye
- 3. sz. melléklet:** Mért furatokhoz tartozó h - b és RGB - b diagramok
- 4. sz. melléklet:** Mért és 2D-s mikroszkópi kép alapján becsült értékek összehasonlítása
- 5. sz. melléklet:** Eredményként adódó mért és becsült értékeket összehasonlító diagramok

Ábrajegyzék

1.1. ábra	Dolgozat felépítése.....	1
2.1. ábra	Anyagok fajlagos modulusa és fajlagos szakítószilárdsága [11]	4
2.2. ábra	UD-CFRP (a) ortogonális forgácsolása és (b) marása [13].....	4
2.3. ábra	Delamináció képződése fűrés során (a) be- és (b) kilépő oldalon [13].....	5
2.4. ábra	Alumínium ötvözetek előnyös és hátrányos tulajdonságai forgácsolhatóság szempontjából [17]	6
2.5. ábra	Rétegsorrend hatása a forgácsalakra [20]	7
2.6. ábra	Mért sorjageometria [25]	8
2.7. ábra	Sorja mérési módszerek rendszerezése [26]	9
2.8. ábra	Különböző sorjátípusok furatoknál: (a) körkörös-, (b) korona- és az (c) átmeneti sorja [29].....	10
2.9. ábra	Sorjaméret meghatározásának folyamata [29]	10
2.10. ábra	Kilépési sorjamagasság és szerszámkopás összefüggése [31]	11
2.11. ábra	25%-os kopással rendelkező csigafűrő (a) mikroszkópi- és (b) 3D-s képe [36]	12
2.12. ábra	Analitikus úton levezetett összefüggés relatív hibája (a) sorjamagasságra és (b) sorjavastagságra [37]	12
3.1. ábra	Sorjabecslő módszer algoritmusa	14
3.2. ábra	Felületi hibaforrások a mikroszkópi képen.....	16
3.3. ábra	Sorja egy részletének 3D-s képe.....	17
4.1. ábra	(a) Kísérleti- és a (b) mérési környezet.....	19
5.1. ábra	Erőmérés feldolgozás.....	20
5.2. ábra	Mért erő karakterisztikája (a) Al/UD-CFRP és (b) UD-CFRP/Al lemezsorrendnél	21
5.3. ábra	Erőmérés eredmények: (a) Al lemez felül, (b) Al lemez alul.....	22
5.4. ábra	Sorjamagasság és a mikroszkóppal készített kép összefüggése	23
5.5. ábra	(a) Sorjamagasság és (b) RGB érték egy mérési irányban.....	24
5.6. ábra	Sorjamagasság összefüggése az RGB értékkel minden mérési irányban	25
5.7. ábra	Mérési pontokra illesztett másodfokú polinomok.....	26
5.8. ábra	Determinációs együttható eloszlása (b) Al/UD-CFRP- és (b) UD-CFRP/Al rétegsorrendben.....	27
5.9. ábra	Mért és becsült eredmények összehasonlítása	28
5.10. ábra	A sorja különböző tartományai.....	29
5.11. ábra	Mért és becsült sorja az első mérési irányban.....	30
5.12. ábra	Mért és becsült sorja a harmadik mérési irányban	30
5.13. ábra	Mért és becsült sorjakeresztmetszet összehasonlítása	31
5.14. ábra	Mért és becsült sorjamagasságok összehasonlítása	32
6.1. ábra	Mért és becsült sorja a nyolcadik mérési irányban	34

Előszó

A fém/szálerősített polimer kompozit szendvicsszerkezetek napjainkban igen nagy népszerűségnek örvendenek a jó fajlagos mechanikai tulajdonságaik miatt. Így több olyan iparágban is alkalmazzák, ahol a jó mechanikai tulajdonságok mellett a minőségi követelmények is igen magasak (például: repülőgépipar és energiaipar). Az ilyen szendvicsszerkezetekben a leggyakrabban alkalmazott kötési technológia a csavarkötés, amihez furat készítésére van szükség. Fúrási művelet során napjainkban is legtöbbször megoldandó problémát jelent a forgácsolásindukált sorja, ezért fontos az elkerülése, illetve a minél költségghatékonyabb és pontosabb mérése. Ez a két tényező a jelenleg jellemzően használt mérési eljárásoknál egymással ellentétben áll.

* * *

A kutatás során nyújtott folyamatos szakmai támogatást szeretném megköszönni konzulensemnek, Dr. Geier Norbertnek. A CMG kutatócsoport a szakmai háttérrel nyújtotta a kutatás során. A KEYENCE profilmérőgéppel való mérésnél való szakmai közreműködésért Dr. Hlinka Józsefnek tartozom köszönettel. Az alumínium lemezek felajánlását köszönöm a Martin Metal Product Kft.-nek és Bors Istvánnak. Ez a kutatás a Kína és Magyarország tudományos és technológiai együttműködését ösztönző 2021-1.2.4-TÉT-2021-00051 támogatásnak köszönhetően valósult meg.

Végül, de nem utolsó sorban köszönettel tartozom családomnak a támogató és megértő közeg biztosításáért.

Budapest, 2023. 10. 31.

Markó Balázs

Jelölések jegyzéke

A táblázatban a többször előforduló jelölések magyar és *angol* nyelvű elnevezése, valamint a fizikai mennyiségek esetén annak mértékegysége található. Az egyes mennyiségek jelölése – ahol lehetséges – megegyezik hazai és a nemzetközi szakirodalomban elfogadott jelölésekkel. A ritkán alkalmazott jelölések magyarázata első előfordulási helyüknél található.

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
A_s	Sorjakeresztmetszet	$\text{mm}^2, \mu\text{m}^2$
b	Sorjavastagság	mm
D	Furatátmérő	mm
F_z	Előtolás irányú erőkomponens	N
h	Sorjamagasság	mm
n	Fordulatszám	1/min
R^2	Determinációs együttható	
f	Előtolás	mm
v_c	Forgácsoló sebesség	m/min

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
α	Szignifikancia szint	
σ	Szórás	

Rövidítések, mozaikszavak

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
CCI	<i>Central Composite Inscribed</i> (Centrál kompozit kísérlettervezési módszer)
CSV	<i>Comma-separated values</i> (Vesszővel tagolt fájl formátum)
CFRP	<i>Carbon fibre reinforced polymer</i> (Szénszállal erősített polimer)
FFT	<i>Fast Fourier-transformation</i> (Gyors Fourier-transzformáció)
MD	<i>Multi-directional</i> (Többirányú szálerősítés)
UD	<i>Uni-directional</i> (Egyirányú szálerősítés)
RGB	<i>Red</i> (piros) <i>Green</i> (zöld) <i>Blue</i> (kék) alapszínek keverésével létrehozható színek

1 Bevezetés

A fém/kompozit szendvicsszerkezetek használata széles körben elterjedt különböző iparágakban, például a repülőgépiparban, űriparban és az energiaiparban. Ezen szendvicsszerkezeteknél egyik leggyakrabban használt kötési technológia a csavarozás, amihez furat készítésére van szükség. A nagy pontosságú furatokat jellemzően forgácsolási technológiákkal szokták elkészíteni, ami legtöbb esetben fűrés vagy marás. A felmerülő forgácsolási nehézségek miatt nehéz teljesíteni a high-tech iparágak elvárásait [1].

A forgácsolási nehézségek több tulajdonságból is származtathatóak. Az egyik ilyen például, hogy forgácsolhatóság szempontjából két különböző tulajdonságú anyagot kell megmunkálni egy menetben. Viszont a nehézségek legtöbbje a szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozitok forgácsolási nehézségeiből adódik [2], [3].

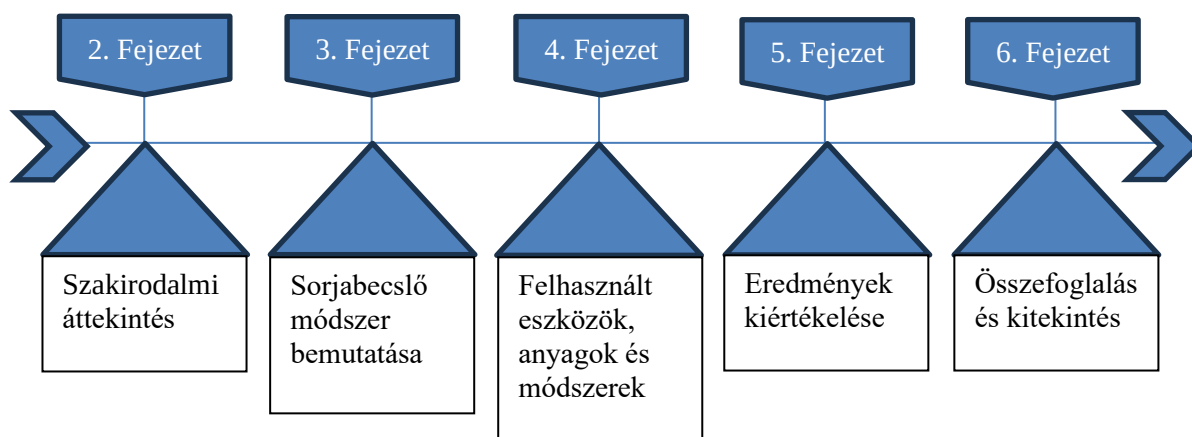
Az ilyen szendvicsszerkezetekben készített furatnál nem csak a be- és kilépő oldalon figyelhető meg sorja, hanem rétegek között is, amely hiba a mechanikai tulajdonságokra van nagy hatással [4].

1.1 Célkitűzés

Dolgozatom célja, hogy könnyebben mérhetővé váljon a rétegek között képződött sorja. Ehhez fejlesztettem ki egy újszerű módszert, aminek segítségével a rétegek között keletkező sorja jellemezhetővé válik. Így végső célom, hogy egy 2D-s mikroszkópi képből meghatározhatóvá váljon a sorjakeresztmetszet.

1.2 Áttekintés

Dolgozatom fő struktúrája látható az **1.1. ábrán**.



1.1. ábra Dolgozat felépítése

Az **1.1. ábra** alapján elsőként összefoglalom a szakirodalom jelenlegi álláspontját az Al/CFRP szendvicsszerkezetekkel kapcsolatban és bemutatom a jelenleg alkalmazásban levő sorjamérési és -jellemzési módszereket. Majd ezt követően leírom az általam fejlesztett sorjabecslő módszert. Ezt követően bemutatom a kísérleti környezetet, a felhasznált anyagokat, eszközöket és a kísérlettervet. A kísérleti környezet ismertetése után a kísérletek kiértékelése és az eredmények ismertetése következik, amit egy összefoglalással zárok.

2 Al/CFRP szendvicsszerkezetek forgácsolási sajátosságai és sorjavizsgálati módszerei

Ebben a fejezetben ismertetem az Al/CFRP szendvicsszerkezetek forgácsolásával kapcsolatos kulcsfontosságú szakirodalmi ismereteket, főként a fúrási technológiára fókuszálva. Majd a forgácsolásindukált sorja főbb jellemzési és mérési eljárásait ismertetem.

2.1 Al/CFRP szendvicsszerkezetek tulajdonságai

A CFRP egy szénszál erősítésű kompozit, ahol az erősítőanyag többnyire 5-10 μm átmérőjű szál, míg a mátrix anyaga többnyire epoxi gyanta, vinilészter gyanta vagy poliészter gyanta. Ezen felül fontos a szálerősítés iránya, ami lehet egyirányú (UD), többirányú (MD) és kitüntetett irány nélküli [5], [6].

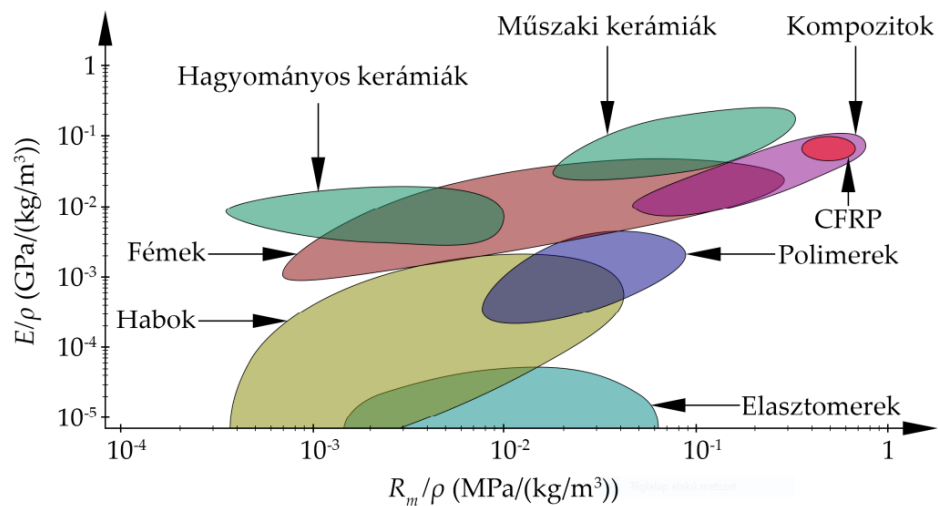
Az alumínium ötvözetek tulajdonságai nagy mértékben eltérhetnek az ötvözők függvényében, de jellemzően jó fajlagos szilárdsággal és korrózióállósággal rendelkeznek [7], [8].

Olyan mechanikai tulajdonságok elérése a cél a fém (Alumínium, Titán, Magnézium) ötvözetek és polimer kompozitok egyesítésével, amely tulajdonságok egyik anyaggal sem érhetők el külön-külön. Tehát így egyesíthetőek a két anyag előnyös tulajdonságai jelentős súlynövekedés elkerülésével [8]. Ezért használják ezen szendvicsszerkezeteket olyan iparágakban, ahol a kis tömeg mellett a kiváló mechanikai tulajdonságok elérése a cél. Például a Boeing 787-es repülőgép körülbelül 35 tonna szénszálerősítésű kompozitot tartalmaz, aminek egy része Alumínium- vagy Titán ötvözetrel van egy szendvicsszerkezetben [9].

Fém/polimer szendvicsszerkezetek közül az Al/CFRP (CFRP/Al, Al/CFRP/Al, CFRP/Al/CFRP) összetétel a leggyakoribb, ami a kiváló fajlagos szilárdságának, korrózió- és erózió állóságának köszönhető [9]. Ezért ez a dolgozat is ilyen szendvicsszerkezettel foglalkozik.

2.2 Al/CFRP szendvicsszerkezetek forgácsolási kihívásai

Al/CFRP szendvicsszerkezetek nehezen forgácsolhatóak, mivel két eltérő anyagot kell egy műveletben forgácsolni [10]. A 2.1. ábra jól szemlélteti, hogy a két anyagnak jelentősen eltérőek a mechanikai tulajdonságai.



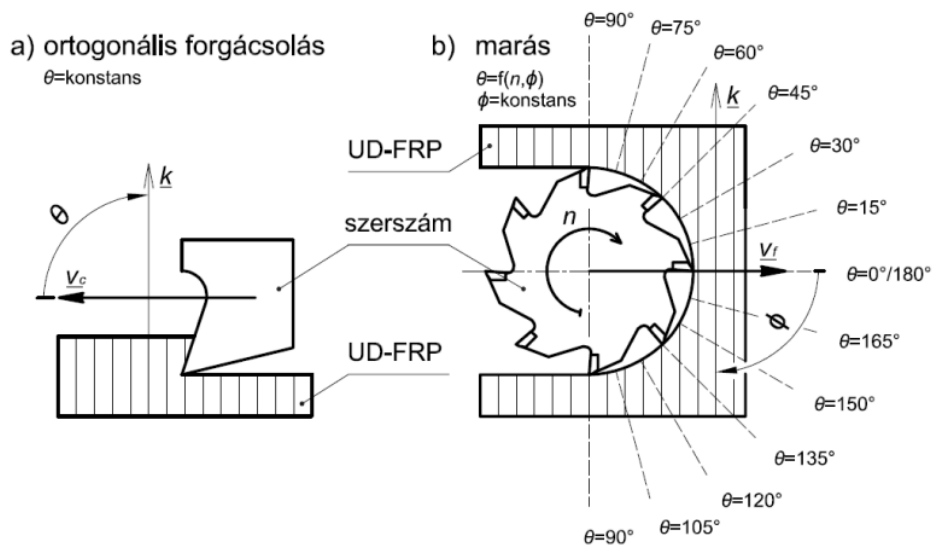
2.1. ábra Anyagok fajlagos modulusa és fajlagos szakítószilárdsága [11]

A **2.1. ábra** alapján kijelenthető, hogy a CFRP nagyobb fajlagos modulusussal és fajlagos szakítószilárdsággal rendelkezik [11]. A következő két alfejezetben részletezem ezen két anyag forgácsolási tulajdonságait.

2.2.1 UD-CFRP kompozitok forgácsolási tulajdonságai

Az UD-CFRP kompozit anyagok inhomogének és anizotrópok az erősítőszál következtében, így forgácsképződésük eltér a fémekétől [12].

Ezen szálerősítésű kompozitok forgácsolásánál a hagyományos forgácsolási paramétereken (például: forgácsoló sebesség, előtolási sebesség és fogasmélység) felül bevezettek két további paramétert, ami a szálvágási szög (θ) és a szálorientációs szög (ϕ). Ezt a két paramétert jól szemlélteti a **2.2. ábra**.

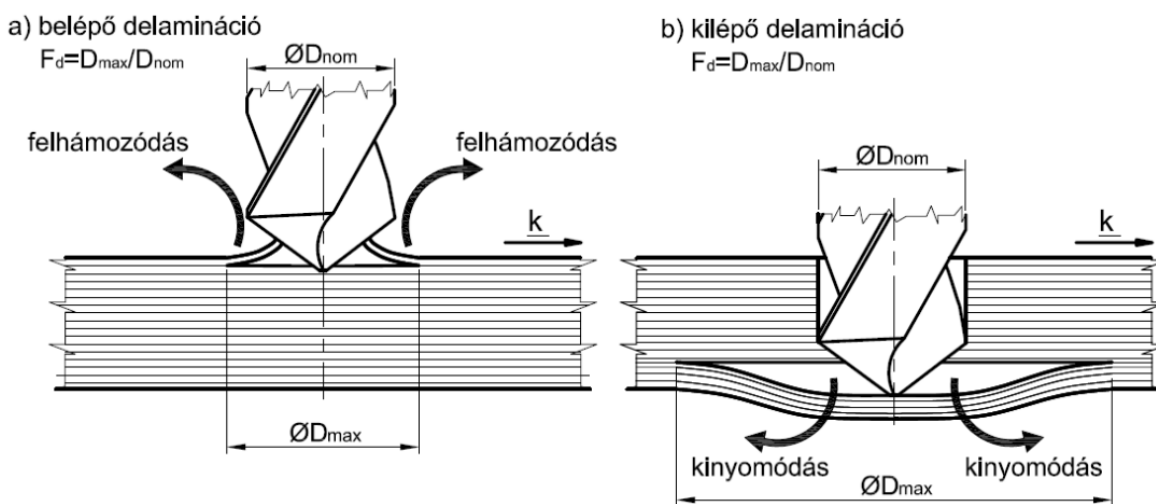


2.2. ábra UD-CFRP (a) ortogonális forgácsolása és (b) marása [13]

A szálvágási szögnek van a legjelentősebb hatása a forgácsolási mechanizmusra. Ez nagy mértékben megnehezíti a szálerősített kompozitok marással vagy fúrással történő megmunkálását, mivel ezen technológiák esetén a szerszámforgással együtt változik folyamatosan a szálvágási szög. Így a forgácsolási mechanizmus is folyamatosan változik [14], [15].

Mivel a dolgozatban a furatok forgácsolásán van a hangsúly, ezért a fúrás során fellépő hibákat említtem meg. Szálerősítésű kompozitoknál fellépő, gyakrabban előforduló furathibák a következők lehetnek: delamináció, mátrix elkenődés, mikropedés, sorja és száلكihúzóds [16]. Ezek közül a delaminációt mutatom itt be. Mivel dolgozatomban a sorja vizsgálatára kerül sor ezért a sorja ismertetése egy külön alcímet kapott.

Az UD-CFRP kompozitok forgácsolása során, ha a forgácsolási erő a laminált rétegre kedvezőtlen irányba hat, akkor a laminált rétegek szétválhatnak egymástól, amely jelenséget delaminációnak nevezik. Ez a jelenség a furatok be- és kilépő oldalán is megjelenhet. Amely hiba hatással van a kompozit mechanikai tulajdonságaira. Ezt jól szemlélteti a **2.3. ábra**.

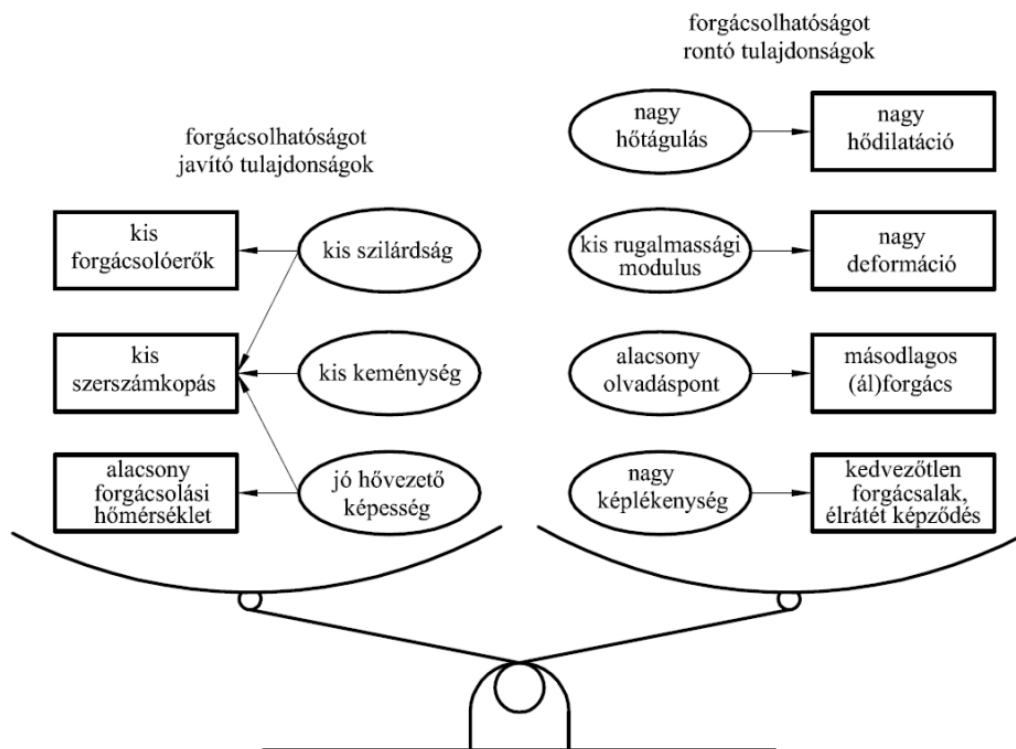


2.3. ábra Delamináció képződése fúrás során (a) be- és (b) kilépő oldalon [13]

A **2.3. ábrán** található jelenség a szendvicsszerkezetek fúrásánál is megjelenik. De ekkor még számolni kell a fém és a CFRP lemez szétválásával is [1], [13].

2.2.2 Alumíniumötvözetek forgácsolási tulajdonságai

Egy anyag forgácsolhatósága több tényezőtől is függ, ilyen például a forgácsoló szerszámot koptató hatása. Relatív kis szilárdságuk és megfelelő hőtani tulajdonságaik következtében az alumíniumötvözetek a jól forgácsolható anyagok közé tartoznak, de az ötvözetek forgácsolhatósága jelentősen eltérhet. A **2.4. ábrán** látható az alumínium ötvözetek forgácsolás szempontjából fontos tulajdonságai.



2.4. ábra Alumínium ötvözetek előnyös és hátrányos tulajdonságai forgácsolhatóság szempontjából [17]

A **2.4. ábrán** lévő tulajdonságokon felül még fontos megemlíteni, hogy az alumíniumötvözetek (főként a kis keménységűek) hajlamosak a „kenődésre”, ezért előnyös a viszonylag nagy forgácsoló sebesség alkalmazása. De a forgácsoló sebesség megválasztásakor a fém/CFRP szendvicsszerkezeteknél mindkét anyag tulajdonságát figyelembe kell venni, ezért a következő alfejezetben ezt vizsgálom [17], [18].

2.2.3 Fém/CFRP szendvicsszerkezetek forgácsolási tulajdonságai

Ebben az alfejezetben részletezem a különböző kutatók által elért eredményeket fém/CFRP szendvicsszerkezeteknél. Legfőképp a furatkészítésre helyezem a hangsúlyt.

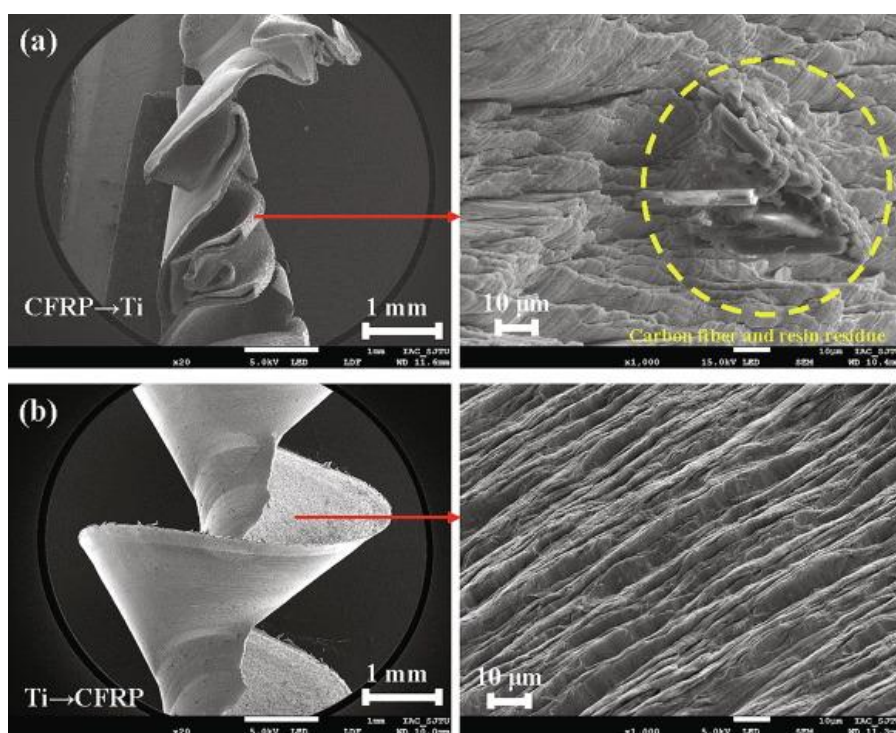
Xu és Mansori [19] munkájukban a Ti/CFRP szendvicsszerkezetek forgácsolását végezték. A technológiai paraméterek vizsgálatánál bemutatták az egyik fő problémát az ilyen szendvicsszerkezetek forgácsolásánál. Ez a probléma abból adódik, hogy a szakirodalom szerint eltérő technológiai paraméterek a megfelelőek a két különböző anyaghoz. Például a forgácsoló sebesség esetében a javasolt érték Titán ötvözetnél $v_c = 10-30$ m/min, míg CFRP esetében $v_c = 150-200$ m/min. Továbbá eredményül megállapították, hogy milyen hatása van a rétegsorrendnek a megmunkált furat minőségére, ezt szemlélteti a **2.1. táblázat**.

2.1. táblázat Rétegsorrend hatása a furat minőségére [19]

Rétegsorrend	Forgácsolási erő	Forgács típus	Furatminőség		Furathiba	
			Felületi érdesség	Furat átmérő	Delamináció	Sorjavastagság
CFRP→Ti	↑	–	↑	↑	↓	↑
Ti→CFRP	↓	–	↓	↓	↑	↓

Megjegyzés: ↑ esetén előnyös-, ↓ esetén hátrányos a minőségre, míg – esetén nincs rá szignifikáns hatással

A 2.1. táblázat alapján a delaminációt és a forgács típust leszámítva a CFRP/Ti rétegsorrend eredményezett jobb minőségű furatot. Azonban más kutatásokban is vizsgálták a rétegsorrend hatását. An és mtsai. [20] forgácsolaknál jelentős különbséget fedeztek fel, amit a 2.5. ábra jól szemléltet.



2.5. ábra Rétegsorrend hatása a forgácsolakra [20]

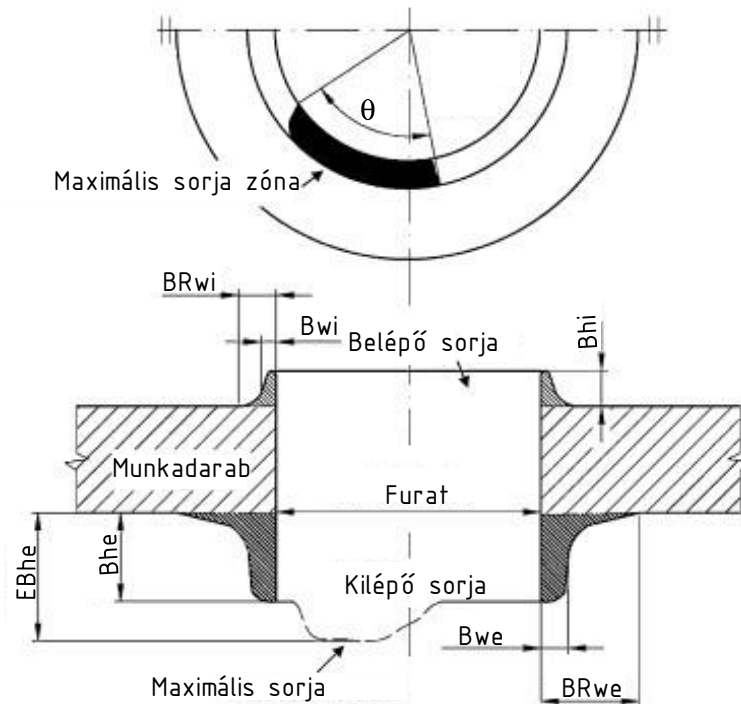
A 2.5. ábrán látható, hogy Ti/CFRP rétegsorrendnél szabályos spirál alakú a forgács. Továbbá ennél a rétegsorrendnél hosszabb sorját kaptak, ami forgácsolási szempontból nem előnyös.

A megfelelő fúrószerszám keresésével is több kutató foglalkozik. Vizsgálják a szerszámkialakítás, szerszámanyag vagy szerszámbevonat hatását [21]–[23]. Zhong és mtsai. [22] a szerszámbevonat hatását vizsgálták a CFRP/Al/CFRP szendvicsszerkezeten. Bevonatos szerszámnál TiAlN bevonatot alkalmaztak. Végeztek erőméréseket, mérték a forgácsolt átmérő pontosságát és konfokális mikroszkóppal vizsgálták a furatok palástfelületét. A végzett mérések alapján megállapították, hogy a felsorolt három jellemző mindegyikére pozitív hatással volt a szerszámbevonat.

2.3 Sorja jellemzése

A sorját többféleképpen is lehet definiálni. Az ISO 13715 számú szabvány szerint a sorja egy a megmunkálás során mérhető maradékanyag, amelynek nagysága nullától eltérő [24].

Furatok forgácsolása során a be- és kilépő oldalon létrejön a sorja. A leggyakrabban és legkönnyebben mérhető paraméterek a sorjamagasság és sorjavastagság. A 2.6. ábra jól szemlélteti a furatoknál a sorjageometriát.

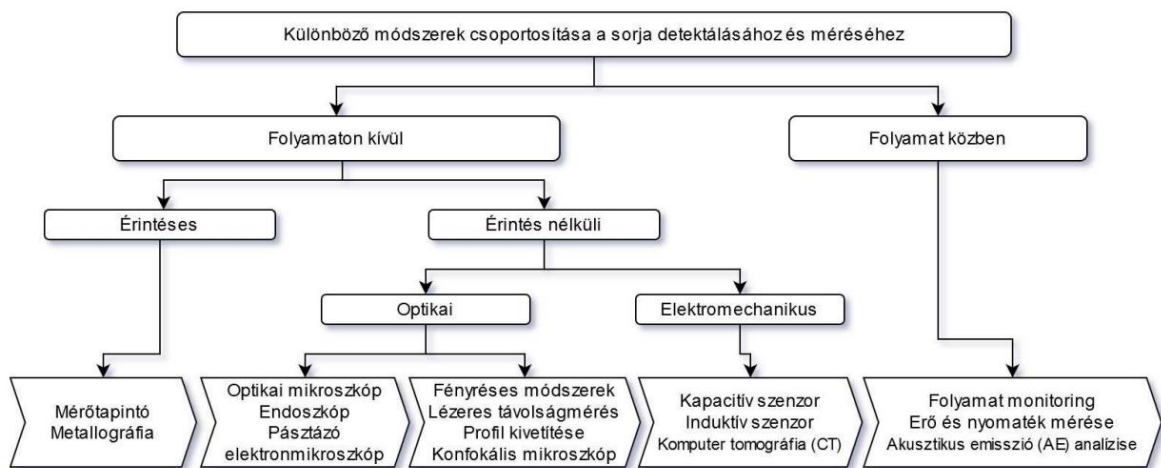


2.6. ábra Mért sorjageometria [25]

A 2.6. ábra alapján megállapíthatóak a különböző sorjamagassági (B_{hi} , B_{he} és EB_{he}) és sorjavastagsági (B_{wi} , BR_{wi} , B_{we} és BR_{we}) paraméterek, valamint a maximális sorja zóna (θ) [25]. A dolgozatban ettől eltérő, a szakirodalomban gyakrabban használt jelöléseket használok. Munkámban a sorjamagasságra h , a sorjavastagságra b jelölést alkalmazom.

2.4 Sorja mérése

A sorja mérése igen sok módszerrel elvégezhető, amely módszereket a 2.7. ábra mutatja be.



2.7. ábra Sorja mérési módszerek rendszerezése [26]

A **2.7. ábra** jól szemlélteti, hogy a sorját geometriai szempontból jellemző adatok csak a folyamaton kívül mérhetőek. A szükséges vizsgálati módszer attól is függ, hogy milyen jellegű jellemzők keresése a cél. Tehát külön kezelendő a sorja anyagminőség változását jellemző paraméterek a sorja geometriai jellemzőitől. A dolgozat továbbiakban kizárólag a geometriai jellemzőket vizsgálja. Ebben a csoportban négy módszer kiemelendő, amelyek a következők: mérőtapintós-, optikai mikroszkópos-, profilométeres- és a konfokális mikroszkópos mérés. Számos kutatásban ezen négy módszer egyikével végeztek méréseket [26], [27].

Mérőtapintós méréssel egyszerűen meghatározható a sorjamagasság és sorjavastagság, ugyanakkor a sorjatérfogat csak igen sok mérési pont felvételével és azok egy modellbe illesztésével hozhatóak létre. Így manapság ez nem hatékony sorjatérfogat mérési módszer a konfokális mikroszkóphoz és a profilmérőgépekhez képest [26].

Az optikai mikroszkópos mérésnek hátránya, hogy „csak” a sorja alakjának egyik irányba eső paramétere kapható a mérés eredményeként. Ennek ellenére ez sok esetben elegendő ipari alkalmazásnál [28].

Konfokális mikroszkóppal és profilométerrel való mérésből 2D-s és 3D-s információk is nyerhetőek, így geometriai jellemzők vizsgálatához ezek a mérőgépek szolgáltatnak legtöbb információt. Ezen mérési technológiának hátránya, hogy időigényesebb, mint egy optikai mikroszkópos mérés és költségvonzata is nagyobb [28]. Így dolgozatomban témájának fő hajtóereje az, hogy bizonyos peremfeltételek között a konfokális mikroszkóppal és profilométerrel való mérés kiváltható legyen optikai mikroszkóppal.

2.5 Sorja vizsgálata furatoknál

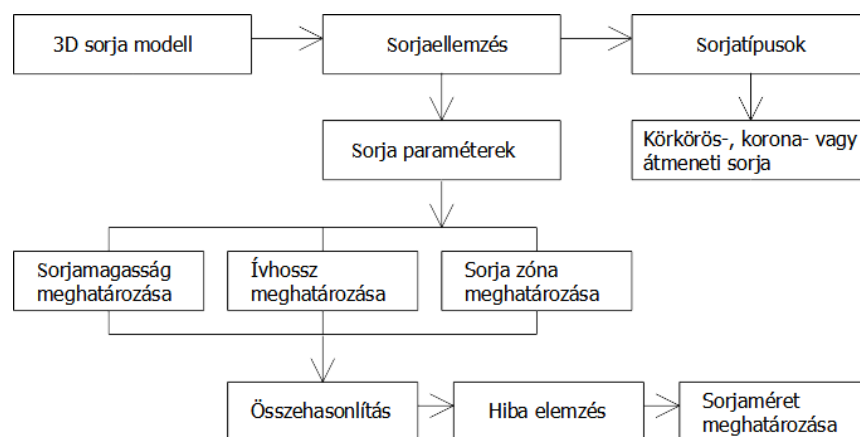
Különböző sorjátípusokat lehet megkülönböztetni furatoknál [29]. A különböző típusokat a 2.8. ábra jól szemlélteti.



2.8. ábra Különböző sorjátípusok furatoknál: (a) körkörös-, (b) korona- és az (c) átmeneti sorja [29]

A 2.8. ábra alapján megállapítható a három különböző sorjátípus, ami a körkörös-, korona- és az átmeneti sorja.

Bahçe és Özdemir [29] fejlesztettek egy sorja mérési- és elemzési módszert, aminek folyamata a 2.9. ábrán látható.

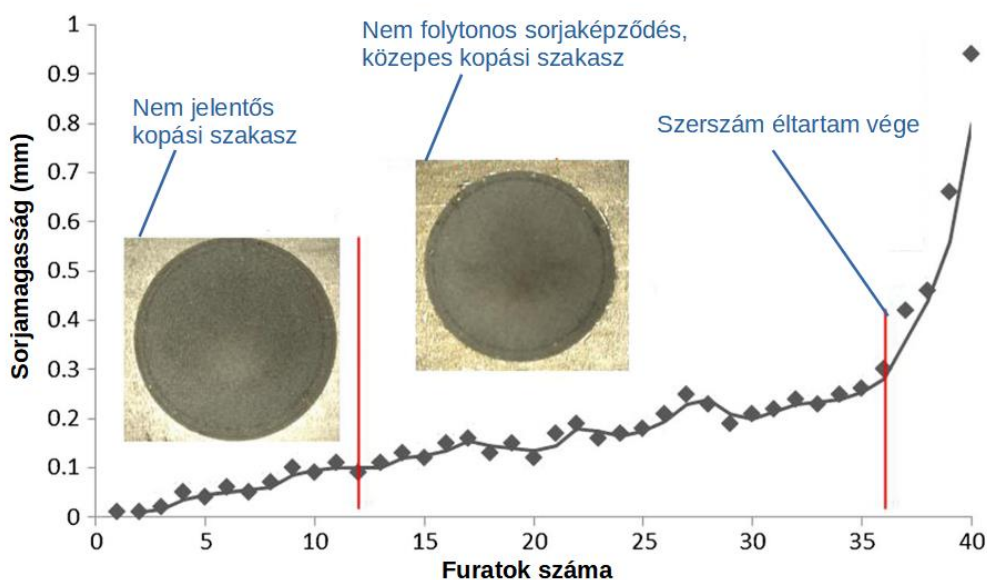


2.9. ábra Sorjaméret meghatározásának folyamata [29]

A 2.9. ábra alapján a sorja 3D-s modelljéből indultak ki. Az átlag sorjamagasság meghatározása volt a céljuk. Kétféle módszerrel határozták meg az átlag sorjamagasságot a hagyományostól eltérő módon. Mindkét módszer egy, a sorjáról oldalról készült mikroszkópi képből indul ki. Egyik esetben a sorjaterületből, míg másik esetben a sorjagörbe hosszából indultak ki. A valós eredményhez képest mindkét módszer nagy szórást (9,94%-48,14%) mutatott, de a mért eredmények trendre megegyeztek a valós eredménnyel. Tehát ez alapján megállapítható, hogy a sorjaterület és a sorjagörbe hossza összefüggésbe van az átlag sorjamagassággal.

Hellstern és Woodruff [30] alumínium szendvicsszerkezeteken vizsgálták a különböző geometriájú és bevonatú fúró szerszámok hatására létrejövő sorját. Nagy számú

(1500 darab) kísérlet alapján több eredmény is adódott. A bevonat nélküli lépcsős csigafúró szerszám kisebb sorjamagasságot eredményezett és ezek szórása is kisebbnek adódott, mint más szerszámgeometria esetén. Továbbá megállapították, hogy a sorjamagasság és a szerszámkopás között nincs szignifikáns összefüggés. Li és mtsai. [31] ezzel ellentétben helikális marási stratégiánál vizsgálták többek között a szerszámkopás és a forgácsolásindukált sorjamagasságot. A kapott eredményük a **2.10. ábrán** látható.



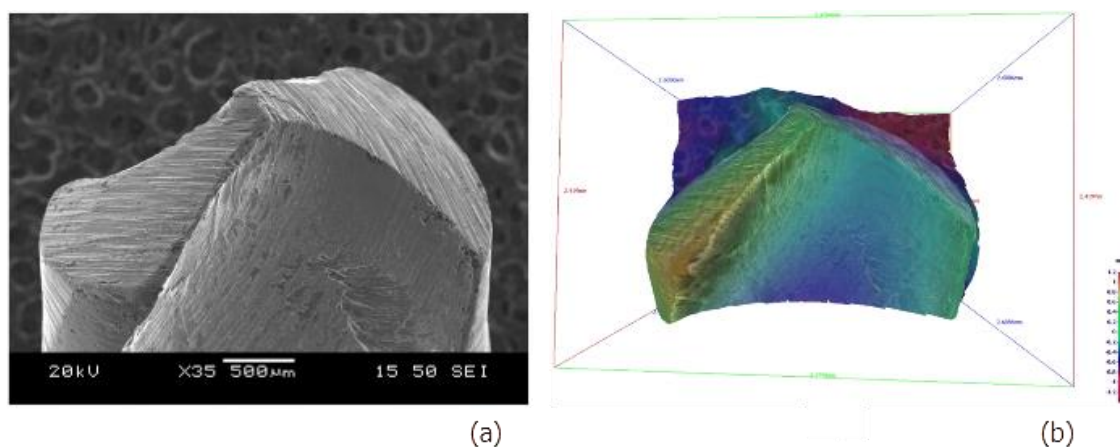
2.10. ábra Kilépési sorjamagasság és szerszámkopás összefüggése [31]

A **2.10. ábra** alapján a szerszámkopás és a sorjamagasság között jelentős összefüggés van. Továbbá az is látható, hogy a szerszám kopásával a mért sorjamagasság értékének ingadozása növekszik.

Mondal és mtsai. [32] alumínium ötvözet furat készítése során vizsgálták a létrejövő sorját. Céljuk a sorjamagasság minimalizálása volt. Taguchi kísérlettervezési módszert használtak, ahol vizsgálták a fordulatszám (n), az előtolás (f) és a csigafúró csúcshölygének (θ) hatását. A három vizsgált paraméter segítségével 95%-os szignifikancia szint mellett meghatároztak egy sorjamagasság becslő összefüggést. Ezen modell determinációs együtthatója $R^2 = 0,9172$ volt. Ez igen jó eredmény, tekintve a faktorok alacsony számát.

Az előbb említett becslő összefüggésekkel a probléma az, hogy a legtöbb esetben egy bizonyos anyagminőség forgácsolásakor igazak, és nehezen általánosíthatóak többféle anyagminőségre. Tehát továbbra is a legtöbb esetben szükséges 2D-s vagy 3D-s mikroszkópi felvétel a sorja valamilyen geometriai paraméterének meghatározásához [32]–[35].

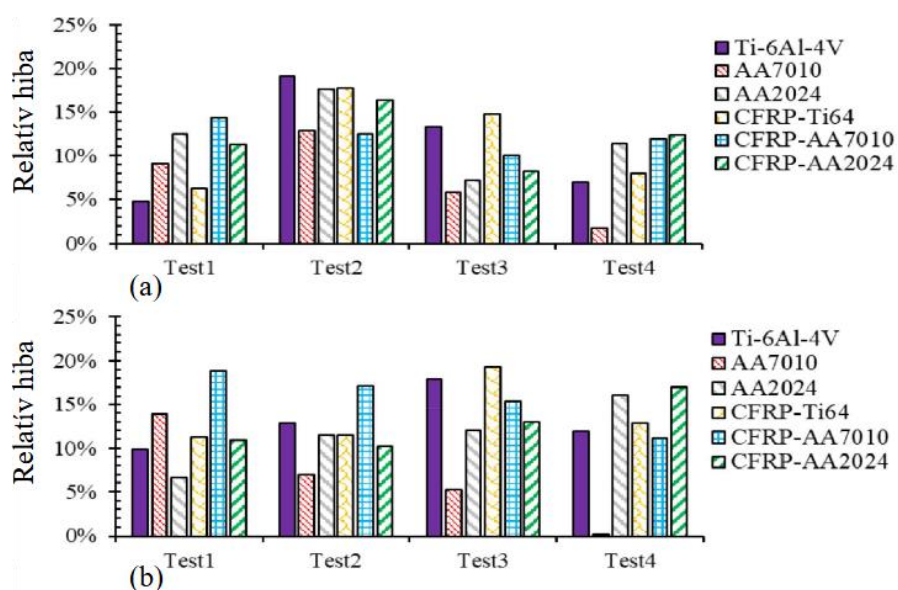
Mandra és mtsai. [36] kidolgoztak egy modellt, amivel a változó sorjanagyság vizsgálható a csigafúró kopásának hatására. Három különböző kopási szinten végeztek méréseket. A **2.11. ábrán** látható a 25%-os kopással rendelkező szerszám.



2.11. ábra 25%-os kopással rendelkező csigafúró (a) mikroszkópi- és (b) 3D-s képe [36]

A **2.11. ábrán** látható, hogy már egy 25%-os kopás is nagy hatással lehet a készített furat minőségére. A mérések alapján megállapítást nyert, hogy 50%-os kopásnál a maximális sorjamagasság nagyságrendileg háromszorosa, a kopással nem rendelkező szerszáméhoz képest. Végezetül a kutatók által felállított modell a sorjamagasságot 30%-os-, míg a sorjavastagságot 20%-os hibával tudta becsülni.

Abdelhafeez Hassan és mtsai. [37] egy analitikus modellt állítottak fel fém/CFRP szendvicsszerkezetek rétegekőzi sorja méretének (sorjamagasság és sorjavastagság) vizsgálatához. Különböző anyagú lemezen végeztek kísérletet. A kísérletek eredménye látható a **2.12. ábrán**.



2.12. ábra Analitikus úton levezetett összefüggés relatív hibája (a) sorjamagasságra és (b) sorjavastagságra [37]

A 2.12. ábrán lévő eredmények alapján a felállított összefüggés igen jól közelíti a valós eredményeket sorjamagasságra (a) és sorjavastagságra (b) nézve. A relatív hiba minden esetben 20%-nál kisebbnek adódott.

2.6 Következtetések és a célkitűzés pontosítása

Az előbb ismertetett szakirodalmak alapján kijelenthető, hogy az AI/CFRP szendvicsszerkezetek megmunkálása során több nehézség is felmerül. Kiemelendő az UD-CFRP anizotrópiája, aminek hatására a forgácsolási tulajdonságok irányfüggőek, amely forgácsolási tulajdonságok hatással vannak sorjaképződésére. Így a dolgozatban a sorja vizsgálatát több irányban is elvégzem. A sorjajellemzési és -mérési módszerek fejlesztése elengedhetetlen, mivel fém/CFRP szendvicsszerkezeteknél a kutatások zöme a CFRP lemezen keletkező sorjával foglalkozik, a fémen keletkező sorjáról legtöbb esetben említést sem tesz.

Sorják jellemzése során elsőként fontos rögzíteni az alkalmazott jelöléseket, mert ezek is eltérnek sok esetben. Dolgozatomban az alkalmazott jelölések a következők: b – sorjavastagság, h – sorjamagasság, A_s – sorjaterület.

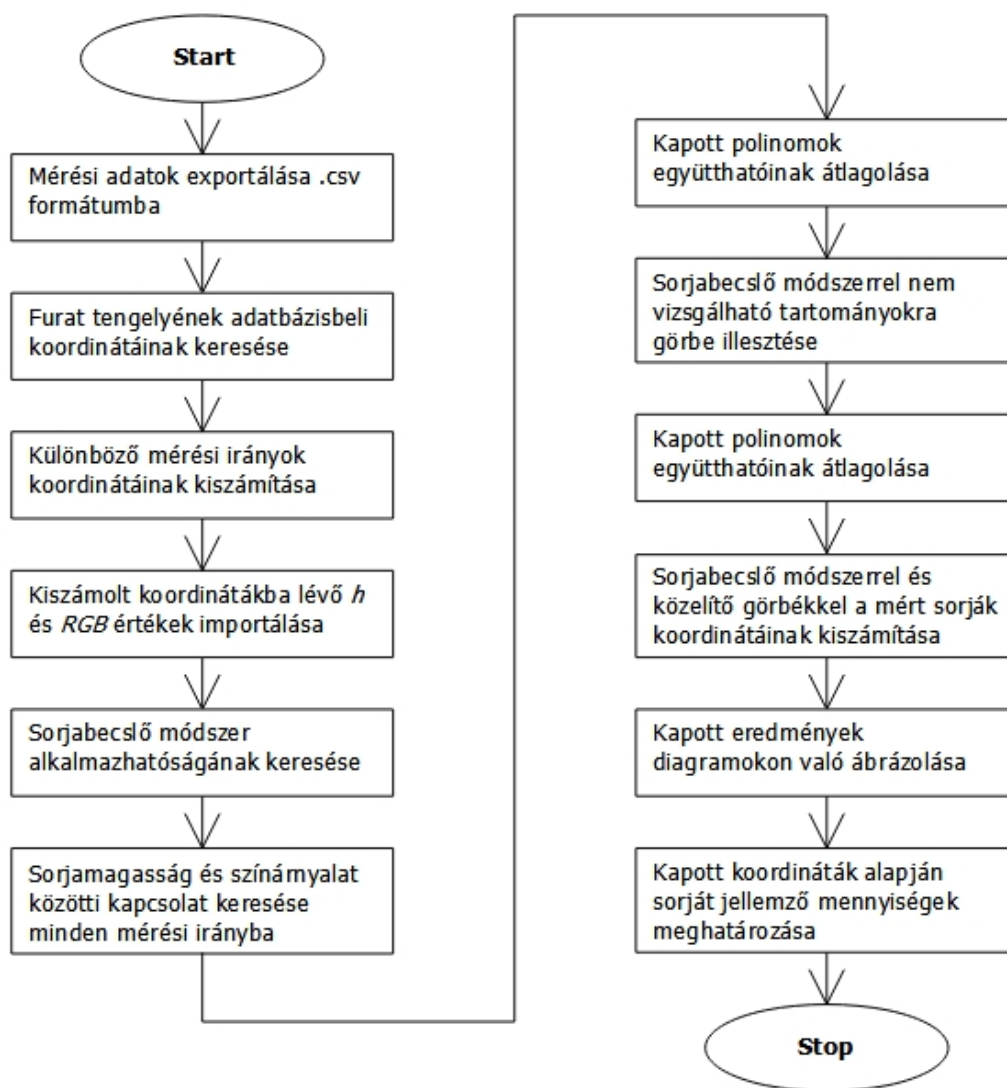
Az irodalomkutatásból továbbá az is látható, hogy a sorjamérés problémája, hogy a méréshez vagy valamilyen tapintós mérést alkalmazunk, vagy 3D-s mérésre alkalmas eszközt. Az idő- és költségcsökkentés, valamint pontosság feltételét tekintve látható, hogy egyik sem teljesíti megfelelően ezt a három feltételt. Továbbá léteznek empirikus modellek, amelyekkel becsülhetőek a sorja egyes paraméterei, de ezeknek a formuláknak a hibája jelentős mértékű, vagy igen sok megkötésnek (peremfeltétel) kell teljesülnie az alkalmazásukhoz. Így a dolgozat témájának kiindulási alapja egy olyan mérési módszer megalkotása, amivel kiküszöbölhetővé válnak a két mérési módszer hiányosságai. Ez a módszer 2D-s mikroszkópi kép alapján ad becslést a sorja háromdimenziós jellemzőire.

3 Az újszerű sorjabecslő módszer bemutatása

Ebben a fejezetben ismertetésre kerül az általam fejlesztett újszerű sorjabecslő módszer működése és a nem elhanyagolható hibaforrások leírása.

3.1 Sorjabecslő módszer működése és algoritmus

A dolgozatban vizsgált sorjabecslő módszer alapfelvetése, hogy a 2D-s mikroszkópi kép pixeljeihez tartozó színárnyalat (RGB) és a sorja magasság (h) között valamilyen összefüggés írható fel. Mivel a sorja nem tekinthető homogénnek, ezért szükséges többirányú mérést és kiértékelést végezni rajta. Ennek érdekében elengedhetetlen, egy definiált algoritmus alkalmazása, amely segít a mérések végrehajtásában és azok kiértékelésében. A sorjabecslő módszer algoritmus látható a **3.1. ábrán**.



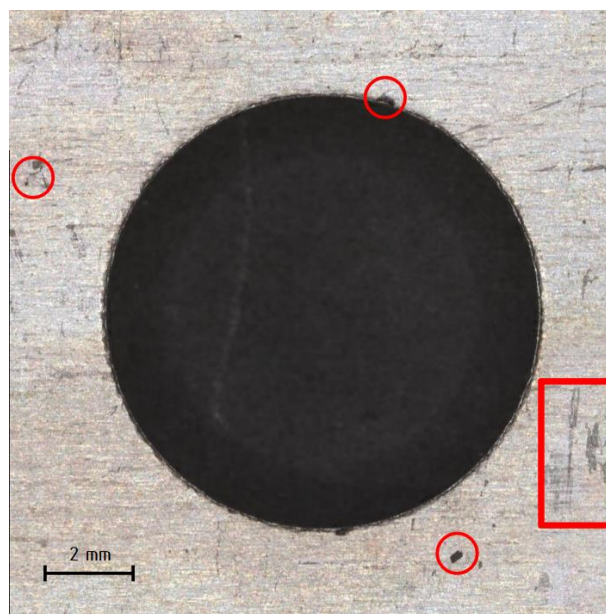
3.1. ábra Sorjabecslő módszer algoritmus

A **3.1. ábra** alapján elsőként a mért adatok exportálása szükséges .csv fájlformátumba. Itt két különböző tömböt kell kimenteni. Ki kell menteni az X- és Y koordinátákhoz tartozó magassági- és *RGB* értékeket. Ezt követően a furat tengelyének helyét kell megkeresni, amit a mikroszkóp szoftverének segítségével határoztam meg. Így definiálható a furat átmérőjének ismeretében a sorja várható helye. Mivel sok (26 darab) furaton mérünk több mérési irányba, ezért célszerű a mért koordináták automatikus meghatározása, ami könnyen megtehető kör egyenletének és szögfüggvényeknek alkalmazásával. Az így kapott koordinátákból a mérési adatok (magassági- és *RGB* értékek) importálása szükséges. A sok felesleges munka elkerülésének érdekében ekkor fontos megvizsgálni, hogy a kapott értékek a megfelelőek -e, gondolva itt például a nem megfelelő helyen való mérésre. Ha a kapott értékek megfelelőek akkor meg kell keresni a sorjamagasság és az *RGB* érték közötti összefüggést, amely összefüggés leírására legtöbb esetben egy másodfokú polinom megfelelő. A sorjabecslő módszerrel nem vizsgálható tartományoknál a sorjamagassági értékekre polinomok illesztése szükséges, amely polinomokkal meghatározzuk a magassági értékeket. Így a két módszerrel kapott eredményeket egy diagrammon lehet ábrázolni és meg lehet állapítani több sorját jellemző paramétert.

Az előbbi leírás alapján látható, hogy igen sok (12) lépésből áll a sorjabecslő módszer, ezért törekedni kell a folyamat minél nagyobb fokú automatizálására, de ezen dolgozat fő célja nem ez, hanem a módszer alkalmazhatóságának vizsgálata és az elérhető becslési pontosság meghatározása.

3.2 A sorjavizsgálati módszer alkalmazási korlátai

Az irodalomkutatás alapján megállapítható, hogy a furatoknál a sorja vizsgálata csak akkor lehet reprezentatív, ha több irányból végzünk méréseket. Ennek hatása AI/UD-CFRP szendvicsszerkezeteknél jelentős hibaforrás. Ez adódhat abból, hogy ott végezzük a sorjamérést, ahol az UD-CFRP- és az alumínium lemez találkozik, így a kompozit anizotrópiájának hatása van a keletkező sorjára. A másik hibaforrás az alumínium lemez felületi hibáiból adódhat, mivel a felületi hibák sorjamagasság irányába legtöbb esetben kis eltérést jelentenek, viszont az *RGB* érték ennek hatására nagy mértékben megváltozik, ezt mutatja a **3.2. ábra**.

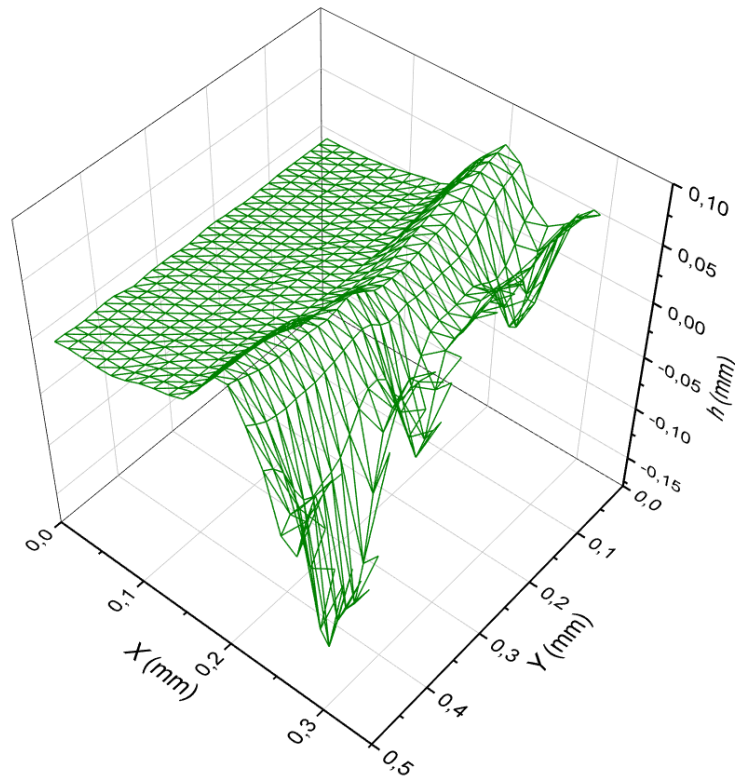


3.2. ábra Felületi hibaforrások a mikroszkópi képen

A **3.2. ábrán** többféle hibaforrás látható. Pirossal van bekarikázva néhány olyan rész, ahol CFRP forgács maradt a felületen, míg a bekeretezett rész az Al lemez felületi hibája. Mindkettő esetben látható, hogy ezek a hibák az *RGB* értéket nagy mértékben módosítják, így nagymértékű hibaforrást jelentenek.

További hibaforrást jelent az *RGB* skála felbontása. Mivel a fekete-fehér színátmenetes képek *RGB* értéke 0 és 255 között van ezért ez jelentős hibaforrás. Ezen felül megemlítendő, hogy ennek a szűk tartománynak szélső tartományaiba jellemzően nem esik az érték, így a valójában használt skála lecsökken ~200-as tartományra. Ez a tartomány növelhető a mikroszkópi fény erősségének megváltoztatásával, amely megnövekedett tartomány a becsülhető sorjamagasság tartományt növelheti, elősegítve a módszer gyakorlati alkalmazhatóságát.

Továbbá vannak olyan hibaforrások, amelyekkel legtöbb esetben minden mérés rendelkezik. Ilyen a mikroszkóp pontatlanságából adódó hibaforrás. Az alkalmazott mikroszkópnak a mérési pontossága $\pm 2,5 \mu\text{m}$, ismétlési pontossága $\pm 0,4 \mu\text{m}$. További hibaforrást jelent az X- és Y- koordinátabeli felbontás, amit a mérőgép szoftvere csak $15,676 \mu\text{m}$ felbontásban tudja kiexportálni egyéb fájl típusokba. Ennek a felbontásnak a finomítása nagyban javíthat a pontosságon, mivel a sorja geometriájában sok esetben vannak $30\text{-}40 \mu\text{m}$ nagyságú kitüremkedések (helyi maximum), amik így nem detektálhatóak megfelelően. Ezt jól mutatja a **3.3. ábra**, ami a **3.2. ábrán** látható furatról készült.



3.3. ábra Sorja egy részletének 3D-s képe

A **3.3. ábrán** jól látható továbbá egy másik hibaforrás. Megállapítható, hogy hibát okoz a sorja jellemzésében, amennyiben kizárólag 2D-s jellemzőkkel próbáljuk leírni. A mért adatok csak lokálisan jellemzik a sorját. Ezen felül a sorja meredeksége nem csak sugár irányban változik, így előfordulhat, hogy a megállapított meredekség jelentősen eltér a valóstól. Ezért érdemes lehet felületszerű becsléseket végezni a vonalszerű helyett.

4 Felhasznált anyagok, eszközök és módszerek

Ebben a fejezetben található a kísérlet során forgácsolt anyagok és a kísérleti környezet leírása. Végezetül a kapott eredmények kiértékelésének módszere kerül bemutatásra.

4.1 Felhasznált anyagok

A kísérlet során egyirányban szénszállal erősített polimer kompozitot használtam. Amely száliránya a marógép X-tengelyével meggyezett. Az UD-CFRP lemez mátrix anyaga vinilészter volt. A **4.1. táblázatban** található a felhasznált kompozit lemez néhány anyagjellemzője.

4.1. táblázat Vinilészter mátrixú UD-CFRP anyagjellemzői [11]

Anyag	R_m (MPa)	τ_m (MPa)	S_d (-)	α_{cN} (kJ/m ²)
Vinilészter mátrixú UD-CFRP	547,9±45,8	21,77±0,70	88,24±0,36	263,17±24,8

A szendvicsszerkezet másik alkotója az alumínium ötvözet. A kísérletben felhasznált lemez AlMgSi1 alumínium ötvözet. Az AlMgSi ötvözetekben a korrózióállóság nagy szilárdsággal párosul, ezért például a járműiparban is alkalmazzák. A **4.2. táblázatban** látható az AlMgSi1 fontosabb jellemzői.

4.2. táblázat AlMgSi1 ötvözet anyagjellemzői [7]

Anyag	R_m (MPa)	$R_{p0,2}$ (MPa)	A_{50} (%)
AlMgSi1	310	260	8

4.2 Kísérleti környezet és kísérletterv

A furatok megmunkálása Kondia B-640 típusú háromtengelyes marógépen történt. A felhasznált szerszám egy Ø10-es TIVOLY POLARIS 150 Xtreme típusú csigafúró volt. Továbbá a lemezek befogása a BME Gyártástudomány és -technológia Tanszéken lévő F1-es fúrókészülékben történt, ahol csavarokkal rögzíthetők egymáshoz a lemezek.

Kísérlettervezésnél a *Central Composite Inscribed* (CCI) típusú kísérlettervezést használtam, ahol a kísérleti alappontot ötször ismételt meg. A kísérlet során mennyiségi faktorként a forgácsolási sebességet (v_c) és az előtölást (f) variáltam. A kísérletterv a **4.3. táblázatban** található.

4.3. táblázat Az alkalmazott kísérletterv

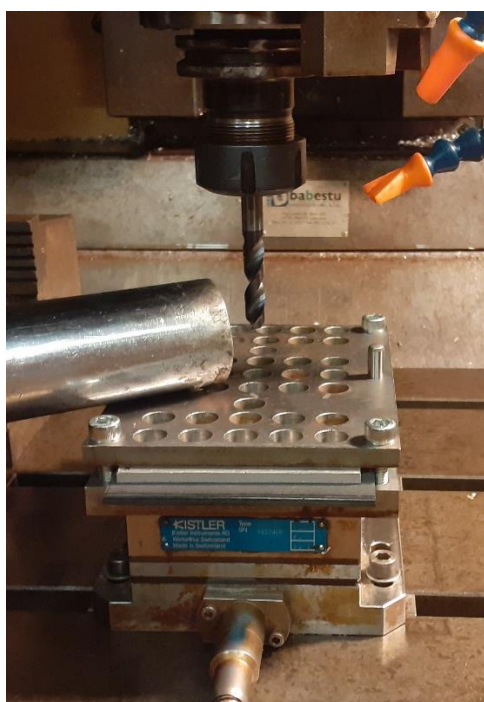
Faktorok		Faktorszintek				
		-2 ^{1/2}	-1	0	+1	+2 ^{1/2}
Forgácsolási sebesség	v_c (m/min)	100	114,65	150	185,36	200
Előtolás	f (mm)	0,05	0,065	0,1	0,135	0,15

A 4.3. táblázatban látható kísérlettervet mindkét lehetséges lemezsorrendben elvégeztem.

4.3 Mérőeszközök és szoftverek

Kísérlet során végeztem erőmérést Kistler 9257B erőmérővel. A mérési frekvencia 7 kHz volt, amelyet a maximális fordulatszám alapján határoztam meg. Erőmérés során tengely irányú (F_z) forgácsoló erőkomponenst mértem. Az erőmérés kiértékelését Minitab® szoftverben készítettem.

A rétegeközi sorja mérését Keyence VR-5000 típusú profilométerrel végeztem. Amely mikroszkópnak mérési pontossága $\pm 2,5 \mu\text{m}$, ismétlési pontossága $\pm 0,4 \mu\text{m}$. A 4.1. ábrán található a kísérleti- és a mérési környezet.



(a)



(b)

4.1. ábra (a) Kísérleti- és a (b) mérési környezet

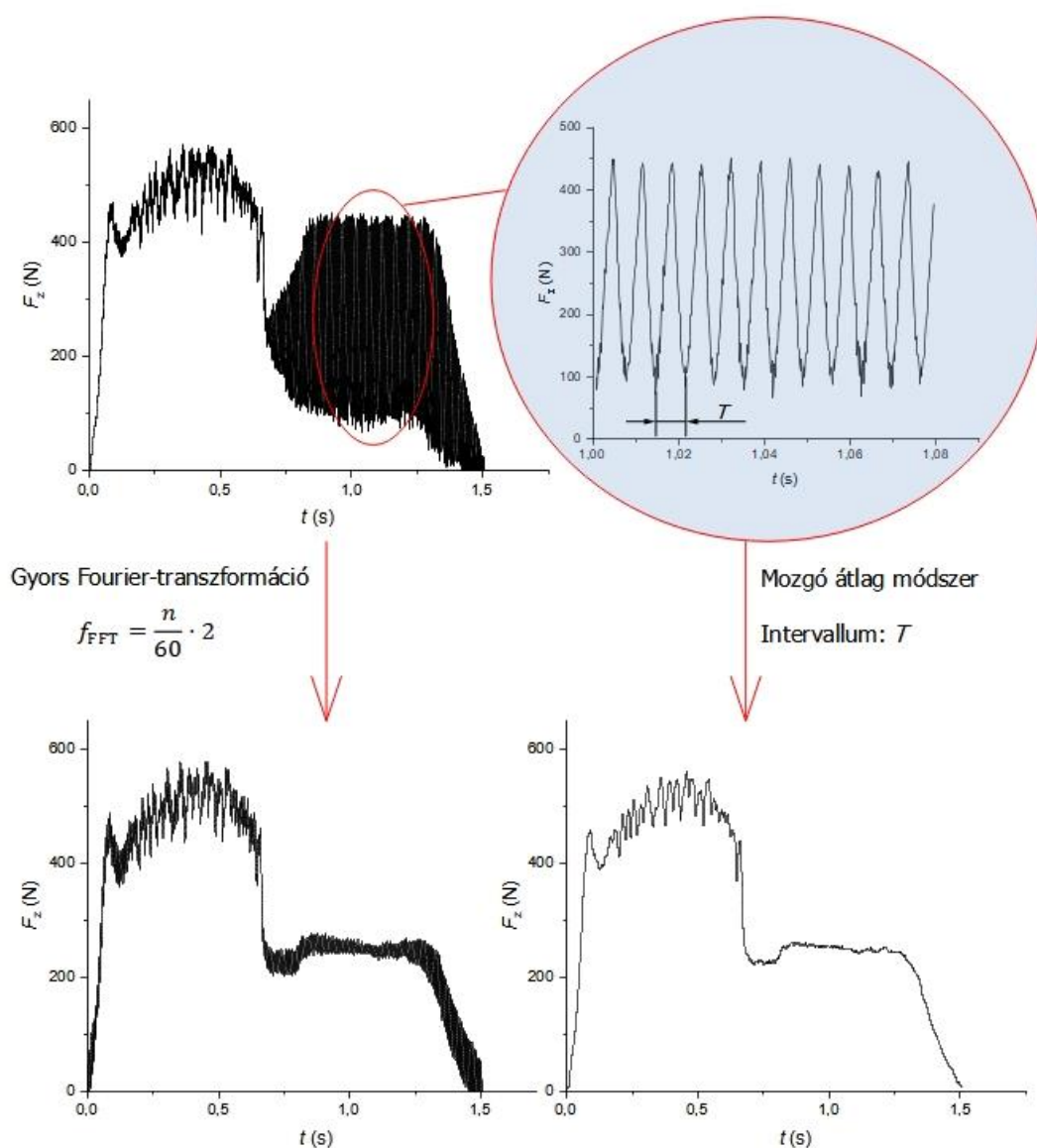
A 4.1. ábrán látható kísérleti- (a) és mérési (b) környezet az 1. sz. mellékletben található kísérleti- és a mérési jegyzőkönyvben részletesen kerülnek jellemzésre.

5 Eredmények és következtetések

Ebben a fejezetben a mérési eredmények és az azokból levonható következtetések kerülnek ismertetésre.

5.1 Erőmérés eredménye

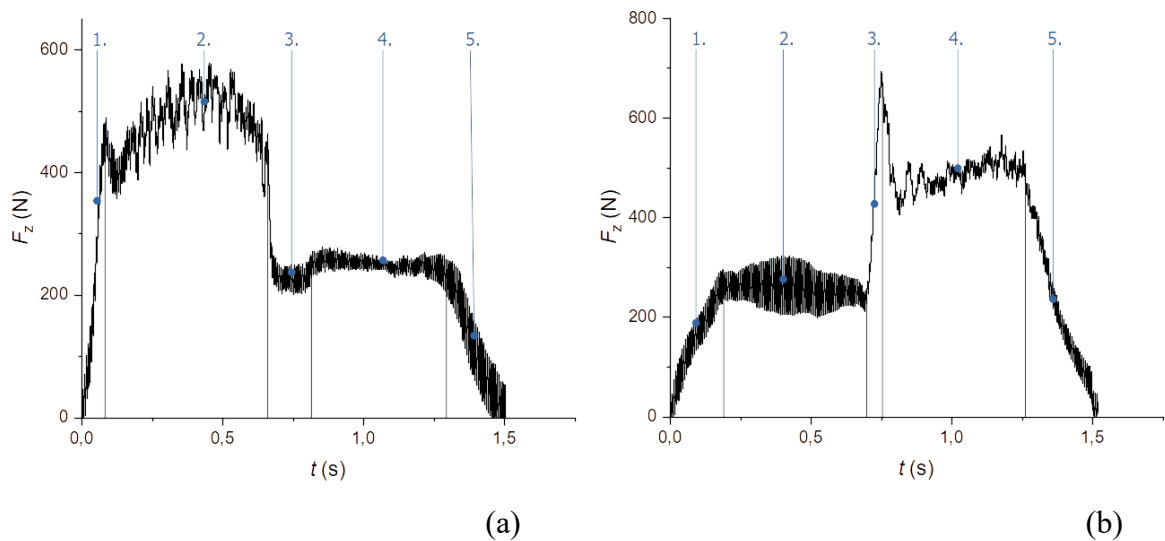
Bár a dolgozatban későbbiekben bemutatott módszer nem használja fel a forgácsoló erők alakulását, de az irodalomkutatás alapján látható, hogy léteznek olyan empirikus sorjabeclő képletek, amelyek a forgácsoló erőkből adnak becslést a keletkezett sorja egyes paramétereire. Ezért elengedhetetlennek tartom a forgácsoló erők alakulásának vizsgálatát. Az erőmérés eredményeként kapott szűretlen adatokon két különböző módszerrel is végeztem szűrést, amit az **5.1. ábra** szemléltet.



5.1. ábra Erőmérés feldolgozás

Az **5.1. ábra** alapján végeztem szűrést Gyors Fourier-transzformáció (FFT) és mozgó átlag módszerrel. A Gyors Fourier-transzformáció (FFT) módszer alkalmazásakor a szűrési frekvenciát (f_{FFT}) úgy definiáltam, hogy minden szerszámfordulat után két jel adódjon szűrést követően. A mozgó átlag esetében pedig az az intervallum, amelyen az átlagolást végzi a módszer, az megegyezik a szűretlen jel hullámhosszával (T). A kapott eredmények jellegre mindkét szűrési módszernél megegyeznek ezért csak az FFT módszerrel kapott eredményeket ismertetem.

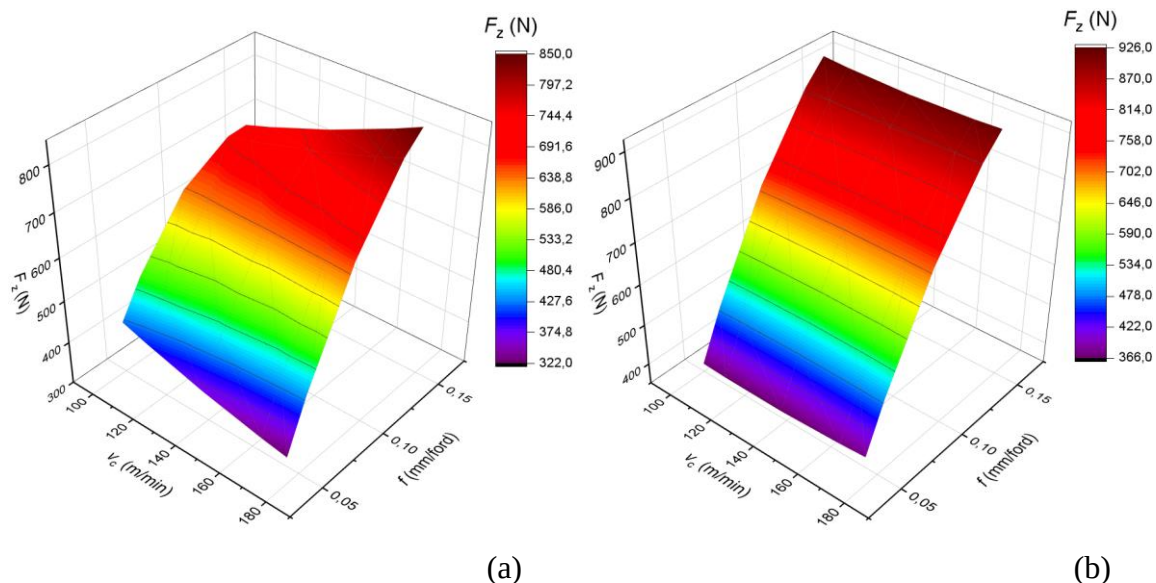
Az **5.2. ábrán** látható mindkét lemezsorrendnél a mért erő ugyanazon technológiai paraméterek mellett.



5.2. ábra Mért erő karakterisztikája (a) Al/UD-CFRP és (b) UD-CFRP/Al lemezsorrendnél

Az **5.2. ábra** alapján megállapítható az UD-CFRP-ben nagyságrendileg csak a fele a tengely irányú erőkomponens (F_z). Ami meglepő az erődiagrammok eredményében, hogy UD-CFRP/Al (b) esetén minden esetben tapasztalható volt rétegek között (3) egy erőmaximum, ami a tisztán alumíniumot forgácsoló részhez (4) képest 200 N-nal nagyobb. Ez egy hirtelen felfutó erő, ami hatással lehet a rétegek közötti sorjaképződésre. Ez a csúcs csak kisebb mértékben jelentkezik akkor, amikor az Al/UD-CFRP rétegsorrendnél (a) megkezdődik a forgácsolás. A **2. sz. mellékletben** látható az összes furatra kapott erő diagram.

A CCI kísérletterv alkalmas arra, hogy a vizsgált tartományban kiszámolhatóvá váljon egyes paraméter kombinációk esetén a vizsgált jellemző. Ezért gyakran alkalmazott módszer a technológiai paraméterek hatásainak szemléltetése térbeli felületként. Az **5.3. ábrán** szemléltetésre kerül a kísérletben vizsgált faktorok (v_c , f) hatása a tengely irányú erőkomponensre (F_z).



5.3. ábra Erőmérés eredmények: (a) Al lemez felül, (b) Al lemez alul

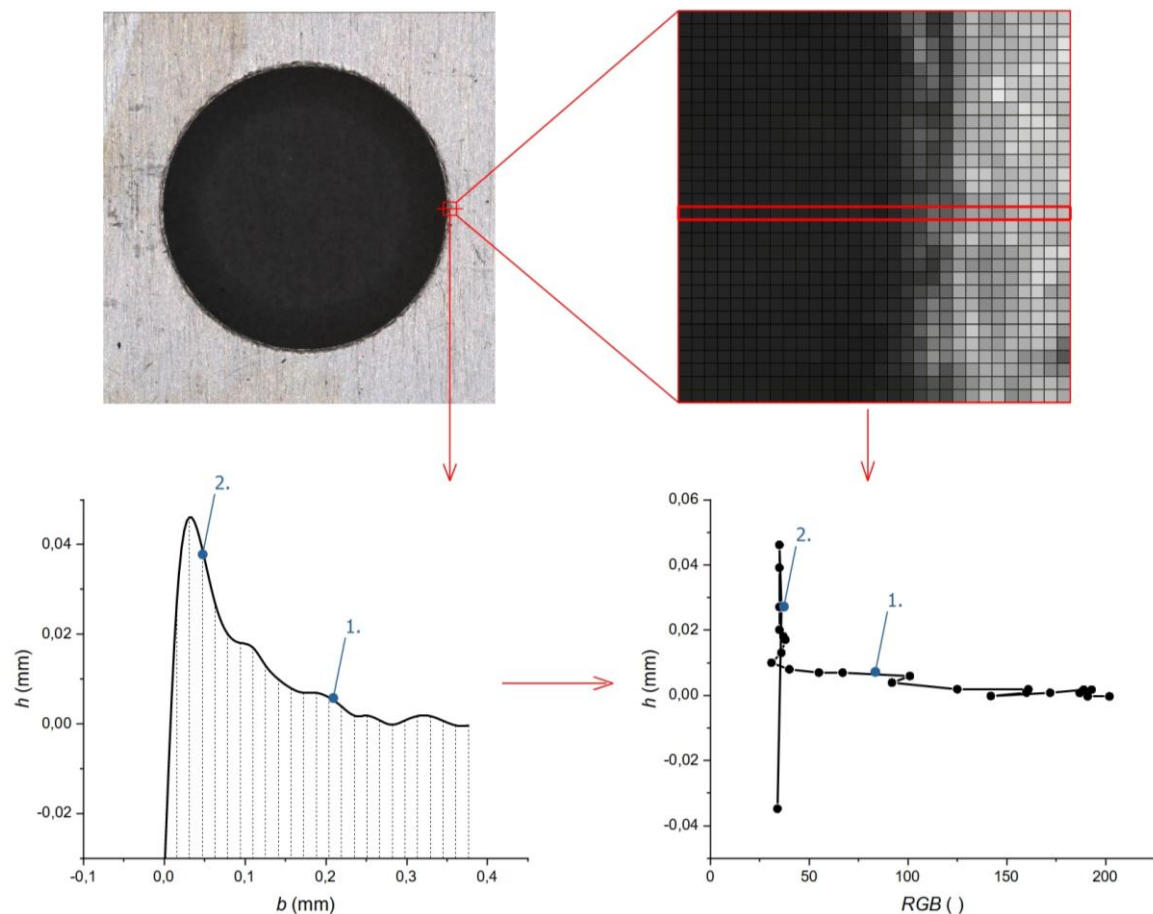
Az **5.3. ábrán** egyértelműen látható, hogy mindkét lemezsorrend esetén az előtolásnak (f) volt nagyobb hatása a tengely irányú erőkomponensre. A varianciaanalízis (ANOVA) alapján is az előtolásnak (f) van szignifikáns hatása a tengely irányú erőkomponensre (F_z), $\alpha = 0,05$ szignifikancia szint mellett.

5.2 Sorjabecslő módszer kivitelezése a mérési adatok alapján

5.2.1 Paraméterek összefüggésének keresése a sorjabecslő módszernél

Az előző fejezetben ismertetett Keyence VR-5000 típusú profilométerrel végzett mérést követően a mérőgép szoftverének segítségével a mért adatok .csv formátumba lettek kimentve. Így a furatokat jellemző tömbök jöttek létre, ami X- és Y- koordinátákhoz rendel hozzá különböző jellemzőket (h , RGB). Ezeknek a tömböknek felbontása $15,676 \mu\text{m}$. Az adatok beolvasását és vizsgálatát Microsoft Excel® programmal végeztem. Minden furat esetén két különböző tömböt vizsgáltam. Az egyik tömbben a koordinátákhoz tartozó magasság, míg a másikban a fekete-fehér színátmenetes mikroszkóppal készített kép RGB értéke volt. A dolgozatban az RGB (Red Green Blue) érték alatt minden esetben egy fekete-fehér színátmenetes kép RGB értékét értem, ami azt jelenti, hogy mind a három színárnyalat azonos értéket kap, így végig csak egy értéként hivatkozok a színárnyalatra.

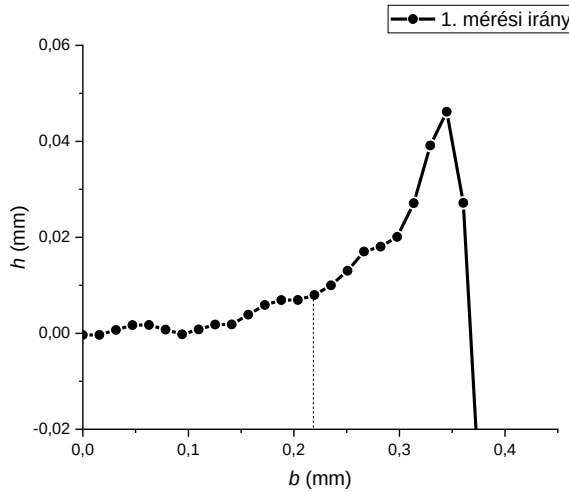
A dolgozat alapfeltevése alapján a sorja jellemzése 2D-s mikroszkópi kép alapján abban az esetben elvégezhető, ha a sorjamagasság (h) és a mikroszkóppal készített kép pixeljeinek RGB értéke egymással összefügg. Az **5.4. ábrán** kerül szemléltetésre a két jellemző összefüggése.



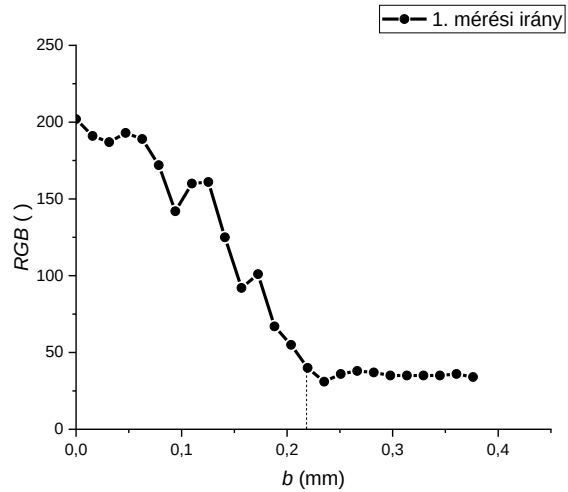
5.4. ábra Sorjamagasság és a mikroszkóppal készített kép összefüggése

Az **5.4. ábra** alapján felfedezhető, hogy vizuálisan nem észrevehető az összefüggés, de ha egy diagramon kerül ábrázolásra a mikroszkópi kép *RGB* értéke a sorjamagasság függvényében, akkor felfedezhető a két jellemző összefüggése. Az 1. rész az, amit vizsgálni lehet 2D-s mikroszkópi kép alapján. Ez az a rész, ahol az *RGB* érték jelentősen csökken a sorjakeresztmetszet meredekségének megváltozásának hatására. A 2. szakasz az, amit jelen mérési beállítás mellett nem lehet vizsgálni, mivel az *RGB* érték beáll egy megközelítőleg állandó 30-40 közötti értékre. Ezért ennek a szakasznak közelítése a mérési pontokra illesztett polinomok segítségével történik.

A furatokon 20°-onként felvett mérési irányokban vizsgáltam a furatokat. Elsőként itt is a sorjamagasságot vetettem össze az *RGB* értékkel. Az **5.5. ábra** a harmadik furat első mérési irányában készült Al/UD-CFRP rétegsorrend esetén.



(a)



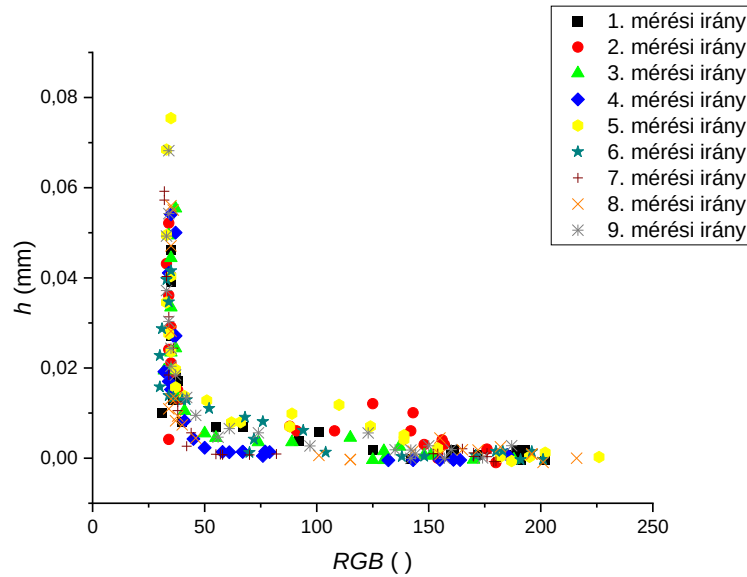
(b)

5.5. ábra (a) Sorjamagasság és (b) RGB érték egy mérési irányban

Az 5.5. ábrán felfedezhető, hogy az RGB érték (b) és a sorjamagasság (a) között van kapcsolat. Az RGB érték változása a sorjamagasság meredekségének megváltozásával van összefüggésben. Ezt indokolja a két mennyiség közötti fizikai kapcsolat is. A jelenség magyarázata a következő: A mikroszkópi fény a munkadarab felületéhez képest közel merőlegesen esik be (amennyiben többek között eltekintünk például a mért lemezek síklapúságától). Ennek a fénynek nagyrésze (~60-70%) visszaverődik az alumínium lemezről [38], így a mért felület meredeksége hatással van a mikroszkóp lencséihez érkező fényre. Így az érzékelt színárnyalattal is összefügg a felületrész meredeksége. A fizikai tartalmat figyelembe véve egyértelmű, hogy miért nem mutatkozik meg az RGB értéken mikor a sorja maximális magasságát elérve csökkeni kezd a sorjamagasság. Ekkor a meredekség abszolútértéke sok esetben nem változik, ami a visszavert fény mennyiségét meghatározza.

A 3. sz. mellékletben láthatók a h - b és a RGB - b diagramok.

Az 5.6. ábrán látható az előzőleg is vizsgált furat minden mérési irányában a sorjamagasság és az RGB érték összefüggése.

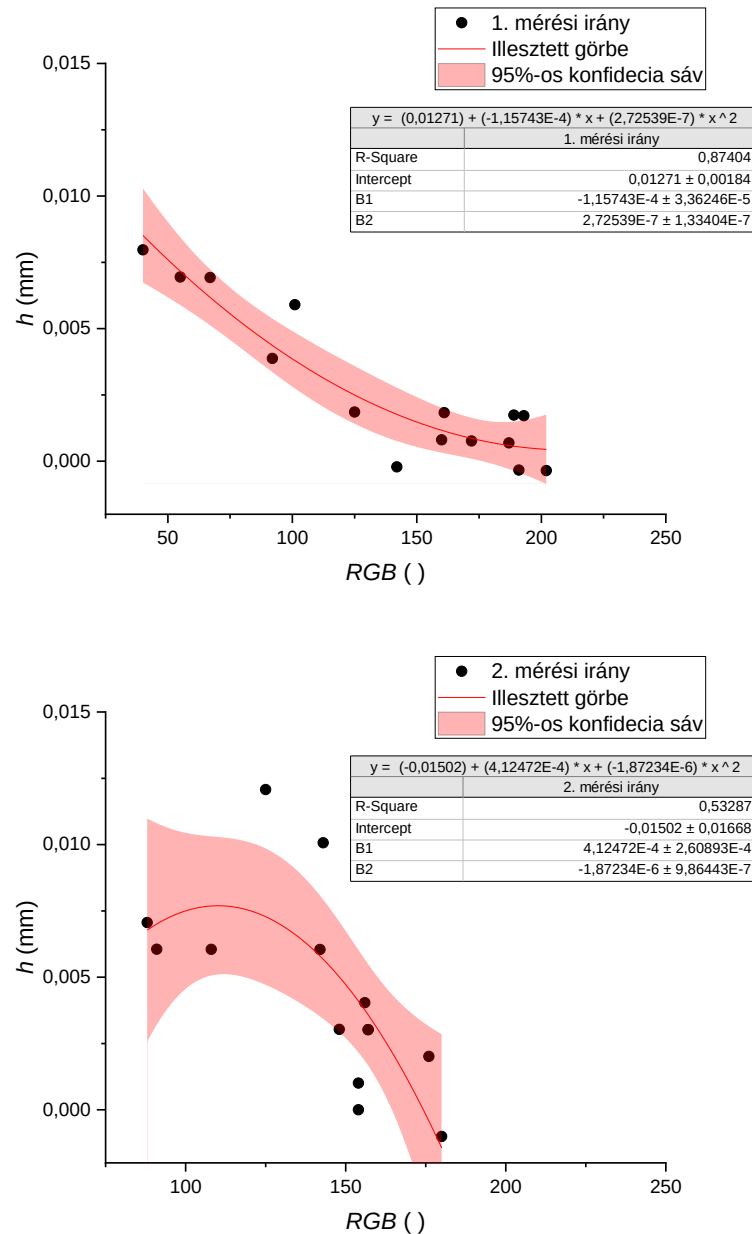


5.6. ábra Sorjamagasság összefüggése az RGB értékkel minden mérési irányban

Az **5.6. ábra** egyértelműen megmutatja, hogy alakra minden mérési irány megegyezik, viszont egyes szakaszokon nagy eltérések tapasztalhatók a mérési irányok között. Ennek a hibának egy része a lemez síklapúsági hibájából ered, amely korrigálva lett. Továbbá látszik, hogy a sorjamagasság és az RGB összefüggésének közelítésére egy másodfokú polinom elegendő, mivel legtöbb esetben nem tartalmaznak az egyes mérési irányokba kapott pontokra illesztett görbék a módszer szempontjából jelentős inflexiókat.

5.2.2 Mért adatokra görbeillesztés a sorjabecslő módszer alapján

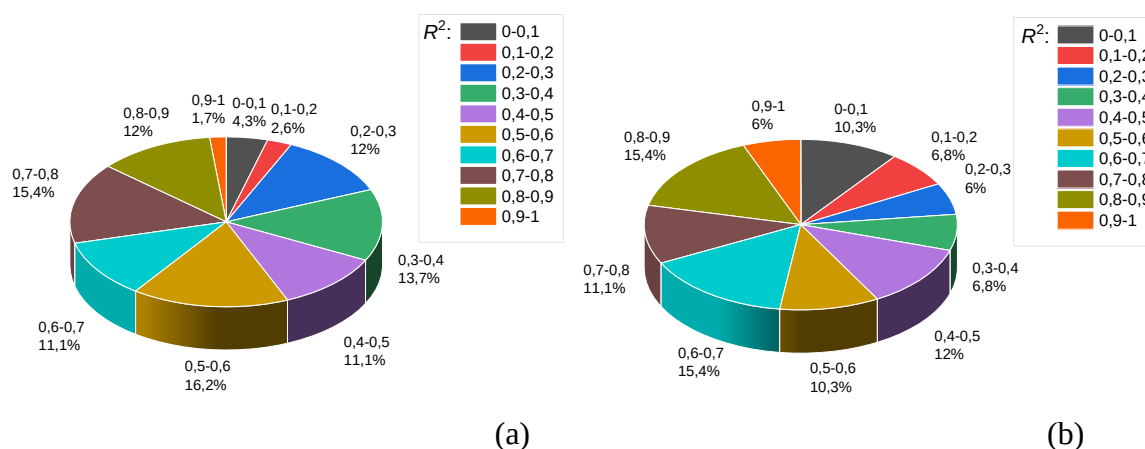
Minden mérési irányba kapott sorjamagasság értékeket szükséges ábrázolni az RGB függvényében. Itt csak azon mérési pontok vannak ábrázolva, ahol az RGB értéke eléri a 40-et. Valamint ezekre a mérési pontokra kell illeszteni a másodfokú polinomokat. A görbék illesztése 95%-os szignifikancia szint mellett történt. Az **5.7. ábrán** látható az eddigiekben is vizsgált furat első- és második mérési irányba mért pontokra illesztett görbéje.



5.7. ábra Mérési pontokra illesztett másodfokú polinomok

Az 5.7. ábra jól szemlélteti a görbeillesztés jószágának szélsőségeit. A két mérési irányba tapasztalható igen nagy eltérés a sorja inhomogenitásából származik, ami a mikroszkópi eredmények alapján látható. Ebben az esetben a polinomok együtthatóinak előjele sem egyezik meg. Ez kilenc mérési irány esetében csak a második irányra igaz, ezért ezt az irányt figyelmen kívül hagyom a későbbi számítások során. Továbbá azokat az eredményeket is figyelmen kívül hagyom, ahol az illesztett görbe determinációs együtthatója (R^2) 0,1 alatti. Mivel ezek nagyban torzítanak a sorjaillesztési módszer használhatóságának vizsgálatát. Így az összes furatot tekintve a 234 illesztett görbe közül összesen 17 került kiszűrésre. A

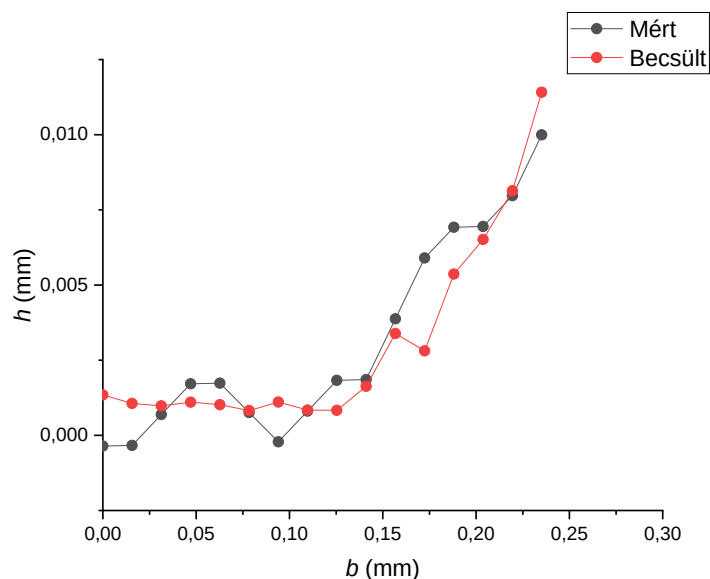
determinációs együtthatók szórásának vizsgálata igen fontos a tárgyalt sorjabecslő módszernél, ezért az **5.8. ábrán** ez kerül szemléltetésre.



5.8. ábra Determinációs együttható eloszlása (a) Al/UD-CFRP- és (b) UD-CFRP/Al rétegsorrendben

Az **5.8. ábra** alapján látható, hogy igen nagy szórást mutat a görbeillesztés determinációs együtthatója (Al/UD-CFRP lemezsorrendnél 0,23, míg UD-CFFRP/Al lemezsorrend esetében 0,27). Ezért érdemes vizsgálni annak hatását, hogy a szélső tartományokba eső részek hogyan befolyásolják az eredményeket. Szűrés nélkül a determinációs együttható Al/UD-CFRP lemezsorrendnél $R^2 = 0,527$, míg UD-CFFRP/Al lemezsorrend esetében $R^2 = 0,534$.

Az **5.7. ábrán** látható illesztett másodfokú polinomok együtthatóinak átlagát vettem és ebbe a polinomba behelyettesített RGB értékekkel történik a sorjamagasság becslés, azon tartományba, ahol $RGB < 40$. Ekkor fontos összevetni a mért sorjamagasságokat a becsült értékekkel. Az **5.9. ábrán** ez látható, a többi diagram a **4. sz. mellékletben** láthatóak.



5.9. ábra Mért és becsült eredmények összehasonlítása

Az **5.9. ábrán** látható, hogy a becsléssel kapott értékek jól közelítik a mért értékeket. Ezen a furaton a nyolc mérést (második mérési irány kiszűrésre került) tekintve a determinációs együtthatók átlag értéke $R^2_{\text{átl}} = 0,729$ ($\sigma = 0,132$). Ez az érték nagyobb, mint ugyanezen mérésekre kapott determinációs együttható, amely illesztett görbékből származik. Az **5.1. táblázatban** van feltüntetve az egyes mérési irányoknál az illesztett másodfokú polinom- és az eredményként kapott összehasonlítás determinációs együtthatója.

5.1. táblázat Determinációs együtthatók vizsgálata

	Mérési irányok									Átlag	Szórás
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
1. determinációs együttható *	0,874	-	0,773	0,753	0,832	0,826	0,299	0,451	0,775	0,698	0,183
2. determinációs együttható **	0,854	-	0,858	0,662	0,664	0,828	0,466	0,656	0,845	0,729	0,132

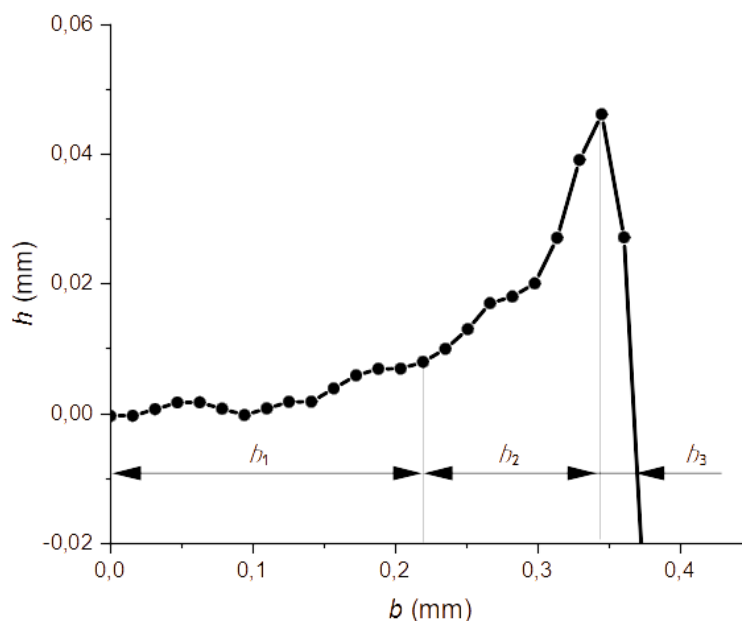
*A mért adatoknál a h meghatározása RGB függvényében. Itt a determinációs együttható a másodfokú polinom közelítését mutatja meg a mért adatokhoz képest.

**Az adott koordináta-hoz tartozó mért pontok és a becsült pontok közötti illeszkedést „jóágát” jelzi.

Az **5.1. táblázat** alapján látható, hogy másodfokú polinommal 95%-os szignifikancia szint mellett a determinációs együtthatók átlag értéke $R^2 = 0,729$ -nak adódott $\sigma = 0,132$ -os szórás mellett. Az is látható, hogy azon mérési irányok (7-8), amelyek az 1. determinációs együtthatónál nagyon alacsony értékűek ($<0,5$), azok jelentősen jobban becsülhetők, mint az az eredetileg h/RGB alapján várható lett volna. Ez azt jelentheti a módszer alkalmazhatóságára nézve, hogy egy kevésbé szigorú szűréssel is igen jó közelítés érhető el úgy, hogy az eredetileg is jól illeszthető irányokban sem romlik jelentősen a determinációs együttható.

5.2.3 Becslő módszerrel nem leírható tartományokra illesztett görbék

A korábbiak alapján csak azon tartományokra volt használható a sorjabecslő módszer, ahol az RGB érték kisebb, mint 40. Így még két tartományon kell görbét illeszteni. Az **5.10. ábrán** a különböző tartományok vannak elválasztva.



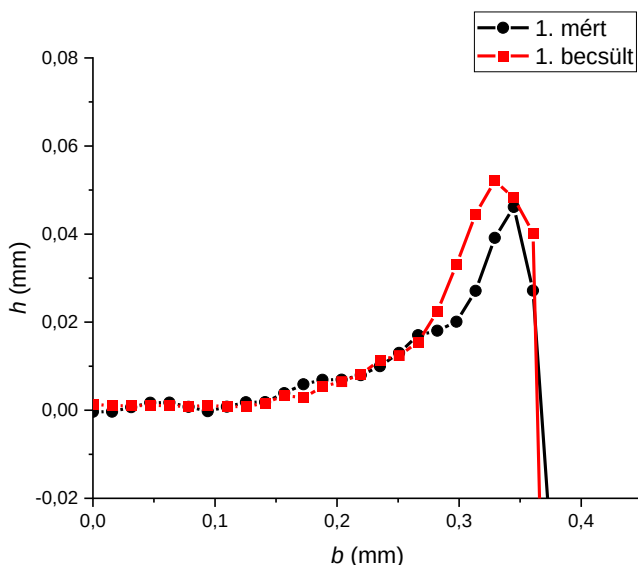
5.10. ábra A sorja különböző tartományai

Az **5.10. ábra** alapján a b_1 jelöli az ismertetett módszerrel becsülhető tartományt. A b_2 és b_3 tartományoknál a mért adatokra illeszttem polinomokat és ezeknek együtthatóit átlagoltam. A polinomokat itt is az eredeti görbékben lévő inflexiók száma alapján határoztam meg. Ez azért fontos, mert így kevésbé adódhatnak olyan sorjaalakok eredményül, amelyek messze állnak egy valódi sorja alakjától. Például a b_3 szakaszt tekintve látható, hogy a valódi alakja egy másodfokú görbéhez közelíthet leginkább (további, a diagramon nem látható pontok is rendelkezésre állnak így magasabb fokú polinomokhoz is illeszthető) hiába eredményeznének a magasabb fokú polinomok jobb illeszkedést. Így a b_2 szakaszt egy negyedfokú-, míg a b_3 szakaszt egy másodfokú polinommal közelítettem. Továbbá a b_2 és b_3 esetén a nulladik kitevőhöz tartozó együttható értéke az előző szakasz végpontja, különben nem beszélhetnénk összefüggő görbéről. Így már a sorja teljes tartománya meghatározásra került.

5.3 Sorjabecslő módszerrel kapott eredmények

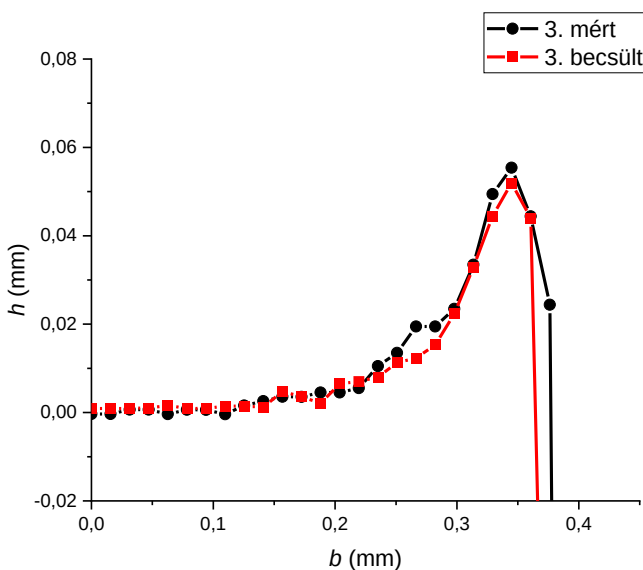
Az előző alcímben leírt lépések eredményeként a kilenc mérési adatból nyolc mérési eredmény adódott (a második mérési irány jelentősen eltért a többi sorjától, így csak nagy

hibával lehetne közelíteni). Az eredmények leginkább a mért és a becsült görbék egy diagramon való ábrázolásával szemléltethetők. Ez látható az **5.11. ábrán**.



5.11. ábra Mért és becsült sorja az első mérési irányban

Az **5.11. ábra** alapján látható, hogy $h = 0,01$ mm sorjamagasságig igen jó közelítés, majd megnő az eltérés. Ez abból adódik, hogy itt már nem a 2D-s mikroszkópi kép alapján becsülő módszer, hanem csak a mért sorjamagasságokra polinom illesztése és azok együttthatóinak átlagolása történt. Az igen nagy különbség a két módszer között, hogy a 2D-s mikroszkópi kép alapján becsülő módszer figyelembe tudja venni a sorja helyi alakosságát, míg a másik módszer csak egy átlag görbe alakot tud illeszteni. De vannak irányok, ahol ez a módszer is igen jó közelítést ad. A harmadik mérési irányba egy ilyen jó közelítés látható az **5.12. ábrán**.

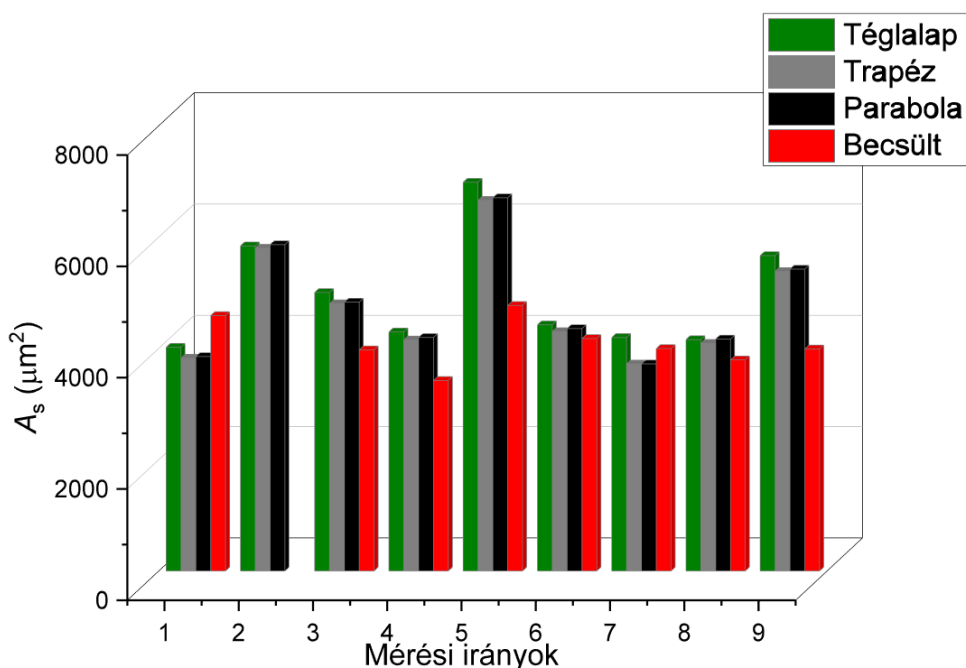


5.12. ábra Mért és becsült sorja a harmadik mérési irányban

Az **5.12. ábrán** mindhárom szakaszban alakra jó közelítés látható, de mint majd későbbiekben látható ez nem jelenti azt, hogy a sorjakeresztmetszet (A_s) esetén is ez jobb közelítés, mint az első mérési irány esetében. A többi mérési iránynál kapott diagram az **5. sz. mellékletben** látható.

A dolgozat kiindulási célja egy sorjakeresztmetszet becslés volt. Az előző bekezdésben látható volt, hogy a sorjakeresztmetszet nem adja vissza megfelelően a sorjaalakot, de az irodalomkutatás során látható volt, hogy a sorja jellemzése során mégis fontos mérőszám a sorja terület és a sorjatérfogot, mivel ezek a mérőszámok adják meg sok esetben az eltávolítandó anyagmennyiséget. Igaz, a vizsgált szendvicsszerkezet esetében rétegekben nem beszélhetünk eltávolítandó anyagmennyiségről, de a dolgozatban bemutatott módszer feltehetően nem csak a szendvicsszerkezeteknél teszi lehetővé a sorjavizsgálatot, hanem egyéb sorjavizsgálat során is. Ezért érdemes bemutatni a sorjakeresztmetszetről kapott eredményeket.

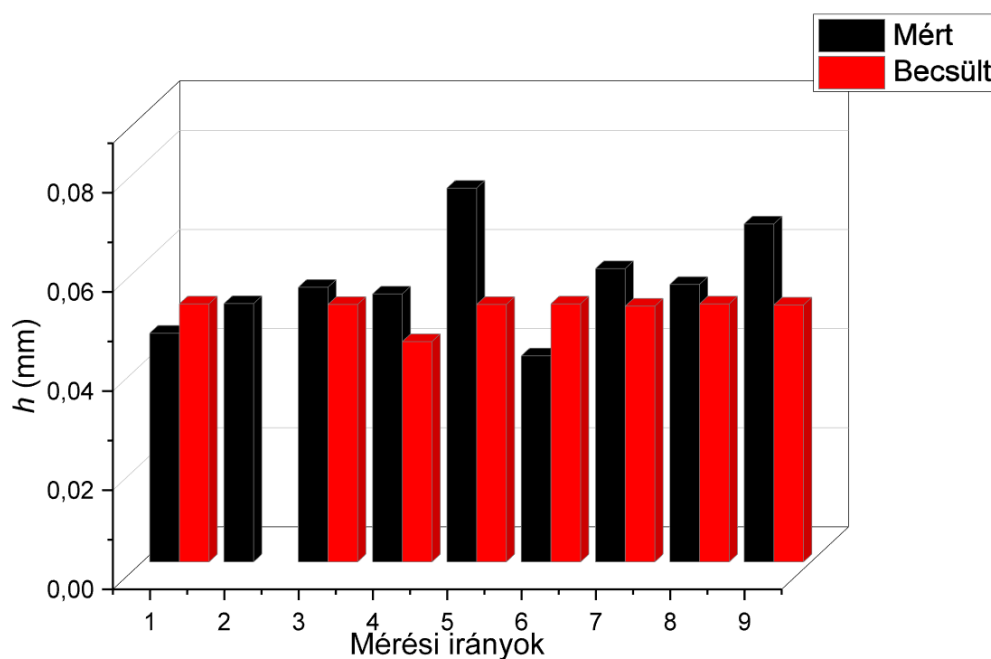
Sok esetben az adott eredmények összehasonlítása során nehezen megállapítható, hogy az eredmény mennyire ad pontos megközelítést. Ennek elkerülése érdekében a mért adatokat három különböző területszámítási módszerrel is kiszámítottam. Ezeket a területszámítás során illesztett alakzatok szerint jelöltem. Az illesztett alakzatok a téglalap, a trapéz és a parabola. A területszámítási módszerek is ebben a sorrendben egyre pontosabbak. A sorjabecslési módszernél parabolát illesztettem minden esetben. Az **5.13. ábrán** a területszámítás eredményei láthatóak.



5.13. ábra Mért és becsült sorjakeresztmetszet összehasonlítása

Az **5.13. ábrán** látható, hogy a mért sorjakeresztmetszet nagyobb szórással rendelkeznek, mint a becsült értékek. Ez a görbeillesztés során lévő átlagolásból is származik. A mért és a becsült értékek eltérése igen változatos mértékű, de ez irodalomkutatás során is már látható volt, hogy a sorjavizsgálatnál legtöbb esetben jelentősen eltérnek az egyes irányok. Számszerűsítve a parabola illesztésével kapott eredmények mért esetben $A_{sm} = 4658,052 \mu\text{m}^2$, míg becsült esetben $A_{sb} = 4090,164 \mu\text{m}^2$. A becsült eredmények jóságának átlaga $A_{s, \text{becsült}}/A_{s, \text{mért}} = 0,902$, míg ennek a jellemzőnek szórása $\sigma = 0,156$. Mivel a szakirodalomban legtöbb esetben a felállított modelleket sorjamagasságra vizsgálják, ezért szükséges összehasonlítani a kapott sorjamagasságokat.

A kutatás jelenlegi fázisában a sorjamagasság vizsgálata nem jellemzi a 2D-s mikroszkópi kép alapú sorjabecslő módszert, mivel azok a szakaszok nem esnek bele abba a tartományba, ahol a görbe meredeksége nagyobb. Így inkább a sorjamagasságok összevetése csak a mért pontokra illesztett polinomokat (b_2 és b_3) jellemzi. A mért és a becsült sorjamagasságok láthatóak az **5.14. ábrán**.



5.14. ábra Mért és becsült sorjamagasságok összehasonlítása

Az **5.14. ábrán** látható, hogy a becslési módszer jelen beállítások mellett nem követi le megfelelően a különböző sorjamagasságokat. A 6-9 mérési irányoknál pedig csak igen kicsi eltérés ($\sim 0,001 \text{ mm}$) van a becsült sorjamagasságokban.

6 Összefoglalás és kitekintés

Ebben a fejezetben ismertetem az elvégzett kutatás során elért fontosabb eredményeket és ezek alapján összegzem a továbblépési lehetőségeket, amik alapján folytatódhat a megkezdett kutatómunka.

6.1 Összefoglalás

A dolgozatban egy a forgácsolási technológiák során gyakran felmerülő problémára kerestem a választ. Ez a forgácsolásindukált sorja mérése furatkészítés során. A szakirodalmak alapján tapintós érdességmérővel, profilométerrel és konfokális mikroszkóppal történik legtöbb esetben a sorjamérés. Mindhárom jelentős hátrányának (idő, költség és pontosság) kiküszöbölése hívta életre dolgozatom témáját, ahol az alapelképzelés szerint 2D-s mikroszkópi kép alapján becsülhetővé válnak a sorja különböző jellemzői. Ehhez az elképzeléshez kapcsolódott a BME Gyártástudomány és -technológia Tanszék egyik fő kutatási irányának számító fém/CFRP szendvicsszerkezetek vizsgálata. Ahol fontos vizsgálni a szendvicsszerkezeteknél a rétegek közötti sorját. Így dolgozatomban Al/UD-CFRP szendvicsszerkezeteknél vizsgáltam a rétegek közötti sorját az Al lemezeken. Kiindulásként problémát jelentett, hogy a szakirodalom áttekintése során a nyílt forrású szakirodalomban nem találtam olyan kutatást, ahol hasonló mérési módszert vizsgáltak, így a dolgozatomban tárgyalt mérési módszer ezen a területen újszerűnek mondható.

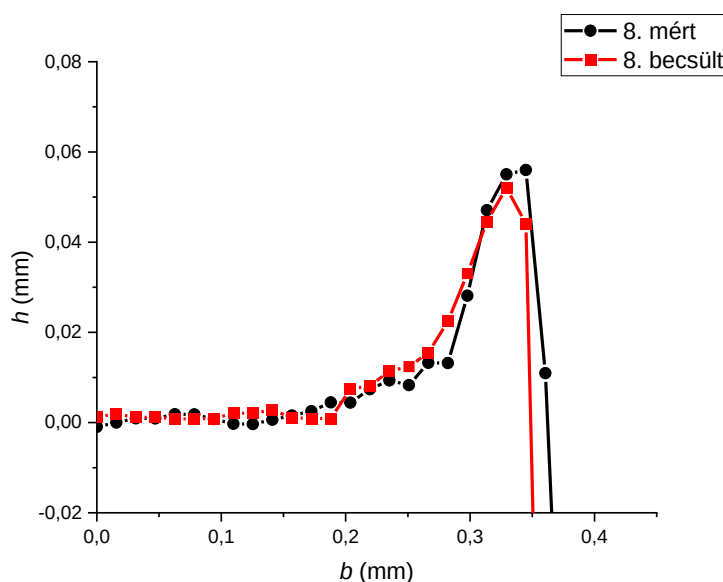
A dolgozat során elsőként kidolgoztam egy algoritmust, ami alapján kivitelezhető a sorjamérési módszer. Majd tárgyaltam a sorjabecslő módszer hibaforrásait és limitációit. Ahol jól láthatóvá vált, hogy a becslő módszernél sok nehézség adódik, amivel szükséges foglalkozni. Ennek hatására ez a becslő módszer egy hosszabb kidolgozást igényel, ami jelen dolgozat keretei között nem kivitelezhető. Így arra fókuszáltam, hogy a dolgozat eredményeként láthatóvá váljon a módszer alkalmazhatósága.

Végeztem fűrési kísérletet CCI (Central Composite Inscribed) kísérletterv alapján. A dolgozat kidolgozása nem tette volna szükségessé a CCI kísérlettervet, de a későbbi vizsgálatokra való tekintettel ez bizonyult előnyösnek. Így két faktort variáltam öt szinten a szakirodalmi ajánlásokat figyelembe véve. A forgácsolási sebességet $v_c = 100-175$ m/min-, míg az előtolást $f = 0,05-0,15$ mm/ford tartományban vizsgáltam.

A sorjabecslő módszert egy furaton lévő több mérési irányban vizsgáltam. Elsőként az adott mérési koordináta-hoz tartozó sorjamagasság (h) és a mikroszkópi kép színárnyalata (RGB) közötti összefüggést kerestem. Egyértelműen látszódott, hogy másodfokú polinommal jól közelíthető az RGB függvényében a sorjamagasság. Itt meghatároztam 95%-

os szignifikancia szint mellett a görbék determinációs együtthatóit (R^2). Al/UD-CFRP rétegsorrendnél a determinációs együtthatók átlaga $R^2 = 0,698$, míg annak szórása $\sigma = 0,183$.

Ezt követően a kapott közelítő összefüggéssel határoztam meg az RGB értékek alapján az adott pixelekhez tartozó sorjamagasságot. Itt 95%-os szignifikancia szint mellett a determinációs együtthatók átlaga $R^2 = 0,729$, míg annak szórása $\sigma = 0,132$. A módszer jelenlegi kidolgozottsági szintje mellett ez a determinációs együttható érték igen magasnak számít. Azonban a sorja csak egy adott tartománya volt vizsgálható ($RGB < 40$) jelen kísérleti és mérési beállításoknál. Így a kimaradt tartományokat a mérési pontokra illesztett polinomok együtthatóinak átlagolásával kapott polinomokkal közelítettem. Így már becsülhetővé vált a sorja teljes tartománya. Egy mért és egy becsült sorja látható a **6.1. ábrán**.



6.1. ábra Mért és becsült sorja a nyolcadik mérési irányban

A **6.1. ábra** alapján látható, hogy ebben a mérési irányban igen jó a módszerrel becsült görbe közelítése.

Végül meghatároztam a kapott görbék alapján a sorjakeresztmetszetet. A területszámítás során parabolát illesztve a jóság átlaga $A_{s, \text{becsült}}/A_{s, \text{mért}} = 0,902$ -nak, míg ennek a jellemzőnek szórása $\sigma = 0,156$ -nak adódott.

A dolgozat eredményeit összegezve látható, hogy érdemes továbbfejleszteni a becsülő módszert, mivel jelen fejlettségi szintjén is igen jó közelítéssel becsülhetők segítségével a sorja jellemzői.

6.2 Kitekintés

A kutatás során több nehézség és kihívás is felmerült, de ezek közül a dolgozat véges kerete miatt nem mindegyik került vizsgálatra. Viszont a nem vizsgált tényezőknek is igen nagy jelentősége lehet, így ezek mentén szükséges elindulni a további kutatások tervezése során.

A vizsgálandó kihívások a következők:

- A sorjabecslő módszer érzékeny a felületi hibákra, amik csak az *RGB* értéket változtatják meg nagy mértékben, de a sorjamagasságot nem.
- A dolgozatban a sorját csak vonalszerűen, egy mérési irány mentén vizsgáltam, de ha a sorját egy 3D-s képen ábrázoljuk, akkor látható, hogy nem csak mérési irányba változik a sorja meredeksége. Így érdemes vonalszerű helyett felületszerű problémának kezelni a sorjabecslést.
- Az eredményekből látszódott, hogy a 2D-s kép alapú becslés pontosabb eredményt ad, mint a sorjamagassági értékekre illesztett polinomok. Így fontos vizsgálni a mikroszkóp mérési beállításainak hatását a 2D-s módszerrel becsülhető tartomány nagyságára nézve.
- A dolgozatban csak egy furaton készítettem el teljesen a sorjabecslő módszert, így a becslő és közelítő görbék is csak ezen kilenc mérési irány alapján történtek meghatározásra. Így szükséges vizsgálni, hogy mekkora adatmennyiség esetén válik viszonylag alacsony hibaforrássá az alulmintavételezés.
- Az eredmények szórásából látható volt, hogy jelentősen javíthatja a becslés pontosságát, ha az átlag sorja alaktól jelentősen eltérő sorják nem vesznek részt a polinomok közelítő összefüggéseinek meghatározásában.

7 Felhasznált források

- [1] Z. yuan Jia, C. Chen, F. ji Wang, C. Zhang, and Q. Wang, “Analytical model for delamination of CFRP during drilling of CFRP/metal stacks,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, no. 11–12, pp. 5099–5109, Feb. 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05029-y.
- [2] S. Vigneshwaran, M. Uthayakumar, and V. Arumugaprabu, “Review on Machinability of Fiber Reinforced Polymers: A Drilling Approach,” *Silicon*, vol. 10, no. 5, pp. 2295–2305, Sep. 2018, doi: 10.1007/s12633-018-9764-9.
- [3] L. Sorrentino, S. Turchetta, and C. Bellini, “A new method to reduce delaminations during drilling of FRP laminates by feed rate,” *Compos Struct*, vol. 186, pp. 154–164, Feb. 2018.
- [4] J. Liang and Y. He, “Study on the evolution and suppression strategy of the interlayer gap in the drilling of CFRP/Al stacked materials,” *J Manuf Process*, vol. 92, pp. 329–337, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.02.010.
- [5] D. K. Rajak, P. H. Wagh, and E. Linul, “Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A review,” *Polymers*, vol. 13, no. 21. MDPI, Nov. 01, 2021. doi: 10.3390/polym13213721.
- [6] A. Pramanik *et al.*, “Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys – A review,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 101. Elsevier Ltd, pp. 1–29, Oct. 01, 2017. doi: 10.1016/j.compositesa.2017.06.007.
- [7] G. Szabó, “Alumíniumötvözetek típusai és feldolgozásuk félfolyamatos öntést követő hengerléssel,” 2019.
- [8] R. Angelone, A. Caggiano, I. Improta, L. Nele, and R. Teti, “Characterization of hole quality and temperature in drilling of Al/CFRP stacks under different process condition,” in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2019, pp. 319–324. doi: 10.1016/j.procir.2019.02.074.
- [9] L. Kala Koyyagura and P. Rao Karanam, “Influence of cutting conditions in drilling of CFRP/Al stacked composites,” 2021.
- [10] M. Zhao, F. Wang, R. Fu, K. Sun, C. Du, and J. Cui, “Drilling study on CFRP/Al stack with different CFRP thickness using chip-breaking step drill bit,” *J Manuf Process*, vol. 90, pp. 300–309, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.01.050.
- [11] csongor Pereszlai, “Szénszállal erősített polimer kompozitok furatforgácsolási technológiáinak fejlesztése és optimalizálása,” *BME Gépészmérnöki Kar Gyártástudomány Tanszék*, 2022.
- [12] K. K. Panchagnula and K. Palaniyandi, “Drilling on fiber reinforced polymer/nanopolymer composite laminates: A review,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 7, no. 2. Elsevier Editora Ltda, pp. 180–189, Apr. 01, 2018. doi: 10.1016/j.jmrt.2017.06.003.
- [13] N. Geier, J. P. Davim, and T. Szalay, “Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 125. Elsevier Ltd, Oct. 01, 2019. doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105552.
- [14] F. ji Wang, J. wei Yin, J. wei Ma, Z. yuan Jia, F. Yang, and B. Niu, “Effects of cutting edge radius and fiber cutting angle on the cutting-induced surface damage in machining of unidirectional CFRP composite laminates,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 91, no. 9–12, pp. 3107–3120, Aug. 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0023-9.

- [15] N. Geier, "Egyirányban szénszállal erősített polimer (UD-CFRP) kompozit anyagok forgácsolt alakjátságainak mikro- és makrogeometriai vizsgálata és jellemző mérőszámrendszerének kidolgozása," *BME Gépészmérnöki Kar Gyártástudomány Tanszék*, 2019.
- [16] N. Geier, J. Xu, C. Pereszlai, D. I. Poór, and J. P. Davim, "Drilling of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: Difficulties, challenges and expectations," in *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 2020, pp. 284–289. doi: 10.1016/j.promfg.2021.07.045.
- [17] R. Horváth, "Öntött alumínium ötvözetek forgácsolhatóságának elemzése külső hengeres felületek finomsztergálásánál," 2015.
- [18] Z. Maros, "Színesfémek forgácsolása," *Nemzeti tankönyvkiadó*, 2009.
- [19] J. Xu and M. El Mansori, "Experimental study on drilling mechanisms and strategies of hybrid CFRP/Ti stacks," *Compos Struct*, vol. 157, pp. 461–482, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.07.025.
- [20] Q. An, J. Dang, J. Li, C. Wang, and M. Chen, "Investigation on the cutting responses of CFRP/Ti stacks: With special emphasis on the effects of drilling sequences," *Compos Struct*, vol. 253, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112794.
- [21] X. Y. Qiu *et al.*, "Influence of main cutting edge structure on hole defects in CFRP/titanium alloy stacks drilling," *J Manuf Process*, vol. 69, pp. 503–513, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.07.061.
- [22] B. Zhong, F. Zou, Q. An, M. Chen, H. Zhang, and C. Xie, "Experimental study on drilling process of a newly developed CFRP/Al/CFRP co-cured material," *J Manuf Process*, vol. 75, pp. 476–484, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.12.062.
- [23] L. Zhang, Z. Liu, W. Tian, and W. Liao, "Experimental studies on the performance of different structure tools in drilling CFRP/Al alloy stacks," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 81, no. 1–4, pp. 241–251, Oct. 2015, doi: 10.1007/s00170-015-6955-z.
- [24] International Standards ISO 13715, "Second edition," 2000.
- [25] L. Pilný, L. De Chiffre, M. Píška, and M. F. Villumsen, "Hole quality and burr reduction in drilling aluminium sheets," *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 5, no. 2, pp. 102–107, 2012, doi: 10.1016/j.cirpj.2012.03.005.
- [26] G. Póka, "Forgácsvastagság hatása a sorjaképződésre síkmarásnál," 2021.
- [27] J. Leopold and G. Schmidt, "Methods of burr measurement and burr detection," *VDI Ber*, vol. 1860, pp. 223–229, 2004.
- [28] Mahr katalógus, "https://precimer.hu/katalogusok/mahr/mahr_2022/mahr-feluleti-erdessegmerok.pdf."
- [29] E. Bahçe and B. Özdemir, "Burr Measurement Method Based on Burr Surface Area," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, vol. 8, no. 4, pp. 1287–1296, Jul. 2021, doi: 10.1007/s40684-020-00228-0.
- [30] C. Hellstern and G. W. Woodruff, "Investigation of Interlayer Burr Formation in the Drilling of Stacked Aluminum Sheets," 2009.
- [31] H. Li, G. He, X. Qin, G. Wang, C. Lu, and L. Gui, "Tool wear and hole quality investigation in dry helical milling of Ti-6Al-4V alloy," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 71, no. 5–8, pp. 1511–1523, Mar. 2014, doi: 10.1007/s00170-013-5570-0.
- [32] N. Mondal, S. Mandal, and M. C. Mandal, "FPA based optimization of drilling burr using regression analysis and ANN model," *Measurement (Lond)*, vol. 152, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2019.107327.

- [33] E. Kilickap, “Modeling and optimization of burr height in drilling of Al-7075 using Taguchi method and response surface methodology,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 49, no. 9–12, pp. 911–923, Aug. 2010, doi: 10.1007/s00170-009-2469-x.
- [34] E. Franczyk, Ł. Slusarczyk, and W. Zebala, “Drilling burr minimization by changing drill geometry,” *Materials*, vol. 13, no. 14, Jul. 2020, doi: 10.3390/ma13143207.
- [35] V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, B. T. Achyutha, and B. Siddeswarappa, “Methodology of Taguchi optimization for multi-objective drilling problem to minimize burr size,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 34, no. 1–2, pp. 1–8, Aug. 2007, doi: 10.1007/s00170-006-0571-x.
- [36] A. M. Mandra, J. Jiang, & Fengfeng, and J. Xi, “A new burr formation model for drilling with tool wear”, doi: 10.1007/s00170-021-07031-4/Published.
- [37] A. Abdelhafeez Hassan, S. L. Soo, D. K. Aspinwall, D. Arnold, and A. Dowson, “An analytical model to predict interlayer burr size following drilling of CFRP-metallic stack assemblies,” *CIRP Annals*, vol. 69, no. 1, pp. 109–112, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.cirp.2020.04.038.
- [38] Marvin J. Weber, *Handbook of optical materials*. Washington, D.C.: CRC PRESS, 2003.