

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

TDK dolgozat

MARKÓ BALÁZS

Kombinált furatforgácsoló technológia fejlesztése a forgácsolásindukált rétegek közti sorja minimalizálására CFRP/Al szerkezetekben

Konzulensek:

Dr. Geier Norbert
Adjunktus

Magyar Gergely
Doktorandusz

Budapest, 2024

NYILATKOZAT AZ ÖNÁLLÓ MUNKÁRÓL

Alulírott, *Markó Balázs*, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a TDK 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, 2024.11.09.

Markó Balázs sk.

Szerzői jog © Markó Balázs, 2024.

TARTALOMJEGYZÉK

Mellékletek jegyzéke	iv
Ábrajegyzék.....	v
Táblázatjegyzék.....	vi
Előszó	vii
Jelölések jegyzéke	viii
1. Bevezetés.....	1
1.1. Célkitűzések.....	1
1.2. Áttekintés	1
2. CFRP/Al szendvicsszerkezetek megmunkálásának szakirodalmi áttekintése.....	3
2.1. CFRP/Al szendvicsszerkezetek bemutatása	3
2.1.1. CFRP és Al forgácsolási tulajdonságai	3
2.1.2. Fém/szálerősített polimer kompozitok alkalmazása	5
2.2. CFRP/Al szendvicsszerkezetek megmunkálása.....	6
2.2.1. Technológiai paraméterek és kísérleti környezet hatása	7
2.2.2. Az alkalmazott forgácsoló technológia hatása	8
2.3. Furatok sorjavizsgálata	10
2.3.1. Sorja definiálása furatok esetén	11
2.3.2. Sorjaképződés mechanizmusa	11
2.3.3. A forgácsolásindukált sorja negatív hatásai	15
2.4. Következtetések és célkitűzések pontosítása	15
3. Felhasznált anyagok, eszközök és módszerek	17
3.1. Felhasznált alapanyagok.....	17
3.2. Kísérleti környezet, kísérletterv és mérőeszközök.....	17
3.2.1. Kísérleti és mérési környezet	17
3.2.2. Kísérletterv.....	19
3.3. Szoftverek és módszerek.....	19
4. Eredmények és következtetések.....	21
4.1. Technológia fejlesztése	21
4.1.1. Kiindulási feltételezések	21
4.1.2. Technológia ismertetése.....	22
4.2. Maximális sorjamagasság vizsgálata	23
4.3. Faktorok hatása	27
5. Összefoglalás és kitekintés	32
5.1. Eredmények.....	32
5.2. Kitekintés.....	33
6. Felhasznált források	34

MELLÉKLETEK JEGYZÉKE

1. **sz. melléklet:** Rétegközben készült mikroszkópi képek
2. **sz. melléklet:** Kísérleti és mérési jegyzőkönyv
3. **sz. melléklet:** Műszaki rajz a technológiákról
4. **sz. melléklet:** Maximális sorjamagasság eloszlások
5. **sz. melléklet:** Cliff-féle hatásnagyság eredmények

ÁBRAJEGYZÉK

1.1. ábra Karosszéria anyagösszetétele BMW 7-es szériánál	1
1.2. ábra Dolgozatom felépítése	2
2.1. ábra CFRP forgácsolási megközelítése: (a) ortogonális forgácsolás-, (b) fúrás- és (c) marás esetén [5]	3
2.2. ábra Delamináció keletkezése Al/CFRP szendvicsszerkezetek fúrásakor [8]	4
2.3. ábra Alumínium ötvözetek csoportosítása [10]	4
2.4. ábra GLARE szendvicsszerkezet felépítési példa [10]	6
2.5. ábra (a) Szerszámkopás és (b) tengely irányú forgácsoló erőkomponens összefüggése Al/CFRP szendvicsszerkezetek fúrása során [29]	8
2.6. ábra Forgácsoló erőkomponensek helikális marásnál (a) munkadarab és (b) szerszám koordináta rendszerben [36]	9
2.7. ábra Az axiális előtolás és a tengely irányú forgácsoló erőkomponens összefüggése [37]	9
2.8. ábra Ultrahangos fúrás: (a) elvi ábrája, (b) forgácsolóél pályája és (c) szerszám szinuszos trajektóriája [31]	10
2.9. ábra Sorjageometria típusok alumínium fúrásakor: (a) körkörös, (b) korona és (c) átmeneti sorja [47]	11
2.10. ábra Sorjageometria típusok UD-CFRP fúrásakor: (a) kicsi sűrű, (b) hosszú ritka és (c) hosszú sűrű sorja [48]	11
2.11. ábra Sorjaképződés folyamata (i) képlékeny és rideg anyagok esetén: (a) folyamatos forgácsolás, (b) munkadarab széleinek megközelítése, (c) sorjaképződés kezdete, (d) kifordulás, (e) sorja növekedése, (f) repedés keletkezése, (g) repedés terjedése és (h) sorjaképződés befejeződése [49], [50]	12
2.12. ábra UD-CFRP forgácsolási mechanizmusa: (a) kinematikai viszonyok és a (b) fellépő hibajelenségek [51]	13
2.13. ábra CFRP alátámasztásának hatása a delaminációra [52]	14
2.14. ábra Sorja eltávolítása orvosi iparban [57]	15
3.1. ábra (a) Kísérleti és (b) mérési környezet	18
3.2. ábra Statisztikai tesztek helye és szerepe a mérési eredmények kiértékelésében	20
4.1. ábra HS technológia vezérlés független CNC algoritmusa	22
4.2. ábra Helikális marás spirális furatbővítéssel: (a) helikális marás, (b) kör marás, (c) spirál marás, (d) körmarás és (e) helikális marás	23
4.3. ábra Mikroszkópi képek a kísérleti középpontban C technológiával	24
4.4. ábra CFRP lemezen sorjamagasság eloszlása C technológiával kísérleti középpontban: (a) 4. furat, (b) 11. furat, (c) 18. furat, (d) 22. furat, (e) 29. furat	25
4.5. ábra A maximális sorjamagassági adathalmazok ferdeség és kurtózis értékei	26
4.6. ábra Technológiák Cliff-féle hatásnagysága az alumínium lemezen	28
4.7. ábra Technológiák Cliff-féle hatásnagysága az UD-CFRP lemezen	29
4.8. ábra Fogankénti előtolás hatása a maximális sorjamagasságra rétegekben UD-CFRP lemez esetén	29
4.9. ábra Fogankénti előtolás hatása a maximális sorjamagasságra rétegekben alumínium lemez esetén	30
4.10. ábra Forgácsolási sebesség hatása a maximális sorjamagasságra rétegekben UD-CFRP lemez esetén	30
4.11. ábra Forgácsolási sebesség hatása a maximális sorjamagasságra rétegekben Al lemez esetén ..	31

TÁBLÁZATJEGYZÉK

2.1. táblázat	<i>CFRP előnyös és hátrányos tulajdonságai alumínium ötvözetekhez viszonyítva [10]....</i>	5
2.2. táblázat	<i>Fém/szálerősített polimer kompozit szendvicsszerkezetek főbb típusai.....</i>	6
2.3. táblázat	<i>Furatkészítő technológiák FML szendvicsszerkezeteken és FRP lemezeken</i>	16
3.1. táblázat	<i>A felhasznált UD-CFRP lemez főbb mechanikai tulajdonságai.....</i>	17
3.2. táblázat	<i>A felhasznált Al lemez főbb mechanikai tulajdonságai</i>	17
3.3. táblázat	<i>Az alkalmazott faktorok és szintjeik, ahol a C jelöli a hagyományos fúrást, H- a helikális marást és HS jelöli a helikális marást rétegek közötti spirálbővítéssel.....</i>	19
4.1. táblázat	<i>Kísérlet során alkalmazott fogankénti axiális előtolás tartományok a rétegek között.....</i>	21
4.2. táblázat	<i>HS technológiánál alkalmazott paraméterek értelmezése.....</i>	22
4.2. táblázat	<i>C technológiával készült furatok maximális sorjamagasság átlaga és szórása szálvágási szög tartományokra bontva</i>	24
4.3. táblázat	<i>Cliff-féle hatásméret értelmezése [59]</i>	27
4.4. táblázat	<i>Technológiák páronkénti hatása</i>	27

ELŐSZÓ

A napjainkban számos fejlett iparágban (repülőgép-, űr- és energiaipar) alkalmazott fém/szál-erősített polimer kompozit szendvicsszerkezeteknél gyakran szükséges furat készítése, aminek hatékony fúrása igen nagy kihívás a felmerülő hibajelenségek miatt. A hibajelenségek kialakulása csökkenthető megfelelően megválasztott technológiák és technológia paraméterek alkalmazásával. Az ilyen technológiák rendszerint valamilyen drága eszközt vagy berendezést igényelnek. Ezért szükségesnek látok egy olyan újszerű technológia kifejlesztését, amivel a 3D-s marási környezet mellett jelentősen csökkenthetők a keletkező hibajelenségek.

* * *

Jelen dolgozat témáját képező kutatómunkám során nagy segítséget nyújtottak konzulenseim Dr. Geier Norbert és Magyar Gergely, amiért köszönettel tartozom. Továbbá a CMG kutatócsoport tagjainak munkáját szeretném megköszönni, amivel kiváló alapot nyújtottak dolgozatom megírásához. Köszönöm a segítségét Dr. Hlinka Józsefnek a Keyence mérőgéppel való mérések során nyújtott szakmai útmutatásért. A Martin Metal Kft.-nek köszönöm a kísérletben használt alumínium lemezek felajánlását. Végül szeretném megköszönni a családomnak amiért mindig támogattak és segítettek a munkám során.

Ez a kutatás a Kína és Magyarország tudományos és technológiai együttműködését ösztönző 2021-1.2.4-TÉT-2021-00051 támogatásnak köszönhetően valósult meg. Továbbá a kutatást támogatta az EKÖP-24-2-BME-184 ösztöndíj.

Budapest, 2024

Markó Balázs

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

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

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
a_{cN}	fajlagos ütőmunka	kJ/mm^2
D	szerszámtmérő	mm
d	furatátmérő	mm
e_h	helikális kiinduló koordináta	mm
e_s	spirál kiinduló koordináta	mm
f	előtolás	mm
F_z	axális (tengely irányú) forgácsoló erőkomponens	N
f_z	fogankénti előtolás	mm
$f_{z,a}$	fogankénti axiális előtolás	mm
g_1	ferdeség	1
g_2	kurtózis (csúcsosság)	1
h_d	alsó lemez vastagsága	mm
h_m	maximális sorjamagasság	mm
$h_{m\text{átl}}$	átlagos maximális sorjamagasság	mm
h_u	felső lemez vastagsága	mm
i_d	alsó hurkok száma	1
i_u	felső hurkok száma	1
k	erősítőszál iránya	°
L_m	rétegeköz megközelítése	mm
p_{cs}	csavarvonal menetemelkedés	mm
q_d	alsó lemez megközelítése	mm
q_u	felső lemez megközelítése	mm
R_m	szakítószilárdság	MPa
S	technológia	1
S_d	Shore D keménység	1
v_c	forgácsolási sebesség	m/min

Görög betűk

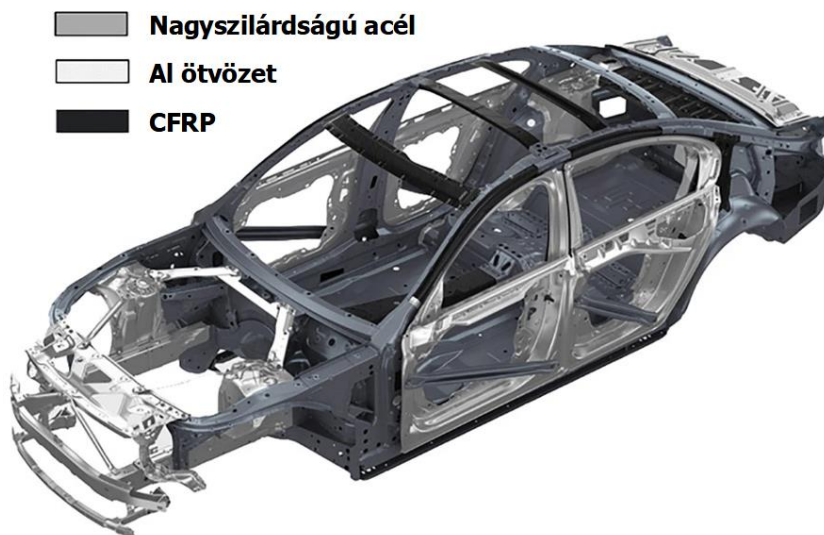
Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
α	szignifikanciaszint	1
δ	mérőszám bizonytalansága	akt.
δ_c	Cliff-féle hatásnagyság	1
θ	szálvágási szög	°
σ	szórás	akt.
τ_m	nyírószilárdság	MPa
φ	lépésköz	°
ϕ	szálorientációs szög	°

Rövidítések, mozaikszavak

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
C	Hagyományos fúrás
CCI	Centrál kompozit kísérlettervezési módszer
CFRP	Szénszállal erősített polimer kompozit
FML	Fém/szálerősített polimer kompozit szendvicsszerkezet
H	Helikális marás
HS	Helikális marás rétegek közötti spirálbővítéssel
UD	Egyirányú szálerősítés

1. BEVEZETÉS

Napjainkban egyre gyakrabban alkalmazzák a fém/szálerősített polimer kompozit szendvicsszerkezeteket. Főként olyan iparágakban, ahol a kiváló fajlagos mechanikai tulajdonság az elsődleges követelmény. A **1.1. ábrán** egy karosszéria anyagösszetétele látható.



1.1. ábra Karosszéria anyagösszetétele BMW 7-es szériánál

Az **1.1. ábrán** látható karosszéria esetén 130 kg súlycsökkenést értek el azzal, hogy fém/CFRP szerkezeteket alkalmaztak acél helyett.

Gyakran alkalmazott forgácsolási technológia a fúrás a fém/szálerősített polimer kompozit szendvicsszerkezeteknél [1]. Fúrás során sorja keletkezhet be- és kilépő oldalon, valamint rétegek között (két lemez között) egyaránt. Számos esetben nem oldható kötési technológiákkal rögzítik ezeket a lemezeket egymáshoz, így a rétegek közötti sorja eltávolítása nem megoldható. Ezért nélkülözhetetlen a rétegek közötti sorja minimalizálása.

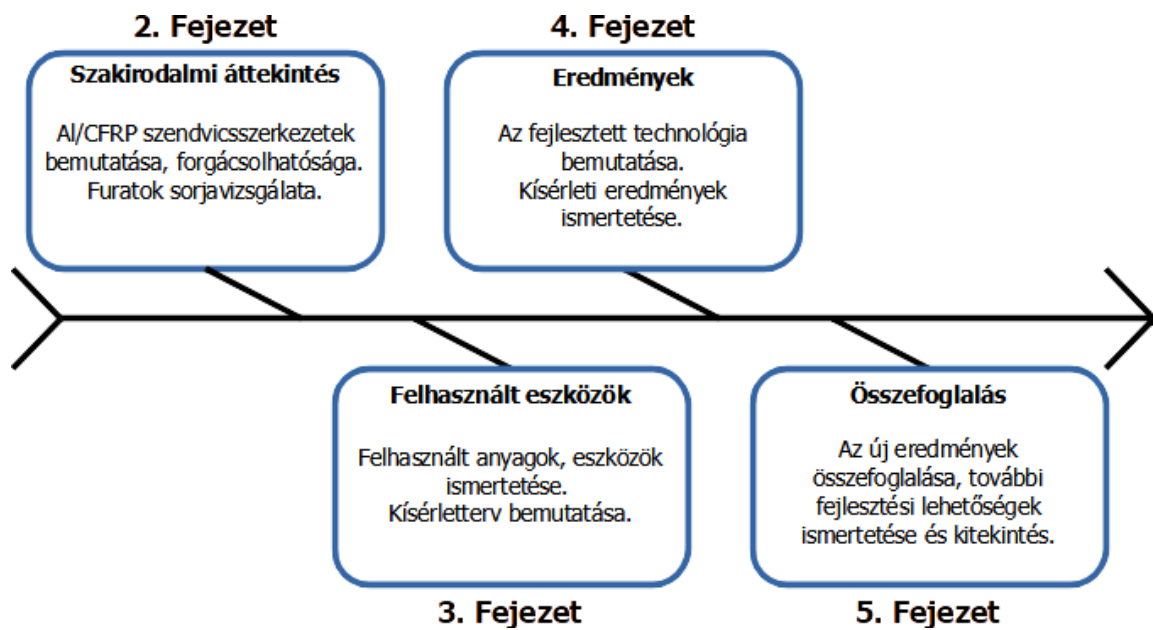
1.1. Célkitűzések

A dolgozatomban fő célja egy olyan újszerű furatforgácsoló technológia fejlesztése és kísérleti összehasonlítása a szakirodalomban található releváns furatforgácsolási technológiákkal, amellyel a forgácsolásindukált rétegek közötti sorja kialakulási kockázata minimális. Ezen felül a sorja jellemzésére több különböző módszer is található az általam tanulmányozott szakirodalmakban, így dolgozatomban nagy hangsúlyt kap több különböző statisztikai módszer alkalmazása.

1.2. Áttekintés

Munkám során elsőként szakirodalmi áttekintést végzek a fém/szálerősített polimer kompozitok témakörében, ahol nagy figyelmet fordítok a különböző technológiák bemutatására. Ezt követően bemutatom a kísérlet során felhasznált eszközöket és a dol-

gozatban használt módszereket, majd a különböző módszerekkel kapott eredményeket kiértékelem. Végezetül összefoglalást és kitekintést adok az elvégzett munkámról. Az **1.1. ábrán** összefoglaltam a dolgozatom felépítését az előbb leírtaknak megfelelően egy halszálka diagramon.



1.2. ábra Dolgozatom felépítése

2. CFRP/AL SZENDVICSSZERKEZETEK MEGMUNKÁLÁSÁNAK SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉSE

Ebben a fejezetben ismertetem a kutatásom tárgyát képező szénszállal erősített polimer kompozit (CFRP) és alumínium (Al) szendvicsszerkezetek tulajdonságait, megmunkálhatóságát. Nagy hangsúlyt fektetek a hazai és a nemzetközi szakirodalomban található furatkészítési technológiák tárgyalására és a forgácsolt furatok vizsgálatára.

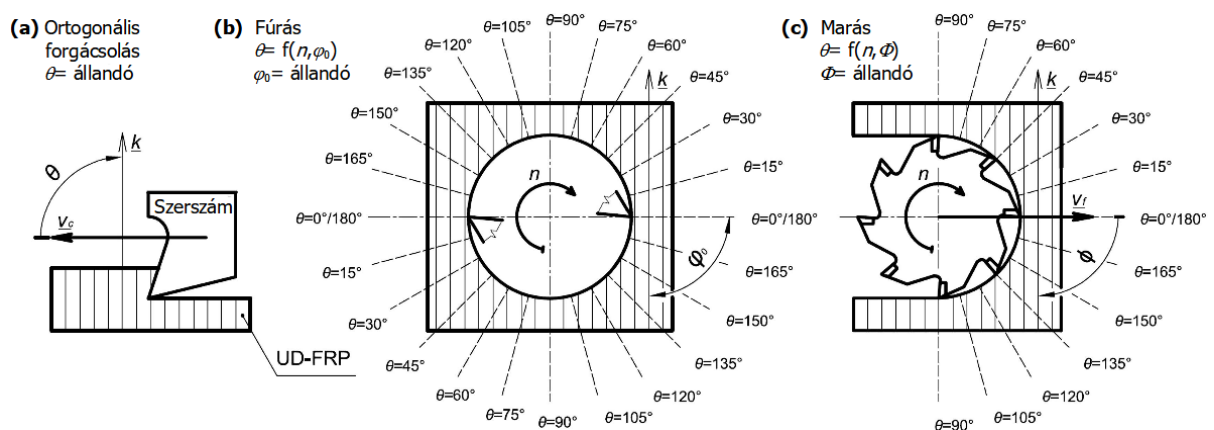
2.1. CFRP/Al szendvicsszerkezetek bemutatása

A CFRP/Al szendvicsszerkezetek forgácsolása során számos nehézség adódik, amelyeknek magyarázata a két lemez eltérő tulajdonságaiban keresendő. Ezért elsőként a CFRP és alumínium tulajdonságait, majd alkalmazási területüket tárgyalom ebben az alfejezetben.

2.1.1. CFRP ÉS AL FORGÁCSOLÁSI TULAJDONSÁGAI

A CFRP kompozitok a nehezen forgácsolható anyagok közé tartoznak a jelentős inhomogenitás és anizotrópia következtében [2]. A szálerősített polimer kompozitok a szálerősítés iránya alapján két csoportba sorolhatók, ahol az egyik az egyirányú (UD), a másik pedig a többirányú (MD) szálerősítés [3]. Liu és munkatársai [4] marási kísérletekkel vizsgálták a CFRP forgácsolási tulajdonságait a szálerősítés iránya alapján. Eredményül azt kapták, hogy az UD-CFRP és a MD-CFRP között jelentős eltérés van a forgácsolási folyamat szempontjából, ami eltérés az erősítőszál pozíciójából és orientációjából származik.

Geier és mtsai. [5] szakirodalmi összegzésükben foglalkoztak a CFRP forgácsolási tulajdonságaival, ahol kiemelték, hogy a CFRP forgácsolása során eltérő megközelítést kell alkalmazni, mint a hagyományos fémes anyagok forgácsolásakor. A 2.1. ábra jól szemlélteti ezt az eltérést.

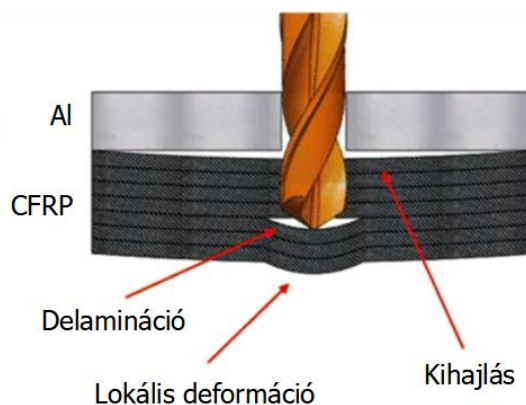


2.1. ábra CFRP forgácsolási megközelítése: (a) ortogonalis forgácsolás-, (b) fúrás- és (c) marás esetén [5]

A **2.1. ábrán** θ a szálvágási szög, ϕ a szálorientációs szög (szálsírkirány), k a szénszálak iránya, n a fordulatszám, v_c a forgácsolási sebesség és v_f az előtoló sebesség. Ezek közül a szálvágási szöget (θ) ismertettem részletesebben.

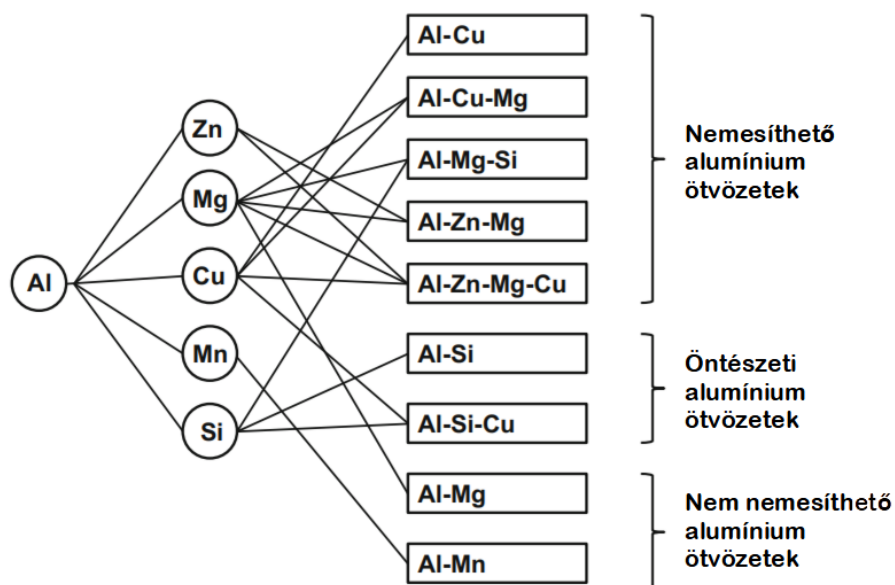
A szálvágási szög (θ) a megmunkálás során az forgácsolási sebesség (v_c) vektora és a szálerősítés iránya közötti bezárt szöget jelöli [5]. CFRP forgácsolása során a szálvágási szögnek van a legnagyobb hatása a forgácsképződési mechanizmusra [6]. A későbbiekben tárgyalom a sorjaképződési mechanizmusnál a szálvágási szög jelentős hatását.

CFRP forgácsolása során a fémeknél is fellépő, minőséget rontó hibajelenségeken felül delamináció is keletkezhet, ekkor a laminált rétegek szétválásáról beszélünk, ami a forgácsolás során fellépő forgácsoló erő hatására jön létre [7]. A **2.2. ábra** jól szemlélteti a delamináció képződését Al/CFRP szendvicsszerkezet fúrásakor.



2.2. ábra Delamináció keletkezése Al/CFRP szendvicsszerkezetek fúrásakor [8]

Az alumínium ötvözetek forgácsolhatósági tulajdonságai az acélhoz képest kisebb szilárdság és a megfelelő hőtechnikai tulajdonságok, de forgácsolhatósági tulajdonságaik nagyban függenek az ötvöző tartalomtól [9]. Az alumínium ötvözetek csoportosítása látható a **2.3. ábrán**.



2.3. ábra Alumínium ötvözetek csoportosítása [10]

A **2.3. ábrán** látható ötvözetek közül a nemesíthető ötvözeteket alkalmazzák leggyakrabban az iparban, mivel általában gazdaságosabbak a nem nemesíthető alumínium ötvözeteknél, azonban továbbra is megfelelően nagy szilárdsággal rendelkeznek [11].

Az UD-CFRP és az alumínium lemezt egy műveletben munkáljuk meg ugyanazon szerszámmal, ezért célszerű egymáshoz képest is vizsgálni a két anyagot. A **2.1. táblázatban** a CFRP előnyös és hátrányos tulajdonságai vannak feltüntetve az alumíniumhoz képest.

2.1. táblázat CFRP előnyös és hátrányos tulajdonságai alumínium ötvözetekhez viszonyítva [10]

Előnyös tulajdonságai	Hátrányos tulajdonságai
- Nagyobb fajlagos merevség (szál-irányban) - Tulajdonságai irányfüggőek (anizotrópia) lehetnek - 10-20%-os súlymegtakarítás - Nagyobb méretstabilitás - Nagyobb szilárdság - Korrózióálló	- Magas anyagköltségek - Tulajdonságai irányfüggőek (anizotrópia) lehetnek - Fémektől jelentősen eltérő tönkremeneteli modell - Nedvességre érzékeny - Nem, vagy csak nehezen újrahasznosítható

A **2.1. táblázat** alapján látható, hogy nem mindegyik tulajdonságról állapítható meg egyértelműen, hogy az a tulajdonság előnyös vagy sem.

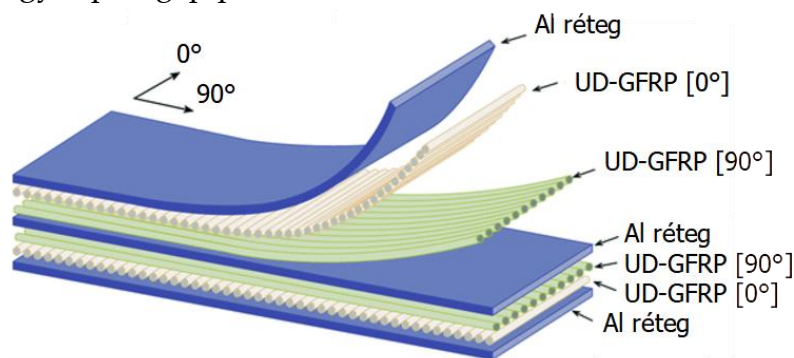
2.1.2. FÉM/SZÁLERŐSÍTETT POLIMER KOMPOZITOK ALKALMAZÁSA

Fém/szálerősített polimer kompozit szendvicsszerkezeteket (FML) olyan fejlett iparágak alkalmazzák, mint az autó-, az energia-, a repülőgép- és az űripar [1]. Ennek megfelelően a különböző elvárásokat szem előtt tartva több típusa létezik az ilyen szendvicsszerkezeteknek. A teljesség igénye nélkül a **2.2. táblázatban** feltüntettem néhány típusát és alkalmazását a FML szendvicsszerkezeteknek.

2.2. táblázat Fém/szálerősített polimer kompozit szendvicsszerkezetek főbb típusai

Megnevezés	Összetétel	Alkalmazási terület	Hivatkozás
GLARE	Alumínium ötvözet és üvegszál erősítésű polimer	Repülőgépipar, űripár, hadiipar és energiaipar	[1] - [4]
CARALL	Alumínium ötvözet és szénaszál erősítésű polimer	Repülőgépipar, autóipar, sporteszközök és energiaipar	[13], [15], [16]
ARALL	Alumínium ötvözet és aramidaszál erősítésű polimer	Repülőgépipar, sporteszközök, autóipar és építőipar	[13], [17], [18]
TiGr	Titán ötvözet és szénaszál erősítésű polimer	Repülőgépipar, sporteszközök, hadiipar és autóipar	[19], [20]

A **2.2. táblázatban** látható kompozitok nem csak alapanyagukat illetően lehetnek jelentősen eltérőek, hanem a felépítésük alapján is. A **2.4. ábrán** látható GLARE szendvicsszerkezet egy repülőgépipari alkalmazásból.



2.4. ábra GLARE szendvicsszerkezet felépítési példa [10]

A példa alapján (**2.4. ábra**) látható, hogy a fém/szálerősített polimer kompozit szendvicsszerkezetek felépítése igen eltérő lehet. Dolgozatomban kétrétegű szerkezetet alkalmazok, mivel a több réteg nagyban megnehezítené a kapott eredmények kiértékelését és sok esetben redundáns eredményeket kapnánk.

2.2. CFRP/Al szendvicsszerkezetek megmunkálása

A CFRP/Al szendvicsszerkezetek megmunkálása során számos forgácsolási nehézség lép fel. Ennek többsége abból adódik, hogy a két anyag forgácsolhatósága jelentős mértékben eltér, mint ahogy azt a korábbiakban láthattuk.

A CFRP/Al szendvicsszerkezeteken gyakran furat készítésére van szükség, mivel ezeknek a szerkezeteknek rögzítését sok esetben csavarkötéssel vagy szegeccseléssel végzik el [21]. Ebben az alfejezetben az általam tanulmányozott szakirodalomban megtalálható furatforgácsolási paraméterek és forgácsolási körülmények hatásait ismertetem.

2.2.1. TECHNOLÓGIAI PARAMÉTEREK ÉS KÍSÉRLETI KÖRNYEZET HATÁSA

Számos publikáció foglalkozik CFRP/Al és egyéb FML szendvicsszerkezeteknél a technológiai paraméterek és a kísérleti beállítás hatásainak vizsgálatával. Ezek közül néhányat részletesebben is ismertetek.

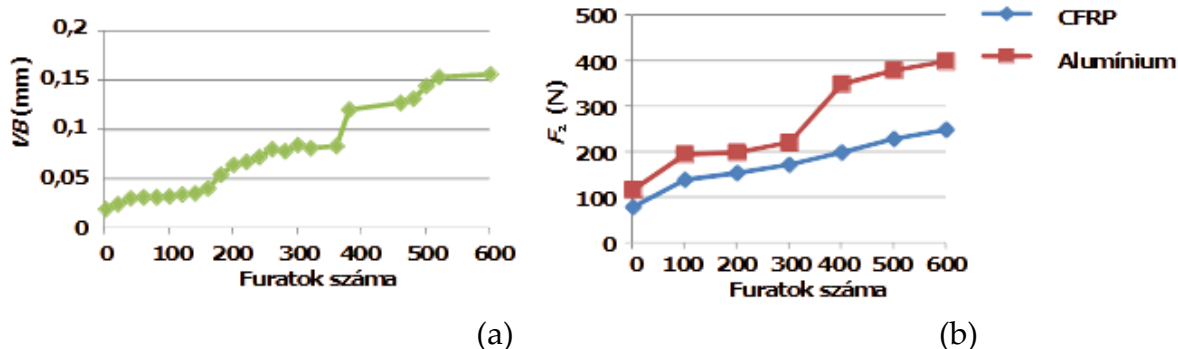
A forgácsolási eljárásoknál a technológiai paraméterek vizsgálata alapvetőnek számít. Furatforgácsolás során a forgácsolási sebesség (v_c)- és az előtolás (f) hatása vizsgálható minden esetben.

Angelone és mtsai. [22] Al/CFRP szendvicsszerkezeteken végeztek fúrási kísérleteket, ahol a fordulatszám- és az előtolás hatását vizsgálták a képződő forgácsolási hőmérsékletre, a geometriai pontosságra (átmérőhelyesség és körköröség) és a delaminációra. A vizsgált tartomány $v_c \approx 60$ - 120 m/min és $f = 0,05$ - $0,15$ mm volt. A $v_c \approx 90$ m/min és a $f = 0,15$ mm technológiai paraméterek eredményezték a legjobb minőségű furatot. Továbbá azt is megállapították, hogy kisebb előtolás hatására jelentősen romlik a furat minősége.

Wang és mtsai. [23] fúrási kísérletek során a technológiai paraméterek (fordulatszám és előtolás) hatásait vizsgálták a forgácsolási erőre, a forgácsolási hőmérsékletre és a furat geometriai pontosságára. A vizsgált tartomány $v_c \approx 30$ - 90 m/min és $f = 0,02$ - $0,08$ mm volt. A tengely irányú forgácsoló erőkomponens jelentősen növekedett az előtolás növelésének hatására, míg a fordulatszámnak nem volt jelentős hatása. A fordulatszám növelésével megemelkedett a forgácsolási hőmérséklet, az előtolás növelésével pedig jelentősen csökkent. A geometriai pontosságnál a CFRP lemezen mért pontatlanság minden esetben nagyobbak adódott az alumínium lemezhez képest. Ez az eltérés csökkenthető a fordulatszám növelésével.

Az előző két publikációból látható, hogy igen széles tartományban szokták vizsgálni a technológiai paramétereket. Továbbá egy olyan érdekes jelenség figyelhető meg, hogy sok esetben kisebb forgácsolási sebességet alkalmaznak Al/CFRP szendvicsszerkezetek vizsgálatánál, mint külön alumínium vagy CFRP lemezek esetén [24]. Ennek ellenér az alumínium ötvözetek esetén nagyobb forgácsolási sebességet és kisebb előtolást ajánl számos szakirodalom, ami még szárazmegmunkálási körülmények mellett is általában $v_c = 100$ - 200 m/min közötti tartományba esik bele [25]. CFRP lemezek fúrása során számos publikáció $v_c = 50$ - 200 m/min közötti tartományba végzi a vizsgálatot [26], [27]. Merino-Pérez és mtsai. [27] publikációjában vizsgálták CFRP fúrása során a forgácsolási sebesség hatásait folyamatjellemzők és a furat minősége alapján. Eredményként megállapították, hogy a $v_c = 100$ m/min esetén jó egyensúlyban van a termelékenység és a szerszámkopás, de vékonyabb lemezek esetén még ennél nagyobb értékek is megfelelőek lehetnek (akár $v_c > 150$ m/min). Az előtolás hatásait részletesebben tárgyalom a technológiák ismertetése résznél.

A szerszámanyag, a szerszámgeometria és a szerszámkopás hatása is jelentős az Al/CFRP szendvicsszerkezetek forgácsolásánál, ahol az adhéziós szerszámkopás a jellemző [28]. Zhang és mtsai. [29] munkájában egyértelműen látható a szerszámkopás és a tengely irányú forgácsoló erőkomponens közötti összefüggés, amit a **2.5. ábrán** tüntettem fel.



2.5. *ábra* (a) Szerszámkopás és (b) tengely irányú forgácsoló erőkomponens összefüggése Al/CFRP szendvicsszerkezetek fúrása során [29]

Az 2.5. ábrán felfedezhető összefüggés mellett a szerszámgeometria is jelentős hatással bír a tengely irányú forgácsolási erőkomponensre [29].

Az Al/CFRP szendvicsszerkezeteknél a hűtés hatásai is szokták vizsgálni. A CFRP lemez miatt hűtőfolyadékot nem szoktak alkalmazni, mivel a hűtőfolyadék behatolhat a rétegek közé a CFRP lemeznél, ami károsodáshoz vezethet [30]. Tamil Alagan és mtsai. [31] többek között vizsgálták a kriogén hűtés hatásait is Al/CFRP szendvicsszerkezeteken hagyományos és ultrahangos fúrási technológiát alkalmazva. Eredményként az adódott, hogy a tengely irányú forgácsoló erőkomponens a kriogén hűtéssel alumínium lemeznél 23%-kal, míg CFRP lemez esetén 53%-kal növekedett az axiális forgácsoló erőkomponens.

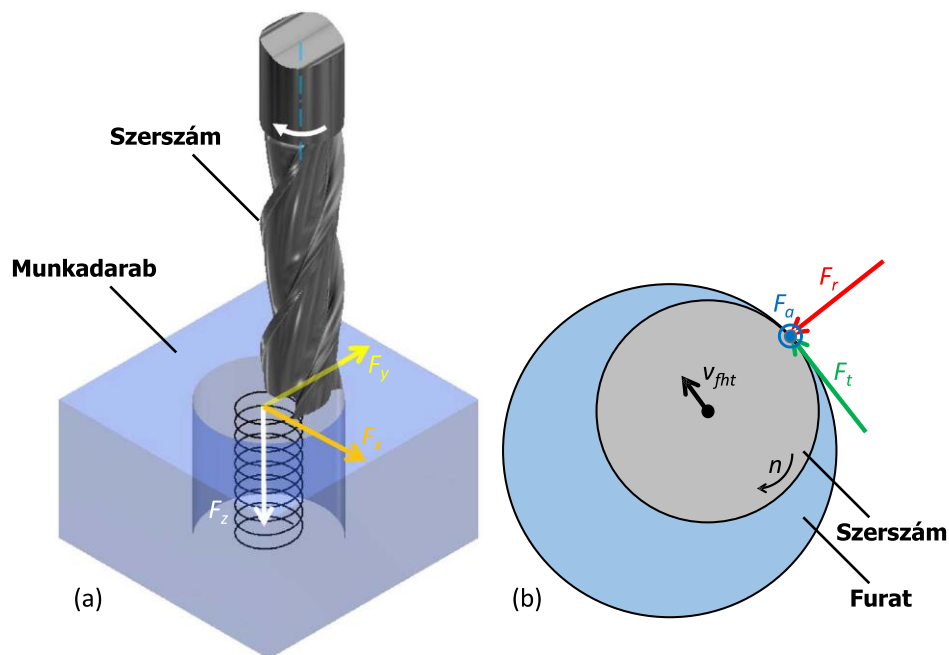
2.2.2. AZ ALKALMAZOTT FORGÁCSOLÓ TECHNOLÓGIA HATÁSA

A dolgozatom fő témája egy általam fejlesztett furatkészítési technológia, ezért külön alcímet kapott a szakirodalmi áttekintés során is.

A szakirodalom tanulmányozása során nem sok publikációt találtam, ami Al/CFRP szendvicsszerkezeteken vizsgálta volna különböző technológiák hatásait, ezért néhány olyan publikációt is ismertetek, ahol csak CFRP vagy más anyagú lemezekon vizsgálták a technológiák hatásait.

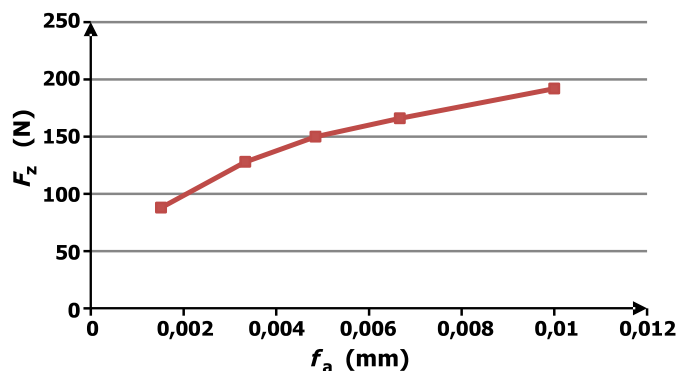
Furatok készítésénél a hagyományos fúrást szokták vizsgálni referenciaként. Itt a szerszám (legtöbb esetben csigafúró), csak tengely irányú előtoló mozgást végez. Hagyományos fúrási technológiánál a szerszámkialakítás és -geometria az, amit számos publikáció vizsgál FML szendvicsszerkezetekben [29], [32] és FRP anyagokban [33], [34].

A hagyományos fúrás mellett a helikális marás technológiát igen gyakran szokták vizsgálni CFRP lemezek fúrási kísérleteinél. Ennél a technológiánál a marószerszám (jellemzően ujjmaró) előtoló mozgása egy csavarvonalat követ, amely szerszám átmérőjének minden esetben kisebbnek kell lennie, mint a kész furat átmérőjének [35]. A 2.6. ábra szemlélteti a helikális marást és annak forgácsoló erőkomponenseit.



2.6. ábra Forgácsoló erőkomponensek helikális marásnál (a) munkadarab és (b) szerszám koordináta rendszerben [36]

A **2.6. ábrán** vizuálisan is látható, hogy a helikális marás esetén kisebb a tengely irányú előtolás, aminek hatására a tengely irányú erőkomponens is kisebbnek adódik. Ezt egyértelműen bizonyítja a **2.7. ábra** is, ahol az axiális előtolás hatása látható.



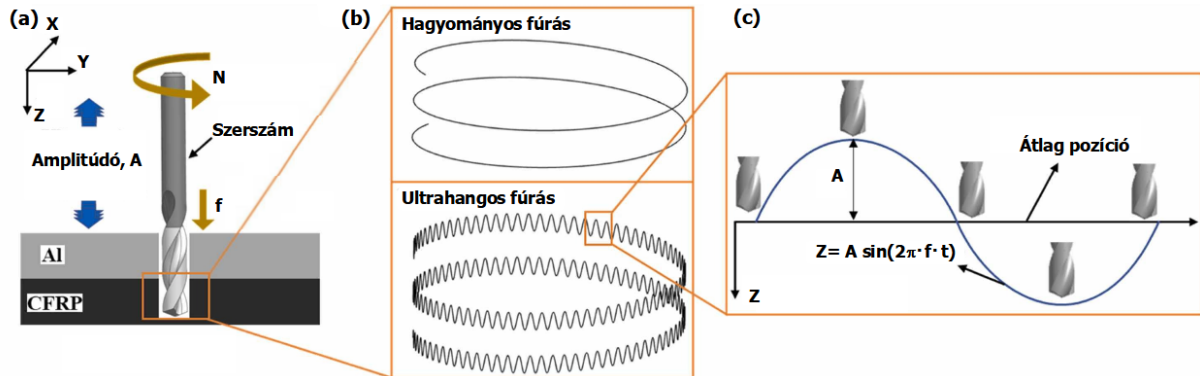
2.7. ábra Az axiális előtolás és a tengely irányú forgácsoló erőkomponens összefüggése [37]

Az axiális előtolás helikális marás esetén az előtolás állandó értéken tartása mellett is megváltoztatható a csavarvonal menetemelkedésével (p_{cs}) [37]. Tehát a **2.7. ábrán** látható, hogy célszerű a minél kisebb menetemelkedés.

A helikális marás egy továbbfejlesztett változata a döntött helikális marás, ahol a megmunkálás során a szerszám bedöntjük a furat tengelye felé, aminek hatására nincs az egész szerszám homlokfelület kontaktban a forgácsolás során [38]. Ez előnyös forgácsolási szempontból, mivel a szerszám homlokfelületén a forgácsolási sebesség az átmérő függvényében változik [35]. Wang és mtsai. [39] CFRP forgácsolásánál a szerszám bedöntésének hatását vizsgálták. A furatokat a következő jellemzők alapján vizsgálták: axiális forgácsoló erőkomponens, furat palástfelületének érdessége, kilépő oldalon képződött delamináció és geometriai pontosság. Eredményül az adódott, hogy

az összes felsorolt jellemzőre pozitív hatással van a szerszám bedöntése. Továbbá Wu és mtsai. [40] munkájában a bedöntés hatására a keletkezett sorja kisebbnek adódott ki- és belépő oldalon egyaránt CFRP megmunkálása során.

Az ultrahangos fúrást is vizsgálják Al/CFRP szendvicsszerkezetek fúrási kísérleteinél, amely technológiát a 2.8. ábra mutat be.



2.8. ábra Ultrahangos fúrás: (a) elvi ábrája, (b) forgácsolóél pályája és (c) szerszám szinuszos trajektóriája [31]

A 2.8. ábrán látható, hogy az ultrahangos fúrás a tengely irányú előtoló mozgás mellett egy egyenletes amplitúdójú oszcilláló mozgást is végez tengely irányban. Zheng és mtsai. [41] publikációjukban többek között vizsgálták az ultrahangos fúrás hatását az axiális forgácsoló erőkomponensre CFRP megmunkálása során. Eredményként azt kapták, hogy az oszcilláló mozgás hatására kisebb az axiális forgácsoló erőkomponens mint a hagyományos fúrás esetén.

A szakirodalom tanulmányozása során fellelhető az imbolygó marás technológia is. Ennél a technológiánál elsőként egy furatot kell készíteni, majd a szerszámot egyre inkább bedöntve egy kettős kúpfelületet hozunk létre, amit követően felbővítjük a furatot egy spirális pálya mentén [35]. Több kutatás alapján is az imbolygó marás hatására kevesebb hibajelenség (delamináció és sorja) keletkezik a kilépő oldalon [42], [43]. A forgácsoló erő a megmunkálás során inkább a munkadarab közepe felé irányul, ami hatására csökken a delamináció a CFRP lemezben [44], de a technológiának ez a tulajdonsága nem előnyös az általunk vizsgált szendvicsszerkezeteknél a rétegköz miatt.

Az előző bekezdésekben láthattuk, hogy számos technológiát fejlesztettek a forgácsolásindukált hibajelenségek minimalizálása érdekében FML szendvicsszerkezetekben és FRP kompozitokban.

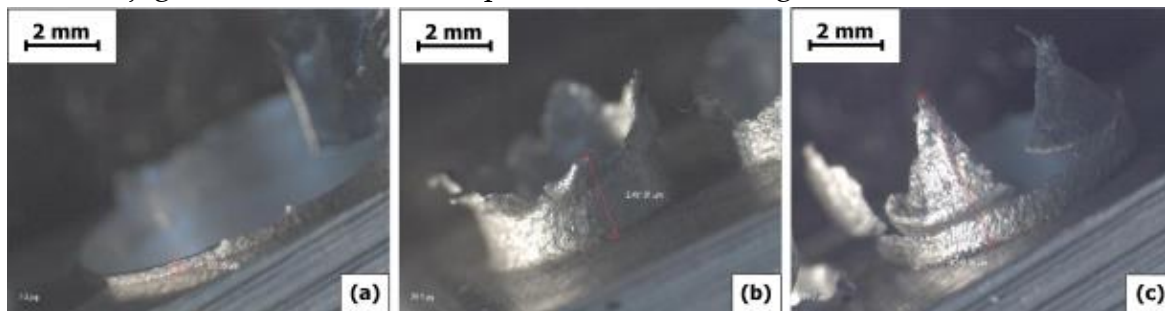
2.3. Furatok sorjavizsgálata

Ahhoz, hogy a sorjavizsgálatot megfelelően el lehessen végezni a helyes következtetések levonásával, ahhoz szükséges a sorja definiálása és a képződésének ismerése. Ez az alfejezet ezt tartalmazza.

2.3.1. SORJA DEFINIÁLÁSA FURATOK ESETÉN

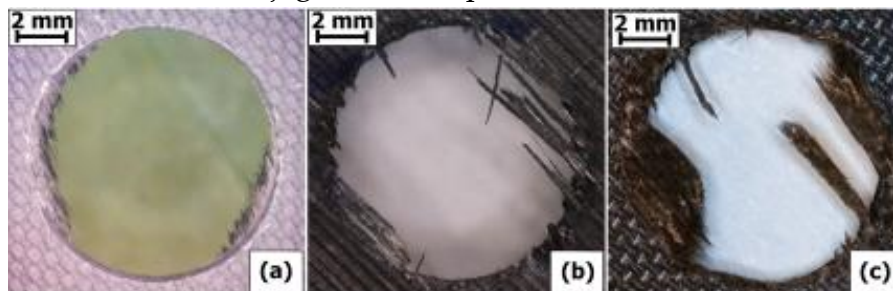
A sorját többféleképpen is szokták definiálni. Az ISO 13715 alapján olyan él tekinthető a megmunkálás során sorjásnak, ahol a maradék anyag nagysága mérhető és zérustól különböző [45]. Egy a szakirodalomban talált definíció, ami forgácsolási folyamat szemszögéből jól leírja a sorját a következő: a sorja egy olyan képlékeny deformáció a munkadarab sarkain és élein, ami a képlékeny folyás eredménye a forgácsolási folyamat során [46].

Furatok esetében többféle sorjageometria típusról beszélhetünk. A **2.9. ábrán** láthatóak a sorjageometria különböző típusai alumínium forgácsolásakor.



2.9. ábra Sorjageometria típusok alumínium fúrásakor: (a) körkörös, (b) korona és (c) átmeneti sorja [47]

A **2.10. ábrán** a UD-CFRP sorjageometria típusai láthatóak.



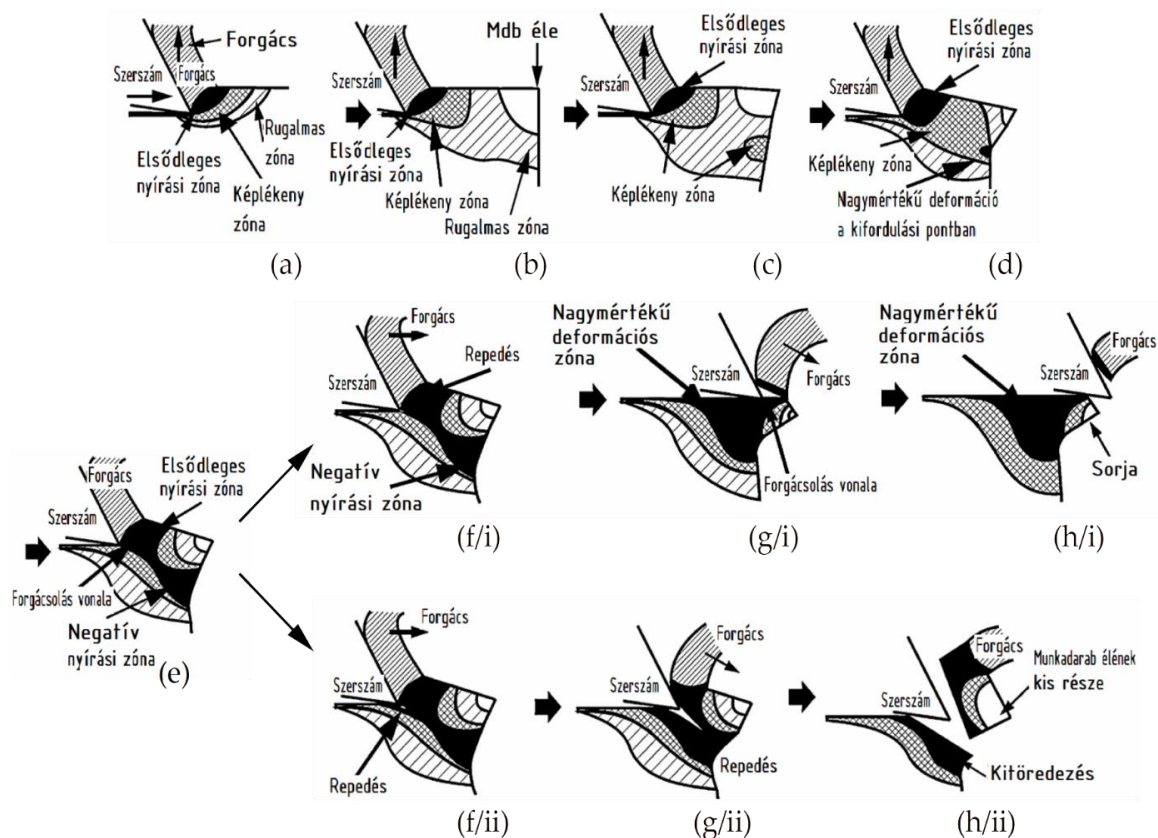
2.10. ábra Sorjageometria típusok UD-CFRP fúrásakor: (a) kicsi sűrű, (b) hosszú ritka és (c) hosszú sűrű sorja [48]

UD-CFRP lemezeknél a $\theta = 135^\circ \pm \delta$ régióban található legtöbb esetben a maximális sorjaképződési zóna, ahol θ a szálvágási szög és δ a hiba intervallum

Tehát összességében megállapítható, hogy az alumíniumnak (**2.9. ábra**) és a CFRP-nek (**2.10. ábra**) teljes mértékben különböző forgácsolásindukált sorjageometriái vannak.

2.3.2. SORJAKÉPZŐDÉS MECHANIZMUSA

Hashimura és mtsai. [49] munkájukban leírták a fémek elméleti sorjaképződési folyamatát, ahol a rideg- és a képlékeny anyagok sorjaképződési mechanizmusa egymástól különbözik. Mindkét esetben a sorjaképződés folyamata nyolc lépéssel írható le, amiből az első öt megegyezik. A sorjaképződési folyamat a **2.11. ábrán** látható.



2.11. ábra Sorjaképződés folyamata (i) képlékeny és rideg anyagok esetén: (a) folyamatos forgácsolás, (b) munkadarab széleinek megközelítése, (c) sorjaképződés kezdete, (d) kifordulás, (e) sorja növekedése, (f) repedés keletkezése, (g) repedés terjedése és (h) sorjaképződés befejeződése [49], [50]

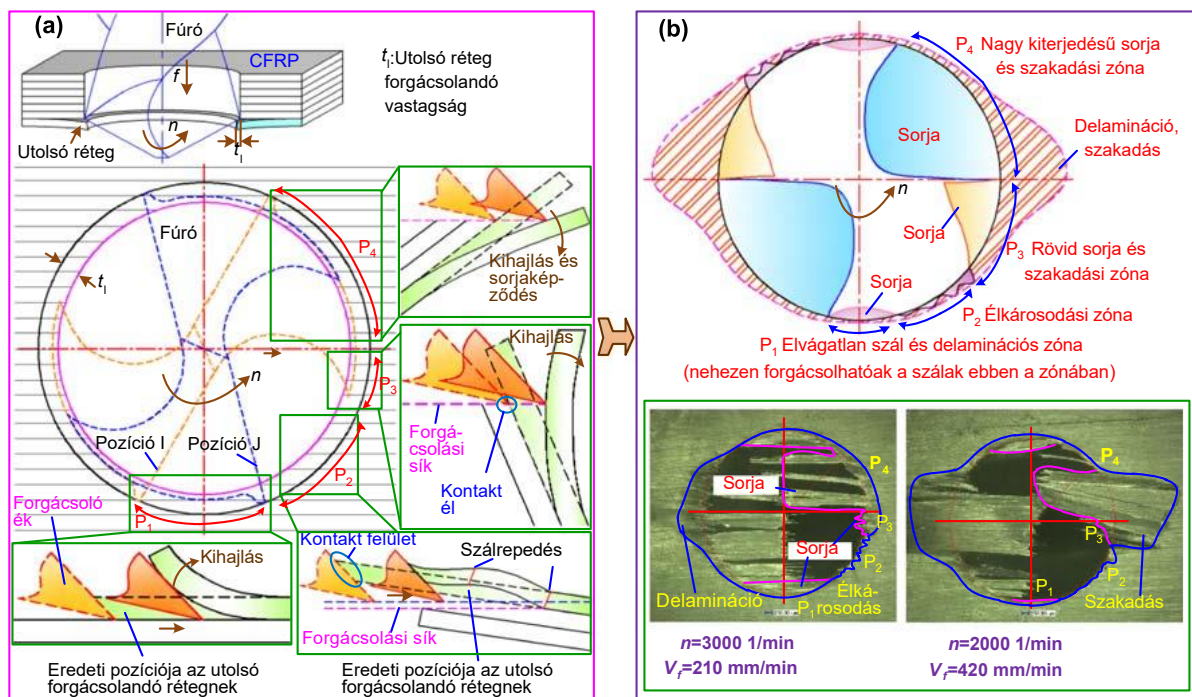
A 2.11. ábrán látható sorjaképződés folyamatának szakaszait az alábbi felsorolásban ismertetem [50]:

- Folyamatos forgácsolás: A folyamatos forgácsolás során már kialakult a nyírási, képlékeny- és deformációs zóna, de még távol van a munkadarab széle.
- Munkadarab széleinek megközelítése: A munkadarab széleinek megközelítése már hatással van a forgácsolásra. A munkadarab széle kihajolhat, mivel a rugalmas zóna eléri a munkadarab határfelületét. A képlékeny alakváltozási zóna pedig tovább terjed az él felé a nyírási zóna körül.
- Sorjaképződés kezdete: A munkadarab élén a képlékeny alakváltozási zóna is megjelenik, így az elsődleges nyírási zóna elkezd terjedni a körülötte lévő képlékeny alakváltozási zónával.
- Kifordulás: A szerszám tovább közeledik a munkadarab éle felé, aminek hatására a két képlékeny zóna egyesül. A kifordulási pontban nagy mértékű a deformáció, így maradó alakváltozást szenved a munkadarab éle.
- Sorja növekedése: Az előző lépésben keletkezett deformációs zóna kiterjed és összekapcsolódik az elsődleges nyírási zónával.
- Repedés keletkezése:
 - A törés kezdete. A szívós anyagoknál a nagy kritikus törési feszültség miatt a törés a szerszám csúcsától indul ki a nyírási zónába.

- ii) A repedés terjedése a negatív nyírási zónából kezdődik a kifordulási pont felé.
- g) Repedés terjedése:
 - i) Az elsődleges nyírási sík felé a repedés tovább terjed. A repedés tovább terjedése törést eredményez.
 - ii) A negatív nyírási zónánál terjed a repedés. A repedés növekszik a szerszám tovább haladásának hatására és nyírás helyett a repedés lesz domináns.
- h) Sorjaképződés befejeződése:
 - i) A forgács a nyírási sík mentén, míg a sorja a munkadarab élén válik le, ezzel befejeződik a sorjaképződés.
 - ii) A munkadarab élének egy darabjával együtt a negatív nyírási sík mentén a forgács leválik, így létrejön a kitöredezett munkadarab él, amit negatív sorjának is neveznek.

A kutatás során alkalmazott alumínium ötvözet képlékeny anyagok közé tartozik, így „pozitív” sorjával rendelkezik [10].

Su és mtsai. [51] UD-CFRP lemezek fúrása során fellépő forgácsolási mechanizmus-sal és hibajelenségekkel foglalkoztak a furat kilépő oldalán. Megállapították, hogy ha a szálvágási szög (θ) tompaszög, akkor nem keletkezik sorja, míg, ha hegyesszög a szálvágási szög, akkor potenciálisan sorja keletkezik. A sorjaképződés szempontjából négy szakaszra osztották a furatokat, amik a **2.12. ábrán** láthatóak.



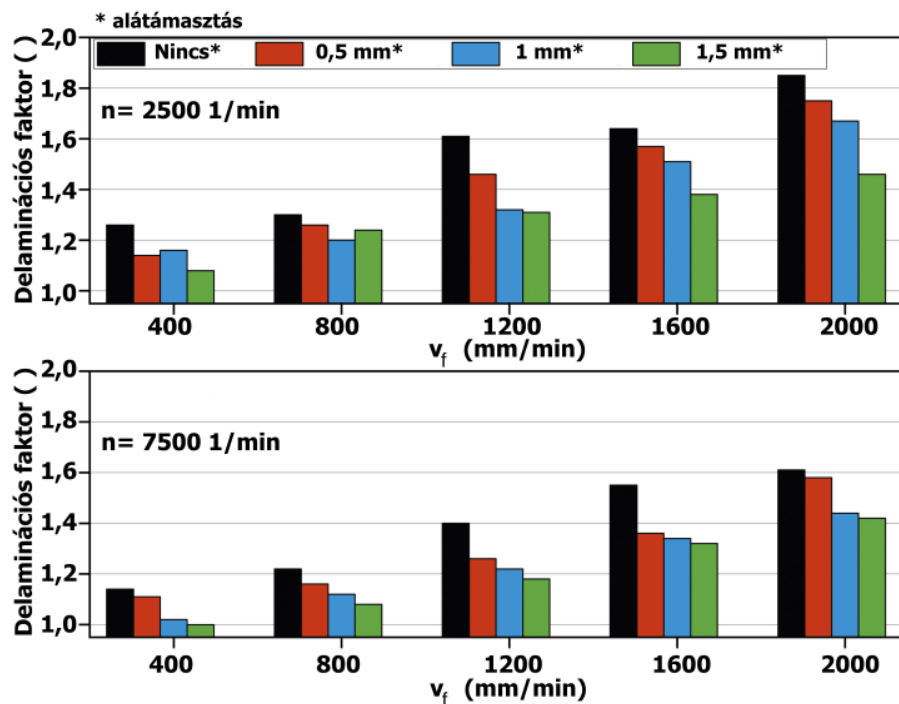
2.12. ábra UD-CFRP forgácsolási mechanizmusa: (a) kinematikai viszonyok és a (b) fellépő hibajelenségek [51]

A **2.12. ábrán** látható szakaszokat az alábbiakban ismertetem [51]:

1. A P_1 zónában nehezen megy végbe a forgácsolás, mivel a szálvágási szög megközelítőleg 90° . A szén-szálak inkább kihajlanak, így ebben a zónában a kihajlás és a delamináció a jellemző.

2. A P_2 zónában a csigafúrónak a csúcssugara még nem találkozik a leválasztandó anyagrésszel, így szálrepedés lép fel ebben a zónában a nagy hajlító feszültségek miatt. Ennek következtében fűrészfog szerű topográfia jön létre a furaton, ami jelentős élkárosodást okozhat a szerszámon.
3. A P_3 zónában a szálvágási szög jelentős növekedésével a szerszám csúcssugara érintkezik az eltávolítandó anyagréteggel, ami sorjaképződéshez vezet. A képződött sorja kis kiterjedésű ebben a zónában.
4. A P_4 zónában a szálvágási szög értéke zérusról növekszik. A szénszálak elkerülnek a forgácsoló élt, aminek hatására nagy kiterjedésű sorja keletkezik.

Az előzőekben látható volt, hogy a CFRP és az alumínium sorjaképződési mechanizmusa jelentősen eltér, amin felül a két lemeznek egymásra is van hatása. Betgöl és mtsai. [52] fúrási kísérletük során a CFRP lemezeket különböző vastagságú alumínium lemezekkel támasztották alá. Így vizsgálták az alátámasztás hatását a CFRP lemezen kilépő oldalon. A tengely irányú forgácsoló erő (F_z) kis mértékben növekedett az alátámasztás hatására, de nem jelentős mértékben. Továbbá vizsgálták a delaminációt is a különböző alátámasztások hatására, aminek eredménye a **2.13. ábrán** látható.



2.13. ábra CFRP alátámasztásának hatása a delaminációra [52]

A **2.13. ábra** alapján látható, hogy a delamináció jelentősen kisebb az alátámasztás hatására. Az általam vizsgált szakirodalomban nem találtam információt arra vonatkozóan, hogy a sorjaképződésre milyen hatással van az alátámasztás, de az előző eredményből látható volt, hogy a forgácsolási folyamatra jelentős hatása van.

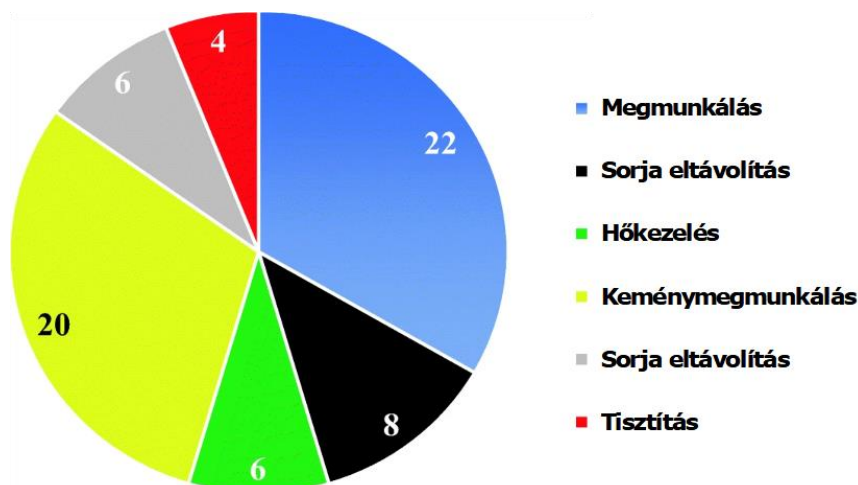
2.3.3. A FORGÁCSOLÁSINDUKÁLT SORJA NEGATÍV HATÁSAI

Az általam tanulmányozott szakirodalmakban több negatív hatását is kiemelik a sorjának amelyek, mint későbbiekben láthatjuk a kisebb geometria pontosság mellett a rosszabb mechanikai tulajdonságok és a növekvő költségek.

Falandys és mtsai. [53] kutatásukban egy automatizált sorjaeltávolítási technológiát mutatnak be. Munkájukban kiemelték, hogy a sorja hatására növekszik a repedések és fáradásos károsodások kockázata. Továbbá a sorja hatására bizonyos szerkezetekben akár 20%-kal is csökkenhet a szerkezet terhelhetősége. Más kutatásban is megemlíti alumínium ötvözetek megmunkálása során a sorjageometria pontosságra, mechanikai tulajdonságokra és költségekre gyakorolt negatív hatásait [54].

CFRP lemezek esetén igen eltérőek az eredmények a sorja mechanikai tulajdonságokra gyakorolt hatásáról, de abban egyetértés van a publikációkban, hogy szükséges az eltávolítása a geometriai pontatlanság miatt [48], [55]. Zhang és mtsai. [56] publikációjában CFRP/Al szendvicsszerkezeteken vizsgálták a felületi minőséget és a forgácsolásindukált sorját. Munkájukban kiemelték, hogy a sorja növeli a szendvicsszerkezetek megbízhatatlanságát, ami nagy probléma tekintve azok felhasználási területeit.

Jin és mtsai. [57] forgácsolásindukált sorjakkal foglalkozó szakirodalmi összegzésében több példát is hoz a sorjaeltávolítás költségeire. Ami a költségeket jól szemlélteti, hogy a német autógyártásban a sorjaeltávolítás költsége elérheti a 14%-ot is az összes megmunkálási költséghez viszonyítva. Ezen felül vannak iparágak, ahol különösen fontos a sorjamentesség. Ilyen például az orvosi ipar, ahol a megmunkálási költségek eloszlását a **2.14. ábrán** látható.



2.14. ábra Sorja eltávolítása orvosi iparban [57]

2.4. Következtetések és célkitűzések pontosítása

A szakirodalmi áttekintés során látható volt, hogy az Al/CFRP szendvicsszerkezetek forgácsolása során számos hibajelenség jön létre (geometriai pontatlanság, delamináció és sorja), amire hatással van a technológiai paraméterek és a megmunkálási környezet egyaránt.

Számos furatkészítő technológiát használnak az FML szendvicsszerkezeteknél és a FRP lemezeknél, amelyeket az átláthatóság érdekében a **2.3. táblázatban** felsorolom.

2.3. táblázat Furatkészítő technológiák FML szendvicsszerkezeteken és FRP lemezeken

Technológia	Specifikáció	Hivatkozás
Hagyományos fúrás	Egyszerű kinematika	[29], [32]
Ultrahangos fúrás	Költséges berendezés, rezgőfej szükséges	[31]
Helikális marás	3D-s megmunkálási környezet szükséges	[36]
Döntött helikális marás	5D-s megmunkálási környezet szükséges	[38]
Imbolygó marás	Komplex kinematika, 5D-s megmunkálási környezet szükséges	[42], [44]

A **2.3. táblázat** alapján látható, hogy a felsoroltak közül csak a hagyományos fúráshoz és a helikális maráshoz nem kell valamilyen speciális megmunkáló berendezés. Így a kutatási munkám célja egy olyan technológia kifejlesztése, amivel 3D-s marási környezetben csökkenthető a rétegek közötti sorjaképződés a hagyományos fúráshoz és a helikális maráshoz képest. Ehhez kiindulási alapot a **2.7. ábra** adta, ahol látható, hogy a kisebb axiális előtolással csökken a tengely irányú forgácsoló erőkomponens és ennek hatására a képződő sorja is. Így már a tervezési fázisban is egy olyan szerszámpálya kifejlesztése a cél, ahol az axiális előtolás értéke zérus a rétegek közötti munkálása során.

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK

Ebben a fejezetben ismertetem a kutatás során használt alapanyagokat, eszközöket és módszereket. Az általam fejlesztett technológiát csak a következő fejezetben mutatom be részletesen.

3.1. Felhasznált alapanyagok

Kutatásom során UD-CFRP/Al lemezeken végeztem a kísérletet. Az UD-CFRP lemezek $\varnothing 7 \mu\text{m}$ -es szénssálakkal erősített vinilészter mátrixú kompozitok voltak. Az UD-CFRP lemezek főbb mechanikai tulajdonságai **3.1. táblázatban** találhatóak.

3.1. táblázat A felhasznált UD-CFRP lemez főbb mechanikai tulajdonságai

Anyag	R_m (MPa)	τ_m (MPa)	S_d (1)	a_{cN} (kJ/m ²)
UD-CFRP	547,9 $\pm$ 45,8	21,77 $\pm$ 0,70	88,24 $\pm$ 0,36	263,17 $\pm$ 24,8

Az alumínium lemezek anyaga AlMgSi1 volt. Az AlMgSi ötvözeteket olyan iparágakban alkalmazzák, ahol elvárás a korrózióállóság és a nagy szilárdság [10]. Ezért alkalmazzák fém/szálerősített polimer kompozit szendvicsszerkezetek alkotójaként. A felhasznált AlMgSi1-es ötvözet főbb mechanikai tulajdonságai a **3.2. táblázatban** láthatóak.

3.2. táblázat A felhasznált Al lemez főbb mechanikai tulajdonságai

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

3.2. Kísérleti környezet, kísérletterv és mérőeszközök

A kísérletek és mérések reprodukálhatóságát szem előtt tartva ebben az alfejezetben ismertetem a kísérleti és mérési környezetet és az alkalmazott kísérlettervet.

3.2.1. KÍSÉRLETI ÉS MÉRÉSI KÖRNYEZET

A kísérletet a Kondia B-640 típusú háromtengelyes maróközponton végeztem. Forgácsoló szerszám kiválasztásánál a fő szempont az volt, hogy általános geometriával rendelkező szerszámokat válasszak. Így az alábbi három forgácsoló szerszámot alkalmaztam:

- (i.) $D = \varnothing 10 \text{ mm}$ TIVOLY 82402211000 keményfém kétcsúcscsögű csigafúró
- (ii.) $D = \varnothing 8 \text{ mm}$ TIVOLY 82402210800 keményfém kétcsúcscsögű csigafúró
- (iii.) $D = \varnothing 6 \text{ mm}$ THOMAS 23N12065 bevonat nélküli egyélű keményfém maró

Az UD-CFRP szálerősítésének iránya minden esetben a marógép Y-tengelyével párhuzamos volt. A kísérlet során X-, Y- és Z-irányú forgácsoló erőkomponenseket mér-

tem Kistler 9257B típusú erőmérővel. A kapott jeleket Kistler 5070 típusú töltéserősítővel végeztem. Ennek eredményeit jelen dolgozatban nem ismertetem, mivel ezek csak egy későbbi kutatási projekthez szükségesek.

A rétegek közötti sorja mérését UD-CFRP és alumínium lemezekben is elvégeztem. A méréshez Keyence VR-5000 típusú profilométert alkalmaztam 38x névleges nagyítás mellett. A mérőgép mérési pontossága $\pm 2,5 \mu\text{m}$, míg ismétlési pontossága $\pm 0,4 \mu\text{m}$. A kapott eredmények összehasonlíthatóságát az ismétlési pontosság befolyásolja, de a mérési pontosság nem, mivel a sorja mérését minden esetben a lemez síkjához képest végeztem. Ez a megállapítás nagy fontosságú tekintve azt, hogy a következő fejezetben ismertetett eredményeknél látható, hogy az alumínium lemez esetén a kapott maximális sorjamagasság eredmények sok esetben 0,01-0,1 mm nagyságrendbe esnek. A mérést követően a sorjamagassági értékeket a mérőgép szoftveréből $7,838 \mu\text{m}$ felbontással exportáltam ki. A maximális sorjamagassági értékeket minden furat esetén $\varphi = 1^\circ$ lépésközzel határoztam meg, amely kisebb az általam vizsgált szakirodalomban szereplőktől. Ennek az az oka, hogy mindkét lemez esetén már vizuálisan is egyértelműen látható volt a képződött rétegek közötti sorja inhomogenitása. A mikroszkópi képek az **1. sz. mellékletben** találhatók.

Az **3.1. ábrán** látható a kísérleti- és mérési elrendezés.



(a)



(b)

3.1. ábra (a) Kísérleti és (b) mérési környezet

A **3.1. ábrán** látható (a) kísérleti és (b) mérési elrendezés részletes leírása **2. sz. mellékletben** található.

3.2.2. KÍSÉRLETTERV

A kísérlettervezést a Central Composite Inscribed (CCI) típusú kísérlettervezési módszerrel végeztem. Mennyiségi faktorként a forgácsolási sebességet (v_c) és a fogankénti előtolást (f_z) variáltam öt szinten. Minőségi faktorként a technológiát (S) variáltam három szinten. A **3.3. táblázatban** található az alkalmazott kísérletterv.

3.3. táblázat Az alkalmazott faktorok és szintjeik, ahol a C jelöli a hagyományos fúrást, H - a helikális marást és HS jelöli a helikális marást réteggközi spirálbővítéssel

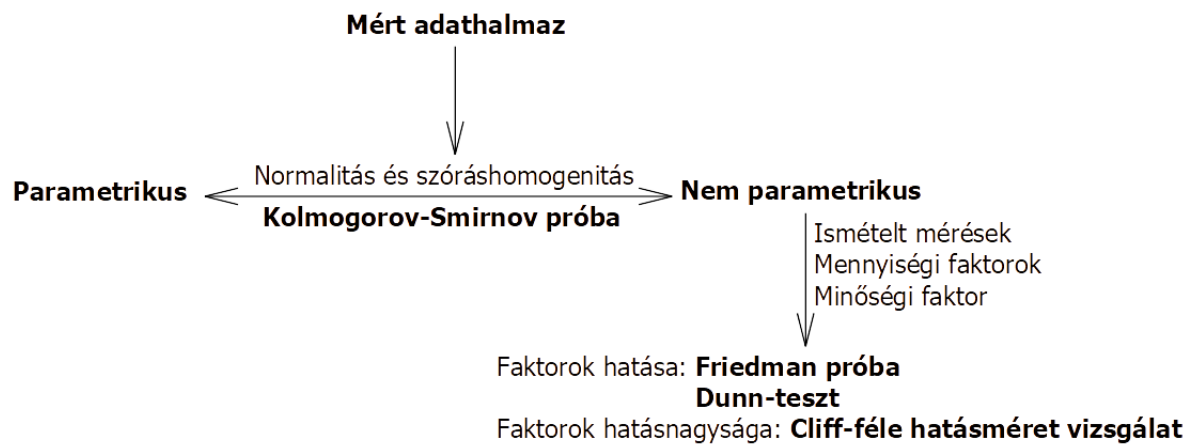
Faktorok		Faktorszintek				
		1	2	3	4	5
Forgácsolási sebesség	v_c (m/min)	100	114,65	150	185,36	200
Fogankénti előtolás	f_z (mm)	0,025	0,033	0,05	0,068	0,075
Technológia	S (1)	C	H	HS		

A dolgozatban vizsgált három technológia a hagyományos fúrás (C), a helikális marás (H) és a helikális marás réteggközi spirálbővítéssel (HS). Továbbiakban a technológiák rövidítéseit használok a dolgozatban. A C - és a H technológiákat a szakirodalom ismertetésénél már részletesen bemutatam. Az általam fejlesztett HS technológiát az Eredmények és következtetések fejezetben ismertetem.

3.3. Szoftverek és módszerek

A kutatás során felhasznált szoftverek a következők voltak: Excel, OriginPro, Minitab és Autodesk Inventor. Excelben és OriginPro-ban készítettem a diagrammokat. Minitabban csináltam a kísérlettervet. Autodesk Inventorban készítettem az ábrákat a technológiákról. A statisztikai próbákat Python programozási nyelven készítettem el.

A kapott maximális sorjamagassági értékeken parametrikusság vizsgálatot végeztem, amelynek során Kolmogorov-Smirnov próbával vizsgáltam a halmazok eloszlását. A faktorok hatását Friedman próbával és Dunn-teszttel vizsgáltam. A faktorok hatásméretét Cliff-féle hatásméret vizsgálattal végeztem el. A statisztikai tesztek megválasztása nagy körütekintést igényelt. Mivel számos tényező befolyásolja az alkalmazható teszteket. Ilyen tényező többek között a parametrikusság is. A statisztikai tesztek helyét és szerepét a **3.2. ábra** szemlélteti



3.2. ábra Statisztikai tesztek helye és szerepe a mérési eredmények kiértékelésében

A **3.2. ábra** alapján látható, hogy az ismételt mérések, mennyiségi és minőségi faktorok hatására választottam az előbb felsorolt statisztikai tesztek. A statisztikai tesztek a következő fejezetben részletesebben is tárgyalom.

4. EREDMÉNYEK ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A saját kutatási eredményeimet ebben a fejezetben ismertetem. Elsőként az általam fejlesztett HS technológiát ismertetem. Ezt követően a maximális sorjamagasság vizsgálatát mutatom be. Végezetül a kísérlet során variált faktorok hatását is vizsgálom.

4.1. Technológia fejlesztése

Ebben az alfejezetben ismertetem az általam fejlesztett HS (helikális marás rétegekőzi spirálbővítéssel) technológiát.

4.1.1. KIINDULÁSI FELTÉTELEZÉSEK

A technológia fejlesztéséhez a kiinduló hipotézist a korábban már ismertetett szakirodalomban található eredmények alapján határoztam meg. Céлом egy olyan technológia fejlesztése, ami 3D-s marási környezet mellett kisebb rétegekőzi sorját eredményez, mint a szakirodalomban található 3D-s technológiák.

A kiinduló hipotézisem az volt, hogy ha az axiális előtolás értéke zérus a rétegekőz készre munkálása során, akkor keletkező maximális sorja magasság is kisebbnek adódik, mint egyéb esetben. Így a HS technológiánál rétegekőzben egy arkhimédészi spirált követ az előtoló mozgás.

A hagyományos fúrásnál alkalmazott fogankénti előtolás értékek a kísérlettervben találhatóak. A helikális stratégiánál a menetemelkedést (p_{cs}) adtam meg a pályageneráláshoz szükséges paraméterként. Tehát helikális pálya esetén a fogankénti axiális előtolás a következő összefüggés alapján számítható:

$$f_{z,a} = \frac{p_{cs}}{N} = \frac{f_z \cdot p_{cs}}{\sqrt{(d\pi)^2 + p_{cs}^2}} \quad (4.1.)$$

ahol $f_{z,a}$ a fogankénti axiális előtolás, p a menetemelkedés, N a hurkonkénti szerszám körülfordulások száma, f_z az előtolás és d a furat átmérője. Tehát összegezve a kísérletek során rétegekőzben alkalmazott fogankénti axiális előtolások láthatóak a **4.1. táblázatban**.

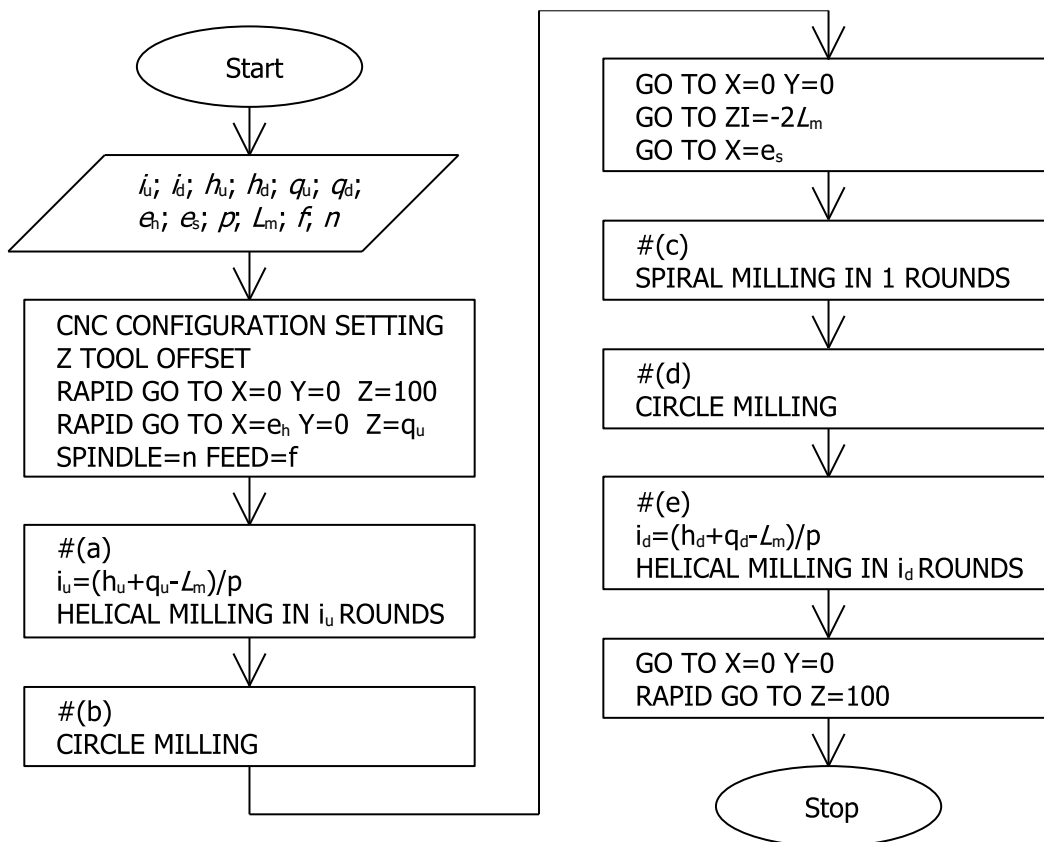
4.1. táblázat Kísérlet során alkalmazott fogankénti axiális előtolás tartományok a rétegekőzben

Technológia, S (1)	Fogankénti axiális előtolás, $f_{z,a}$ (mm)
C	$f_{z,a} = 0,025-0,075$ mm
H	$f_{z,a} = 0,00159-0,00477$ mm
HS	$f_{z,a} = 0$ mm

A **4.1. táblázat** alapján látható, hogy igen nagy különbségek vannak fogankénti axiális előtolásban a különböző technológiák esetén.

4.1.2. TECHNOLÓGIA ISMERTETÉSE

A HS technológiát a **4.1. ábrán** lévő CNC vezérlés független algoritmusban mutatom be.



4.1. ábra HS technológia vezérlés független CNC algoritmus

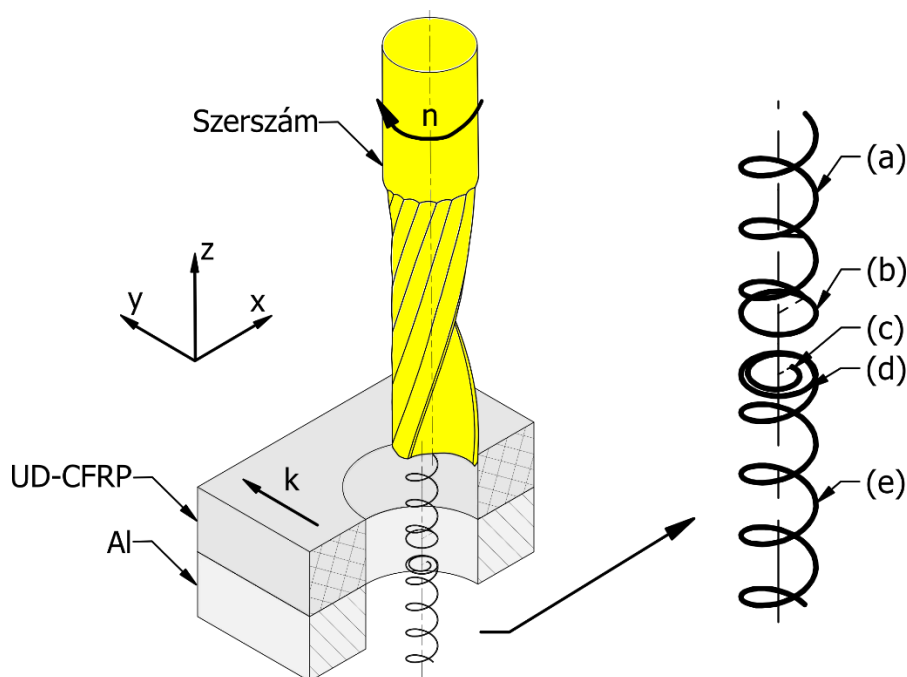
A **4.1. ábrán** lévő paraméterek elnevezését és mértékegységét az átláthatóság érdekében a **4.2. táblázatba** írtam le.

4.2. táblázat HS technológiánál alkalmazott paraméterek értelmezése

Jelölés	Megnevezés	Mértékegység	Jelölés	Megnevezés	Mértékegység
i_u	Felső hurkok száma	1	e_h	Helikális kiinduló koordináta	mm
i_d	Alsó hurkok száma	1	e_s	Spirál kiinduló koordináta	mm
h_u	Felső lemez vastagsága	mm	p	Helikális menetemelkedés	mm
h_d	Alsó lemez vastagsága	mm	L_m	Rétegek köz megközelítés	mm
q_u	Felső lemez megközelítése	mm	f	Előtolás	mm
q_d	Alsó lemez megközelítése	mm	n	Fordulatszám	(1/min)

A HS technológia algoritmusát (4.1. ábra) előfúrt furaton ($\varnothing 8$ mm) hajtottam végre, amely után elsőként egy csavarvonalat követve, helikális pályát követ a szerszám. A rétegek előtt egy megközelítési távolsággal (v) körmozgást végez a szerszám az egyenletes ráhagyás biztosításának érdekében. Ezt követően a szerszám homlokfelülete egy megközelítési távolsággal a rétegek alatt végzi a spirális mozgást, amit egy körmozgással simít be. Így az axiális előtolás értéke a rétegek készremunkálásakor zérusnak adódik. Végezetül az alsó lemez fennmaradó részét egy helikális pálya mentén munkálja meg a maró szerszám. A technológiák főbb geometriai adatai a 3. sz. mellékletben láthatóak.

A HS technológiát a 4.2. ábra szemlélteti, ahol az algoritmusban szereplő jelzéseket is feltüntettem.

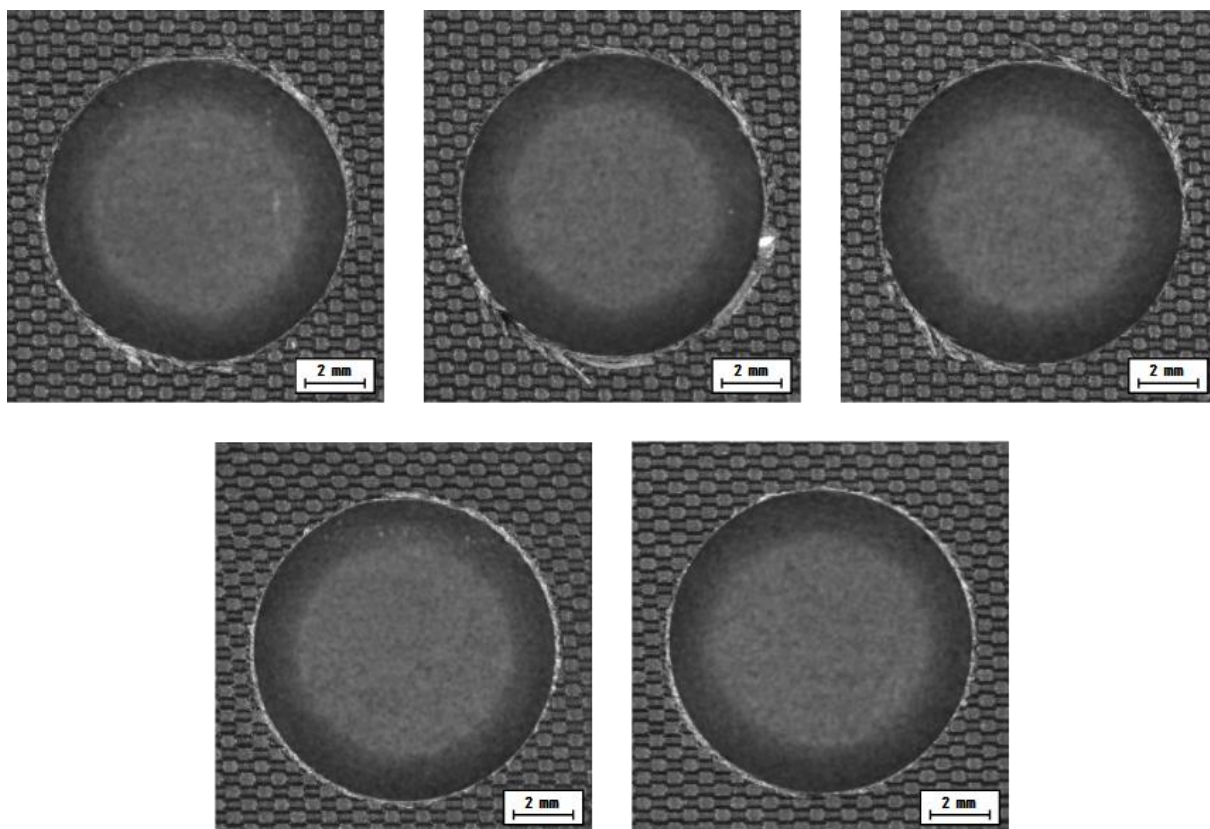


4.2. ábra Helikális marás spirális furatbővítéssel: (a) helikális marás, (b) kör marás, (c) spirál marás, (d) körmarás és (e) helikális marás

A 4.2. ábrán lévő HS technológia is az előfúrást követő lépéseket mutatja be. A k az erősítőszál irányát jelöli.

4.2. Maximális sorjamagasság vizsgálata

A mérést követően kapott maximális sorjamagassági eredményeken egyértelműen láthatóak voltak a sokszor két nagyságrendű eltérések ugyanazon furaton. Ezt jól szemléltetik vizuálisan a 4.3. ábrán lévő mikroszkópi képek, amelyek C technológiával készültek a kísérleti középpontban ($f_z = 0,05$ mm; $v_c = 150$ m/min).



4.3. ábra Mikroszkópi képek a kísérleti középpontban C technológiával

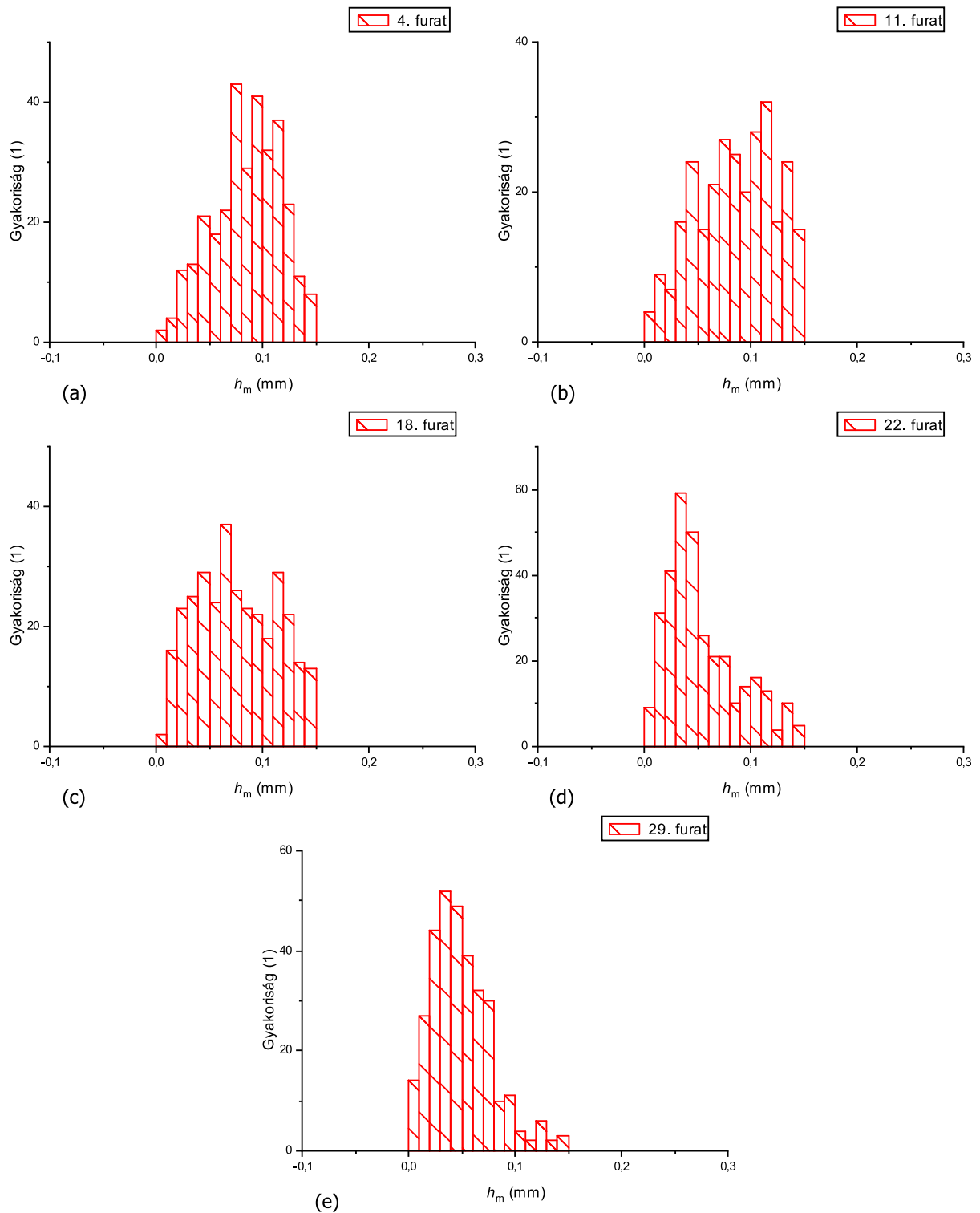
A mikroszkópi képek (4.3. ábra) alapján megállapítható, hogy a faktorok hatásvizsgálatánál fontos az alkalmazható módszerek felkutatása az erősen inhomogén sorjeloszlás miatt. Ezt jól szemlélteti a 4.2. táblázat, ahol az előző furatok maximális sorjamagasság értékei vannak feltüntetve.

4.2. táblázat C technológiával készült furatok maximális sorjamagasság átlaga és szórása szálvágási szög tartományokra bontva

	1. furat		2. furat		3. furat		4. furat		5. furat	
θ (°)	$h_{mátl}$ (mm)	σ_{h_m} (mm)	$h_{mátl}$ (mm)	σ_{h_m} (mm)	$h_{mátl}$ (mm)	σ_{h_m} (mm)	$h_{mátl}$ (mm)	σ_{h_m} (mm)	$h_{mátl}$ (mm)	σ_{h_m} (mm)
1-30	0,083	0,027	0,060	0,036	0,058	0,032	0,027	0,017	0,030	0,019
31-60	0,089	0,020	0,042	0,019	0,064	0,029	0,034	0,016	0,038	0,019
61-90	0,118	0,116	0,089	0,054	0,113	0,085	0,107	0,037	0,056	0,026
91-120	0,107	0,029	0,147	0,052	0,131	0,041	0,129	0,042	0,081	0,049
121-150	0,109	0,018	0,082	0,030	0,094	0,046	0,061	0,029	0,054	0,015
151-180	0,117	0,036	0,090	0,029	0,071	0,032	0,050	0,017	0,048	0,019

A 4.2. táblázat alapján látható, hogy az átlag és a szórás a maximális sorjamagasságot nem jellemzi reprezentatívan. Ezért a kísérletet követően rendelkezésre álló adathalmazon elsőként parametrikusság vizsgálata szükséges, mivel más statisztikai tesztek lehet alkalmazni parametrikus- és nem-parametrikus adathalmazokon. A parametrikusság vizsgálata során a halmazok eloszlását és szóráshomogenitását vizsgáltam.

A **4.3. ábrán** látható furatok maximális sorjamagasságának az eloszlása látható a **4.4. ábrán**.



4.4. ábra CFRP lemezen sorjamagasság eloszlása C technológiával kísérleti középpontban: (a) 4. furat, (b) 11. furat, (c) 18. furat, (d) 22. furat, (e) 29. furat

A **4.4. ábrán** látható, hogy ugyanazon paraméterekkel és -technológiával készített furatok esetén is jelentős eltérést mutat a sorjamagasság eloszlás ferdesége és csúcsossága (kurtózis). Fontos megjegyezni, hogy az eltérést nem a szerszám kopottsága

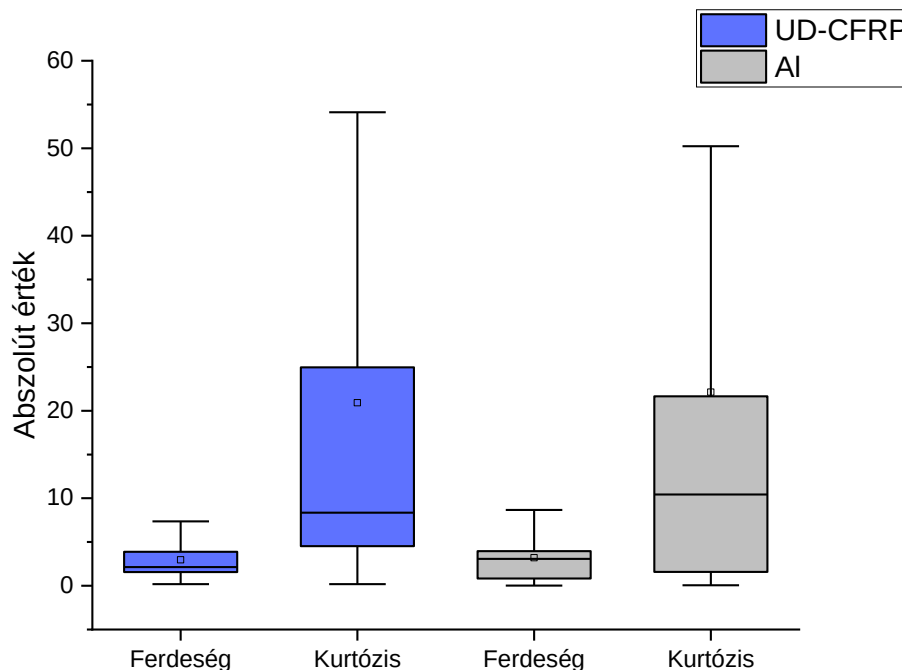
okozta, amit az is igazol, hogy a 22.- és a 29. furat maximális sorjamagasságának átlaga kisebbnek adódott, mint a 4.- és a 11. furaté. A szerszámkopás jelentős növekedése a maximális sorjamagasság növekedését is eredményezné, ahogy az a szakirodalmi áttekintésben is látható volt. A **4. sz. mellékletben** találhatóak a maximális sorjamagasság eloszlás diagrammok.

Az eloszlás vizsgálata során normalitás próbát végeztem Kolmogorov-Smirnov próbával. A normalitás vizsgálatokor főként két jellemzőt vizsgáltam, a ferdeséget (Skewness) és kurtózt (Kurtosis). Az alábbi tartományban tekinthető parametrikusnak egy adathalmaz:

$$|g_1| < 1 \quad (4.1.)$$

$$|g_2 - 3| < 1 \quad (4.2.)$$

ahol g_1 a ferdeség és g_2 a kurtózis (csúcsosság). A normalitás vizsgálat során kapott ferdeség és kurtózis értékek a **4.5. ábrán** vannak szemléltetve.



4.5. ábra A maximális sorjamagassági adathalmazok ferdeség és kurtózis értékei

Az **4.5. ábrán** látható, hogy a kapott ferdeség és kurtózis értékek többsége (77,56%-a) nem felel meg a parametrikusság feltételének a (4.1.) és a (4.2.) összefüggések alapján. A szóráshomogenitás vizsgálatát nem végzem el, mivel a parametrikusság feltétele megdőlt a ferdeség és a kurtózis vizsgálata során. Ennek hatására a faktorok vizsgálatára továbbiakban csak nem parametrikus statisztikai teszteket alkalmazok.

A nem parametrikus statisztikai tesztek közül a Friedman próbát (jelen feltételek mellett) érdemes elvégezni elsőként. Ezzel megállapítható a faktorok szignifikanciája az egész adathalmazra nézve. Tehát ha nincs szignifikáns hatása egyik faktornak sem, akkor nem szükséges további tesztek elvégzése. A Friedman próba az alumínium és az UD-CFRP lemez esetén is szignifikáns eredményt adott 5%-os szignifikancia szint

mellett. Ezt követően a post hoc tesztek közül szükséges választani a páronkénti szignifikanciaszint meghatározásához. Az adatok kiértékelése során Dunn-tesztet készítettem. A teszt során Bonferroni korrekciót alkalmaztam az ismételt összehasonlítások eredményezte hiba elkerülése érdekében. A dolgozat véges terjedelme miatt a Dunn-teszt során alkalmazott összefüggéseket nem ismertetem.

A páronkénti szignifikanciaszint meghatározását követően a hatásnagyságot vizsgáltam. A kiértékelés során a Cliff-féle hatásméretet állapítottam meg, aminek értékét az alábbi összefüggés adja meg.

$$\delta_c = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [R_i > F_j] - [F_i > R_j]}{n^2}, \delta_c \in [-1, 1] \quad (4.3.)$$

ahol δ_c a Cliff-féle hatásméret, R - és F a független véletlen változók (egy-egy kísérleti beállítás), míg $[\cdot]$ az Iverson-zárójel, ami 1-et ad vissza, amikor a zárójelben lévő feltétel igaz, és 0-t, ha hamis a feltétel. A Cliff-féle hatásméret értéktelmezése a **4.3. táblázatban** látható [58].

4.3. táblázat Cliff-féle hatásméret értéktelmezése [59]

Értelmezés	δ_c (1)
Elhanyagolható hatás	<0,15
Kis hatás	0,15-0,33
Közepes hatás	0,33-0,47
Nagy hatás	>0,47

A **4.3. táblázatban** látható tartományokon kívül a nagy tartományt 0,7-nél két részre bontom a pontosabb eredmény kiértékelés érdekében.

4.3. Faktorok hatása

A Dunn-teszttel mind a 39 kísérleti beállítást páronként összehasonlítottam. A kísérlet kiértékelése során a faktorok fő hatásait tudtam vizsgálni. Parametrikus tesztek esetén a kereszthatások (interakciók) vizsgálata sok esetben kevésbé pontos, mint a főhatások vizsgálata. Ezért csak a fő hatások vizsgálatát végeztem el. A **4.4. táblázatban** a technológiák páronkénti hatása (szignifikanciája) látható.

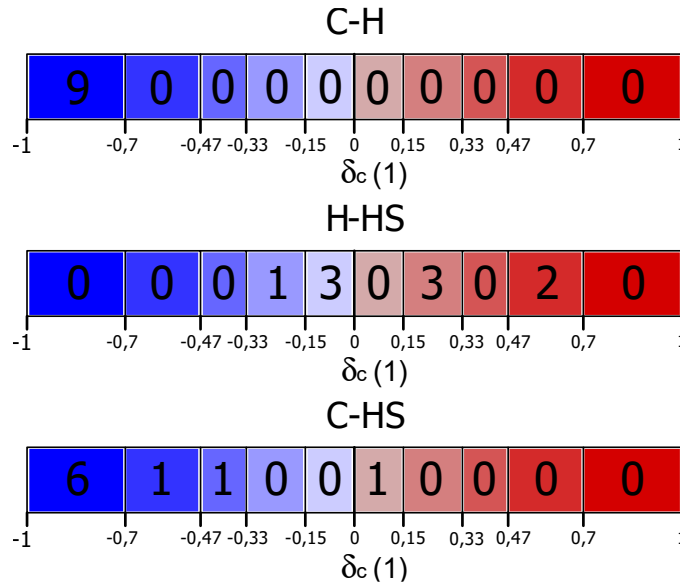
4.4. táblázat Technológiák páronkénti hatása

	Al			UD-CFRP		
	C-H	H-HS	C-HS	C-H	H-HS	C-HS
$p < 0,05$	9	3	8	8	5	9
$p > 0,05$	0	6	1	1	4	0

A **4.4. táblázat** alapján az alumínium lemez esetén a C-H és C-HS párok között szignifikáns különbség van, míg a H-HS pároknál többségében nincs jelentős különbség. Ennek az az oka, hogy az alumínium lemezen H és HS technológiákkal kapott maximális

sorjamagassági értékek igen kicsik (jellemzően $h_{\text{máti}} \approx 0,01$ mm) és ezért nem adódtak jelentős eltérések a két technológia között. Az UD-CFRP lemeznél mindegyik pár esetén többségben van a szignifikáns eltérés. A H-HS párok esetén mindkét lemeznél kevésbé jelentősek a hatások. Az UD-CFRP lemez esetén a vártaknak megfelelően a HS technológiával a zérus rétegek közötti axiális eltolás következtében jellemzően kisebbnek adódtak a maximális sorjamagassági értékek, mint H technológia esetén.

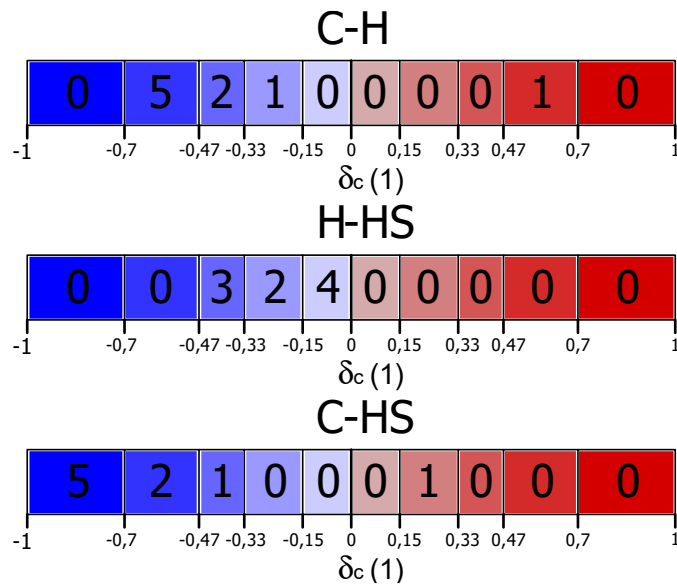
A technológiák Cliff-féle hatásnagyság elemzés eredménye az alumínium lemezen a **4.6. ábrán** látható.



4.6. ábra Technológiák Cliff-féle hatásnagysága az alumínium lemezen

A **4.6. ábra** alapján a C-H pároknál kapott hatásnagyság alapján megállapítható, hogy a C technológiával kapott maximális sorjamagassági értékek döntő része nagyobb, mint a H technológiával kapott értékek. A C-HS pároknál is a C technológia döntően nagyobb értékeket adott, de itt már a 9-ből 6 pár eset a legkisebb tartományba. A H-HS párok esetén- ahogy azt a szignifikancia vizsgálat is jelezte – nehezebb az egyértelmű következtetések levonása. A vizsgálat 9-ből 2 esetben adott nagy hatást. A kevés szignifikáns pár és a kis hatásnagyságok ellenére az látszódik, hogy a H technológia több esetben adott kisebb maximális sorjamagasságot, mint a HS technológia.

A technológia faktor hatását mutatja **4.7. ábra** a maximális sorjamagasságra UD-CFRP lemezek esetén

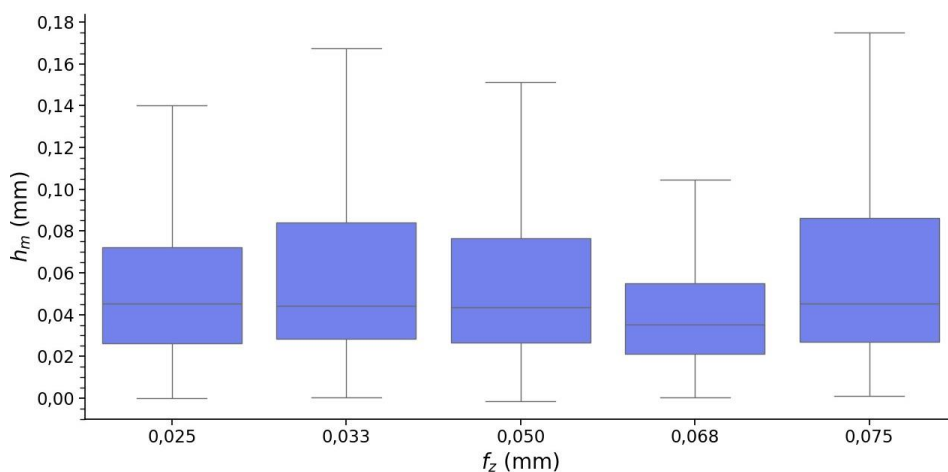


4.7. ábra Technológiák Cliff-féle hatásnagysága az UD-CFRP lemezen

Az UD-CFRP lemezen (4.7. ábrán) a C-HS pár eredményezte a legnagyobb hatásnagyságot, de a C-H párok hatásnagyságának többsége (55%) a nagy tartományba esik. A H-HS pároknál minden esetben a HS technológia eredményezte többségében a kisebb maximális sorjamagassági értékeket, ahol három esetben közepes, két esetben kis, míg 4 esetben elhanyagolható hatásról beszélhetünk. Tehát a faktorok hatását összegezve a H és HS technológia mindkét lemez esetén szignifikánsan kisebb maximális sorjamagasságot eredményezett. A H-HS párok esetében az alumínium lemezeknél többségében (66%) nincs szignifikáns hatás, míg UD-CFRP lemez esetén többségben (55%) szignifikánsan kisebb maximális sorjamagasságot eredményezett a HS technológia. A Cliff-féle hatásnagyság vizsgálatot mind a 39 kísérleti beállításon páronként összehasonlítottam, amik az 5. sz. mellékletben találhatóak

Az eredmények kiértékelése során a fő részt az általam fejlesztett technológia vizsgálata teszi ki, de röviden kitérek a technológiai paraméterek vizsgálatára is.

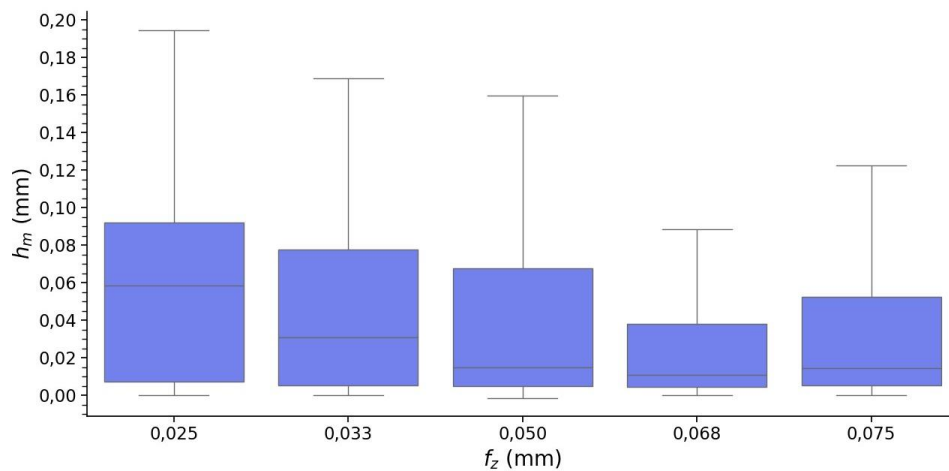
Az UD-CFRP lemez esetében a különböző fogankénti előtolással (f_z) kapott maximális sorjamagassági értékek láthatóak a 4.8. ábrán.



4.8. ábra Fogankénti előtolás hatása a maximális sorjamagasságra rétegeközben UD-CFRP lemez esetén

A **4.8. ábrán** látható, hogy a kapott eredmények igen nagy szórást mutatnak és nem fedezhető fel egyértelmű trend, hogy a nagyobb vagy a kisebb értékek eredményeznek kevesebb sorját.

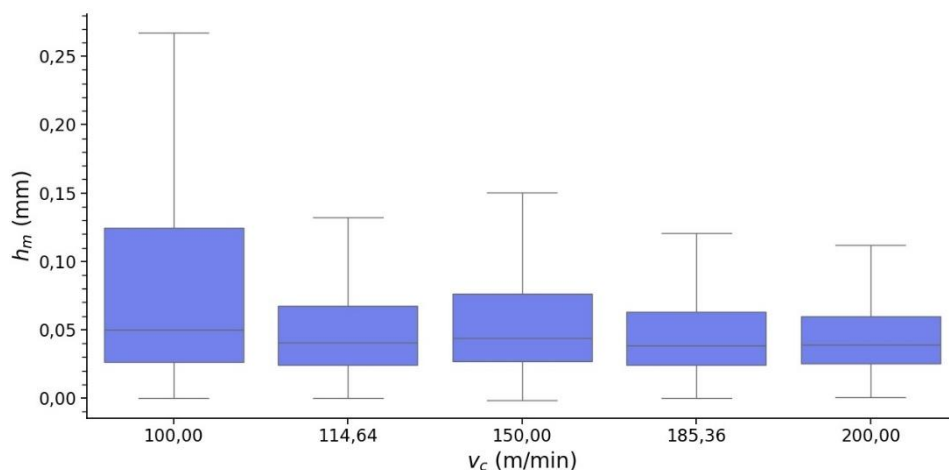
Alumínium lemez esetén a fogankénti előtolás hatása a **4.9. ábrán** található.



4.9. ábra Fogankénti előtolás hatása a maximális sorjamagasságra rétegeközben alumínium lemez esetén

Az alumínium lemez esetén (**4.9. ábra**) már megfigyelhető egy olyan trend, hogy kisebb maximális sorjamagasság értékeket eredményeznek a nagyobb fogankénti előtolások. Ennek egyik lehetséges oka az lehet, hogy az alumínium lemez alul helyezkedett el a fúrás során, így a rétegeközi sorja alumínium lemeznél belépő oldalon van. Tehát ebben az esetben az előtolás hatására létrejövő erő a lemez felé mutat nem pedig a lemezből, mint a kilépő oldal esetén. Összességében a két diagram alapján (**4.8. ábra és 4.9. ábra**) az $f_z = 0,068$ mm fogankénti előtolás eredményezi átlagosan a legkisebb maximális sorjamagasságot a vizsgált szintek közül.

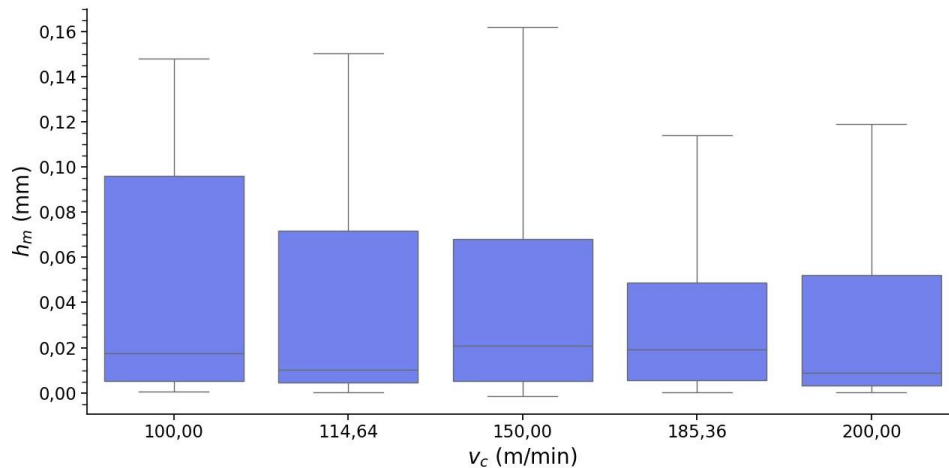
A másik vizsgált faktor a forgácsolási sebesség volt, aminek hatása a **4.10. ábrán** látható.



4.10. ábra Forgácsolási sebesség hatása a maximális sorjamagasságra rétegeközben UD-CFRP lemez esetén

A **4.10. ábra** alapján a maximális sorjamagassági értékek a $v_c = 100$ m/min-es szinten jelentősen nagyobbak adódtak, mint a többi esetben. A $v_c = 114,64$ - 200 m/min-es tartományban már nincs jelentős eltérés a factorszintek maximális sorjamagasságra gyakorolt hatásában.

Az alumínium lemez esetében a forgácsolási sebesség a **4.11. ábrán** látható.



4.11. ábra Forgácsolási sebesség hatása a maximális sorjamagasságra rétegeközben Al lemez esetén

Az alumínium lemez esetén a nagyobb forgácsolási sebességek kisebb maximális sorjamagasságot eredményeztek a **4.11. ábra** alapján. Tehát az eredmények alapján nagyobb forgácsolási sebességek ($v_c = 185,36$ m/min és $v_c = 200$ m/min) eredményeztek kisebb maximális sorjamagasságokat.

Összességében az előzőek alapján látható volt, hogy az alkalmazott technológiának szignifikáns ($\alpha = 0,05$) a hatása a keletkező maximális sorjamagasságra, és a vizsgált technológiai paramétereknek (f_z és v_c) is jelentős hatásuk van.

Végezetül fontos megemlíteni, hogy a technológiákkal csak a dolgozatban ismertetett kísérleti környezetben forgácsoltam furatokat. Az általam fejlesztett technológia hatását csak akkor lehet pontosan felmérni, hogyha egyéb körülmények között is végzünk kísérleteket. Így a technológia hatásának validálásához szükséges többek között különböző geometriával rendelkező szerszámokkal és eltérő anyagú (például UD-CFRP esetén másik mátrix anyag alkalmazása) lemezekkel is végezni kísérleteket.

5. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KITEKINTÉS

Ebben a fejezetben összegzem az elvégzett kutatás során kapott eredményeket és megemlítek néhány szempontot, ami alapján további vizsgálatok végezhetőek az általam fejlesztett technológián.

5.1. Eredmények

Dolgozatomban furatkészítési technológiát fejlesztettem és vizsgáltam CFRP/Al szendvicsszerkezeten. Ennek a témának kiindulási alapja az volt, hogy ezen szendvicsszerkezeteket olyan fejlett iparágak alkalmazzák, ahol minden esetben elvárás a kiváló minőséget eredményező megmunkálás. Szakirodalmi áttekintésem során látható volt, hogy számos hibajelenség merül fel FML szendvicsszerkezetek furatkészítése során, amelyek közül a rétegekben létrejövő forgácsolásindukált hibák jelentősége igen nagy, mivel azokat nem lehet olyan könnyen utólagosan eltávolítani, mint a be- és a kilépő oldalon lévő hibákat. Továbbá a szakirodalom alapján látható volt, hogy azon technológiák, amelyek hatására jelentősen csökkenthető a rétegek közötti sorjaképződés, azok legtöbb esetben valamilyen viszonylag költségesebb berendezést, eszközt vagy szerszámot igényelnek. Így kutatásom során a fő cél egy olyan technológia fejlesztése volt, aminek hatására csökkenthető a rétegek közötti sorjaképződés 3D-s marási környezetben, hagyományos geometriájú, kereskedelmi forgalomban könnyen beszerezhető szerszám alkalmazásával.

Technológia fejlesztése során a kiinduló alapot az adta, hogy számos tanulmányban egyértelmű eredménynek adódott, hogy az axiális előtolás csökkentésével a forgácsolásindukált sorja csökkenthető a furat készítése során. Így a hipotézisem az volt, hogy ha az axiális előtolás értékét zérusra csökkentem a rétegek közötti készremunkálása során akkor jelentősen kisebb lesz a keletkező rétegek közötti sorja. Így az irodalomban megtalálható helikális marási technológiát úgy fejlesztettem tovább, hogy a rétegek között egy arkhimédészi spirált követve végezzem megmunkálást.

A CCI (Central Composite Inscribed) kísérlettervezési módszert alkalmaztam, ahol a két mennyiségi faktor a fogankénti előtolás és a forgácsolási sebesség volt. A minőségi faktor a technológia volt, ahol az általam fejlesztett HS technológiát a szakirodalomban megtalálható hagyományos fúrással (C) és helikális marással (H) hasonlítotam össze.

A kutatásom során kapott legfőbb eredmények a következők:

- (i.) A kísérlet során alkalmazott megmunkálási körülmények mellett az UD-CFRP/Al szendvicsszerkezeteken képződő maximális sorjamagasság eloszlása nem mutatott normál eloszlást és a ferdeség és kurtózis jellemzők sem feleltek meg (77,56%-ban) a parametrikusság feltételeinek. Így összességében a maximális sorjamagasság csak nem parametrikus statisztikai tesztekkel vizsgálható.
- (ii.) Mindkét lemez esetén szignifikáns a technológia hatása a rétegek közötti maximális sorjamagasságra a Friedman próba alapján 95%-os szignifikancia szint mellett.

- (iii.) A Dunn-teszt alapján a H és HS technológia mindkét lemez esetén többségében szignifikánsan ($\alpha = 0,05$) kisebb maximális sorjamagasságot eredményezett a C technológiához viszonyítva. Alumínium lemez esetén a H technológia kisebb maximális sorjamagasságot eredményezett, mint a HS technológia, de többségében (9-ből 6 darab) a különbség nem szignifikáns. UD-CFRP lemez esetén a HS technológia többségében (9-ből 5 darab) szignifikánsan eredményezett kisebb maximális sorjamagasságot a H technológiához képest.
- (iv.) A technológiákat Cliff-féle hatásnagysággal vizsgálva látható volt, hogy a H és a HS technológiának többségében nagy a hatása a C technológiához képest mindkét lemez esetén. Az alumínium lemez esetén 9-ből 5 esetben eredményezett statisztikailag kisebb sorjamagasságot a H technológia a HS technológiához képest. A HS technológia pedig minden esetben statisztikailag kisebb maximális sorjamagassági értékeket eredményezett a H technológiához képest az UD-CFRP lemeznél.
- (v.) A vizsgált technológiai paraméter tartományokban ($f_z = 0,025-0,075$ mm és $v_c = 100-200$ m/min) a fogankénti előtolás esetén az $f_z = 0,068$ mm-, míg a forgácsolási sebesség esetén a $v_c = 200$ m/min eredményezte átlagosan a legkisebb maximális sorjamagasságot.

5.2. Kitekintés

Az általam fejlesztett technológiát (HS) egy kísérlettel vizsgáltam, de további vizsgálatok is szükségesek ahhoz, hogy egyértelművé váljanak a technológiában rejlő lehetőségek.

Az alábbiakban felsorolom a kutatás során felmerülő további fejlesztési és vizsgálati lehetőségeket:

- (i.) Szükséges a HS technológia optimalálása, mivel a forgácsolás során létrejövő kinemaika nagyban függ a szerszámtérítéstől és a pályagenerálási algoritmusban leírt geometriai és technológiai paraméterektől.
- (ii.) A HS technológia továbbfejlesztése több irányban is megindulhat. Ennek egyik lehetséges változata az, hogy 5D-s marási környezetre is lehetne optimalni a technológiát, mivel a szakirodalmi részen látható volt, hogy például a szerszám bedöntése javítja a létrehozott furat minőségét helikális marás esetén.
- (iii.) A HS technológiát célszerű lenne a másik lemezsorrend szerint (alumínium lemez felül és UD-CFRP lemez alul) is vizsgálni.
- (iv.) Az igen inhomogén sorjageometria következtében célszerű kisebb lépésközönként mintavételezni a maximális sorjamagasságot. Azonban nagyban elősegítené a kiértékelési folyamatot annak ismerete, hogy mekkora az a maximális lépésköz, ami esetén még nem torzul nagy mértékben a kapott sorjamagassági eredmények.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] J. Min *et al.*, "Fabrication processes of metal-fiber reinforced polymer hybrid components: a review," Jun. 01, 2022, *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1007/s42114-021-00393-z.
- [2] S. Gordon and M. T. Hillery, "A review of the cutting of composite materials," *Proc. Instn Mech. Engrs*, 2003.
- [3] R. Fu *et al.*, "Drill-exit temperature characteristics in drilling of UD and MD CFRP composites based on infrared thermography," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 135, pp. 24–37, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2018.08.002.
- [4] C. Liu, J. Ren, K. Shi, and Y. Zhang, "Investigation of fracture mechanism evolution model for UD-CFRP and MD-CFRP during the milling process," *Compos Struct*, vol. 306, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.116585.
- [5] N. Geier, J. P. Davim, and T. Szalay, "Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review," Oct. 01, 2019, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105552.
- [6] W. Hintze, R. Clausen, C. Schütte, and K. Kroll, "Evaluation of the total cutting force in drilling of CFRP: a novel experimental method for the analysis of the cutting mechanism," *Production Engineering*, vol. 12, no. 3–4, pp. 431–440, Jun. 2018, doi: 10.1007/s11740-018-0807-2.
- [7] N. Geier, "Egyirányban szénszállal erősített polimer (UD-CFRP) kompozit anyagok forgácsolt alakosságainak mikro- és makrogeometriai vizsgálata és jellemző mérőszámrendszerének kidolgozása," *BME Gépészmérnöki Kar Gyártástudomány Tanszék*, 2019.
- [8] 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.
- [9] I. P. Okokpujie and L. K. Tartibu, "A mini-review of the behaviour characteristic of machining processes of aluminium alloys," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, Jan. 2022, pp. 4526–4532. doi: 10.1016/j.matpr.2022.05.006.
- [10] N. Eswara and P. R. J. H. Wanhill, "Indian Institute of Metals Series Aerospace Materials and Material Technologies," 2017. [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/15453>
- [11] Z. Maros, "Színesfémek forgácsolása," *Nemzeti tankönyvkiadó*, 2009.
- [12] L. Gao, Z. Li, S. Jiang, and B. Xie, "Dynamic impact behavior and notched fatigue life of GLARE laminates," *Compos Struct*, vol. 323, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.117449.
- [13] T. Sinmazçelik, E. Avcu, M. Ö. Bora, and O. Çoban, "A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods," Aug. 2011. doi: 10.1016/j.matdes.2011.03.011.

- [14] W. Sai and G. B. Chai, "Fatigue in Fiber-Metal Laminates for Small Wind Turbine Blades Application," in *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, May 2018. doi: 10.1051/mateconf/201816507005.
- [15] R. Othman *et al.*, "Application of carbon fiber reinforced plastics in automotive industry: A review," 2018. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/337917403>
- [16] C. Zheng and S. Lei, "Mechanical analysis and optimal design for carbon fiber resin composite wound hydrogen storage vessel with aluminum alloy liner," *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*, vol. 131, no. 2, Apr. 2009, doi: 10.1115/1.3027459.
- [17] J. wei Bao, Y. wei Wang, R. An, H. wu Cheng, and F. chi Wang, "Investigation of the mechanical and ballistic properties of hybrid carbon/ aramid woven laminates," *Defence Technology*, vol. 18, no. 10, pp. 1822–1833, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.dt.2021.09.009.
- [18] A. M. Mukesh and N. R. J. Hynes, "Mechanical properties and applications of fibre metal laminates," *AIP Conf Proc*, vol. 2142, no. 1, p. 100002, Aug. 2019, doi: 10.1063/1.5122456.
- [19] M. Peters, J. Kumpfert, C. H. Ward, and C. Leyens, "Titanium alloys for aerospace applications," Jun. 01, 2003. doi: 10.1002/adem.200310095.
- [20] N. A. Nassir *et al.*, "Experimental and numerical characterization of titanium-based fibre metal laminates," *Compos Struct*, vol. 245, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112398.
- [21] E. Doluk, "Comparison of hole quality after drilling and helical milling of the Al/CFRP stacks," *Technologia i Automatyizacja Montażu*, vol. 122, no. 4, pp. 3–12, 2023, doi: 10.7862/tiam.2023.4.1.
- [22] 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.
- [23] C. Y. Wang, Y. H. Chen, Q. L. An, X. J. Cai, W. W. Ming, and M. Chen, "Drilling temperature and hole quality in drilling of CFRP/aluminum stacks using diamond coated drill," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 16, no. 8, pp. 1689–1697, Jun. 2015, doi: 10.1007/s12541-015-0222-y.
- [24] M. C. Santos, A. R. Machado, W. F. Sales, M. A. S. Barrozo, and E. O. Ezugwu, "Machining of aluminum alloys: a review," Oct. 01, 2016, *Springer London*. doi: 10.1007/s00170-016-8431-9.
- [25] M. Nouari, G. List, F. Girot, and D. Coupard, "Experimental analysis and optimisation of tool wear in dry machining of aluminium alloys," *Wear*, vol. 255, no. 7–12, pp. 1359–1368, 2003, doi: 10.1016/S0043-1648(03)00105-4.
- [26] N. Geier and T. Szalay, "Optimisation of process parameters for the orbital and conventional drilling of uni-directional carbon fibre-reinforced polymers (UD-

- CFRP)," *Measurement (Lond)*, vol. 110, pp. 319–334, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.measurement.2017.07.007.
- [27] J. L. Merino-Pérez, R. Royer, E. Merson, A. Lockwood, S. Ayvar-Soberanis, and M. B. Marshall, "Influence of workpiece constituents and cutting speed on the cutting forces developed in the conventional drilling of CFRP composites," *Compos Struct*, vol. 140, pp. 621–629, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.01.008.
- [28] S. R. Fernandez-Vidal, S. Fernandez-Vidal, M. Batista, and J. Salguero, "Tool wear mechanism in cutting of stack CFRP/UNS A97075," *Materials*, vol. 11, no. 8, Jul. 2018, doi: 10.3390/ma11081276.
- [29] 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.
- [30] I. Shyha, S. L. Soo, D. Aspinwall, and S. Bradley, "Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fibre reinforced plastic composites," *J Mater Process Technol*, vol. 210, no. 8, pp. 1023–1034, Jun. 2010, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.02.011.
- [31] N. Tamil Alagan *et al.*, "Investigation of the quality of Al-CFRP stacks when drilled using innovative approaches," *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 43, pp. 260–272, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.cirpj.2023.04.011.
- [32] Ashrafi SA, Sharif S, Farid AA, and Yahya M, "Performance evaluation of carbide tools in drilling CFRP-Al stacks," *J Compos Mater*, pp. 2071–2084, 2014.
- [33] Z. Jia, R. Fu, B. Niu, B. Qian, Y. Bai, and F. Wang, "Novel drill structure for damage reduction in drilling CFRP composites," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 110, pp. 55–65, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2016.08.006.
- [34] F. Su, L. Zheng, F. Sun, Z. Wang, Z. Deng, and X. Qiu, "Novel drill bit based on the step-control scheme for reducing the CFRP delamination," *J Mater Process Technol*, vol. 262, pp. 157–167, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.06.037.
- [35] Cs. Pereszlai, "Szénszállal erősített polimer kompozitok furatforgácsolási technológiáinak fejlesztése és optimalizálása," *BME Gépészmérnöki Kar Gyártástudomány Tanszék*, 2022.
- [36] R. B. D. Pereira, L. C. Brandão, A. P. de Paiva, J. R. Ferreira, and J. P. Davim, "A review of helical milling process," Sep. 01, 2017, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.ijmachtools.2017.05.002.
- [37] P. A. Rey, J. LeDref, J. Senatore, and Y. Landon, "Modelling of cutting forces in orbital drilling of titanium alloy Ti-6Al-4V," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 106, pp. 75–88, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2016.04.006.
- [38] H. Tanaka, K. Ohta, R. Takizawa, and K. Yanagi, "Experimental study on tilted planetary motion drilling for CFRP," in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2012, pp. 443–448. doi: 10.1016/j.procir.2012.04.079.
- [39] Q. Wang, Y. Wu, Y. Li, D. Lu, and T. Bitoh, "Proposal of a tilted helical milling technique for high-quality hole drilling of CFRP: analysis of hole surface finish,"

- International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 101, no. 1–4, pp. 1041–1049, Mar. 2019, doi: 10.1007/s00170-018-2995-5.
- [40] Y. B. Wu, Q. Wang, and M. Nomura, “Proposal of Tilt Helical Milling Method for Hole Creation of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP),” *Adv Mat Res*, vol. 806, pp. 190–195, Nov. 2015, doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.806.190.
 - [41] K. Zheng, S. Dong, and W. Liao, “Investigation on thrust force in rotary ultrasonic drilling of CFRP using Brad drill,” *Machining Science and Technology*, vol. 23, no. 6, pp. 971–984, Nov. 2019, doi: 10.1080/10910344.2019.1636277.
 - [42] A. N. Helle, C. Pereszlai, A. Gödri, and N. Geier, “Comparative Analysis of Burrs in UD-CFRP Composites Using Advanced Hole Machining Technologies,” *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, vol. 49, no. 2, pp. 47–52, 2021, doi: 10.33927/hjic-2021-21.
 - [43] V. Schulze, C. Becke, K. Weidenmann, and S. Dietrich, “Machining strategies for hole making in composites with minimal workpiece damage by directing the process forces inwards,” *J Mater Process Technol*, vol. 211, no. 3, pp. 329–338, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.10.004>.
 - [44] V. Schulze, W. Spomer, and C. Becke, “A voxel-based kinematic simulation model for force analyses of complex milling operations such as wobble milling,” *Production Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 1–9, Feb. 2012, doi: 10.1007/s11740-011-0348-4.
 - [45] International Standards ISO 13715, “Second edition,” 2000.
 - [46] J. C. Aurich, D. Dornfeld, P. J. Arrazola, V. Franke, L. Leitz, and S. Min, “Burrs-Analysis, control and removal,” *CIRP Ann Manuf Technol*, vol. 58, no. 2, pp. 519–542, 2009, doi: 10.1016/j.cirp.2009.09.004.
 - [47] 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.
 - [48] D. I. Poór, N. Geier, C. Pereszlai, and J. Xu, “A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation, characterisation and challenges,” Oct. 15, 2021, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109155.
 - [49] M. Hashimura, J. Hassamontr, and D. A. Dornfeld, “Effect of In-Plane Exit Angle and Rake Angles on Burr Height and Thickness in Face Milling Operation,” *J Manuf Sci Eng*, vol. 121, no. 1, pp. 13–19, Feb. 1999, doi: 10.1115/1.2830566.
 - [50] G. Póka, “Forgácsvastagság hatása a sorjaképződésre síkmarásnál,” *BME Gépészmérnöki Kar Gyártástudomány Tanszék*, 2021.
 - [51] F. Su, Z. Deng, X. Qiu, F. Sun, and Q. Wu, “Morphological characteristics and formation mechanisms of the UD-CFRP drill exit-damages,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 107, no. 5–6, pp. 2363–2374, Mar. 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05186-0.

- [52] Ç. Betgül, U. Köklü, and S. Morkavuk, "The effects of support plate thickness on the drilling machinability of CFRP," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2023, doi: 10.1177/07316844231218942.
- [53] K. Falandys, K. Kurc, A. Burghardt, and D. Szybicki, "Automation of the Edge Deburring Process and Analysis of the Impact of Selected Parameters on Forces and Moments Induced during the Process," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 17, Sep. 2023, doi: 10.3390/app13179646.
- [54] T. Régnier *et al.*, "Fundamental study of exit burr formation mechanisms during orthogonal cutting of AlSi aluminium alloy," *J Mater Process Technol*, vol. 257, pp. 112–122, 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.037i.
- [55] F. Wang, T. Gu, X. Wang, X. Jin, and B. Zhang, "Analysis of Burr and Tear in Milling of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Using Finite Element Method," *Applied Composite Materials*, vol. 28, no. 4, pp. 991–1018, Aug. 2021, doi: 10.1007/s10443-021-09896-w.
- [56] X. Zhang, M. Li, and D. Huang, "Surface quality and burr characterization during drilling CFRP/Al stacks with acoustic emission monitoring," *J Manuf Process*, vol. 98, pp. 138–148, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.04.076.
- [57] S. Y. Jin, A. Pramanik, A. K. Basak, C. Prakash, S. Shankar, and S. Debnath, "Burr formation and its treatments—a review," Mar. 01, 2020, *Springer*. doi: 10.1007/s00170-020-05203-2.
- [58] Z. Kala, "Global Sensitivity Analysis of Structural Reliability Using Cliff Delta," *Mathematics*, vol. 12, no. 13, Jul. 2024, doi: 10.3390/math12132129.
- [59] K. Meissel and E. S. Yao, "Using Cliff's Delta as a Non-Parametric Effect Size Measure: An Accessible Web App and R Tutorial," vol. 29, 2024, [Online]. Available: <https://cliffdelta.shinyapps.io/calculator>;