

TIMA TAMÁS SÁNDOR  
TDK DOLGOZAT

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



TDK DOLGOZAT

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

TIMA TAMÁS SÁNDOR  
TDK DOLGOAZT

Többtengelyes élmaró technológiával megmunkált CFRP  
kompozit vizsgálata forgácsolásindukált sorja és felületi  
minőség szempontjából

Konzulens:

*Dr. Geier Norbert*  
adjunktus

Budapest, 2023

Szerzői jog © Tima Tamás Sándor, 2023.

## NYILATKOZAT AZ ÖNÁLLÓ MUNKÁRÓL

Alulírott, *Tima Tamás Sándor* (M1Z8BJ), 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, 2023.11.05.

*Tima Tamás Sándor*

# TARTALOMJEGYZÉK

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| Előszó .....                                                               | ii  |
| Jelölések jegyzéke .....                                                   | iii |
| 1. Bevezetés.....                                                          | 0   |
| 2. Szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozitok forgácsolhatósága ..... | 1   |
| 2.1. CFRP kompozitok hagyományos élmegmunkálása .....                      | 2   |
| 2.2. Horonymarás CFRP kompozitokban.....                                   | 3   |
| 2.3. Többtengelyes CFRP kompozit megmunkálás.....                          | 4   |
| 2.4. A kutatás célja.....                                                  | 6   |
| 3. Kísérleti körülmények, eszközök és módszerek .....                      | 7   |
| 3.1. Kísérlettervezés .....                                                | 7   |
| 3.2. Kísérleti környezet .....                                             | 9   |
| 3.2.1. Forgácsoló környezet .....                                          | 9   |
| 3.2.2. Sztereomikroszkópos vizsgálati környezet.....                       | 11  |
| 3.2.3. Topográfós vizsgálat .....                                          | 12  |
| 3.2.4. Felületi érdességmérés .....                                        | 12  |
| 3.3. Kísérlet NC kódja .....                                               | 13  |
| 4. Kiértékelési módszerek.....                                             | 15  |
| 4.1. Képfeldolgozó algoritmus .....                                        | 15  |
| 4.2. Fajlagos átlagos élhossz számítása .....                              | 16  |
| 4.3. Maximális sorjanagyság számítása .....                                | 18  |
| 5. Eredmények és értelmezésük .....                                        | 19  |
| 5.1. Forgácsolásindukált sorja .....                                       | 20  |
| 5.2. Felületi minőség .....                                                | 23  |
| 5.3. Korlátok és megkötések, kitekintés .....                              | 27  |
| 6. Összefoglalás.....                                                      | 28  |
| 7. Felhasznált források .....                                              | 29  |
| 8. Mellékletek .....                                                       | 32  |
| 8.1. Kísérleti jegyzőkönyv .....                                           | 32  |
| 8.2. Kísérlet NC kódja .....                                               | 35  |
| 8.3. Képfeldolgozó algoritmus kódja .....                                  | 36  |

## ELŐSZÓ

*A szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozit anyagokat egyre szélesebb körben alkalmaz-  
zák a repülő-, hadi- és járműiparban, hiszen kis sűrűségük mellett nagy mechanikai szilárdság-  
gal rendelkeznek az erősítő szálak irányában. Ezeket az anyagokat szénszál erősítőszálak és  
jellemzően térhálós polimer mátrixanyag építi fel. Az iparban gyakran laminálással állítják elő  
a közel kész geometriájú CFRP alkatrészeket. Azonban a laminálás során a szűk tűrésű lapok  
előállítása nehézkes, ezért forgácsolási megmunkálás szükséges a megfelelő geometria kiala-  
kításához. Emellett a CFRP kompozit lemez külső részei nem rendelkeznek azokkal a mechani-  
kai tulajdonságokkal, mint amivel a munkadarab belső része bír, ezért a nem megfelelő külső  
részek élmárására van szükség...*

\* \* \*

Elsősorban szeretném megköszönni konzulensemnek, Dr. Geier Norbertnek a TDK dolgozatom kidolgozásában, a kísérletekben és a mérések lebonyolításában nyújtott segítségét.

Köszönöm Poór Dániel Istvánnak az előgyártmányok pontos elkészítését.

Köszönöm az Anyagtudomány és Technológia Tanszék munkatársainak a mikroszkópos felvé-  
telek elkészítésében való segítségét, kiemelten Kemény Alexandra doktorandusznak.

Szeretném megköszönni családomnak a támogatásukat, biztatásukat és türelmüket.

Ez a kutatás a Kína és Magyarország tudományos és technológiai együttműködését ösztönző  
2021-1.2.4-TÉT-2021-00051 támogatásnak köszönhetően valósult meg.

Budapest, 2023.11.05.

*Tima Tamás Sándor*

## 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  |
|-----------------|---------------------------------------------------------|---------------|
| $a_e$           | fogásszélesség                                          | mm            |
| $a_{e,v}$       | végleges fogásszélesség                                 | mm            |
| $c$             | maradó letörés mértéke                                  | mm            |
| $D$             | szerszámtátmérő                                         | mm            |
| $f$             | előtolás                                                | mm            |
| $L_{f.á.}$      | fajlagos átlagos élhossz                                | -             |
| $L_{Rm}$        | maximális sorjanagyság                                  | pixel         |
| $m$             | illesztett egyenes meredeksége                          | -             |
| $n$             | fordulatszám                                            | 1/min         |
| $n$             | készített képek száma                                   | -             |
| $\underline{n}$ | felületi normális                                       | -             |
| $N_{wd}$        | készített kép szélessége                                | -             |
| $N_{wh}$        | fehér képpontok száma                                   | -             |
| $r$             | szerszámsugár                                           | mm            |
| $R_a$           | átlagos érdesség                                        | $\mu\text{m}$ |
| $R_{a\_top}$    | topográfus vizsgálat átlagos érdessége                  | $\mu\text{m}$ |
| $R_z$           | egyenetlenség magasság                                  | $\mu\text{m}$ |
| $R_{z\_top}$    | topográfus vizsgálat egyenetlenség magassága            | $\mu\text{m}$ |
| $v_c$           | forgácsoló sebesség                                     | m/min         |
| $v_f$           | előtoló sebesség                                        | mm/min        |
| $y$             | illesztett egyenes egyenlete                            | -             |
| $y_{Nwh,i,j}$   | fehér képpontok „y” koordinátái                         | -             |
| $y'_{Nwh,i,j}$  | fehér képpontok az illesztett egyenestől vett távolsága | -             |

### Görög betűk

| Jelölés   | Megnevezés, megjegyzés, érték | Mértékegység |
|-----------|-------------------------------|--------------|
| $\beta$   | spirálszög                    | °            |
| $\varphi$ | szerszám bedöntése            | °            |

### Indexek, kitevők

| Jelölés | Megnevezés, értelmezés           |
|---------|----------------------------------|
| $i$     | általános futóindex (egész szám) |
| $j$     | általános futóindex (egész szám) |

### Rövidítések, mozaikszavak

| Jelölés | Megnevezés, értelmezés        |
|---------|-------------------------------|
| CFRP    | szénszállal erősített polimer |
| NC      | numerikus vezérlés            |

## 1. BEVEZETÉS

A szénszál-erősítésű polimer (CFRP) kompozitok élmegmunkálása során számos kihívás merül fel, például a megmunkálás okozta sorja és a delamináció kialakulása. Az iparban speciális geometriájú szerszámok és optimalizált folyamatparaméterek alkalmazásával hozzák létre a megfelelő minőségű CFRP alaksajátosságokat. Kutatásom fő célja a korábban kifejlesztett többtengelyes élmegmunkálási technológia fejlesztése két változtatott paraméter bevonásával. A két vizsgált paraméter a szerszám bedöntési szöge ( $\varphi$  (°)) és a maradó letörés mértéke ( $c$  (mm)). Az élmarási kísérleteket 0°-os spirálszögű, egy élű, tömör keményfém szármarróval végeztük. A megmunkált éleket Olympus SZX16 sztereomikroszkóppal vizsgáltuk. A képeket digitális képfeldolgozással értékeltük ki. Továbbá a munkadarabok felületi minőségét is megvizsgáltuk két mérési módszerrel is, egy KEYENCE VR-5000 Series típusú topográfós mikroszkóppal, valamint egy Mitutoyo Surfest SJ-401 típusú felületi érdességmérővel.

Jelen TDK 2. fejezetében a CFRP kompozitok élmegmunkálására irányuló nemzetközi és hazai kutatásokat mutatom be, ezen fejezet végén tűzöm ki kutatásom fő célját. A 3. fejezetben foglalom össze a kísérleti körülményeket, kísérleti eszközöket és a kísérlettervet. A 4. fejezetben bemutatom a kiértékelési módszereket. Az 5. fejezetben ismertetem a kapott eredményeket és következtetéseket vonok le azokból, valamint ismertetem jövőbeli kutatási céljaimat. Végül a 6. fejezetben összefoglalom az elvégzett munkát.

## 2. SZÉNSZÁLLAL ERŐSÍTETT POLIMER (CFRP) KOMPOZITOK FORGÁCSOLHATÓSÁGA

A szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozitokat széles körben alkalmazzák. Gyorsan terjednek a csúcskategóriás iparágakban, mint a repülőipar (lásd 2.1. ábra), az autóipar és a hadiipar, elsősorban nagy szilárdságuknak és kis fajlagos tömegüknek köszönhetően [1]. Ezeket a kompozitokat gyakran kvázi készre alakítva állítják elő, automatizált kompozitgyártási technológiákkal [2]. A pontos geometriát igénylő részeket azonban legtöbbször mechanikus megmunkálási technológiákkal alakítják ki, például fúrással vagy marással [3]. A CFRP kompozitokat nehezen forgácsolható anyagoknak tekintjük, mivel a szénszál erősítések nagy ellenállást tanúsítanak a szerszám által kifejtett vágóerővel szemben és könnyen kihajlanak. Ez a mechanizmus a gyorsabb szerszámkopáshoz és nagyobb geometriai hibákhoz vezet, mint például a delamináció, a fokozott sorjaképződés, a száلكihúzódas és a mátrixkiegés. Továbbá a megmunkálási technológiák paraméterezése és optimalizálása során nagy kihívást jelent a CFRP kompozit anizotrópiája okozta inhomogenitás [4].

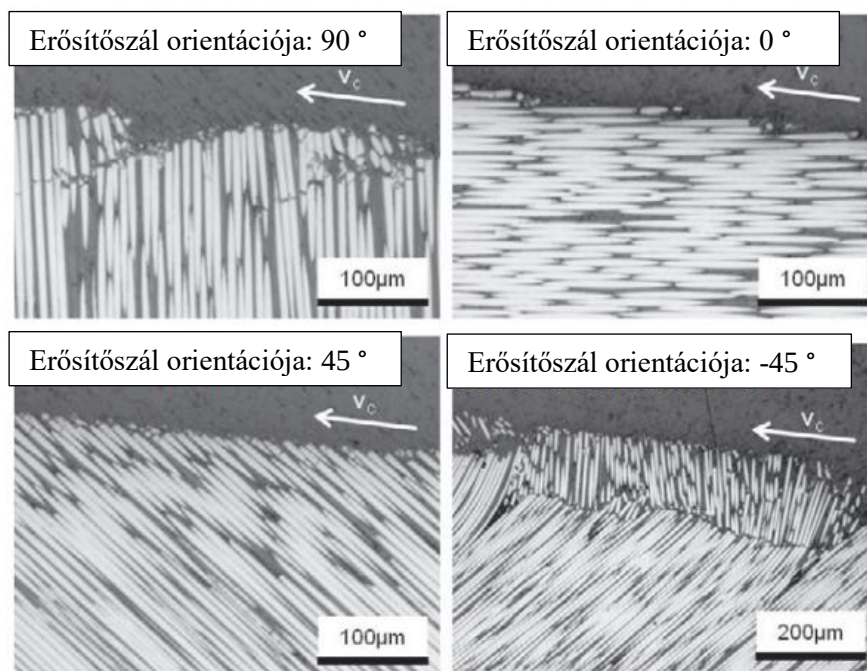


2.1. ábra CFRP kompozit felhasználási területe, Boeing 787 félháj szerkezetének külső része [5]

A később összeszerelésre kerülő nagy pontosságú CFRP kompozit alkatrészek széleit gyakran megmunkálják, hogy a szigorú méret- és alakkövetelményeket biztosítani tudják [6]. Noha több kutatás is irányul a nem mechanikus élmegmunkálási technológiák fejlesztésére, mint például az abrazív vízzel történő vágás [7], a lézersugaras vágás [8], szikraforgácsolás [9] és lézeres megmunkálás [10] stb., a mechanikus élmegmunkálás a legelterjedtebb az ipari környezetben [6]. Ezen technológiák ipari használata közben azonban még mindig számos kihívás merül fel. Hagyományos palástmarást alkalmazva korszerű szerszámmal (pl. kompressziós maró, méhsejt maró) megmunkált CFRP kompozitok élei jó minőségben előállíthatók, amíg a szerszámkopás jelentősen nem változtatja meg a szerszám vágóélének állapotát. A CFRP kompozitok forgácsolásakor a szerszámkopás főleg a vágóél sugarának növekedését eredményezi, amely nem megfelelő forgácseltávolítást eredményez [11].

## 2.1. CFRP kompozitok hagyományos élmegmunkálása

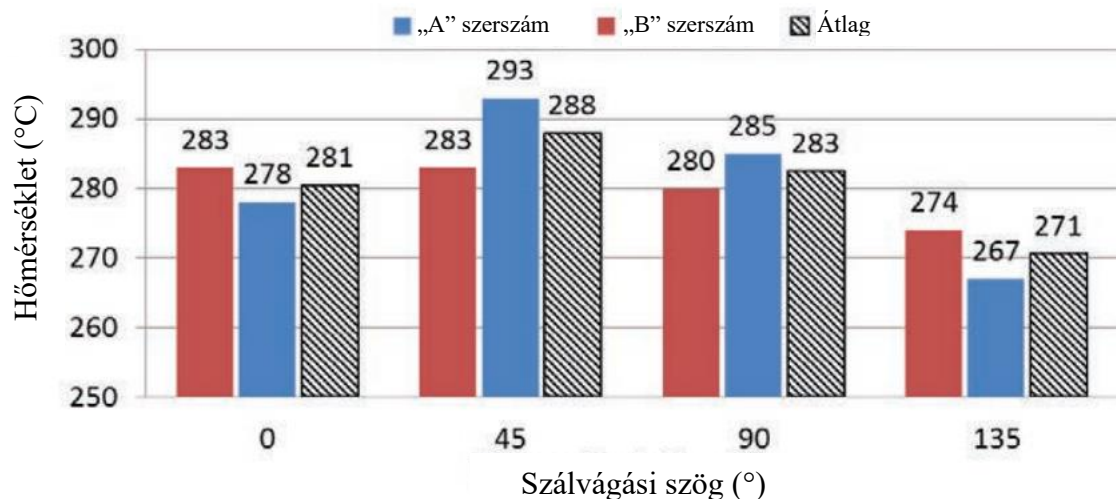
Su és munkatársai [12] hagyományos élmarási kísérleteket végeztek CFRP kompozit anyagot megmunkálva. Kutatásuk során megállapították, hogy a fogásmélységnek szignifikáns hatása van a forgácsképződésre. Nguyen és munkatársai [13] a CFRP kompozit szálorientációjának hatását vizsgálták a szerszámkopásra összpontosítva. Az eredményeik azt mutatják, hogy a szerszámkopás nem olyan drasztikus, mint fémötvözetek megmunkálásánál. Schorník és munkatársai [14] CFRP kompozitokon végeztek élmarási kísérleteket, megvizsgálták a megmunkálási körülmények hatását a megmunkált munkadarab felületi minőségére. Kutatásuk alapján megállapítható, hogy a kísérlet során beállított forgácsolási sebességhez ( $v_c = 502,4 \text{ m/min}$ ) a megfelelő előtoló sebesség  $v_f = 200 \text{ mm/min}$ -ben határozható meg. Pecat és munkatársai [15] marási paraméterek hatását vizsgálták a CFRP felületi integritásra. Eredményeik alapján kimondható, hogy a szálorientációt tekintve  $0^\circ$  és  $+45^\circ$ -os szálvágási szögben történő megmunkálás esetén megfelelően jó minőségű felületek adódtak. Azonban  $-45^\circ$  és  $90^\circ$  szálvágási szögnél a mikrofelvetelek komoly felületi sérüléseket mutatnak, amely repedések és szegmentációk formájában jelennek meg (lásd 2.2. ábra). Yashiro és munkatársai [16] a forgácsoló szerszám és a megmunkált felület közti hőmérsékletet vizsgálták. Kutatásuk bizonyítja, hogy a szerszám és a munkadarab érintkezési pontjában  $v_c = 25 \text{ m/min}$ -os forgácsolási sebességnél elérte a  $180^\circ\text{C}$ -t. Majd  $v_c = 50 \text{ m/min}$ -os forgácsolási sebességnél a hőmérséklet a CFRP kompozit üvegesedési hőmérséklete fölé emelkedett.



2.2. ábra A különböző szálorientációjú minták mikroszkópos felvételei [15]

## 2.2. Horonymarás CFRP kompozitokban

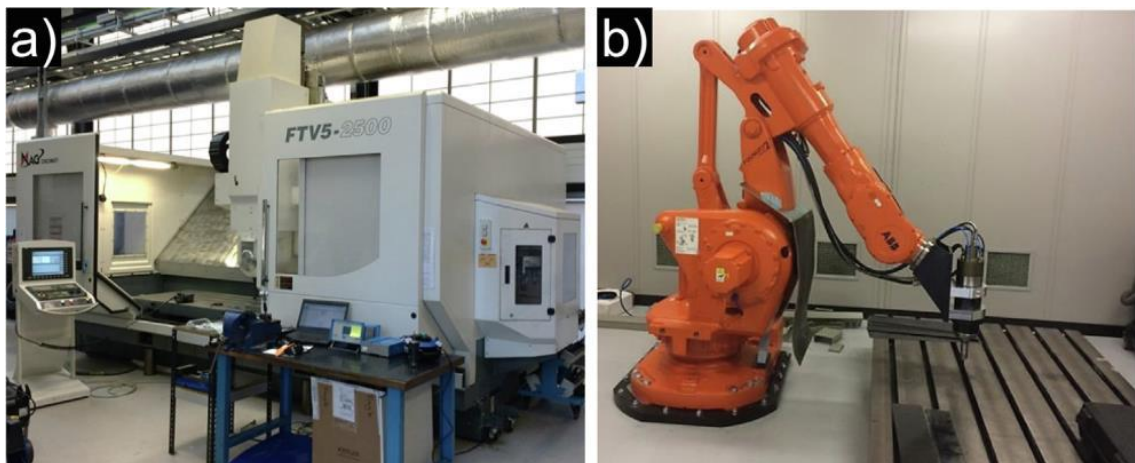
Nagy figyelem irányul a CFRP kompozitokon végzett horonymarások vizsgálatára. Ezen TDK dolgozatban azért fontos foglalkozni a horonymarással, mivel a horonymegmunkálás során szerzett kutatási tapasztalatok adaptálhatók az élmarási technológia fejlesztéséhez. A kutatók egyetértenek abban, hogy a szálvágási szög alapvető szerepet játszik a forgácseltávolításban és a hibaképződési mechanizmusokban, továbbá fontos paraméterek még a forgácsolási stratégia (egyenirányú marás, ellenirányú marás), a vágóél állapota (vágóélsugár nagysága). Geier [17] UD-CFRP kompozitokban (egységes szálirányú) végzett egyen- és ellenirányú marást, azt vizsgálva, hogy a szálvágási szög hogy befolyásolja a forgácsolási erő nagyságát. Kutatása során megállapította, hogy a legkisebb forgácsolási erő a 120 °-os szálvágási szögnél jelentkezik, ahogy ezt Liu és munkatársai is bebizonyították [18]. Zhang és munkatársai [19] nagysebességű marást végeztek CFRP kompozitban egyen- és ellenirányú marási stratégiával, változó szálvágási szöggel. Kutatásukban megállapították, hogy a forgácsoló sebességnek nagy hatása van a forgácsoló erőre a megmunkálás során. Jamal és munkatársai [20] a horonymarás során fellépő forgácsoló erőket vizsgálták. Megállapították, hogy a megmunkálás okozta sérülések akkor a legnagyobbak, ha az eredő nyíróerő kellően nagy a keresztirányú erősítőszálakhoz képest. El-Hofy és munkatársai [21] horonymarás közben vizsgálták a szerszám hőmérsékletét. Kutatásukból kiderült, hogy a legnagyobb hőmérséklet a 45°-os szálvágási szögnél adódott (lásd 2.3. ábra).



2.3. ábra A szerszám hőmérséklete a nevezetes szálvágási szögeknél [21]

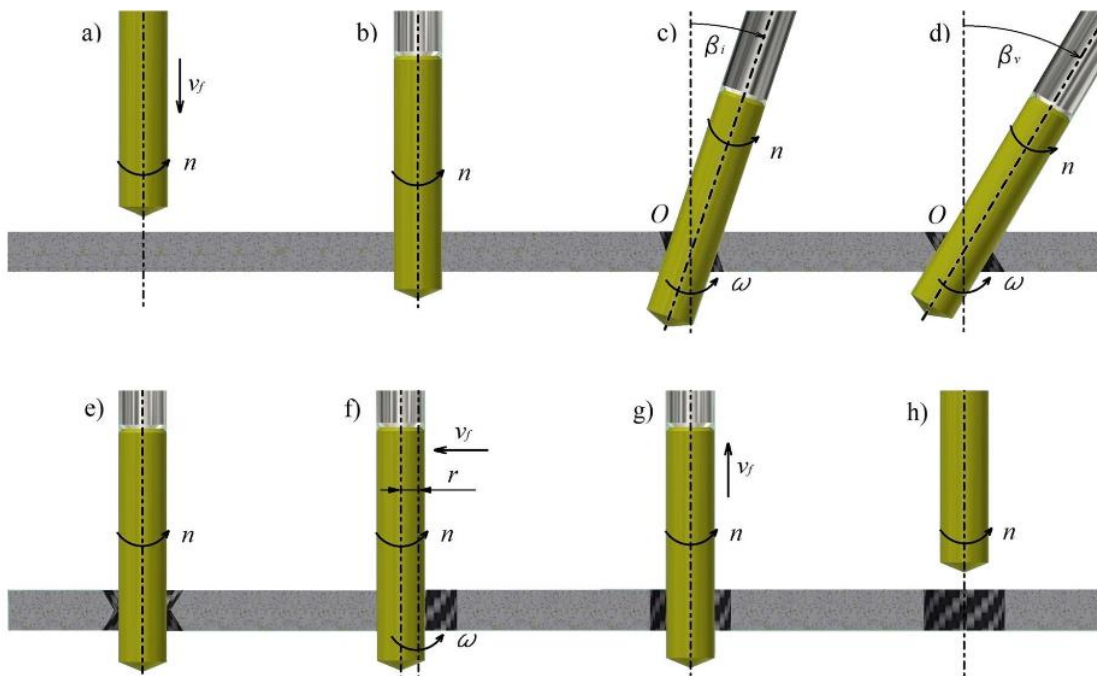
### 2.3. Többtengelyes CFRP kompozit megmunkálás

A CFRP kompozit élének megmunkálása nem csak fejlett szerszámgeometriával, optimalizált folyamatparaméterekkel és hűtéssel [22], hanem hatékony szerszámmozgással [23] is javíthatók. A hagyományos szerszám mozgása kiegészíthető a szerszám bedöntésével, így segítve a megmunkálási hibák elkerülését. Bár a szerszám bedöntésének alkalmazása az ipari környezetben jelenleg elég költséges (öt független szerszámtengely vagy ipari robot vezérlését igényli). Néhány kísérlet már történt, amelyben a szerszám dőlésének hatását vizsgálták a megmunkált CFRP kompozit geometriai hibáira. Hosokawa és munkatársai [24] spirális palástmaróval végeztek nagy minőségű megmunkálást. Kutatásukban megállapították, hogy a tangenciális erő és a normálerő jelentősen csökken, ha nagyobb spirálszögű palástmaró szerszámot alkalmaznak. Hintze és munkatársai [25] munkájuk során a geometriai és kinematikai összefüggések három dimenziós leírását dolgozták ki. Vizsgálatuk alapján konstatálható, hogy a delamináció elkerülhető, amennyiben a forgácsoló erő részben a rétegek összenyomására irányul. Ashworth és munkatársai [26] azt vizsgálták, hogy a szerszám gép merevsége milyen mértékben befolyásolja a CFRP kompozit él megmunkálását. Kutatásuk alapján megállapítható, hogy a 6 tengelyes ABB robot rosszabb minőségre munkálta meg a kompozit élét, mint az 5 tengelyes megmunkáló központ (lásd 2.4. ábra).



2.4. ábra Ashworth és munkatársai által használt megmunkológépek, a) 5 tengelyes megmunkálóközpont, b) 6 tengelyes ABB robot [26]

A furatmegmunkálás során fokozottan figyelni kell a delamináció elkerülésére, valamint a száلكihúzódsra. Ennek elkerülésére a furat megmunkálásának stratégiáján is lehet változtatni. Egy ilyen változtatási lehetőség az imbolygó marás technológiával elkészített furat. Ezen furatmegmunkálási technológia során egy fúró-maró szerszámot kell alkalmazni. A szerszám először egy a névleges furat méreténél kisebb furatot készít a laminátumon, majd a szerszámot körbe forgatva kialakít két ferde felületet a munkadarab két oldalán. Ezután helikális maráspályával kialakítható a végleges furatátmérő (lásd 2.5. ábra). A technológia előnye, hogy nem szükséges speciális szerszám a megmunkáláshoz, továbbá a furat letörései is egy lépésben elkészíthetők. Pereszlai és munkatársai [27] ezt a furatkészítési stratégiát hasonlították össze más furatmegmunkálásokkal. Eredményeikben megállapították, hogy a forgácsolásindukált delamináció és a sorja nagysága is nagy mértékben csökkenthető az imbolygó marás furatmegmunkálási stratégiával, ennek oka elsősorban a döntött szerszám okozta kompressziós hatás. Schulze és munkatársai [28] CFRP kompozitokon végeztek fúrási kísérleteket, több technológiával munkáltak meg furatokat, többek között imbolygó marás fúrási stratégiát is alkalmazva. Bebizonyították, hogy a használt stratégiák közül az imbolygó marás technológiával készült furatok hibája volt a legkisebb.



2.5. ábra Imbolygó marás furatkészítési stratégia szemléltetése [27]

#### *2.4. A kutatás célja.*

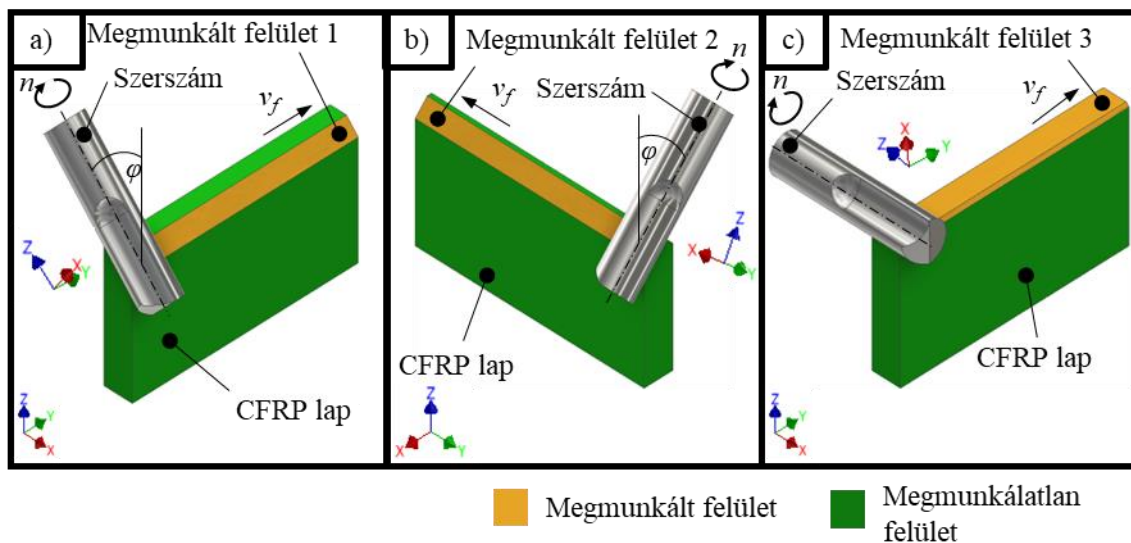
A CFRP kompozitok élmegmunkálásának fentebb tárgyalt hiányosságaira és kihívásaira reflektálva jelen kutatásom fő célja a korábban kidolgozott [29] többtengelyes élmegmunkálási stratégia továbbfejlesztése. A kifejlesztett többtengelyes élmegmunkálási technológia az imbolygó marás furatmegmunkálási stratégia alapján jött létre, annak lineáris „kiterített” implementációjával. A többtengelyes megmunkálás során hagyományos szerszámmal történő élmegmunkálás történik, miközben a lehető legnagyobb felületi minőség és legkisebb megmunkálás okozta hiba elérése a cél.

### 3. KÍSÉRLETI KÖRÜLMÉNYEK, ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK

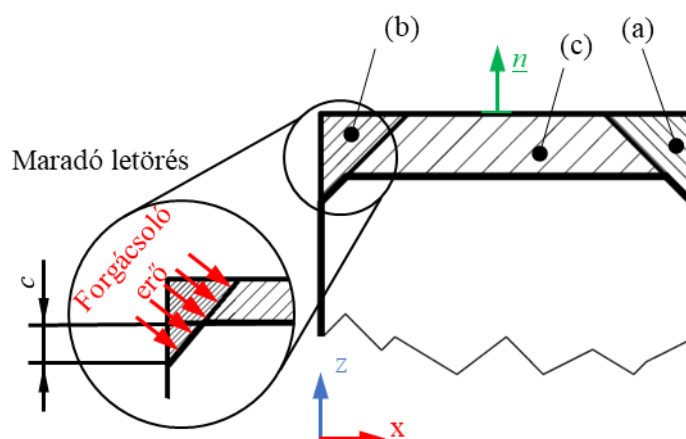
#### 3.1. Kísérlettervezés

A kísérletek során a bedöntési szög nagyságát és a maradó letörés mértékét vizsgáltam többtengelyes élmaró technológia alkalmazásánál. A többtengelyes élmaró technológia három fázisban készíti el a CFRP kompozit végleges élgeometriáját [29]. Az első fázisban egy adott szöggel ( $\varphi$ ) ferde felületet készít a szerszám (lásd 3.1.a ábra), a kísérletek során ezt a bedöntési szöget variáltam. A második lépésben a megmunkálandó él másik oldalán is elkészíti a szerszám a ferde felületet adott bedöntésben ( $\varphi$ ) (lásd 3.1.b ábra), végül a harmadik szakaszban egy hagyományos élmaró ciklussal véglegesíti az él geometriáját, a 3.1.c ábrán látható módon. A többtengelyes élmaró technológiát a 2022-es TDK dolgozatomban fejlesztettem ki [29].

A kísérletek során a maradó letörés mértékét is változtattam, amelyet a 3.2. ábrán illusztráltam. A 3.2. ábrán látható, hogy a forgácsoló erő a munkadarab belseje felé mutat.



3.1. ábra Többtengelyes megmunkálás ábrája: A munkadarab élének első megmunkálási fázisa meghatározott bedöntési szögben ( $\varphi$ ), (b) A munkadarab élének első megmunkálási fázisa meghatározott bedöntési szögben ( $\varphi$ ), (c) Az él végleges kialakítása

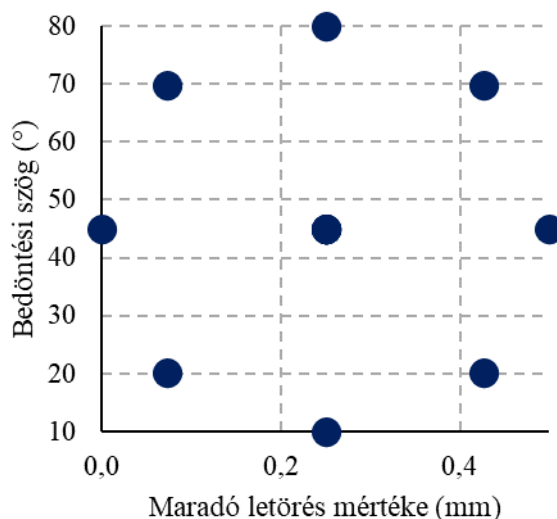


3.2. ábra A maradó letörés mértékének illusztrációja,  $c$  (mm) a maradó letörés mértéke,  $n$  a felületi normális

A kísérlettervezés összeállításához a Central Composite kísérlettervezési módszert alkalmaztam. A kísérlet megtervezéséhez a Minitab szoftvert használtam, a kísérlettervezés során szükséges és elégséges számban randomizáltam a kísérletek végrehajtási sorrendjét. Erre azért volt szükség, hogy a kísérlet során figyelmen kívül hagyott tényezők befolyása állandó maradjon a kísérletek elvégzése közben. A kísérleti faktoroknak a bedöntési szöget ( $\varphi$ ) és a maradó letörés mértékét ( $c$ ) választottam. Az bedöntési szög és a maradó letörés faktorokat 5-5 szinten vizsgáltam. A faktorokat és a vizsgált szinteket a 3.1-es táblázat foglalja össze. A kísérleti faktorszintek a 3.3. ábrán grafikusán kerültek szemléltetésre.

3.1. táblázat: Kísérleti faktorok és faktorszintek

| Faktorok               | Jelölés       | Faktorszintek |        |        |        |        |
|------------------------|---------------|---------------|--------|--------|--------|--------|
|                        |               | 1             | 2      | 3      | 4      | 5      |
| Bedöntési szög         | $\varphi$ (°) | 10,000        | 20,251 | 45,000 | 69,749 | 80,000 |
| Maradó letörés mértéke | $c$ (mm)      | 0,000         | 0,073  | 0,250  | 0,427  | 0,500  |



3.3. ábra A kísérleti faktorszintek grafikusán ábrázolva

A kísérlet során rögzített paraméterek:

- száraz megmunkálás
- egyenirányú marás
- végleges fogásszélesség:  $a_{e,v} = 0,5 \text{ mm}$
- fordulatszám  $n = 6000 \text{ 1/min}$  ( $v_c = 113,4 \text{ m/min}$ )
- rögzítő csavarok meghúzási nyomaték  $3 \text{ Nm}$
- alkalmazott készülék M1 marókészülék
- a szálirány ( $v_f$  és szálak között bezárt szög) =  $90 \text{ fok}$
- letörés magassága egyenlő a beállított fogásszélességgel
- hosszkorrekció =  $48,713 \text{ mm}$
- $0,01 \text{ mm}$  pontosságú tolómérővel meghatározva a munkadarab méretek

A kísérletek során a fenti felsorolásban szereplő paramétereket rögzítettem annak érdekében, hogy a kísérlet reprezentálható legyen, illetve a véletlen hibákat minimalizáljam.

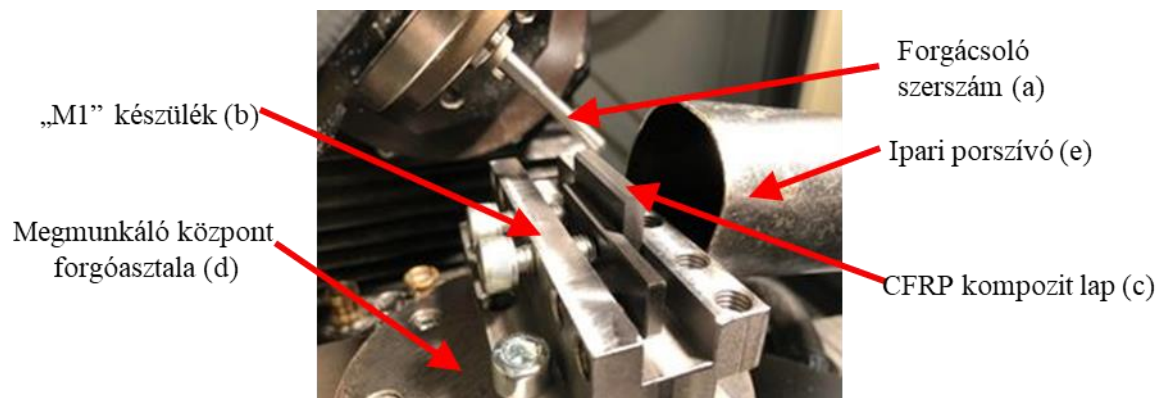
## 3.2. Kísérleti környezet

### 3.2.1. FORGÁCSOLÓ KÖRNYEZET

A forgácsolási kísérleteket a Gyártástudomány és -technológia Tanszék VHTC-130 LINEAR 5 tengelyes megmunkálóközpontján végeztem el (lásd 3.4. ábra). A kísérletek során az „M1”-es készüléket alkalmaztam. Ez a készülék egy olyan speciális munkadarab befogó, amelybe a 3.5. ábrán látható módon csavarokkal és egy közdarabbal lehet beszorítani a munkadarabot annak érdekében, hogy megmunkálás közben ne mozduljon ki. A készüléknek köszönhetően a befogáshoz szükséges szorítócsavarokat adott nyomatékra lehet húzni, így ezt a paramétert is rögzítettem a kísérletek során.



3.4. ábra VHTC-130 LINEAR  
5 tengelyes megmunkálóközpont



3.5. ábra Kísérleti környezet: (a) Forgácsoló szerszám, (b) „M1” munkadarab befogó készülék, (c) CFRP kompozit munkadarab, (d) Megmunkáló központ forgóasztala, (e) Ipari porszívó

A készülék felhelyezésénél figyeltem arra, hogy a készülék hosszabbik oldala (100 mm) párhuzamos legyen a szerszámgép Y tengelyével. Ezt egy analóg óra segítségével határoztam meg. A párhuzamosság eltérést a 100 mm-en  $\pm 10 \mu\text{m}$ -re sikerült csökkenteni. Ez az eltérés meglehetősen kicsi, így a kiértékelésnél nem vettem figyelembe.

A forgácsolást egy THOMAS 23N1106 számú,  $D = 6 \text{ mm}$  átmérőjű tömör keményfém szerszámmal végeztem el. A szerszám spirálszög  $\beta = 0^\circ$ , amely azért lényeges, mert így a megmunkálás közben a szerszámból nem adódik kompressziós hatás a munkadarabra. A szerszám a 3.6.-os ábrán látható.



3.6. ábra Forgácsoló szerszám

Mivel a CFRP kompozitban található szénzsálak jól vezeték az áramot, a kísérlet közben elszívást kellett alkalmazni annak érdekében, hogy a forgács ne kerüljön a szerszám-gép vezetékére, csapágyazásaira, nehogy a szerszám-gépben rövidzárlatot okozzon. A kísérlet során használt tanszéki Nilfisk GB733 számú ipari porszívó a 3.7.-es ábrán látható.



3.7. ábra Ipari porszívó [29]

### 3.2.2. SZTEREOMIKROSKÓPOS VIZSGÁLATI KÖRNYEZET

A forgácsolt munkadarabokat az Anyagtudomány és Technológia Tanszék OLYMPUS SZX16 típusú sztereomikroszkóppal vizsgáltam meg, és azokról a mikroszkóphoz tartozó Stream szoftver segítségével készítettem a fényképeket. A munkadarabokról 20-szoros nagyításban készültek a felvételek. A sztereomikroszkóp a 3.8.-es ábrán látható. A munkadarabokról a felületi normálisra ( $n$ ) merőlegesen készültek a felvételek (lásd 3.2. ábra).

Minden élről három felvétel készült annak érdekében, hogy átlagos élhosszt és szórást lehessen számolni.



3.8. ábra OLYMPUS SZX16 típusú sztereomikroszkóp

### 3.2.3. TOPOGRÁFOS VIZSGÁLAT

A topográfus vizsgálat során a munkadarabok felületéről készültek felvételek. A KEYENCE VR-5000 Series típusú topográfus mikroszkóp beállítása után a berendezés automatikusan készítette el a felvételeket. A készült fájlokból ezután a mikroszkóp szoftverével értékeltem ki az adatokat. A kiértékelés során a felület teljes hosszán meg tudtam határozni a felületi érdesség mérőszámokat, így átlagolásra nem volt szükség. A topográfus mikroszkóp a 3.9. ábrán látható.



3.9. ábra A KEYENCE VR-5000 Series típusú topográfus mikroszkóp

### 3.2.4. FELÜLETI ÉRDESSÉGMÉRÉS

A munkadarabok felületi érdességét egy Mitutoyo Surfes SJ-401 típusú felületi érdességmérővel is lemértem. Minden munkadarabot háromszori ismétléssel, majd a kiértékelés során átlagoltam a mért értékeket. A felületi érdességmérő a 3.10. ábrán látható.



3.10. ábra Mitutoyo Surfes SJ-401 típusú felületi érdességmérő [30]

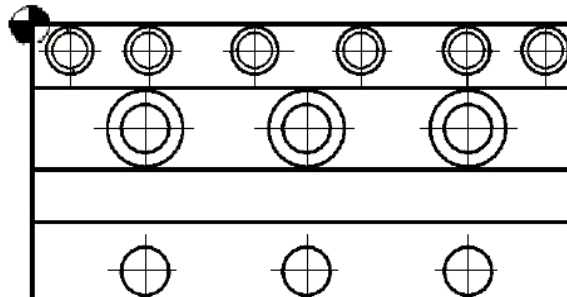
### 3.3. Kísérlet NC kódja

A kísérlethez szükséges NC kód paraméteres módon került megírásra annak érdekében, hogy egy, a kísérlethez szükséges bemenő adat gyorsan és hatékonyan változtatható legyen. Az NC kód a 8.2. sz. mellékletben található.

Azon paraméterek, amelyeket minden kísérlet alkalmával meg kell adni:

- Munkadarab szélessége
- Munkadarab magassága
- Munkadarab hossza
- Munkadarab nullponttól való Y távolsága
- Bedöntési szög megadása
- Maradó letörés mértéke

A megmunkáláshoz szükséges nullpontot az M1-es készülék felső síkjának sarkába kell felvenni a 3.11.-es ábrán látható módon. Az NC program futása során a nullpontot ebből a pozícióból helyezi és forgatja a szükséges pozícióba.

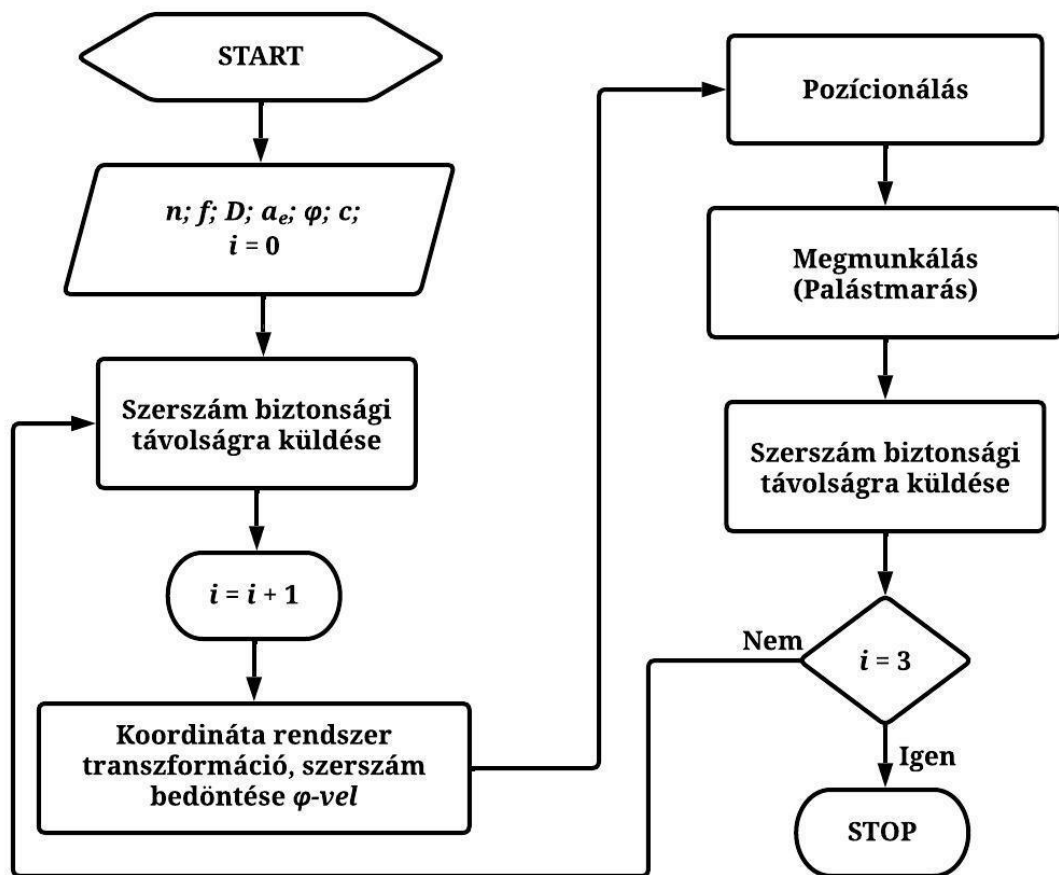


3.11. ábra Nullpont helyzete a készüléken

A szerszám gép relatív kis munkatere miatt fokozottan ügyelni kellett az esetleges ütközésekre. Ezért az NC program több bemenő adatot is megvizsgál annak érdekében, hogy az esetleges ütközések elkerülhetők legyenek. Abban az esetben, ha a program ütközést feltételez, akkor arra egy figyelmeztető üzenetet küld a vezérlőpanelen.

A több tengelyes élmarás algoritmus a 3.11. ábrán látható. Az algoritmusba először meg kell adni a kezdő paramétereket (munkadarab méretei, faktorszintek megadása), majd az ütközések elkerülése miatt különböző ellenőrzéseket végez az algoritmus. Ez után következett a szerszám biztonsági síkba való küldése, majd a koordináta transzformáció és annak végrehajtása. A következő lépésben a szerszám megközelítette a munkadarabot. Majd az algoritmus egy start jelre várt, erre azért volt szükség, hogy megbizonyosodjunk róla, hogy a megmunkálás előtt minden kísérleti eszköz működik-e

(pl. ipari porszívó), illetve minden paraméter megfelelően lett-e beállítva. Ezután a szerszám adott bedöntéssel ( $\varphi$ ) elkészíti a munkadarab egyik oldalára a letörést, majd a másik oldal következik a már előbb megadott letöréssel ( $\varphi$ ). Végül a szerszám a paramétereknél rögzített fogásszélességgel ( $a_{e,v} = 0,5 \text{ mm}$ ) véglegesíti a készítendő élt. A megmunkálás után az algoritmus szintén egy start jelre vár, hiszen ettől a lépéstől kezdve az ipari porszívó működtetésére már nincs szükség, így az kikapcsolható. A start jel megadása után egy biztonsági távolságra áll a szerszám, majd az algoritmus kikapcsolja a koordináta transzformációt. Végül leállítja a főorsó forgását.



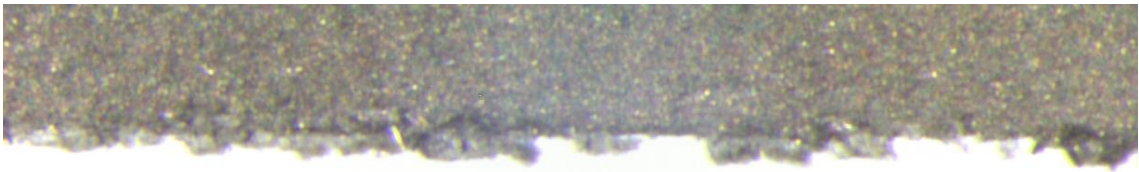
3.11. ábra Többtengelyes élmarás általános algoritmus

## 4. KIÉRTÉKELÉSI MÓDSZEREK

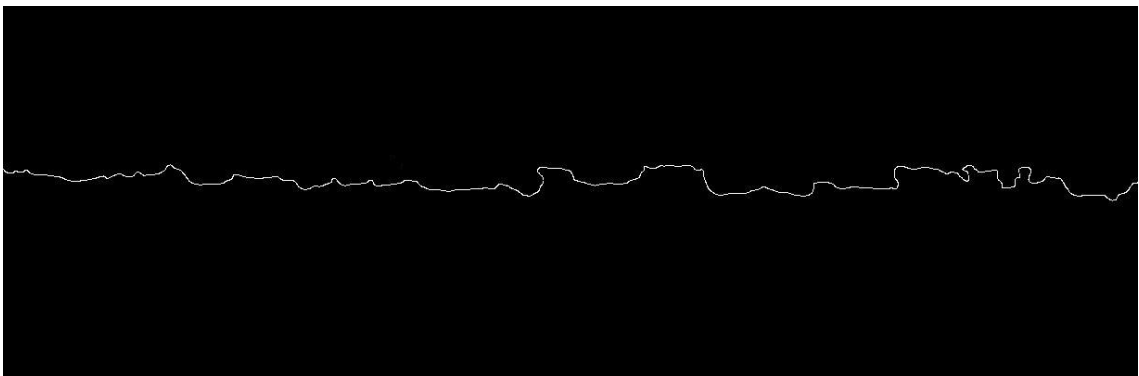
### 4.1. Képfeldolgozó algoritmus

A képfeldolgozás során először a Wolfram Mathematica 13.1 szoftverrel meghatároztam a képeken található munkadarabok éleit (lásd 4.1. ábra) oly módon, hogy az élek fehér pixelekké legyenek ábrázolva, míg a nem élhez tartozó képpontok feketék legyenek. Az így elkészült kép a 4.2.-es ábrán látható, amely az ELMAR2\_1\_10x\_1 jelzésű kísérlethez tartozik. Ezután egy másik algoritmus megszámolta a fehér képpontok számát. Az élke-reső és a fehér képpontszámláló algoritmus kódja az 8.3. sz. mellékletben található.

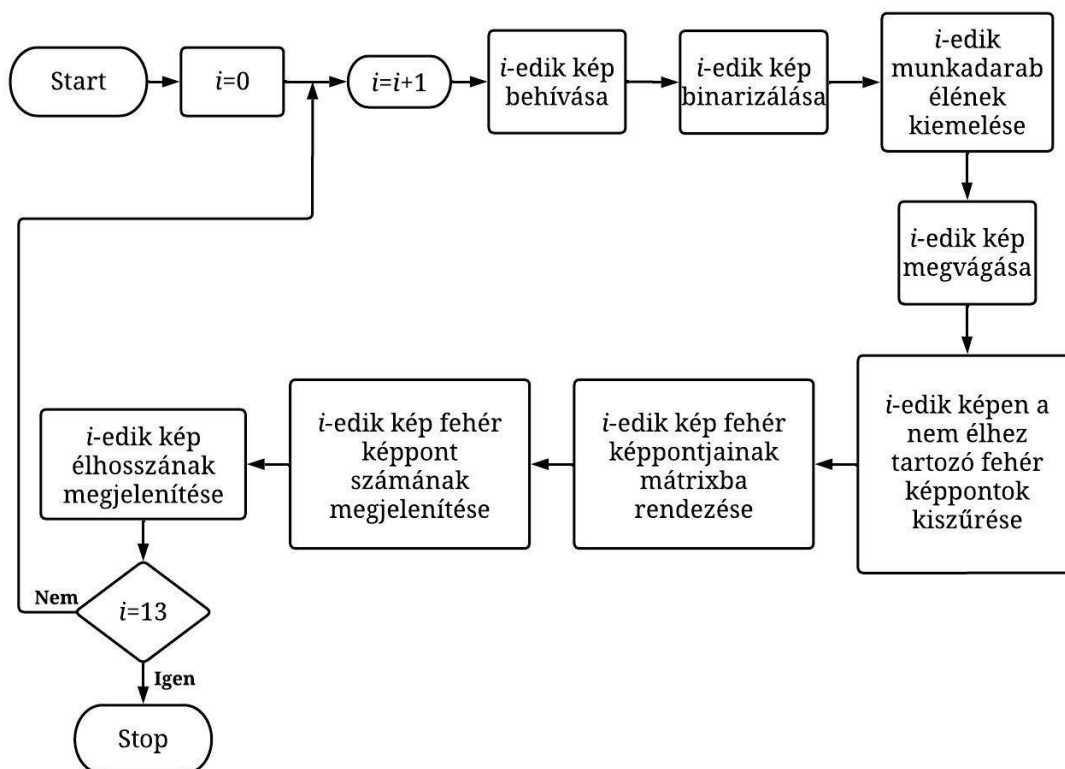
A képfeldolgozó algoritmus blokkdiagramja a 4.3.-as ábrán látható. Az algoritmus először behívja a képet, majd binarizálja azt. Ezek után kiemeli a munkadarab élet és megvágja a képet, hogy a kiértékelés szempontjából felesleges képpontokkal ne kelljen számolni a későbbiekben. Az algoritmus ezt követően kiszűri a képen található fehér képpontokat, majd egy mátrixba rendezi azokat. Végül megadja az egyes képek fehér képpontjainak számát és az egyes képek szélességét. A képfeldolgozás a 2022-es TDK dolgozatomban megtalálható képfeldolgozáshoz hasonlóan történt [29].



4.1. ábra Sztereomikroszkóppal lefényképezett él



4.2 ábra Képfeldolgozó algoritmus által generált kép



4.2 ábra Képfeldolgozó algoritmus blokkdiagramja [29]

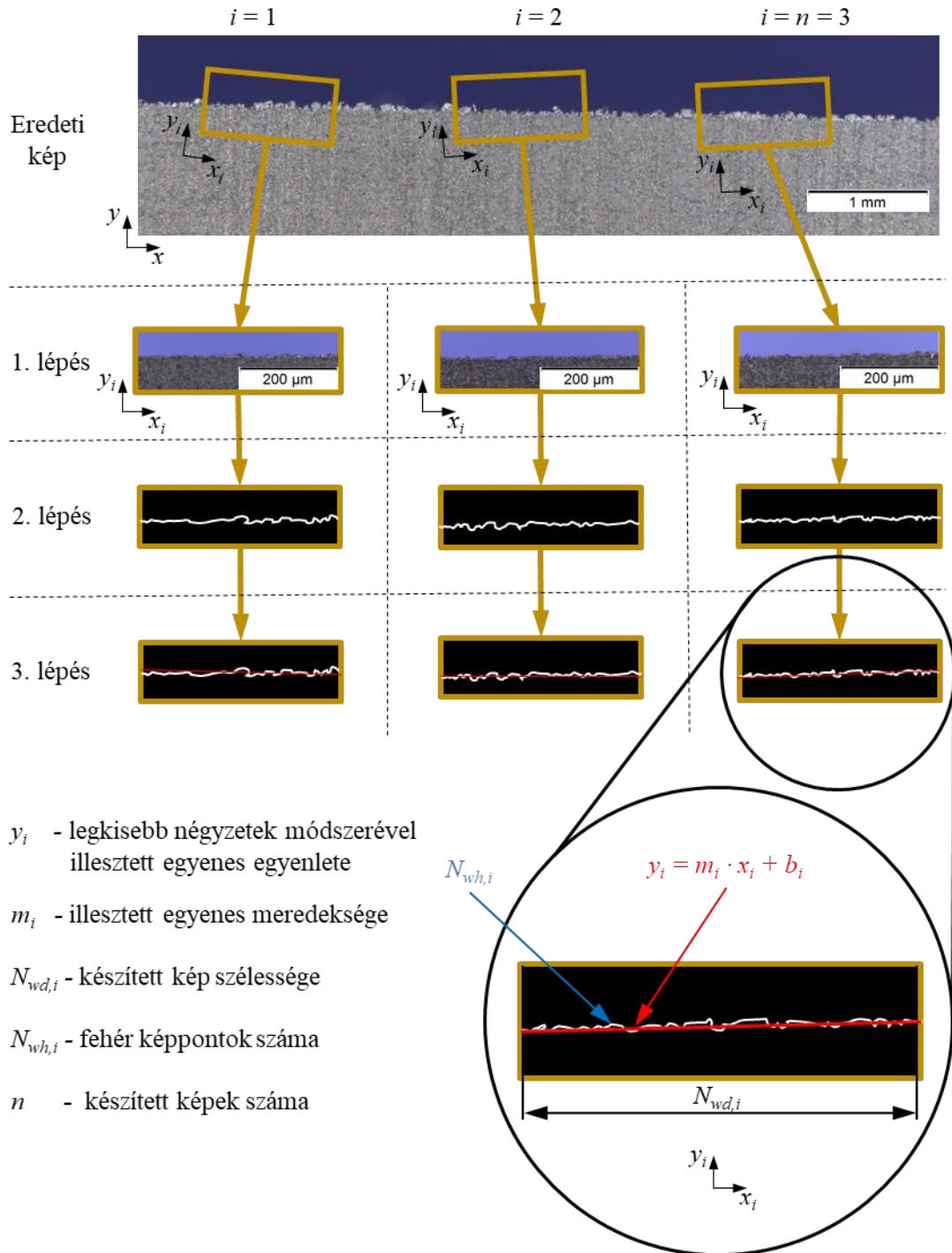
#### 4.2. Fajlagos átlagos élhossz számítása

A fehér képpontok számát arányosítva a képek szélességével megkapjuk az egységnyi élhosszt. A hibával terhelt elkészített képek azonban nem vízszintesek, így ha a képszélesség pixelszámával osztunk, akkor nem összevethető eredményt kapunk, hiszen minden kép meredeksége különböző. Ezért a generált képen található fehér képpontokat egy mátrixba rendezve kigyűjtöttem, és a MS Excel segítségével a legkisebb négyzetek módszerével közelítő egyenest illesztettem a pontokra. A közelítő egyenes meredeksége megegyezik a kép ferdeségével, így ezzel az adattal kiszámoltam a tényleges élhosszt. A korrigált élhosszal elosztva a fehér pixelek számát már összehasonlítható eredményt kapunk. A képpontok meredekségét a 4.3.-as ábra szemlélteti. A fajlagosított élhosszakat átlagolva megkaptuk a fajlagos átlagos élhosszakokat ( $L_{f.d.}$  (-)), az (1) -es egyenlet szerint. A fajlagos átlagos élhossz számítását először a 2022-es TDK dolgozatomban dolgoztam ki.

A fajlagos élhossz számítása:

$$L_{f.á.} (-) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{N_{wh,i}}{\frac{N_{wd,i}}{\cos(\arctg(m_i))}} \right) \quad (1)$$

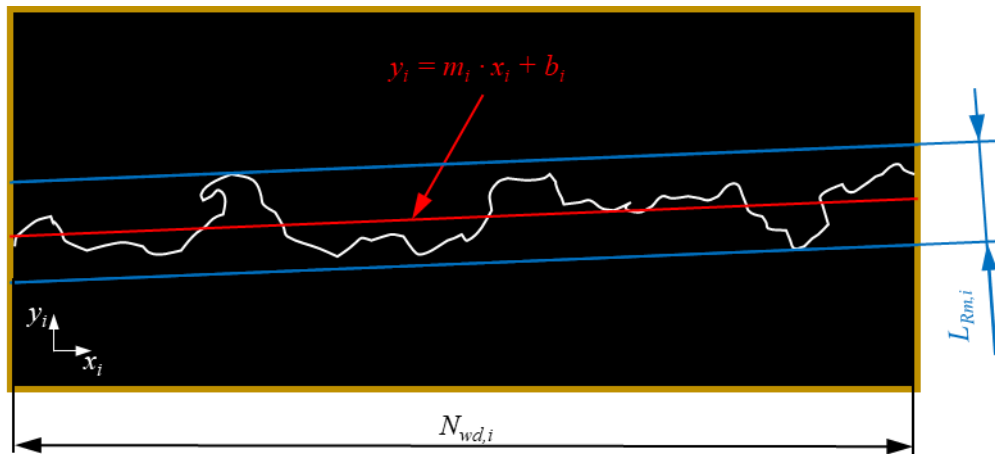
, ahol az  $L_{f.á.} (-)$  a képpontok fajlagos átlagos élhossza, az  $N_{wh,i}$  a képfeldolgozó algoritmus által meghatározott fehér képpontok száma,  $N_{wd,i}$  a készített képek szélességei,  $m_i$  az illesztett egyenes meredeksége.



4.3. ábra Képfeldolgozás illusztrációja

### 4.3. Maximális sorjanagyság számítása

Az átlagos sorjanagyság ( $L_{Rm}$ , (pixel)) mérőszámot a felületi érdesség mérésénél használt maximális felületi érdesség mérőszámhoz hasonlóan számítottam ki. A maximális sorjanagyság számításánál adott alaphosszon egyenlő távolságra határoztam meg a maximális kiemelkedés és maximális mélyedés távolságát az alapvonaltól, majd a kapott értékeket előjel nélkül összegeztem. Esetemben az alapvonal a kompenzálás során illesztett egyenes volt. A maximális sorjanagyságot a 4.4.-es ábra szemlélteti. Számítása a (2) -es egyenlet alapján történik, amelyet a 4.5.-ös ábra magyaráz.

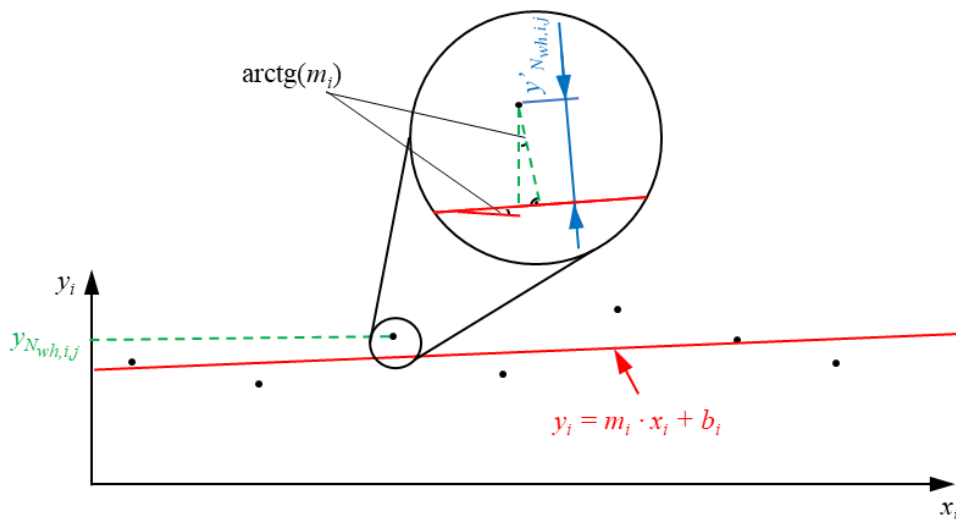


4.4. ábra Maximális sorjanagyság szemléltetése

Az átlagos sorjanagyság számítása:

$$L_{Rm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \max [(y_{N_{wh,i,j}} - y_i) \cdot \cos(\arctg(m_i))] + |\min [(y_{N_{wh,i,j}} - y_i) \cdot \cos(\arctg(m_i))]| \right) (2)$$

, ahol  $L_{Rm}$ , (pixel) az átlagos sorjanagyság,  $y_{N_{wh,i,j}}$  (-) a fehér képpontok „y” koordinátái,  $y_i$  az illesztett egyenes egyenlete,  $m_i$  az illesztett egyenes meredeksége.



4.5. ábra A maximális sorjanagyság számításának szemléltetése,  $y_{N_{wh,i,j}}$  (-) a fehér képpontok „y” koordinátái,  $y'_{N_{wh,i,j}}$  (-) a fehér képpontok az illesztett egyenestől vett távolsága

## 5. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTELMEZÉSÜK

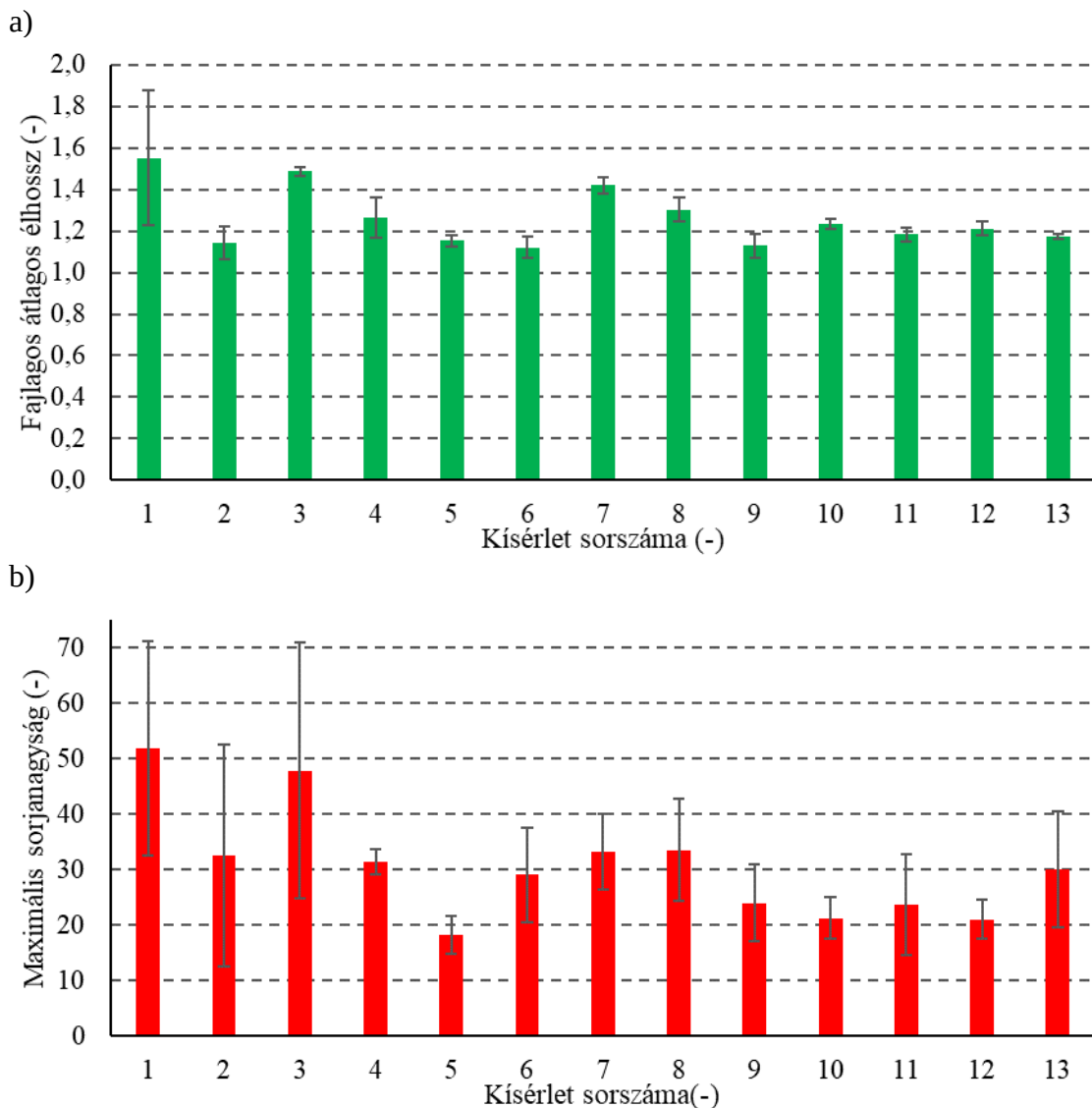
A kísérletek végrehajtási sorrendjét, a kísérleti faktorszinteket és az eredményeket összegzi az 5.1. táblázat. A sorjanagyság mérőszámok az (1)-es és (2)-es egyenlet alapján lettek számítva. A forgácsolásindukált sorja az 5.1-es fejezetben kerül bemutatásra, míg a felületi minőség eredményei az 5.2-es fejezetben.

5.1. táblázat Faktorszintek és eredmények összesítése

| Kísérlet<br>sor-<br>száma | Munkada-<br>rab száma | Faktorok      |          | Eredmények     |                     |                            |            |                         |            |
|---------------------------|-----------------------|---------------|----------|----------------|---------------------|----------------------------|------------|-------------------------|------------|
|                           |                       |               |          | Sorjanagyság   |                     | Érdességmérő<br>eredményei |            | Topográfós<br>vizsgálat |            |
| Ssz. (-)                  | Mdb.ssz. (-)          | $\varphi$ (°) | $c$ (mm) | $L_{f.á.}$ (-) | $L_{Rm}$<br>(pixel) | $R_a$ (μm)                 | $R_z$ (μm) | $R_a$ (μm)              | $R_z$ (μm) |
| 1                         | 1                     | 80,000        | 0,250    | 1,552          | 51,970              | 0,800                      | 5,267      | 1,031                   | 5,352      |
| 2                         | 3                     | 20,251        | 0,427    | 1,145          | 32,540              | 2,460                      | 13,000     | 2,979                   | 13,462     |
| 3                         | 5                     | 69,749        | 0,073    | 1,486          | 47,907              | 1,613                      | 9,000      | 1,671                   | 8,839      |
| 4                         | 7                     | 45,000        | 0,250    | 1,263          | 31,493              | 2,060                      | 10,467     | 1,870                   | 9,071      |
| 5                         | 9                     | 20,251        | 0,073    | 1,153          | 18,196              | 1,853                      | 10,333     | 2,557                   | 12,624     |
| 6                         | 11                    | 45,000        | 0,250    | 1,121          | 29,075              | 1,923                      | 9,800      | 2,117                   | 10,410     |
| 7                         | 13                    | 69,749        | 0,427    | 1,419          | 33,195              | 0,910                      | 5,767      | 1,121                   | 6,119      |
| 8                         | 15                    | 45,000        | 0,000    | 1,302          | 33,529              | 1,430                      | 8,467      | 1,982                   | 9,798      |
| 9                         | 17                    | 45,000        | 0,250    | 1,128          | 24,045              | 2,180                      | 10,433     | 2,291                   | 10,670     |
| 10                        | 19                    | 45,000        | 0,500    | 1,233          | 21,324              | 1,613                      | 8,533      | 1,707                   | 8,795      |
| 11                        | 21                    | 45,000        | 0,250    | 1,184          | 23,661              | 1,533                      | 8,267      | 1,803                   | 9,457      |
| 12                        | 23                    | 10,000        | 0,250    | 1,212          | 21,053              | 1,850                      | 9,500      | 1,990                   | 9,804      |
| 13                        | 25                    | 45,000        | 0,250    | 1,173          | 30,094              | 1,900                      | 9,633      | 2,444                   | 11,203     |

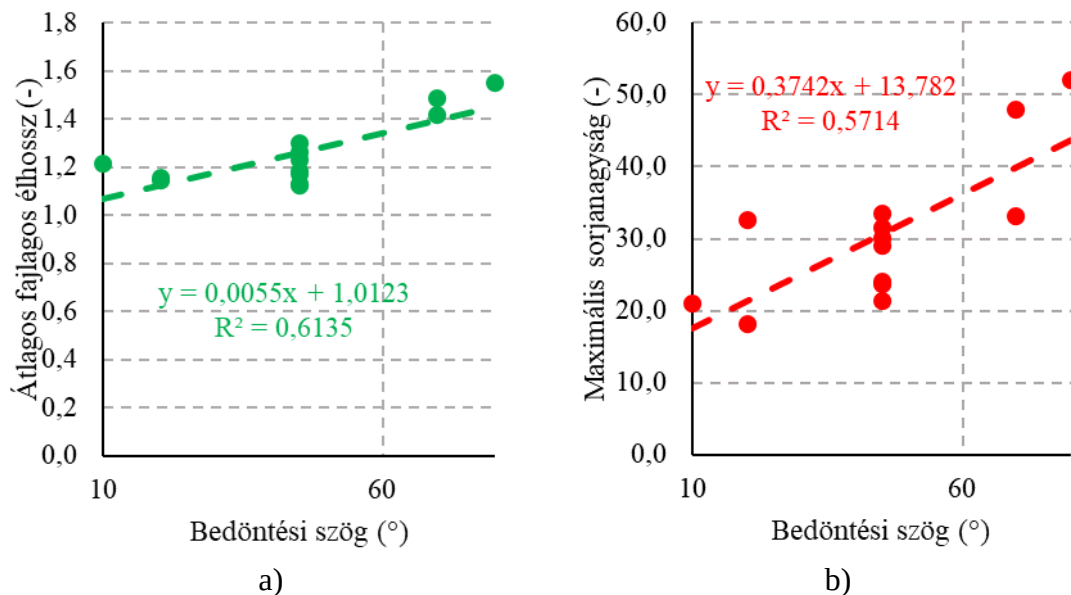
### 5.1. Forgácsolásindukált sorja

Az átlagos fajlagos élhosszak láthatók az egyes kísérleteknél az 5.1.a ábrán. Az 5.1.b ábrán az egyes kísérletekhez tartozó maximális sorjanagyságok láthatóak ábrázolva. Mindkét mérőszám az 1-es kísérleti beállításnál adódott maximálisra ( $L_{f.á.1} = 1,552$  (-),  $L_{Rm,1} = 51,970$  (pixel)), míg minimálisra a 4-es kísérleti beállításnál ( $L_{f.á.4} = 1,121$  (-),  $L_{Rm,4} = 31,493$  (pixel)). A legnagyobb és legkisebb számolt sorjanagyságot jellemző mérőszámok közt tehát  $\Delta L_{f.á.} = 0,431$  (pixel) és  $\Delta L_{Rm} = 20,477$  (pixel). A két mérőszám hasonló eredményeket mutat, azonban a maximális sorjanagyság nagyobb szórást eredményezett.



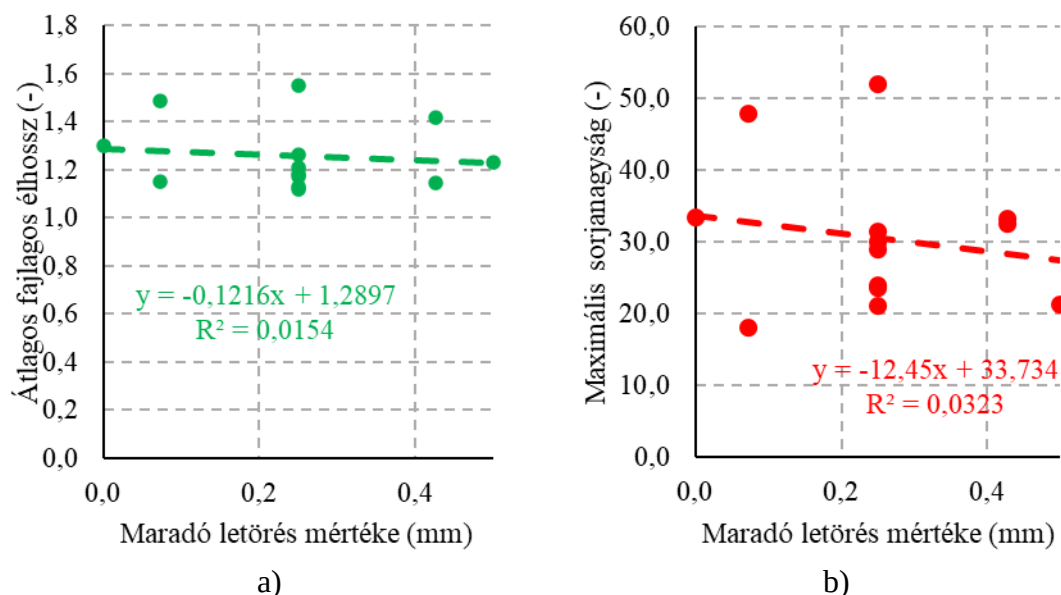
5.1. ábra A sorjanagyságot jellemző mérőszámok az egyes kísérleti beállításoknál,  
a) az átlagos fajlagos sorjanagyság, b) a maximális sorjanagyság

Az 5.2.-es ábrán a sorjanagyság mérőszámok láthatók a bedöntési szög függvényében. Látható, hogy mindkét mérőszám esetén a bedöntési szög növelésével nő a fajlagos átlagos élhossz és a maximális sorjanagyság is.



5.2. ábra A sorjanagyság mérőszámok ábrázolva a bedöntési szög függvényében, a) átlagos fajlagos élhossz, b) maximális sorjanagyság

Az 5.3.-as ábrán a sorjanagyság mérőszámokat ábrázoltam a maradó letörés függvényében. Mindkét diagram csökkenő trendet mutat, így a maradó letörés növelésével csökkennek a sorjanagyság mérőszámainak értékei.



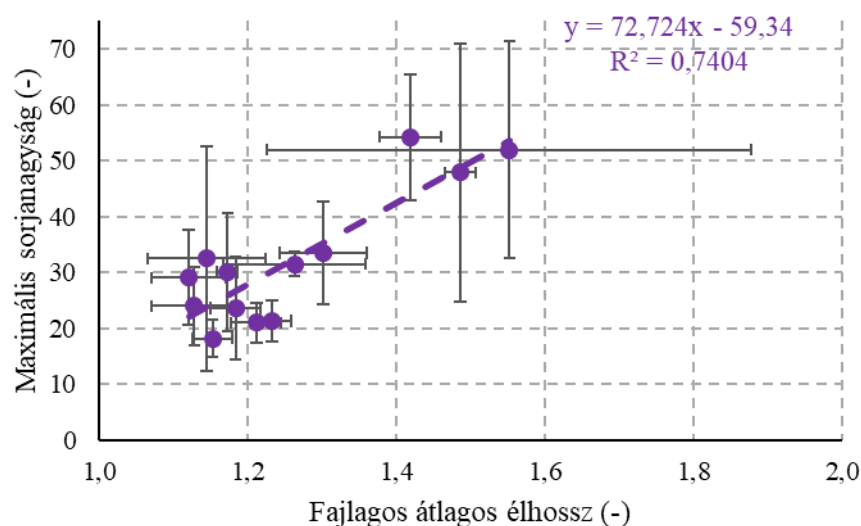
5.3. ábra A sorjanagyság mérőszámok ábrázolva a maradó letörés függvényében, a) átlagos fajlagos élhossz, b) maximális sorjanagyság

A fajlagos átlagos élhosszak és a maximális sorjanagyság ANOVA táblázatait megvizsgálva látható, hogy mindkét mérőszám esetén a bedöntési szög hatása szignifikáns 95 %-os szignifikancia szinten. Az 5.2.-es táblázat foglalja össze az ANOVA táblázat értékeit, vastag számmal kiemelve a szignifikáns értékeket.

5.2. táblázat A sorjanagyság mérőszámok ANOVA táblázatai, a) fajlagos átlagos élhosszhoz tartozó értékek, b) maximális sorjanagysághoz tartozó értékek

| a)                                            |              | b)                                            |              |
|-----------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------|--------------|
| Fajlagos átlagos élhossz<br>( $L_{f.á.}$ (-)) |              | Maximális sorjanagyság<br>( $L_{Rm}$ (pixel)) |              |
| Source                                        | P-Value      | Source                                        | P-Value      |
| Model                                         | 0,001        | Model                                         | 0,005        |
| Linear                                        | 0,000        | Linear                                        | 0,004        |
| $\varphi$ (°)                                 | <b>0,000</b> | $\varphi$ (°)                                 | <b>0,001</b> |
| $c$ (mm)                                      | 0,246        | $c$ (mm)                                      | 0,803        |
| Square                                        | 0,003        | Square                                        | 0,010        |
| $\varphi$ (°) · $\varphi$ (°)                 | <b>0,001</b> | $\varphi$ (°) · $\varphi$ (°)                 | <b>0,003</b> |
| $c$ (mm) · $c$ (mm)                           | 0,060        | $c$ (mm) · $c$ (mm)                           | 0,382        |
| 2-Way Interaction                             | 0,559        | 2-Way Interaction                             | 0,210        |
| $\varphi$ (°) · $c$ (mm)                      | 0,559        | $\varphi$ (°) · $c$ (mm)                      | 0,210        |

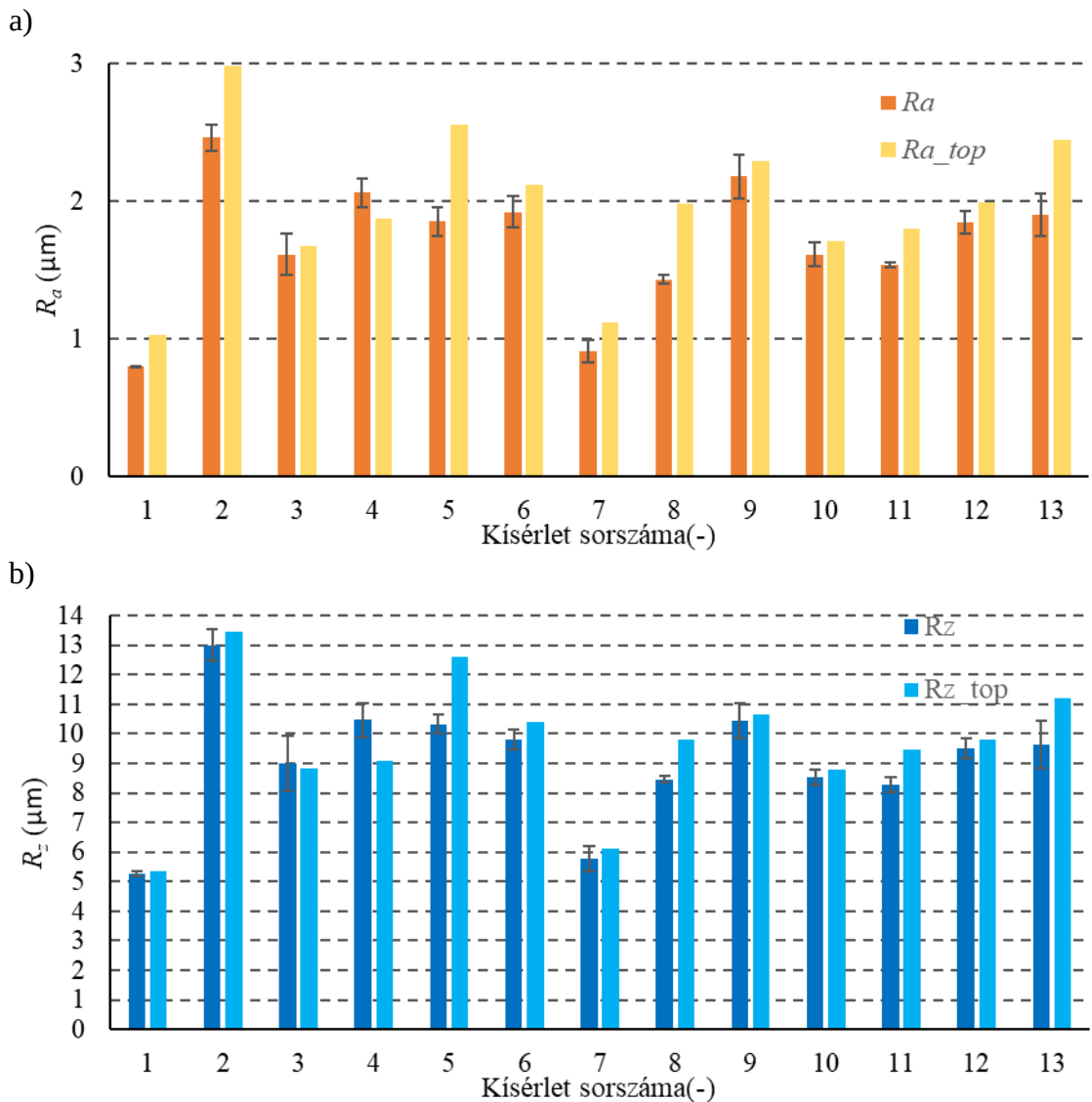
A maximális sorjanagyságot ábrázolva a fajlagos átlagos élhossz függvényében látható, hogy az eredmények monoton növekvő trendet mutatnak. Az 5.4.-es diagram ábrázolja a két mérőszám értékeit.



5.4. ábra Maximális sorjanagyság a fajlagos átlagos élhossz függvényében

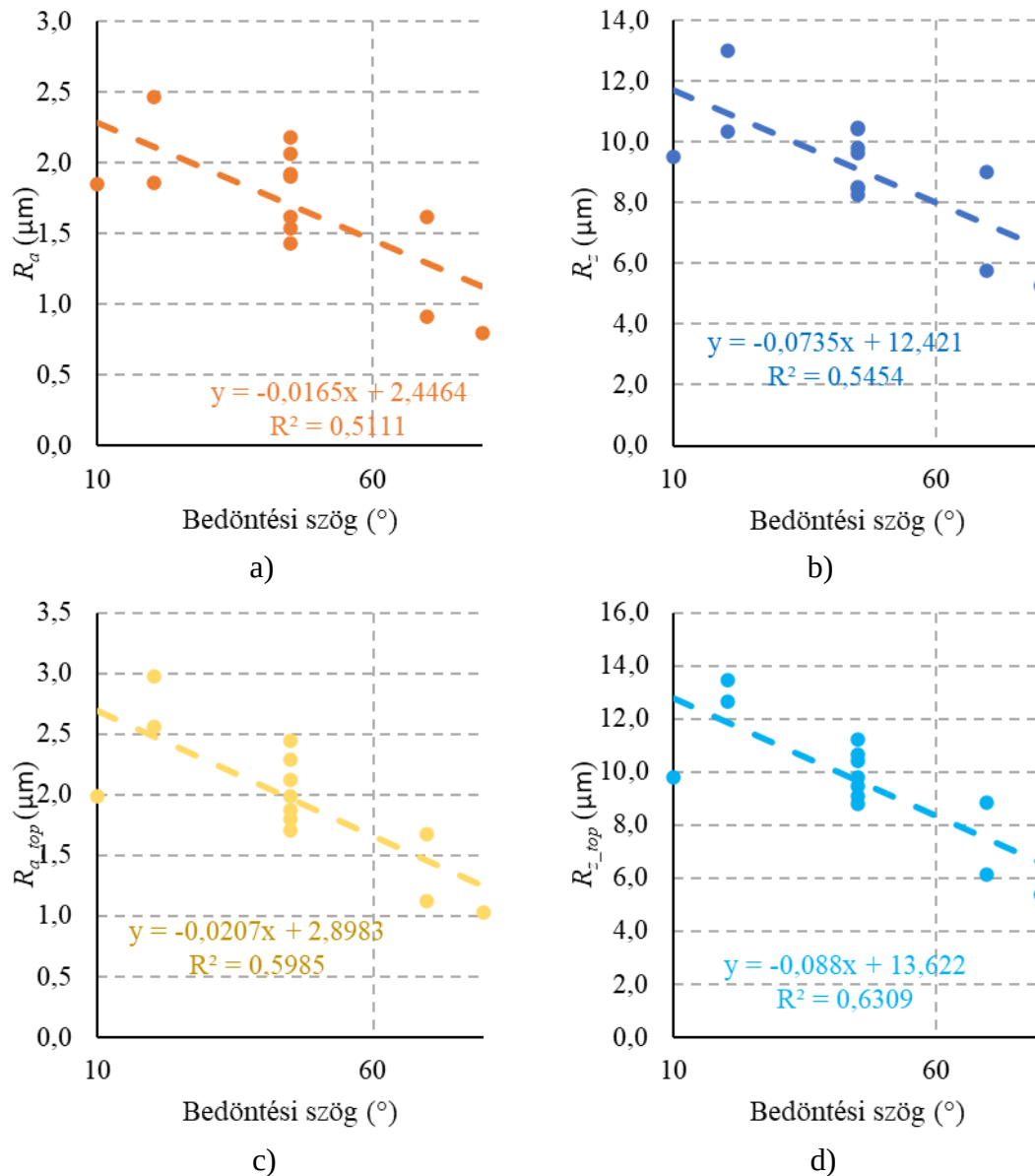
## 5.2. Felületi minőség

Az átlagos felületi érdesség látható az 5.5.a ábrán, az 5.5.b ábrán pedig a felületi egyenetlenség magasságokat ábrázoltam az egyes kísérleti beállításoknál. Mindkét diagramon láthatók a felületi érdességmérő által lemerő adatok és a topográfus vizsgálat által generált eredmények. Mindkét mérőszám esetén a 2. kísérleti beállításnál adódtak maximálisra az értékek, míg mindkét mérőszám esetén az 1. kísérleti beállításnál alakultak minimálisra a kapott értékek. A legnagyobb és legkisebb értékek közti különbségek  $\Delta R_a = 1,660 \text{ (}\mu\text{m)}$ ,  $\Delta R_{a\_top} = 1,948 \text{ (}\mu\text{m)}$ ,  $\Delta R_z = 7,733 \text{ (}\mu\text{m)}$ ,  $\Delta R_{z\_top} = 8,110 \text{ (}\mu\text{m)}$ . A topográfus mikroszkóp által generált eredmények nagyobbra adódtak minden kísérleti beállításnál, azonban a felületi érdességmérő által kiadott értékekhez hasonló nagyságrenddel rendelkeznek.



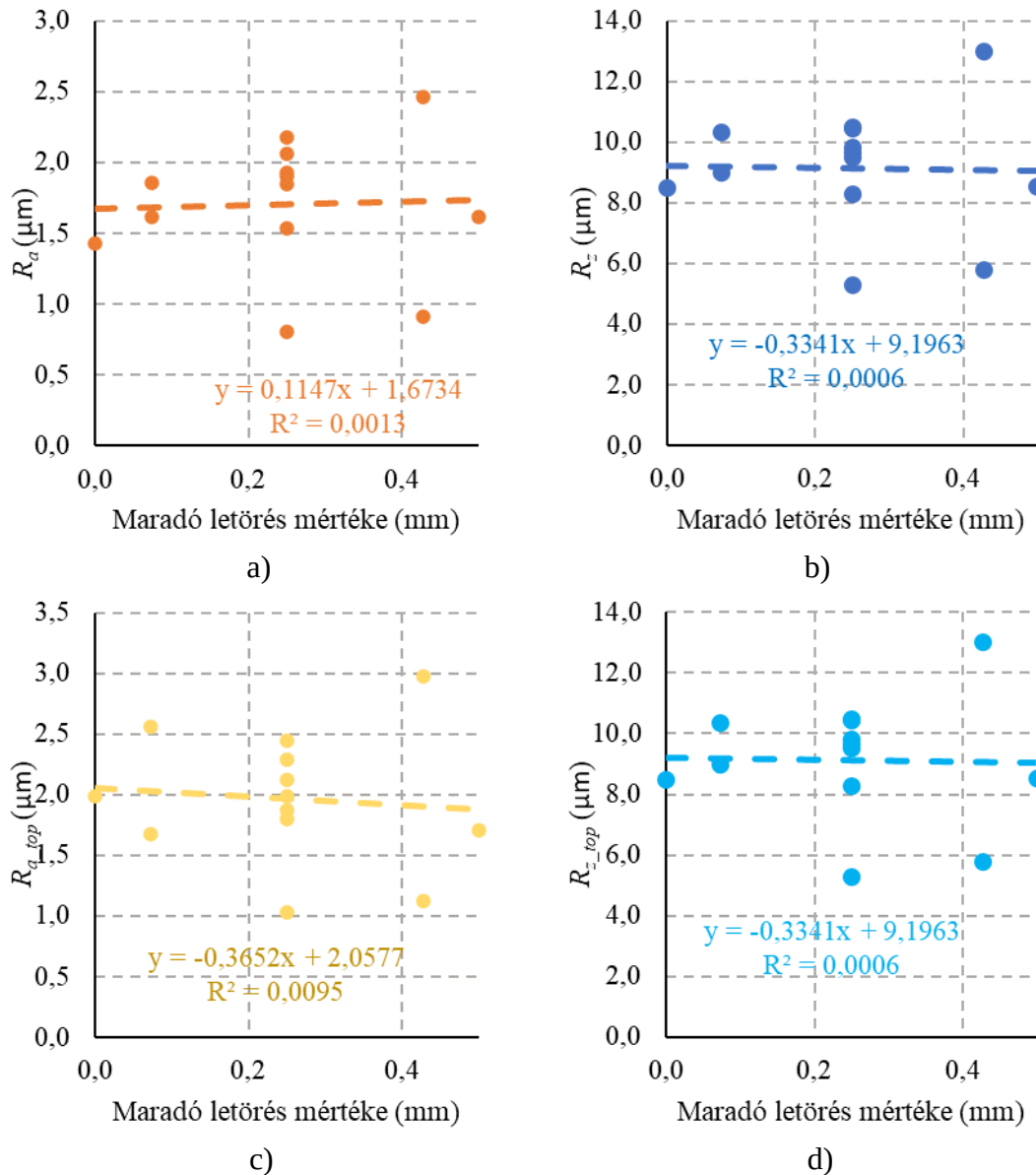
5.5. ábra A felületi érdességet jellemző mérőszámok az egyes kísérleti beállításoknál, a) az átlagos felületi érdesség, b) az egyenetlenség-magasság

Az 5.6.-os ábrán a felületi érdesség mérőszámok láthatók a bedöntési szög függvényében. Látható, hogy mind a négy mérőszám (az átlagos érdesség és az egyenetlenség-magasság) csökken a bedöntési szög növelésével mindkét mérési módszerrel kiértékelve.



5.6. ábra A felületi érdességet jellemző mérőszámok a bedöntési szög függvényében, a) az átlagos felületi érdesség, b) az egyenetlenség-magasság, c) az átlagos felületi érdesség topográfós vizsgálattal, d) az egyenetlenség-magasság topográfós vizsgálattal

Az 5.7.-es ábrán a felületi érdesség mérőszámokat ábrázoltam a maradó letörés függvényében. Az érdességmérő által mért átlagos érdesség kivételével minden diagram csökkenő trendet mutat, így a maradó letörés növelésével csökkennek a felületi érdesség mérőszámainak értékei, míg az érdességmérő által mért eredményeknél az átlagos érdesség nő a maradó letörés mértékének növelésével.



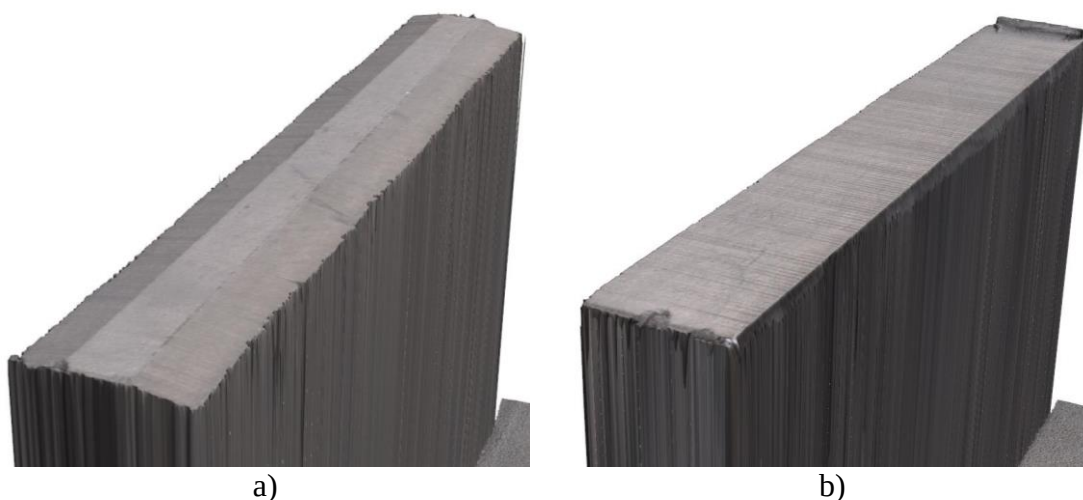
5.7. ábra A felületi érdességet jellemző mérőszámok a maradó letörés függvényében, a) az átlagos felületi érdesség, b) az egyenetlenség-magasság, c) az átlagos felületi érdesség topográfus vizsgálatával, d) az egyenetlenség-magasság topográfus vizsgálatával

Az átlagos érdességek és az egyenetlenség-magasság ANOVA táblázatait megvizsgálva látható, hogy mindkét mérőszám esetén a döntési szög hatása szignifikáns 95 %-os szignifikancia szinten. Az 5.3.-as táblázat foglalja össze az ANOVA táblázat értékeit, vastag számmal kiemelve a szignifikáns értékeket. A topográf-felület vizsgálat eredményeit nem vizsgáltam külön ANOVA táblázatban, hiszen nagyon hasonló eredmények adódtak, mint a felületi érdességmérővel meghatározott értékeknél.

5.3. táblázat A felületi érdesség mérőszámok ANOVA táblázatai, a) átlagos érdességhez tartozó értékek, b) egyenetlenség-magassághoz tartozó értékek

| a)                                                    |              | b)                                                    |              |
|-------------------------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------|--------------|
| $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )                               |              | $R_z$ ( $\mu\text{m}$ )                               |              |
| Source                                                | P-Value      | Source                                                | P-Value      |
| Model                                                 | 0,011        | Model                                                 | 0,017        |
| Linear                                                | 0,007        | Linear                                                | 0,008        |
| $\varphi$ ( $^\circ$ )                                | <b>0,002</b> | $\varphi$ ( $^\circ$ )                                | <b>0,003</b> |
| $c$ (mm)                                              | 0,823        | $c$ (mm)                                              | 0,888        |
| Square                                                | 0,090        | Square                                                | 0,262        |
| $\varphi$ ( $^\circ$ ) $\cdot$ $\varphi$ ( $^\circ$ ) | <b>0,047</b> | $\varphi$ ( $^\circ$ ) $\cdot$ $\varphi$ ( $^\circ$ ) | 0,117        |
| $c$ (mm) $\cdot$ $c$ (mm)                             | 0,216        | $c$ (mm) $\cdot$ $c$ (mm)                             | 0,635        |
| 2-Way Interaction                                     | 0,033        | 2-Way Interaction                                     | 0,036        |
| $\varphi$ ( $^\circ$ ) $\cdot$ $c$ (mm)               | <b>0,033</b> | $\varphi$ ( $^\circ$ ) $\cdot$ $c$ (mm)               | <b>0,036</b> |

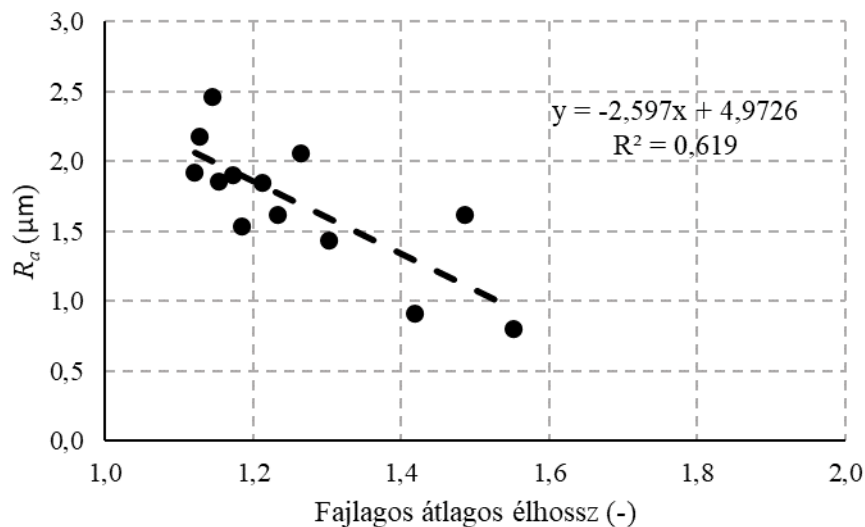
Topográf-felület mikroszkóppal készített felvételek láthatók az 5.8. ábrán. Az 5.8.a ábra az 1-es kísérleti beállításhoz tartozik, tehát a legjobb felületi minőségű munkadarab. Az 5.8.b ábrán a 2-es kísérleti beállítással megmunkált munkadarab felülete látható, amely a legrosszabb felületi minőséget eredményezte.



5.8. ábra A topográf-felület vizsgálatot meghatározott felületek ábrája, a) a legjobb felületi minőség, b) a legrosszabb felületi minőség

### 5.3. Korlátok és megkötések, kitekintés

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a bedöntési szög ( $\varphi$  (°)) hatása szignifikáns, míg a maradó letörés ( $c$  (mm)) hatása nem befolyásolja a maradó sorja nagyságát és a felület minőségét. Mivel a maradó letörés mértéke nem szignifikáns a megmunkálás szempontából, így annak megválasztása más befolyásoló tényező alapján történik. Amennyiben a sorja minimalizálása a célunk, úgy minél kisebb bedöntési szöggel kell megmunkálnunk a munkadarabot, így kisebb lesz az átlagos fajlagos sorjanagyság és a maximális sorjanagyság is. Azonban, ha a felületi minőség javítása a cél akkor a bedöntési szöget minél nagyobbra választva érhető el a legkisebb átlagos érdesség és egyenetlenség-magasság. Az 5.9. ábra mutatja, hogy a felület átlagos érdessége miként alakul a fajlagos átlagos élhossz függvényében. Az ábra alapján megállapítható, hogy a fajlagos átlagos élhossz növekedésével csökken az átlagos érdesség. A megmunkálás során tehát egy olyan optimális bedöntési szöget kell választani, amelynél a kívánt felületi minőség elérhető a lehető legkisebb képződött sorjanagysággal.



5.9. ábra Az átlagos érdesség a fajlagos átlagos élhossz függvényében

A többtengelyes megmunkálási technológiával megmunkálva a CFRP kompozitok éleit nagyobb felületi minőség érhető el kisebb mennyiségű képződött sorja mellett. A technológia során fontos megválasztani a bedöntési szög nagyságát, hiszen azzal nagymértékben befolyásolni lehet az elkészült él minőségét. A technológia előnye, hogy nem szükséges bonyolult, drága szerszámot alkalmazni, hiszen a kompressziós hatást a szerszám bedöntésével éri el a technológia és nem a szerszám geometriai kialakításával. Hátránya viszont, hogy a technológiához bonyolult kinematikai szerszámgépet igényel.

A többtengelyes megmunkálási technológia során a szerszámot a szerszámgép „B” tengelyével döntöttem be a megfelelő szögben. Azonban a későbbi kutatások során szeretném megvizsgálni a technológiát a szerszám „A” tengely körüli bedöntésével is. Ez azonban még bonyolultabb kinematikát igényel. Így a megmunkáláshoz már 6 tengelyre van szükség, amelyhez már ipari robot alkalmazását igényli.

A technológia további limitációja, hogy egyenes él munkálható meg vele. A jövőben szeretném megoldani a bonyolultabb geometriájú CFRP kompozit élek megmunkálását. Ehhez bonyolultabb CNC kód szükséges.

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen TDK-ban a többtengelyes élmaró technológiát vizsgáltam a szerszám bedöntési szögének és a maradó letörés mértékének függvényében. A kísérleteket egy VHTC-130 LINEAR típusú 5 tengelyes megmunkálóközponton végeztem el, egy THOMAS 23N1106 számú,  $D = 6$  mm átmérőjű,  $\beta = 0^\circ$ -os spirálszögű tömör keményfém szerszámmal. A megmunkált munkadarabok felületeit egy OLYMPUS SZX16 típusú sztereomikroszkóppal és egy KEYENCE VR-5000 Series típusú topográfus mikroszkóppal vizsgáltam meg. A munkadarabok felületi minőségét pedig egy Mitutoyo Surfest SJ-401 típusú felületi érdességmérővel határoztam meg. Ezután kiértékeltem a kapott eredményeket. A kiértékelés során a sorjanagyságot és a felületi minőséget vizsgáltam. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a szerszám bedöntési szögének ( $\varphi$  ( $^\circ$ )) hatása szignifikáns, míg a maradó letörés ( $c$  (mm)) hatása nem befolyásolja a maradó sorja nagyságát és a felület minőségét. Amennyiben a sorja minimalizálása a célunk, úgy minél kisebb bedöntési szöggel kerül megmunkálásra a munkadarab, annál kisebb lesz az átlagos fajlagos sorjanagyság és a maximális sorjanagyság is. Azonban, ha a felületi minőség javítása a cél, akkor a bedöntési szöget minél nagyobbra állítva érhető el a legkisebb átlagos érdesség és egyenetlenség-magasság.

## 7. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] 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, p. 105552, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105552.
- [2] L. Takacs and F. Szabó, ‘Automated determination of the optimal manufacturing direction of polymer composite shell structures’, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 1246, no. 1, p. 012026, 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1246/1/012026.
- [3] R. Teti, ‘Machining of Composite Materials’.
- [4] N. Geier, G. Póka, Á. Jacsó, and C. Pereszlai, ‘A method to predict drilling-induced burr occurrence in chopped carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites based on digital image processing’, *Composites Part B: Engineering*, vol. 242, p. 110054, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.compositesb.2022.110054.
- [5] ‘Boeing: 787 By Design’. Accessed: Nov. 02, 2023. [Online]. Available: <https://www.boeing.com/commercial/787/by-design/#/advanced-composite-use>
- [6] N. Geier, J. Xu, D. I. Poór, J. H. Dege, and J. P. Davim, ‘A review on advanced cutting tools and technologies for edge trimming of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites’, *Composites Part B: Engineering*, vol. 266, p. 111037, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.compositesb.2023.111037.
- [7] M. El-Hofy, M. O. Helmy, G. Escobar-Palafox, K. Kerrigan, R. Scaife, and H. El-Hofy, ‘Abrasive Water Jet Machining of Multidirectional CFRP Laminates’, *Procedia CIRP*, vol. 68, pp. 535–540, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2017.12.109.
- [8] C. Anghel, K. Gupta, and T.-C. Jen, ‘A Review on Laser Beam Cutting’, 2020.
- [9] W. S. Lau, M. WANGt, and W. B. Lee, ‘DISCHARGE MACHINING OF CARBON COMPOSITE MATERIALS’.
- [10] W. Hintze, M. Cordes, T. Geis, M. Blühm, C. Emmelmann, and M. Canisius, ‘Laser Scored Machining of Fiber Reinforced Plastics to Prevent Delamination’, *Procedia Manufacturing*, vol. 6, pp. 1–8, 2016, doi: 10.1016/j.promfg.2016.11.001.
- [11] F. Wang, J. Yin, J. Ma, Z. 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’, *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 91, no. 9, pp. 3107–3120, Aug. 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0023-9.
- [12] Y. Su, Z. Jia, B. Niu, and G. Bi, ‘Size effect of depth of cut on chip formation mechanism in machining of CFRP’, *Composite Structures*, vol. 164, pp. 316–327, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.11.044.
- [13] D. Nguyen, M. S. Bin Abdullah, R. Khawarizmi, D. Kim, and P. Kwon, ‘The effect of fiber orientation on tool wear in edge-trimming of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates’, *Wear*, vol. 450–451, p. 203213, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.wear.2020.203213.
- [14] V. Schorník, M. Daňa, and I. Zetková, ‘The Influence of the Cutting Conditions on the Machined Surface Quality when the CFRP is Machined’, *Procedia Engineering*, vol. 100, pp. 1270–1276, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.493.

- [15] O. Pecat, R. Rentsch, and E. Brinksmeier, 'Influence of Milling Process Parameters on the Surface Integrity of CFRP', *Procedia CIRP*, vol. 1, pp. 466–470, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.procir.2012.04.083.
- [16] T. Yashiro, T. Ogawa, and H. Sasahara, 'Temperature measurement of cutting tool and machined surface layer in milling of CFRP', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 70, pp. 63–69, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2013.03.009.
- [17] N. Geier, 'Influence of fibre orientation on cutting force in up and down milling of UD-CFRP composites', *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 111, no. 3, pp. 881–893, Nov. 2020, doi: 10.1007/s00170-020-06163-3.
- [18] 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', *Composite Structures*, vol. 306, p. 116585, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.116585.
- [19] L. Zhang and X. Zhang, 'A comparative experimental study of unidirectional CFRP high-speed milling in up and down milling with varied angles', *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 101, pp. 1147–1157, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.06.064.
- [20] J. Sheikh-Ahmad, M. El-Hofy, F. Almaskari, K. Kerrigan, and Y. Takikawa, 'The evolution of cutting forces during slot milling of unidirectional carbon fiber reinforced polymer (UD-CFRP) composites', *Procedia CIRP*, vol. 85, pp. 127–132, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.09.043.
- [21] M. H. El-Hofy *et al.*, 'Tool Temperature in Slotting of CFRP Composites', *Procedia Manufacturing*, vol. 10, pp. 371–381, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.007.
- [22] K. Kerrigan and R. J. Scaife, 'Wet vs dry CFRP drilling: Influence of cutting fluid on tool performance', *Procedia CIRP*, vol. 77, pp. 315–319, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.09.024.
- [23] Z. Sun *et al.*, 'An innovative study on high-performance milling of carbon fiber reinforced plastic by combining ultrasonic vibration assistance and optimized tool structures', *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 22, pp. 2131–2146, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.12.054.
- [24] A. Hosokawa, N. Hirose, T. Ueda, and T. Furumoto, 'High-quality machining of CFRP with high helix end mill', *CIRP Annals*, vol. 63, no. 1, pp. 89–92, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.084.
- [25] W. Hintze and F. Brüggmann, 'Influence of spatial tool inclination on delamination when milling CFRP', *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 252, pp. 830–837, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.10.041.
- [26] S. Ashworth *et al.*, 'Effects of machine stiffness and cutting tool design on the surface quality and flexural strength of edge trimmed carbon fibre reinforced polymers', *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 119, pp. 88–100, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.01.019.
- [27] C. Pereszlai and N. Geier, 'Comparative analysis of wobble milling, helical milling and conventional drilling of CFRPs', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, Feb. 2020, doi: 10.1007/s00170-019-04842-4.

- [28] 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’, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 211, no. 3, pp. 329–338, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.10.004.
- [29] ‘Szénszállal erősített polimer kompozitok többtengelyes élmárási technológiájának fejlesztése és kísérleti vizsgálata - BME TDK Portál’. Accessed: Nov. 03, 2023. [Online]. Available: <http://tdk.bme.hu/GPK/GTT2/Szenszallal-erosített-polimer-kompozitok>
- [30] ‘Méréstechnikai labor – GTT honlap’. Accessed: Nov. 03, 2023. [Online]. Available: [https://manuf.bme.hu/?page\\_id=239](https://manuf.bme.hu/?page_id=239)



# Kísérleti jegyzőkönyv

## 1. KUTATÁS CÉLJA

A kutatás céljának rövid és tömör ismertetése.

## 2. KÍSÉRLETI KÖRNYEZET

### 2.1. Felhasznált gépek, szerszámok, műszerek és eszközök

- Nűlfák GB733 ipari porszívó
- NCT VHTC-130 LINEAR 5 tengelyes megmunkáló központ
- Egyedi tervezésű mobilis tüköző
- Kiorázot készítő hűtő: 0,01 mm
- THOMAS 23N1106 (FM100.D6) (D6, egyélt, bevonat nélküli, spirálszög=0 maró)

### 2.2. Rögzített paraméterek és körülmények

- száraz megmunkálás
- egyenirányú marás
- Végleges fogásszélesség: 0,5 mm
- fordulatszám  $n=6000$  1/min ( $v_c=113,4$  m/min)
- Rögzítő csavarok meghúzási nyomaték 3 Nm
- Alkalmazott készlet: M1 marókészlet
- A szállirány (vf és szálak között bezárt szög)=90 fok
- Letörés magassága egyenlő a beállított fogásszélességgel
- Hosszkorrekció = 48,713 mm
- 0,01 mm pontosságu tolómérővel meghatározva a mbl. méretek

## Kutatási alapadatok

| Környezet       |                      |
|-----------------|----------------------|
| Dátum:          | 2023. szeptember 25. |
| Helyszín:       | BME „G” épület       |
| Hőmérséklet:    |                      |
| Nyomás:         |                      |
| Személyzet      |                      |
| Kísérletvezető: | Tima Tamás Sándor    |
| Laboráns 1:     | Dr. Geier Norbert    |
| Laboráns 2:     |                      |
| Laboráns 3:     |                      |
| Laboráns 4:     |                      |
| Laboráns 5:     |                      |

## 8. MELLÉKLETEK

### 8.1. Kísérleti jegyzőkönyv



2.3. Faktorok

| Megnevezés                          | Jelölés | Mértékegység | Ertéltelmezési tartomány |                | Szintek száma | Vizsgált szintek              |
|-------------------------------------|---------|--------------|--------------------------|----------------|---------------|-------------------------------|
| Szerszám bedöntés „X” tengely körül | $\phi$  | °            | 10                       | Legalsó szint  | 5             | 10; 20; 25; 45; 69; 74; 9; 80 |
| Letörés magassága                   | c       | mm           | 0                        | Legfelső szint | 5             | 0; 0,073; 0,25; 0,427; 0,5    |





### 3. KÍSÉRLETTERVEZÉSI MÁTRIX

| Ssz. | Próbatest<br>azonosító | Próbatestm<br>érete<br>(mm) | Faktorok      |                    | Megjegyzés                                       |
|------|------------------------|-----------------------------|---------------|--------------------|--------------------------------------------------|
|      |                        |                             | $\phi$<br>(°) | $\epsilon$<br>(mm) |                                                  |
| P1   |                        |                             |               |                    |                                                  |
| P2   |                        |                             |               |                    |                                                  |
| 1    | 1                      | 35x21,4x5,256               | 80,000        | 0,250              |                                                  |
| 2    | 3                      | 35x21,25x5,248              | 20,251        | 0,427              |                                                  |
| 3    | 5                      | 35x21,5x5,280               | 69,749        | 0,073              |                                                  |
| 4    | 7                      | 35x21,7x5,246               | 45,000        | 0,250              |                                                  |
| 5    | 9                      | 35x20,7x5,211               | 20,251        | 0,073              |                                                  |
| 6    | 11                     | 35x21,3x5,246               | 45,000        | 0,250              |                                                  |
| 7    | 13                     | 35x21,45x5,259              | 69,749        | 0,427              |                                                  |
| 8    | 15                     | 35x21,1x5,253               | 45,000        | 0,000              | A felírt felőli oldalon készült letörés szemmel. |
| 9    | 17                     | 35x21,6x5,224               | 45,000        | 0,250              | Szám felőli oldalon nagyobb letörés              |
| 10   | 19                     | 35x21,6x5,274               | 45,000        | 0,500              |                                                  |
| 11   | 21                     | 35x21,5x5,274               | 45,000        | 0,250              |                                                  |
| 12   | 23                     | 35x21,5x5,204               | 10,000        | 0,250              |                                                  |
| 13   | 25                     | 35x21,6x5,255               | 45,000        | 0,250              |                                                  |

Alkatészrajz:

## 8.2. Kísérlet NC kódja

```
%O1002(ELMAR2_kiserlet_20230925)
G54 G90 G49
(#####)
#101=5.3 (Mdb. szelessege-X - mm (Mikrometerrel merve))
#102=22.19 (Mdb. magassaga-Z - mm)
#103=35 (Mdb. hossza-Y - mm)
#104=35 (Mdb. nullponttol valo y tavlosaga - mm (Tavtartoval beallitva))
(Faktorok:)
#106=0.1 (Marado letores Z iranyu nagysaga - mm)
#112=45 (Bedontesi szog - fok)
(#####)
#105=6 (Szerszamatmero - mm)
#110=200 (Elotolasi sebesseg - mm/min)
#111=6000 (Fordulatszam - 1/min)
#113=0.5 (Veglegesito fogasvetel - mm)
#114=47.046 (Hosszkorrekcio - mm)
#115=25 (Elhossz - mm)

#109=SIN[FOK[#112]]*[#113+#106] (Fogasszelesseg letoresnel - mm)
(#####)
#3006=(NULLPONT, HOSSZKORR. OK?)
IF[#103+#104]GT150] #3006=(VEGALLAS VESZELY-Y)
IF[#104LT35] #3006=(UTKOZES VESZELY-Y)
IF[#103GT35.5] #3006=(UTKOZES VESZELY-Y)
IF[#102GT45] #3006=(VEGALLAS VESZELY-Z)
IF[#114LT[11.5+#101+5]] #3006=(UTKOZES VESZELY HOMLOKFELULETTEL)
M3
G43 Z50 H1
G69.1
G0 X0 Y120
Z50 B0 C0

(Ferde palastmaras_1_letores)
S#111 F#110
M3
G0 Z[#102-9.9+50]
G68.2 X[11.5+#101] Y#104 Z[#102-9.9] I90 J-#112 K-90
G53.1
G0 Y[#103+#105]
X5 Z[-#101-3]
X[-#109+[#105/2]]
#3006=(Ferde palastmaras 1. ferde felulet START?)
G1 Y-#105
#3006=(Kiserlet 1. ferde felulet VEGE)
G40
G69.1
G0 Z[#102-9.9+50]

(Ferde palastmaras_2_letores)
G68.2 X11.5 Y#104 Z[#102-9.9] I90 J#112 K-90
G53.1
G0 Y-#105
X-5 Z-5
X[#109-[#105/2]]
#3006=(Ferde palastmaras 2. ferde felulet START?)
G1 Y-#105
#3006=(Kiserlet 2. ferde felulet VEGE)
G40
```

```

G69.1
G0 Z[#102-9.9+50]

(Ferde palastmaras_veglegesito fogas)
G68.2 X11.5 Y#104 Z[#102-9.9] I90 J-90 K-90
G53.1
G0 Y[#103+#105]
X20 Z20
X5 Z[-#101-3]
X[-#113+[#105/2]]
#3006=(Ferde palastmaras 3. sikfelulet START?)
G1 Y-#105
#3006=(Ferde palastmaras 3. sikfelulet VEGE)
G0 X[50-[[#102-9.9]]+50]
G40
G69.1
Y160
G0 B0
M5

G0 Z50 B0 C0
Y160
M5
M30
%
```

### 8.3. Képfeldolgozó algoritmus kódja

```

pic = Import[StringJoin[NotebookDirectory[], "13_10x_3.jpg"]];
pic1 = ImageTake[pic, {900, 1500}];
pic2 = ChanVeseBinarize[pic1];
pic3 = EdgeDetect[pic2]
pic1 = Import[StringJoin[NotebookDirectory[], "1_10x_1_1.jpg"]];
pic2 = Import[StringJoin[NotebookDirectory[], "1_10x_2_2.jpg"]];
pic3 = Import[StringJoin[NotebookDirectory[], "1_10x_3_3.jpg"]];
count = 0;
points1 = ImageScan[If[Mean[#] > 0, count++] &, pic1]
count
count = 0;
points2 = ImageScan[If[Mean[#] > 0, count++] &, pic2]
count
count = 0;
points3 = ImageScan[If[Mean[#] > 0, count++] &, pic3]
count
picv1 = ImageDimensions[pic1];
picv2 = ImageDimensions[pic2];
picv3 = ImageDimensions[pic3];
picv1[[1]]
picv2[[1]]
picv3[[1]]
pic1 = Import[StringJoin[NotebookDirectory[], "27_10x_1_1.jpg"]];
pic2 = Import[StringJoin[NotebookDirectory[], "27_10x_2_2.jpg"]];
pic3 = Import[StringJoin[NotebookDirectory[], "27_10x_3_3.jpg"]];
picvec1 = PixelValuePositions[pic1, 0.01];
picvec2 = PixelValuePositions[pic2, 0.01];
picvec3 = PixelValuePositions[pic3, 0.01];
Export["27_10x_1_1.txt", picvec1]
Export["27_10x_2_2.txt", picvec2]
Export["27_10x_3_3.txt", picvec3]
```