

SEPRŐS SZILÁRD
OTDK DOLGOZAT

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



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

SEPRŐS SZILÁRD
SZERSZÁMKOPÁS ÉS FORGÁCSOLÁSINDUKÁLT
SORJA KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA CFRP KOMPOZIT
MIKROFÚRÁSA SORÁN

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF TOOL WEAR AND
MACHINING-INDUCED BURRS DURING MICRO
DRILLING OF CFRP COMPOSITE

Konzulens:

Dr. Geier Norbert

Adjunktus

Budapest, 2023

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó	iv
Jelölések jegyzéke	v
1. Bevezetés.....	1
1.1. Célkitűzések.....	1
1.2. Áttekintés	1
2. CFRP kompozitok mikrofúrásának kihívásai és publikált megoldásai	2
2.1. A CFRP kompozitok tulajdonságai és anyagjellemzői.....	2
2.2. CFRP kompozitok mikroforgácsolásának kihívásai és megoldásai	4
2.2.1. A CFRP anyagok mikroforgácsolásának kihívásai.....	4
2.2.2. Szerszámkopás	6
2.2.3. Forgácsolásindukált sorja és delamináció.....	8
3. Kísérleti körülmények, eszközök és módszerek	11
3.1. Kísérleti környezet és eszközök	11
3.2. Előkísérletek.....	12
3.3. Kísérletterv	14
3.4. Kísérlet előkészítése és menete	15
3.5. Kísérlet kiértékelése	17
3.5.1. Szerszámkopás kiértékelése	17
3.5.2. Furatterület kiértékelése	18
4. Eredmények ismertetése és értelmezése	22
4.1. Szerszámkopás	22
4.2. Forgácsolásindukált sorja	28
4.3. Szerszámkopás hatása a sorjára.....	32
4.4. Kitekintés.....	34
5. Összefoglalás.....	36
6. Felhasznált források	37
7. Mellékletek	43

ELŐSZÓ

A napjainkban tapasztalható rohamos fejlődési elvárás az élet szinte összes területén tapasztalható. Különösen igaz ez a mérnöki feladatokra, melyeknél folytonos igény van valami jobbra, pontosabbra, megbízhatóbbra. A mérnöki feladatok nehézsége, de egyben az egyik legnagyobb lehetősége az, hogy egy problémát számos körülmény befolyásol, így sokféle megközelítéssel lehet ezeket megoldani. A fő cél viszont az optimális megoldás megtalálása, mely során figyelembe kell venni a különböző körülmények hatását a folyamatra, illetve egymásra is. Ezek alapján a legkorszerűbb mérnöki konstrukciók megalkotásához szükséges lehet a legkorszerűbb anyagok, technológiák és kialakítások ötvözése. A szénszállal erősített polimer kompozitok jellemzően korszerű, speciális igényű szerkezetekben használatosak. Ezen anyagok konvencionális forgácsolása egy kutatott és releváns információkkal rendelkező terület, viszont a mikroméretű forgácsolásukról lényegesebb kevesebb kutatás és információ lelhető fel.

* * *

Köszönöm Dr. Geier Norbert adjunktusnak a szakmai iránymutatását, a teljes kutatás során nyújtott segítséget, valamint a kompozitanyagok forgácsolásának témájába való bevezetését.

Szeretném megköszönni Poór Dániel István doktorandusznak a konzultációs lehetőséget, mely hozzásegített a kísérleti és kiértékelési módszerek javításához.

Lukács Tamás doktorandusznak köszönöm a képfeldolgozó program elkészítésében nyújtott segítségét.

Köszönöm Kemény Alexandra tanársegédnek a hozzájárulását a BME Anyagtudomány és -technológia Tanszéken végzett mikroszkópi vizsgálatokhoz.

Szeretném megköszönni Dr. Hlinka József adjunktus segítségét a Keyence VR-5200 mérőgép használata során.

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

Budapest, 2023.11.04.

Seprős Szilárd

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 hazai és a nemzetközi szakirodalomban elfogadott jelölésekkel. A ritkán alkalmazott jelölések magyarázata első előfordulási helyük-nél található.

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
A_{free}	furat sorjamentes területe	mm ²
A_{nom}	furat névleges területe	mm ²
A_{sorja}	sorja területe	mm ²
d	szerszámtátrő	mm
f	előtolás	μm
f_z	élenkénti előtolás	μm
F_b	sorjafaktor	%
F_b	sorjafaktor	1
F_{bf}	furat sorjamentes faktor	%
F_{bf}	furat sorjamentes faktor	1
r_β	élsugár	μm
n	főorsó szám	1/min
N	furatszám	1
T	szerszám sorszáma	1
v_c	forgácsolási sebesség	m/min
W	hátkopás vetülete	μm

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
θ	szálvágási szög	°

Indexek, kitevők

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
b	sorja (burr)
bf	sorjamentes (burr free)
i	általános futóindex (egész szám)
nom	névleges (nominális) érték

Rövidítések, mozaikszavak

Jelölés	Megnevezés, értelmezés
ANOVA	varianciaanalízis
CER	élsugár
CFRP	szénszállal erősített polimer
CNC	számítógépes számjegyvezérlés
FRP	Szálerősített polimer
UD-CFRP	egyirányban szénszállal erősített polimer

1. BEVEZETÉS

A szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozitok kiváló mechanikai tulajdonságaik és relatív kis sűrűségük miatt bizonyos ipari szektorok alapvető szerkezeti anyagává váltak [1]. A nagy szakítószilárdság és rugalmassági modulus mellett korrózióállóságuk, illetve jó elektromos és hővezető képességük is hozzájárult ahhoz, hogy a CFRP kompozit anyagok számos különböző iparágban terjedtek el [2].

A szálerősített polimer (FRP) alkatrészeket közel végleges formára tudják legyártani, azonban az alaktűrések, a méretpontosság és a szerelhetőségi feltételek megkövetelik az alkatrészek további megmunkálását. Az FRP anyagok forgácsolással való megmunkálása számos kihívást rejt a megmunkálandó anyag anizotrop és inhomogén tulajdonságai, valamint az erősítőszálak jellemzően erősen abrazív koptató hatása miatt [3].

Bizonyos területeken szükség van a szokványosnál lényegesen kisebb méretű alak-sajátosságok megmunkálására FRP kompozitokban, ezekben az esetekben a hagyományostól eltérő, mikroméretű forgácsoló szerszámokat kell alkalmazni [4]. A mérethatás miatt mikroforgácsolás esetén a makroméretű forgácsolástól eltérő mechanizmusokat lehet megfigyelni [5]. Az FRP kompozitok sajátos forgácsolási tulajdonságainak így egy még speciálisabb esetét tapasztalhatjuk meg CFRP kompozitok mikroforgácsolása esetén.

1.1. Célkitűzések

Kutatásom fő célja a szénszállal erősített polimer kompozitok mikrofúrása során a szerszámkopás és az elkészített furatok minőségének vizsgálata és modellezése. A szerszámkopást és a forgácsolásindukált sorját reprodukálható digitális képfeldolgozással tervezem feldolgozni.

1.2. Áttekintés

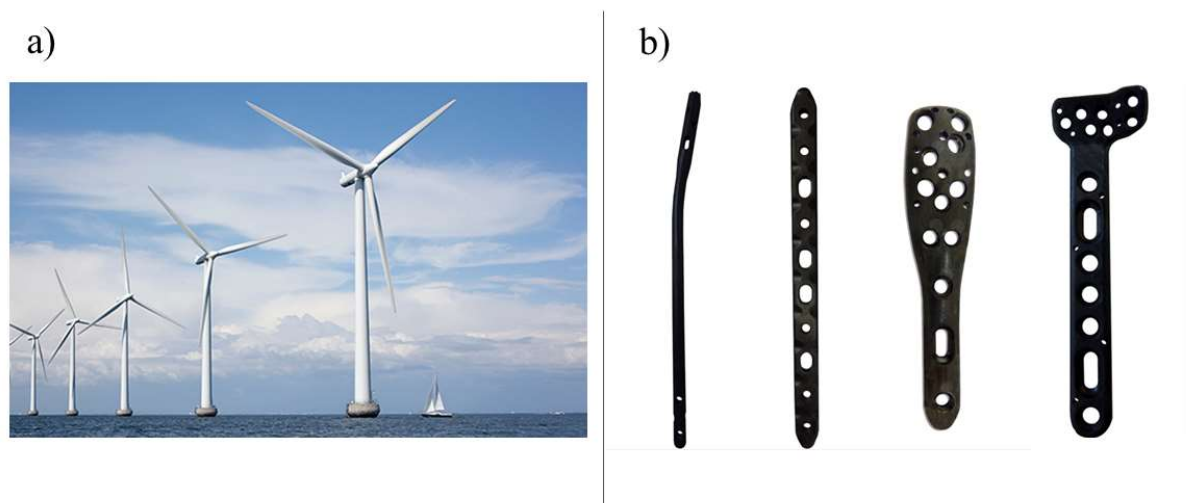
Az *első fejezet* tartalmazza a téma rövid ismertetését, valamint a kutatásom – ezzel párhuzamosan ezen dolgozat – struktúráját, folyamatát. A *második fejezetben* a CFRP kompozitok anyagi jellemzőit, tulajdonságait ismertetem, valamint összefoglalom ezen anyagok forgácsolásának szakirodalmi ismereteit. Bemutatom továbbá a CFRP anyagok mikroforgácsolásának kihívásait és publikált eredményeit a fellelt szakirodalom alapján. A szakirodalmi áttekintés után a *harmadik fejezetben* ismertetem a kísérleti környezetet és a kísérlettervet, valamint az előkísérletek tapasztalatait, melyek együttesen vezettek el a végső kísérlet kialakulásához. A *harmadik fejezet* tartalmazza még az adatok kinyerésének és feldolgozásának módszereit. A *negyedik fejezetben* ismertetem és értékelem a kapott eredményeket, összevetem a kezdeti feltevésekkel, valamint a publikált eredményekkel és lejegyzem a javaslatokat. Végül az *ötödik fejezetben* a kutatás összefoglalásával zárom a dolgozatot.

2. CFRP KOMPOZITOK MIKROFŰRÁSÁNAK KIHÍVÁSAI ÉS PUBLIKÁLT MEGOLDÁSAI

Ebben a fejezetben a CFRP kompozitok, a mikroforgácsolás, valamint a CFRP kompozitok mikroforgácsolásának szakirodalmi ismereteit mutatom be az irodalomkutatás során talált publikációk alapján.

2.1. A CFRP kompozitok tulajdonságai és anyagjellemzői

A kutatásom során szénszállal erősített polimer kompozitokkal foglalkoztam, ezen kompozitok felhasználása igen népszerű a legújabb technológiákat igénylő szektorokban, mint a repülőgép-, űr- és hadiipar, valamint az autóiparban is egyre nagyobb teret nyer [6,7]. A CFRP anyagokat gyakran használják még szenzorelemekben [8], orvostechnikai eszközökben [9,10] és az elektronikai iparágban [11,12]. Előállításuk költségesebb és nagyobb energiaigényű, mint a hagyományos szerkezeti anyagoké [13], ugyanakkor a CFRP anyagok által elérhető súllyscsökkentés kifizetődő lehet bizonyos termékek teljes életcikluson vett energiafelhasználás szempontjából [14]. A kompozitok alkalmazása tehát nem csak konstrukciós, de gazdasági szempontból is előnyös lehet. CFRP anyagok esetén a fenntartható fejlődést nem csak a gazdaságos felhasználás, hanem a szénszálak újrahasznosítása, reciklálása is elősegíti [15,16]. Ezen anyagok gyártásának, felhasználásának és újrahasznosításának fejlesztése így már nem csak a technológiai alkalmazhatóság, hanem a fenntartható fejlődés szempontjából is fontos. A **2-1. ábrán** néhány példát láthatunk a CFRP anyagok felhasználására [17,18].



2-1. ábra: a) CFRP anyagok felhasználása a szélérőművek turbinalapátjaiban [17] b) Ortopéd implantátumok CFRP anyagból [18]

A szálerősített polimer kompozit anyagok között a karbonszálak erősítés az egyik legkiemelkedőbb, köszönhetően a szén-szén kötések által biztosított szilárdság miatt. A szén grafitos szerkezete egyirányban rendkívüli szilárdságot biztosít, így az erősítőszálakban a szén grafitos szerkezete kerül felhasználásra [19]. A karbonszálak tipikus átmérője 7-8 μm körüli, ezeket a szálakat különböző előgyártmányokból (prekurzorokból) állítják elő, a két legfontosabb a poliakrilnitril (PAN) és a kátrány alapú szénszál gyártás [20]. A szénszálak fizikai tulajdonságait a **2-2. ábra** szemlélteti. Az ábrán látható, hogy különböző típusú szénszálaknál a sűrűség és a szakítószilárdság értékei között tapasztaljuk a legkisebb eltéréseket. A többi fizikai tulajdonság között egészen nagy eltérések lehet megfigyelni, ezeket a különböző tulajdonságokat viszont felhasználástól függően lehet hasznosítani. Az erősítőszálakat egy kisebb szilárdságú, de szívósabb mátrixanyag foglalja magába adhéziós kötással.

Pre-kurzor	Gyártó	Típus	Szál- átmérő	Krisz- talit hossza	Sűrűség	Húz. rug. modulus	Szakító- szilárdság	Hővezetési tényező (szál- irányban)	Fajlagos elektromos ellenállás
			μm	nm	g/cm^3	GPa	MPa	W/mK	$\mu\Omega\text{m}$
PAN	Toray Torayca	T1000	5,0	5,3	1,80	294	6370	32	14,0
		M40J	5,0	12,5	1,77	377	4400	67	10,0
		M60J	5,0	17,0	1,93	588	3820	152	7,0
	Zoltek	PX35	7,2	n.a.	1,81	242	4137	n.a.	15,5
Kátrány	Nippon Granoc	XN-60	10,0	14,6	2,12	620	3430	180	7,0
		XN-80	10,0	21,7	2,17	780	3430	320	5,0
		XN-90	10,0	40,0	2,19	860	3430	500	3,0
		YS-95A	7,0	58,6	2,19	920	3530	600	2,2
		XN-100	10,0	97,3	2,22	n.a.	n.a.	900	1,5

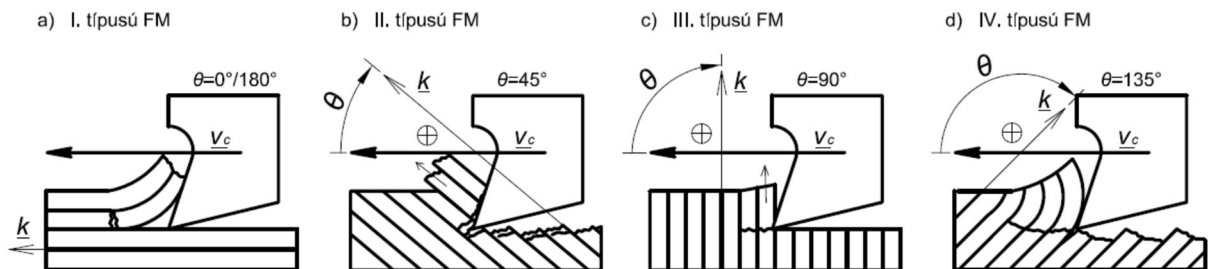
2-2. ábra: Kereskedelemben kapható szénszálak fizikai tulajdonságai [20]

Mivel a szénszálak szálirányú erősítésre vannak használva, így a termékek létrehozásánál jelentős szerepet játszik a szálirányok strukturális elrendezése [19]. Az egyirányban erősített polimer kompozitok (UD-CFRP) a jellemzően egyirányban lényegesen nagyobb igénybevételű termékek előállításánál fontos. Gyakori elrendezés még a roving szövet, a multiaxiális többrétegű szövet, illetve a paplan struktúra, ezeknek az elrendezése is a jellemző igénybevételek szerint történik.

2.2. CFRP kompozitok mikroforgácsolásának kihívásai és megoldásai

2.2.1. A CFRP ANYAGOK MIKROFORGÁCSOLÁSÁNAK KIHÍVÁSAI

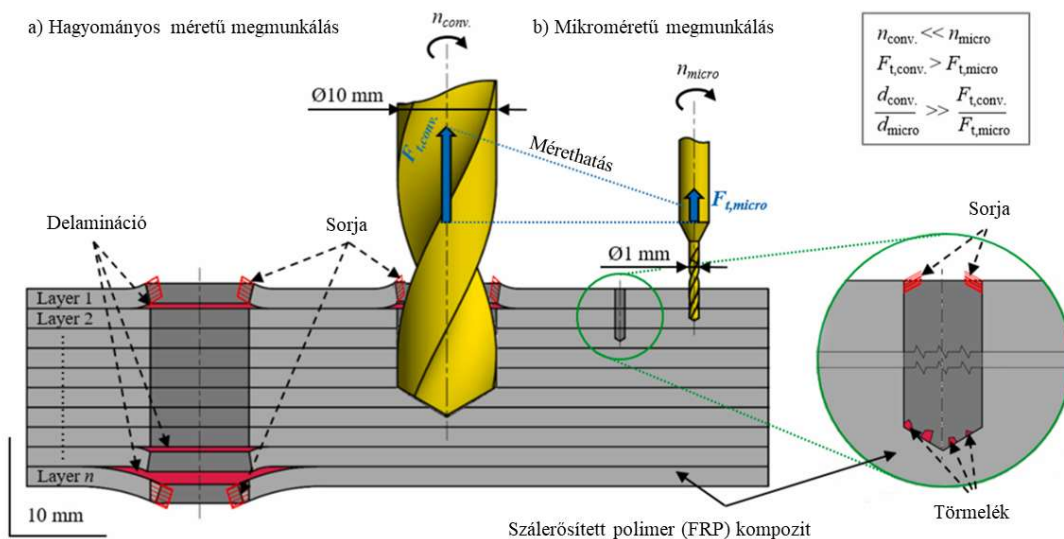
A CFRP kompozitok mikroforgácsolása azért jelent kihívást, ugyanis a megmunkálás során egyesülnek az anyagi tulajdonságok okozta és a miniatürizálás miatti forgácsolási nehézségek [21]. A forgácsolási folyamatot leginkább meghatározó tényezők a szerszám geometriája és a forgácsolási paraméterek, mint az előtolás és a forgácsolási sebesség. Anyagi oldalról a forgácsolást befolyásolja a szálerősített polimer kompozitok szerszámra gyakorolt abrazív koptató hatása, valamint az anizotrop és inhomogén szerkezet miatti sajátos sorjaképződés és rétegek közötti szétválás (delamináció) [22]. Az anizotrop és inhomogén szerkezet hatása a szálirányok és a szerszám mechanikai kapcsolatánál jelenik meg. A forgácsolási sebesség (v_c) és a szálak iránya (k) között bezárt szög a szálvágási szög (θ), ennek értéke jelentősen befolyásolja a forgácsképződés mechanizmusát (FM), ezáltal a kialakuló felületi minőséget és a képződő sorját [23,24]. A nagyméretű sorja megnehezítheti, vagy meg is akadályozhatja az alkatrész szerelési folyamatait, a sorja eltávolítása ráadásul többletmegmunkálást és -költséget eredményez a gyártás során. A forgácsképződési mechanizmusokat szemlélteti egyirányban szálerősített polimer kompozitok esetén a **2-3. ábra** [25].



2-3. ábra: UD-FRP forgácsképződési mechanizmusainak geometriai modelljei [25]

A forgácsképződési mechanizmusoknál megkülönböztethető a „hajlítás okozta törés domináns”, valamint a „vágás domináns” forgácsképződés. Jellemzően a „vágás domináns” forgácsképződés során alakul ki kedvezőbb felület, a „hajlítás domináns” forgácsképződés során a nyomás és az anyag rugalmas deformációja miatt a szálak kihajolnak, így növelhetik is a forgács vastagságát. Ugyanakkor megegyező mechanizmusok esetén a szálvágási szögtől függően lényegesen eltérhet a megmunkált felületek minősége (lásd. **2-3. ábra a) és d)**). A szerszám élsugarának (r_β) hatása is szignifikáns a forgácsképződési mechanizmusokra, kisebb élsugár esetén „vágás domináns” a forgácsképződés, így kedvezőbb a megmunkált felület érdessége és kisebb a forgácsolási erő is [23,26]. A szerszám anyagba való be- és kilépésénél rétegek közötti szétválás, másnéven delamináció jöhet létre, mely az alkatrész mérethibáját okozhatja [27].

A miniaturizálás iránya az egyre kisebb alkatrészek gyártására és alaksajátosságok megmunkálására törekszik [28]. Mikromegmunkálás során általánosan 1 milliméternél kisebb szerszámokkal történik az 1 milliméternél kisebb tartományú alaksajátosságok előállítása. A méretek csökkenése viszont nem feltétlen hordozza magával a paraméterek arányos csökkenését, ez az úgynevezett mérethatás [29,30]. Mikrofúrás (és -marás) esetén például a forgácsolás során fellépő erők csökkennek, de a fajlagos forgácsolási erő jellemzően növekszik a vasalás dominancianövekedés miatt. Ez látható a **2-4. ábrán**. A hagyományostól kisebb méretű szerszám így arányosan nagyobb terhelésnek van kitéve, ez hatással lehet a szerszámkopásra, illetve a szerszám kihajlása is megnőhet [12]. Utóbbi többféle kárt is okozhat, mint például a szerszám törését vagy az elkészített furat mérethibáját. Ezen erők csökkentésére megoldás lehet az akár nagyságrenddel kisebb előtolási értékek alkalmazása. Túlságosan alacsony előtolási értékeknél az elméleti forgácsvastagság és az élsugar hasonló mérettartományú lehet, ez azt eredményezheti, hogy a szerszám maga alá zömíti az anyagot [31,32]. Ebben az esetben minimális az anyagleválasztás, ami növeli a következő fordulatnál a forgácsvastagságot, illetve a zömített anyag keményebbé válhat. A keményebb anyag és a megnövekedett forgácskeresztmetszet növeli a forgácsolás során fellépő erőket, mely jelentősebb szerszámkopást vagy akár szerszámtörést is eredményezhet.



2-4. ábra: Szálerősített polimer kompozitok hagyományos méretű és mikroméretű forgácsolásának különbségei [4]

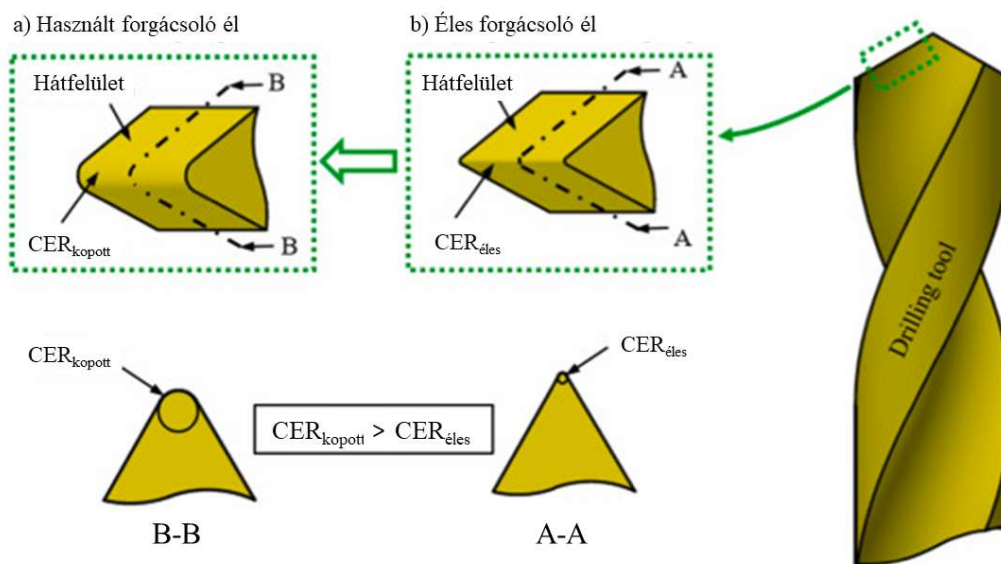
A fentiekben leírtakból látható, hogy a mikrofúrás során a fordulaton belül változó forgácsolási mechanizmusok, a fellépő erők miatti rétegekzi szétválás, a mérethatás miatt fellépő zömítés és nagy fajlagos terhelések, valamint az anyag abrazív koptató hatása egy igen komplex forgácsolási folyamatot adnak meg.

2.2.2. SZERSZÁMKOPÁS

A CFRP kompozitok mikroforgácsolása során az előző fejezetekben leírt forgácsolási kihívások és a mikrofúró szerszámok rossz forgácskivezetése miatt nagymértékű szerszámkopást lehet tapasztalni a kísérletek során. A szálerősített polimer kompozitok mikroforgácsolásával foglalkozó kutatások többségében a szerszám kopása nyomon van követve, vagy a többi értékre gyakorolt hatása miatt, vagy kifejezetten a kopás megfigyelése miatt.

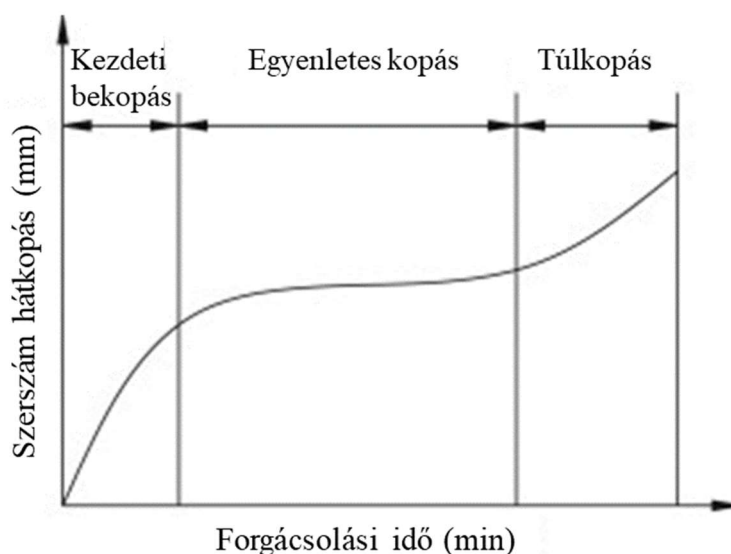
A szerszámkopás megállapítására az élsugár (Cutting edge radius, rövidítve: CER), illetve a hátkopás mértékét ajánlott megfigyelni és azzal jellemezni a kopás mértékét. Az élsugár vizsgálata jobb módszernek bizonyulhat, miután erős korrelációban áll a forgácsolás során kapott értékekkel [26].

Ugyanakkor az élsugár lemérése bonyolultabb és jobb technológiát igényel, mint a hátkopás vizsgálata, ezért több kutatásban is a hátkopást vizsgálatával határozták meg a szerszámkopást [11],[33]–[35]. Ehhez a módszerhez hozzájárul az a feltevés, miszerint a hátkopás növekedése, arányos a szerszám élsugarának növekedésével (2-5. ábra). A hátkopás vizsgálatakor ugyanakkor figyelembe kell venni azt, hogy az él mentén egyenletlenül tud kialakulni a kopott rész, illetve különböző sérülések (például a kráteres kopás) zavarhatják a vizsgált felületet.



2-5. ábra: A szerszámkopás jellemzése a forgácsoló él sugarának ismeretében [26]

A szerszám kopása a forgácsolási idővel növekszik, ezt a jelenséget kopásgörbe diagrammal szokás ábrázolni. A kopásgörbe általánosan három eltérő jellegű szakaszból áll, melyeknél különbözik a szakasz hossza és a kopás sebessége [36]. A kopási folyamatot a 2-6. ábra szemlélteti.



2-6. ábra: A kopás változása a forgácsolási idő függvényében [37]

A kopásgörbén (2-6. ábra) jól megfigyelhető három különböző kopási szakasz. A kezdeti bekopás szakaszán a kopás értékének változása nagy, de a görbe degresszív. Ezután az egyenletes kopás szakasza következik, ezen a részen a kopási értékek változása közel megegyező az egész szakaszon, a görbének lineáris jellege van. Az egyenletes kopás szakasza jellemzően hosszabb a bekopás szakaszánál. A túlkopás szakaszán a kopási értékek jelentősen növekednek, a görbe progresszív. A szerszám törése jellemzően a túlkopási szakaszon belül történik. Alhadeff és munkatársai [37] mikroforgácsolási kísérletek során vizsgálták a kopási görbéket különböző forgácsolási módok és anyagok alkalmazásával. A bevonatos szerszámok esetén a kopási görbe négy szakaszból áll, ahol a már ismertetett három szakaszt megelőzi egy lassú, egyenletes bevonat kopási szakasz.

A szálerősített polimerek mikroforgácsolásának témájában találhatóak publikációk, melyek a szerszámkopással foglalkoznak. Dogrusadik és Kentli [34] megállapították, hogy az előtolásnak nagyobb hatása van a hátkopás mértékére, mint a főorsó fordulatszámának (a forgácsoló sebességnek), valamint megfigyelték, hogy a támaszlemez anyaga is hatással van a hátkopásra. Támaszlemezek alkalmazása esetén a forgácsolási paraméterek nagyobb mértékben voltak hatással a folyamatra, mint támaszlemezek nélkül. Különböző kutatásokban is kimutatták a kenő- és hűtőanyagok hatását a hátkopásra [11,33], például már hideg levegős hűtéssel is kedvezőbb szerszámkopási értékek tapasztalhatóak, mint száraz, hűtés nélküli forgácsolás során. Több kutatás bizonyította, hogy a bevonatos szerszámok kopása lényegesen kisebb, szinte elhanyagolható a bevonat nélküli keményfém mikrofúró szerszámok kopásához képest [38]. Wang és munkatársai [39] bevonat nélküli, gyémántbevonatos és AlTiN bevonatos szerszámokkal végeztek kísérleteket. A furatok számának növekedésével a bevonat

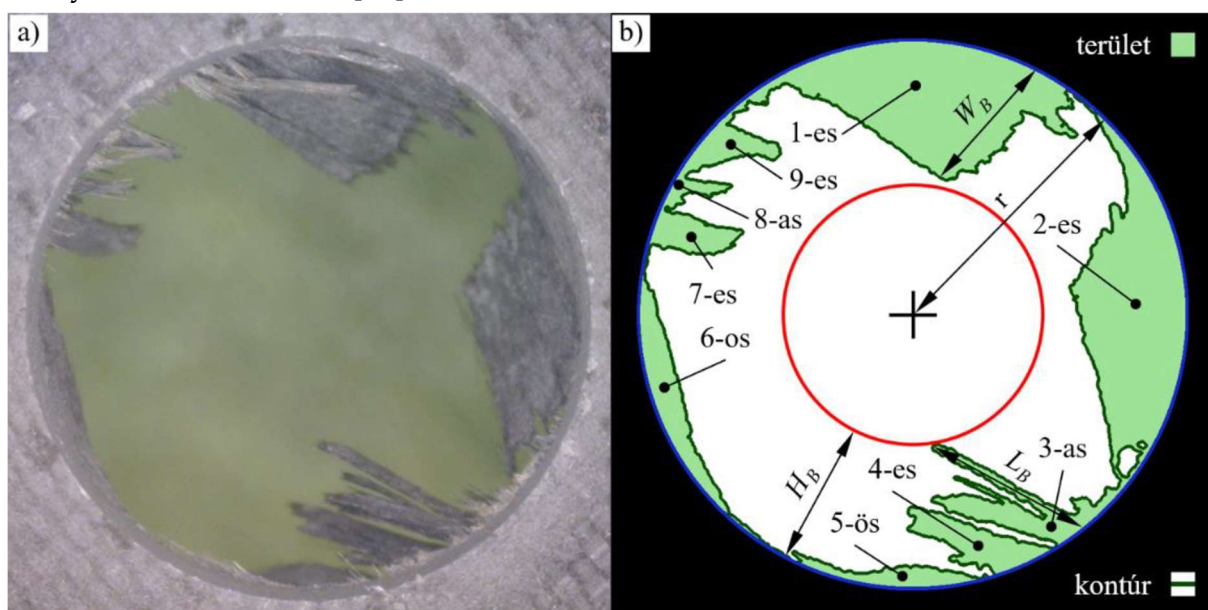
nélküli és AlTiN bevonatos szerszámok esetén mért forgatónyomaték és az axiális erőkomponens növekedése nagyobb volt, mint a gyémántbevonatos szerszám esetén.

A szerszámtörések megelőzése és szerszámkopás nyomon követése érdekében szükséges lehet a szerszám állapotát ellenőrző rendszerek fejlesztése [40]. A szerszám vizsgálata történhet például folytonos optikai mérésekkel, illetve erő- és rezgésmérésből származó jelek elemzéséből történő következtetéssel [41].

2.2.3. FORGÁCSOLÁSINDUKÁLT SORJA ÉS DELAMINÁCIÓ

A szálerősített kompozitok forgácsolása során keletkező legjelentősebb makrogeometriai hibák a forgácsolásindukált sorjaképződés és a delamináció [42].

A forgácsolásindukált sorja a forgácsolás során az alakcsátosságokon található anyagfelesleg, ezeket jellemzően a megmunkálás során el nem vágott szálakból állnak. A szerszám – kifejezetten bizonyos szálvágási tartományokban – vágás helyett meghajlítja a rugalmas szálanyagot, ezekből jönnek létre a vágatlan szálak. A sorja meghatározása történhet többféleképpen is, terület- vagy hosszalapon vagy a sorjaképződmények darabszámával [43], ezt szemlélteti a 2-7. ábra.



2-7. ábra: a) CFRP kompozitba készített, jellemző forgácsképződeményekkel rendelkező furat, b) A feldolgozott kép [43]

Az említett mérőszámok közül a területalapúak a leghasználatosabbak a szakirodalomban, ugyanis ezen értékek lehetővé teszik a furatok összehasonlítását. Különböző geometriák esetén a nominális értékhez való arányosítással lehet összehasonlításokat végezni, ebben az esetben a hosszúság alapú mérőszámok is használatosak lehetnek. Poór és munkatársai [43] összefoglalták és értékelték a szakirodalomban használatos mérőszámokat, ezekből mutatnak be három típust, melyek információértéke a leginkább hasznosítható a sorja vizsgálata során.

A területalapú, nominális furathoz arányosított mérőszámok közül a sorjafaktor (**1. egyenlet**) és a sorjamentes faktor (**2. egyenlet**) a leghasználatosabb.

$$F_b = \frac{A_{nom} - A_{free}}{A_{nom}} = \frac{A_b}{A_{nom}} \quad (1)$$

F_b : a sorjafaktor (1)

A_{nom} : a nominális furat területe (mm²)

A_{free} : a sorjamentes területe a furatnak (mm²)

A_b : a sorja területe (mm²)

$$F_{bf} = \frac{A_{free}}{A_{nom}} \quad (2)$$

F_{bf} : a sorjamentes faktor (1)

A_{nom} : a nominális furat területe (mm²)

A_{free} : a sorjamentes területe a furatnak (mm²)

A hosszalapú, nominális furathoz arányosított mérőszámok közül a kontúr sorjafaktor (**3. egyenlet**) használatával lehet különböző méretű alak sajátosságokat összehasonlítani.

$$F_{bc} = \frac{C_c - C_{nom}}{C_{nom}} \quad (3)$$

F_{bc} : a kontúr sorjafaktor (1)

C_b : a forgácsolt furat kontúrja (mm)

C_{nom} : a nominális furat kerülete (mm)

A forgácsoláshoz indukált sorja képződése mikro- és makroméretű forgácsolás esetén is nagyjából ugyanakkora problémát okoz a furatminőségben, ugyanis a sorjaképződést fajlagosan ugyanakkora mértékű erők és hasonló mechanizmusok alakítják. Makroméretű forgácsolás esetén a szerszámgeometria és szerszámbevonatolás hatása a furatminőségre igen jelentős, mikroméretű forgácsolás esetén is igaz ez az állítás [44]. Ugyanakkor ezen speciális szerszámok előállítása bonyolultabb és korlátozottabb, mint a konvencionális méretű fúrószerszámoké, így csekélyebb mértékben (vagy lényegesen drágábban) lehet ezzel befolyásolni a forgácsoláshoz indukált sorját [38,45]. Támaszlemez és központfuratok alkalmazása javítja a mikrofúrószerszám ütését és kihajlását, így az elkészült furatoknak kedvezőbb a minősége [34,46]. A furatok minőségére hatással van az előtolás szabályozás [47], illetve a szerszám hűtése is [48], ezek szélesebb körben használhatóak, a támaszlemez és a központfuratok méretbeli korlátai miatt. Wang és munkatársai kimutatták [23], hogy a szálvágási szög van a legnagyobb hatással a furatpalást felületére, hasonlóan a hagyományos méretű forgácsoláshoz. A furat palástfelületén nagyjából ugyanazok a mikrogeometriai hibák fedezhetők fel, mint a makro méretű forgácsolásnál [49].

A mikroforgácsolás során létrejövő delamináció nem tekinthető akkora mértékűnek, mint a hagyományos méretű furatoknál [50,51]. Ennek oka a mikroforgácsolás során fellépő kisebb forgácsolási és axiális irányú erő [52]. Pliusys és Mativenga [53] publi-

kációja szerint a főorsó fordulatszáma és a fúrószerszám főélelhelyezési szöge szignifikáns hatással van a delaminációra a ki- és belépő oldalon is. A delamináció minimalizálása támaszlemezekkel lehetséges, ugyanakkor ezek a lemezek enyhe mértékben károsítják a munkadarab felületét. Shyha és társai kimutatták [54], hogy az előtolás és a szerszám geometriája jelentős hatással van a furatpaláston kialakult hibákra.

A szakirodalmi összefoglalás végén még szeretnék megemlíteni néhány, a hagyományos forgácsolástól eltérő megmunkálási módot, mint a lézersugaras megmunkálást [55], a vízsugaras megmunkálást [56], valamint a szikraforgácsolást [57]. Ezen modernebb technológiák használata esetén kisebb erők és nyomatékok ébrednek, melyek kedvezőbbek a kialakított alaksajátosságok minőségére, illetve a szerszámkopással sem kell foglalkozni. Ugyanakkor ezen technológiák általában kisebb fajlagos anyagleválasztásra képesek, lényegesen drágábbak és alkalmazhatóságuk is korlátozottabb, így még speciálisabb anyagok megmunkálása esetén is gyakran a forgácsolás az optimális eljárás. Ebből következik, hogy technológiai szükségszerűség a forgácsolási ismeretek és tapasztalatok kiterjesztése, valamint a módszerek továbbfejlesztése.

3. KÍSÉRLETI KÖRÜLMÉNYEK, ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK

A fejezetben ismertetem a kísérleti környezetet, a felhasznált eszközöket és munkadarabokat. Bemutatom az előkísérleteket, azok tapasztalatait és az ezek által létrejött végleges kísérlettervet, továbbá a kísérlet menetét és a kapott adatok kiértékelési módszereit.

3.1. Kísérleti környezet és eszközök

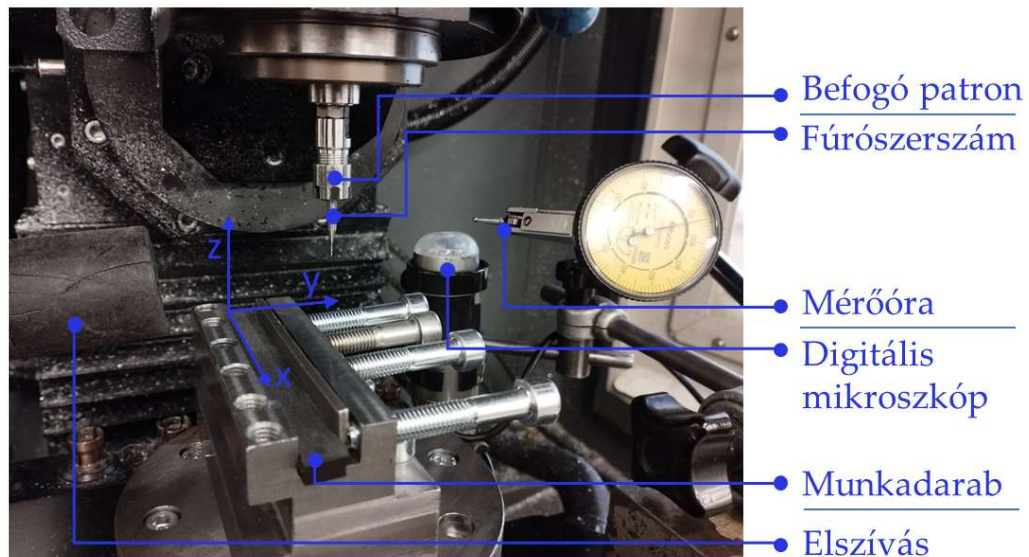
A kutatás során mikrofuratokat készítettem, ezt figyelembe kellett venni a szerszámgép kiválasztásánál. A kicsi szerszámtér mértéke miatt magas – néhány tízezres nagyságú - főorsó fordulatszámra volt szükség a kellő forgácsoló sebesség elérése érdekében. Emiatt az NCT VH7C-130 LINEAR öttengelyes CNC marógépet választottam, aminek a maximális főorsó fordulatszáma 60000 fordulat/perc.

A furatokat SECO SD26-0.50-3.20-3R1 típusú $d=0,5$ mm átmérőjű keményfém mikrofúróval készítettem (**1. sz. melléklet**), ezekből 13 darab állt rendelkezésre, T1...T13 jelöléssel. Előzetesen mindegyik szerszámtér megvizsgáltam egy Olympus SZX16 sztereóbinokuláris fénymikroszkóppal 115x névleges nagyítással. Élhibát, kopottságot nem figyeltem meg egyik szerszámtér esetén sem. A szerszámtérek nem lehetett közvetlenül befogni a szerszámgép tokmájába, ezért befogó patronra kellett alkalmazni. A szerszámtér minimalizálása okán a szerszámtér befogást többször megismételtem, a **2. számú mellékletben** jelölt módon.

A kutatás során kétféle munkadarabot használtam, az előkísérletek során egy epoxi mátrixú UD-CFRP anyagot, majd a végső kísérletekhez vinil mátrixú UD-CFRP anyagot, melynek alsó és felső szélső rétege multiaxiális elrendezésű. A kísérletekhez felhasznált vinil mátrixú UD-CFRP kompozit mechanikai tulajdonságai megegyeznek a Geier Norbert doktori értekezésében közöltekkel [25]. A munkadarab és a szerszámgép közötti rögzítést egy marókészülék biztosította.

A szerszámtér kopottságának dokumentálására Dino-Lite típusú AM413T5 és AM413ZT jelű digitális mikroszkópokat használtam, ezeket mágnes talpas állványok segítségével rögzítettem a munkaasztalra. Ugyanígy rögzítettem a Mitutoyo típusú HER320 jelű mérőórát, mellyel a szerszámtér mértékét tudtam mérni.

A száraz megmunkálás miatt a forgácsolás során ügyelni kellett a keletkező forgács és por elszívásáról, melyek károsak mind a kezelő személyzet egészségére, mind a szerszámgép állapotára. Az elszívást Nilfisk GB 733 típusú ipari porszívóval, illetve a Kärcher K1000 típusú porszívóval oldottam meg. A kísérleti környezet a **3-1. ábrán** látható.



3-1. ábra: A kísérleti elrendezés

3.2. Előkísérletek

Az előkísérletek célja az előzetes kísérletterv vizsgálata, a kinyerhető adatok és azok kiértékelhetőségének megismerése, valamint a furatdarabszám nagyságának és a képkészítés módjának és gyakoriságának meghatározása volt.

Elsősorban a szerszámkatalógus alapján beállított technológiai paraméterek helyességét ellenőriztem, a forgácsolás során nem tapasztaltam semmi rendelleneset, illetve a furatokról és szerszámról készült képek alapján kielégítőnek találtam a kezdeti beállításokat.

A kezdeti kísérletterv szerint egy folytonos és két kategorikus faktort is vizsgáltam volna. A folytonos faktorként az előtolást, míg kategorikus faktorként a munkadarab oldalait és a fúrási technológiát tekintettem, ezeket sorban 3-3-2 szinten vizsgálva. Az elsődlegesen kutatott faktor az előtolás volt, így a szerszámkatalógus alapján beállított értéknél magasabb értékeket vizsgáltam, amivel a céloom jelentős szerszámsérülés vagy akár szerszámtörés elérése volt, ezáltal egy felső korlátot tudtam volna meghatározni. A javasolt előtolási értéknél lényegesen nagyobb szinten se tapasztaltam jelentős sérülést a szerszámon, így a mintavétel terjedelmét növeltem meg egy akkora szintre, ahol már lényeges szerszámkopást vagy -törést feltételeztem. A furatok darabszámát több lépésben növeltem, majd a munkadarabon elférő furatok számát és a növekvő furat darabszámot figyelembe véve meghatároztam az elkészítendő furatok számát szintenként. A szerszámkopás helyes megfigyelése és a kapott eredmények összehasonlíthatósága miatt adott előtolási szinthez különböző szerszám tartozott. Ezek a szerszámok korábban nem voltak használva, így élhíbat vagy kopottságot egyikben se fedeztem fel. Ezalapján vizsgáltam más előtolási szinteken a szerszámot és a furatokat, mivel a furatok számának terjedelme egészen nagy volt, így a kiértékelés egyszerűsítése érdekében csak ezt a faktort alkalmaztam.

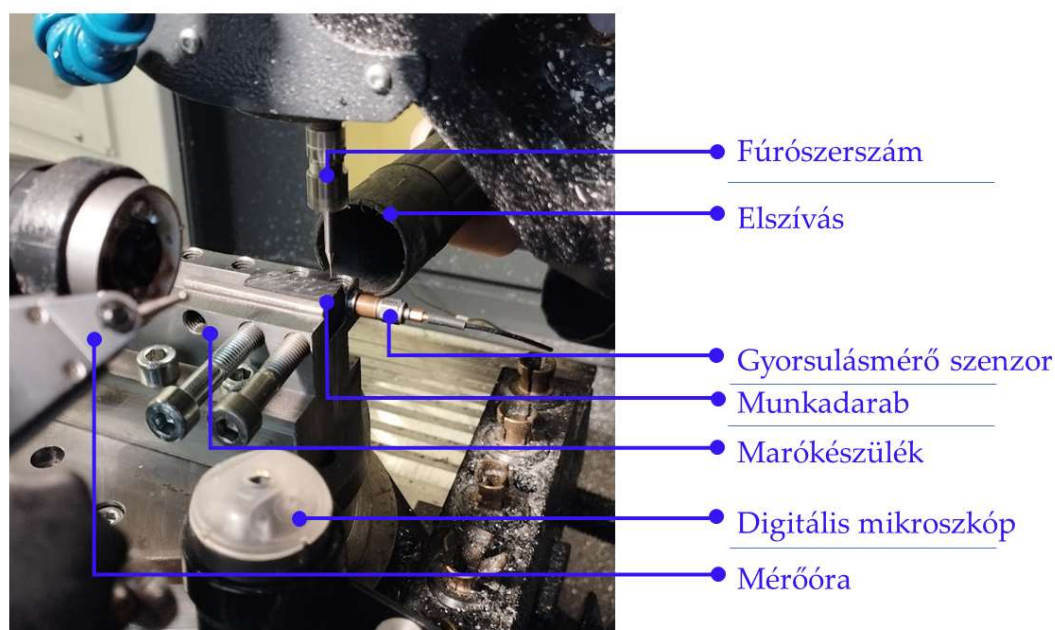
A növekvő furatdarabszám miatt célszerű volt egy nagyobb megmunkálható felületű munkadarab beszerzése, ez viszont az anyag és a szerkezet megváltoztatásával is járt, az eredeti epoxi mátrixú UD-CFRP helyett vinil mátrixú UD-CFRP anyagot használtam, melynek alsó és felső szélső rétegei multiaxiálisak voltak (**3. sz. melléklet**). Utóbbi munkadarabot darabolni kellett, ezt egy keretes fűrészszel oldottam meg.

A szerszámról való kép készítésére két digitális mikroszkópot használtam, egy a z tengellyel párhuzamosan alulról fotózta a szerszámot, a másik az y tengellyel párhuzamosan oldalról, az utóbbi elrendezésben készült képekből nem kaptam felhasználható adatot, így a továbbiakban csak az első elrendezésben használtam az egyik digitális mikroszkópot. Az előkísérletek során megfigyeltem a szerszámkopás mértékét és meghatároztam, hogy hány furat elkészítése után kell a szerszámot lefotózni.

A patronos befogásnál jelentős mértékű szerszámütést figyeltem meg (> 0.1 mm), ezért egy algoritmust készítettem (**2. sz. melléklet**) az ütés mérésére, az alapján elvégeztem a szerszámütés beállításokat és méréseket. Ennek eredményeképpen a 2-es sorszámú patronos befogót választottam a további fúrásokhoz. A szerszám befogásánál így mindig az algoritmus alapján történt a szerszámütés mérése, beállítása.

A szerszámra rátapadt törmelékkel levegővel fújtam le, így azonos tisztaságú, jobban kiértékelhető képeket kaptam a szerszámkopásról.

Az előkísérletek során Deltatron típusú 4518-001 jelű gyorsulásmérő szenzorral, NI USB 4431 adatgyűjtővel és KISTLER 5080 töltéserősítővel vizsgáltam a forgácsolás során keletkező rezgéseket. Az adatokat LabView környezetben kaptam meg, ezeket exportáltam Matlab környezetbe, ahol a jelfeldolgozó eszköztár (Signal Processing Toolbox) segítségével digitális jelszűrést végeztem. A kapott adatokat nem tudtam érdemben felhasználni, nem találtam karakterisztikus pontokat, hatásokat melyek alapján magáról a fúrási folyamatról többet tudtam volna meg, így az előtolás és a keletkező rezgések kapcsolatát a továbbiakban figyelmen kívül hagytam. Az előkísérleti környezetet a felszerelt gyorsulásmérő szenzorral a **3-2. ábra** szemlélteti.



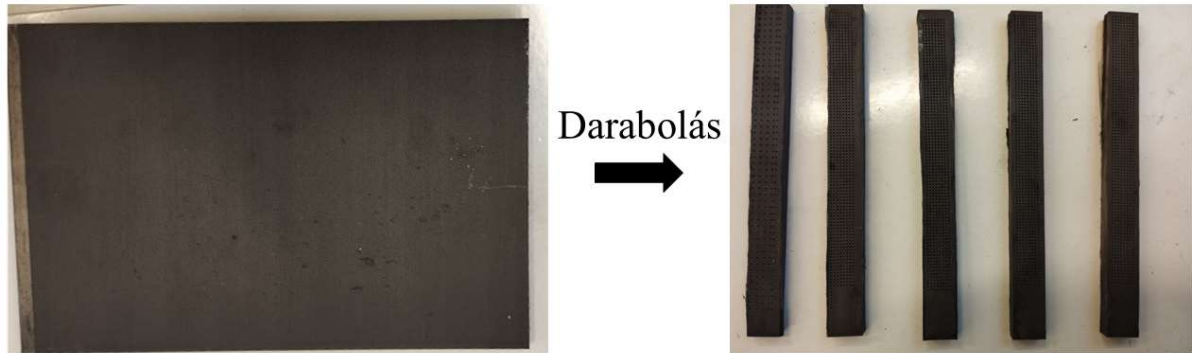
3-2. ábra: Előkísérleti elrendezés gyorsulásmérő szenzorral

3.3. Kísérletterv

A kezdeti kísérlettervből és az előkísérletek tapasztalataiból előállítottam azt a kísérlettervet, mely alapján hatékonyabbnak, célszerűbbnek találtam a végső kísérlet elvégzését. A faktoriális kísérletterv megmaradt, viszont csupán egy folytonos paraméter szintjét vizsgáltam. Ez az előtolás volt, melyet 3 szinten ($f_1=8\text{ }\mu\text{m}$, $f_2=16\text{ }\mu\text{m}$, $f_3=24\text{ }\mu\text{m}$) vizsgáltam. A beállított paraméter alapján kettő értéket vizsgáltam, az egyik a szerszámkopás mértéke, a másik a sorjaképződés mértéke volt. Az f faktor 3 szintjét 3 különböző szerszámon (T1, T2, T3) vizsgáltam, így biztosítva az egyenlő kiinduló feltételeket. A furatpozíciókat nem randomizáltam, ugyanis a sorjaképződés időbeni változását vizsgáltam és randomizált furatpozíciókkal sokkal hosszabb és bonyolultabb lett volna mind a furatok elkészítése, mind azok kiértékelése. Ugyanígy az előtolási szint- szerszám kombináció sem lett randomizálva, a hosszabb és bonyolultabb folyamatok miatt, továbbá a szerszámkopások összevetése azonos fúrási sorrend és feltételek mellett pontosabb képet adhat, mint randomizált esetben.

3.4. Kísérlet előkészítése és menete

A kísérlet előkészítése során elvégeztem a vinil mátrixú UD-CFRP darabolást, hogy megfelelő méretű és számú munkadarab legyen, ezt ábrázolja a **3-3. ábra**. Ezek után a marókészülékkel rögzítettem az első munkadarabot a munkatérben.



3-3. ábra: A kezdeti CFRP munkadarab és a méretre vágott munkadarabok (a furatok elkészítése után fényképezve)

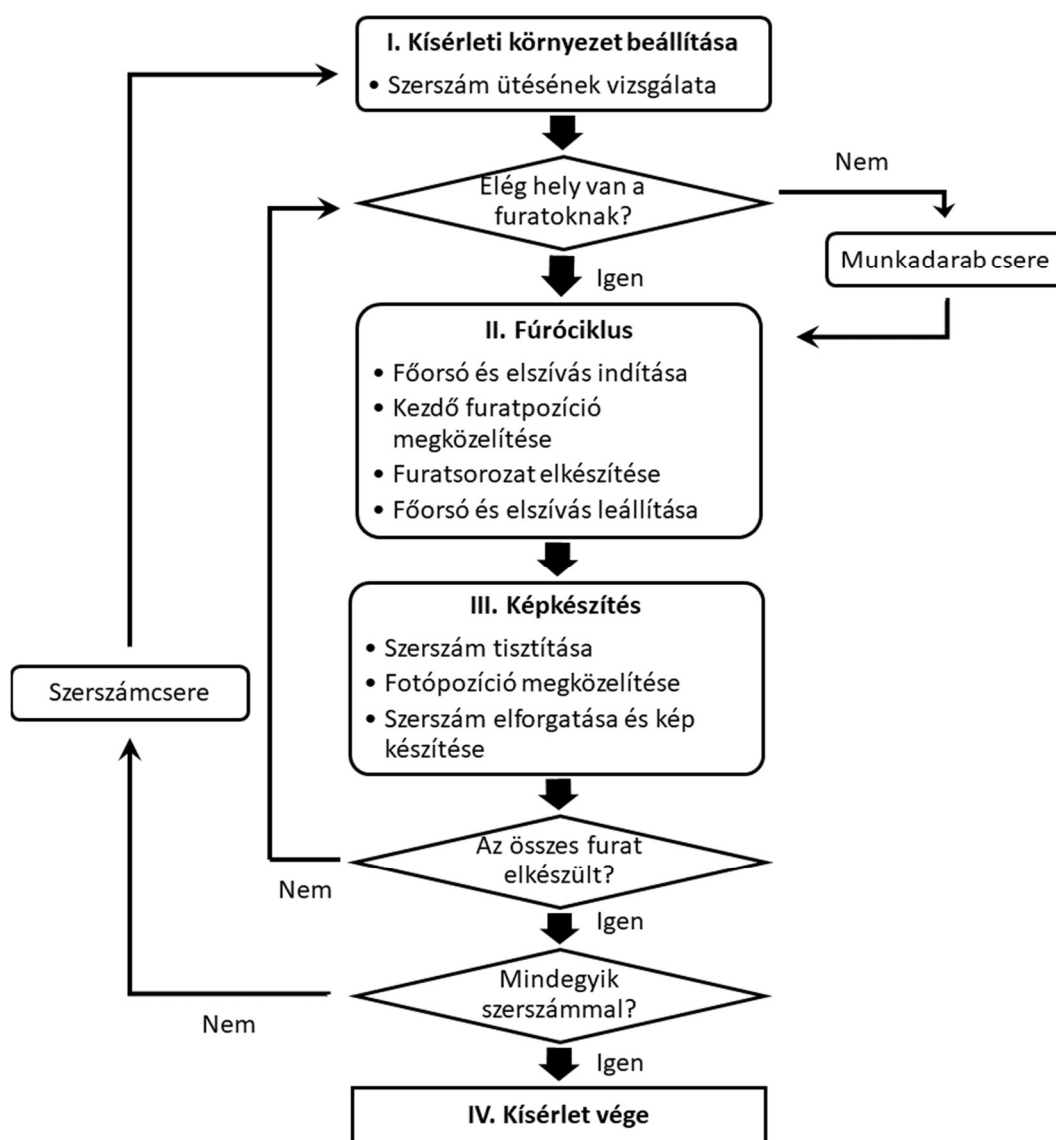
A digitális mikroszkópot és a mérőórát rögzítettem a munkaasztalra mágnesalpas állványok segítségével. Az asztal mozgatásával ellenőriztem, hogy a munkadarab pozíciót meg lehet közelíteni úgy, hogy a munkatérben levő eszközök között mindig biztonságos távolság legyen. Ezek után a 2-es számú patronba befogtam a fúrószerszámot, az algoritmus alapján lemértem és beállítottam az ütest. A szerszám rögzítése után nullpontbemérés következett, illetve a digitális mikroszkóp felé küldött szer számnak beállítottam a fókuszát és ezt a koordinátát rögzítettem, mint fényképezési pont. A fényképezési pont koordinátája be lett írva a G-kódos fúróciklus programjába, így a digitális mikroszkóp és a szerszám helyzetének beállítása automatizálva lett. A G-kódos fúróciklust biztonsági távolság hozzáadásával ellenőriztem. Az elszíváshoz szükséges porszívót odakészítettem a szerszámgép mellé. Az előkészítés utolsó lépéseként ellenőriztem az eszközök meglétét, a G-kódot, a digitális mikroszkóp laptop-hoz való csatlakozását, illetve a kísérleti elrendezés helyességét.

A fúrási műveletek $v_c = 50$ m/min forgácsoló sebességgel történtek, a furatmélység 2 mm értékre lett beállítva, a munkadarabon pedig a furatközéppontok távolsága 1-1 mm volt x és y irányban is. A G-kódos programban (**4. sz. melléklet**) a furatok X irányban készültek, majd az adott sor elkészülte után Y irányú pozicionálással újabb sor fúrása kezdődött. A szerszámról 30 furatonként történt képkészítés, a G-kódos programba beépített dialógusokkal történtek a ciklus tervezett megszakításai, ahol a szerszám tisztítását, a fényképhelyzet beállítását és képek rögzítését kellett manuálisan megoldani.

A kísérletet és annak előkészítését Dr. Geier Norbert adjunktussal végeztem. A kísérlet során a feladatok elosztása az alábbi volt:

- Dr. Geier Norbert: Szerszámgép kezelése, szerszám tisztítása sűrített levegővel
- Seprős Szilárd: Porszívó kezelése, mikroszkópi képek rögzítése, jegyzőkönyv vezetése

A fúrási kísérlet egy megadott ciklus alapján ment ennek folyamatábráját a **3-4. ábra** szemlélteti. A kísérlet során alkalmazott változtatásokat, hibákat, megfigyeléseket és javaslatokat a kísérleti jegyzőkönyvben rögzítettem (**5. sz. melléklet**). A fúrási ciklusok befejeztével és az adatok mentése után az eszközök és munkadarabok el lettek pakolva, a mérési környezet eredeti állapotban vissza lett adva.



3-4. ábra: A kísérlet menetének folyamatábrája

3.5. Kísérlet kiértékelése

Ebben a részben a szerszámról és munkadarabról való adatszerzés módszereit mutatom be. Mindkettő esetben képi adatokkal dolgoztam, így a fényképezési módszereket és a készült képek feldolgozását mutatom be.

3.5.1. SZERSZÁMKOPÁS KIÉRTÉKELÉSE

A kísérlet egyik célja a szerszámkopás megfigyelése volt különböző előtolási értékeknél. A szerszámkopást elsődlegesen az élsugár vizsgálatával lehet megfelelően nyomon követni [26], hiszen a CFRP elsődlegesen abrazívan koptatja a szerszámot[58]. Mikrofuró szerszám esetén meglehetősen körülményes az élsugár vizsgálata, ugyanis megfelelő nagyítású mikroszkóp és megfelelő élhelyzet beállítása szükséges. Ezért választottam azt a módszert, melynél a kopott szerszámél lekerekedésének vetületét vizsgálom meghatározott élszakaszon, ugyanis ezesetben a mikroszkóp és a furórszerszám helyzete egyszerűen beállítható (a mikroszkóp a szerszámtengellyel párhuzamosan, alulról készít képet). A kísérlet során célszerű volt az élkopás dokumentálása olyan módon, hogy a furórszerszám egy befogásban ki tudja fúrni az összes furatot, tehát ne kelljen eltávolítani a szerszámgépből. A képek készítéséhez a tanszéki laboratóriumban megtalálható Dino-Lite AM413T5 digitális mikroszkópot használtam, melyet el tudtam helyezni a munkaasztalon, ezáltal a fénykép készítés részben automatizált módon történt. A szerszámkopás digitális mikroszkóppal való vizsgálata a **3-5. ábrán** látható. Az azonos mikroszkópi képek készítése érdekében azonos fényviszonyra, megtisztított szerszámra és azonos szöghelyzetbe állításra volt szükség. Az azonos fényviszonyt a digitális mikroszkóp beállított erősségű fénye adta meg, a szerszámgép belső megvilágítása le lett kapcsolva a fénykép készítésénél. A szerszámok fénykép készítés előtt sűrített levegővel lettek megfújva, így kvázi azonos tisztaságúak és törmelék mentesek lettek.

A kapott képeket a DinoCapture programban rögzítettem és ugyanebben a környezetben végeztem el a szerszám élkopottságának vizsgálatát. A forgácsoló él bizonyos területén vizsgáltam a lekerekedés vetületének a vastagságát, ezeken a részeken 3 mérést végeztem el és az átlagukat vettem az adott képhez tartozó kopási értéknek, ezt mutatja az **4. egyenlet**.

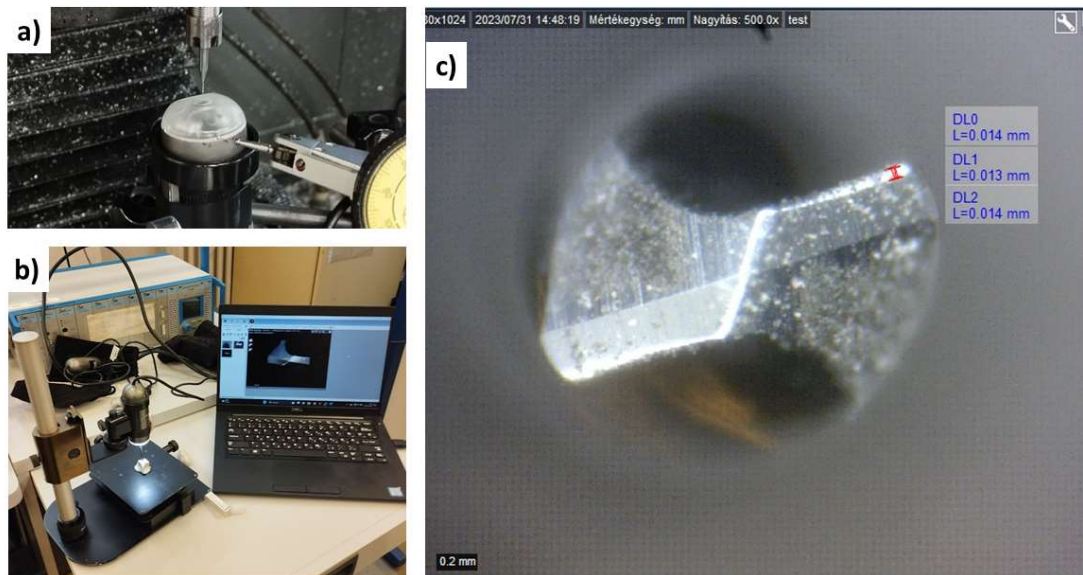
$$W = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s W_i \quad (4)$$

W = A szerszámél lekerekedésének vetülete (μm)

s = Adott szerszámképen végzett mérések (-); ($s=3$)

A kapott értékeket ábrázoltam grafikonon valós értékekkel és kétszomszédos mozgóátlaggal is, utóbbi jobban ábrázolja a szerszámkopás folyamatát. Az értékeket a Minitab statisztika szoftverben dolgoztam fel varianciaanalízist (ANOVA) végezve. Az ANOVA vizsgálathoz tartozó nullhipótezisem az volt, hogy a vizsgált átlagok nem egyenlők (tehát a hatás szignifikáns), amennyiben a P valószínűségi érték kisebb 0.05-

nél. Amikor a nullhipotézist elvetem, akkor a hatást nem tekintem szignifikánsnak és $P > 0.05$, amennyiben a nullhipotézis elvetését megtagadom, akkor a hatás szignifikánsnak tekinthető és $P < 0.05$ értéket vesz fel.

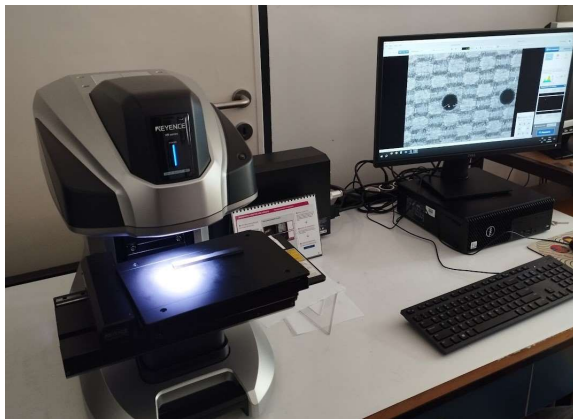


3-5. ábra: **a)** A szerszám fotópozícióban (kikapcsolt megvilágítással), **b)** Előkép megjelenítése a mikroszkóp beállításakor, **c)** A szerszámél megjelenítése és elemzése a DinoCapture programban

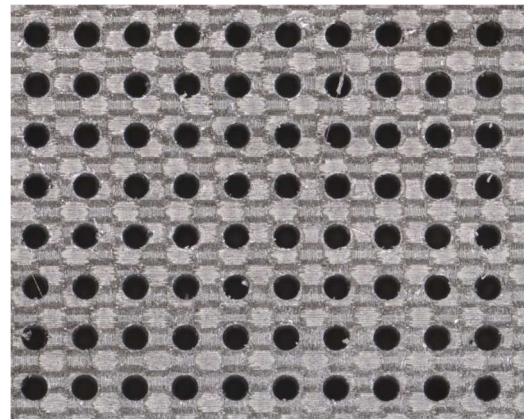
3.5.2. FURATTERÜLET KIÉRTÉKELÉSE

Az elkészült furatokon a furat sorjamentes területének változását vizsgáltam különböző előtolási szinteken, illetve folyamatos szerszámkopás mellett. A kísérlet során több mint 3000 furat készült, így az előkísérletektől eltérő képkészítési módot kellett alkalmazni, hogy ne egyesével kelljen a furatképeket rögzíteni.

A vizsgálatokhoz egy Keyence VR-5200 3D-s digitális profilométert használtam. Ez az eszköz pár perc alatt elkészítette egy munkadarab összes furatáról a képet, megfelelő nagyításban. A képkészítés során 2D-s és 3D-s felvételeket is készített az eszköz. Az elemzés során a 2D-s képeket használtam fel, mivel azok vizsgálatára készítettem előzetesen kiértékelő programot, illetve a 3D-s elemzés esetén az anyag multiaxiális felső rétegei zavaró hatással voltak a mért sorjamagasság és sorjaterület profilokra. A 3D-s képek felhasználása kisebb furatszám és síkabb felület esetén több adat megszerzését lehetővé tette volna, mint például a sorja magasságát, vagy delaminációs zóna meghatározását. A Keyence VR-5200 3D-s digitális profilométert és a mérési elrendezését a **3-6. ábra** mutatja be, az elkészített kétdimenziós kép a **3-7. ábrán** látható.



3-6. ábra: Keyence V2-5200 3D-s digitális mikroszkóp



3-7. ábra: A furatokról készült kombinált 2D-s kép

Az így kapott képeket Matlab környezetben, a képfeldolgozó eszköztár (Image Processing Toolbox) segítségével dolgoztam fel. A célom a programmal a binarizált furatképekből a furatterület meghatározása volt. Az általam írt program (6. sz. melléklet) a fehér képpontokat számolja meg, ami adja a furat sorjamentes területének képpont számát. A milliméter/képpont arány tudatában meg lehetett határozni a furat sorjamentes terület értékét mm²-ben is. Mivel a kapott képpont szám és a keresett érték is terület jellegű, így az egydimenzióban meghatározott arányszám négyzetes értékét kellett használni. Ez az átváltás az 5. egyenletben látható, mely az adatok feldolgozásakor fel lett használva.

$$A_{free} = A_p \cdot p_{scale}^2 \quad (5)$$

A_{free} : A furat sorjamentes területe (mm²)

A_p : A program által számolt sorjamentes terület (képpont)

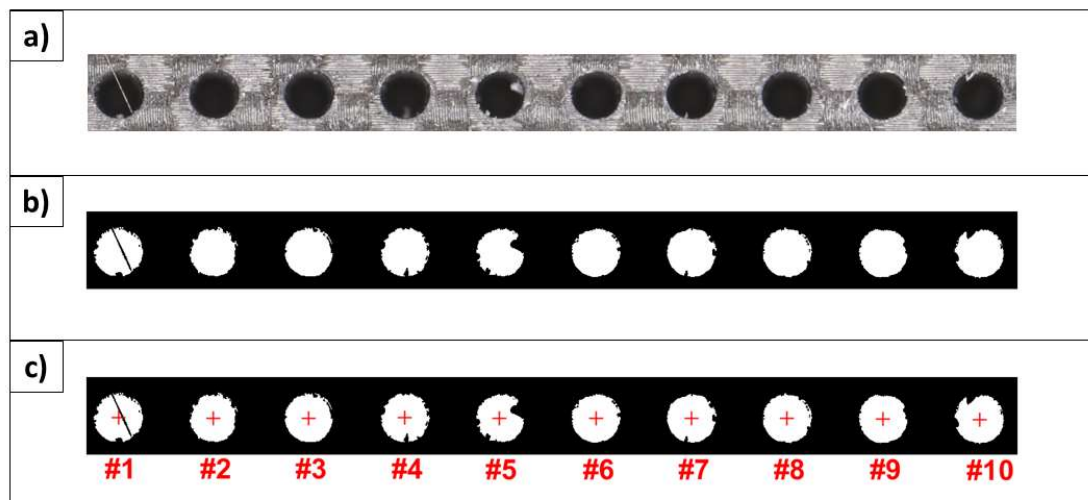
p_{scale} : Hosszérték/képpont arány (mm/képpont)

A képfeldolgozó programkód felépítése az alábbi:

1. Kép betöltése a programba
2. Kép binarizálása
3. Binarizált kép hibáinak tisztítása
4. Körillesztés a furatra
5. Furatsorrend detektálása
6. Adatok exportálása

A programkód két fő feladata a megfelelő binarizált kép előállítása és a képen lévő furatok helyes sorrendben történő detektálása volt. A beállított binarizálási paraméterekkel és szűrési módszerrel csak a furatok lettek megkülönböztetve, így a legtöbb esetben tisztán a furatok képpont számát kaptam meg. Egy adott furatsorszámhoz a megfelelő képnek és képi adatoknak kell tartoznia, hogy a valós furatterület változást szemléltetni lehessen. Ezt a furatok detektálásával és annak ellenőrzésével értem el, ezt a folyamatot a 3-8. ábra szemlélteti. Az algoritmus a képpontokat oszloponként

vizsgálja, először az első oszlopot fentről lefelé, majd a második oszlopot ugyanígy és így tovább. A terület észlelése akkor kezdődik, amikor az első fehér képpontot érzékeli a program és addig tart amíg vannak a vizsgált és az előtte lévő oszlopban szomszédos fehér pontok. Ideális esetben, tehát a képpont oszlopokkal és -sorokkal párhuzamos tengelyek és azonos furatterületek esetén, tökéletes sorrendben detektálná az algoritmus a furatokat. Esetemben utóbbi feltétel nem teljesült, így a furathibák miatt hibás, a valóságtól eltérő detektálás alakult ki, például a tizedik furat lett elsőként észlelve, ez a hiba hatással volt így az utána kialakuló sorrend helyességére is. A problémát a képek feldarabolásával oldottam meg, így egy kép csupán egy sornyi furatot tartalmazott, de a furatsorrend detektálása megfelelő volt és a valós furatsorrend szerint tudtam az adatokat exportálni a további feldolgozáshoz, kiértékeléshez.



3-8. ábra: **a)** A mikroszkópi képből kivágott sor, **b)** A binarizált és szűrt kép, **c)** A detektált furatok sor-számmal ellátva

A vágott képeket meghatározott sorrendben mentettem el, így azok programba való betöltése is a valós furatsorrendre épült. Az adatexportálás előtt ellenőrzésre szolgált, hogy tudtam hány észlelt furatnak kell a képen lennie, amennyiben a programban előhívott területi tulajdonság táblázat (regionprops table) több észlelt részt mutatott, úgy átnéztem a detekciót. Pár esetben egy-egy el nem szakadt szál miatt egy furatra két területet észlelt az algoritmus, ezeket az értékeket manuálisan javítottam a táblázatban. A körillesztés funkciót ellenőrzés céljából használtam, megvizsgáltam az illesztett kör helyességét, illetve kigyűjtöttem az illesztett kör sugárértékeit, így összetudtam hasonlítani a program által generált kör és a furat területét, de a továbbiakban inkább csak a valós adatok elemzésével foglalkoztam. A kapott adatokat így egy táblázatban tudtam összegyűjteni a valós fúrési sorrend alapján, előtolás szerint külön vezetve.

A kapott adatokból a furatok minőségének jellemzésére a sorjamentes területfaktor (F_{bf}) mérőszámot használtam. Ez egy dimenzió nélküli érték, mely a nyers mm² területérték helyett a sorjamentes rész arányát mutatja meg. Ezt a mérőszámot a kapott furatterület és a nominális furatterület hányadosa adja meg, ez látható a **6. egyenleten**.

$$F_{bf} = \frac{A_{free}}{A_{nom}} \quad (6)$$

F_{bf} : Sorjamentes területfaktor (1)

A_{free} : Furat sorjamentes területe(mm²)

A_{nom} : Furat névleges területe (mm²)

A **6. egyenlet** alapján a furat akkor tekinthető sorjamentesnek, ha $F_{bf}=1$. Az eredmények között található néhány $\alpha>1$ területfaktor értékű furat, ez a furatátmérőn kívül elszakadt szálak detektálásból adódott. A kívül elszakadt szálak leárnyékoltak területet, vagy a zsákfuratokhoz hasonló feketeségi fokkal rendelkeztek, ezáltal jött létre adott esetben binarizálási hiba.

A szerszámkopás kiértékeléséhez hasonló módon, a furatot jellemző értékeket is a Minitab statisztikai szoftverben elemeztem ki ANOVA vizsgálattal. Az ANOVA vizsgálathoz felállított nullhipótezisem az volt, hogy a vizsgált átlagok nem egyenlőek (tehát a hatás szignifikáns), amennyiben a P valószínűségi érték kisebb 0.05-nél. Amikor a nullhipótezist elvetem, akkor a hatást nem tekintem szignifikánsnak és $P > 0.05$, amennyiben a nullhipótesis elvetését megtagadom, akkor a hatás szignifikánsnak tekinthető és $P < 0.05$ értéket vesz fel.

4. EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE ÉS ÉRTELMEZÉSE

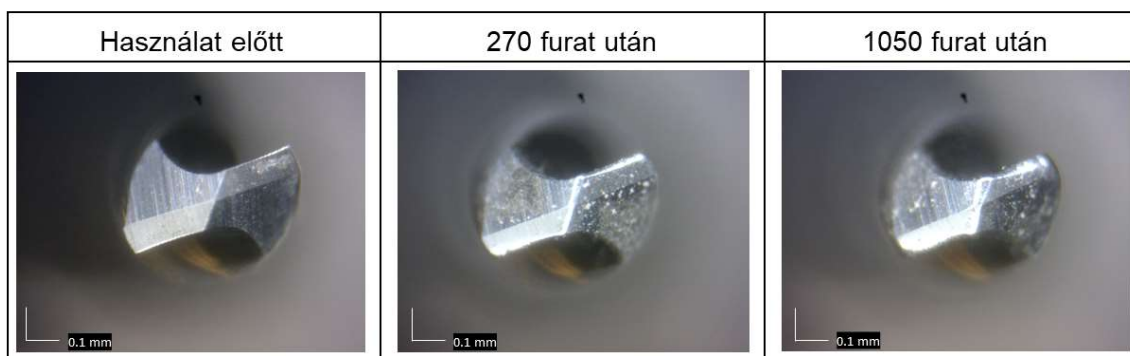
Ebben a fejezetben ismertetem a kísérletek során gyűjtött adatokat és az azok feldolgozásából kimutatható eredményeket és hatásokat, majd értékelem a felhasznált technológiát.

4.1. Szerszámkopás

Kísérletem egyik célja a szerszámkopás vizsgálata volt CFRP kompozitok mikroforgácsolása során, ennek eredményeit mutatom be a következőkben. A szerszám folytonos kopása hatással lehet egy kísérlet során a vizsgált értékekre, így a kopás hatásának vizsgálata forgácsolási kísérletek esetén szükséges lehet. A CFRP kompozitok abrazív koptató hatása és a mikrofúrás forgácsolási mechanizmusa miatt a kísérlet során indokolt volt a szerszámkopás vizsgálata.

A mikrofúró szerszám megfigyelése majd kiértékelése a digitális mikroszkóppal készített képek alapján történt. A kísérletek során folyamatosan rögzítve lettek a képek, így a szerszám gép mellett elhelyezett laptopon nyomon tudtam követni a szerszám állapotát. Súlyos szerszámsérülést vagy szerszámtörést nem tapasztaltam egyszer sem, így a szerszám állapota nem indokolta a kísérlet leállítását.

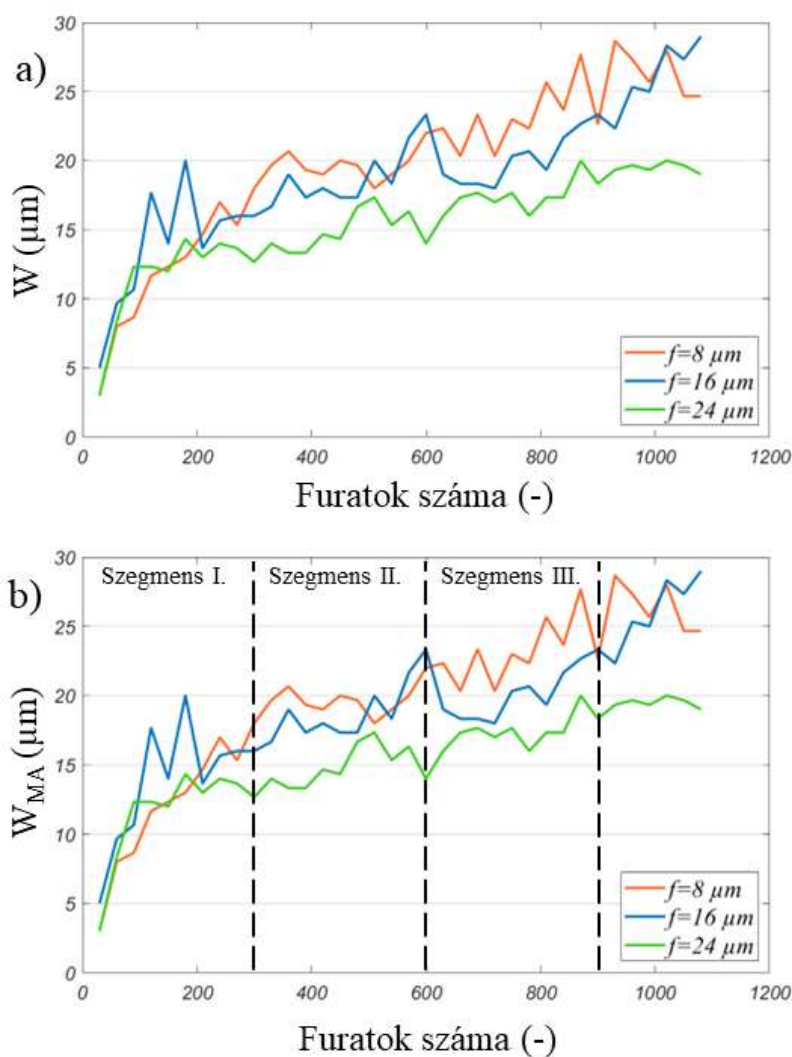
A kopási folyamatot szemlélteti a **4-1. ábra**, melyen a kopottsági állapotot lehet megfigyelni a szerszámmal elkészített furatok számának ismeretében. Az ábrán látható a visszacsillanó részek vastagodása, melyből a szerszám kopására, az élsugar lekerekedésére lehet következtetni. A kopott szerszámél szakaszokon látható, hogy jobban kopnak a nagyobb sugáron elhelyezkedő részek, melyeknél a forgácsoló sebesség értéke nagyobb.



4-1. ábra: A szerszám kopásának folyamata a mikrofúrási kísérletek során

A nyers adatok feldolgozásából kinyert élkopottsági értékeket táblázatba gyűjtöttem össze (**7. sz. melléklet**), majd grafikonon ábrázoltam (**4-2. ábra**). A jobb ábrázolás érdekében mozgóátlag görbét is készítettem, mely részben megszűri a fotózási és mérési hibákat. A fotózási és mérési hibák ugyanis egy olyan görbét mutattak, melyben adott pontok között csökkent az élkopottság vastagsága, mely elvileg helytelen, a szerszámkopásnak egy monoton növekvő görbét kell mutatnia, ezt az elvet a mozgóátlagos

görbe jobban prezentálja. A két grafikon a **4-2. ábrán** látható. Az ábrán megfigyelhető, hogy a három előtolási értékhez rendelt sorszámozott szerszámokhoz ($f=8\text{ }\mu\text{m}$ - T1, $f=16\text{ }\mu\text{m}$ - T2, $f=24\text{ }\mu\text{m}$ - T3) tartozó kopási görbék megkülönböztethetőek egymástól. A legnagyobb előtolási értékhez tartozó szerszámnál figyelhető meg a legalacsonyabb kopás, míg a legalacsonyabb előtolásnál láthatóak a legmagasabb szerszámkopási értékek.



4-2. ábra: a) A szerszámkopási értékek furatdarabszám szerinti feltüntetése; b) A szerszámkopás mozgóátlagos görbéje és a meghatározott kopási szakaszok

Mindkét grafikonon megfigyelhető, hogy a fúrási kísérletek első harmadában eltérő jellegű a szerszámkopás változása, ezért a **4-2. ábra b)** részén látható módon kopási szegmensekre osztottam a grafikont. A kopási szegmensek meghatározásánál az egyenlő furatdarabszámot és a kopási értékek változásának mértékét vettem figyelembe (**8. sz. melléklet**). Az első szegmenst az 1-300. furatig tartó részen határoztam meg, a görbe ezen a részen leginkább egy monoton növekvő félpárola alakjára ha-

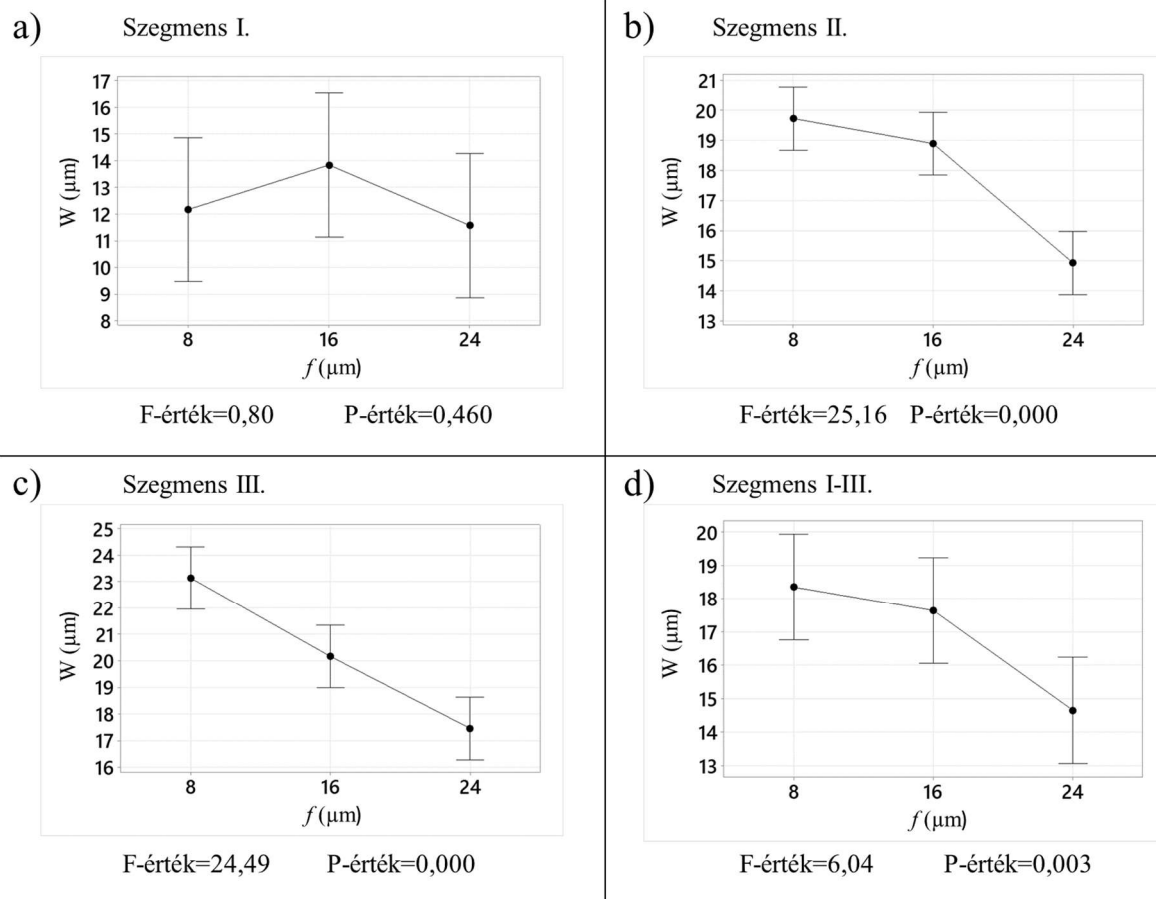
sonlít, a szerszámkopás változásának mértéke egyre csökken. Az I. szegmens összeegyeztethető a jellegzetes kopásgörbe kezdeti bekopás szakaszával. A második és harmadik szakasz a 301-600. és a 601-900. furatig tartó rész, ez a két szakasz egészen hasonló egymáshoz, görbéjüknek lineáris jellege van, a szerszámkopás változásának mértéke kvázi azonos az egész szakaszon. A II. és a III. szegmens összeegyeztethető a kopásgörbe egyenletes kopási szakaszával, ebben az esetben két szegmens alkot egy kopási szakaszt. A túlkopás szakasza egyértelműen nem látszik, nem állapítható meg. Az első kopási szegmens ránézésre is egészen eltér a második és harmadik szegmens-től, ha megfigyeljük a szerszámkopás mértékét azt vehetjük észre, hogy az első szegmensben mért élkopottság kvázi megegyezik, de inkább nagyobb, mint a második és harmadik szegmensben együttevén. A teljes szakaszon és a három kopási szegmensben varianciaanalízis vizsgálatot végeztem a Minitab statisztikai szoftverben. Ennek eredményeit a **4-1. táblázatban** tüntetem fel, a táblázatban láthatóak a vizsgálat F-próba és P szignifikanciaszint értékei, illetve az adott faktorokhoz tartozó szerszámkopás átlag és szórás értékeit.

4-1. táblázat: ANOVA-tábla $W(\mu\text{m})$ vs. $f(\mu\text{m})$; különböző szakaszokon

<i>Szegmens</i>	<i>F-érték</i>	<i>P-érték</i>	<i>Faktor</i>	<i>$W_{\text{átlag}} (\mu\text{m})$</i>	<i>$W_{\text{szórás}} (\mu\text{m})$</i>
I.	0,80	0,460	8	12,17	4,57
			16	13,83	4,36
			24	11,57	3,44
II.	25,16	0,000	8	19,733	1,075
			16	18,900	2,161
			24	14,933	1,421
III.	24,49	0,000	8	23,133	2,223
			16	20,167	1,894
			24	17,467	1,146
I.-III.	6,04	0,003	8	18,34	5,49
			16	17,633	4,025
			24	14,656	3,278

A szórási értékek megerősítik a grafikonon látottakat, tehát minél későbbi kopási szegmenst figyelünk, a szórási értékek – az élkopottság megváltozásának értékei – annál kisebbek, ezt a grafikon laposodása, lineárisához való tartása mutatja ki. A vizsgálat P-értékeinél észrevehetjük, hogy csak az első kopási szegmensnél nagyobb a P értéke a 0.05-ös valószínűségi értéknél, így elvetem a nullhipotézis csak ezen a szegmensben, az átlagok egyenlőnek tekinthetők. Az átlagok egyenlősége ezen a részen azt jelenti, hogy a szerszámkopásra nem volt szignifikáns hatással az, hogy melyik előtolási értékkel forgácsoltunk. A második és harmadik szegmenseket és a teljes kopási szakaszt figyelembe véve a nullhipotézis elvetését megtagadom, az átlagok különbözőek, így

szignifikánsan más szerszámkopási eredményeket kaptam különböző előtolási értékeken. A varianciaanalízis eredményeit a **4-3. ábra** szemlélteti a konfidencia intervallumokkal.



4-3. ábra: Az előtolás hatása a szerszámkopásra a) Az első kopási szegmensen (1-300. furat); b) A második kopási szegmensén (301-600. furat); c) A harmadik kopási szegmensén (601-900. furat); d) A teljes kopási szakaszon

A **4-3. ábra** és a **4-1. táblázat** adatai alapján belátható, hogy az előtolás növelése kisebb mértékű szerszámkopást eredményezett, kivéve a kísérletek elején azon a bekopási szakaszon, ahol a szerszámkopás mértékét kvázi azonosnak lehet tekinteni.

A kísérlet során készített és vizsgált nagy furatszámra köszönhetően jobban meg lehet ítélni az előtolás és a szerszámkopás kapcsolatát, egy 100-200 furatot tartalmazó vizsgálat alapján másképp lehetett volna megítélni az előtolás hatását a szerszámkopásra. Ugyanakkor a bekopási szakasz kvázi azonossága elérhetővé teheti hasonló paraméterek mellett az előtolás, mint faktor, szélesebb tartományban való beállítását.

Az eredmények alapján bebizonyosodott, hogy az előtolás értéke és az elkészített furatok száma hatással van a szerszám kopására. A forgácsolási folyamat paraméterei (előtolás, furatszám) és a mért adat (szerszámkopás) közötti összefüggések leírását matematikai modellek generálásával közelítettem. A kopási értékekre regressziós egyeneseket illesztettem, ezeket a determinációs együttható (R^2) értékeikkel jellemeztem. A szerszámkopás leírására három különböző matematikai modellt mutatok be,

ezeket három jellemző (egyszerűség, extrapolálás, pontosság) alapján választottam ki. A modelleket előtolásonként a Minitab statisztikai szoftverben állítottam elő, ezeket a **9. számú melléklet** tartalmazza, a kiválasztott és általánosított (előtolástól függő) modelleket röviden ismertetem a következőkben.

A legegyszerűbb közelítés a lineáris regresszió, ennek a modellnek a megalkotása alapvető volt az előtolási értékek által gyakorolt hatás megközelítésére és a további modellekhez kiinduló alapként szolgált. A determinációs együttható (R^2) ennél a modellenél a legkisebb, de mivel ennek van a legegyszerűbb alakja, így ez lehet a legalkalmasabb a folyamatok becslésére, kiindulási alapja lehet a további számításoknak. A modellalkotás során először a három előtoláshoz tartozó lineáris függvényeket implementáltam. A függvényekhez tartozó konstans szorzók közötti eltéréseket az előtolási értékek hatványával fejeztem ki. A lineáris regressziós egyenes esetén az f előtolási érték kitevője negatív, mely nagyobb előtolás esetén kisebb kopást eredményez, ez a kísérlet eredményeivel összhangban áll. A lineáris függvényt a **7. egyenlet** írja le.

$$W_{\text{lineáris}} = W_0 + f^{-0,286} \cdot 0,0337863 \cdot N + 7,23584 \quad (7)$$

$W_{\text{lineáris}}$: A szerszámkopást leíró lineáris függvény (μm)

W_0 : Az új állapotú szerszám élsugarának vetülete (μm)

f : Előtolás (μm)

N : Furatszám (-)

A harmadfokú függvénnyel való leírás egészen jó illeszkedést ad, illetve ez nyújthatja a legjobb előrejelzést. Extrapolálás szempontjából ez adhatja a legjobb eredményt, amennyiben a kísérlet furatszámánál nagyobb tartományon bekövetkező szerszámkopást akarunk becsülni. Ennek az oka, hogy a harmadfokú függvény illeszkedik a legjobban a karakterisztikus kopásgörbére, jelen esetünkben a bekopás és az egyenletes kopás szakaszát tudja prezentálni a modell, melyet a **8. egyenlet** ír le. Az előtolási érték kitevőjének meghatározása a lineáris modellhez hasonló volt, de ebben az esetben a hatványkitevők függtek attól, hogy a szorzó konstans melyik polinomiális taghoz tartozik.

$$W_{\text{harmadfokú}} = W_0 + 3,06449 \cdot 10^{-8} \cdot (f^{-0,21} \cdot N)^3 - 3,22274 \cdot 10^{-5} \cdot (f^{-0,21} \cdot N)^2 + 0,121348 \cdot (f^{-0,21} \cdot N) + 1,53347 \quad (8)$$

$W_{\text{harmadfokú}}$: A szerszámkopást leíró lineáris függvény (μm)

W_0 : Az új állapotú szerszám élsugarának vetülete (μm)

f : Előtolás (μm)

N : Furatszám (-)

A kiértékelés során összehasonlított matematikai modellek közül általánosan a hatványkitevős függvény adta a legpontosabb illeszkedést. Ennek oka az lehet, hogy a hatványkitevős függvény kezdeti meredeksége nagyobb, mint a harmadfokúé, így jobban hasonlít a kezdeti kopás szakaszára, ez pedig a két nagyobb előtolási értékeknél tapasztalt kissé kiugró értékeknél jobb illeszkedést adhat meg. A modell limitációja az,

hogy csak az első két kopási szakaszon (kezdeti bekopás és egyenletes kopás) lehet használni, ugyanis a függvény jellege nem egyeztethető össze a túlkopást prezentáló görbe jellemzőivel. A hatványkitevős modell a **9. egyenleten** látható. A modellben az f megjelenik a furatszám hatványkitevőjében az eddigiekhez hasonló módon, tehát az előtolás növelésével csökkentve a szorzat értékét. A szorzó konstansban viszont pozitív kitevővel látható (ez egy $f/2$ -es szorzattal való összevonása miatt van).

$$W_{\text{hatványkitevős}} = W_0 + \frac{1}{2} \cdot f^{0,58} \cdot N^{\frac{1,07}{\sqrt{f}}} \quad (9)$$

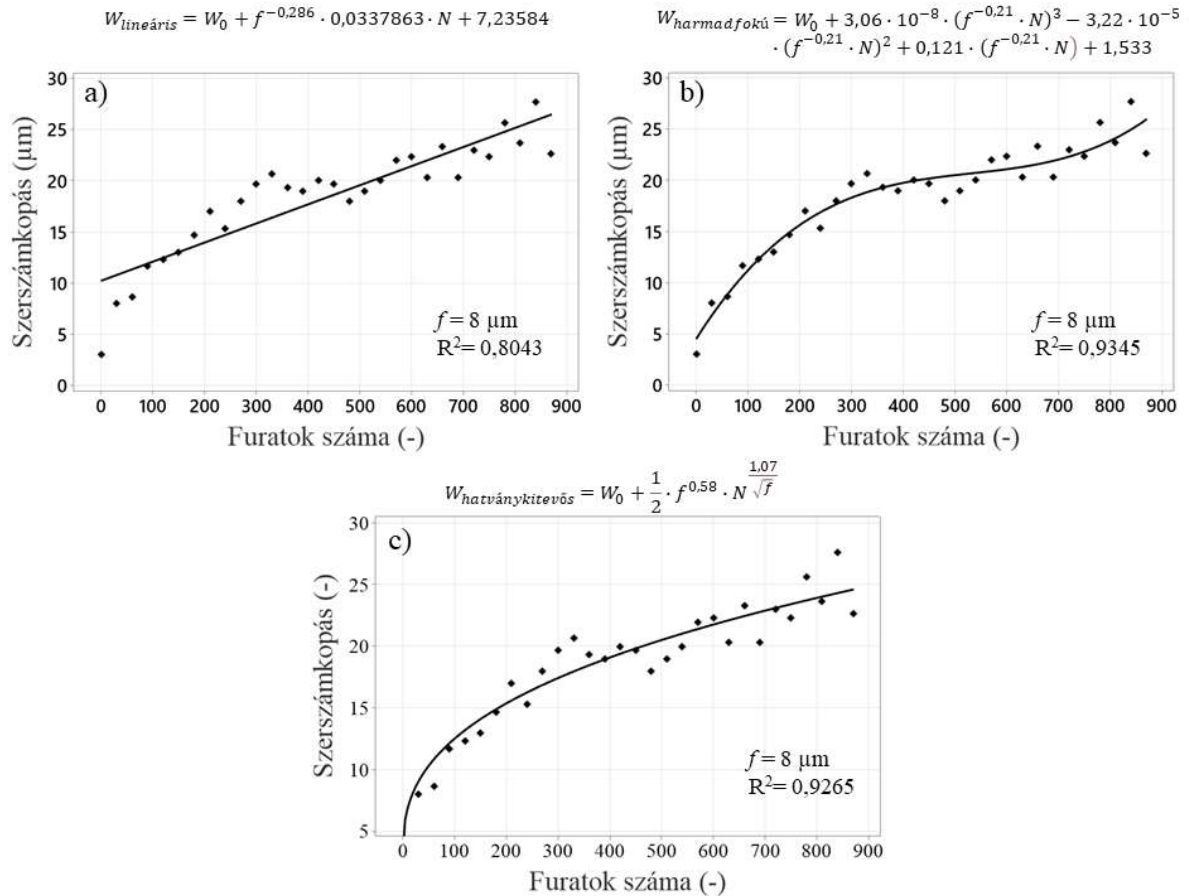
$W_{\text{hatványkitevős}}$: A szerszámkopást leíró lineáris függvény (μm)

W_0 : Az új állapotú szerszám élsugarának vetülete (μm)

f : Előtolás (μm)

N : Furatszám (-)

Az illeszkedés fokát tekintve az előtolási értékek függvényében meghatározott szorzó tényezők modellbe való beillesztése általánosan 1-2% eltérést eredményezett az első körben előállított (csak furatszám függő) modellekhez képest. Ezek alapján a modellek egészen jó közelítést adtak a szerszámkopásra az előtolás és a furatszám függvényében. A három modell a **4-4. ábrán** látható a legkisebb előtolás esetén, a többi előtoláshoz tartozó modellek ábráit a **10. számú melléklet** tartalmazza.

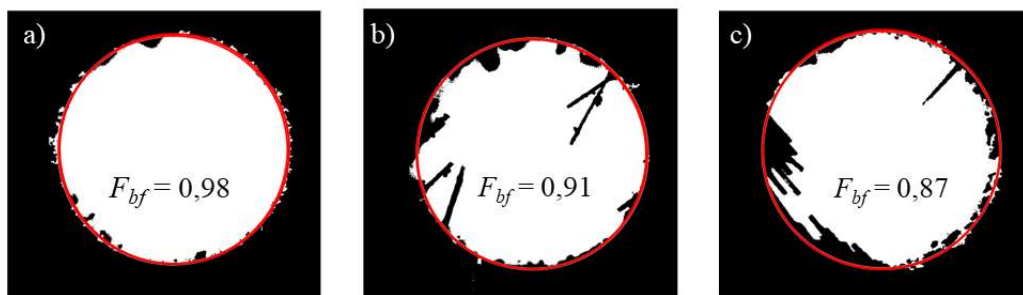


4-4. ábra: A szerszámkopás modellezésére alkotott függvények és a mérési adatpontok $f = 8 \mu\text{m}$ esetén
a) Lineáris modell; b) Harmadfokú modell; c) Hatványkitevős modell

4.2. Forgácsolásindukált sorja

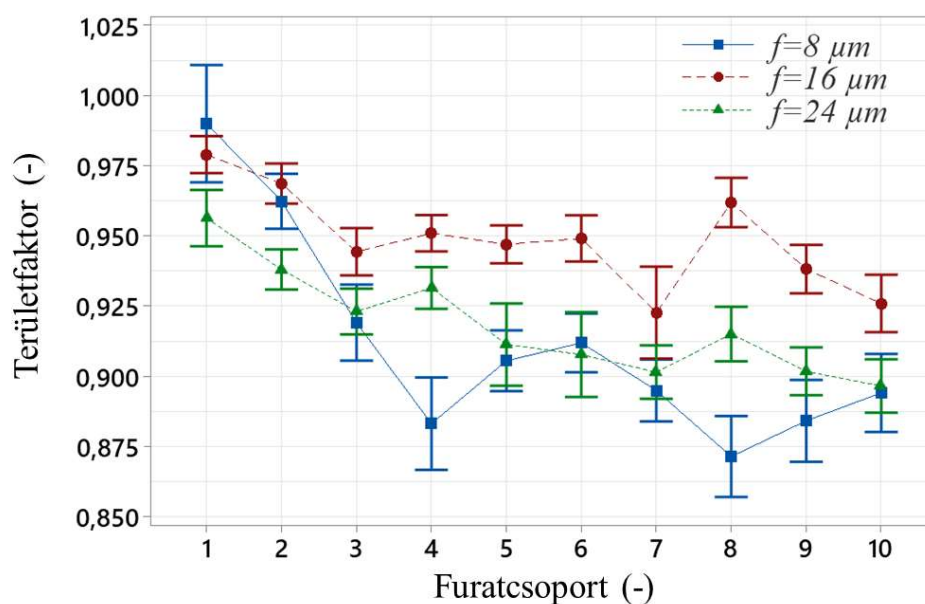
A forgácsolt furatok minőségének jellemzésének egyik formája a forgácsolás okozta sorjaképződés vizsgálata. CFRP kompozit anyagok kiemelten fontos lehet a sorja vizsgálata, ugyanis „hajlítás domináns” forgácsképződési mechanizmus során vágatlan szálak maradhatnak fent a megmunkált felületen[3]. A furatokon lévő sorja elsődlegesen az alkatrészek illeszkedését rontja, így a szerelést nehezíti meg. A következőkben a forgácsolásindukált sorja vizsgálata során kapott képeket, az azok feldolgozásából megszerzett adatokat, illetve ezen adatok statisztikai elemzésének eredményeit mutatom be.

A kísérlet során készített mikrofuratokat – akár csak a mikrofúrókat– digitális mikroszkóppal tudtam megvizsgálni. A mikrofuratok vizsgálata fúrási sorrendben volt célszerű, hogy szemléltetni lehessen a fúrási folyamatot és azt a szerszámkopási eredményekkel össze lehessen vetni. A furatok minőségére az F_{bf} területfaktor, dimenzió nélküli mérőszámot használtam. A területfaktor értékeit szemlélteti a **4-5. ábra**.



4-5. ábra: a) Minimálisan sorjaképződés; b) Néhány vágatlan szálból álló sorja; c) Vágatlan szálcsoportok alkotják a sorja javát

A furatok területfaktor értékeinek ábrázolására furatcsoportokat alakítottam ki. Egy $n_{csoport}$ furatcsoportot 100 darab furat alkot és 10 darab furatcsoportot határoztam meg, így mindegyik faktornál az első 1000 furatot vizsgáltam. A furatcsoportokhoz tartozó területfaktor értékeket a **4-6. ábra** mutatja be.



4-6. ábra: A furat minőségének változása az elkészített furatok számában

A grafikon alapján belátható a területfaktor értékének csökkenése a furatok számának növelésével, melynek oka a szerszámkopási értékek növekedése lehet. A grafikonon látható, hogy a legkisebb előtolási értéknél megfigyelt területfaktor értékek között van egynél nagyobb is, ez a kiértékelési részben részletezett feldolgozási hiba miatt van. Az is megállapítható, hogy a középső előtoláshoz tartozó területfaktor értékek kevésbé csökkennek, mint a másik kettő előtolásnál. A furatcsoportok értékeit a **4-2. táblázat** tartalmazza.

4-2. táblázat: A furatcsoportok területfaktor jellemzői faktoronként

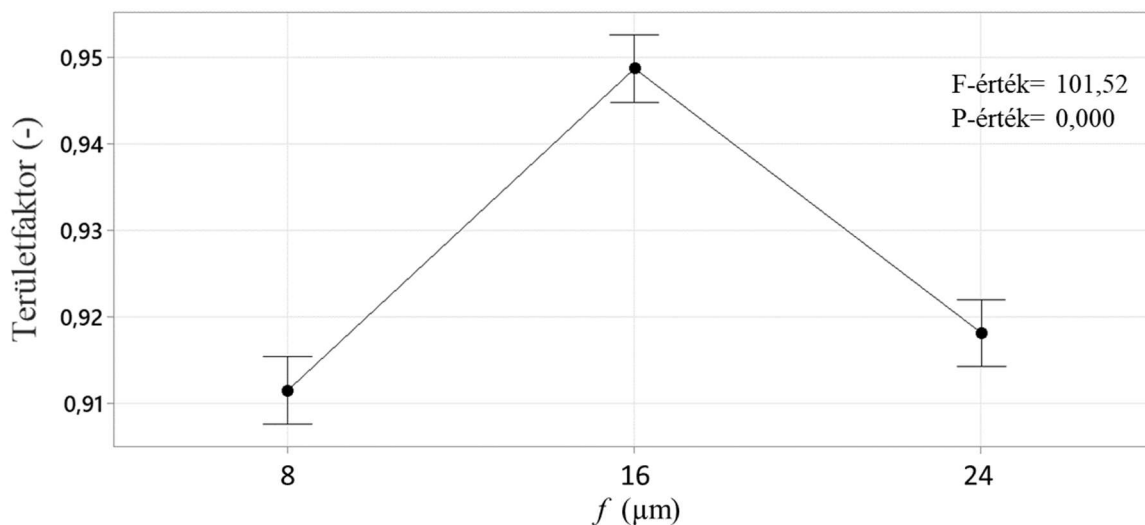
Furatcsoport ssz.	Faktor					
	$f=8 \mu m$		$f=16 \mu m$		$f=24 \mu m$	
	F_{bf} átlag (-)	F_{bf} Szórás (-)	F_{bf} átlag (-)	F_{bf} Szórás (-)	F_{bf} átlag (-)	F_{bf} Szórás (-)
1	0,9899	0,1052	0,9788	0,0332	0,9562	0,0506
2	0,9622	0,0494	0,9685	0,0359	0,9379	0,0360
3	0,9189	0,0683	0,9442	0,0423	0,9230	0,0410
4	0,8830	0,0830	0,9508	0,0325	0,9313	0,0375
5	0,9053	0,0545	0,9469	0,0339	0,9111	0,0739
6	0,9118	0,0526	0,9490	0,0412	0,9076	0,0761
7	0,8948	0,0555	0,9225	0,0825	0,9013	0,0478
8	0,8713	0,0727	0,9618	0,0442	0,9149	0,0487
9	0,8840	0,0734	0,9380	0,0436	0,9016	0,0429
10	0,8939	0,0700	0,9258	0,0515	0,8964	0,0479

A 4-5. ábrát és a 4-2. táblázatban lévő adatokat megvizsgálva észrevehető, hogy az $f = 16 \mu\text{m}$ értékhez tartozó területfaktor értékek a furatcsoportok között kevésbé csökkennek, mint a másik két előtolási érték esetében, illetve a szórás értékek is alacsonyabbnak tekinthetők. Az előtolás hatását a területfaktorra szintén varianciaanalízissel figyeltem meg a különböző furatcsoportoknál is, ennek eredményeit a 4-3. táblázat tartalmazza.

4-3. táblázat: ANOVA-tábla: $F_{bf}(\mu\text{m})$ vs. $f(\mu\text{m})$; különböző furatcsoportokon

Területfaktor-Előtolás ANOVA				
Furatcsoport ssz.	Adj SS	Adj MS	F-érték	P-érték
1	0,0589	0,0294	5,99	0,003
2	0,0522	0,0261	15,56	0,000
3	0,0368	0,0184	6,78	0,001
4	0,2438	0,1219	39,05	0,000
5	0,1010	0,0505	15,79	0,000
6	0,1038	0,0519	15,15	0,000
7	0,0418	0,0209	5,11	0,007
8	0,4096	0,2048	63,86	0,000
9	0,1518	0,0759	24,92	0,000
10	0,0628	0,0314	9,55	0,000
1-10	0,7833	0,3917	101,52	0,000

A 4-3. táblázat adatai alapján a nullhipotézist elvetését megtagadom, miszerint az átlagok nem tekinthetők egyenlőnek, ezáltal különböző előtolási értékeknél a furat minősége szignifikánsan más. A 4-2. és 4-3. táblázatból levont következtetésekből arra lehet utalni, hogy a három faktor közül a középső értéknél szignifikánsan jobb területfaktor értékeket kapunk, az tekinthető optimálisnak sorjaképződés szempontjából. Ezt a megfigyelést a 4-7. ábra erősíti meg, ahol az összes furat területfaktor értéke figyelembe van véve, a furatcsoportokra bontott ábrákat a 11. sz. melléklet tartalmazza.



4-7. ábra: Az előtolás hatása a furatok minőségére

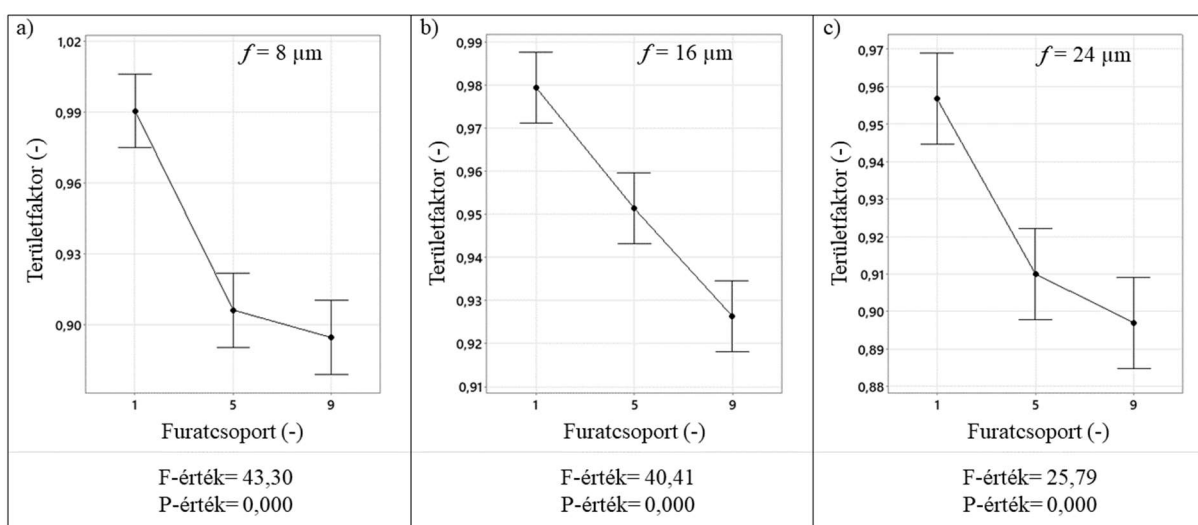
A 4-7. ábrán jól látható, hogy a fentiekben említett megfigyelésekkel megegyezően az $f = 16 \mu\text{m}$ előtolási értékhez tartozó területfaktor értékek magasabbak, a mikrofuratok minősége jobb. Ezt a jelenséget okozhatja a CFRP kompozitok erősítőanyagának, a szénszálnak a szálvastagsága ($7\text{-}8 \mu\text{m}$) és a kétélű mikrofúró szerszám élenkénti előtolásának a kapcsolata. Az élenkénti előtolás a fordulatonkénti előtolás fele, a középső faktor esetében $f_z = 8 \mu\text{m}$, így egy él nagyjából egész szálakat képes elvágni egy fordulat megtétele alatt, míg a legkisebb és legnagyobb előtolás esetén a szerszámélek a szénszálak fél, illetve másfél átmérőnyi részét forgácsolják.

A területfaktorok értékét vizsgáltam furatcsoportok szerint is, ebben az esetben is varianciaanalízist végeztem el, ennek az eredményeit a 4-4. táblázat mutatja be. A statisztikai elemzést azon feltevés bizonyítása miatt végeztem el, mely szerint a furatok darabszámával csökken a területfaktor mértéke.

4-4. táblázat: ANOVA-tábla: $F_{bf} (-)$ vs. $n_{csoport} (-)$; különböző előtolási értékeknél

Területfaktor-Furatcsoport ANOVA				
$f(\mu\text{m})$	Adj SS	Adj MS	F-érték	P-érték
8	0,5482	0,2741	43,30	0,000
16	0,1407	0,0704	40,41	0,000
24	0,1979	0,0990	25,79	0,000

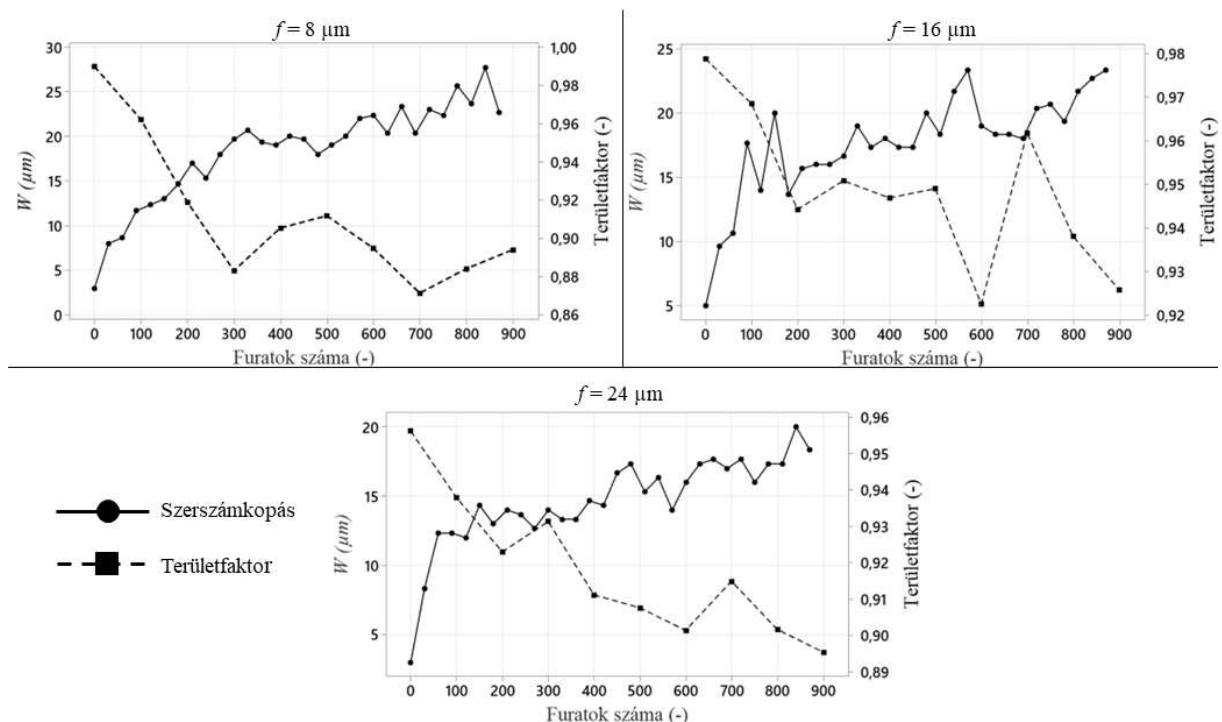
A P értékek alapján a nullhipotézis elvetését megtagadom, a különböző furatcsoportokhoz tartozó területfaktor értékek nem tekinthetők egyenlőnek, ezáltal bizonyos, hogy a furatok számának növekedésével szignifikánsan csökken a furatok minősége. A 4-8. ábra igazolja azt a várható jelenséget, hogy a megmunkált furatok darabszámával csökken a területfaktor értéke, ez pedig a szerszámkopás növekedésének tudható be. A 4-8.-es ábra a területfaktor és a szerszámkopás értékeit mutatja be adott sorozatú furatoknál.



4-8. ábra: Az elkészített furatok számának hatása a furatok minőségére

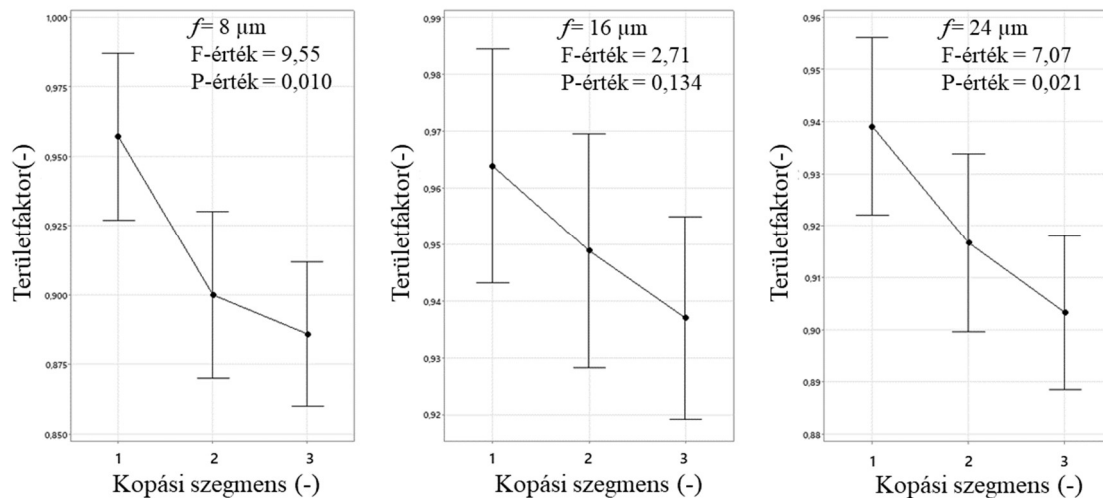
4.3. Szerszámkopás hatása a sorjára

Miután ismertettem a forgácsolásindukált sorja képződésének folyamatát a furatok számának és az előtolások függvényében, megvizsgálom a másik mért érték – a szerszámkopás – hatását a területfaktor értékekre. A várható eredmény az, hogy a szerszámkopás növekedésével csökken a területfaktor értéke, tehát a furaton nagyobb mértékű sorjaképződést várok. A két értéket a furatok számának függvényében figyeltem, mely ugye jelentős hatás volt mind a szerszámkopásra, mind a furatminőség alakulására. Az adatok együttes prezentálásához a szerszámkopás W értékeit és a furatcsoportok F_{bf} értékeit használtam fel. Mivel ezek az adatok különböző furatdarabszámhoz tartoztak (szerszámkopási adat 30 furatonként, 1 furatcsoport 100 furat adataiból áll) ezért a furatok számának függvényében kettő függőleges tengelyhez rendeltem az adott értékeket. Ezt ábrázolja a **4-9. ábra**.



4-9. ábra: A szerszámkopás és a területfaktor alakulása a furatok számának függvényében

A **4-9. ábrán** észrevehető, hogy a szerszámkopás növekedésével csökken a területfaktor értéke, ez elmondható mind a három előtoláshoz tartozó grafikonra. Viszont ezekről a grafikonokról nem állapítható meg, hogy a szerszámkopás milyen hatással van a sorjaképződésre, itt csak a két folyamat viszonyát tudjuk megfigyelni. A szerszámkopás hatását a sorjára varianciaanalízis alkalmazásával figyeltem meg. A varianciaanalízis eredményét az F és P értékekkel, valamint a konfidenciaintervallumos ábrázolással a **4-10. ábra** tünteti fel.



4-10. ábra: A kopási szakaszok hatása a területfaktor értékekre

A nullhipotézisem megegyezik a szerszámkopásnál és a forgácsindukált sorja vizsgálatánál meghatározottal. Az $f = 8 \mu\text{m}$ és az $f = 24 \mu\text{m}$ előtolási értékekhez tartozó P értéke kisebb 0.05-nél, így itt a nullhipotézis elvetését megtagadom, a hatások szignifikánsnak tekinthetők. Az $f = 16 \mu\text{m}$ előtolás esetén a P értéke nagyobb 0.05-nél, így a módszertan alapján a nullhipotézist elvetem, a kopási szakaszok nem tekinthetők szignifikánsnak. Két előtolási értéknél szignifikánsnak vélhető a hatás és a konfidencia intervallumos ábra hasonlóan tekinthető mindhárom esetben, így a szerszám kopását szignifikáns hatásnak tekintem a területfaktor értékére. Ugyanakkor belátható, hogy a furatcsoportok (a furatok száma) jelentősebb hatással voltak a területfaktor értékeire, mint a szerszámkopás. Ezen eredmény értelmezéséhez még hozzátartozik az is, hogy a varianciaanalízis vizsgálat egyszerűsítése miatt a három meghatározott kopási szakaszt vizsgáltuk, a felosztás finomítása kiegészíthetné a kopás hatásáról megszerzett ismereteket.

4.4. Kitekintés

Az eredmények értékeléséhez hozzátartozik azok felhasználhatósága, bizonyos technológiákba való beilleszthetősége. A megalkotott matematikai modellek viszonyítási alapul szolgálhatnak hasonló mikrofúrási paraméterek mellett kísérlet- vagy technológiatervezésnél. A modellek használatával be lehet állítani a készítendő furatok számának korlátait, meg lehet becsülni a kopási szakaszok tartományát, így akár a szerszámcsere esedékességét is. Amennyiben a megmunkálási folyamat során képi szerszámállapot ellenőrzés történne (mint ezen kísérlet során is), úgy a kopási értékek becslésével meg lehetne határozni, hogy nagyjából hány furat elkészítése után érdemes a szerszám kopottsági állapotát rögzíteni. A kísérlet során használt három előtolás közül az $f = 16 \mu m$ előtolási érték volt optimális a furatok minőségének tekintetében. A legkisebb szerszámkopás az $f = 24 \mu m$ előtolási értéknél volt, de a furatok minősége szignifikánsan rosszabb volt, mint az $f = 16 \mu m$ előtolási értéknél, így összességében utóbbi előtolás volt a legkedvezőbb a mikrofúrási folyamatokra.

A kapott eredmények természetesen egy speciális, meghatározott paraméterekkel korlátozott kísérlet eredményei. Ezen paraméterek (erősítőszál anyaga, szálak elrendezése, mátrixanyag, befogás, szerszámgeometria és -átmérő, szerszámbevonat, forgácsolási paraméterek, stb.) megváltoztatása megbontja ezt a limitációkkal előállított esetet, így a várható eredmények kisebb – nagyobb mértékben (paramétertől függően) megváltozhatnak.

A kísérletek, az adatok megszerzése és kiértékelése során számos fejlesztési és kutatási ötlet fogalmazódott meg bennem. Ezeket ismertetem a következőkben.

A kísérletekhez tartozó fejlesztési javaslatokhoz tartozik egy olyan mikrofúró szerszám beszerzése, melynek befogási átmérője elegendő magában a szerszám gépbe való befogáshoz, így a befogó patron használata nem lenne szükséges. A magában és a patronnal befogott szerszám esetén meg lehetne vizsgálni a szerszáműtések és ennek ismeretében figyelni meg a mikrofúrás eredményeit. Ezzel lehetne vizsgálni a technológia hatását. Magához a mikrofúráshoz tartozó másik javaslat a szerszám hűtése, valamilyen kenőanyag használata. Ennek függvényében lehetne figyelni a forgácsolási eredményeket, valamint kiértékelési szempontból a szerszámra gyakorolt tisztító hatását, mely képkészítésnél, így a folyamatos szerszám vizsgálatnál lényege lehet.

Az adatok kiértékelésénél az egyik legfontosabb megoldás a CER és a hátkopás közötti analógia pontosítása, matematikai megközelítése lenne CFRP kompozitok mikrofúrása során. A CER vizsgálatához másféle képkészítési mód – például pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) – lenne szükséges. Ennek a módszernek a hátránya a

szerszám folyamatos kivétele és behelyezése lenne, amennyiben folytonos szerszámkopást vizsgálnék.

A Keyence digitális profilométerrel való képkészítés során több továbbfejlesztési javaslat is megfogalmazódott bennem. Síkfelületű UD-CFRP anyagok vizsgálata esetén lényegesen többet tudnék meghatározni a kialakult furat minőségéről. A sorjamentes területen kívül képes lennék meghatározni a furat melletti részen képződött sorja magasságát és szélességét, a vágatlan szálak axiális irányba történő kilógását, valamint lényeges lehet a delaminációs zóna ilyen módon való megfigyelése is. A 3D-s morfológiából kiindulva pedig számos összehasonlító kísérletet lehetne végezni, mint például mikro- és makroméretű alaksajátosságoknál, vagy különböző szálerősített polimer anyagok között.

Az elvégzett kutatás során így nem csak eredményeket és tapasztalatokat nyertem, hanem számos jövőbeni kísérlet lehetőségéhez jutottam hozzá.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásom során szénszállal erősített polimer kompozitok mikrofúrása során a szerszámkopás és az elkészített furatok minőségének vizsgálatát végeztem, célom a folyamat optimalizálása, modellezése, valamint a limitációk megismerése volt. A szakirodalomból szerzett ismeretek, valamint az előkísérletek tapasztalatai alapján végeztem el a végső kísérletet. A kísérletek során vinil mátrixú, szélső rétegeiben biaxiális elrendezésű UD-CFRP kompozitokat mikrofúrtam. A fúrási folyamatok során az előtolás értékét változtattam három szinten, mindegyik előtolási értékhez külön szerszámot rendeltem hozzá, így kvázi azonos kiinduló feltételek mellett vizsgálhattam a szerszám kopását. A szerszámokról digitális mikroszkóppal készítettem képeket, és a hát-kopás vetületének nagyságát vizsgálva figyeltem meg a szerszámkopás folyamatát. A szerszámkopási értékeket előtolásonként ábrázoltam és a Minitab statisztikai szoftverben varianciaanalízis vizsgálatot végeztem. Megállapítottam azt, hogy a kisebb előtolási érték nagyobb szerszámkopást eredményez, illetve azt is, hogy a bekopási szakaszon nem szignifikáns az előtolás hatása a szerszámkopásra. Az eredmények alapján és a hatások ismeretében matematikai modellel írtam le a szerszám kopását. A matematikai modell az előtolási érték és a furatszám függvényében jellemzi a szerszámkopást. A szerszámkopás mellett az elkészült furatok minőségét vizsgáltam még. A kísérlet során elkészített több, mint háromezer furatról egy Keyence VR-5200 3D-s digitális profilométerrel készítettem képeket és a 2D-s képeket használtam fel a továbbiakban. A Matlab szoftver Image Processing Toolbox eszköztárának segítségével algoritmust készítettem a képek binarizálására, detektálására és a kívánt mérőszám kinyerésére. A furatok minőségét egy területalapú mérőszámmal, a sorjamentes területfaktorral ábrázoltam. A kapott értékeket grafikonon ábrázoltam és ebben az esetben is varianciaanalízis vizsgálatot végeztem a Minitab statisztikai szoftverben. Megállapítottam, hogy a furatszám növekedése szignifikáns hatással van a területfaktor értékeire. Az előtolások közül a középső értéket ($f = 16 \mu\text{m}$) találtam optimálisnak a kialakuló furatok minőségének tekintetében. A területfaktor értékeire megvizsgáltam a szerszámkopás hatását is. Varianciaanalízist végezve a szerszámkopás hatását szignifikánsnak találtam a területfaktor értékeire, de nem annyira, mint az elkészült furatok számának a hatását.

A kutatásom eredménye bővíti a CFRP kompozitok mikrofúrásához tartozó ismereteket, valamint az elkészített modell hozzájárulhat egy jövőbeni kísérlet vagy akár technológia tervezéséhez. A kísérletek és a kiértékelések során számos fejlesztési javaslat és gondolat született meg, mely szintén hozzátartozik a kutatás eredményeihez.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] H. Zheng és mtsai., „Recent advances of interphases in carbon fiber-reinforced polymer composites: A review”, *Compos. Part B Eng.*, köt. 233, o. 109639, márc. 2022, doi: 10.1016/j.compositesb.2022.109639.
- [2] N. Forintos és T. Czigany, „Multifunctional application of carbon fiber reinforced polymer composites: Electrical properties of the reinforcing carbon fibers – A short review”, *Compos. Part B Eng.*, köt. 162, o. 331–343, ápr. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.10.098.
- [3] N. Geier, J. Xu, C. Pereszlai, D. I. Poór, és J. P. Davim, „Drilling of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: Difficulties, challenges and expectations”, *Procedia Manuf.*, köt. 54, o. 284–289, jan. 2021, doi: 10.1016/j.promfg.2021.07.045.
- [4] N. Geier és mtsai., „A critical review on mechanical micro-drilling of glass and carbon fibre reinforced polymer (GFRP and CFRP) composites”, *Compos. Part B Eng.*, o. 110589, 2023.
- [5] B. Z. Balázs, N. Geier, M. Takács, és J. P. Davim, „A review on micro-milling: recent advances and future trends”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, köt. 112, sz. 3, o. 655–684, jan. 2021, doi: 10.1007/s00170-020-06445-w.
- [6] M. Aamir, M. Tolouei-Rad, K. Giasin, és A. Nosrati, „Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: a review”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, köt. 105, sz. 5, o. 2289–2308, dec. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04348-z.
- [7] J.-M. Lee, B.-J. Min, J.-H. Park, D.-H. Kim, B.-M. Kim, és D.-C. Ko, „Design of Lightweight CFRP Automotive Part as an Alternative for Steel Part by Thickness and Lay-Up Optimization”, *Materials*, köt. 12, sz. 14, Art. sz. 14, jan. 2019, doi: 10.3390/ma12142309.
- [8] M. Ramakrishnan, G. Rajan, Y. Semenova, és G. Farrell, „Overview of Fiber Optic Sensor Technologies for Strain/Temperature Sensing Applications in Composite Materials”, *Sensors*, köt. 16, sz. 1, Art. sz. 1, jan. 2016, doi: 10.3390/s16010099.
- [9] „Carbon Fiber - an overview | ScienceDirect Topics”. Elérés: 2023. október 20. [Online]. Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/topics/nursing-and-health-professions/carbon-fiber>
- [10] N. Kumar, A. K. Gangwar, K. SangeetaDevi, N. Kumar, A. K. Gangwar, és K. SangeetaDevi, „Carbon Fibers in Biomedical Applications”, in *Recent Developments in the Field of Carbon Fibers*, IntechOpen, 2018. doi: 10.5772/intechopen.75826.
- [11] X. Huang, C. Wang, T. Yang, Y. He, Y. Li, és L. Zheng, „Wear characteristics of micro-drill during ultra-high speed drilling multi-layer PCB consisting of copper foil and ceramic particle filled GFRPs”, *Procedia CIRP*, köt. 101, o. 326–329, jan. 2021, doi: 10.1016/j.procir.2020.10.007.

- [12] H. Watanabe, H. Tsuzaka, és M. Masuda, „Microdrilling for printed circuit boards (PCBs)—Influence of radial run-out of microdrills on hole quality”, *Precis. Eng.*, köt. 32, sz. 4, o. 329–335, okt. 2008, doi: 10.1016/j.precisioneng.2008.02.004.
- [13] A. Al-Lami, P. Hilmer, és M. Sinapius, „Eco-efficiency assessment of manufacturing carbon fiber reinforced polymers (CFRP) in aerospace industry”, *Aerosp. Sci. Technol.*, köt. 79, o. 669–678, aug. 2018, doi: 10.1016/j.ast.2018.06.020.
- [14] S. Das, „Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites”, *Int. J. Life Cycle Assess.*, köt. 16, sz. 3, o. 268–282, márc. 2011, doi: 10.1007/s11367-011-0264-z.
- [15] D. May, C. Goergen, és K. Friedrich, „Multifunctionality of polymer composites based on recycled carbon fibers: A review”, *Adv. Ind. Eng. Polym. Res.*, köt. 4, sz. 2, o. 70–81, ápr. 2021, doi: 10.1016/j.aiepr.2021.01.001.
- [16] N. Geier, D. I. Poór, C. Pereszlai, P. Tamás-Bényei, és J. Xu, „A drilling case study in polymer composites reinforced by virgin and recycled carbon fibres (CFRP and rCFRP) to analyse thrust force and torque”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, köt. 120, sz. 3, o. 2603–2615, máj. 2022, doi: 10.1007/s00170-022-08947-1.
- [17] „Blade | Energy | MARKETS | Carbon Fiber Composite Materials | TORAY”. Elérés: 2023. október 21. [Online]. Elérhető: <https://www.cf-composites.toray/markets/energy/blade/>
- [18] E. L. Steinberg, E. Rath, A. Shlaifer, O. Chechik, E. Maman, és M. Salai, „Carbon fiber reinforced PEEK Optima—A composite material biomechanical properties and wear/debris characteristics of CF-PEEK composites for orthopedic trauma implants”, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, köt. 17, o. 221–228, jan. 2013, doi: 10.1016/j.jmbbm.2012.09.013.
- [19] T. Czvikovszky, P. Nagy, és J. Gaal, „A polimertechnika alapjai”, *MHuegyetemi Kiadó Bp.*, köt. 132, o. 453, 2000.
- [20] N. Forintos, „A szénszál állapotjelz\Ho szerepe kompozit szerkezetekben”, 2021, Elérés: 2023. október 28. [Online]. Elérhető: <https://repository.omikk.bme.hu/bitstream/handle/10890/16143/ertekezes.pdf?sequence=2>
- [21] R. S. Anand, K. Patra, és M. Steiner, „Size effects in micro drilling of carbon fiber reinforced plastic composite”, *Prod. Eng.*, köt. 8, sz. 3, o. 301–307, jún. 2014, doi: 10.1007/s11740-014-0526-2.
- [22] D. I. Poór, N. Geier, C. Pereszlai, és J. Xu, „A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation, characterisation and challenges”, *Compos. Part B Eng.*, köt. 223, o. 109155, okt. 2021, doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109155.
- [23] F. Wang, J. Yin, J. Ma, Z. Jia, F. Yang, és 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.*, köt. 91, sz. 9, o. 3107–3120, aug. 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0023-9.

- [24] N. Geier, T. Szalay, és M. Takács, „Analysis of thrust force and characteristics of uncut fibres at non-conventional oriented drilling of unidirectional carbon fibre-reinforced plastic (UD-CFRP) composite laminates”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, köt. 100, sz. 9, o. 3139–3154, febr. 2019, doi: 10.1007/s00170-018-2895-8.
- [25] Geier N., „Egyirányban szénszállal erősített polimer (UD-CFRP) kompozit anyagok forgácsolt alaksajátosságainak mikro- és makrogeometriai vizsgálata és jellemző mérőszámrendszerének kidolgozása”, *Analysis of machining induced micro- and macro-geometrical damages of unidirectional carbon fibre reinforced polymer (UD-CFRP) composites, and the development of its characteristics measures*, 2019, Elérés: 2023. november 1. [Online]. Elérhető: <https://repositorium.omikk.bme.hu/handle/10890/13185>
- [26] A. Faraz, D. Biermann, és K. Weinert, „Cutting edge rounding: An innovative tool wear criterion in drilling CFRP composite laminates”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, köt. 49, sz. 15, o. 1185–1196, dec. 2009, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.08.002.
- [27] D. Geng és mtsai., „Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review”, *Compos. Struct.*, köt. 216, o. 168–186, máj. 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.02.099.
- [28] M. Takács, B. Verő, és I. Mészáros, „Micromilling of metallic materials”, *J. Mater. Process. Technol.*, köt. 138, sz. 1, o. 152–155, júl. 2003, doi: 10.1016/S0924-0136(03)00064-5.
- [29] Biró I., „A forgácsleválasztás energetikai modelljének kiterjesztése nagy szilárdságú acél precíziós és mikroforgácsolási technológiájához”, *Extension of the energy consumption model of mechanical chip-removal for precision and microcutting processes*, 2017, Elérés: 2023. november 1. [Online]. Elérhető: <https://repositorium.omikk.bme.hu/handle/10890/5479>
- [30] F. Klocke, K. Gerschwiler, és M. Abouridouane, „Size effects of micro drilling in steel”, *Prod. Eng.*, köt. 3, sz. 1, o. 69–72, márc. 2009, doi: 10.1007/s11740-008-0144-y.
- [31] I. Biró, T. Szalay, és N. Geier, „Effect of cutting parameters on section borders of the empirical specific cutting force model for cutting with micro-sized uncut chip thickness”, *Procedia CIRP*, köt. 77, o. 279–282, jan. 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.09.015.
- [32] P. W. Butler-Smith és mtsai., „A study of an improved cutting mechanism of composite materials using novel design of diamond micro-core drills”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, köt. 88, o. 175–183, jan. 2015, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2014.10.002.
- [33] J. W. Kim, J. Nam, J. Jeon, és S. W. Lee, „A Study on Machining Performances of Micro-Drilling of Multi-Directional Carbon Fiber Reinforced Plastic (MD-CFRP) Based on Nano-Solid Dry Lubrication Using Graphene NanoPlatelets”, *Materials*, köt. 14, sz. 3, Art. sz. 3, jan. 2021, doi: 10.3390/ma14030685.

- [34] A. Dogrusadik és A. Kentli, „Experimental investigation of support plates’ influences on tool wear in micro-drilling of CFRP laminates”, *J. Manuf. Process.*, köt. 38, o. 214–222, febr. 2019, doi: 10.1016/j.jmapro.2019.01.018.
- [35] H. Inoue és mtsai., „Influence of tool wear on internal damage in small diameter drilling in GFRP”, *Compos. Struct.*, köt. 39, sz. 1, o. 55–62, szept. 1997, doi: 10.1016/S0263-8223(97)00068-8.
- [36] Z. Hao, D. Gao, Y. Fan, és R. Han, „New observations on tool wear mechanism in dry machining Inconel718”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, köt. 51, sz. 12, o. 973–979, dec. 2011, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2011.08.018.
- [37] L. L. Alhadeff, M. B. Marshall, D. T. Curtis, és T. Slatter, „Protocol for tool wear measurement in micro-milling”, *Wear*, köt. 420–421, o. 54–67, febr. 2019, doi: 10.1016/j.wear.2018.11.018.
- [38] J. Xu, T. Lin, J. P. Davim, M. Chen, és M. El Mansori, „Wear behavior of special tools in the drilling of CFRP composite laminates”, *Wear*, köt. 476, o. 203738, júl. 2021, doi: 10.1016/j.wear.2021.203738.
- [39] X. Wang, P. Y. Kwon, C. Sturtevant, D. (Dae-W. Kim, és J. Lantrip, „Tool wear of coated drills in drilling CFRP”, *J. Manuf. Process.*, köt. 15, sz. 1, o. 127–135, jan. 2013, doi: 10.1016/j.jmapro.2012.09.019.
- [40] K. Patra, A. K. Jha, T. Szalay, J. Ranjan, és L. Monostori, „Artificial neural network based tool condition monitoring in micro mechanical peck drilling using thrust force signals”, *Precis. Eng.*, köt. 48, o. 279–291, ápr. 2017, doi: 10.1016/j.precisioneng.2016.12.011.
- [41] J. Xu, C. Li, M. Chen, M. El Mansori, és J. Paulo Davim, „On the analysis of temperatures, surface morphologies and tool wear in drilling CFRP/Ti6Al4V stacks under different cutting sequence strategies”, *Compos. Struct.*, köt. 234, o. 111708, febr. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111708.
- [42] J. Xu és mtsai., „A critical review addressing drilling-induced damage of CFRP composites”, *Compos. Struct.*, köt. 294, o. 115594, aug. 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115594.
- [43] Poór D. I., Geier N., Pereszlai C., és Balázs B. Z., „Sorjavezsgálati mérőszámok összehasonlító elemzése szénszállal erősített polimer (CFRP) kompozitokban”, *Gradus*, köt. 8, sz. 1, o. 272–277, 2021, doi: 10.47833/2021.1.ENG.008.
- [44] M. Hasan, J. Zhao, és Z. Jiang, „A review of modern advancements in micro drilling techniques”, *J. Manuf. Process.*, köt. 29, o. 343–375, okt. 2017, doi: 10.1016/j.jmapro.2017.08.006.
- [45] N. Geier, J. P. Davim, és T. Szalay, „Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review”, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, köt. 125, o. 105552, 2019.
- [46] N. S. Nasir, N. Ab Wahab, B. Bin Sofian, R. Izamshah, és H. Sasahara, „Experimental Investigations Towards Hole Accuracy in Micro-drilling of Carbon Fibre

- Reinforced Polymer Material”, *Manuf. Technol.*, köt. 21, sz. 3, o. 381–386, jún. 2021, doi: 10.21062/mft.2021.050.
- [47] K. Shunmugesh és K. Panneerselvam, „Optimization of Process Parameters in Micro-Drilling of Carbon Fiber Reinforced Polymer (Cfrp) Using Taguchi and Grey Relational Analysis”, *Polym. Polym. Compos.*, köt. 24, sz. 7, o. 499–506, szept. 2016, doi: 10.1177/096739111602400708.
- [48] C. Agrawal és mtsai., „Experimental investigation on the effect of dry and multi-jet cryogenic cooling on the machinability and hole accuracy of CFRP composites”, *J. Mater. Res. Technol.*, köt. 18, o. 1772–1783, máj. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.03.096.
- [49] E. D. Eneyew és M. Ramulu, „Experimental study of surface quality and damage when drilling unidirectional CFRP composites”, *J. Mater. Res. Technol.*, köt. 3, sz. 4, o. 354–362, okt. 2014, doi: 10.1016/j.jmrt.2014.10.003.
- [50] R. S. Anand és K. Patra, „Cutting force and hole quality analysis in micro-drilling of CFRP”, *Mater. Manuf. Process.*, köt. 33, sz. 12, o. 1369–1377, szept. 2018, doi: 10.1080/10426914.2017.1401715.
- [51] S. Gaugel és mtsai., „A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber reinforced polymers (CFRP)”, *Compos. Struct.*, köt. 155, o. 173–183, nov. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.08.004.
- [52] Y. Karpat és O. Bahtiyar, „Tool geometry based prediction of critical thrust force while drilling carbon fiber reinforced polymers”, *Adv. Manuf.*, köt. 3, sz. 4, o. 300–308, dec. 2015, doi: 10.1007/s40436-015-0129-y.
- [53] E. Plusys és P. T. Mativenga, „Reducing Delamination in Micro Drilling of Carbon Composite Materials”, in *Proceedings of the 38th International MATADOR Conference*, S. Hinduja, P. J. da Silva Bartolo, L. Li, és W.-Y. Jywe, Szerk., Cham: Springer International Publishing, 2022, o. 337–356. doi: 10.1007/978-3-319-64943-6_24.
- [54] I. S. Shyha, D. K. Aspinwall, S. L. Soo, és S. Bradley, „Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, köt. 49, sz. 12, o. 1008–1014, okt. 2009, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.05.009.
- [55] Y. Zhang, Y. Liu, L. Cao, J. Chen, G. Qiu, és J. Wang, „Preparation and analysis of micro-holes in C/SiC composites and ablation with a continuous wave laser”, *J. Eur. Ceram. Soc.*, köt. 41, sz. 1, o. 176–184, jan. 2021, doi: 10.1016/j.jeurceram-soc.2020.08.033.
- [56] R. Suresh, K. Sohit Reddy, és K. Shapur, „Abrasive Jet Machining for Micro-hole Drilling on Glass and GFRP Composites”, *Mater. Today Proc.*, köt. 5, sz. 2, Part 1, o. 5757–5761, jan. 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.12.171.
- [57] R. Kumar, P. K. Agrawal, és I. Singh, „Fabrication of micro holes in CFRP laminates using EDM”, *J. Manuf. Process.*, köt. 31, o. 859–866, jan. 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.01.011.

- [58] D. Iliescu, D. Gehin, M. E. Gutierrez, és F. Girot, „Modeling and tool wear in drilling of CFRP”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, köt. 50, sz. 2, o. 204–213, febr. 2010, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.10.004.

7. MELLÉKLETEK

1. számú melléklet: A mikrofúró szerszám adatai

2023. 11. 01. 11:51

SD26-0.50-3.20-3R1 | Secco Tools

SD26-0.50-3.20-3R1

GDG oodo B70 - DRILLING MICRO DRILLS

Item number 02731622

P

M

K

N

S

PC

Minimum sales quantity: 1

Minimum sales quantity: 1

Name	Description	Value
Barcode	Product barcode	01622027002100
DC	Cutting diameter	0.500 mm
DMM	Shank diameter	3.00 mm
Gradeltype	Gradeltype	Carbide Uncoated
ItemNumber	Item Number	02731622
LU	Usable length	3.2 mm
LUX	Usable length maximum	4.0 mm
OAL	Overall length	38.0 mm
Shanktype	Shanktype	Cylindrical
SIG	Point angle	130.0 deg
Weight	Netweight	0.004 kg
ZEFP	Peripheral effective cutting edge count	2

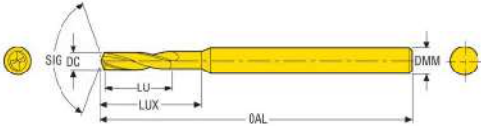


https://www.seccotools.com/ricide/p_02731622?language=en

1/2

2023. 11. 01. 15:51

SD26-0.50-3.20-3R1 | Secco Tools





Illustrations shown may vary from actual product

2/2

2. számú melléklet: Patron meghatározása szerszámütés szempontjából

Szerszám sorszám	Befogás	patron	ütés
(1-13)	teljes feltolás/rés ráhagyá)	(1-5)	(qm)
13	feltolva	1	140
13	rés	1	200
13	feltolva	1	230
13	rés	1	240
13	rés	2	65
13	rés	2	90
13	feltolva	2	120
13	rés	2	130
13	feltolva	2	140
13	feltolva	2	145
13	feltolva	3	95
13	rés	3	105
13	feltolva	3	125
13	rés	3	145
13	feltolva	3	160
13	rés	3	160
13	rés	4	110
13	feltolva	4	110
13	feltolva	4	130
13	feltolva	4	140
13	rés	4	145
13	rés	4	145
13	rés	5	80
13	rés	5	95
13	feltolva	5	100
13	feltolva	5	105
13	feltolva	5	140
13	rés	5	180

Átlagok

1

202,5

2

115

3

131,6666667

4

130

5

116,6666667

Szórások

2-es patron

31,3049517

5-ös patron

36,8329563

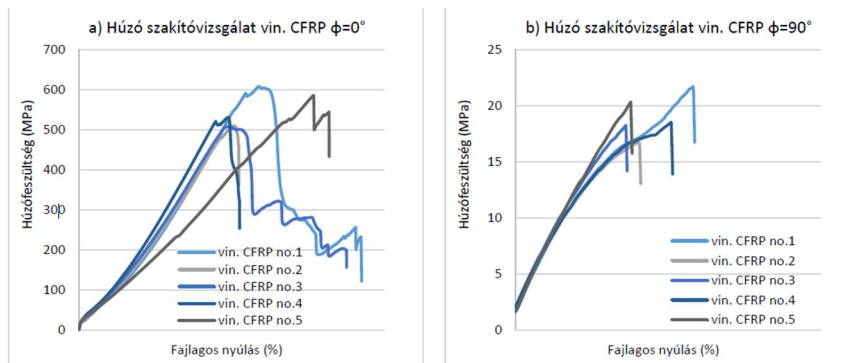
réssel

135

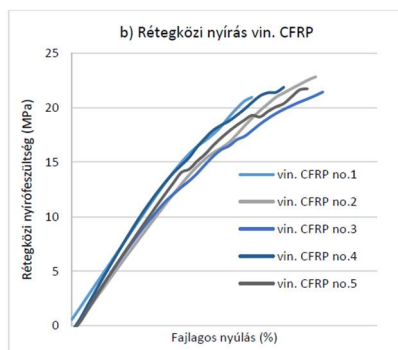
feltolás

134,2857143

3. számú melléklet: A vinil mátrixú CFRP anyag vizsgált értékei



Próbatest anyaga	$\sigma \text{ (MPa)} \pm s^* \text{ (MPa)}$			
	$\phi=0^\circ$	$\phi=30^\circ$	$\phi=60^\circ$	$\phi=90^\circ$
epo. CFRP	$723,00 \pm 58,29$	$76,25 \pm 1,94$	$34,02 \pm 1,98$	$22,48 \pm 2,88$
vin. CFRP	$547,85 \pm 45,78$	$61,22 \pm 5,15$	$17,36 \pm 1,31$	$19,01 \pm 1,83$



4. számú melléklet: G-kód

```
%03271(MICRODRILL2)
(*****
#111=1 (szerszam hely)
#112=0 (asztal kint x koord., mm)
#113=50 (asztal kint y koord., mm)

#300=7 (FURAT X , mm)
(*****
G90 G17 G40 G54
G43 Z50 H1
G95 G97 (F mm/ford, S ford/min)
S31850 M3 (50M/MIN)
F.024
G0 X0 Y0
Z20

X#300 Y0
#203=0 (0)
#201=0 (0)
WHILE[#201LT3]D02

#200=0
#3006=(POTMETER 100%?)
WHILE[#200LT30]D01
M3
G0 Y-[#203*1]
G1 G43 Z5 H1
G1 Z2
G1 Z-2
Z5
#200=#200+1
#203=#203+1
END1

M5
#3006=(POTMETER 50%)
G0
Z23.4
Y19.02
X100.18
#3006=(FENYKEP KESZ?)
X#300
#201=#201+1
END2

X#112 Y#113
M5
(*****
M30
%
```

5. számú melléklet: A kísérleti jegyzőkönyv

Kísérleti jegyzőkönyv

1. KUTATÁS CÉLJA

CFRP kompozit mikrofűrthetőségi vizsgálata. Szerszámkopás és furatminőség vizsgálata, változtatott előtolási értékekkel, különböző oldalakon.

2. KÍSÉRLETI KÖRNYEZET

2.1. Felhasznált gépek, szerszámok, műszerek és eszközök

- NCT VHTC-130 LINEAR CNC mikromarógép
- M1 Marókészülék magasító adapterrel
- (d= 2,7 mm HSS csigafűró)
- SD26-0.50-3.20-3R1; d= 0,5 mm keményfém mikrofüró (T1,T2,...T13)
- Dino-Lite AM413T5 és AM413ZT digitális mikroszkóp
- Mitutoyo HER320 mérőóra
- Kärcher 1000 porszívó
- ;SECO JS4136002SZ3.3(4650119-005-DC=6) 3 élű keményfém marószerszám

2.2. Rögzített paraméterek és körülmények

- forgácsolási sebesség, $v_c=50$ m/min (31850 rpm)
- száraz megmunkálás
- ütés minden alkalommal algoritmus alapján beállítva
- kísérletek ismétlésszáma amíg el nem törik a szerszám, vagy 1000 furat.
- Munkadarab: UD- CFRP (vinil mátrixú- Geier doktoriból, szélső rétegek(alsó-felső) multidirekcionális

KUTATÁSI ALAPADATOK

Projekt	
Azonosító:	MICRODRILL2
Vezető:	Seprős Szilárd
Környezet	
Dátum:	2023. július 31.
Helyszín:	BME „G” épület
Hőmérséklet:	20 °C
Megjegyzés:	
Személyzet	
Kísérletvezető:	Seprős Szilárd (jegyzőkönyv)
Laboráns 1:	Dr. Geier Norbert

1

2.3. Faktorok

Megnevezés	Jelölés	Mértékegység	Értelmezési tartomány		Szintek száma	Vizsgált szintek
			Legalsó szint	Legfelső szint		
Előtolás	f	µm/fordulat	-	-	3	-
Fűrt oldal	S	-	-	-	3	S1, S2, S3
Technológia	TE	-	-	-	2	TE1, TE2

Kategorikus faktorok szintjeinek magyarázata:

- S1: lemez legnagyobb felülete irányából
- S2: oldalról
- S3: oldalról, szerszámtengely egybeesik a száltengellyel
- TE1: Előfurat nélkül
- TE2: Előfurattal

További megjegyzések:

- névleges mélység: 2 mm
- 2-es sorszámú patron T1 szerszám ütése: 70 qm
- 10 furatonként fotó(első fotó fúrások előtt)
- 49. furatnál stop! utána folytatva
- további kutatási terület: Törmelék leszedése szerszám felületéről
- **fotópont: X100.680 Y19.02 Z23.62(73.595) Második Z: 23.980**
- 2-es sorszámú patron T2 szerszám ütése: 120,140,100, 90, 60
- X100.180 Z:23.810 4es munkadarab
- 4es mdb 7.sor első 30 furat 2x furva
- 2-es sorszámú patron T3 szerszám ütése: 60

2

3. KÍSÉRLETTERVEZÉSI MÁTRIX

Csak a változó körülmények feltüntetve! Nem szomszédos sorsszámok között ugyanazon szerszám, munkadarab és beállított faktor

Ssz.	Próbatest azonosító	Szerszám	Faktorok				Megjegyzés
			f ($\mu\text{m}/\text{fordulat}$)	S (-)	TE (-)		
1	2	T1	8	S1	TE1		X és Y távolság 2mm furatok között
201	2	T1	8	S1	TE1		x-ben távolság 1mm
250	2			S1	TE1		
251	3	T1	8	S1	TE1		X és Y távolság 1mm furatok között, munkadarabcsere
347	3	T1	8	S1	TE1		100 helyett 97 furat, innentől 9 ciklus lesz(90furat egy sorban), levegővel tisztítás
977	3	T1	8	S1	TE1		Szerszámcserre,Munkadarab csere
978	4	T2	16	S1	TE1		
1697	4	T2	16	S1	TE1		Munkadarab csere
1698	5	T2	16	S1	TE1		
2057	5	T2	16	S1	TE1		Szerszámcserre
2058	5	T3	24	S1	TE1		Munkadarabcsere
2418	6	T3	24	S1	TE1		
3138	6	T3	24	S1	TE1		Kísérlet vége

4. ZÁRADÉK

Kísérletek vége: 2023 (év) 07(hónap) 31 (nap) 15 (óra) 45 (perc)

A kísérleti adatok lementve és a mérési környezet eredeti állapotba visszarendezve. Amortizálódott eszközök lejelentve (geier.norbert@gpk.bme.hu).

A kísérleti adatokat, a metaadatot és a kísérleti jegyzőkönyvet feltöltöttem a CMG OneDrive tárhelyre.

.....
Kísérletvezető

6. számú melléklet: A Matlab környezetben írt képfeldolgozó program

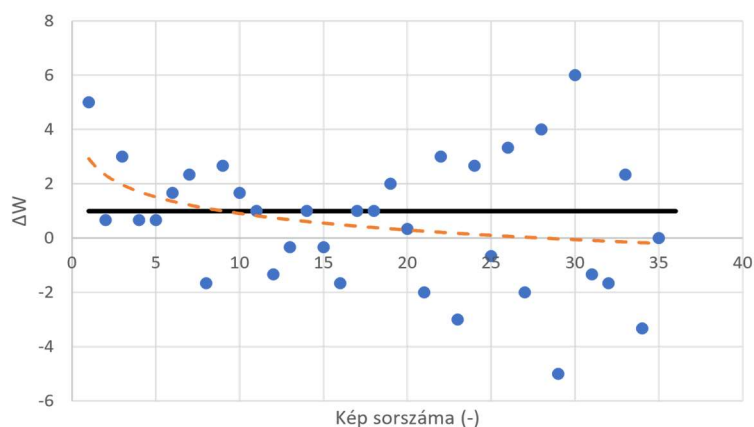
```
%IMAGEDATASTORE LÉTREHOZÁSA ÉS JELÖLÉS
IMDS=imageDatastore('C:\BME\MICRODRILL2\MICRODRILL2_kiserlet_4_20230731\Képek\cut')
Kep_sorszam=56
img= readimage(IMDS,Kep_sorszam)
%% KÉP BEOLVASÁSA, BINARIZÁLÁSA, INVERTÁLT KÉP SZÜRÉSE
% img= imread("Main image_Optical_20230816115932.png")
imshow(img)
BW1= im2
gray(img)
BW1= imbinarize(BW1,'adaptive','ForegroundPolarity','bright','Sensitivity',0.99)
imshow(BW1)
% BW2=imrotate(bwareaopen(~BW1,1000),270)
BW2=bwareaopen(~BW1,200)
imshow(BW2)
% prop=regionprops(BW2, "all")
%% KÖRILLESZTÉS
% r_min=20
% r_max=100
% [centers, radii] = imfindcircles(BW1,[r_min
r_max],"ObjectPolarity","dark","Sensitivity",0.9)
% viscircles(centers,radii,"LineStyle","--")
%% TERÜLET TULAJDONSÁGOK
props = regionprops('table',BW2, ["Centroid" "Area"])
%%FURATKÖZÉP DETEKTÁLÁS
props.Centroid_x = props.Centroid(:,1);
props.Centroid_y = props.Centroid(:,2);
props_by_row = sortrows(props,["Centroid_x" "Centroid_y"])
%ADATOK EXPORTÁLÁSA
dataexp = regionprops('table',BW2, ["Area" "Eccentricity" "Circularity" "EquivDiameter"
"Solidity" ])
% writetable(dataexp,'adatmentes.xlsx','Sheet',3,'WriteMode','append')
% writetable(dataexp,'adatmentes.xlsx','Sheet',1,'Range','A1:E100')
%FURATKÖZÉP SORSZÁMOZÁSA
centroids = vertcat(props.Centroid);
xc = centroids(:, 1);
yc = centroids(:, 2);
hold on
plot(xc, yc, 'r+', 'MarkerSize', 10, 'LineWidth', 1);
for k = 1 : height(props)
    xc = props(k,:).Centroid(:,1);
    yc = props(k,:).Centroid(:,2);
    caption = sprintf(' %d ', k);
    text(xc, yc, caption, 'Color', 'r', 'FontWeight', 'bold','FontSize',20,'Position',[xc-30
yc+70])
end
```

7. számú melléklet: A szerszámkopási értékek

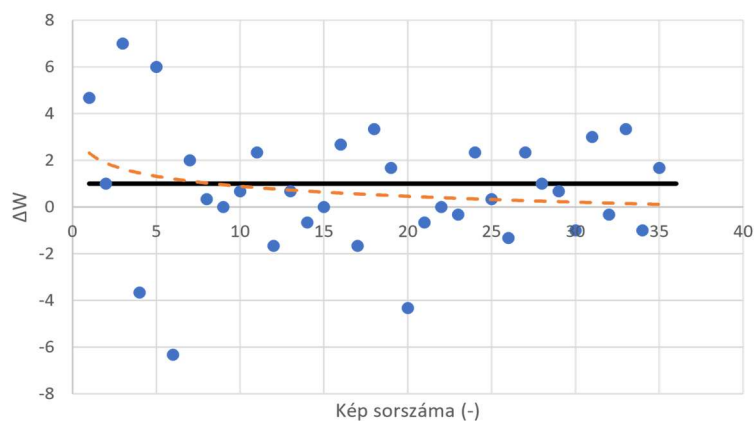
Kép sorszám	W (μm)		
	f= 8 μm	f= 16 μm	f= 24 μm
1	3,00	5,00	3,00
2	8,00	9,67	8,33
3	8,67	10,67	12,33
4	11,67	17,67	12,33
5	12,33	14,00	12,00
6	13,00	20,00	14,33
7	14,67	13,67	13,00
8	17,00	15,67	14,00
9	15,33	16,00	13,67
10	18,00	16,00	12,67
11	19,67	16,67	14,00
12	20,67	19,00	13,33
13	19,33	17,33	13,33
14	19,00	18,00	14,67
15	20,00	17,33	14,33
16	19,67	17,33	16,67
17	18,00	20,00	17,33
18	19,00	18,33	15,33
19	20,00	21,67	16,33
20	22,00	23,33	14,00
21	22,33	19,00	16,00
22	20,33	18,33	17,33
23	23,33	18,33	17,67
24	20,33	18,00	17,00
25	23,00	20,33	17,67
26	22,33	20,67	16,00
27	25,67	19,33	17,33
28	23,67	21,67	17,33
29	27,67	22,67	20,00
30	22,67	23,33	18,33
31	28,67	22,33	19,33
32	27,33	25,33	19,67
33	25,67	25,00	19,33
34	28,00	28,33	20,00
35	24,67	27,33	19,67
36	24,67	29,00	19,00

8. számú melléklet: A kopási szegmensek meghatározása a kopásváltozás alapján

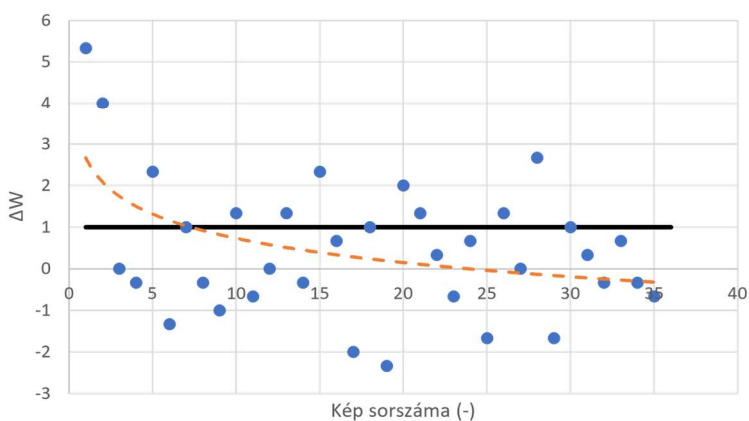
$f=8\text{ }\mu\text{m}$



$f=16\text{ }\mu\text{m}$



$f=24\text{ }\mu\text{m}$



A szerszámkopás megváltozását logaritmusos függvényekkel közelítem mindhárom előtolás esetén.

Az első szegmenst ott határoztam meg, ahol a függvény értéke 1 (ez a 7. és 10. kép között van).

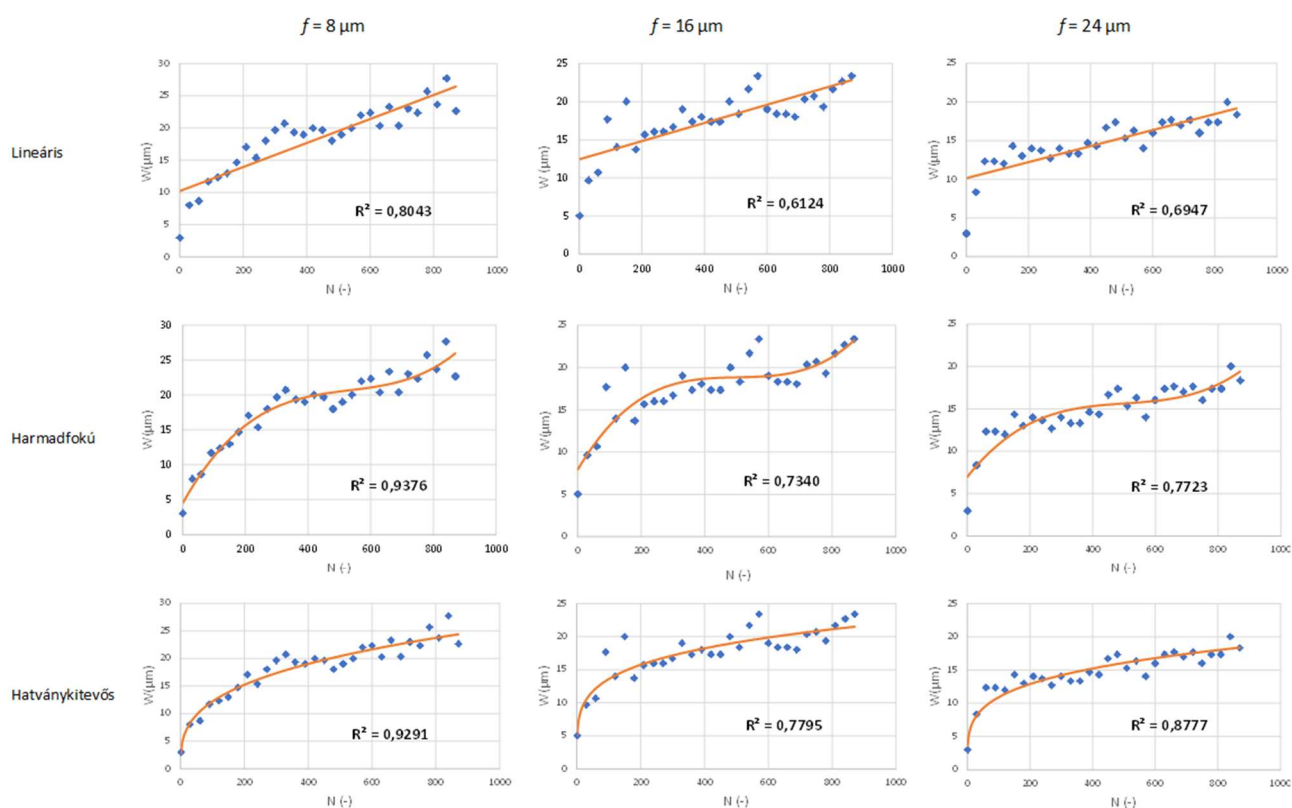
A két kisebb előtolás körülbelül a 10. képnél (300 furat) metszi a referenciavonalat ($\Delta W=1$).

Ezek alapján a 300. furatnál határozom meg az I. szegmenst, a II. szegmenst a 600 furatig, a III. szegmenst a 900 furatig tart az egyenlő furatszámú szegmensek miatt.

9. számú melléklet: A generált modellek és a megalkotott általános modellek

Előtolás\Generált egyenletek:	Lineáris modell	Harmadfokú modell	Hatványkitevős modell
$f=8\text{ }\mu\text{m}$	$W=0,0186*N+10,235$	$W=0,00000009*(N^3)-0,00014*(N^2)+0,0803*(N)+4,5052$	$W=2,7968*N^{0,3198}$
R^2 illeszkedés	0,8043	0,9346	0,9291
$f=16\text{ }\mu\text{m}$	$W=0,0119*N+12,445$	$W=0,00000008*(N^3)-0,000125*(N^2)+0,0638*(N)+7,916$	$W=5,124*N^{0,2118}$
R^2 illeszkedés	0,6123	0,7497	0,7862
$f=24\text{ }\mu\text{m}$	$W=0,0103*N+10,153$	$W=0,00000006*(N^3)-0,00009*(N^2)+0,0467*(N)+6,9719$	$W=3,5983*N^{0,2408}$
R^2 illeszkedés	0,6947	0,804	0,8743
Általános:	$W=W_0+f^{(-0,286)}*N+7,23584$	$W=W_0+0,00000306449*(f^{(-0,2)}*N)^3-0,000322274*(f^{(-0,2)}*N)^2+0,121348*f^{(-0,2)}*N+1,53347$	$W=W_0*(f^{0,58})/2*N^{1,07/(GYÖK(f))}$
R^2 illeszkedés (8;16;24)	0,8043; 0,6124; 0,6947	0,9376; 0,7340; 0,7723	0,9265; 0,7795; 0,8777

10. számú melléklet: A matematikai modellek ábrázolva



11. számú melléklet: A területfaktor előtolásonkénti értékek ANOVA vizsgálata mindegyik furatcsoporton

