

PALÁGYI IMRE
TDK DOLGOZAT

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



TDK DOLGOZAT

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

PALÁGYI IMRE
TDK DOLGOZAT

Vasalás által dominált forgácsolási körülmények azonosítása
fémötvözetek ellenirányú marása esetén

Konzulens:

Dr. Biró István
Adjunktus

Témavezető:

Dr. Biró István
Adjunktus

Budapest, 2022

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés.....	2
1.1. Célkitűzések	2
1.2. Áttekintés.....	2
2. Szakirodalmi áttekintés/Előzmények	3
2.1. A minimális rétegvastagság fogalma, összefüggése a mérethatással	3
2.2. Különböző forgácsolási paraméterek hatása	6
3. A feladat kibontása/Első főfeladat.....	11
3.1. A kísérleti összeállítás	11
3.2. A számítás módszere.....	14
3.2.1. A négyszögjel vizsgálata	14
3.2.2. A szerszám kilépésének megtalálása az adatsorban.....	15
3.2.3. A szerszám belépése	16
3.2.4. A transzformáció.....	16
3.2.5. Az kilengések simítása az adatsoron.....	16
3.2.6. A rétegvastagság meghatározása cikloispálya segítségével.....	18
3.2.7. Az erők és erőarányok ábrázolása	19
3.2.8. Hibaszámítás	20
4. A leolvasott értékek	21
4.1. A program lefuttatása.....	21
4.2. A folyamat továbbfejlesztésének lehetőségei	22
5. Összefoglalás/Eredmények értékelése	26
5.1. Eredmények	26
5.2. Javaslatok.....	26
6. Felhasznált források.....	27

* * *

Köszönöm szépen Jacsó Ádám tanár úrnak, hogy a mérés elvégzésekor vállalta a gépkezelést, Dr. Laczik Bálint tanár úrnak a hurkolt ciklois pálya pontos leírásában történő segítségét, valamint Dr. Biró István tanár úrnak a hasznos és tanulságos konzultációkat.

Budapest, 2022

Palágyi Imre

1. BEVEZETÉS

1.1. Célkitűzések

A minimális leválasztható rétegvastagság vizsgálatával kapcsolatos kísérleteket és azok kiértékelését korábbi kutatómunkáim során kezdtem meg. Az elvégzett kísérletsorozat alkalmával ellenirányú marást alkalmazva végeztem a szerszámélre ható erők alakulásából, illetve az így rögzített erőértékek arányából vontam le következtetéseket.

Ezen kiértékelések statisztikai értékelése során összevetésre került a mérési módszer a kollégám által homlokbeszűrő esztergálással történő vizsgálatokkal. Az ellenirányú végzett marási kísérletek során az eredmények szórása meglehetősen nagy értékre adódott a minimális rétegvastagság nagyságrendjébe eső forgácsvastagságok esetén, ezért a jelen diplomamunka célja egy pontosabb kiértékelési módszer megalkotása, majd az így kapott eredmények összevetése a korábbi kísérletekkel.

A korábbi kutatás főleg az ellenirányú marás alkalmazásakor adódó minimális leválasztható rétegvastagság paraméterfüggését taglalta. Az eredmények szerint a minimális rétegvastagság exponenciális jellegű növekedést mutat az előtolás növelésének hatására, míg a forgácsolósebesség hatására konkrét tendencia nem mondható ki, az eredmények szóródása nagy volt, azonban növekmény tapasztalható.

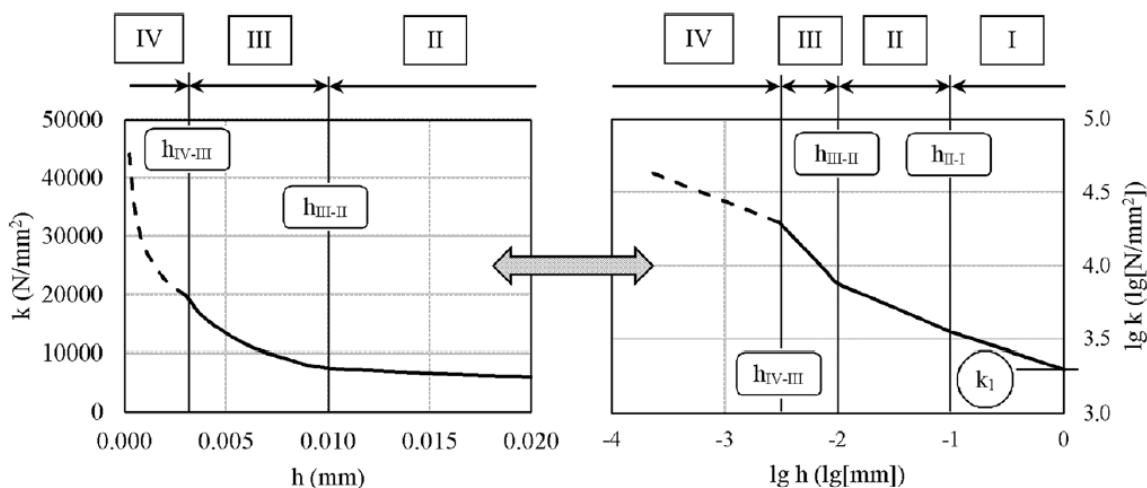
1.2. Áttekintés

Jelen dolgozatban egy rövid elméleti ismertető után a korábban elvégzett marási kísérletsorozat során rögzített adatokra megalkottam egy pontosabb kiértékelési módszert, melynek lényege, hogy az átlagos, egy fordulat alatt fellépő erők létrehozását kihagyom, helyette mindegyik fordulatot külön-külön vizsgálva igyekszem megállapításokat tenni a minimális rétegvastagságot illetően. A módszertan ismertetése után a projekt jelenlegi állását, majd a továbbfejlesztés lehetőségeit és módszerét ismertetem.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS/ELŐZMÉNYEK

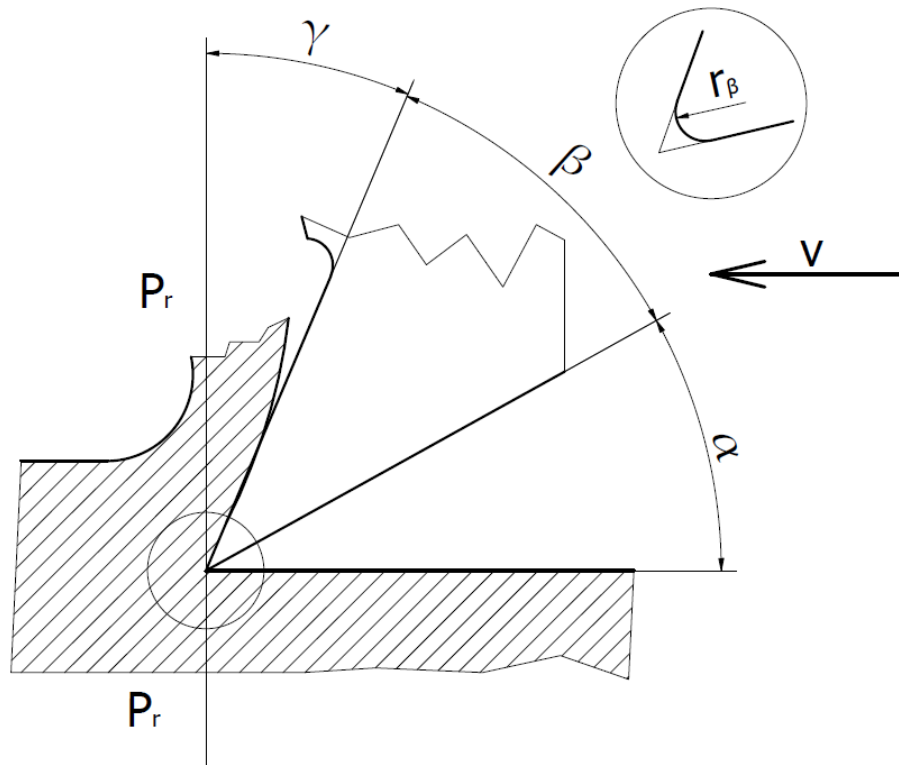
2.1. A minimális rétegvastagság fogalma, összefüggése a mérethatással

Vékony forgács leválasztása esetén a minimálisan leválasztható rétegvastagság (továbbiakban minimális rétegvastagság) problémát okozhat az általunk végzett megmunkálásban. Minimális rétegvastagság alatt azt az anyagréteget értjük, amely megmunkálása közben megkezdődik a forgács leválasztása a munkadarabról. Ha ennél a határértéknél kisebb a megmunkálás során a fogásvétel, akkor a szerszám csak hidegen alakítja (vasalja) a munkadarab külső rétegét, ezzel megnövelve a szerszámra ható erőket. Bíró István és mtsai. [1] forgácsolási kísérleteik során a leválasztandó rétegvastagság függvényében vizsgálták a fajlagos forgácsolóerő alakulását. Az 1. ábra szemlélteti az eredményeiket:



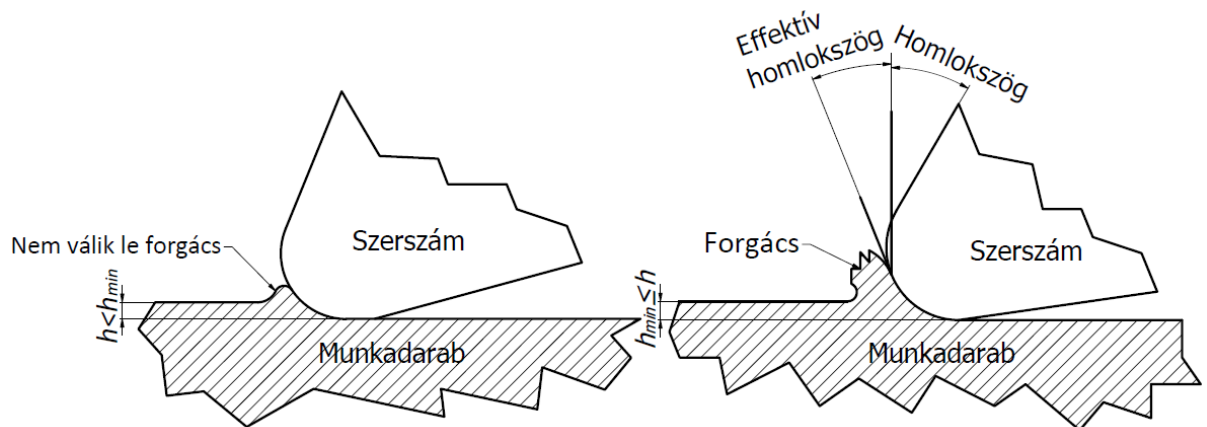
1. ábra: A fajlagos forgácsolóerő alakulása a leválasztandó rétegvastagság függvényében [1]

A rétegvastagság csökkenésével járó hirtelen fajlagos forgácsolóerő-növekményt mérethatás jelenségének nevezzük. Látható, hogy a logaritmikus tengelyen egy egyértelmű meredekségváltozás történik a IV. és III. zóna határán. Ez a jelenség összefüggésben áll a korábban említett hidegalakításba forduló energiavesztéssel. Fontos megemlíteni a mérethatás vizsgálatokor továbbá a különbséget az ideálisnak tekintett, illetve a valós szerszámok közötti eltéréseket is. Bali János [2] Forgácsolás című tanönyvében említi az ideális forgácsolási körülményeket, valamint a valós körülményeket. A 2. ábrán az általános szerszám ortogonál-nézetbeli képét láthatjuk.



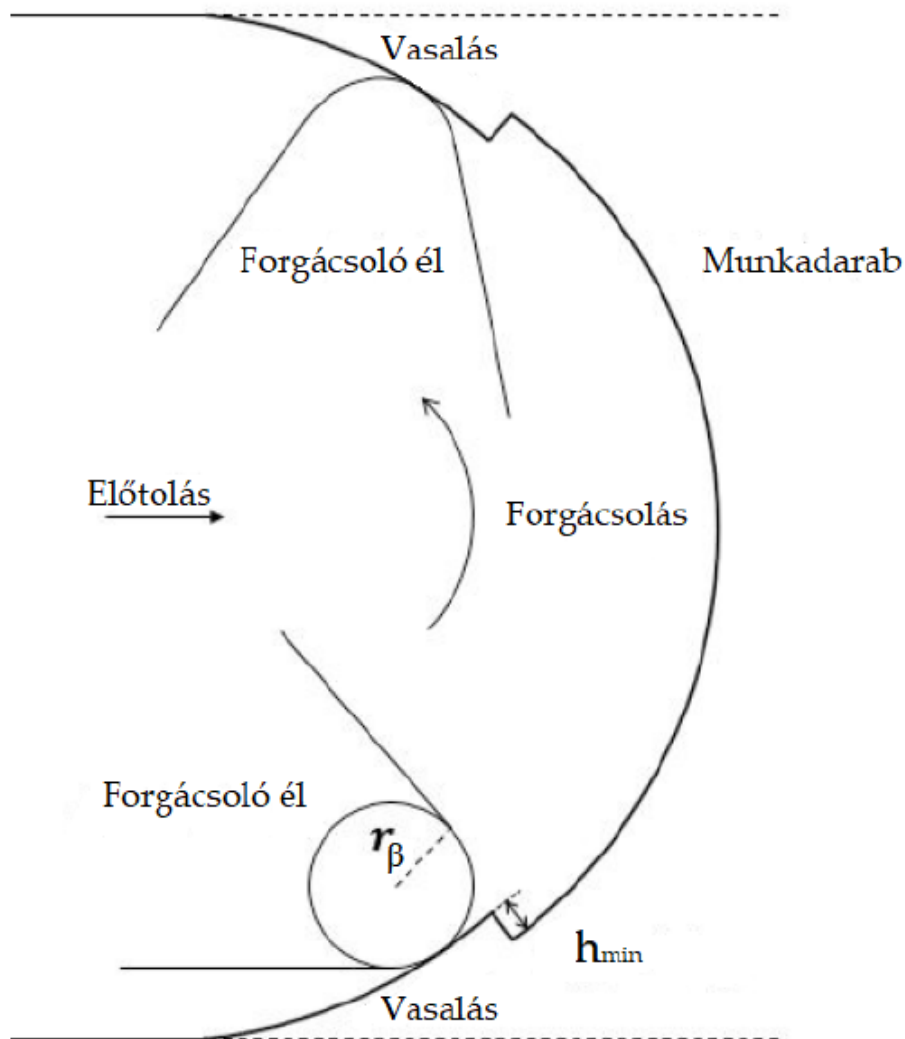
2. ábra: Az ideális esztergaszerszám szögei ahol α az hátszög, β az élszög, γ pedig a homlokszög, r_β pedig az élekerekítési sugár

Az ideális szerszám esetében elhanyagoljuk az élekerekítési sugarat. Ezt kellően nagy fogásvétel esetén megtehetjük, hiszen nem játszik szerepet a forgács leválasztásában (ellenben az erőkre, valamint a megmunkált felület minőségére hatással van). A minimális rétegvastagság mérettartományában azonban már előfordulhat, hogy a leválasztott rétegvastagság nagysága összemérhető lesz az élsugárral. Ebben az esetben már beszélhetünk effektív homlokszögről, ami a szerszám éle mentén látható. Ezt, valamint a hidegalakításból forgácsolásba történő átmenetet szemlélteti a 3. ábra.



3. ábra: A vasalásból forgácsolásba történő átmenet, valamint az effektív homlokszög definíciója

Ezt az átmenetet korábbi kutatásokban kétféle kísérlettel hozták létre, homlokbe-szúró esztergálás közben, valamint ellenirányú marást alkalmazva. A homlokbe-szúró esztergálás előnye a visszamérhető horony, míg ellenirányú marás során a sok-szorosan megismételt mérést tekinthetjük előnyös tulajdonságnak. A 4. ábrán egy teljes átmérővel végzett marási kísérletben kerül szemléltetésre a megmunkált réteg vastagsága.

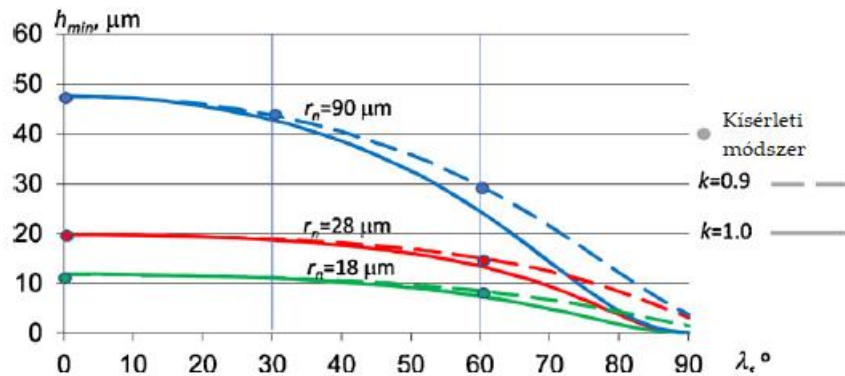


4. ábra: [3] Jue-Hyun Lee és mtsai. által kiadott publikáció alapján teljes átmérővel történő marás esetén a rétegvastagság

Jue-Hyun Lee és mtsai. egy geometriai szimuláció segítségével próbálták megbecsülni a minimális rétegvastagság hatását a leválasztott forgács mennyiségére, azonban ez a kísérlet nem vette figyelembe sem a szerszámkopást (amelyet a szerszámmal történő hidegalakítás számottevően megnövel), valamint a marás során fellépő erőkből keletkező rezgéseket sem, így pontos következtetés nem vonható le.

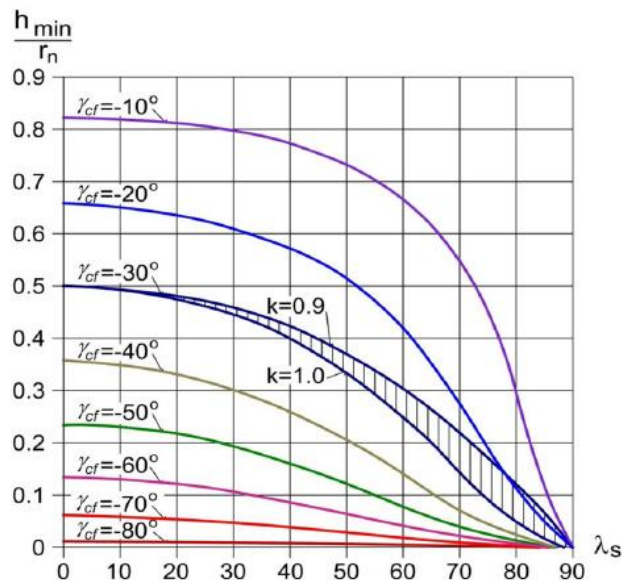
2.2. Különböző forgácsolási paraméterek hatása

A minimális rétegvastagság nagyon erősen függ a megmunkálás paramétereitől, például a szerszámgeometriától, a munkadarab anyagától, a megmunkálás mozgásvi-szonyától, azaz a forgácsolósebességtől és az előtolástól. Tadeusz M. és mtsai. [4] a szerszám terelőszögének és éllekerekítési sugarának hatását vizsgálták a minimális ré-tegvastagságra, eredményeik a 5. ábrán láthatók.



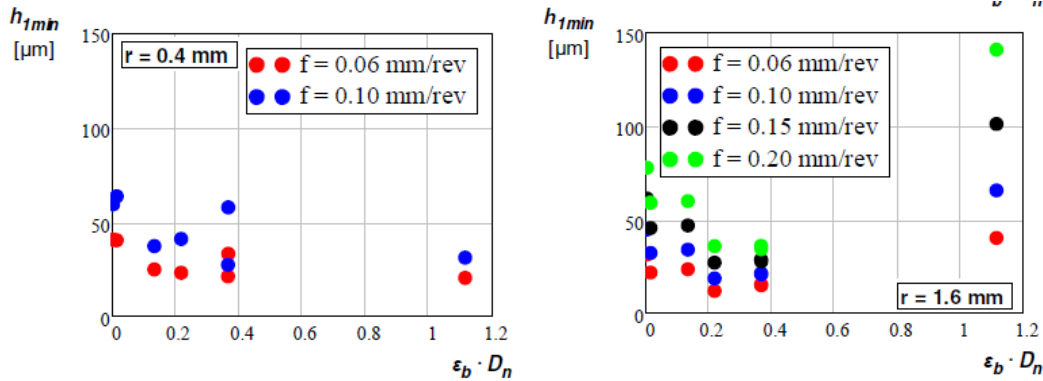
5. ábra: Tadeusz M. és mtsai. [4] kutatása, a terelőszög hatása a minimális rétegvastagságra, k-val a forgácsoláramlás irányát különböztetik meg

Ezen kívül képezték még a minimális rétegvastagság és a szerszám éllekerekítési sugarának arányát, melyet szintén ábrázolva a terelőszög függvényében látható a 6. ábrán:



6. ábra: Tadeusz M. és mtsai. [4] kutatása, a terelőszög hatása a minimális rétegvastagság és a szer-szám élsugarának arányára különböző homlokszögekre

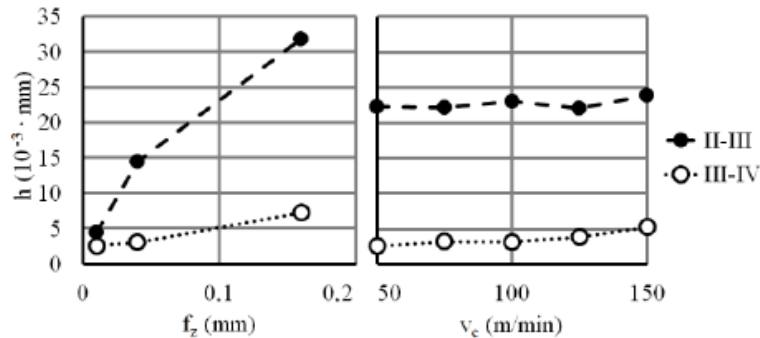
Ezen kívül Fredrik Schulteiss és mtsai. [5] minimális rétegvastagság megmunkált felületi minőségre gyakorolt hatásával kapcsolatos kutatásukban találtak összefüggést az alakítási felkeményedés és a minimális rétegvastagság közötti kapcsolatra, ezek láthatók a 7. ábrán:



7. ábra: Az alakítási felkeményedés hatása ($\epsilon_b \cdot D_n$) a minimális rétegvastagságra különböző előtolásértékeken [5]

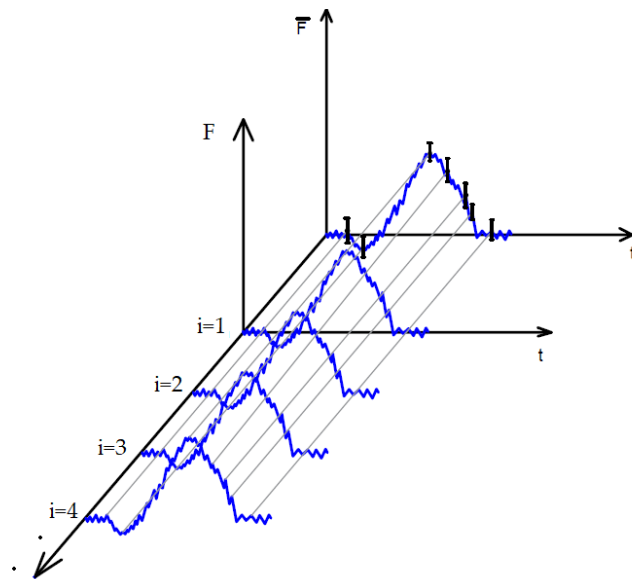
Az előtolás hatásának jellege némileg látható a jobb oldali ábrán, ahol 4 különböző előtolás értéken vizsgálták meg a minimális rétegvastagság értékét, miszerint nem lineáris a növekmény, sokkal inkább valamilyen hatványfüggvény szerint növekszik.

Ehhez hasonló jelenséget tapasztaltak Biró István és mtsai. [6], akik a forgácsolási az előtolás és forgácsolósebesség hatását vizsgálták. A kutatás során a fő mutatójuk a fajlagos forgácsolóerő volt, melynek értékeit tartományokra bontották, ezek határait vizsgálva. Tapasztalataik szerint az előtolás növekedésével a tartományok határa exponenciális növekményt mutat, míg a forgácsolósebesség hatására pontos tendencia ugyan nem állapítható meg, de növekmény jellegű összefüggés látható.



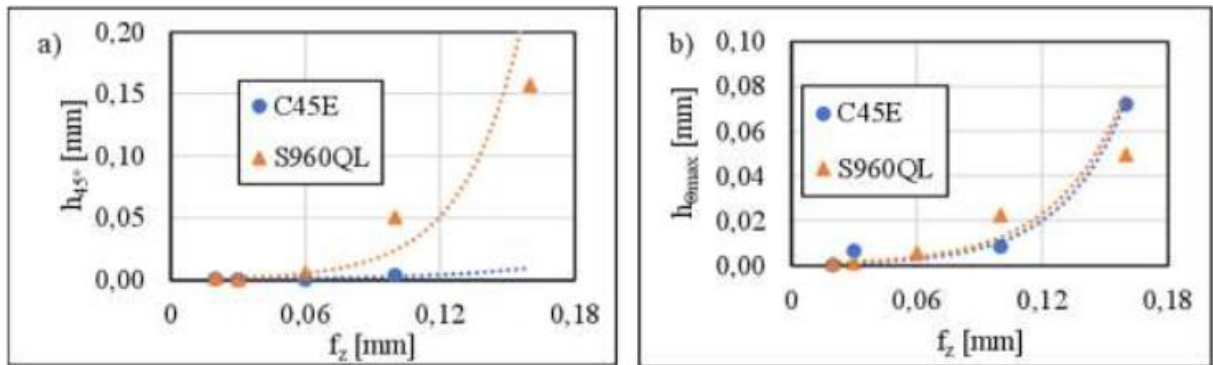
8. ábra: A fajlagos forgácsolóerő tartományhatárának változása a paraméterek függvényében

Hasonló mérést végeztem egy korábbi kutatás alkalmával [7], ahol a minimális rétegvastagságot konvencionális méretű szerszámmal, ellenirányú marással. Ebben a kutatásban ellenirányú marást végeztem C45E és S960QL anyagokon. A mérés során az erőmérő rendszer 50 fordulat adatait rögzítette. Ezen erőkből a 9. ábrán látható módon képeztem egy átlagos fordulatot, melyet transzformáltam a munkadarabra ható erőkből a szerszám élére ható erőkké.

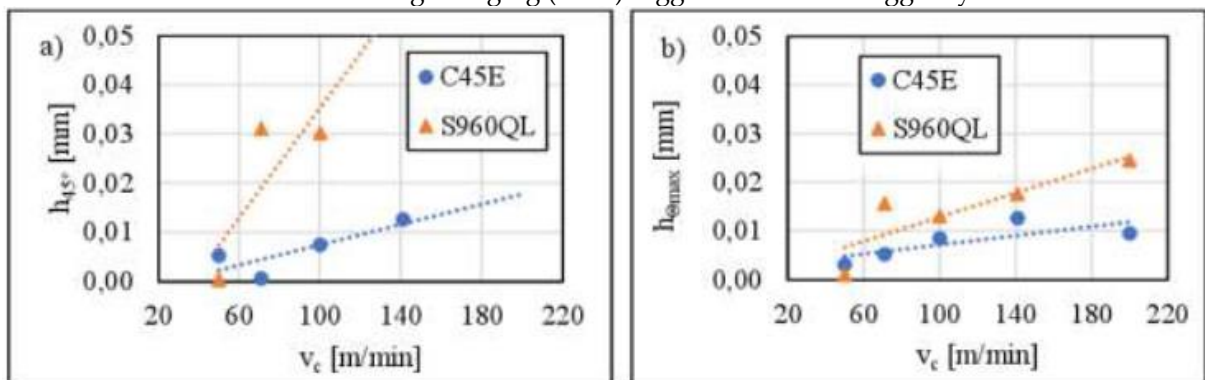


9. ábra: Az átlagos fordulat képzését szemléltető ábra

Ezek után a szerszám élére ható erőkre egy görbét illesztettem, majd az erők arányát kiszámítottam a csak transzformált, valamint az illesztett erőgörbékre. Az illesztett erőgörbéken jellemzően található volt egy olyan pont, ahol a normálerő és a forgácsolóerő értéke megegyezett, a „nyers” transzformált erőadatok arányában pedig található volt egy lokális maximum a mérések során, ezeket kigyűjtve láthatóvá vált, hogy az előtolás növelése valóban exponenciális növekményt okoz ezen jellegzetes rétegvastagságok tekintetében (10. ábra és 10. ábra).



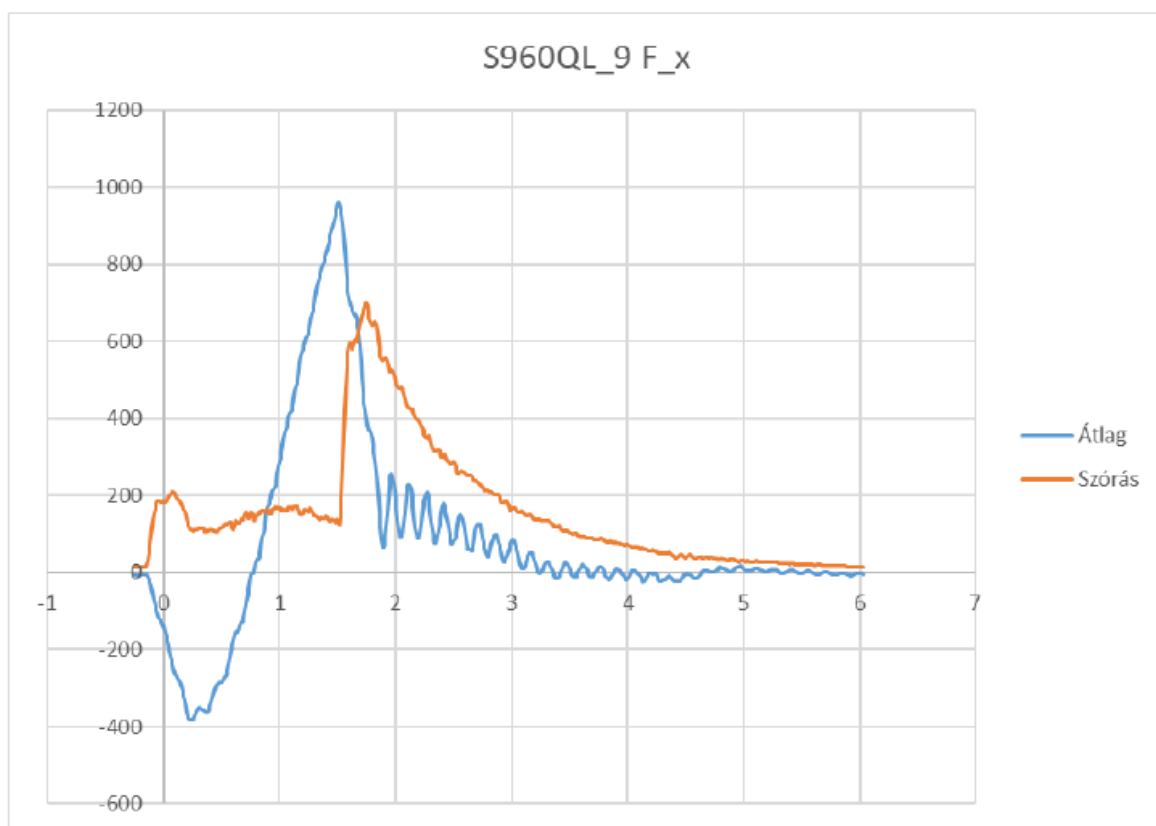
10. ábra Az erők metszéspontjához tartozó rétegvastagság (h_{45°), valamint az erőarány lokális maximumához tartozó rétegvastagság ($h_{\theta_{\max}}$) függése az előtolás függvényében



11. ábra A 10. ábrán ismertetett jellemzők függése a forgácsolósebesség függvényében

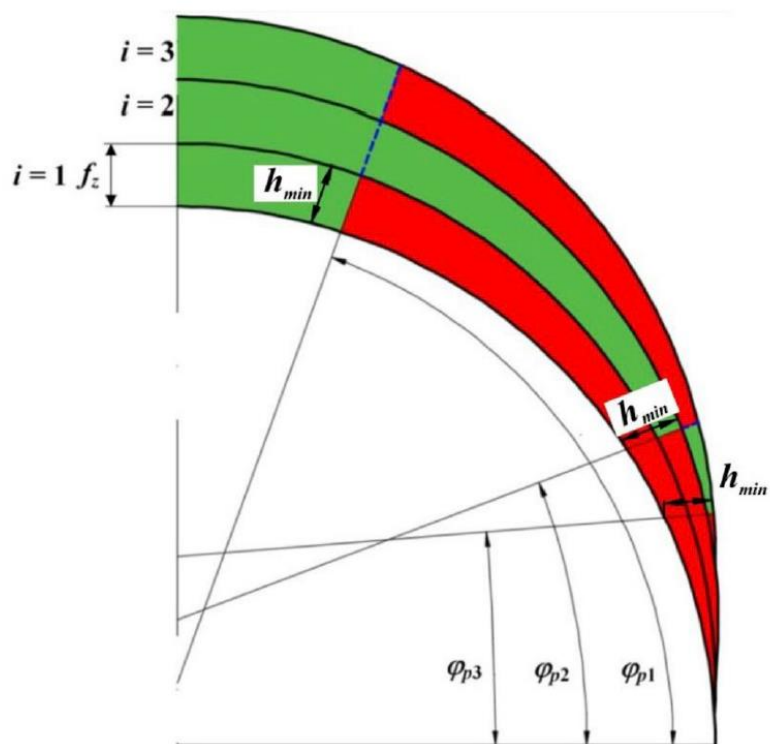
A forgácsolósebesség-függés vizsgálata során az adatok nagy szóródása miatt pontos tendencia nem mutatható ki, azonban valamilyen növekmény jellegű változás tapasztalható.

Ezután statisztikai vizsgálatoknak vetettem alá az itt kidolgozott mérési adatsorokat, valamint a korábban használt közelítőképlet helyett a rétegvastagság vizsgálatára pontos cikloispálya egyenletébe helyettesítettem be. A cikloispályába való behelyettesítés nem adott más eredményt, a jellegzetes rétegvastagságok paraméterfüggése azonos volt a közelítő képlethez képest, értékük különbözött. Az átlagos fordulat számításakor azonban a szerszám szögelfordulásának függvényében ábrázoltam mind az erőt, mint az átlagos erőadatok szórását:

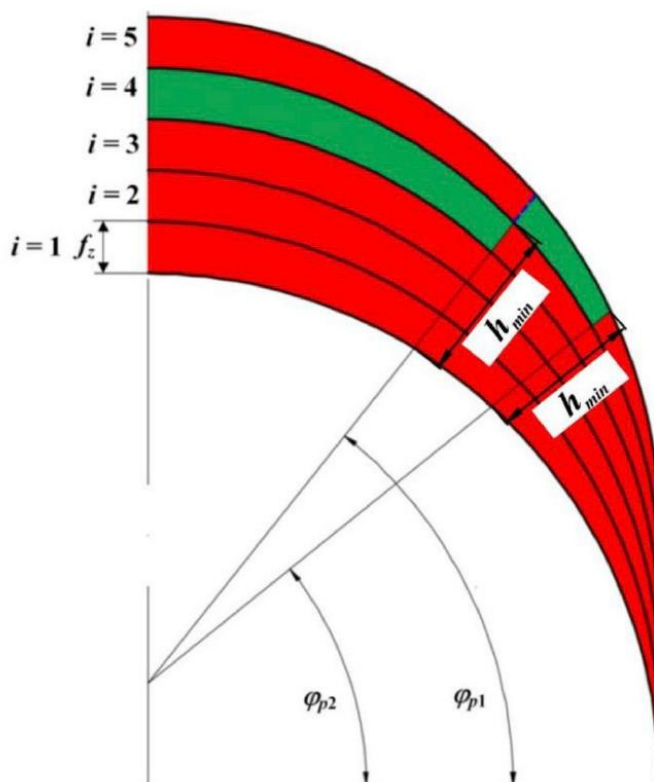


12. ábra: Az átlagos fordulat erőértékei és szórásuk

A szerszám kilépésekor látható szórásnövekedés a szerszám ellenirányú marásból adódó kilengésének következménye. Ellenben a szerszám belépése után tapasztalható lokális maximum a minimális rétegvastagsággal kell, hogy összefüggésben legyen. Ezzel kapcsolatban S. Wojciechowski és mtsai. [8] cikkében található a magyarázat, mely a jelenségnek az anyagfelhalmozódás nevet adta. A jelenség lényege, hogy a szerszám a forgácsleválasztást mindig egy adott rétegvastagság felett kezdődik el, mely azt eredményezi, hogy a maradékanyag miatt korábban kezdődik meg a forgácsleválasztás a következő fordulatban. Két esetet különböztetnek meg, amikor az élenkénti előtolás meghaladja a minimális rétegvastagságot, valamint amikor az előtolás kisebb, mint a minimális rétegvastagság. Szemléltesse ezt a 13. ábra és a 14. ábra:



13. ábra: Az anyagfelhalmozódás jelensége minimális rétegvastagságnál nagyobb élenkénti előtolás esetén [8]

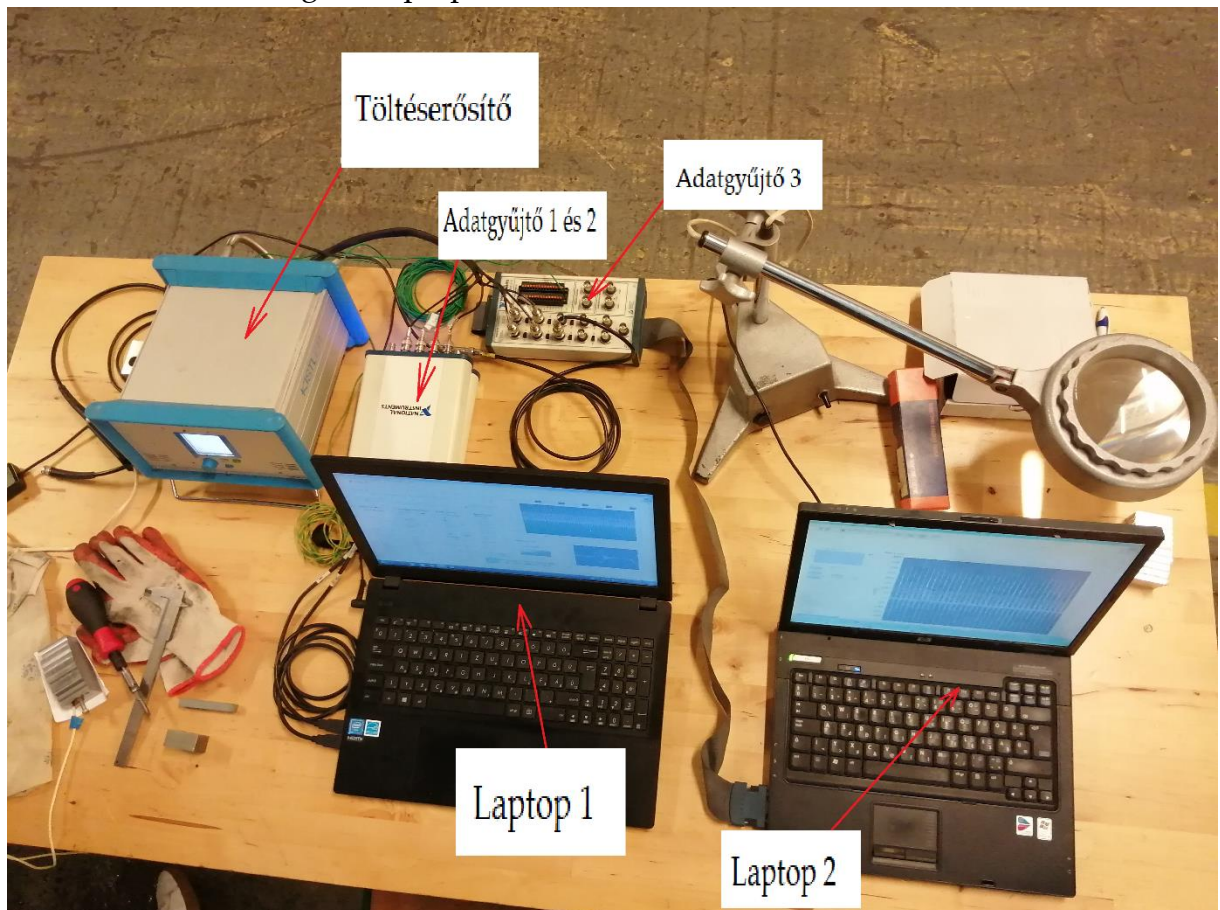


14. ábra: Az anyagfelhalmozódás jelensége minimális rétegvastagságnál kisebb élenkénti előtolás esetén [8]

3. A FELADAT KIBONTÁSA/ELSŐ FŐFELADAT

3.1. A kísérleti összeállítás

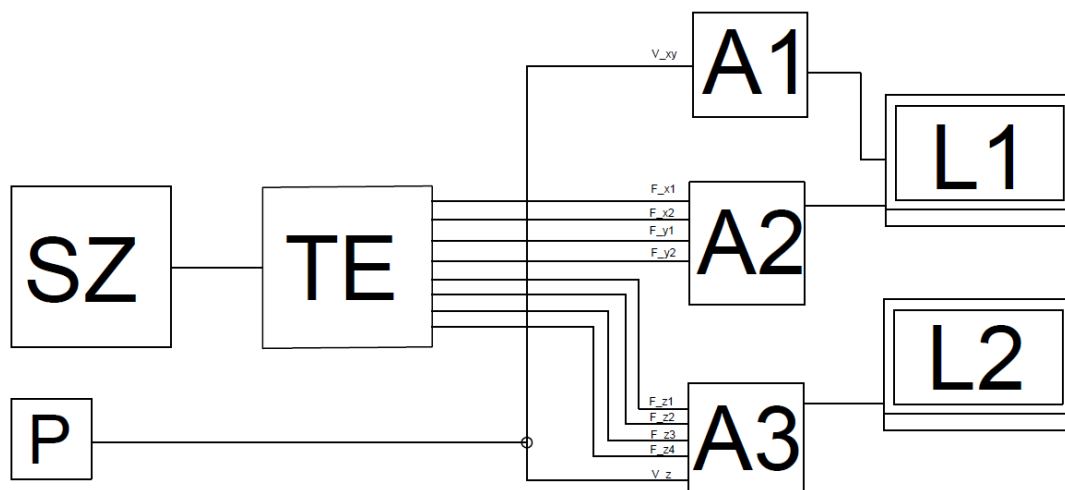
Ebben a dolgozatban is a korábbi kutatás során mért erőkre készült a kiértékelő program. A mérés során egy Kondia B640 3-tengelyes CNC megmunkáló központon végeztünk ellenirányú marást egy 16 (mm) átmérőjű szerszámmal, 8 (mm) fogászélességgel, 2 (mm) fogásmélységgel. A megmunkálás paramétereinek megválasztásakor a Sumitomo WEX2016E szerszámtestbe befogott Sumitomo AXMT123504PE-ERG típusú váltólapkához ajánlott paramétereket osztottuk fel úgy, hogy a forgácsolósebesség lineáris növekménnyel változzon, az előtolás pedig exponenciálisan növekedjen, hiszen irodalomkutatásaim során azt láttam, hogy a minimális rétegvastagság is hasonló növekményt kell, hogy mutasson. A 15. ábrán láthatók az adatgyűjtők, töltéserősítő és adatfeldolgozó laptopok:



15. ábra: A mérési elrendezés adatgyűjtőiről mérési elrendezés

Az ábrán látható, hogy két laptopot alkalmaztunk az adatgyűjtésre. Ez az erőmérő kimeneteinek száma miatt volt szükséges, mert egy adatgyűjtőben nem tudtuk az összes mért erőkomponenst rögzíteni. A „Laptop 1” néven szereplő lappal került rögzítésre az x és y irányú, a „Laptop 2” pedig a z irányú komponens rögzítése. Mivel ezeket nem lehetett teljesen szimultán rögzíteni, ezért a z irányú komponens a korábbi

mérések során csak tájékoztató jelleggel szerepeltek a mért adatok sorokon, azonban az új kiértékelésben már további információ tartalommal nem bírtak, ezért az új mérésben elhanyagoltam ezeket. A 16. ábrán látható kapcsolási rajz a mérési elrendezés sematikus ábrája:

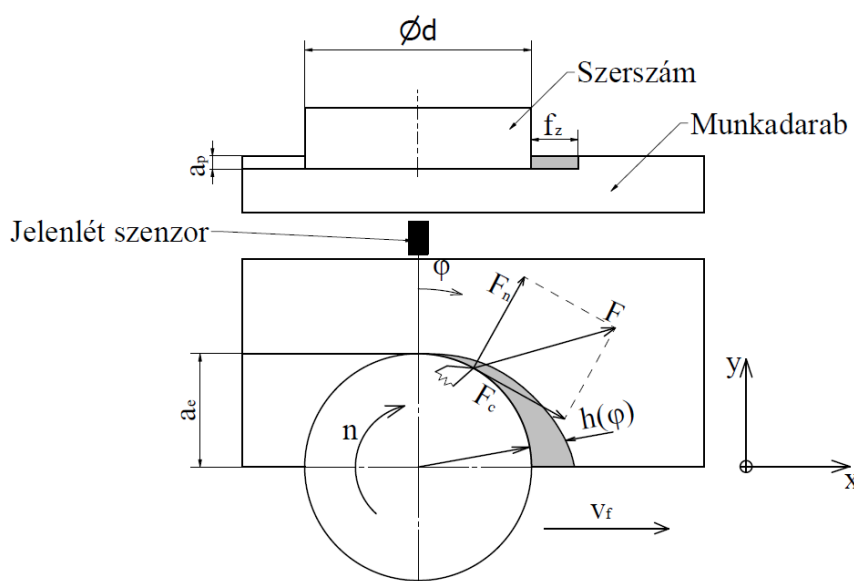


16. ábra: A mérési elrendezés blokkdiagramja

A jelölések:

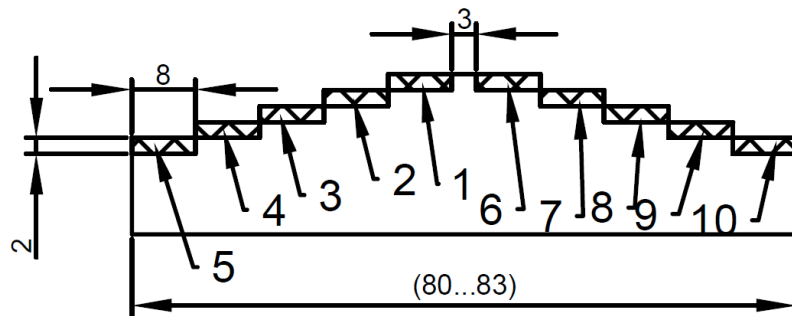
- SZ – Erőmérő szenzor (KISTLER 9257B)
- TE – Töltéserősítő (KISTLER 5070A)
- P – Jelenlétszenzor (Proximity) (OMRON E3FDS10B4)
- A1, A2, A3 – Adatgyűjtők (A1-A2: NI USB-4431, A3: NI BNC-2110)
- L1, L2 – Laptopok

A mérési elrendezésről és a felhasznált mennyiségek jelölését szemléltető ábra a 17. ábra:



17. ábra: A mérési elrendezés és jelölésrendszere [7] alapján

A mérés során 3 anyagú munkadarabon végeztünk forgácsolást, ezek anyaga AlMgSi1 alumíniumötvözet, C45E általános rendeltetésű acél és S960QL finomszemcsés nagyszilárdságú szerkezeti acél. A munkadarabok a 18. ábrán látható lépcsőzetes kialakításúak, hogy a későbbiekben felületi minőség vizsgálatára is alkalmasak legyenek.



18. ábra: A munkadarab kialakítása

A mérések során a paraméterek változtatásának metodikája a következő volt: Az első 5 mérés során állandó előtolás mellett változtattuk a forgácsolósebességet (közvetten a megmunkálóközponton megadható fordulatszámmal), a 6-10. mérésen pedig állandó forgácsolósebesség (fordulatszám) mellett változtattuk az előtolás értékeket. A mérések sorszáma a nyilak végén levő számok jelölik. Ezeket a paramétereket a 1. táblázat foglalja magába:

Mérés sorszáma	Előtolás f_z	Forgácsoló sebesség v_c
1	0,057	50
2	0,057	71
3	0,057	100
4	0,057	141
5	0,057	200
6	0,02	100
7	0,034	100
8	0,057	100
9	0,095	100
10	0,16	100

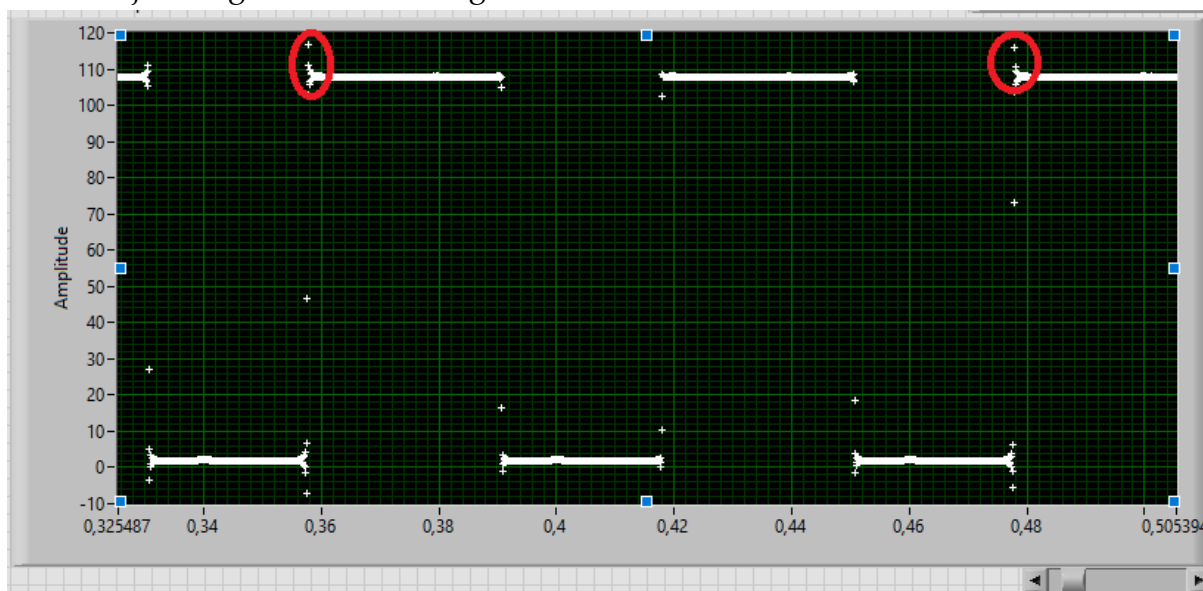
1. táblázat: A kísérletek sorszámaához tartozó paraméterek

3.2. A számítás módszere

Jelen dolgozatban a korábbi kísérlet eredményein végzek egy pontosabb kiértékelési módszert, melynek alapja az átlagos, egy fordulat alatt mérhető forgácsolóerők meghatározásának lépése helyett külön-külön vizsgálja meg mindegyik fordulatban a fel-lépő erőket.

3.2.1. A NÉGYSZÖGJEL VIZSGÁLATA

A kiértékelés első lépéseként a mérés során alkalmazott jelenlétszenzor négyszögjelével foglalkoztam. A LABView beépített függvényei segítségével meghatároztam a periódusidőt és a négyszögjel túlfutását jellemző Overshoot értéket. Az erre alkalmazott függvény a Timing and Transition Measurements néven található meg. Az Overshoot jelenség értelmezését segítő ábra a 19. ábra:

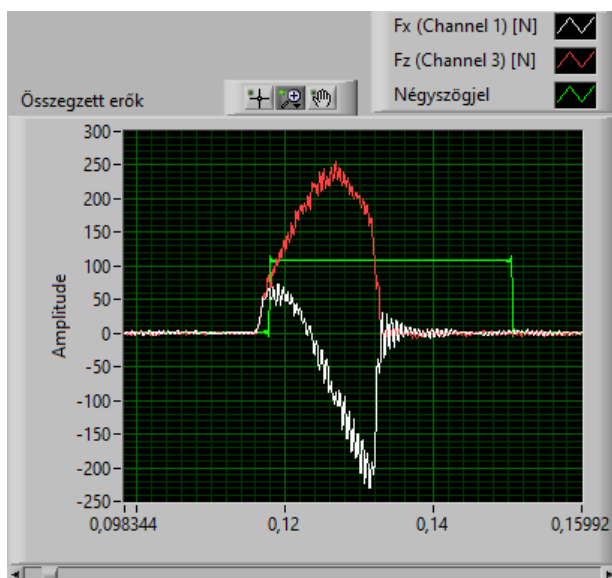


19. ábra: Az overshoot a jel felső értékén történő „túllendülés”

Az overshoot értékének kiszámítása ahhoz volt szükséges, hogy a szerszám belépéseinek időpontját meg tudjam határozni. A belépések számításához szükséges volt még a jelközepszint meghatározására, ehhez a LABView Amplitude and Levels függvényét alkalmaztam, ahol is a „high state level” és a „low state level” kimenetek, vagyis a jel felső- és alsó értékeinek számtani közepét vettem. Az adatsorból kigyűjtöttem azokat az adatokat, amelyek nagyobbak az előző értéknél, valamint meghaladják a jelközepszint értékét. Ezen adatoknak az adatsorban vett sorszáma a szerszám belépésének jelenlétszenzor által meghatározott helye. Ezen táblázaton visszafelé végighaladva kivonva egymásból az értékeket, megkaptam, hogy melyik fordulatban hány adat került rögzítésre. Ezek átlagát és szórását kiszámítottam a LABView Deviation and Variance függvényének segítségével, amely korrigált tapasztalati szórást számol.

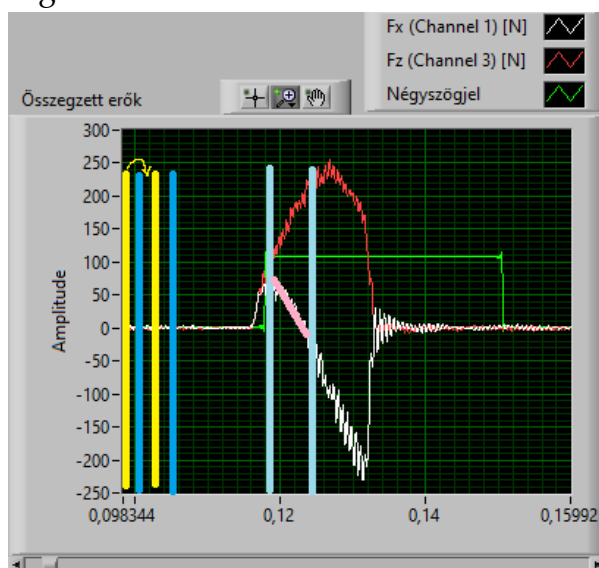
3.2.2. A SZERSZÁM KILÉPÉSÉNEK MEGTALÁLÁSA AZ ADATSORBAN

A rögzített erőértékek között a szerszám kilépése az ellenirányú marás jellege miatt jobban észrevehető, mint a szerszám belépése, mivel a szerszám belépésekor a fogás, amit a szerszám vesz, 0 értékről változik az élenkénti előtolás értékévé (félátmérős megmunkálás esetén). A 20. ábrán láthatók az adott irányba (x és y) összegzett rögzített erőértékek egy fordulatban:



20. ábra: Egy fordulatban rögzített erőértékek

A kiértékelés során a szerszámkilépés meghatározásához egy kézzel megadható szélességű sávot alkalmaztam, amely egyesével végigmegy az adatsor adatain, a sáv szélességét megőrizve. Ezen a sávon belül a LABView Linear Fit nevű függvényét használva egyenest illesztettem az adatsorra, majd kigyűjtöttem az illesztett egyenesek meredekségét. A 21. ábra segít ezt szemléltetni:



21. ábra: A meredekségmeghatározó sáv szélesség. Rózsaszín jelöli az illesztett egyenest, ezen egyenesek meredeksége került kigyűjtésre

Az erőadatsort a négyszögjelből meghatározott fordulatonként rögzített adatszámokat tartalmazó táblázat alapján szétbontottam egy-egy fordulatra, majd ezen belül a legnagyobb meredekségű sáv sorszámát tekintettem a szerszám kilépésének.

3.2.3. A SZERSZÁM BELÉPÉSE

Az erődiagramon látható belépést a szerszám kilépéséből közvetett módon számítottam ki, a korábban kiszámított átlagos fordulatonként rögzített adatszám negyedét kivontam a szerszámkilépések helyeiből, majd a rögzített erők adatsoraiból kivontam az első belépés előtti összes rögzített adatot, ezzel közös nullhelyzetbe helyezve őket. A négyszögjel esetén az adatok törlését azonos módon, az első belépésig rögzített adatok törlését elvégeztem, majd egy táblázatba rendeztem az erőket.

3.2.4. A TRANSZFORMÁCIÓ

A kísérlet során a szerszám belépését tekintettem 0° -os szöghelyzetnek. A rögzített adatsorba beillesztettem egy szögértékekkel kapcsolatos oszlopot, amelyet a korábban számított periódusidőből kiértékelte szögsebesség és a rögzített adatok között mért idő (dt) segítségével tettem meg. (1. és 2. egyenlet)

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1)$$

Ahol ω a szögsebesség, T pedig a periódusidő.

$$\varphi_i = \omega \cdot t_i \quad (2)$$

Ahol φ_i a szögelfordulás, t_i pedig az adott időpillanatban rögzített időérték.

A transzformáció során a rögzített erőértékek a 3. és 4. egyenletbe kerültek behelyettesítésre, ezzel a munkadarabra ható erők helyett megkaptam a szerszám élére ható erőket:

$$F_c = -\sin\varphi \cdot F_x + \cos\varphi \cdot F_y \quad (3)$$

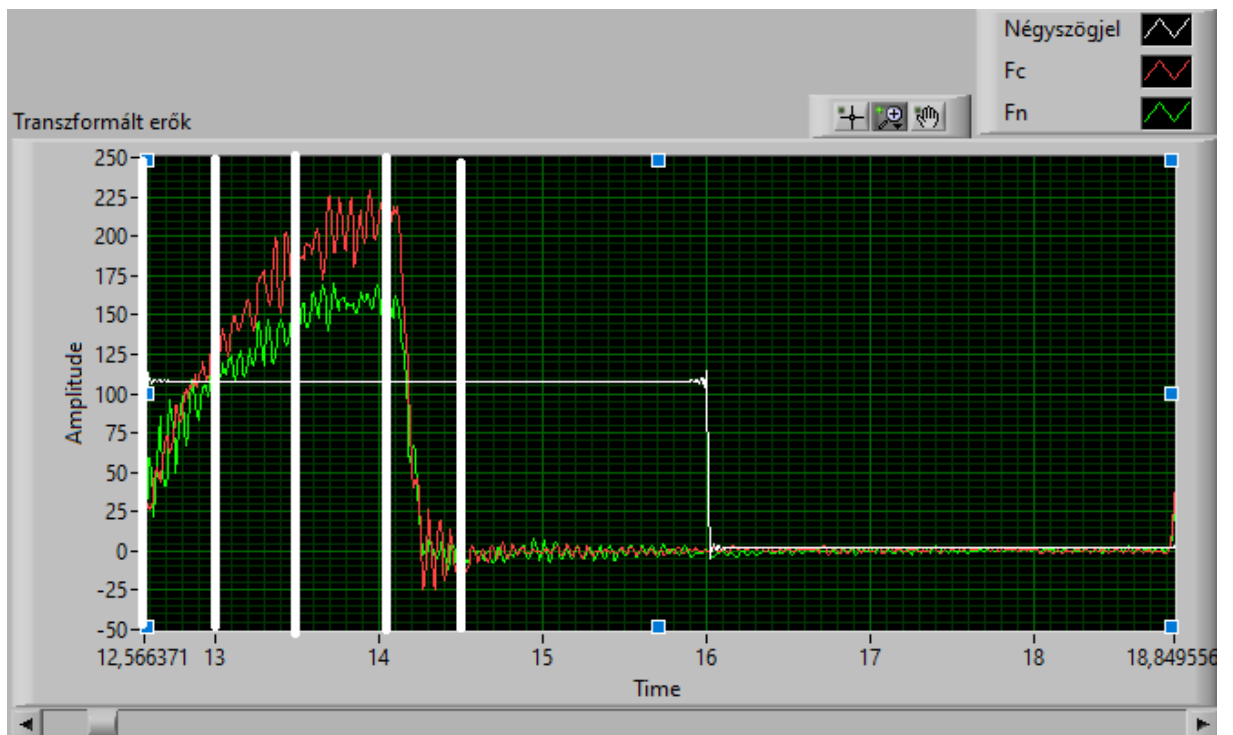
$$F_n = \cos\varphi \cdot F_x + \sin\varphi \cdot F_y \quad (4)$$

Ahol az erők a 17. ábrán látható erőkomponensek.

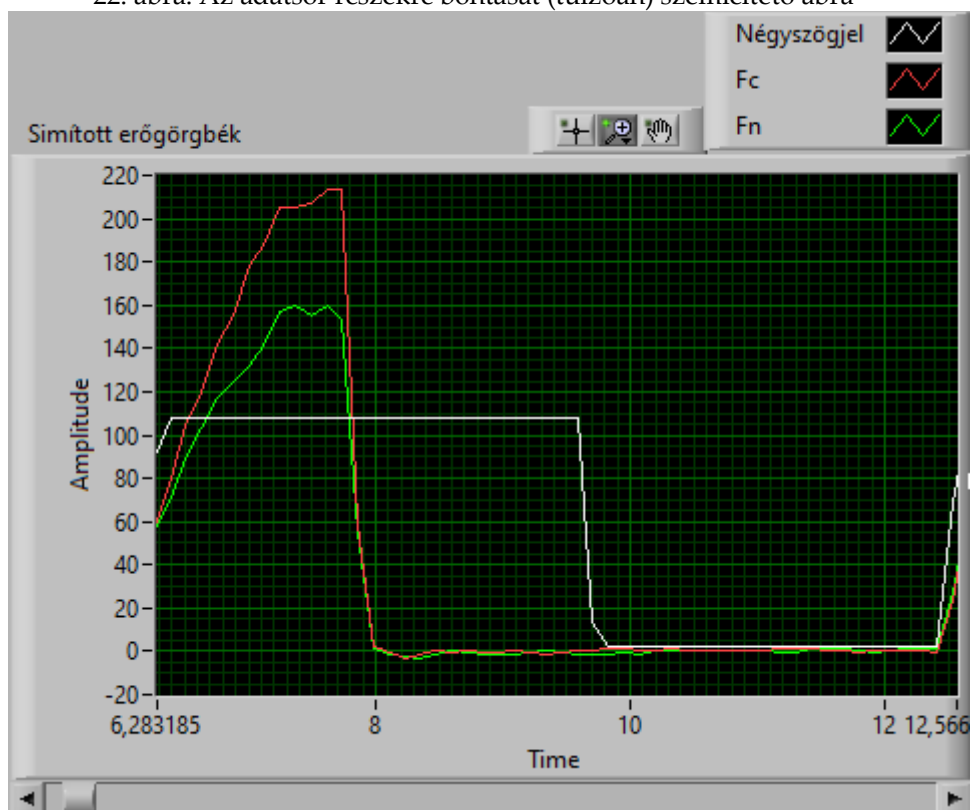
3.2.5. AZ KILENGÉSEK SIMÍTÁSA AZ ADATSORON

Mivel a megmunkálás során jelentős ingadozások tapasztalhatók a rögzített adatokban, ezért szükségesnek ítéltam, hogy ezeket a diagramokat „kisimítsam”, így a transzformált erőket ismét sávokra bontottam, azonban a meredekségmérő algoritmustól eltérő módon:

Jelen esetben az adatsor egyszerű részekre bontásáról van szó, melyeken belül a rögzített erők átlagát vettem a LABView Mean függvényét alkalmazva. A szétbontást szemlélteti a 22. ábra, a simított ábrát pedig a 23. ábra:



22. ábra: Az adatsor részekre bontását (túlzóan) szemléltető ábra



23. ábra: A simított erőgörbék a részekre bontás után

3.2.6. A RÉTEGVASTAGSÁG MEGHATÁROZÁSA CIKLOISPÁLYA SEGÍTSÉGÉVEL

A rétegvastagságokat a (szerszám rezgését egyelőre elhanyagolva) a marószerszám pontos, hurkolt ciklois pályája alapján végeztem el. A hurkolt cikloissal leírható szerszámpálya programozásához a Maple matematikai szoftvert alkalmaztam. Ehhez először a korábban meghatározott szögértékeket exportáltam egy fájlba, amelyet beolvastattam a Maple-be. Ezután felírtam egy „balra” haladó szerszám egyenletét (5. egyenlet).

$$w = I \cdot R \cdot e^{I \cdot \varphi} - r \cdot \varphi \quad (5)$$

Ahol R a megmunkáló szerszám sugara ($D=16$ mm esetén 8 mm), r a szerszám gördülőkörének sugara, φ pedig a szerszám szögelfordulása, I pedig a komplex szám.

A szerszám gördülőkörének kerülete a megmunkálás során alkalmazott fordulatunkénti előtolás (amely egyélt megmunkálás esetén megegyezik az élenkénti előtolással) értékével, innen számítható a gördülőkör sugara (6. egyenlet).

$$r = \frac{f_z}{2 \cdot \pi} \quad (6)$$

A leválasztott rétegvastagság meghatározásához fel kell írni egy olyan egyenes egyenletét, amely a 5. egyenletben megadott ciklois pályával azonos fázisban forog, mindössze egy fordulatnyi perióduskülönbséggel.

$$W = I \cdot u \cdot e^{I \cdot \psi} - r \cdot \psi - 2 \cdot r \cdot \pi \quad (7)$$

Ahol u az origóból kiinduló egyenes paramétere, ψ az egyenes forgásszöge, i a komplex szám.

A rétegvastagság értékét a hurkolt ciklois, valamint a hurkolt cikloishoz képest egy fázissal eltolt, de azonosan „forgó és haladó mozgást végző” egyenes metszéspontja fogja adni. Ehhez először a „ w ” és a „ W ” komplex függvények képzetes részét egyenlővé téve, majd meghatározva az így kapott egyenlet gyökét kaptam a 8. egyenletet.

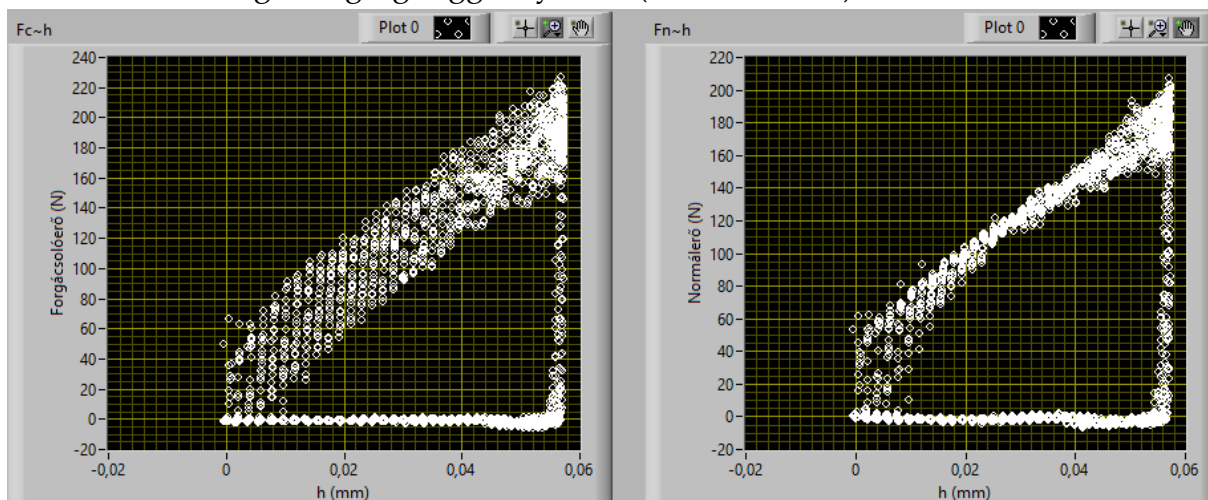
$$\Phi = \arccos\left(\frac{1}{8}u \cdot \cos(\psi)\right) \quad (8)$$

Ezt a „ Φ ” értéket behelyettesítve a „ w ” és „ W ” függvények valós részének különbségébe, majd kapunk egy bonyolult egyenletet, amelyet nem lehet implicit módon megoldani, csak numerikus módszerekkel. Ezért a már korábban Excel segítségével kiszámolt szöghelyzetek értékét a Maple szoftverrel beolvastattam, majd azok segítségével kiszámoltattam a rétegvastagságot. A ciklois pálya és az egyenes metszéspontja azonban azt az értéket adja meg, amely az egyenesből „marad”, ha az egyenes végét lemetszi a ciklois pálya, ezért a megmunkált rétegvastagság értéke a szerszám sugarának és ennek a „maradék” u értéknek a különbsége (9. egyenlet).

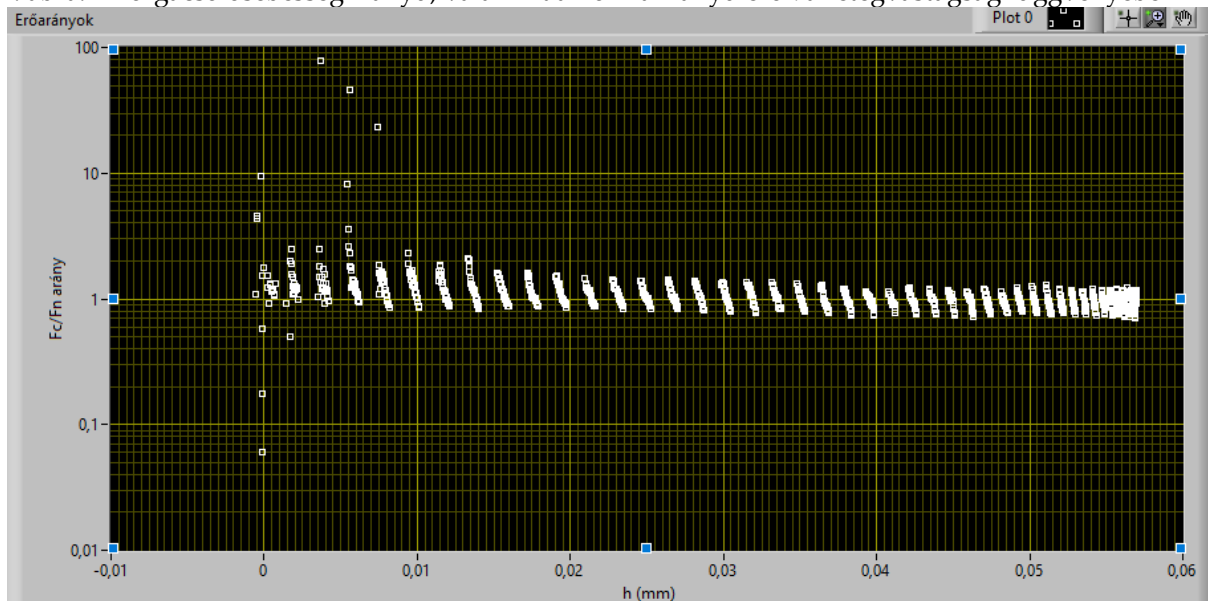
$$h(\varphi) = R - u(\varphi) \quad (9)$$

3.2.7. AZ ERŐK ÉS ERŐÁRÁNYOK ÁBRÁZOLÁSA

A Maple segítségével miután kiszámítottam a rögzített erőkhöz tartozó összes rétegvastagság-értékeket, ezeket visszaolvastam a LABView-ba, majd a rétegvastagságok függvényében ábrázoltam a szerszámra ható erők értékeit, ezután a hányadosát képeztem a normál irányú és a forgácsolóbesség-irányú erőkomponenseknek, majd ezt is ábrázoltam a rétegvastagság függvényében. (24. és 25. ábra)



24. ábra: A forgácsolóbesség-irányú, valamint a normálirányú erők a rétegvastagság függvényében



25. ábra: Az F_c/F_n erőarány a rétegvastagság függvényében

Mivel az normálerő diagramján látható, hogy a szerszámbelépésnél és a kilépéshez közel egyaránt láthatóan szétartanak az erőértékek, ezért azt azokat a „csomópontokat”, ahol a legkisebb az eltérés a különböző fordulatok során rögzített erők értékei között, egy táblázatba kigyűjtöttem, majd a hibaszámítást követően ábrázoltam.

3.2.8. HIBASZÁMÍTÁS

A rögzített rétegvastagság értékek hibáját két forrásból számítottam: egyrészt a formulatonként rögzített adatok darabszámának szórásából, valamint a diagramok simítása során elvesztett adatokból. Ezek a hibák közvetlenül a rögzített szögértékekre vannak hatással, ezért a rögzített rétegvastagságok kigyűjtése során a szerszám szöghelyzetét is rögzítettem, majd az eredő hiba felét kivontam és hozzáadtam a szögértékhez, hogy a hibasáv két szélét meghatározzam. Az eredő hiba:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{adatszám}^2 + \sigma_{simítás}^2} \quad (10)$$

Ahol az alsóindexek jelölik a hibák forrását. Az adatszámok szórását még a négy-szögjel vizsgálatakor kiszámítottam. A simításból származó hibának a simítás során felvett sáv szélességét tekintettem. Mivel ezt a programban adatszámokként kell megadni, ezért ezt a sáv szélességet megszoroztam a „dt”-vel, majd a szögsebességgel. Végül a σ hibasávval kiszámoltam a szögek szélsőértékeit (11):

$$\varphi_{hjell_max} = \varphi_{hjell} + \frac{\sigma}{2} \quad (11)$$

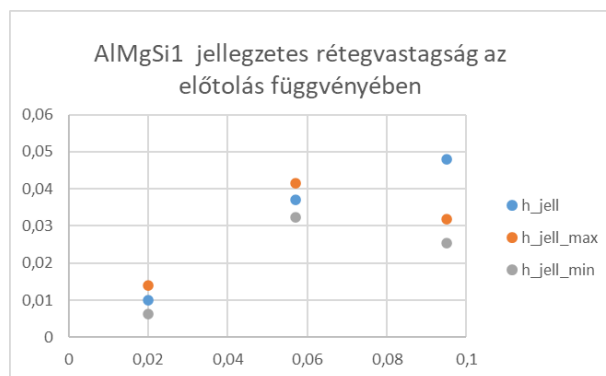
$$\varphi_{hjell_min} = \varphi_{hjell} - \frac{\sigma}{2} \quad (12)$$

Végül az így kapott szög szélsőértékeket visszahelyettesítettem a Maple-ben írt programba, majd egy diagramon ábrázoltam az így kapott rétegvastagság értékeket a rögzített értékekkel.

4. A LEOLVASOTT ÉRTÉKEK

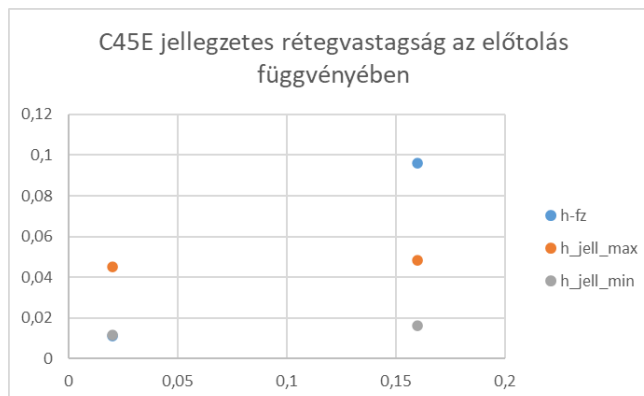
4.1. A program lefuttatása

A program lefuttatása során előzetes eredményként kaptam néhány jellegzetes rétegvastagság-értéket, melyeket a különböző anyagok esetében ábrázoltam, ezek láthatók a 26. ábrán:

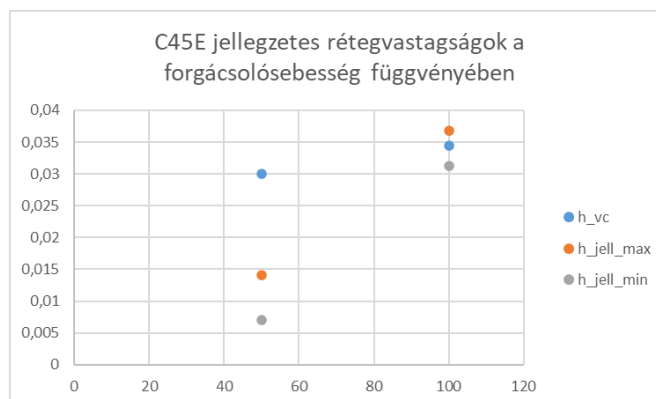


26. ábra: A jellegzetes rétegvastagságok értékei az előtolás függvényében

A C45E anyagú munkadarab esetén már több paraméter függvényében is kiértékelhető eredményt kaptam:



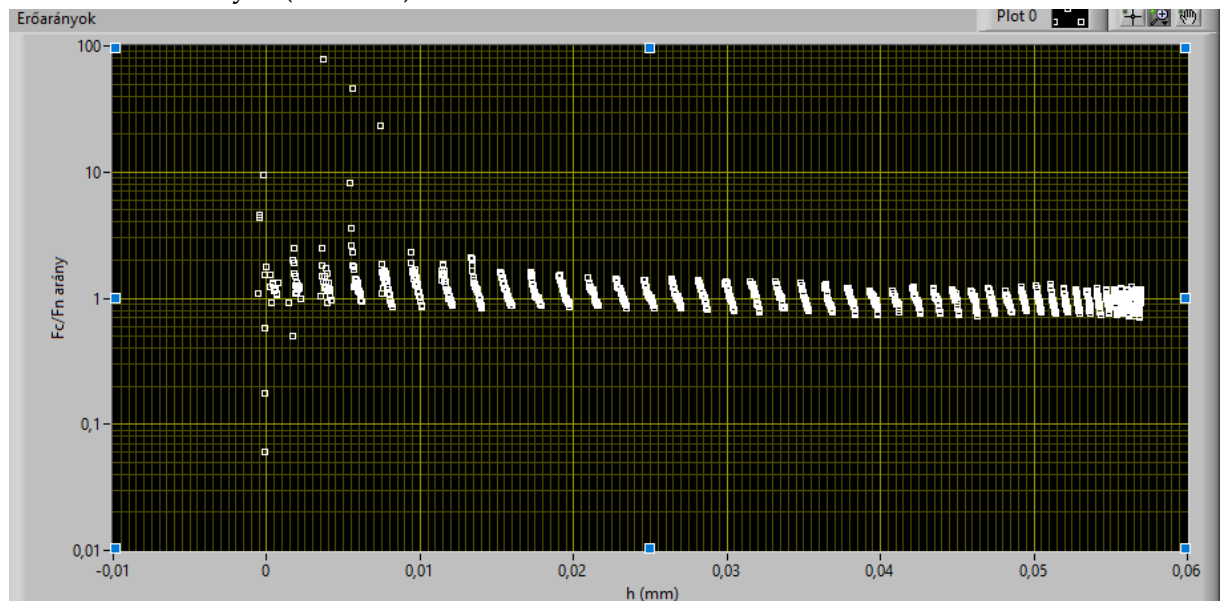
27. ábra: A jellegzetes rétegvastagságok értékei az előtolás függvényében



28. ábra: A jellegzetes rétegvastagság értékek a forgácsolósebesség függvényében C45E esetén

A 26-29. ábrákon látható rétegvastagság értékek nagyságrendileg egybeesnek a korábbi kiértékelések, valamint az irodalomkutatásban tapasztalt eredményekkel. Továbbá a növekmény jellege a kevés adat miatt nem meghatározható, azonban igazolja a korábbi eredményeket, miszerint a paraméterek növelésével a minimálisan leválasztható rétegvastagság növekszik.

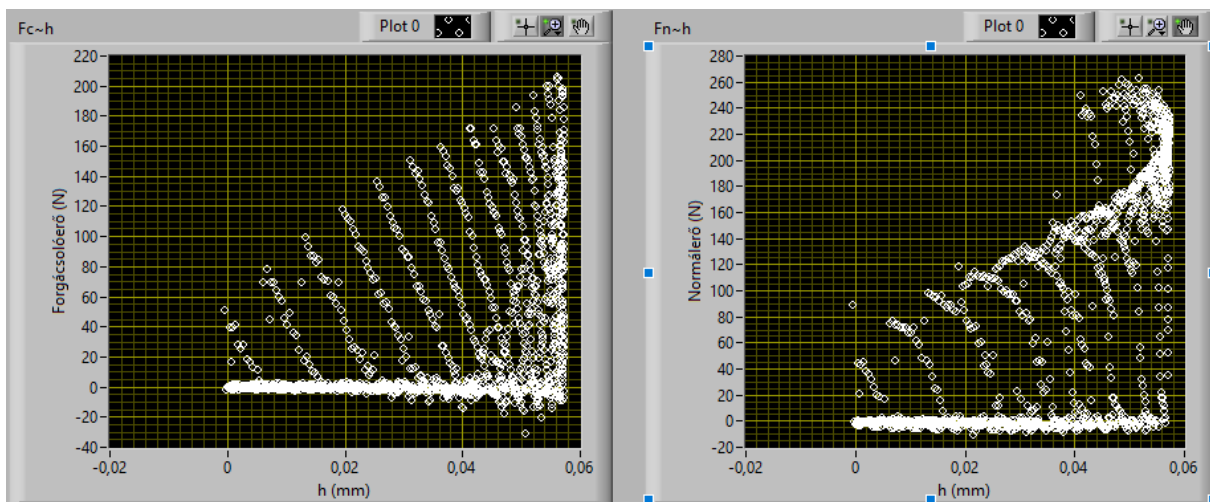
A kiértékelés során az erőarányok ábrázolása során egyértelmű eredményt nem kaptam, a kiugró értékek bizonyára a program pontatlanságából adódó hibás adatösszerendelés eredményei (29. ábra):



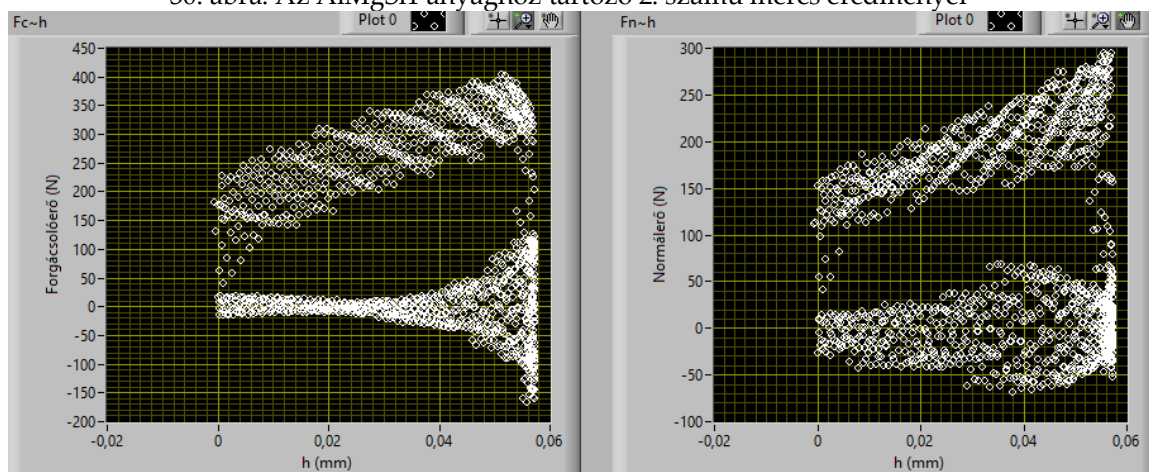
29. ábra: Az AlMgSi1_1 számú kísérlet erőarányai a rétegvastagság függvényében

4.2. A folyamat továbbfejlesztésének lehetőségei

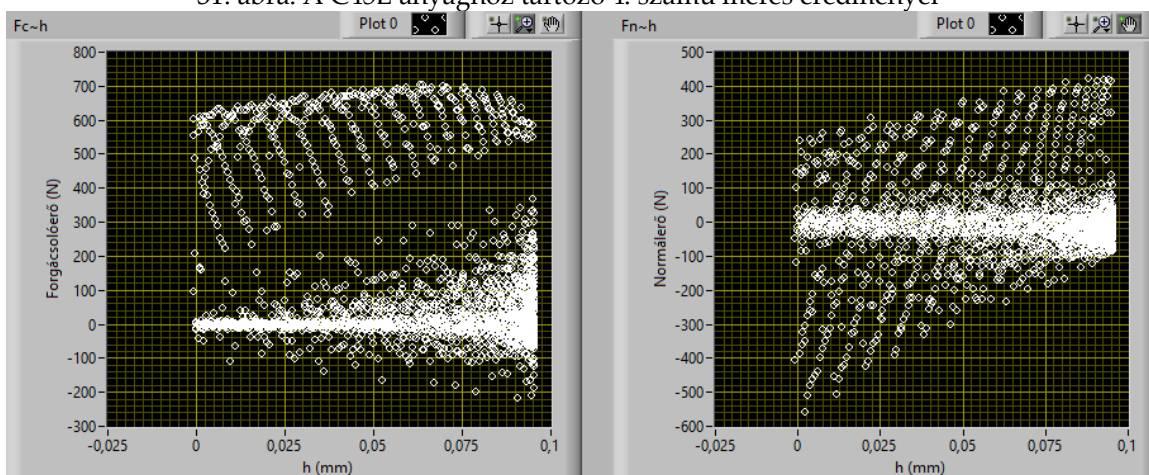
A kiértékelő program lefuttatása során egyértelműen látható a legtöbb esetben, hogy a szerszámgép nem tudott állandó fordulatszámot tartani, emiatt ingadoztak az egy fordulaton rögzített adatok számai. Azok a mérések, amelyek nem adtak egyértelmű eredményt a kiértékelésre, a következő diagramokat eredményezték (30-31-32. ábra):



30. ábra: Az AlMgSi1 anyaghoz tartozó 2. számú mérés eredményei



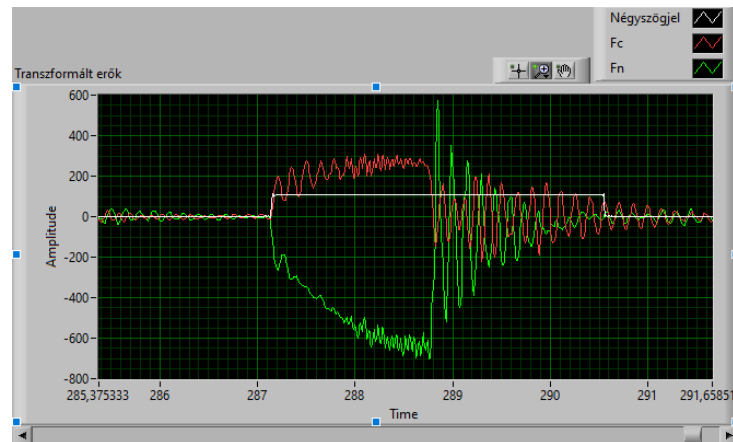
31. ábra: A C45E anyaghoz tartozó 4. számú mérés eredményei



32. ábra: Az S960QL 9. számú mérése

Az imént említett inkonzisztenciák a kiértékelés során pontatlanul összerendelt négyzetjel- és erőértékek, valamint az ebből adódó hibásan megadott nullszögérté-

kek miatt következtek be, ugyanis a 32. ábrán látható adatsorhoz tartozó transzformáció során látható adatsor vége felé (ahol a szögértékek magas értéket értek el), láthatók a hibák:



33. ábra: Az S960QL_9 méréshez tartozó transzformált erők nagy szögek esetén

Emiatt a kutatás folytatása gyanánt a szögértékek javítása kulcskérdéssé válik. Egy módszer lehet erre például, hogy a szerszám belépéséhez az erőadatok között nem az átlagosan egy fordulat alatt rögzített adatszámot tekintem, hanem az ahhoz az adott fordulathoz tartozó rögzített adatszámot, majd a szögeket is úgy rendelem össze, hogy azok az adott fordulatban az adott fordulatban rögzített adatszámok arányában legyenek felosztva mindegyik erőértékhez, ezzel biztosítva, hogy minden belépésnél pontosan 0 értéket vegyen fel a szög, így a nagy szögek miatt történő elcsúszás minimális legyen.

Ezen felül nehezítő körülmény az is, hogy bizonyos mérések esetén a szerszám már a 0° előtt egy negyedfordulattal hozzáér az anyaghoz és megmunkálni kezdi a lépcső alsó felét, emiatt a négyszögjel egyenetlenül oszlik meg a kiértékelésben, így a LAB-View kiértékelőfüggvényei nem azt az eredményt adják ki, mint amiket látni szeretnék (34. ábra):



34. ábra: A korai megmunkálás miatt történő négyszögjel-ingadozás

A korrigálandó számítási módok remélhetőleg konzisztensebb és összehasonlíthatóbb eredményekre vezetik a kiértékelést. Ezenfelül remélhetőleg automatizálhatóbbá is válik a kiértékelés, mert a jelenlegi módszer több helyen is kézi beavatkozást igényel, mint például a meredekségvizsgáló algoritmus sávszélességének, valamint a diagramok simításának sávszélesség-megadása. A hibaszámításban nehézséget okoz, hogy a rétegvastagságot közvetett módon, a szerszám szöghelyzetéből számítom, emiatt előfordul, hogy a „felső szöghatárhoz”, kisebb rétegvastagság érték tartozik a ciklois pálya jellegéből adódóan. A korrigált nullszöghelyzet meghatározása remélhetőleg lecsökkenti a hibasáv szélességét is.

5. ÖSSZEFOGLALÁS/EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

5.1. *Eredmények*

A dolgozat során ismertetett kiértékelési módszer jó alapot képez a későbbiekben egy pontosabb, jobban automatizálható kiértékelő programnak. Az eddig sikeresen rögzített eredmények nagyságrendileg az irodalomkutatásban, valamint a korábbi kiértékelési módszerben látottakkal megfeleltethetőek. A megmunkálási paraméterek hatására történő növekmény is szintén igazolható, azonban a tendencia kimutatásához kevés adat áll rendelkezésre egyelőre.

5.2. *Javaslatok*

A kutatás folytatásaképpen a szerszám nullszöghelyzetének pontosabb megadásával lehet a hibák lehetőségét csökkenteni, ezzel konzisztensebb eredményeket elérve a jelenlegi adatsorból. Későbbi kutatásban érdemes lehet a szerszám pálya még pontosabb meghatározásával, a szerszámrezgés figyelembevételével a leválasztott (és a még le nem választott) anyagvastagságok számítását elvégezni egy gyorsulásmérő segítségével.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] I. Biró és T. Szalay, „Extension of empirical specific cutting force model for the process of fine chip-removing milling”, *Int J Adv Manuf Technol*, köt. 88, sz. 9, Art. sz. 9, febr. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8957-x.
- [2] J. Bali, *Forgácsolás*. Budapest: Tankönyvkiadó Vállalat, 1985.
- [3] J.-H. Lee és A. A. Sodemann, „Geometrical Simulation of Chip Production Rate in Micro-EndMilling”, *Procedia Manufacturing*, köt. 26, o. 209–216, jan. 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.029.
- [4] T. Mikołajczyk, H. Latos, D. Yu. Pimenov, T. Paczkowski, M. K. Gupta, és G. Krolczyk, „Influence of the main cutting edge angle value on minimum uncut chip thickness during turning of C45 steel”, *Journal of Manufacturing Processes*, köt. 57, o. 354–362, szept. 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.06.040.
- [5] F. Schultheiss, S. Hägglund, V. Bushlya, J. Zhou, és J.-E. Ståhl, „Influence of the Minimum Chip Thickness on the Obtained Surface Roughness During Turning Operations”, *Procedia CIRP*, köt. 13, o. 67–71, jan. 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.04.012.
- [6] 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, 0 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.09.015.
- [7] P. Imre és B. István, „Minimálisan leválasztható rétegvastagság vizsgálata S960QL és C45E acélok ellenirányú marással történő megmunkálása során: Determination of minimum uncut chip thickness by means of conventional milling of S960QL, and C45E steels”, *Nemzetközi Gépészeti Konferencia – OGÉT*, o. 187–190, ápr. 2021.
- [8] S. Wojciechowski, M. Matuszak, B. Powalka, M. Madajewski, R. W. Maruda, és G. M. Królczyk, „Prediction of cutting forces during micro end milling considering chip thickness accumulation”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, köt. 147, o. 103466, dec. 2019, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2019.103466.