

Óbudai Egyetem
Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
Anyagtudományi és Gyártástechnológiai Intézet



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

**MŰSZAKI MŰANYAG
FORGÁCSOLHATÓSÁGÁNAK
VIZSGÁLATA**

Szerző: **Nagy Nándor**
gépészmérnök BSc. szak, III. évf.

Konzulensek: **Horváth Richárd**
tanársegéd
Dr. Drégelyi-Kiss Ágota
egyetemi docens
Nikitscher Tamás
intézeti mérnök

Budapest, 2014.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	- 3 -
2. A műanyagok tulajdonságai	- 4 -
2.1 A műanyagok története	- 4 -
2.2 Mi is az a műanyag?	- 5 -
2.3 Műszaki műanyagok.....	- 6 -
2.4 Az Alkalmazott műszaki műanyag: Poli(oxi-metilén)	- 7 -
2.5 Anyagvizsgálatok	- 9 -
3. Felhasznált szerszámok, gépek	- 11 -
3.1 A kísérletekhez használt lapka	- 11 -
3.2 A vizsgálatokhoz felhasznált gépek, eszközök.....	- 12 -
4. Vizsgált érdességi paraméterek	- 14 -
5. Alkalmazott kísérletterv	- 18 -
6. Eredmények bemutatása.....	- 22 -
6.1 Az érdesség mérés folyamata	- 22 -
6.2 Empirikus modellek felállítása	- 23 -
6.3 Empirikus modellek és valós érdesség kapcsolata	- 25 -
6.3.1 R_a érdességek összehasonlítása száraz megmunkáláskor	- 25 -
6.3.2 R_a érdességek összehasonlítása hűtőfolyadékos megmunkáláskor.....	- 26 -
6.3.3 R_z érdességek összehasonlítása száraz megmunkáláskor.....	- 27 -
6.3.4 R_z érdességek összehasonlítása hűtőfolyadékos megmunkáláskor	- 28 -
6.4 Száraz és hűtőfolyadékos megmunkálások eredményeinek összehasonlítása.....	- 29 -
6.4.1 Felületi érdességek összehasonlítása	- 29 -
6.4.2 Szórások vizsgálata	- 35 -
6.4.3 R_p/R_v arányok vizsgálata száraz és hűtőfolyadékos megmunkálás esetén	- 37 -
6.4.4 Az R_{sk} - R_{ku} értékek vizsgálata	- 38 -
7. Optimum pont meghatározása.....	- 39 -
7.1 Forgácsolási optimum pont ellenőrzése	- 41 -
8. Összegzés	- 42 -
9. Irodalomjegyzék.....	- 43 -

1.Bevezetés

A tudományos diákköri munkám során egy adott műszaki műanyag, nevezetesen a POM (Polioximetilén) forgácsolhatóságának vizsgálatával foglalkoztam. Ezen belül értem az anyag forgácsolás közbeni viselkedését, és a megmunkálás során előállított felület minőségét.

A választás azért esett a fent említett témára, mert bár a műanyagok az 1940-es évek óta töretlenül és legdinamikusabban fejlődő anyagszoport, mégsem áll rendelkezésünkre elegendő adat, elegendő szakirodalom a forgácsolás közbeni viselkedésükről. A többi anyaggal ellentétben nincs külön szerszámcsoportjuk, a szerszámkatalógusokban nem találunk az egyes szerszámokhoz forgácsolási paraméter ajánlásokat - például forgácsoló sebesség, előtolás, fogásmélység – műanyag megmunkálás esetére.

Joggal merülhet fel a kérdés, hogy miért is kellene? Hiszen a műanyagokkal könnyű bánni, kisebb forgácsoló erők lépnek fel, nincs akkora szerszámkopás, mint például az acélok esetében. Elsősorban nem is a szerszámok éltartama a legfontosabb, mert a szerszámkopás valóban nem jelentős. Műanyag alkatrészek esetében a felület minősége, és a mai világ élvonalában nélkülözhetetlen termelékenység a kérdés. Minél jobb felület előállítása minél gyorsabban. Melyik az a sebesség, előtolás, fogásmélység amelyeknél még nem melegszik túl/nem olvad meg az anyag és megfelelő felületi érdesség érhető el.

E dolgozatban erre a kérdésre kerestem a választ. A továbbiakban szeretném bemutatni ezen az iparban előszeretettel alkalmazott műszaki műanyag, hogy milyen nehézségekbe ütközhetünk forgácsolás során, hogyan változnak a felületi érdességek, forgácseltávolítás különböző forgácsolási paraméter beállítások esetén.

A forgácsolási vizsgálatok során egy ún. Centrál kompozit kísérlettervet kétszer hajtottam végre száraz valamint hűtő-, kenő-, öblítő folyadék használata mellett elvégzett megmunkálási körülmények között. Céлом empirikus modellek felállítása Ra és Rz felületi érdességek becslésére hűtőfolyadékos valamint száraz megmunkálási körülmények esetén, illetve egy forgácsolási optimum pont megtalálása, amelyben az érdességi paraméterek értékeinek minimalizálására és a termelékenység maximalizálására törekedtem.

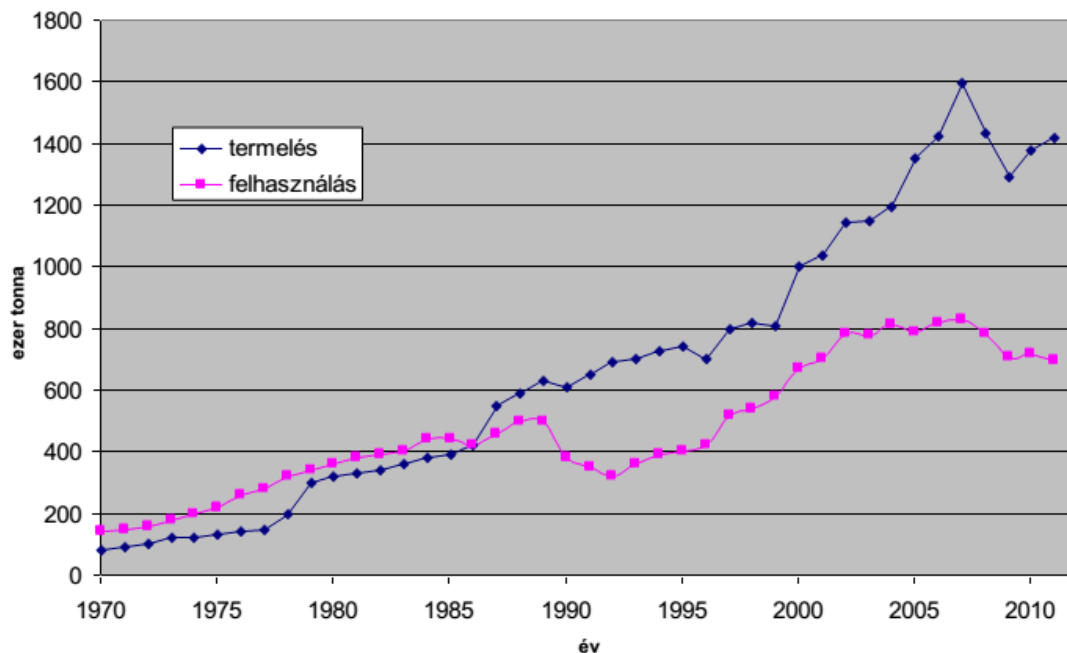
2. A műanyagok tulajdonságai

2.1 A műanyagok története

A makromolekulák és a polimerek vizsgálatával foglalkozó tudomány fiatalnak mondható annak ellenére, hogy egyrészt a természetes polimerek a természet alkotói (például fehérjék vagy cellulóz), másrészt pedig már több ezer éve használja őket az emberiség. Már az ősember is ismerte a természetes gyantákat, bibliai idők előtt is használtak aszfaltot, gumilabdákat találtak maya gyermeksírok feltárásánál. A rómaiak idején a természetes gumi is ismert volt, az indiánok pedig már Amerika felfedezése előtt készítettek tárgyakat kaucsukból. [1]

Az első ipari feldolgozásra is alkalmas anyag a gumi és az ebonit volt. Goodyear 1839-ben fedezte fel a gumi vulkanizálását majd beindult a gumiipar az Egyesült Államokban. Az első valóban szintetikus műanyagot 1909-ben kezdték el gyártani, ez a bakelit volt ami Baekeland nevéhez fűződik.

A műanyagok termelése az 1930-as években kezdett nagyobb méretekben is beindulni. Ezt követően a többi iparág fejlődését messze meghaladta a műanyagipar, és ez a tendencia még napjainkban is tart. 1933-ban a világ műanyagtermelése 110 000 tonna volt. 1939-re már 350 000 tonna. 1950-ben a termelés elérte a másfél millió tonnát. 1974-ben pedig már 46 000 000 tonna volt. Napjainkban a világ műanyagtermelése körülbelül 280 millió tonna. Magyarország műanyag termelését és felhasználását az 1970-es évektől az 1. ábra szemlélteti. A műanyagipar fejlődése viszont nem csak a mennyiségek növekedésében nyilvánult meg, hanem újabb és újabb műanyagfélések megjelenésében is. [2] Ma már kémiai szerkezetük alapján több mint 70 csoportba sorolhatók a műanyagok. Ha a nagy mennyiségű adalékanyagokat és a polimer keverékeket is figyelembe vesszük több mint 500 anyagcsoportot kapunk, valamint a kereskedelmi forgalomban lévő eltérő tulajdonságú műanyag alapanyagok száma a húszezret is meghaladja. [3]



1. ábra, Magyarország műanyag termelése és fogyasztása 1970-től 2010-ig. [5]

Műanyagokat egyre nagyobb mennyiségben és egyre sokoldalúbb célokra alkalmaznak mind a tervezők, mind pedig a napi felhasználók. Segítségükkel olyan műszaki problémák is megoldhatóvá válnak, melyeket a klasszikus anyagokkal nem valósíthatunk meg. A legnagyobb felhasználási terület a hagyományos szerkezeti anyagok – legfőképpen a fémek – helyettesítése. Az ipar szinte minden ágazatában számos előnye van műanyagok alkalmazásának. Ezek az előnyök a kis sűrűségtől kezdve a jó szigetelőképessegen, könnyű megmunkálhatóságon át a sokoldalú választékig sokfélék lehetnek. De a műanyagok sikerének talán az első oka a kedvező ár/érték arány. Gyakorlatilag minden igény kielégíthető műanyagokkal és e mellé elérhető ár is párosul.

2.2 Mi is az a műanyag?

A műanyagok természetes, illetve mesterséges polimerek, amiket úgynevezett monomerekből (kis mólsúlyú anyagok) vagy a természetben fellelhető szerves polimerekből lehet mesterséges úton előállítani.

Elsődleges összetevőjük a szén (C) valamint a hidrogén (H), de ezeken kívül tartalmazhatnak még nitrogént (N), oxigént (O), klórt (Cl), fluort (F) és kén (S) is.

Makromolekuláris, tehát óriásmolekulákból álló anyagok, melyek több ezer atomot tartalmaznak molekulánként.

A kőolaj és a földgáz valamit a szén a műanyaggyártás legfontosabb alapanyagai. Finomítása során a kőolaj többféle frakcióra választható szét. A legfontosabb frakció a

műanyag előállítás szempontjából a könnyűbenzin (nafta). Ez krakkolással különböző gázmolekulákra bontható, pl. propilénre (C_3H_6), butilénre (C_4H_8), etilénre (C_2H_4) és további szénhidrogénekre. Különböző szénhidrogén molekulák kaphatók a szénből előállítható városigáz és a földgáz krakkolásával is. Az így kapott szénhidrogén molekulák (monomerek) hosszú láncú makromolekulákká egyesíthetők, és különböző polimerek állíthatók elő. [4]

A polimerek többféleképpen csoportosíthatók. A legáltalánosabb osztályzási módok az alapszerkezet szerinti illetve az előállítás szerinti csoportosítás.

Alapszerkezetük szerint a polimerek lehetnek:

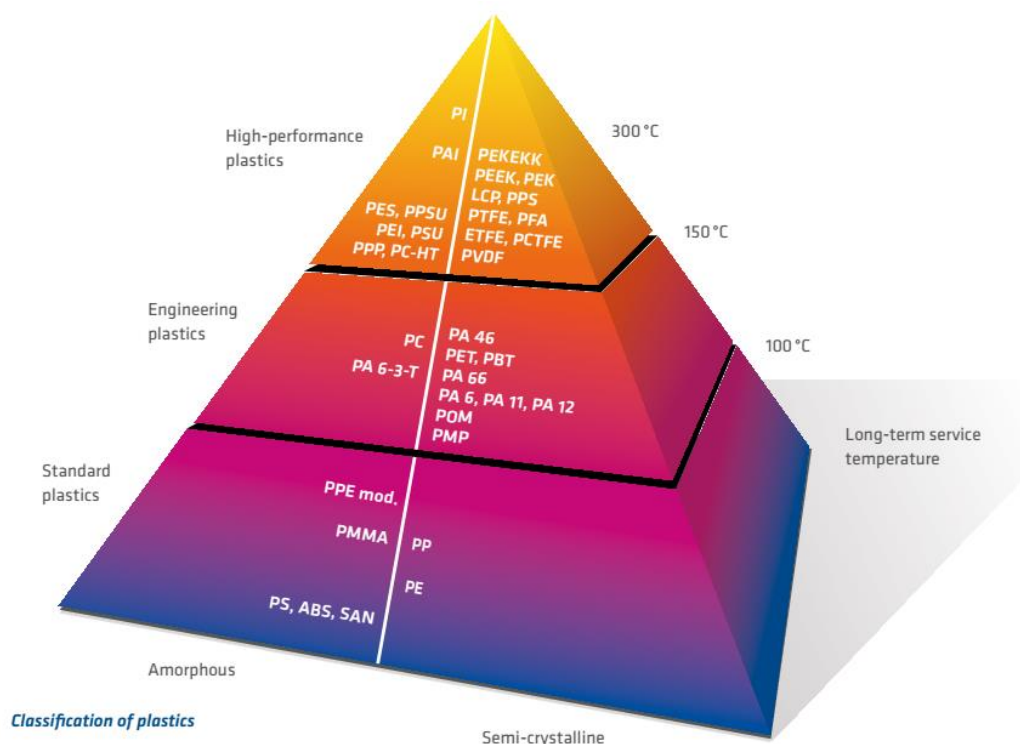
- Termoplasztikus (hőre lágyuló műanyagok)
- Hőre nem lágyuló műanyagok
- Nagy rugalmasságú, gumyszerű műanyagok (elasztomerek)

Előállítás szerint lehetnek:

- Polimerizációval előállított polimerek
- Polikondenzációval előállított polimerek
- Poliaddícióval előállított polimerek

2.3 Műszaki műanyagok

A műszaki műanyagok olyan polimerek melyek széles hőmérséklet tartományban használhatóak, kiemelkedő mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek (például kopásállóság, kúszásállóság, ütésállóság, statikus és kifáradási szilárdság) és ezek mellett jó a kémiai ellenálló képességük és az elektromos szigetelő képességük, valamint meg kell említeni a nagy méretpontosságukat, ami lehetővé teszi finom textúrák kialakítását is. Lehetnek hőre lágyuló illetve hőre keményedő polimerek is. [6] A 2. ábra szemlélteti a nagy teljesítményű, az általános műszaki műanyagok és a közönséges műanyagok főbb típusait, azok színvonalát és alkalmazhatósági hőmérséklet korlátait.

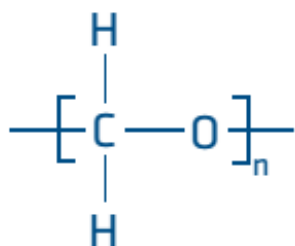


2. ábra Anyagpiramis [7]

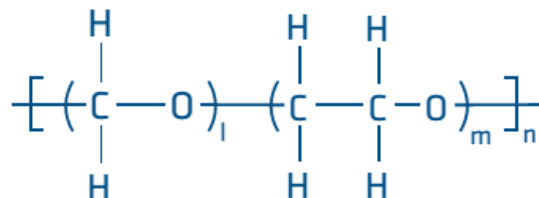
2.4 Az Alkalmazott műszaki műanyag: Poli(oxi-metilén)

A poli(oxi-metilén) formaldehid vagy hosszabb szénláncú aldehidek homo és kopolimerje lehet. Szokásos elnevezése még a poliformaldehid, vagy a poliacetál. Hőre lágyuló, lineáris szerkezetű, kristályos műszaki műanyag.

A kiindulási anyagról függően előállítható homo (POM-H) vagy kopolimer (POM-C). Mindkét változat polimerizációval állítható elő. A POM-H formaldehid anionos mechanizmusú szuszpenziós polimerizációval, a POM-C pedig a trioxán kationos mechanizmusú tömbpolimerizációjával állítható elő.[8]



3. ábra POM-H kémiai szerkezete [7]



4. ábra POM-C kémiai szerkezete [7]

A POM-H egyenes lánc oxi-metilén egységekből tevődik össze (3. ábra). A POM-C végső polimerlánc is alapvetően oxi-metilén egységekből áll, de közöttük véletlenszerű elrendeződésben C-C kötések vannak (4. ábra).

A homopolimer magasabb kristályosodási fokkal rendelkezik a kopolimernél, emiatt nagyobb a merevsége, keménysége, mechanikai szilárdsága, kúszásállósága. A kopolimek viszont jobban ellenállnak a magas hőmérsékletnek, az oxidációnak valamint erős lúgoknak és a hidrolízisnek.[9]

Összefoglalva a POM főbb jellemzőit: [10]

- Igen jó a kopásállósága, értéke 3-5-szörösen meghaladja az egyéb műanyagokét.
- Széles alkalmazási hőmérséklettartománnyal rendelkezik: -50°C -tól $+120^{\circ}\text{C}$ -ig.
- Nagyfokú méretstabilitás jellemzi
- jó fajlagos ütőmunka
- Kifáradás nélkül viseli a dinamikus igénybevételeket, vibrációt
- igen jó visszaállási, regenerációs tulajdonság
- fiziológiailag semleges (élelmiszerekre engedélyezett)
- víz hatására nem duzzad, 80°C -ig vízben működő gépelemek anyagának is kiváló.

Ezek az alaptulajdonságok tovább javíthatók adalékanyagok hozzáadásával például PTFE vagy molibdén-szulfid a súrlódási és kopási tulajdonságok javítására, üvegszál erősítés a szakítószilárdság és merevség növelésére stb.

A POM-ot előszeretettel alkalmazzák a villamos iparban, ha a jó antisztatikus tulajdonságok mellett szükséges a szilárdság, rugalmasság, nedvállóság (villamos merülőszivattyú, kapcsolók, számlapok stb.). Élelmiszeripari és gyógyászati célokra is használják (szórófej kozmetikumokhoz, szállítószalagok, görgők stb.), gyakran háztartási és egyéb cikkek anyagaként is megtalálható (háztartási gépek alkatrészei, csipeszek, horgász cikkek stb.). Fő alkalmazási területe azonban a gép- és járműipar. A nagy szilárdsági tulajdonságai, változó terheléssel szembeni ellenállása, jó mérettartóssága, jó siklási tulajdonságai valamint a kis sűrűsége, egyszerű és gazdaságos feldolgozása a fémek versenytársává teszik számos helyen (gépelemek, csapágycsuklók, fogaskerekek, görgők, szivattyúalkatrészek, benzintöltő pisztoly ház, benzintartálysapka stb.).[11]

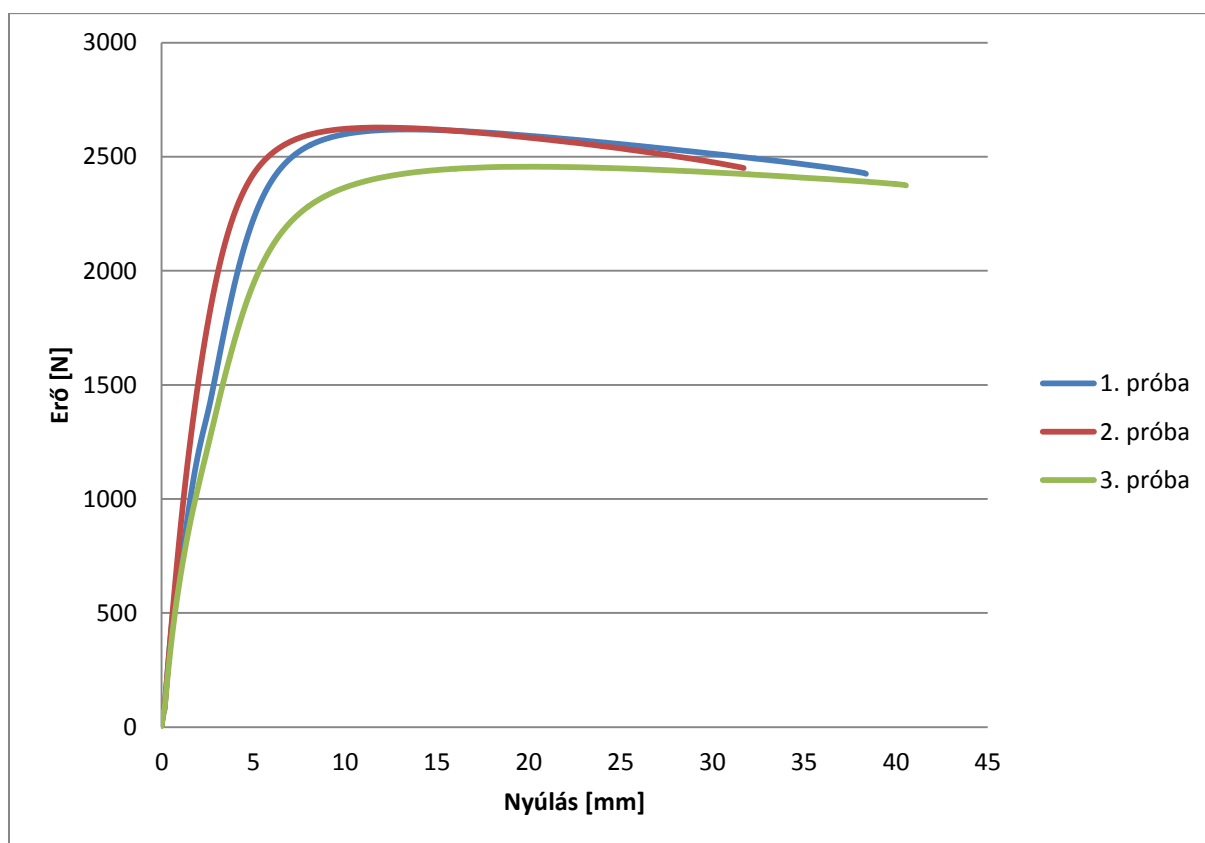
2.5 Anyagvizsgálatok

Az alkalmazott műszaki műanyagon anyagvizsgálatként szakítóvizsgálatokat és keménységméréseket végeztem.

A szakítóvizsgálathoz a próbatesteket az ISO 527-es szabvány szerint munkáltam ki, valamint az ISO 527-es szabvány szerint határoztam meg a vizsgálati körülményeket is. Három próbatesten vizsgáltam az anyag húzószilárdságát.

Próbák	Erők [N]		Nyúlások %		Húzószilárdság [Mpa]
	max	szakadáskor	max erőnél	szakadáskor	
1.	2619,42	2424,97	13,39	38,4	65,49
2.	2627,91	2450,11	11,82	31,72	65,70
3.	2456,26	2373,97	20,25	40,57	61,41

1. táblázat: A szakítópróbák eredményei



5. ábra: A szakítópróbák eredményei Nyúlás- Erő diagramban ábrázolva



6. ábra: A próbatestek, és a szakítóvizsgálat menete

A keménységméréshez Shore D keménységmérési eljárást alkalmaztam. Az eljárás során egy tompa tűvel szembeni ellenálló képesség mértékét mérjük. Az abszolút keménységű anyag Shore keménysége 100. Ebben az esetben a tű egyáltalán nem hatol be az anyagba. Shore – keménységgel főként gumikat, és termoplasztikus műanyagokat szokás jellemezni, de alkalmazható acélok keménységének mérésére is. Az eljárás során a terhelés 3másodpercig tartott 50N nagyságú terhelőerővel. 3 mérést végeztem az anyag keménységének megállapítására.



7. ábra A keménységméréshez használt próbatest, és a jelölt mérési pontok

A mért Shore D keménység értékek:

- 84,4
- 84,6
- 84,6

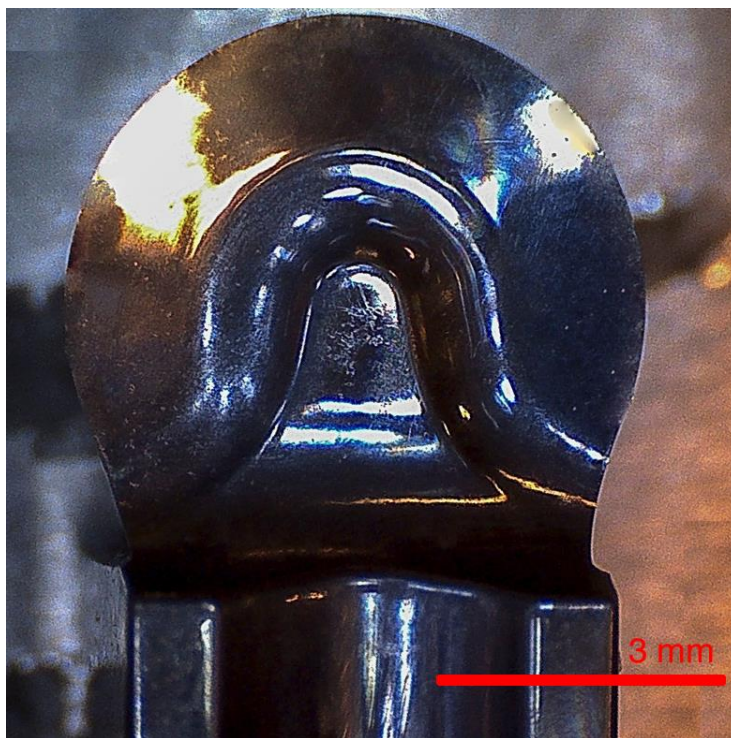
3. Felhasznált szerszámok, gépek

3.1 A kísérletekhez használt lapka

A műszaki műanyagok megmunkálására nincs külön kialakított szerszámcsoporthoz. Forgácsolási műveletek végezhetők hagyományos fémmegmunkáló szerszámokkal. Szerszámacél, gyorsacél, keménység, és gyémánt szerszámok alkalmazhatók éles kivitelben.[10] A kísérlethez Alumínium megmunkálásra, illetve külön szerszámcsoporthoz híján műanyagok forgácsolásához is ajánlott szerszámot használtam, melyet a TaeguTec biztosított számomra. Ez egy R geometriájú 3 mm-es sugarú körlemez, mellyel a műanyag alkatrészek esetében gyakran előforduló alakcsiszolás is elvégezhető. Meghatároztam a lapka élekkerekedését a lapka körívének több pontján, majd ezek átlaga alapján 0,0267 mm-es sugarú élekkerekedést regisztráltam. Ez az érték már megközelíti a gyémántlapkák élekkerekedését. A lapka anyaga K10 keménység, amely alkalmas edzett acél, ötvöztet és ötvöztelen öntöttvasak, Si-tartalmú alumínium ötvöztet, rövid forgácsot adó réz-ön és rézhorgany ötvöztet műanyagok és keménységumi forgácsolására. Közepes forgács keresztmetszetű könnyű nagyoló és simító megmunkálásokra alkalmas. [12]

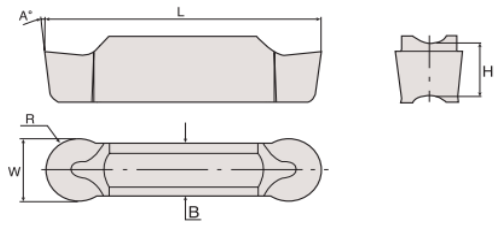
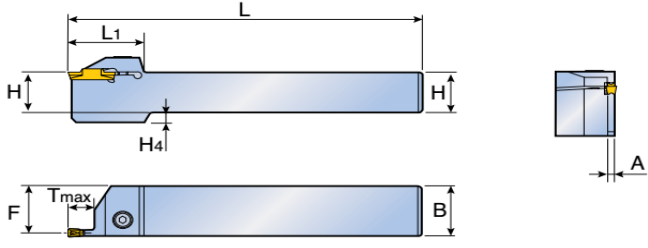
Felhasznált lapka: TaeguTec TDA 6.00-3.00 K10

Szerszámbeágyazó: Taegutec T-Clamp TTER 20 20-6



8. ábra Taegutec TDA 6.00-3.00 K10 lapka

2. táblázat A kísérlethez használt lapka és lapkatartó paraméterei [13]

	$A=7^\circ$ $L=25\text{ mm}$ $R=3\text{ mm}$ $W=6\text{ mm}$ $B=5\text{ mm}$ $H=5,2\text{ mm}$
	$H=20\text{ mm}$ $B=20\text{ mm}$ $L=125\text{ mm}$ $F=17,6\text{ mm}$ $L1=41\text{ mm}$ $A=5\text{ mm}$ $T_{\max}=20\text{ mm}$

3.2 A vizsgálatokhoz felhasznált gépek, eszközök

A kísérletterv végrehajtására egy MAZAK SUPER QUICK TURN 10MS típusú CNC esztergán történt. [14]



9. ábra MAZAK SUPER QUICK TURN 10MS CNC eszterga

Műszaki adatok:

-max. esztergálható átmérő	230 mm
-max. munkadarab hossz	305 mm
-max. fordulatszám	6000 1/min
-teljesítmény	11 kW
-befogható szerszámok	12 db
-szélesség × mélység × magasság	2675 × 1466 × 1905 [mm]
-tömeg	3850 kg

A felületi érdesség mérés során összesen 192 mérést végeztem el. A 16 különböző forgácsolási paraméterekkel előállított felületeken 6 ponton mértem felületi érdességet, külön a szárazon történő és a hűtőfolyadék alkalmazásával végzett megmunkálásokat. A 10. ábrán látható Mitutoyo Surftest SJ 301 felületi érdesség mérő berendezést használtam a mérésekhez.



10. ábra Mitutoyo Surftest SJ301 felületi érdesség mérő műszer

Mérés során egy tapintó tű csúszik végig a felületen, majd a felületi egyenetlenségekből adódó magasságirányú mozgásokból eredő jeleket egy átalakító segítségével elektromos jellé alakítja, így mérhető, PC-n regisztrálható értékeket kapunk.[15]

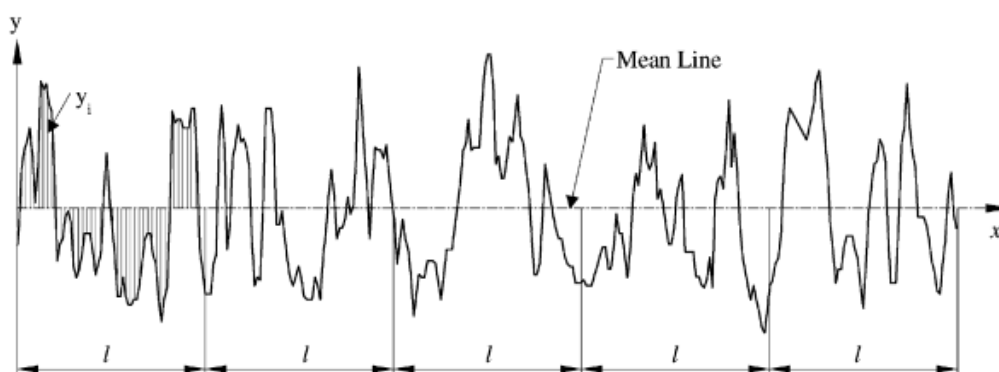
- Tapintási magasságkülönbség: 350 μm
- Felbontás: 0,5 μm
- Mérési hossz: 4 mm
- Vontatási hossz: 5,6 mm
- Tapintótű sebessége: 0,5 mm/s

4. Vizsgált érdességi paraméterek

Ra – Átlagos érdesség [16]

Matematikai definíciója: $Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$

Az átlagos érdesség az egyik legismertebb érdességi paraméter, ezáltal az iparban is a leginkább használt jellemző. A felület magasságirányú jellemzésére szolgál. Értéke alapján jól megállapítható a felület finomsága, durvasága. Megmunkált felületek minősítésére, megmunkálási folyamatok jellemzésére jól alkalmazható. Az átlagos érdesség változása egy felület előállításakor valamely technológiai paraméter romlására, megváltozására utalhat (pl. szerszámkopás). Más technológiával előállított felületek esetén mérhetünk azonos Ra értéket, miközben a két felület teljesen eltérő működési tulajdonságokkal is rendelkezhet. Ez azért lehetséges, mert az átlagos érdesség nem tesz különbséget a csúcs és a völgyzónák között, és nem tartalmazza a profil hosszirányú jellemzőit sem, valamint nem tájékoztat a profil középvonala körüli eloszlásáról sem. Ezek a tulajdonságok pedig jelentősen befolyásolják a súrlódási, kenési, kopási, érintkezési, stb. viszonyokat.

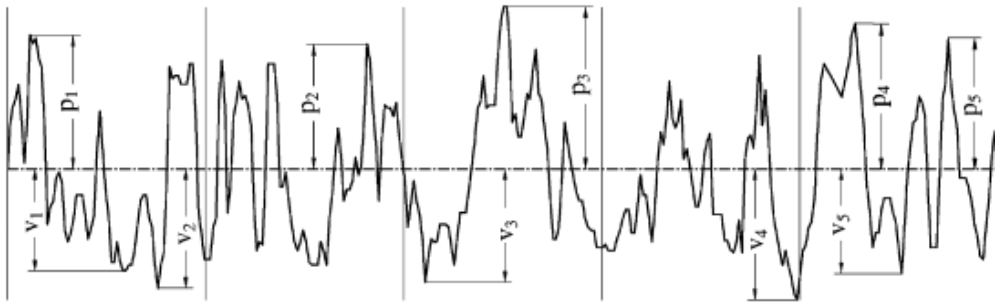


11. ábra Az Ra átlagos érdesség értelmezése [17]

Rz – Érdesség magasság [16]

Matematikai definíciója: $Rz = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i + v_i)$

A műszaki felületek működése szempontjából fontos a felület lokális szélső értékei, vagyis a kiugró érdesség csúcsok és völgyek jellemzése, amelyet többek között az Érdesség magasság paraméterrel is jellemezhetünk. Az Rz érdesség magasság megmutatja az alaphosszon a legmagasabb csúcs és a legmélyebb völgy távolságát.

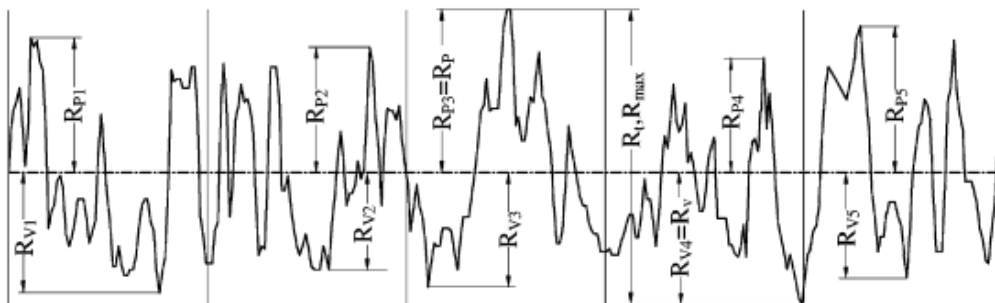


12. ábra Az Rz érdesség magasság értelmezése [17]

Rp – Maximális csúcsmagasság, Rv – Maximális völgymélység [16]

Az Rp maximális csúcsmagasság az alaphosszon mért legmagasabb csúcs távolsága a középvonaltól.

Az Rv maximális völgymélység az alaphosszon mért legmélyebb völgy távolsága a középvonaltól.

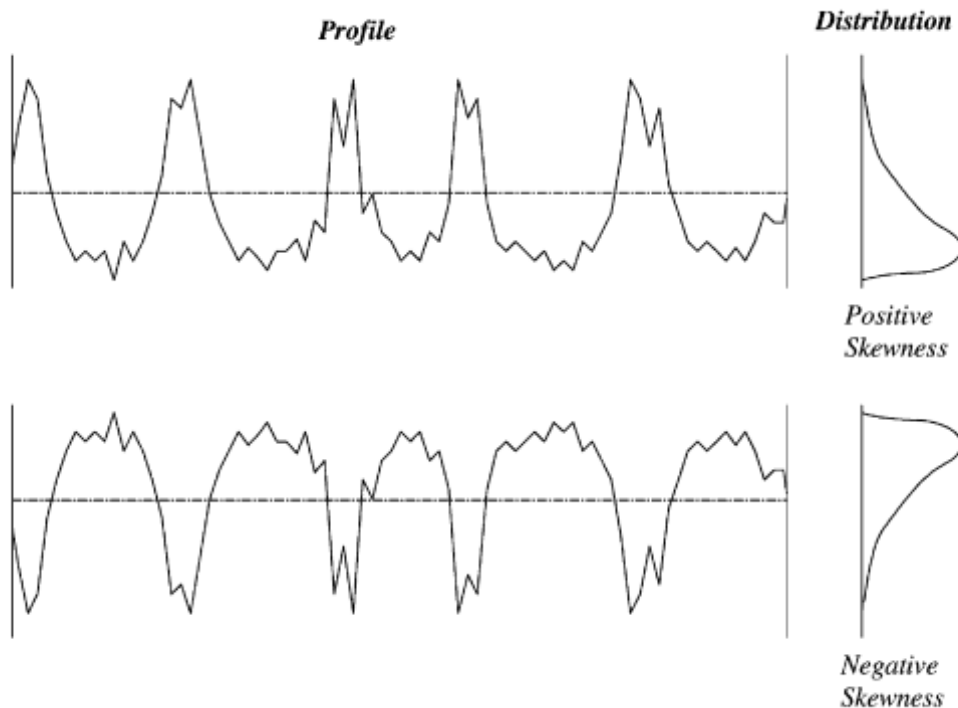


13. ábra Az Rp csúcsmagasság és Rv völgymélység értelmezése [17]

Rsk – Ferdeségi mérőszám [16]

Matematikai definíciója:
$$Rsk = \frac{1}{R_q^3} \int_{-\infty}^{\infty} y^3 p(y) dy$$

A ferdeségi mérőszám paraméter (skewness) a profil magasságeloszlás függvényének alakját jellemzi, vagyis a középvonalhoz viszonyított aszimmetriát. Ez az érdességi paraméter igen fontos műszaki tartalmat hordoz a működő felületről. Pozitív ferdeséget kapunk, ha a mért felület profiljának csúcsai nagyobbak, mint a völgymélységek. Ha viszont a völgymélységek értékei nagyobbak a csúcsmagasság értékeinél, akkor negatív ferdeségű a felület. Negatív *Rsk* érték kedvezőbb a teherviselő képesség és a kopásállóság szempontjából. Gaussi felületeknél, amikor szimmetrikus a profilpontok magasságeloszlás függvénygörbéje, *Rsk* értéke 0.

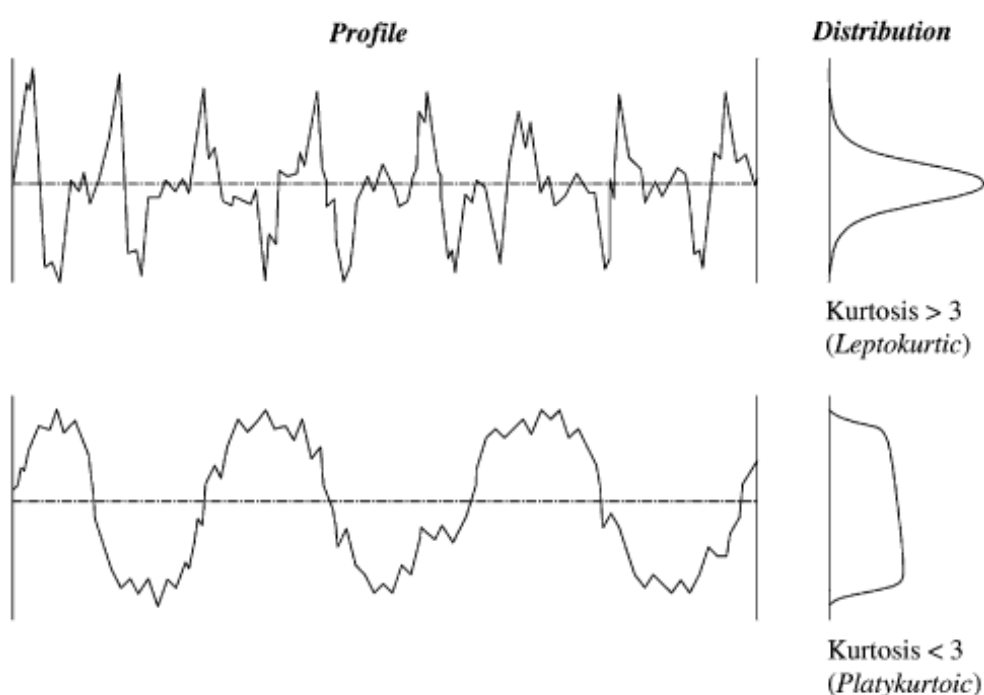


14. ábra Az *Rsk* (skewness) ferdeségi mérőszám értelmezése [17]

Rku – Lapultsági mérőszám [16]

Matematikai definíciója: $Rku = \frac{1}{R_q^4} \int_{-\infty}^{\infty} y^4 p(y) dy$

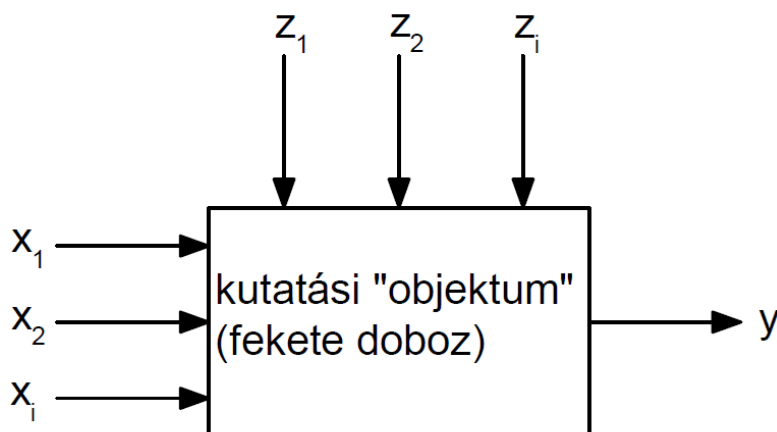
Az *Rku* (kurtosis) lapultsági mérőszám a magasságeloszlás szórását (szórásterjedelmét), tehát a csúcsosságát, hegyességét jellemzi. Gaussi felület esetén az *Rku* értéke 3. Ha értéke nagyobb, mint 3 intenzív kopás jellemző az egymáson elcsúszó felületeknél, ha kisebb, mint 3 akkor a felületek kedvezőbb működési tulajdonságokkal rendelkeznek. A felületek működési tulajdonságai az *Rsk* és *Rku* paraméterek együttes figyelembe vételével jól meghatározhatók.



15. ábra Az *Rku* (kurtosis) lapultsági mérőszám értelmezése [17]

5. Alkalmazott kísérletterv

Egy kutatási „objektum”, jelen esetben egy forgácsolási folyamat kísérleti vizsgálatára következő ábrán látható ún. fekete doboz alkalmazható.



16. ábra A kutatási objektum vázlata

A vizsgálat céljának numerikus jellemzőjét reprezentálja a jobb oldali, y -nal jelölt nyíl, melyet a fekete doboz kimenetének vagy függő változójának nevezünk. A kísérlethez szükséges, hogy az y függő változó értékét befolyásolni lehessen. Az ehhez alkalmazott befolyásoló tényezőket x -el jelöljük és a fekete doboz bemeneteinek, független változónak, illetve faktoroknak nevezzük. A z -vel jelölt nyilak a nem szabályozható vagy zaj faktorokat jelölik, melyek befolyásolják/befolyásolhatják a folyamatot, de nem tudjuk őket változtatni. [18]

A kísérlettervezés célja az y függő változó és az x független változó közötti kapcsolat, azaz a válaszfüggvény meghatározása.

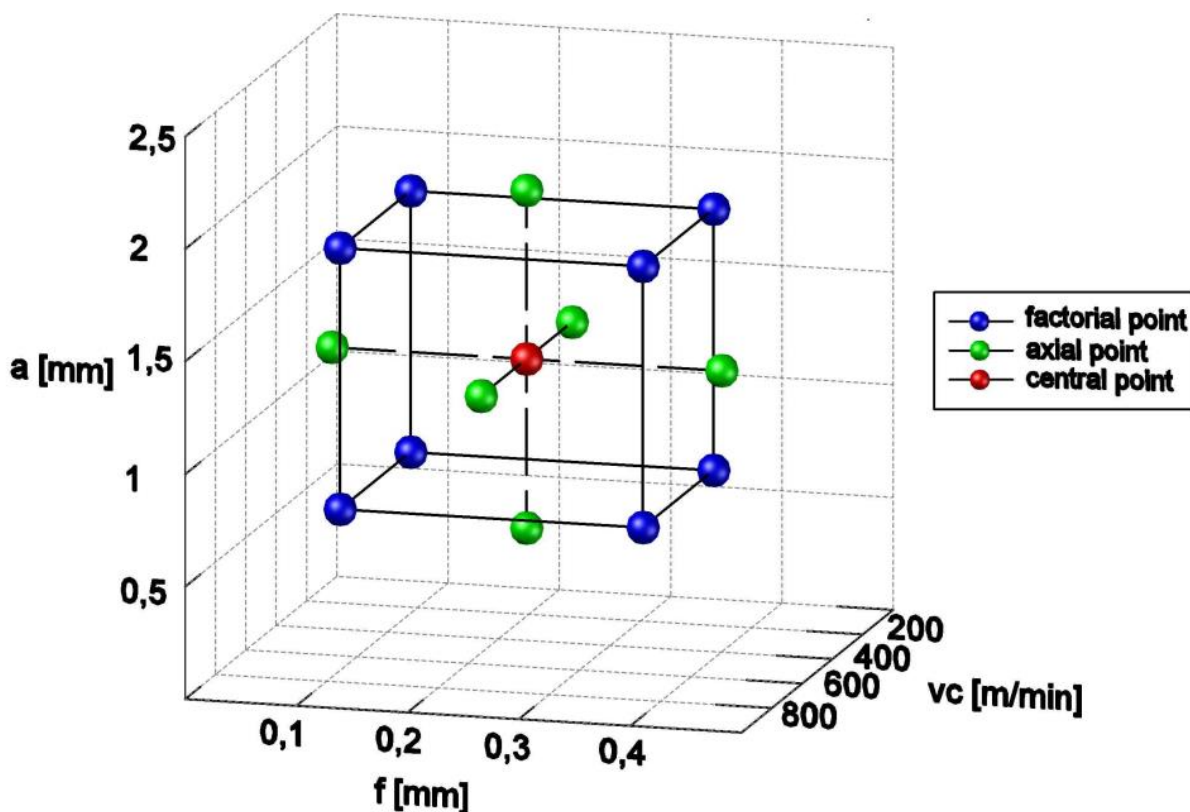
Az $y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i)$ függvényt nevezzük válaszfüggvénynek.

A kísérletekben mindegyik faktor (független változó) több értéket vehet fel. Ezek az értékek a szintek. A faktorok szintjeinek egy rögzített kombinációja egy lehetséges kísérleti beállítás, ami a függő változó egy bizonyos értékét eredményezi. A létrehozható, egymástól független kísérleti beállítások száma: $n = p^f$, ahol p jelöli a szintek számát és f a faktorok számát. A kutatási gyakorlatok jellemzően úgy állhatnak össze, hogy az egyik faktor értékét szintenként változtatva, a többi faktort pedig állandó értéken tartva, mérik az y függő változó értékét (OFAT, One Factor At a Time). Az így elvégezhető kísérleti beállítások száma nagyon nagy lehet, melyek megvalósítását az időigény, kísérleti költségek, mérőműszer kapacitás korlátozzák, illetve ellehetetlenítik. Ez az ún. passzív kísérleti módszer.

Ezzel szemben az aktív kísérleti módszerekben az összes vizsgálandó faktort csak 2-3 szinten állítják be, és meghatározott sorrendben variálják azok beállítandó értékeit. A függő változó alakulását a független változók függvényében matematikai statisztikai módszerekkel történő feldolgozás útján határozzák meg. Ez a módszer a passzív kísérleti módszerhez képest általában kevesebb kísérleti beállítással megbízhatóbb és több információt eredményez. A faktoriális kísérlettervezés tehát előnyösen alkalmazható olyan aktív kísérletek tervezéséhez, amelynek célja empirikus függvények meghatározása, vagy optimális feltételek, szélső értékek keresése. [18]

A forgácsolási kísérlet végrehajtásához alkalmazott kísérletterv az ún. central composit terv (CCD, Central Composit Design) melynek során 3 faktort 5 szinten változtatva a következő beállításokat követően mértem a függő változót, valamint kerestem a válaszfüggvényt.

A Central Composit terv 15 kísérleti pontot tartalmaz, amelyek térbeli elhelyezkedését, ortogonalitását a 17. ábra szemlélteti.



17. ábra. A Central Composit terv kísérleti pontjainak térbeli elhelyezkedése

A 3 faktor a forgácsoló sebesség v_c , az előtolás f , és a fogásmélység a , melyek értékeit a különböző szinteken az alábbi táblázat mutatja.

szintek	Faktorok		
	v_c [m/min]	f [mm]	a [mm]
-1,28719	100	0,050	0,50
-1	167	0,089	0,67
0	400	0,225	1,25
1	633	0,361	1,83
1,28719	700	0,400	2,00

3. táblázat A 3 faktor 5 szinten vizsgálva

A forgácsolási paraméterek értékeinek beállításakor figyelembe vettem a szakirodalom POM forgácsolására ajánlott sebességeit ($v_c=200-500$ m/min). Viszont igyekeztem az ajánlott értékeknél tágabb intervallumban, az ipari körülményeknek is eleget téve nagyobb sebességeket alkalmazni. A többi forgácsolási paramétert minimális és maximális értékeit is hasonló módon állítottam be.

Mérési pontok	v_c	f	a
1	-1.00000	-1.00000	-1.00000
2	-1.00000	-1.00000	1.00000
3	-1.00000	1.00000	-1.00000
4	-1.00000	1.00000	1.00000
5	1.00000	-1.00000	-1.00000
6	1.00000	-1.00000	1.00000
7	1.00000	1.00000	-1.00000
8	1.00000	1.00000	1.00000
9	-1.28719	0.00000	0.00000
10	1.28719	0.00000	0.00000
11	0.00000	-1.28719	0.00000
12	0.00000	1.28719	0.00000
13	0.00000	0.00000	-1.28719
14	0.00000	0.00000	1.28719
15 (C)	0.00000	0.00000	0.00000
16 (C)	0.00000	0.00000	0.00000

4. táblázat

Mérési pontok	v_c , m/min	f , mm	a , mm
1	167	0,089	0,67
2	167	0,089	1,83
3	167	0,361	0,67
4	167	0,361	1,83
5	633	0,089	0,67
6	633	0,089	1,83
7	633	0,361	0,67
8	633	0,361	1,83
9	100	0,225	1,25
10	700	0,225	1,25
11	400	0,050	1,25
12	400	0,400	1,25
13	400	0,225	0,50
14	400	0,225	2,00
15 (C)	400	0,225	1,25
16 (C)	400	0,225	1,25

5. táblázat

A beállításokon belüli 3 faktor szintjeinek elrendezését a 4. táblázat szemlélteti, valamint az ezekhez a szintekhez tartozó faktorok értékeit a 5. táblázat mutatja.

A 15. és a 16. mérési pont megegyezik. Ezek a középpontban találhatóak és ellenőrzésre szolgálnak. Ezeket a mérési pontokat külön munkadarabokra esztergáltam. A 16 mérési pontot kétszer hajtottam végre. Az első száraz megmunkálási körülmények mellett, a másodikat pedig hűtőfolyadék alkalmazásával. A forgácsolási paraméterek a mérési pontokban mindkét eljárás esetén megegyeztek, kizárólag a hűtőközeg alkalmazása volt a különbség.

A különböző kísérleti beállításokkal előállított felületek érdességi paramétereit 6 ismétléssel határoztam meg, amely összesen $16 \times 6 \times 2 = 192$ mért értéket jelentett. A mérési eredményekre az összefüggéseket az alábbi függvény segítségével kerestem:

$$Y = \varphi(v_c, f, a)$$

Ahol φ a válaszfüggvény, Y a kimenő paraméter, amely Ra és Rz értékének felel meg, v_c, f, a pedig a bemenő paraméterek. A válaszfüggvényeket az alábbi fenomenológiai modell felépítésével határoztam meg mind a száraz mind pedig a hűtőfolyadékos Ra és Rz értékekre:

$$Ra = b_0 + b_1 \cdot v_c + b_2 \cdot f + b_3 \cdot a + b_{11} \cdot v_c^2 + b_{22} \cdot f^2 + b_{33} \cdot a^2 + b_{12} \cdot v_c \cdot f + b_{13} \cdot v_c \cdot a + b_{23} \cdot f \cdot a + \varepsilon$$

$$Rz = c_0 + c_1 \cdot v_c + c_2 \cdot f + c_3 \cdot a + c_{11} \cdot v_c^2 + c_{22} \cdot f^2 + c_{33} \cdot a^2 + c_{12} \cdot v_c \cdot f + c_{13} \cdot v_c \cdot a + c_{23} \cdot f \cdot a + \varepsilon$$

amely egyenletekben $b_0, b_i, b_{ii}, c_0, c_i, c_{ii}$ a számított koefficienseket valamint ε a hibát jelöli. [19]

Minden együtthatót megvizsgáltam, hogy szignifikánsan eltér-e nullától, vagyis hogy az adott faktornak van-e szignifikáns hatása az egyenlet eredményére.

6. Eredmények bemutatása

6.1 Az érdesség mérés folyamata

A felületi érdesség mérés elvégzésekor minden felületen 6-szor regisztráltam az érdességi paramétereket. Ez összesen 192 mérési pontot jelentett. A 6 rögzített érték átlagával történtek a további számítások, valamint a diagramokban is minden felület 6 mérési értékének az átlaga szerepel. Az átlagok mellett az értékek szórása is megállapításra került. A mérés során rögzítettem az R_a , R_z , R_p , R_v , R_{sk} , R_{ku} érdességi paramétereket, valamint ezek szórását. Az 6. táblázat tartalmazza az R_a , R_z értékeket valamint ezek szórását száraz és hűtőfolyadékos megmunkálás esetére.

Beállítások	v_c [m/min]	f [mm]	a [mm]	Szárász				Hűtőfolyadék			
				R_a átlag [μm]	sR_a [μm]	R_z átlag [μm]	sR_z [μm]	R_a átlag [μm]	sR_a [μm]	R_z átlag [μm]	sR_z [μm]
1.	167	0,089	0,67	0,325	0,015	1,872	0,078	0,348	0,010	2,000	0,074
2.	167	0,089	1,83	0,328	0,015	1,962	0,054	0,362	0,012	2,133	0,099
3.	167	0,361	0,67	0,855	0,088	4,360	0,325	0,850	0,079	4,267	0,411
4.	167	0,361	1,83	0,835	0,069	4,212	0,367	0,918	0,037	4,662	0,180
5.	633	0,089	0,67	0,328	0,008	1,855	0,103	0,365	0,010	2,088	0,061
6.	633	0,089	1,83	0,320	0,011	1,920	0,118	0,372	0,010	2,238	0,073
7.	633	0,361	0,67	0,955	0,109	4,695	0,486	0,978	0,059	4,855	0,194
8.	633	0,361	1,83	0,893	0,062	4,593	0,267	1,047	0,039	5,058	0,157
9.	100	0,225	1,25	0,587	0,059	3,327	0,242	0,723	0,027	3,427	0,126
10.	700	0,225	1,25	0,620	0,062	3,403	0,269	0,668	0,041	3,373	0,191
11.	400	0,05	1,25	0,185	0,005	1,277	0,047	0,230	0,009	1,620	0,102
12.	400	0,4	1,25	1,228	0,065	5,945	0,376	1,355	0,132	6,427	0,494
13.	400	0,225	0,50	0,648	0,056	3,588	0,239	0,718	0,072	3,417	0,205
14.	400	0,225	2,00	0,623	0,082	3,490	0,358	0,703	0,051	3,290	0,166
15.	400	0,225	1,25	0,673	0,056	3,642	0,206	0,737	0,076	3,450	0,220
16.	400	0,225	1,25	0,692	0,064	3,690	0,278	0,732	0,075	3,345	0,189

6. táblázat

6.2 Empirikus modellek felállítása

A dolgozat egyik fő célkitűzése empirikus modellek felállítása volt az Ra és Rz felületi érdességek értékeinek becslésére, a beállított forgácsolási paraméterek függvényében mind a száraz, mind pedig a hűtőfolyadék alkalmazása mellett végzett megmunkálások esetére. Ehhez a korábban említett fenomenológiai modellek koefficienseit kellett kiszámítani.

A modellek:

$$Ra = b_0 + b_1 \cdot v_c + b_2 \cdot f + b_3 \cdot a + b_{11} \cdot v_c^2 + b_{22} \cdot f^2 + b_{33} \cdot a^2 + b_{12} \cdot v_c \cdot f + b_{13} \cdot v_c \cdot a + b_{23} \cdot f \cdot a + \varepsilon$$

$$Rz = c_0 + c_1 \cdot v_c + c_2 \cdot f + c_3 \cdot a + c_{11} \cdot v_c^2 + c_{22} \cdot f^2 + c_{33} \cdot a^2 + c_{12} \cdot v_c \cdot f + c_{13} \cdot v_c \cdot a + c_{23} \cdot f \cdot a + \varepsilon$$

Minitab 14 statisztikai program segítségével határoztam meg kiszámítandó koefficiensek ($b_0, b_i, b_{ii}, c_0, c_i, c_{ii}$) értékeit valamint a determinációs együttható (R^2) és a szórás értékeit. Ehhez be kellett vinni a programba a 16 különböző beállítású hűtőfolyadék nélküli és a 16 hűtőfolyadékos megmunkálás után kapott érdességi paramétereket. Miután meghatároztam az együtthatók értéket, a szignifikancia vizsgálat következett, amelyben megvizsgáltam, hogy 95%-os szignifikancia szinten melyik együttható tér el nullától, vagyis meghatároztam, hogy az adott faktornak van-e szignifikáns hatása az egyenlet eredményére.

A vizsgálat eredményét az 7. táblázat tartalmazza:

	v_c	f	a	v_c^2	f^2	a^2	$v_c \cdot f$	$v_c \cdot a$	$f \cdot a$
$Ra_{száraz}$	x	x	x	x	∅	∅	x	∅	∅
$Rz_{száraz}$	x	x	x	x	x	∅	x	∅	∅
$Ra_{hök}$	x	x	x	x	∅	x	x	∅	∅
$Rz_{hök}$	x	x	x	x	x	x	x	∅	∅

7. táblázat

Amelyben az x-el jelölt faktoroknál szignifikáns hatás állapítható meg, a ∅-al jelölt faktoroknál pedig nem volt szignifikáns hatás. Ennek következményeképp az ilyen faktorok nem szerepelnek az adott modellben.

A táblázatból jól látható, hogy a forgácsoló sebesség négyzete és az előtolás és forgácsoló sebesség szorzata mindegyik egyenlet eredményére hatással van. Különbség a száraz és a hűtőfolyadékos megmunkálások között, hogy hűtőfolyadék alkalmazásakor a fogásmélység négyzete is belekerül az egyenletbe. További különbség az Ra és Rz érdességi paraméterek egyenletei között, hogy amíg az Ra értékek alakulását nem, addig az Rz értékek alakulását befolyásolja az előtolás négyzete. A forgácsoló sebesség és a fogásmélység szorzata valamint az előtolás és a fogásmélység szorzata egyik egyenletbe sem került bele.

A kapott modellek, és a korreláció:

$$Ra_{száraz} = 5,927 \cdot 10^{-2} + 6,271 \cdot 10^{-4} \cdot v_c + 2,022 \cdot f - 1,803 \cdot 10^{-2} \cdot a - 8,720 \cdot 10^{-7} \cdot v_c^2 + 6,443 \cdot 10^{-4} \cdot v_c \cdot f$$

$$R^2 = 0,9259 \text{ (92,59\%)}$$

$$Rz_{száraz} = 0,455 + 2,827 \cdot 10^{-3} \cdot v_c + 12,672 \cdot f - 5,444 \cdot 10^{-2} \cdot a - 4,122 \cdot 10^{-6} \cdot v_c^2 - 8,128 \cdot f^2 + 3,599 \cdot 10^{-3} \cdot v_c \cdot f$$

$$R^2 = 0,9352 \text{ (93,52\%)}$$

$$Ra_{hök} = -7,740 \cdot 10^{-2} + 5,597 \cdot 10^{-4} \cdot v_c + 2,041 \cdot f + 0,296 \cdot a - 8,541 \cdot 10^{-7} \cdot v_c^2 - 0,110 \cdot a^2 + 9,073 \cdot 10^{-4} \cdot v_c \cdot f$$

$$R^2 = 0,9399 \text{ (93,99\%)}$$

$$Rz_{hök} = 0,682 + 1,279 \cdot 10^{-3} \cdot v_c + 4,789 \cdot f + 1,097 \cdot a - 1,951 \cdot 10^{-6} \cdot v_c^2 + 9,993 \cdot f^2 - 0,396 \cdot a^2 + 3,123 \cdot 10^{-3} \cdot v_c \cdot f$$

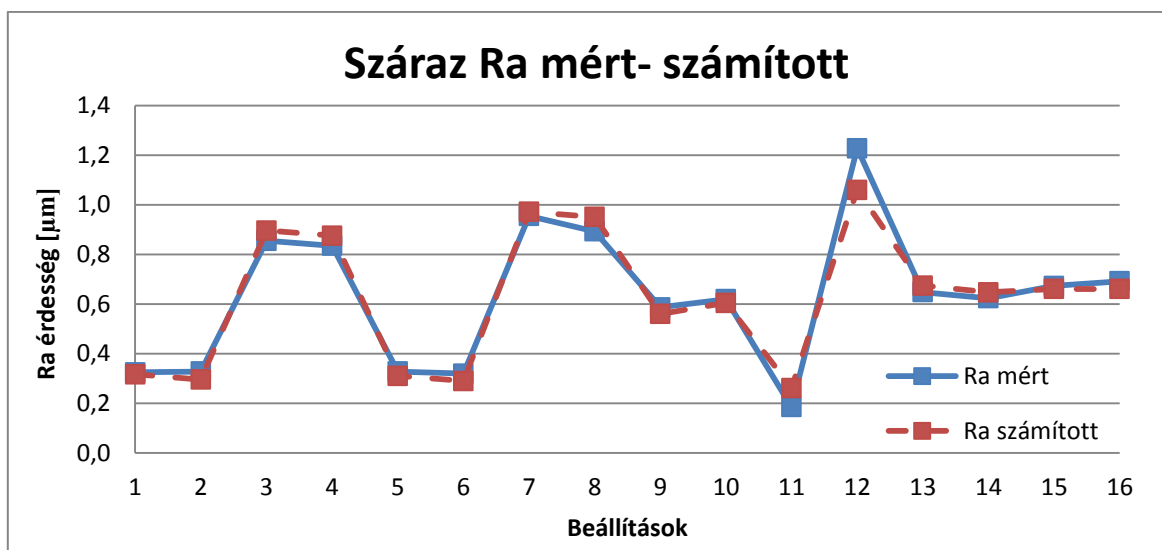
$$R^2 = 0,9499 \text{ (94,99\%)}$$

Az Ra érdességi paraméterre kapott egyenletek különböző forgácsolási paraméterek beállításával megmunkált felületek várható Ra átlagos érdesség értékét kis szórással ($s=0,072\text{-}0,075 \mu\text{m}$), és viszonylag nagy korrelációval ($R^2=0,9252\text{-}0,9399$) írják le.

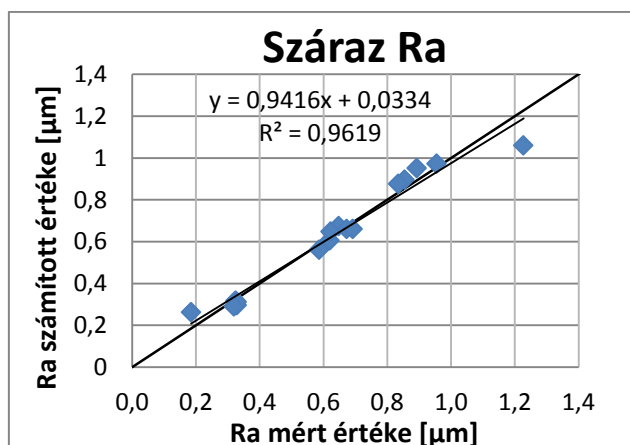
Az Rz érdességi paraméterre kapott egyenletek a megmunkált felület várható érdesség magasságának értékeit nagyobb szórással ($s=0,289\text{-}0,325 \mu\text{m}$), viszont valamivel nagyobb korrelációval ($R^2=0,9352\text{-}0,9499$) írják le.

6.3 Empirikus modellek és valós érdesség kapcsolata

6.3.1 R_a érdességek összehasonlítása száraz megmunkáláskor



1. diagram

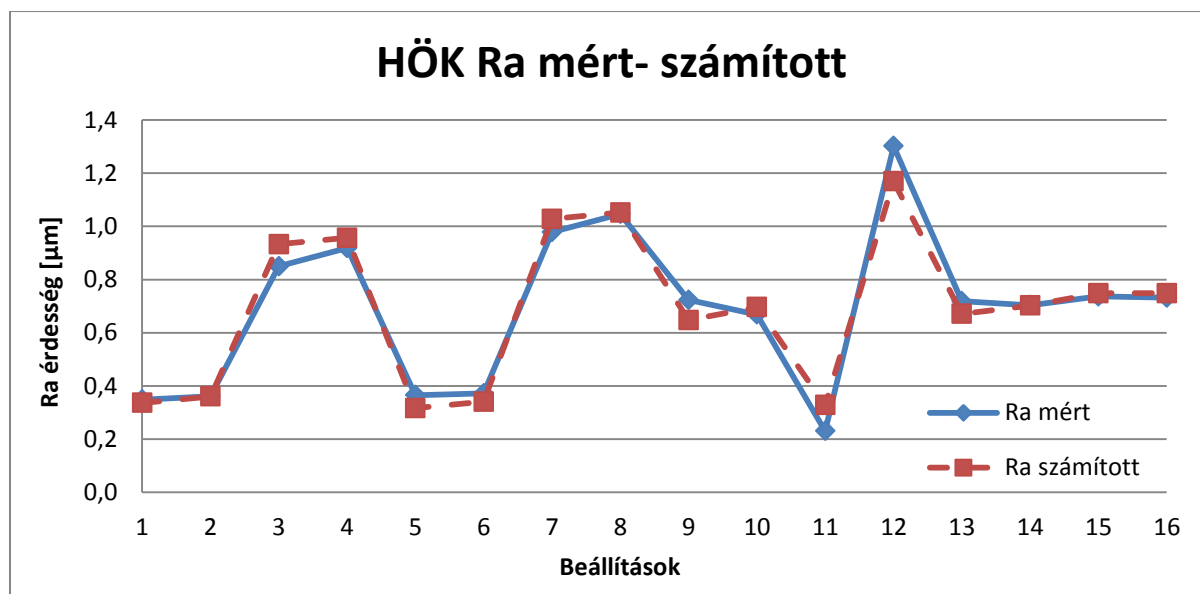


2. diagram

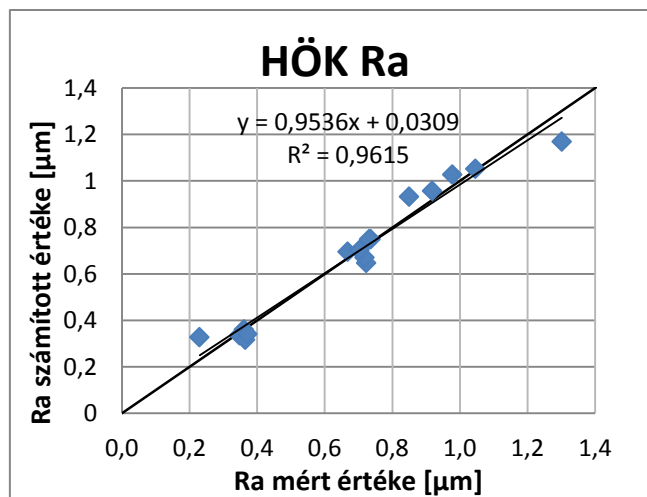
Az 1. diagramban összehasonlítottam a megmért felületi érdességeket, valamint a modellből kapott felületi érdesség értékeket, miután behelyettesítettem az adott beállítás forgácsolási paramétereit az egyenletbe. A 2. diagram is a két R_a érték összehasonlítására szolgál. Ebben az egyenes jelölni a tökéletes megegyezést a mért és a számított érdességek között. A pontokra felvettem egy trendvonalat is, melynek egyenlete a diagramban látszik. Az egyenesek egyenlete $y = Ax + B$, melyben A jelöli az egyenes meredekségét, B pedig az egyenes kezdőpontját. Jelen helyzetben az ideális egyenes $y = x$ lenne, tehát $A=1$, $B=0$. A kapott trendvonal egyenletéből is jól látszik, hogy nincs sok eltérés az ideális egyenlethez viszonyítva. A trendvonalra vonatkozó $R^2=0,9619$ érték a pontok korrelációját mutatja a trendvonalhoz képest. A diagramokból jól kivehető a modell viszonylag nagy korrelációja ($R^2=0,9259$) is a valós felületi érdességhez. A 11. és a 12. beállításnál nagyobb eltérés

fedezhető fel. Ezen a két beállításon kaptam a legkisebb és a legnagyobb érdesség értékeket. A nagyobb eltérést valószínűleg a szélsőséges forgácsolási paraméterek beállítása eredményezte. A többi értéknél viszont igen jó illeszkedést láthatunk. Az 1. diagramon megfigyelhető továbbá, hogy az átlagos felületi érdességre a beállított előtolás van a legnagyobb hatással. Az azonos előtolással megmunkált felületek érdességei egy lépcsőn helyezkednek el elkülönülve a más előtolással megmunkált felületek érdességétől. Az 1-2 és 5-6 beállításoknál alkalmazott előtolás értéke 0,089 mm és ezeknél a beállításoknál rendre 0,3 μm körüli átlagos érdesség mérhető. A 3-4 és 7-8 beállításoknál az előtolás nagysága 0,361 mm volt. Az ilyen előtolással előállított felületek R_a érdessége 0,87-0,97 μm között van. A 9-10 valamint 13-14-15-16 felületeket 0,225 mm-es előtolással munkáltuk meg. Ezeknél a felületeknél 0,59-0,69 μm között voltak az R_a érdességi paraméter értékei. A 11 és 12-es beállítások tartalmazták a legkisebb és legnagyobb előtolás értéket, ennek megfelelően az átlagos érdesség is ezeknél a felületeknél lett a legkisebb (0,185 μm) illetve a legnagyobb (1,2275 μm).

6.3.2 R_a érdességek összehasonlítása hűtőfolyadékos megmunkáláskor



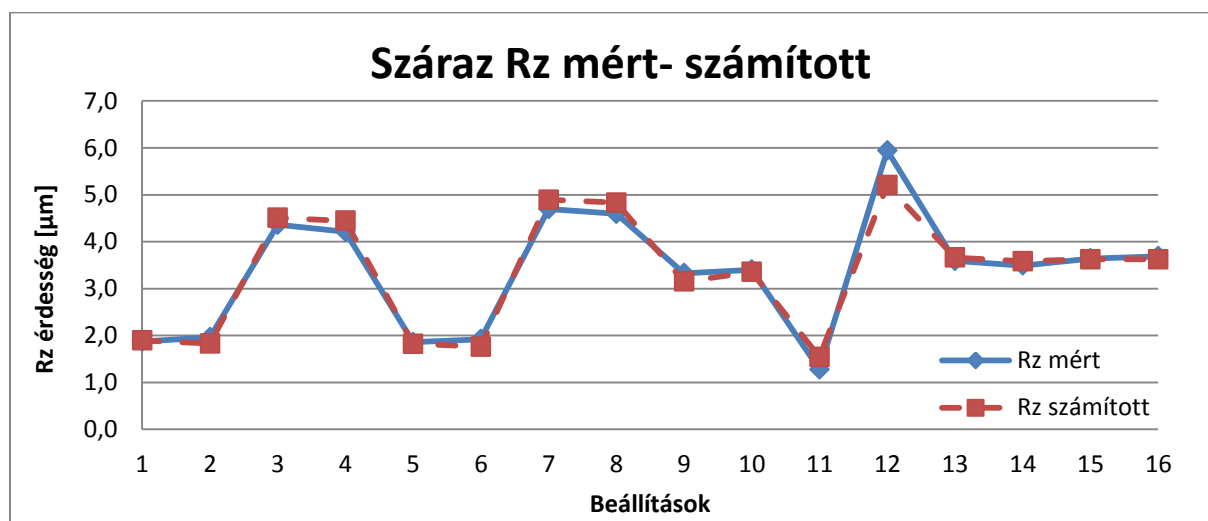
3. diagram



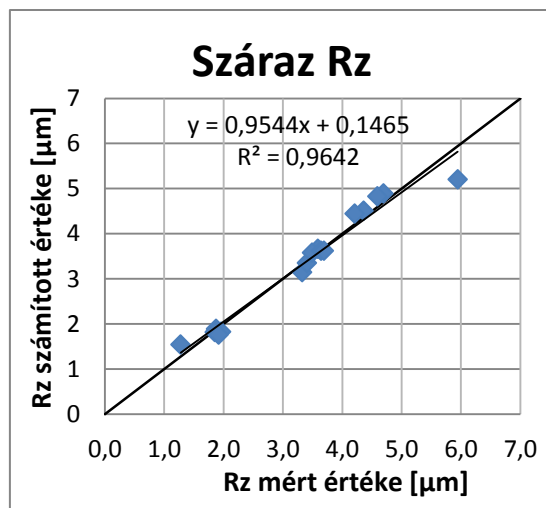
4. diagram

A hűtőfolyadék alkalmazása mellett megmunkált felületekre is ráillenek a szárazon megmunkált felületek tulajdonságai. Itt is megvannak a különböző előtolással előállított felületek átlagos érdességi lépcsői. Különbségként megfigyelhető, hogy amíg a hűtőfolyadék nélkül megmunkált felületek esetében a fogásvétel növelésével látszólag javuló felületi érdesség érhető el, itt épp az ellenkezője történik. Ez jól megfigyelhető a 3. diagram 3-4 és 7-8 beállításainál, szemben az 1. diagram ugyanezen beállításával. A 9-10-es beállításoknál is eltérő eredményeket kapunk. Míg az 1. diagramban a forgácsoló sebesség növelésével nő a felületi érdesség, addig hűtőfolyadék alkalmazásakor csökken. A 4. diagramból kivehető, hogy a modellel számított értékek itt is hasonlóan jó illeszkedést mutatnak a mért értékekre, mint száraz megmunkálás esetén, ugyanis a pontokra illesztett trendvonal egyenlete ebben az esetben is közel áll az ideálshoz..

6.3.3 Rz érdességek összehasonlítása száraz megmunkáláskor



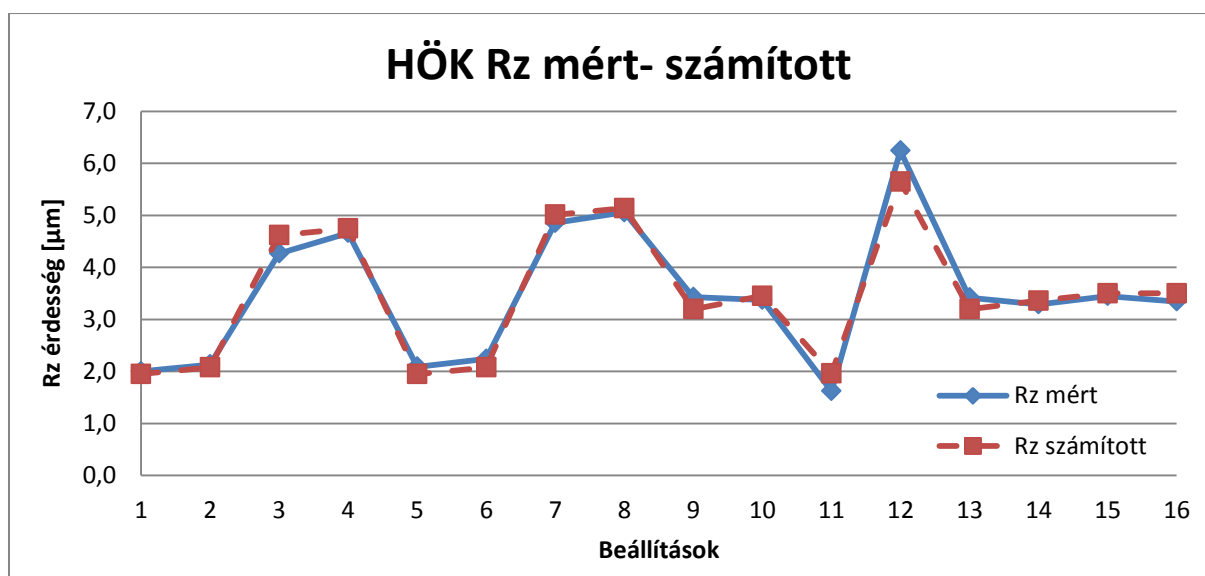
5. diagram



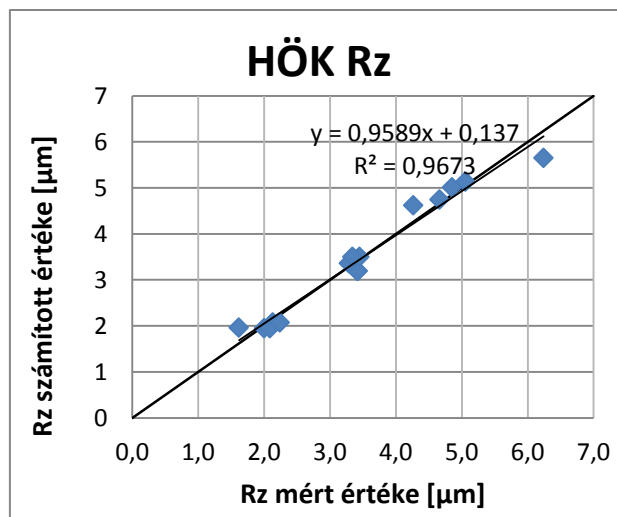
6. diagram

Az Rz felületi érdesség magasság értékeinek alakulását mutatja az 5. diagram. A pontok egymáshoz képesti elhelyezkedése szinte megegyezik az Ra átlagos érdességi paraméterek diagramjainál látottakkal, a két felületi érdességi paraméter jellegéből adódóan. Az egyenletből számított pontok jól illeszkednek a mért felületi érdesség értékekre. A legnagyobb előtolással megmunkált felület esetében itt is nagyobb különbség látható a többi értékhez képest, a legkisebb előtolás esetén viszont nincs nagy eltérés a mért értékhez képest. Az Ra érdességeket számító egyenletek kis előtolásnál a valósnál nagyobb érdességet számítottak, nagy előtolásnál viszont a várt felületi érdesség lett a kisebb a valós értékkel szemben. Ez az Rz érdességi paraméter egyenleteinél is jól megfigyelhető a 6. diagramon. A trendvonal, hasonlóan az eddigiekhez, az Rz érdesség értékeinél is közelít az $y=x$ egyeneshez.

6.3.4 Rz érdességek összehasonlítása hűtőfolyadékos megmunkáláskor



7. diagram



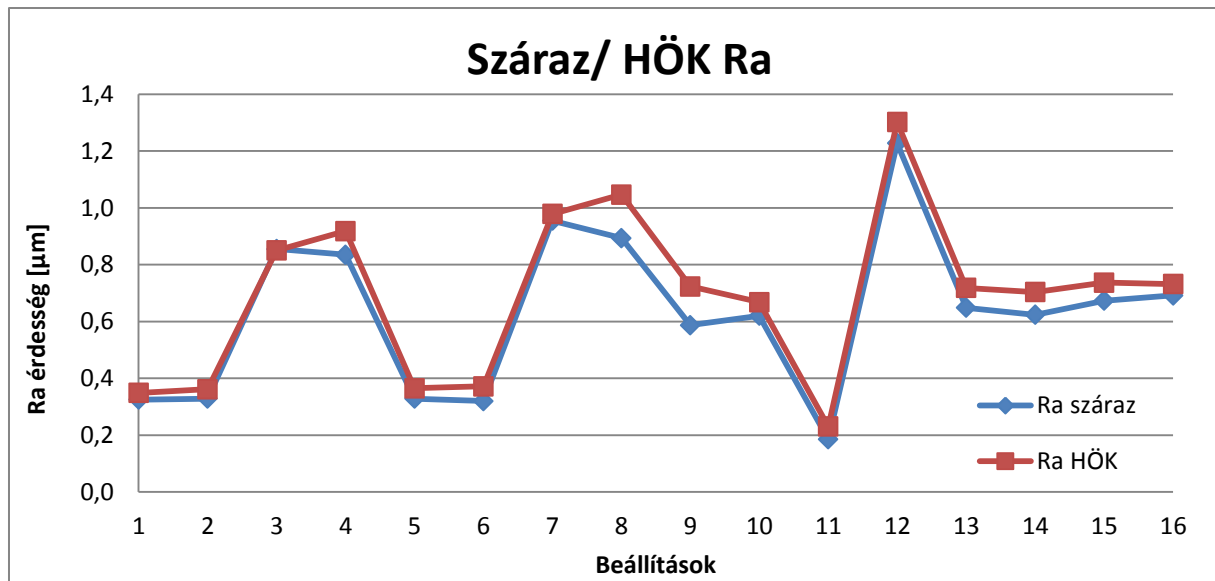
8. diagram

Hűtőfolyadékos megmunkálás esetén is hasonló eredményeket kapunk R_z érdesség magassági paraméterek vizsgálatakor, mint száraz megmunkálás esetén. Az R_a értékeknél megállapított különbség a két eljárással elért R_z értékek között is felfedezhető, tehát a fogásvétel növelésével nedves megmunkáláskor romlik az R_z érdesség, addig száraz megmunkálás esetén nagyobb fogásvétel kedvezőbb felületi érdesség magasságot eredményezett (8. diagram). Az egyenlet alapján várt értékek itt is jó illeszkedést mutatnak a mért érdességekre. Nagyobb eltérés a legkisebb és legnagyobb előtolással megmunkált felületeknél észlelhető. Ebben az esetben is közel áll a trendvonal a egyenlete a tökéletes illeszkedéshez, és a pontok nagy korrelációval illeszkednek rá.

6.4 Száraz és hűtőfolyadékos megmunkálások eredményeinek összehasonlítása

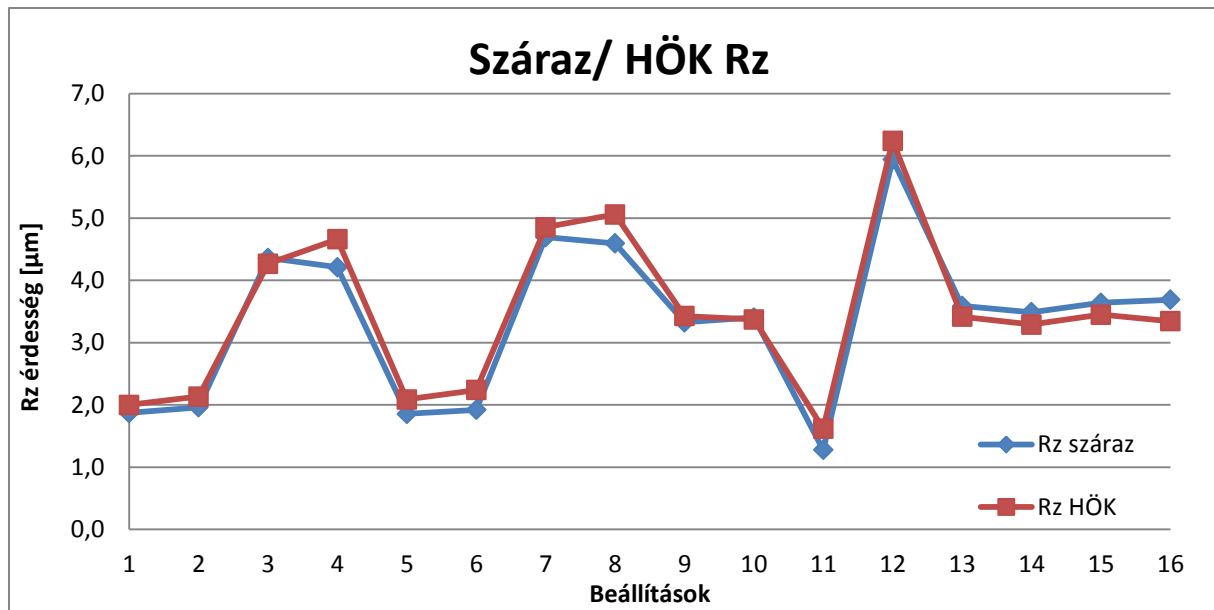
6.4.1 Felületi érdességek összehasonlítása

Műanyagok forgácsolása esetén, ha nagyobb forgácsoló sebességgel szeretnénk dolgozni, gyakran szükséges valamilyen hűtőközeg alkalmazása, hogy elkerüljük a beégéseket, megolvadást. Dolgozatom során műanyag megmunkáláshoz szakirodalomban talált forgácsoló sebesség értékeknél nagyobb sebességeket is alkalmaztam, amelyek a POM szárazon forgácsolhatóságának határát, a hűtőfolyadékok alkalmazásának szükségességét segítették behatárolni. A hűtőfolyadék olajos emulzió volt, melyet ömlesztéses hűtési eljárással juttattunk a forgácsleválasztás helyére. A kísérletterv mindkét közegen történő végrehajtása után a következő eredményeket kaptuk:



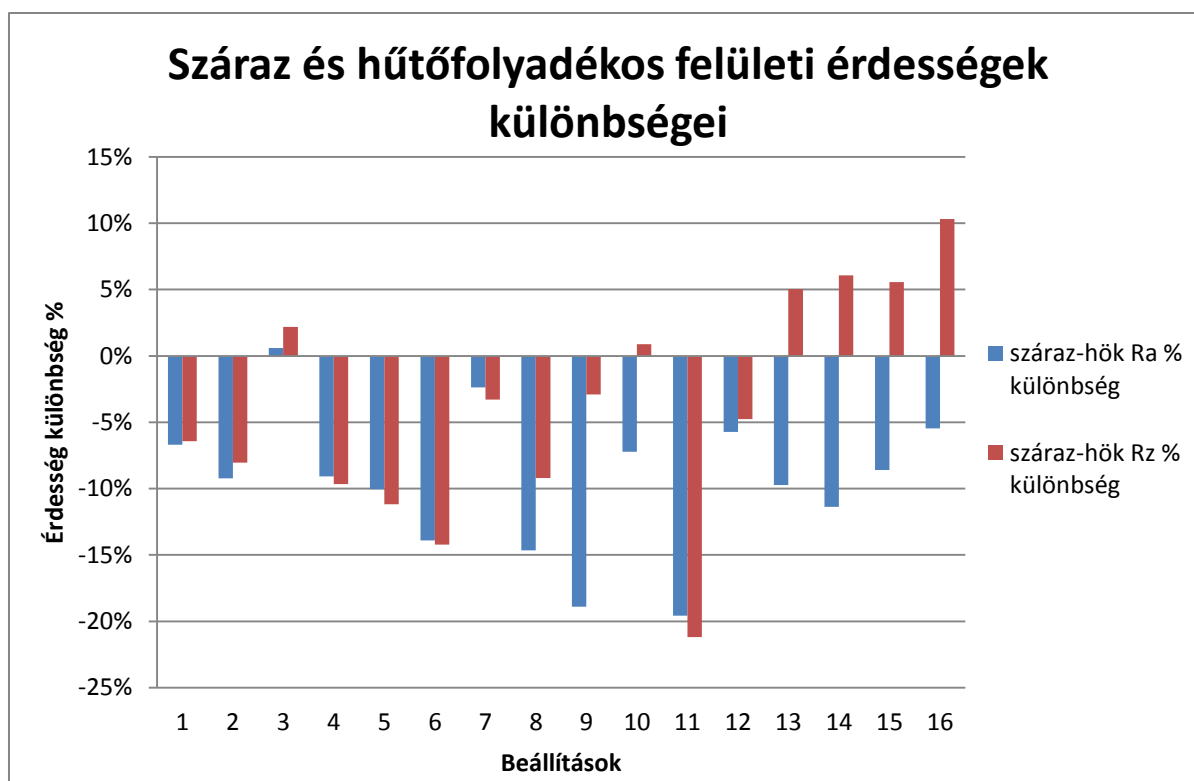
9. diagram

A 9. diagramon pirossal jelöltem a hűtőfolyadék használatával megmunkált felületek *Ra* érdességeit, kékkel a szárazon megmunkált felületek *Ra* érdességeit. Az eredmények igen meglepőek voltak, ugyanis a hűtőfolyadék alkalmazása mindegyik beállítással megmunkált felületi átlagos érdességére negatív hatással volt. Egyedül a 3. beállításnál volt 0,005 μm-el jobb *Ra* érdesség a hűtőfolyadékos megmunkálás javára a szárazhoz képest. Azonban ez a különbség is elenyésző 0,6%-os eltérés két érték között. A száraz megmunkálás javára viszont sokkal nagyobb különbségek is voltak. Átlagban 9,5%-al jobb felületi érdességet mutattak a szárazon megmunkált felületek *Ra* érdességei. A diagramból jól megfigyelhető a 3-4-es és 7-8-as beállításnál hogy a két hűtőközeg eltérően reagál a fogásvétel növelésére. Hűtőfolyadék alkalmazása esetén a fogásvétel növelésével nő a felületi érdesség, száraz megmunkálás esetén viszont csökken. A 9-10-es beállításoknál a forgácsoló sebesség növelésére figyelhetjük meg a reakciókat. Száraz megmunkáláskor a forgácsoló sebesség növelése mellett romló felületi érdességet láthatunk, hűtőfolyadékos megmunkálásnál viszont javult az érdesség.



10. diagram

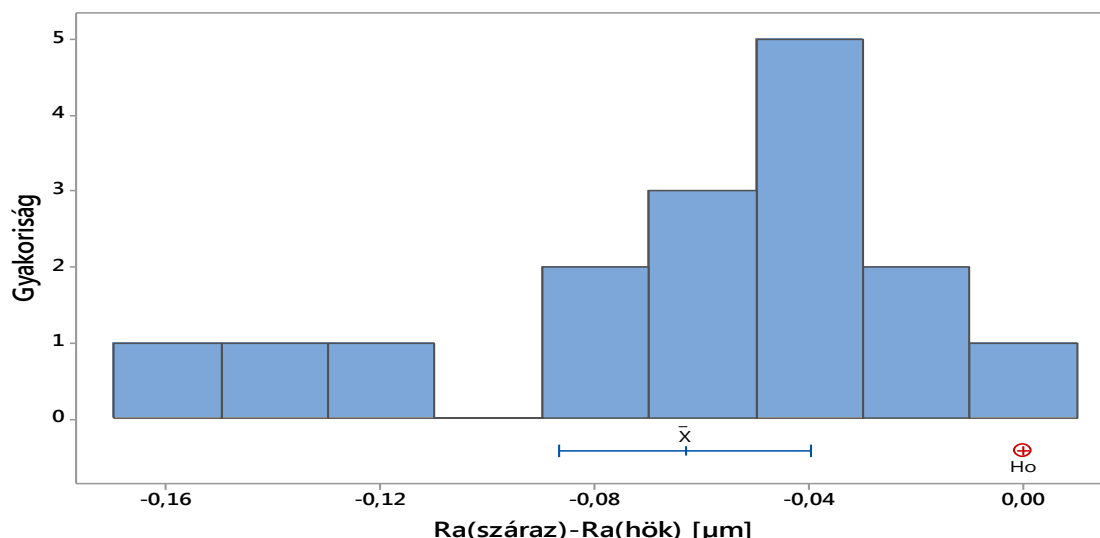
A 10. diagramon látható az *Rz* értékek alakulása a két hűtőközeg esetén. A felületi érdesség magasság értékek esetén nem lett mindegyik rosszabb a hűtőfolyadék alkalmazásával, de így is egyértelmű, hogy jobb a száraz megmunkálás felületi érdesség szempontjából. Az utolsó 4 beállításnál jobb *Rz* érdességgel rendelkeznek a hűtőfolyadékos beállítások, amelyeknél 400m/min forgácsoló sebességgel történt a megmunkálás. Ezeken kívül a 3-mas beállításnál is 2,2%-al jobb érdességgel rendelkezik a hűtőfolyadék. Ezekkel a beállításokkal az *Ra* érdességi paraméter is valamennyivel jobb volt, mint szárazon. A 10. beállításnál is valamelyest jobb eredményt kaptunk hűtőfolyadék alkalmazásával. A többi felületen a száraz megmunkálás diadalmaskodott és mind a 16 mérési pontot nézve átlagosan majdnem 4%-al jobb *Rz* felületi érdesség magasság érhető el száraz megmunkálással. A forgácsolási paraméterek változására hasonlóan reagáltak az *Rz* érdességek, mint az *Ra* érdességek.



11. diagram

A 11. diagram jól szemlélteti a száraz, és a hűtéses eljárások közötti különbségeket. Negatív tartomány esetén a száraz megmunkálás javára láthatjuk az értékeket, a pozitív tartományban lévő oszlopok esetén a hűtőfolyadék alkalmazása bizonyult előnyösebbnek. Mint láthatjuk ez nem mondható el sok beállításnál, főleg ha az *Ra* átlagos érdességek különbségeit nézzük, sokkal kedvezőbbek a szárazon megmunkált felületek. A 11-es beállításnál kaptam a legnagyobb %-os különbségeket. A szárazon megmunkált felület 19,6%-kal bizonyult jobbnak az *Ra* érdesség tekintetében, 21,2%-kal az *Rz* tekintetében. Ezen a beállításon kívül is voltak 10% feletti eltérések a száraz megmunkálás javára. A hűtőfolyadék mellett állnak az utolsó 4 beállítás *Rz* érdességmagasság értékei. Ezeknél a beállításonál hűtőfolyadékkal 5-10%-kal alacsonyabb *Rz* érdesség értékeket kaptam. Összességében viszont elmondható, hogy a száraz megmunkálás a kedvezőbb felületi érdesség szempontjából.

Hogy biztosabban kijelenthessem ezt az állítást, a 16 hűtőfolyadék nélkül megmunkált, és a 16 hűtőfolyadék alkalmazásával megmunkált felületek érdességi paramétereinek értékeit úgynevezett páros t-próbával vizsgáltam annak érdekében, hogy meghatározzam van-e szignifikáns különbség az egyes beállításokkal gyártott felületek érdességei között.



12. diagram: A két eljárással gyártott felületek Ra érdességi paraméter értékeinek különbségének hisztogramja

Paired T for Ra száraz - Ra hők

	N	Mean	StDev	SE Mean
Ra dry	16	0,6310	0,2831	0,0708
Ra hők	16	0,6942	0,3033	0,0758
Difference	16	-0,0632	0,0440	0,0110

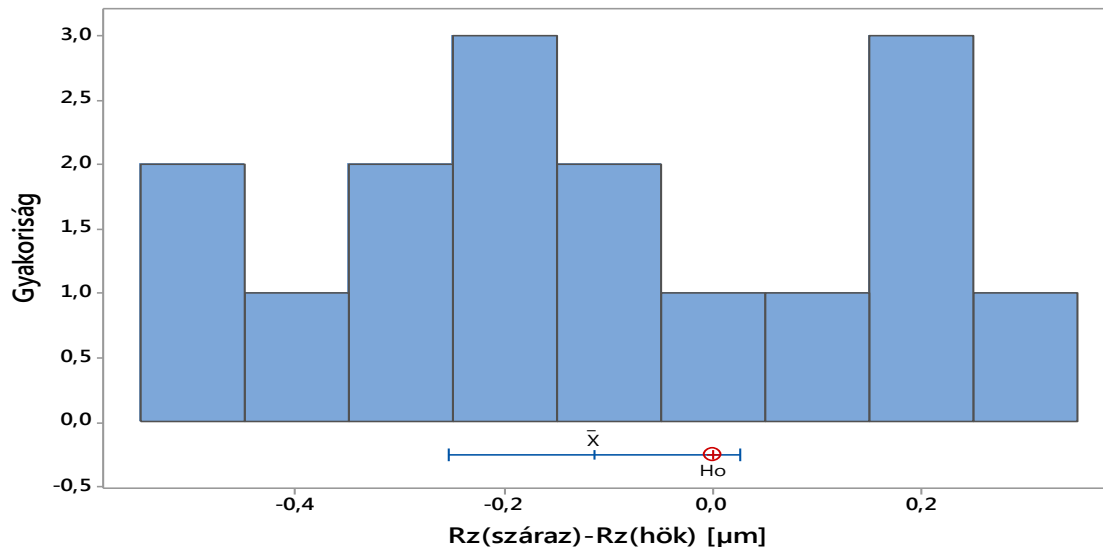
95% CI for mean difference: (-0,0866; -0,0397)

T-Test of mean difference = 0 (vs ≠ 0): T-Value = -5,74 P-Value = 0,000

8. táblázat: A páros t-próba eredményei Ra értékek esetén

A 12. diagram egy hisztogramot ábrázol, melyben a szárazon és a hűtőfolyadék használata mellett forgácsolt Ra felületi érdesség értékeinek különbségei szerepelnek. H_0 jelöli az a pontot, amelynél a két érték különbsége 0. A hisztogramból látható, hogy egy olyan beállítás van ahol nincs jelentős különbség a két eljárással megmunkált felület Ra érdességei között. Az összes többi beállításnál a szárazon megmunkált felületek érdessége a kedvezőbb. A 8. táblázatban a páros t-próba eredményeit láthatjuk.

Mivel a P értéke kisebb mint 0,05 ezért 95%-os szignifikancia szinten megállapítható, hogy van különbség a két eljárás között. A diagramból és a táblázatból jól kivehető, hogy az értékek átlagának 95%-os konfidencia intervalluma -0,0866 μm és -0,0397 μm között van. Ez annyit jelent, hogy ha egy tetszőleges beállítás esetén megvizsgálánk a felületi érdességek különbségét száraz, valamint hűtőfolyadékos megmunkálás esetén, az eredmények nagy, 95%-os valószínűséggel a -0,0866 μm-től -0,0397 μm-ig terjedő intervallumba esnének, tehát ennyivel kedvezőbb Ra átlagos érdességet kapnánk száraz megmunkálással, azaz a száraz és hűtőfolyadékos megmunkálások érdességeinek különbsége negatív.



13. diagram: A két eljárással gyártott felületek Rz érdességi paraméter értékeinek különbségének hisztogramja

Paired T for Rz száraz - Rz hők

	N	Mean	StDev	SE Mean
Rz dry	16	3,364	1,286	0,322
Rz hők	16	3,478	1,319	0,330
Difference	16	-0,1137	0,2625	0,0656

95% CI for mean difference: (-0,2536; 0,0261)

T-Test of mean difference = 0 (vs $\neq$ 0): T-Value = -1,73 P-Value = 0,10

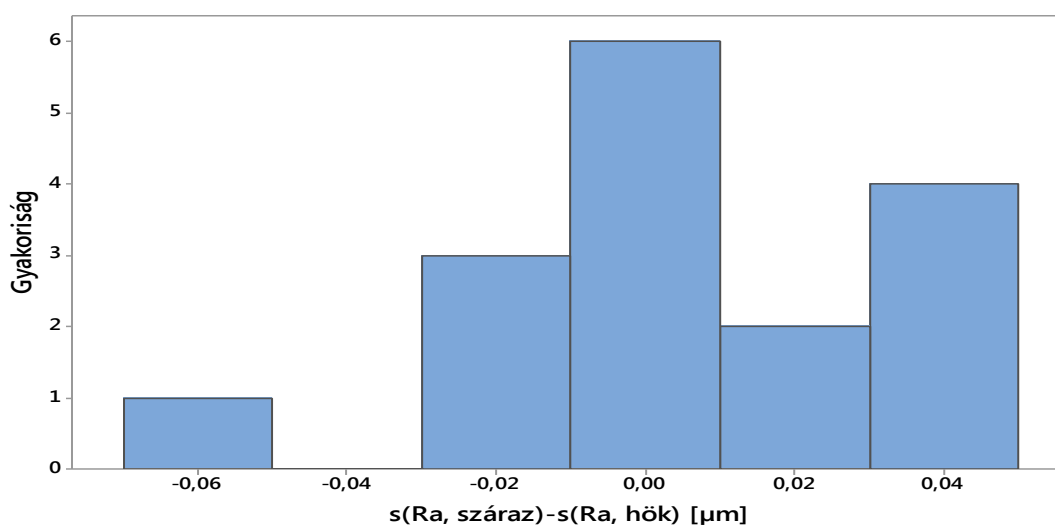
9. táblázat: A páros t-próba eredményei Rz értékek esetén

Az Rz érdességi paraméter értékeken is végrehajtottam páros t-próbát. A 13. diagram ismét egy hisztogramot ábrázol, jelen esetben a szárazon megmunkált beállítások és a hűtőfolyadékos beállítások Rz érdességmagasságának különbségeit, a 9. táblázat pedig a páros t-próba eredményeit.

Megállapítható, hogy Rz-re vonatkozóan 95%-os szignifikancia szinten nincs különbség a száraz és a hűtőfolyadékos eljárás között, mivel P értéke nagyobb, mint 0,05. A hisztogramból ugyan látható, hogy ha a különbségek átlagát vesszük, Rz paraméter esetében is a száraz megmunkálás a kedvezőbb, ugyanakkor -0,254 μm -tól 0,026 μm -ig terjedő különbség intervallumba gyárthatunk egy tetszőlegesen választott forgácsolási paraméter beállítással. Ebben az intervallumban pedig benne van annak a lehetősége is, hogy előnyösebb a hűtőfolyadék alkalmazása az Rz felületi érdesség magasság szempontjából.

6.4.2 Szórások vizsgálata

Minden felületen 6-szor mértem felületi érdességet, ezért a meghatározott átlag értékek valamilyen szórással rendelkeznek. Mivel a szórások nem követnek normális eloszlást, ezért a szórások különbségének vizsgálatára nemparaméteres próbát kell alkalmazni. A páros t-próbához hasonlóan képeztem a kétféle eljárással (hűtés nélküli, hűtőfolyadékos) előállított felületek R_a és R_z mért értékek szórásainak különbségét, és Wilcoxon tesztet alkalmazásával megvizsgáltam, hogy a szórások különbségei szignifikánsan eltérnek e zérustól.



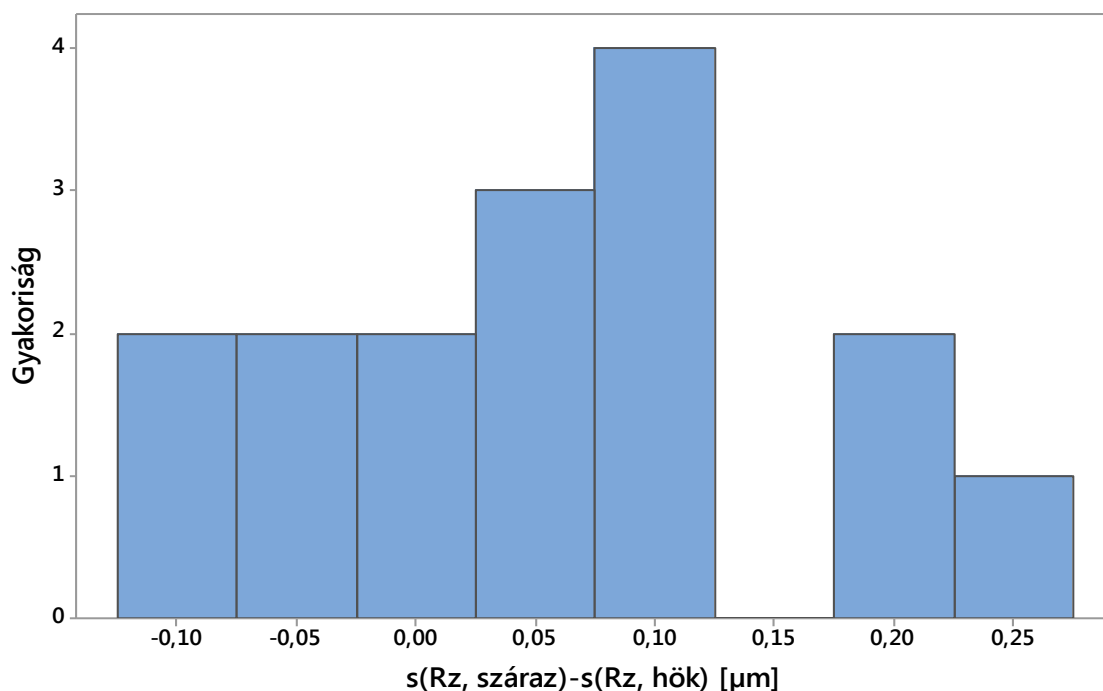
14. diagram: Hisztogram az R_a értékek szórásainak különbségéről

Test of median = 0,000000 versus median ≠ 0,000000						
	N	N for Test	Wilcoxon Statistic	P	Estimated Median	
sRA delta	16	16	90,0	0,266	0,006708	
		Estimated Median	Achieved Confidence	Confidence Interval		
	N			Lower	Upper	
sRA delta	16	0,0067	94,8	-0,0071	0,0194	

10. táblázat: A Wilcoxon teszt eredményei R_a értékek szórásainak esetén

A 14. diagramon látható, hogy az R_a érdesség szórásainak különbségei inkább a hűtőfolyadékos megmunkálás esetén kedvezőbbek, ugyanis 6 beállítás esetén a szórások különbsége nagyobb, mint zérus, 6 beállításnál közel egyenlő zérussal, és csak 4 beállítás esetén kisebb a szárazon megmunkált felületek szórása, tehát a szórások különbsége kisebb, mint zérus.

A 10. táblázatból viszont láthatjuk, hogy P értéke nagyobb, mint 0,05, ami azt eredményezi, hogy a száraz és hűtőfolyadékos megmunkálások között nincs szignifikáns különbség az R_a érdesség értékek szórásait nézve.



15. diagram Hisztogram az Rz értékek szórásainak különbségéről

Test of median = 0,000000 versus median $\neq$ 0,000000

	N	N for Test	Wilcoxon Statistic	P	Estimated Median
sRz delta	16	16	100,0	0,103	0,04935

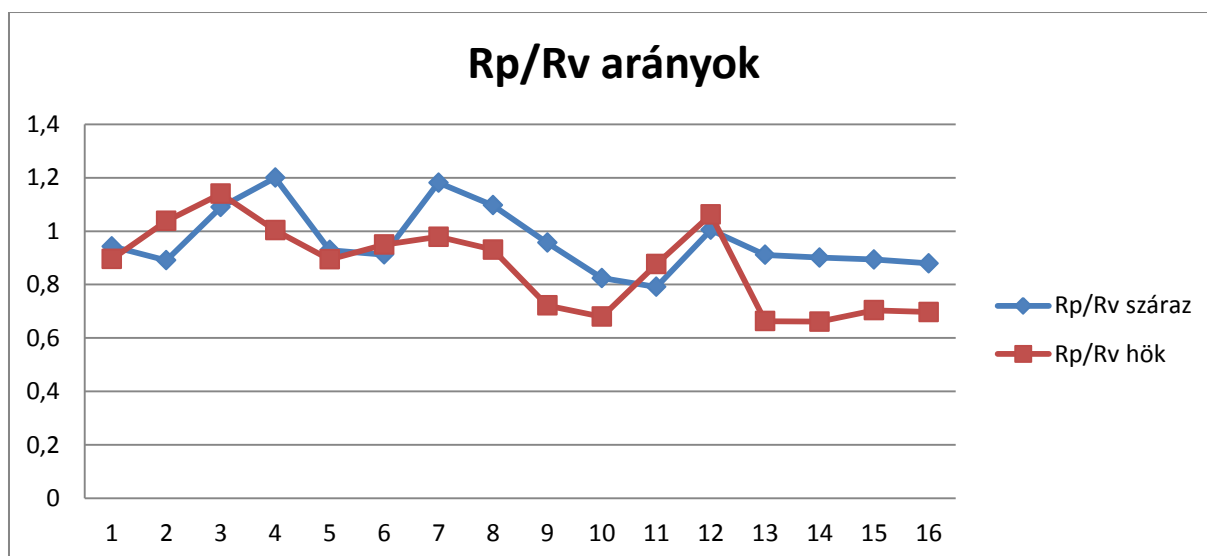
	N	Estimated Median	Achieved Confidence	Confidence Interval Lower	Confidence Interval Upper
sRz delta	16	0,049	94,8	-0,005	0,110

11. táblázat A Wilcoxon teszt eredményei Rz értékek szórásainak esetén

A különböző beállításokkal és hűtőközeggel előállított felületek Rz értékek szórásainak különbségéről is az látható a 15. diagramon, hogy a különbségek pozitív és negatív tartományban is egyaránt megtalálhatóak, mégis több beállítás esetén kaptam pozitív különbség értékeket, tehát látszólag a hűtőfolyadékos megmunkálás a kedvezőbb az Rz értékek szórásai szempontjából.

A 11. táblázatban található a Wilcoxon teszt eredményei, melyek azt mutatják, hogy mégsem jelenthető ki a hűtőfolyadék alkalmazásának pozitív hatása a szórásokra, mert P értéke nagyobb, mint 0,05, tehát nincs szignifikáns különbség a két eljárás között, ha az Rz értékek szórásait vesszük figyelembe.

6.4.3 R_p/R_v arányok vizsgálata száraz és hűtőfolyadékos megmunkálás esetén



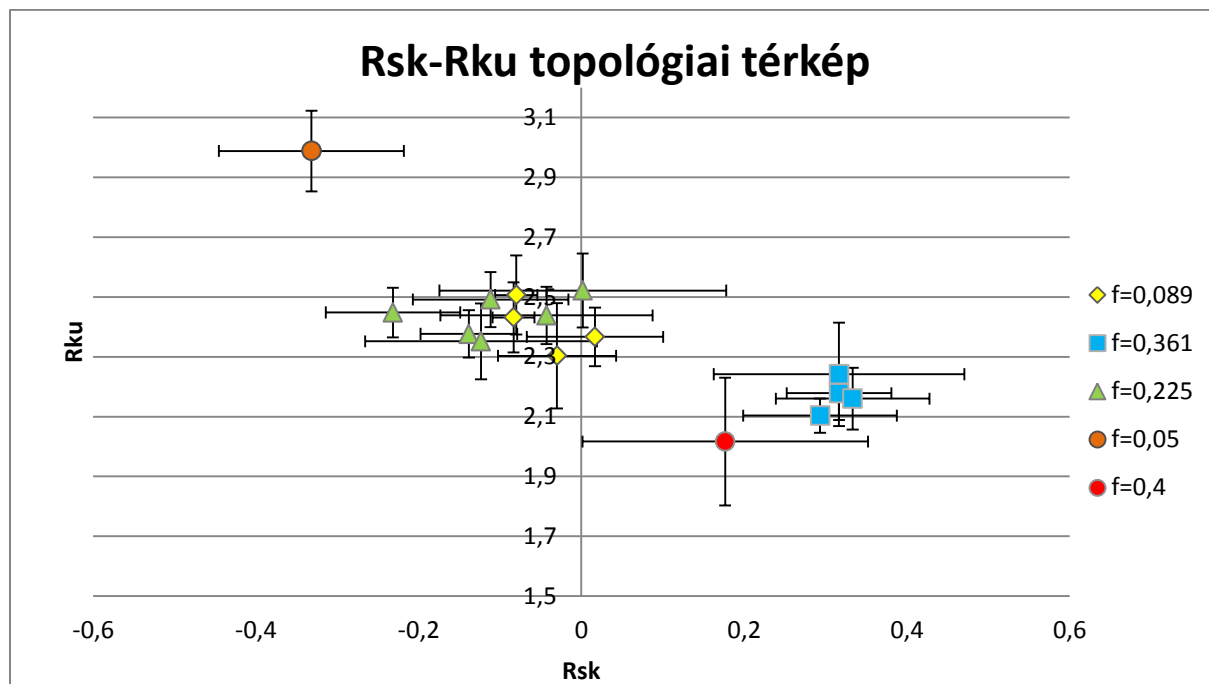
16. diagram: Az R_p/R_v hányados alakulása száraz és hűtőfolyadékos megmunkáláskor

Az R_p/R_v aránypár az érdesség csúcsok és völgyek közötti arányt mutatja. Teljesen szimmetrikus felület esetén az aránypár 1-el egyenlő. A 3. ábrából látható, hogy száraz megmunkáláskor az aránypár közel 1 körüli értéket vesz fel, de a felületek többségénél az aránypár értéke 1 alatt van. Hűtőfolyadékos megmunkáláskor átlagban kicsit alacsonyabb értékeket kaptunk, mint száraz forgácsoláskor. Ezekből az következik, hogy a felületek nagyobb völgymélységekkel rendelkeznek az érdességi csúcsoknál, kevésbé csúcsos felületeket sikerült gyártani. Ez részben a körlapka geometriájának tudható be, ugyanis a nagy csúcssugár elsimítja az érdességi csúcsokat.

Megfigyelhető továbbá egy hullámosság az R_p/R_v értékek alakulásában mindkét módszer esetén. A hullámok csúcsai a 3-4., 7-8., és a 12. beállításnál láthatók. Ezek a beállítások voltak a kísérletterv nagy előtolású beállításai. Következésképpen nagyobb előtolással csúcsosabb felületet gyártunk.

6.4.4 Az *Rsk*- *Rku* értékek vizsgálata

Az *Rsk*-*Rku* értékek alakulását topológiai térképek alkalmazásával vizsgáltam meg. A topológiai térkép egy *Rsk*-*Rku* koordináta rendszerben ábrázolt pontsor, ami a különböző beállításokkal megmunkált felületeken egyidejűleg mért ferdeségi és lapultsági mérőszámok értékeit adja meg.



17. diagram: Szárazon megmunkált felületek topológiai térképe

A topológiai térképen a vízszintes tengelyen az *Rsk*, a függőleges tengelyen az *Rku* értékek vannak feltüntetve. Megfigyelhető hogy az érdesség statisztikai paraméterei előtolás szerint külön csoportokba rendeződnek. Különösen a nagyobb előtolással megmunkált felületeknél állapítható meg az elkülönülés. A 0,361 mm-es előtolással megmunkált felületek ferdeségi és lapultsági mérőszámai igen közel állnak egymáshoz. Az *Rsk* értékek 2,9 és 3,3 között találhatóak, az *Rku* értékek pedig 2,1 és 2,4 között helyezkednek el. Közel áll ehhez a csoporthoz a 0,4 mm-es előtolással gyártott felület is. A közepes 0,225 mm-es és a kisebb 0,089 mm-es előtolással forgácsolt felületek csoportjai között átfedés van, nem különülnek el egymástól teljesen. *Rku* értékeik alakulása 2,3 és 2,5 között volt mindkét előtolás esetén. Az *Rsk* értékek alakulásában fellelhető különbség köztük. A 0,225 mm-es előtolásnál 0-tól egészen -2,3 ig terjednek, a kisebb előtolásnál pedig 0,016-tól -0,08-ig vették fel a skewness értékeket. A legkisebb előtolással megmunkált felület a bal felső sarokban helyezkedik el elkülönülve a többi értéktől. Minden pontra fel lett tüntetve az értékek szórása.

7. Optimum pont meghatározása

Egy termék minőségének javítására irányuló kísérletnél a termék minősége nem jellemezhető egyetlen adattal. A több, általában különböző mértékegységű és különböző súlyokkal figyelembe veendő jellemzők kombinációjára dolgozta ki Harrington a kívánatossági függvényeket. Ezek a függvények a (0,1) intervallum felosztásával különböző minőségi fokozatokat rendelnek a különböző számértékekhez melyekben 0 az elvi alsó határérték, 1 pedig az elvi határérték, amely maximálisan kielégíti az elvárásokat. [20]

Dolgozatomban az optimum pont meghatározásának feltétele a minimális felületi érdesség elérése volt maximális termelékenység mellett. Ebből adódóan a figyelembe vett jellemzők a következők voltak:

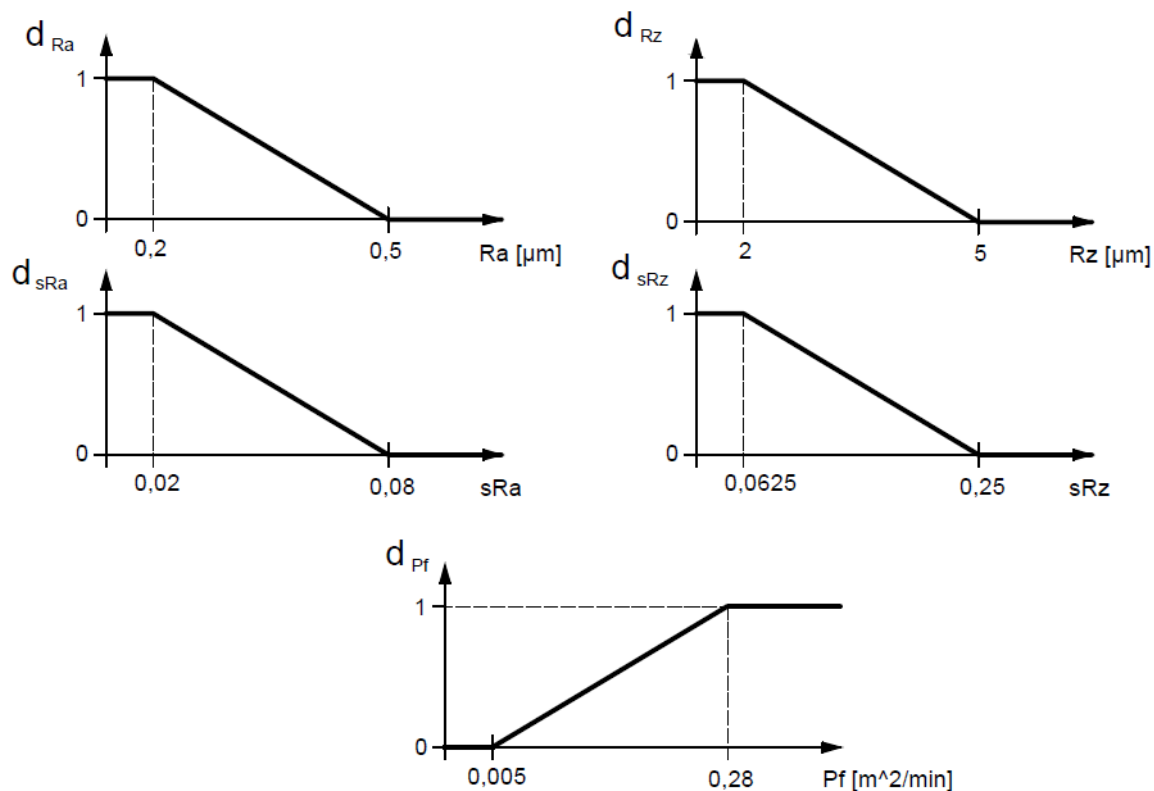
- Termelékenység (forgácsoló sebesség és előtolás szorzata), maximalizálás
- Ra átlagos felületi érdesség, minimalizálás
- sRa , átlagos felületi érdesség szórása, minimalizálás
- Rz érdesség magasság, minimalizálás
- sRz , érdesség magasság szórása, minimalizálás

A termelékenység (Pf) határértékeit a kísérletterven belül a legkisebb és legnagyobb beállítható előtolás és forgácsoló sebesség szorzatával határoztam meg, így:

$$100 \frac{m}{min} \cdot 0,00005 m = 0,005 \frac{m^2}{min},$$

$$\text{valamint } 700 \frac{m}{min} \cdot 0,0004 m = 0,28 \frac{m^2}{min}.$$

Az Ra átlagos felületi érdesség határértékeinek meghatározásakor olyan értékeket választottam, amelyek acélok esetében már köszörült felületnek felelnek meg, így az intervallumot 0,2-0,5 μm között állapítottam meg. Az Rz érdesség magasság határértékeit ugyancsak a köszörülés technológiájából adódó $Rz \cong 10Ra$ szabály felhasználásával az intervallum 2-5 μm . Az átlagos érdesség szórását 0,02-0,08 közé, az Rz értékek szórását 0,0625-0,025 közé állítottam.



18. ábra kívánatossági függvények

A Minitab 16 programba beállítottam az említett jellemzők intervallumait majd a program a következő beállításokat, valamint a jellemzők várható értékeit határozta meg:

- Forgácsoló sebesség 700 m/min
- Előtolás 0,0783 mm
- Fogásvétel 2 mm

Az ezekkel a beállításokkal megmunkált felület program által becsült érdességei, valamint az érdességek szórásai:

- | | | |
|---------|---------------------------------------|-----------------|
| - Ra | 0,202 μm | $d_{Ra}=0,996$ |
| - sRa | 0,012 | $d_{sRa}=1$ |
| - Rz | 1,393 μm | $d_{Rz}=1$ |
| - sRz | 0,090 | $d_{sRz}=0,852$ |
| - Pf | $0,055 \frac{\text{m}^2}{\text{min}}$ | $d_{Pf}=0,181$ |

Az összetett célfüggvény a jellemzőkre vonatkozó d értékek geometriai átlagolásával kapjuk meg az alábbi képlet szerint:

$$D = \sqrt[n]{d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_n}$$

Esetünkben:
$$D = \sqrt[5]{d_{Ra} \cdot d_{sRa} \cdot d_{Rz} \cdot d_{sRz} \cdot d_{Pf}}$$

Ahol n a vizsgálandó tulajdonságok számát jelöli. D érték csak akkor nagy, ha egyik d_i érték se kicsi, a kis d értékek súlya viszont jelentős a geometriai átlagolás miatt.

Az egyenletbe behelyettesítve a kapott d értékeket a D célfüggvény a következő:

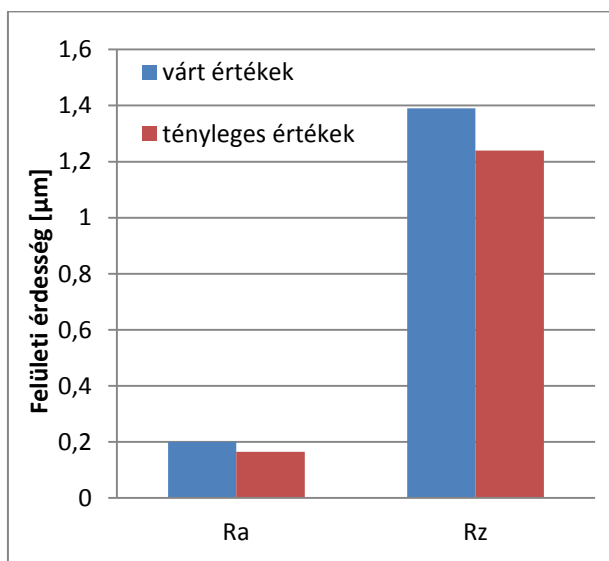
$$D = \sqrt[5]{0,996 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,852 \cdot 0,181} = 0,687$$

7.1 Forgácsolási optimum pont ellenőrzése

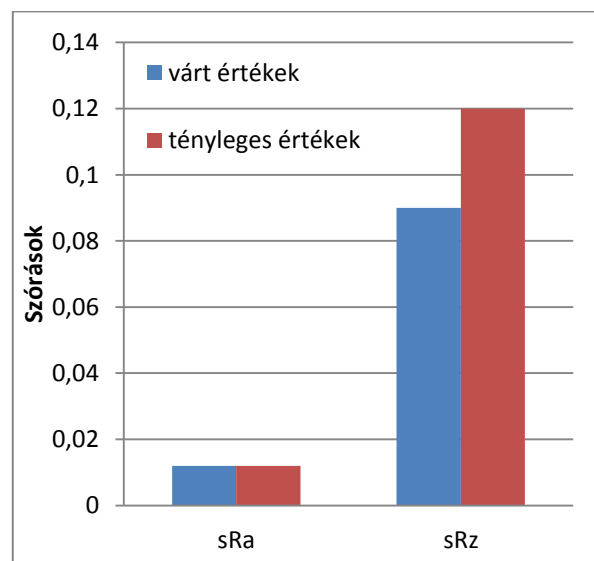
A Minitab 16 által meghatározott optimális forgácsolási paraméterek beállításával elvégeztem a forgácsolást, amit felületi érdesség mérés követett a kísérletterv elvégzése utáni mérési módszerekkel és eszközökkel.

A feltételezett optimum pont érdesség mérésének eredményei:

- Ra	0,165 μm
- sRa	0,012
- Rz	1,24 μm
- sRz	0,117



18. diagram



19. diagram

Ahogy azt a 18. és 19. diagram is mutatja, az eredmények igen közel állnak az elvárt értékekhez. Ez különösen igaz a felületi érdesség értékek szórásaira. Az R_a valós szórása és a becsült szórás között csupán 1,5 tizedred a különbség, ami elhanyagolhatónak tekinthető. Az R_z érdesség valós szórása 2,5 századdal lett nagyobb, mint a várt érték, tehát szintén nagyon pontosan megközelítette. A felületi érdességek esetében viszont kicsit nagyobb különbség van az elvárt és a tényleges érdességi értékek között. Az optimum pontnak meghatározott beállításokkal végrehajtott forgácsolás után ugyanis kedvezőbb felületeket kaptam, mint ahogyan azt elvártam. A tényleges R_a átlagos érdesség mintegy 22 %-al kisebb érték lett az elvártnál. A valós R_z érték is kedvezőbb lett mint vártam, itt átlagosan 12%-al alacsonyabb felületi érdesség magasság értékeket regisztráltam.

8. Összegzés

- Dolgozatom során egy úgynevezett CCD (Central Composit Design) kísérlettervet hajtottam végre a POM (Poli-oxi-metilén) nevű műszaki műanyag forgácsolhatóságának megállapítására száraz, valamint hűtőfolyadék alkalmazása mellett történő forgácsoláskor.
- A kísérletterv elvégzése után empirikus modelleket állítottam fel az R_a és R_z felületi érdességi paraméterek értékeinek becslésére mind száraz, mind hűtőfolyadékos megmunkálás során
- Összehasonlítottam a szárazon, valamint hűtőközeg használata mellett előállított felületeket a felületi érdességek, valamint ezen értékeinek szórásainak szempontjából.
- Definiáltam egy forgácsolási optimum pontot, aminek meghatározásánál figyelembe vettem a felületi érdesség értékeit, az értékek szórását, valamint a termelékenységet.
- A feltételezett optimum pont beállításával elvégeztem az ellenőrző kísérletet, majd a felületi érdességmérést követően összehasonlítottam a kapott értékeket az várt értékekkel.

9. Irodalomjegyzék

- [1] Pukánszky Béla: Műanyagok, Műegyetemi kiadó, 8-11.
- [2] Dr. Kovács Lajos: Műanyag Zsebkönyv, Műszaki könyvkiadó 1979, 31-36.
- [3] Dr. Füzes László: Műanyagok Anyag- és Technológia kiválasztás, Bagolyvár könyvkiadó 1994, 26-27.
- [4] Dr. Kalácska Gábor: Műszaki Műanyagok Gépészeti Alapjai, Minerva-Sop Bt. 1997, 4.
- [5] Dr. Macskási Levente: 50 Éves a Műanyag és Gumi, MTA 2013
- [6] Dr. füzes László: Műszaki Műanyagok Típusai, Tulajdonságai, Feldolgozási és Alkalmazási Lehetőségei, 2005
<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:2rs7R6sm1TwJ:ftp://pt.bme.hu/Polymer%2520alkatreszek%2520gyartasa/1%2520es%25202%2520Muszaki%2520muanyag%2520fogalma%2520%26%2520tipusai.ppt+&cd=1&hl=hu&ct=clnk&gl=hu>
- [7] Ensinger: Engineering Plastics -The Maunal, http://www.ensinger-online.com/uploads/media/Ensinger-Manual_01.pdf
- [8] Adolf Franck: Kunststoff-Kompedium, 4., neubearbeitete und erweiterte Auflage, Vogel Buchverlag, 1996
- [9] A. W. Birley, R. J. Heath, M. J. Scott: Plastics Materials Properties and Applications, 2nd Edition, BLACKIE ACADEMIC & PROFESSIONAL 1994
- [10] Dr. habil Kalácska Gábor: Műszaki műanyag félkész termék ismertető sorozat 3. rész, 2.anyagcsoport – Poli(oxi-metilén) POM - <http://www.muanyagipariszemle.hu/2005/06/2-anyagcsoport-polioximetilen-pom-dr-habil-kalacska-gabor-20.pdf>
- [11] Dr. Füzes László, Dr. Kelemen Andorné: Műszaki Műanyagok Zsebkönyve, Műszaki könyvkiadó 1989
- [12] Fenyvessy Tibor, Fuchs Rudolf, Plósz Antal: Műszaki Táblázatok, Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, Budapest, 2010
- [13] TaeguTec Parting & Grooving Contents
http://www.taegutec.com/Ustyles/DownloadFiles/C_tclamp_en.pdf
- [14] Varga Bálint, Dr. Mikó Balázs: BMF BGK AGI Forgácsoló Gépműhely Szerszámgépei, 2009, Oktatási Segédlet
- [15] Dr. Horváth Sándor: A felületi hullámosság 2D-s és 3D-s jellemzése, a működési tulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálata és elemzése, Doktori (PhD) értekezés, Budapest 2008
- [16] Czifra Árpád: Útmutató a Tribológia tárgy mikrotopográfiai vizsgálatok laborgyakorlatához, Budapest 2011, http://www.gbi.bgk.uni-obuda.hu/oktatas/segedanyagok/gepelemek/tribologia/Utmutato_trib_labor.pdf
- [17] E.S. Gadelmawlaa, M.M. Kourab, T.M.A. Maksouf', I.M. Elewaa, H.H. Solimand, Roughness parameters, Journal of Materials Processing Technology 123 (2002) 133-145

- [18] Dr. Fridrik László: Válogatott fejezetek a gépgyártástechnológiai kísérletek tervezése témakötéből, Nemzeti Tankönyvkiadó, 1993
- [19] Horváth Richárd, Drégelyi-Kiss Ágota, Mátyási Gyula: Application of RSM Method for the Examination of Diamond Tools, ACTA POLYTECHNICA HUNGARICA 11:(2) pp. 137-147. (2014)
- [20] Szabó Péter: Vékonylemezek Ellenállás-pontkötéseinek Minőség-centrikus optimalizálása, PhD értekezés, Miskolc, 2002. 44-55.