



Miskolci Egyetem
Gépészmérnöki és Informatikai Kar
Gyártástudományi Intézet



Diplomaterv

**Adott megmunkáló eljárások
energiahatékonyságának vizsgálata**

Készítette: **Smolnicki Szilárd**

Neptun kód: JRQF3F

Miskolc, 2022

EREDETISÉGI NYILATKOZAT

Alulírott Smolnicki Szilárd; Neptun-kód: JRQF3F a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának végzős gépészmérnök szakos hallgatója ezennel büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában nyilatkozom és aláírással igazolom, hogy az *Adott megmunkáló eljárások energiahatékonyságának vizsgálata* című diplomatervem saját, önálló munkám; az abban hivatkozott szakirodalom felhasználása a forráskezelés szabályai szerint történt.

Tudomásul veszem, hogy diplomaterv esetén plágiumnak számít:

- szószerinti idézet közlése idézőjel és hivatkozás megjelölése nélkül;
- tartalmi idézet hivatkozás megjelölése nélkül;
- más publikált gondolatainak saját gondolatként való feltüntetése.

Alulírott kijelentem, hogy a plágium fogalmát megismertem, és tudomásul veszem, hogy plágium esetén szakdolgozatom/diplomatervem visszautasításra kerül.

Miskolc, 2022. év 11. hó 22. nap

.....

Hallgató

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	3
1. Az energiahatékonyság kérdései.....	4
1.1. Társadalmi és gazdasági viszonyok.....	4
1.2. A hatékonyság jellemzői	4
1.3. A fenntartható fejlődésről.....	6
1.4. Az energiahatékonyság megvalósítása	7
1.5. Az üvegházhatású gázok	8
1.6. Az ökohatékonyság.....	9
1.7. Energiahatékonyságból ökohatékonyságot.....	11
1.8. Az ökotermelékenység és az ökointenzitás	13
2. A hűtő-kenő folyadékok.....	14
2.1. A környezetkímélő gyártás	14
2.2. A hűtő-kenő folyadékok jellemzői	15
2.3 A hűtő-kenő eljárások.....	16
2.3.1. Minimális mennyiségű kenés (MQL)	16
2.3.2. Nanofolyadékkal támogatott MQL	16
2.3.3. Kriogén megmunkálás	17
3. A 2D-s felületi érdesség mérőszámai.....	18
3.1. Az átlagos érdesség	18
3.2. Az egyenetlenség-magasság	18
3.3. A maximális egyenetlenség	19
3.4. A négyzetes középérték	19
3.5. A hordfelületi görbe 2D-s jellemzői.....	19
4. A 3D-s felületi érdesség mérőszámai.....	21
4.1. A 3D-s felületi érdesség mérésének fejlődése	21
4.2. A felületi érdesség aritmetikai középértéke.....	21
4.3. A felületi érdesség négyzetes középértéke	22
4.4. A felületi érdesség maximális értéke.....	22
4.5. A tízpontmagasság.....	23
4.6. A hordfelületi görbe 3D-s jellemzői.....	23
4.7. Az érdességi mérőszámok összevetése.....	24
5. A felületek megmunkálása és érdességmérése.....	25
5.1. A próbadarab jellemzői	25

5.2. Az esztergálás jellemzői	26
5.3. A gyémántvasalás jellemzői	26
5.4. A felületi érdesség mérése	28
5.5. A Kraljic-mátrixok	28
6. A kísérleti eredmények ismertetése.....	31
6.1. Az esztergált felület érdességmérésének eredményei	31
6.2. A gyémántvasalt felület érdességmérésének kiértékelése	33
6.3. A javulási tényezők meghatározása, kiértékelése.....	39
7. Az energiahatékonyság vizsgálata a faktoriális kísérlettervezés alkalmazásával	51
7.1. Az energiahatékonyság vizsgálata gyémántvasalás esetén a faktoriális kísérlettervezés alkalmazásával.....	52
7.2. Az energiahatékonyság vizsgálata a gyémántvasalás javulási tényezői esetén a faktoriális kísérlettervezés alkalmazásával.....	57
Összefoglalás.....	62
Summary	63
Felhasznált irodalom	64

Bevezetés

A 21. század egyik, ha nem a legégetőbb feladatát jelenti környezetünk védelme mind lokálisan, mind globálisan. A kereslet megállíthatatlan növekedése, a különbnél külön igények és követelmények az egyes termékekkel, szolgáltatásokkal kapcsolatban mind arra sarkallják az egyes szektorok képviselőit, hogy kínálatukat folyamatosan fejlesszék, tökéletesítsék. A globális felmelegedés, a légszennyezés, a zajterhelés mind-mind egyenként is komoly problémát jelent, de együttes hatásukat, illetve következményeiket (erdőtüzek, tengerszint emelkedés) értékelve megállapítható, hogy sürgős beavatkozásokra, változtatásokra van szükség, hogy ezen folyamatokat meg lehessen fordítani. A minket körülvevő világ hatásai, fenntarthatósági problémái, konfliktusai mindinkább rámutatnak az energiahatékonyság és a környezettudatosság aktualitására. Fontos egészen a legapróbb részletekig megértenünk azt, hogy bolygónk készleteinek korlátok nélküli kizsákmányolása előbb-utóbb természeti katasztrófákhoz vezethet, melyeknek láthatjuk is az előjeleit.

A forgácsoló megmunkálások terén, ha a környezettudatosságra gondolunk, akkor a hűtő-kenő folyadékok alkalmazása, valamint a nagy energiaigényű megmunkáló eljárások okozhatnak fejtörést: Diplomamunkám célja ezen kérdések vizsgálata esztergálás, valamint gyémántvasalás során.

Kutatásomat az energiahatékonyság, az ökohatékonyság, valamint a hűtő-kenő folyadékok legfrissebb eredményeinek felderítésével, feldolgozásával kezdtem, így a Dolgozat első fejezetében ezeket ismertetem. A következő részekben azon 2D-s, illetve 3D-s felületérdességi mérőszámok jellemzőit, származtatásait veszem sorra, melyeket a későbbiekben használok a mérések kiértékelése során. Az ötödik fejezetben bemutatom a próbadarab méreteit, anyagminőségét, melyen a vizsgálatokat végzem. Ezt követi az esztergálás, illetve a gyémántvasalás technológiai jellemzőinek bemutatása, valamint az érdességméréshez alkalmazott mérőgép és a mérőszoftver ismertetése. A Kraljic-mátrixot – melyet az eredmények vizuális ábrázolásához használok fel –, szintén ebben a fejezetben mutatom be.

Munkám további részeiben a kísérleti eredmények ismertetése következik a Kraljic-mátrixok segítségével. Összehasonlítom az esztergált és a gyémántvasalt felületek érdességi paramétereit, továbbá meghatározom a javulási tényezőket is, különböző technológiai adatok által gyémántvasalt felületekre. A faktoriális kísérlettervezés segítségével ajánlásokat teszek a technológiai paraméterek ideális megválasztására.

Végezetül Dolgozatomat egy összefoglalással zárom, ahol levonom következtetéseimet, konklúziómat a kutatásom eredményeiből.

1. Az energiahatékonyság kérdései

1.1. Társadalmi és gazdasági viszonyok

Az emberi társadalom folyamatos fejlődése, a növekvő jólét egyre közelebb visz minket a különféle globális környezeti problémák sürgetőbb megoldásához. Ezek megoldásához általában olyan komplex tervekre van szükség, amelyek hosszú távú, fenntartható megoldást tudnak kínálni a jövőnk szempontjából. A fenntarthatóság nagyban függ a fogyasztás és a termelés arányától, valamint attól, hogy ez milyen teherrel jár a bolygónk számára.

A komplex tervek kialakításához részleteiben kell ismerni a problémát, fontos tehát a mikroszintű döntéseket összhangba hozni a makroszintű követelményekkel [1]. Sajnos gyakran előfordulnak olyan érdekellentétek, melyek a nagyobb értékteremtés kontra gazdaságosabb, környezetkímélőbb gyártás között húzódnak [2]. Sokszor egy-egy új technológia, beruházás túl magas ára riasztja el a vállalatot a befektetéstől, még ha az új berendezés környezetbarátabb működést is garantálhatna.

Egyes kutatások arra a következtetésre jutottak, hogy a legnagyobb piacvezető vállalatok éppen ezért inkább változtatják meg fokozatosan, lépésről lépésre termékeiket, ebből kifolyólag a merészebb innovációk az ezektől kisebb, kiugrásra váró, „másodsodrásban” lévő cégektől származhatnak majd [3].

Az említett fejlődés szempontjából egy ipari vállalat esetén gondolhatunk a termelékenység növelésére, az energiaszükséglet csökkentésére, továbbá ezek hatékonyságának javítására. Termelési szempontból ugyanis a termelékenység egy abszolút fogalom, a kibocsátások és a ráfordítások arányán alapul [4], míg a hatékonyság relatív, hiszen akár a termelékenység hatékonyságáról is beszélhetünk. Ha tehát egy folyamat hatékonyságán szeretnénk javítani, azt megtehetjük az előállított érték termelékenységének növelésével, a környezeti hatás intenzitásának csökkentésével vagy a termelékenység növelésével és az intenzitás csökkentésével egyszerre [5].

1.2. A hatékonyság jellemzői

A fenntartható fejlődéshez olyan komplex tervekre van szükség, amelyben az egyes folyamatok részleteiben hordozzák magukban ezt a szemléletet. Az egyes folyamatokat befolyásoló tényezők nevezhetők folyamatparamétereknek is, ezek olyan adatok, melyek alapjaiban határozzák meg egy folyamat végtermékének minőségét, hatékonyságát, illetve károsanyagkibocsátását.

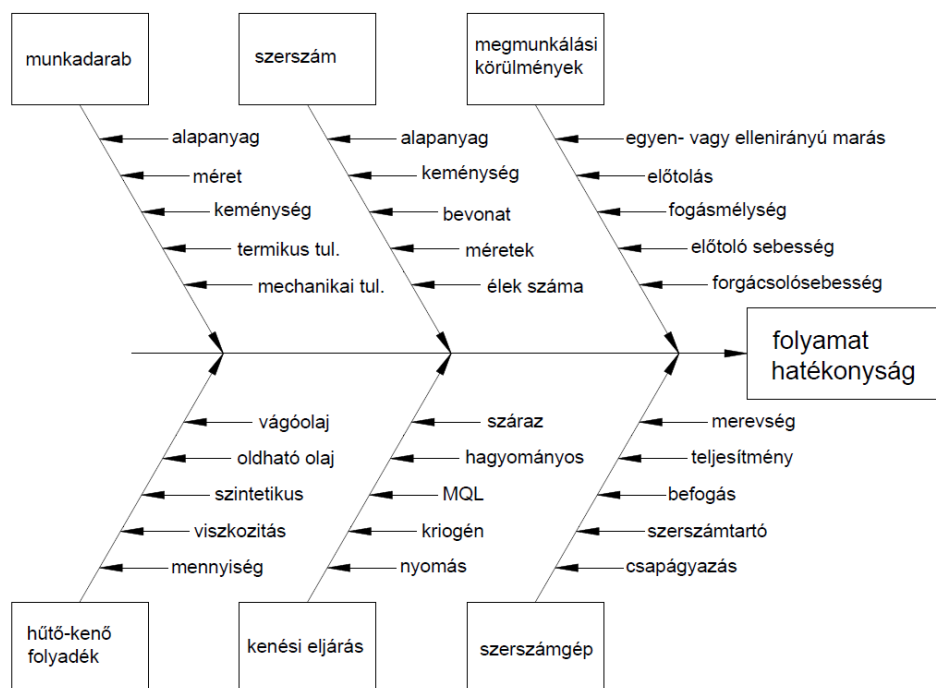
A legtöbb folyamat ugyanis dinamikus rendszer: a folyamatparaméterek változtatása különböző kimeneteket – és ezáltal környezeti hatásokat is – eredményez [6]. A cél tehát az, hogy a folyamatparamétereket egyenként, valamint egymásra gyakorolt hatásait is vizsgálva olyan kombinációk kerüljenek kialakításra, melyek a legmegfelelőbb kimeneti értékekkel rendelkeztek. Ehhez nagy segítséget tud nyújtani a faktoriális kísérlettervezés módszere.

A hatékonyság definíciójára eltérő meghatározásokat találunk a szakirodalomban, valamint az egyes cégek, vállalatok is másképp tekinthetnek egy terméket, folyamatot vagy szolgáltatást hatékonynak. Általánosan elmondható azonban, hogy a hatékonyság azt mutatja meg, hogy egységnyi ráfordítással mennyi érték, értéktöbbség állítható elő [7]. Így például a szabad versenyes kapitalizmus piaci harcának részvevői profit maximalizálásra törekednek, akkor működnek hatékonyan, ha a kezdetben befektetett értéket növelni képesek.

A gyártás hatékonysága – (1) jelű képlet – ezzel szemben már korlátok közé szorított, egyfajta hatásfokként fogható fel, amely egy 0 és 1 közé eső, dimenziótlan szám [8].

$$\text{gyártási hatékonyság} = \frac{\text{hasznos kimenet}}{\text{ráfordítások}} \quad (1)$$

Ennek oka a gyártás során felmerülő veszteségek, melyek miatt sosem érhető el 100%-os hatásfokkal történő gyártás; a gyártó cégek, vállalatok célkitűzése így az lehet, hogy minél inkább megközelítsék ezt az értéket. A gyártási folyamat hatékonyságát rengeteg paraméter befolyásolja, ezeket az 1. ábrán látható Ishikawa diagram szemlélteti. Az ábrán szereplő MQL rövidítés minimális mennyiségű kenést jelent (MQL: Minimum Quantity Lubrication).



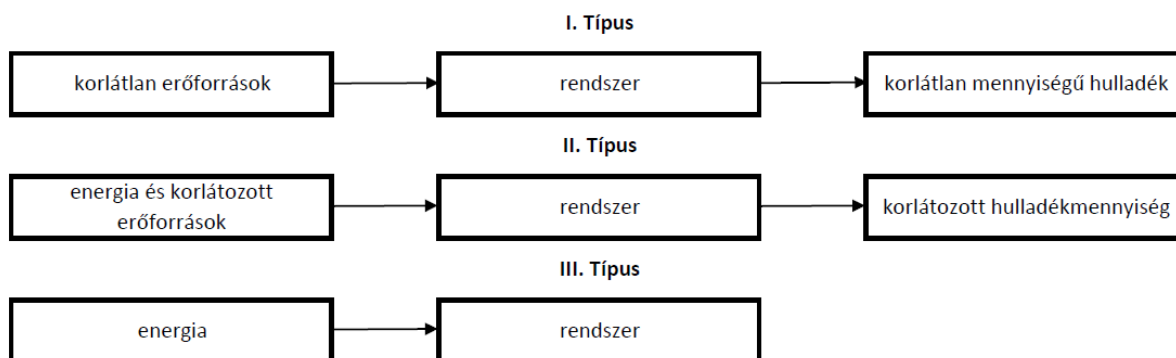
1. ábra. A folyamat paramétereinek hatása a folyamat hatékonyságára [9]

Az energiafogyasztás például az egyik legfontosabb ilyen paraméter, hiszen azon túl, hogy a gyártási költségek jelentős hányadát teszi ki, a környezetre is nagy hatást gyakorol, az elektromos energia felhasználása például melléktermékként különféle hulladékok és gázok keletkezését vonja maga után, melynek csökkentése, újra hasznosítása kiemelt jelentőséggel bír. Az energiahatékonyság maximalizálása tehát segítséget nyújthat az éghajlatváltozás, illetve az erőforrások kimerülése elleni harcban, valamint csökkenő energiaárakat eredményezhet [9].

1.3. A fenntartható fejlődésről

Az ún. *ipari ökológiát* a fenntarthatóság tudományának is nevezik, elsősorban a természeti és az ipari rendszerek összehangolására törekszik, amely a két rendszer teljesítményére és egymás közötti kapcsolataira vonatkozó széleskörű objektív információkon alapul [10]. Története visszanyúlik egészen a 20. század derekára, ugyanis már egy 1972-ben megjelent jelentés is a fenntarthatatlan keresletet és termelést, a környezetszennyezés világméretű növekedését, a természeti erőforrások kimerülését, széles körű alultápláltságot és a világ népességének növekedését irányozta elő [11]. 1987-ben a Gro Harlem Brundtland vezetésével működő bizottság jelentésében olyan fejlődésnek határozta meg a fenntartható fejlődést, amely kielégíti a jelen szükségleteit anélkül, hogy veszélyeztetné a jövő nemzedékek képességét saját szükségleteik kielégítésére [12]. 1989-ben aztán Schaltegger és Sturm ökohatékonysági megközelítésben vizsgálta a fenntartható fejlődést, melynek lényege az volt, hogy az áruk és szolgáltatások nagyobb értéket képviselnek, ha kevesebb hulladékot és környezetszennyezést okoznak [13]. Az ENSZ 1992-es ENSZ Rio de Janeiróban tartott Környezetvédelmi és Fejlesztési Konferenciájának eredményeként megszületett az Agenda 21 elnevezésű jelentés, melynek egyik bekezdése kimondta, hogy „a környezetminőség és a fenntartható fejlődés céljainak eléréséhez a termelés hatékonyságára és a fogyasztási szokások megváltoztatására lesz szükség, melyhez az erőforrás-felhasználás optimalizálása és a hulladék minimalizálása kell, hogy előtérbe kerüljön” [14].

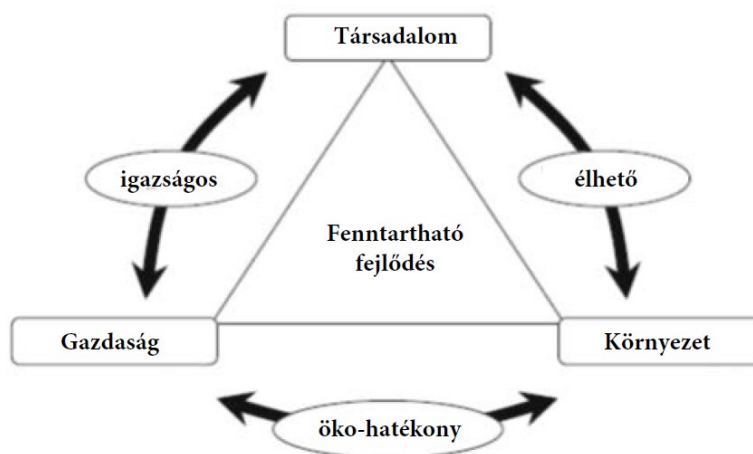
Az ipari ökológia tehát az az eszköz, mellyel az emberiség megközelítheti és fenntarthatja a fogyasztói igényeket a folyamatos gazdasági, kulturális és technológiai fejlődés mellett; miközben a koncepció megköveteli, hogy egy ipari rendszert ne a környező rendszerektől elszigetelten, hanem azokkal összhangban vegyünk számításba [10]. Lényegét három különböző rendszermodell bemutatásával lehet szemléltetni, ahogy az a 2. ábrán is látható.



2. ábra. Az ipari ökológia rendszertípusai [15]

Az I. típus egy lineáris rendszer, ahová korlátlan mennyiségben táplálnak erőforrásokat, melyek felhasználás után hulladékként megsemmisítésre kerülnek. A II. típusú rendszerben ezzel szemben belső körfolyamatok alakulnak ki, jelentős lesz az anyagok belső újra felhasználása, így a rendszerbe beáramló, illetve kikerülő anyag mennyisége korlátozható. A III. típusú rendszerben pedig megvalósul a teljes anyagszállás, ahová csak energiabevitelre van szükség [10].

Látható, hogy a fenntartható fejlődés korántsem nevezhető újdonsült felfogásnak, elérése azonban még napjainkban is nagyon távolinak tűnik. Ennek okai a három alappillérjében kereshető, melyek a 3. ábrán láthatók. A társadalom, a környezet, illetve a gazdaság összehangolása nem egyszerű, egyik-másik változása felbillentheti az egyensúlyt, mivel a fejlődés egyszerre akar élhető, igazságos és ökohatékony lenni.

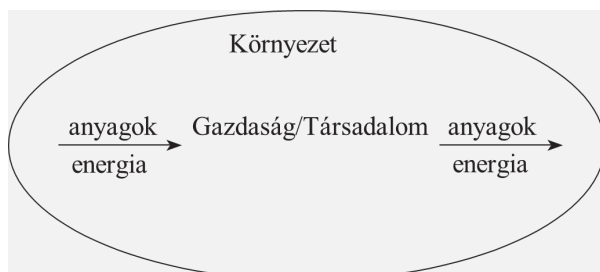


3. ábra. A fenntartható fejlődés három alappillére [16]

1.4. Az energiahatékonyság megvalósítása

Egy folyamat célja környezetvédelmi szempontból az energiahatékonyság növelése. Vagyis az, hogy adott mennyiségű energiával minél nagyobb mennyiségben és/vagy minél jobb minőségben lehessen gyártani.

Ahogy a 4. ábrán is látható, a gazdaság és a társadalom legfőbb motorja az anyag- és energiaforgalom, amely összeköttetésben van a környezettel. Minden rendszer jellemezhető energiahatékonyság szempontjából azáltal, hogy mennyi nyersanyagot igényel input-ként, valamint, hogy mennyi energiát igényel ahhoz, hogy a nyersanyagból javakat és szolgáltatásokat nyújtson output-ként [10].



4. ábra. Az anyag- és energiaáramlás [17]

A legújabb felfogások szerint az energiahatékonyság maximalizálásához a környezetre, mint innovációs lehetőségre kell tekinteni, nem pedig a vállalatot potenciálisan fenyegető veszélyre. Ennek lényege, hogy olyan módszereket alakítanak ki a tisztítási/hulladékkezelési normák során, melyek lehetővé teszik az innovációt és a költségcsökkentést [18].

A kérdés tehát az, hogy az energiafogyasztás csökkentése milyen hatással van a folyamat minőségére, veszélyezteti-e annak alapvető előírásait, valamint, hogy milyen kapcsolat van a folyamatparaméterek és a környezeti hatások között [19]. Mindezek figyelembevételével kompromisszumok köthetők, megtalálva azt a folyamatparaméter-kombinációt, mellyel a folyamat egységesen lesz megfelelő minőségű és energiahatékony is. Ez pedig már összefoglalóan ökohatékony folyamatnak is tekinthető.

1.5. Az üvegházhatású gázok

További problémaforrást jelent az energiafelhasználás szempontjából az üvegházhatású gázok (pl. a szén-dioxid, a metán, a dinitrogén-oxid vagy a klórozott-fluorozott szénhidrogének) kibocsátása, amely a környezet pusztítását vonja maga után, hozzájárulva a globális felmelegedéshez, a tengerszint emelkedéséhez. Az üvegházhatású gázok légkörre gyakorolt felmelegítő hatását a szén-dioxid egyenérték segítségével állapíthatjuk meg, amely a kibocsátott gáz tömegének és globális felmelegítő potenciáljának (GWP) szorzata [20]. Az utóbbi időben több kritika is érte az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére való törekvéseket – azok elhanyagolható gazdasági hatásai miatt –, a legújabb kutatások azonban arra mutatnak rá, hogy a kibocsátáscsökkentés összeegyeztethető a költségmegtakarítással környezetvédelmi innováció révén, továbbá, hogy a környezetvédelmi kötelezettségvállalás javíthatja az ipari üzem termelékenységét [21].

A gyártási folyamatok során elengedhetetlen tehát, hogy az olyan jellemzőket, mint például a szerszámgépek, szerszámbefogók, szerszámok, hűtő-kenő folyadékok, folyamatosan tanulmányozni kell, hiszen ezek jelentősen befolyásolhatják az elvégzett műveletek eredményeit minőségi, illetve energiafelhasználási szempontból is. Alapos elemzés szükséges tehát az anyageltávolítással járó megmunkálási folyamatok esetén, hiszen ezen eljárások nagyobb teljesítményt, nagyobb energiát igényelnek, amely magas szén-dioxid egyenérték-kibocsátást eredményez, különösen olyan anyagok esetén, melyek nagyobb forgácsolósebességet követelnek meg. A nagy teljesítmény továbbá nagy előtolási sebességet, valamint jelentős fogásmélységet is jelent, hiszen ezen paraméterek teszik lehetővé a minél termelékenyebb anyagleválasztást, minél rövidebb időintervallum alatt [21].

1.6. Az ökohatékonyság

Az ökohatékonyság célja a nem-fenntartható fejlődés hibáit felismerve elmozdulni egy fenntartható gazdaság irányába. Ahogy a hatékonyságra, úgy az ökohatékonyságra is többféle megfogalmazást találni a szakirodalomban. Elterjedése és bevezetése az Üzleti Világtanács a Fenntartható Fejlődésért (WBCSD: World Business Council for Sustainable Development) 1991-ben megjelent publikációjától számítható. A WBCSD szerint akkor érhető el ökohatékonyság, ha a javak és a szolgáltatások úgy képesek csökkenteni az erőforrások intenzitását – legalább a föld ökológiai kapacitásának szintjére –, hogy közben biztosítani tudják az emberi szükségleteket és az életminőséget. Ennek sarkalatos pontjai közt van az anyag- és energiaintenzitás csökkentés, a hulladék és emisszió csökkentés, a visszaforgatás növelés, a megújuló erőforrások használatának növelése, a termék élettartam növelés és a szolgáltatások arányának növelése. A Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet (OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development) megfogalmazásában az ökohatékonyság az a hatékonyság, amikor az emberi szükségleteknek megfelelő az erőforrás-felhasználás, melyet az in-, illetve outputok arányával definiálnak. Az Európai Környezeti Ügynökség látásmódja szerint pedig a „jobb életminőség, kevesebb természeti forrással” irány tekinthető ökohatékonny működésnek. A Roche cég pedig például az értékesítéshez kapcsolódó környezetvédelmi kiadások és az előidézett környezeti hatások hányadosaként értelmezi a fogalmat [7].

Általánosságban megállapítható, hogy a környezetvédelmi projektek esetében az ökohatékonyságot általában háromféleképpen állapíthatják meg. Az első esetben, mint a költségekkel szoros összefüggésben lévő gazdasági megközelítés a domináns, ebben a megközelítésben az az alapkérdés, hogy egy adott gazdasági erőforrás milyen feltételek mellett

képes hozni maximális hozamot. A második opció, amikor ökológiai hatékonyságként tekintünk rá, tisztán környezetvédelmi szempontból; ez tehát a kibocsátások, illetve az ökológiai hatások közötti arányt írja le a kibocsátás és az abból származó szolgáltatás között. Végül pedig, ezeket ötvözve, az ökohatékonyság tekinthető egyfajta kereszt-hatékonyságnak, amely összekapcsolja a környezeti és gazdasági kérdéseket, arra keresve a választ, hogy mennyi a megkeresett pénzegységre jutó környezeti terhelés [22].

A gyártás hatékonyságát és az ökohatékonyságot először Gutowski ötvözte, aki szerint az ökohatékonyság a hasznos kimenet, illetve valamilyen mértékegység hányadosaként definiálható. Utóbbi lehet akár egy környezeti hatás, vagy erőforrás-felhasználás is, így – ellentétben magával a hatékonysággal –, ez nem egy dimenziótlan arány. Ezt egy példával a (2) jelű képlet szemlélteti:

$$\text{ökohatékonyság} = \frac{1 \text{ kg alumínium}}{1 \text{ kg alumínium előállításához szükséges energia}} \quad (2)$$

Ez valójában az alumínium energaintenzitásának reciproka, amely kb. 100-200 MJ/kg. Ezért az ökohatékonyság gyakran valamilyen intenzitási mérőszám reciproka. A gyártástechnológia fejlődését tekintve megállapítható, hogy az ökológiai hatékonyság az idő előrehaladtával folyamatosan javult, tehát csökkentek a felhasznált erőforrások egységnyi termelésre vetítve [8]. Az elmúlt nagyjából száz év során a forgácsoló eljárások során eredő megmunkálási idő kb. a század részére csökkent, amely főképp a forgácsolószerszám-anyagok fejlesztésének volt köszönhető [23].

A probléma azonban abból fakad, hogy a gyártási technológiák terén éppen ellenkező mintázat figyelhető meg az elmúlt évtizedekben, hiszen e téren az alacsony költségű erőforrásokat egyre nagyobb kapacitású, teljesítményű, magasabb költségű erőforrásokkal helyettesítik, a már említésre kerülő piaci versenyben kiépítendő versenyelőny miatt. Az elmúlt évek stabil energia árai ráadásul kedveztek az automatizálásnak, az emberi munka helyett [8]. A mikro-, illetve nanoméretű eszközök előállítása tipikus példája a magas költségű csúcstechnológiának, amely természetesen nélkülözhetetlen a 21. század iparából. Egy tanulmány 20 különböző gyártási eljárást tekintett át – a hagyományos eljárásoktól kezdve (pl. forgácsolás, köszörülés, fröccsöntés, homokformába öntés), a fejlett megmunkálási eljárásokon át (pl. vízsugaras megmunkálás) a gyors prototípusgyártás és a nanotechnológia területéig –, melyben megállapításra került, hogy ezen folyamatok energaintenzitása közel nyolc nagyságrenddel nőtt az elmúlt évtizedekben [24]. A feldolgozott anyagegységre vetített energiafelhasználás az, amely drasztikusan megnövekedett.

Annak ellenére tehát, hogy a történelem során folyamatosan növekszik az ökohatékonyság, ez általában nem jár együtt erőforrás-megtakarítással, hiszen az esetek többségében a megtermelt mennyiség is fokozatosan növekszik. Az erőforrások csökkentéséhez így az ökohatékonyságnak meg kell haladnia a termelést, illetve a fogyasztást is, amely kormányzati beavatkozásokkal, illetve áremelkedéssel érhető el [8].

1.7. Energiahatékonyságból ökohatékonyságot

Egy folyamat ökohatékonysága egy látszólagos ellentmondást old fel megfelelő innovációk és szemléletmódok segítségével: „olyan fejlődésre törekszik, amely lehetővé teszi a jólét növekedését mindenki számára, miközben a természet használata csökken” [10].

Az ökohatékonyságra való törekvés okait az alábbi felsorolás foglalja össze [25, 26]:

- a vállalatok figyelmének felkeltése úgy, hogy az innovációra ösztönözze őket;
- a piaci kudarcok, a külső költségek, a közjavak biztosítása, az információs és alkalmazkodási hiányosságok leküzdése;
- ismereteket generálni a valószínűsíthető erőforrás-hatékonysági hiányosságokról és a lehetséges fejlesztési területekről;
- a környezetvédelmi fejlesztések iránti kereslet megteremtése és stabilizálása;
- a technológiai fejlődési pályák közötti átmeneti időszakokban a versenyfeltételek kiegyenlítése;
- a technológiai fejlődés új irányára vonatkozó valószínűség növelése;
- a szigorúbb intézkedések politikai funkcióinak fenntartása olyan esetekben, amikor a környezet állapota tovább romlik, vagy új negatív külső költségek merülnek fel.

Az ökohatékonny felfogás hatására a vállalatok újra gondolják a minőség kérdését is. Azáltal ugyanis, hogy az eddig melléktermékként elfogadott anyagokat visszaforgatják, újra hasznosítják a folyamatok során, felszabadítják az innováció és a minőségirányítás erejét – például a hulladékkezelés kérdésében –, így az átcsoportosított tudásalap magában a konkrét termelésben tud hasznosulni, mint termelési inputok cseréje vagy újra felhasználása, a folyamatok hozamának növelése, a gondos ellenőrzés és karbantartás, valamint a termék javítása a változás melléktermékeként [18].

Összefoglalva, az ökohatékonyságnak hét lényeges irányelvét különböztethetjük meg [27]:

- az áruk és szolgáltatások anyagintenzitásának csökkentése;
- az áruk és szolgáltatások intenzitásának csökkentése;
- csökkentsük a mérgező anyagok szétszóródását;

- az anyagok újrahasznosíthatóságának javítása;
- a megújuló erőforrások fenntartható felhasználásának maximalizálása;
- a termékek tartósságának meghosszabbítása;
- a termékek szolgáltatásintenzitásának növelése.

Ezen irányelvek mellett fontosak még fontosak az olyan közvetett elemek, mint az emberi szükségletek és az életmód minőségének új szemlélete, az ökoszisztémák kapacitási korlátainak elismerése, valamint a koncepció folyamatos fejlesztése, amely tükrözi annak dinamikus jellegét [18].

A gyártásból ismert nulla hiba koncepció környezetvédelmi megfelelője nem más, mint a veszélyes vagy potenciálisan veszélyes anyagok nulla kibocsátása egy létesítményből vagy termékből. Bár ez szinte lehetetlen, az ökohatékony szemléletmód a hulladék-kibocsátás minimalizálására törekszik [27]. A gyakorlat azt mutatja, hogy ezen irányelvek gyakran szinkronban vannak a fogyasztói igényekkel, hiszen a számítástechnika fejlődésével az elektronikai eszközök mérete csökkenő tendenciát mutat, miközben a digitális adathordozó eszközök (pendrive-ok, merevlemezek) terjedésével idővel kikopik a papír alapú dokumentáció.

A DIN EN ISO 14045 jelű szabvány foglalkozik az ökohatékonyság értékelésével, a benne található megközelítés alkalmazható egyes gazdasági értékek és a gyártási folyamatok, rendszerek környezeti hatásainak arányának vizsgálatára. Az értékelés öt fázisból áll [19,20]:

- (1) cél és alkalmazási kör meghatározása,
- (2) környezeti értékelés,
- (3) termékrendszer értékének értékelése,
- (4) az ökohatékonyság számszerűsítése és
- (5) értelmezés.

A cél és hatókör meghatározása (1) megfogalmazza az ökológiai hatékonyság értékelésének célját, a célközönséget és az eredmények tervezett felhasználását. A környezeti értékelés (2) a termékrendszer potenciális környezeti hatásának meghatározására szolgál. A termékrendszer értékbecslése (3) a termékrendszer teljes életciklusát figyelembe veszi, az odaítélt funkcionális, pénzbeli vagy egyéb értékek értékének vagy kívánatos voltának értékelésével. Az ökohatékonyság számszerűsítése során (4) a cél és a hatókör meghatározásával összhangban a környezeti értékelés és a termékrendszer értékének értékelése során kapott eredmények arányát határozzák meg [28, 29]. Az azonban, hogy végül a

környezetterhelés és a termékminőség arányát milyen nézőpont alapján értelmezik (5), különböző lehet.

1.8. Az ökotermelékenység és az ökointenzitás

Egyes kutatások az ökohatékonyságra ökotermelékenység néven hivatkoznak, mivel sok közgazdász a környezetet (beleértve a természeti erőforrásokat is) termelési tényezőnek tekinti, így megfogalmazásukban az ökotermelékenység nem más, mint az áruk és szolgáltatások egy egységnyi felhasznált környezetre jutó jóléti kibocsátása [30]. A mérnöki szemléletmódhoz ennek inverze, az ökointenzitás áll közelebb, ez pedig a természeti adottságok felhasználását jelenti egy egységnyi jóléti teljesítményre vetítve [10].

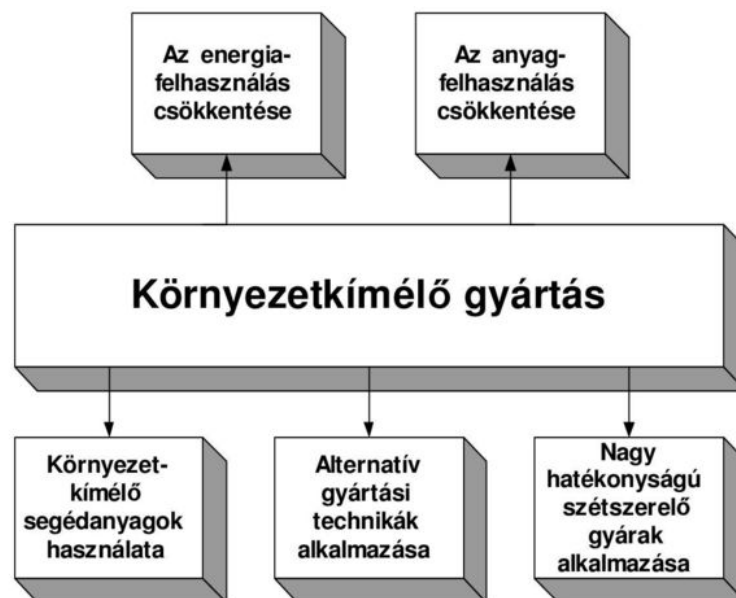
Nem igazak ebben az esetben a termodinamika alapvető fogalmai sem, hiszen a piaci viszonyokat az emberek szeszélyes preferenciái határozzák meg (pl. egy szakadt farmer értékesebb, mint egy makulátlan), amely így a keresleti függvényt és az árakat is megváltoztatja. Továbbá, mivel a vállalatok a teljesítményértékelésüket a környezetterhelési szempontokhoz kötik, ezért az ökotermelékenység mértékegységének érdemes a CO₂/kg, vagy az erőforrás/kg alakú mérőszámot választani [30].

2. A hűtő-kenő folyadékok

Ahogy az 1. ábrán látható volt, egy folyamat hatékonyságát rengeteg paraméter befolyásolja. Megállapítást nyert, hogy mind a hűtő-kenő folyadékok (HKF), mind a kenési eljárások egy-egy elkülönülő „fő” szálkáját képezik az Ishikawa diagramnak. A következőkben ezek jellemzőit vizsgálom meg részletesebben.

2.1. A környezetkímélő gyártás

Az 5. ábrán látható, mely intézkedések elengedhetetlenek ahhoz, hogy egy gyártási folyamat környezetkímélő lehessen. Ehhez egyrészt csökkenteni kell az anyag- és energiafelhasználást, továbbá olyan anyagokat, technikákat, módszereket – környezetkímélő segédanyagok, nagy hatékonyságú szétszerelő gyárok alkalmazása, alternatív gyártási technikák alkalmazása –, kell alkalmazni, melyek az életciklus- és költségelemzés szerint javítják egyik vagy másik paramétert: tehát vagy a befektetett költségeket csökkentik, vagy pedig az okozott környezeti hatásokat [31].



5. ábra. A környezetkímélő gyártás elemei [31]

Az 1950-es években teljes sugarú hűtéssel nagyjából 5...10 l/min hűtő-kenő folyadékot használtak, míg ez az érték árasztásos hűtés-kenéssel 100...250 l/min. A hűtési módok fejlődését tekintve megállapítható, hogy a folyadéksugaras hűtés minden tekintetben elmarad a modern, porlasztott formájú hűtéstől; hiszen míg előbbi esetén nemcsak, hogy nagyobb az elhasznált folyadék mennyiség, de a folyadék szét is szóródik. A porlasztás előnye ezzel szemben a csökkentett felhasznált mennyiség, a jobb hűtőhatás – a folyadékcseppek elpárolgása

miatt –, valamint a nagyobb kenőhatás, mivel a folyadékcseppek könnyen a szerszám kontaktfelületeibe hatolnak [32].

A szállítási és szivárgási veszteségek, az emisszió, a halogenizált tisztítószeres és mérgező káros anyagok, amelyek az előállítás, a szállítás és a használat, valamint a szokásos égetéses megsemmisítés során keletkeztek, állandóan növekvő mértékben veszélyeztetik a talajt, a vizet és a levegőt. A HKF-ok adalékanyagai között baktérium- és gombaölő szerek, képződő reakciótermékek szerepelnek, melyeket törvények, rendeletek korlátoznak. Ebben az esetben tehát a környezeti hatás jelenti a megoldandó feladatot [31].

2.2. A hűtő-kenő folyadékok jellemzői

A hűtő-kenő folyadékok használata elég sokrétű, fontos szerepet játszanak a kopás sebességének csökkentésében, ezáltal a szerszám munkaképességének növelésében, melynek hála csökkenthető a szerszámköltség, növelhető a termelékenység a kevesebb élezés, illetve szerszámcsere nélkül. Megkönnyíti a forgácseltávolítást, csökkenti a forgácsolási erőt és a forgácsolási teljesítményt, valamint a hődeformációkat a hűtés révén, miközben javítja a felületi minőséget, növeli a folyamat megbízhatóságát. Mindezek hatására növekszik a megmunkálási pontosság, miközben csökken a megmunkálási idő [32].

Ugyanakkor vannak elvárásaink is velük szemben, hiszen nem okozhatnak káros egészségügyi hatást, valamint korróziót a fémes alkatrészekben és a munkadarabon. Nem bomolhatnak fel alkotóelemeikre, hiszen ekkor használhatatlanná válnak, továbbá használatuk után megsemmisítésre van szükség, hogy ne kerüljön a környezetbe, szennyezve azt, igaz maga a megsemmisítés is energiafelhasználással jár [32].

Nevükből fakadóan a hűtő-kenő folyadékoknak két fő feladata van: hűteni és kenni. (A harmadik, szintén nem elhanyagolható feladata a forgács eltávolítása a munkatérből.) A kenőhatásnak hála csökkenti a súrlódási tényezőt a súrlódási- és karcos zónákban – tehát ott, ahol a szerszám homlok-, illetve kisebb mértékben hátfelülete súrlódásnak van kitéve. A hűtőhatás pedig a forgácsképződésnél keletkező hő elvezetéséért felel, mellyel csökken a forgácsolási hőmérséklet és a szerszámkopás sebessége, miközben nő a megmunkálási pontosság. Vannak víz bázisú folyadékok – vizes oldatok, emulziók –, melyek jó hűtőhatással, míg kevésbé jó kenőhatással rendelkeznek; míg az olaj bázisú folyadékok – növényi, állati, ásványi eredetű olajok – esetén ennek épp a fordítottja igaz. A legelterjedtebb HKF az emulzió, melynek különösen jó mind a hűtő-, mind a kenőhatása. Általában tejfehér színű, víz, olaj, valamint emulgátor keveréke, ahol az emulgátor valamilyen olyan szappan, amely az olajrészecskéket diszperz – egymástól független – állapotban tartja a vízben [32].

2.3 A hűtő-kenő eljárások

A korábban említett módszereken túl manapság jóval modernebb technológiákkal találkozni a forgácsolás hűtés-kenésére, a következőkben ezek kerülnek bemutatásra.

2.3.1. Minimális mennyiségű kenés (MQL)

Az MQL használata esetén három-négy nagyságrenddel csökkenthető az alkalmazott hűtő-kenő folyadék, értéke általában 5-50 ml/h, de maximum 10 l/h. Előnyeit az alábbi felsorolás foglalja össze [33]:

- a kenő hatású filmréteg kizárólag a főélen jelenik meg; ez a súrlódási tényező csökkenésével jár együtt, amely mérsékli a kopásintenzitást
- a kenőanyag mennyisége 60-90%-kal csökken; munkadarab és a forgács egyaránt száraz marad, ráadásul a munkadarab korróziója nem következik be, a dolgozó szem- és bőrirritációja megszűnik
- a munkadarab felületi kezelésének és zsírtalanításának költségei jelentősen csökkennek, a tárolással, kezeléssel és megsemmisítéssel (esetleg újra hasznosítással) kapcsolatos költségekkel egyetemben

Az MQL eljárás során általában a levegő felel a hűtésért, melynek az emulzióknál kisebb a hűtőteljesítménye, ennek kompenzálására kevernek kis mennyiségű olajat a hideg levegővel. A tiszta olaj sűrített levegővel való használata csökkenti a súrlódási együtthatót, miközben a forgácsolási hőmérsékletet a kívánt tartományon belül tartja [34].

A módszernek ugyanakkor vannak hátrányai is, mint például a magas költségek, a nagyobb zajszennyezés, mely befolyásolhatja a munkaegészségügyet is, így javasolt a környezetbarát olajok használata, melyek fluormentesek [34].

2.3.2. Nanofolyadékkal támogatott MQL

A minimális mennyiségű kenés kiegészíthető nanorészecskékkel is, melynek hatására javult az MQL hatékonysága, jobb eredmények tapasztalhatók a hagyományos MQL-hez képest [34]. Az olajba helyezett nano méretű részecskék megtapadnak az érintkező felületeken, melyek között elasztó-hidrodinamikus kenést biztosítanak [35]. Ilyen keveréket állít elő például az Aerosol-Booster, az általuk gyártott szuszpenzió kiterjedt távolságokra szállítható, miközben a szerszámokban lévő szűk csatorna fúvókaként működik. Amint a nano-MQL belép a csatornába, a nyomás esésével nagy sebességre gyorsul, majd levegő és olaj fázisra válik szét, egyenletes pernetsugárrá alakulva. Ez a permet a szerszám forgácsolóélén egyenletes kenőanyagfilmet képezve biztosítja a kenést [36].

2.3.3. Kriogén megmunkálás

A kriogén hűtési technika során kriogén gázokat – mint a nitrogén, hélium vagy a széndioxid – használnak extrém hűtési célokra. Mivel a légkör 78%-át nitrogéngáz alkotja, a nitrogén alkalmazása fenntartható módszer, hiszen a levegőbe párologva nem okoz szennyeződést, továbbá olyan olajmentes forgácsot eredményez, amely fémhulladékként könnyen újra hasznosítható. Az eljárás során a kenésért egy vékony folyékony gázpárna felel, amely a szerszám és a munkadarab között képződik [34].

A folyamat hátrányaként a munkadarab túlhűtése említendő meg, amely ridegedést, valamint nagyobb teljesítmény-szükségletet jelent. A túlhűtést a nyomás és az áramlási sebesség megfelelő beállításával lehet elkerülni. Csökken továbbá a forgácsolóerő is, hiszen a kriogén hűtés miatt csökken a súrlódási együttható a szerszám peremén. Ez kisebb forgácsolósebességeknél hatékony, azonban a sebességet növelve a kriogén nehéz behatolása miatt a hatékonyság csökkenése figyelhető meg. Ezen probléma elkerülésére javasolt hornyokat elhelyezni a forgácsolószerszámon [34].

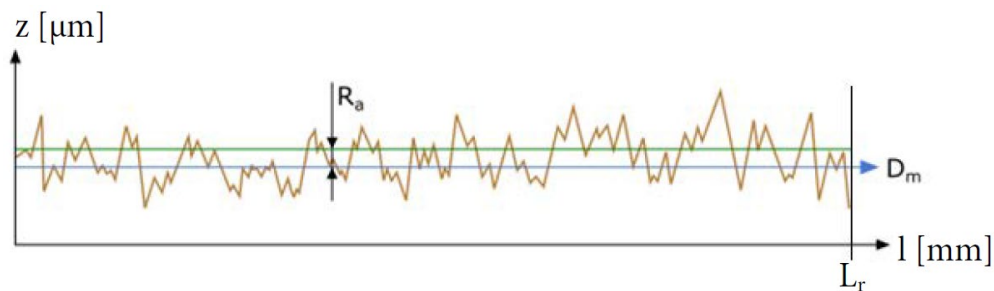
3. A 2D-s felületi érdesség mérőszámai

A felületminőség fogalma magába foglalja a megmunkált felület alakeltéréseit, érdességét, hullámosságát [37]. Ebben a fejezetben bemutatom az alkalmazott 2D-s felületérdességi mérőszámok definícióit, képleteit és jellegzetességeit, melyeket majd felhasználok az eredmények kiértékelése során.

3.1. Az átlagos érdesség

Az átlagos érdesség az egyik legáltalánosabban használt 2D-s felületérdességi mérőszám. Számításához egy meghatározott alaphosszon egyenlő távolságokban kell definiálni a kiemelkedések, illetve a bemélyedések alapvonalától mért távolságát, majd pedig az eredmények abszolútértékének számtani közepét kell kiszámolni. Középvonalnak tekinthető az a vonal, amely alatt és felett a kiemelkedések és bemélyedések területének összege egyenlő [37]. Az átlagos érdességet a 6. ábra szemlélteti, számítását pedig a (3) jelű képlet.

$$R_a = \frac{1}{L_r} \cdot \int_0^{L_r} |z(x)| dx \quad (3)$$

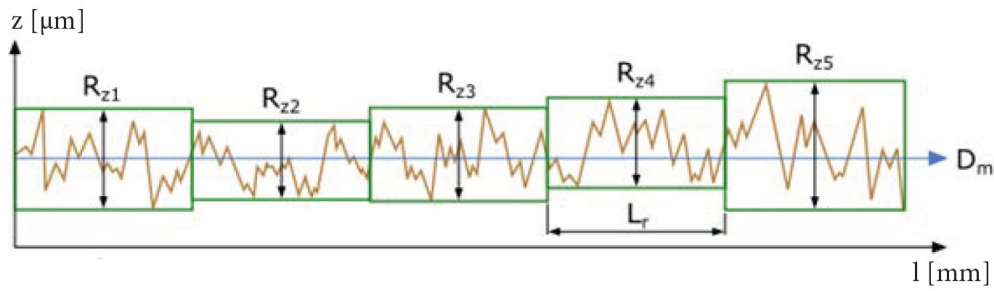


6. ábra. Az átlagos érdesség származtatása [38]

3.2. Az egyenetlenség-magasság

Az egyenetlenség-magasság meghatározása során a mintavételezési hosszónként vett 5-5 db legmagasabb csúcs és legmélyebb völgy közti magasságkülönbségek számtani átlagát kell venni [37]. Az egyenetlenség-magasságot az 7. ábra szemlélteti, számítását pedig a (4) jelű képlet.

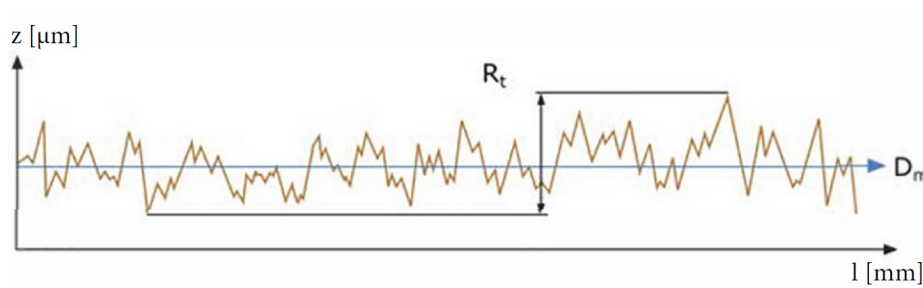
$$R_z = \frac{1}{5} \cdot (R_{z1} + R_{z2} + R_{z3} + R_{z4} + R_{z5}) \quad (4)$$



7. ábra. Az egyenetlenség-magasság származtatása [38]

3.3. A maximális egyenetlenség

A 8. ábrán látható maximális egyenetlenség származtatása a teljes mérési szakaszon található legmagasabb csúcs, valamint legmélyebb árok magasságkülönbségeként adódik [37].



8. ábra. A maximális egyenetlenség származtatása [38]

3.4. A négyzetes középérték

A négyzetes középérték a profileltérések négyzetes középértékeként számítható, a 6. ábra jelöléseit használva a (5) jelű képlet segítségével [37].

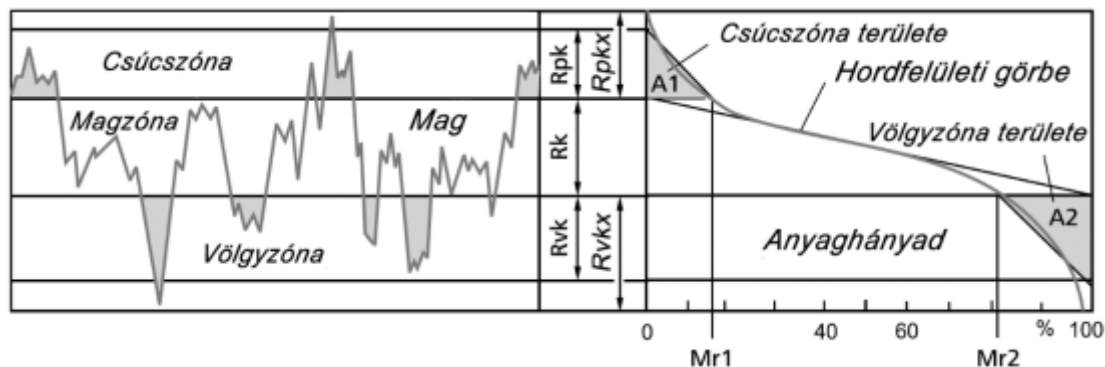
$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L_r} \cdot \int_0^{L_r} z^2(x) dx} \quad (5)$$

3.5. A hordfelületi görbe 2D-s jellemzői

A hordfelületi görbe (AFC – Abbott-Fireston Curve) jellemzőit az ISO 13565 szabvány tartalmazza, mely alapján felosztható a felületi görbe csúcs-, mag-, illetve völgyzónára [39]. Ennek megfelelően három felületérdességi jellemzőről beszélhetünk, melyek a felület anyagkitöltöttségéről adnak információt. Ezek az alábbiak:

- R_k : az érdességi profil magrészének mélysége
- R_{pk} : az érdességi profil csúcsrészének mélysége
- R_{vk} : az érdességi profil völgyrészének mélysége

Ahogy az a 9. ábrán is látható, az egyes paraméterek az anyaghányad görbe levetítései. A profil magrészének mélységét ott kapjuk, ahol a hordfelületi görbe meredeksége a legkisebb. Így alakul ki a tőle balra található csúcszóna, illetve a jobbra lévő völgyzóna, melyek meredeksége már jelentős.



9. ábra. Hordfelületi görbe paraméterei 2D-s esetben [39]

A kiugró értékekre való érzékenység miatt az R_{pk} és R_{vk} paraméterek már redukált értékeknek tekinthetők az R_{pkx} és R_{vqx} jellemzőkből. Az Mr_1 a csúcszóna, az Mr_2 pedig a völgyzóna kezdeti anyaghányad értékeit adják meg százalékosan. Előbbi kicsi, utóbbi nagy értéke a megmunkált felület ideális hordképességét jelenti [39]. Ezen jellemzők információt adnak a megmunkált alkatrészek későbbi teherbírásáról [40].

4. A 3D-s felületi érdesség mérőszámai

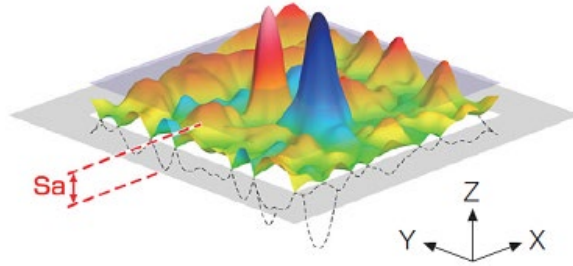
4.1. A 3D-s felületi érdesség mérésének fejlődése

A felületek 3D-s jellemzésének története az 1980-as évekig nyúlik vissza, amikor is Coventry Polytechnic-en K.J. Stout és csapata kifejlesztett egy hardverrendszert és egy azt támogató szoftvert, amely az első kereskedelmi forgalomba kerülő szoftvercsomag prototípusa lett azáltal, hogy a felületek vizualizációs technikáinak széles választékát biztosította. A technológia fejlődése nem ment zökkenőmentesen, a műszergyártók ugyanis azon a véleményen voltak, hogy a 3D-s topográfia csupán „tudományos kuriózum”, annak nincs helye az iparban [41]. A kezdeti szárnybontogatások után az újabb mérőföldkő 1990-ben következett, amikor is az Európai Közösség támogatásával megszületett egy több, mint 300 oldalas jelentés a Birminghami Egyetemen, amely 14 db 3D-s felületérdességi paramétert javasolt használatra, melyek a felület funkcionális, térbeli és amplitúdó tulajdonságait írták le. Az első tapintófejes gyártó a Somicronic volt, amely a paraméterek széles skáláját tette elérhetővé rendszerén. A „Birmingham 14” paramétereket aztán 1996-ban telepítették a Somicronic 3D-s felületvizsgáló készülékén, amely olyan szabványos fájlformátumot is tartalmazott, melyet más számítógépes rendszerekre is továbbítani lehetett [41]. Az európai kutatásokkal párhuzamosan az USA-ban is történtek előrehaladások, főképp az optikai interferometrikus rendszerek fejlesztése terén. A fő műszergyártók a WYKO, illetve a ZYGO cégek voltak, műszereik a kor lehetőségeihez képest rendkívül gyors 3D-s felületmérésre voltak képesek, olyan technikákat alkalmazva, mint a függőleges pásztázó interferometria vagy a kiterjesztett tartományú interferometria, miközben nanométer alatti felbontást is képesek voltak elérni. A kétezres évek elején pedig már a háromszögelési és konfokális technikát alkalmazó műszerek is kezdtek megjelenni, például a Scantron nevű cég gondozásában [41].

4.2. A felületi érdesség aritmetikai középértéke

A felületi érdesség aritmetikai középértéke háromdimenziósan bővíti az R_a profilparamétert. Az egyik legszélesebb körben használt 3D-s érdességi paraméter, mivel stabil eredményeket biztosít, melyeket nem befolyásolják a karcok, szennyeződések és a mérési zaj [42]. Számítását a (6) jelű képlet és a 10. ábra szemlélteti.

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x,y)| dx dy \quad (6)$$

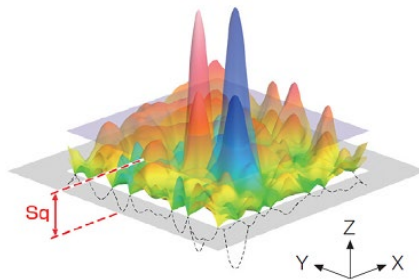


10. ábra. A felületi érdesség aritmetikai középértékének szemléltetése [42]

4.3. A felületi érdesség négyzetes középértéke

A felületi érdesség négyzetes középértéke háromdimenziósan bővíti az R_q profilparamétert. Szintén gyakran használt jellemző, mivel jó statisztikát generál és stabil eredményeket, miközben szintén nem befolyásolják a karcok, szennyeződések [42]. Számítását a (7) jelű képlet és a 11. ábra szemlélteti.

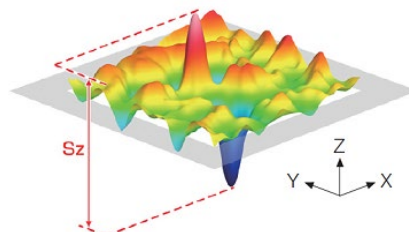
$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A |z^2(x, y)| dx dy} \quad (7)$$



11. ábra. A felületi érdesség négyzetes középértékének szemléltetése [42]

4.4. A felületi érdesség maximális értéke

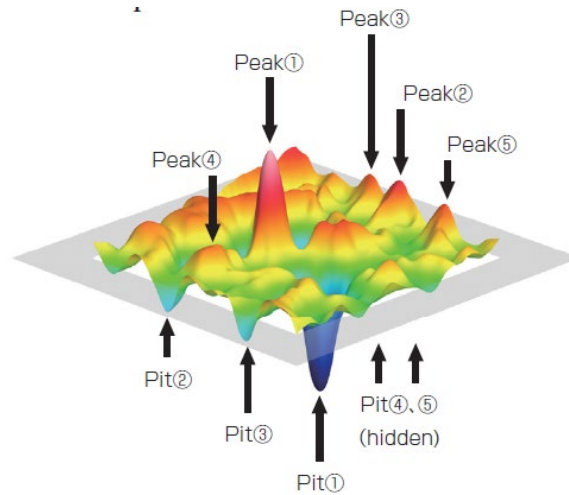
A felületi érdesség maximális értéke háromdimenziósan bővíti az R_z profilparamétert. Értéke a maximális csúcsmagasság, valamint a maximális völgymélység összegével egyezik meg. Használata már kevésbé jelentős, hiszen nagyságát befolyásolhatják a karcok, szennyeződések, melyeket ugyanakkor a kiértékelés során figyelembe lehet venni [42]. Az S_z maximális felületi érdességet a 12. ábra szemlélteti.



12. ábra. A felületi érdesség maximális értékének szemléltetése [42]

4.5. A tízpontmagasság

A tízpontmagasság (S_{10z}) a 2D-s egyenetlenség-magassághoz R_z hasonló jellemzőkkel bír. Nagyságának megállapításához az öt legnagyobb magassággal rendelkező csúcs átlagértékéhez kell hozzáadni az öt legnagyobb mélységgel rendelkező gödör átlagértékét [42]. A tízpontmagasságot a 13. ábra szemlélteti.



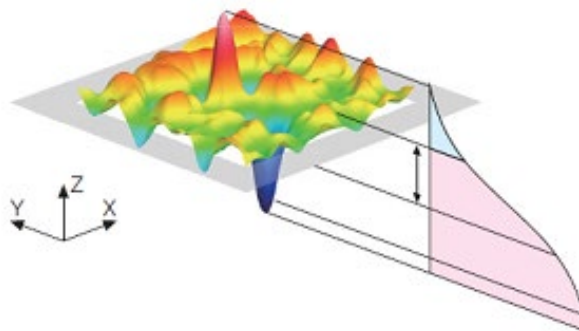
13. ábra. A tízpontmagasság szemléltetése [42]

4.6. A hordfelületi görbe 3D-s jellemzői

Az előző fejezetben ismertetett 2D-s hordfelületi görbe jellemzőit is lehet vizsgálni 3D-s esetben. Ezek az alábbiak:

- S_k : a felületi érdesség magzónájának magassága
- S_{pk} : a felületi érdesség csúcszónájának magassága
- S_{vk} : a felületi érdesség völgyzónájának magassága

A 2D-s esethez hasonlóan itt az S_{mr1} jellemző határozza meg a csúcszóna és a magzóna határát, míg az S_{mr2} százalékos anyaghányad a mag- és a völgyzóna között jelöl határt. Alkalmas a súrlódások, kopások vizsgálatára, például motorok hengerfelületeinek kenhetőségének értékelésére [42]. A 3D-s hordfelületi görbe paramétereit a 14. ábra szemlélteti.



14. ábra. Hordfelületi görbe paramétereit 3D-s esetben [42]

4.7. Az érdességi mérőszámok összevetése

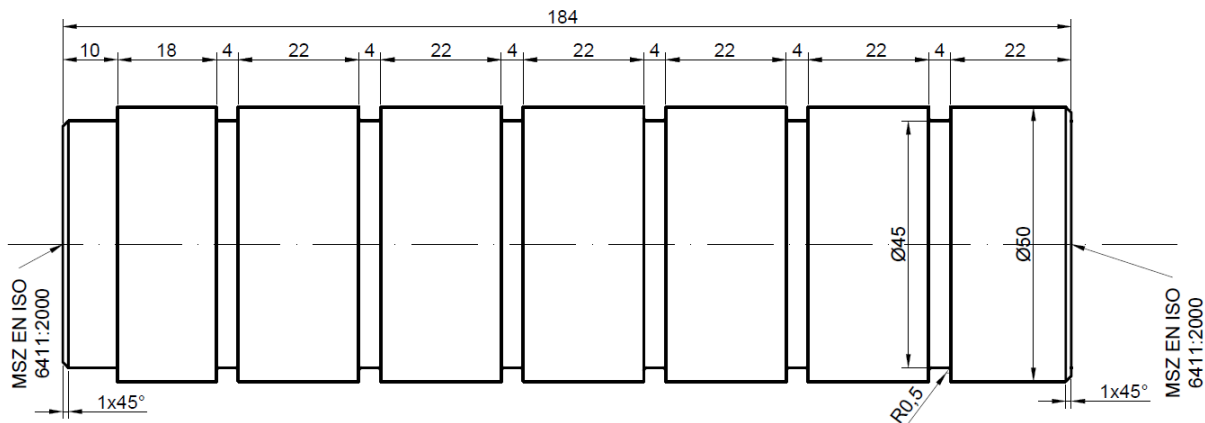
Az érdességi mérőszámok definícióit, képleteit összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy eltérő elvek és célokra használhatók fel az egyes paraméterek. Az átlagos érdesség (R_a) homogén szerkezetű anyagok megmunkálásakor általában jól jellemzi a 2D-s felület érdességi viszonyait. Ha változik az átlagos érdesség, akkor abból a gyártási folyamat megváltozására lehet következtetni, mint például a szerszámkopás vagy a rezgések megjelenése. Ez a mérőszám azonban nem tesz különbséget a profil csúcsai és völgyei között, hiszen mint látható volt, az eredmények abszolútértékével történt az átlagolás. Ez különösen a nagy szemcséket tartalmazó anyagok esetén lehet problémás, hiszen egy-egy nagyobb kiemelkedés vagy bemélyedés jelentős torzítást vihet a felület értékelésébe [43].

Mindez azt jelenti, hogy két, azonos átlagos érdességgel rendelkező felület között akár igen jelentős működés közbeni eltérések lehetnek. Ekkor érdemes más érdességi mérőszámokat is vizsgálni, hiszen az említett nagyobb bemélyedések és kiemelkedések vizsgálatára az egyenetlenség-magasság (R_z) tökéletesen funkcionál. Ha pedig még inkább ezekre a csúcsokra és árkokra vagyunk kíváncsiak, akkor a maximális egyenetlenség (R_t) is hasznos lehet. Ezen három paraméter tehát – R_a , R_z , R_t – sokkal többet tud mondani együttesen egy felület érdességi viszonyairól, mint külön-külön. Általánosságban elmondható tehát, hogy az egyenetlenség-magasság, valamint a maximális egyenetlenség közel azonos ($R_z \sim R_t$), utóbbi azonban érzékenyebb a kiugró profilpontokra. (Az R_z kevésbé, mert ott az átlagolás miatt lecsökkennek a kiugró értékváltozások.) Végezetül, a négyzetes középértéket (R_q) vizsgálva megállapítható, hogy ez a mérőszám is sokkal érzékenyebb az R_a -nál a felületen végbemenő kiemelkedésekre, bemélyedésekre, felerősíti azokat a négyzetre emelés miatt [43].

5. A felületek megmunkálása és érdességmérése

5.1. A próbadarab jellemzői

A kísérletek elvégzéséhez egy speciális, erre a célra tervezett tengely alakú alkatrész volt, melynek műszaki rajzát a 15. ábra szemlélteti. A darabon hat olyan hengeres felület lett kialakítva, ahol méréseket lehet végezni, gyártása pedig a Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézetének műhelyében található szerszámgépeken történt meg. Összesen négy darab készült el belőle.



15. ábra. A próbadarab műszaki rajza

A megmunkálások alapanyagául az 1.4307 jelölésű (további jelölések: X2CrNi18-9/304L/S30403) ausztenites szövetszerkezetű rozsdamentes króm-nikkel acélötvözet szolgált, amely jó korrózióálló tulajdonságai mellett a hidegalakítást, illetve a hegesztést is jól viseli. Előnyös szennyeződésgátló hatásfoka, az oxidációval szembeni ellenállóképessége, valamint könnyű tisztíthatósága miatt gyakran alkalmazzák élelmiszer feldolgozó berendezések (sörfőzés, tejfeldolgozás, borkészítés), konyhai felszerelések és készülékek és vegyipari berendezések (konténerek, hőcserélők, szappangyártás) gyártására. Kémiai összetételét az 1. táblázat foglalja össze [44].

1. Táblázat. Kémiai összetétele (20 °C-on) – DIN 10088-1:2005 [44]

Elem	Fe	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni
%	66,8-71,3	≤0,03	1	2	0,045	0,015	≤0,11	17,5-19,5	8-10,5

A mechanikai tulajdonságaira térve, folyáshatára $R_{p0,2} \geq 210 \text{ MPa}$; szakítószilárdsága $R_m = 520 - 700 \text{ MPa}$, míg szakadási nyúlása $A \geq 45\%$. A sűrűsége $\rho = 7,9 \text{ kg/dm}^3$, keménysége pedig $160 - 190 \text{ HB}$.

5.2. Az esztergálás jellemzői

A megmunkálás a darabok méretre fűrészelésével kezdődött, majd az alkatrész bal oldalán található központfurat és a befogásra alkalmas átmérő kialakításával folytatódott EU-400-01 típusjelű esztergagépen. Ezt követte a hosszesztergálás $d = \varnothing 50$ mm-en, majd pedig a beszúrások a darab jobb végétől kezdődően 22 milliméterenként.

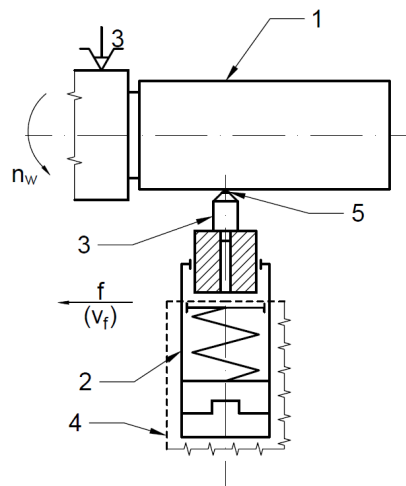
A mérendő felületek kialakításához az esztergagép technológiai paraméterei az alábbiak szerint lettek beállítva:

- forgácsolósebesség: $v_c = 1,3875 \left[\frac{m}{s} \right]$ (fordulatszám: $n = 530 \frac{1}{min}$)
- előtolás: $f = 0,05 \frac{mm}{ford}$

Összességében így 24 db (4 próbadarabon, próbadarabonként 6-6 felületen), ugyanolyan körülmények között esztergált felület került kialakításra.

5.3. A gyémántvasalás jellemzői

A gyémántvasalás ugyanezen EU-400-01 típusjelű esztergagépbe befogott vasalószerszámmal történt. A vasalószerszám feje egyszemcsés gyémánt volt, a megmunkálás körülményeit sematikusán a 16. ábra szemlélteti. Az ábrán 1-es a munkadarab, 2-es a vasalószerszám, 3-as a vasalóbetét, 4-es szerszámbefogó, 5-ös pedig a gyémántcsúcs jelölése.



16. ábra. A gyémántvasalás sematikus ábrája

A felületek vasalása során a felületi érdesség csökkenését és a felületi réteg szilárdítását a megmunkálandó anyagnál jóval nagyobb keménységű gyémántszerszám és a munkadarab felülete közötti csúszási súrlódás eredményezi [45].

A gyémántvasalás technológiai adatai minden felület esetén különbözőek voltak, melyek a fordulatszám, az előtolás és a vasalószerszám által kifejtett erő kombinációiból alakultak ki. Ezen kombinációkat a 2. táblázatban foglaltam össze. A felületek eljelölését a próbadarabok

segítségével hatosával csoportosítottam. A táblázat kiegészült továbbá két számított értékkel, a vasalási sebességgel – (8) jelű képlet –, valamint a megmunkálás teljesítményével – (9) jelű képlet.

$$v_v = d \cdot \pi \cdot n \left[\frac{m}{s} \right] \quad (8) \quad P = F \cdot v_v [W] \quad (9)$$

2. Táblázat. A gyémántvasalás technológiai adatai

Sorszám	$f \left[\frac{mm}{ford} \right]$	$n \left[\frac{1}{min} \right]$	$v_v \left[\frac{m}{s} \right]$	$F (N)$	$P (W)$
1-1	0,05	265	0,6938	120	83,25
1-2	0,05	265	0,6938	100	69,38
1-3	0,05	265	0,6938	80	55,50
1-4	0,05	265	0,6938	60	41,63
1-5	0,05	265	0,6938	40	27,75
1-6	0,05	265	0,6938	20	13,88
2-1	0,1	265	0,6938	120	83,25
2-2	0,1	265	0,6938	100	69,38
2-3	0,1	265	0,6938	80	55,50
2-4	0,1	265	0,6938	60	41,63
2-5	0,1	265	0,6938	40	27,75
2-6	0,1	265	0,6938	20	13,88
3-1	0,05	375	0,9817	120	117,81
3-2	0,05	375	0,9817	100	98,17
3-3	0,05	375	0,9817	80	78,54
3-4	0,05	375	0,9817	60	58,90
3-5	0,05	375	0,9817	40	39,27
3-6	0,05	375	0,9817	20	19,63
4-1	0,1	375	0,9817	120	117,81
4-2	0,1	375	0,9817	100	98,17
4-3	0,1	375	0,9817	80	78,54
4-4	0,1	375	0,9817	60	58,90
4-5	0,1	375	0,9817	40	39,27
4-6	0,1	375	0,9817	20	19,63

5.4. A felületi érdesség mérése

A felületi érdesség mérőszámainak mérése AltiSurf 520 jelölésű érdességmérő berendezéssel történt, amely a Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézetének folyosóján található. A mérőgép három, egymásra merőleges x-y-z motorizált egyenáramú tengelyek mentén képes mozogni, tengelyenként 200 mm-en. Maximális sebessége nagyjából 40 mm/sec, akár 0,1 μm -es léptékben [46].

A felületi topográfia részletes elemzését a mérőgéphez tartozó AltiMap szoftver segítségével végeztem el. A gép több érzékelője közül az érintésmentes interferometrikus háromszögelt lézert alkalmaztam. Az általa készített jegyzőkönyvek nagy száma miatt mindet nem lenne célszerű bemutatni, azonban a mellékletek között megtalálható 1-1 példány a szemléltetés kedvéért [1-2. melléklet].

5.5. A Kraljic-mátrixok

A Kraljic-mátrix Peter Kraljic nevéhez kötődik, aki 1983-as cikkében [47] alapjaiban hozott újdonságokat a beszerzési piacon. Ötletét azóta a tudomány és az ipar számos területén alkalmazták, az adott feladat paramétereire átültetve a gondolat lényegét.

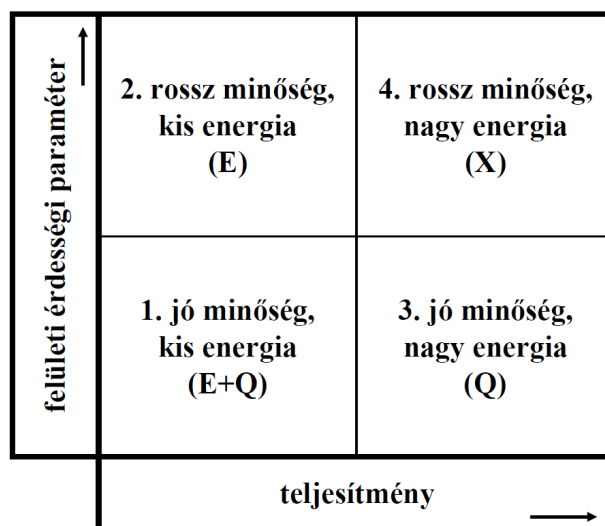
A mátrix függőleges tengelyén a beszerzendő javak komplexitása található, amit jellemez a piac monopol vagy akár versengő volta, a technológia jellege, a piacra lépési korlátok, a logisztika költségei vagy annak komplexitása. A vízszintes tengelyen pedig a beszerzendő javak fontossága szerepel a vállalat számára, ami értelmezhető a termék hozzáadott értéke, a teljes költségen belüli aránya, bonyolultsága vagy a profithatása szempontjából [47]. A beszerzési mátrix egyes kategóriáit a 17. ábra szemlélteti.



17. ábra. Az eredeti Kraljic mátrix [47]

A rutin termékek esetén mind a beszerzendő javak fontossága, mind a komplexitása alacsony szintű, így ezen beszerzések célja a folyamatok hatékonyságának biztosítása, informatikai támogatás, tehát ezek nélkülözhetetlenek a folyamat működését illetően. A stratégiai termékek esetén ezzel szemben mind a beszerzendő javak fontossága, mind a komplexitása magas szintű, így ezek kockázat kezelése kulcsfontosságú, gyakori megoldás a partnerkapcsolat kialakítása a beszállítóval. Jellemző a beszállító fejlesztés, a kereslettervezés, melyek a piaci verseny során döntést tudnak hozni két cég versengésében. A szűk keresztmetszetű termékek esetén a beszerzendő javak fontossága alacsony, míg a komplexitása magas szintű. Ezek kis értékű, de nagy kockázattal járó termékek, melyek kevésbé lényegesek a folyamat sikeressége szempontjából. A befolyásolható termékek esetén a beszerzendő javak fontossága magas, míg a komplexitása alacsony szintű. Ezek rendkívül fontos, jól specifikálható, egyszerű termékek, sok beszállítóval, általában a leggyakoribb eszköz a versenyeztetésre [47].

Az általam alkalmazott mátrix esetén is egy Descartes-féle koordináta-rendszerben kell felvenni pontokat, mégpedig úgy, hogy a függőleges tengelyen a megmunkálás energiaigénye, a vízszintes pedig az egyes felületérdességi mérőszámok kapnak helyet. A leendő értékeket mindkét irányban megfeleztve négy részre osztható a mátrix, ahogyan azt már korábbi munkám [43] során is használtam. Ez látható a 18. ábrán.



18. ábra. A felületérdességre vonatkoztatott Kraljic mátrix [43]

Látható, hogy a bal alsó zóna a célkitűzés, hiszen itt mind a minőség (Q), mind az energiafelhasználás (E) megfelelő; míg a jobb felső zóna kerülendő a rossz felületminőség és nagy energiaigény miatt. Megfontolandó a Kraljic-mátrix 3x3-as felosztása is, ekkor ugyanis

még inkább kiszűrhetőek a leginkább ajánlott és kerülendő kombinációk. Ehhez az értékek két irányban vett harmadolására van szükség.

Az is fontos szempont, hogy a gyémántvasalás milyen mértékben javított az esztergált felületen. Ennek megállapításához javulási tényezőket kell számítanom, melyek aztán szintén elhelyezhetők egy Kraljic-mátrixban, a teljesítmény függvényében. Ekkor változik a mátrix celláinak megítélése, ahogy az a 19. ábrán is látható. Az ábrán szereplő „I” az „improvement” angol eredetű szó rövidítése, amely „javulást” jelent. A későbbi fejezetekben is alkalmazni fogom ezt a rövidítést a javulási tényezők megkülönböztetésére.

javulási tényező ↑	1. nagy javulás, kis energia (I+E)	3. nagy javulás, nagy energia (I)
	2. kis javulás, kis energia (E)	4. kis javulás, nagy energia (X)
	teljesítmény →	

19. ábra. A javulási tényezőre vonatkoztatott Kraljic mátrix

Ahogy az ábra mutatja, a bal felső zóna vált célkitűzéssé, hiszen a kis energiaigény (E) mellett itt találni a legnagyobb javulási tényezőket (I). A 2. és 3. cellák itt is átmeneti zónák, előbbi esetén a javulási tényező, utóbbinál pedig az energiafelhasználás nem megfelelő; míg a 4. szektorban egyik paraméter sem ideális.

6. A kísérleti eredmények ismertetése

6.1. Az esztergált felület érdességmérésének eredményei

A kísérletek során az esztergált és a gyémántvasalt felületek érdességét hasonlítom össze, figyelembe véve az egyes megmunkálások teljesítmény-igényét. Ehhez először is az esztergálások után mért felületérdesség értékeket foglalom össze a 3. és a 4. táblázatban. Előbbiben a 2D-s, utóbbiban a 3D-s felületérdességi mérőszámokkal. Az értékek $[\mu\text{m}]$ mértékegységben kerülnek megadásra. Minden felületszelvény 3 ponton került mérésre, a táblázatok már ezen három érték átlagát tartalmazzák.

3. Táblázat. A 2D-s felületérdességi eredmények esztergált felület esetén

Sorszám	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_q [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	$R_t [\mu\text{m}]$	$R_k [\mu\text{m}]$	$R_{pk} [\mu\text{m}]$	$R_{vk} [\mu\text{m}]$
1-1	0,6555	0,8127	3,9356	5,5208	2,1046	0,9355	0,6420
1-2	0,4742	0,5934	2,9194	3,5890	1,4986	0,6592	0,5286
1-3	0,4394	0,5375	2,5227	3,1892	1,4231	0,5460	0,4237
1-4	0,4800	0,5876	2,8559	3,8789	1,5009	0,6088	0,6137
1-5	0,5995	0,7250	3,2508	3,8453	2,0058	0,5771	0,5446
1-6	0,6117	0,7543	3,5438	4,3123	1,9469	0,7777	0,7013
2-1	1,1651	1,4261	6,3576	7,2268	3,4394	1,3247	0,9834
2-2	1,0613	1,2877	5,5586	6,6256	3,2718	1,1155	0,7182
2-3	1,0489	1,2675	5,4421	6,2716	2,9193	1,2359	0,9382
2-4	0,9312	1,1607	5,4445	6,1983	2,5955	1,2793	1,0536
2-5	0,6686	0,8620	4,3666	5,2065	1,9577	0,9869	1,0254
2-6	0,6368	0,7941	3,9027	4,7670	2,0586	0,7516	0,8184
3-1	0,4378	0,5489	2,7247	3,3998	1,3746	0,6389	0,5168
3-2	0,4975	0,6339	3,3424	4,1871	1,5301	0,7952	0,6042
3-3	0,4530	0,5704	2,8413	3,1831	1,3914	0,6697	0,5529
3-4	0,4303	0,5438	2,6502	3,6439	1,3443	0,6722	0,4380
3-5	0,4534	0,5725	2,7735	3,8057	1,3518	0,7159	0,6307
3-6	0,5613	0,7409	3,6012	5,7649	1,4462	1,3751	0,9360
4-1	0,9195	1,0868	4,4301	5,2614	2,9300	0,5927	0,8114
4-2	0,8739	1,0347	4,1377	4,7029	2,7037	0,2976	0,9094
4-3	0,8346	0,9863	4,0095	4,5198	2,6736	0,3451	0,8264
4-4	0,8612	1,0278	4,2195	4,7548	2,6916	0,6169	0,8863
4-5	0,8684	1,0192	4,1175	4,7609	2,8770	0,4588	0,7616
4-6	0,9452	1,1615	5,1076	5,9694	3,0854	0,9768	0,9691

4. Táblázat. A 3D-s felületérdességi eredmények esztergált felület esetén

Sorszám	$S_a[\mu\text{m}]$	$S_q[\mu\text{m}]$	$S_z[\mu\text{m}]$	$S_{10z}[\mu\text{m}]$	$S_k[\mu\text{m}]$	$S_{pk}[\mu\text{m}]$	$S_{vk}[\mu\text{m}]$
1-1	0,7087	0,9481	7,4002	4,5901	2,0059	1,2221	1,1289
1-2	0,5073	0,6344	4,5697	3,1895	1,5880	0,6686	0,4649
1-3	0,4704	0,5836	4,6805	3,0639	1,4449	0,5500	0,3615
1-4	0,4929	0,6211	5,2362	3,9943	1,4552	0,6910	0,4167
1-5	0,6457	0,7916	5,2287	3,5957	1,9636	0,6103	0,5352
1-6	0,6558	0,8202	5,7232	3,7356	2,0137	0,8299	0,5772
2-1	1,1962	1,4695	10,2233	6,2509	3,5209	1,2901	1,0627
2-2	1,1215	1,3570	8,5374	5,5952	3,4790	1,0842	0,8243
2-3	1,0976	1,3414	10,0611	5,8599	2,7433	1,4007	0,9896
2-4	0,9546	1,1941	7,5710	4,2946	2,5770	1,2778	0,9975
2-5	0,7191	0,9350	6,7610	3,2199	1,9595	1,1129	1,0183
2-6	0,7099	0,9139	7,6108	5,3666	2,1397	0,8546	0,9758
3-1	0,4688	0,5892	4,9489	3,4064	1,4007	0,6501	0,4331
3-2	0,5067	0,6346	5,5182	4,4192	1,5449	0,5498	0,5354
3-3	0,4745	0,5976	4,4675	3,2350	1,4501	0,6462	0,4710
3-4	0,4397	0,5552	4,3636	3,0035	1,3295	0,6039	0,4420
3-5	0,4825	0,6124	4,7596	2,9773	1,4700	0,6332	0,5933
3-6	0,5230	0,6617	5,0790	3,6488	1,6043	0,6353	0,5838
4-1	0,9819	1,2030	7,3160	4,1697	2,9780	0,9940	1,1120
4-2	0,8867	1,0500	5,8392	3,6036	2,8166	0,3292	0,7635
4-3	0,8432	1,0025	5,4743	3,3625	2,6073	0,2846	0,8270
4-4	0,8670	1,0451	6,2153	4,0342	2,6690	0,5712	0,7621
4-5	0,9927	1,2176	7,2823	4,1224	3,1806	0,9703	1,0269
4-6	1,0341	1,2945	8,1115	4,0193	3,3451	1,1456	1,3832

Ezen adatokról önmagukban egyelőre sok minden nem mondható, azt azonban érdemes összevetni, hogy két, illetve három dimenziós mérőszám-párok hogyan viszonyulnak egymáshoz. Hogy erről egy átfogó képet kapjak, átlagoltam a 24 felületre vett értékeket mindkét esetben, melyeket az 5. táblázatban foglaltam össze.

Páronként vizsgálva az értékeket megállapítható, hogy ha ugyan minimálisan is, de vannak eltérések az eredmények tekintetében, amely arra enged következtetni, hogy ajánlott a 3D-s mérések alkalmazása is.

5. Táblázat. Az átlagolt felületérdességek esztergált felület esetén

R_a [μm]	0,7045	S_a [μm]	0,7409
R_q [μm]	0,8640	S_q [μm]	0,9197
R_z [μm]	3,9190	S_{10z} [μm]	4,0316
R_t [μm]	4,7744	S_z [μm]	6,3741
R_k [μm]	2,1718	S_k [μm]	2,2203
R_{pk} [μm]	0,7897	S_{pk} [μm]	0,8169
R_{vk} [μm]	0,7431	S_{vk} [μm]	0,7619

6.2. A gyémántvasalt felület érdességmérésének kiértékelése

Az esztergált felületek mérését követően joggal reménykedtem abban, hogy a gyémántvasalt felületek mérése során kisebb értékeket kapok, ez pedig így is lett. Elsősorban ezen értékeket foglalom össze a 6. és a 7. táblázatban, feltüntetve az egyes megmunkálások teljesítmény-igényét is.

6. Táblázat. A 2D-s felületérdességi eredmények gyémántvasalt felület esetén

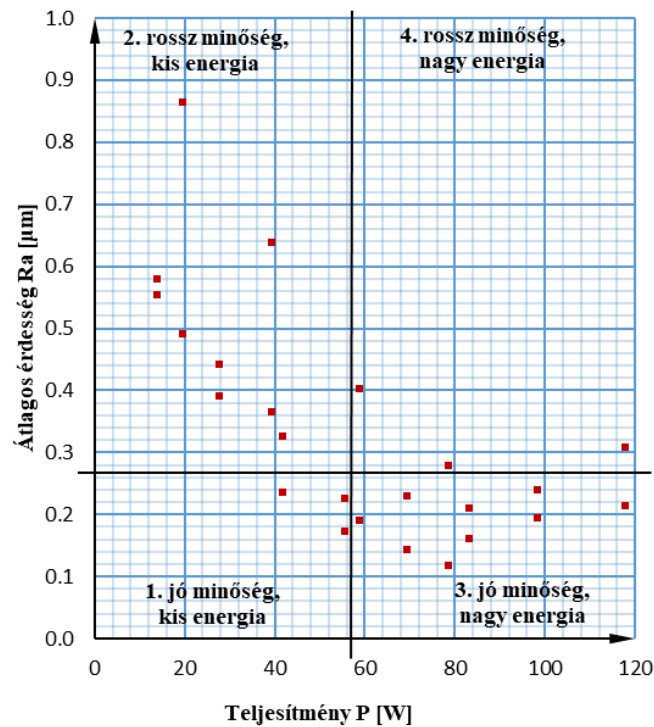
Sorszám	P (W)	R_a [μm]	R_q [μm]	R_z [μm]	R_t [μm]	R_k [μm]	R_{pk} [μm]	R_{vk} [μm]
1-1	83,25	0,1613	0,2047	1,0840	1,4252	0,5069	0,2023	0,2148
1-2	69,38	0,1425	0,1856	1,0071	1,3855	0,4087	0,2430	0,1857
1-3	55,50	0,1729	0,2254	1,1969	1,6449	0,4516	0,1597	0,3953
1-4	41,63	0,2365	0,3036	1,5809	1,9624	0,5918	0,2392	0,5601
1-5	27,75	0,3907	0,4828	2,2278	2,6826	1,1913	0,2853	0,6321
1-6	13,88	0,5536	0,6534	2,6881	3,3997	1,8982	0,3871	0,4608
2-1	83,25	0,2097	0,2715	1,4667	1,9745	0,6013	0,3417	0,3040
2-2	69,38	0,2297	0,3151	1,7310	2,3835	0,5975	0,2481	0,6299
2-3	55,50	0,2269	0,3225	2,1284	2,7650	0,5275	0,2951	0,6434
2-4	41,63	0,3263	0,4285	2,2742	2,6612	0,8054	0,2462	0,8208
2-5	27,75	0,4412	0,5620	2,7027	3,1647	1,1289	0,3781	0,9494
2-6	13,88	0,5796	0,6990	3,0775	3,7813	1,9508	0,4861	0,5563
3-1	117,81	0,2148	0,2614	1,2592	1,7121	0,7084	0,2507	0,2560
3-2	98,17	0,1955	0,2705	1,5149	2,8504	0,4850	0,5234	0,3274
3-3	78,54	0,1180	0,1545	0,8771	1,3001	0,3330	0,1926	0,2080
3-4	58,90	0,1910	0,2507	1,3331	1,5717	0,5305	0,1997	0,4332
3-5	39,27	0,3655	0,4710	2,4158	3,5188	1,0136	0,4980	0,6717
3-6	19,63	0,4915	0,6050	2,7448	3,3662	1,5629	0,5459	0,6075

Sorszám	$P (W)$	$R_a [\mu m]$	$R_q [\mu m]$	$R_z [\mu m]$	$R_t [\mu m]$	$R_k [\mu m]$	$R_{pk} [\mu m]$	$R_{vk} [\mu m]$
4-1	117,81	0,3081	0,3865	1,9648	2,6216	0,9515	0,4880	0,3495
4-2	98,17	0,2404	0,3206	1,9111	2,6246	0,7022	0,2702	0,5835
4-3	78,54	0,2800	0,3960	2,1619	2,6795	0,6340	0,2420	0,9645
4-4	58,90	0,4026	0,5435	2,6319	3,3265	0,8462	0,2623	1,2845
4-5	39,27	0,6382	0,7685	3,2258	3,7691	1,6857	0,3666	1,0391
4-6	19,63	0,8648	1,0369	4,3843	5,0996	2,8499	0,3890	1,0936

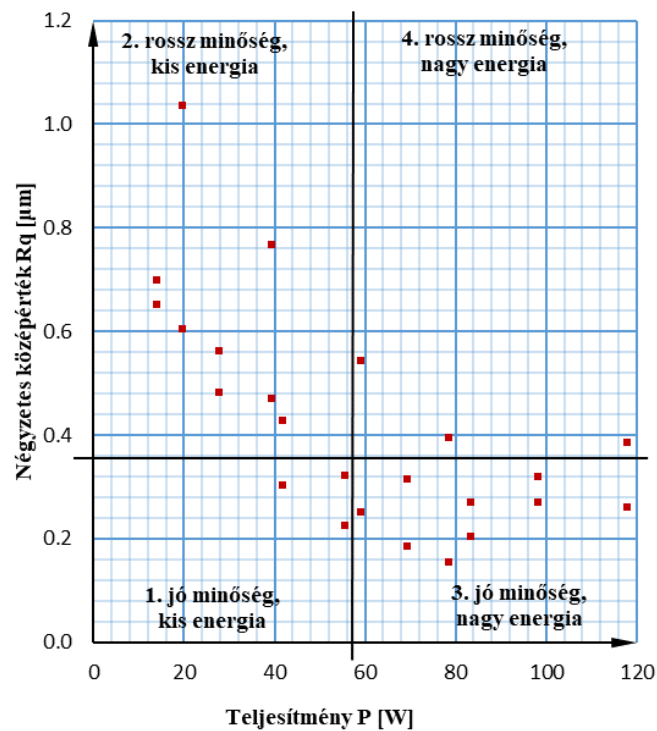
7. Táblázat. A 3D-s felületérdességi eredmények gyémántvasalt felület esetén

Sorszám	$P (W)$	$S_a [\mu m]$	$S_q [\mu m]$	$S_z [\mu m]$	$S_{10z} [\mu m]$	$S_k [\mu m]$	$S_{pk} [\mu m]$	$S_{vk} [\mu m]$
1-1	83,25	0,1918	0,2465	2,5665	1,7513	0,5350	0,2237	0,2639
1-2	69,38	0,1408	0,1816	2,1121	1,4630	0,3913	0,1477	0,2046
1-3	55,50	0,1743	0,2338	2,5619	1,6018	0,4292	0,1359	0,3743
1-4	41,63	0,2597	0,3423	3,1740	2,0017	0,6947	0,2087	0,5107
1-5	27,75	0,4295	0,5365	3,6529	1,8628	1,1953	0,3251	0,5571
1-6	13,88	0,5779	0,6953	4,7680	3,1592	1,7870	0,3928	0,4929
2-1	83,25	0,2534	0,3262	2,9837	2,5693	0,7396	0,3372	0,3066
2-2	69,38	0,2217	0,3026	2,9268	2,1298	0,5777	0,2053	0,4962
2-3	55,50	0,2395	0,3406	3,5610	2,3246	0,5986	0,1620	0,6460
2-4	41,63	0,3440	0,4713	4,0565	2,9900	0,8123	0,2748	0,8786
2-5	27,75	0,4821	0,6130	4,3735	2,7265	1,2607	0,3073	0,8487
2-6	13,88	0,6135	0,7502	5,1680	2,9274	1,9249	0,4481	0,6440
3-1	117,81	0,2152	0,2940	2,8711	1,7068	0,5901	0,3597	0,3674
3-2	98,17	0,1784	0,2505	3,5280	2,2763	0,4511	0,2905	0,3433
3-3	78,54	0,1201	0,1559	1,9228	1,3864	0,3201	0,1214	0,1852
3-4	58,90	0,2208	0,3047	3,1220	1,9191	0,5752	0,2597	0,4973
3-5	39,27	0,4030	0,5197	4,7612	3,1715	1,1925	0,4088	0,6539
3-6	19,63	0,5285	0,6698	5,3015	3,0461	1,5772	0,5799	0,7132
4-1	117,81	0,3805	0,5016	4,2046	2,2032	1,1328	0,6078	0,5544
4-2	98,17	0,2983	0,3909	3,8059	2,4686	0,8685	0,3284	0,5294
4-3	78,54	0,2951	0,4235	3,5570	2,2872	0,6851	0,2511	0,8967
4-4	58,90	0,4719	0,6252	4,3060	2,3616	1,1114	0,3419	1,1266
4-5	39,27	0,7783	0,9420	5,2330	2,8578	2,3308	0,3834	0,9787
4-6	19,63	0,9707	1,1840	7,2883	4,2552	3,0745	0,7045	0,9462

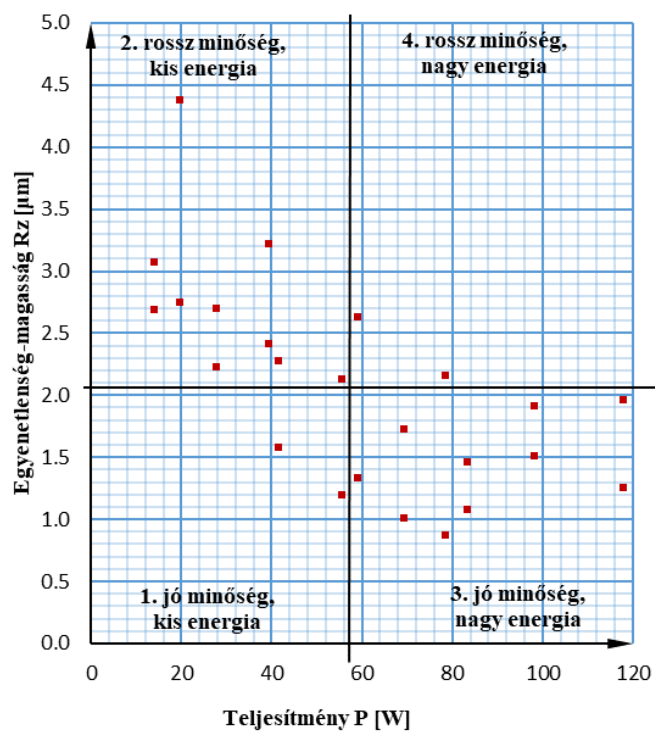
Ezen adatokból elkészítettem az 5.5. fejezetpontban ismertetett Kraljic-mátrixokat, ezeket 19-26. számú ábrák foglalják össze. Az első négy ábra a 2D-s, az utolsó négy pedig a 3D-s felületérdességi mérőszámokat tartalmazza a teljesítmény függvényében. A hordfelületi görbe jellemzőivel a későbbiekben fogok foglalkozni.



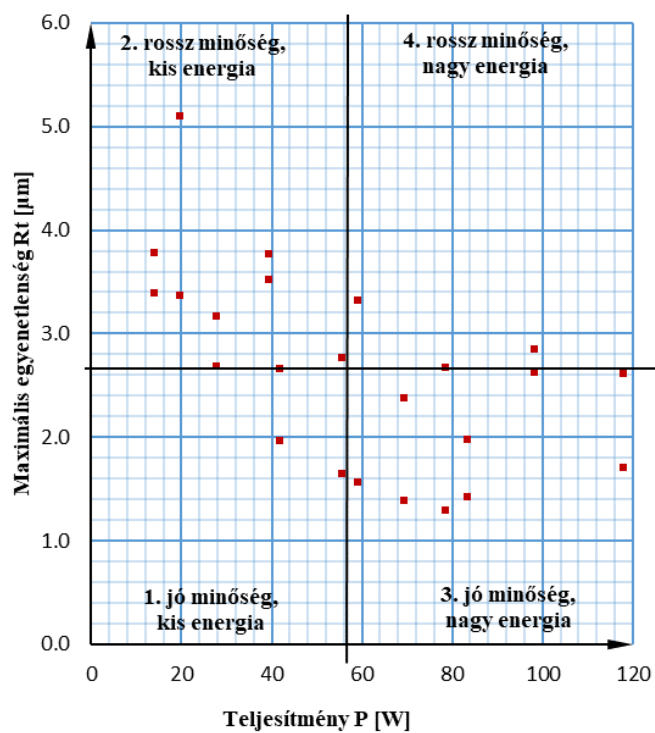
19. ábra. Az átlagos érdesség és a teljesítmény értékei gyémántvasalás során



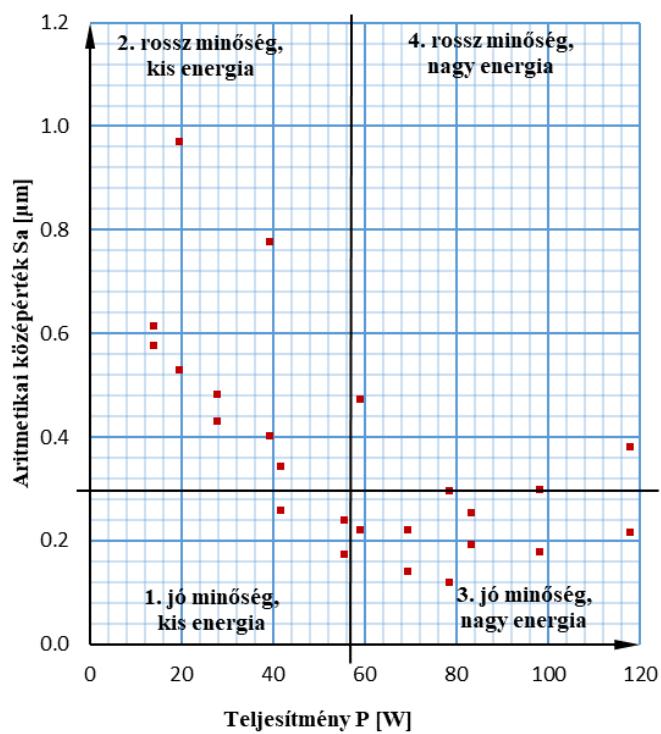
20. ábra. A négyzetes középérték és a teljesítmény értékei gyémántvasalás során



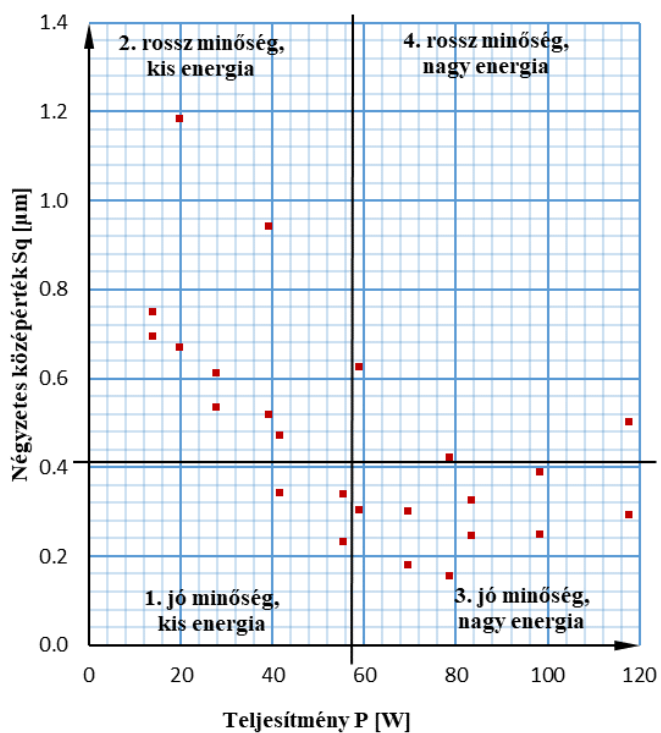
21. ábra. Az egyenetlenség-magasság és a teljesítmény értékei gyémántvasalás során



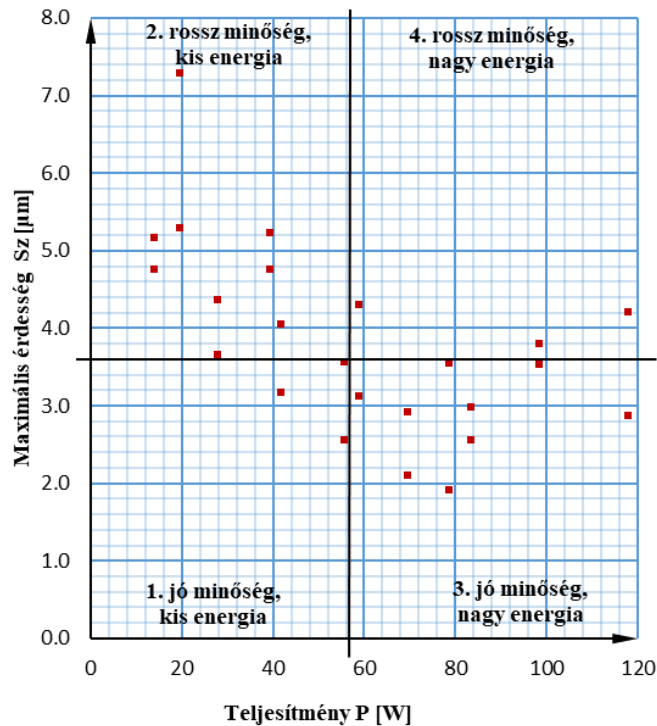
22. ábra. A maximális egyenetlenség és a teljesítmény értékei gyémántvasalás során



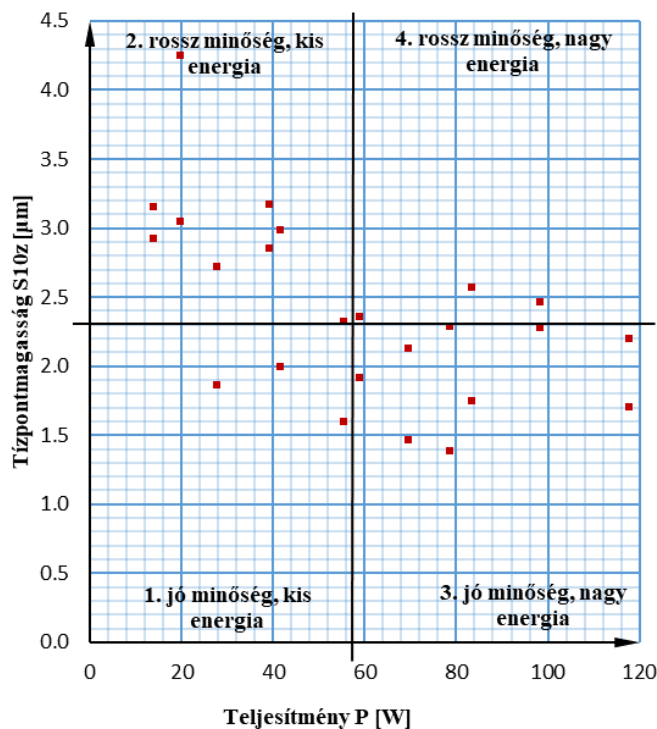
23. ábra. Az aritmetikai középérték és a teljesítmény értékei gyémántvasalás során



24. ábra. A négyzetes középérték és a teljesítmény értékei gyémántvasalás során



25. ábra. A maximális érdesség és a teljesítmény értékei gyémántvasalás során



26. ábra. A tízpontmagasság és a teljesítmény értékei gyémántvasalás során

Az ábrákból egységesen rajzolódik ki az, hogy a teljesítmény növelésével csökken az érdesség egy bizonyos fokig, majd pedig elér egy minimumpontot 60-80 W környékén, ahonnan a teljesítmény növelése a felületérdesség romlását vonja magával. Megállapítható

tehát az, hogy ezen technológiai paraméter-kombinációkkal történő megmunkálások kerülendők, ezek pontos értékeit a 2. táblázat tartalmazza.

A legjobb felületérdességi értékeket az alábbi paraméterkombinációval értem el:

- $f = 0,05 \frac{mm}{fordulat}$
- $v_v = 0,9817 \frac{m}{s}$
- $F = 80 N; P = 78,54 W$

Ez az adatpont azonban a Kraljic-mátrix 3. zónájába esett, tehát az energiahatékonyság szempontjából nem ideális választás. Mind a nyolc felületérdességi mérőszámot figyelembe véve két olyan paraméterkombináció volt, melyek kivétel nélkül a Kraljic-mátrix célkitűzésnek tekinthető, első zónájába kerültek; ezek csupán a vasalóerő – és ezáltal a teljesítmény – nagyságában tértek el egymástól:

- $f = 0,05 \frac{mm}{fordulat}$
- $v_v = 0,6938 \frac{m}{s}$
- $F_1 = 60 N; P_1 = 41,63 W$ és $F_2 = 80 N; P_2 = 55,5 W$

A legjobb felületérdességet produkáló megmunkálással összevetve a technológiai adatokat belátható, hogy a nagyobb vasalási sebesség eredményezte a jobb felületminőséget, ami ugyanakkor a (8) és (9) jelű képleteknek megfelelően növelte a megmunkálás teljesítményigényét, rontva az energiahatékonyságot.

6.3. A javulási tényezők meghatározása, kiértékelése

A következőkben olyan paramétereit keresem a gyémántvasalásnak, amikor amellet, hogy az energiahatékonyság szempontjából megfelelő volt a megmunkálás, az esztergálást követően a legnagyobb javulást sikerült elérni a felület minőségét illetően gyémántvasalással.

Az ehhez szükséges javulási tényezőt a (10) jelű egyenlet segítségével számítom ki, ez egy százalékos érték, amely megadja, hogy mennyit javult a felületminőség a gyémántvasalásnak hála. Erre azért van szükség, mert az esztergálás során eltérő minőségű felületek adódnak, melyek kiindulópontjai a gyémántvasalásnak. A formula egy általánosító képlet, a benne szereplő „X” a 2D-s felületérdességek esetén használatos „R”, illetve a 3D-s esetben használt „S” betűket helyettesíti, míg az „y” a különböző mérőszám-típusok alsó indexeit általánosítja.

$$IX_y = \frac{X_{y;esztergált} - X_{y;vasalt}}{X_{y;esztergált}} \cdot 100 [\%] \quad (10)$$

A 8-9. táblázatokban már ezen számított adatok százalékos értékeit ismertetem, feltüntetve az egyes megmunkálások teljesítményigényét is.

8. Táblázat. A 2D-s felületérdességi paraméterek javulási tényezői

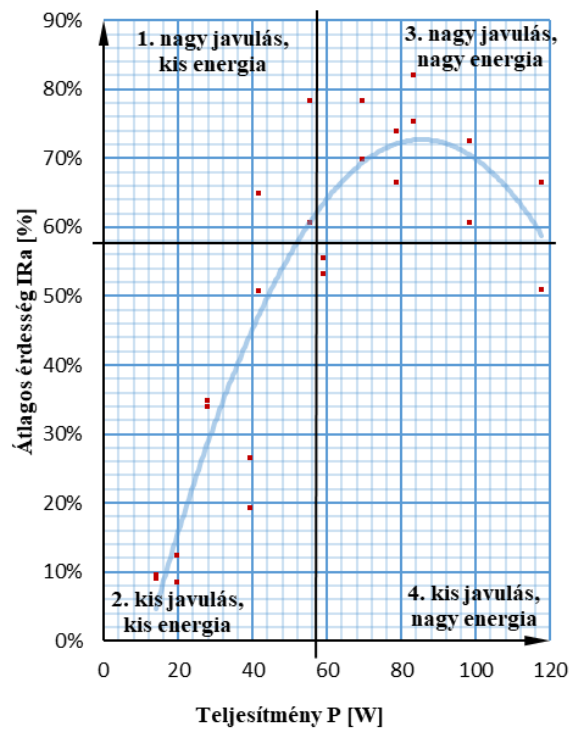
Sorszám	$P (W)$	IR_a	IR_q	IR_z	IR_t	IR_k	IR_{pk}	IR_{vk}
1-1	83,25	75.40%	74.82%	72.46%	74.18%	75.91%	78.38%	66.54%
1-2	69,38	69.94%	68.73%	65.50%	61.40%	72.73%	63.13%	64.88%
1-3	55,50	60.65%	58.07%	52.55%	48.42%	68.27%	70.75%	6.69%
1-4	41,63	50.73%	48.33%	44.65%	49.41%	60.57%	60.72%	8.72%
1-5	27,75	34.83%	33.41%	31.47%	30.24%	40.61%	50.56%	-16.06%
1-6	13,88	9.50%	13.38%	24.15%	21.16%	2.50%	50.23%	34.29%
2-1	83,25	82.00%	80.96%	76.93%	72.68%	82.52%	74.21%	69.09%
2-2	69,38	78.35%	75.53%	68.86%	64.03%	81.74%	77.76%	12.30%
2-3	55,50	78.37%	74.55%	60.89%	55.91%	81.93%	76.12%	31.43%
2-4	41,63	64.96%	63.08%	58.23%	57.07%	68.97%	80.75%	22.09%
2-5	27,75	34.01%	34.80%	38.10%	39.22%	42.34%	61.69%	7.41%
2-6	13,88	8.98%	11.98%	21.14%	20.68%	5.24%	35.32%	32.02%
3-1	117,81	50.94%	52.37%	53.79%	49.64%	48.46%	60.76%	50.46%
3-2	98,17	60.71%	57.33%	54.68%	31.92%	68.30%	34.17%	45.82%
3-3	78,54	73.96%	72.92%	69.13%	59.16%	76.07%	71.24%	62.38%
3-4	58,90	55.62%	53.90%	49.70%	56.87%	60.53%	70.30%	1.08%
3-5	39,27	19.39%	17.73%	12.90%	7.54%	25.02%	30.45%	-6.51%
3-6	19,63	12.44%	18.34%	23.78%	41.61%	-8.07%	60.30%	35.09%
4-1	117,81	66.49%	64.44%	55.65%	50.17%	67.53%	17.67%	56.92%
4-2	98,17	72.49%	69.02%	53.81%	44.19%	74.03%	9.23%	35.84%
4-3	78,54	66.45%	59.85%	46.08%	40.72%	76.29%	29.89%	-16.70%
4-4	58,90	53.25%	47.12%	37.62%	30.04%	68.56%	57.47%	-44.92%
4-5	39,27	26.51%	24.60%	21.66%	20.83%	41.41%	20.08%	-36.45%
4-6	19,63	8.50%	10.72%	14.16%	14.57%	7.63%	60.17%	-12.85%

9. Táblázat. A 3D-s felületérdességi paraméterek javulási tényezői

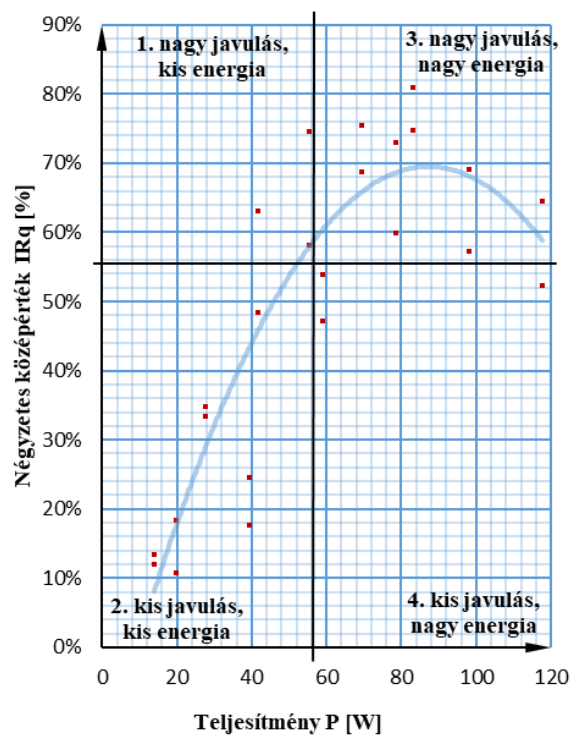
Sorszám	$P (W)$	IS_a	IS_q	IS_z	IS_{10z}	IS_k	IS_{pk}	IS_{vk}
1-1	83,25	72.94%	74.00%	65.32%	61.85%	73.33%	81.70%	76.62%
1-2	69,38	72.24%	71.37%	53.78%	54.13%	75.36%	77.91%	55.98%
1-3	55,50	62.95%	59.94%	45.27%	47.72%	70.29%	75.29%	-3.52%
1-4	41,63	47.32%	44.88%	39.38%	49.89%	52.26%	69.79%	-22.54%
1-5	27,75	33.48%	32.23%	30.14%	48.19%	39.13%	46.73%	-4.09%
1-6	13,88	11.88%	15.23%	16.69%	15.43%	11.26%	52.67%	14.60%

Sorszám	$P(W)$	IS_a	IS_q	IS_z	IS_{10z}	IS_k	IS_{pk}	IS_{vk}
2-1	83,25	78.82%	77.80%	70.82%	58.90%	78.99%	73.86%	71.15%
2-2	69,38	80.23%	77.70%	65.72%	61.94%	83.39%	81.07%	39.80%
2-3	55,50	78.18%	74.61%	64.61%	60.33%	78.18%	88.43%	34.72%
2-4	41,63	63.97%	60.53%	46.42%	30.38%	68.48%	78.50%	11.92%
2-5	27,75	32.96%	34.44%	35.31%	15.32%	35.66%	72.39%	16.66%
2-6	13,88	13.57%	17.91%	32.10%	45.45%	10.04%	47.56%	34.00%
3-1	117,81	54.10%	50.10%	41.99%	49.90%	57.87%	44.67%	15.18%
3-2	98,17	64.79%	60.53%	36.07%	48.49%	70.80%	47.17%	35.88%
3-3	78,54	74.69%	73.92%	56.96%	57.14%	77.92%	81.22%	60.68%
3-4	58,90	49.78%	45.12%	28.45%	36.10%	56.74%	56.99%	-12.53%
3-5	39,27	16.46%	15.14%	-0.03%	-6.52%	18.88%	35.43%	-10.20%
3-6	19,63	-1.05%	-1.23%	-4.38%	16.52%	1.69%	8.72%	-22.16%
4-1	117,81	61.25%	58.31%	42.53%	47.16%	61.96%	38.85%	50.15%
4-2	98,17	66.36%	62.77%	34.82%	31.50%	69.17%	0.25%	30.66%
4-3	78,54	65.00%	57.75%	35.02%	31.98%	73.73%	11.78%	-8.43%
4-4	58,90	45.56%	40.18%	30.72%	41.46%	58.36%	40.15%	-47.83%
4-5	39,27	21.59%	22.64%	28.14%	30.67%	26.72%	60.49%	4.69%
4-6	19,63	6.13%	8.54%	10.15%	-5.87%	8.09%	38.51%	31.59%

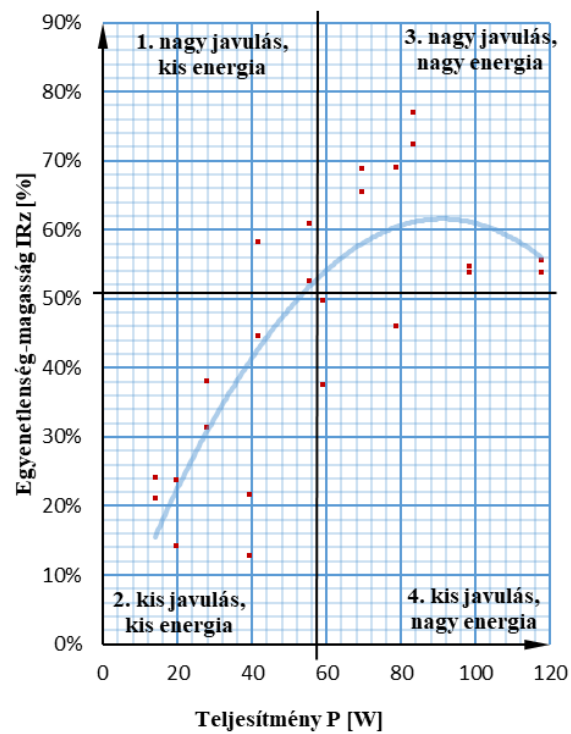
Ezen adatok segítségével szintén elkészítettem az 5.5. fejezetpontban ismertetett Kraljic-mátrixokat, csak most a 19. ábra jelöléseit alkalmazva. Ezeket 27-34. számú ábrák szemléltetik. Az első négy ábra a 2D-s, a következő négy pedig a 3D-s felületérdességi mérőszámokat tartalmazza a teljesítmény függvényében.



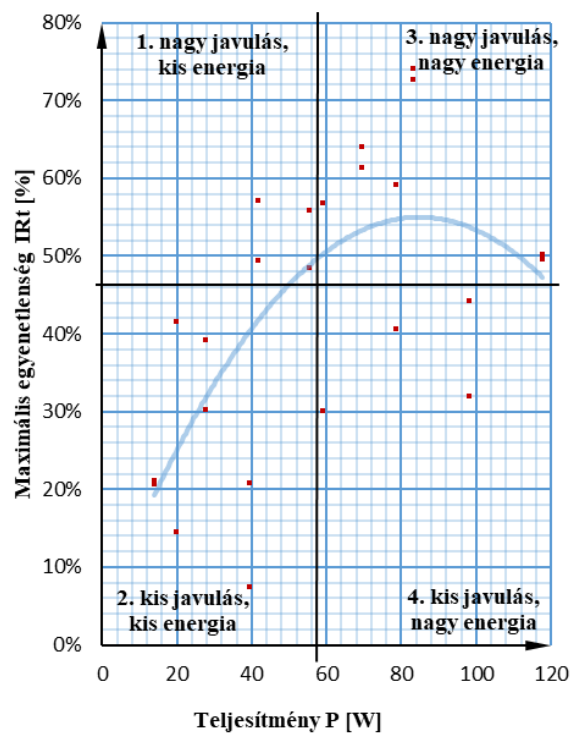
27. ábra. Az átlagos érdesség javulási tényezője gyémántvasalás után



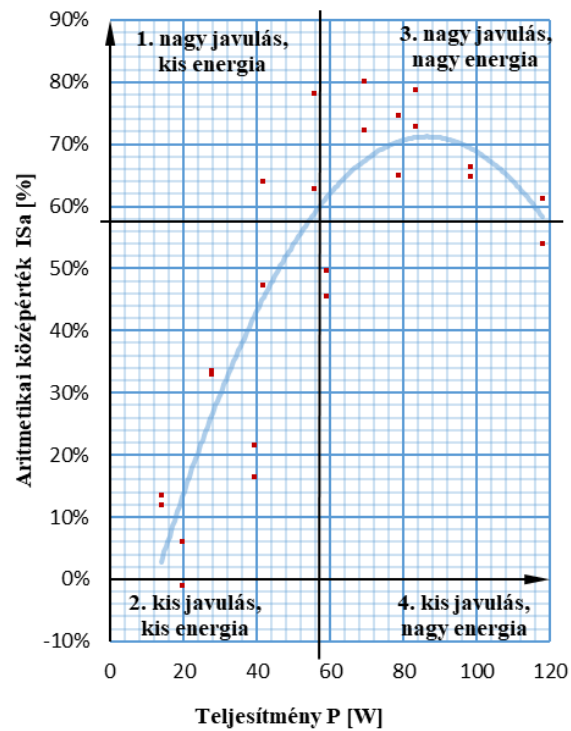
28. ábra. A négyzetes középérték javulási tényezője gyémántvasalás után



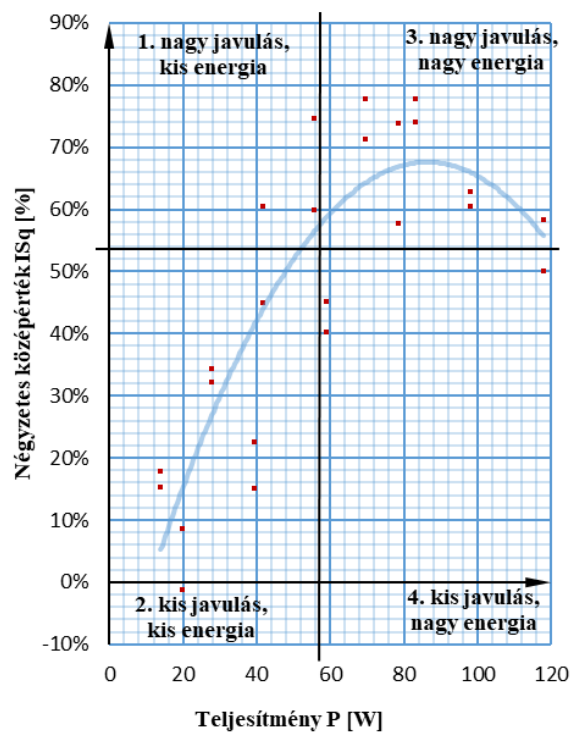
29. ábra. Az egyenetlenség-magasság javulási tényezője gyémántvasalás után



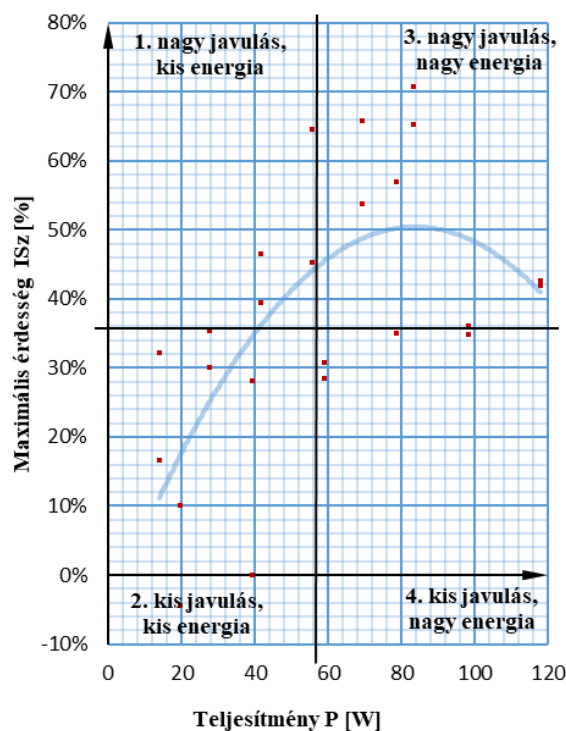
30. ábra. A maximális egyenetlenség javulási tényezője gyémántvasalás után



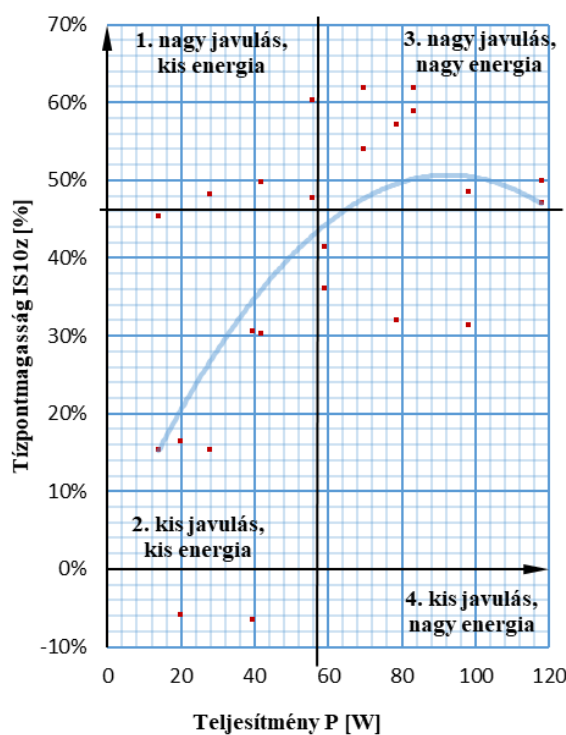
31. ábra. Az aritmetikai középérték javulási tényezője gyémántvasalás után



32. ábra. A négyzetes középérték javulási tényezője gyémántvasalás után



33. ábra. A maximális érdesség javulási tényezője gyémántvasalás után



34. ábra. A tízpontmagasság javulási tényezője gyémántvasalás után

A javulási tényezőket bemutató ábrákon is megfigyelhető ugyanaz a trend, melyet a gyémántvasalt felület érdességének kiértékelése során megállapítottam: a teljesítmény növelésével egyre nagyobb javulási tényezők érhetők el minden felületérdességi mérőszám esetén, a maximális értékek azonban ebben az esetben is 60-80 W között lesznek, onnantól

ugyanis a teljesítményt tovább növelve ugyan javul a felületminőség a gyémántvasalás hatására, de nem olyan mértékben, mint a kisebb teljesítmények esetén. Elmondható tehát, hogy azon nagy teljesítmény-igényű paraméterkombinációk minden esetben kerülendők (2. táblázat), hiszen amellett, hogy nagy energiaigényű megmunkálások, nem javítanak olyan mértékben a felületminőségen.

A legnagyobb javulási tényezőket az alábbi paraméterkombináció produkálta, ezt azonban érdemes fenntartásokkal kezelni, hiszen – rámutatva ezzel a javulási tényezők Achilles-sarkára –, ez a felület rendelkezett a legrosszabb érdességi paraméterekkel az esztergálást követően.

- $f = 0,1 \frac{mm}{fordulat}$
- $v_v = 0,6938 \frac{m}{s}$
- $F = 120 N; P = 83,25 W$

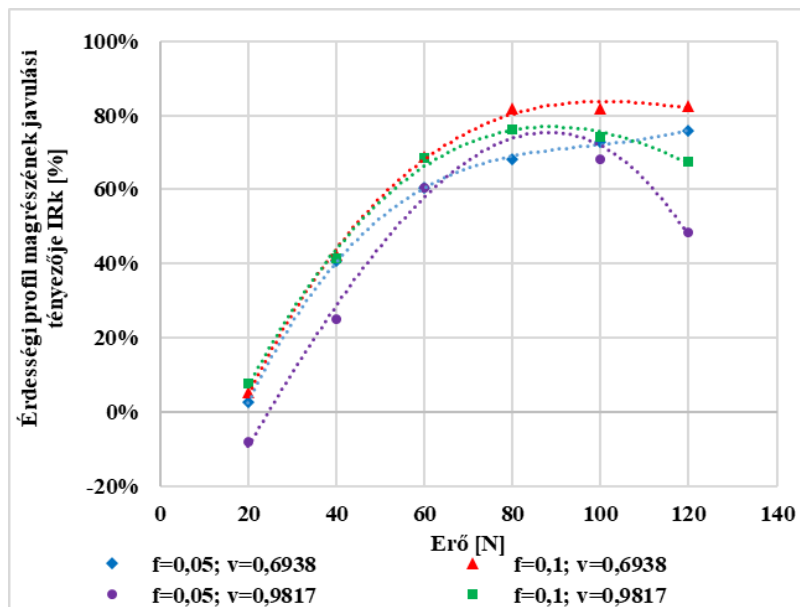
Ha azonban a Kraljic-mátrix szempontjából vizsgálom az ábrákat, akkor már vannak egyezések a korábbiakkal kapcsolatban. Három olyan paraméterkombináció is volt ugyanis, amely mind a nyolc felületérdességi mérőszámot figyelembe véve a mátrix első, kedvező zónájába esett. Ezek vasalási sebességükben megegyeztek, csupán az előtolás és a vasalóerő értékeiben tértek el egymástól. Azonosításukat a 2. táblázat sorszámozása alapján végezve, értékeik az alábbiak:

- 1-3: $f = 0,05 \frac{mm}{fordulat}; v_v = 0,6938 \frac{m}{s}; F = 80 N; P = 55,5 W$
- 2-3: $f = 0,1 \frac{mm}{fordulat}; v_v = 0,6938 \frac{m}{s}; F = 80 N; P = 55,5 W$
- 2-4: $f = 0,1 \frac{mm}{fordulat}; v_v = 0,6938 \frac{m}{s}; F = 60 N; P = 41,63 W$

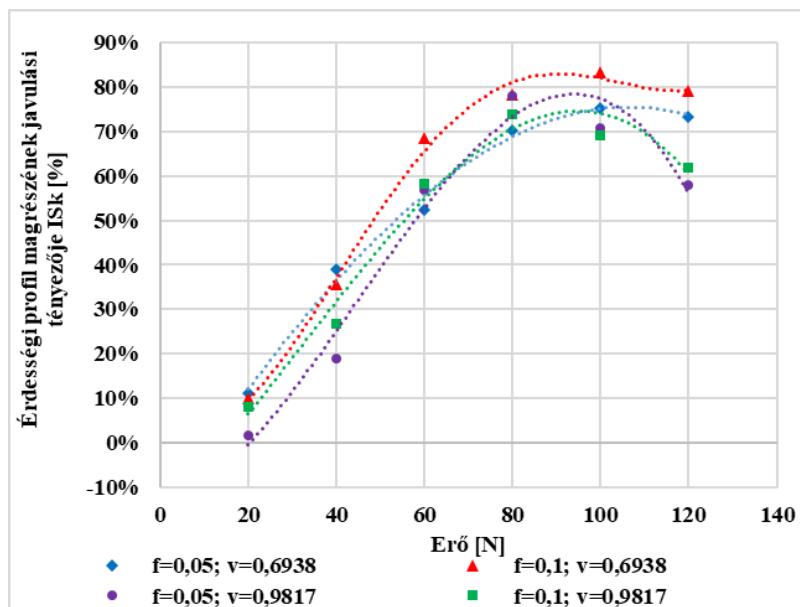
A gyémántvasalt felület érdességének kiértékelésével összevetve ezen adatokat, tapasztaltam hasonlóságokat – a vasalási sebesség, a vasalóerő és így a teljesítmény értékeiben –, amely az energiahatékonysági szempontok figyelembevételé miatt történt; ezek ugyanis azok a paraméterek, melyek befolyásolják a megmunkálás energiaigényét. A nagyobb előtolás azonban a 6.2. fejezetpontban bemutatott felületminőség-értékek alapján valójában nem kedvez a felületnek, jelen esetben is tehát csak a kedvezőtlen esztergált felület okozta a nagy javulást a felületminőségben ezen két megmunkálás (2-3 és 2-4) esetén. Általánosan megállapítható tehát, hogy a javulási tényezők értékeit fenntartásokkal kell kezelni, értéke ugyanis nagyban függ a kiinduló felület minőségétől (egy érdesebb felületen könnyű nagy javulást elérni, mint egy kevésbé érdesen), kiugró értékek esetén össze kell vetni a kiinduló felületek érdességét is, azokat esetlegesen súlyozó tényezőkkel ellátni.

A már többször említett hordfelületi görbe jellemzőit az eddigiektől eltérő filozófia alapján értékelem, mivel ezen paraméterek alakulása nem annyira egyértelmű, mint az előző esetekben.

A 35-40. ábrák a hordfelületi görbe jellemzőinek javulási tényezőit tartalmazzák az előtolás, a vasalási sebesség, illetve a vasalóerő függvényében. Első körben azonban csak a hordfelületi görbe magrészének ábráit vizsgálom a javulási tényező szempontjából, a 2D-s esetet a 35. ábra, a 3D-st pedig a 36. ábra prezentálja.



35. ábra. Érdességi profil magrészének javulási tényezője a vasalási sebesség, az előtolás és a vasalóerő függvényében – 2D

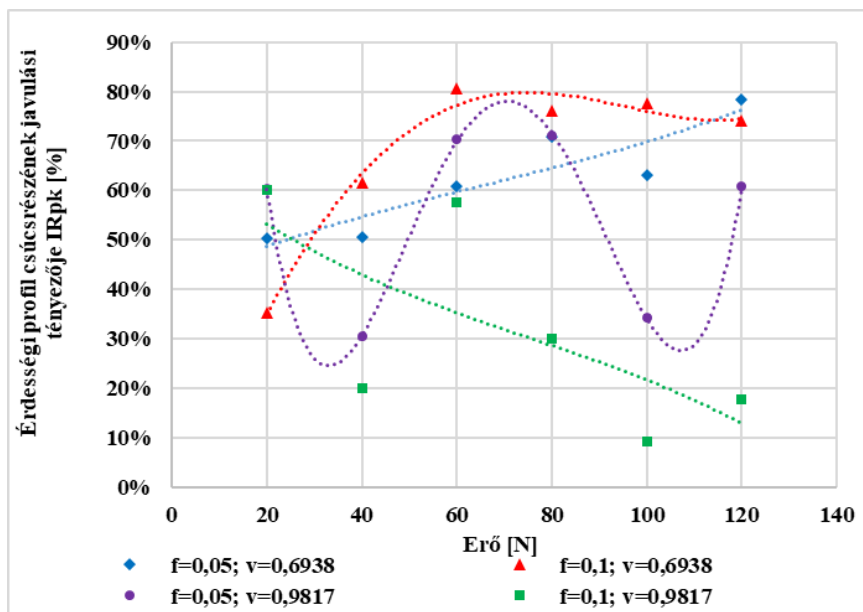


36. ábra. Érdességi profil magrészének javulási tényezője a vasalási sebesség, az előtolás és a vasalóerő függvényében – 3D

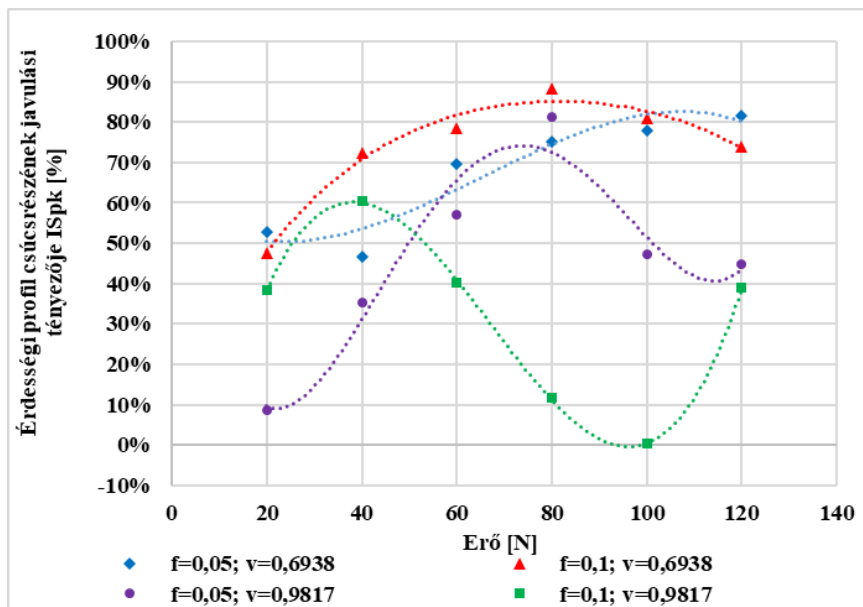
Az ábrák kedvezőbb nyomon követéséhez az egyes adatpont-halmazokhoz trendvonalakat vettem fel, melyekből többségében hasonló görbék adódtak. Az ábrákon az látszik, hogy a vasalóerő növelésével folyamatosan növekszik a javulási tényező mértéke, míg nem elér egy

maximumpontot, ahonnan már csökkenésnek indul. Ez megegyezik az eddigi megfigyeléseimmel a többi felületérdességi mérőszámmal kapcsolatosan. Az ábrákon – főképp a 3D-s paramétert elemző, 36. ábrán – az is látszik, hogy az egyező vasalási sebességek esetén (piros-kék, illetve zöld-lila trendvonal) a görbék maximumhelye, vagyis a vasalóerő megegyezik, csak a javulási tényező értékeiben térnek el egymástól.

A 37-38. ábrákon az érdességi profil csúcsrészének javulási tényezői láthatók.



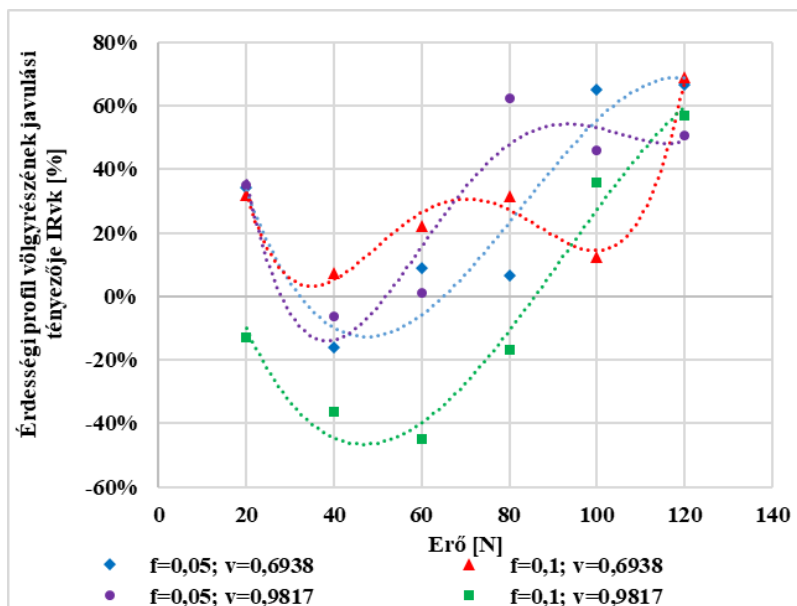
37. ábra. Érdességi profil csúcsrészének javulási tényezője a vasalási sebesség, az előtolás és a vasalóerő függvényében – 2D



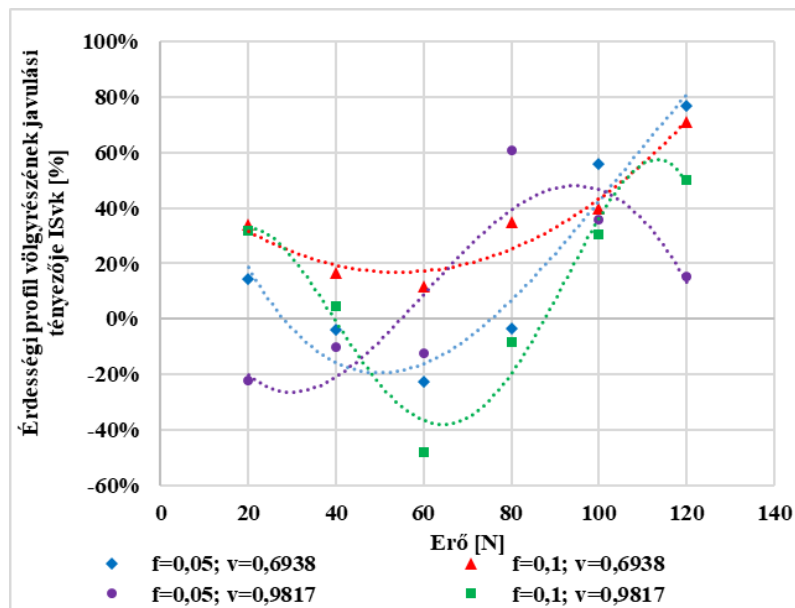
38. ábra. Érdességi profil csúcsrészének javulási tényezője a vasalási sebesség, az előtolás és a vasalóerő függvényében – 3D

Az érdességi profil csúcsrészének javulási tényezőiben már sokkal nagyobb szórást találni a technológiai paraméterek változtatásától függően. Az érdességi profil csúcsrésze a profil legfelső pontjait jelenti, a 9. ábrán ismertetett módon arányosítva a magzóna és a völgyzóna anyaghányadával. Ezt a tényezőt érdekesebb inkább csupán a 3D-s esetre vetítve értékelni, a 2D-s adatok ugyanis nem adtak értékelhető képet a témáról. Megállapítható, hogy a minimális előtolás és vasalási sebesség esetén (kék trendvonal) a vasalóerő növelésével folyamatosan nőtt a javulási tényező, míg ezen paraméterek maximális értékeinél (zöld trendvonal) a vasalóerő növelése idővel még rontott is az érdességi profil csúcsrészének nagyságán. Az értékek minimális-maximális kombinációja esetén ellenben (piros, lila trendvonal) megint volt a javulási tényezőnek maximális értéke, 70-80 N vasalóerő felett az előbbiekhöz hasonlóan már kisebb javulás volt elérhető.

Végül pedig, a 39-40. ábrákon az érdességi profil völgyrészének javulási tényezői láthatók.



39. ábra. Érdességi profil völgyrészének javulási tényezője a vasalási sebesség, az előtolás és a vasalóerő függvényében – 2D



40. ábra. Érdességi profil völgyrészének javulási tényezője a vasalási sebesség, az előtolás és a vasalóerő függvényében – 3D

A hordfelületi görbe völgyrészének javulási tényezői a csúcsrészhez hasonlóan elég változatosan alakultak a technológiai paraméterek változtatásával. A hordfelület völgyrésze a felület legmélyebb rétegeiről ad visszajelzést, a 9. ábra jelöléseinek megfelelően. Az ábrákból megállapítható, hogy a vasalóerő növelése előbb még negatívan hat a javulási tényezőre (negatív értékek is előfordulnak), míg elérve egy minimumpontot, a legnagyobb vasalóerők már nagymértékben javítanak a hordfelületi görbe völgyrészének nagyságán. Ebből tehát azt a fontos következtetést tudom megállapítani, hogy a legmélyebb „völgyek” a felületen valójában csak akkor „tömődnek be” a gyémántvasalás hatására, ha elég nagy erővel történik a megmunkálás!

7. Az energiahatékonyság vizsgálata a faktoriális kísérlettervezés alkalmazásával

Faktoriális kísérlettervezés során a rendelkezésre álló mérési eredmények segítségével lehet tapasztalati képleteket készíteni matematikai módszerekkel, ehhez a MathCad programot alkalmaztam. Az egymástól független technológiai paraméterkombinációk száma függ egyrészt a felhasznált technológiai paraméterektől – ezek az ún. faktorok –, illetve ezen paraméterek különböző értékeitől – ezek az ún. szintek, a leggyakoribb esetben egy minimum, illetve egy maximum értékből tevődik össze.

Esetemben a faktorok száma azon technológiai paraméterek számával egyezik meg, melyek értékeit változtattam a megmunkálás során. Ilyen volt az előtolás, a vasalási sebesség (a fordulatszámából számítva), valamint a vasalóerő. Minden paraméterhez két értéket rendeltek, így a szintek száma kettő lesz. Ezekre a későbbiekben minimum, illetve maximum értékeként hivatkozom.

Ezek alapján a független beállítások száma az alábbiak szerint alakul:

- faktorok száma: $f = 3$
- szintek száma: $p = 2$
- elvégzendő kísérletek száma: $n = p^f = 2^3 = 8$

Ezt a nyolc beállítást a 10. táblázatban foglaltam össze, értékeit az 5.3. fejezetpontban bemutatott 2. táblázatból nyertem ki.

10. Táblázat. A felhasznált technológiai adatok a faktoriális kísérlettervezéshez

Sorszám	$f \left[\frac{mm}{fordulat} \right]$	$v_v \left[\frac{m}{s} \right]$	$F (N)$	$P (W)$
1-1	0,05	0,6938	120	83,25
1-6	0,05	0,6938	20	13,88
2-1	0,1	0,6938	120	83,25
2-6	0,1	0,6938	20	13,88
3-1	0,05	0,9817	120	117,81
3-6	0,05	0,9817	20	19,63
4-1	0,1	0,9817	120	117,81
4-6	0,1	0,9817	20	19,63

A táblázatban négyesével váltakozik a vasalási sebesség, kettesével az előtolás, míg egyesével a vasalóerő értéke; így generálva nyolc különböző megmunkálási variációt.

Minden esetben a (11) jelű egyenlet alakjában keresem a megoldásokat, a képletben szereplő $k_0; k_1; k_2; k_3; k_{12}; k_{13}; k_{23}; k_{123}$ tetszőleges valós számok, melyek a számítások végén adódnak, míg az „X” a 2D-s felületérdességek esetén használatos „R”, illetve a 3D-s esetben használt „S” betűket helyettesíti, továbbá az „y” a különböző mérőszám-típusok alsó indexeit általánosítja:

$$(I)X_y = k_0 + k_1 \cdot f + k_2 \cdot F + k_3 \cdot v_v + k_{12} \cdot f \cdot F + k_{13} \cdot f \cdot v_v + k_{23} \cdot F \cdot v_v + k_{123} \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (11)$$

7.1. Az energiahatékonyság vizsgálata gyémántvasalás esetén a faktoriális kísérlettervezés alkalmazásával

Először a gyémántvasalás során mért felületérdességi mérőszámokra végzem el a faktoriális kísérlettervezést, ehhez először is bemutatom a felhasznált mérési eredményeket 2D-s, illetve 3D-s esetben a 11-12. táblázatokban.

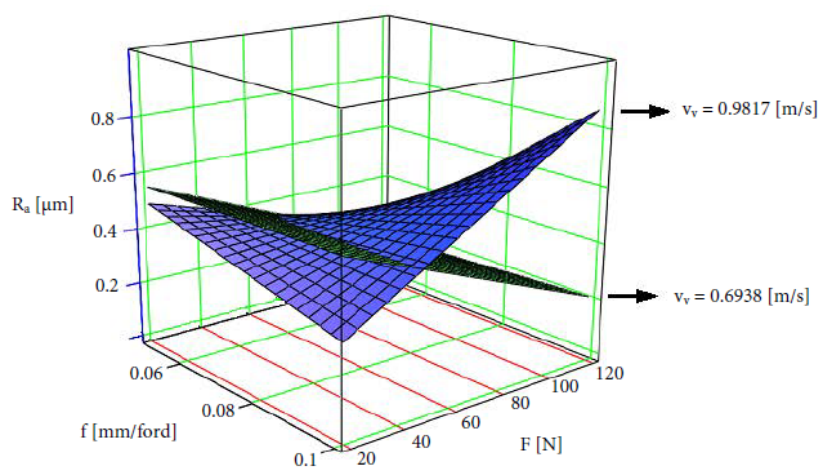
11. Táblázat. A gyémántvasalás kísérlettervezéséhez használt 2D-s felületérdességek

Sorszám	$R_a [\mu\text{m}]$	$R_q [\mu\text{m}]$	$R_z [\mu\text{m}]$	$R_t [\mu\text{m}]$
1-1	0,1613	0,2047	1,0840	1,4252
1-6	0,5536	0,6534	2,6881	3,3997
2-1	0,2097	0,2715	1,4667	1,9745
2-6	0,5796	0,6990	3,0775	3,7813
3-1	0,2148	0,2614	1,2592	1,7121
3-6	0,4915	0,6050	2,7448	3,3662
4-1	0,3081	0,3865	1,9648	2,6216
4-6	0,8648	1,0369	4,3843	5,0996

12. Táblázat. A gyémántvasalás kísérlettervezéséhez használt 3D-s felületérdességek

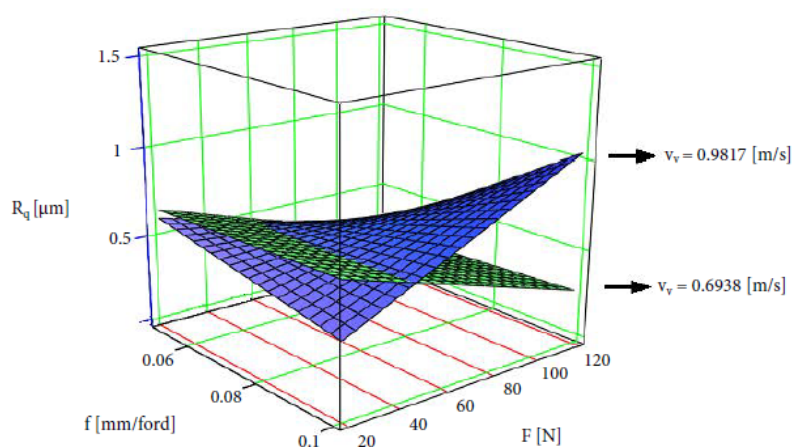
Sorszám	$S_a [\mu\text{m}]$	$S_q [\mu\text{m}]$	$S_z [\mu\text{m}]$	$S_{10z} [\mu\text{m}]$
1-1	0,1918	0,2465	2,5665	1,7513
1-6	0,5779	0,6953	4,7680	3,1592
2-1	0,2534	0,3262	2,9837	2,5693
2-6	0,6135	0,7502	5,1680	2,9274
3-1	0,2152	0,2940	2,8711	1,7068
3-6	0,5285	0,6698	5,3015	3,0461
4-1	0,3805	0,5016	4,2046	2,2032
4-6	0,9707	1,1840	7,2883	4,2552

A gyémántvasalás során, a 2D-s felületérdességi paraméterekre számított képleteket a (12)-(15) jelű egyenletek, valamint a 41-44. ábrák, míg a 3D-s felületérdességi paraméterekre számított képleteket a (16)-(19) jelű egyenletek, valamint a 45-48. ábrák szemléltetik.



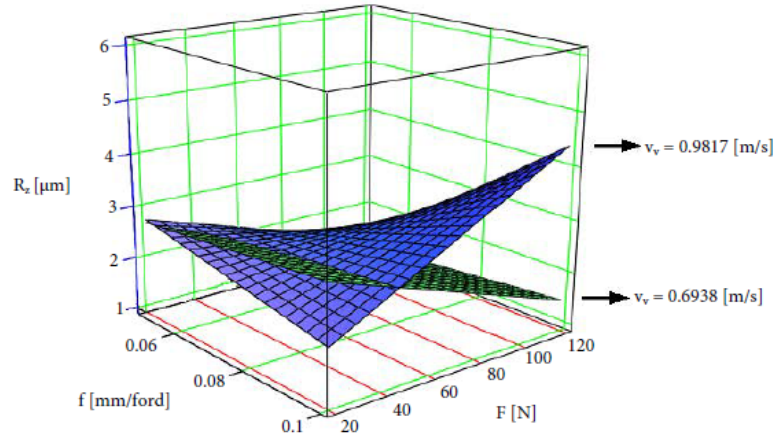
41. ábra. Az átlagos érdesség (R_a) változása a vasalás technológiai paramétereinek függvényében

$$R_a = -0,08 + 18,341 \cdot f + 0,013 \cdot F + 0,995 \cdot v_v - 0,386 \cdot f \cdot F - 25,815 \cdot f \cdot v_v - 0,024 \cdot F \cdot v_v + 0,563 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (12)$$



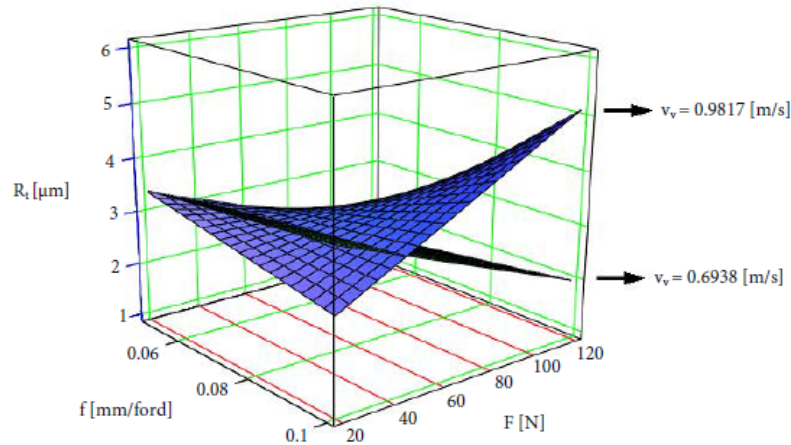
42. ábra. A négyzetes középérték (R_q) változása a vasalás technológiai paramétereinek függvényében

$$R_q = -0,236 + 22,933 \cdot f + 0,016 \cdot F + 1,352 \cdot v_v - 0,465 \cdot f \cdot F - 31,862 \cdot f \cdot v_v - 0,03 \cdot F \cdot v_v + 0,676 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (13)$$



43. ábra. Az egyenetlenség-magasság (R_z) változása a vasalás technológiai paramétereinek függvényében

$$R_z = -2,165 + 101,884 \cdot f + 0,075 \cdot F + 6,894 \cdot v_v - 1,887 \cdot f \cdot F - 135,586 \cdot f \cdot v_v - 0,132 \cdot F \cdot v_v + 2,717 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (14)$$



44. ábra. A maximális egyenetlenség (R_t) változása a vasalás technológiai paramétereinek függvényében

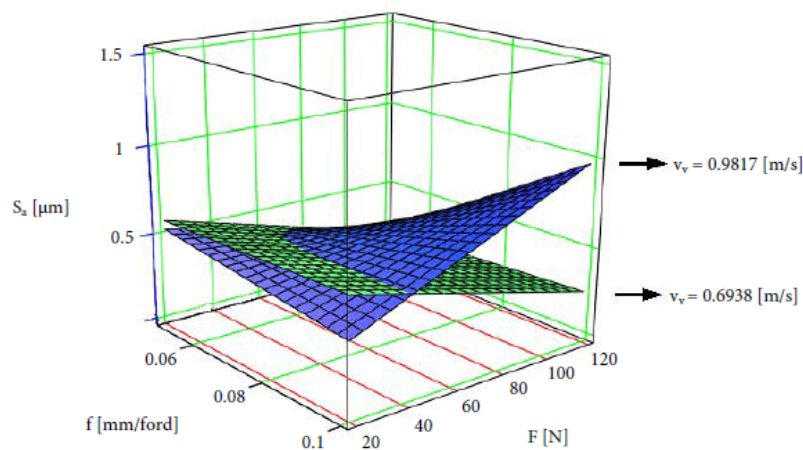
$$R_t = -0,943 + 99,456 \cdot f + 0,066 \cdot F + 6,327 \cdot v_v - 1,877 \cdot f \cdot F - 133,316 \cdot f \cdot v_v - 0,127 \cdot F \cdot v_v + 2,754 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (15)$$

A négy 2D-s felületérdességi paraméter hasonló viselkedést mutatott, így érdemes egységesen vizsgálni őket az ismétlések elkerülése végett. Minimális vasalási sebesség és tetszőleges vasalóerő mellett az előtolás csökkentése az R_a és az R_q értéken szinte nem változtatott, miközben az R_z , illetve R_t értékeket csökkentette, tehát kiugró értékeket a lassú előtoló sebességgel minimalizálni lehet. Ugyanakkor szintén minimális vasalási sebesség és tetszőleges előtolás mellett a vasalóerő növelése csökkentette felületérdességi paramétereket. Ebből arra következtettek, hogy a 6. fejezet Kraljic-mátrixaiban 60-80 W környékén tapasztalt felületérdességi-minimumok valójában a kisebb vasalási sebességnek voltak köszönhetőek. A maximális vasalási sebesség ugyanis rosszabb felületérdességet eredményezett. Ezen megmunkálások esetén maximális előtolás mellett a vasalóerő növelése rontott, míg minimális előtolás mellett javított a felületérdességi mérőszámokon. Az ideális paraméterkombináció

azonban az alábbiak szerint alakul a 2D-s felületérdességi mérőszámok faktoriális kísérlettervezése alapján:

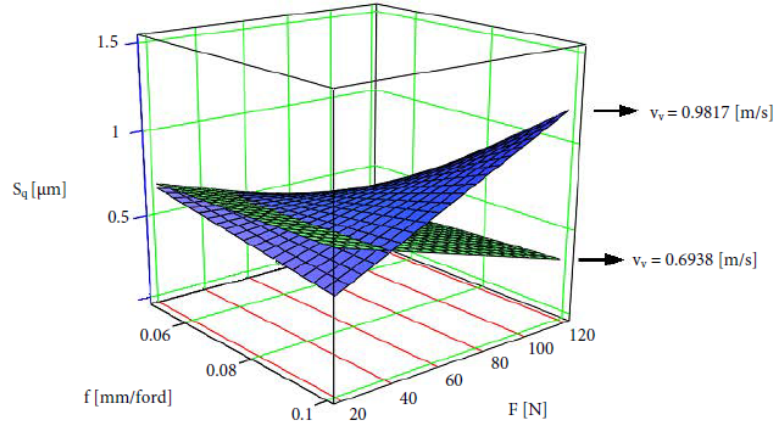
- $f = 0,05 \frac{mm}{fordulat}$
- $v_v = 0,6938 \frac{m}{s}$
- $F = 120 N$

Ezen adatok az energiahatékonysági szempontokat figyelembe véve kompromisszumképes értékek, hiszen a megmunkálás teljesítmény-igénye szempontjából alapvetően is kedvezőbb kisebb vasalási sebesség jobb felületminőséget eredményez, miközben a nagyobb vasalóerő növeli a teljesítményt, rontva az energiahatékonyságon. A felületminőség „kárára”, a kedvezőbb energiahatékonyság céljából ugyanakkor érdemes lehet megfontolni a maximális vasalási sebesség és előtolás alkalmazását minimális vasalóerő mellett, hiszen ezen megmunkálás felületérdességi mérőszámai ugyan elmaradtak az előbb említett paraméterkombináció felületérdességi értékeitől, de kevesebb energiát fogyasztanak. A kérdés az, hogy mik a felületminőségre vonatkozó igények.



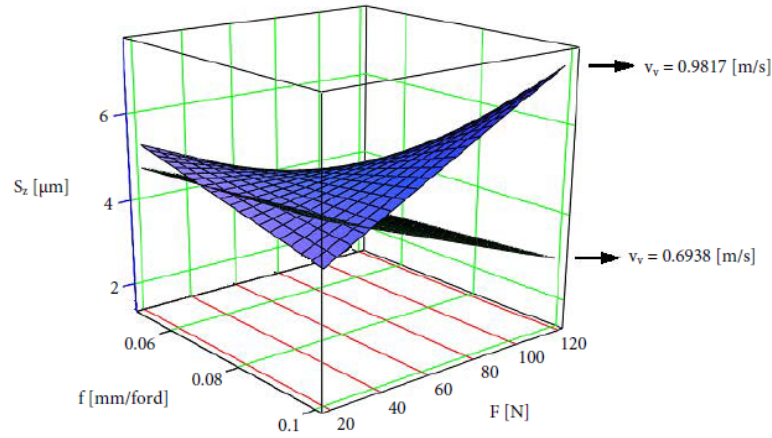
45. ábra. Az aritmetikai középérték (S_a) változása a vasalás technológiai paramétereinek függvényében

$$S_a = -0,087 + 17,916 \cdot f + 0,015 \cdot F + 1,025 \cdot v_v - 0,418 \cdot f \cdot F - 24,946 \cdot f \cdot v_v - 0,028 \cdot F \cdot v_v + 0,61 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (16)$$



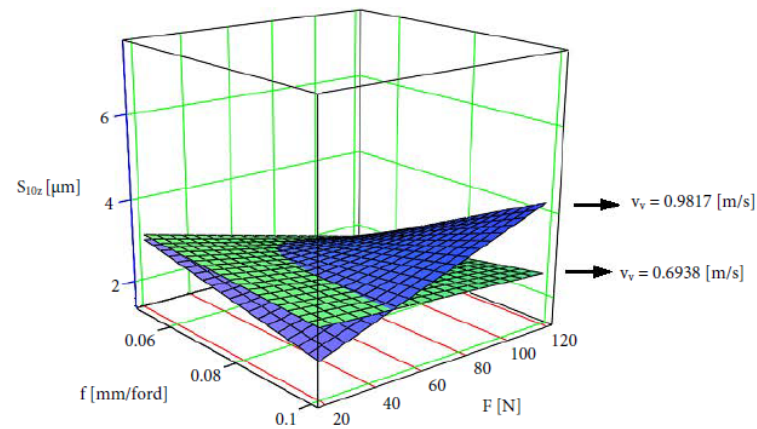
46. ábra. A négyzetes középérték (S_q) változása a vasalás technológiai paramétereinek függvényében

$$S_q = -0,204 + 21,713 \cdot f + 0,018 \cdot F + 1,354 \cdot v_v - 0,493 \cdot f \cdot F - 29,856 \cdot f \cdot v_v - 0,033 \cdot F \cdot v_v + 0,718 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (17)$$



47. ábra. A felületi érdesség maximális értékének (S_z) változása a vasalás technológiai paramétereinek függvényében

$$S_z = -2,841 + 133,065 \cdot f + 0,116 \cdot F + 11,03 \cdot v_v + 2,646 \cdot f \cdot F - 180,36 \cdot f \cdot v_v - 0,199 \cdot F \cdot v_v + 3,819 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (18)$$



48. ábra. A tízpontmagasság (S_{10z}) változása a vasalás technológiai paramétereinek függvényében

$$S_{10z} = 1,587 + 43,189 \cdot f + 0,03 \cdot F + 3,309 \cdot v_v - 0,91 \cdot f \cdot F - 74,9 \cdot f \cdot v_v - 0,079 \cdot F \cdot v_v + 1,627 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (19)$$

A 3D-s felületérdességi mérőszámok is hasonló trendeket mutattak egymáshoz képest. Minimális vasalósebesség mellett csökkent a felületérdesség, gyakorlatilag függetlenül az előtolás mértékétől, miközben a maximális vasalási sebesség alkalmazása rosszabb felületminőséget eredményezett azonos előtolás és vasalóerő mellett (kivéve a legkisebb vasalóerő-értékeket). A legideálisabb paraméter-kombináció tehát a 3D-s felületérdességi mérőszámok alapján:

- $f = 0,05 \frac{mm}{fordulat}$
- $v_v = 0,6938 \frac{m}{s}$
- $F = 120 N$

Az energiahatékonysági elveket figyelembe itt is érdemes lehet megfontolni ezek helyett a nagyobb vasalási sebesség alkalmazását kis vasalóerő mellett, amely csökkenti a megmunkálás teljesítmény-igényét.

7.2. Az energiahatékonyság vizsgálata a gyémántvasalás javulási tényezői esetén a faktoriális kísérlettervezés alkalmazásával

A gyémántvasalás felületérdességi mérőszámainak faktoriális kísérlettervezése után a javulási tényezőkre is elvégzem a kísérlettervezést az energiahatékonyság vizsgálatához, ehhez ugyancsak összegzem a felhasznált javulási tényező értékeket a 13-14. táblázatokban.

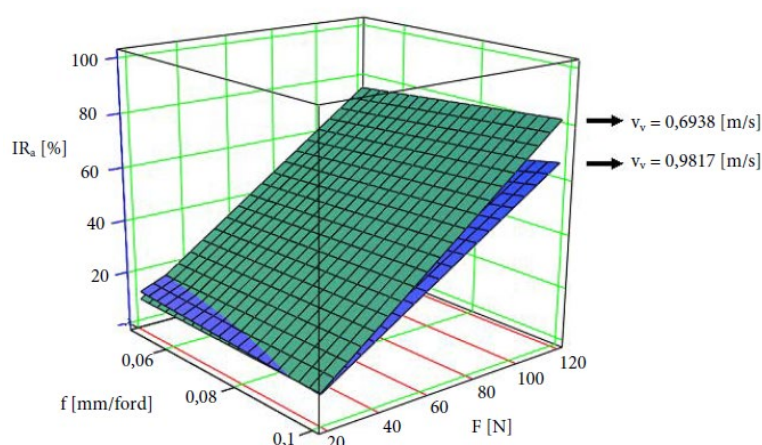
13. Táblázat. A javulási tényező kísérlettervezéséhez használt 2D-s felületérdességek

Sorszám	IR_a	IR_q	IR_z	IR_t
1-1	75.40%	74.82%	72.46%	74.18%
1-6	69.94%	68.73%	65.50%	61.40%
2-1	60.65%	58.07%	52.55%	48.42%
2-6	50.73%	48.33%	44.65%	49.41%
3-1	34.83%	33.41%	31.47%	30.24%
3-6	9.50%	13.38%	24.15%	21.16%
4-1	82.00%	80.96%	76.93%	72.68%
4-6	78.35%	75.53%	68.86%	64.03%

14. Táblázat. A javulási tényező kísérlettervezéséhez használt 3D-s felületérdekességek

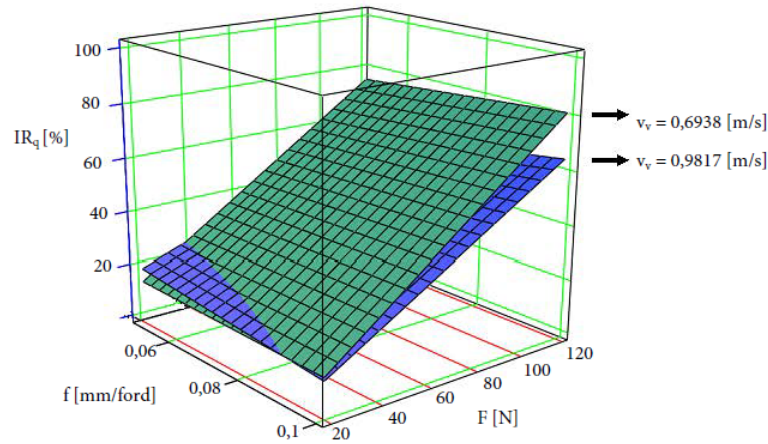
Sorszám	IS_a	IS_q	IS_z	IS_{10z}
1-1	72.94%	74.00%	65.32%	61.85%
1-6	72.24%	71.37%	53.78%	54.13%
2-1	62.95%	59.94%	45.27%	47.72%
2-6	47.32%	44.88%	39.38%	49.89%
3-1	33.48%	32.23%	30.14%	48.19%
3-6	11.88%	15.23%	16.69%	15.43%
4-1	78.82%	77.80%	70.82%	58.90%
4-6	80.23%	77.70%	65.72%	61.94%

A gyémántvasalás utáni javulási tényezők 2D-s felületérdekességi paraméterekre számított értékeit a (20)-(23) jelű egyenletek, valamint a 49-52. ábrák, míg a 3D-s felületérdekességi paraméterekre számított értékeit a (24)-(27) jelű egyenletek, valamint az 53-56. ábrák szemléltetik.



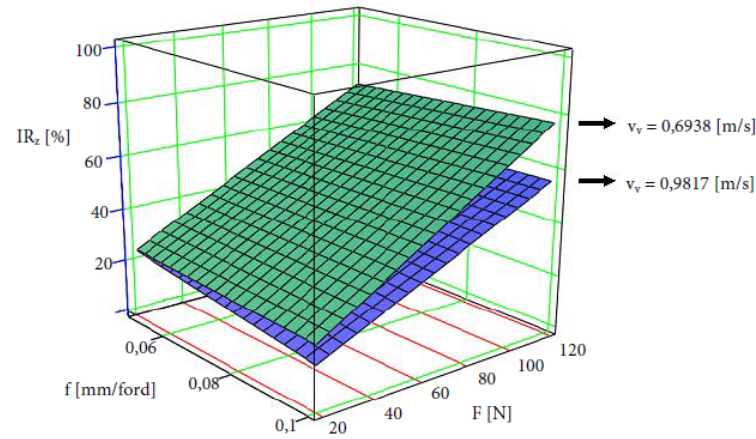
49. ábra. Az átlagos érdesség javulási tényezőjének (IR_a) változása a vasalás technológiai paramétereinek függvényében

$$IR_a = -36,23 + 245,195 \cdot f + 1,546 \cdot F + 49,719 \cdot v_v - 4,538 \cdot f \cdot F - 409,448 \cdot f \cdot v_v - 1,381 \cdot F \cdot v_v + 8,593 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (20)$$



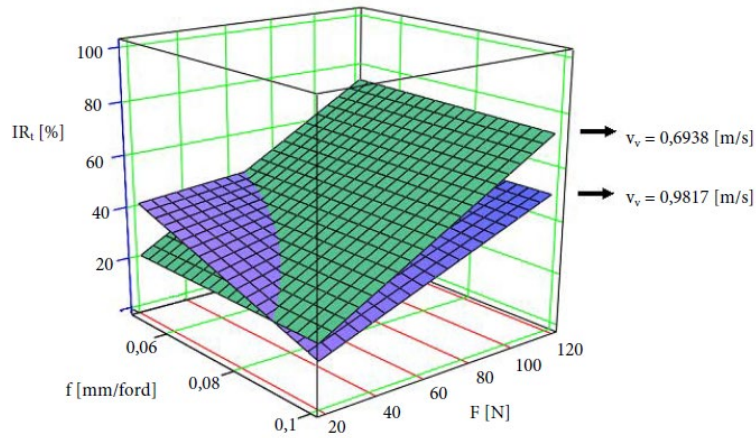
50. ábra. A négyzetes középérték javulási tényezőjének (IR_q) változása a vasalás technológiai paramétereinek függvényében

$$IR_q = -42,009 + 358,747 \cdot f + 1,492 \cdot F + 66,315 \cdot v_v - 4,348 \cdot f \cdot F - 600,903 \cdot f \cdot v_v - 1,374 \cdot F \cdot v_v + 8,44 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (21)$$



51. ábra. Az egyenetlenség-magasság javulási tényezőjének (IR_z) változása a vasalás technológiai paramétereinek függvényében

$$IR_z = -6,792 + 267,022 \cdot f + 0,946 \cdot F + 37,166 \cdot v_v - 0,432 \cdot f \cdot F - 514,762 \cdot f \cdot v_v - 0,775 \cdot F \cdot v_v + 2,779 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (22)$$

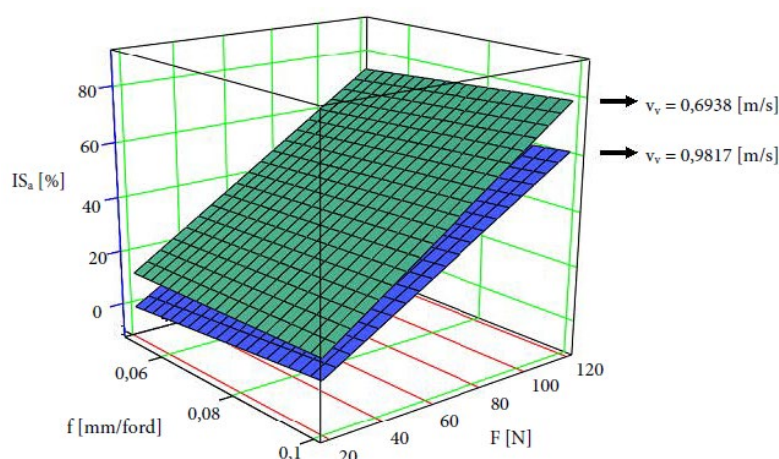


52. ábra. A maximális egyenetlenség javulási tényezőjének (IR_t) változása a vasalás technológiai paramétereinek függvényében

$$IR_t = -137,919 + 1,55 \cdot 10^{-3} \cdot f + 2,314 \cdot F + 214,401 \cdot v_v - 13,984 \cdot f \cdot F - 2,242 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot v_v - 2,556 \cdot F \cdot v_v + 19,861 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (23)$$

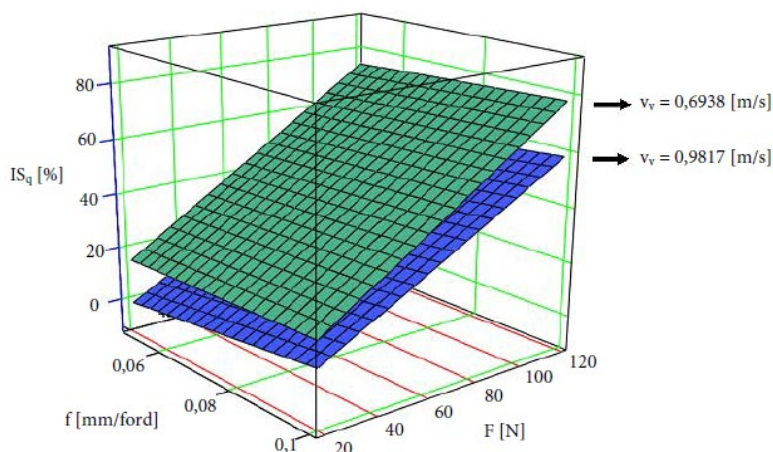
A 2D-s felületérdességi mérőszámok javulási tényezői szintén hasonlóan viselkedtek az egyes technológiai paraméterek változtatásának hatására, így érdemes őket együttesen értékelni. Megállapítható, hogy a legnagyobb javulási értékeket a minimális vasalási sebességgel értem el – ez kedvező az energiahatékonyság szempontjából –, a legnagyobb vasaló erő mellett; miközben az előtolás változtatása nem volt feltűnő hatással a javulási tényezőkre. Az ajánlott technológiai paraméterkombináció tehát a 2D-s felületérdességi mérőszámok javulási tényezői alapján:

- $f = 0,05$ vagy $0,1 \frac{mm}{fordulat}$
- $v_v = 0,6938 \frac{m}{s}$
- $F = 120 N$



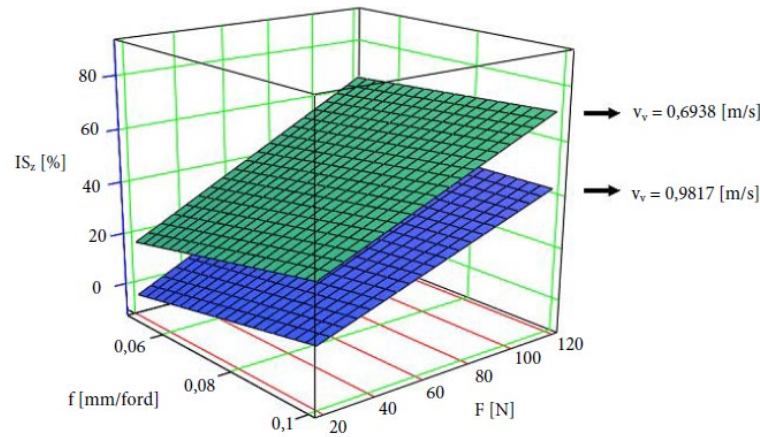
53. ábra. Az aritmetikai középérték javulási tényezőjének (IS_a) változása a vasalás technológiai paramétereinek függvényében

$$IS_a = 42,391 - 288,242 \cdot f + 0,609 \cdot F - 62,807 \cdot v_v + 2,872 \cdot f \cdot F + 440,014 \cdot f \cdot v_v - 0,059 \cdot F \cdot v_v - 2,932 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (24)$$



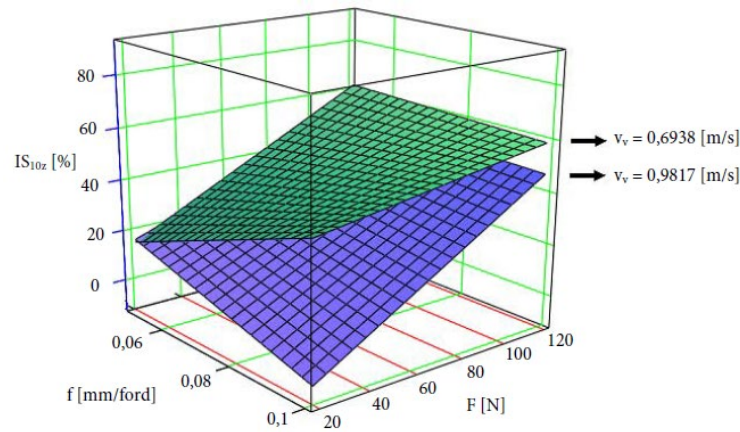
54. ábra. A négyzetes középérték javulási tényezőjének (IS_q) változása a vasalás technológiai paramétereinek függvényében

$$IS_q = 55,478 - 318,433 \cdot f + 0,691 \cdot F - 78,493 \cdot v_v + 1,516 \cdot f \cdot F + 529,767 \cdot f \cdot v_v - 0,165 \cdot F \cdot v_v - 1,862 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (25)$$



55. ábra. A felületi érdesség maximális értékének javulási tényezőjének (IS_z) változása a vasalás technológiai paramétereinek függvényében

$$IS_z = 39,104 + 350,925 \cdot f + 0,542 \cdot F - 71,393 \cdot v_v - 0,016 \cdot f \cdot F - 4,446 \cdot f \cdot v_v + 0,063 \cdot F \cdot v_v - 2,834 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (26)$$



56. ábra. A tízpontmagasság javulási tényezőjének (IS_{10z}) változása a vasalás technológiai paramétereinek függvényében

$$IS_{10z} = -191,042 + 3,766 \cdot 10^{-3} \cdot f + 2,376 \cdot F + 231,441 \cdot v_v - 31,955 \cdot f \cdot F - 4,372 \cdot 10^{-3} \cdot f \cdot v_v - 2,281 \cdot 10^{-3} \cdot F \cdot v_v - 36,554 \cdot f \cdot F \cdot v_v \quad (27)$$

A 3D-s felületérdességi mérőszámainak javulási tényezőit vizsgálva megállapítható, hogy a minimális vasalási sebesség alkalmazása eredményezett kedvezőbb javulási értékeket a maximálissal szemben. Ebben az esetben a nagyobb vasalóerők voltak képesek nagyobb javulást elérni, függetlenül az előtolás mértékétől. Ebből kifolyólag az ajánlott legkedvezőbb paraméterkombináció megegyezik a 2D-s esetben alkalmazottal, amely az energiahatékonyság szempontjából is egy kompromisszumos választás:

- $f = 0,05$ vagy $0,1 \frac{mm}{fordulat}$
- $v_v = 0,6938 \frac{m}{s}$
- $F = 120 N$

Megállapítható tehát a későbbi kutatások tekintetében, hogy ahol nincs szükség feltétlenül 3D-s felületérdesség mérésre, ott a 2D-s mérés is optimális lehet, hiszen hasonló következtetésekre jutottam mindkét dimenzióban.

Összefoglalás

Kutatásomat az energiahatékonyság és a hűtő-kenő folyadékok legfrissebb eredményeinek felderítésével, feldolgozásával kezdtem, így a Diplomamunkám első fejezetében ezeket ismertettem. A következő részekben azon 2D-s, illetve 3D-s felületérdességi mérőszámok jellemzőit, származtatásait vettem sorra, melyeket a későbbiekben felhasználtam a mérések kiértékelése során.

Az ötödik fejezetben bemutatam a próbadarab méreteit, anyagminőségét, melyen a vizsgálatokat végeztem. Ezt követően az esztergálás, illetve a gyémántvasalás technológiai jellemzőinek bemutatását, valamint az érdességméréshez alkalmazott mérőgép és a mérőszoftver ismertetését készítettem el. A Kraljic-mátrixot – melyet az eredmények vizuális ábrázolásához használtam fel –, szintén ebben a fejezetben mutattam be.

A Dolgozat további részeiben a kísérleti eredmények ismertetése következett a Kraljic-mátrixok segítségével. Összehasonlítottam az esztergált és a gyémántvasalt felületek érdességi paramétereit, továbbá meghatároztam a javulási tényezőket is, a különböző technológiai adatok által gyémántvasalt felületekre. A faktoriális kísérlettervezés segítségével ajánlásokat tettem a technológiai paraméterek ideális megválasztására.

Megállapítottam, hogy a gyémántvasalt felület érdessége nagyban függ az előtolás, a vasalási sebesség és a vasalóerő megválasztásától. A legjobb felületérdességet produkáló megmunkálással összevetve a technológiai adatokat beláttam, hogy a nagyobb vasalási sebesség eredményezte a jobb felületminőséget, ami ugyanakkor növelte a megmunkálás teljesítmény-igényét, rontva az energiahatékonyságot.

Ezt követően arra a következtetésre jutottam, hogy a javulási tényezők értékeit fenntartásokkal kell kezelni, értéke ugyanis nagyban függ a kiinduló felület minőségétől (egy érdesebb felületen könnyű nagy javulást elérni, mint egy kevésbé érdesen), kiugró értékek esetén össze kell vetni a kiinduló felületek érdességét is, azokat esetlegesen súlyozó tényezőkkel ellátni.

A Dolgozat 7. fejezetében a faktoriális kísérlettervezés segítségével ideális paraméterkombinációit kerestem a gyémántvasalásnak a felületérdességi mérőszámok vizsgálatával. A javulási tényezőket is figyelembe véve megállapítottam, hogy a felületminőség és az energiahatékonyság szempontjából a minimális előtolás és vasalási sebesség mellett alkalmazott maximális vasalóerő alkalmazása a legideálisabb választás. Ha nem célkitűzés a legjobb felületminőség elérése, akkor – tovább javítva az energiahatékonyságot – alkalmazható a maximális vasalási sebesség, minimális vasalóerő mellett.

Summary

I started my research by exploring and processing the latest results on energy efficiency and cooling fluids, so I presented them in the first chapter of my MSc thesis. In the following sections, I discussed the characteristics and derivations of the 2D and 3D surface roughness metrics that I subsequently used in the evaluation of the measurements.

In the fifth chapter I presented the dimensions and material quality of the test sample on which the tests were carried out. Then, I presented the technological characteristics of the turning and diamond-burnishing processes, as well as the measuring machine and the measuring software used for roughness measurement. The Kraljic matrix, which I used to visualise the results, is also presented in this chapter.

In the rest of the research, the experimental results using the Kraljic matrices were presented. I compared the roughness parameters of the turned and diamond-burnished surfaces and also determined the improvement factors for surfaces diamond-burnished by different process data. Using factorial experimental design, I made recommendations for the ideal choice of technological parameters.

I have found that the roughness of diamond-burnished surfaces is highly dependent on the choice of feed rate, burnishing speed, and burnishing force. By comparing the technological data with the machining that produced the best surface roughness, I found that higher burnishing speeds resulted in better surface quality, but increased the power requirements of the machining, resulting in lower energy efficiency.

Then I concluded that the values of the improvement factors should be treated with caveats, as their value depends to a large extent on the quality of the initial surface (it is easier to achieve a large improvement on a rough surface than on a less rough one), and in case of outliers, the roughness of the initial surfaces should be compared and possibly weighted.

In the final chapter of the research, I used factorial experimental design to find ideal parameter combinations for diamond burnishing by examining surface roughness metrics. Considering the improvement ratio, I found that the application of maximum burnishing force with minimum feed and burnishing speed is the most ideal choice in terms of surface quality and energy efficiency. If the objective is not to achieve the best surface quality, then, to further improve energy efficiency, maximum burnishing speed with minimum burnishing force can be applied.

Felhasznált irodalom

- [1] Huppes, G., Ishikawa, M. (2007). An introduction to quantified eco-efficiency analysis. In: Huppes, G., Ishikawa, M. (eds) Quantified Eco-Efficiency. Eco-Efficiency in Industry and Science, vol 22. Springer, Dordrecht
- [2] Michelsen, O. (2007). Eco-efficiency in redesigned extended supply chains; furniture as an example. In: Huppes, G., Ishikawa, M. (eds) Quantified Eco-Efficiency. Eco-Efficiency in Industry and Science, vol 22. Springer, Dordrecht
- [3] Organisation for Economic Co-operation and Development. Eco-efficiency. Pages 83, 1998
- [4] M. Winter. Eco-efficiency of Grinding Processes and Systems. Springer International Publishing, 2016
- [5] Koskela, M., Vehmas, J. (2012): Defining Eco-efficiency: A Case Study on the Finnish Forest Industry. Business Strategy and the Environment, 21:546–566.
- [6] Li, Wen & Winter, Marius & Kara, Sami & Herrmann, Christoph. (2012). Eco-Efficiency of Manufacturing Processes: A Grinding Case. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 61. 59–62. 10.1016/j.cirp.2012.03.029.
- [7] Tóthné Szita Klára: Az ökohatékonyság növelésének trendjei; Magyar Tudomány, 2007/09 1177. o.
- [8] Gutowski, Timothy. (2010). The efficiency and eco-efficiency of manufacturing. International Journal of Nanomanufacturing. 6. 10.1504/IJNM.2010.034770.
- [9] Peng, Tao & Xu, Xun. (2014). Energy-efficient machining systems: A critical review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 72. 1389-1406. 10.1007/s00170-014-5756-0.
- [10] Bartelmus, Peter & Moll, Stephan & Bringezu, S. & Nowak, S. & Bleischwitz, Raimund. (2004). Translating sustainable development into practice: A 'patchwork' of some new concepts and an introduction to material flows analysis. 10.4337/9781845420574.00011.
- [11] Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens III, W.W. (1972): The limits to growth. Universe Books, New York, USA.]
- [12] Brundtland Commission (1987): Our Common Future. Oxford University Press, Oxford, UK.]

- [13] Schaltegger, S., Sturm, A. (1989): Ökologieinduzierte Entscheidungsprobleme des Managements: Ansatzpunkte zur Ausgestaltung von Instrumenten. WWZ-Discussion Paper No. 8914.
- [14] UN (United Nations) (Ed.) (1992): Earth Summit. Agenda 21. The United Nations Programme of Action from Rio. The final text of agreements negotiated by Governments at the United Nations Conference on Environment and Development (UNCED).
- [15] Allenby, B.R. (1999) Industrial Ecology – Policy Framework and Implementation, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- [16] Herrmann, C. (2010): Ganzheitliches Life Cycle Management - Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen. Springer Verlag, Berlin, Germany.
- [17] Allenby, B.R. (1999) Industrial Ecology – Policy Framework and Implementation, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- [18] Bleischwitz, Raimund & Hennicke, Peter. (2004). Eco-efficiency, regulation and sustainable business: Towards a governance structure for sustainable development. Eco-Efficiency, Regulation and Sustainable Business: Towards a Governance Structure for Sustainable Development. 1-228. 10.4337/9781845420574.00001.
- [19] Li, Wen & Winter, Marius & Kara, Sami & Herrmann, Christoph. (2012). Eco-Efficiency of Manufacturing Processes: A Grinding Case. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 61. 59–62. 10.1016/j.cirp.2012.03.029.
- [20] <https://legszennyezettseg.met.hu/kibocsatas/trendek/uveghazhatasu-gazok> (2022. 11. 16.)
- [21] Domingo, Rosario & Marin, Marta & Claver Gil, Juan & Calvo, Roque. (2015). Selection of Cutting Inserts in Dry Machining for Reducing Energy Consumption and CO2 Emissions. Energies. 8. 13081-13095. 10.3390/en8112362.
- [22] Kicherer, Andreas & Schaltegger, Stefan & Tschochohei, Heinrich & Pozo, Beatriz. (2007). Eco-efficiency. Int. J. LCA. 12. 537-543. 10.1065/lca2007.01.305.
- [23] Kalpakjian, S. (1995) Manufacturing Engineering and Technology, 3rd ed., Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts.
- [24] Gutowski, T.G., Branham, M.S., Dahmus, J.B., Jones, A.J., Thiriez, A. and Sekulic, D.. (2009) ‘A thermodynamic analysis of resources used in manufacturing processes’, Environmental Science and Technology, Vol. 43, pp.1584–1590.

- [25] Porter, M. and C.v.d. Linde (2001), 'Green and Competitive: Ending the Stalemate', in E.v.d. Wubben (ed.), The Dynamics of the Eco-Efficient Economy, Cheltenham, UK and Northampton, MA: Edward Elgar, pp. 33–55.
- [26] Bleischwitz, R. (2003), 'Governance of Eco-Efficiency in Japan – An Institutional Approach', International Asian Quarterly, 34 (1–2), 107–26.
- [27] DeSimone, Livio D. and Popoff, Frank, (2000), Eco-Efficiency: The Business Link to Sustainable Development, vol. 1, 1 ed., The MIT Press
- [28] DIN EN ISO 14040 (2009): Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006). Beuth Verlag, Berlin, Germany.
- [29] DIN EN ISO 14045 (2012): Umweltmanagement - Ökoeffizienzbewertung von Produktsystemen - Prinzipien, Anforderungen und Leitlinien (ISO 14045:2012). Beuth Verlag, Berlin, Germany.
- [30] Heijungs, R. (2007). From thermodynamic efficiency to eco-efficiency. In: Huppes, G., Ishikawa, M. (eds) Quantified Eco-Efficiency. Eco-Efficiency in Industry and Science, vol 22. Springer, Dordrecht
- [31] Dudás Illés – Friedhelm Lierath – Varga Gyula: Környezetbarát technológiák a gépgyártásban; Budapest, 2010, Műszaki Könyvkiadó
- [32] Dudás Illés: Gépgyártástechnológia II. Forgácsoláselmélet, a technológiai tervezés alapjai; Budapest, 2011, Műszaki Könyvkiadó 164-167. oldal
- [33] Biró Szabolcs– Csuka Sándor- dr. Sipos Sándor: A forgácsolási folyamat vizsgálata minimálkenéskor, Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek, XIII. évf. 2008/1. p. 51-54.
- [34] Peng, Tao & Xu, Xun. (2014). Energy-efficient machining systems: A critical review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 72. 1389-1406. 10.1007/s00170-014-5756-0.
- [35] Sujan Debnath, Moola Mohan Reddy, Qua Sok Yi. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review, Journal of Cleaner Production, Volume 83, 2014, Pages 33-47, ISSN 0959-6526
- [36] <http://www.powerin.hu/kenoanyag-adagolas-aerosol-booster-rendszerrel/> (2022. 11. 17.)
- [37] https://perfor.hu/erdesseg_67 (2022. 10. 16.)
- [38] <https://www.technisches-zeichnen.net/technisches-zeichnen/diverses/rauheitswerte.php> (2022. 10. 17.)

- [39] Szalóki, István és Sipos, Sándor és Viharos, Zsolt János (2016) Szintaktikus fémhabok marással megmunkált felületi struktúrájának elemzése. In: Proceedings of 8th International Engineering Symposium at Bánki (IESB 2016). Óbudai Egyetem, Budapest, pp. 1-21. ISBN 978-615-5460-95-1
- [40] Kubatova, D. & Melichar, M. (2019). Roughness Evaluation Using Abbott-Firestone Curve Parameters, Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, pp.0467-0475, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.063
- [41] Blunt, Liam & Jiang, Xinnian. (2003). Advanced Techniques for Assessment Surface Topography: Development of a Basis for 3D Surface Texture Standards "Surfstand". 1-355.
- [42] <https://www.olympus-ims.com/en/> (2022. 10. 15.)
- [43] Smolnicki Szilárd: Ökohatékonysági elemzés különböző gépipari megmunkálások esetén TDK dolgozat, konzulens Dr. Varga Gyula, Miskolc, 2022
- [44] <https://www.inoxservice.hu/upload/inline/adatlapok/durvalemezek/1.4307%20-%20ADATLAP.pdf> (2022. 10. 11)
- [45] Varga, Gyula & Ferencsik, Viktória. (2015). Gyémántvasalt munkadarab-felületek felületi érdességének 3D-s vizsgálata. 10.26649/musci.2015.060.
- [46] https://www.altimet.fr/?page_id=236&lang=en (2020. 10. 15.)
- [47] Kraljic, Peter. (1983). Purchasing Must Become Supply Management. Harvard Business Review. 61.

Mellékletek

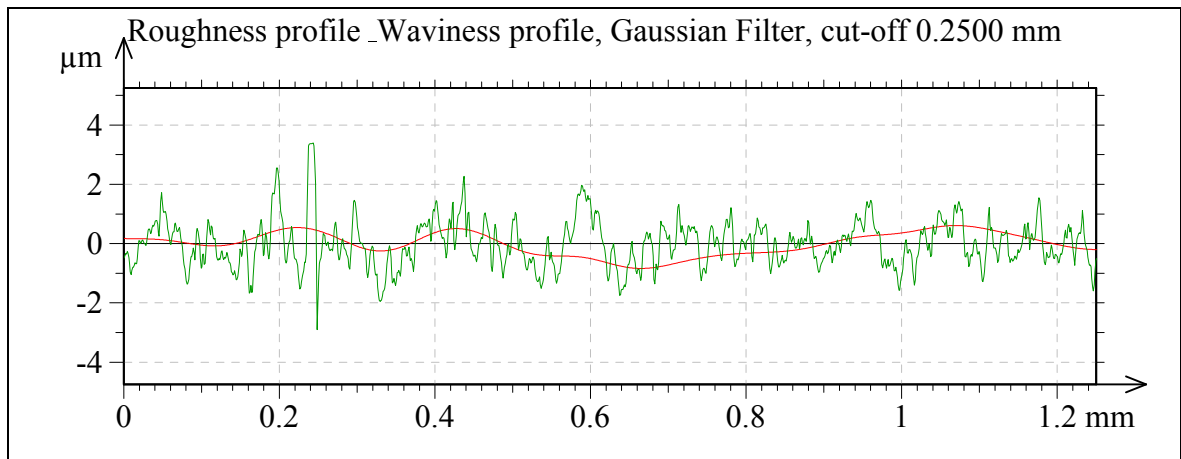
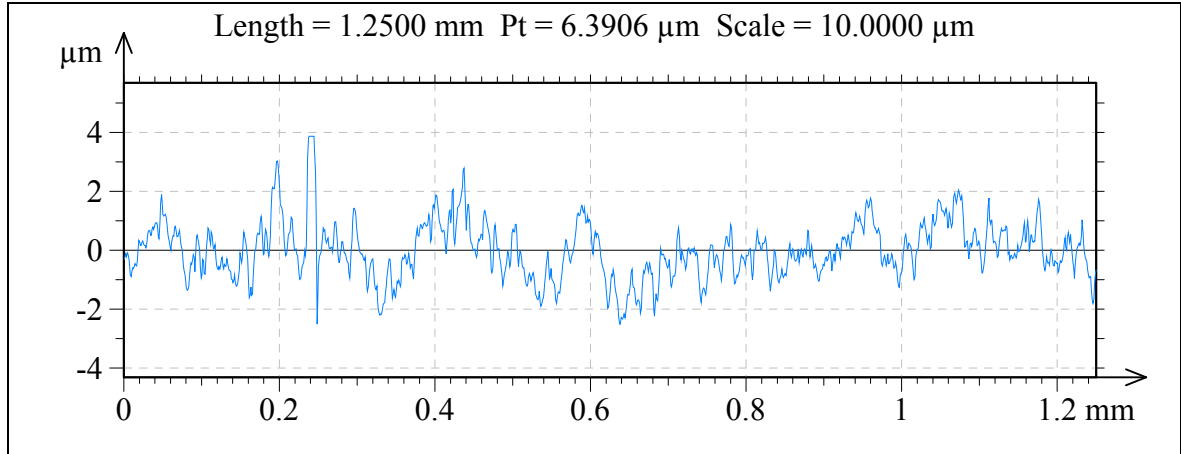
1. Jegyzőkönyv minta 2D-s felületérdességi mérésről (1 oldal)
2. Jegyzőkönyv minta 3D-s felületérdességi mérésről (1 oldal)

1. számú melléklet

Jegyzőkönyv minta 2D-s felületérdességi mérésről

JEGYZŐKÖNYV

1. Munkadarab, 1. szelvény, A helyzet Vasalás előtt



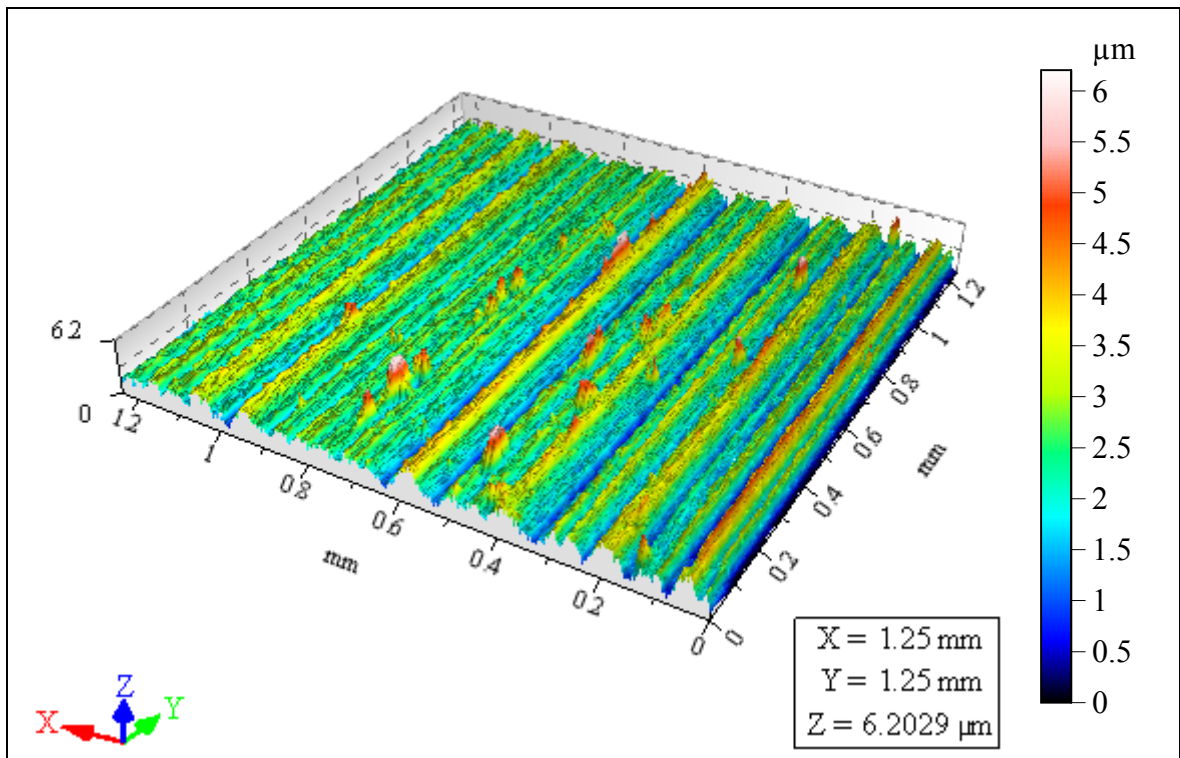
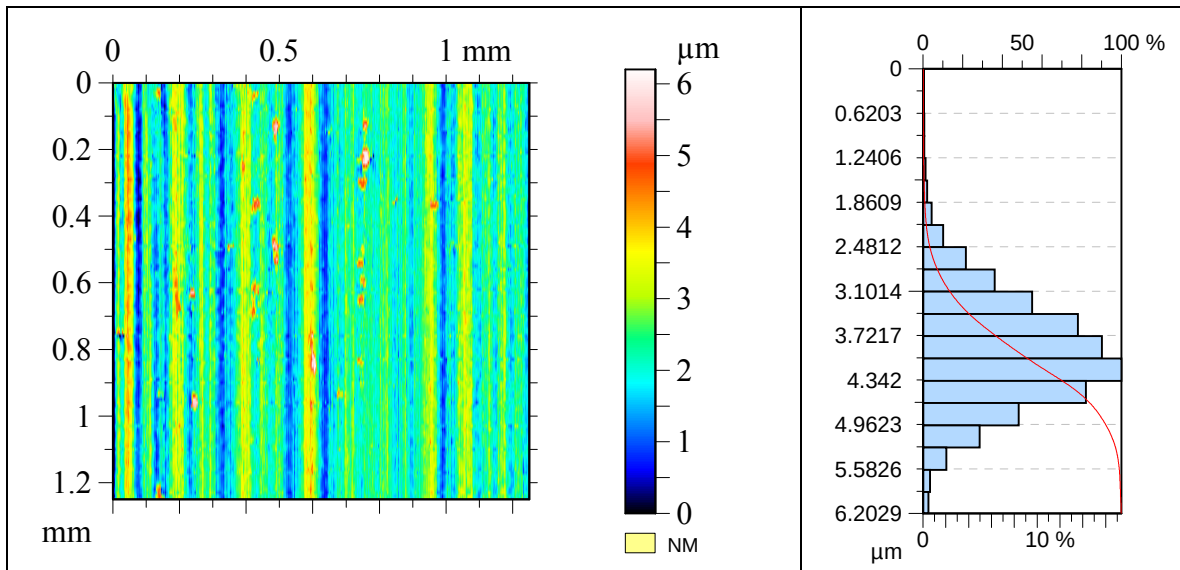
Ra	0.6097	μm	Arithmetic Mean Deviation of the roughness profile.
Rq	0.7758	μm	Root-Mean-Square (RMS) Deviation of the roughness profile.
Rz	4.0815	μm	Maximum Height of roughness profile.
Rt	6.2899	μm	Total Height of roughness profile.
Rk	1.8870	μm	Kernel Roughness Depth.
Rpk	1.1250	μm	Reduced Peak Height.
Rvk	0.6418	μm	Reduced Valley Depth.

2. számú melléklet

Jegyzőkönyv minta 3D-s felületérdességi mérésről

JEGYZŐKÖNYV

1. Munkadarab, 1. szelvény, A helyzet Vasalás előtt



Sa	0.5991	μm	Arithmetic mean height
Sq	0.7633	μm	Root mean square height
Sz	6.2029	μm	Maximum height
S10z	4.2338	μm	Ten point height
Sk	1.7791	μm	Core roughness depth
Spk	0.8233	μm	Reduced summit height
Svk	0.6237	μm	Reduced valley depth