

Óbudai Egyetem

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

Gépszerkezettani és Biztonságtechnikai Intézet



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

AZ M- ÉS MOTIF RENDSZERŰ PARAMÉTEREK KAPCSOLATA

Szerző: Lipusz Gergely Levente
gépészmérnök BSc. szak, II. évf.

Konzulens: Dr. Horváth Sándor
egyetemi docens

Budapest, 2014.

1. Bevezetés, célkitűzés

A felületi érdességmérés a gépiparban fontos szerepet tölt be, mivel „a felület mikrogeometriájának, mikrotopográfiájának mérése nem kizárólag a gyártástechnológiai folyamatok minősítésére ad alkalmat, hanem fontos információkat nyújt az adott felület működési, tribológiai tulajdonságairól is” [1]. A probléma, amelyre a dolgozat megoldást kínál egyfelől az, hogy a méréseket különböző elven működő berendezésekkel végzik, a nagyobb cégeknek nagy tudású gépeik vannak, amelyek üzemeltetéséhez és karbantartásához komoly pénzügyi háttér szükséges. Azonban a kisebb vállalatok tulajdonában többnyire kézi, ill. közepes hatékonyságú mérőberendezések vannak, és ezek természetesen kisebb tudással rendelkeznek.

A probléma másik oldala, hogy az autóiparban a hagyományos M rendszerű paraméterek mellett egyre nagyobb teret kapnak a motif rendszerbeli paraméterek is, így az alkatrész rajzokon egyre többször jelennek meg utóbbiak. Mivel az a beszállító nyer el egy-egy megrendelést, aki a leggyorsabban képes alkalmazkodni és megfelelni az adott előírásoknak, a kisebb tudású mérőberendezésekkel rendelkező beszállítók komoly hátrányba kerülhetnek, annak ellenére, hogy a gyártástechnológiai elvárásoknak megfelelnek.

A TDK dolgozat célja ennek a problémának a megoldása: az M rendszerű és motif rendszerbeli paraméterek matematikai vizsgálata mellett az esetleges paraméterkapcsolatok feltárása, kiértékelése, ismertetése.

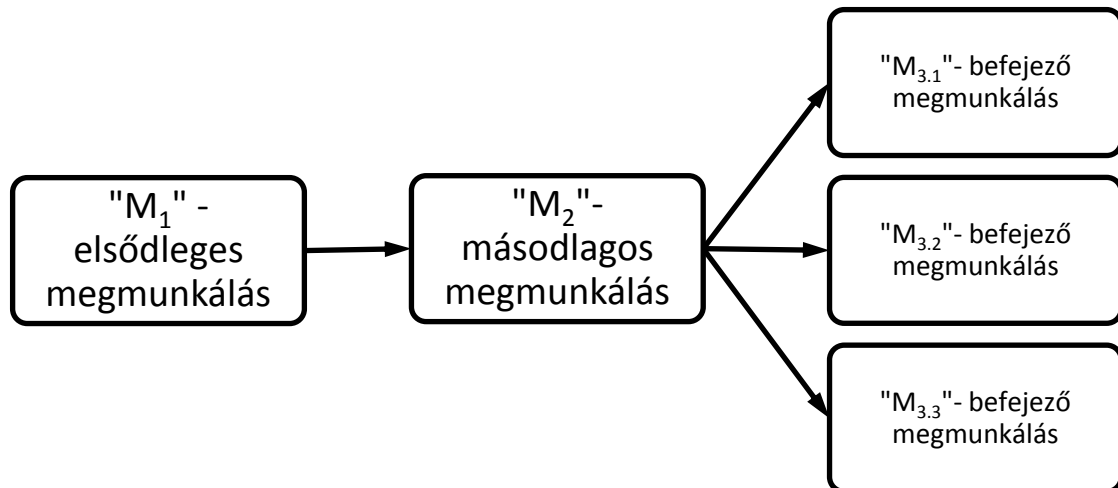
A kutatás során az alábbi fontos kérdések kerestem a választ:

- Van-e az egyes paraméterek között kapcsolat, és ha igen, akkor milyen mértékben korrelálnak egymással? (R^2)
- Milyen (lehetőleg egyszerű) matematikai összefüggéssel írhatóak fel ezek a kapcsolatok?

2. A kutatás módszere, menete

A dolgozatban részletesen kifejtett vizsgálat egy magyarországi autóipari beszállító felkérésére zajlott le 2013 nyarán. A vizsgált alkatrészeket a vállalat biztosította. A céggel kötött titoktartási szerződés miatt a TDK dolgozat a termékről és a gyártási technológiáról nem közölhet részleteket, ezért ezeket betűkódokkal jelöltem az alábbiakban leírtak szerint.

A vizsgált munkadarabok öt különböző megmunkálási fázisból lettek kiválasztva (M_1 , M_2 , $M_{3,1}$, $M_{3,2}$, $M_{3,3}$) [1. ábra], és megmunkálási fázisonként húsz került vizsgálat alá (1., 2., ... 19., 20.). A darabok két felületét („A” és „B”) három-három alkalommal mértem le (p_1, p_2, p_3). A mérésnél Mahr-gépen PTK vontatóra szerelt MFW-250 tapintót használtam, amelynek csúcshölyge 90° , csúcshölyge $5\mu\text{m}$. Ez összesen 600 mérést jelent ($5 \times 20 \times 2 \times 3$). A mérési hosszak az „A” felületen 5,6 mm és a „B” felületen 2,4 mm voltak. A cut-off 0,8mm volt. A „B” felület hengeres felület, így másodfokú polinóm szűrőt is alkalmaztam, így a két felületről gyűjtött adatokat külön-külön kellett feldolgozni. Az $M_{3,3}$ befejező megmunkálás az $M_{3,1}$ és $M_{3,2}$ befejező megmunkálások kombinációja. Felhasznált egyéb eszközök: satu, MarSurf XCR20 szoftver.



[1.ábra]

2.1. A munkadarabok, ill. a mérések jelölési rendszere

A titoktartási kötelezettségeket figyelembe véve az azonosíthatóság érdekében az egyes felületmérések jelölése:

Megmunkálási fázis_Alkatrész sorszáma_Felület_Profil sorszáma

Például az M_{3.1}_14_A_p3 jelölés jelentése:

Az 1. befejező megmunkálási fázisból származó, 14. sorszámú, a munkadarab „A” felületén mért 3. érdességi profil.

2.2. A vizsgált paraméterek

Vizsgálataim a következő paraméterekre terjedt ki:

- Az M rendszerű paraméterek:
 - Átlagos érdesség (R_a)
 - Négyzetes középérték (R_q)
 - Érdesség magasság (R_z)
 - Maximális egyenetlenség (R_t)
 - Maximális csúcsmagasság (R_p)
 - Maximális völgymélység (R_v)
 - Közepes hullámhossz (R_{Sm})
 - Lokális maximumok átlagos távolsága (R_S)
 - Ferdeségi mérőszám (R_{Sk})
 - Lapultsági mérőszám (R_{Ku})
 - Hullámossági profil közepes eltérése (W_a)

- Hullámossági profil maximuma (W_t)
- Hullámossági profil legnagyobb magassága a középvonaltól (W_p)
- Hullámossági profil legnagyobb mélysége (W_v)
- Hullámossági profil közepes hullámhossza (W_{sm})
- Hullámossági profil ferdeségi mérőszáma (W_{sk})
- Hullámossági profil lapultsági mérőszáma (W_{ku})
- A Motif rendszerű paraméterek:
 - Érdességi motif átlagos magassága (R)
 - Érdességi motif hossz (AR)
 - Érdességi motif maximális magassága (R_x)
 - Hullámossági motif közepes magassága (W)
 - Hullámossági motif közepes osztása (AW)
 - Hullámossági motif maximális hullámmélység (W_x)

Az egyes paraméterek definícióit a 3.fejezet tárgyalja.

2.3. Az vizsgált paraméter párok

A paraméterek származtatása alapján kiválasztottam a két rendszerben definiált hasonló tartalmú paramétereket, melyek között esetleges korreláció mutatható ki.

- R_a - R
- R_q - R
- R_z - R
- R_v - R
- R_p - R
- R_t - R_x
- R_{sm} - AR
- R_s - AR
- W_a - W
- W_p - W
- W_v - W
- W_t - W_x
- W_{sm} - AW
- R_{sk} - R_{ku}
- R_z - R_s
- R_a - R_v
- W_a - W_t

3. Az M - és a motif rendszerű paraméterek

Ebben a fejezetben a vizsgálat tárgyát képező paraméterek definícióját foglalom össze a vonatkozó szabványok alapján.

3.1. Az M rendszerű paraméterek

Az M (középvonalas) rendszerű paraméterekre vonatkozó szabvány az EN ISO 4287.

3.1.1. Átlagos érdesség (R_a)

Az R_a átlagos érdesség a tényleges érdességi profil és a középvonal közti távolságok abszolút értékeinek átlaga.

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i|$$

3.1.2. Négyzetes középérték (R_q)

Az R_q négyzetes középérték (simasági mérőszám) a tényleges érdességi profil és a középvonal közti távolságok négyzetes középértéke.

$$R_q = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_i)^2}$$

3.1.3. Érdesség magasság (R_z)

Az R_z érdességi magasság az alaphosszokon értelmezett érdességi profil legmagasabb csúcsa és a középvonal közti távolságok, valamint legmélyebb völgy és középvonal közti távolságok összegének átlaga a kiértékelési hosszon.

$$R_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_{pi} + z_{vi})$$

3.1.4. Maximális egyenetlenség (R_t)

Az R_t maximális egyenetlenség a kiértékelési hosszon az érdességi profil legmagasabb csúcsa és a középvonal közti távolság és a legmélyebb völgy és középvonal közti távolság összege.

$$R_t = z_p^{max} + z_v^{min}$$

3.1.5. Maximális csúcsmagasság (R_p)

Az R_p maximális csúcsmagasság az alaphosszokon értelmezett érdességi profil legmagasabb csúcsa és a középvonal közti távolságok átlaga a kiértékelési hosszon.

$$R_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{pi}$$

3.1.6. Maximális völgymélység (R_v)

Az R_v maximális völgymélység az alaphosszokon értelmezett érdességi profil legmélyebb völgye és a középvonal közti távolságok átlaga a kiértékelési hosszön.

$$R_v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_{vi}$$

3.1.7. Profilelemek közepes hullámhossza (R_{Sm})

Az R_{Sm} profilelemek közepes hullámhossza a periodikus érdességi profil esetén alkalmas a jellemző hullámhossz meghatározására.

$$R_{Sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{si}$$

3.1.8. Lokális maximumok átlagos távolsága (R_s)

Az R_s lokális maximumok átlagos távolsága a kiértékelési hosszön az érdességi profil csúcsok egymáshoz képesti távolságának átlaga.

$$R_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^i x_i$$

3.1.9. Ferdeségi mérőszám (R_{Sk})

Az R_{Sk} ferdeségi mérőszám az érdességi profil magasságeloszlás-függvényének alakját a középvonalhoz viszonyított aszimmetriáját jellemzi.

$$R_{Sk} = \frac{1}{R_q^3} \left(\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |z^3(x)| dx \right)$$

3.1.10. Lapultsági mérőszám (R_{Ku})

Az R_{Ku} lapultsági mérőszám az érdességi profil magasságeloszlás csúcsosságát, azaz szórását jellemzi.

$$R_{Ku} = \frac{1}{R_q^4} \left(\frac{1}{lr} \int_0^{lr} z^4(x) dx \right)$$

3.1.11. Hullámossági profil közepes eltérése (W_a)

A W_a hullámossági profil közepes eltérése a középvonal és a hullámossági profil távolságok átlaga.

$$W_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx$$

3.1.12. Hullámossági profil maximuma (W_t)

A W_t hullámossági profil maximuma a kiértékelési hosszban a hullámossági profil legmagasabb pontja és középvonal közti távolság és a legmélyebb pontja és középvonal közti távolság összege.

$$W_t = z_p^{max} + z_v^{min}$$

3.1.13. Hullámossági profil legnagyobb magassága a középvonaltól (W_p)

A W_p hullámossági profil legnagyobb magassága az alaphosszokon értelmezett hullámossági profil legmagasabb pontja és a középvonal közti távolságok átlaga a kiértékelési hosszban.

$$W_p = \frac{1}{l} \int_0^l z_p(x) dx$$

3.1.14. Hullámossági profil legnagyobb mélysége (W_v)

A W_v hullámossági profil legnagyobb mélysége az alaphosszokon értelmezett hullámossági profil legmélyebb pontja és a középvonal közti távolságok átlaga a kiértékelési hosszban.

$$W_v = \frac{1}{l} \int_0^l z_v(x) dx$$

3.1.15. Hullámossági profil közepes hullámhossza (W_{sm})

A W_{sm} hullámossági profil közepes hullámhossza a periodikus hullámossági profil esetén alkalmas a jellemző hullámhossz meghatározására.

$$W_{sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{si}$$

3.1.16. Hullámossági profil ferdeségi mérőszáma (W_{sk})

A W_{sk} hullámossági profil ferdeségi mérőszáma a hullámossági profil magasságeloszlás-függvényének alakját a középvonalhoz viszonyított aszimmetriáját jellemzi.

$$W_{sk} = \frac{1}{W_q^3} \left(\frac{1}{lr} \int_0^{lr} |z^3(x)| dx \right)$$

3.1.17. Hullámossági profil lapultsági mérőszáma (W_{Ku})

A W_{Ku} hullámossági profil lapultsági mérőszám a hullámossági profil magasságeloszlás szórását jellemzi.

$$W_{sk} = \frac{1}{W_q^4} \left(\frac{1}{lr} \int_0^{lr} z^4(x) dx \right)$$

3.2. A motíf rendszerű paraméterek

A motíf rendszerű paraméterekre vonatkozó szabvány az EN ISO 12085. Motífnak a profil két szomszédos csúcsa közötti profil szakaszt nevezzük.

3.2.1. Érdességi motíf átlagos magassága (R)

Az R érdességi motíf átlagos magassága a motífnak közepes magasságának átlaga.

$$R = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m H_j \quad m = 2n \quad VAGY \quad R = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} R_i$$

3.2.2. Érdességi motíf hossz (AR)

Az AR érdességi motíf hossz a motífnak szélességének átlaga.

$$AR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AR_i$$

3.2.3. Érdességi motíf maximális magassága (R_x)

Az R_x érdességi motífnak maximális magassága az érdességi motífnak magasságai közül a legnagyobb.

$$R_x = R_i^{max}$$

3.2.4. Hullámossági motíf közepes magassága (W)

A W hullámossági motíf közepes magassága a hullámossági motífnak mélységének átlaga.

$$W = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{2n} W_i$$

3.2.5. Hullámossági motíf közepes osztása (AW)

Az AW hullámossági motíf közepes osztása a hullámossági motífnak profilirányú méretének átlaga.

$$AW = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n AW_i$$

3.2.6. Hullámossági motif maximális hullámmélység (W_x)

A W_x maximális hullámmélység a hullámossági motifok mélységei közül a legnagyobb.

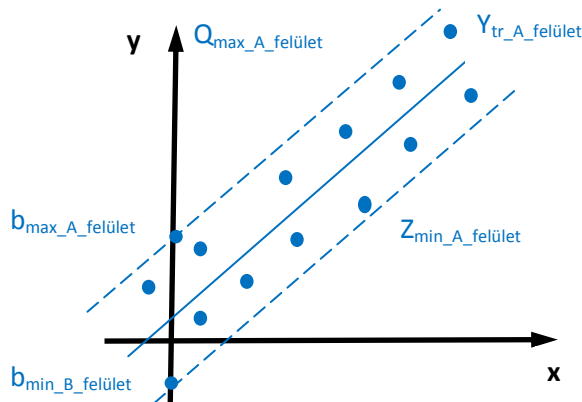
$$W_x = W_i^{max}$$

4. A ponthalmazt határoló burkoló egyenesek egyenletének általános levezetése

A kiértékelés a jól ismert R_a - R_z paraméterek közötti megfeleltetéshez hasonló elven alapszik. M-rendszerű paraméterekhez motif paramétereket rendelünk, (Ez lesz a modell, azaz valamely (pl. fizikai) törvényszerűség értelmében az x független változó bizonyos értékénél a függő változó értéke $Y = \varphi(x)$), amelyek pont-pont (x, y) koordináta rendszerekben kerültek ábrázolásra. Az ábrázolt ponthalmazt regresszió analízissel vizsgáltam. Mivel fontos szempont volt az „egyszerűsége” való törekvés, ezért csak ismétlés nélküli egyváltozós lineáris regressziót alkalmaztam, ahol a $\sigma_{y_i}^2$ konstans volt.

A kék színnel jelölt pontok az „A” felületen, a piros színnel jelölt pontok pedig a „B” felületen végzett mérésekből származnak.

4.1.1. Az „A” felület



[2.ábra]

Az „A” felületről származó pontok trendvonal:

$$Y_{tr_A_felület} = m_{tr_A_felület} \cdot x + b_{tr_A_felület}$$

Az „A” felületről származó ponthalmaz burkoló egyenseinek meghatározásához az $Y_{tr_A_felület}$ meredekségét felhasználjuk fel.

$$Q_{max_A_felület} = m_{tr_A_felület} \cdot X + b_{max_A_felület}$$

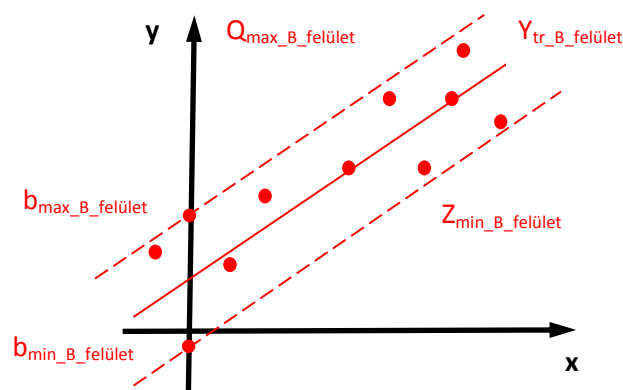
$$Z_{min_A_felület} = m_{tr_A_felület} \cdot X + b_{min_A_felület}$$

A $b_{\max_A_felület}$ és a $b_{\min_A_felület}$ az egyetlen ismeretlen. Így az $y = m \cdot x + b$ egyenletet b -re rendezve egy kétváltozós egyenletet kapunk.

$$b(X; Y) = Y - m_{tr_A_felület} \cdot X$$

Az egyenletekbe behelyettesítjük az $(X_1; Y_1), (X_2; Y_2) \dots (X_{n-1}; Y_{n-1}), (X_n; Y_n)$ értékeket, majd a kapott „ b ” értékek között megkeressük a legkisebbet és a legnagyobbat ($b_{\max_A_felület}$, $b_{\min_A_felület}$). Ezeket visszahelyettesítve a megfelelő „ A ” felületi burkoló egyenesek egyenleteibe a pontthalmaz területe leszűkíthetővé válik.

4.1.2. A „B” felület



[3.ábra]

A „B” felületről származó pontok trendvonala:

$$Y_{tr_B_felület} = m_{tr_B_felület} \cdot x + b_{tr_B_felület}$$

A „B” felületről származó pontthalmaz burkoló egyeneseinek meghatározásához a $Y_{tr_B_felület}$ meredekségét felhasználjuk fel.

$$Q_{\max_B_felület} = m_{tr_B_felület} \cdot X + b_{\max_B_felület}$$

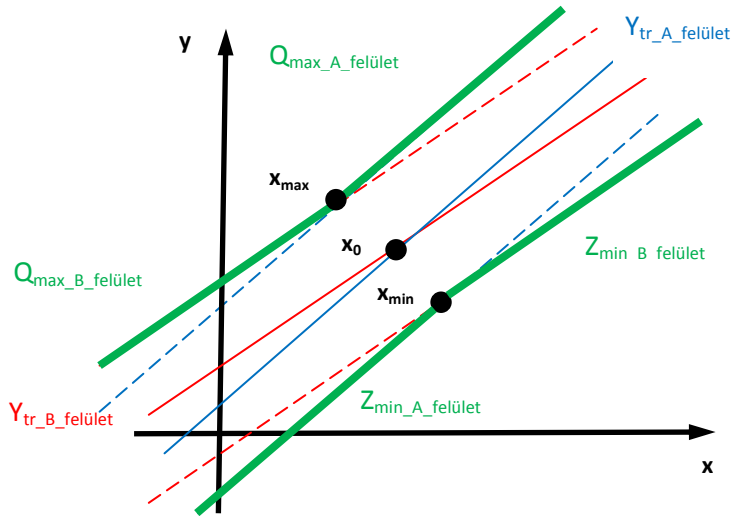
$$Z_{\min_B_felület} = m_{tr_B_felület} \cdot X + b_{\min_B_felület}$$

A $b_{\max_B_felület}$ és a $b_{\min_B_felület}$ az egyetlen ismeretlen. Így az $y = m \cdot x + b$ egyenletet b -re rendezve egy kétváltozós egyenletet kapunk.

$$b(X; Y) = Y - m_{tr_B_felület} \cdot X$$

Az egyenletekbe behelyettesítjük az $(X_1; Y_1), (X_2; Y_2) \dots (X_{n-1}; Y_{n-1}), (X_n; Y_n)$ értékeket, majd a kapott „ b ” értékek között megkeressük a legkisebbet és a legnagyobbat ($b_{\max_B_felület}$, $b_{\min_B_felület}$). Ezeket visszahelyettesítve a megfelelő „B” felületi burkoló egyenesek egyenleteibe a pontthalmaz területe leszűkíthetővé válik.

4.2. „A” és „B” felületek egyenesei közös koordinátarendszerben



[4.ábra]

4.2.1. Metszéspontok

Trendvonalak metszéspontja (X_0):

$$Y_{tr_A_felület} = Y_{tr_B_felület}$$

$$m_{tr_A_felület} \cdot x + b_{tr_A_felület} = m_{tr_B_felület} \cdot x + b_{tr_B_felület}$$

$$X_0 = \frac{b_{tr_B_felület} - b_{tr_A_felület}}{m_{tr_A_felület} - m_{tr_B_felület}}$$

A $Q_{max_A_felület}$ és a $Q_{max_B_felület}$ felső burkoló egyenesek eredője a Q_{max} függvény, amely az alábbi metszéspontban (X_{max}) bontható szét az előbb említett két egyenesre:

$$Q_{max_A_felület} = Q_{max_B_felület}$$

$$m_{tr_A_felület} \cdot X + b_{max_A_felület} = m_{tr_B_felület} \cdot X + b_{max_B_felület}$$

$$X_{max} = \frac{b_{max_B_felület} - b_{max_A_felület}}{m_{tr_A_felület} - m_{tr_B_felület}}$$

A $Z_{min_A_felület}$ és a $Z_{min_B_felület}$ alsó burkoló egyenesek eredője a Z_{min} függvény, amely az alábbi metszéspontban (X_{min}) bontható szét az előbb említett két egyenesre::

$$Z_{min_A_felület} = Z_{min_B_felület}$$

$$m_{tr_A_felület} \cdot X + b_{min_A_felület} = m_{tr_B_felület} \cdot X + b_{min_B_felület}$$

$$X_{min} = \frac{b_{min_B_felület} - b_{min_A_felület}}{m_{tr_A_felület} - m_{tr_B_felület}}$$

4.2.2. A burkoló egyenesek helyzete

$Q_{\max}$:

- Ha a vizsgálati érték (X) kisebb, mint a metszéspont értéke ($X_{\max}$), akkor az alábbi két egyenesbe helyettesítünk be (azaz ha $X < X_{\max}$):

$$Q_{\max_A_felület}(X) = m_{tr_A_felület} \cdot X + b_{\max_A_felület}$$

$$Q_{\max_B_felület}(X) = m_{tr_B_felület} \cdot X + b_{\max_B_felület}$$

Ebben az intervallumban az $Q_{\max_B_felület}$ egyenes pontjai adnak nagyobb értéket, tehát ezzel az egyenessel felülről behatárolható a pontthalmaz.

- Ha a vizsgálati érték (X) nagyobb, mint a metszéspont értéke ($X_{\max}$), akkor az alábbi két egyenesbe helyettesítünk be (azaz ha $X > X_{\max}$):

$$Q_{\max_A_felület}(X) = m_{tr_A_felület} \cdot X + b_{\max_A_felület}$$

$$Q_{\max_B_felület}(X) = m_{tr_B_felület} \cdot X + b_{\max_B_felület}$$

Ebben az intervallumban az $Q_{\max_A_felület}$ egyenes pontjai adnak nagyobb értéket, tehát ezzel az egyenessel felülről behatárolható a pontthalmaz.

$Z_{\min}$:

- Ha a vizsgálati érték (X) kisebb, mint a metszéspont értéke ($X_{\min}$), akkor az alábbi két egyenesbe helyettesítünk be (azaz ha $X < X_{\min}$):

$$Z_{\min_A_felület}(X) = m_{tr_A_felület} \cdot X + b_{\min_A_felület}$$

$$Z_{\min_B_felület}(X) = m_{tr_B_felület} \cdot X + b_{\min_B_felület}$$

Ebben az intervallumban az $Z_{\min_A_felület}$ egyenes pontjai adnak kisebb értéket, tehát ezzel az egyenessel alulról behatárolható a pontthalmaz.

- Ha a vizsgálati érték (X) nagyobb, mint a metszéspont értéke ($X_{\min}$), akkor az alábbi két egyenesbe helyettesítünk be (azaz ha $X > X_{\min}$):

$$Z_{\min_A_felület}(X) = m_{tr_A_felület} \cdot X + b_{\min_A_felület}$$

$$Z_{\min_B_felület}(X) = m_{tr_B_felület} \cdot X + b_{\min_B_felület}$$

Ebben az intervallumban az $Z_{\min_B_felület}$ egyenes pontjai adnak kisebb értéket, tehát ezzel az egyenessel alulról behatárolható a pontthalmaz.

5. Mérési eredmények

A már említett paraméterpárokat pont (x,y) diagramban ábrázoltam, és az alábbi kapcsolatszintekbe soroltam be.

$1 \leq R^2 < 0,8$	jó kapcsolat
$0,8 \leq R^2 < 0,6$	közepes kapcsolat
$0,6 \leq R^2 < 0$	gyenge kapcsolat

Az első lépésben a külső hatások által okozott mérési hibák kiszűrése érdekében olyan pontokat (paraméterek értékeit) kerestem, amelyek jelentősen eltérnek a többitől, és az értékek ugyanahhoz az érdesség profilhoz vezethetők vissza. A 600-ból 10 profil tűnt hibásnak, így ezeket figyelmen kívül hagytam a további elemzések során.

A második lépésben a közepes és a jó szintek határán lévő paraméterkapcsolatokat tovább vizsgáltam az esetleges jobb kapcsolat elérése céljából. Például az M_1 elsődleges megmunkálás formaadó technológia, amely igen durva felületet ad eredményül a kész termékekhez képest. Mivel az ebből a megmunkálási fázisból kikerült termék nem eladásra szánt, hanem további megmunkálásoknak vetik alá, ezért ezeket az értékeket figyelmen kívül hagyhatjuk a diagramok vizsgálata során. Valamint, ahogyan Horváth et al. kimutatták [4], az $M_{3.3}$ befejező megmunkálás rosszabb, durvább felületet ad, mint az M_2 másodlagos megmunkálás, tehát erről a felületekről származó adatok nem kerültek bele a további elemzésekbe, amivel csökkenthető a koordináta-rendszerben a mérési eredményeket reprezentáló pontthalmaz területe.

Megjegyzés: A szűrés során a regresszió egyenestől távol eső pontok koordinátáit [$P_i(\text{motif paraméter}; M \text{ paraméter})$] megvizsgálva az látható, hogy a kiugrásokat az esetek többségében az M-rendszerű paraméterek okozták. Ez nem is meglepő, mert az M-rendszerű paraméterekkel jobban kimutathatók az „egyedi hibák”, míg a motif rendszerbeli paraméterekkel kevésbé.

Az alábbi táblázat a vizsgált paraméterpárok kapcsolatát foglalja össze. A továbbiakban a jó kapcsolattal rendelkező paraméterpárokat mutatom be.

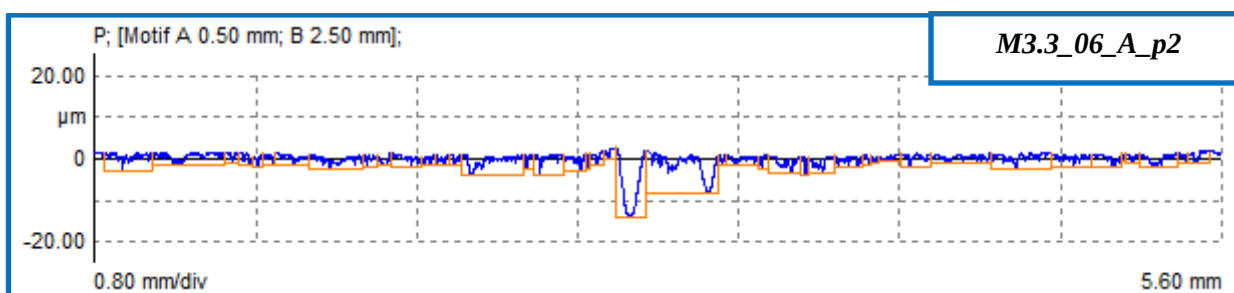
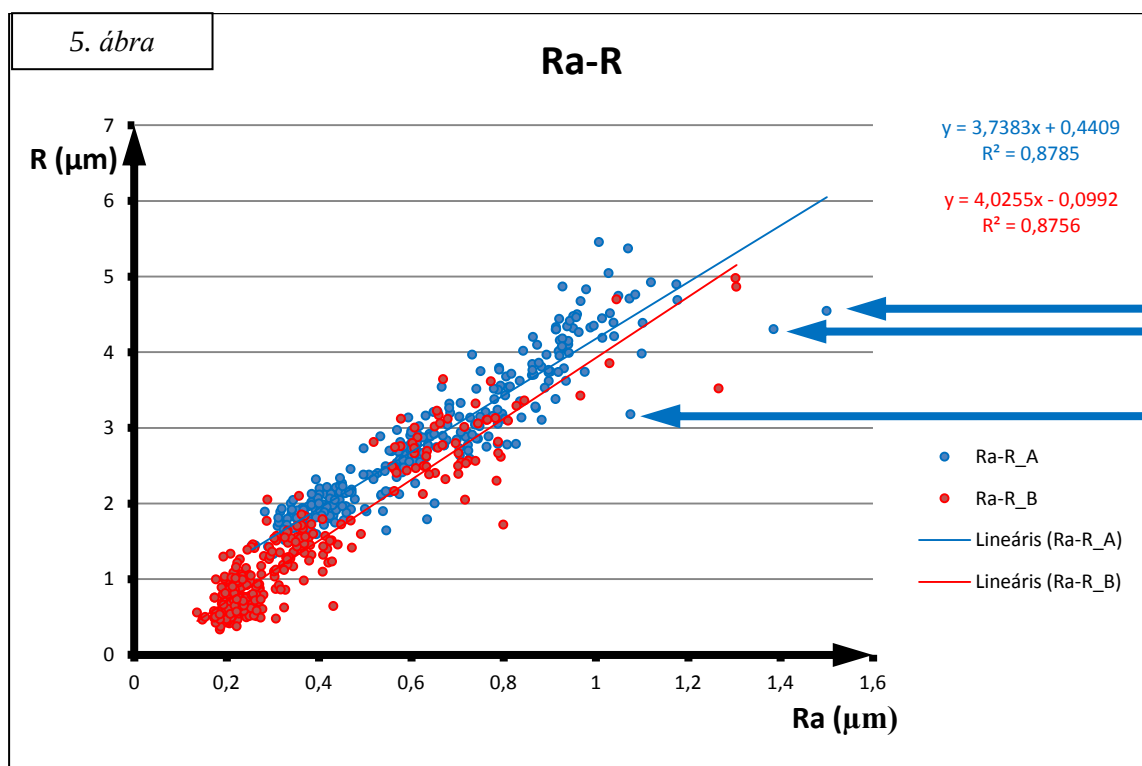
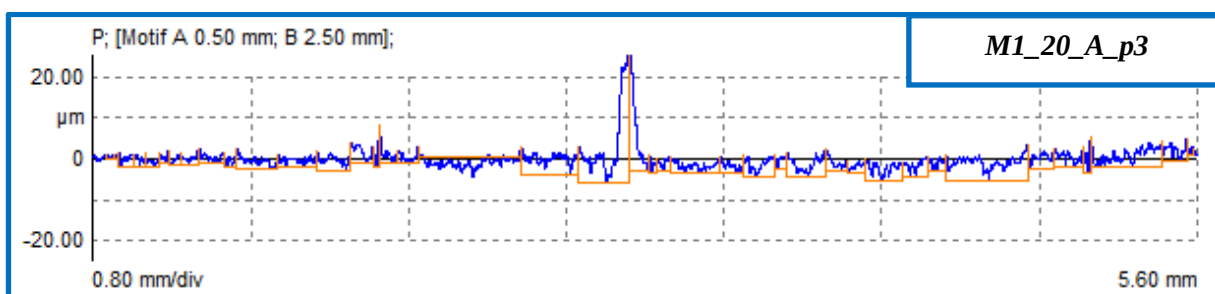
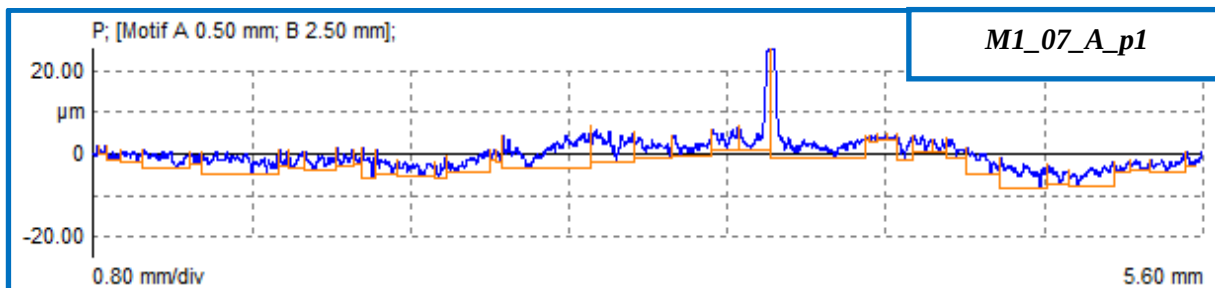
Diagram név	Eredeti R ²	Ábra kód	1. szűrés	Ábra kód	Kapcsolat	2. szűrés	Ábra kód	Kapcsolat	Megjegyzés
Ra-R	0,8785	2.	0,9045	3.		-	-		
	0,8756		0,8947			-			
Rq-R	0,6963	4.	0,8289	5.		-	-		
	0,8358		0,8959			-			
Rz-R	0,8167	6.	0,8384	7.	További vizsgálat	0,8665	8.		M _{3,3} darabok figyelmen kívül hagyása.
	0,7898		0,8152			0,8599			
Rv-R	0,4276	-	0,4270	-			-		
	0,6192		0,6502						
Rp-R	0,6702	9.	0,7260	10.	További vizsgálat	0,8327	11.		M _{3,3} darabok figyelmen kívül hagyása.
	0,6587		0,7795			0,8235			
Rt-Rx	0,7473	-	0,6454	-		-	-		
	0,5742		0,5246			-			
RSm-AR	0,5354	-	0,5706	-		-	-		
	0,1979		0,2109			-			
RS-AR	0,2755	-	0,3561	-		-	-		
	0,4039		0,4052			-			
Wa-W	0,6148	-	0,6115	-		-	-		
	-		-			-			
Wp-W	0,6821	-	0,6747	-		-	-		
	-		-			-			
Wv-W	0,5800	-	0,5827	-		-	-		
	-		-			-			
Wt-Wx	0,6165	12.	0,5766	13.		-	-		Felsőhatár meghatározás ¹
	-		-			-			
WSm-Aw	0,0018	-	0,0013	-		-	-		
	-		-			-			
Rsk-RKu	0,9140	-	0,9234	-		-	-		
	0,8470		0,8443			-			
Rz-RS	0,0194	-	0,0002	-		-	-		
	0,0403		0,1011			-			
Ra-Rv	0,6253	-	0,6179	-		-	-		
	0,6999		0,7376			-			
Wa-Wt	0,9170	14.	0,9189	15.		-	-		
	0,8379		0,8315			-			

[1. táblázat]

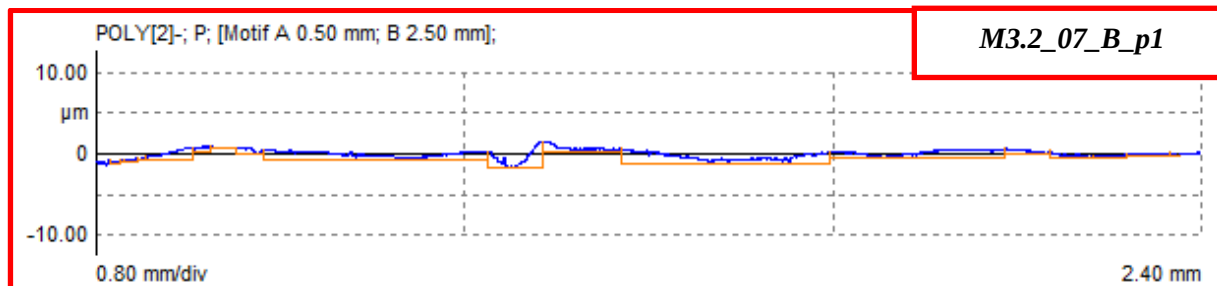
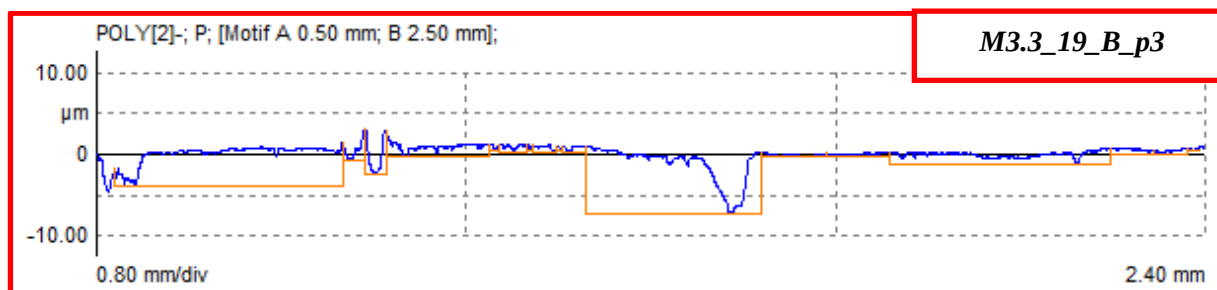
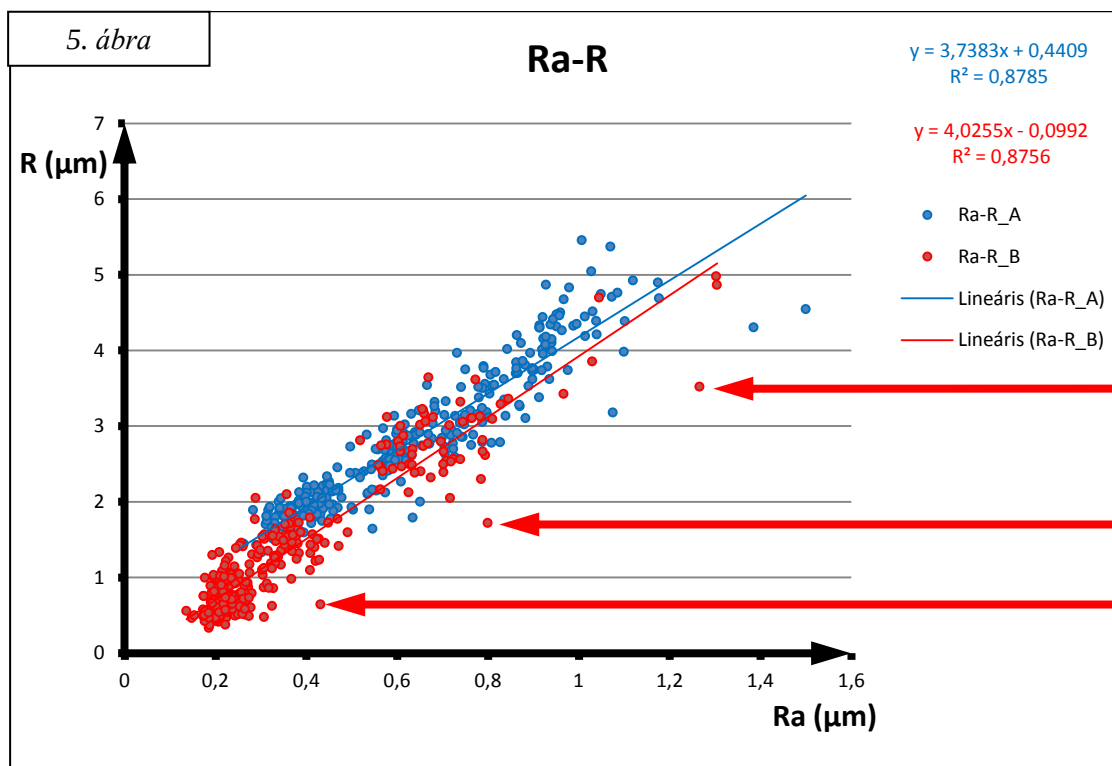
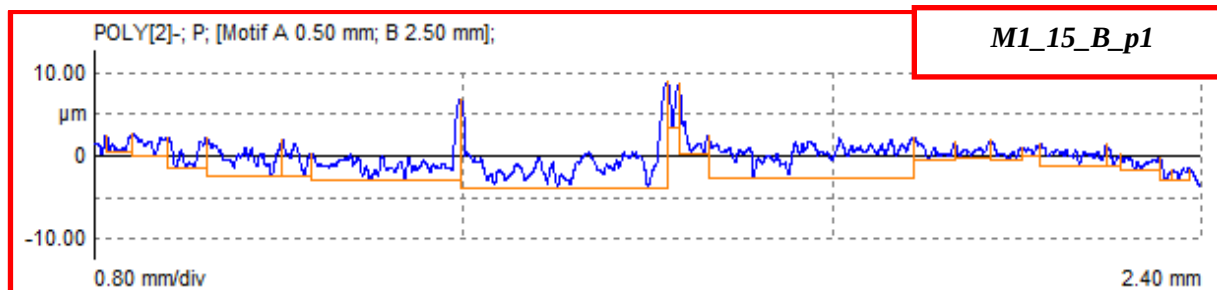
¹ A 7. fejezetben részletesen is kitérek a Wt-Wx kapcsolatra.

5.1. Az átlagos érdesség (Ra) és az érdességi motíf átlagos magasság (R) közötti kapcsolat

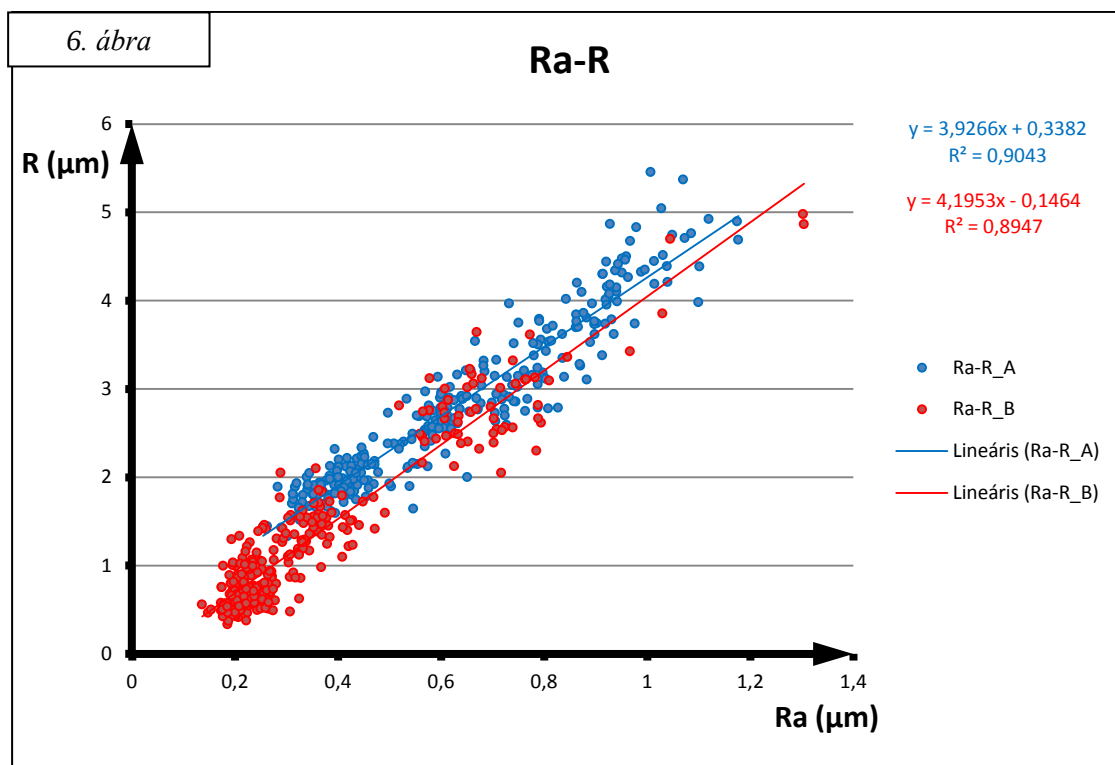
Megvizsgáltam, hogy az Ra–R diagramban a lineáris regressziótól nagyon távol eső pontok értékei miért térnek el ilyen jelentősen a többitől. Jól látható, hogy az „A” felületen az eltérésért egy nagyobb völgy vagy csúcs a felelős. Ezeket hibás profiloknak tekintem.



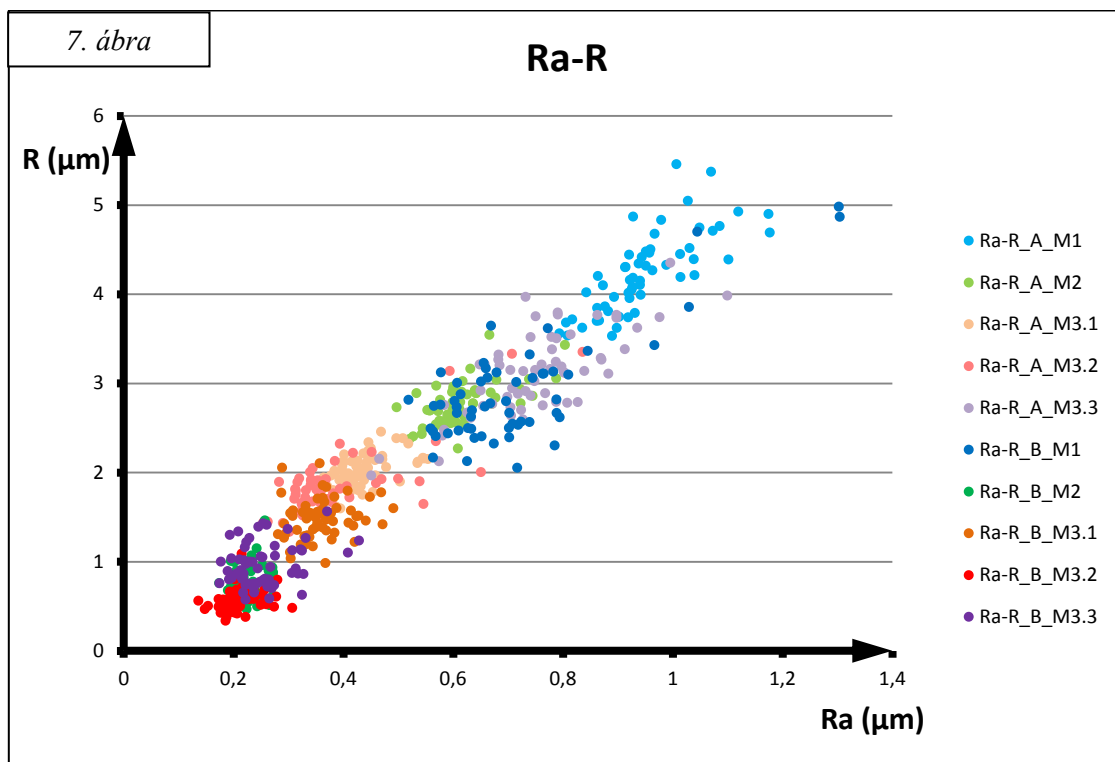
A”B” felületnél az eltérésért több közepes érdesség csúcs vagy völgy a felelős.



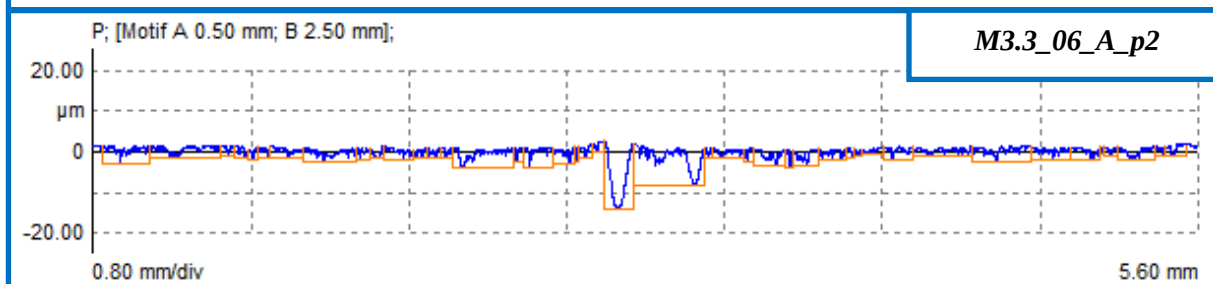
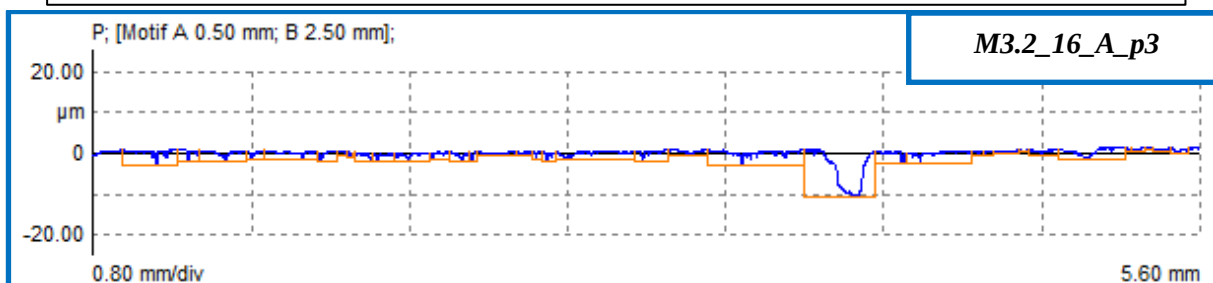
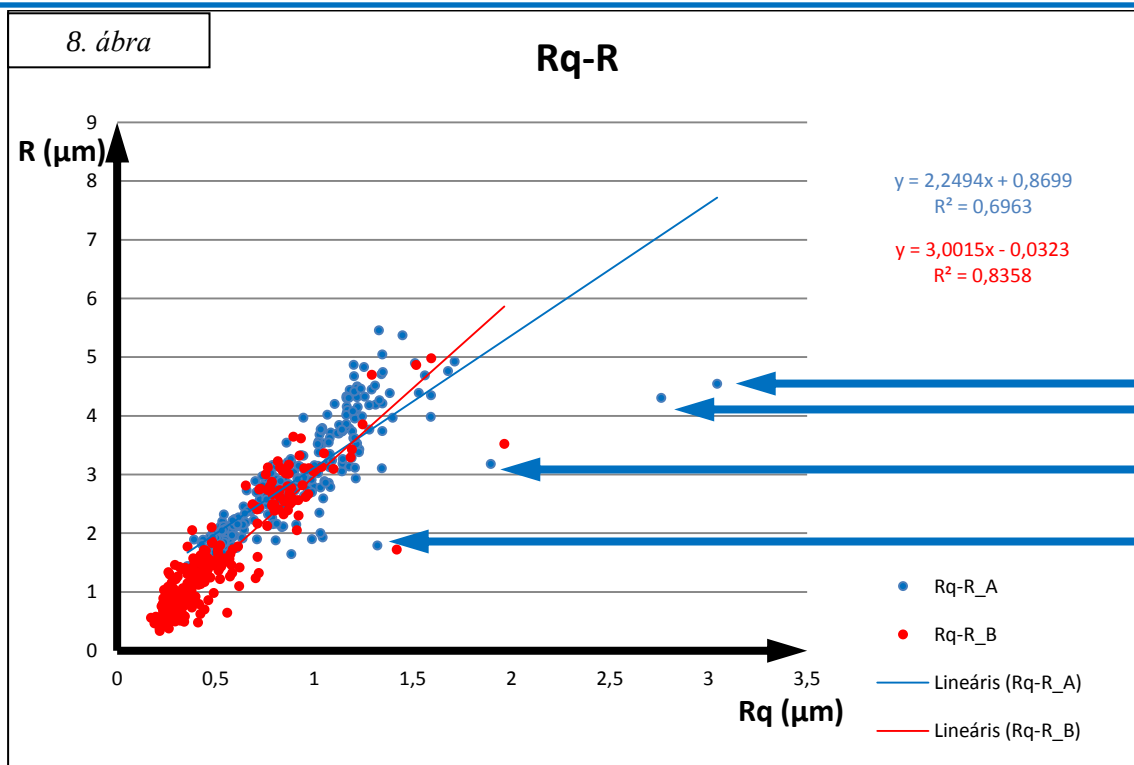
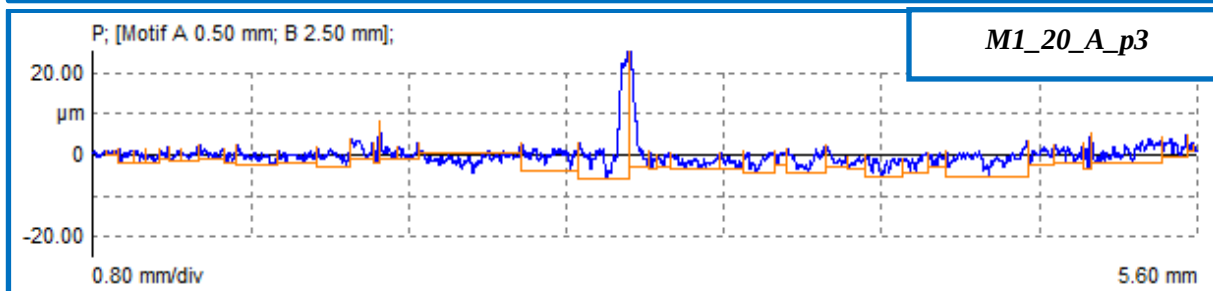
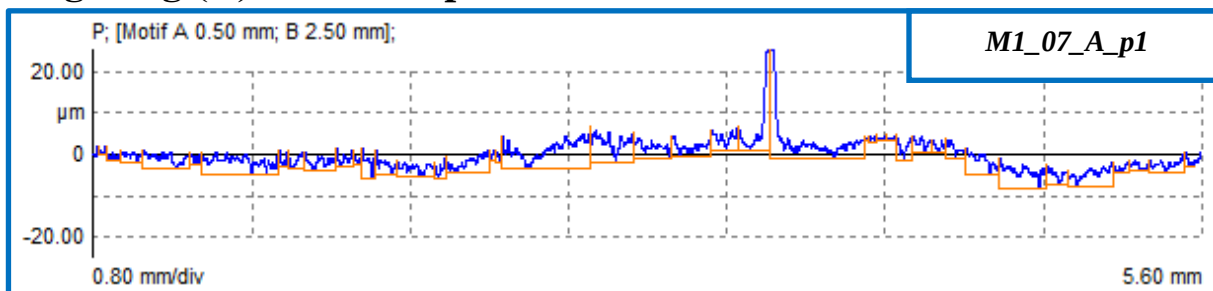
Az R^2 jelentősen javul az előző hibás profilok eltávolítása után, így az Ra-R kapcsolat erősödik.

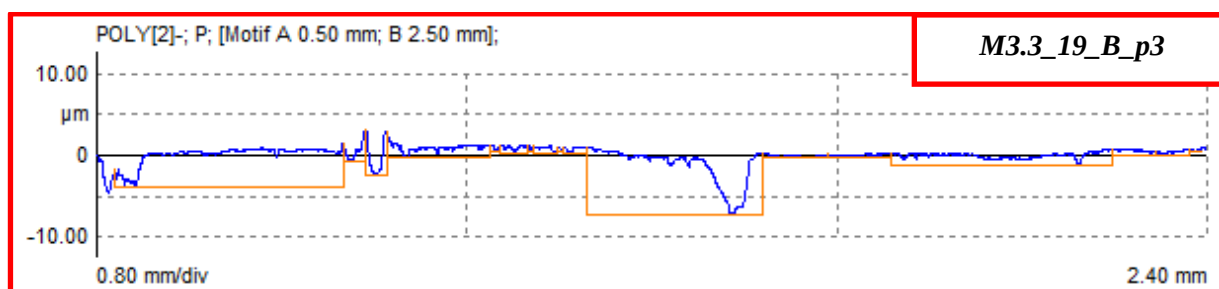
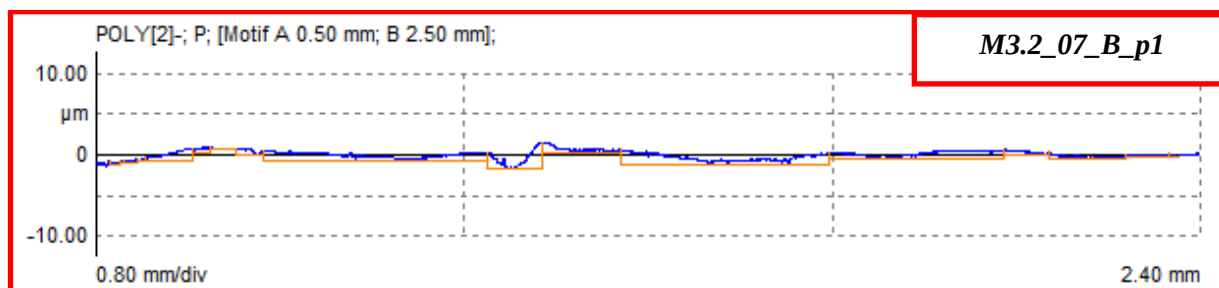
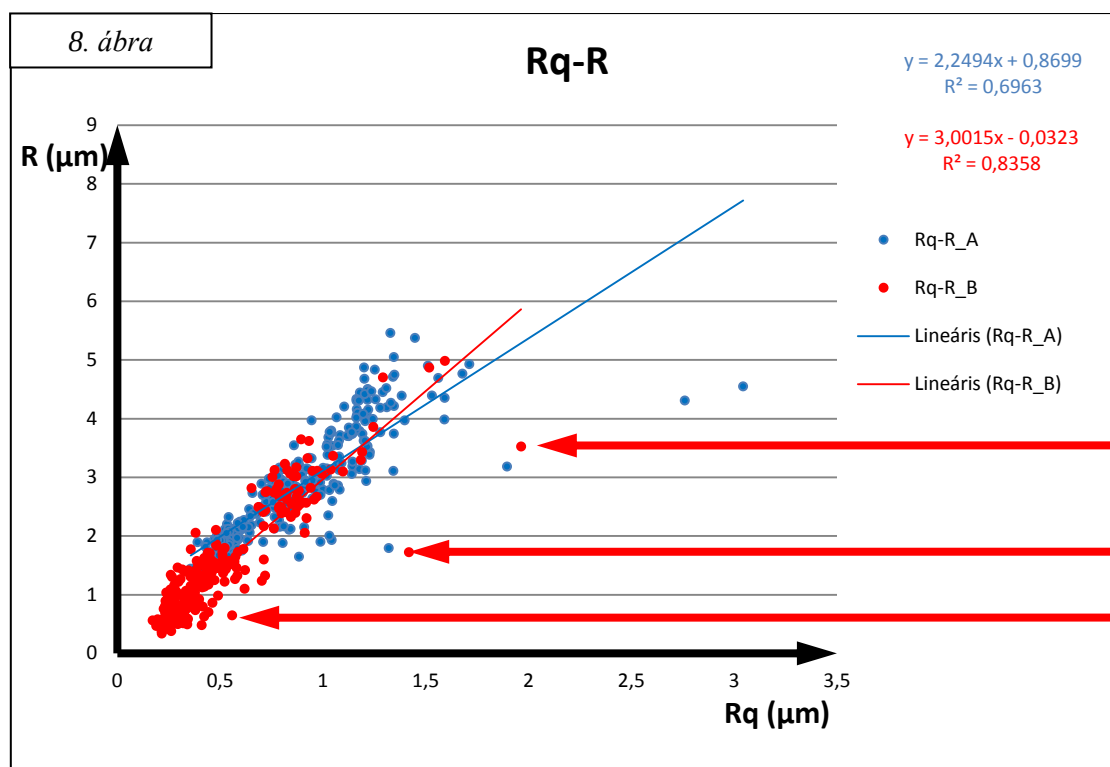
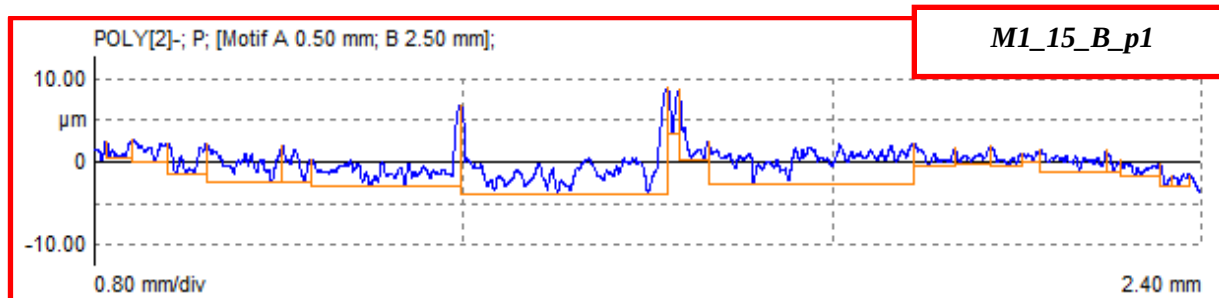


A 6. ábra megmunkálás szerinti megjelenítése.

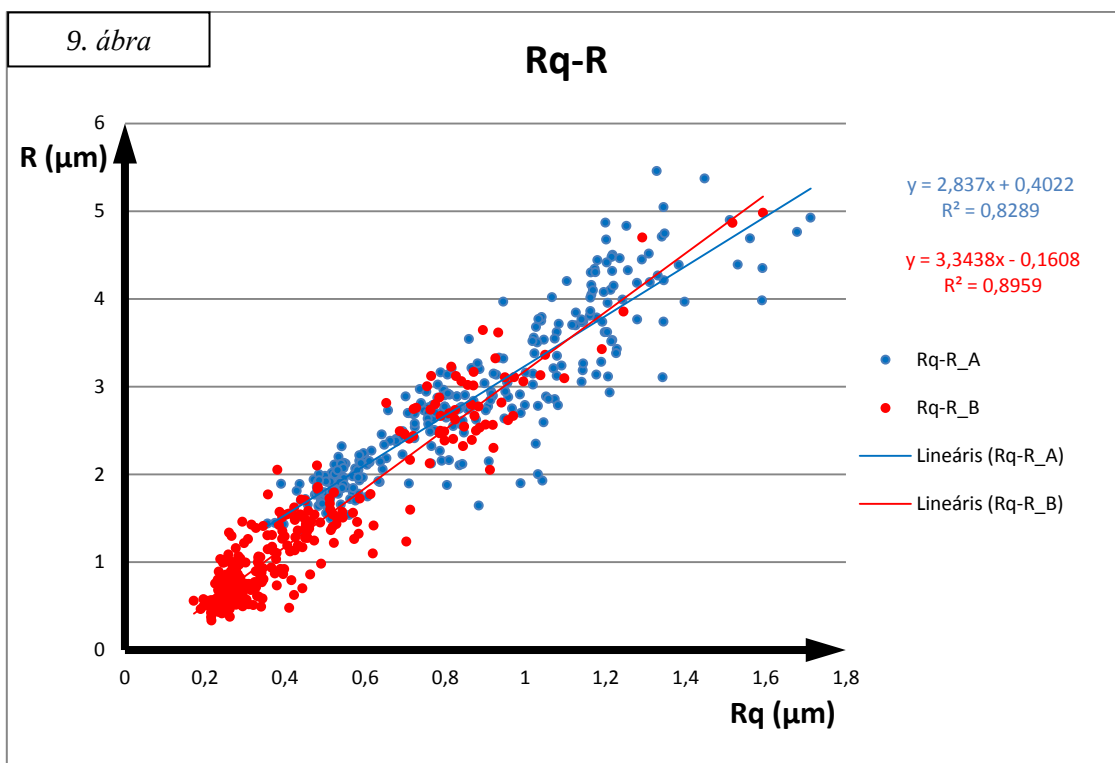


5.2 A négyzetes középérték (Rq) és az érdességi motíf átlagos magasság (R) közötti kapcsolat

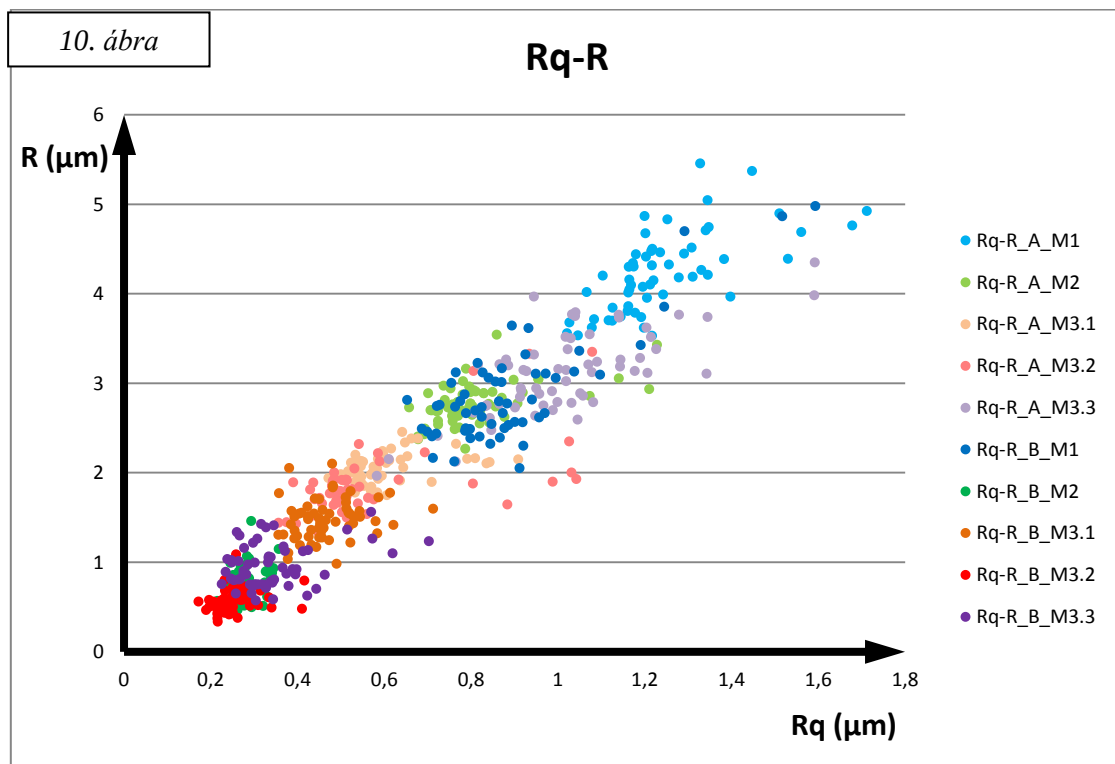




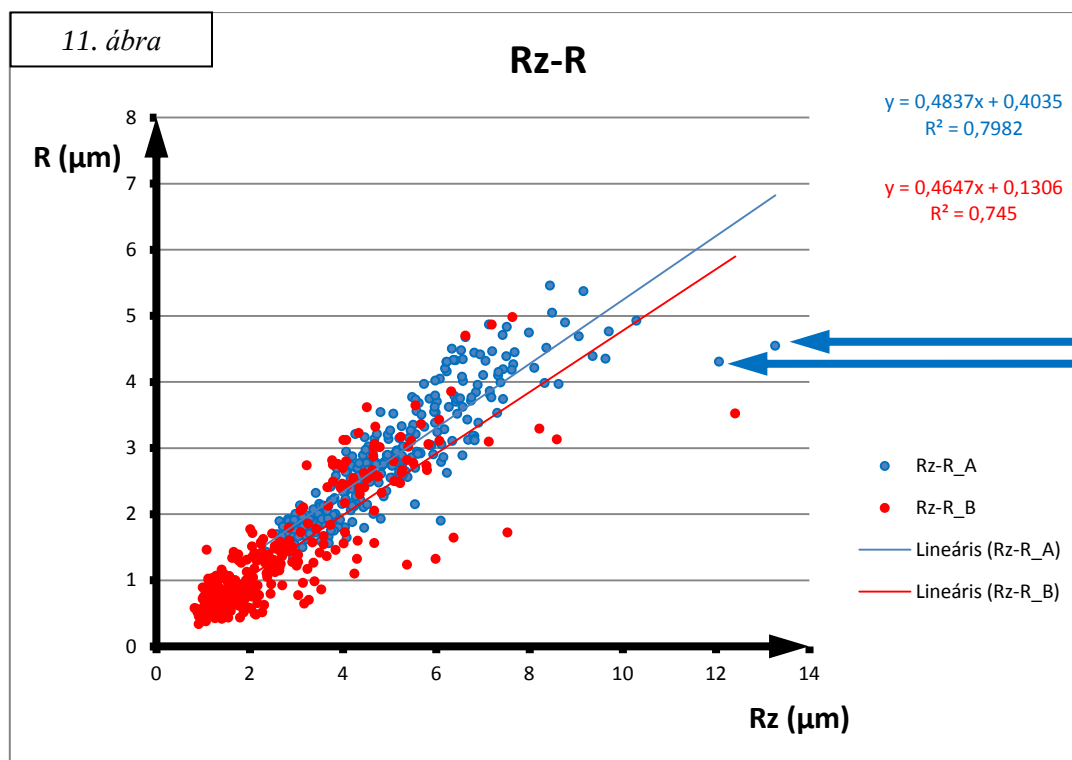
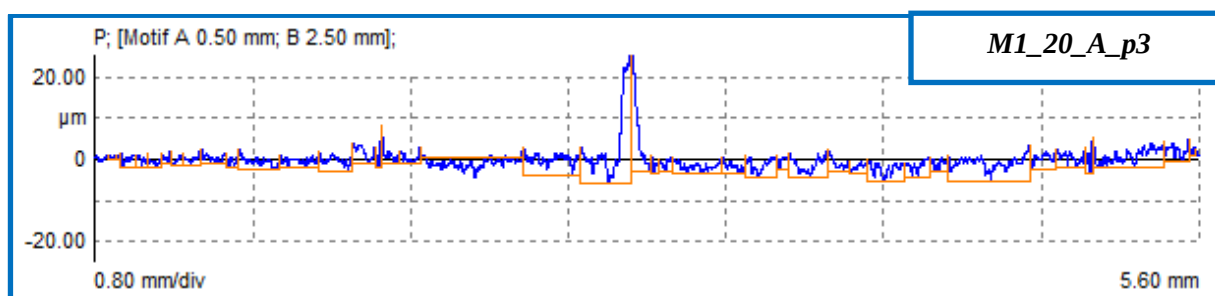
Az R^2 jelentősen javul az előző hibás profilok eltávolítása után, így az Rq-R kapcsolat erősödik.

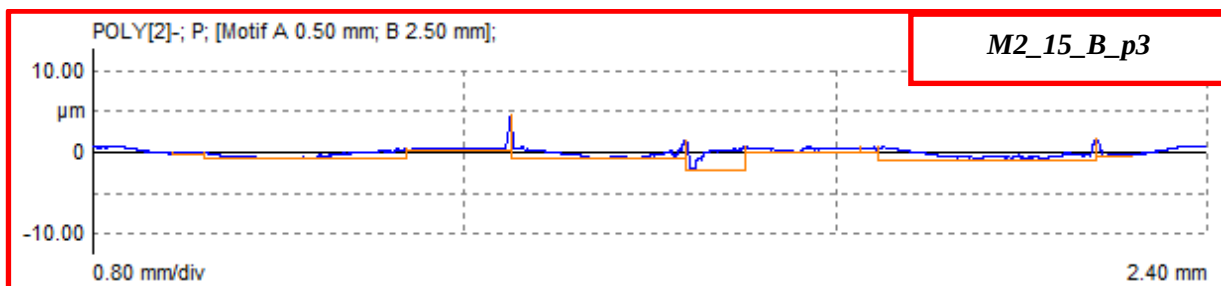
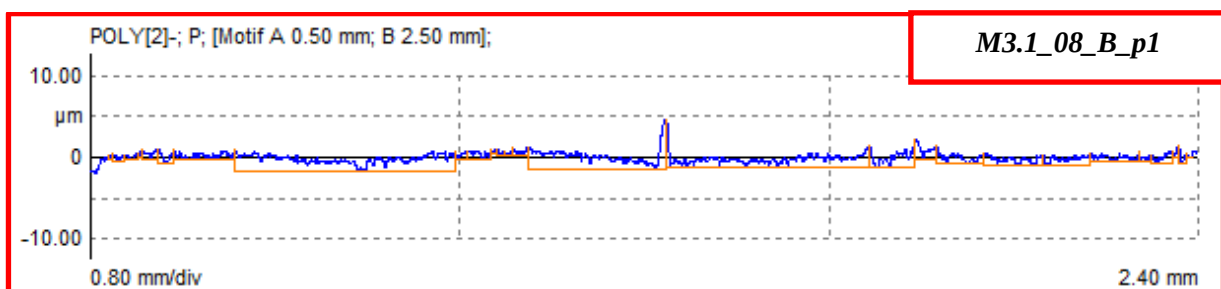
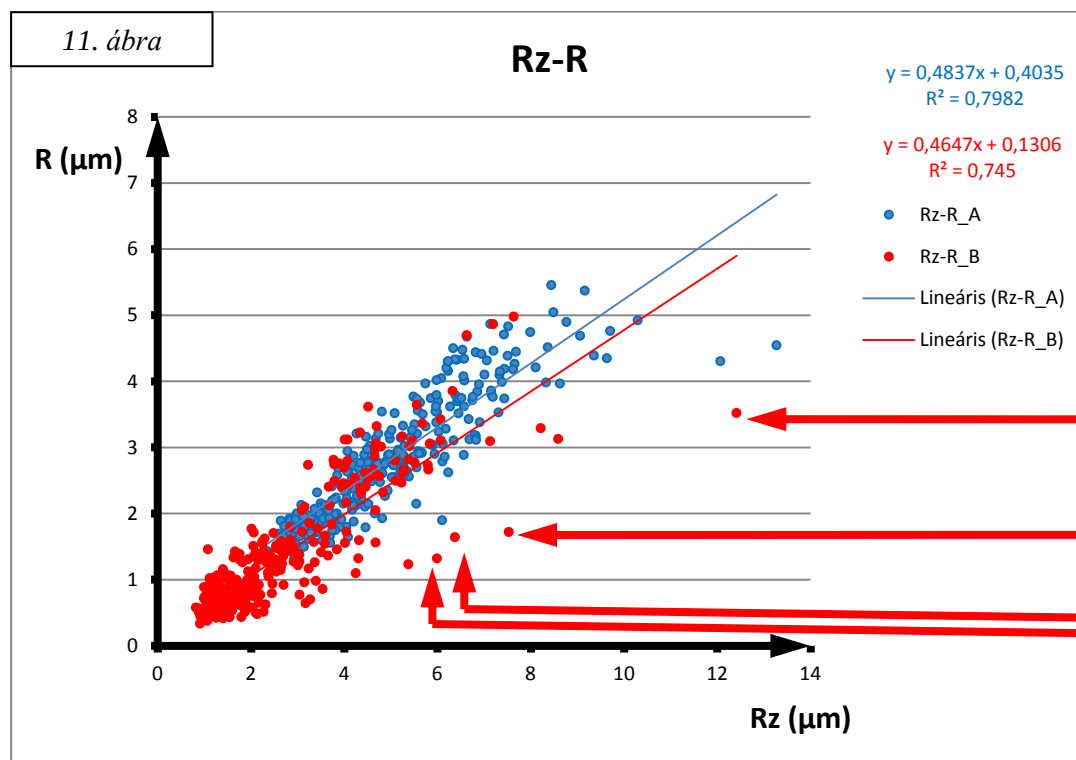
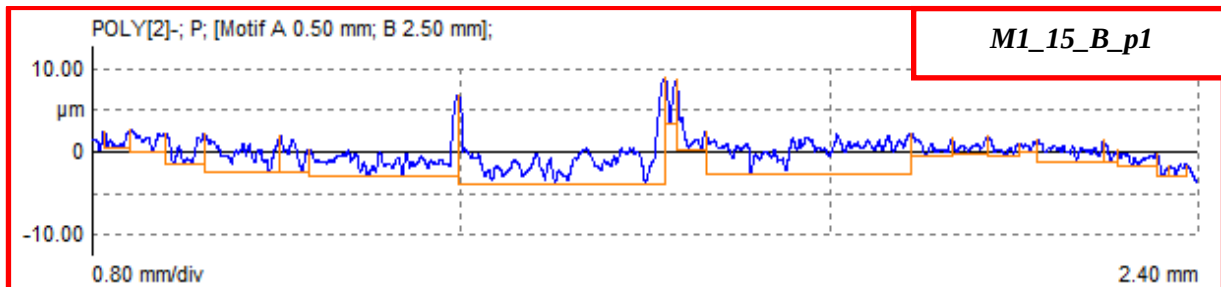
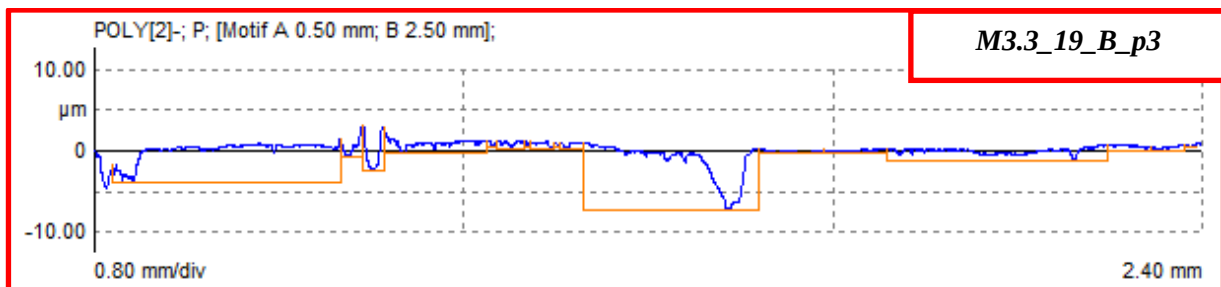


A 9. ábra megmunkálás szerinti megjelenítése.

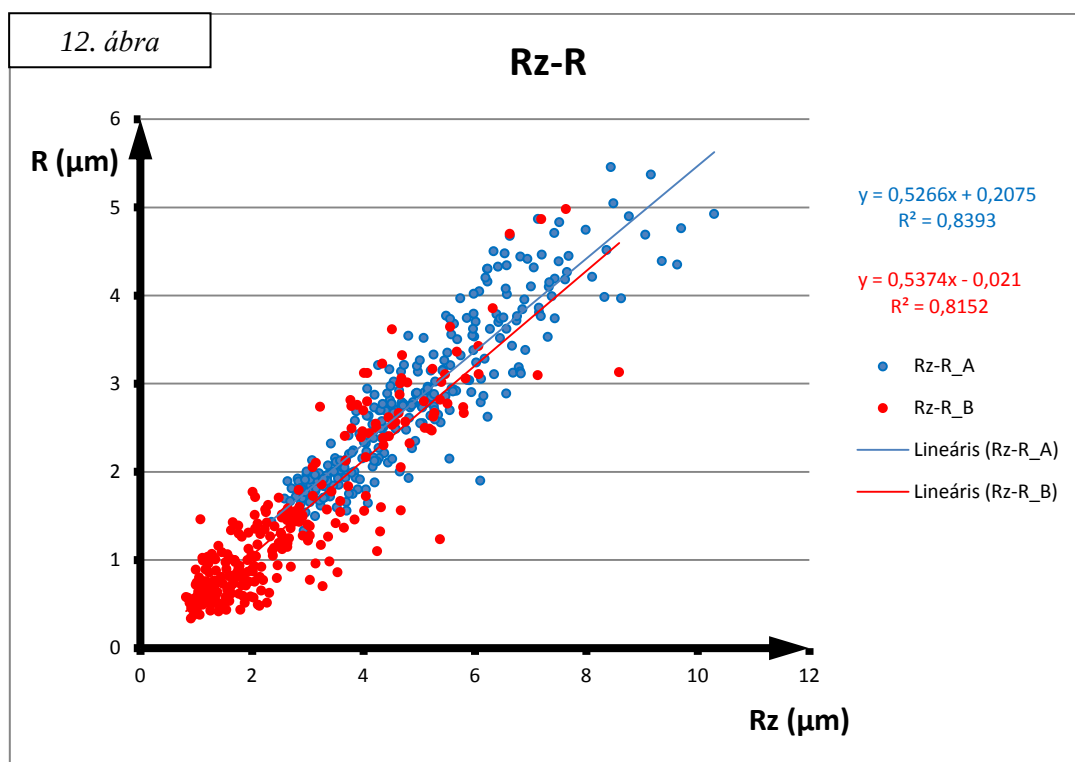


5.3. Az érdesség magasság (Rz) és az érdességi motíf átlagos magasság (R) közötti kapcsolat

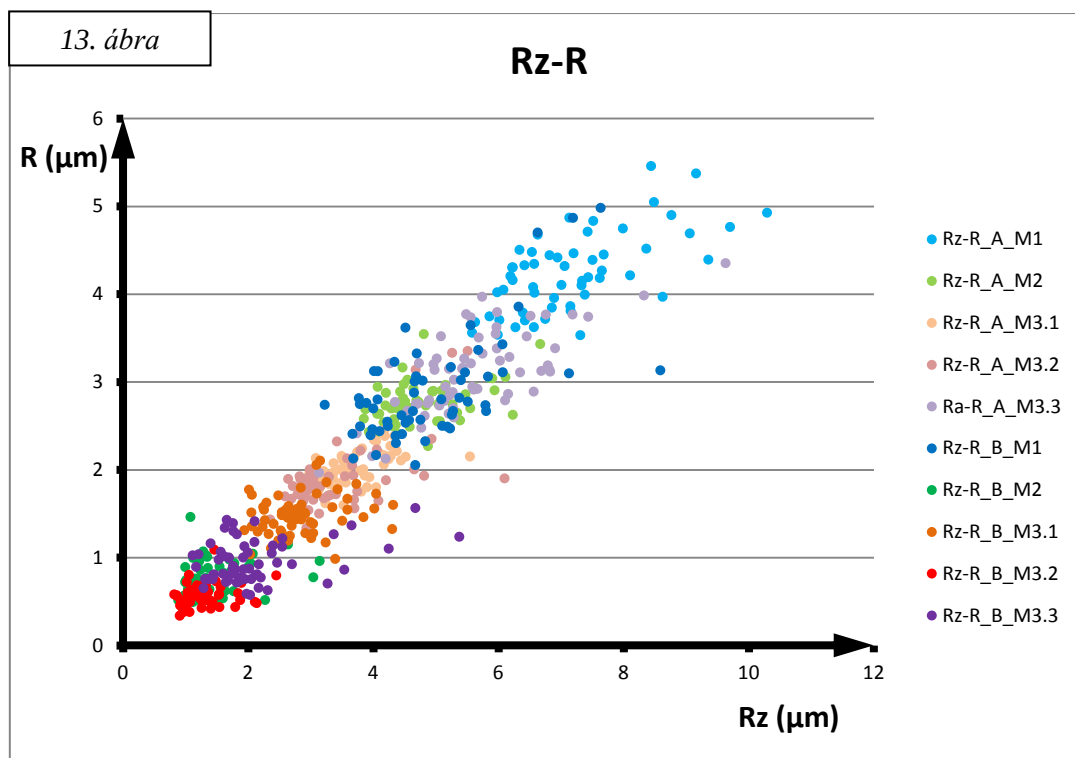




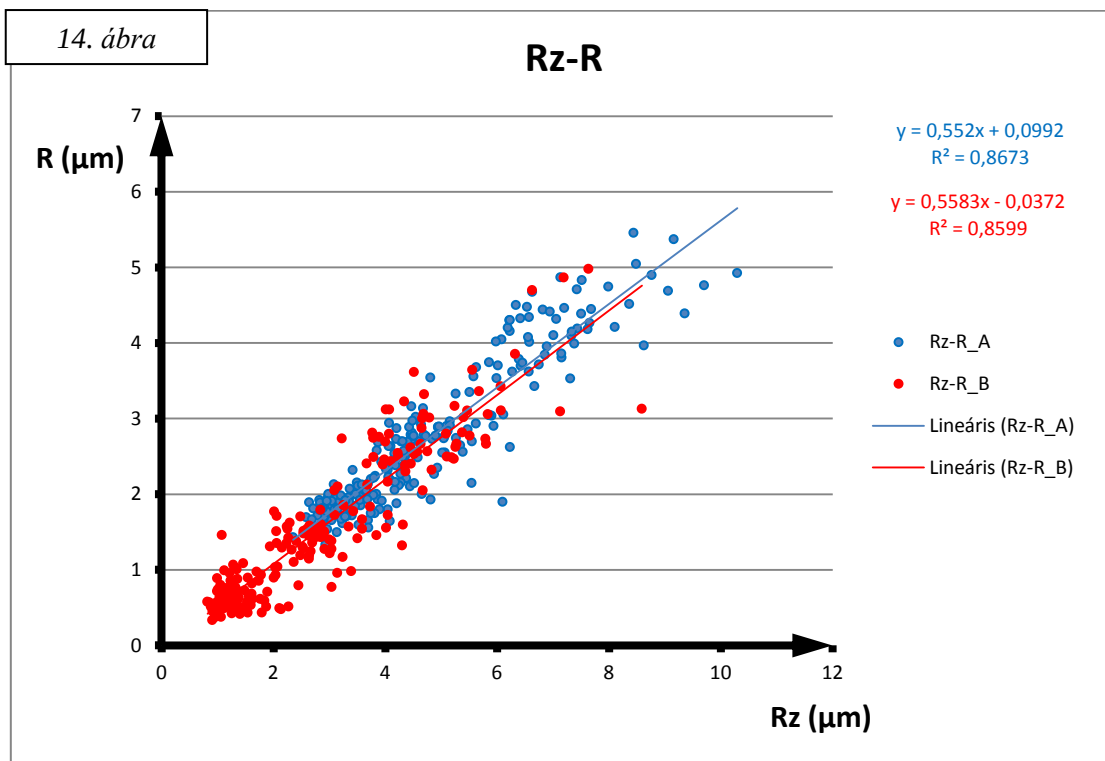
A nagyon eltérő profilok eltávolítása után a kapcsolat a B felület esetében a közepes és jó szint határára ($R^2=0,8$) esik, így a megmunkálás oldaláról vizsgáljuk meg a diagramokat.



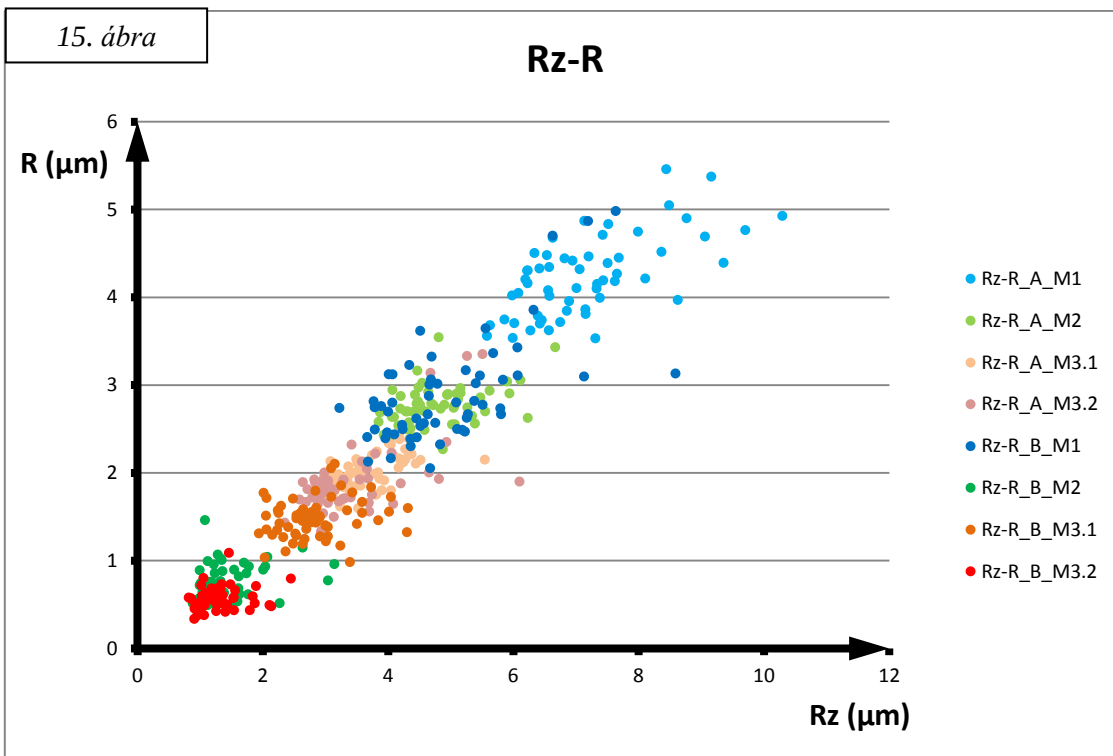
A 12. ábra megmunkálás szerinti megjelenítése.



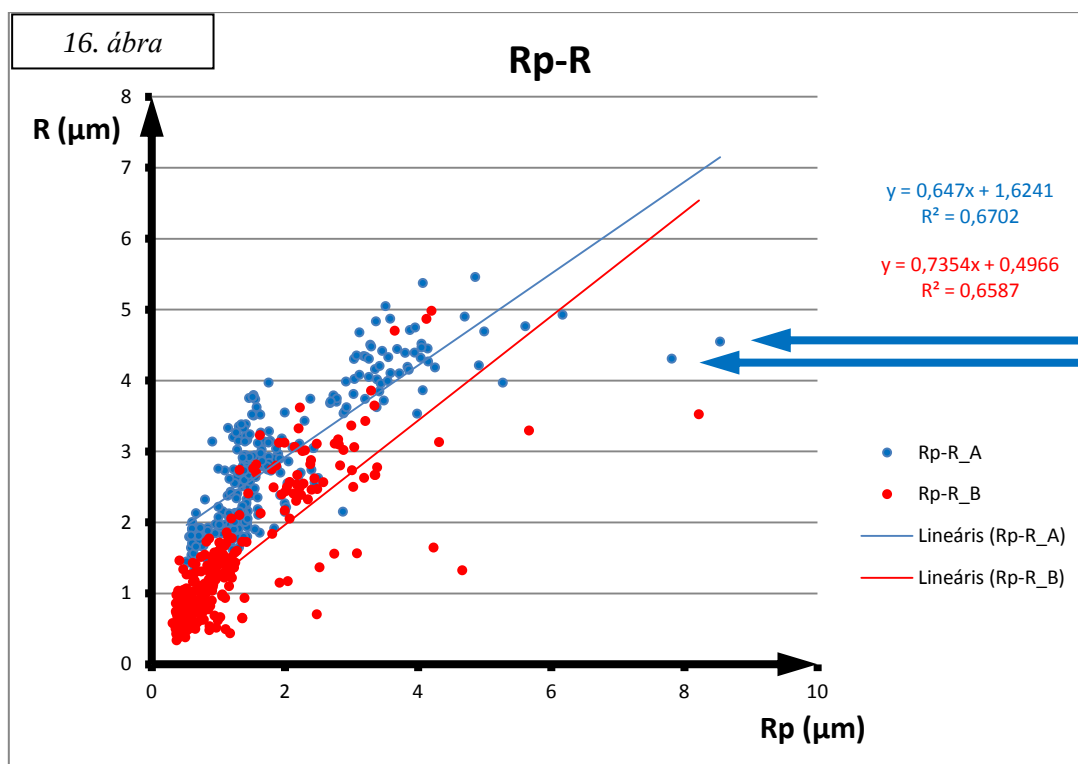
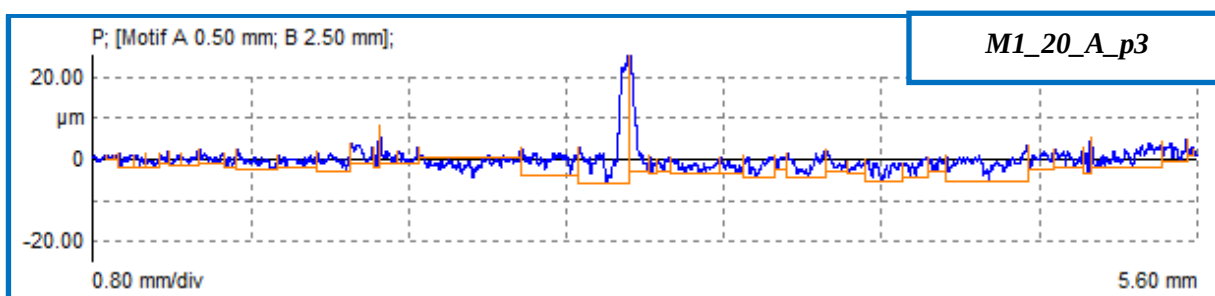
Ha az előző hibás profilokat és a $M_{3.3}$ darabokat (az M_2 megmunkáláshoz képest romló érdességi értékük miatt) is figyelmen kívül hagyjuk, akkor a Rz-R kapcsolat jelentősen erősödik.

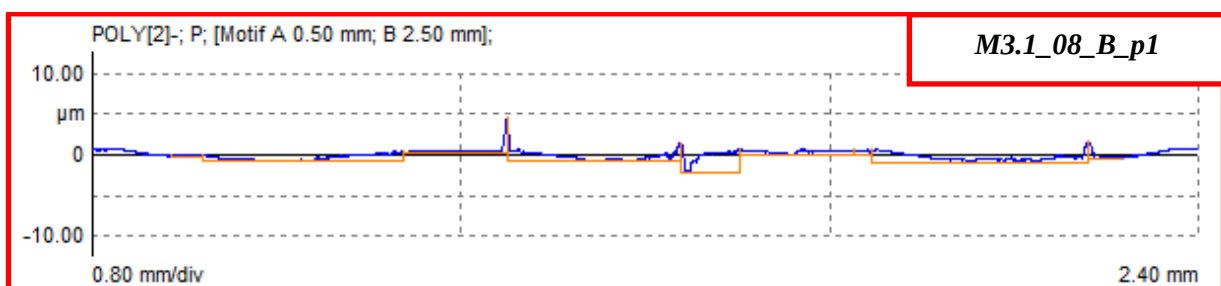
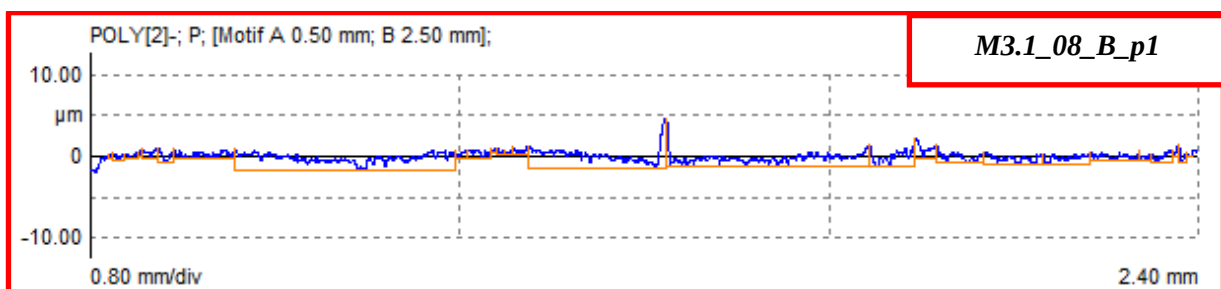
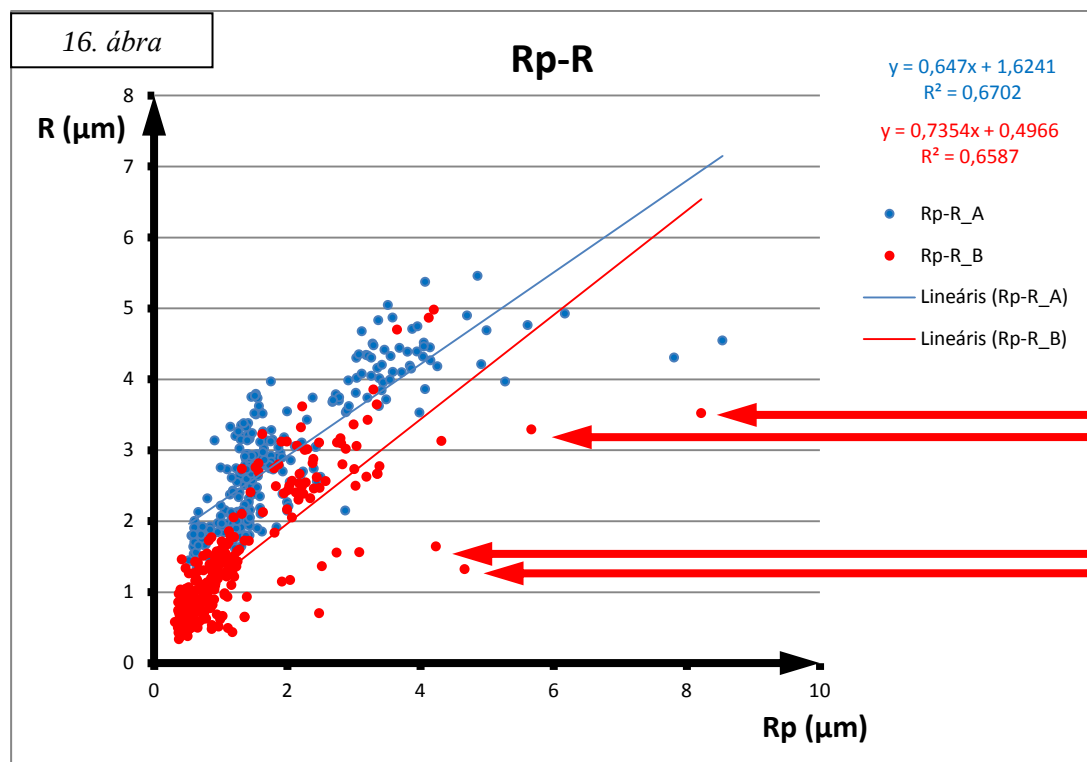
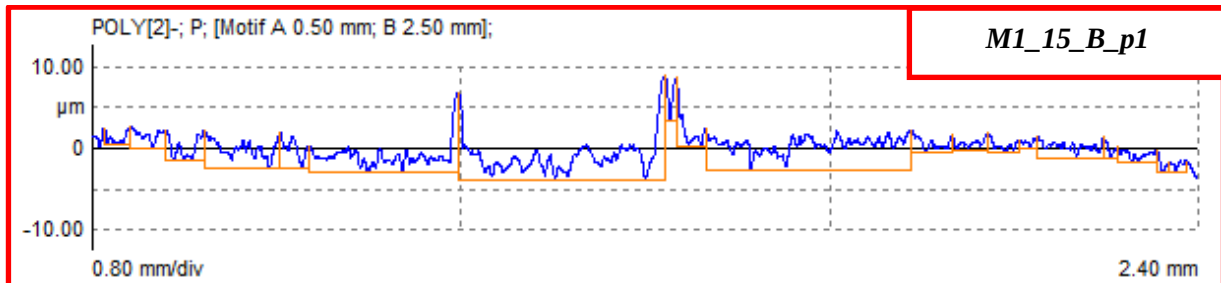
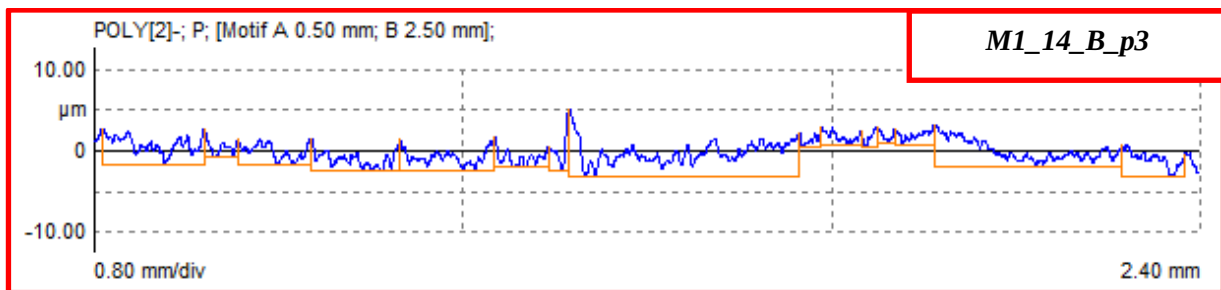


A 14. ábra megmunkálás szerinti megjelenítése.

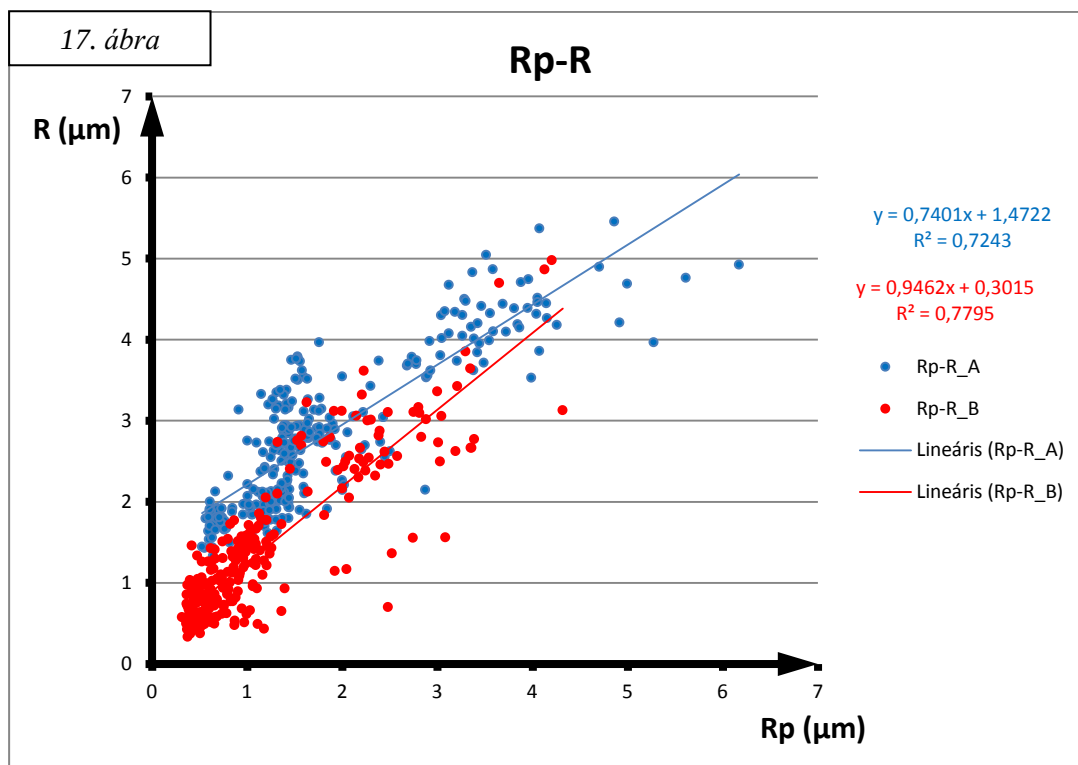


5.4. A maximális csúcsmagasság (Rp) és az érdességi motif átlagos magasság (R) közötti kapcsolat

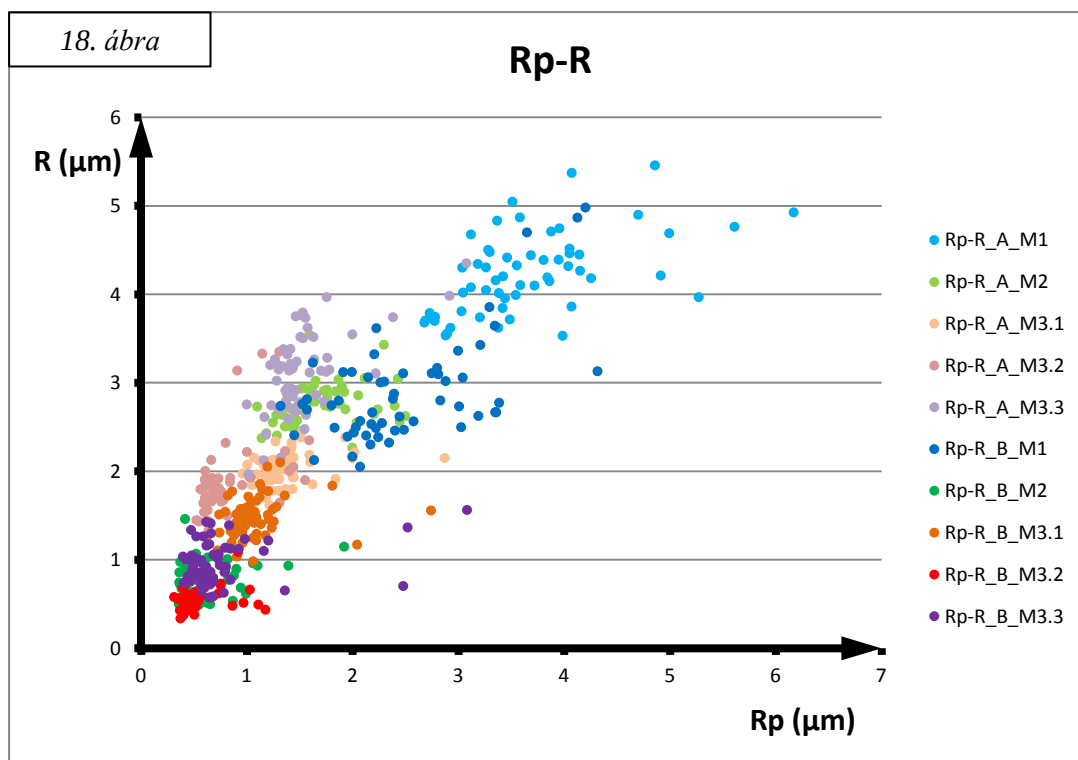




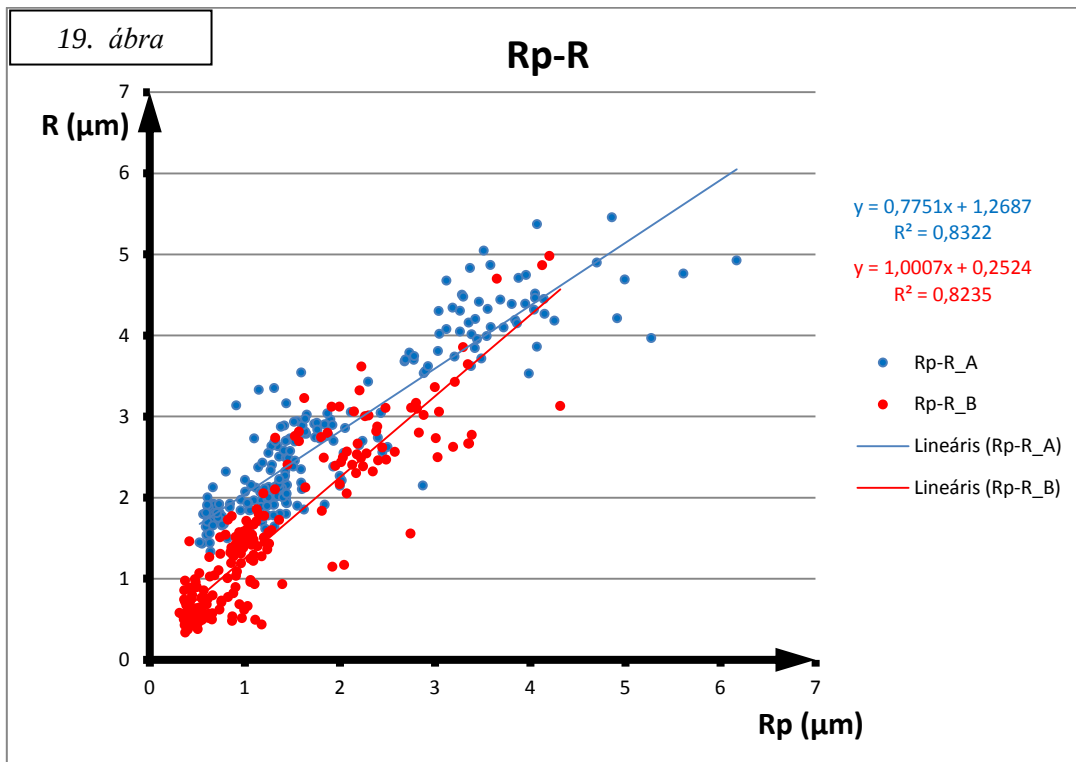
A jelentősen eltérő értékek eltávolítása után is gyenge a kapcsolat, így a megmunkálás szempontjából vizsgáljuk meg az értékeket.



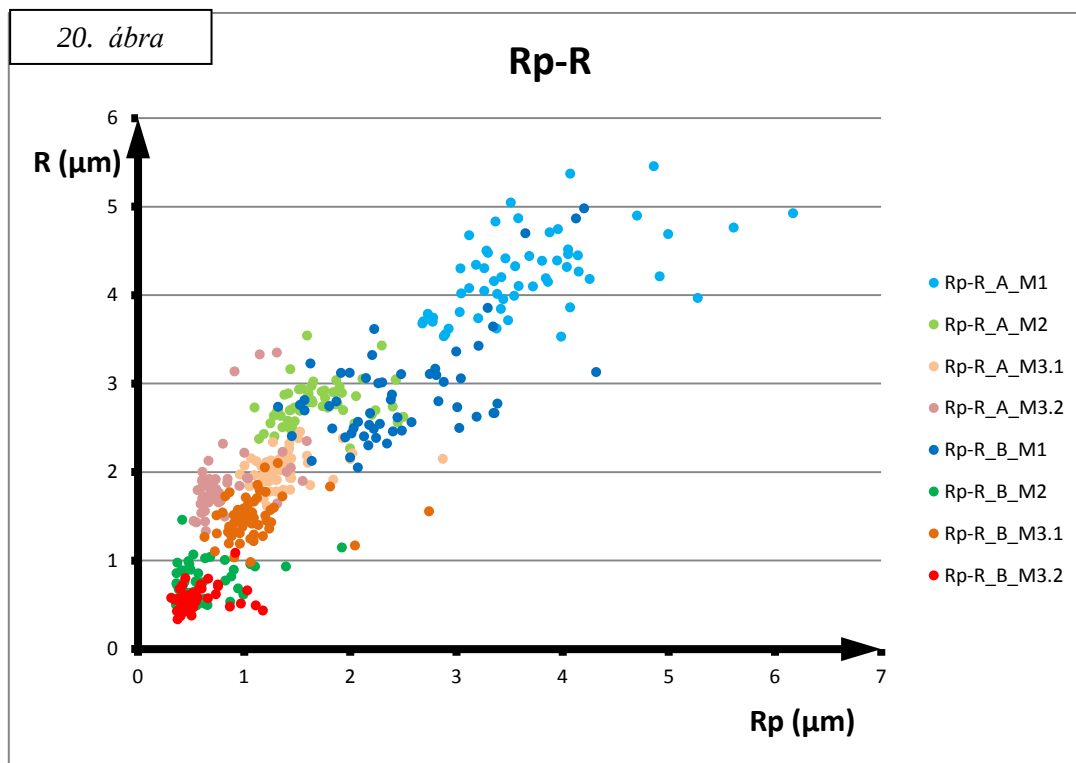
A 17. ábra megmunkálás szerinti megjelenítése.



Ha az előző hibás profilokat és a $M_{3.3}$ darabokat (az M_2 megmunkáláshoz képest romló érdességi értékek miatt) is figyelmen kívül hagyjuk, akkor a R_p - R kapcsolat jelentősen erősödik.

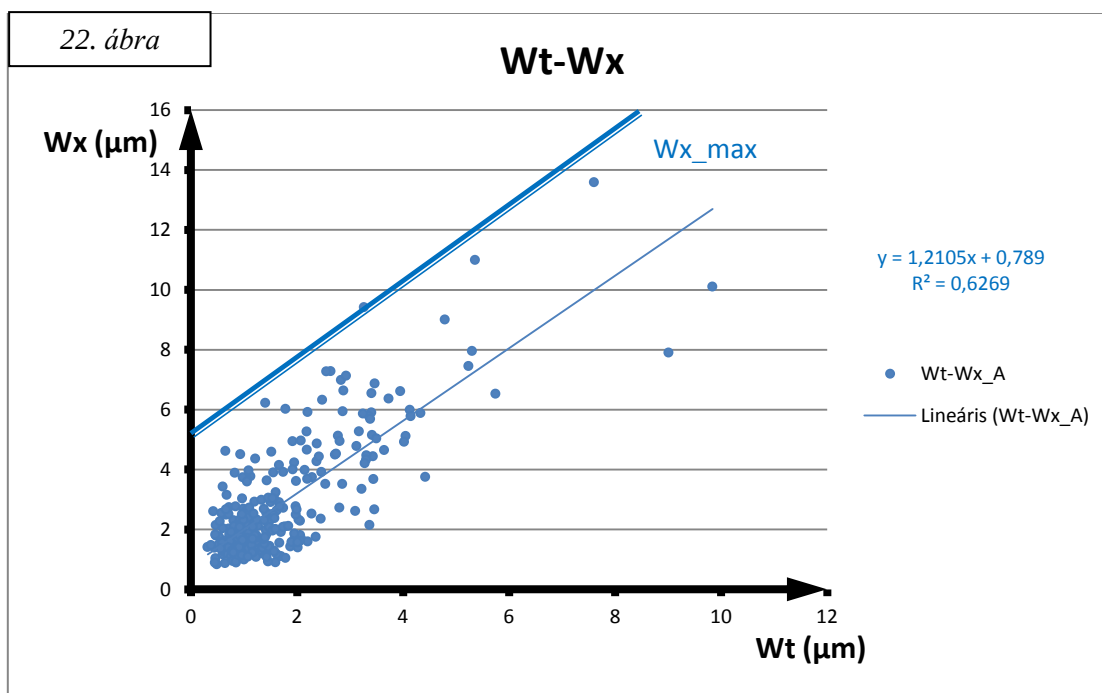
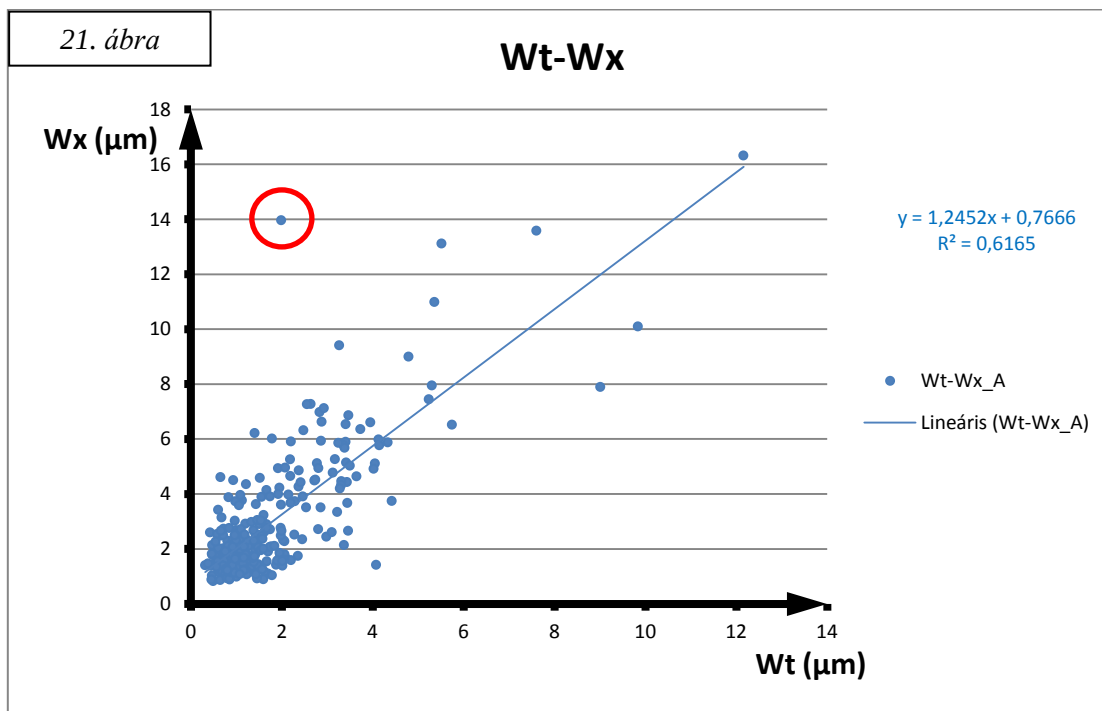


A 19. ábra megmunkálás szerinti megjelenítése.



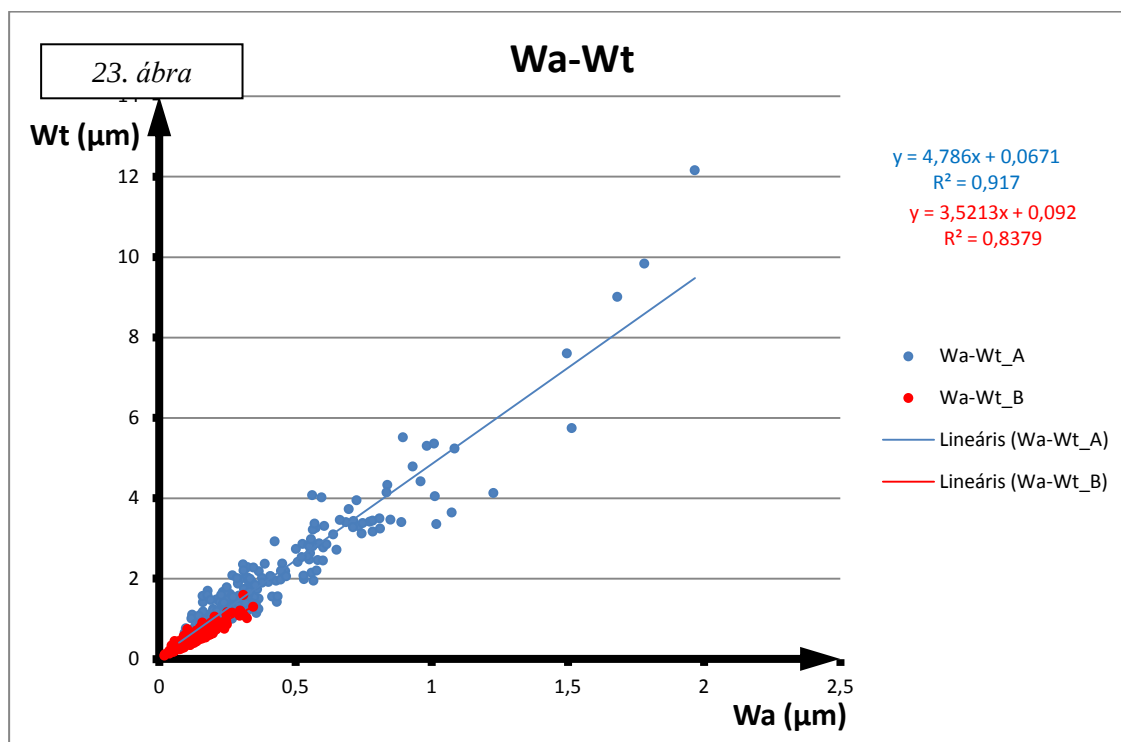
5.5. A hullámossági profil maximuma (Wt) és a hullámossági motif maximális hullámmélység (Wx) közötti kapcsolat

A hullámossági profil maximuma (Wt) és a hullámossági motif maximális hullámmélység (Wx) között a kapcsolat gyenge ($R^2=0,6269$), de meg lehet határozni egy felső határt (erről a 7. fejezetben tesztek említést). A bekarikázott mérési pontról feltételezzük, hogy mérési hiba, de az ehhez a ponthoz tartozó adatbevitel során a hullámossági profil képének mentése nem történt meg, így utólag nem lehetett beazonosítani a hiba forrását, azaz hogy egy nagyobb völgy vagy csúcs, vagy a teljes mérési hosszon több nagyobb eltérés okozta-e a relatív szabálytalanságot a többi pont helyéhez képest.

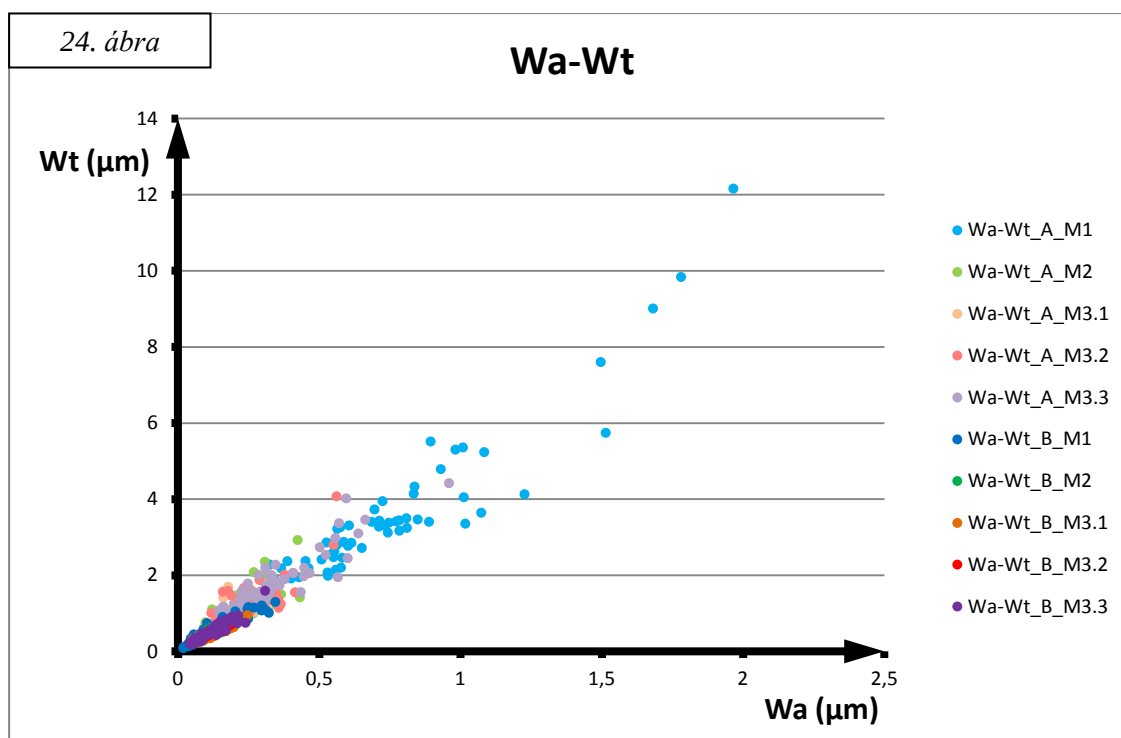


5.6. A hullámossági profil közepes eltérés (Wa) és a hullámossági profil maximális hullámmélység (Wt) kapcsolata

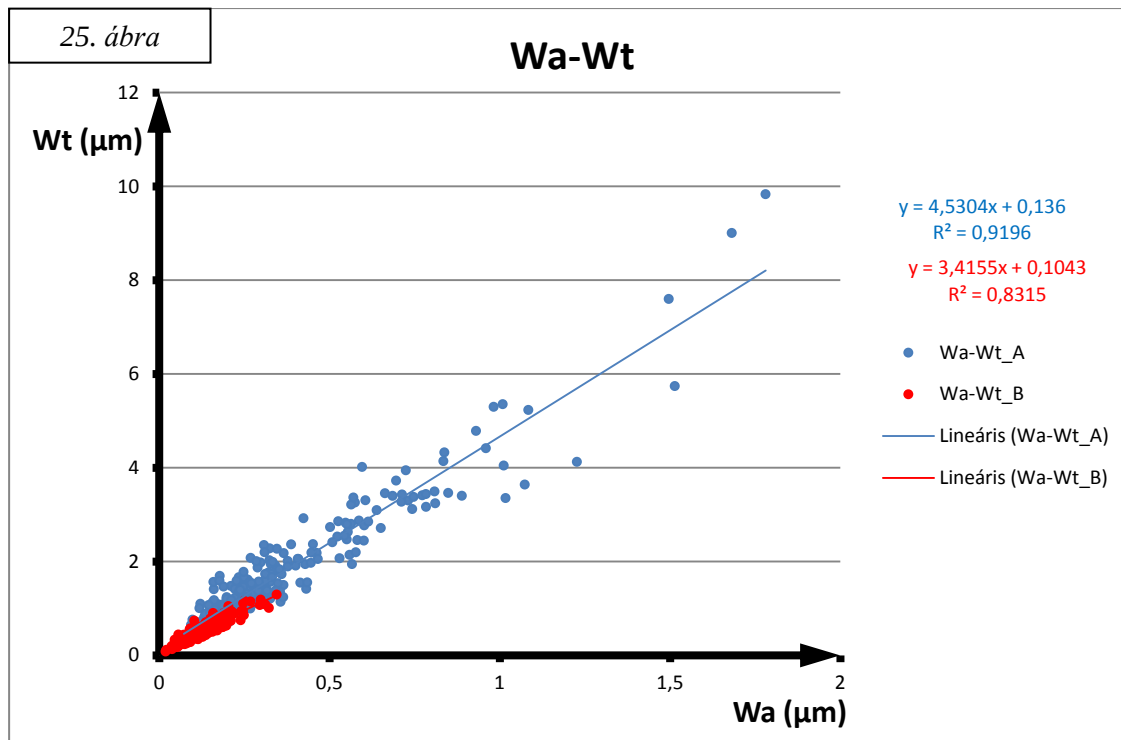
A hibás profilok kiszűrése előtt is erős a Wa-Wt kapcsolat.



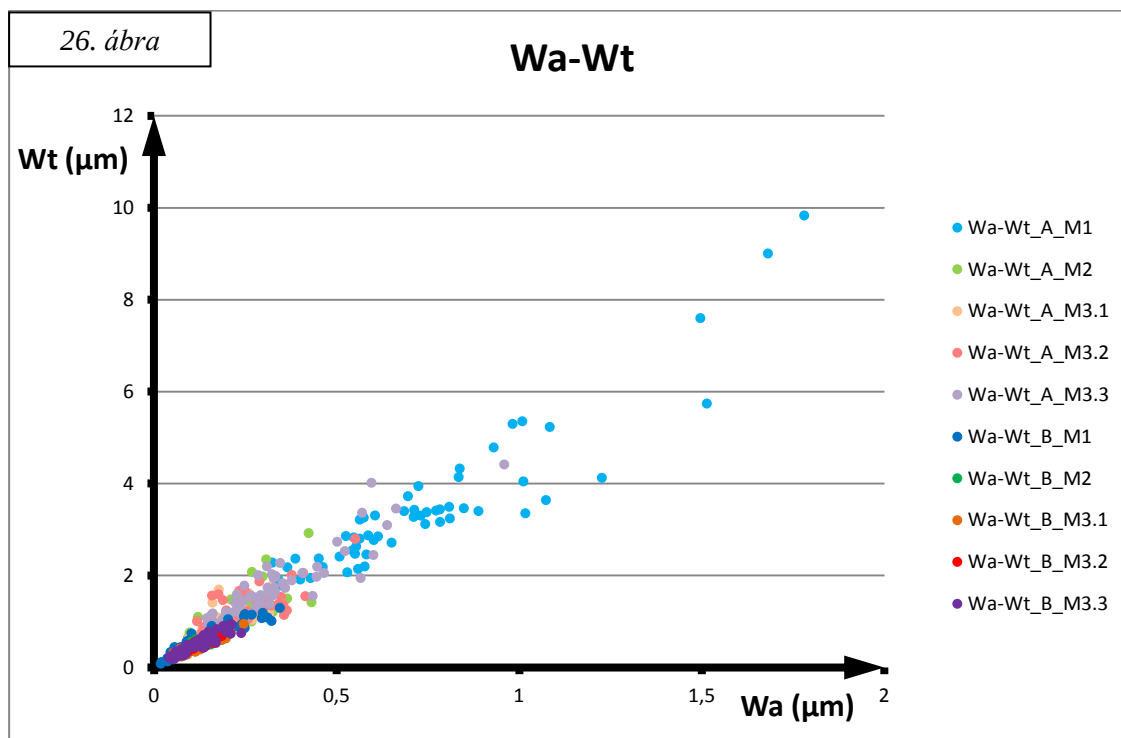
A 23. ábra megmunkálás szerinti megjelenítése.



A hibás profilok kiszűrése után is erős marad a Wa-Wt kapcsolat.



A 25. ábra megmunkálás szerinti megjelenítése.



6. A határoló egyenesek egyenletei

- Ra-R:

Felső határ:	$ha\ x < 2,5078 \quad y = 3,9345x + 1,4986$ $ha\ x > 2,5078 \quad y = 4,1953x + 0,8446$
Alsó határ:	$ha\ x < 1,6632 \quad y = 3,9345x - 0,5554$ $ha\ x > 1,6632 \quad y = 4,1953x - 0,9892$

- Rq-R:

Felső határ:	$ha\ x < 1,8029 \quad y = 2,8448x + 1,6821$ $ha\ x > 1,8029 \quad y = 3,3438x + 0,7824$
Alsó határ:	$ha\ x < 0,1574 \quad y = 3,3438x - 1,1123$ $ha\ x > 0,1574 \quad y = 2,8448x - 1,0338$

- Rz-R:

Felső határ:	$ha\ x < -20,0145 \quad y = 0,5583x + 1,0987$ $ha\ x > -20,0145 \quad y = 0,5538x + 1,0078$
Alsó határ:	$ha\ x < 41,2776 \quad y = 0,5583x - 1,6629$ $ha\ x > 41,2776 \quad y = 0,5538x - 1,4755$

- Rp-R:

Felső határ:	$ha\ x < 3,7496 \quad y = 0,7776x + 2,4405$ $ha\ x > 3,7496 \quad y = 1,0007x + 1,6040$
Alsó határ:	$ha\ x < 4,7349 \quad y = 1,0007x - 1,1861$ $ha\ x > 4,7349 \quad y = 0,7776x - 0,1297$

- Wa-Wt:

Felső határ:	$ha\ x < -1,2508 \quad y = 3,4155x + 0,3904$ $ha\ x > -1,2508 \quad y = 4,5251x + 1,7783$
Alsó határ:	$ha\ x < 1,2045 \quad y = 4,5251x - 1,4225$ $ha\ x > 1,2045 \quad y = 3,4155x - 0,0860$

7. Következtetések, konklúziók

A TDK dolgozat célkitűzése lényegében az volt, hogy két lényeges kérdésre keressek választ: Az elsőként megfogalmazott kérdés:

- ***Van-e az egyes paraméterek között kapcsolat, és ha igen, akkor milyen mértékben korrelálnak egymással? (R^2)***

Az eredmények alapján elmondható, hogy a vizsgált két nagy paraméterrendszer között több ponton is lehetséges a megfeleltetés. A kutatás közben több paraméterpár erős kapcsolatára is fény derült (Ra-R, Rq-R, Rz-R, Rp-R), ami a megfelelő definíciók hasonlóságára vezethető vissza, mert Ra, Rq, Rz, Rp és R is magasságirányú paraméterek. Ez a kapcsolat nem közvetlen, mert az M-rendszerben alkalmazott szűrők miatt kialakult profil nem azonos a motifokéval. A motifok értelmezési profilja az M-rendszerbeli szűretlen (P) profillal egyezik meg. Viszont közvetett kapcsolatot feltételezhetünk, ha állandó a megmunkálási környezet (pl. forgácsolási sebesség, préselési nyomás, hőmérséklet stb.). Az Ra, Rq, Rz, és Rp esetén az érdességi csúcsok és völgyek a középvonaltól vett távolságaival végzünk valamilyen matematikai műveletet (pl.: átlagolás, négyzetes középérték stb.), amiből származtatjuk a mérőszámot. Az R motif paraméter esetén az érdességi profilon képzett érdességi motifok magasságainak átlagolásával kapjuk a mérőszámot. Tehát, állandó megmunkálási környezetben az M rendszerbeli R profilon értelmezett magassági paraméterek, illetve a motif rendszerbeli érdességi, ezen belül magassági paraméterek között közvetett, ámde releváns, jól kirajzolódó kapcsolatot állapíthatunk meg.

A legjobb kapcsolat az átlagos érdesség (Ra) és a motif átlagos magassága (R) között van. A korreláció négyzete az „A” felület esetén 0,9045 és a „B” felület esetén 0,8947.

A másodikként felvetett kérdés a következő:

- ***Milyen (lehetőleg egyszerű) matematikai összefüggéssel írhatóak fel a paraméterek közötti kapcsolatok?***

A korábbiakban részletesen ismertettük az összefüggések (paraméterdefiníciókra épülő) matematikai oldalát. A kapcsolat kialakításában fontos szempont volt a kezelhetőség, tehát hogy a paraméterek átváltása során alkalmazott módszer a lehetőségekhez képest minél egyszerűbb matematikai műveletekre leképezhető legyen, ebből eredően pedig gyorsan végrehajthatóvá váljon akár emberi, akár gépi felhasználó számára.

A kutatás két legfontosabb kérdésének megválaszolása után nézzünk egy általános példát a módszer alkalmazására. A korábban említett Ra-R paraméterkapcsolat esetén, ami az 1-hez legközelebb eső R^2 értékkel bír, a következőképpen vezethető le az átváltás: ha az átlagos érdességet (Ra) mérés útján meghatároztuk, akkor a következő egyenleteket használhatjuk az átlagos motif magasság (R) meghatározására:

ha	$Ra \leq 1,8843$	$R = 3,9345 \times Ra + 0,3346$
ha	$Ra > 1,8843$	$R = 4,1953 \times Ra - 0,1464$

A megfelelő egyenletből megkapjuk a számított motif átlagos magasságának értékét (R). Ez után meg kell vizsgálni, hogy a mért és számított paraméterek között valóban fennáll-e a kapcsolat, tehát a korábban koordináta-rendszerben ábrázolt pontthalmaz leszűkített területén belül található-e a kiszámolt motif.

A megengedhető maximális motíf átlagos magasságának értéke (R_{max}):

$$\text{ha } Ra \leq 2,5078 \quad R_{max} = 3,9345 \times Ra + 1,4986$$

$$\text{ha } Ra > 2,5078 \quad R_{max} = 4,1953 \times Ra + 0,84$$

A megengedhető minimális motíf átlagos magasságának értéke (R_{min}):

$$\text{ha } Ra \leq 1,6632 \quad R_{min} = 3,9345 \times Ra - 0,5554$$

$$\text{ha } Ra > 1,6632 \quad R_{min} = 4,1953 \times Ra - 0,9892$$

Ha az alábbi feltételnek megfelel a számított motíf átlagos magassága (R), akkor kimondható, hogy az átváltás érvényes.

$$R_{min} \leq R \leq R_{max}$$

A kutatás eredményeit megvizsgálva az is észrevehető, hogy a hullámossági paramétereknél nem fedezhető fel jelentős kapcsolat (szemben az érdességi paraméterekkel), de egy esetben, mégpedig a hullámossági profil maximuma (W_t) és a hullámossági motíf maximális hullámmélység (W_x) paramétereknél a gyenge korreláció ($R^2=0,6269$) ellenére legalább a felső határ megadható az alábbiak szerint.

Ha a mért W_t értéket a trendvonal egyenletébe behelyettesítjük, akkor megkapjuk a számított W_x értékét:

$$W_x = 1,2105 \times W_t + 0,7890$$

A megengedhető hullámossági motíffok maximális magasságának (W_{x_max}) egyenlete:

$$W_{x_max} = 1,2105 \times W_t + 5,4721$$

Ha az alábbi feltétel érvényesül, azaz W_x nagyobb, mint W_{x_max} , akkor a gyenge kapcsolatszint ellenére megnő az esélye annak, hogy az átváltással érvényes eredményt kapunk.

$$W_x \leq W_{x_max}$$

8. Az eredmények hasznosíthatósága az iparban

A motíf rendszert először 1969-ben szabványosította a francia autóipar (NF E 05-015), majd 1996-tól a nemzetközi szabványba is bekerült (EN ISO 12085). A gépjárműiparban a hagyományos M rendszerű paraméterek mellett a motíf rendszerbeliek térnyerése figyelhető meg, ezért ez utóbbiak is egyre többször szerepelnek a megbízói alkatrészbázisokon. A megrendelők egyre többször írják elő a motíf paraméterek mérését is, ami az általánosan használt mérőberendezésekkel és alacsony költségvetéssel rendelkező beszállítók számára komoly problémát jelent, mivel az a beszállító nyer meg egy-egy megrendelést, aki a leggyorsabban képes alkalmazkodni és megfelelni az adott előírásoknak. A dolgozatban közölt eredmények a kisebb beszállítóknak nyújthatnak segítséget: megkönnyítik az olyan megrendelések teljesítését, amikor a beszállító csak az egyik, M rendszerű paraméter mérését képes elvégezni, de a megbízó további, motíf paraméterek mérését is előírja. Továbbá a kis kezdőtőkével rendelkező, a piacra belépni kívánó, újonnan alapított vállalat számára is hasznos lehet a paraméterrendszerek közötti átváltási módszer alkalmazása, mivel nem kerül hátrányba akkor sem, ha a kezdetekben nem fektet be egy nagy tudású mérőberendezésbe, hanem a kisebb gépekre alapozva kíván versenybe szállni a régóta a piacon lévő cégekkel a megbízásokért. Ilyen és hasonló esetekben a dolgozatban ismertetett összefüggések alternatív megoldásként szolgálhatnak a kis költségvetésű, de a versenyképességüket növelni vágyó kisvállalatoknak.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném köszönetemet kifejezni mindenkinek, aki segítette a munkámat a mérések és a TDK dolgozat megírása során.

Dr. Horváth Sándornak, akinek a szakmai tanácsai és útmutatása megalapozta a dolgozat létrejöttét.

Dr. Czifra Árpádnak, aki alapvetően hozzájárult a kutatás elindításához, lebonyolításához, és segítette munkám szakmai hozzáértésével.

Nagy Viktor hallgatótársamnak és barátomnak, akivel elvégeztük a méréseket.

Szüleimnek és testvéreimnek a mindenkori támogatást.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni egykori szakközépiskolai osztályfőnökeimnek, Kovács Kálmánnak és Veres Józsefnek, akik bevezettek a gépészet világába, és ezzel is hozzájárultak életem első komolyabb szakmai eredményéhez.

Irodalomjegyzék

- [1] Czifra Árpád, Drégelyi-Kiss Ágota, Galla Jánosné, Huba Antal (szerk.), Kis Ferenc, Petróczki Károly: Méréstechnika, Budapest: Typotex Kiadó, 2012. 1050 p. (TÁMOP Gépész tananyag) (ISBN:13 978-963-2795-37-9)
- [2] Dr. Horváth Sándor: A felületi hullámosság 2D-s és 3D-s jellemzése, a működési tulajdonságokra gyakorolt hatásának vizsgálata és elemzése, PhD értekezés, ZMNE, Budapest 2008
- [3] Dr. Horváth Sándor: Forgácsolt felületek hullámosságának vizsgálata, Egyetemi doktori értekezés, Budapest Műszaki Egyetem, 1990
- [4] Dr. Horváth Sándor, Dr. Czifra Árpád, Lipusz Gergely Levente, Nagy Viktor: Felületmódosító eljárások hatása az érdesség M-rendszerű és motif paramétereire, OGÉT 2014 Nemzetközi Gépész Találkozó, Nagyszerben (elfogadott publikáció)

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés, célkitűzés.....	1
2. A kutatás módszere, menete	1
2.1. A munkadarabok, ill. a mérések jelölési rendszere.....	2
2.2. A vizsgált paraméterek.....	2
2.3. Az vizsgált paraméter párok	3
3. Az M - és a motif rendszerű paraméterek.....	4
3.1. Az M rendszerű paraméterek	4
3.1.1. Átlagos érdesség (R_a)	4
3.1.2. Négyzetes középérték (R_q)	4
3.1.3. Érdesség magasság (R_z).....	4
3.1.4. Maximális egyenetlenség (R_t)	4
3.1.5. Maximális csúcsmagasság (R_p)	4
3.1.6. Maximális völgymélység (R_v).....	5
3.1.7. Profilelemek közepes hullámhossza (R_{Sm}).....	5
3.1.8. Lokális maximumok átlagos távolsága (R_S)	5
3.1.9. Ferdeségi mérőszám (R_{Sk})	5
3.1.10. Lapultsági mérőszám (R_{Ku})	5
3.1.11. Hullámossági profil közepes eltérése (W_a)	5
3.1.12. Hullámossági profil maximuma (W_t)	6
3.1.13. Hullámossági profil legnagyobb magassága a középvonaltól (W_p).....	6
3.1.14. Hullámossági profil legnagyobb mélysége (W_v).....	6
3.1.15. Hullámossági profil közepes hullámhossza (W_{Sm})	6
3.1.16. Hullámossági profil ferdeségi mérőszáma (W_{Sk})	6
3.1.17. Hullámossági profil lapultsági mérőszáma (W_{Ku}).....	7
3.2. A motif rendszerű paraméterek	7
3.2.1. Érdességi motif átlagos magassága (R)	7
3.2.2. Érdességi motif hossz (AR)	7
3.2.3. Érdességi motif maximális magassága (R_x)	7
3.2.4. Hullámossági motif közepes magassága (W)	7
3.2.5. Hullámossági motif közepes osztása (AW)	7
3.2.6. Hullámossági motif maximális hullámmélység (W_x)	8
4. A pontthalmazt határoló burkoló egyenesek egyenletének általános levezetése	8
4.1.1. Az „A” felület	8
4.1.2. A „B” felület	9
4.2. „A” és „B” felületek egyenesei közös koordináta-rendszerben	10
4.2.1. Metszéspontok	10
4.2.2. A burkoló egyenesek helyzete	11
5. Mérési eredmények	12
5.1. Az átlagos érdesség (R_a) és az érdességi motif átlagos magasság (R) közötti kapcsolat.....	14

5.2 A négyzetes középérték (R_q) és az érdességi motíf átlagos magasság (R) közötti kapcsolat.....	17
5.3. Az érdesség magasság (R_z) és az érdességi motíf átlagos magasság (R) közötti kapcsolat.....	20
5.4. A maximális csúcsmagasság (R_p) és az érdességi motíf átlagos magasság (R) közötti kapcsolat	24
5.5. A hullámossági profil maximuma (W_t) és a hullámossági motíf maximális hullámmélység (W_x) közötti kapcsolat.....	28
5.6. A hullámossági profil közepes eltérés (W_a) és a hullámossági profil maximális hullámmélység (W_t) kapcsolata.....	29
6. A határoló egyenesek egyenletei.....	31
7. Következtetések, konklúziók	32
8. Az eredmények hasznosíthatósága az iparban	33