

Felületi érdességi paraméterek vizsgálata esztergált felületek esetében

Study and comparison of surface roughness parameters in turning

Lóránd Áron*, Drégelyi-Kiss Ágota**

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

*lorand.aron@bgk.uni-obuda.hu, **dregelyi.agota@bgk.uni-obuda.hu

Összefoglalás - A felületi érdességmérést érintő 2021-es szabványváltozásból kifolyólag kidolgoztuk a felületi érdességet jellemző paramétereket a legújabb, ISO 21920:2021 szabvány szerint, mivel jelenleg az egyetem nem rendelkezik olyan kiértékelő software-rel vagy mérőműszerrel, amely képes lenne erre. A cikk célja részleteiben bemutatni az új adatfeldolgozási eljárást, illetve esztergált etalonokon Mitutoyo SJ 301-es érdességmérő műszerrel végzett mérésekkel validálni az eljárás helyességét. Ezt a mérőműszer által mutatott értékekkel való összehasonlítással végeztük. Eredményként csekély eltéréseket kaptunk, amelyre az új eljárás mellett a numerikus módszerek különbsége is magyarázatot adhat.

Kulcsszavak - felületi érdesség, adatkiértékelés, adatszűrés, ISO 21920 szabvány

Abstract - As a result of the 2021 standard change affecting surface roughness measurement, we developed a software to calculate the parameters characterizing surface roughness according to the latest ISO 21920:2021 standard, as the university currently does not have evaluation software or measuring devices capable of this. This article aims to provide a detailed explanation of the new data processing procedure, and to confirm its accuracy through measurements on turned artifacts using a Mitutoyo SJ 301 roughness measuring instrument. This was done by comparing the calculated values with the ones shown by the device. As a result, we obtained minor differences, which can be explained by the difference in numerical methods as well as the new procedure.

Keywords: surface roughness, data processing, filtration, ISO 21920 standard

1 BEVEZETÉS

A 2021-ben bevezetett új, felületi érdességre vonatkozó szabvány számos, kisebb-nagyobb változást hozott a felületi érdességre vonatkozó jellemzők, paraméterek kiszámításában. Mivel mind kutatásban, mind az iparban szükséges a legfrissebb szabvány szerint és a lehető legnagyobb precizitással végezni az adatok kiértékelését, ezért fontosnak éreztünk kidolgozni egy software-t, ami az új, ISO 21920:2021 [1] (módosítva 2022-ben) szabvány alapján számítja ki a felületi érdességre jellemző paramétereket.

Célunk a mérőeszközből kinyerhető nyers adatok feldolgozása volt. Ez magába foglalja az adatok megfelelő szűrését, illetve a releváns paraméterek (Ra , Rz) kiszámítását. Végül össze is hasonlítottuk a mérőműszer által kiszámolt értékeket a saját eredményeinkkel.

Felületi érdességen a felület egyéni, komplex szerkezetét, geometriáját értjük. Fontosságát az is mutatja, hogy rendkívül széles körű azon tulajdonságok, tényezők halmaza, amiket befolyásol az érdesség. Műszaki szempontból érdemes megemlíteni, hogy az érdesség mértéke jelentős hatással van a valódi érintkezési felület nagyságára, a súrlódásra, a kopás fokára. További ilyen tényezők között felsorolhatók optikai, illetve hőteljesítménnyel kapcsolatos tulajdonságok, és például a festhetőség is [2]. Azonban a legfontosabb az, hogy az érdesség paraméterek mérés által meghatározhatóak, így minőségellenőrzésre alkalmasak például valamilyen gyártási folyamat során. Érdekességként megemlíthető az is, hogy biológiai vonatkozása is van: befolyásolhatja a szuperhidrofób viselkedést is [3].

Ahogy minden mérnöki folyamat, úgy a felületi érdességmérés is szabályozott. 2021-ig bezárólag az ISO 4287:1997 [4] és ISO 4288:1996 [5] szabványok voltak érvényben. 2021 végén azonban új szabvány lépett a helyükbe, az ISO 21920:2021, amely - a 2022-es csekély módosításokkal - azóta is hatályos. Első része a felületi érdesség jelöléseit határozza meg, második része a szakkifejezések és a paraméterek definícióit adja meg, végül a harmadik a felületi textúra pontos előírásával foglalkozik. A különbségek a szabványok között négy kategóriába sorolhatók: elnevezésekben, jelölésekben bekövetkezett változások, új paraméterek (pl. az abszolút gradiens átlaga) és új profil elemek megjelenése (pl. a profilcsúcs mellett a profilvölgy).

1. táblázat: A korábbi és jelenlegi felületi érdességi szabvány főbb nevezék változásai

ISO 4287	ISO 21920
kiértékelési hossz (<i>evaluation length</i>) l_n	kiértékelési hossz (<i>evaluation length</i>) l_e
mintavételezési hossz (<i>sampling length</i>) l_r	szekcióhossz (<i>section length</i>) l_{sc}
a legtöbb paraméter a mintavételezési hosszban van definálva	csak R_{pt} , R_p , R_{vt} , R_v , R_z vannak a szekcióhosszon kiértékelve, minden más a kiértékelési hosszban kerül definálásra
profilcsúcs (<i>profile peak</i>)	profilhegy (<i>profile hill</i>)
-	profilcsúcs (<i>profile peak</i>)
profilvölgy (<i>profile valley</i>)	profilvölgy (<i>profile dale</i>)
-	profilgödör (<i>profile pit</i>)
-	korrelációs hossz (<i>correlation length</i>)

Kiértékelés szempontjából a legjelentősebb különbség az, hogy míg korábban a mintavételezési (most: szekció-, lásd hamarosan) hossz (angolul: sampling length volt, most már section length, l_{sc}) kellett a paramétereket kiértékelni, majd ezeket átlagolni, addig most a legtöbb paraméter az egész kiértékelési hossz (angolul: evaluation length, $l_e = n_{sc} \times l_{sc}$, ahol n_{sc} a szekciók száma) értelmezendő. Az 1. táblázatban összefoglaljuk a főbb különbségeket, illetve példát mutatunk az új paraméterekre.

Az összes terület szakirodalmát, ahol előfordul felületi érdesség, összevetve elmondható, hogy a leggyakrabban előforduló paraméterek az átlagos érdesség, R_a , és R_z , az R-profil (érdességi profil) maximum magassága.

Kiszámítási módjaikat az alábbi összefüggések mutatják:

$$R_a = \frac{1}{l_e} \int_0^{l_e} |z(x)|$$

és

$$R_z = \frac{1}{n_{sc}} \sum_{i=1}^{n_{sc}} \left(\max_{j \in N_i} (Z_{vd,j}) + \max_{k \in N_i} (Z_{ph,k}) \right),$$

ahol $z(x)$ az érdességi profil függőleges koordinátája, $Z_{vd,j}$ a j -edik völgy mélysége, $Z_{ph,j}$ a j -edik csúcs magassága, $N_i = \{j = 1, 2, \dots, n_p \text{ vagy } n_p | (i-1)l_{sc} \leq x_j \leq il_{sc}\}$, n_v, n_p a csúcsok és völgyek száma, x_j a j -edik profilcsúcs helyzete az x-tengelyen [1].

Emellett még az R_q , R_v és R_p paramétereket is vizsgáltuk, melyek rendre: négyzetes középmagasság, átlagos völgymélység és átlagos csúcsmagasság (*root mean square height*, *mean pit depth* és *mean peak height*). Ezek közül az utóbbi kettő összege adja meg R_z -t, és ahogy a nevük is mutatja, a szekciókra átlagolt mennyiségekről van szó.

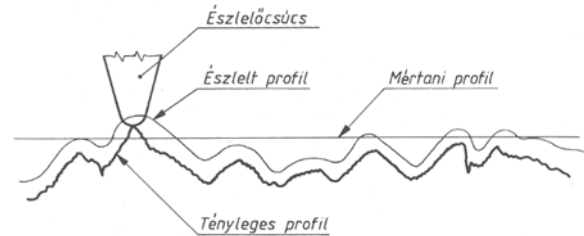
2 ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

2.1 A szűrés folyamata

Ahhoz, hogy az érdesség paramétereket ki tudjuk számolni, elő kell állítani a letapogatott felszínről készített modelltől a felületi érdességi profilt, vagyis az R-profilt. E célból az adatokban egy szűrés folyamat lépésein szükséges végigvinni. Azonban az érdességmérésnél nemcsak numerikusan történik szűrés, hanem mechanikusan, a tapintó által is. Az alábbiakban bemutatjuk, milyen szűrés lépések vannak, és melyik milyen felületi modellt eredményez.

Minden testnek egyedi felszíne van, sajátos geometriával rendelkezik. Az ezt bemutató modellt hívjuk felületi modellnek (*skin model*). A felületi érdesség mérése során a felületen található völgyeket és csúcsokat szeretnénk letapogatni. Amennyiben nem optikai, hanem tapintótűs eszközzel határozzuk meg a felületet, a mérőműszer feje nem fér bele minden felület minden mélyedésébe, így a felületet nem minden esetben tudjuk tökéletesen letapogatni a tapintófejjel, amikor az a mérendő felületen végighalad. Ez egyfajta természetes szűrő, amely tehát a

mérőfej véges méretéből származik [6]. Így kapjuk a mechanikai felületi profilt, amelyet az 1. ábra szemléltet. Értelemszerűen minél kisebb a letapogatást végző gyémántgömb átmérője, ez a két modell annál inkább közelít egymáshoz.

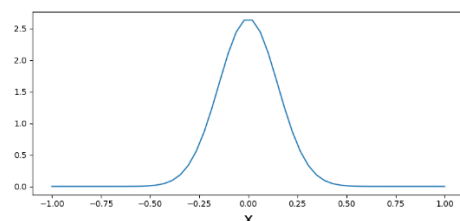


1. ábra: A felületi (tényleges) és mechanikai felületi (észlelt) profil szemléltetése, amely utóbbi a tapintófej véges méretéből fakad

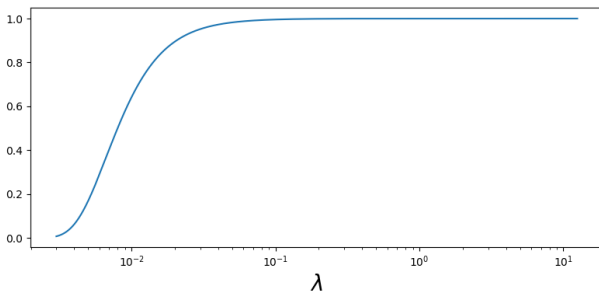
A felületi modellt nem tudjuk tehát meghatározni, a felület letapogatását követően létrejött modellt mechanikai felületi profilnak nevezzük. A mechanikai felületi profil további szűréséhez, melyre azért van szükség, hogy kiszűrjük az érdességhez túl kis és túl nagy hullámhosszú komponenseket, illetve a felület dőltségét/alakját, elengedhetetlen számítógépes adatfeldolgozó módszer.

A numerikus szűrés jelen esetben mindegyik lépésben Gauss-szűrő alkalmazását jelenti, valamilyen *nesting indexszel* vagy levágási hullámhossz értékkel (*cutoff wavelength*, λ_c), amely elnevezések közül a jelen szabvány mindkettőt megengedi, azonban a korábbi szabványban kizárólag utóbbi élt. Ez az érték a Gauss-eloszlás, amellyel a szűréshez a hullámhossz-tartományba transzformált adatsort kell megszorozni, szórására (szélességére) utal, és amelyet mind az előző, mind az ISO 21920 [1] szabvány különböző kiértékelési hosszoknál különböző értékekben határoz meg. Hangsúlyozzuk, hogy a szűrő típusa (ami jelen esetben a Gauss-típusú szűrő) kiértékelési hosszoként (és szabványonként) eltér.

Az adatszűrés első lépése a profil S-filter alkalmazása, N_{is} nesting indexszel (egyéb érvényben lévő jelöléssel λ_s), amellyel az elsődleges felületi profilhoz (*primary surface profile*) jutunk. Ez a gyakorlatban egy aluláteresztő Gauss-szűrő Fourier-térben való alkalmazását jelenti [7], $\lambda_s = 8 \mu\text{m}$ levágási hullámhosszal, vagyis minden olyan hullámhosszt, ami ennél kisebb hullámhosszú (nagyobb frekvenciájú), azt a szűrő elnyomja (tehát az annál nagyobb hullámhosszúak kerülnek be). A Gauss-szűrő Fourier-térben sem egy éles, függőleges határvonalat jelent - ahogy ezt a 2. ábra mutatja -, hanem a nesting index bizonyos környezetében 0-ról 1-re fokozatosan emelkedő függvényről beszélünk. Az S-szűrő tulajdonképpen a nagyon kicsiny hullámhosszú komponensek kiszűrését végzi.



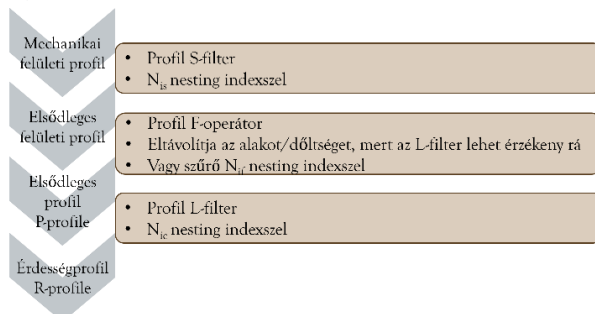
2. ábra: Egy Gauss-eloszlás szemléltetése direkt térben



3. ábra: Ugyanazon eloszlás Fourier-térbeli logaritmus x-tengellyel

Ezután következnek profil F-operátor (*profile F-operation*), aminek alkalmazásával az elsődleges profil (*primary profile*), másnéven a P-profil kapjuk. Ez legtöbb esetben a felvett profil alakját és/vagy dőltségét hivatott eltávolítani, mivel a következő szűrő, az L-filter érzékeny lehet arra, ha a profil nem sík. Előfordulhat olyan eset is, amikor ez az művelet ugyanúgy szűrőt jelent, mint az S-filter, mely típusa több fajta lehet, ekkor az ehhez tartozó nesting indexet N_{if} -fel jelöljük.

A szűrési folyamat záró lépése az említett L-filter alkalmazása. Az ezt jellemző nesting index jele N_{ic} , értéke 2,5 mm. Ez egy felülatérsztő szűrő, vagyis minden olyan hullámhosszt fokozatosan átenged, amely ennél az értéknél kisebb. Ez az a szűrő, amely szétválasztja az érdességprofil (roughness profile), tehát az R-profil, amely a rövid hullámhosszokhoz tartozó finom léptékű szabálytalanságokat mutatja meg, és a hullámosságprofil (waviness profile), vagyis a W-profil, amely a nagyobb hullámhosszokon előforduló nagyobb léptékű eltéréseket szemlélteti (lásd 10. ábra). Számszerűsítve: minden 8 μm és 2,5 mm közötti hullámhossz az érdesség részét képezi, az ennél nagyobb értékek tehát a hullámossághoz tartoznak. Úgy is megkapható a W-profil, ha a P-profilból levonjuk ábraaz R-profil, és ugyanez igaz visszafelé is, tehát a W-profil levonva az R-profil kapjuk meg. Látható, hogy az R- és W-profilok szoros összefüggésben vannak egymással. Azt, hogy milyen szűrés, legyen az mechanikai vagy numerikus módszerrel létrehozott, milyen profilt hoz létre, a 4. ábra szemlélteti.

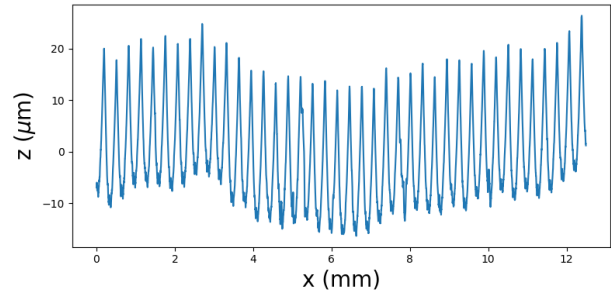


4. ábra: Az adatszűrés folyamatábrája

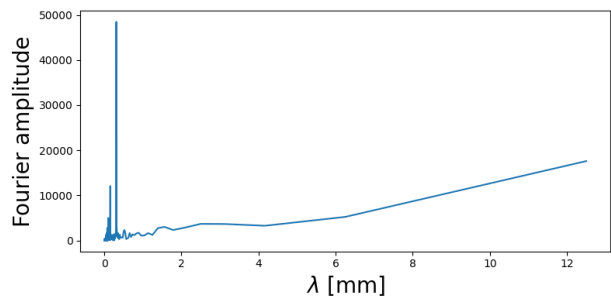
2.2 Numerikus kivitelezés

A szűrés folyamatának numerikus implementálására két út kínálkozik. Az egyik a már említett Fourier-transzformációt alkalmazó, ahol mind a mért profilt, mind

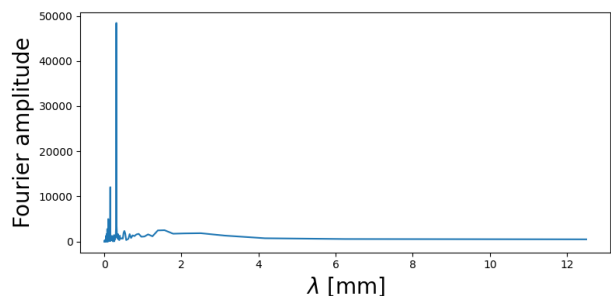
a szűrőt hullámhossz-térben kell venni, majd a profilt súlyfüggvényként meg kell szorozni az adott nesting indexű szűrővel. A 3. ábra tehát gyakorlatilag a szűrő átengedési karakterisztikáját mutatja. Az 5. ábra általunk ábrázolt, szűretlen profilt, az 6. annak Fourier-transzformáltját, a 7. a szűrt Fourier-spektrumát szemlélteti.



5. ábra: Egy szűretlen, mért felületi profil direkt térben



6. ábra: Ugyanazon profil Fourier-spektruma



7. ábra: A szűrt Fourier-spektrum

A másik módszer a direkt térben való szűrés. Ehhez egy kevésbé ismert művelet, a konvolúció szükséges, amit az alábbi módon definiálhatunk:

$$(f * g)(t) := \int_{-\infty}^{+\infty} f(\tau)g(t - \tau)d\tau.$$

A direkt térben vett profil és a direkt térben vett, azonos levágási hullámhosszal rendelkező Gauss-szűrő konvolúcióját kell venni, amikor S-filterről és L-filterről beszélünk. A dőltség (tilt) levonása nem változik. Annyiban egyszerűbb a dolgunk, ha ezt az utat választjuk, hogy nem kell a Fourier-transzformációkkal törődni. Bebizonyítható, hogy a két folyamat, a direkt térben vett konvolúció és a Fourier-térben vett szorzás ekvivalens.

Python programozási nyelvet használtunk a kiértékelésre és az ábrák elkészítésére, ahol a számunkra szükséges

diszkrét Fourier-transzformációra beépített parancs van, amely elvégzi mind a Fourier-spektrum, mind az x-tengely értékeinek elkészítését (előbbire a *scipy* könyvtár *fft* parancsa szolgál, utóbbira a *numpy* csomag *fftfreq* parancsa), bár kiemeljük, hogy utóbbi „kézzel” is el lehet végezni, és mi ezzel a lehetőséggel éltünk. A direkt térben elvégzett szűréshez szükséges konvolúció műveletéhez is található beépített parancs: ez a *numpy* csomag *convolve* parancsa. Az adatok beolvasásához, az adatszűréshez, az R- és W-profilok előállításához és a paraméterek kiszámolásához szükséges kódrészletek is olvashatóak alább (az elválasztott részek a folyamat különböző lépéseit hajtják végre):

```
df=pd.read_excel('N09-R.xls',sheet_name=1, header=None)
z=df[3].tolist()
x=df[2].tolist()
rprofile=df[5].tolist()

Fj1=fft(z)
n=8330
l=12.5
dx=1/n
j=arange(1,floor(n/2).astype(int)+1)
lamb=1/j
plot(lamb,abs(Fj1)[1:floor(n/2).astype(int)+1])

n=len(r)
lsc=2.5
nsc=5
le=nsc*lsc
start_index=0
lengths=[]
rmatrix=[]
xmatrix=[[],[],[],[],[],[ ]]
lengths=[]
mins=[]
maxs=[]
for i in range(0,nsc):
    for j in range(len(x)):
        if i*lsc<x[j]<(i+1)*lsc:
            xmatrix[i].append(x[j])
    lengths.append(len(xmatrix[i]))
for length in lengths:
    rmatrix.append(r[start_index:start_index+length])
    start_index+=length
for i in range(0,nsc):
    mins.append(min(rmatrix[i].real))
    maxs.append(max(rmatrix[i].real))
Ra=sum(abs(r))/n
Rq=sqrt(sum(r**2)/n).real
Rp=sum(maxs)/len(maxs)
Rv=abs(sum(mins)/len(mins))
Rz=Rp+Rv
return Ra, Rq, Rp, Rv, Rz

alpha=sqrt(log(2)/pi)
def s_low(lambda_): #low-pass filter
    return e**(-pi*(alpha*lambda_cl/lambda_)**2)
def s_high(lambda_): #high-pass filter
    return 1-e**(-pi*(alpha*lambda_ch/lambda_)**2)
#S filter lambda_c=0,008 mm, F filter: tilt levonása,
#L filter: lambda_c=2.5 mm

Fszürt=Fj1*szűrő_low
temp=ifft(Fszürt).real #visszatranszformáljuk az
#S-filterezett spektrumot, hogy a formot levonhassuk
popt,pcov=curve_fit(fun1,x,temp)
tilt=temp_fun1(arr,popt[0],popt[1]) #tilt levonása
Fszürt=fft(tilt) #vissza FT
Fszürt=Fszürt*szűrő_high

r=ifft(Fszürt).real
w=z-r
```

2.3 A felületi érdesség mérése

Ugyan jórészt az új szabvány szerinti kiértékelés bemutatásáról szól ezen írás, nem mehetünk el mellett, hogy az algoritmusunkat valódi adatokon teszteljük, és a felületi érdességmérő készülék által kiértékelt mérőszámokkal összevessük az általunk kapott értékeket. Ehhez a szükséges adatokat esztergált etalonok méréséből nyertük, amely mérést egy Mitutoyo SJ 301-es profilometrikus mérőeszközzel végeztünk. A műszert a 8., az etalonokat a 9. ábra mutatja. Minden adatfelvételt háromszor ismételtünk meg.



8. ábra: Az adatok felvételéhez használt mérőeszköz

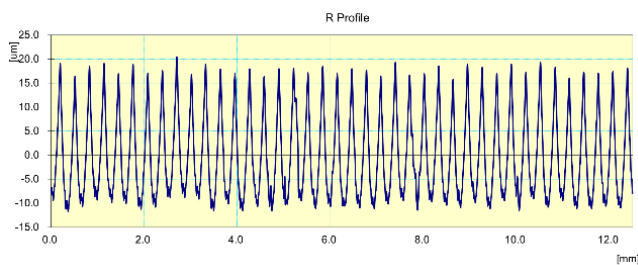


9. ábra A méréshez használt etalonok

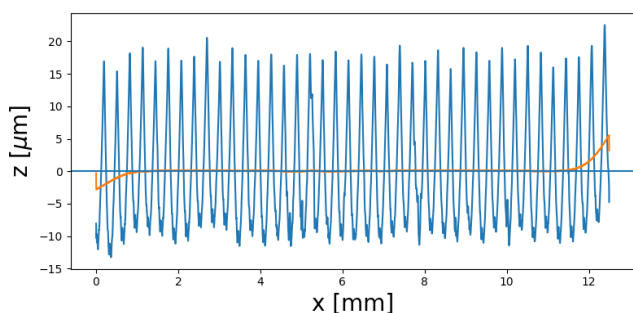
3 EREDMÉNYEK

Több módon tudjuk a kapott eredményeinket összehasonlítani. Ebben a fejezetben az általunk kapott R-profilját vetjük össze a mérőeszköz által mutatott R-profiljával. Mint már említettük, ezt a profilt úgy kapjuk, hogy a mért profiltól eltávolítjuk a W-profil megfelelő szűrők segítségével.

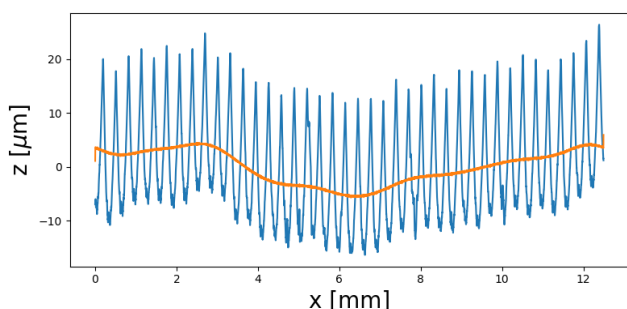
A 10-12. ábra az említett érdességprofilok összevetését mutatja be. A 10. ábra a műszer által meghatározott, míg a 11. ábra az általunk kapott profilt, illetve a kettőnek a különbségét szemlélteti. Az x-tengelyen a vizsgált test szélétől vett távolság szerepel milliméterben, az y-tengelyen az érdesség mértéke (egy adott vonaltól mint 0-szinttől mért függőleges távolság) látható mikronban mérve. A profil szélein minimális eltérés látható, amely részek általában nem relevánsak, mivel ott a mérési bizonytalanság nagyobb a mérési eljárásból következően (a mérőfej a mérendő darabra érskor és az arról való leéreskor nem teljesen egyenes a mérőkar haladása). A 12. ábra a szűretlen profilon mutatja be a W-profilát.



10. ábra: A mérőeszköz által előállított R-profil



11. ábra: A kék grafikon a nyers adatokból általunk kapott R-profil mutatja be, a narancssárga vonal a 8. ábrán látható és az említett R- profil közötti különbséget mutatja



12. ábra: Az általunk kapott W-profil (narancssárga) bemutatása a mért profilon (kék)

Az eredmények összevetésének másik formája az érdesség paraméterek összehasonlítása. Ezt az alábbi, 2. táblázatban tesszük meg.

2. táblázat: A mérőműszer és az általunk kapott érdesség paraméterek összehasonlítása

	A mérőeszközből származó paraméterek ISO 4287	Eredmények ISO 21920	%-os eltérés
R_a (μm)	7,54	7,57	0,40%
R_q (μm)	8,70	8,76	0,69%
R_p (μm)	19,41	20,09	3,50%
R_v (μm)	11,51	11,73	1,91%
R_z (μm)	30,92	31,83	2,94%

Jól látható, hogy az R_a , R_q paraméterekben (amelyek igen hasonló jellegű mérőszámok) 10^{-2} -os nagyságrendű eltérés van, az R_z -ben 10^{-1} -es, mivel azt az R_p és R_v különbségének abszolút értékeként képezzük, így mindkét szám a mérőeszközökből származó számoktól való eltérését hordozza. Összességében ezek nem jelentős különbségek. Az eltérések százalékos értékeit a táblázat utolsó oszlopa mutatja (itt az általunk kapott értékeket vettük 100%-nak). Az R_p -ben megjelenő nagyobb, néhány százalékos eltérést magyarázhatjuk a 9. ábrán láthatóakkal. Az x-tengely 12 μm körüli értékénél az általunk kapott R-profil (narancssárga vonal) némileg magasabb értékeket mutat – tehát magasabb csúcsok jelennek meg –, mint a mérőműszer által számoltak. Ugyanez elmondható, ha az R_v -ben jelentkező különbséget akarjuk megérteni. A 0 μm körül nálunk alacsonyabb értékek – mélyebb völgyek – szerepelnek. Ezek a differenciák mutatkoznak meg az átlagos értékek különböztetésében. Ezenkívül a különbségek származhatnak a korábban használt és az új szabvány különbözőségéből, illetve a numerikus, számolási eltérésekből (integrálás diszkrét tétel, kerekítés).

4 ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatómunkánk a magasság leíró paraméterek jellemzésére, elnevezésük, kiszámítási módszerükben - a szabványváltozás által - bekövetkezett változások bemutatására szolgál. Ki kell emelni, hogy a felületi érdesség jellemzésére jóval több paraméter létezik (térbeli, hibrid, anyagarányal kapcsolatos paraméterek), amelyekkel jelen kutatásunkban nem foglalkoztunk, ráadásul az ISO 21920-as szabvánnyal újak is születtek (pl. az abszolút gradiens számtani közepe vagy a profilvölgyek ösztérülete), amelyek kiszámítási folyamatainak kidolgozása további feladatnak is tekinthető. Ennek fényében következő lépésben kiterjeszhető a számítási eljárás az általunk nem vizsgáltakra, azonban azt kiemeljük, hogy jelen írásban kidolgoztuk a mérés-technika-kutatás és az ipar számára jelentősebb paramétereket.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] ISO 21920 (2022) GPS. Surface texture: Profile, ISO, Geneva.
- [2] Bhushan, B. (2000). Surface roughness analysis and measurement techniques. In B. Bhushan, *Modern tribology handbook, two volume set* (old.: 79-150). Boca Raton, Florida: CRC Press.
- [3] Yang, C., Tartaglino, U., & Persson, B. N. J. (2006). Influence of surface roughness on superhydrophobicity. *Physical review letters*, 97(11), 116103.
- [4] ISO 4287 (1997) GPS — Surface texture: Profile method — Terms, definitions and surface texture parameters, ISO, Geneva.
- [5] ISO 4288 (1996) GPS — Surface Texture: Profile Method — Rules and Procedures for the Assessment of Surface Texture, ISO, Geneva.
- [6] Lou, S. e. (2019). An investigation of the mechanical filtering effect of tactile CMM in the measurement of additively manufactured parts. *Measurement*, 144, 173-182.
- [7] Muralikrishnan, B. R. (2009). *Computational Surface and Roundness Metrology* London : Springer-Verlag London Limited.