MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

100Cr6 MALZEMENİN SERT TORNALAMA İŞLEMİNDE Pt CİNSİNDEN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ

KAAN CAN BAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Ayhan ETYEMEZ

İSTANBUL, 2025

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

100Cr6 MALZEMENİN SERT TORNALAMA İŞLEMİNDE Pt CİNSİNDEN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ

KAAN CAN BAŞ

(523222006)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Ayhan ETYEMEZ

İSTANBUL, 2025

ÖNSÖZ

Talaşlı imalat teknolojilerindeki kapsamlı gelişmeler neticesinde sert tornalama işlemi artık taşlama işlemi ile elde edilebilen boyutsal, geometrik ve yüzey kalitesi kriterlerinin önemli bir kısmını daha düşük maliyet ile sağlar düzeye ulaşmıştır. Bunun yanında daha az beyaz katman oluşumu gibi mikroyapısal avantajları da olduğu görülmüştür. Bu bağlamda bu yüksek lisans tez çalışmasında sert tornalama işlemi ile elde edilebilecek yüzey kalitesi ve etki faktörleri incelenmiştir.

Her aşamasında önemli kazanımlar elde ettiğim bu tezin hazırlanmasında bilgisi ve tecrübesi ile yol gösteren danışmanım sayın Doç. Dr. Ayhan ETYEMEZ'e, lisans ve lisansüstü çalışmalarım boyunca teşvik ve desteğini esirgemeyen sayın Dr. Öğr. Üyesi Ferhat GÜNGÖR'e, teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca deneysel çalışmalarımda sağladığı imkanlar ile Nikken Türkiye'ye katkıları için çok teşekkür ediyorum.

Bu alandaki akademik ve endüstriyel çalışmalara faydalı olacağını temenni ediyorum.

Temmuz, 2025 **Kaan Can BAŞ**

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER ii
ÖZET iv
ABSTRACT vi
SEMBOLLER viii
KISALTMALAR xi
ŞEKİL LİSTESİ xii
TABLO LİSTESİ xvi
1. GİRİŞ 1
1.1. Tezin Konusu 1
1.2. Tezin Amacı ve Hedefi 2
1.3. Tezin Hipotezi 2
1.4. Tezin Özgün Yönü 3
1.5. Literatür İncelemesi 3
1.6. Çelikler 5
1.6.1. Alaşımsız Çelikler 5
1.6.1.1. Düşük Karbonlu Çelikler 5
1.6.1.2. Orta Karbonlu Çelikler 5
1.6.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler 6
1.6.2. Alaşımlı Çelikler 6
1.7. Sert Malzemeler 6
1.8. Sert Tornalama 6
1.9. Malzemelerin Sertliği 7
1.9.1. Çizilme Sertliği 7
1.9.2. Geri Tepme (Dinamik) Sertliği 8
1.9.3. İz (Girinti) Sertliği 8
1.9.3.1. Makro İz (Girinti) Sertliği Ölçme Testi 8
1.9.3.2. Mikro İz (Girinti) Sertliği Ölçme Testi 10
1.10. Yüzey Pürüzlülüğü 11
1.10.1. Yüzey Profilleri ve Filtreler (ISO 4287) 14
1.10.2. Yüzey Pürüzlülük Parametreleri 14
1.10.2.1. Maksimum Tepe Yüksekliği (Rp, Pp, Wp) 14
1.10.2.2. Maksimum Profil Derinliği (Rv, Pv, Wv) 15
1.10.2.3. Maksimum Yüzey Pürüzlülüğü Ortalaması (Rz, Pz, Wz) 15
1.10.2.4. Maksimum Yüzey Pürüzlülüğü (Rz1max, Pz1max, Wz1max 16
1.10.2.5. Aritmetik Ortalama Yükseklik (Ra, Pa, Wa) 16

1.10.2.6. Toplam Profil Yüksekliği (Rt, Pt, Wt) 17
1.10.2.7. Profil Elemanlarının Ortalama Yüksekliği (Rc, Pc, Wc) 17
1.10.2.8. Ortalama Karekök Sapması (Rq, Pq, Wq) 18
1.10.2.9. Asimetriklik (Rsk, Psk,Wsk) 18
1.10.2.10. Sivrilik – Basıklık (Rku, Pku, Wku) 19
1.10.2.11. Profil Elemanlarının Ortalama Genişliği (RSm, PSm, WSm) 19
1.10.2.12. Ortalama Karekök Eğimi (RΔq, PΔq, WΔq) 20
1.10.2.13. Yük Uzunluk Oranı (Rmr(c), Pmr(c), Wmr(c)) 21
1.10.2.14. Rpk, Rk, Rvk, Mr1, Mr2 21
2. MATERYAL VE YÖNTEM 22
2.1. Deneysel Çalışmanın İş Akış Şeması 22
2.2. Deneysel Çalışma Numunesi 23
2.3. Deneysel Çalışmada Kullanılan Torna Tezgahı 24
2.4. Deneysel Çalışmada Kullanılan Kesici Takım ve Tutucular 24
2.5. Deneysel Çalışmada Kullanılan Ölçüm Ekipmanları 26
2.6. Deneysel Çalışmada Uygulanan Kesme Şartları ve Deney Tasarımı 27
3. BULGULAR VE TARTIŞMA 31
3.1. Alın Tornalama Deneyleri Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları 31
3.2. Dış Çap Tornalama Deneyleri Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları 33
3.3. Verilerin Analiz Edilmesi 34
3.3.1. Sinyal Gürültü Oranları ve En İyi Seviyeler 34
3.3.2. Varyans Analizi (Analyses of Variance – ANOVA) 37
4. SONUÇLAR 40
KAYNAKLAR 41
EKLER 43
EK A ALINTORNALAMA DENEYLERİ Ra VE Pt YÜZEY GRAFİKLERİ 43
EK B DIŞ ÇAP TORNALAMA DENEYLERİ Ra VE Pt YÜZEY GRAFİKLERİ 67

ÖZET

100Cr6 MALZEMENİN SERT TORNALAMA İŞLEMİNDE Pt CİNSİNDEN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNE ETKİ EDEN FAKTÖRLERİN İNCELENMESİ

İnsanlığın makinelerden beklentilerinin her geçen gün artması, malzeme bilimi, bilgisayar destekli tasarım, analiz ve hesaplama kabiliyetleri, hassas ölçüm ve muayene teknolojileri ve imal usullerinde önemli gelişmeleri beraberinde getirmiştir. Günümüzde birçok mühendislik ürünü makine ağır yükler altında, uzay şartlarında, çok düşük ve yüksek sıcaklıklarda, yüksek hızlarda, çok hassas ve mikro boyutlar gibi çok farklı koşullarda insanlığa hizmet etmektedir. İnsanlık olarak sahip olduğumuz makine ve teknoloji üretme gücümüz gurur verici şekilde artmaktadır. Ancak teknolojik ilerlemelerle birlikte kaynak kullanımı ve maliyet faktörleri de giderek önem kazanmaktadır. Ülkelerin, küresel boyuttaki teknoloji yarışında, ürün fiyatındaki rekabet gücü uluslararası ticaretin şeklini belirlemektedir. Zaman zaman ekonomik savaşlara dönüşen bu rekabetin unsurlarından biri de imalat usullerindeki maliyetlerdir. İmalat maliyetleri konusu, talaşlı imalat endüstrisi olarak ele alındığında sert malzemelerin işlenmesinde, taşlama işlemi yerine sert tornalama işlemleri giderek daha fazla tercih edilmektedir. Yapılan akademik çalışmalarda sert malzemelerin işlenmesinde, sert tornalama işleminin, taşlama işleminden daha az beyaz katman oluşumuna sebep olduğu da görülmüştür. İş parçasının alın yüzeyleri, açılı yüzeyleri, delik içi yüzeyleri, radyuslar ve pahlar, eksenel ve radyal geometrik unsurlar tek bir torna tezgahında sert tornalama ile bitirilebilmektedir. Aynı zamanda iş parçasının farklı geometrileri arasındaki eşmerkezlilik, salgı ve konum gibi geometrik toleransların sağlanması da daha mümkün olmaktadır.

Rulman çeliklerinin birçok çeşidi olmasına rağmen 100Cr6 çeliği, yüksek sertlik, aşınma direnci ve yorulma mukavemeti özellikleri ile en sık tercih edilenidir. Rulmanlardaki kullanımının dışında özellikle otomotiv ve makine imalatında olmak üzere kritik parçaların imalatında vazgeçilmez niteliktedir.

Literatürde sert tornalama işleminin Ra cinsinden yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin incelendiği çalışmalar mevcuttur. Ancak endüstride bilhassa sızdırmazlık yüzeylerinde Pt cinsinden yüzey pürüzlülük kriteri ile çok sık karşılaşılmaktadır. Sızdırmazlık beklentisi dış çap ve iç çap yüzeylerinde olsa da genellikle alın yüzeylerinde karşımıza çıkmaktadır.

Bu bağlamda yapılan yüksek lisans tez çalışması ile 100Cr6 çeliğin sert tornalama işleminde Pt cinsinden yüzey pürüzlülüğü kriterine etki eden faktörlerin etki düzeylerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak literatür taraması yapılarak sabit kesme koşulları, incelenecek etki faktörleri ve seviyeleri belirlenmiştir. Deneysel çalışmada tam faktöriyel

deney dizaynı ile 36 deney dış çap tornalama, 36 deney ise alın tornalama işlemi için gerçekleştirilmiştir. Sert tornalama deneyleri 55 HRC sertlikte 100Cr6 çelikten numuneler üzerinde uygulanmıştır. İncelenen etki faktörleri kater kesme kenar açısı (KAPR), kesici uç köşe radyusu (RE), kesme derinliği (Ap) ve ilerleme yönüdür. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Ra ve Pt cinsinden yapılmıştır. Optimum faktör seviyelerinin belirlenmesinde Dr. Genichi Taguchi'nin sinyal-gürültü oranı (S/N) yöntemi kullanılarak "daha küçük-daha iyi" kriteri altında gerçekleştirilmiştir. Faktörlerin etki seviyerinin ise varyans analizi (ANOVA) ile tespit edilmiştir.

Elde edilen veriler, sert tornalama işleminde, yüzey kalite kriteri olarak toplam profil yüksekliği (Pt) 2µm'den daha az olan yüzeyler elde edilebileceğini göstermiştir.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF FACTORS AFFECTING Pt SURFACE ROUGHNESS IN HARD TURNING OF 100Cr6 MATERIAL

The ever-increasing expectations of humanity from machines have led to significant developments in materials science, computer-aided design, analysis and calculation capabilities, precision measurement and inspection technologies and manufacturing methods. Today, many engineered machines serve humanity under very different conditions such as heavy loads, space conditions, very low and high temperatures, high speeds, very sensitive and micro dimensions. As humanity, our power to produce machinery and technology is proudly increasing. However, along with technological advances, resource utilization and cost factors are becoming increasingly important. The competitiveness of countries in the global technology race and product price determines the shape of international trade. One of the elements of this competition, which sometimes turns into economic wars, is the costs in manufacturing procedures. When the issue of manufacturing costs is considered as the machining industry, hard turning processes are increasingly preferred instead of grinding processes in the processing of hard materials. Academic studies have also shown that when machining hard materials, hard turning causes less white layer formation than grinding. Academic studies have also shown that hard turning causes less white layer formation than grinding when machining hard materials. Face surfaces, angled surfaces, in-hole surfaces, radii and chamfers, axial and radial geometric elements of the workpiece can be finished by hard turning on a single lathe. It is also more possible to achieve geometric tolerances such as concentricity, runout and position between different geometries of the workpiece.

Although there are many types of bearing steels, 100Cr6 steel is the most preferred due to its high hardness, wear resistance and fatigue strength. Apart from its use in bearings, it is indispensable in the manufacture of critical parts, especially in automotive and machinery manufacturing.

In the literature, there are studies examining the effects of hard turning process on surface roughness in terms of Ra. However, in the industry, especially on sealing surfaces, surface roughness criterion in terms of Pt is encountered very frequently. Although the sealing expectation is on the outer diameter and inner diameter surfaces, it is generally encountered on the face surfaces. In this context, with the master's thesis study, it is aimed to determine the effect levels of the factors affecting the surface roughness criterion in Pt in the hard turning process of 100Cr6 steel. For this purpose, a literature review was carried out and fixed cutting

conditions, effect factors and levels to be examined were determined. In the experimental study, 36 experiments were carried out for OD turning and 36 experiments for face turning with a full factorial experimental design. Hard turning tests were performed on 100Cr6 steel specimens with a hardness of 55 HRC. The influence factors investigated were the catenary cutting edge angle (KAPR), insert corner radius (RE), depth of cut (Ap) and feed direction. Surface roughness measurements were made in Ra and Pt. The optimum factor levels were determined using Dr. Genichi Taguchi's signal-to-noise ratio (S/N) method under the "smaller-is-better" criterion. The effect levels of the factors were determined by analysis of variance (ANOVA).

The data obtained showed that in hard turning, surfaces with a total profile height of less than 2µm can be obtained as a surface quality criterion.

SEMBOLLER

µm	: Mikrometre
Al	: Alüminyum
Ark.	: Arkadaşları
B	: Takım şaft genişliği (mm)
C	: Karbon
c	: Profil kesiti seviyesi
c	: Sabit değer
Cu	: Bakır
D	: Bilye çapı (mm)
F_0	: Ön yük (kgf)
F_1	: Uygulama yükü (kgf)
Fe	: Demir
h	: Kalıcı girinti (iz) derinliği
H	: Takım şaft yüksekliği (mm)
h_0	: Ön yük girinti (iz) derinliği (mm)
h_1	: Maksimum girinti (iz) derinliği (mm)
HB	: Brinnel sertliği
HF	: Takım fonksiyonel yüksekliği (mm)
HRC	: C ölçeği rockwell sertliği
IC	: Kesici uç iç teğet daire çapı (mm)
KAPR	: Takım kesme kenarı açısı (°)
kg	: Kilogram
kgf	: Kilogram kuvvet
ln	: Değerlendirme uzunluğu (mm)
L	: Kesici uç kesme kenar boyu (mm)
LE	: Kesici uç etkin kesme kenar boyu (mm)

LF : Takım tam boyu (mm)

lr : Örneklem uzunluğu (mm)

m/dak : Metre/dakika

mm : Milimetre

mm/dev : Milimetre/devir

Mn : Mangan

Mr1 : Pürüzlülük çekirdeğinin üst sınırına karşılık gelen malzeme oranı

Mr2 : Pürüzlülük çekirdeğinin alt sınırına karşılık gelen malzeme oranı

n : Deneyin tekrar sayısı

N : Newton

OHX : Takım maksimum bağlama boyu (mm)

Pt : Birincil profilin toplam yüksekliği

RΔq, PΔq, WΔq : Ortalama karekök eğimi

Ra, Pa, Wa : Aritmetik ortalama yüksekliği

Rc, Pc, Wc : Profil elemanlarının ortalama yüksekliği

RE : Kesici uç köşe radyusu (mm)

Rk : Çekirdek pürüzlülük derinliği

Rku, Pku, Wku : Sivrilik - basıklık

Rmr(c), Pmr(c), Wmr(c) : Yük uzunluk oranı

Rp, Pp, Wp : Maksimum tepe yüksekliği

Rpk : Azaltılmış tepe yüksekliği

Rq, Pq, Wq : Ortalama karekök sapması

Rsk, Psk, Wsk : Asimetriklik

RSm, PSm, WSm : Profil elemanlarının ortalama genişliği

Rt, Pt, Wt : Toplam profil yüksekliği

Rv, Pv, Wv : Maksimum profil yüksekliği

Rvk : Azaltılmış vadi derinliği

Rz, Pz, Wz : Ortalama pürüzlülük yüksekliği

Rzmaks, Pzmaks, Wzmaks : Maksimum pürüzlülük yüksekliği

S : Kesici uç kalınlığı (mm)

Si : Silisyum

Ti : Titanyum

WF : Takım fonksiyonel genişliği (mm)

Xs : Profil elemanı uzunluğu

y_i : Deney sonucu ölçülen değer

y_{maks} : En yüksek nokta

y_{min} : En çukur nokta

Zx : Sapma değeri

λc : Sınır dalga boyu (cut off)

λf : Dalgalılık ve daha büyük dalga boyları filtresi

λs : Mekanik ve elektriksel gürültü filtresi

KISALTMALAR

AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
ANOVA	: Varyans Analizi
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
CBN	: Kübik Bor Nitrür
CMM	: Koordinat Ölçme Makinesi
CNC	: Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
ISO	: Uluslararası Standart Organizasyonu
LRHT	: Leeb Geri Tepme Sertlik Testi
NIST	: Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Standartlar Bürosu
PCB	: Polikristalin Elmas
PCBN	: Polikristalin Kübik Boron Nitrit
S/N	: Sinyal Gürültü Oranı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
UKSD	: Uluslararası Kauçuk Sertlik Derecesi
vb	: ve benzeri
vd	: ve diğerleri

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1-1 Rockwell Sertlik Testi 9
Şekil 1-2 Yüzey Sapmaları ve Düzensizlikler 11
Şekil 1-3 Pürüzlülük ve Dalgalılık 12
Şekil 1-4 Metroloji Ölçüm Spektrumu 12
Şekil 1-5 Yüzey Pürüzlülüğü 13
Şekil 1-6 Maksimum Tepe Yüksekliği 15
Şekil 1-7 Maksimum Profil Derinliği 15
Şekil 1-8 Örneklemin Maksimum Yüzey Pürüzlülüğü 16
Şekil 1-9 Rz, Rt ve Rz1maks 16
Şekil 1-10 Aritmetik Ortalama Yükseklik 17
Şekil 1-11 Toplam Profil Yüksekliği 17
Şekil 1-12 Profil Elemanları Ortalama Yüksekliği 18
Şekil 1-13 Ortalama Karekök Sapması 18
Şekil 1-14 Asimetriklik 19
Şekil 1-15 Sivrilik - Basıklık 19
Şekil 1-16 Profil Elemanlarının Ortalama Genişliği 20
Şekil 1-17 Ortalama Karekök Eğimi 20
Şekil 1-18 Yük Uzunluk Oranı 21
Şekil 1-19 Rpk, Rk, Rvk, Mr1, Mr2 22
Şekil 2-1 Deneysel Çalışma İş Akış Şeması 22
Şekil 2-2 Deney Numune Parçası Ölçüleri 23
Şekil 2-3 Hwacheon Cutex 160A MC Tezgahının Görseli 24
Şekil 2-4 Bulut Makina DIGIROCK-LC-RBOV Sertlik Ölçme Cihazı 26
Şekil 2-5 Taylor Hobson Intra Touch Yüzey Pürüzlülük ve Profil Ölçme Cihazı 27
Şekil 2-6 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Bölgeleri Şematik Gösterimi 27
Şekil 2-7 Numune Bağlama Şematik Gösterimi 28
Şekil 2-8 Tornalama İşlemlerinin Şematik Gösterimi 28
Şekil 3-1 Alın Tornalama Deney 4 - Ra 32
Şekil 3-2 Alın Tornalama Deney 4 - Pt 32
Şekil 3-3 Dış Çap Tornalama Deneyleri Ra Yüzey Pürüzlülüğü SN Oranı 35
Şekil 3-4 Dış Çap Tornalama Deneyleri Pt Yüzey Pürüzlülüğü SN Oranı 35
Şekil 3-5 Alın Tornalama Deneyleri Ra Yüzey Pürüzlülüğü SN Oranı 36
Şekil 3-6 Alın Tornalama Deneyleri Pt Yüzey Pürüzlülüğü SN Oranı 36
Şekil 3-7 Dış Çap Tornalama Varyans Analizleri a) Ra Yüzey Pürüzlülüğü b) Pt Yüzey Pürüzlülüğü 38
Şekil 3-8 Alın Tornalama Varyans Analizleri a) Ra Yüzey Pürüzlülüğü b) Pt Yüzey Pürüzlülüğü 39
Şekil A-1 Alın Tornalama Deney 1 - Ra 43
Şekil A-2 Alın Tornalama Deney 1 - Pt 43
Şekil A-3 Alın Tornalama Deney 2 - Ra 43
Şekil A-4 Alın Tornalama Deney 2 - Pt 44
Şekil A-5 Alın Tornalama Deney 3 - Ra 44
Şekil A-6 Alın Tornalama Deney 3 - Pt 44
Şekil A-7 Alın Tornalama Deney 4 - Ra 45
Şekil A-8 Alın Tornalama Deney 4 - Pt 45
Şekil A-9 Alın Tornalama Deney 5 - Ra 45
Şekil A-10 Alın Tornalama Deney 5 - Pt 46
Şekil A-11 Alın Tornalama Deney 6 - Ra 46
Şekil A-12 Alın Tornalama Deney 6 - Pt 46

Şekil A-13 Alın Tornalama Deney 7 - Ra 47
Şekil A-14 Alın Tornalama Deney 7 - Pt 47
Şekil A-15 Alın Tornalama Deney 8 - Ra 47
Şekil A-16 Alın Tornalama Deney 8 - Pt 48
Şekil A-17 Alın Tornalama Deney 9 - Ra 48
Şekil A-18 Alın Tornalama Deney 9 - Pt 48
Şekil A-19 Alın Tornalama Deney 10 - Ra 49
Şekil A-20 Alın Tornalama Deney 10 - Pt 49
Şekil A-21 Alın Tornalama Deney 11 - Ra 49
Şekil A-22 Alın Tornalama Deney 11 - Pt 50
Şekil A-23 Alın Tornalama Deney 12 - Ra 50
Şekil A-24 Alın Tornalama Deney 12 - Pt 50
Şekil A-25 Alın Tornalama Deney 13 – Ra.....51
Şekil A-26 Alın Tornalama Deney 13 - Pt 51
Şekil A-27 Alın Tornalama Deney 14 - Ra 51
Şekil A-28 Alın Tornalama Deney 14 - Pt 52
Şekil A-29 Alın Tornalama Deney 15 - Ra 52
Şekil A-30 Alın Tornalama Deney 15 - Pt 52
Şekil A-31 Alın Tornalama Deney 16 - Ra 53
Şekil A-32 Alın Tornalama Deney 16 - Pt 53
Şekil A-33 Alın Tornalama Deney 17 - Ra 53
Şekil A-34 Alın Tornalama Deney 17 - Pt 54
Şekil A-35 Alın Tornalama Deney 18 - Ra 54
Şekil A-36 Alın Tornalama Deney 18 - Pt 54
Şekil A-37 Alın Tornalama Deney 19 - Ra 55
Şekil A-38 Alın Tornalama Deney 19 - Pt 55
Şekil A-39 Alın Tornalama Deney 20 - Ra 55
Şekil A-40 Alın Tornalama Deney 20 - Pt 56
Şekil A-41 Alın Tornalama Deney 21 - Ra 56
Şekil A-42 Alın Tornalama Deney 21 - Pt 56
Şekil A-43 Alın Tornalama Deney 22 - Ra 57
Şekil A-44 Alın Tornalama Deney 22 - Pt 57
Şekil A-45 Alın Tornalama Deney 23 - Ra 57
Şekil A-46 Alın Tornalama Deney 23 - Pt 58
Şekil A-47 Alın Tornalama Deney 24 - Ra 58
Şekil A-48 Alın Tornalama Deney 24 - Pt 58
Şekil A-49 Alın Tornalama Deney 25 - Ra 59
Şekil A-50 Alın Tornalama Deney 25 - Pt 59
Şekil A-51 Alın Tornalama Deney 26 - Ra 59
Şekil A-52 Alın Tornalama Deney 26 - Pt 60
Şekil A-53 Alın Tornalama Deney 27 - Ra 60
Şekil A-54 Alın Tornalama Deney 27 - Pt 60
Şekil A-55 Alın Tornalama Deney 28 - Ra 61
Şekil A-56 Alın Tornalama Deney 28 - Pt 61
Şekil A-57 Alın Tornalama Deney 29 - Ra 61
Şekil A-58 Alın Tornalama Deney 29 - Pt 62
Şekil A-59 Alın Tornalama Deney 30 - Ra 62
Şekil A-60 Alın Tornalama Deney 30 - Pt 62
Şekil A-61 Alın Tornalama Deney 31 - Ra 63
Şekil A-62 Alın Tornalama Deney 31 - Pt 63
Şekil A-63 Alın Tornalama Deney 32 - Ra 63
Şekil A-64 Alın Tornalama Deney 32 - Pt 64

Şekil A-65 Alın Tornalama Deney 33 - Ra 64
Şekil A-66 Alın Tornalama Deney 33 - Pt 64
Şekil A-67 Alın Tornalama Deney 34 - Ra 65
Şekil A-68 Alın Tornalama Deney 34 - Pt 65
Şekil A-69 Alın Tornalama Deney 35 - Ra 65
Şekil A-70 Alın Tornalama Deney 35 - Pt 66
Şekil A-71 Alın Tornalama Deney 36 - Ra 66
Şekil A-72 Alın Tornalama Deney 36 - Pt 66
Şekil B-1 Dış Çap Tornalama Deney 1 - Ra 67
Şekil B-2 Dış Çap Tornalama Deney 1 - Pt 67
Şekil B-3 Dış Çap Tornalama Deney 2 - Ra 67
Şekil B-4 Dış Çap Tornalama Deney 2 - Pt 68
Şekil B-5 Dış Çap Tornalama Deney 3 - Ra 68
Şekil B-6 Dış Çap Tornalama Deney 3 - Pt 68
Şekil B-7 Dış Çap Tornalama Deney 4 - Ra 69
Şekil B-8 Dış Çap Tornalama Deney 4 - Pt 69
Şekil B-9 Dış Çap Tornalama Deney 5 - Ra 69
Şekil B-10 Dış Çap Tornalama Deney 5 - Pt 70
Şekil B-11 Dış Çap Tornalama Deney 6 - Ra 70
Şekil B-12 Dış Çap Tornalama Deney 6 - Pt 70
Şekil B-13 Dış Çap Tornalama Deney 7 - Ra 71
Şekil B-14 Dış Çap Tornalama Deney 7 - Pt 71
Şekil B-15 Dış Çap Tornalama Deney 8 - Ra 71
Şekil B-16 Dış Çap Tornalama Deney 8 - Pt 72
Şekil B-17 Dış Çap Tornalama Deney 9 - Ra 72
Şekil B-18 Dış Çap Tornalama Deney 9 - Pt 72
Şekil B-19 Dış Çap Tornalama Deney 10 - Ra 73
Şekil B-20 Dış Çap Tornalama Deney 10 - Pt 73
Şekil B-21 Dış Çap Tornalama Deney 11 - Ra 73
Şekil B-22 Dış Çap Tornalama Deney 11 - Pt 74
Şekil B-23 Dış Çap Tornalama Deney 12 - Ra 74
Şekil B-24 Dış Çap Tornalama Deney 12 - Pt 74
Şekil B-25 Dış Çap Tornalama Deney 13 - Ra 75
Şekil B-26 Dış Çap Tornalama Deney 13 - Pt 75
Şekil B-27 Dış Çap Tornalama Deney 14 - Ra 75
Şekil B-28 Dış Çap Tornalama Deney 14 - Pt 76
Şekil B-29 Dış Çap Tornalama Deney 15 - Ra 76
Şekil B-30 Dış Çap Tornalama Deney 15 - Pt 76
Şekil B-31 Dış Çap Tornalama Deney 16 - Ra 77
Şekil B-32 Dış Çap Tornalama Deney 16 - Pt 77
Şekil B-33 Dış Çap Tornalama Deney 17 - Ra 77
Şekil B-34 Dış Çap Tornalama Deney 17 - Pt 78
Şekil B-35 Dış Çap Tornalama Deney 18 - Ra 78
Şekil B-36 Dış Çap Tornalama Deney 18 - Pt 78
Şekil B-37 Dış Çap Tornalama Deney 19 - Ra 79
Şekil B-38 Dış Çap Tornalama Deney 19 - Pt 79
Şekil B-39 Dış Çap Tornalama Deney 20 - Ra 79
Şekil B-40 Dış Çap Tornalama Deney 20 - Pt 80
Şekil B-41 Dış Çap Tornalama Deney 21 - Ra 80
Şekil B-42 Dış Çap Tornalama Deney 21 - Pt 80
Şekil B-43 Dış Çap Tornalama Deney 22 - Ra 81
Şekil B-44 Dış Çap Tornalama Deney 22 - Pt 81

Şekil B-45 Dış Çap Tornalama Deney 23 - Ra....81
Şekil B-46 Dış Çap Tornalama Deney 23 - Pt....82
Şekil B-47 Dış Çap Tornalama Deney 24 - Ra....82
Şekil B-48 Dış Çap Tornalama Deney 24 - Pt....82
Şekil B-49 Dış Çap Tornalama Deney 25 - Ra....83
Şekil B-50 Dış Çap Tornalama Deney 25 - Pt....83
Şekil B-51 Dış Çap Tornalama Deney 26 - Ra....83
Şekil B-52 Dış Çap Tornalama Deney 26 - Pt....84
Şekil B-53 Dış Çap Tornalama Deney 27 - Ra....84
Şekil B-54 Dış Çap Tornalama Deney 27 - Pt....84
Şekil B-55 Dış Çap Tornalama Deney 28 - Ra....85
Şekil B-56 Dış Çap Tornalama Deney 28 - Pt....85
Şekil B-57 Dış Çap Tornalama Deney 29 - Ra....85
Şekil B-58 Dış Çap Tornalama Deney 29 - Pt....86
Şekil B-59 Dış Çap Tornalama Deney 30 - Ra....86
Şekil B-60 Dış Çap Tornalama Deney 30 - Pt....86
Şekil B-61 Dış Çap Tornalama Deney 31 - Ra....87
Şekil B-62 Dış Çap Tornalama Deney 31 – Pt....87
Şekil B-63 Dış Çap Tornalama Deney 32 - Ra....87
Şekil B-64 Dış Çap Tornalama Deney 32 - Pt....88
Şekil B-65 Dış Çap Tornalama Deney 33 - Ra....88
Şekil B-66 Dış Çap Tornalama Deney 33 - Pt....88
Şekil B-67 Dış Çap Tornalama Deney 34 - Ra....89
Şekil B-68 Dış Çap Tornalama Deney 34 - Pt....89
Şekil B-69 Dış Çap Tornalama Deney 35 - Ra....89
Şekil B-70 Dış Çap Tornalama Deney 35 - Pt....90
Şekil B-71 Dış Çap Tornalama Deney 36 - Ra....90
Şekil B-72 Dış Çap Tornalama Deney 36 - Pt....90

TABLO LİSTESİ

Tablo 1 ISO 6501 Rockwell Sertlik Yöntemleri 10
Tablo 2 ISO 681-17 Standardına göre 100Cr6 Malzemenin Kimyasal İçeriği 23
Tablo 3 100Cr6 Malzemenin Uluslararası Standartlardaki Tanımlanması 23
Tablo 4 Hwacheon Cutex 160A MC Teknik Özellikleri 24
Tablo 5 Deneysel Çalışmada Kullanılan Katerlerin Özellikleri 25
Tablo 6 Deneysel Çalışmada Kullanılan Kesici Uçların Özellikleri 26
Tablo 7 Alın Tornalama Deneylerinde Kullanılan Kesme Şartları 29
Tablo 8 Alın Tornalama Deney Tablosu 29
Tablo 9 Dış Çap Tornalama Deneylerinde Uygulanan Kesme Şartları 30
Tablo 10 Dış Çap Tornalama Deney Tablosu 30
Tablo 11 Alın Tornalama Deneyleri Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları 31
Tablo 12 Dış Çap Tornalama Deneyleri Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları 33
Tablo 13 Dış Çap Tornalama Optimum Seviyeleri 37
Tablo 14 Alın Tornalama Optimum Seviyeleri 37

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Konusu

Otomotiv, hava araçları, iş makineleri, robot teknolojileri, ev aletleri, medikal cihazlar gibi insan yaşamında yer alan neredeyse her bir makinede birçok sertleştirilmiş çelik malzemeden iş parçaları yer almaktadır. Bu iş parçaları tornalama, frezeleme, delik delme, broşlama, raybalama, vargel ve planyalama, taşlama, honlama, lepleme gibi birçok talaşlı imalat usulleri ile şekillendirilerek elde edilir. Bu iş parçaları kol saati mekanizması gibi mikro elemanlar olabilirken tonlarca ağırlıkta bir gemi krank mili, güç aktarma şaftı, dişli veya rulman gibi makine elemanları olabilir. Bu iş parçaları makineler üzerindeki işlevlerine göre çeşitli statik ve dinamik yükleri taşıması, aşınmaya karşı direnç göstermesi gibi görevleri yerine getirirler. Bu gibi gerekçelerle belirli değerlerde sertleştirilmiş çelikler tercih edilir.

Talaşlı imalat usulleri ile imal edilen makine parçaları kimi zaman nihai ölçülerinde işlendikten sonra ısıl işlem uygulanarak sertleştirilir ve başka bir şekillendirme işlemi uygulanmadan makine üzerindeki görevini yerine getirir. Kimi zaman ise parça nihai ölçülerine sertleştirme işleminden sonra tekrar talaşlı imalat işlemleri uygulanarak getirilir. Sertleştirme öncesi ve sonrası yapılacak işlemlere aşağıdaki etmenler değerlendirilerek karar verilir.

- İşleme kolaylığı ve imalat maliyeti,
- Sertleştirme işlemlerinin parça boyutlarında değişime etkisi,
- Sertleştirme işleminin parçanın geometrik şekil değişimine etkisi,
- Isıl işlem ve ısıl işlem sonrası işlemlerin malzemenin kimyasal ve mekanik özelliklerine etkisi,
- Parça geometrisinin ve boyutlarının parçanın talaşlı imalat esnasında tezgaha bağlanmasına uygunluğu,
- Parçanın eşmerkezlilik, salgı, diklik, düzlemsellik ve benzeri (vb.) geometrik toleranslarının ve yüzey pürüzlülüğü kriterlerinin sağlanması,

Tornalama, frezeleme, delik delme, broşlama, raybalama, vargel ve planyalama, taşlama, honlama, lepleme ve diğerleri (vd.) talaşlı imalat yöntemlerinin hepsi uygun şartlar sağlanması durumunda sertleştirilmiş çeliklere uygulanabilmektedir.

Bu çalışmada endüstride yoğun olarak uygulanan sert tornalama işlemini taşlama işlemine daha uygun maliyetli bir alternatif olarak ele alacağız. Hassas ölçülere sahip silindirik

parçaların imalatında sertleştirme işlemi sonrası sert tornalama işlemi ve taşlama işlemi en yaygın uygulanan işlemlerdir. Sert tornalama işlemi ve taşlama işleminin birbirine göre bazı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Parçanın imal adedi, boyutları, boyutsal ve geometrik toleransları, sertlik miktarı ve malzeme özellikleri, müşteri özel istekleri, gerek duyulan torna veya taşlama tezgahının amortisman ve işletme maliyetleri, imalat hızı gibi faktörler değerlendirilerek parçanın imalat operasyonlarına karar verilir. Endüstriyel talaşlı imalatta, müşterinin istediği kaliteyi, en hızlı şekilde ve en az maliyet ile imal etmek hedeflenir. Taşlama işlemi, tezgahların yüksek amortisman maliyeti, ayar süresinin uzun olması, işletme maliyeti ve sarf giderlerinin yüksek maliyeti karşısında ancak sipariş hacminin yüksek olduğu durumlarda elverişli olacaktır. Bu gibi durumlarda sert tornalama işlemi çok daha ekonomik ve hızlı bir çözüm olabilmektedir.

1.2. Tezin Amacı ve Hedefi

Tezin amacı sertleştirilmiş çelik malzemelerden parçaların talaşlı imalatında ısıl işlem sonrası taşlama işlemine alternatif olarak sert tornalama işleminin uygulanabilirliğine katkı sağlamaktır. Bu çalışmada sert tornalama işleminde toplam birincil profil yüksekliği (Pt) cinsinden yüzey pürüzlülüğü kriterine etki eden faktörlerin etki düzeylerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın hedefi ise 52-55 Rockwell sertliğinde (HRC) 100Cr6 malzemenin tornalama ile 5 milimetrelik (mm) ölçüm mesafesinde Pt2 mikrometre (µm) yüzey pürüzlülük değerinin sağlanmasıdır.

Hedef belirlenirken endüstride geniş bir uygulama alanı olmasına dikkat edilmiştir. 100Cr6 malzeme rulman imalatında yoğun olarak kullanılmakla birlikte otomotiv sektöründe ve makine imalatında da vazgeçilmez niteliktedir. Bu parçaların sızdırmazlık yüzeylerinde ise Pt yüzey pürüzlülüğü önemli bir kriter olarak üreticilerin karşısına çıkmaktadır.

1.3. Tezin Hipotezi

Hipotez 1: Yanaşma açısı 93°, 100° ve 107,5° olan katerler ile testler yapılacaktır. Yanaşma açısı küçüldükçe oluşacak tornalama izlerinin tepe bölgelerinde bir miktar silinme oluşacağından yüzey pürüzlülüğüne olumlu etki etmesi beklenmektedir.

Hipotez 2: Kesme hızı ve ilerleme hızı sabitken 0,8 mm köşe radyuslu kesici takım ile yapılan tornalamada 0,4 mm köşe radyuslu takıma göre tornalama izlerinin daha kısa tepeler oluşturması beklenmektedir. Öte yandan artan köşe radyusu ile sürtünme kuvveti artacaktır. İki durumun birlikte etkisi testler sonucunda anlaşılacaktır.

Hipotez 3: Kesme hızı, ilerleme hızı, yanaşma açısı ve kesici takım köşe radyusu sabitken ilerleme yönü değiştirildiğinde radyal ve eksenel kesme kuvvetlerinin doğrultusu, yönü ve şiddeti değişeceğinden kesme kuvvetlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin yüksek olması beklenmektedir.

Hipotez 4: Talaş derinliği direk olarak bileşke kesme kuvvetini arttıracağından yüzey pürüzlülüğüne önemli bir etki göstermesi beklenmektedir. Aynı zamanda kesici takım talaş kırıcı veya yönlendirici geometriye sahip ise talaş derinliği, talaş kırıcı veya yönlendirici formun talaşı şekillendirme davranışını değiştireceğinden iş parçasından kesilen talaşın tornalanmış yüzeye sürterek yüzey pürüzlülüğüne olumsuz etki etmesine sebep olabilir.

1.4. Tezin Özgün Yönü

Konuyla ilgili literatür araştırması yapıldığında 100Cr6 malzemenin sert tornalama işlemi ile ilgili çeşitli çalışmalara rastlanmaktadır. Ancak alın tornalama işlemi, ilerleme yönü ve Pt yüzey pürüzlülüğü daha önce sert tornalamanın çalışılmamış yönleridir. Bu tez çalışması bu özgün yönleri ile literatürdeki önemli bir boşluğu dolduracaktır. Endüstride talaşlı imalat ile üretilen parçalarda Pt yüzey pürüzlülük kriterine sıkça rastlanmaktadır. Alın tornalama ise talaşlı imalatta hemen her tornalama işleminin olmazsa olmaz işlemi iken literatürde incelenmemiş bir sert tornalama işlemidir. Çalışmanın bir hedefi de alın yüzeyinde 5 mm'lik bir ölçüm mesafesinde Pt2 µm yüzey pürüzlülüğünün elde edilmesidir. Bu seviyede bir yüzey kalitesinin taşlama işlemine alternatif olarak sert torna ile elde edilmesi endüstri için katma değerli olacaktır. Çünkü taşlama işleminde beyaz tabaka oluşumu sert torna işleminden daha fazla olması sebebiyle komponentin yorulma ömrünün kısaldığı bilinmektedir. Talaşlı imalatta yüzey pürüzlülüğü önemli bir kriter olsa da komponentin karmaşık formu ve talep edilen geometrik toleranslar taşlama işleminin uygulanabilirliğini zorlaştırmakta, çoklu operasyonlar gerektirmekte veya maliyet arttırmaktadır. Bu şartlarda sert tornalama avantajlı bir alternatif olabilmektedir. Bu çalışma ile taşlama işlemi yerine daha az maliyetli sert torna işlemi ile elde edilebilecek yüzey kalitesi seviyesi ortaya konulacaktır.

1.5. Literatür İncelemesi

Gustavo de Siqueira Galoppi ve ark. 2006 yılında hazırladıkları çalışmalarında kaplamalı ve kaplamasız kübik bor nitrür (CBN) uçların 100Cr6 malzemenin sert torna işlemindeki performanslarını incelemişlerdir. Sonuçlara göre kaplamalı uçlarda aşınma gecikerek kesici takım ömrü daha uzundur. Kaplama tamamen aşındıktan sonra krater oluşumu başlamaktadır. Kesici takım ömrüne kesme hızının, ilerleme hızından daha önemli bir etken olduğunu ortaya koymuşlardır[1].

Gabriel C. Benga ve Alexandre M. Abrao 2003 yılında hazırladıkları çalışmalarında 100Cr6 malzemenin sert torna işleminde seramik ve polikristalin kübik boron nitrit (PCBN) kesici uçların takım ömürlerini ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini karşılaştırmıştır. Sonuçlara göre PCBN uçlar seramik uçlardan daha iyi bir takım ömrü sağlar. Yüzey pürüzlülüğüne ise hem seramik uçlarda hem de PCBN uçlarda en büyük etmen ilerleme hızıdır[2].

Y. Kevin Chou ve Hui Song 2004 yılında hazırladıkları çalışmalarında kesici takım köşe radyusunun sert tornalama işlemindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlara göre daha büyük uç radyuslu kesici takımlar ile daha iyi yüzey kalitesi elde etmişlerdir. Artan kesici takım köşe radyusu ile birlikte teğetsel kesme kuvveti de bir miktar artmaktadır. Aşınmamış yeni takımlarda beyaz tabaka oluşumu yalnızca 0,3 milimetre/devir (mm/dev) gibi yüksek ilerleme değerinde oluşmuştur. Aşınmış takımlarda ise 0,05 mm/dev gibi düşük ilerlemelerde bile beyaz tabaka oluşumu meydana gelmektedir[3].

Michaela Samarziova ve Miroslav Neslusan 2013 yılında hazırladıkları çalışmalarında 100Cr6 malzemenin sert torna işleminde silicili geometrili ve silici formu olmayan geleneksel uçların yüzey kalitesin etkisini incelemişlerdir. Sonuçlara göre silici geometriye sahip uçlarda yüzey pürüzlülüğü daha düşüktür[4].

Mehmet Boy ve ark. 2014 yılında hazırladıkları çalışmalarında kesici takım yanaşma açısının kesme kuvvetlerine ve yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemişlerdir. Sonuçlara göre 93° yanaşma açısı ile 107,5° yanaşma açısına göre daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmiştir. Ancak küçük yanaşma açısı ile kesme kuvvetleri daha yüksektir[5].

Satish Chinchanikar ve ark. 2014 yılında hazırladıkları çalışmalarında sert tornalama işleminde kuru kesme, su bazlı kesme sıvısı ve kokonat yağlı bir kesme sıvısı ile testler gerçekleştirip yüzey pürüzlülüğüne etkisini incelemişlerdir. Sonuçlara göre düşük kesme hızlarında kuru kesme ile daha iyi yüzey kalitesi elde etmişlerdir. Yüksek kesme hızlarında ise kokonat bazlı kesme sıvısı kuru kesme ve su bazlı kesme sıvısına göre daha iyi yüzey kalitesi sağlamaktadır.

Soğutma yöntemi her ne olursa olsun, yüzey pürüzlülüğü artan kesme hızı ile birlikte hızla düşerken, kesme hızı 150-160 metre/dakika (m/dak) kesme hızını aştığında yüzey pürüzlülüğü tekrar yükselmektedir. Kuru kesme durumunda daha belirgin olmak üzere yüzey pürüzlülüğünü en çok ilerleme hızı, daha sonra talaş derinliği ve son olarak kesme hızı etkilemektedir[6].

1.6. Çelikler

Çelikler, en fazla %2,1 oranında karbon içeren demir karbon alaşımlarıdır. Karbon (C) oranı %2,1'den fazla olan demir karbon alaşımlarına dökme demir denilmektedir. Çelikleri, kimyasal bileşimleri, kullanım alanları, üretim yöntemi, şekillendirme yöntemi, mikroyapı ve ısıl işlem uygunluğuna göre sınıflandırmak mümkündür. Çelik, uygulanan mekanik ve ısıl işlemler ile çok farklı mikroyapılar ve özellikler kazanabildiğinden en temelde kimyasal bileşimlerine göre sınıflandırmak daha doğru bir yaklaşım olacaktır. Kimyasal bileşimlerine göre; "Alaşımlı Çelikler" ve "Alaşımsız Çelikler" olarak ikiye ayrılmaktadırlar[7,8].

1.6.1. Alaşımsız Çelikler

Demir (Fe) ve karbon (C) elementinin yanında %0,5 silisyum (Si), %0,8 mangan (Mn), %0,1 alüminyum (Al), %0,1 titanyum (Ti) ve %0,25 bakır (Cu) elementi bulundurabilen çelik türüdür. Aynı zamanda sade karbonlu çelik olarak da isimlendirilirler. Alaşımsız çeliklerin özelliklerini belirleyen en önemli alaşım elementi karbon olduğundan alaşımsız çelikler kendi içinde "Az Karbonlu Çelikler", "Orta Karbonlu Çelikler" ve "Yüksek Karbonlu Çelikler" olarak 3 gruba ayrılır[7].

1.6.1.1. Düşük Karbonlu Çelikler

%0,25'ten daha az karbon içeren çeliklerdir. Çekme mukavemetleri düşük, sertleştirilebilme yetenekleri çok azdır. Kaynak olma özelliği çok iyidir[7,9].

1.6.1.2. Orta Karbonlu Çelikler

%0,25 ile %0,55 oranında karbon içeren çeliklerdir. Isıl işleme çok uygun çeliklerdir. Bu çeliklerin mikroyapısı ve özellikleri ısıl işlem ile büyük ölçüde değiştirilebilir. Çekme mukavemetleri düşük karbonlu çeliklerden bir miktar daha yüksektir. Kaynak olma özelliği orta düzeydedir[7].

Genel dövme çelikleri: %0,25 ile %0,35 oranında karbon içerirler.

Mil çelikleri: %0,35 ile %0,45 oranında karbon içerirler. Mil, tel, dingil imalatında tercih edilirler.

Aşınmaya dayanıklı çelikler: %0,45 ile %0,55 oranında karbon içerirler. Ray, ray tekerleği, silindir ve pres kalıplarının imalatında kullanılır.

1.6.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler

%0,55'ten daha fazla karbon içeren çeliklerdir. Çekme mukavemeti diğer alaşımsız çeliklere göre daha yüksek olup, sertleştirilebilme yetenekleri çok yüksektir ancak kaynak olma özelliği çok düşüktür[7].

1.6.2. Alaşımlı Çelikler

Alaşımlı çelikler, alaşımsız çeliklerde sınırlı oranda bulunabilen alaşım elementlerinden daha yüksek oranda içeren ve diğer alaşım elementlerinden de eklenebilen alaşımlardır. Bileşimine eklenen alaşım elementinin türüne ve miktarına bağlı olarak, çeliğin sertlik, dayanımı, darbe direnci, yüksek sıcaklığa dayanımı, aşınma direnci, dövülebilirlik, işlenebilirlik, korozyon direnci vd. özellikleri geliştirilebilir.

1.7. Sert Malzemeler

Genellikle 45 C ölçeği rockwell sertliği (HRC) sertlik değerinin üzerinde ve işlenmesi daha zor malzemelerdir[10–11]. Malzemelerin sertlik değerini ifade etmek için Brinell sertliği, Rockwell sertliği, Vickers sertliği ve Knoop sertliği denilen bazı sertlik ölçüm yöntemleri kullanılır. Rockwell sertlik testinin sertlik değerini ölçmek için herhangi bir ek optik cihaza gerek duyulmaması, numunenin ön hazırlık gerektirmeden tahribatsız muayene ile sertliğinin ölçülebilmesi, numunenin tekrar kullanılabilir olması ve hızlı olması gibi avantajları vardır. Uluslararası Standart Organizasyonu (ISO) 6508 ve Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) E18'e göre standartlaştırılmış farklı sertlik değerleri, çeşitli malzemeler ve uygulama alanları için 30 farklı Rockwell test metodu bulunmaktadır. (örn.: HRA, HRBW, HRC, HR30N, HR15TW). Hızlı ve kolay olması sebebiyle pratikte en çok kullanılan metot HRC'dir. Sert malzemeler sertlik değeri 45 HRC'nin üzerinde olan malzemelerdir. Sertlik değeri 45-55 HRC malzemeler orta sertlikte, sertlik değeri 55 HRC'nin üzerinde olan malzemeler aşırı sert malzemeler olarak sınıflandırılır[12].

1.8. Sert Tornalama

Kendi ekseni etrafında dönen bir iş parçasından doğrusal hareket eden bir kesici takım yardımıyla talaş kaldırılarak iş parçasının şekillendirilmesine tornalama işlemi denilmektedir. Sertlik değeri 45 HRC'nin üzerinde olan malzemelerin tornalanmasına ise sert tornalama denilmektedir. Sert tornalama işlemi yumuşak tornalamanın yapıldığı torna tezgahlarında da yapılabilir. Hatta bakımları iyi yapılmış rijit bir üniversal torna tezgahında da sert tornalama yapılabilir. Boyutsal toleransları ve yüzey pürüzlülük kriterleri sıkı parçalar için özel tasarlanmış makineleri kullanmak en iyi tercih olacaktır. Ancak sert tornalama kalitesinin tek

anahtarı sadece tezgah rijitliği değildir. Önemli olan sistem rijitliğidir. Taret ve fener mili arasındaki tüm gereksiz çıkıntı ve takım tutucu uzantılarının, şim ve ara parçaların ortadan kaldırılması gerekmektedir. Amaç her şeyi mümkün olduğunca fener mili aynasına ve tarete yakın tutmaktır. İş parçasının uzunluk, çap oranı en çok 4:1 olmalıdır.

Uygun şartlarda gerçekleştirilen bir sert tornalama işlemi ile aritmetik ortalama yükseklik (Ra) 0,4 - 0,8 µm yüzey kalitesi, 2 - 5 µm dairesellik ve ±3 - 7 µm çap toleransı elde etmek mümkündür[13]. Sert tornalama yumuşak tornalamanın yapıldığı torna tezgahlarında gerçekleştirilebilir. Ancak tezgah yumuşak tornalamaya göre 2 katına kadar artan kesme kuvvetlerine karşın rijitliğini koruyabilecek yapıda olmalıdır. Sert tornalama için karbür, sermet, CBN, PCBN, PCD gibi gelişmiş kesici uçlar önerilir[14].

1.9. Malzemelerin Sertliği

Bir katı malzemenin, uygulanan bir kuvvete karşı gösterdiği tepki mekanik davranış olarak tanımlanır. Malzemenin gösterdiği bu davranış, çekme, basma, kayma, darbe mukavemetleri, rijitliği, elastikliği, sünekliği, kırılganlığı, sertliği, aşınma direnci gibi mekanik özelliklerini belirler. Katı bir malzemenin sertlik ölçüsü, sabit bir basınç uygulandığında kalıcı şekil değişikliğine karşı gösterdiği direncin bir ölçüsü olarak tanımlanabilir[15]. Üç ana sertlik ölçüm türü vardır: çizilme sertliği, iz (girinti) sertliği ve geri tepme (dinamik) sertliği.

1.9.1. Çizilme Sertliği

Çizilme sertliğinin ölçülmesi ilk defa 1820 yılında Alman mineralog Friedrich Mohs tarafından önerilmiştir. Mohs sertliği adı verilen bu yöntemde, sertliği belirlenecek malzemenin Mohs sertlik cetveline göre sertliği bilinen malzemelerle ayrı ayrı birbirine sürtülür. Sürtme işlemi sonrasında hangi malzemenin çizdiğine ve hangi malzeme tarafından çizildiğine bakılır. Sertliği belirlenmek istenen malzeme hangi malzemeyi çizdiyse ondan daha sert demektir. Aynı şekilde hangi malzeme tarafından çizildiyse o malzemeden daha az sert demektir. Örneğin sertlik değeri 3 olan Kalsit malzemesini çizdiyse ve sertlik değeri 4 olan Kalsit malzemesi tarafından çizildiyse sertlik değeri 3 ile 4 arasındadır.

1.9.2. Geri Tepme (Dinamik) Sertliği

Dinamik sertlik ölçümünde sertliği ölçülecek malzemeye hareketli bir yük uygulanır. Çarptırılan cisim malzemede elastik ve plastik deformasyona sebep olur. Çarptırılan cismin çarpma esnasındaki kinetik enerjisinin bir kısmı plastik deformasyon için harcanır ve çarptırılan cisim malzemenin tepkisiyle geri itilir. Malzemenin verdiği tepki ölçülerek malzeme sertliği tayin edilir.

1.9.3. İz (Girinti) Sertliği

İz (girinti) sertliği, elmas, tungsten ve karbür gibi yüksek sertlikteki malzemelerden imal edilmiş çeşitli geometrilerde olabilen batıcı bir ucun statik bir yük ile numune malzemeye bastırılmasıyla plastik deformasyon meydana getirilip bu deformasyon izinin derinliğinin veya boyutunun ölçülerek sertlik değerinin tayin edildiği bir sertlik ölçme yöntemidir. Endüstride en sık kullanılan setlik ölçme yöntemidir.

1900 yılında İsveçli mühendis olan Johan August Brinell tarafından Brinell sertlik testi adı verilen ilk iz sertlik testi geliştirilmiştir. En yaygın iz sertliği ölçme yöntemleri Rockwell, Vickers, Knoop ve Brinell'dir. İz sertliği ölçme yöntemleri uygulama farklılıkları bakımından makro ve mikro sertlik testleri olarak 2 grubu ayrılır.

1.9.3.1. Makro İz (Girinti) Sertliği Ölçme Testi

Makro iz testleri 2 – 30 Newton (N) arasında yük uygulanarak yapılan testlerdir. Endüstride sıklıkla Brinnell, Meyer, Vickers, Rockwell, Shore Durometre ve Uluslararası Kauçuk Sertlik derecesi testleri uygulanmaktadır. Bu testlerde küre, piramit ve koni şeklinde batıcı uçlar kullanılır. Her test tipinde belirli bir sabit yük, belirli bir süre boyunca uygulanarak malzemenin plastik deformasyona karşı direnci ölçülür[15,16].

Bu çalışmada deney numunelerinin sertlik derecesi Rockwell sertlik testi ile ölçülmüştür. Rockwell sertlik testi, uygulama kolaylığı, hesaplama gerektirmemesi, daha hızlı sonuç alınabilmesi, Brinell ve Vickers gibi optik ölçüm gerektiren yöntemlere göre daha az maliyetli olması gibi nedenlerle pratikte en çok kullanılan sertlik testi haline gelmiştir.

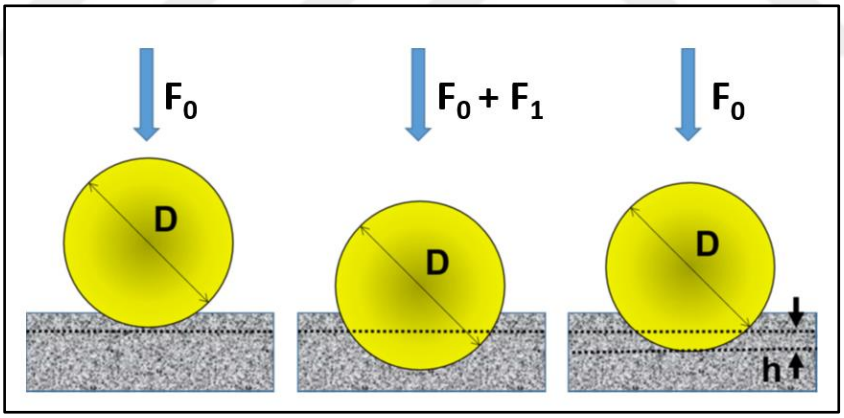
Yöntem ilk olarak 1908 yılında Viyanalı profesör Paul Ludwik'in Die Kegelprobe (Koni Testi) isimli kitabında tasarlamıştır. Paul Ludwik'in tasarladığı bu diferansiyel derinlik yöntemi boşluk ve yüzey kusurlarının sebep olabileceği ölçüm hatalarını ortadan kaldırmaktadır.

ABD'den Hugh M. Rockwell ve Stanley P. Rockwell fikri geliştirerek patent başvurusunda bulundular ve 11 Şubat 1919'da patent onaylandı. 18 Kasım 1924'te ise Stanley P. Rockwell

orijinal buluşa iyileştirme başvurusunda bulundu ve bu başvuru da 18 Kasım 1924'te onaylandı.

Rockwell testi 3 aşamada uygulanmaktadır.

1. **Aşama :** İlk olarak bir ön yük (F_0) uygulanarak batıcı uç h_0 derinliğine kadar batırılır. Bu aşamada sertlik değerini belirleyecek olan girinti derinliğinin başlangıç (referans) noktası elde edilir. Bu ön yük ISO 6508 standardına göre 10 kgf, ASTM E18 standardına göre ise 3 kgf'dir
2. **Aşama :** Daha sonra standart tarafından tanımlanan uygulama yükü (F_1) uygulanarak yine standart tarafından tanımlanan bekleme süresi kadar beklenir. Bu aşamada batıcı uç maksimum girinti izi derinliğine (h_1) kadar batırılmış olur.
3. **Aşama :** Bekleme süresinin sonunda ek test yükü kaldırılır. Batıcı uç elastik deformasyon derinliği kadar mesafede yukarı kalkar ve kalıcı girinti derinliğinde (h) kalır. Kalıcı girinti iz derinliği kullanılarak standartta tanımlanan formül ile Rockwell sertlik değeri hesaplanabilir. Ancak Rockwell sertliği test cihazlarında yer alan analog bir saat veya dijital ekran sayesinde sertlik değeri hesaplama yapmadan okunabilmektedir. Son olarak ön test yükü de kaldırılarak test sona erdirilir[17,18].



Şekil 1-1 Rockwell Sertlik Testi

ISO 6508 standardına göre tanımlanan Rockwell sertlik yöntemlerinde, kullanılacak batıcı uç tipi, ön test yükü, toplam test yükü ve uygulama aralığı Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1 ISO 6501 Rockwell Sertlik Yöntemleri

Rockwell Sertlik Sembolü	Rockwell Sertlik Metodu	Batıcı Uç	Ön Test Yükü (kgf)	Toplam Yük (kgf)	Uygulama Aralığı (Rockwell Sertliği)
A	HRA	Elmas Koni (120°)	10	60	20 - 95 HRA
B	HRBW	Bilye (1/16")	10	100	10 - 100 HRBW
C	HRC	Elmas Koni (120°)	10	150	20[a] - 70 HRC
D	HRD	Elmas Koni (120°)	10	100	40 - 77 HRD
E	HREW	Bilye (1/8")	10	100	70 - 100 HREW
F	HRFW	Bilye (1/16")	10	60	60 - 100 HRFW
G	HRGW	Bilye (1/16")	10	150	30 - 94 HRGW
H	HRHW	Bilye (1/8")	10	60	80 - 100 HRHW
K	HRKW	Bilye (1/8")	10	150	40 - 100 HRKW

[a] Elmas koni batıcı uç ve küre bilye batıcı uç yüzeyleri girinti derinliğinin en az 0,4 mm'lik kısmına kadar parlatılırsa, uygulama aralığı 10 HRC'ye kadar genişletilebilir.

Rockwell sertlik değeri belirtilirken, sertlik değeri ile birlikte, Rockwell sertlik sembolü ve batıcı uç tipi belirtilir. Batıcı uç olarak küre bilye kullanıldığında W ile belirtilirken elmas koni batıcı uç kullanıldıysa belirtilmez. Örneğin; 60 HRC ve 30 HRBW.

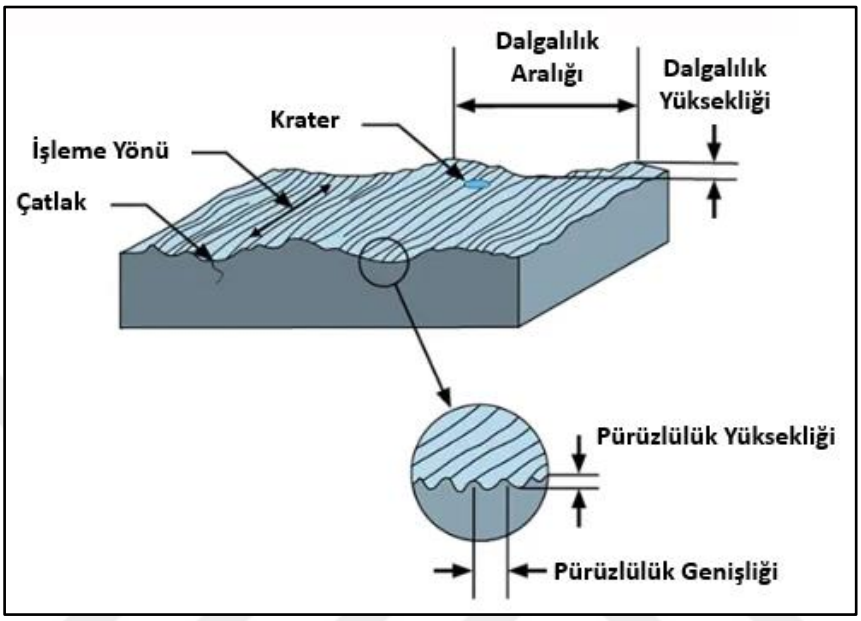
1.9.3.2. Mikro İz (Girinti) Sertliği Ölçme Testi

Mikro iz (girinti) sertlik testleri genellikle küçük ve ince numuneler üzerinde daha küçük test kuvveti uygulanarak yapılan sertlik ölçme yöntemleridir. Endüstride sıklıkla Mikro-Vickers, Knoop, Buchholz, Mikro Uluslararası Kauçuk Sertlik Derecesi testleri uygulanmaktadır.

Oluşturulan girinti izleri makro sertlik testlerinde oluşturulan izlere göre çok daha küçük olup boyutları mikroskop yardımıyla ölçülür. Mikro sertlik testleri küçük mesafelerdeki sertlik değişiminin ölçülebilmesini sağlar.

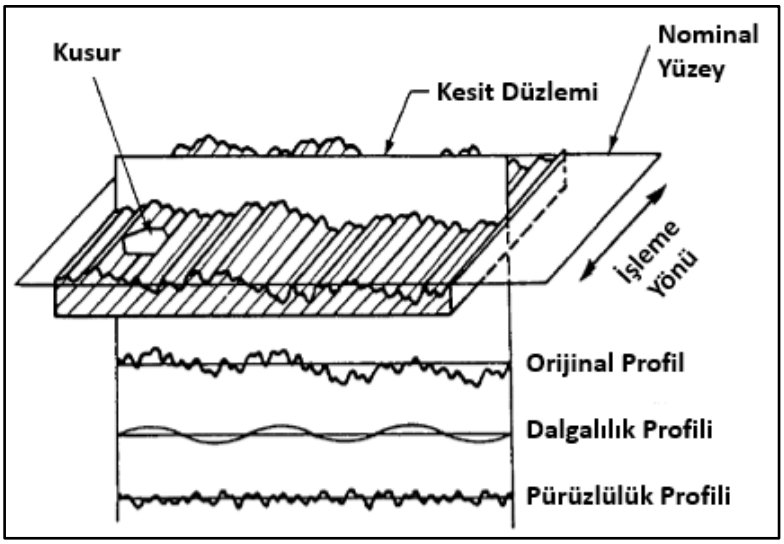
1.10. Yüzey Pürüzlülüğü

Katı cisimlerin yüzeyleri bilgisayar katı modellerinde ve teknik resimlerde kusursuz unsurlar olarak gösterilir. Ancak imal edilen iş parçası yüzeylerinde bazı sapmalar veya düzensizlikler meydana gelmektedir[19]. İş parçası yüzeyindeki sapmalar ve düzensizlikler Şekil1-2'de gösterilmiştir.



Şekil 1-2 Yüzey Sapmaları ve Düzensizlikler

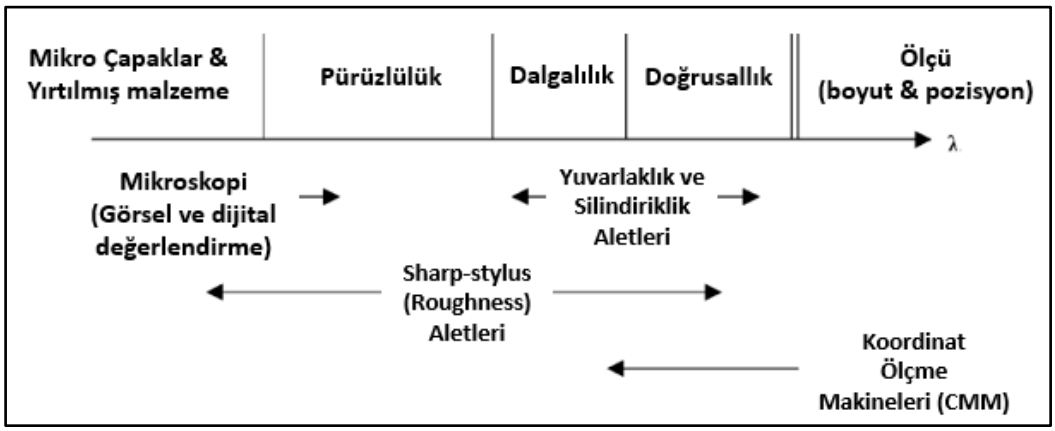
İmalat teknolojilerinin tarihsel gelişimi boyunca imalat süreçlerinin farklı yönlerinin farklı dalga boyu rejimleri oluşturduğu ve bunların parçanın işlevini etkilediği kabul edilmiştir. Yüksek frekanslı veya kısa dalga boylu bileşenler pürüzlülük, orta frekanslı bileşenler dalgalılık ve düşük frekanslı yani uzun dalga boylu bileşenler ise form olarak adlandırılmıştır. Şekil1-3'te pürüzlülük ve dalgalılık gösterilmiştir.



Şekil 1-3 Pürüzlülük ve Dalgalılık

Önceleri bu farklı dalga boyundaki yüzey profillerini yakalamak için çeşitli aletler ve ölçüm teknikleri kullanılmıştır. Yırtılmış malzemeyi veya mikro çapağı tespit etmek için mikroskopi kullanıldı. Pürüzlülüğü elde etmek için ise iğne uçlu aletler kullanıldı. Form bilgisi elde etmek için ise diğer başka aletlerden faydalanıldı.

Günümüzde ise her geçen gün daha sofistike hale gelen cihazlarda ölçüm yeteneklerini bir araya toplamak mümkün hale geldi. Tipik bir iğne uçlu profilometre cihazı ile pürüzlülük, dalgalılık ve form saptanabilmektedir. Bir Koordinat Ölçme Makinesi (CMM) cihazı ile hem boyutsal hem de form bilgisi elde edilebilmektedir. Şekil1-4'te günümüz metroloji ölçüm spektrumunu göstermektedir[20].

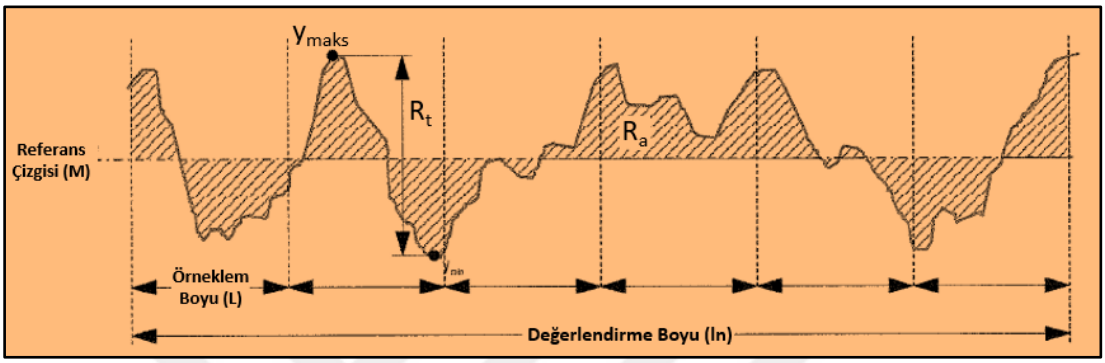


Şekil 1-4 Metroloji Ölçüm Spektrumu

Yüzey profillerini birbirinden ayırt etmek ve belirli özelliklerini sayısal olarak karşılaştırabilmek için yüzey profilindeki tepe ve çukurların yükseklikleri ve aralık mesafeleriyle ilişkili çeşitli matematiksel kombinasyonlar tasarlanmıştır[21].

Yüzey pürüzlülüğünü elde etmek için yüzey sapmalarının geometrik yüzeyden derinliği ve yüksekliği ölçülerek bir profil elde edilir. Pürüzlülük olarak ifade edilen yüzey kalitesinin hesaplanması için bu profilden form hatası ve dalgalılık gibi daha uzun dalga boyuna sahip yüzey sapmaları çıkarılır.

Birçok yüzey kalitesi parametresinin ölçümü için bir referans çizgisinden faydalanılır. Referans çizgisi, kaydedilen yüzey profili boyunca elde edilen noktalara en küçük kareler yöntemi uygulanarak elde edilir. Şekil 1-5'te gösterilmiştir.



Şekil 1-5 Yüzey Pürüzlülüğü

Rt: (Almanca Rauhtiefe kelimesinden türetilmiştir.) Pürüzlülük derinliği anlamına gelmektedir. Değerlendirme uzunluğu (ln) boyunca en yüksek nokta (y_{maks}) ile en çukur nokta (y_{min}) arasındaki dikey mesafeyi ifade eder. Matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$Rt = y_{maks} - y_{min}$$

Ra: (Pürüzlülük ortalaması) Ölçülen değerlerin referans çizgisinden ortalama sapmasıdır. Matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^1 |y|\ dx$$

Profil, eşit örnekleme aralığında n tane noktadan oluşuyor ise Ra'nın matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir[19].

$$R_a = \frac{|y_1| + |y_2| + |y_3| + \cdots + |y_n|}{n}$$

Yüzey sapmalarını birbirinden ayırmak için sınır dalga boyu (cut off , λc) kavramı kullanılır. Mesela, dalga boyu 0 ile 0,08 mm arasında olan sapmalar görmek isteniyorsa λc=0,08 mm olarak belirtilir. Genel olarak yüzey sapmaları form, dalgalılık ve pürüzlülük olarak 3'e ayrılır. Bu ayrım izafidir. İş parçası boyutlarına ve kişiden kişiye değişebilmektedir.

İğne uçlu indüktif cihazlarda form, dalgalılık ve pürüzlülük elektriksel filtreler ile ayırt edilir. Bu cihazlarda pürüzlülük (high-pass) ve dalgalılık (low-pass) filtresi olmak üzere 2 tip elektriksel filtre bulunur. Pürüzlülük (high-pass) filtre λc'den küçük dalga boyuna sahip sapmaları geçirerek pürüzlülüğü gösterir. Dalgalılık (low-pass) filtre ise λc'den büyük dalga boyuna sahip sapmaları geçirerek dalgalılık ve form sapmasını gösterir. Daha gelişmiş cihazlar ayrıca bir mekanik ve elektriksel gürültü filtresine (λs) sahiptir. Bu filtre sayesinde mekanik ve elektriksel gürültü süzülür[22].

1.10.1. Yüzey Profilleri ve Filtreler (ISO 4287)

Gerçek profil: İş parçası yüzeyi ile bu yüzeye dik bir düzlemin yüzey pürüzlülüğünün en yüksek olduğu yönde kesiştiği profildir. Normalde işleme izlerine dik yöndedir.

Ölçülen profil: Prob ucu yarıçapı nedeniyle ve eğer kullanılmışsa pabuç nedeniyle mekanik olarak filtrelenmiş profildir.

Birincil (primary, P) profil: Ölçülen profilin λs sınır dalga boyu ile filtrelendiği profildir. Bu filtre ile pürüzlülük ile alakalı olmadığı düşünülen mekanik ve elektriksel gürültü sapmaları kaldırılır.

Pürüzlülük (roughness, R) profili: Birincil profilden λc sınır dalga boyundan daha büyük sapmaların çıkarıldığı profildir.

Dalgalılık (waviness, W) profili: Birincil profilden λc sınır dalga boyundan daha küçük sapmaların çıkarıldığı profildir.

λs profil filtresi: Pürüzlülük ile mekanik ve elektriksel gürültü sapmalarını ayıran filtredir.

λc profil filtresi: Pürüzlülük ile dalgalılık sapmalarını ayıran filtredir.

λf profil filtresi: Dalgalılık ile dalgalılıktan daha uzun dalga boylarını ayıran filtredir[22,23].

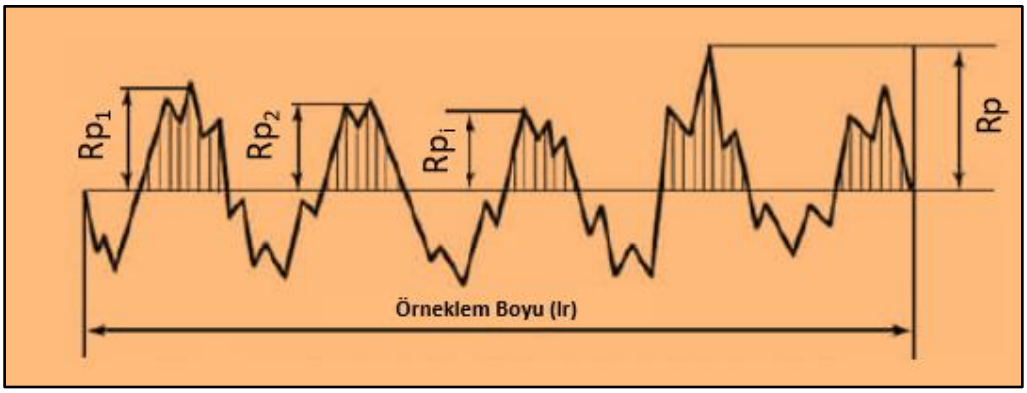
1.10.2. Yüzey Pürüzlülük Parametreleri

Her bir parametre yüzey profilinin farklı yönlerini değerlendirmek için tasarlanmıştır.

1.10.2.1. Maksimum Tepe Yüksekliği (Rp, Pp, Wp)

Bir örnekleme uzunluğu (lr) boyunca profilin en yüksek tepe noktasının yüksekliğidir[24,25].

$$\mathrm{Rp} = \mathrm{maks}\,(\mathrm{Z(x)})$$

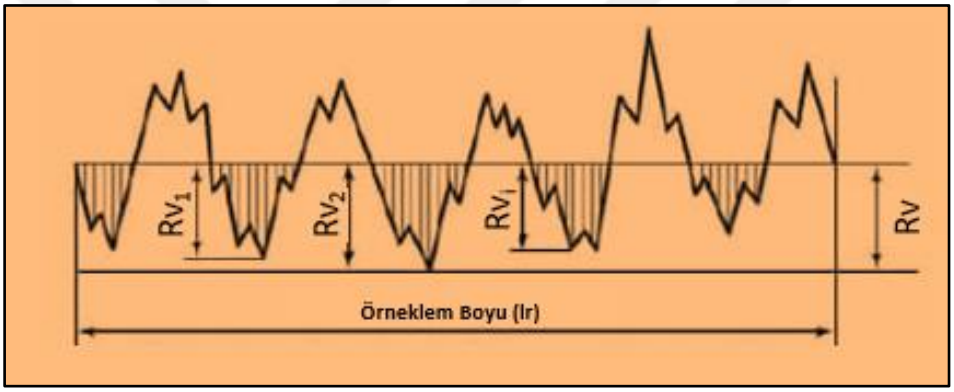


Şekil 1-6 Maksimum Tepe Yüksekliği

1.10.2.2. Maksimum Profil Derinliği (Rv, Pv, Wv)

Bir örnekleme uzunluğu (lr) boyunca profilin en derin noktasının derinliğidir[24,25].

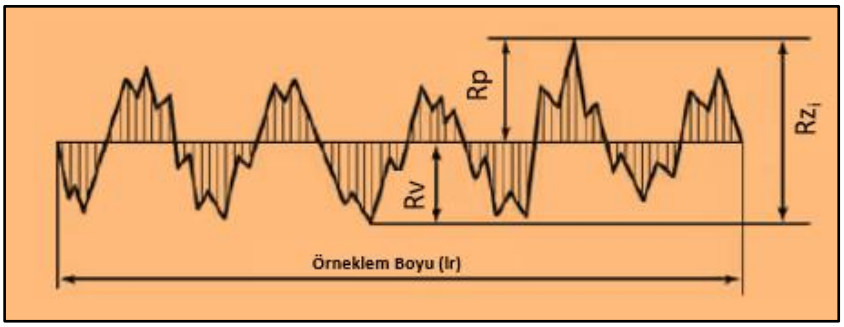
$$Rv = |\min\ (Z(x))|$$



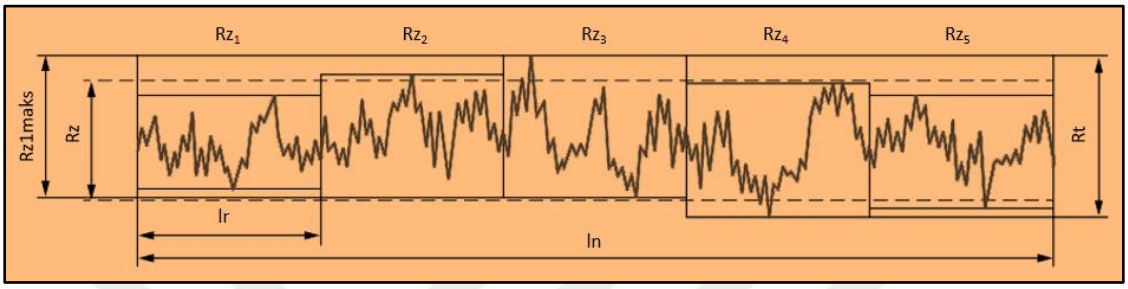
Şekil 1-7 Maksimum Profil Derinliği

1.10.2.3. Maksimum Yüzey Pürüzlülüğü Ortalaması (Rz, Pz, Wz)

Şekil 1-9'da gösterildiği gibi değerlendirme uzunluğu (ln) 5 eşit örneklem uzunluğuna (lr) bölünür. Şekil 1-8'de gösterildiği gibi her bir örneklem uzunluğu (lr) boyunca en yüksek tepe yüksekliği (Rp) ile en derin vadi derinliği (Rv) arasındaki mesafe Rz_i olarak ifade edilir. Her bir örneklem için Rz_1, Rz_2, Rz_3, Rz_4, Rz_5 olarak ölçülür. 5 Rz_i değerinin ortalaması profilin Rz değerini ifade eder[24,25].



Şekil 1-8 Örneklemin Maksimum Yüzey Pürüzlülüğü



Şekil 1-9 Rz, Rt ve Rz1maks

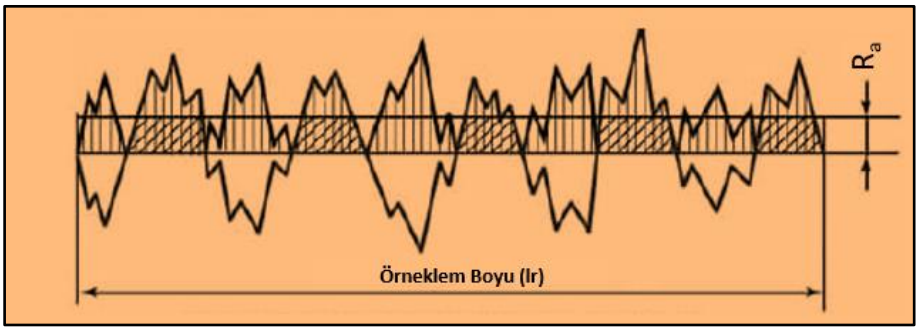
1.10.2.4. Maksimum Yüzey Pürüzlülüğü (Rz1max, Pz1max, Wz1max

Şekil 1-9'da gösterildiği gibi değerlendirme uzunluğu (ln) 5 eşit örneklem uzunluğuna (lr) bölünür. Şekil 1-8'de gösterildiği gibi her bir örneklem uzunluğu (lr) boyunca en yüksek tepe yüksekliği (Rp) ile en derin vadi derinliği (Rv) arasındaki mesafe Rz_i olarak ifade edilir. Her bir örneklem için Rz_1, Rz_2, Rz_3, Rz_4, Rz_5 olarak ölçülür. 5 Rz_i değeri arasındaki en büyük değer profilin Rz1maks değeridir.[24,25].

1.10.2.5. Aritmetik Ortalama Yükseklik (Ra, Pa, Wa)

Örneklem uzunluğu (lr) boyunca kaydedilen yüzey sapmalarının referans çizgisinden yüksekliklerinin mutlak değerlerinin ortalamasıdır. Ra parametresi AA ve CLA olarak da adlandırılır[24,25].

$$\mathrm{Ra, Pa, Wa} = \frac{1}{\mathrm{lr}} \int_0^{\mathrm{lr}} |Z(x)|\, dx$$

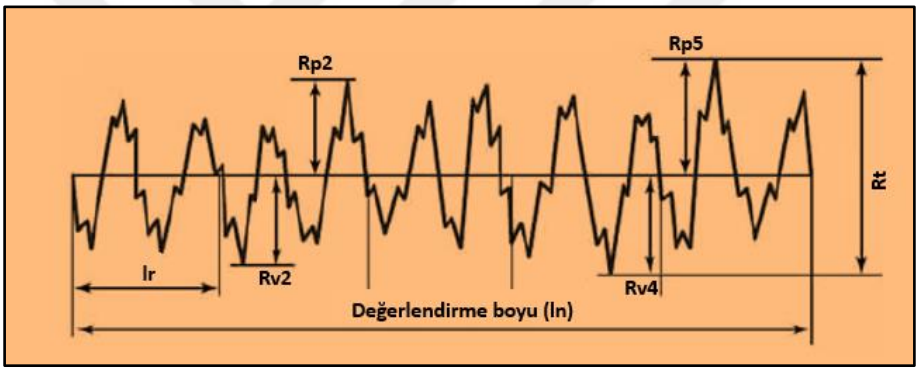


Şekil 1-10 Aritmetik Ortalama Yükseklik

1.10.2.6. Toplam Profil Yüksekliği (Rt, Pt, Wt)

Değerlendirme uzunluğu (ln) boyunca, en yüksek tepe ile en derin vadi arasındaki dikey mesafedir. Dikkat edilmelidir ki örneklem uzunluğu (lr) değil, değerlendirme uzunluğu (ln) boyunca incelenir. O nedenle her profil için Rt ≥ Rz durumu geçerlidir[24,25].

$$\mathrm{Rt, Pt, Wt} = \mathrm{maks\ (Rpi)} + \mathrm{maks\ (Rvi)}$$



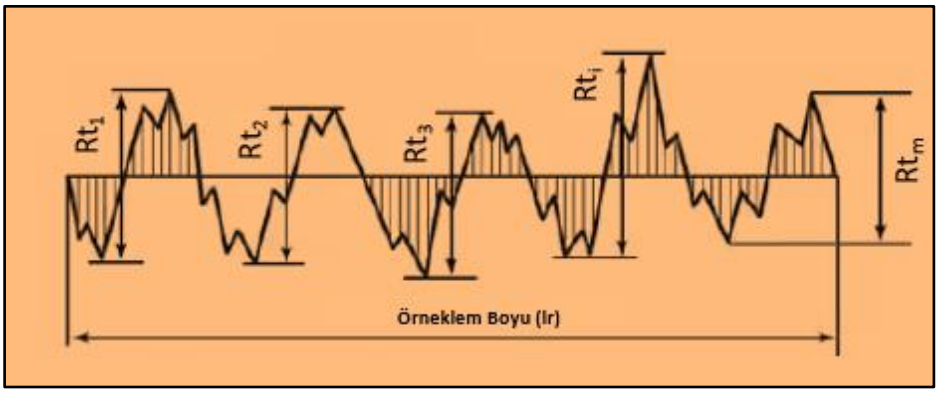
Şekil 1-11 Toplam Profil Yüksekliği

1.10.2.7. Profil Elemanlarının Ortalama Yüksekliği (Rc, Pc, Wc)

Bir örneklem uzunluğu (lr) boyunca, profil elemanı yüksekliklerinin (Rt_i) ortalamasıdır. Profil elemanları bir tepe ve ona komşu vadiden oluşmaktadır. Profil elemanlarının tanımlamasında yükseklik ve uzunluk ile ilgili 2 kural uygulanır[24,25].

1) Profil elemanın yüksekliği (veya derinliği), Rz değerinin %10'undan daha az ise önceki tepeye (veya vadiye) dahil edilir.
2) Profil elemanının uzunluğu, örnekleme uzunluğunun (lr) %1'inden kısa ise önceki tepeye (veya vadiye) dahil edilir.

$$\mathrm{Rc} = \mathrm{Rt_m} = \frac{1}{\mathrm{m}} \sum_{\mathrm{i=0}}^{\mathrm{m}} \mathrm{Rti}$$

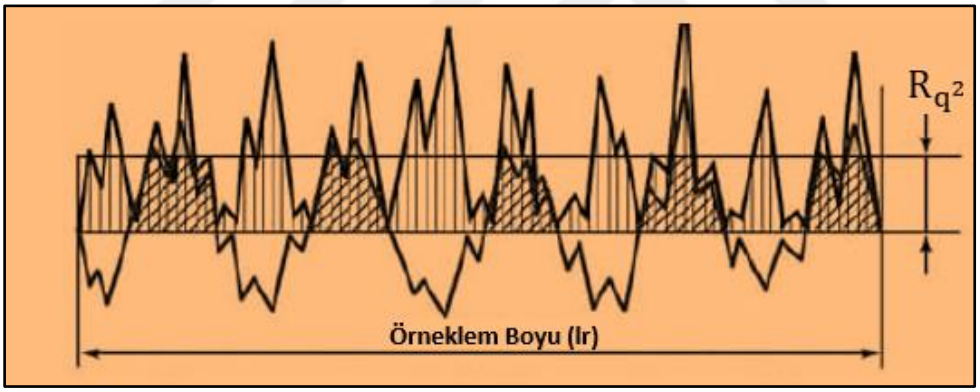


Şekil 1-12 Profil Elemanları Ortalama Yüksekliği

1.10.2.8. Ortalama Karekök Sapması (Rq, Pq, Wq)

Örnekleme uzunluğu (lr) boyunca kaydedilen sapma değerlerinin kareköklerinin ortalamasıdır. En yaygın kullanılan parametrelerden biridir. Rq parametresi RMS olarak da adlandırılır[24,25].

$$\mathrm{Rq, Pq, Wq} = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{lr}} \int_0^{\mathrm{lr}} \mathrm{Z}^2\,(\mathrm{x})\,\mathrm{dx}}$$

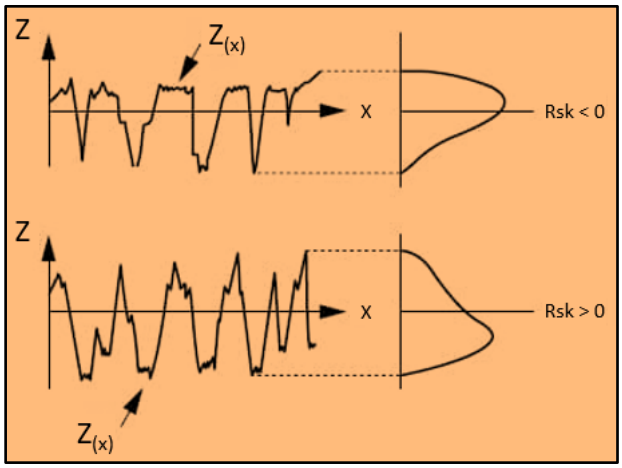


Şekil 1-13 Ortalama Karekök Sapması

1.10.2.9. Asimetriklik (Rsk, Psk,Wsk)

Örnekleme uzunluğu (lr) boyunca kaydedilen sapma değerlerinin (Zx) küplerinin ortalaması alınır ve Rq^3 değerine bölünür. Profilin asimetrikliğinin bir ölçüsüdür. Örneğin, negatif bir asimetriklik değeri iyi bir yataklama yüzeyinden beklenen bir özelliktir[24,25].

$$\mathrm{Rsk} = \frac{1}{\mathrm{Rq}^3}\left[\frac{1}{\mathrm{lr}} \int_0^{\mathrm{lr}} \mathrm{Z}^3\,(\mathrm{x})\,\mathrm{dx}\right]$$

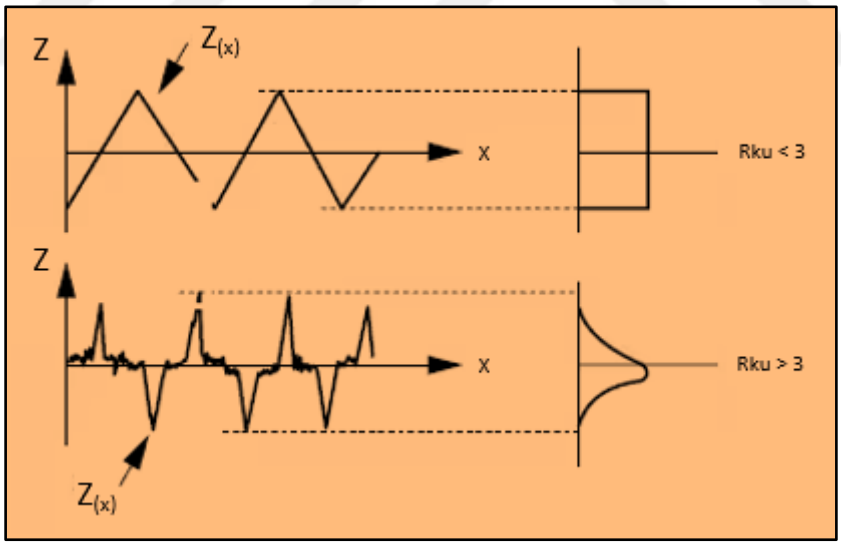


Şekil 1-14 Asimetriklik

1.10.2.10. Sivrilik – Basıklık (Rku, Pku, Wku)

Örneklem uzunluğu (lr) boyunca kaydedilen sapma değerlerinin (Zx) dördüncü kuvvetlerinin ortalaması alınır ve Rq^4 değerine bölünür. Bu parametre tepe ve vadilerin uç geometrisi hakkında bilgi verir[24,25].

$$Rsk = \frac{1}{Rq^4}\left[\frac{1}{lr}\int_0^{lr} Z^4\,(x)\,dx\right]$$



Şekil 1-15 Sivrilik - Basıklık

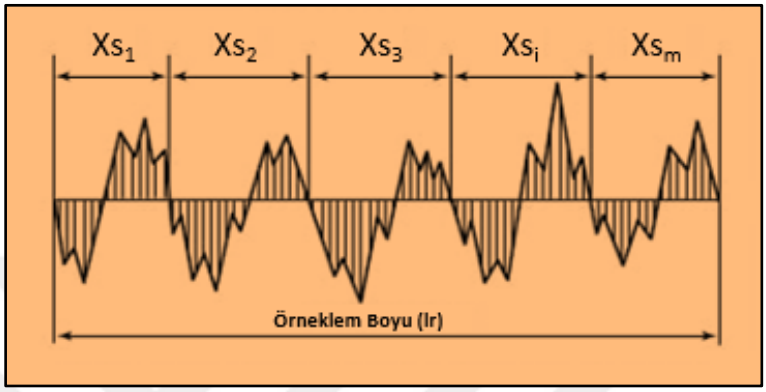
1.10.2.11. Profil Elemanlarının Ortalama Genişliği (RSm, PSm, WSm)

Örnekleme uzunluğu (lr) boyunca profil elemanlarının uzunluğunun (Xs) ortalamasıdır. Profil elemanları bir tepe ve ona komşu vadiden oluşmaktadır. Profil elemanlarının tanımlamasında yükseklik ve uzunluk ile ilgili 2 kural uygulanır[24,25].

1) Profil elemanın yüksekliği (veya derinliği), Rz değerinin %10'undan daha az ise önceki tepeye (veya vadiye) dahil edilir.

2) Profil elemanının uzunluğu, örnekleme uzunluğunun (lr) %1'inden kısa ise önceki tepeye (veya vadiye) dahil edilir.

$$\mathrm{RSm, PSm, WSm} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} Xs_i$$

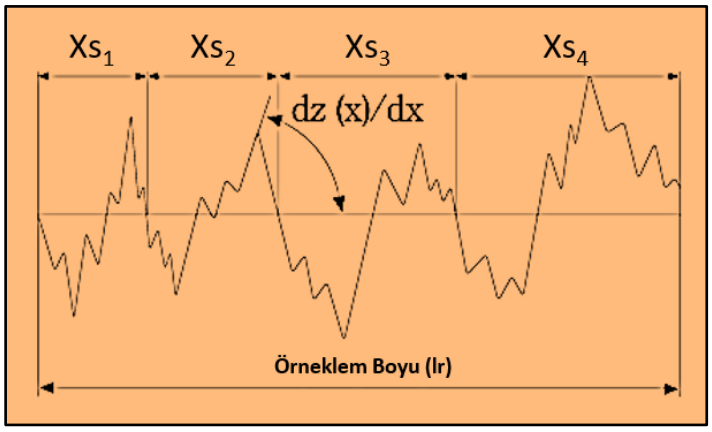


Şekil 1-16 Profil Elemanlarının Ortalama Genişliği

1.10.2.12. Ortalama Karekök Eğimi (RΔq, PΔq, WΔq)

Örnekleme uzunluğu (lr) boyunca tüm profil eğimlerinin karekök ortalamasıdır[24,25].

$$R\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l}\int_0^l \left(\frac{d}{dx} Z(x)\right)^2 dx}$$

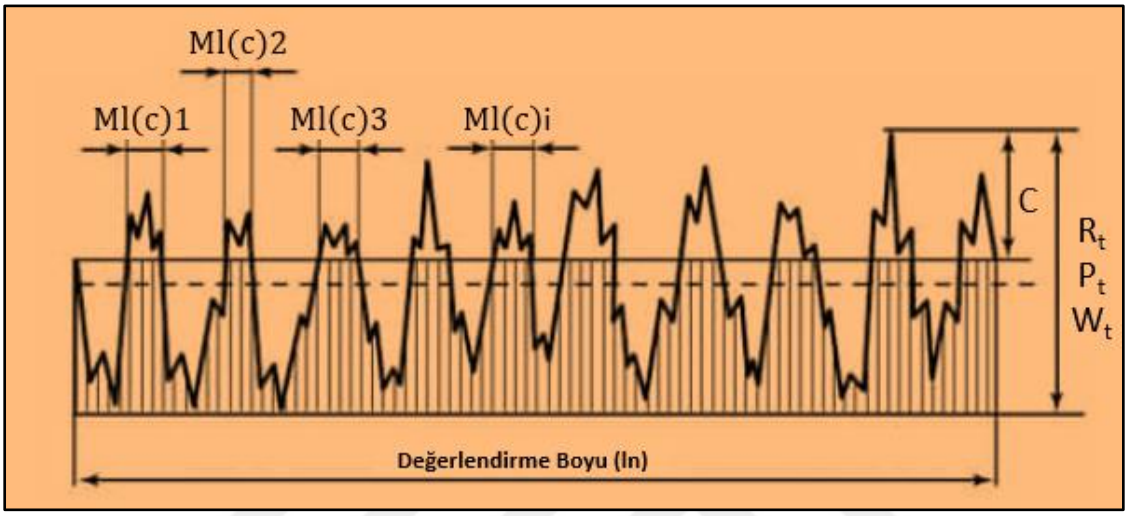


Şekil 1-17 Ortalama Karekök Eğimi

1.10.2.13. Yük Uzunluk Oranı (Rmr(c), Pmr(c), Wmr(c))

Değerlendirme uzunluğu (ln) boyunca, belirli bir profil kesiti seviyesinde (c) toplam dolu malzeme uzunluğunun, değerlendirme uzunluğuna (ln) oranını belirtir. C yüksekliği µm veya % cinsinden verilir[24,25].

$$\mathrm{Rmr, Pmr, Wmr(c)} = \frac{100}{\mathrm{ln}} \sum_{i=1}^{m} \mathrm{M\ l(c)i(\%)}$$



Şekil 1-18 Yük Uzunluk Oranı

1.10.2.14. Rpk, Rk, Rvk, Mr1, Mr2

Bu parametreler otomotiv endüstrisi tarafından silindir deliklerinde meydana gelebilecek olası aşınmanın kontrolü için özel olarak tasarlanmıştır[26].

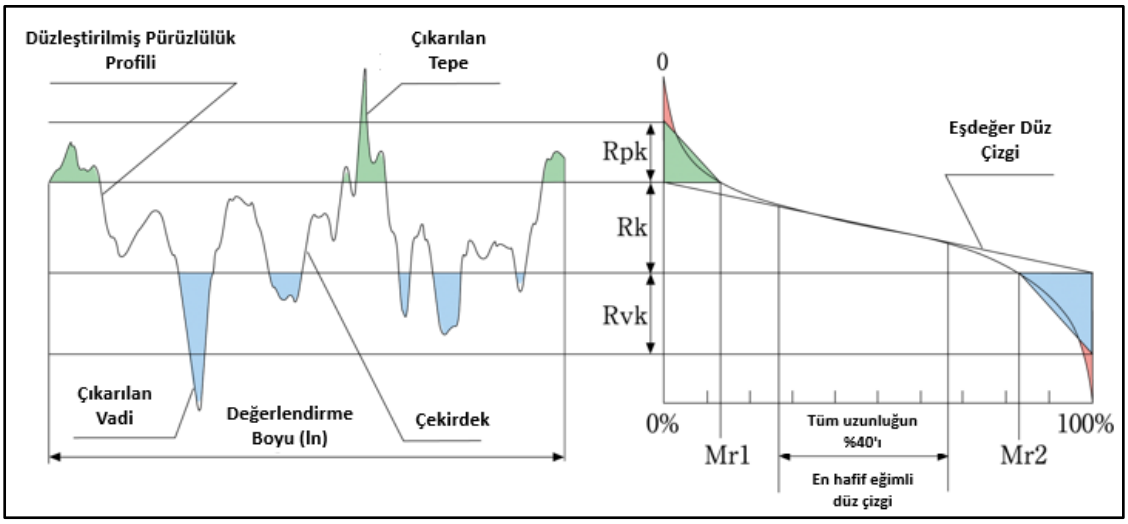
Rpk : Azaltılmış tepe yüksekliğidir. Motorun çalışmaya başladığı ilk zamanlarda aşınacak olan yüzeyin üst kısmıdır.

Rk : Çekirdek pürüzlülük derinliğidir. Silindirlerin performansını ve ömrünü belirleyecek olan uzun vadeli çalışma yüzeyidir

Rvk : Azaltılmış vadi derinliğidir. Yüzeyde oluşan derin çukurların yağ tutma kapasitesidir.

Mr1 : Pürüzlülük çekirdeğinin üst sınırına karşılık gelen malzeme oranıdır.

Mr2 : Pürüzlülük çekirdeğinin alt sınırına karşılık gelen malzeme oranıdır.

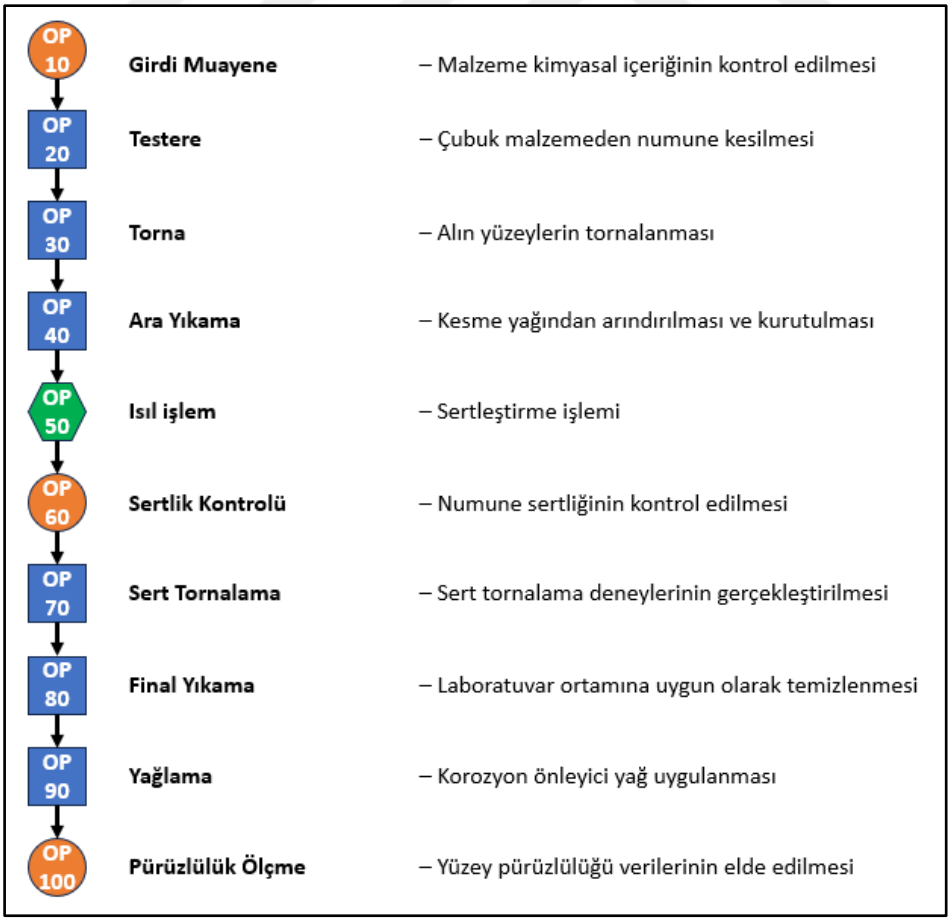


Şekil 1-19 Rpk, Rk, Rvk, Mr1, Mr2

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Deneysel Çalışmanın İş Akış Şeması

Deneysel çalışmanın iş akış şeması aşağıdaki görselde sunulmuştur. Ara kontrollerinde uygulandığı bir iş akış planı ile deney numunelerinin denk olması sağlanmıştır.



Şekil 2-1 Deneysel Çalışma İş Akış Şeması

2.2. Deneysel Çalışma Numunesi

ISO 683-17 standardına göre 100Cr6 malzemenin kimyasal içeriği Tablo 2'de gösterilmektedir[27].

Tablo 2 ISO 681-17 Standardına göre 100Cr6 Malzemenin Kimyasal İçeriği

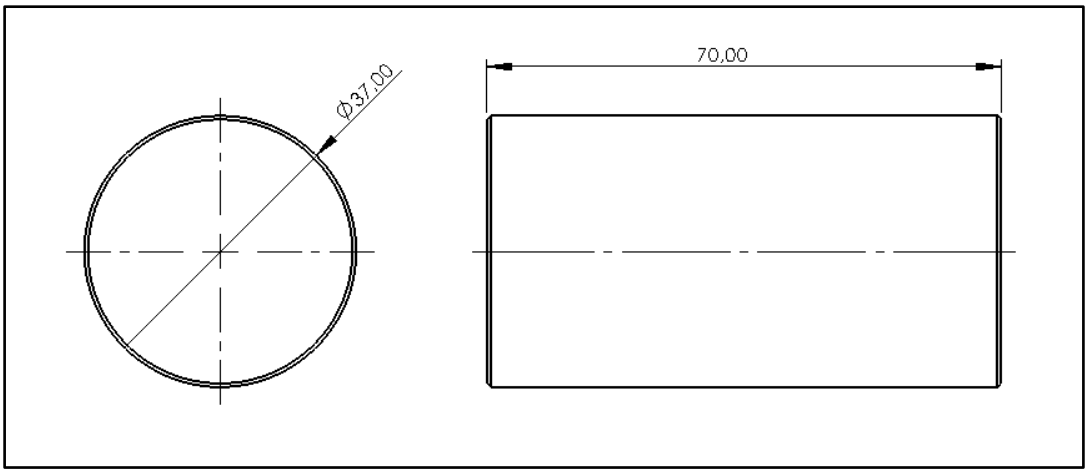
	Karbon C	Silisyum Si	Mangan Mn	Fosfor P	Kükürt S	Krom Cr	Molibden Mo	Alüminyum	Bakır Cu	Oksijen O
Minimum	0,93	0,15	0,25	-	-	1,35	-	-	-	-
Maksimum	1,05	0,35	0,45	0,025	0,015	1,60	0,10	0,050	0,30	0,0015

100Cr6 malzemenin uluslararası standartlardaki farklı tanımlamaları Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3 100Cr6 Malzemenin Uluslararası Standartlardaki Tanımlanması

Avrupa	Almanya		Fransa	İspanya	B.K.	ABD
EN	**DIN**	**W.n.**	**AFNOR**	**UNE**	**B.S.**	**AISI/SEA**
100Cr6	100Cr6	1.3505	100Cr6	F1310	535A99	52100

Sert tornalama deneylerinin gerçekleştirileceği numune parça ölçüleri aşağıda gösterilmektedir.



Şekil 2-2 Deney Numune Parçası Ölçüleri

2.3. Deneysel Çalışmada Kullanılan Torna Tezgahı

Deneylerde, sert tornalama işlemi için Hwacheon marka, Cutex 160A MC model bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) torna tezgahı kullanılmıştır. Bir ana iş mili ve karşı punta desteği bulunan tezgahın döner tareti 12 adet takım kapasitelidir.



Şekil 2-3 Hwacheon Cutex 160A MC Tezgahının Görseli

Tezgahın gerçekleştirilecek tornalama işlemi için bilinmesi gereken özellikleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

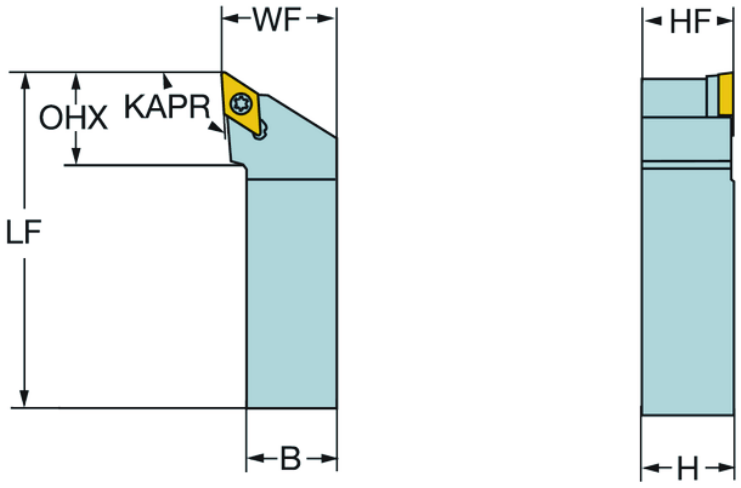
Tablo 4 Hwacheon Cutex 160A MC Teknik Özellikleri

	Değer	**Birim**
İş mili gücü	15	kW
İş mili hızı	6000	dev/dak
İş mili torku	127	Nm
Maksimum tornalama çapı	300	mm
Maksimum tornalama boyu	300	mm
Dış çap takım boyutu	□25	mm
İç çap takım boyutu	Ø40	mm
NC kontolcüsü	0*i*-TF Plus	

2.4. Deneysel Çalışmada Kullanılan Kesici Takım ve Tutucular

Deneylerde, yalnızca yanaşma açıları (93°, 100° ve 107,5°) farklı olan özdeş katerler kullanılmıştır. Katerlerin boyutsal ve geometrik özelikleri Tablo 5'te gösterilmiştir.

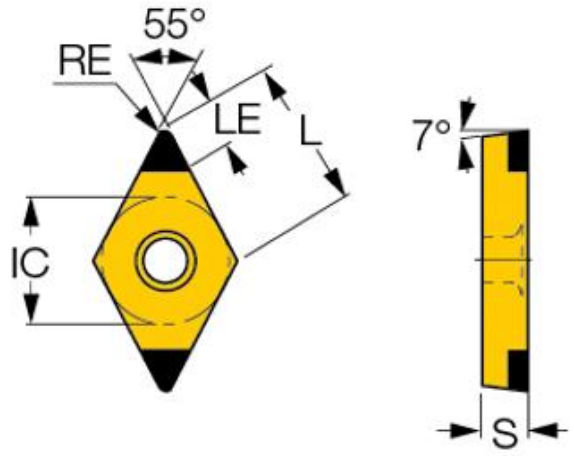
Tablo 5 Deneysel Çalışmada Kullanılan Katerlerin Özellikleri



	SDJCR 2525M 11	SDXCR 2525M 11	SDHCR 2525M 11
Takım kesme kenarı açısı (KAPR)	93°	100°	107,5°
Maksimum bağlama boyu (OHX)	24,4 mm	24,4 mm	24,4 mm
Takım tam boyu (LF)	150 mm	150 mm	150 mm
Fonksiyonel genişlik (WF)	32 mm	32 mm	32 mm
Fonksiyonel yükseklik (HF)	25 mm	25 mm	25 mm
Takım şaft genişliği (B)	25 mm	25 mm	25 mm
Takım şaft yüksekliği (H)	25 mm	25 mm	25 mm

Deneylerde kesici takım olarak yalnızca uç radyus ölçüleri (0,4mm ve 0,8mm) birbirinden farklı olan özdeş CBN kesici uçlar kullanılmıştır. Kesici uçların boyutsal ve geometrik özellikleri Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6 Deneysel Çalışmada Kullanılan Kesici Uçların Özellikleri



	DCGW 11T304	DCGW 11T308
Köşe radyusu (RE)	0,4 mm	0,8 mm
Kesme kenarı boyu (L)	11,6 mm	11,6 mm
Etkin kesme kenar boyu (LE)	2,5 mm	2,1 mm
İç teğet daire çapı (IC)	9,52 mm	9,52 mm
Kesici uç kalınlığı (S)	3,97 mm	3,97 mm
Boşluk açısı	7°	7°

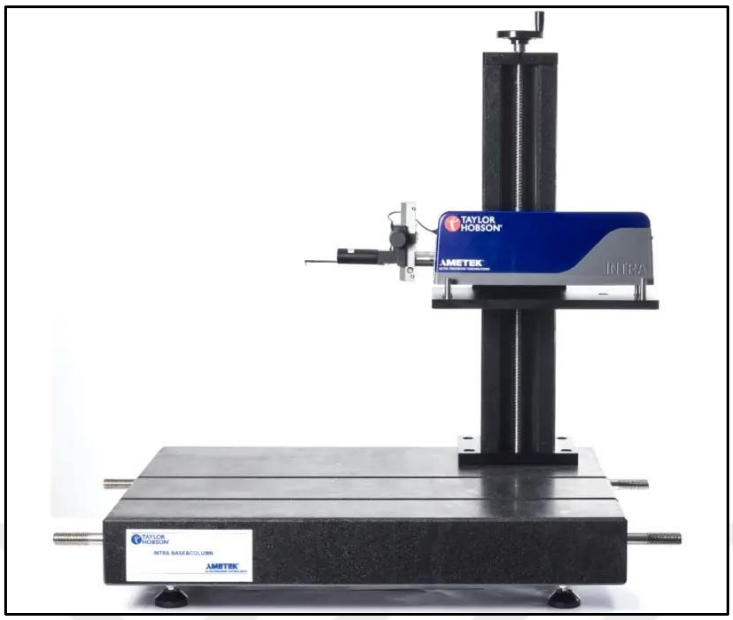
2.5. Deneysel Çalışmada Kullanılan Ölçüm Ekipmanları

Deney numunelerinin ısıl işlem sonrası sertlik değeri Bulut Makina Digirock-Lc-Rbov sertlik ölçme cihazı ile 55 HRC olarak ölçülmüştür.



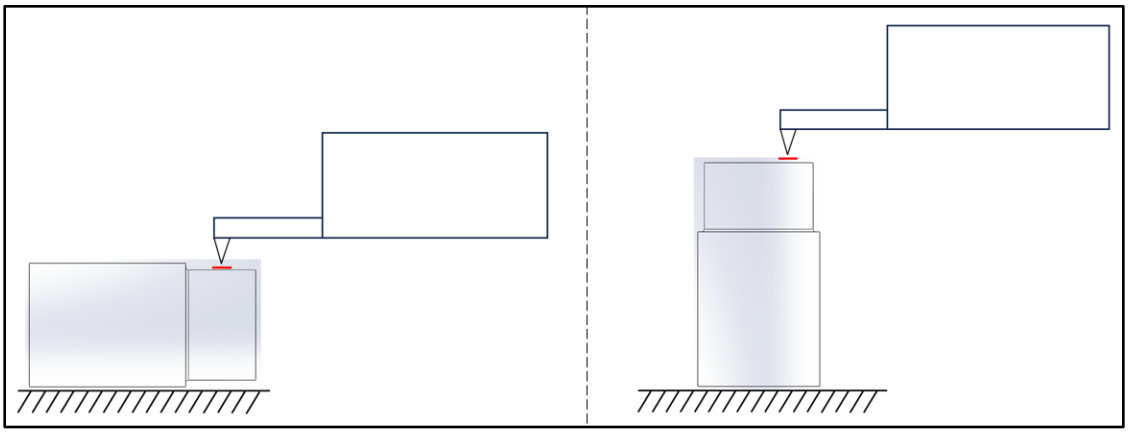
Şekil 2-4 Bulut Makina DIGIROCK-LC-RBOV Sertlik Ölçme Cihazı

Deney numunelerinin yüzey pürüzlülüğü ölçümü Taylor Hobson Intra Touch yüzey pürüzlülük ve profil ölçme cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 2-5 Taylor Hobson Intra Touch Yüzey Pürüzlülük ve Profil Ölçme Cihazı

Dış çap yüzeyi pürüzlülük ölçümü sert tornalama yapılan yüzeyin orta bölgesinden 5 mm'lik değerlendirme boyu ile yapılmıştır. Alın yüzeyi pürüzlülük ölçümü ise Ø15 ile Ø25 arasında 5 mm'lik değerlendirme boyu ile yapılmıştır. Şekil 2-6 ile gösterilmiştir.

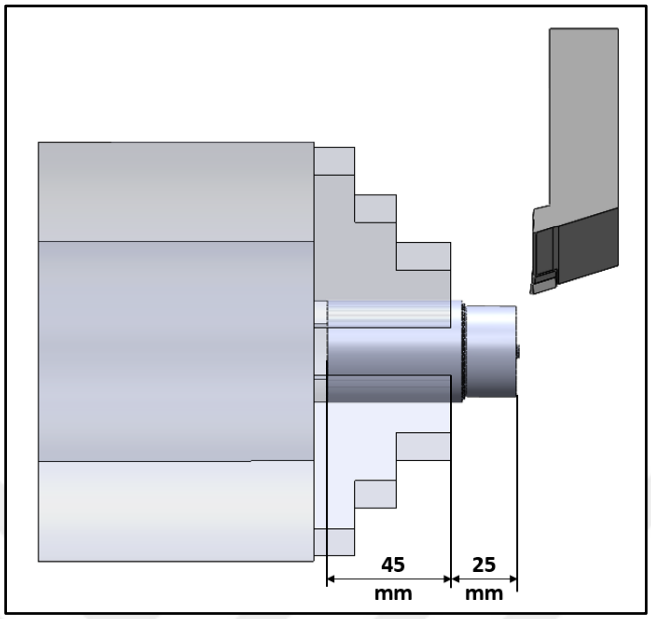


Şekil 2-6 Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Bölgeleri Şematik Gösterimi

2.6. Deneysel Çalışmada Uygulanan Kesme Şartları ve Deney Tasarımı

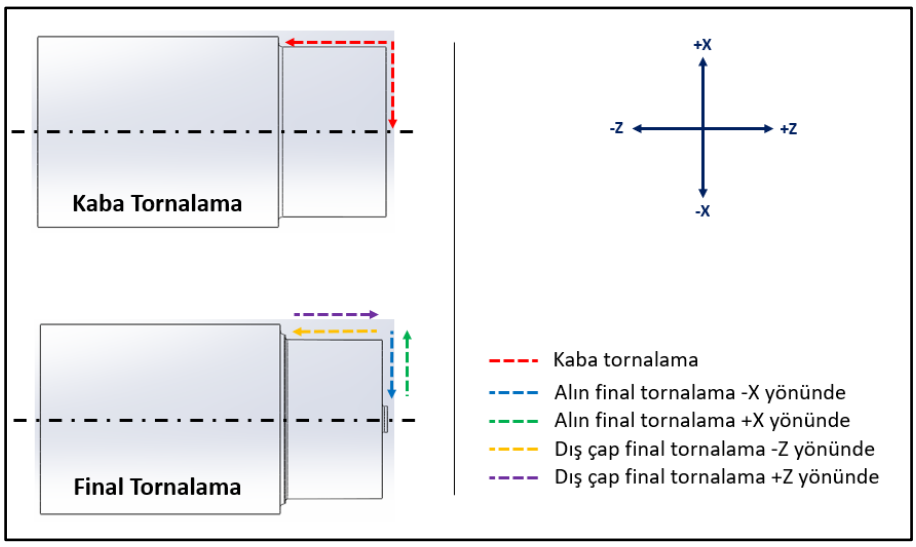
Bu çalışmada deney tasarımı olarak tam faktöriyel dizayn (full factorial design) uygulanmıştır. Dış çap tornalama işlemi için 36 deney ve alın tornalama işlemi için 36 deney uygulanmıştır. Deneylerde 100 m/dak sabit kesme hızı ve 0,05 mm/dev ilerleme hızı sabit parametre olarak uygulanmıştır. Deneylerde dış çap tornalama ve alın tornalama olarak iki yönteme yer verilmiştir ve iki işlem için de sonuçlar değerlendirilmiştir. Alın tornalama işlemi

için kesme hızını sabit tutmak amacıyla G96 NC kodu ile programlama yapılmıştır. Numune parçalar Şekil 2-7'de gösterildiği gibi 25 mm'lik kısmı dışarda kalacak şekilde 45 mm mesafeden 3 ayaklı ayna ile sıkma yapılmıştır.



Şekil 2-7 Numune Bağlama Şematik Gösterimi

Deney sonuçlarının malzemenin yüzeye yakın bölgelerindeki olası inklüzyonlardan ve geometrik kusurlardan etkilenmemesi için, Şekil 2-8'de gösterildiği gibi önce kaba tornalama yapılmış ve her uygulamada kaba tornalama için aynı kesme şartları uygulanmıştır. Alın tornalama deneylerinde uygulanan kesme şartları Tablo 7'de, dış çap tornalama deneylerinde uygulanan kesme şartları ise Tablo 9'da gösterilmiştir.



Şekil 2-8 Tornalama İşlemlerinin Şematik Gösterimi

Tablo 7 Alın Tornalama Deneylerinde Kullanılan Kesme Şartları

Seviye	Kater Kesme Kenarı Açısı (KAPR)	Kesici Uç Köşe Radyusu (RE)	Kesme Derinliği (Ap)	İlerleme Yönü
1	93°	0,4 mm	0,05 mm	-X
2	100°	0,8 mm	0,10 mm	+X
3	107,5°	-	0,15 mm	-

Tablo 8 Alın Tornalama Deney Tablosu

Deney No	Kater Kesme Kenarı Açısı (KAPR)	Kesici Uç Köşe Radyusu (RE)	Kesme Derinliği (Ap)	İlerleme Yönü
1	93°	0,4	0,05	-X
2	93°	0,4	0,10	-X
3	93°	0,4	0,15	-X
4	93°	0,4	0,05	+X
5	93°	0,4	0,10	+X
6	93°	0,4	0,15	+X
7	93°	0,8	0,05	-X
8	93°	0,8	0,10	-X
9	93°	0,8	0,15	-X
10	93°	0,8	0,05	+X
11	93°	0,8	0,10	+X
12	93°	0,8	0,15	+X
13	100°	0,4	0,05	-X
14	100°	0,4	0,10	-X
15	100°	0,4	0,15	-X
16	100°	0,4	0,05	+X
17	100°	0,4	0,10	+X
18	100°	0,4	0,15	+X
19	100°	0,8	0,05	-X
20	100°	0,8	0,10	-X
21	100°	0,8	0,15	-X
22	100°	0,8	0,05	+X
23	100°	0,8	0,10	+X
24	100°	0,8	0,15	+X
25	107,5°	0,4	0,05	-X
26	107,5°	0,4	0,10	-X
27	107,5°	0,4	0,15	-X
28	107,5°	0,4	0,05	+X
29	107,5°	0,4	0,10	+X
30	107,5°	0,4	0,15	+X
31	107,5°	0,8	0,05	-X
32	107,5°	0,8	0,10	-X
33	107,5°	0,8	0,15	-X
34	107,5°	0,8	0,05	+X
35	107,5°	0,8	0,10	+X
36	107,5°	0,8	0,15	+X

Tablo 9 Dış Çap Tornalama Deneylerinde Uygulanan Kesme Şartları

Seviye	Kater Kesme Kenarı Açısı (KAPR)	Kesici Uç Köşe Radyusu (RE)	Kesme Derinliği (Ap)	İlerleme Yönü
1	93°	0,4 mm	0,05 mm	-Z
2	100°	0,8 mm	0,10 mm	+Z
3	107,5°		0,15 mm	

Tablo 10 Dış Çap Tornalama Deney Tablosu

Deney No	Kater Kesme Kenarı Açısı (KAPR)	Kesici Uç Köşe Radyusu (RE)	Kesme Derinliği (Ap)	İlerleme Yönü
1	93°	0,4	0,05	-Z
2	93°	0,4	0,10	-Z
3	93°	0,4	0,15	-Z
4	93°	0,4	0,05	+Z
5	93°	0,4	0,10	+Z
6	93°	0,4	0,15	+Z
7	93°	0,8	0,05	-Z
8	93°	0,8	0,10	-Z
9	93°	0,8	0,15	-Z
10	93°	0,8	0,05	+Z
11	93°	0,8	0,10	+Z
12	93°	0,8	0,15	+Z
13	100°	0,4	0,05	-Z
14	100°	0,4	0,10	-Z
15	100°	0,4	0,15	-Z
16	100°	0,4	0,05	+Z
17	100°	0,4	0,10	+Z
18	100°	0,4	0,15	+Z
19	100°	0,8	0,05	-Z
20	100°	0,8	0,10	-Z
21	100°	0,8	0,15	-Z
22	100°	0,8	0,05	+Z
23	100°	0,8	0,10	+Z
24	100°	0,8	0,15	+Z
25	107,5°	0,4	0,05	-Z
26	107,5°	0,4	0,10	-Z
27	107,5°	0,4	0,15	-Z
28	107,5°	0,4	0,05	+Z
29	107,5°	0,4	0,10	+Z
30	107,5°	0,4	0,15	+Z
31	107,5°	0,8	0,05	-Z
32	107,5°	0,8	0,10	-Z
33	107,5°	0,8	0,15	-Z
34	107,5°	0,8	0,05	+Z
35	107,5°	0,8	0,10	+Z
36	107,5°	0,8	0,15	+Z

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

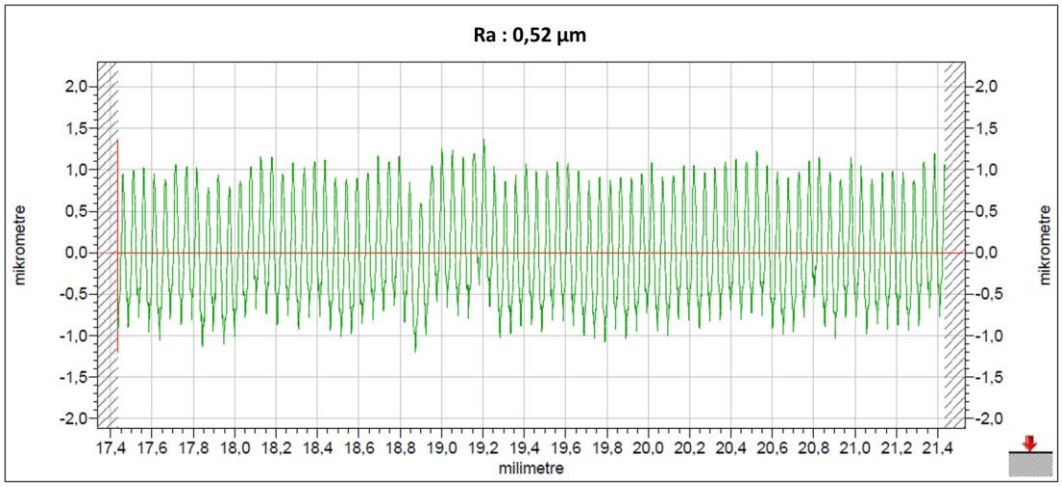
3.1. Alın Tornalama Deneyleri Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Alın tornalama deney numuneleri üzerinden elde edilen yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları Tablo 11'de sunulmuştur. Deneyler sonucunda elde edilen Ra yüzey pürüzlülük değerleri 0,09 - 0,52 µm arasında, Pt yüzey pürüzlülük değerleri ise 0,91 - 4,38 µm arasındadır.

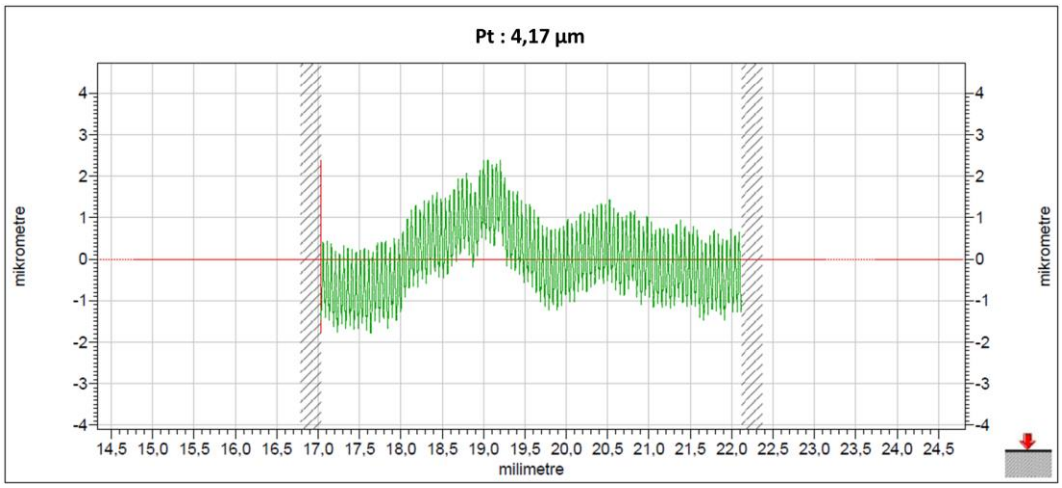
Tablo 11 Alın Tornalama Deneyleri Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

Deney No	Ra	Pt	Deney No	Ra	Pt
1	0,48	2,85	**19**	0,12	1,05
2	0,49	4,38	**20**	0,16	1,48
3	0,49	4,32	**21**	0,16	1,30
4	0,52	4,17	**22**	0,12	1,13
5	0,51	4,09	**23**	0,14	1,20
6	0,51	2,77	**24**	0,16	1,15
7	0,11	1,52	**25**	0,17	1,70
8	0,09	0,91	**26**	0,18	2,44
9	0,10	1,87	**27**	0,19	2,83
10	0,10	0,96	**28**	0,17	1,29
11	0,09	1,11	**29**	0,17	1,17
12	0,10	1,10	**30**	0,18	2,42
13	0,17	1,74	**31**	0,20	1,97
14	0,21	1,62	**32**	0,23	1,88
15	0,20	1,44	**33**	0,26	2,13
16	0,22	1,60	**34**	0,13	1,14
17	0,25	1,53	**35**	0,32	2,01
18	0,25	1,69	**36**	0,24	2,89

Taylor Hobson Intra Touch cihazı ile 36 alın tornalama deneyinden elde edilen tüm Ra ve Pt grafikleri "EKLER" bölümünde Şekil A-1'den Şekil A-72'ye kadar sunulmuştur. Örnek olarak 4 numaralı alın tornalama deneyinden elde edilen Ra ve Pt grafikleri birincil profil (P profil) ile pürüzlülük profili (R profil) arasındaki yüzeydeki dalgalılık etkisini açıkça göstermektedir ve Şekil 3-1 ve Şekil 3-2'de sunulmuştur.



Şekil 3-1 Alın Tornalama Deney 4 - Ra



Şekil 3-2 Alın Tornalama Deney 4 - Pt

3.2. Dış Çap Tornalama Deneyleri Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları

Dış çap tornalama deney numuneleri üzerinden elde edilen yüzey pürüzlülüğü ölçüm sonuçları Tablo 12'de sunulmuştur. Deneyler sonucunda elde edilen Ra yüzey pürüzlülük değerleri 0,13 - 0,45 µm arasında, Pt yüzey pürüzlülük değerleri ise 1,23 - 3,14 µm arasındadır.

Tablo 12 Dış Çap Tornalama Deneyleri Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları

Deney No	Ra	Pt	Deney No	Ra	Pt
1	0,16	1,48	**19**	0,28	1,67
2	0,18	1,43	**20**	0,37	2,33
3	0,18	1,53	**21**	0,39	2,16
4	0,18	1,34	**22**	0,38	2,35
5	0,20	1,46	**23**	0,36	2,30
6	0,18	1,37	**24**	0,34	2,55
7	0,15	1,32	**25**	0,23	1,41
8	0,21	1,59	**26**	0,26	1,51
9	0,28	1,82	**27**	0,23	1,62
10	0,31	1,89	**28**	0,22	1,26
11	0,24	1,75	**29**	0,22	1,96
12	0,24	1,74	**30**	0,23	1,47
13	0,45	3,14	**31**	0,24	1,77
14	0,18	1,23	**32**	0,35	2,02
15	0,22	2,12	**33**	0,36	1,97
16	0,36	2,00	**34**	0,13	1,30
17	0,37	2,28	**35**	0,25	1,58
18	0,41	2,29	**36**	0,17	1,52

Taylor Hobson Intra Touch cihazı ile 36 dış çap tornalama deneyinden elde edilen tüm Ra ve Pt grafikleri "EKLER" bölümünde Şekil B-1'den Şekil B-72'ye kadar sunulmuştur.

3.3. Verilerin Analiz Edilmesi

3.3.1. Sinyal Gürültü Oranları ve En İyi Seviyeler

Tam faktöriyel deney tasarımı ile elde edilen sonuçlar Dr. Genichi Taguchi'nin sinyal-gürültü oranı (S/N) yöntemi ile değerlendirilmiştir. Çalışmanın hedefi en iyi yüzey kalitesini elde etmek olduğundan S/N oranının hesaplanması için "en küçük en iyi" formülü uygulanmıştır[28].

Uygulanan S/N denklemi aşağıdaki gibidir.

$$S/N = -10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right)$$

y_i : deney sonucu ölçülen değer

n : deneyin tekrar sayısı

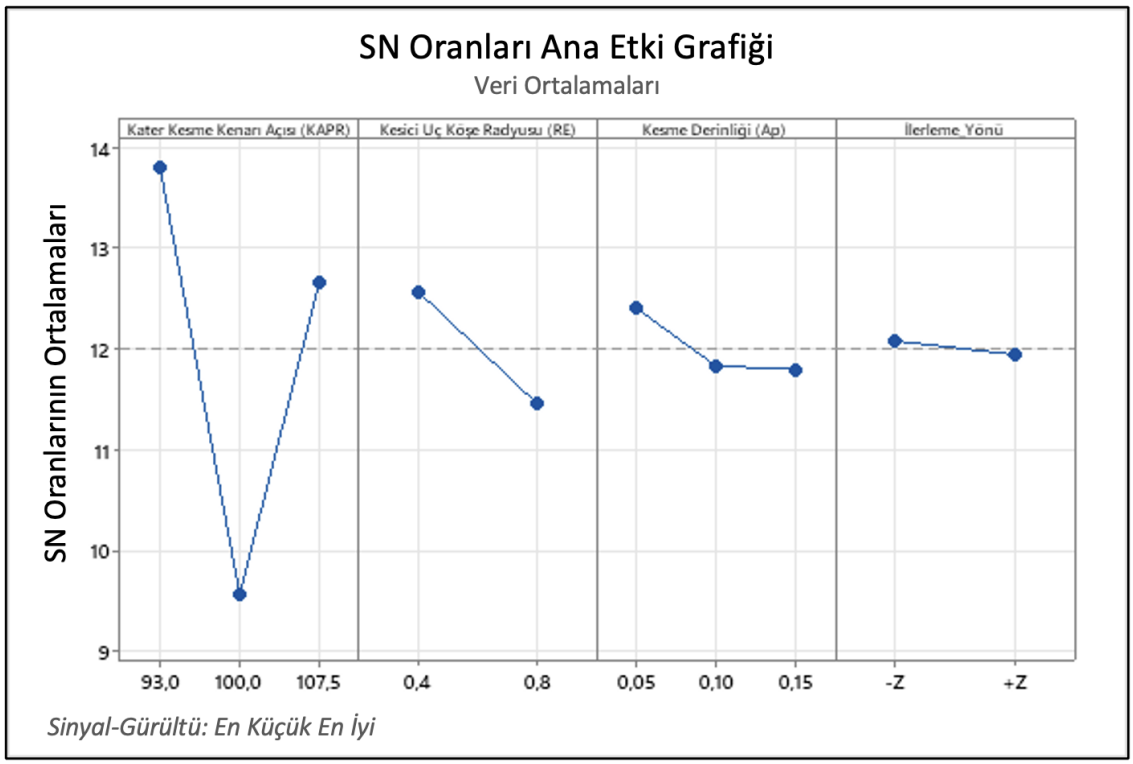
S/N oranları 4 etki parametresinin her seviyesi için analiz edilmiştir. En yüksek S/N oranını veren seviyeler hem düşük ortalama yanıtı hem de düşük değişkenliği gösterir. Bu şu anlama gelir;

Ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri ne kadar düşükse, S/N oranı o kadar yüksektir.

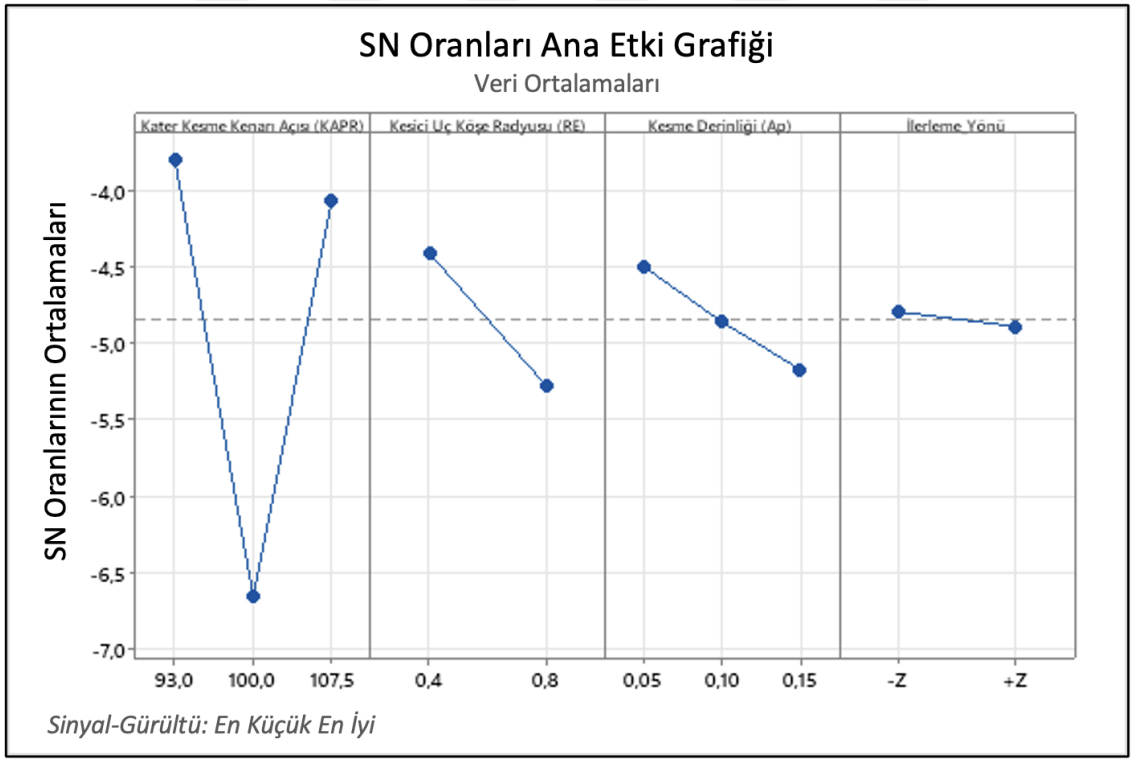
Tekrarlanan deneyler arasındaki yüzey pürüzlülük değişkenliği ne kadar düşükse S/N oranı o kadar yüksektir.

Dolayısıyla yüksek S/N oranı iyidir ve tutarlı şekilde düşük ölçümler yapıldığını gösterir.

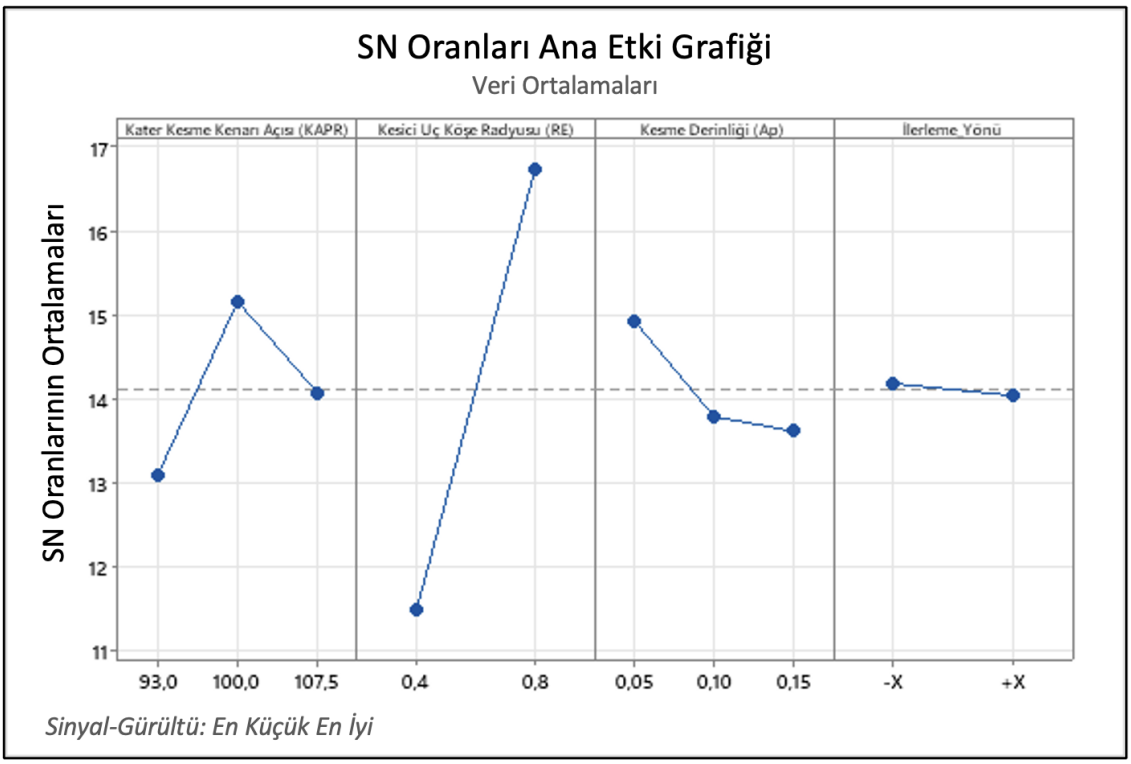
Dış çap tornalama deneylerinin yüzey pürüzlülüğü için S/N oranı grafikleri Şekil 3-3ve Şekil 3-4'te, alın tornalama deneylerinin yüzey pürüzlülüğü için S/N oranı grafikleri ise Şekil 3-5 ve Şekil 3-6'da gösterilmiştir.



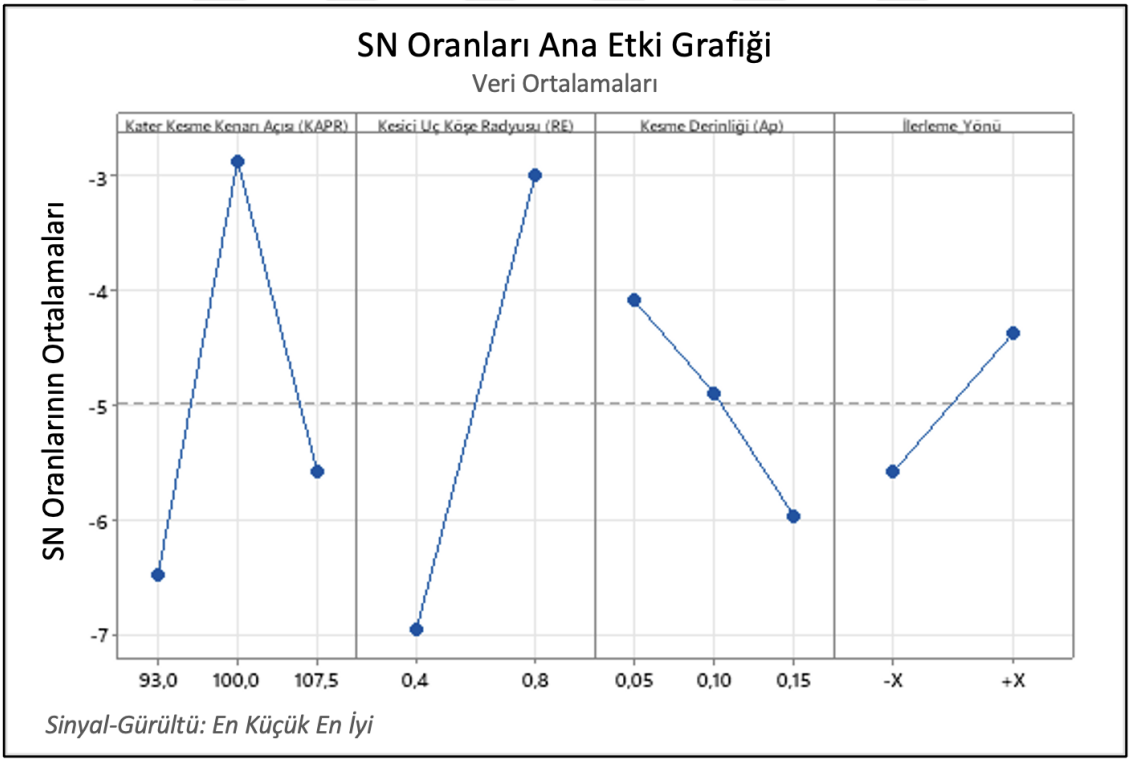
Şekil 3-3 Dış Çap Tornalama Deneyleri Ra Yüzey Pürüzlülüğü SN Oranı



Şekil 3-4 Dış Çap Tornalama Deneyleri Pt Yüzey Pürüzlülüğü SN Oranı



Şekil 3-5 Alın Tornalama Deneyleri Ra Yüzey Pürüzlülüğü SN Oranı



Şekil 3-6 Alın Tornalama Deneyleri Pt Yüzey Pürüzlülüğü SN Oranı

S/N oranı grafikleri incelendiğinde dış çap tornalama işleminde hem Ra hem de Pt cinsinden yüzey pürüzlülüğü için optimum seviyeler aynı olup Tablo 13'te gösterilmiştir. Alın tornalama işleminde ise Ra ve Pt cinsinden yüzey pürüzlülüğü için optimum seviyeler Tablo 14'te gösterilmiştir. Dış çap tornalama işleminde kater kesme kenar açısı (KAPR) için optimum seviye 93° iken alın tornalama işleminde 100°'dir. Dış çap tornalama işleminde kesici uç köşe radyusu (RE) için optimum seviye 0,4 mm iken alın tornalama işleminde 0,8 mm'dir. Her iki tornalama işleminde de kesme derinliği (Ap) için optimum seviye 0,05 mm'dir. Dış çap tornalama işleminde ilerleme yönü için optimum seviye her iki pürüzlülük kriter için de aynı yönlü iken alın tornalamada farklı yönlerde optimum değere ulaşmaktadır.

Tablo 13 Dış Çap Tornalama Optimum Seviyeleri

Faktörler	Ra	Pt
Kater Kesme Kenar Açısı (KAPR)	93°	93°
Kesici Uç Köşe Radyusu (RE)	0,4	0,4
Kesme Derinliği (Ap)	0,05	0,05
İlerleme Yönü	-Z	-Z

Tablo 14 Alın Tornalama Optimum Seviyeleri

Faktörler	Ra	Pt
Kater Kesme Kenar Açısı (KAPR)	100°	100°
Kesici Uç Köşe Radyusu (RE)	0,8	0,8
Kesme Derinliği (Ap)	0,05	0,05
İlerleme Yönü	-X	+X

3.3.2. Varyans Analizi (Analyses of Variance – ANOVA)

Faktörlerin etki seviyelerinin belirlenebilmesi için varyans analizi Minitab 22 istatistik yazılımında gerçekleştirilmiştir[29]. Varyans analizi tablosundaki P değeri 0,05'ten (%95 önem seviyesinden) küçük ise faktörün yanıt üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi var demektir.

Dış çap tornalama işlemi için varyans analizleri Şekil 3-7'de sunulmuştur. Dış çap tornalama işleminde yüksek etkiye sahip faktör kater kesme kenarı açısıdır (P<0,05). Şekilde görüldüğü gibi kater kesme kenar açısı (KAPR), kesici uç köşe radyusu (RE), kesme derinliği (Ap) ve ilerleme yönünün Ra yüzey kalitesine etkileri sırasıyla %45.62, %3.79, %0.34 ve %0.05'tir. Kater kesme kenar açısı (KAPR), kesici uç köşe radyusu (RE), kesme derinliği (Ap) ve ilerleme yönünün Pt yüzey kalitesine etkileri sırasıyla %46.39, %3.17, %0.97 ve %0.04'tür.

Varyans Analizi

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Kater Kesme Kenarı Açısı (KAPR)	2	0,116467	45,62%	0,116467	0,058233	13,18	0,000
Kesici Uç Köşe Radyusu (RE)	1	0,009669	3,79%	0,009669	0,009669	2,19	0,150
Kesme Derinliği (Ap)	2	0,000867	0,34%	0,000867	0,000433	0,10	0,907
İlerleme_Yönü	1	0,000136	0,05%	0,000136	0,000136	0,03	0,862
Hata	29	0,128136	50,20%	0,128136	0,004418		
Toplam	35	0,255275	100,00%				

a)

Varyans Analizi

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Kater Kesme Kenarı Açısı (KAPR)	2	3,03222	46,39%	3,03222	1,51611	13,61	0,000
Kesici Uç Köşe Radyusu (RE)	1	0,20703	3,17%	0,20703	0,20703	1,86	0,183
Kesme Derinliği (Ap)	2	0,06365	0,97%	0,06365	0,03182	0,29	0,754
İlerleme_Yönü	1	0,00234	0,04%	0,00234	0,00234	0,02	0,886
Hata	29	3,23165	49,44%	3,23165	0,11144		
Toplam	35	6,53687	100,00%				

b)

DF: Serbestlik Derecesi, Seq SS: Ardışık Kareler Toplamı, Adj SS: Düzeltilmiş Kareler Toplamı, Adj MS: Düzeltilmiş Ortalama Kareleri, F-Value: İstatistik Değeri, P-Value: Olasılık Değeri.

Şekil 3-7 Dış Çap Tornalama Varyans Analizleri a) Ra Yüzey Pürüzlülüğü b) Pt Yüzey Pürüzlülüğü

Alın tornalama işlemi için varyans analizleri ise Şekil 3-8'de sunulmuştur. Alın tornalama işleminde ise yüksek etkiye sahip faktörler kesici uç köşe radyusu (RE) ve kater kesme kenarı açısı (KAPR) dır. (P<0,05). Şekilde görüldüğü gibi kater kesme kenar açısı (KAPR), kesici uç köşe radyusu (RE), kesme derinliği (Ap) ve ilerleme yönünün Ra yüzey kalitesine etkileri sırasıyla %15.12, %28.09, %0.96 ve %0.13'dür. Kater kesme kenar açısı (KAPR), kesici uç köşe radyusu (RE), kesme derinliği (Ap) ve ilerleme yönünün Pt yüzey kalitesine etkileri sırasıyla %20.99, %24.16, %2.81 ve %1.31'dir.

Varyans Analizi

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Kater Kesme Kenarı Açısı (KAPR)	2	0,095717	15,12%	0,095717	0,047858	3,94	0,031
Kesici Uç Köşe Radyusu (RE)	1	0,177803	28,09%	0,177803	0,177803	14,63	0,001
Kesme Derinliği (Ap)	2	0,006050	0,96%	0,006050	0,003025	0,25	0,781
İlerleme_Yönü	1	0,000803	0,13%	0,000803	0,000803	0,07	0,799
Hata	29	0,352503	55,70%	0,352503	0,012155		
Toplam	35	0,632875	100,00%				

a)

Varyans Analizi

Kaynak	DF	Seq SS	Katkı	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Kater Kesme Kenarı Açısı (KAPR)	2	7,1803	20,99%	7,1803	3,5901	6,00	0,007
Kesici Uç Köşe Radyusu (RE)	1	8,2656	24,16%	8,2656	8,2656	13,81	0,001
Kesme Derinliği (Ap)	2	0,9612	2,81%	0,9612	0,4806	0,80	0,458
İlerleme_Yönü	1	0,4467	1,31%	0,4467	0,4467	0,75	0,395
Hata	29	17,3586	50,74%	17,3586	0,5986		
Toplam	35	34,2124	100,00%				

b)

DF: Serbestlik Derecesi, Seq SS: Ardışık Kareler Toplamı, Adj SS: Düzeltilmiş Kareler Toplamı, Adj MS: Düzeltilmiş Ortalama Kareleri, F-Value: İstatistik Değeri, P-Value: Olasılık Değeri.

Şekil 3-8 Alın Tornalama Varyans Analizleri a) Ra Yüzey Pürüzlülüğü b) Pt Yüzey Pürüzlülüğü

4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında sertleştirilmiş çeliklerin talaşlı imalatında taşlama işlemine bir alternatif olarak sert tornalama işlemi yüzey pürüzlülük kriteri bakımından incelenmiştir. Kater kesme kenarı açısı (KAPR), kesici uç köşe radyusu (RE), kesme derinliği (Ap) ve ilerleme yönü faktörlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Tüm deneysel çalışma ve analiz hem dış çap tornalama hem de alın tornalama işlemi için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlüğü kriteri olarak Ra ve Pt cinsinden yüzey pürüzlülüğü ayrı ayrı incelenerek sert tornalama işlemlerinden elde edilebilecek yüzey kalitesi detaylıca ele alınmıştır.

Dış çap tornalama ve alın tornalama işleminde Pt cinsinden en iyi yüzey kalitesi için optimum koşulların aynı olmadığı ortaya koyulmuştur.

Dış çap tornalama işleminde optimum seviyeler kater kesme kenar açısı (KAPR) için 93°, kesici uç köşe radyusu için 0,4 mm ve kesme derinliği için 0,05 mm ve ilerleme yönü için –Z yönü olarak tespit edilmiştir.

Alın tornalamada işleminde optimum seviyeler kater kesme kenar açısı (KAPR) için 100°, kesici uç köşe radyusu için 0,8 mm ve kesme derinliği için 0,05 mm ve ilerleme yönü için +X yönü olarak tespit edilmiştir.

Dış çap tornalama işleminde Pt yüzey pürüzlülüğüne yüksek etkiye sahip faktör kater kesme kenarı açısı (KAPR)' dır ($P<0,05$). Kater kesme kenarı açısının (KAPR) Pt yüzey pürüzlülüğüne etkisi %46,39'dur.

Alın tornalama işleminde Pt yüzey pürüzlülüğüne yüksek etkiye sahip faktörler kesici uç köşe radyusu (RE) ve kater kesme kenarı açısı (KAPR)' dır. ($P<0,05$) Kesici uç köşe radyusunun (RE) Pt yüzey pürüzlülüğüne etkisi %24,16'dır. Kater kesme kenarı açısının (KAPR) Pt yüzey pürüzlülüğüne etkisi %20,99'dur.

Çalışmanın hedefi olan birincil profil yüksekliği $Pt \leq 2$ µm yüzey kalitesi sert tornalama işlemi ile elde edilmiştir.

Sert tornalama, uygun parametrelerle taşlama işlemine ekonomik bir alternatif olabilir.

KAYNAKLAR

[1] Galoppi, G.D.S., Filho, M.S., Batalha, G.F., (2006) Hard Turning of Tempered DIN 100Cr6 Steel with Coated and No Coated CBN Inserts, Journal of Materials Processing Technology, 179 (1–3), 146–153.

[2] Benga, G.C., Abrao, A.M., (2003) Turning of Hardened 100Cr6 Bearing Steel with Ceramic and PCBN Cutting Tools, Journal of Materials Processing Technology, 143–144 (1), 237–241.

[3] Chou, Y.K., Song, H., (2004) Tool Nose Radius Effects on Finish Hard Turning, Journal of Materials Processing Technology, 148 (2), 259–268.

[4] Samardžiová, M., Neslušan, M., (2013) Development of Surface Roughness in Hard Turning of 100Cr6 Using Mixed Ceramic Cutting Tool with Wiper Geometry and Conventional Geometry, Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology, 21 193–198.

[5] Boy, M., Günay, M., Demir, H., Çiftçi, İ., (2014) Effects of the Approach Angle on Cutting Force and Surface Roughness in Hard Turning of AISI 52100, Proceedings of 19th International Conference Mechanika.

[6] Chinchanikar, S., Salve, A.V., Netake, P., More, A., Kendre, S., Kumar, R., (2014) Comparative Evaluations of Surface Roughness During Hard Turning under Dry and with Water-based and Vegetable Oil-based Cutting Fluids, Procedia Materials Science, 5 1966–1975.

[7] Aydinoğlu, M.M.B., (2002) Az Alaşımlı Krom-Molibden Çeliklerinin Yapı Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2002.

[8] Singh, R., (2020) Applied Welding Engineering (Third Edition).

[9] Eker, A.A., (2008) Demir Esaslı Malzemeler Sunumu.

[10] Davim, J.P., (2011) Machining of Hard Materials, Springer, London.

[11] Ajaja, J., (2019) Influence of Hard Turning on the Surface Characteristics and Fatigue Life of 300M Ultra- High Strength Steel, Doktora Tezi, Polytechnique Montréal, 2019.

[12] Patel G. C., M., Chate, G.R., Parappagoudar, M.B., Gupta, K., (2020) Machining of Hard Materials: A Comprehensive Approach to Experimentation, Modeling and Optimization, Springer International Publishing, Cham.

[13] Mohanty, S., (2014) Modelling of Hard Turning Process, Yüksek Lisans Tezi, National Institute of Technology Rourkela, 2014.

[14] Mukhopadhyay, A., (2015) Experimental Investigations and Optimization of the Machinability Aspects of AISI 4340 Alloy Steel Using Uncoated Carbide and Coated Cermet Inserts in Dry Hard Turning, Yüksek Lisans Tezi, National Institute of Technology Rourkela, 2015.

[15] Broitman, E., (2017) Indentation Hardness Measurements at Macro-, Micro-, and Nanoscale: A Critical Overview, Tribology Letters, 65 (1), 23.

[16] ASTM E10-23, (2023) Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.

[17] ISO6508-1, (2016) Metallic Materials - Rockwell Hardness Test.

[18] ASTM-E18-22, (2022) Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials.

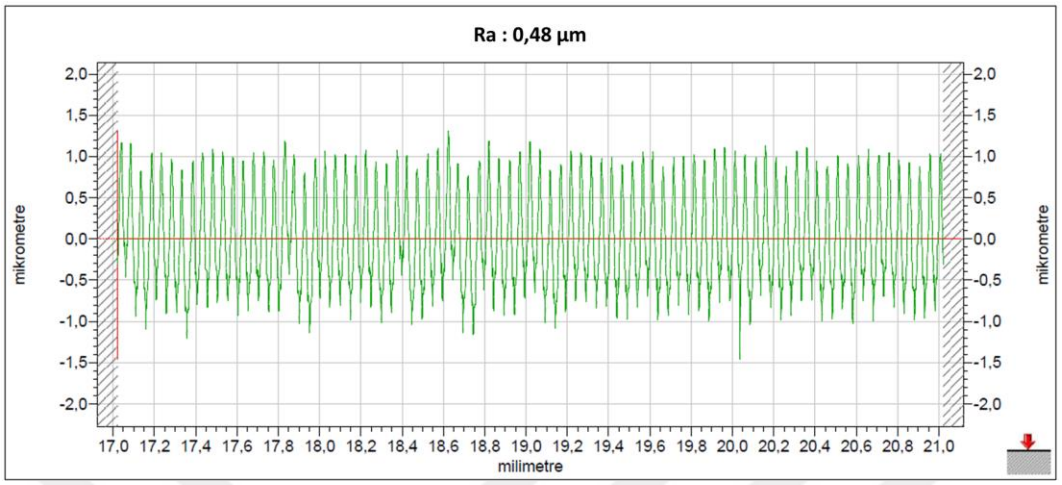
[19] Knüfermann, M.M.W., (2003) Machining Surface of Optical Quality by Hard Turning, Doktora Tezi, Cranfield University School of Industrial and Manufacturing Science, 2003.

[20] Raja, J., Muralikrishnan, B., Fu, S., (2002) Recent Advances in Separation of Roughness, Waviness and Form, Precision Engineering, 26 (2), 222–235.

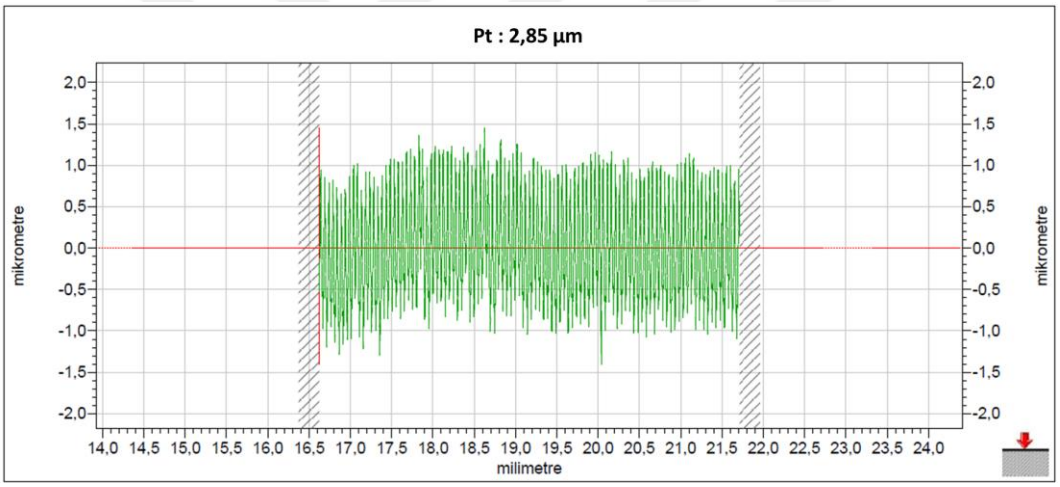
[21] Sahay, C., Ghosh, S., (2018) Understanding Surface Quality: Beyond Average Roughness (Ra). in: 2018 ASEE Annual Conference & Exposition Proceedings, ASEE Conferences, Salt Lake City, Utahp. 31176.
[22] Aksulu, M., Ganioğlu, O., Yandayan, T., (2001) Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri ve Yüzey Pürüzlülüğü Parametreleri, Eskişehir-Türkiye.
[23] Mitutoyo, (2016) Quick Guide to Surface Roughness Measurement.
[24] Keyence, (2024) Surface Roughness Parameters, https://www.keyence.eu/ss/products/microscope/roughness/line/parameters.jsp.
[25] Olympus, (2024) Surface Roughness Measurement - Parameters, https://www.olympus-ims.com/en/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters/.
[26] Taylor Hobson, (2024) Surface Finish Hybrid Parameters, https://www.taylor-hobson.com/resource-center/blog/2022/july/what-are-surface-finish-hybrid-parameters.
[27] ISO683-17, (1999) Heat-Treated Steels, Alloy Steels and Free-Cutting Steels.
[28] Kumsal, K.H., (1994) Taguchi Metodu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.
[29] Aydın, E., (2023) Taguchi Optimizasyon Metodunun İmalat Mühendisliği Alaninda Kullanimi: Minitab Örneği, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 28 (3).

EKLER

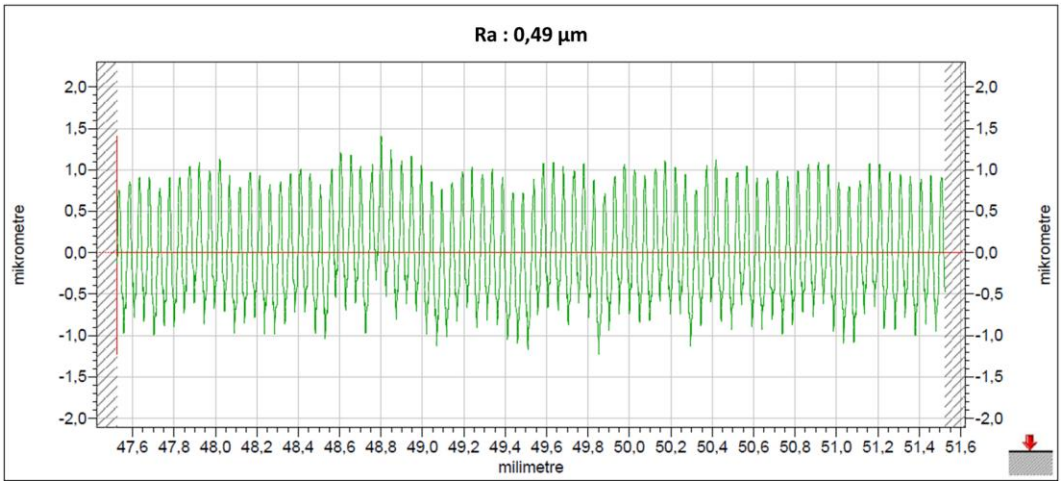
EK A ALINTORNALAMA DENEYLERİ Ra VE Pt YÜZEY GRAFİKLERİ



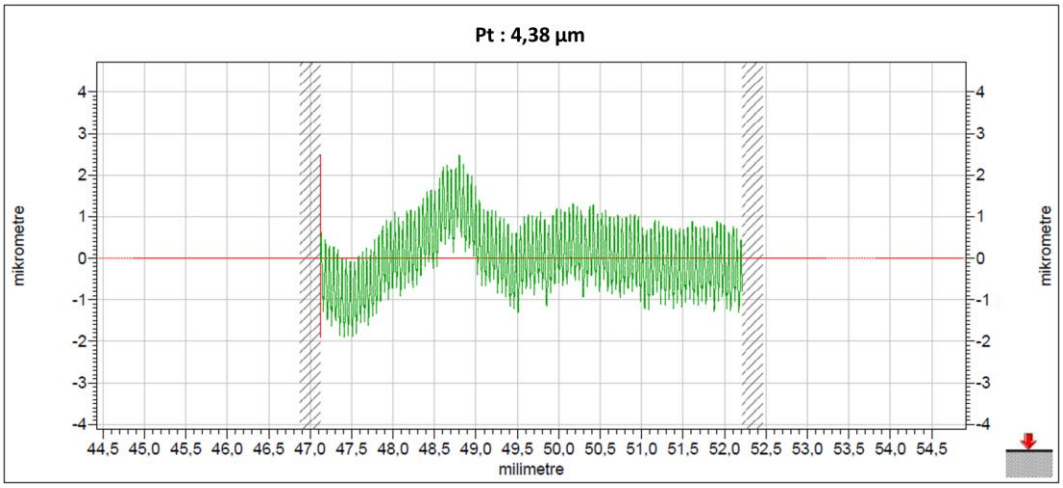
Şekil A-1 Alın Tornalama Deney 1 - Ra



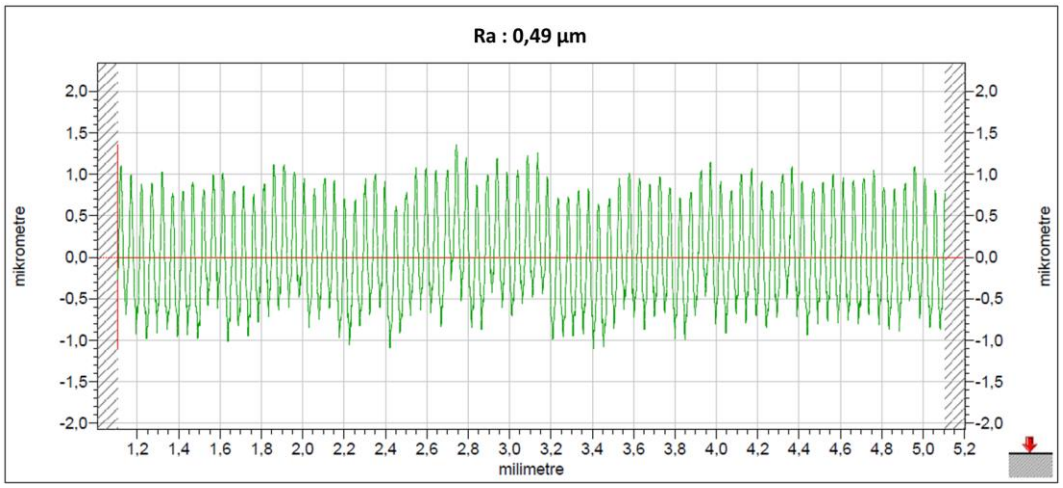
Şekil A-2 Alın Tornalama Deney 1 - Pt



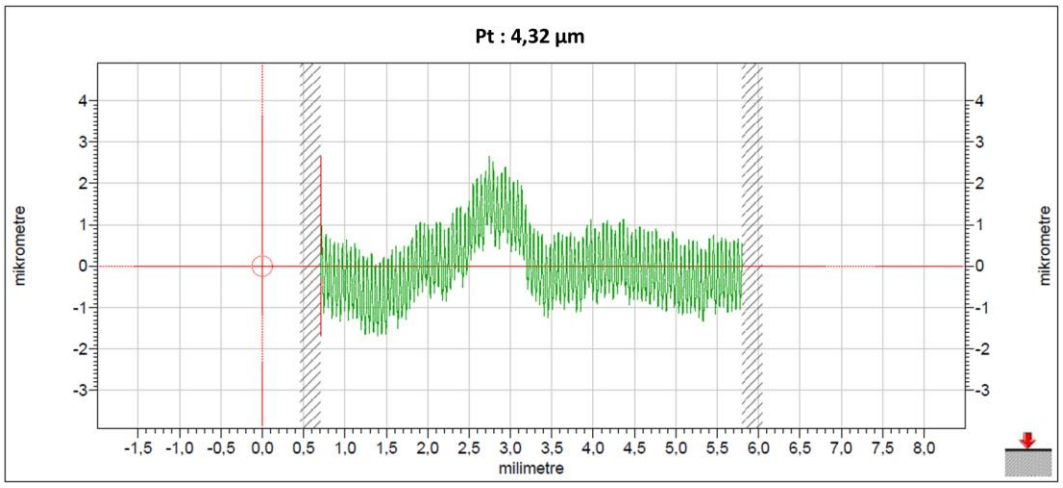
Şekil A-3 Alın Tornalama Deney 2 - Ra



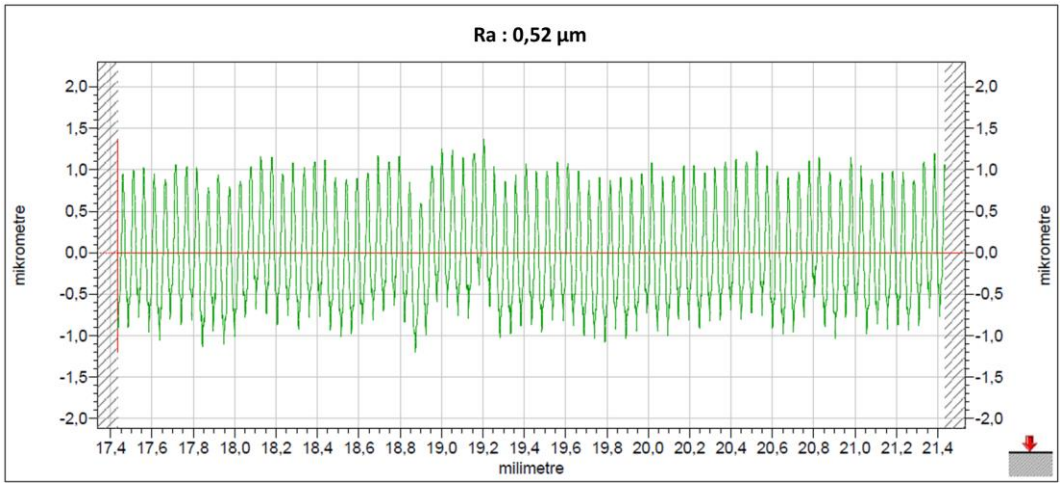
Şekil A-4 Alın Tornalama Deney 2 - Pt



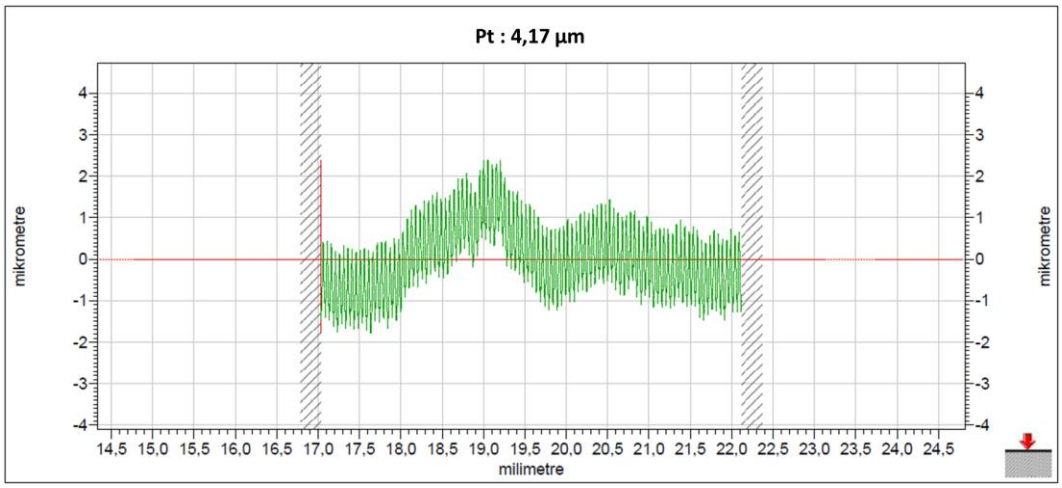
Şekil A-5 Alın Tornalama Deney 3 - Ra



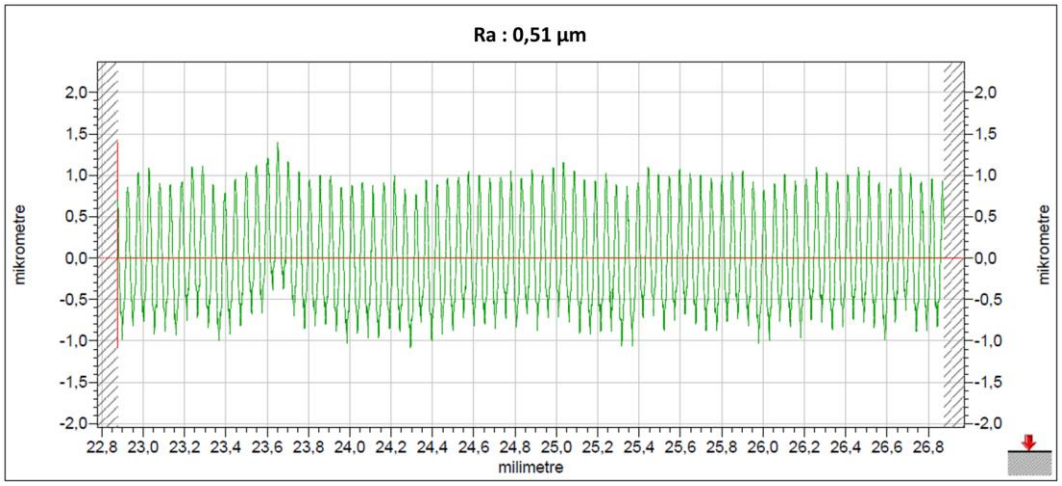
Şekil A-6 Alın Tornalama Deney 3 - Pt



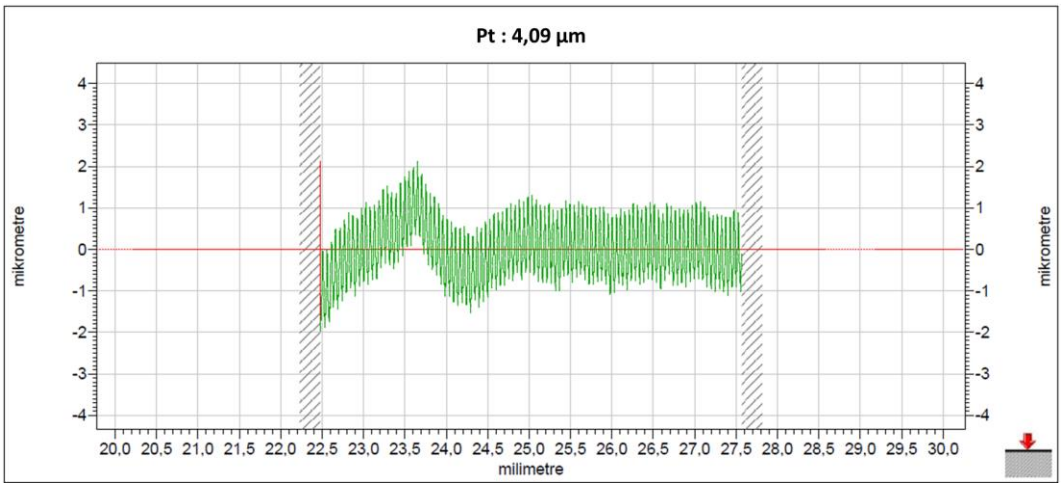
Şekil A-7 Alın Tornalama Deney 4 - Ra



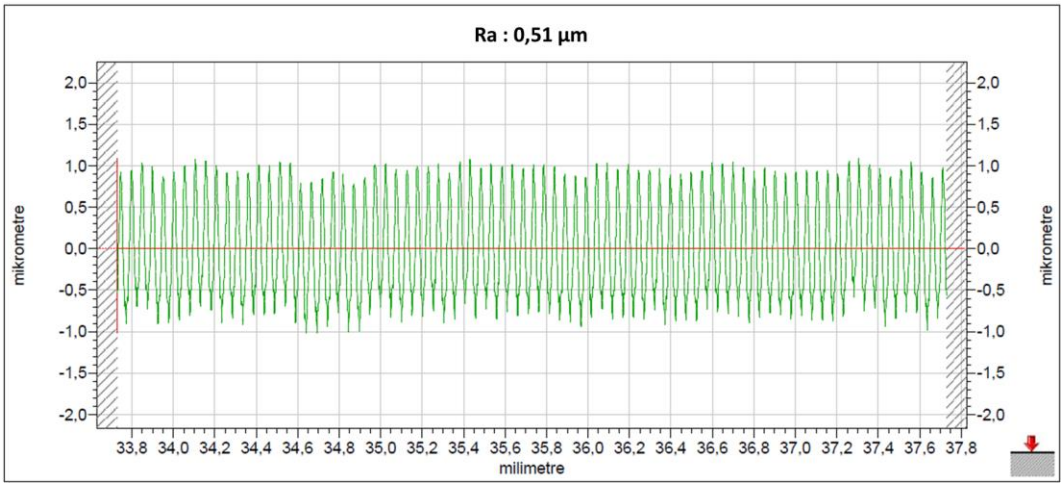
Şekil A-8 Alın Tornalama Deney 4 - Pt



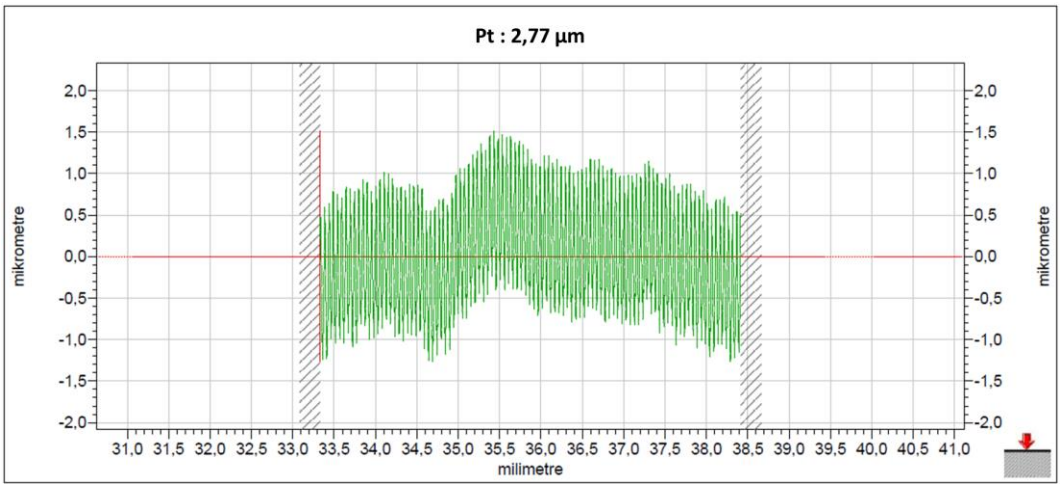
Şekil A-9 Alın Tornalama Deney 5 - Ra



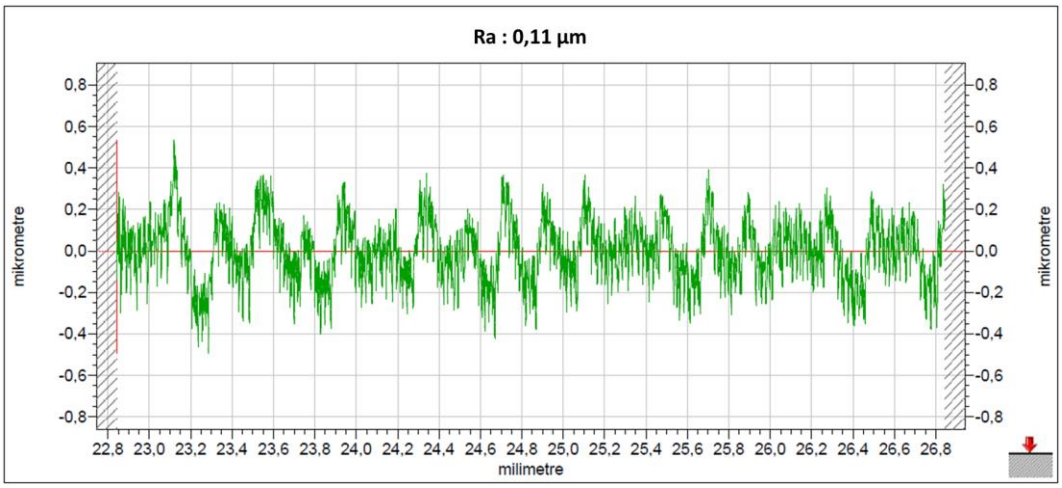
Şekil A-10 Alın Tornalama Deney 5 - Pt



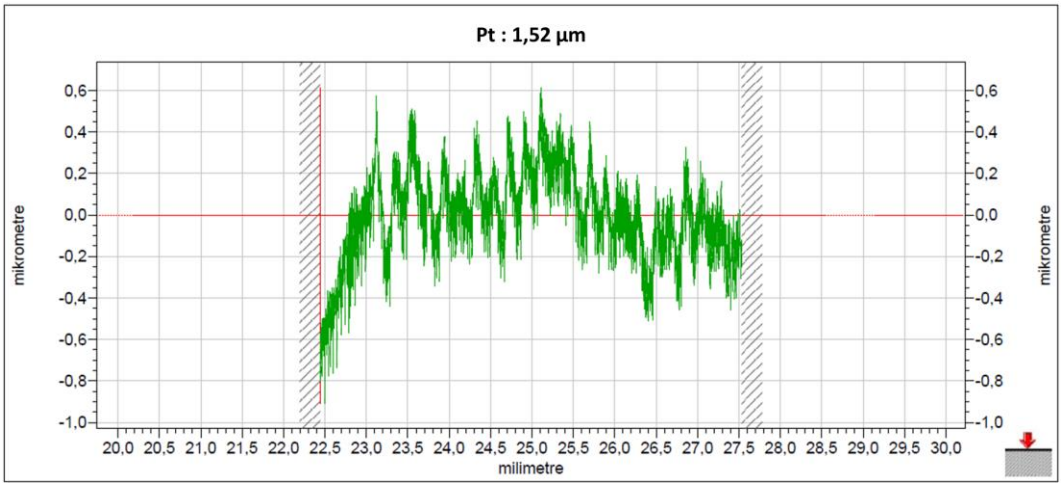
Şekil A-11 Alın Tornalama Deney 6 - Ra



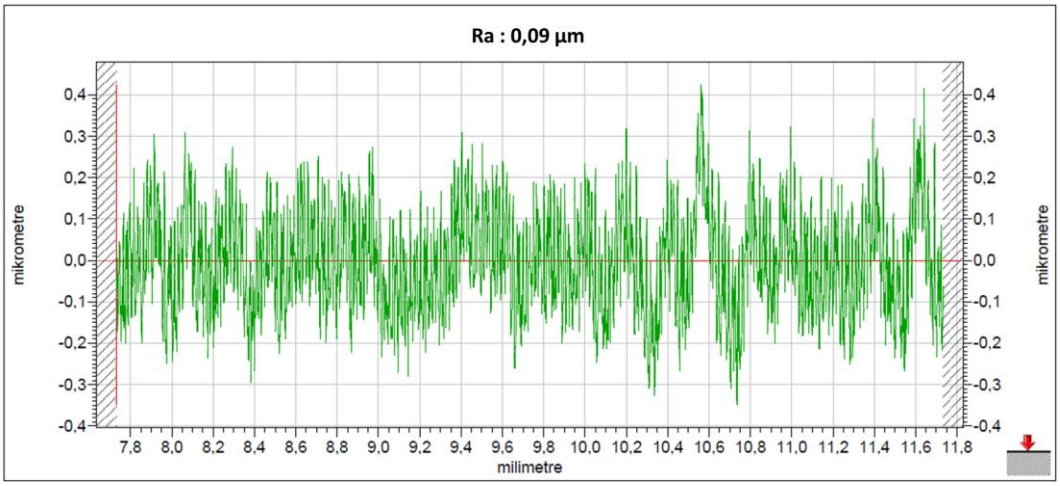
Şekil A-12 Alın Tornalama Deney 6 - Pt



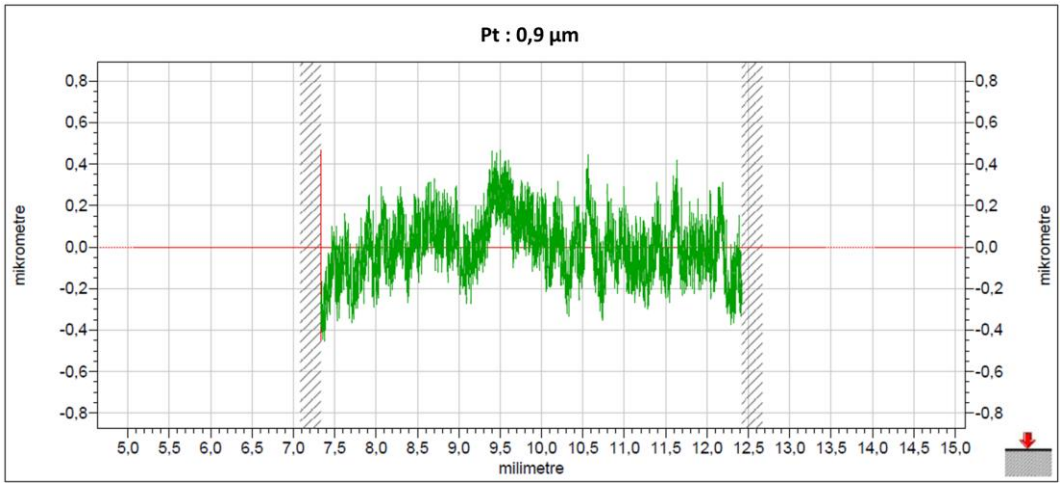
Şekil A-13 Alın Tornalama Deney 7 - Ra



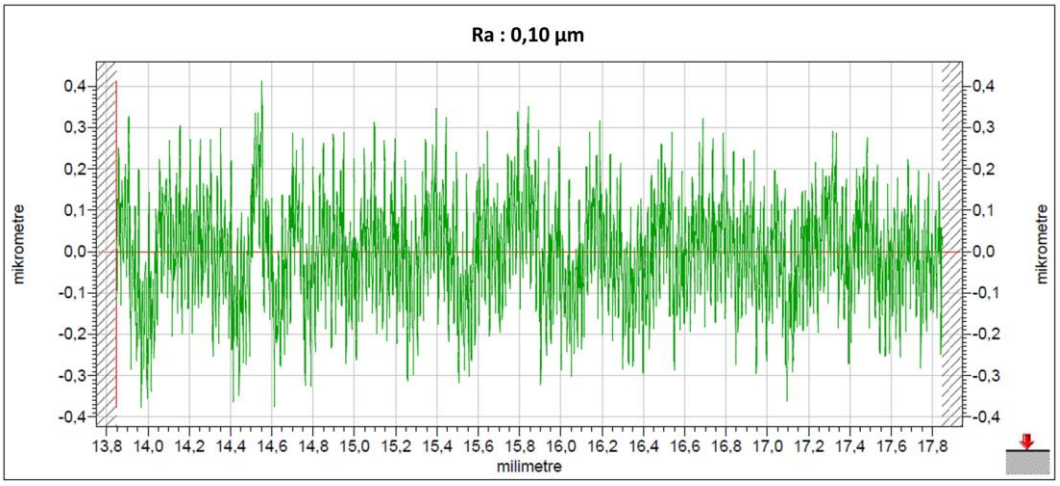
Şekil A-14 Alın Tornalama Deney 7 - Pt



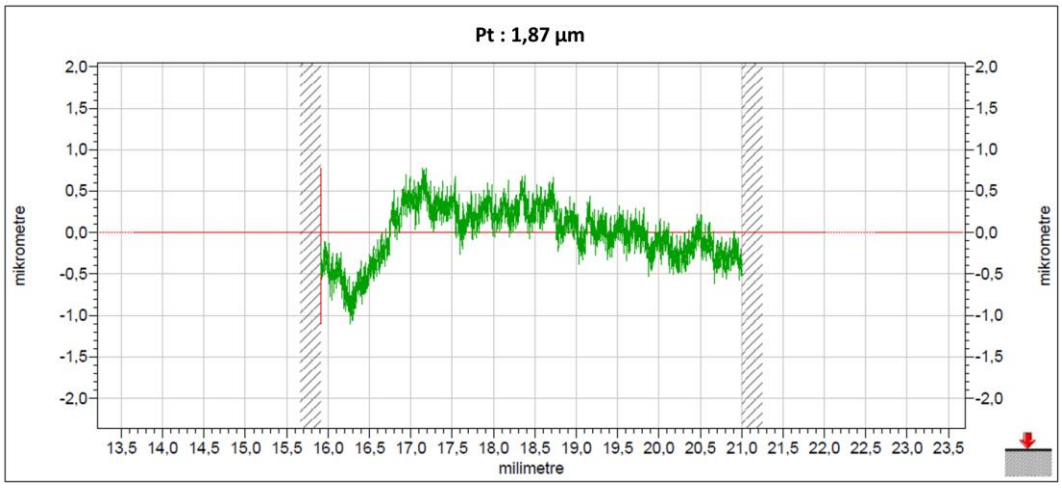
Şekil A-15 Alın Tornalama Deney 8 - Ra



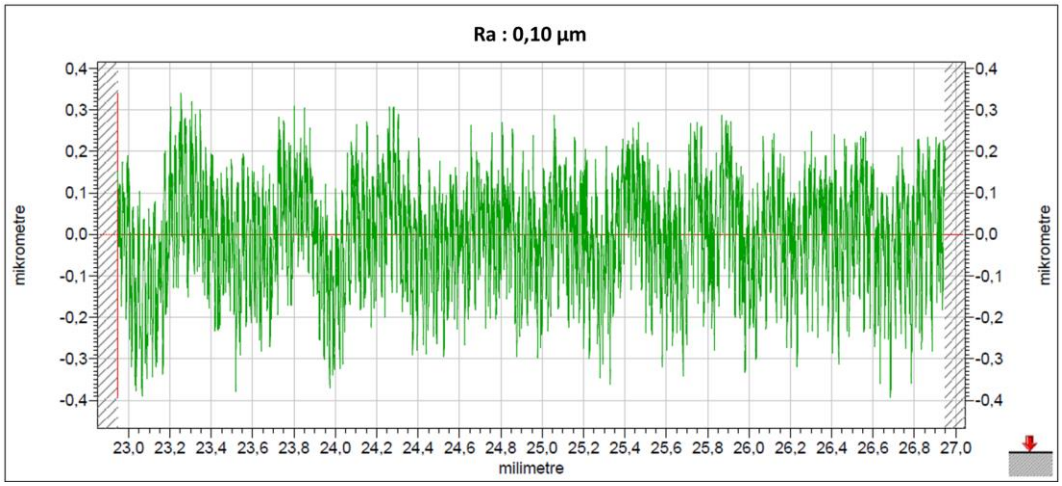
Şekil A-16 Alın Tornalama Deney 8 - Pt



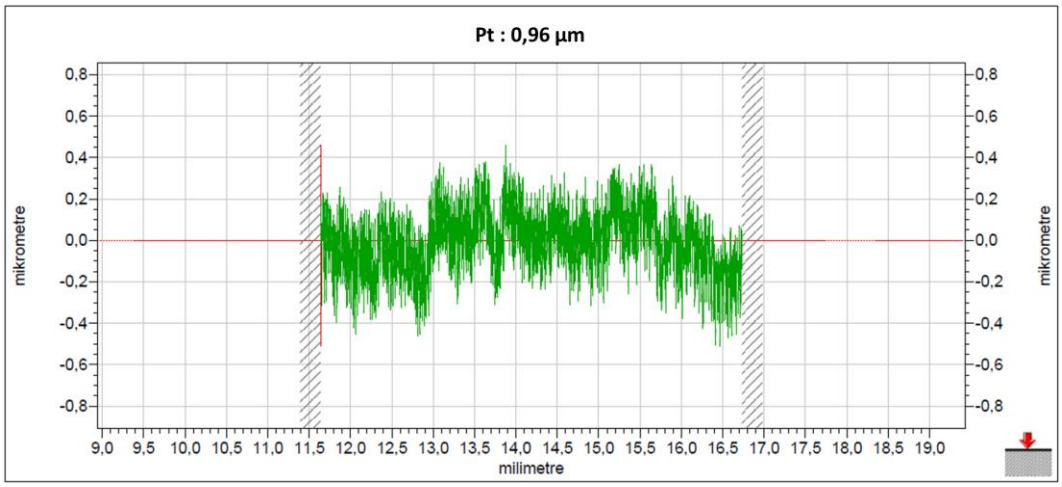
Şekil A-17 Alın Tornalama Deney 9 - Ra



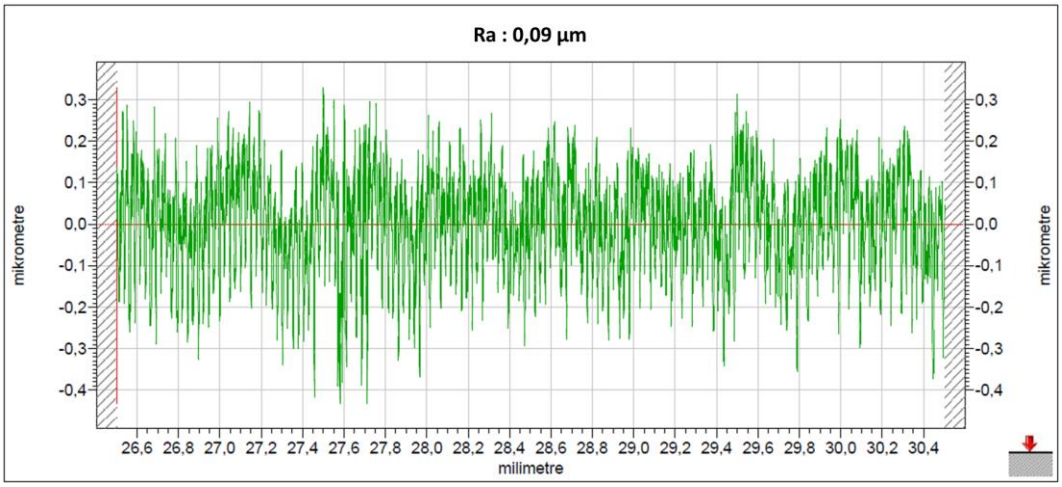
Şekil A-18 Alın Tornalama Deney 9 - Pt



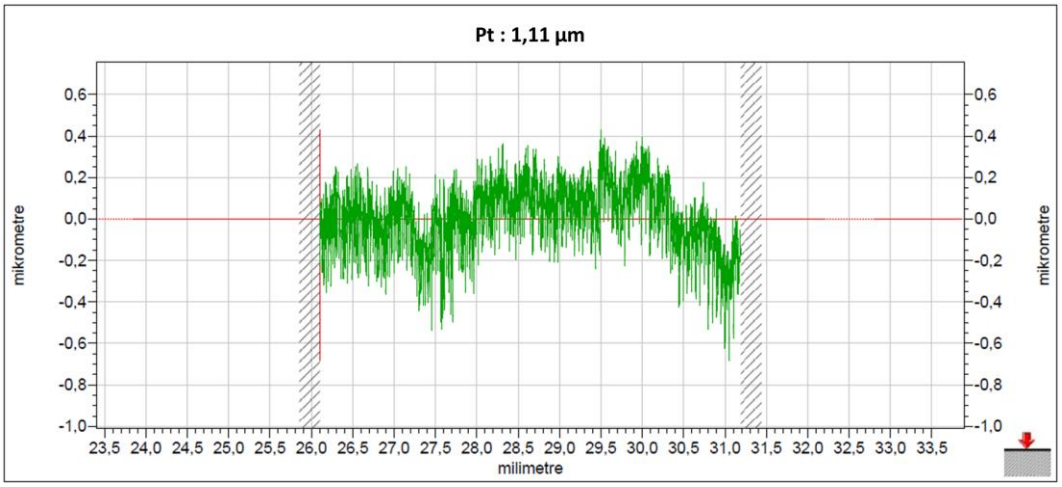
Şekil A-19 Alın Tornalama Deney 10 - Ra



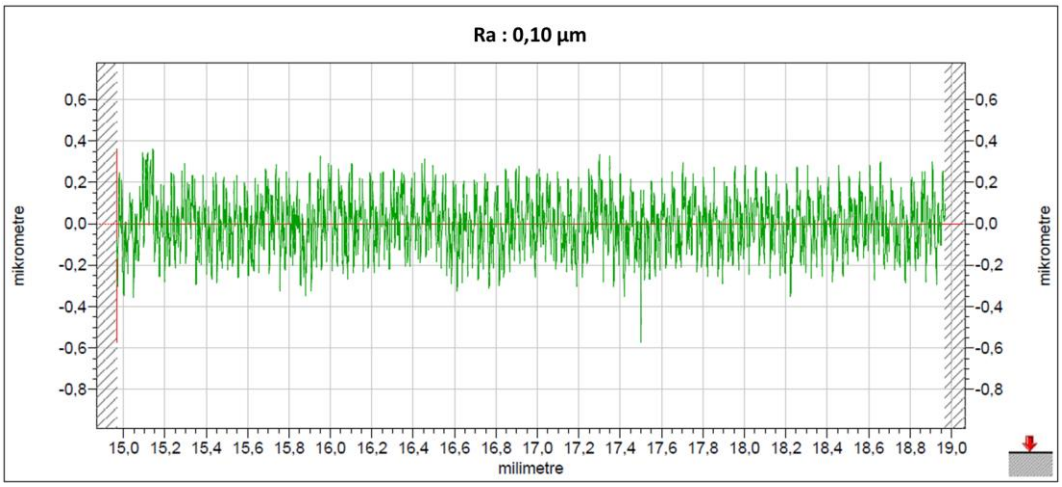
Şekil A-20 Alın Tornalama Deney 10 - Pt



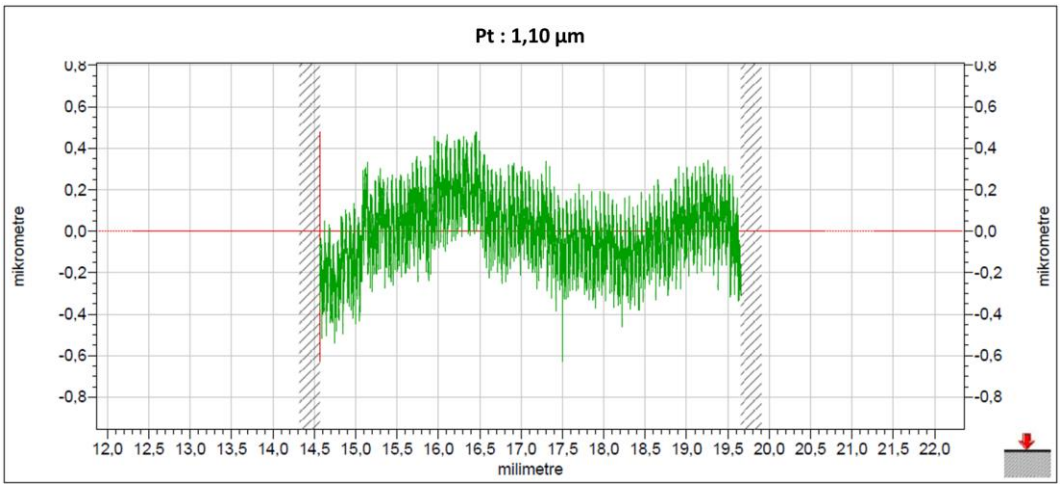
Şekil A-21 Alın Tornalama Deney 11 - Ra



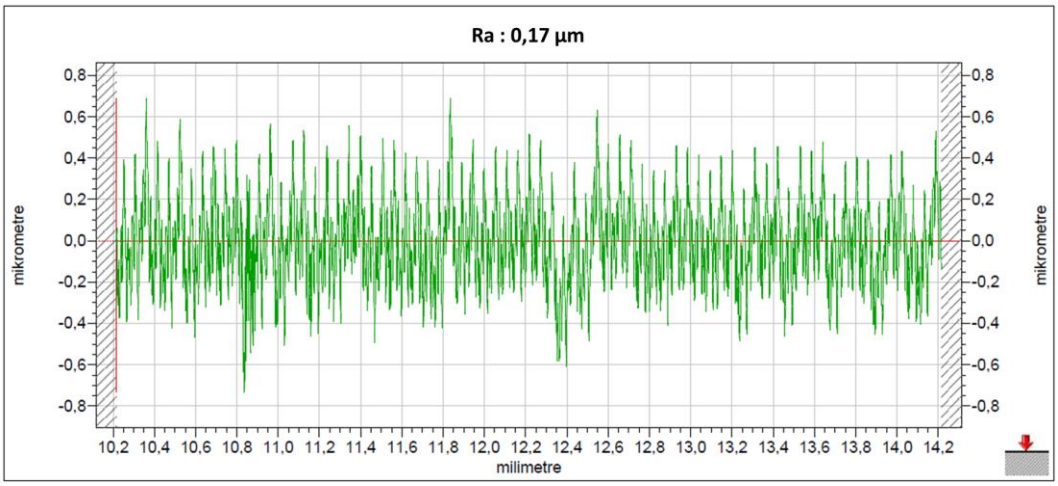
Şekil A-22 Alın Tornalama Deney 11 - Pt



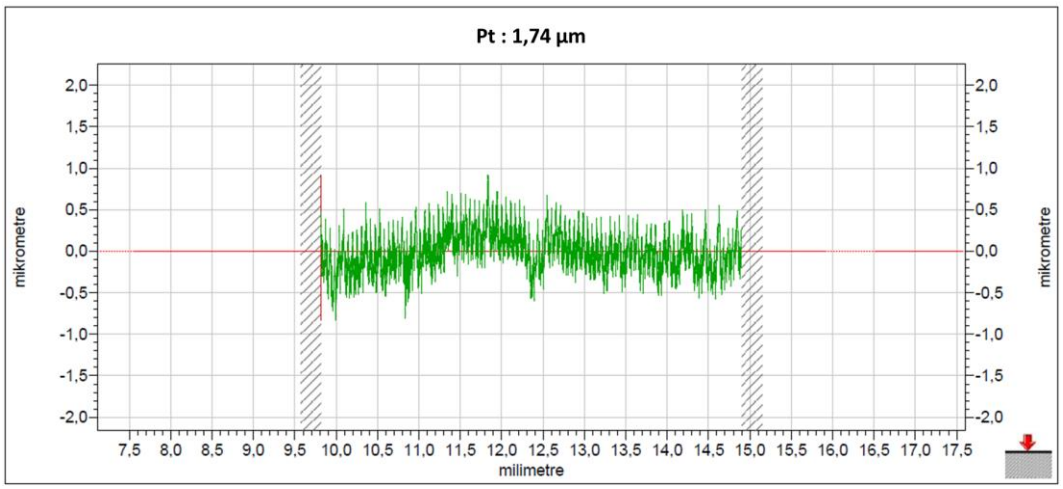
Şekil A-23 Alın Tornalama Deney 12 - Ra



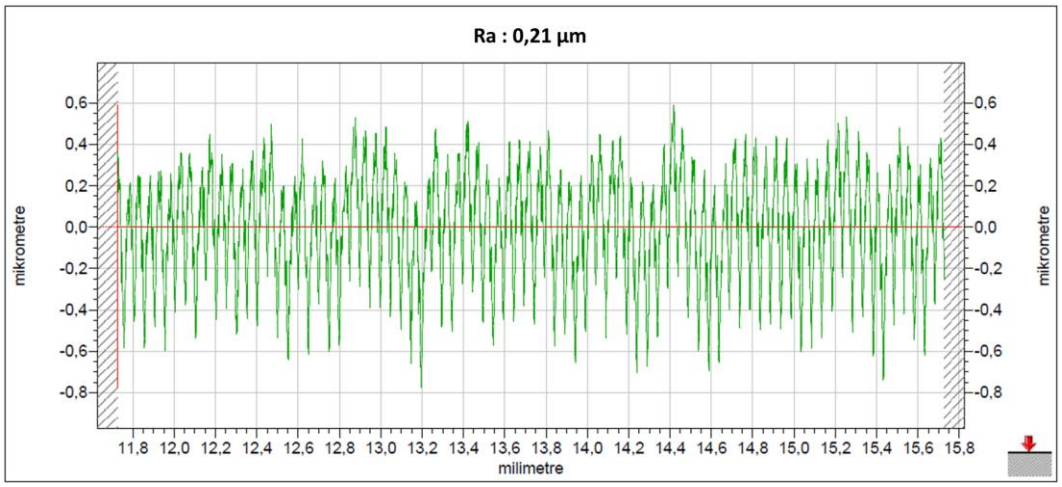
Şekil A-24 Alın Tornalama Deney 12 - Pt



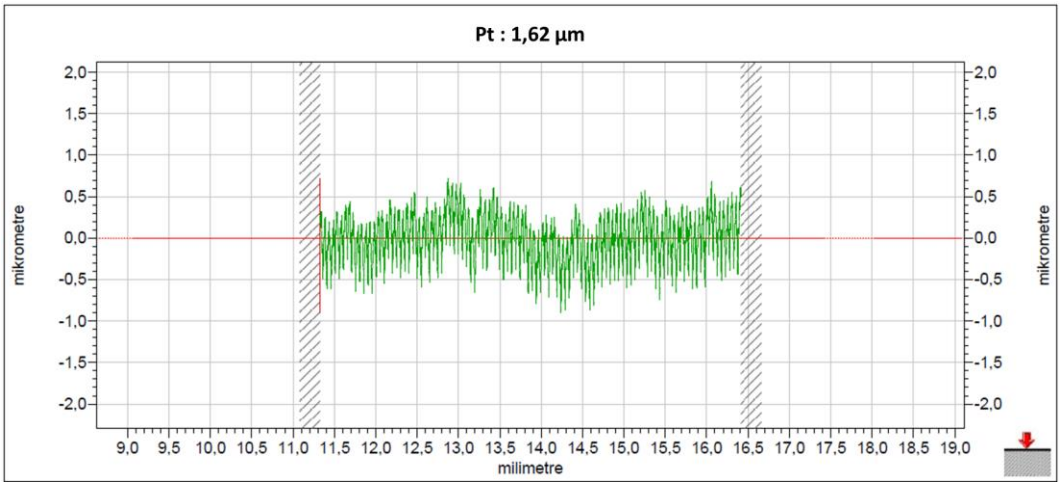
Şekil A-25 Alın Tornalama Deney 13 – Ra



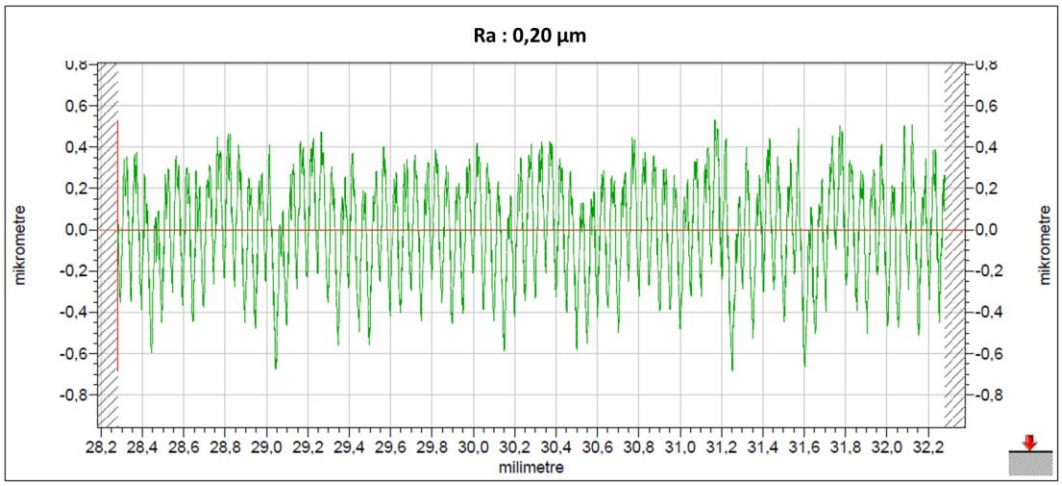
Şekil A-26 Alın Tornalama Deney 13 - Pt



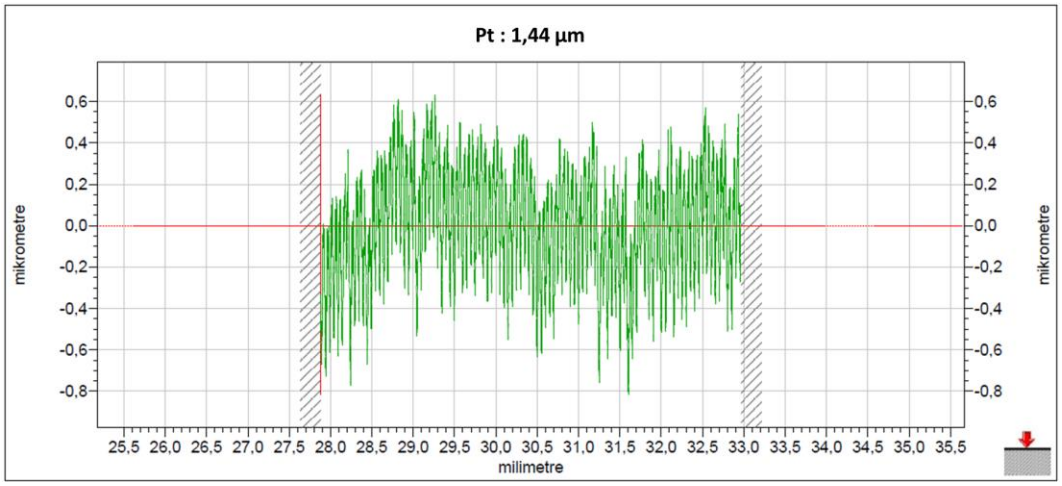
Şekil A-27 Alın Tornalama Deney 14 - Ra



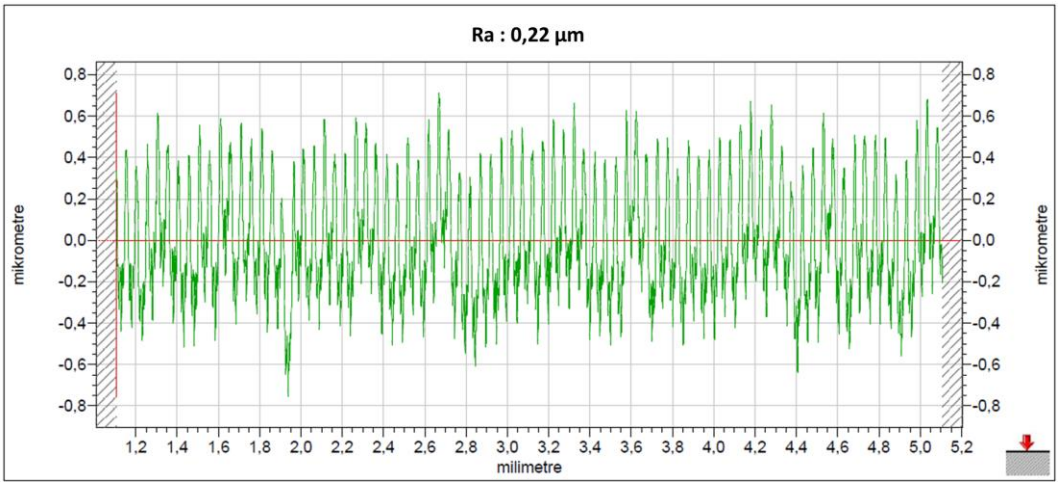
Şekil A-28 Alın Tornalama Deney 14 - Pt



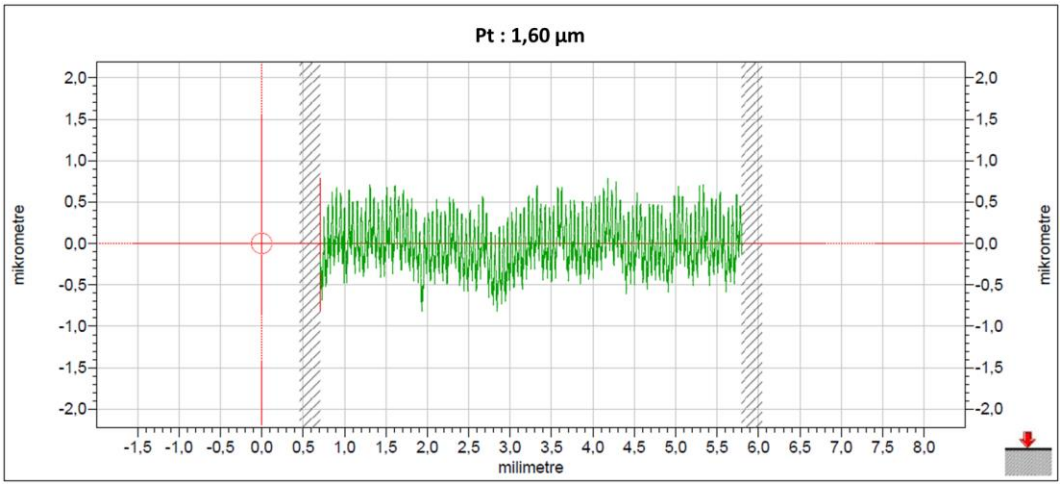
Şekil A-29 Alın Tornalama Deney 15 - Ra



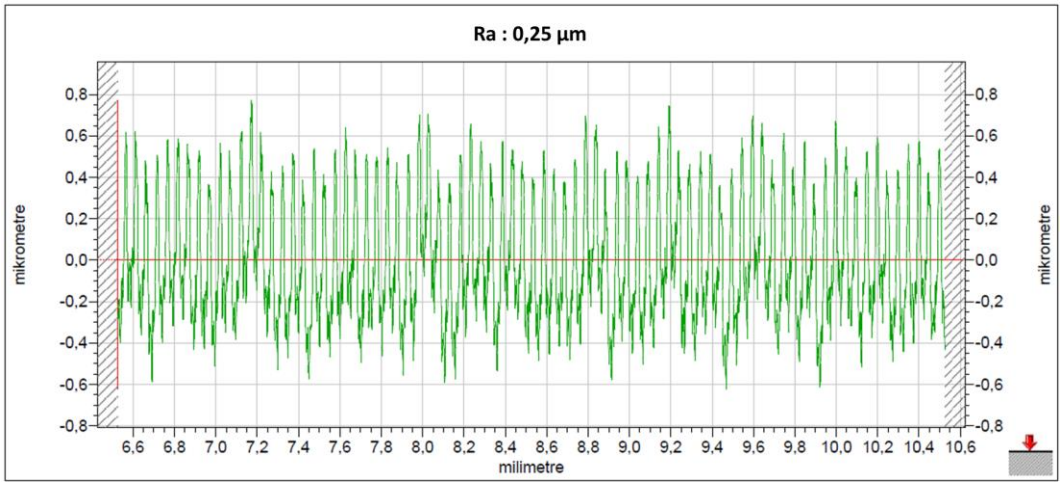
Şekil A-30 Alın Tornalama Deney 15 - Pt



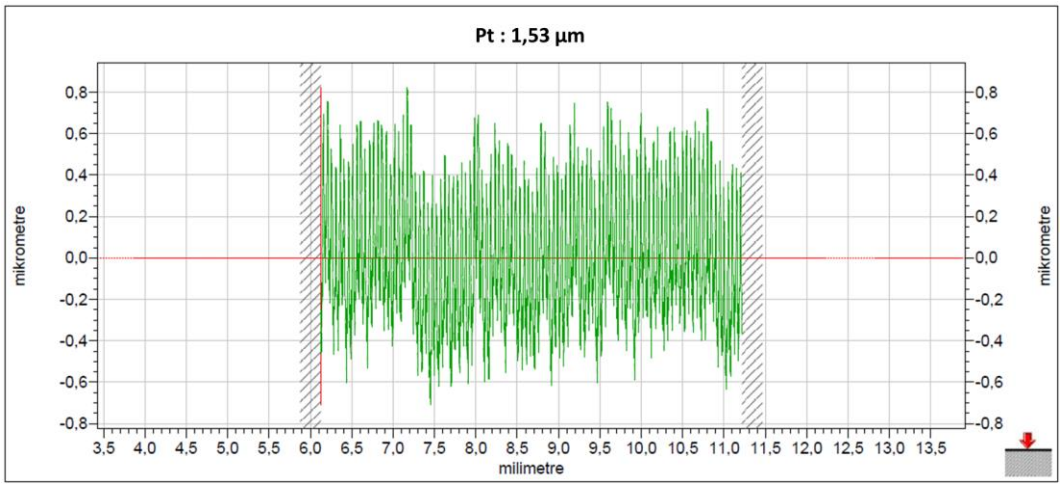
Şekil A-31 Alın Tornalama Deney 16 - Ra



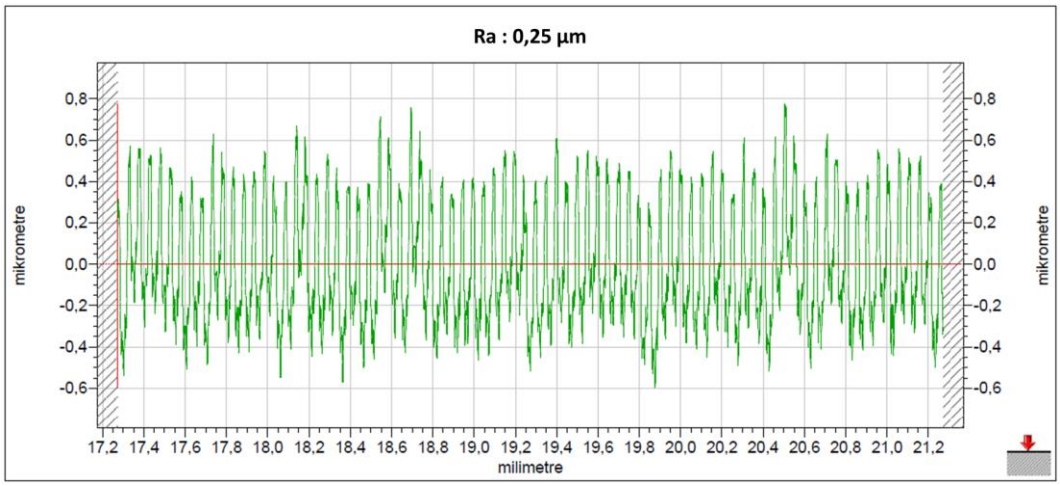
Şekil A-32 Alın Tornalama Deney 16 - Pt



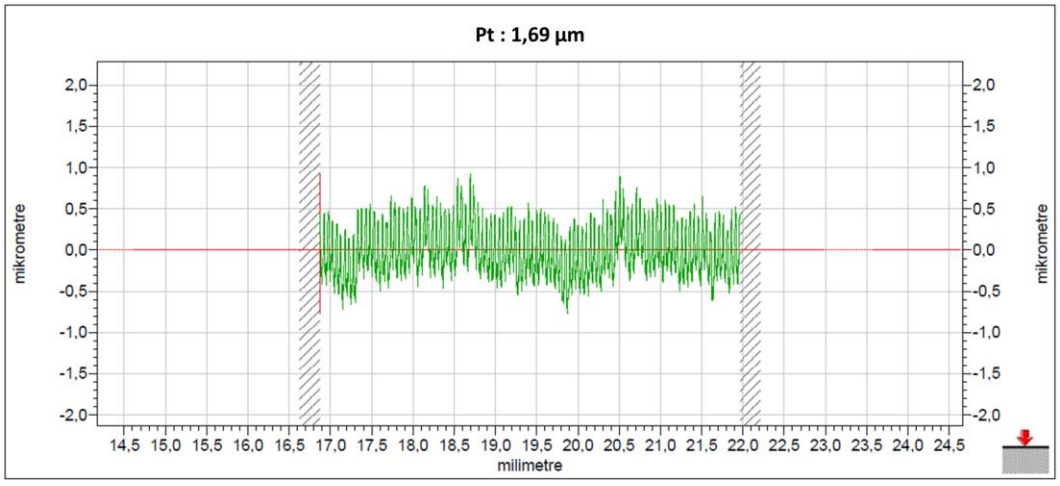
Şekil A-33 Alın Tornalama Deney 17 - Ra



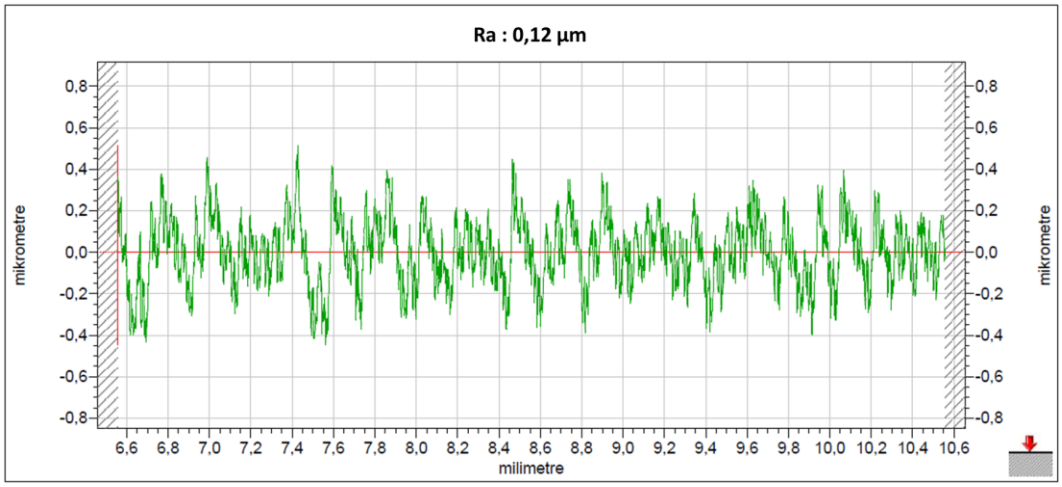
Şekil A-34 Alın Tornalama Deney 17 - Pt



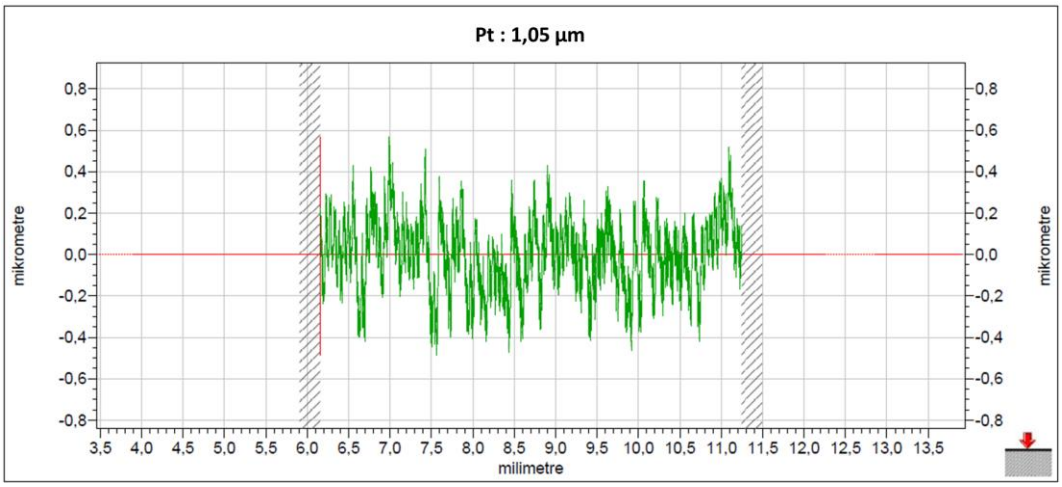
Şekil A-35 Alın Tornalama Deney 18 - Ra



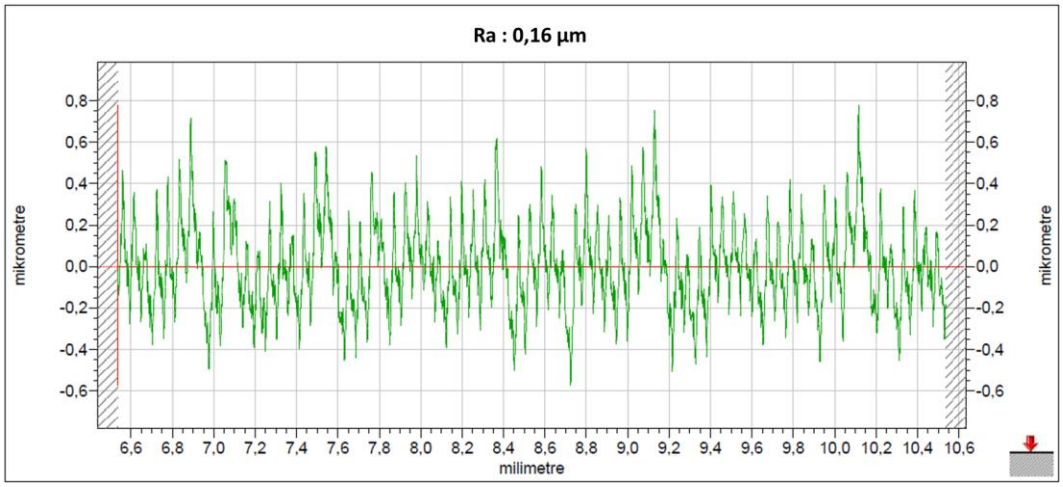
Şekil A-36 Alın Tornalama Deney 18 - Pt



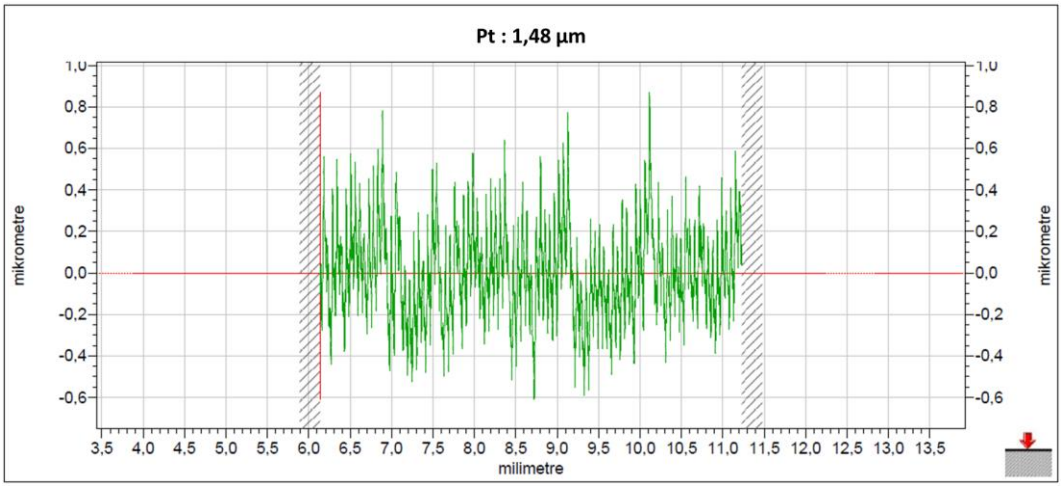
Şekil A-37 Alın Tornalama Deney 19 - Ra



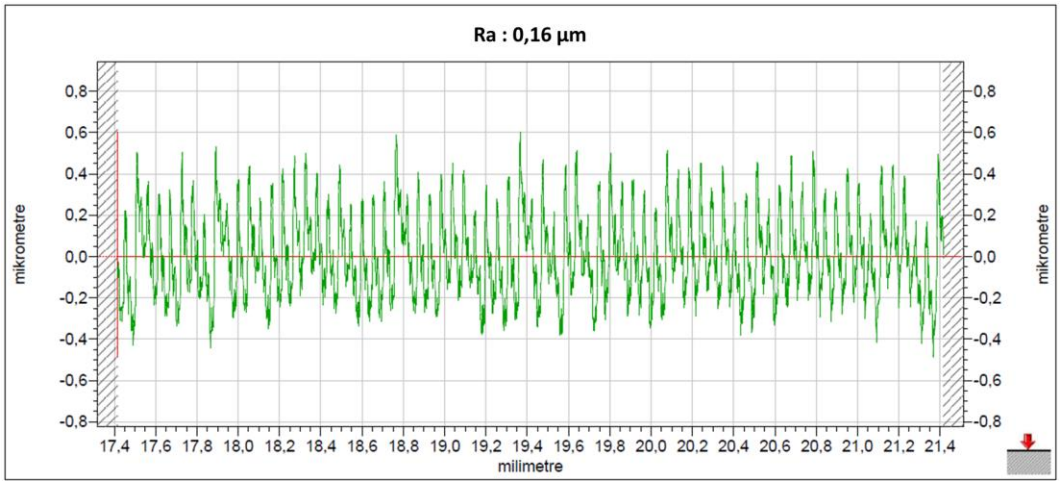
Şekil A-38 Alın Tornalama Deney 19 - Pt



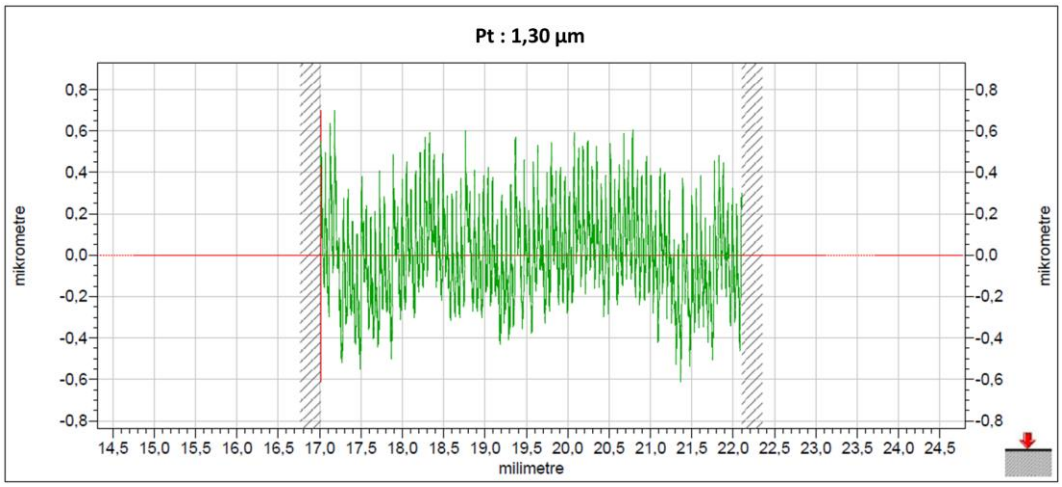
Şekil A-39 Alın Tornalama Deney 20 - Ra



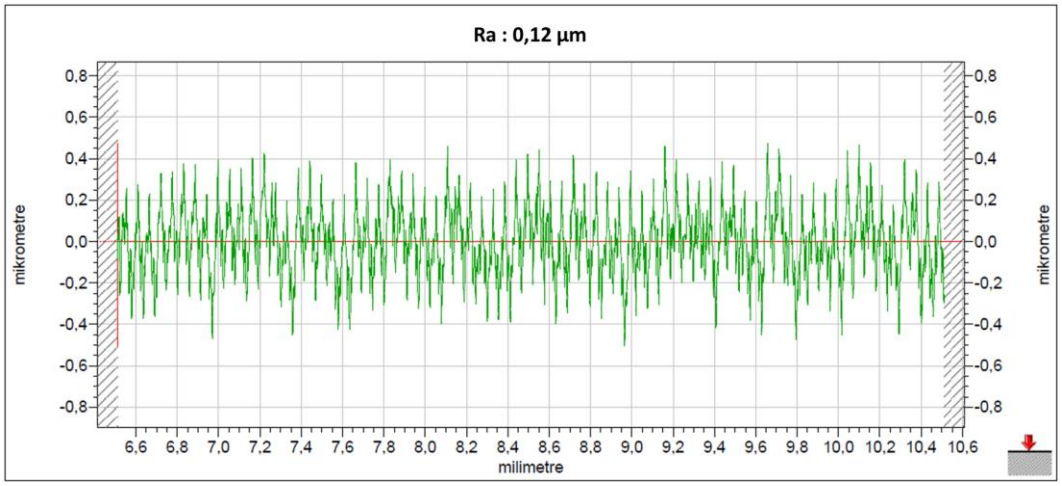
Şekil A-40 Alın Tornalama Deney 20 - Pt



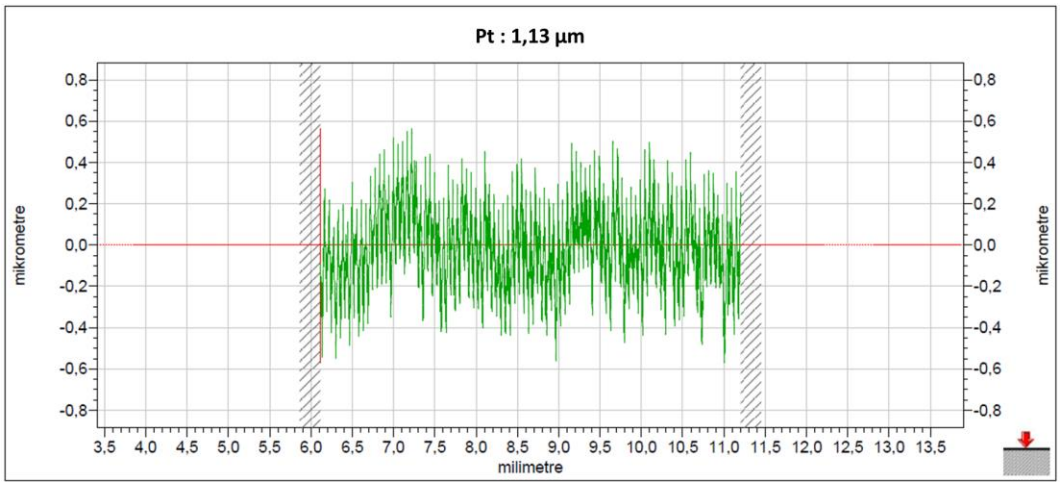
Şekil A-41 Alın Tornalama Deney 21 - Ra



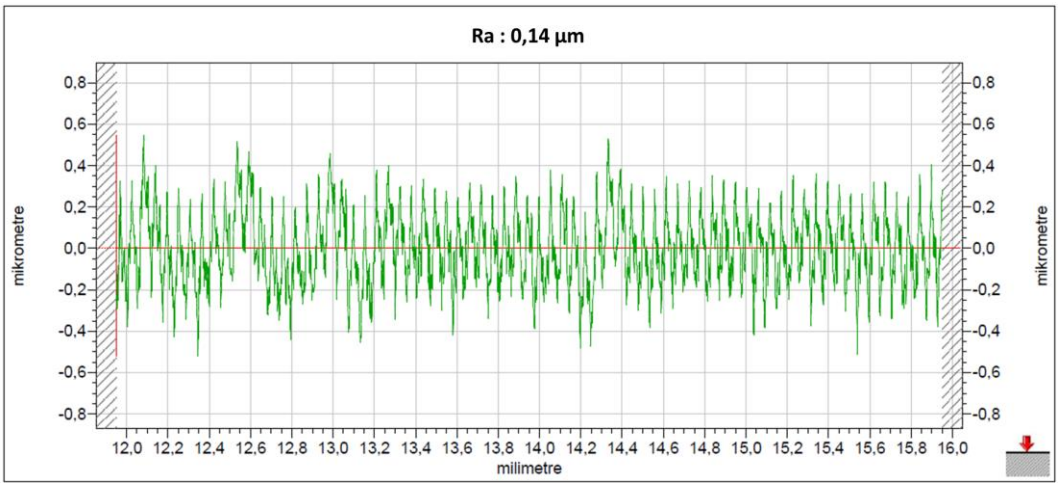
Şekil A-42 Alın Tornalama Deney 21 - Pt



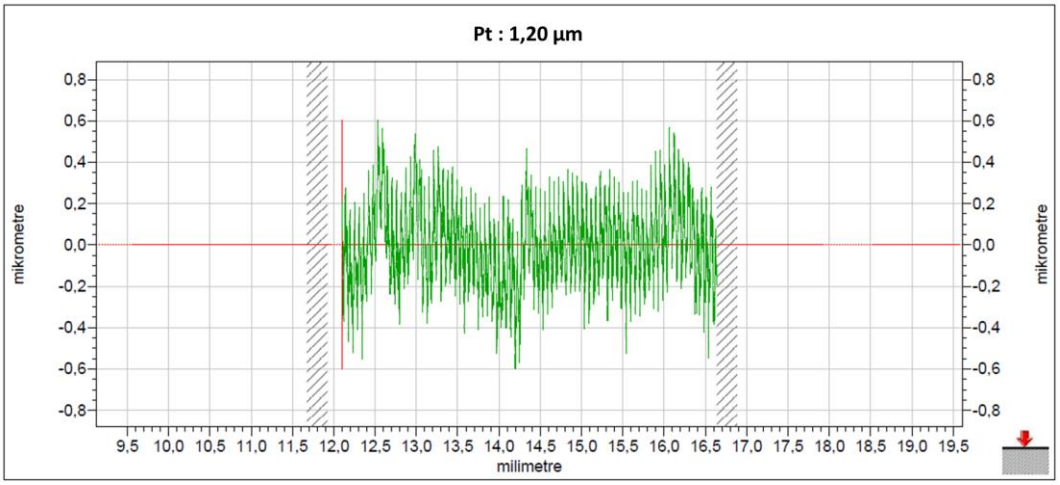
Şekil A-43 Alın Tornalama Deney 22 - Ra



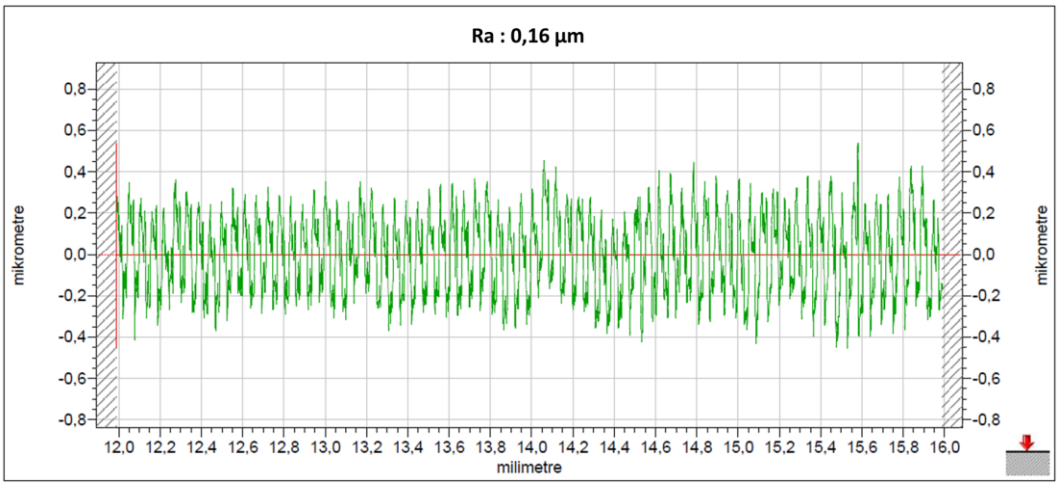
Şekil A-44 Alın Tornalama Deney 22 - Pt



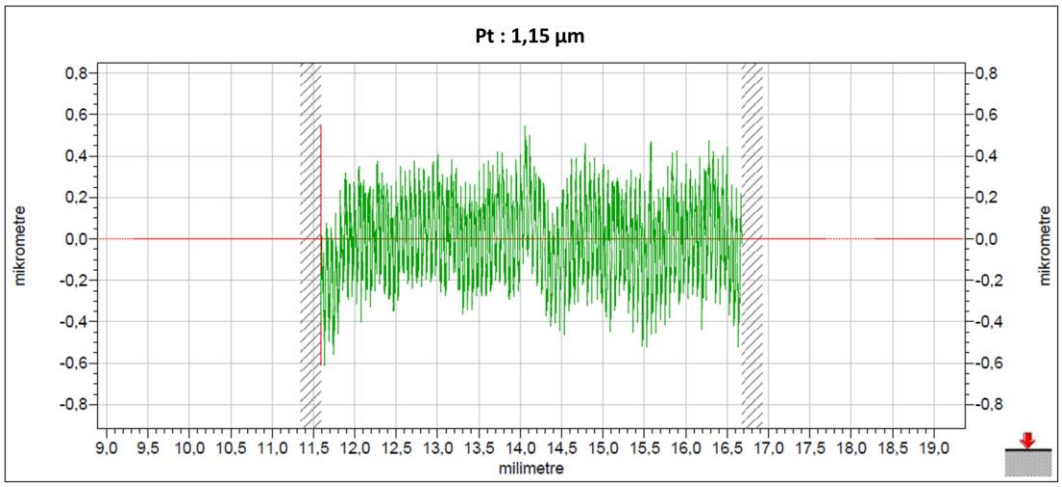
Şekil A-45 Alın Tornalama Deney 23 - Ra



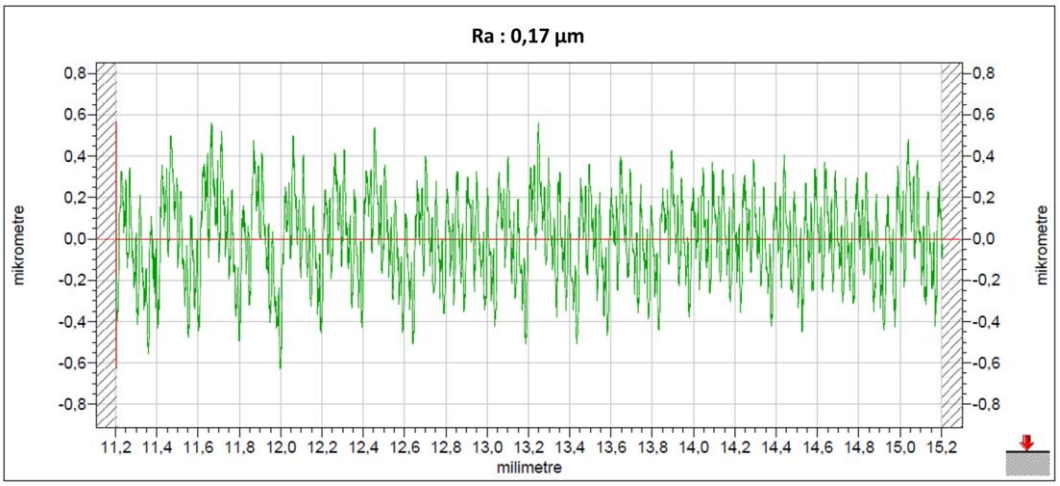
Şekil A-46 Alın Tornalama Deney 23 - Pt



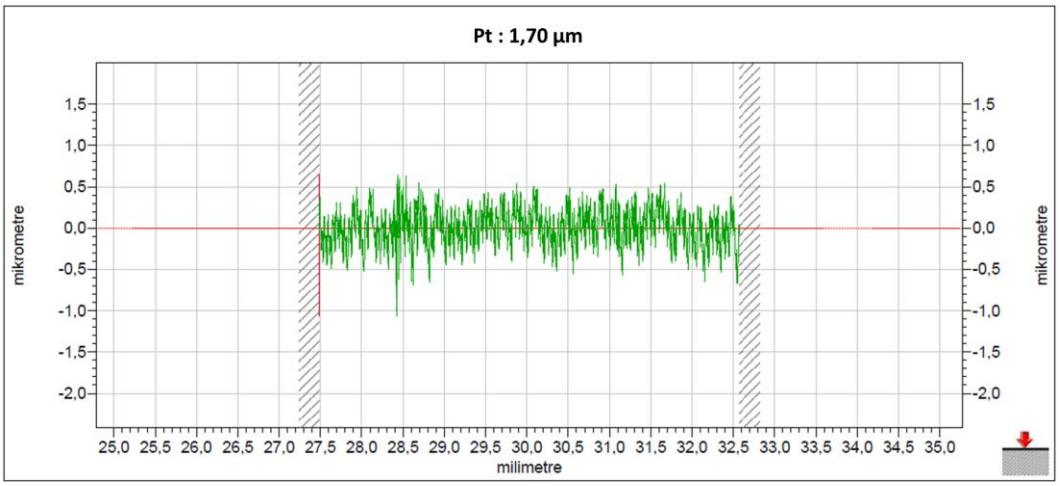
Şekil A-47 Alın Tornalama Deney 24 - Ra



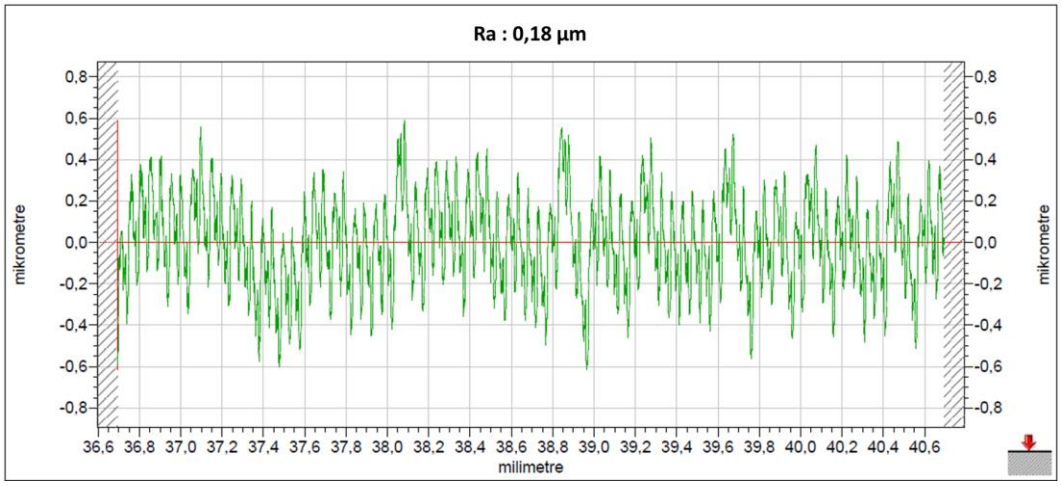
Şekil A-48 Alın Tornalama Deney 24 - Pt



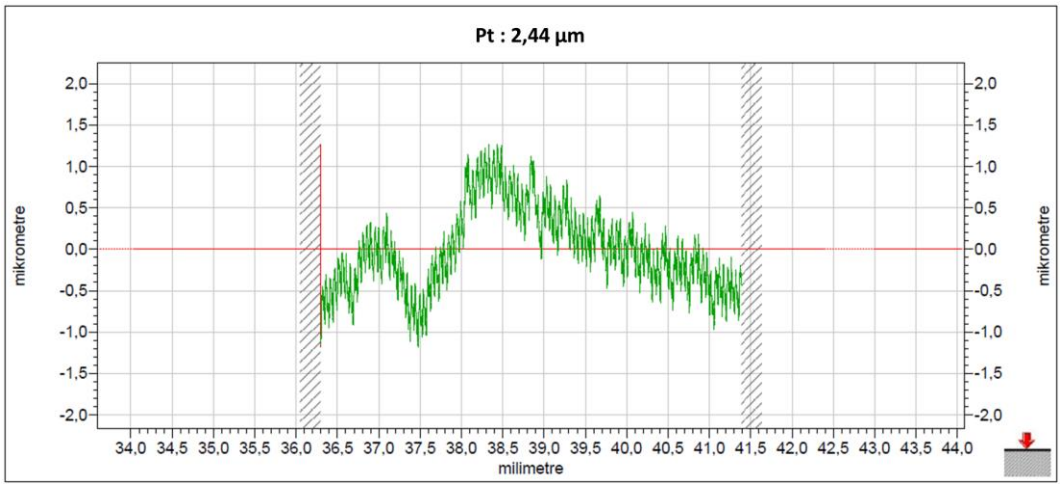
Şekil A-49 Alın Tornalama Deney 25 - Ra



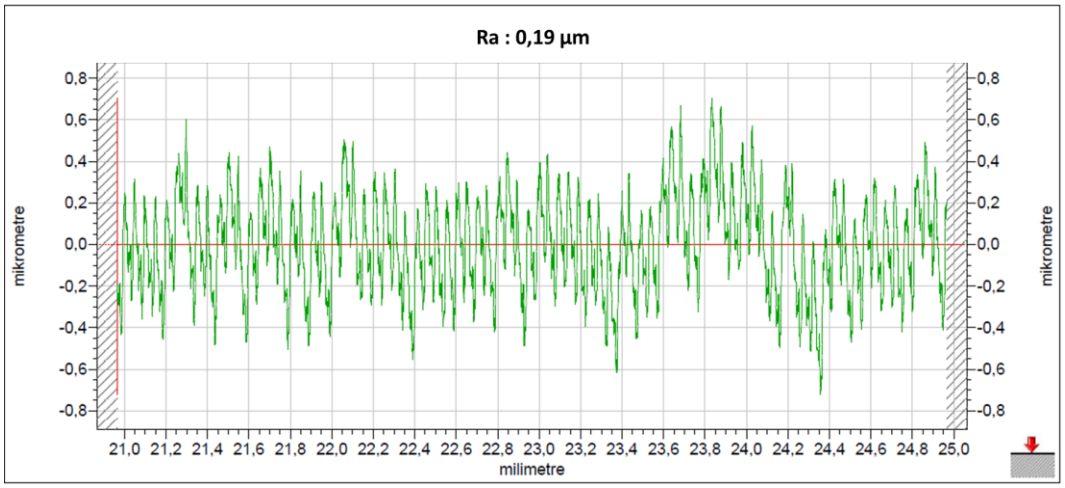
Şekil A-50 Alın Tornalama Deney 25 - Pt



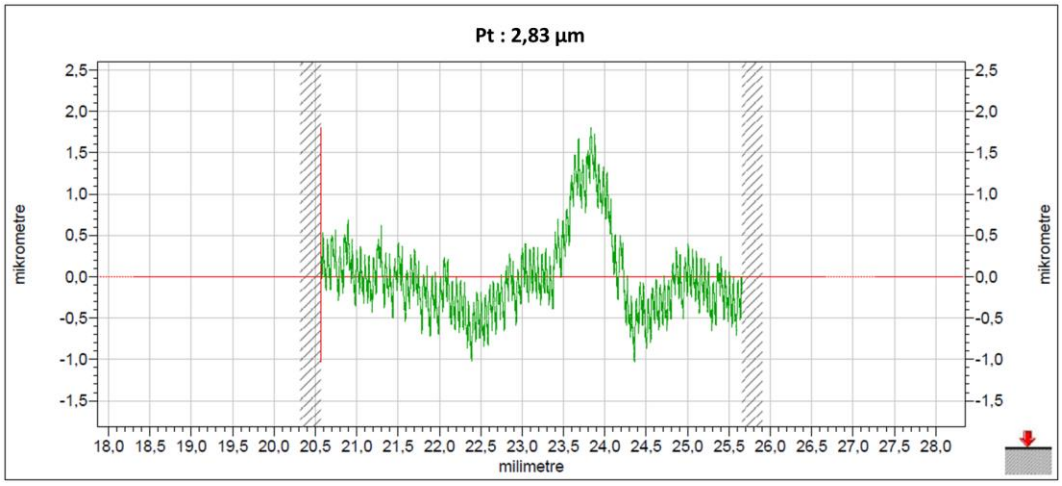
Şekil A-51 Alın Tornalama Deney 26 - Ra



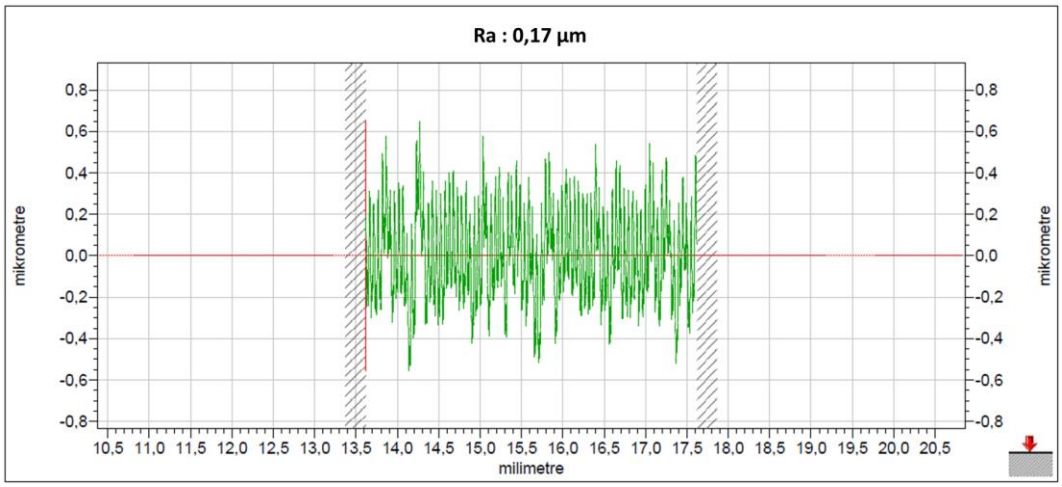
Şekil A-52 Alın Tornalama Deney 26 - Pt



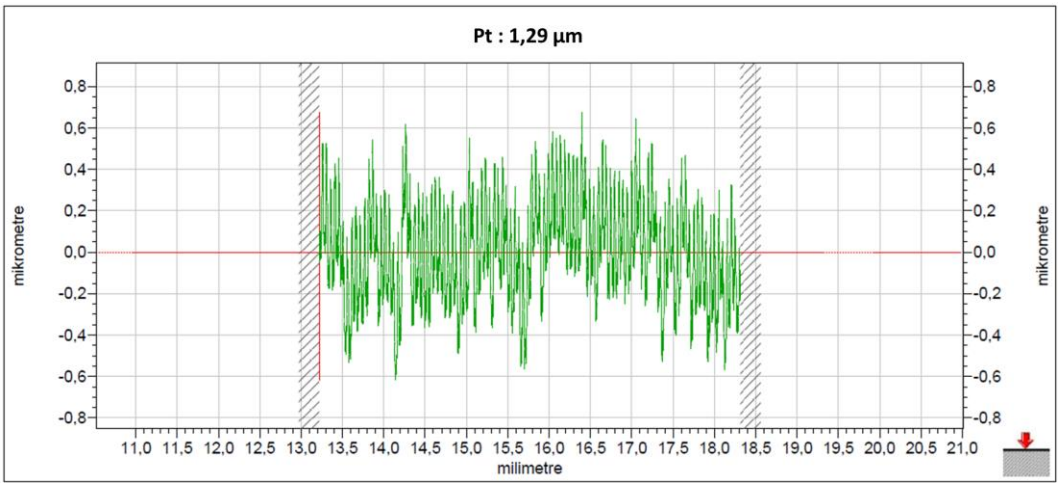
Şekil A-53 Alın Tornalama Deney 27 - Ra



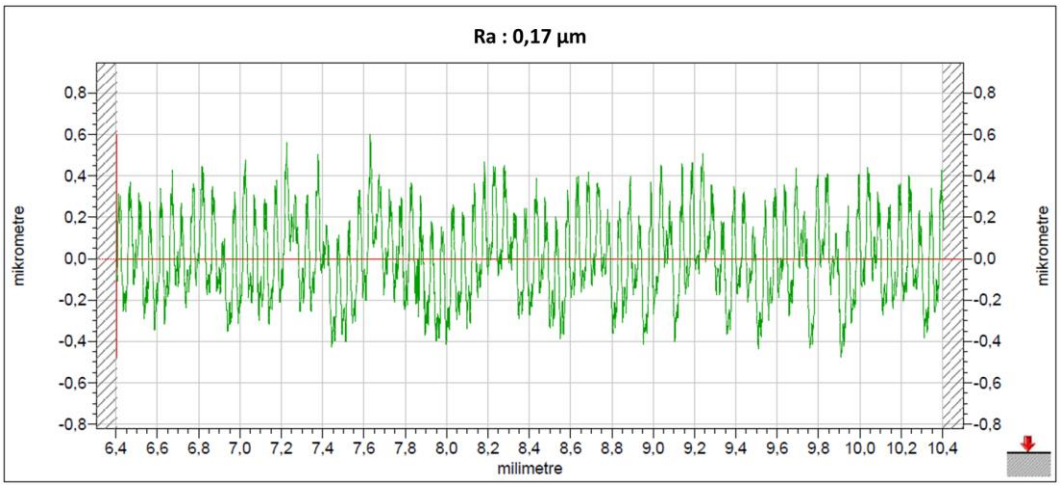
Şekil A-54 Alın Tornalama Deney 27 - Pt



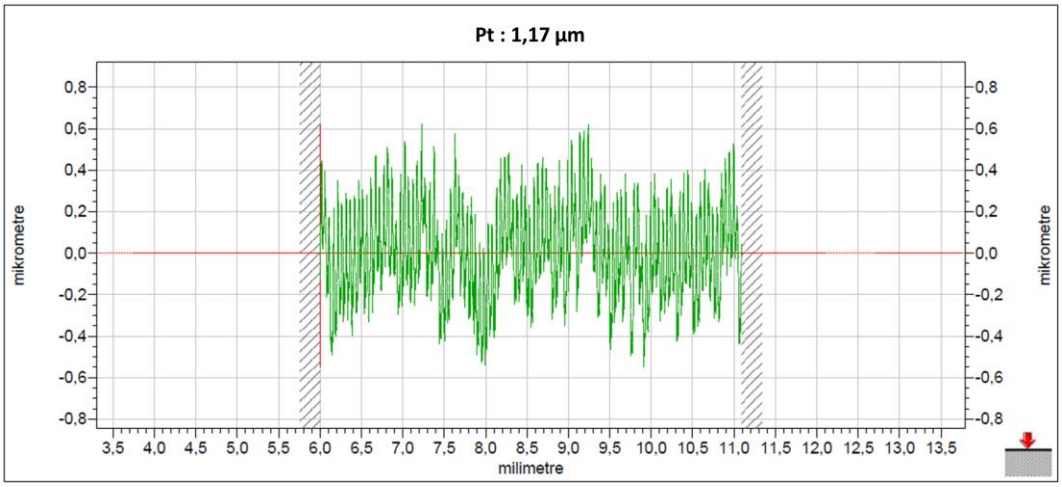
Şekil A-55 Alın Tornalama Deney 28 - Ra



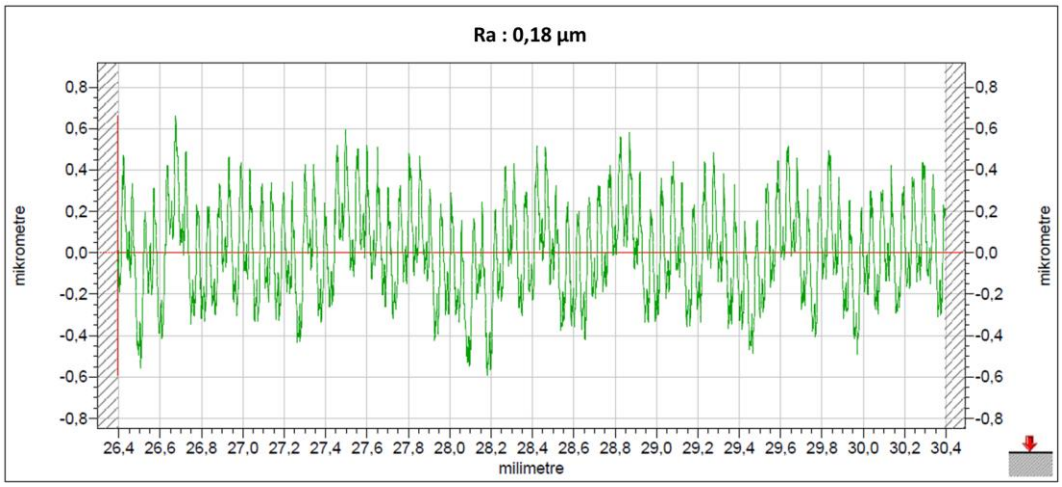
Şekil A-56 Alın Tornalama Deney 28 - Pt



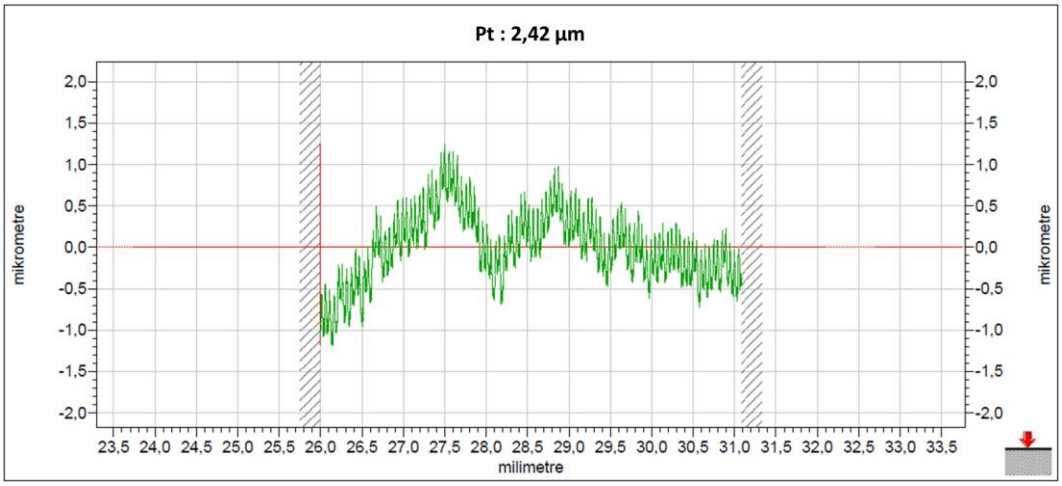
Şekil A-57 Alın Tornalama Deney 29 - Ra



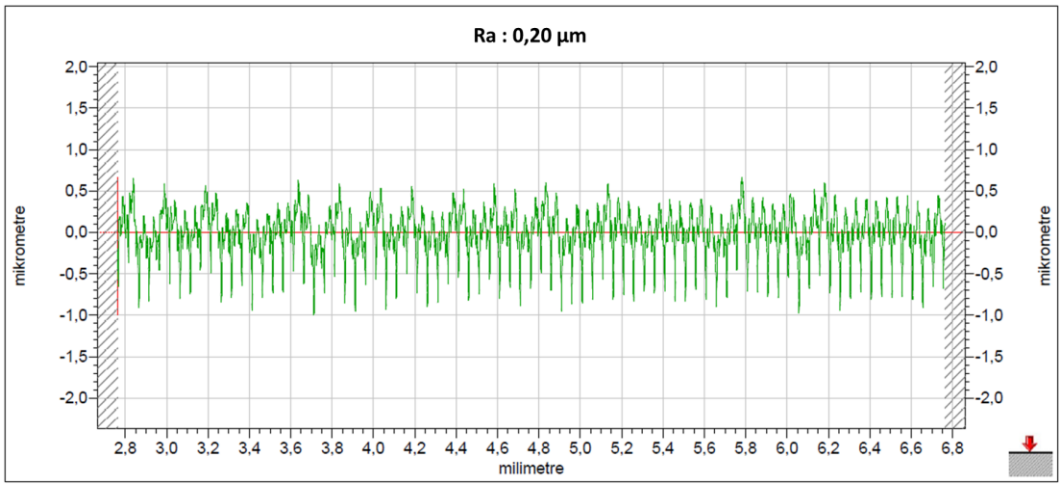
Şekil A-58 Alın Tornalama Deney 29 - Pt



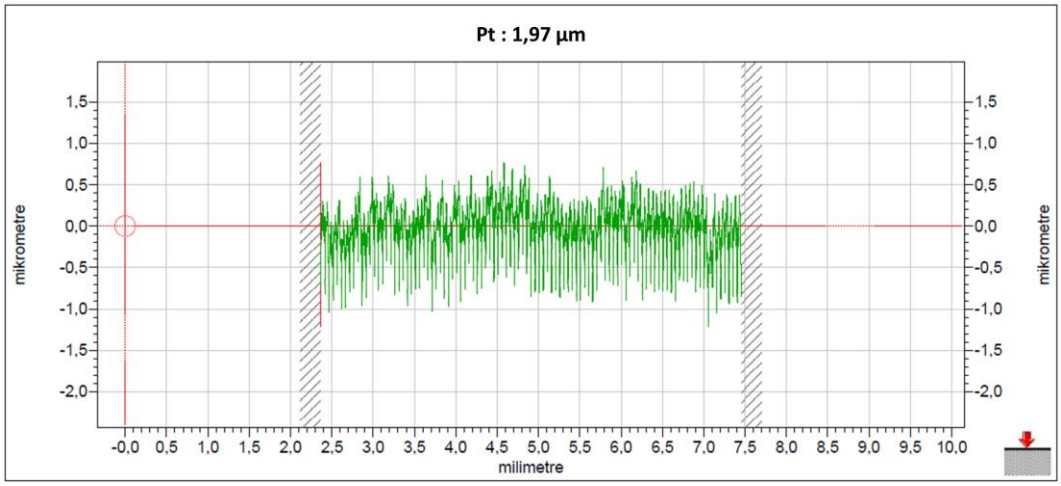
Şekil A-59 Alın Tornalama Deney 30 - Ra



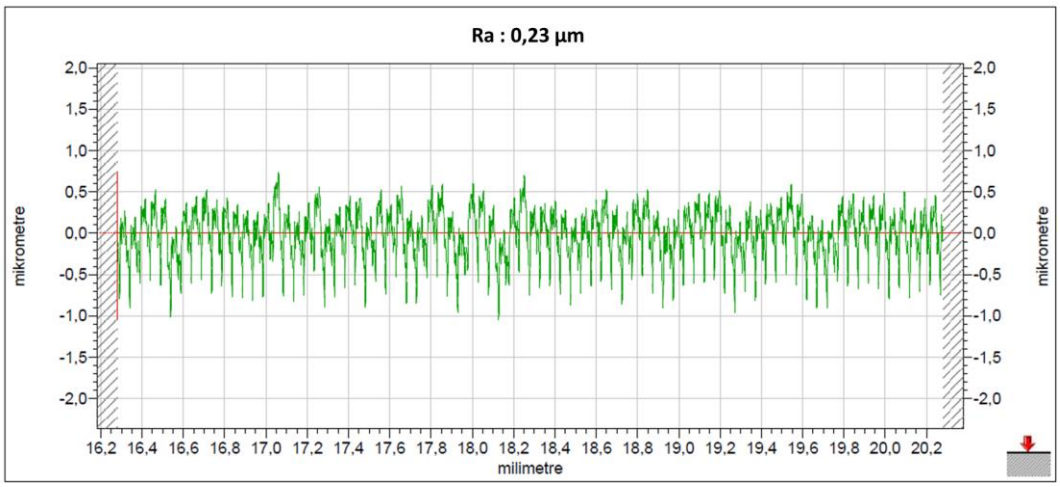
Şekil A-60 Alın Tornalama Deney 30 - Pt



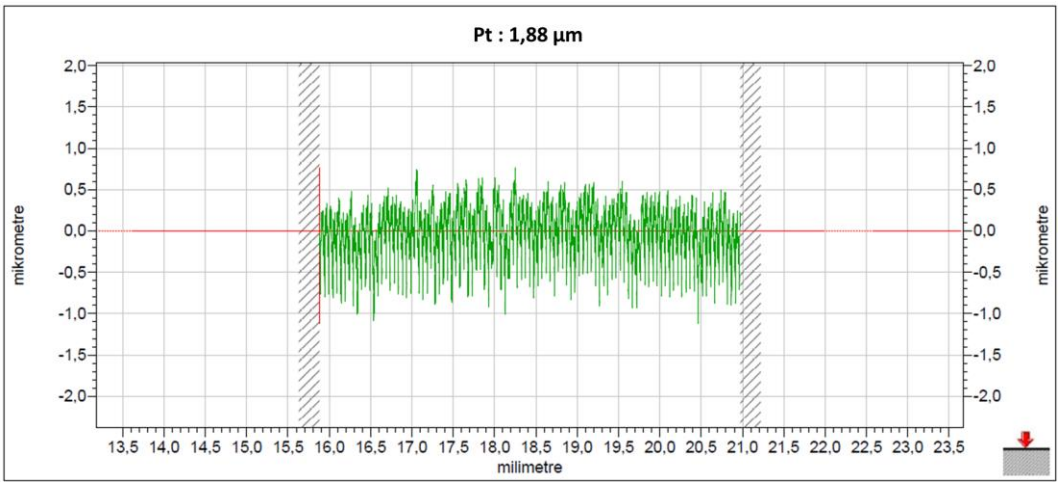
Şekil A-61 Alın Tornalama Deney 31 - Ra



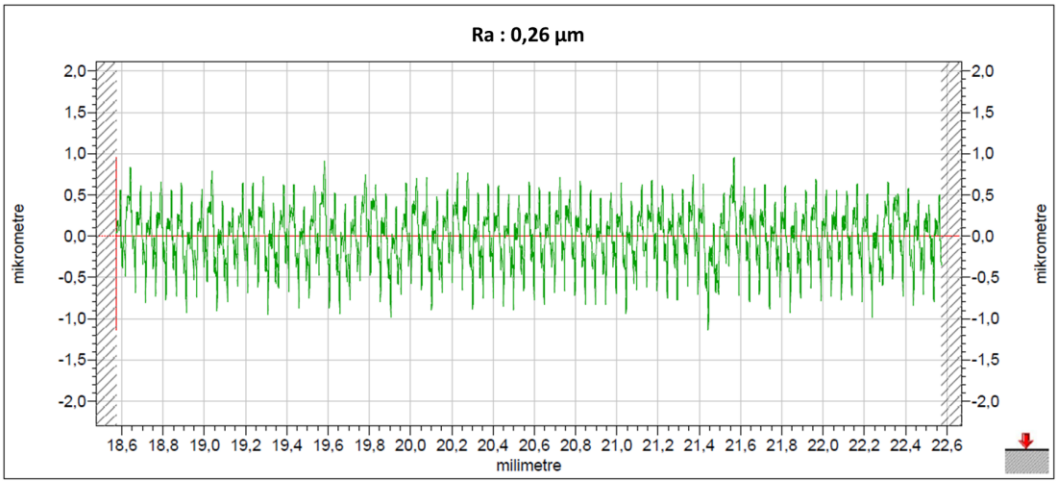
Şekil A-62 Alın Tornalama Deney 31 - Pt



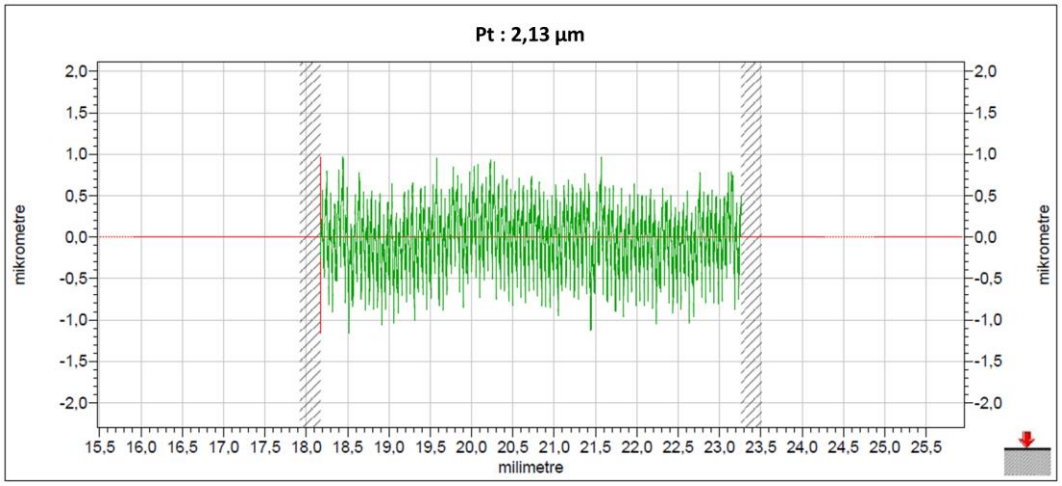
Şekil A-63 Alın Tornalama Deney 32 - Ra



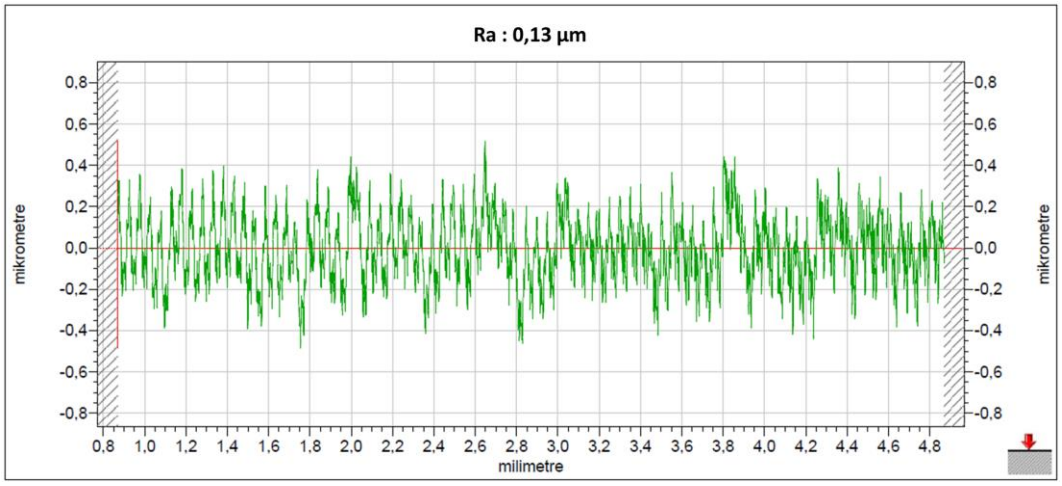
Şekil A-64 Alın Tornalama Deney 32 - Pt



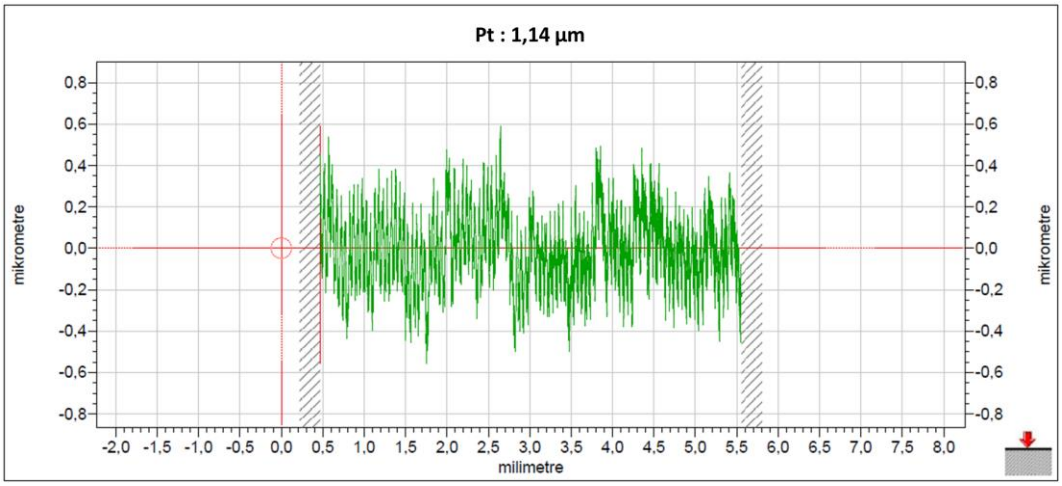
Şekil A-65 Alın Tornalama Deney 33 - Ra



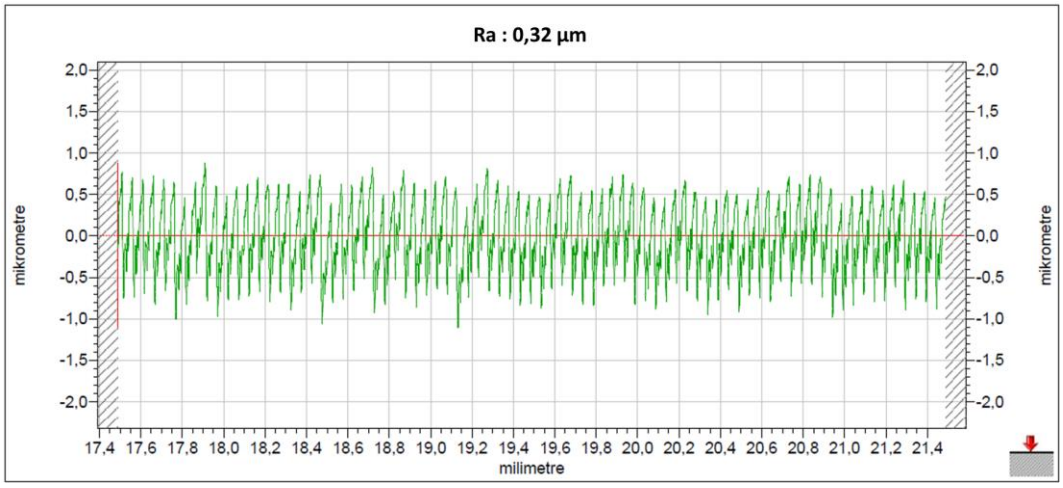
Şekil A-66 Alın Tornalama Deney 33 - Pt



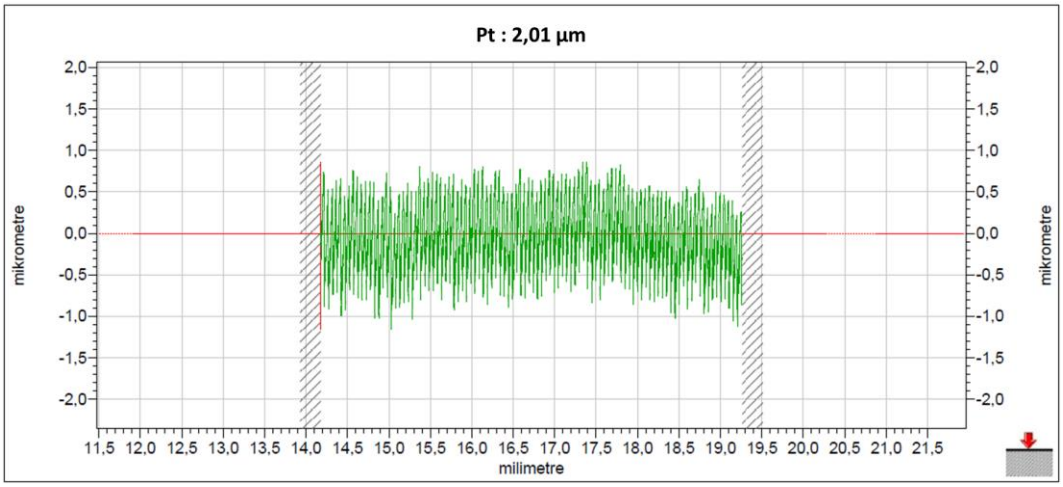
Şekil A-67 Alın Tornalama Deney 34 - Ra



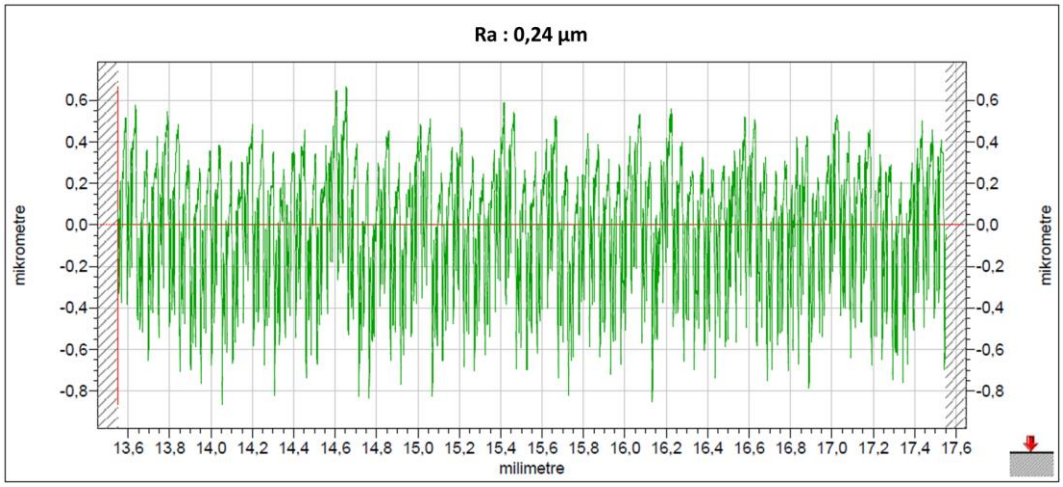
Şekil A-68 Alın Tornalama Deney 34 - Pt



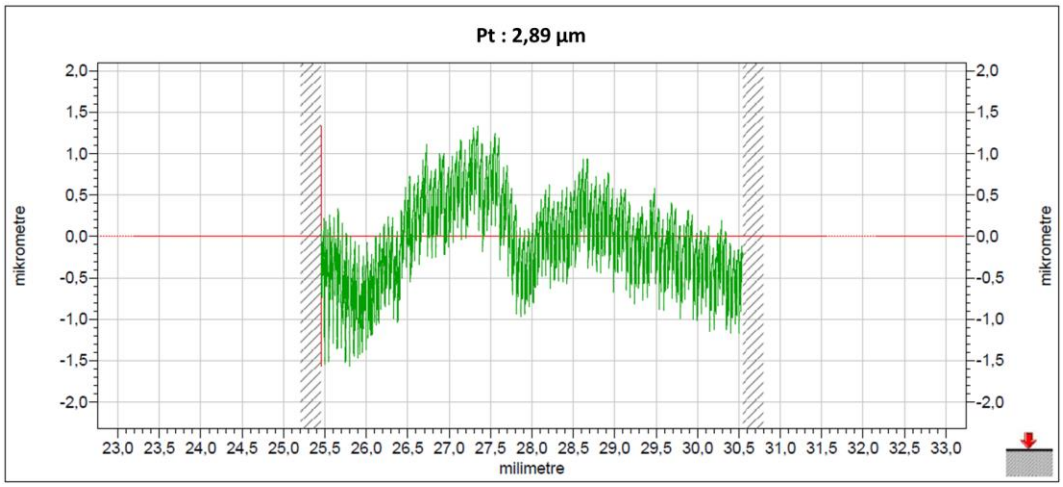
Şekil A-69 Alın Tornalama Deney 35 - Ra



Şekil A-70 Alın Tornalama Deney 35 - Pt

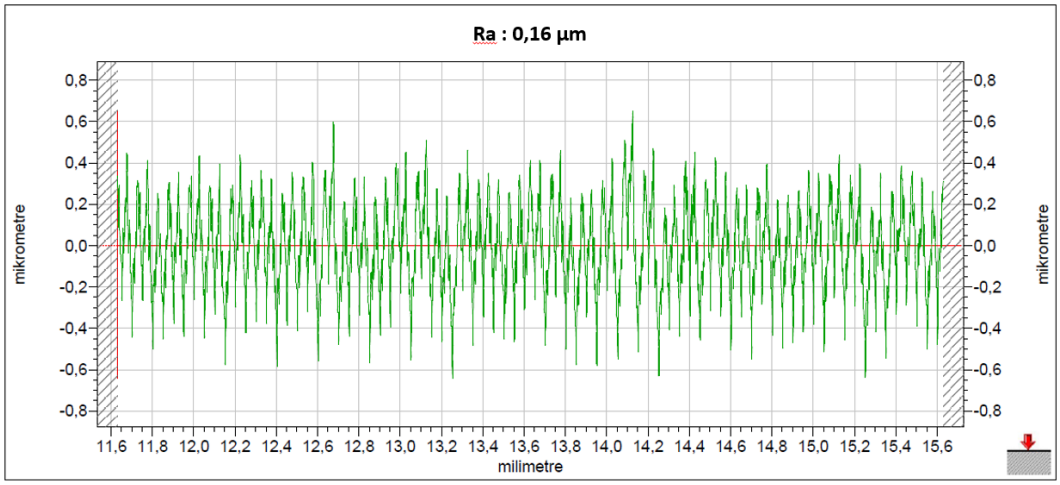


Şekil A-71 Alın Tornalama Deney 36 - Ra

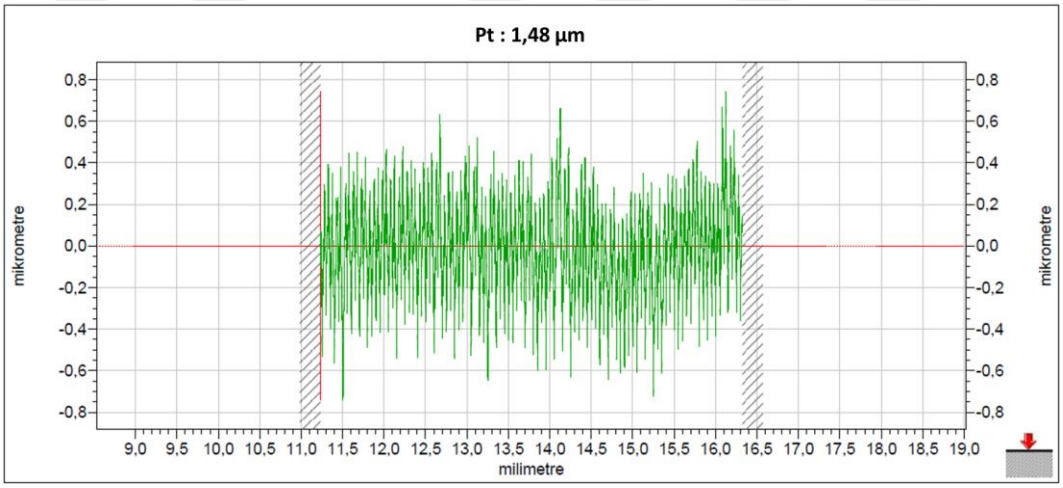


Şekil A-72 Alın Tornalama Deney 36 - Pt

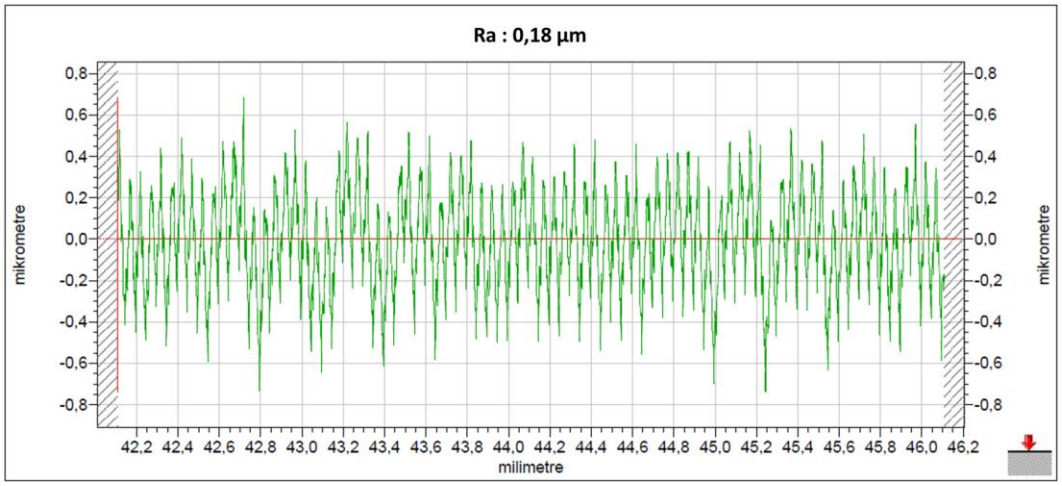
EK B DIŞ ÇAP TORNALAMA DENEYLERİ Ra VE Pt YÜZEY GRAFİKLERİ



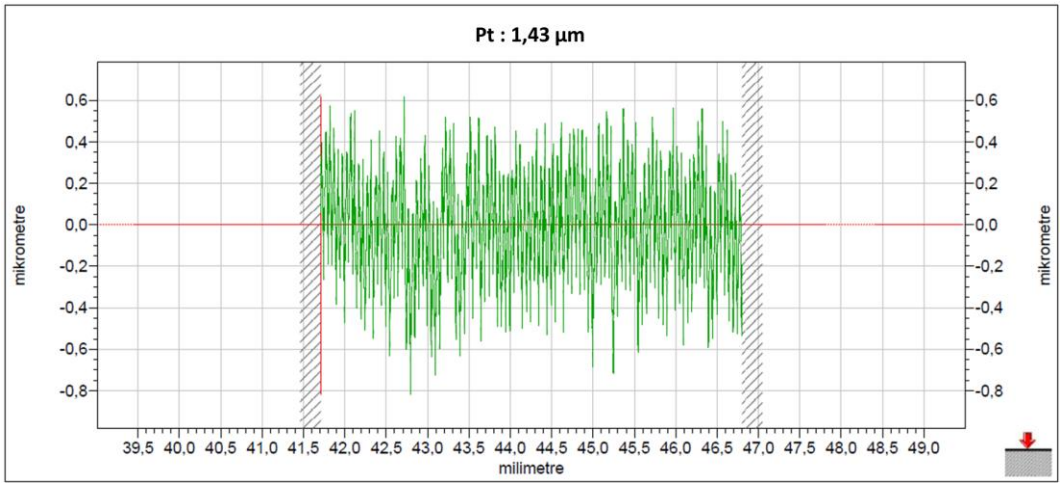
Şekil B-1 Dış Çap Tornalama Deney 1 - Ra



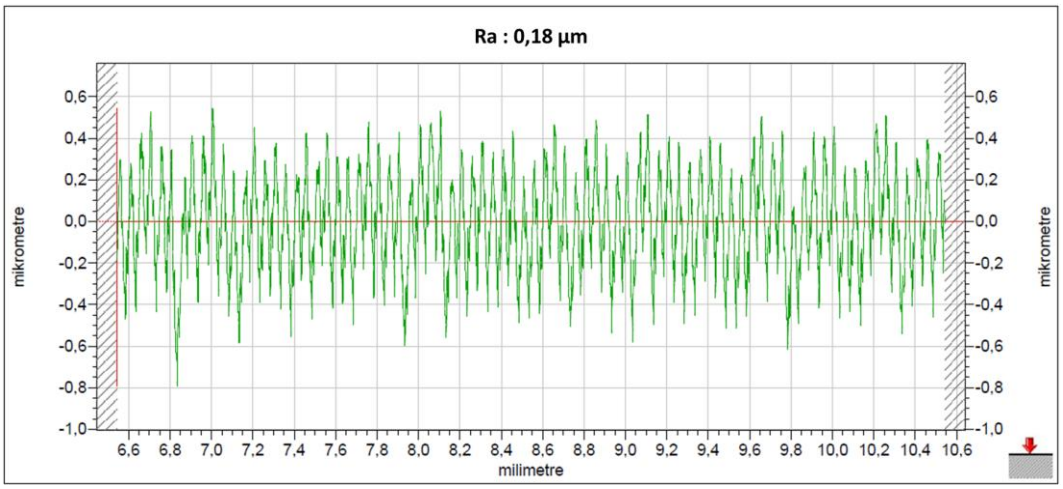
Şekil B-2 Dış Çap Tornalama Deney 1 - Pt



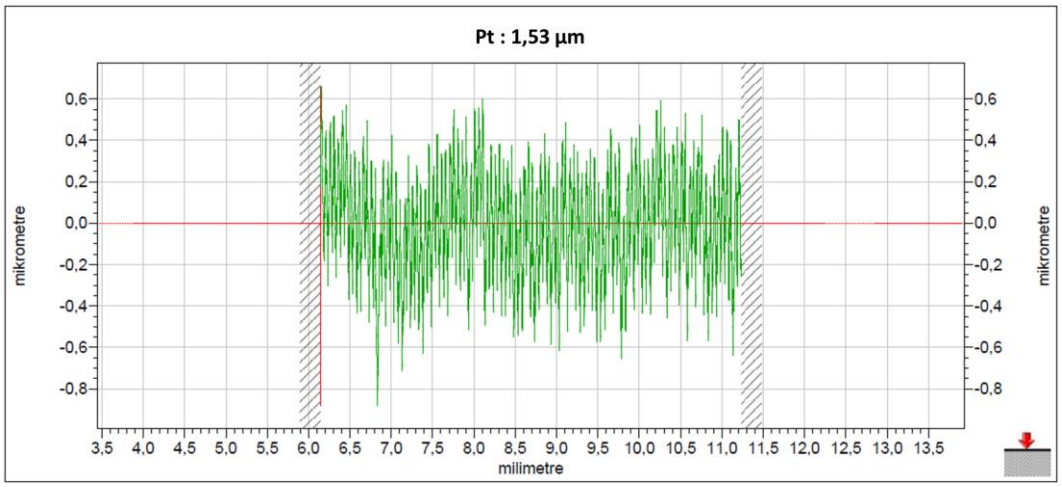
Şekil B-3 Dış Çap Tornalama Deney 2 - Ra



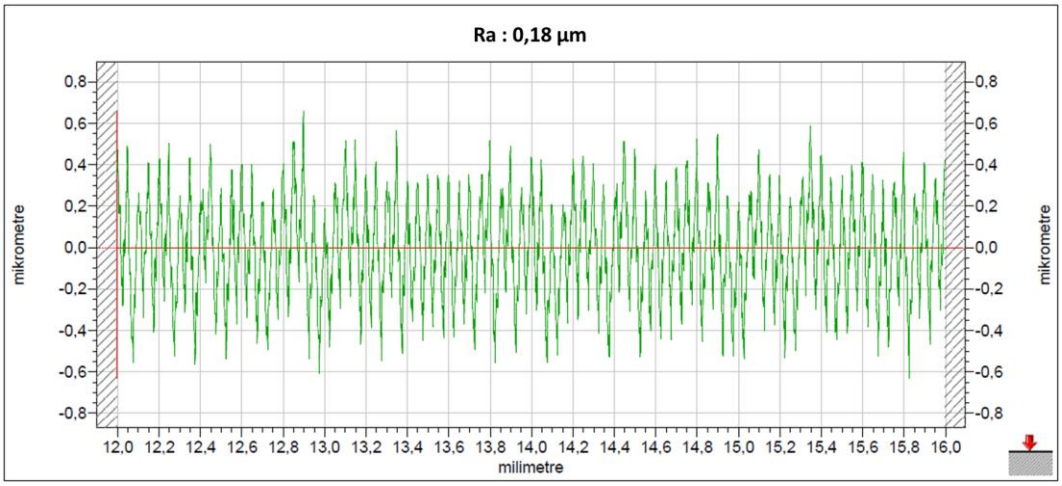
Şekil B-4 Dış Çap Tornalama Deney 2 - Pt



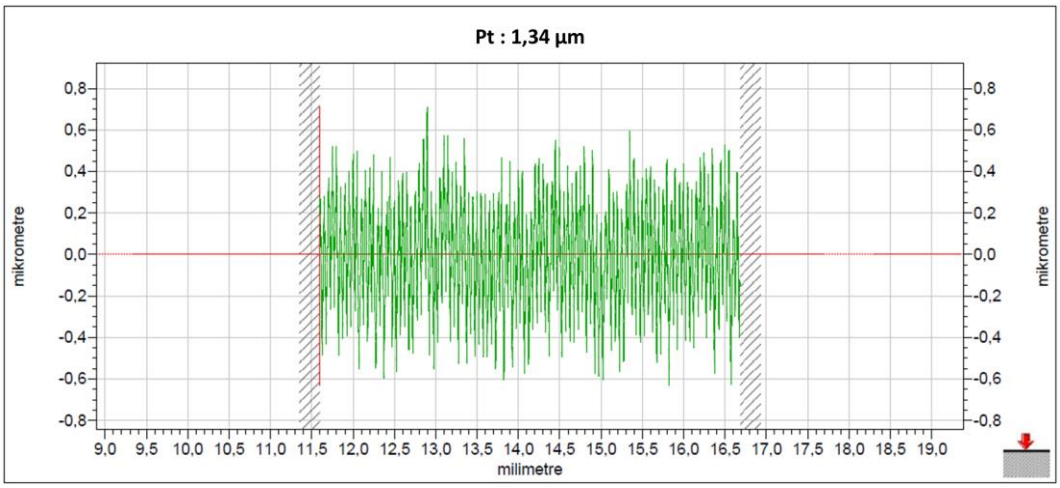
Şekil B-5 Dış Çap Tornalama Deney 3 - Ra



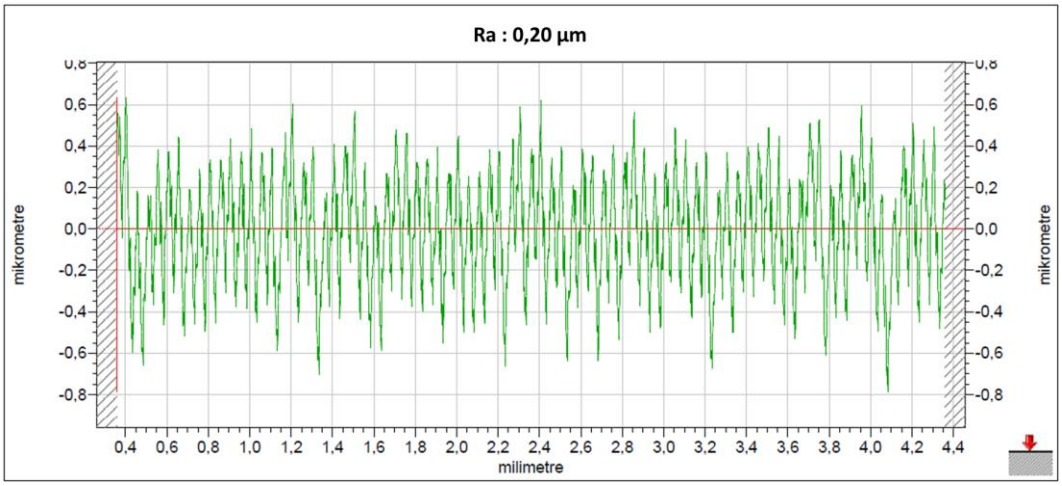
Şekil B-6 Dış Çap Tornalama Deney 3 - Pt



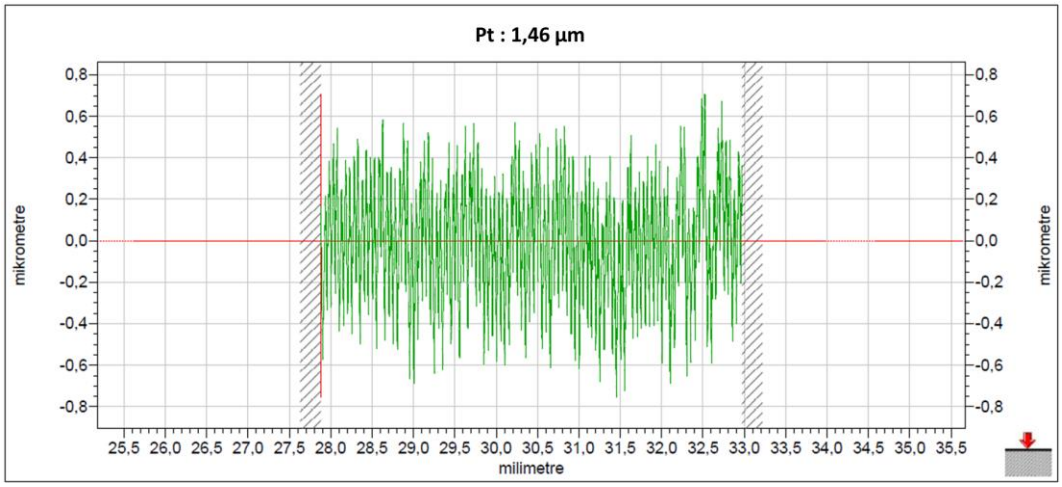
Şekil B-7 Dış Çap Tornalama Deney 4 - Ra



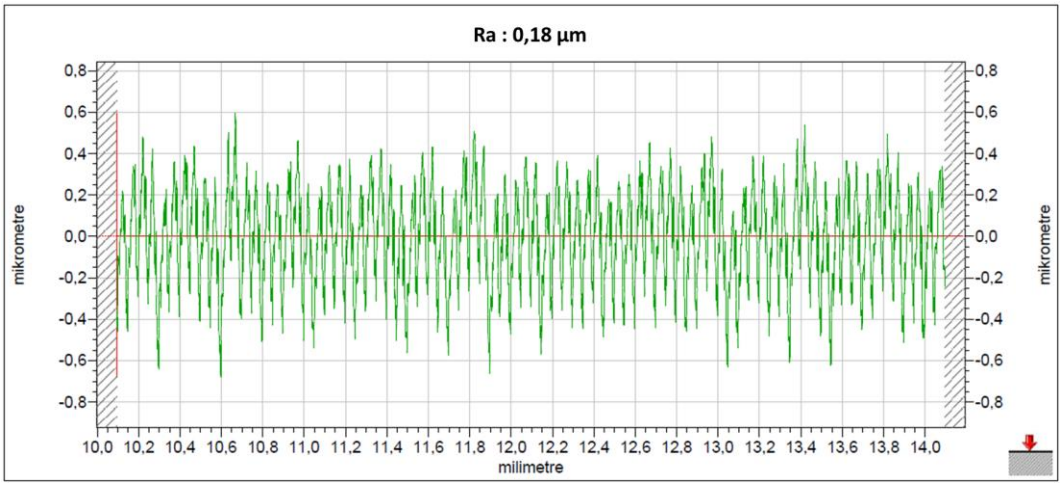
Şekil B-8 Dış Çap Tornalama Deney 4 - Pt



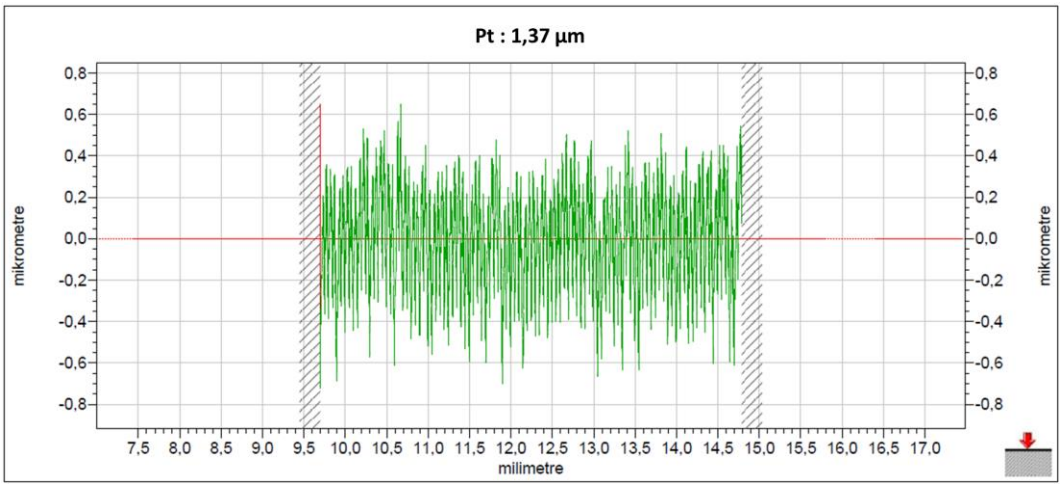
Şekil B-9 Dış Çap Tornalama Deney 5 - Ra



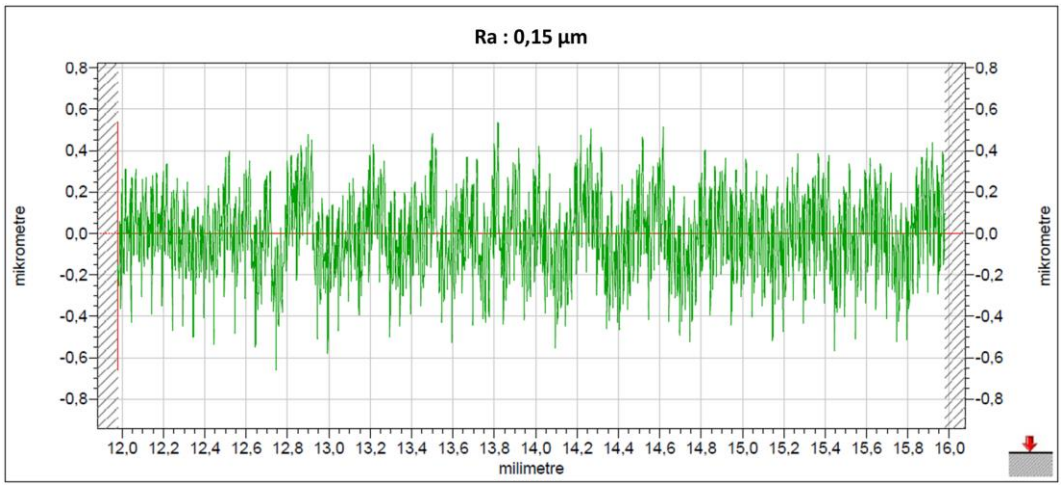
Şekil B-10 Dış Çap Tornalama Deney 5 - Pt



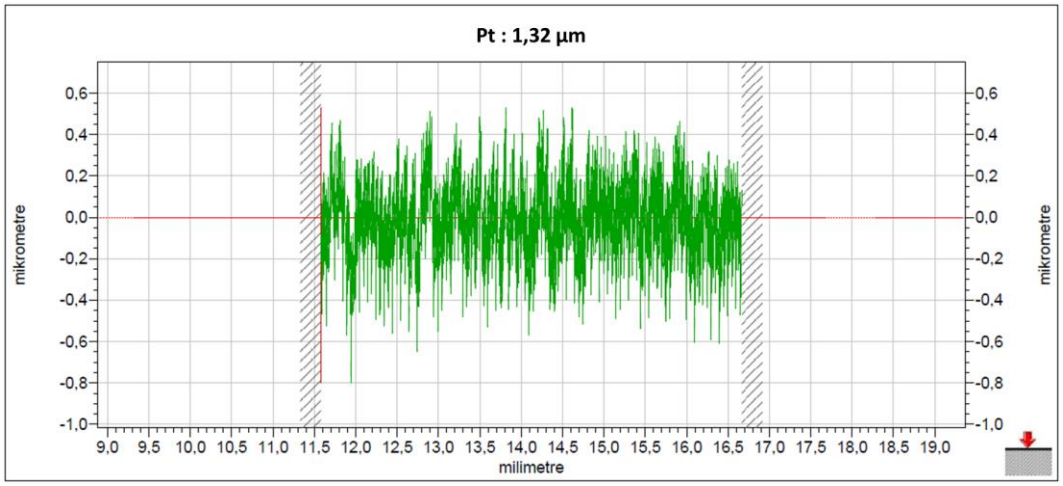
Şekil B-11 Dış Çap Tornalama Deney 6 - Ra



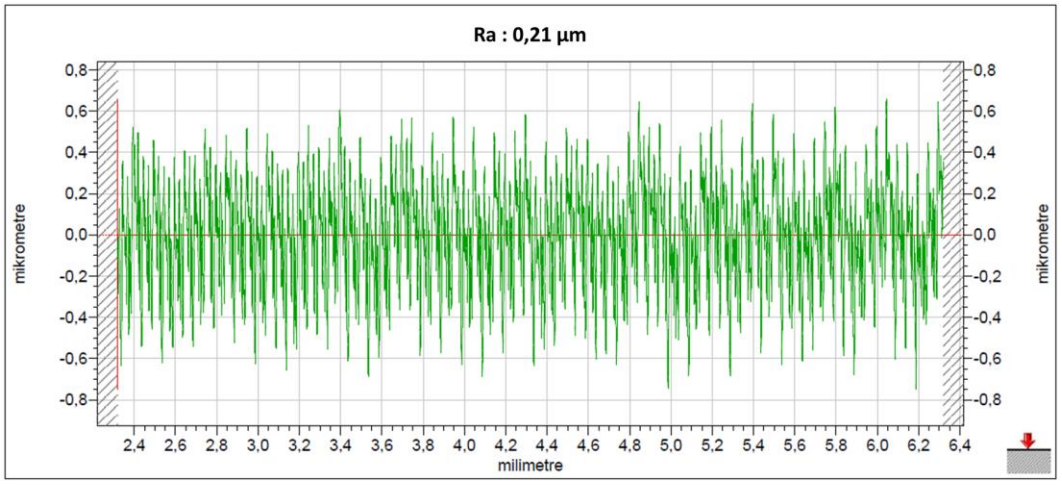
Şekil B-12 Dış Çap Tornalama Deney 6 - Pt



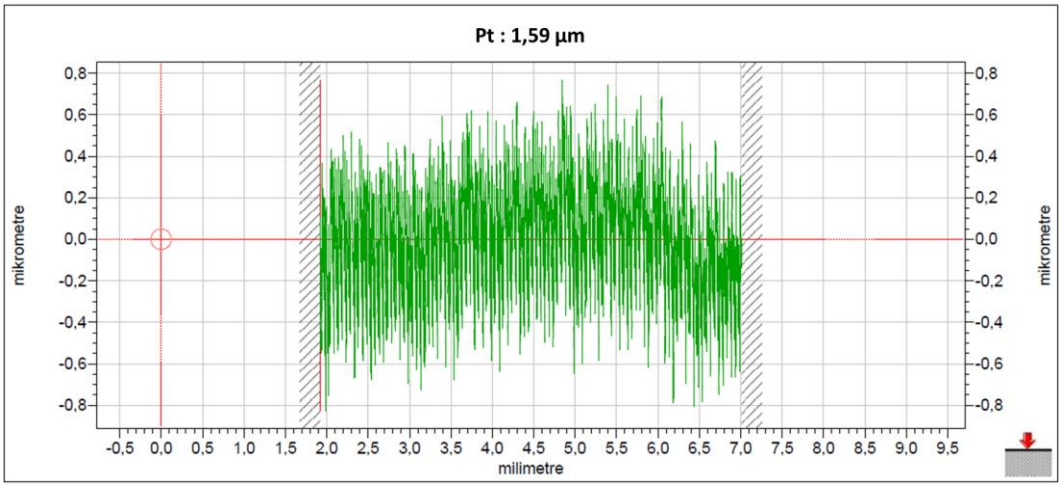
Şekil B-13 Dış Çap Tornalama Deney 7 - Ra



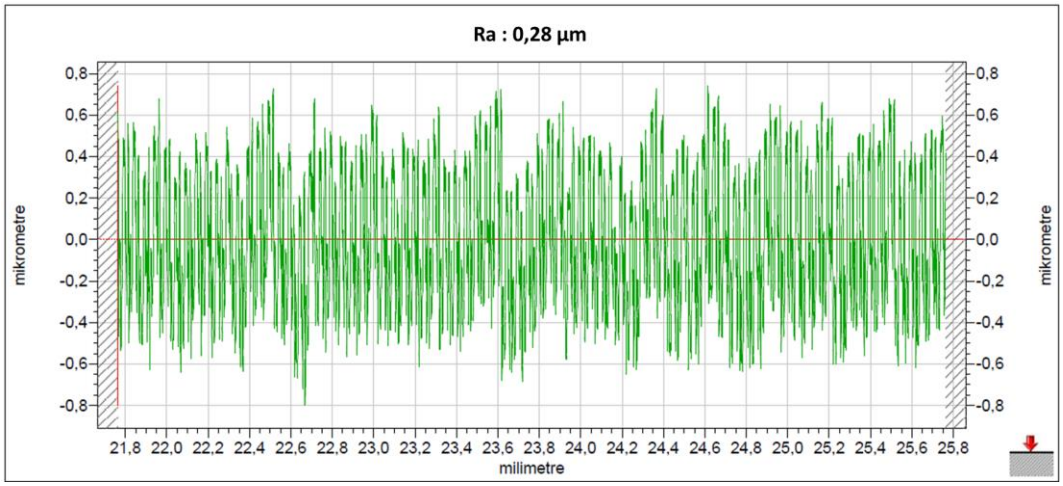
Şekil B-14 Dış Çap Tornalama Deney 7 - Pt



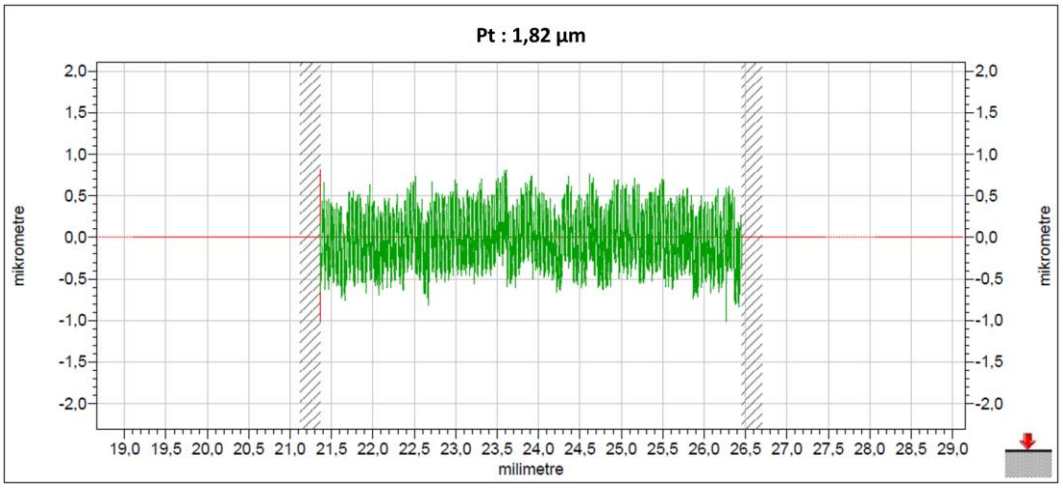
Şekil B-15 Dış Çap Tornalama Deney 8 - Ra



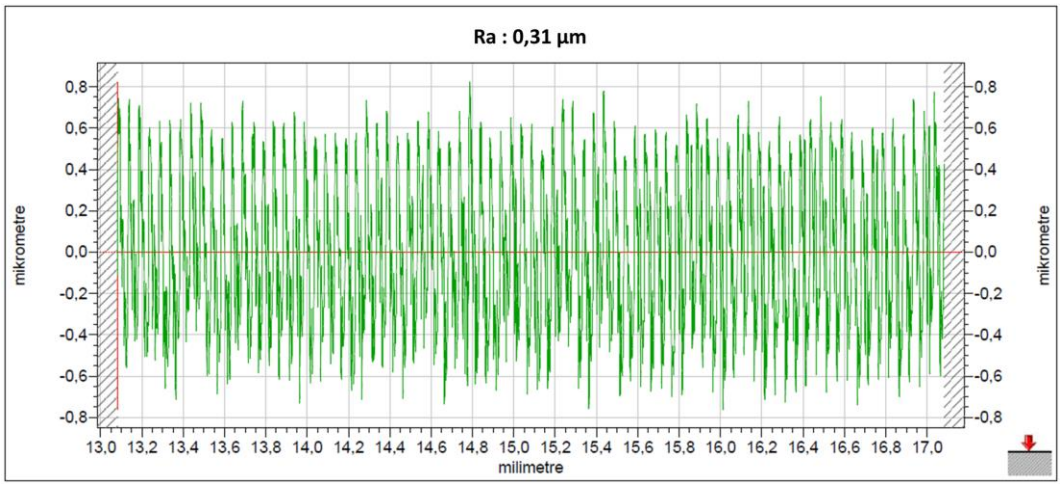
Şekil B-16 Dış Çap Tornalama Deney 8 - Pt



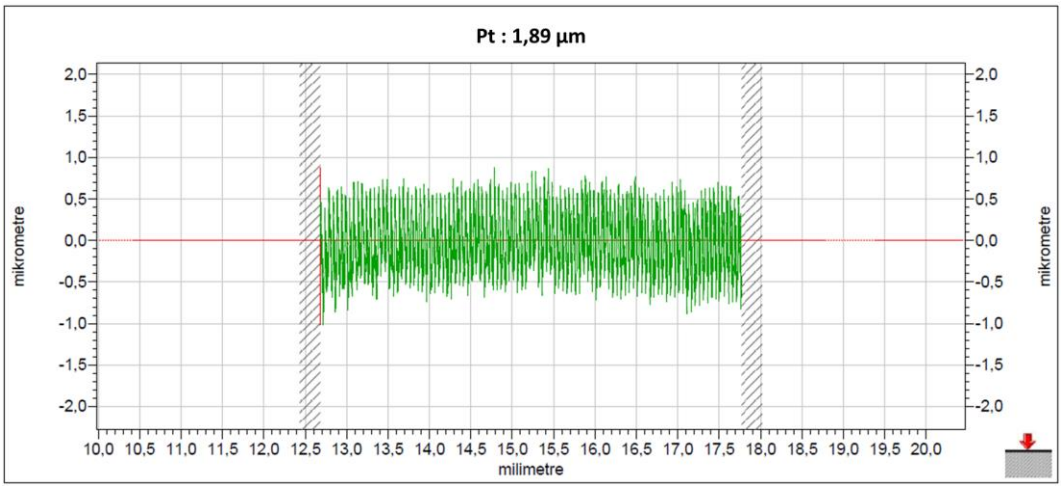
Şekil B-17 Dış Çap Tornalama Deney 9 - Ra



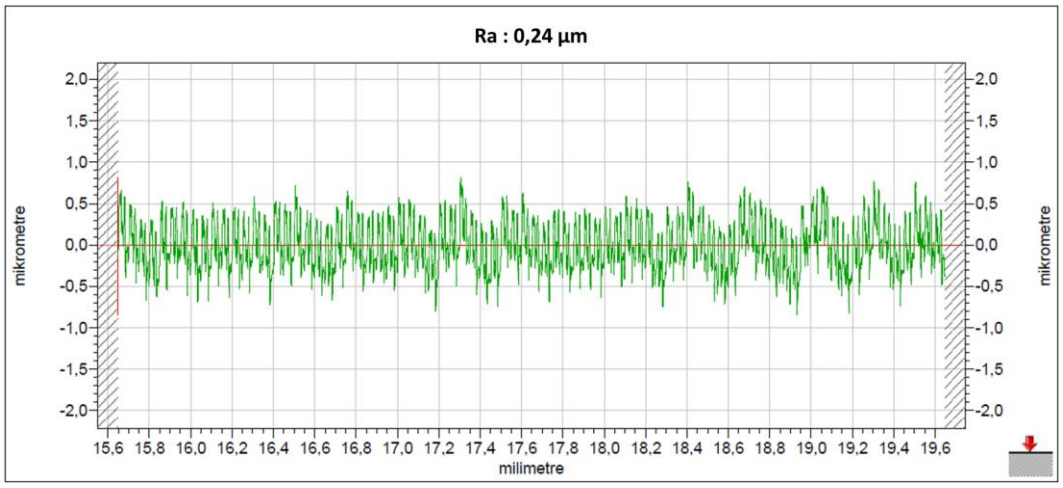
Şekil B-18 Dış Çap Tornalama Deney 9 - Pt



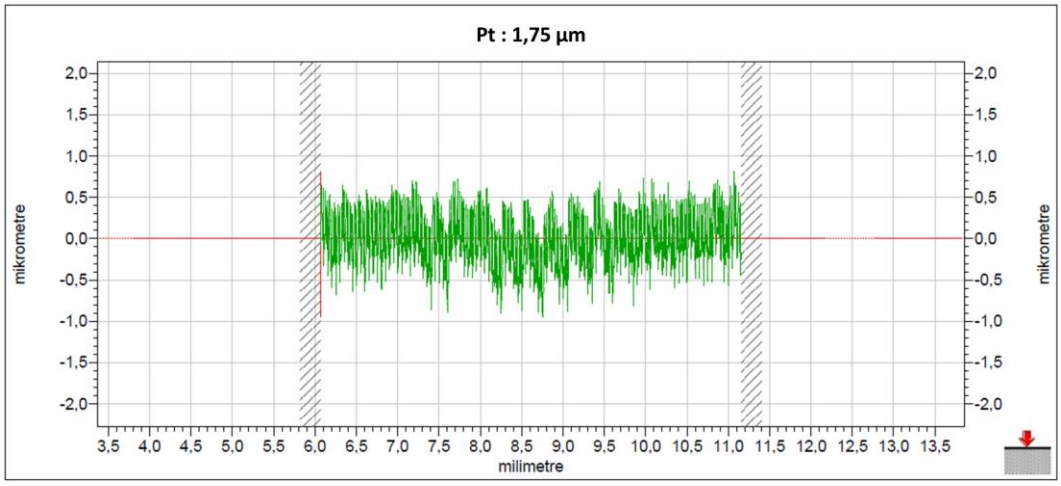
Şekil B-19 Dış Çap Tornalama Deney 10 - Ra



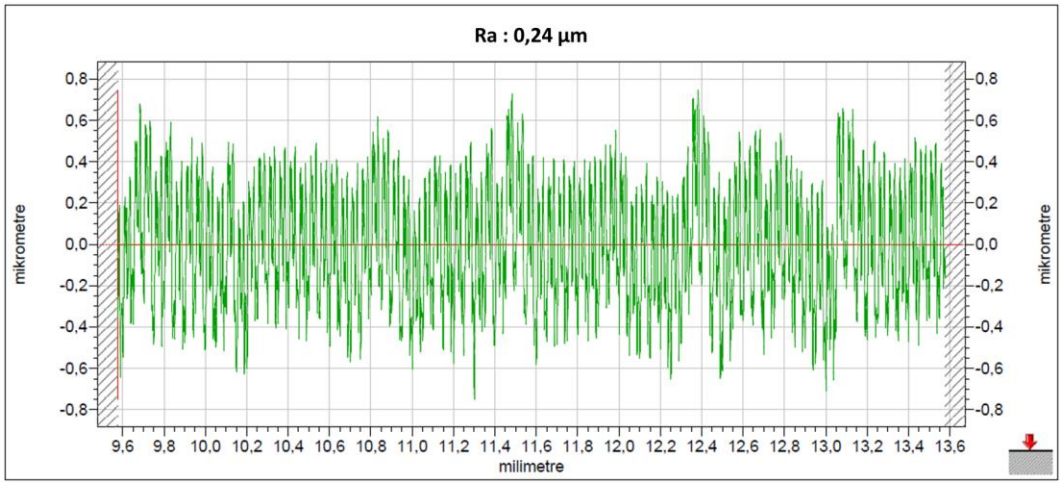
Şekil B-20 Dış Çap Tornalama Deney 10 - Pt



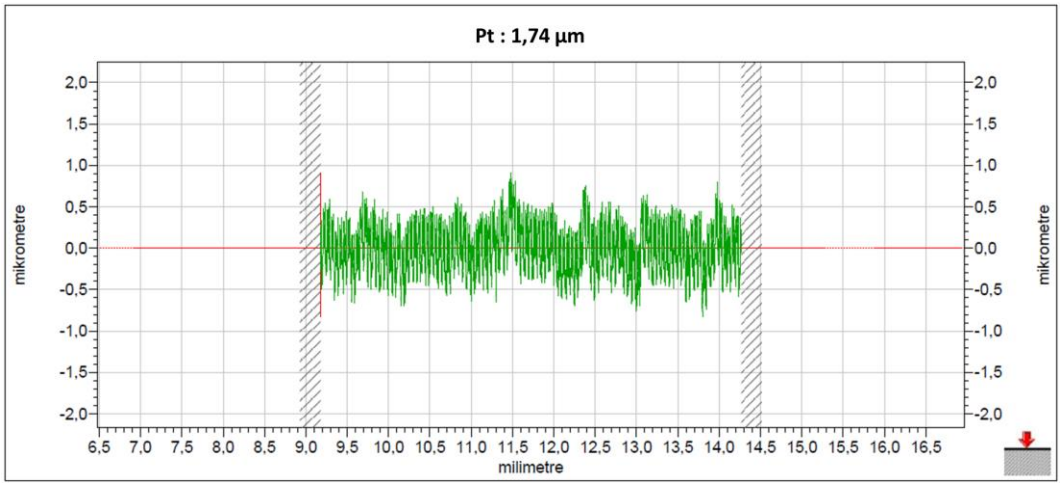
Şekil B-21 Dış Çap Tornalama Deney 11 - Ra



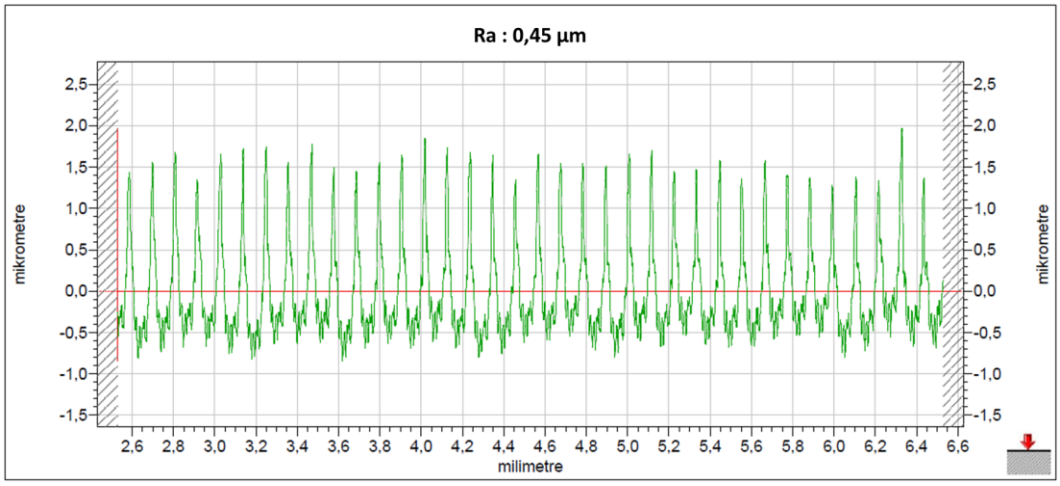
Şekil B-22 Dış Çap Tornalama Deney 11 - Pt



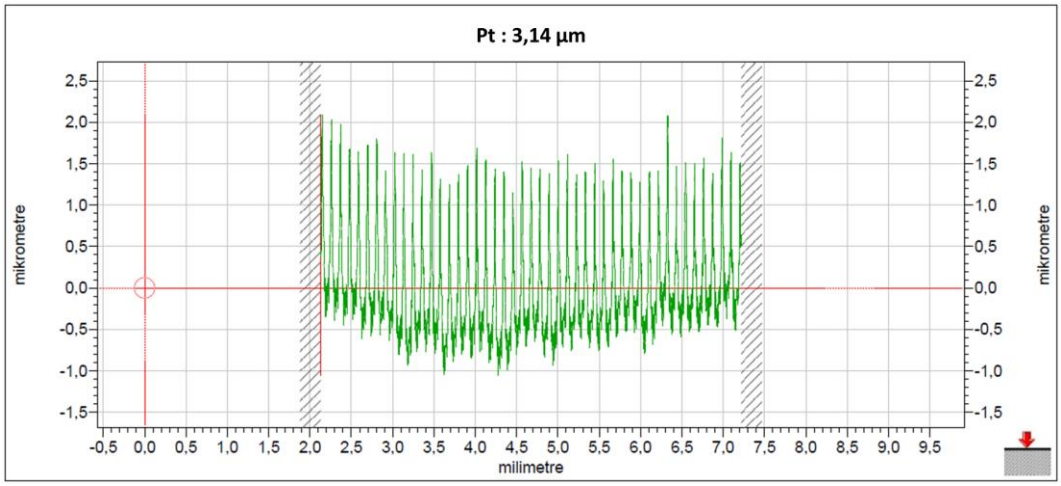
Şekil B-23 Dış Çap Tornalama Deney 12 - Ra



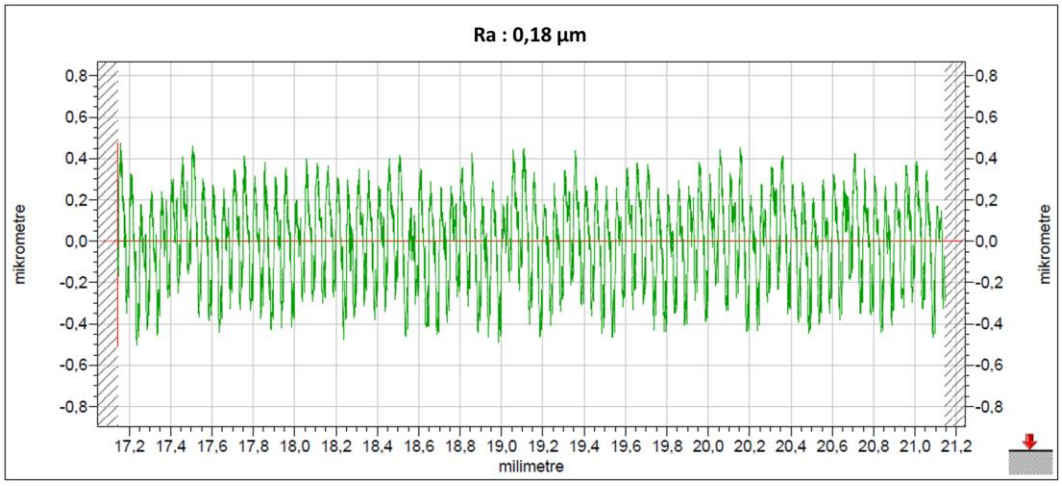
Şekil B-24 Dış Çap Tornalama Deney 12 - Pt



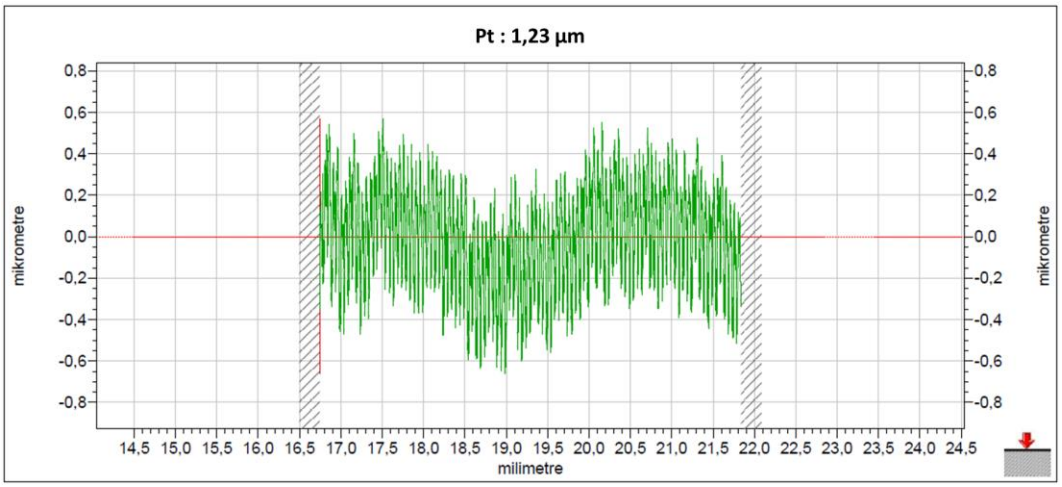
Şekil B-25 Dış Çap Tornalama Deney 13 - Ra



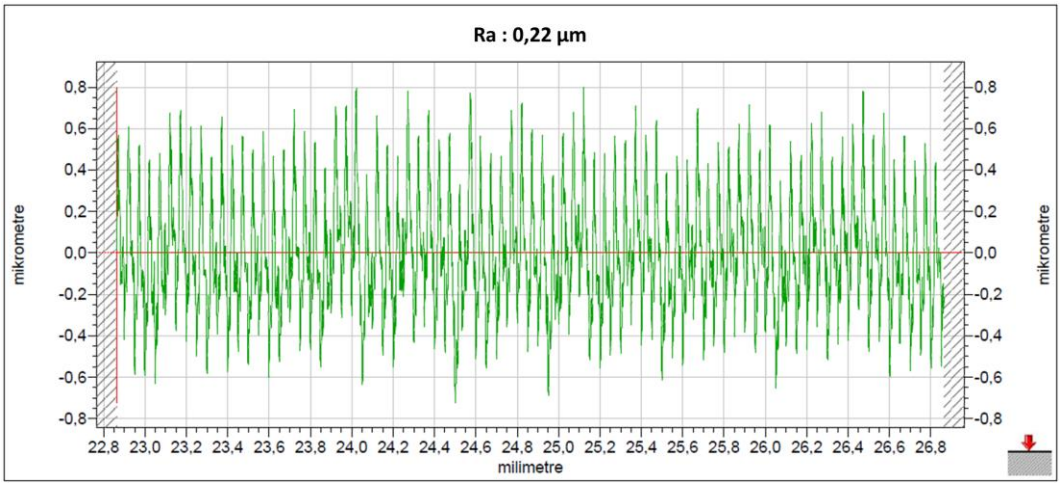
Şekil B-26 Dış Çap Tornalama Deney 13 - Pt



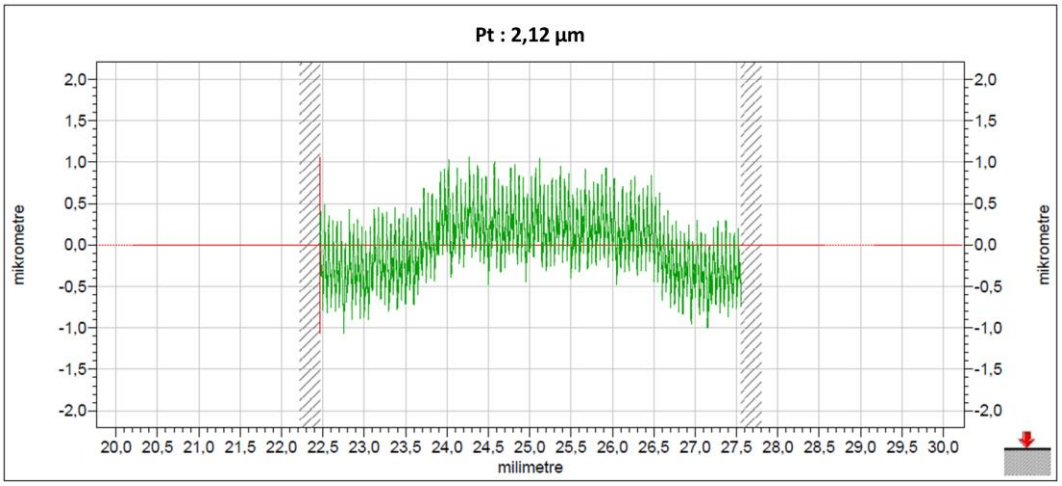
Şekil B-27 Dış Çap Tornalama Deney 14 - Ra



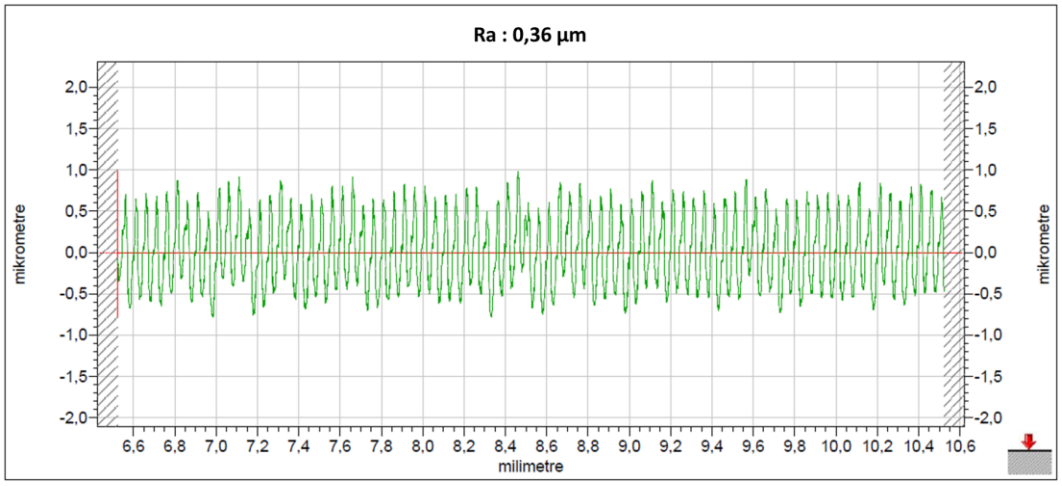
Şekil B-28 Dış Çap Tornalama Deney 14 - Pt



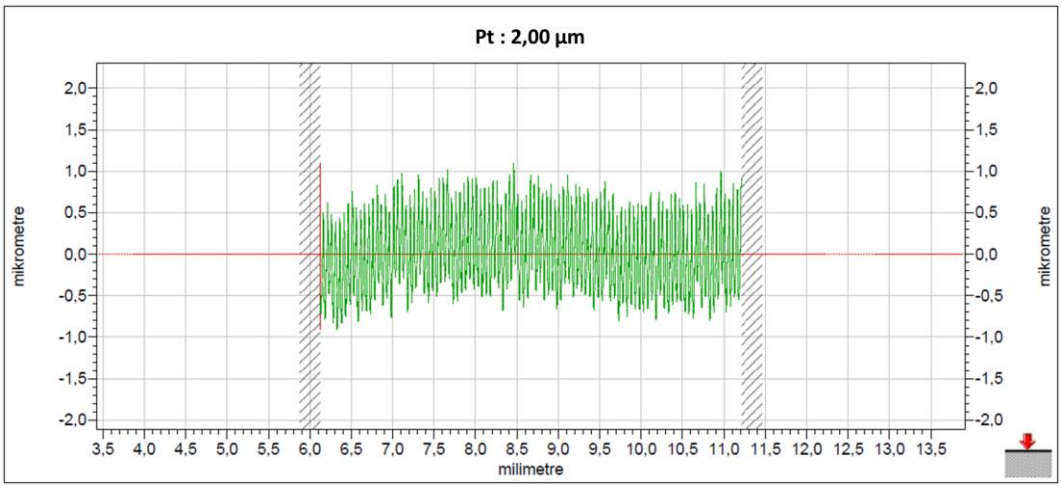
Şekil B-29 Dış Çap Tornalama Deney 15 - Ra



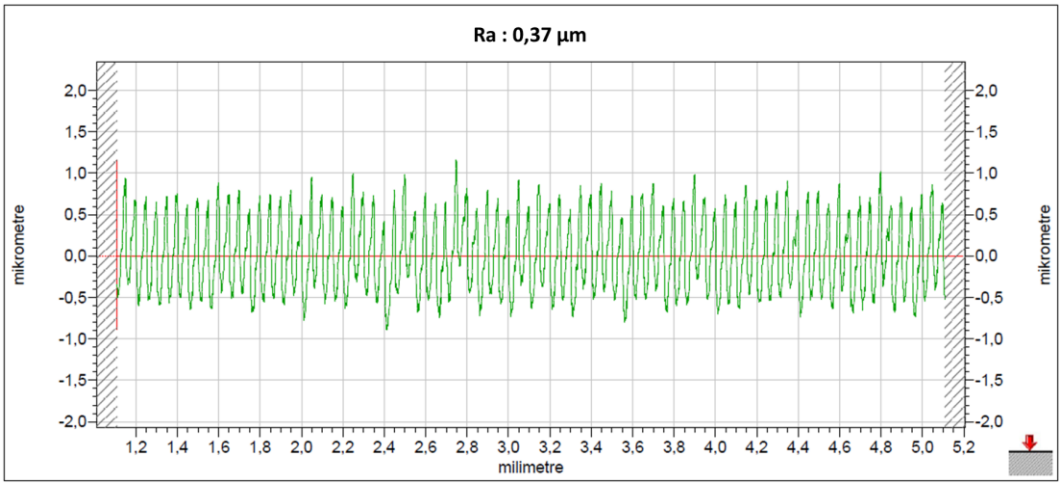
Şekil B-30 Dış Çap Tornalama Deney 15 - Pt



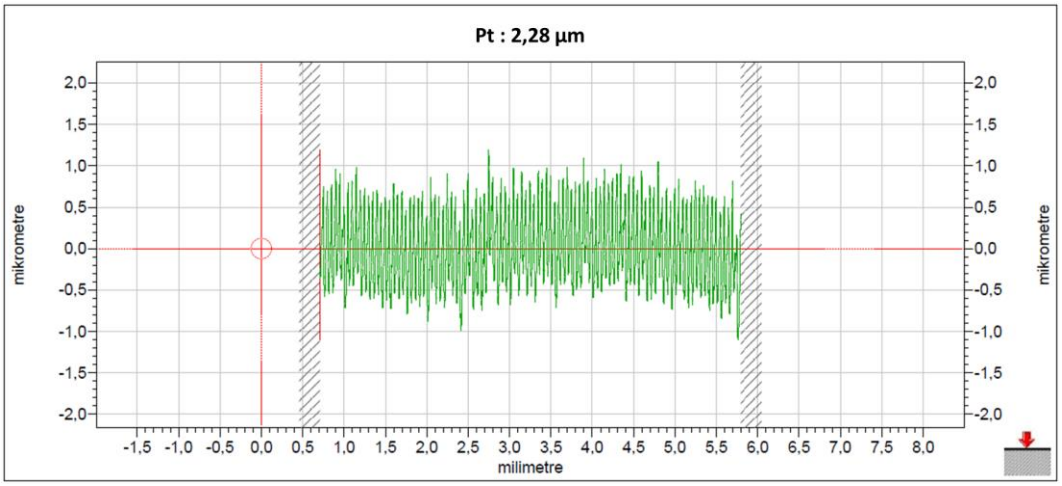
Şekil B-31 Dış Çap Tornalama Deney 16 - Ra



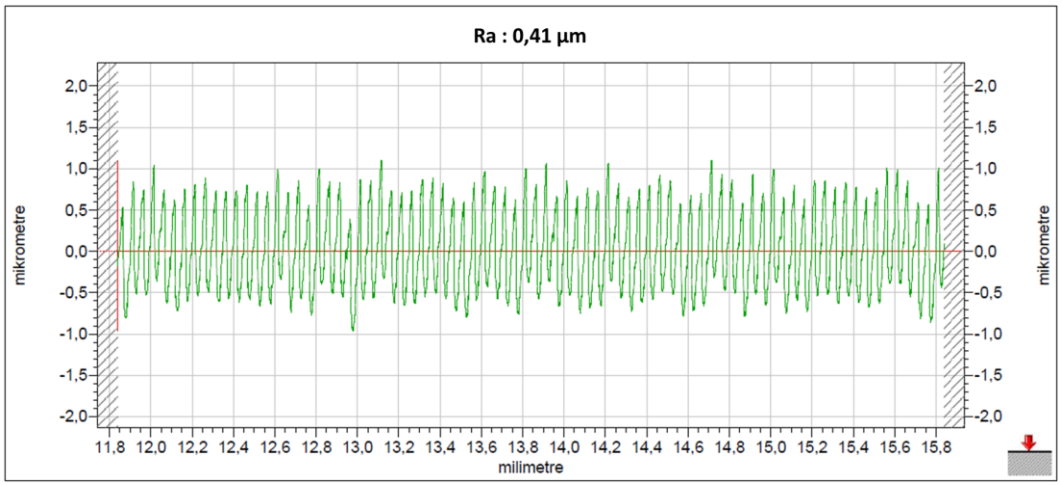
Şekil B-32 Dış Çap Tornalama Deney 16 - Pt



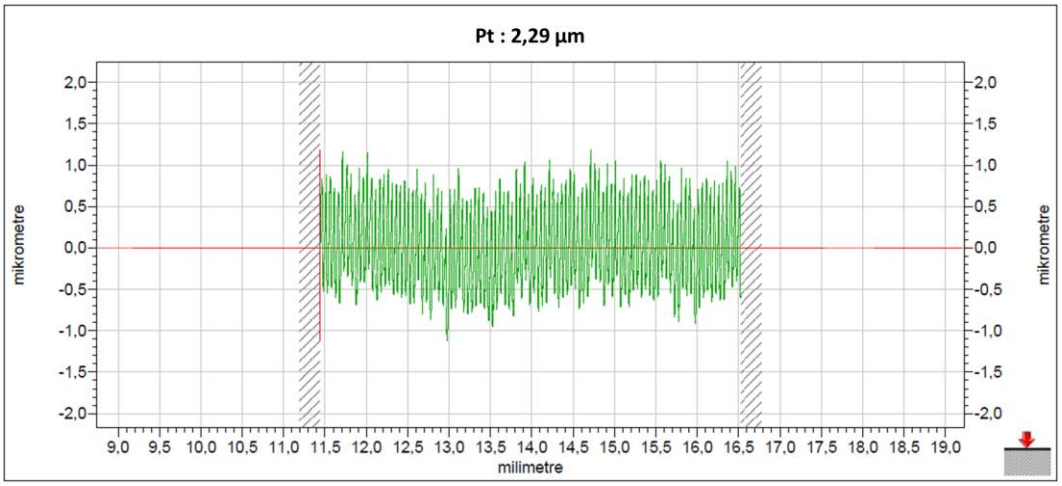
Şekil B-33 Dış Çap Tornalama Deney 17 - Ra



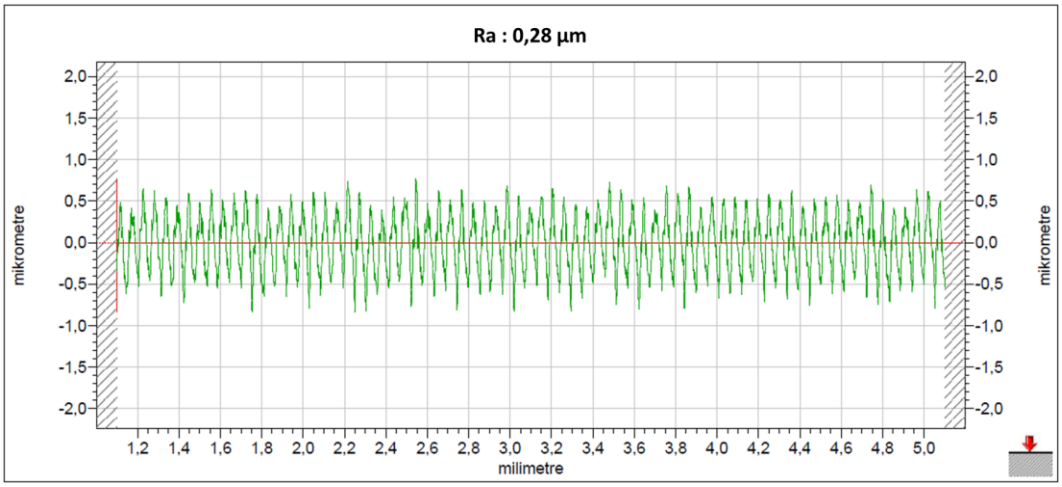
Şekil B-34 Dış Çap Tornalama Deney 17 - Pt



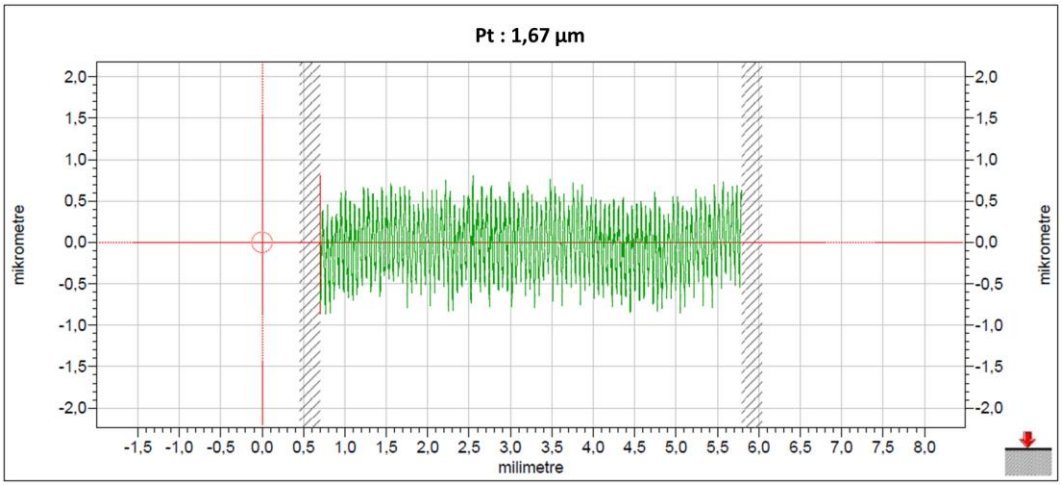
Şekil B-35 Dış Çap Tornalama Deney 18 - Ra



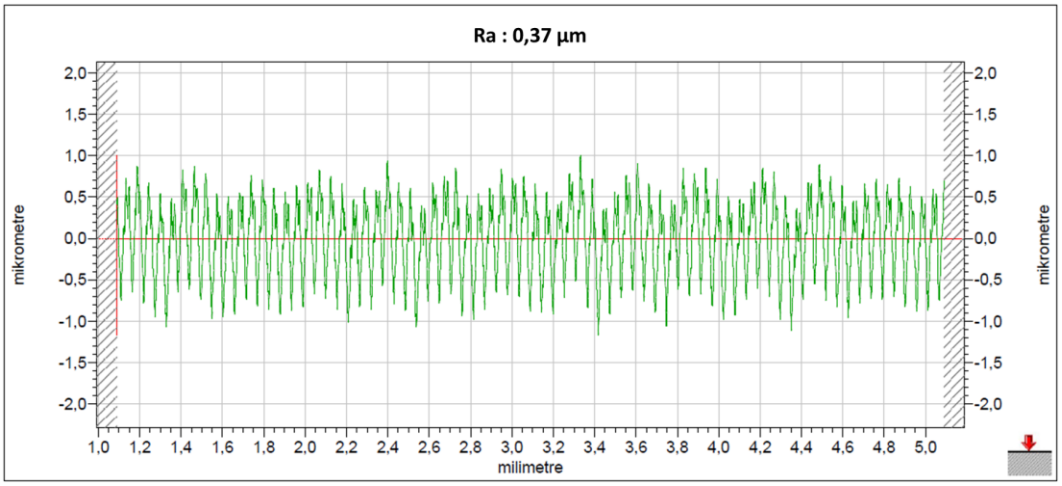
Şekil B-36 Dış Çap Tornalama Deney 18 - Pt



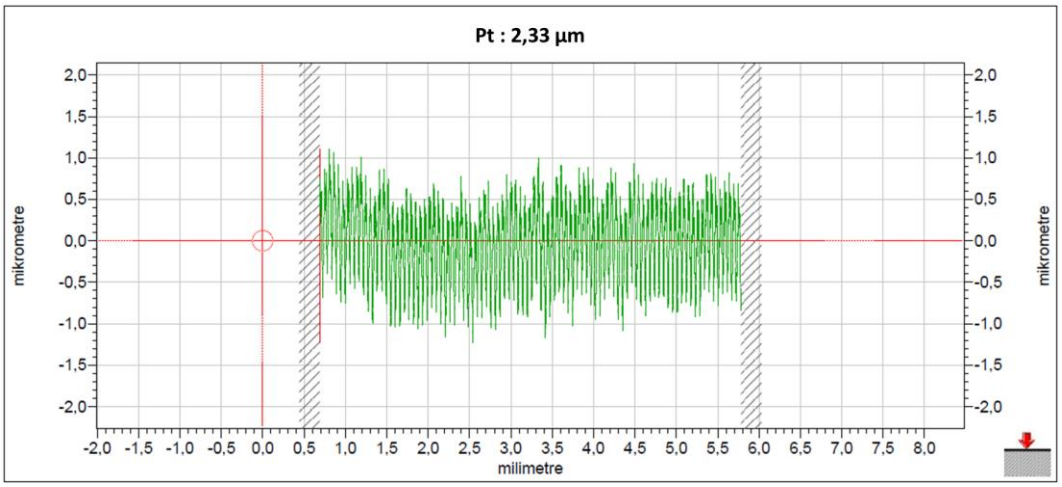
Şekil B-37 Dış Çap Tornalama Deney 19 - Ra



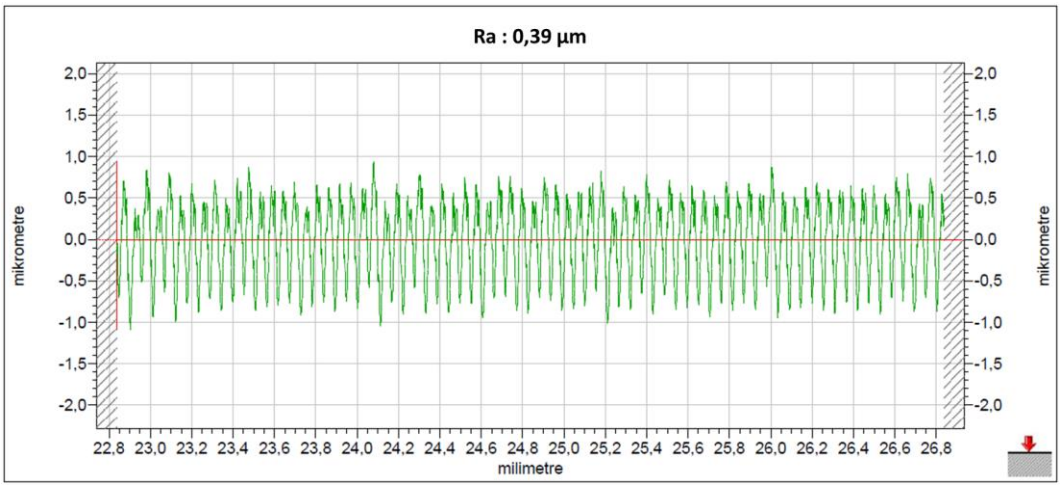
Şekil B-38 Dış Çap Tornalama Deney 19 - Pt



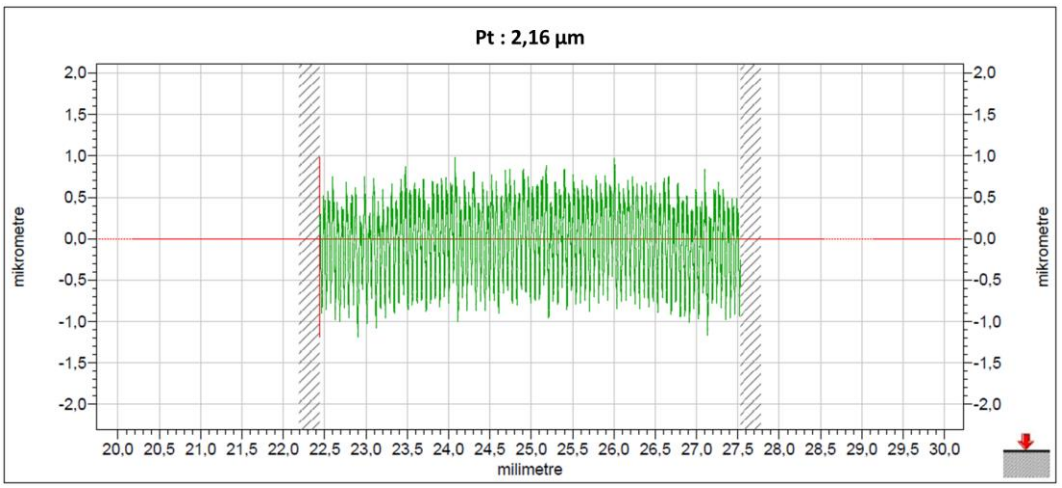
Şekil B-39 Dış Çap Tornalama Deney 20 - Ra



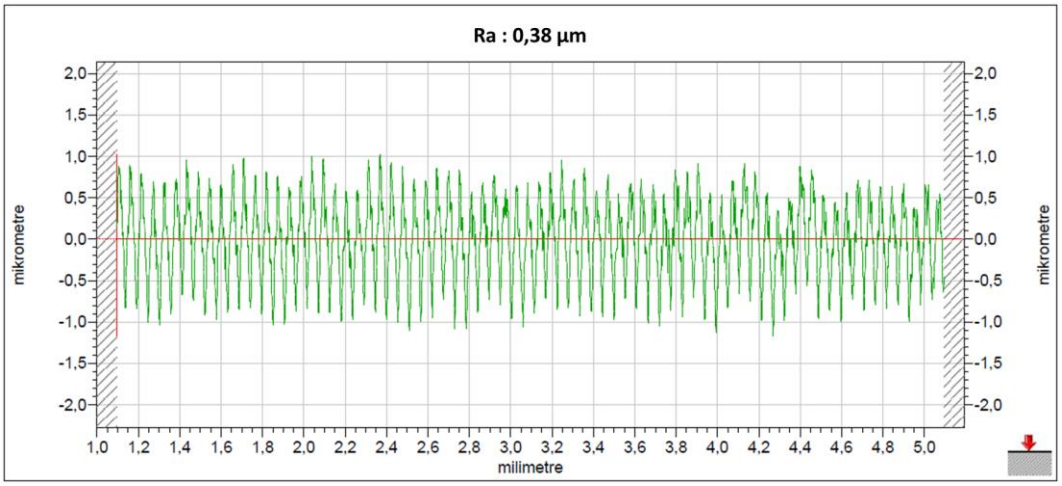
Şekil B-40 Dış Çap Tornalama Deney 20 - Pt



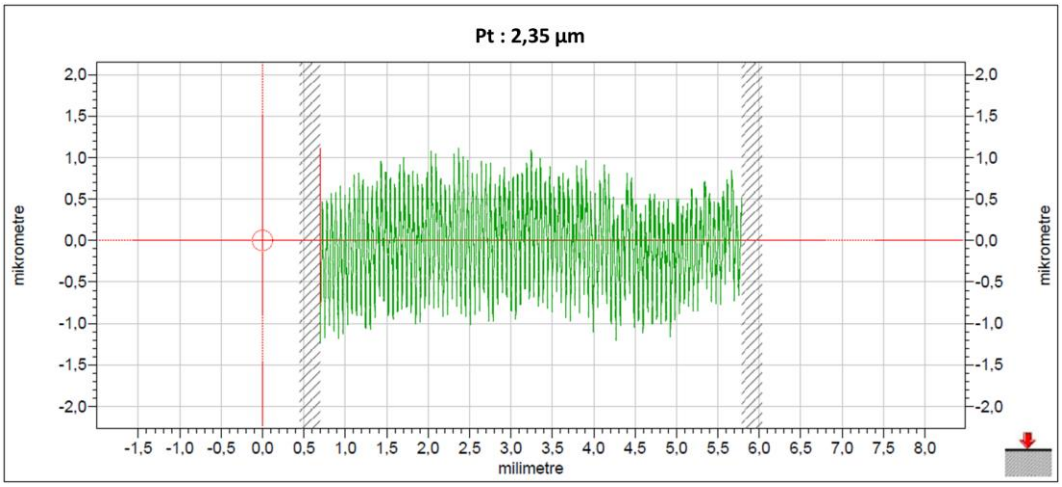
Şekil B-41 Dış Çap Tornalama Deney 21 - Ra



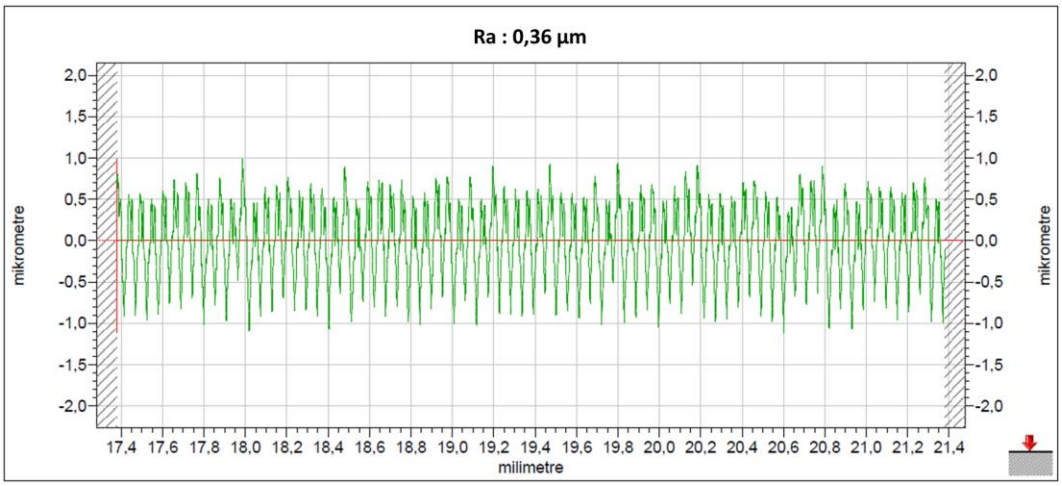
Şekil B-42 Dış Çap Tornalama Deney 21 - Pt



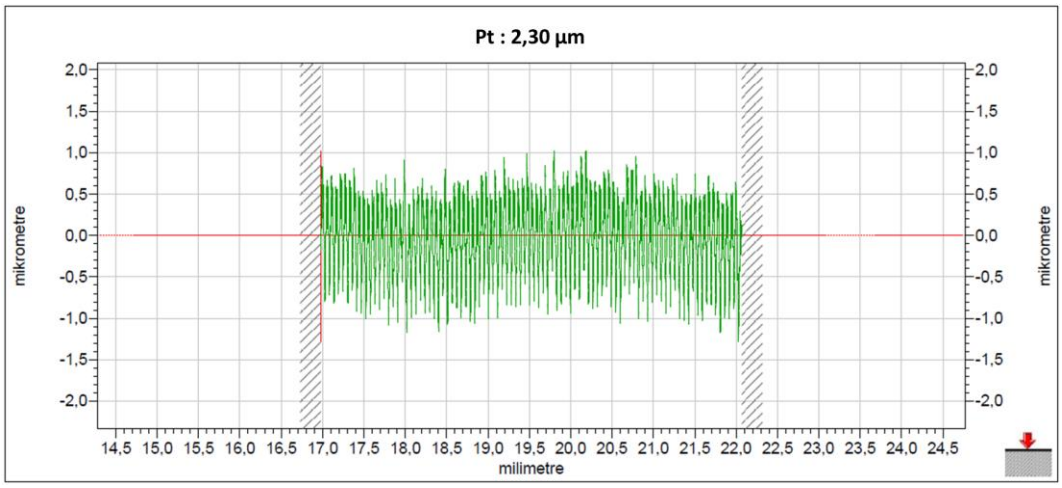
Şekil B-43 Dış Çap Tornalama Deney 22 - Ra



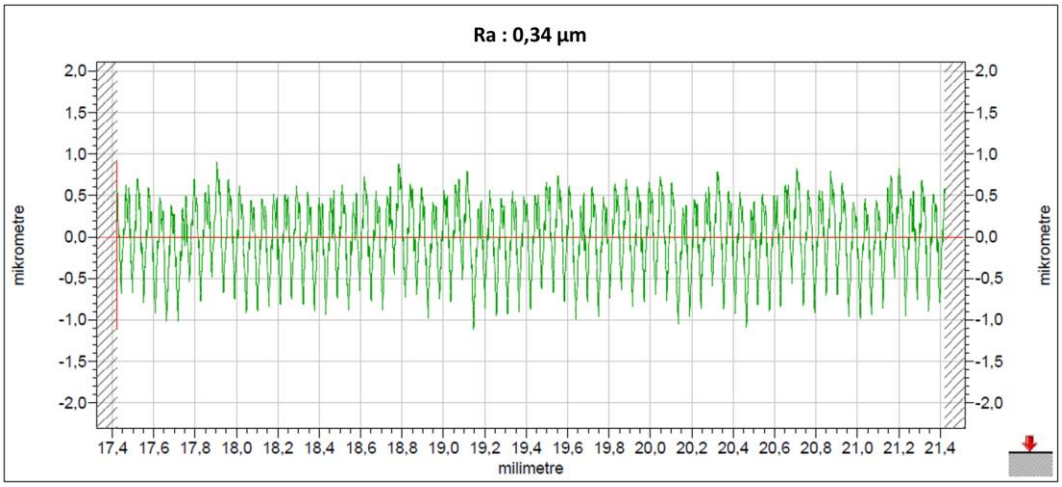
Şekil B-44 Dış Çap Tornalama Deney 22 - Pt



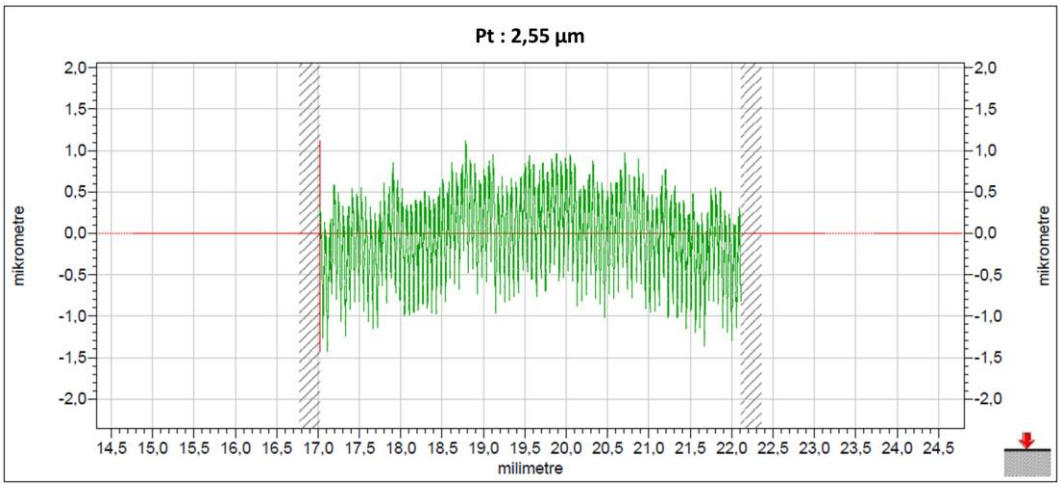
Şekil B-45 Dış Çap Tornalama Deney 23 - Ra



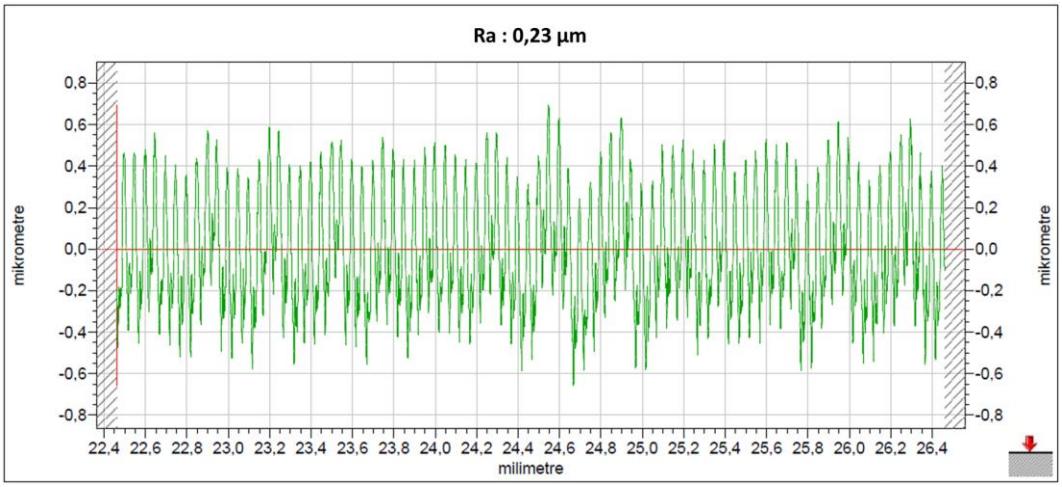
Şekil B-46 Dış Çap Tornalama Deney 23 - Pt



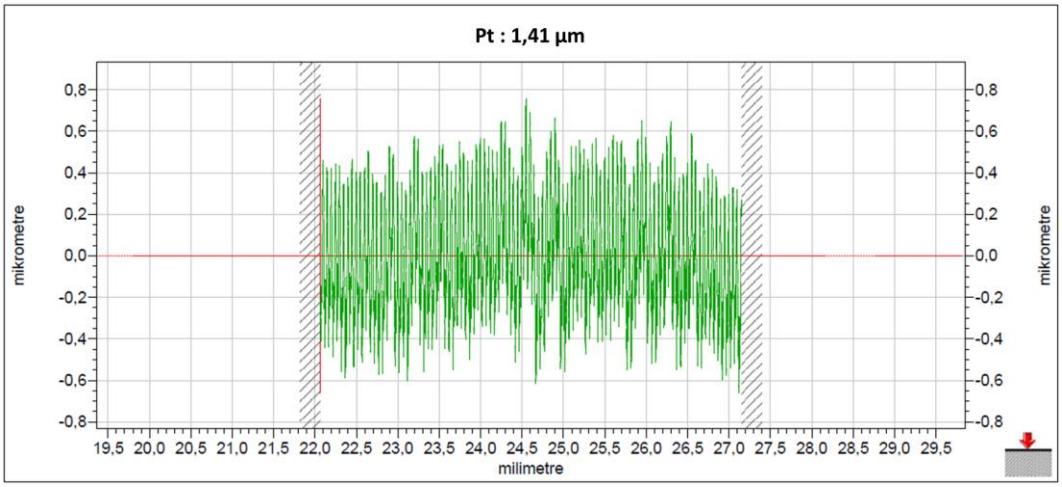
Şekil B-47 Dış Çap Tornalama Deney 24 - Ra



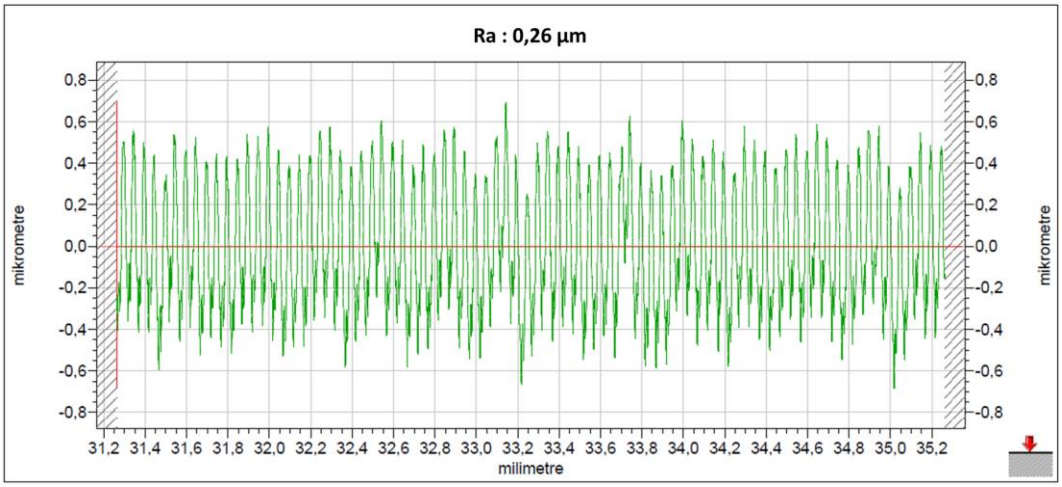
Şekil B-48 Dış Çap Tornalama Deney 24 - Pt



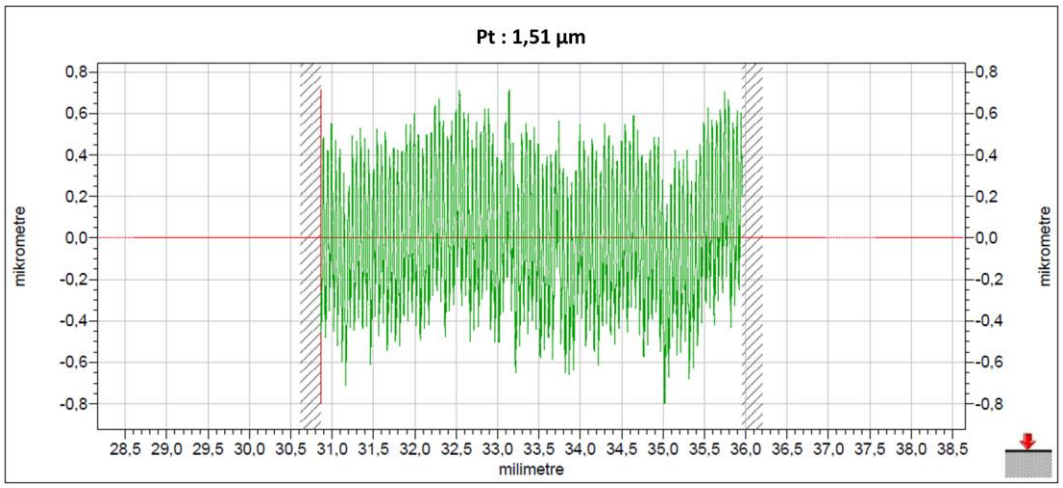
Şekil B-49 Dış Çap Tornalama Deney 25 - Ra



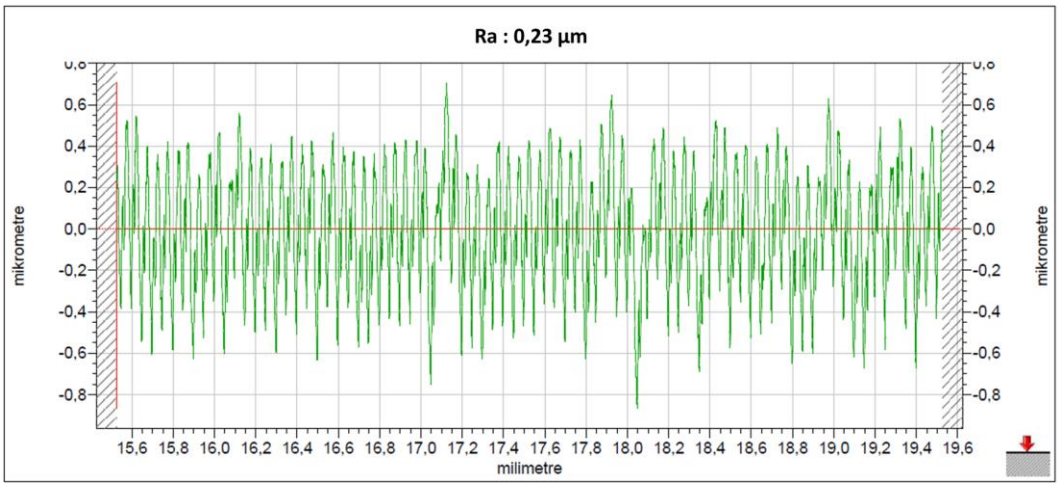
Şekil B-50 Dış Çap Tornalama Deney 25 - Pt



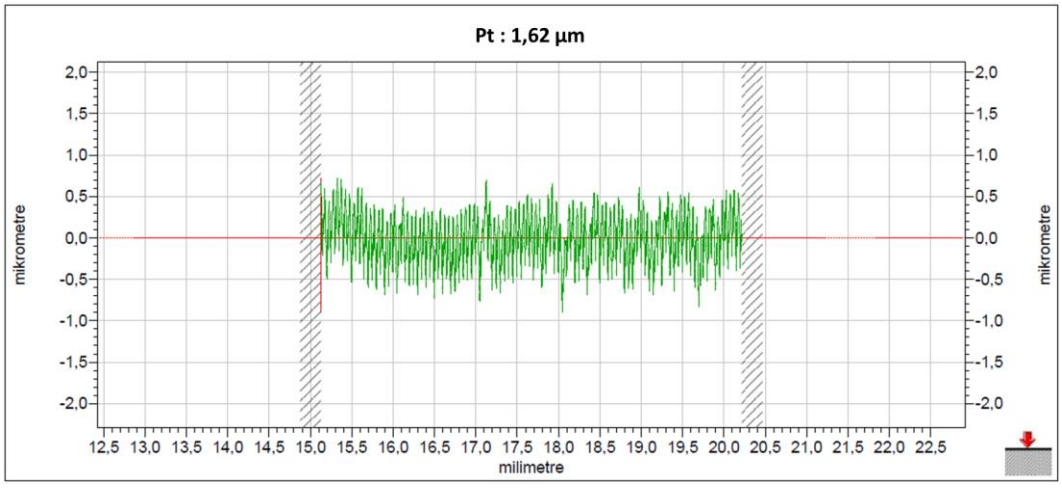
Şekil B-51 Dış Çap Tornalama Deney 26 - Ra



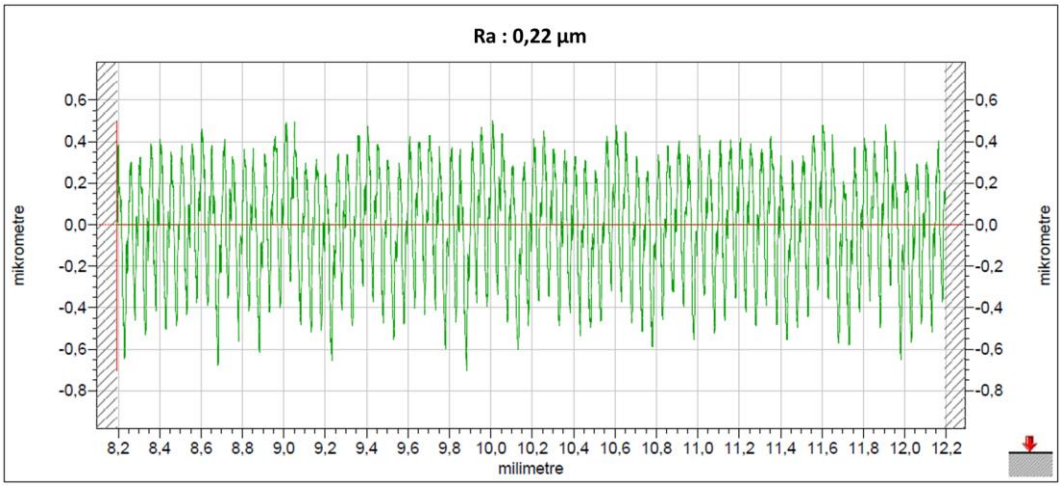
Şekil B-52 Dış Çap Tornalama Deney 26 - Pt



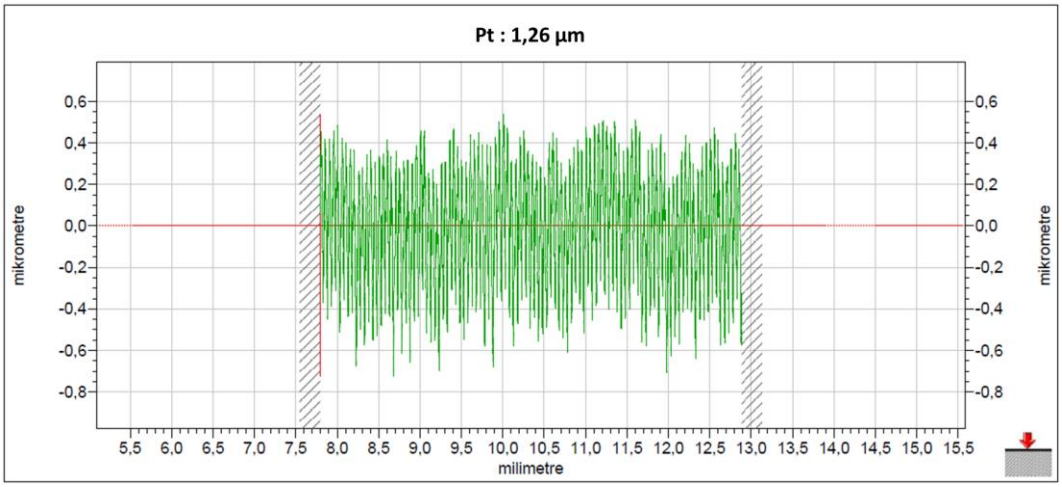
Şekil B-53 Dış Çap Tornalama Deney 27 - Ra



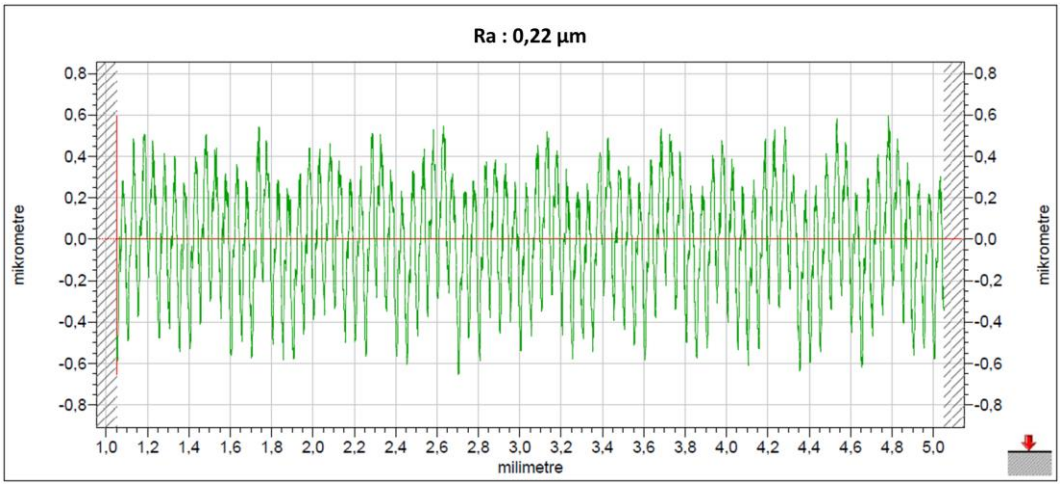
Şekil B-54 Dış Çap Tornalama Deney 27 - Pt



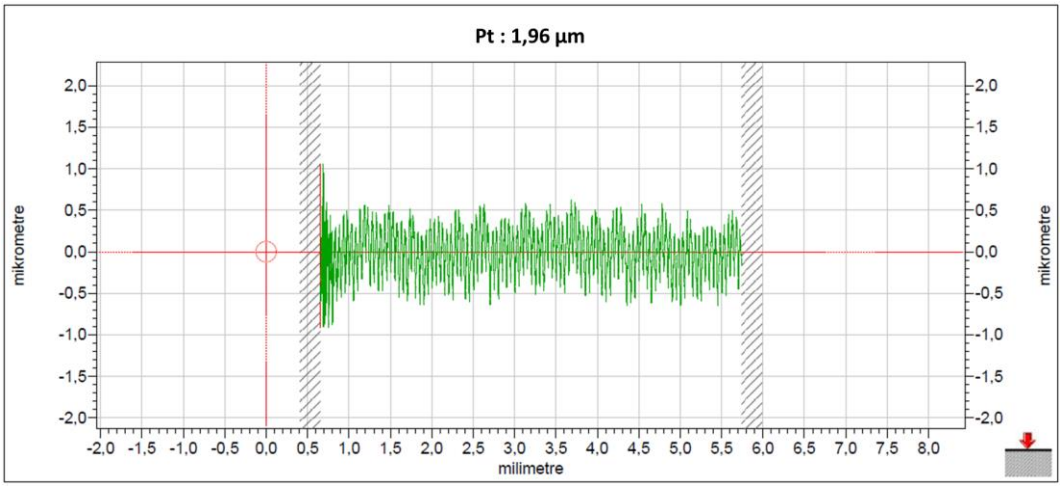
Şekil B-55 Dış Çap Tornalama Deney 28 - Ra



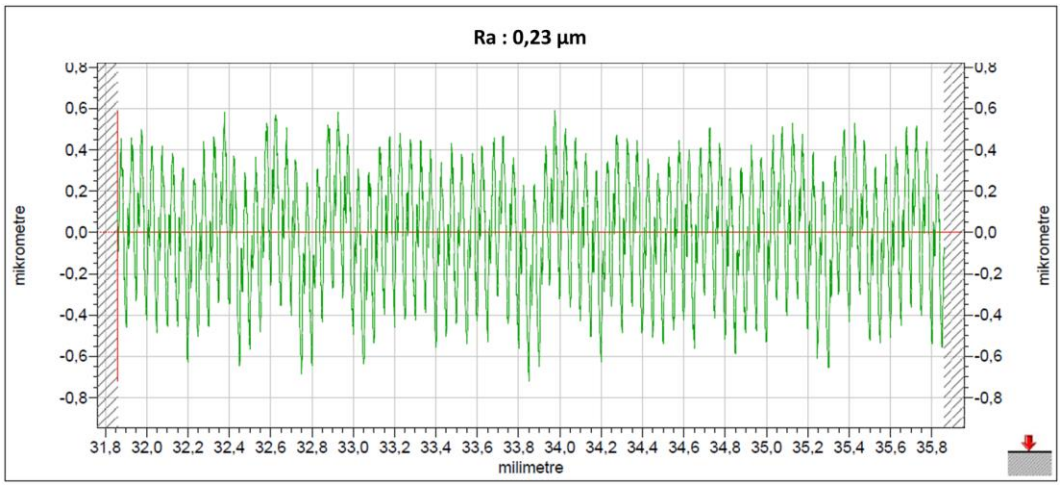
Şekil B-56 Dış Çap Tornalama Deney 28 - Pt



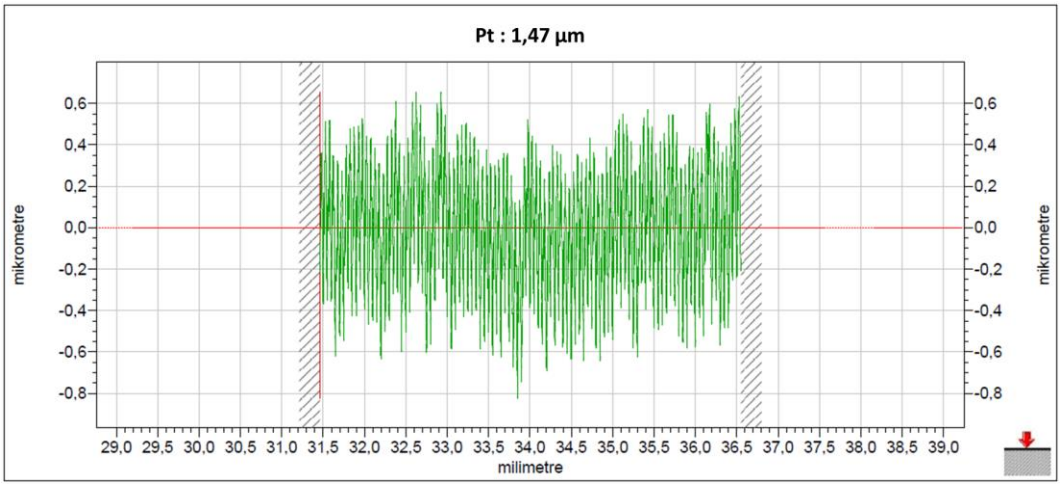
Şekil B-57 Dış Çap Tornalama Deney 29 - Ra



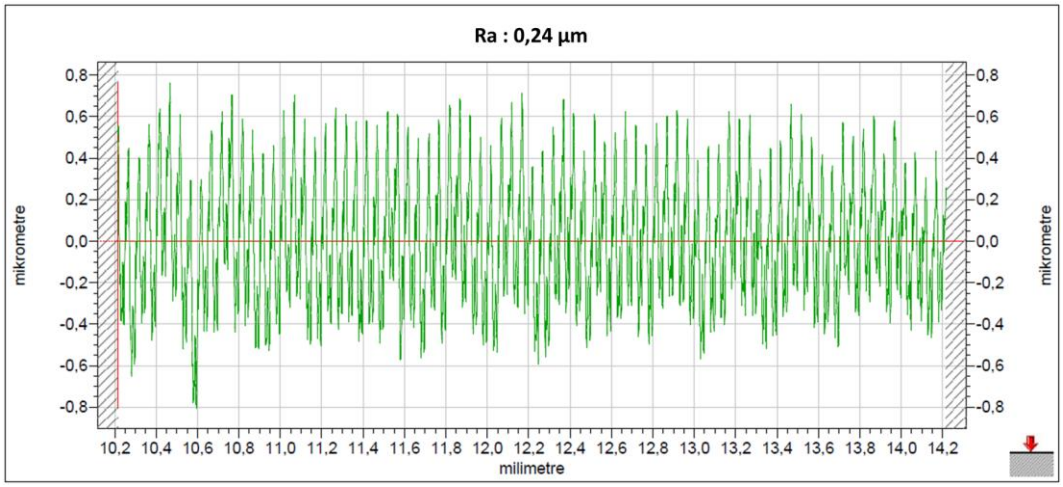
Şekil B-58 Dış Çap Tornalama Deney 29 - Pt



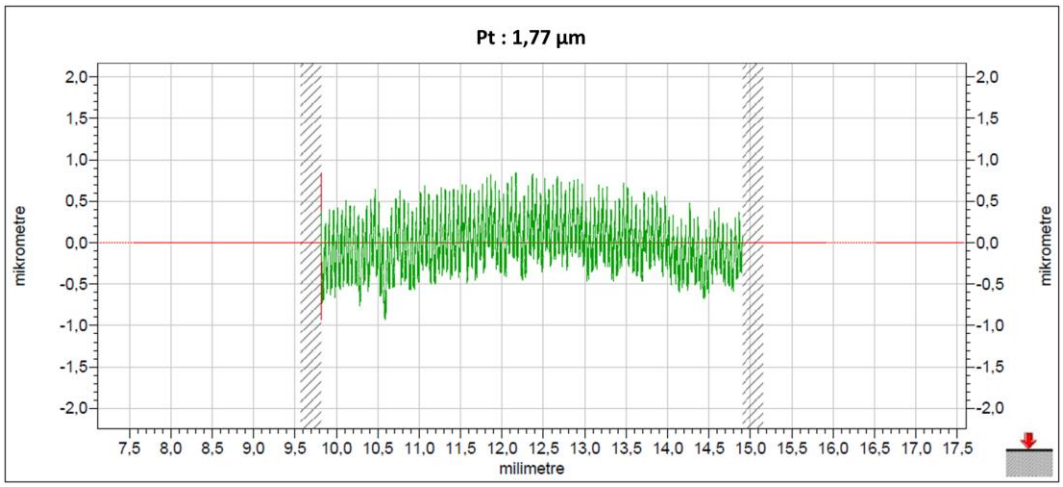
Şekil B-59 Dış Çap Tornalama Deney 30 - Ra



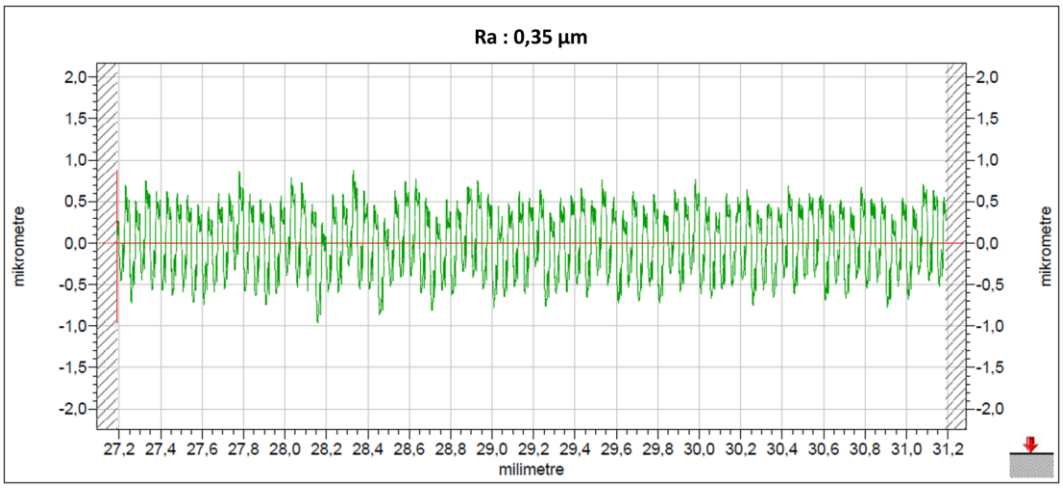
Şekil B-60 Dış Çap Tornalama Deney 30 - Pt



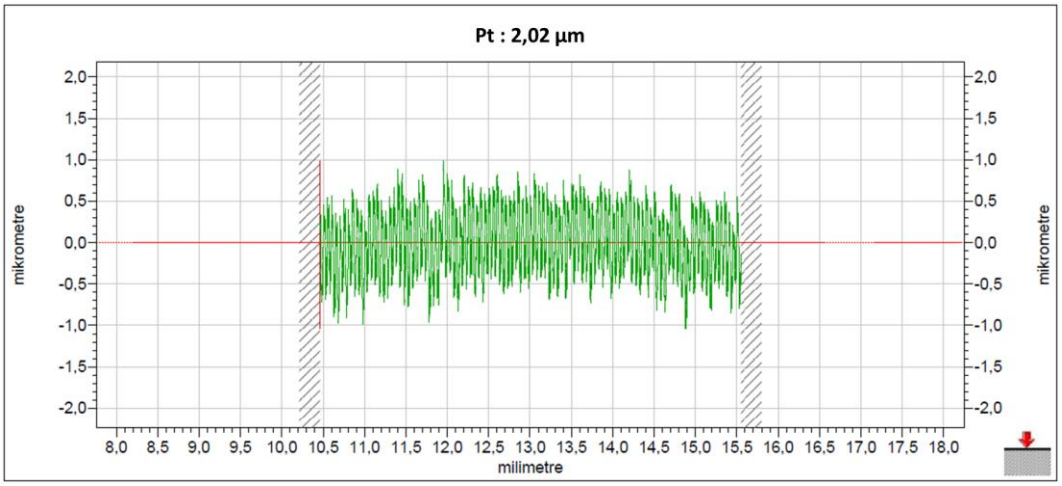
Şekil B-61 Dış Çap Tornalama Deney 31 - Ra



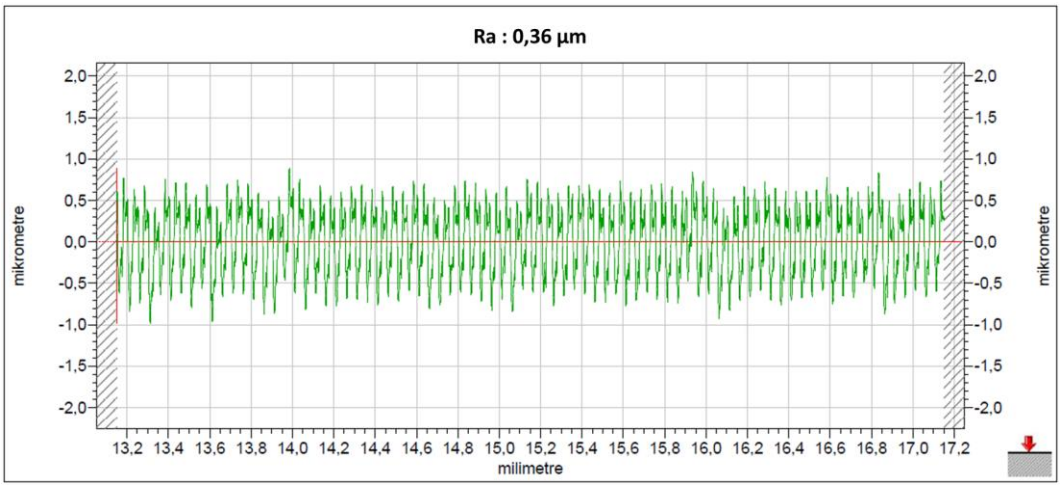
Şekil B-62 Dış Çap Tornalama Deney 31 – Pt



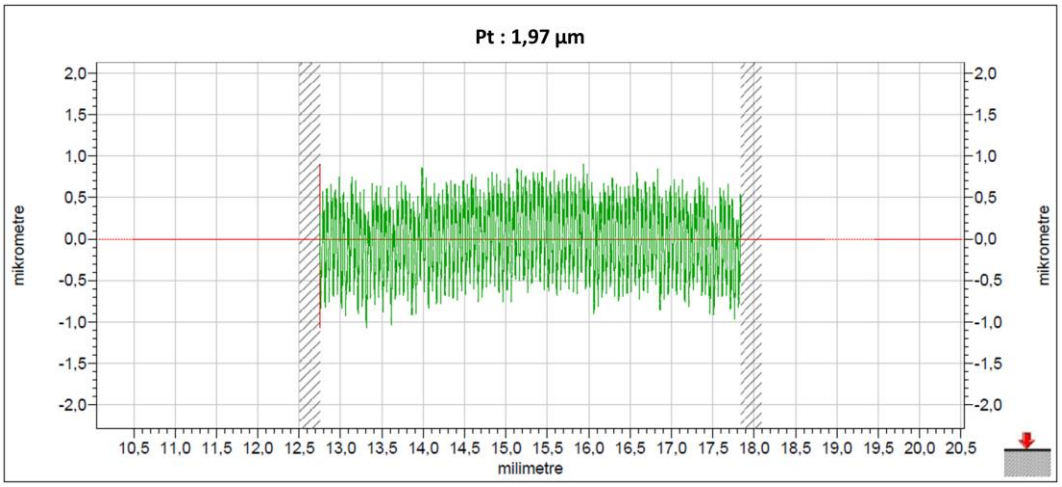
Şekil B-63 Dış Çap Tornalama Deney 32 - Ra



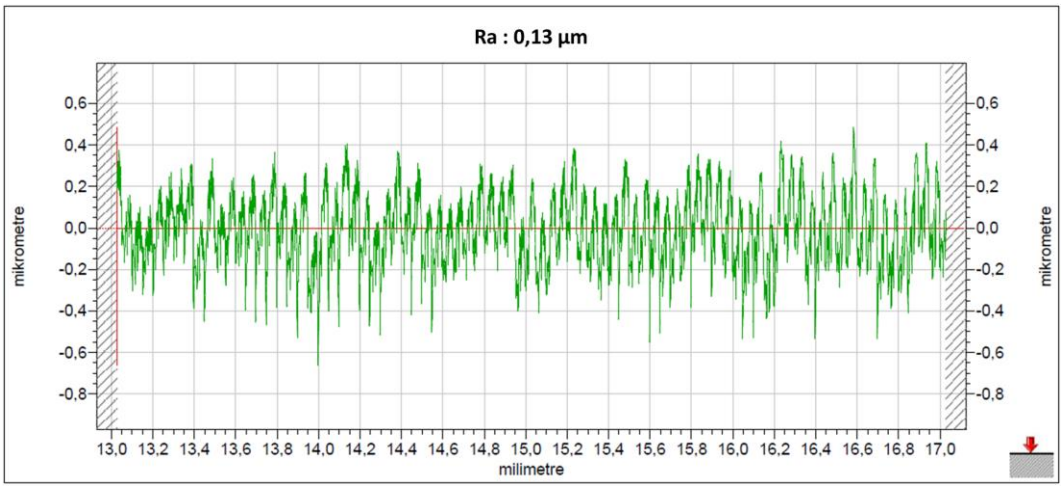
Şekil B-64 Dış Çap Tornalama Deney 32 - Pt



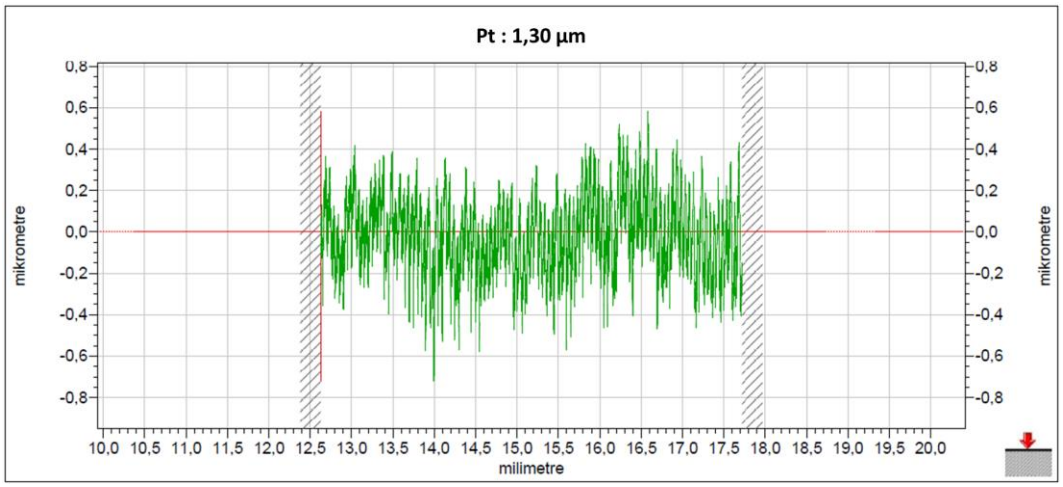
Şekil B-65 Dış Çap Tornalama Deney 33 - Ra



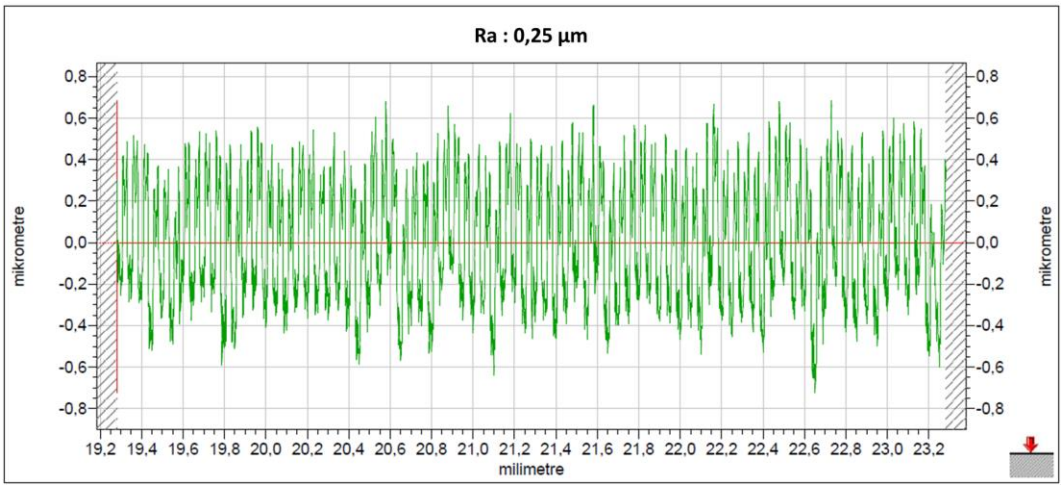
Şekil B-66 Dış Çap Tornalama Deney 33 - Pt



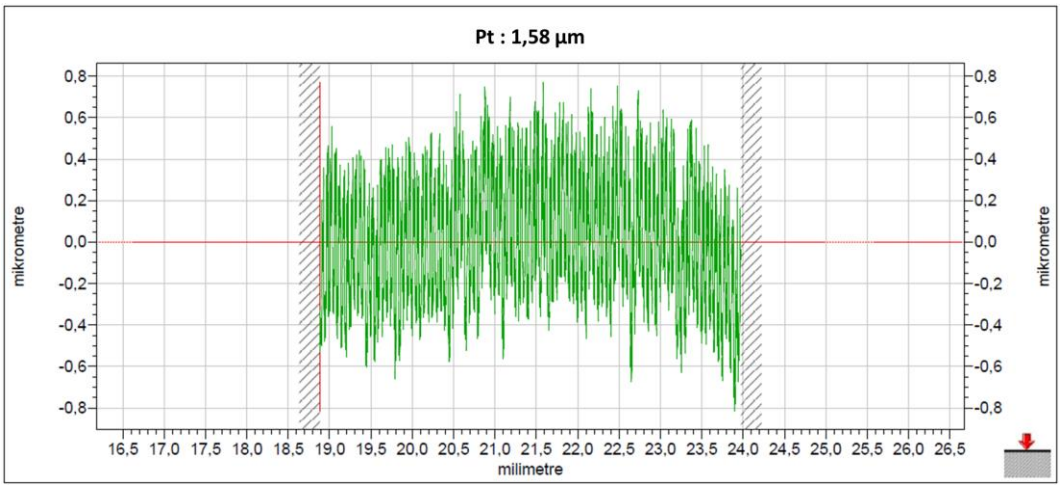
Şekil B-67 Dış Çap Tornalama Deney 34 - Ra



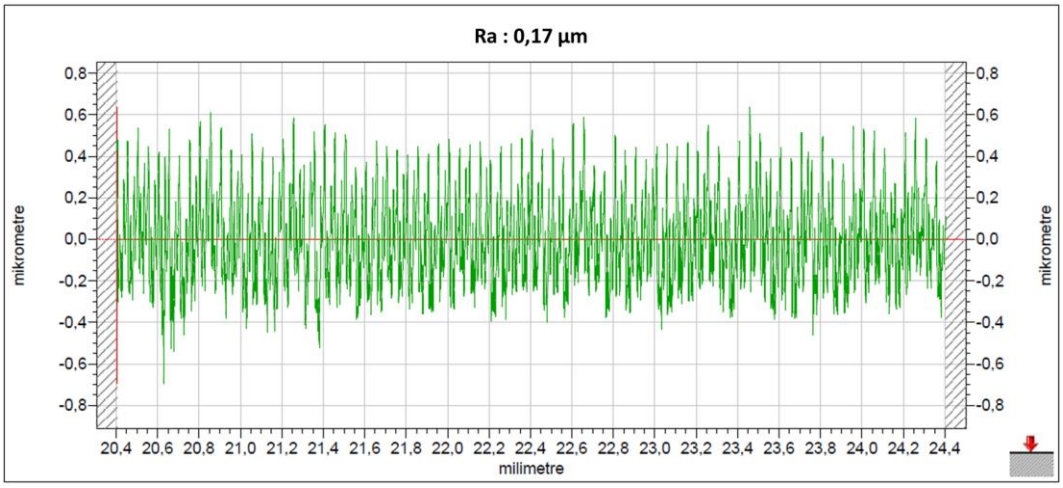
Şekil B-68 Dış Çap Tornalama Deney 34 - Pt



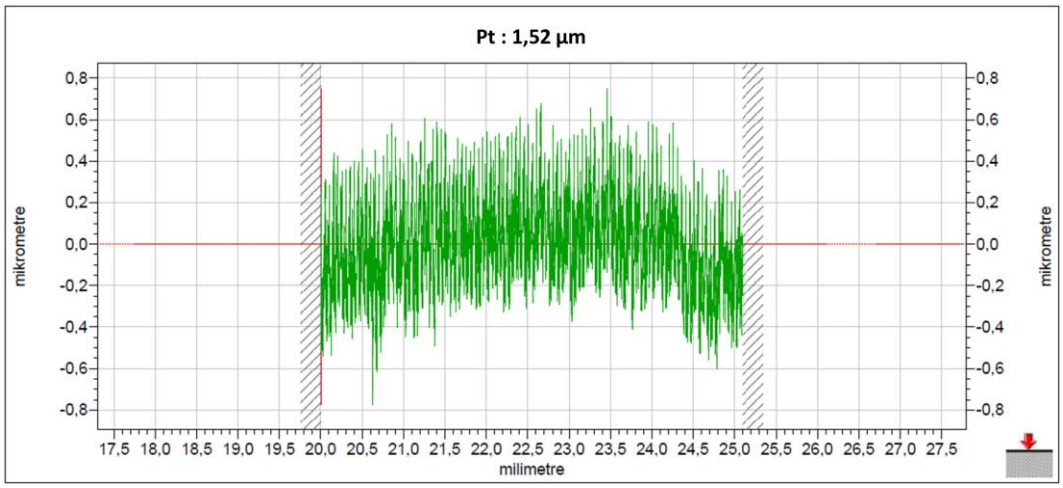
Şekil B-69 Dış Çap Tornalama Deney 35 - Ra



Şekil B-70 Dış Çap Tornalama Deney 35 - Pt



Şekil B-71 Dış Çap Tornalama Deney 36 - Ra



Şekil B-72 Dış Çap Tornalama Deney 36 - Pt