



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

AISI 4340 ÇELİKLERE UYGULANAN
NİTRASYON İŞLEMİNİN BOYUT VE
GEOMETRİK TOLERANSINA
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Celalettin AKYÜZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Celalettin AKYÜZ tarafından hazırlanan “AISI 4340 Çeliklere Uygulanan Nitrasyon İşleminin Boyut ve Geometrik Toleransına Etkisinin Araştırılması” adlı tez çalışması 24/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Murat DİLMEÇ
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Danışman

Doç Dr. Mevlüt TÜRKÖZ
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Celalettin AKYÜZ

Tarih:06.01.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AISI 4340 ÇELİKLERE UYGULANAN NİTRASYON İŞLEMİNİN BOYUT VE GEOMETRİK TOLERANSINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Celalettin AKYÜZ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ
2024, 62 Sayfa

Jüri
Doç. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ
Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN
Prof. Dr. Murat DİLMEÇ

AISI 4340 ıslah çeliği, yüksek mukavemet, tokluk ve aşınma direnci özellikleri sayesinde havacılık, otomotiv ve savunma sanayi gibi birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu malzemenin yüzey sertliğini artırmak, aşınma direncini yükseltmek ve yorulma dayanımını iyileştirmek için nitrasyon yüzey sertleştirme işlemi önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, nitrasyon işlemi sırasında boyutsal ve geometrik değişimlerin oluşması, hassas toleranslarla çalışan sistemlerde olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Bu çalışmada, AISI 4340 çeliklerine uygulanan nitrasyon işleminin, parçaların boyut, geometrik tolerans, yüzey pürüzlülüğü, yüzey sertliği ve difüzyon derinliği ile beyaz tabaka kalınlığına etkileri incelenmiştir. Araştırmada, üç farklı geometrik forma sahip toplam 18 adet numune kullanılmıştır. Her bir geometriden üç numuneye 6 saat, diğer üç numuneye ise 12 saat nitrasyon işlemi uygulanmıştır. Parçalar üzerinde yapılan ölçümler neticesinde boyut toleransında 6 saatlik nitrasyon işleminde 3,5 ila 6 µm aralığında, 12 saatlik nitrasyon işleminde ise 15 ila 19 µm aralığında değişim meydana gelmiştir. Bu değişimin IT5 ve IT9 aralığındaki tolerans derecelerinden çoğunda tolerans dışına çıkılmasına neden olduğu veya tolerans derecelerini değer olarak 10 µm'nin altına düşürerek imalatı zorlaştırdığı bulunmuştur. Nitrasyon işlemi simetriklik toleransını olumsuz yönde etkilerken, paralellik ve eş merkezlilik toleransına etki etmemiştir. Nitrasyon süresi arttıkça yüzey sertliğinin azaldığı görülürken nitrasyon süresinin artması difüzyon derinliğini ve beyaz tabaka kalınlığını artırmıştır.

Anahtar Kelimeler: AISI 4340, Beyaz Tabaka, Geometrik Tolerans, Nitrasyon, Yüzey Pürüzlülüğü

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF NITRIDING PROCESS ON THE DIMENSIONAL AND GEOMETRIC TOLERANCES OF AISI 4340 STEELS

Celalettin AKYÜZ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ

2024, 62 Pages

**Jury
Assoc. Prof. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ
Assoc. Prof. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN
Prof. Dr. Murat DİLMEÇ**

The AISI 4340 quenched and tempered steel is widely used in various industries, such as aerospace, automotive, and defense, due to its high strength, toughness, and wear resistance properties. Nitriding surface hardening processes plays a significant role in increasing the surface hardness of this material, enhancing its wear resistance, and improving its fatigue strength. However, dimensional and geometric changes that occur during the nitriding process can adversely affect systems operating with precise tolerances. In this study, the effects of the nitriding process applied to AISI 4340 steel on part dimensions, geometric tolerances, surface roughness, surface hardness, diffusion depth, and white layer thickness were examined. A total of 18 samples with three different geometric forms were used in the research. Six hours of nitriding was applied to three samples from each geometry, while 12 hours of nitriding was applied to the other three samples. Measurements conducted on the parts revealed dimensional changes ranging from 3.5 to 6 μm for the 6-hour nitriding process and from 15 to 19 μm for the 12-hour nitriding process. It was found that these changes caused most tolerance grades in the IT5 to IT9 range to fall out of tolerance or reduced tolerance grades to values below 10 μm , making manufacturing more challenging. While the nitriding process negatively affected symmetry tolerance, it did not affect parallelism or concentricity tolerances. As the nitriding duration increased, surface hardness decreased; however, the increase in nitriding duration also led to an increase in diffusion depth and white layer thickness.

Keywords: AISI 4340, Geometric Tolerance, Nitriding, Surface Roughness, White Layer

ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında bana destek olan ve yol gösteren gerek teknik bilgi birikimi gerekse akademik rehberliği ile çalışmanın her aşamasında büyük katkı sağlayan değerli hocam Doç. Dr. Mevlüt TÜRKÖZ'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Numunelerin hazırlanmasında destek sağlayan Ağaoğlu Havacılık ve Savunma Sanayi LTD. ŞTİ.'ne ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

CMM ölçümlerinde desteklerini esirgemeyen İstanbul Silah A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Nitrasyon işleminde yardımcı olan Alpha Metalurji A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Metalografik incelemede laboratuvarının kullanılmasına müsaade eden Teknotest Test Merkezi'ne teşekkür ederim.

Bu süreçte maddi manevi desteklerini her zaman hissettiğim babam İsmail AKYÜZ, annem Şevika AKYÜZ ve kardeşlerime, özellikle sabır ve anlayışlarıyla beni motive eden eşim Feyzanur ŞAŞMAZ AKYÜZ ve kızım Zeynep Asya AKYÜZ'e kalbi şükranlarımı sunarım.

Celalettin AKYÜZ
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
2.1. Sertleştirme İşlemleri ve Etkileri	2
2.2. Isıl İşlemlerin Parçaların Boyut Toleransına ve Yüzey Kalitesine Etkisi	6
3. MATERYAL VE YÖNTEM	18
3.1. Materyal	18
3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması	18
3.3. Parçaların Talaşlı İmalat Yöntemiyle Üretilmesi ve Taşlanması	20
3.4. Parçaların Ölçüm İşlemleri	22
3.5. Parçalara Nitrasyon İşlemi Uygulanması	25
3.6. Nitrasyon Tabakasının Görüntülenmesi ve Ölçümü.....	27
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA	32
4.1. Parçaların Sertlik Değerine Nitrasyon İşleminin Etkisi.....	32
4.2. Nitrasyon İşleminin Yüzey Pürüzlüğüne Etkisi.....	36
4.3. Nitrasyon İşleminin Boyut ve Geometrik Toleransa Etkisi.....	39
4.3.1. Düz prizmatik parça.....	39
4.3.2. Kanallı prizmatik parça.....	43
4.3.3. Silindirik parça.....	46
4.4. Nitrasyon İşleminin Nitrasyon Derinliğine Etkisi	50
4.5. Nitrasyon İşleminin Beyaz Tabaka Kalınlığına Etkisi	53
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
5.1 Sonuçlar	59
5.2 Öneriler	60
KAYNAKLAR	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

mm	: Milimetre
°C	: Santigrad Derece
µm	: Mikrometre
RSD-C	: Rockwell Sertlik Değeri
HV	: Vickers Sertlik Değeri
NH ₃	: Amonyak
Ra	: Yüzey pürüzlülük parametresi
SiC	: Silisyum Karbür
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit

Kısaltmalar

AISI	: American Iron and Steel Institute
CMM	: Coordinate Measurement Machine
CNC	: Computer Numeric Control

1. GİRİŞ

Günümüz endüstriyel uygulamalarında, yüksek mukavemetli ve dayanıklı malzemelerin kullanımı giderek daha önemli hale gelmektedir. Özellikle, kritik bileşenlerin uzun ömürlü ve güvenilir olabilmesi için malzemelerin mekanik özelliklerinin yanı sıra yüzey özelliklerinin de iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, AISI 4340 çeliği yüksek dayanım, tokluk, aşınma ve yorulma direnci özellikleri nedeniyle, havacılık, otomotiv ve savunma sanayi başta olmak üzere pek çok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle, namli ve benzeri yüksek performans gerektiren parçaların üretiminde tercih edilen bir malzeme olan AISI 4340 çeliği, güçlü yapısal özelliklerinin yanı sıra, yüzey sertliğinin artırılması gereken durumlarda da önemli bir potansiyel sunmaktadır.

AISI 4340 çeliğinin yüzey sertliğini ve dayanıklılığını artırmak amacıyla uygulanan çeşitli yüzey iyileştirme yöntemlerinden biri de **nitrasyon** işlemidir. Nitrasyon, çeliğin yüzeyine azot iyonlarının difüzyonunu sağlayarak, yüzeyde sert bir nitrür tabaka oluşturan termokimyasal bir işlemdir. Bu işlem, malzemenin aşınma direncini artırırken, aynı zamanda yorulma dayanımını da iyileştirebilmektedir. Ancak, nitrasyon işlemi sırasında yüzeyde meydana gelen değişiklikler, boyutsal ve geometrik toleranslarda sapmalara yol açabilmektedir. Bu da özellikle hassas toleranslarla çalışan sistemlerde, parçaların uyumlu bir şekilde çalışmasını zorlaştırabilir.

Çeliklerin nitrasyon işlemine tabi tutulması, yüzey sertliğinin artırılması ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinin yanı sıra, boyutsal değişimlerin ve geometrik toleransların da kontrol altında tutulması gerekliliğini doğurur. Bu bağlamda, bu çalışmanın amacı, **AISI 4340 çeliklerine uygulanan nitrasyon işleminin**, parçaların boyut ve geometrik toleransları üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde incelemektir. Ayrıca, nitrasyon işleminin **yüzey pürüzlülüğü** üzerindeki etkileri de bu çalışmanın önemli bir odak noktasıdır.

Bu tez, AISI 4340 çeliği üzerinde nitrasyon işleminin etkilerini araştırarak, hem endüstriyel uygulamalar için değerli bilgiler sunmayı hem de literatürdeki boşlukları doldurmayı hedeflemektedir. Çalışmada, farklı işlem sürelerine ve geometrik yapılara sahip numuneler üzerinde yapılan deneysel analizler, nitrasyon sürecinin mekanik ve yüzey özelliklerine olan etkilerini ortaya koymaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

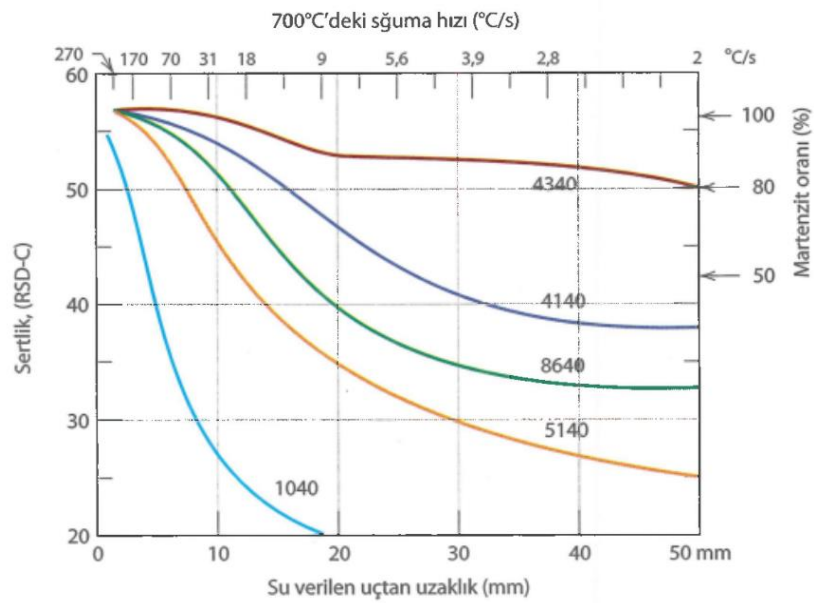
2.1. Sertleştirme İşlemleri ve Etkileri

Günümüzde teknolojinin gelişmesi ve makineleşmeyle birlikte metal malzeme kullanımı önemli oranda artmıştır. Metal malzemelerin kullanımında, çalışma şartlarına göre malzemenin ham haline nazaran mekanik özelliklerin iyileştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Başlıca mekanik özellikler çekme-basma dayanımı, sertlik, darbe dayanımı, kırılma tokluğu, yorulma dayanımı ve sürünme özellikleridir. İstenilen mekanik özellik türü iyileştirmesine göre farklı ısı işlemlere başvurulur. Isıl işlem kısaca; çeliklerin istenilen mikro yapıyı ve mekanik özellikleri kazanması için kontrollü ısıtma ve soğutma işlemidir.

Isıl işlemler çoğunlukla mühendislik alaşımı olan çelik malzemelere uygulanır. Yüksek dayanımlı çelikler için mekanik özelliklerin en iyi kombinasyonu malzemenin mikro yapısındaki martenzitik yapının büyük oranda ve parça kesitinin tamamında gözlenmesiyle oluşur. Çeliklerde martenzitik yapının oluşması geleneksel ısı işlem uygulamalarıyla yani çeliğin önce istenilen sıcaklığa getirilerek o sıcaklıkta bir süre bekletilmesi, son olarak da su, yağ veya hava gibi ortamlarda hızlı soğutulması ile gerçekleştirilir. Büyük parçaların su verilmesi esnasında tüm parça hacminin eş zamanda soğuması mümkün değildir. Her zaman parçanın merkezi parçanın yüzeyine göre geç soğur. Bu durum parçanın merkeziyle yüzeyinde farklı mikro yapılar ve buna bağlı olarak farklı özellikler oluşmasına neden olur. Bunun yanında parça kesitindeki farklı soğuma hızları parçada termal gerilmeler oluşturur. Bu gerilmelerin etkisiyle parça geometrisinde çarpılmalar meydana gelir. Parçanın geometrik değişimi bazen de ısı işlem sırasında faz dönüşümlerine bağlı olarak meydana gelen hacimsel değişikliklerden kaynaklanır.

Çeliğin hızlı soğutulması sonucu meydana gelen martenzitik yapının büyük oranda ve tüm kesitte oluşabilmesi sertleşebilme kabiliyeti olarak bilinir. Sertleşebilme kabiliyeti malzemenin sert cismin batmasına karşı gösterdiği direnç olan sertlik özelliğiyle karıştırılmamalıdır. Sertleşebilme kabiliyeti, malzemenin yüzeyinden merkezine olan soğuma farkının sebep olduğu sertlikteki düşüş miktarıyla ilgilidir. Özetle sertleşebilme kabiliyeti yüksek olan çelikler, martenzitik yapının parçanın yüzeyinde de merkezinde de eşit olarak dağıldığı böylece parça içinde de yüzeyde de yaklaşık olarak aynı sertlik değerlerinin oluştuğu çeliklerdir. Şekil 2.1’de karbon miktarları %0,4 olarak ağırlıkça aynı 5 çeliğin sertleşebilme kabiliyetleri gösterilmiştir (Callister ve Rethwisch,

2015). Bu çeliklerde kullanılan nikel, krom ve molibden gibi alaşım elementlerinin miktarına göre sertleşebilme kabiliyetleri farklılık göstermiştir. 5 çeliğin de başlangıçta yüzeyinde ölçülen sertlik değeri 57 RSD-C sertlik değerinde olacak şekilde aynıdır. Buradan yüzeydeki sertliğin çelikteki karbon miktarına bağlı olduğu ve hepsinde %0,4 karbon olduğu için yüzey sertliğinin değişmediği görülür. Malzemenin yüzeyinden merkezine gidildikçe basit karbonlu çelik olan 1040 çeliğindeki ani dikey düşüş diğer dört çeliğe nazaran sertleşebilme kabiliyetinin düşük olduğunu gösterir. Bu grafikte en iyi sertleşebilme kabiliyeti gösteren çelik 50 mm Jominy mesafesinde sertliğinde en az düşüş olan 4340'tır.



Şekil 2.1. Ağırlıkça %0,4 C içeren 1040-5140-8640-4140 ve 4340 çeliklerinin sertleşebilme eğrileri (Callister ve Rethwisch, 2015).

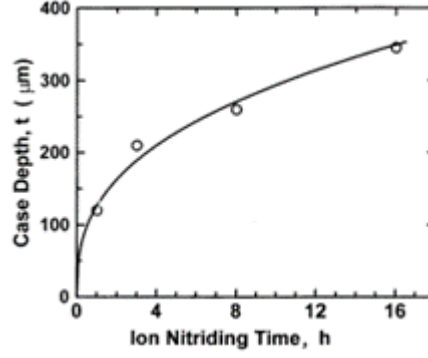
Bazı parçalarda çekirdeğe kadar sertleşme önemli iken bazı parçalarda sadece yüzeyin sertlik kazanması istenir. Bu tür parçalarda yüzeye karbon yayındırarak karbürler vasıtasıyla oluşturulan sertleştirme işlemi sementasyon, yüzeylerin hızla bölgesel olarak ısıtılıp soğutulma yoluyla sertleşme sağlayan indüksiyon ve yüzeye azot yayındırılarak meydana getirilen nitrürlerden sertlik kazanılmasını sağlayan nitrasyon işleminden yararlanır. Sementasyon ve nitrasyon, yüzey sertleştirme işlemleri olarak farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Sementasyon, derin sertleşme sağlar ve yüzeyin yüksek sertliğini artırarak aşınma ve yıpranmalara karşı direnç oluşturur (Bryson, 2014). Bu işlem genellikle otomatikleştirilebilir ve geniş parça boyutlarına uygulanabilir, ancak iç kısımların yumuşak kalması ve enerji ile zaman tüketimi gibi dezavantajlar da taşır. Nitrasyon ise daha ince bir yüzey sertliği oluşturur, aşınma ve korozyona karşı

dayanıklılığı artırır ve düşük sıcaklıkta yapıldığı için iç yapının bozulma riski düşer. Ayrıca, nitrasyon işlemi, yağlama gerektirmez ve yüzeyde oksitlenme veya karbürleşme oluşmaz (Forgeng, 2006). Ancak, nitrasyonun sağladığı sertlik derinliği sınırlıdır ve uygulama daha özel ekipmanlar ve dikkatli sıcaklık kontrolü gerektirir, bu da maliyetleri artırabilir. Sonuç olarak, sementasyon daha derin sertleşme isteyen durumlar için, nitrasyon ise ince ve dayanıklı yüzeyler için daha uygundur.

Nitrasyon işleminde demir nitrürleri veya alaşım nitrürlerinin çökmesini teşvik etmek için, ferritik kristal yapının azot ile düşük çözünürlüğünden yararlanılır (Dobrocky ve ark., 2020). Yani ferritik yapı, azot için nispeten düşük bir çözünürlük sunar. Bu durum, azot atomlarının çelik içerisinde serbestçe dolaşmaktansa, daha kararlı olan nitrür fazlarını oluşturmak için bir araya gelmelerini teşvik eder. Yüzeyde, genellikle kohezif bir nitrür tabakası (bağlayıcı tabaka) oluşur; bu tabaka, yüzeye belirli bir miktarda azot içeriği eklenmesiyle meydana gelir. Nitrürler, çelik matrisine eşit şekilde dağılır ve özellikle alaşımlı çeliklerde sertleşmeye yol açan bir difüzyon bölgesi oluşturur. Azot, demirin ostenit ferrit dönüşüm sıcaklığını 590 °C'ye kadar düşürdüğü için nitrürleme işlemleri genellikle bu sıcaklıkların altında yapılır (Smith, 2004).

Nitrürleme sıcaklığının alt sınırı 350 °C civarındadır, çünkü bu sıcaklığın altında azot difüzyonu, ekonomik ve teorik açıdan makul bir seviyeye ulaşmaz. Sıcaklık düştükçe, belirli bir sertlik derinliğine ulaşabilmek için gerekli nitrasyon süresi uzar. Nitrür tabakasının maksimum sertlik değeri yaklaşık 950-1000 HV'ye, tabaka derinliği ise 450-500 µm'ye kadar çıkabilir. Isıtma ve soğuma işlemleri yavaş gerçekleştiğinden ve malzemenin genelinde herhangi bir dönüşüm veya hacim değişikliği olmadığından, bu işlem sadece düşük bir deformasyon riski bulundurur. Nitrürleme işlemi sırasında azot atomları, çelik yüzeyine difüze olarak çelik bileşimindeki alüminyum, krom, vanadyum ve titanyum gibi elementlerle birleşerek çok sert ve ince bir nitrür tabakası oluşturur. Bu sayede çeliğin yorulma ömrü ve korozyon direnci önemli ölçüde artar. Seybolt (1969) tarafından yapılan çalışmalarda, bu mekanizmanın çeliğin yüzey sertliğini artırdığı belirtilmiştir. Ancak, alaşımsız çeliklerde nitrür oluşturu elementler bulunmadığından nitrürleme işlemiyle yüzey sertleştirilmesi sağlamak oldukça zordur (Dosset, 1991).

Şekil 2.2'de görüldüğü üzere kimyasal kompozisyonunda nitrür yapıcı elementler bulunduran AISI 4140 çeliğine 475°C sıcaklıkta nitrasyon işlemi uygulanmasında işlem süresi arttıkça sert tabaka kalınlığında artış gözlenmiştir.



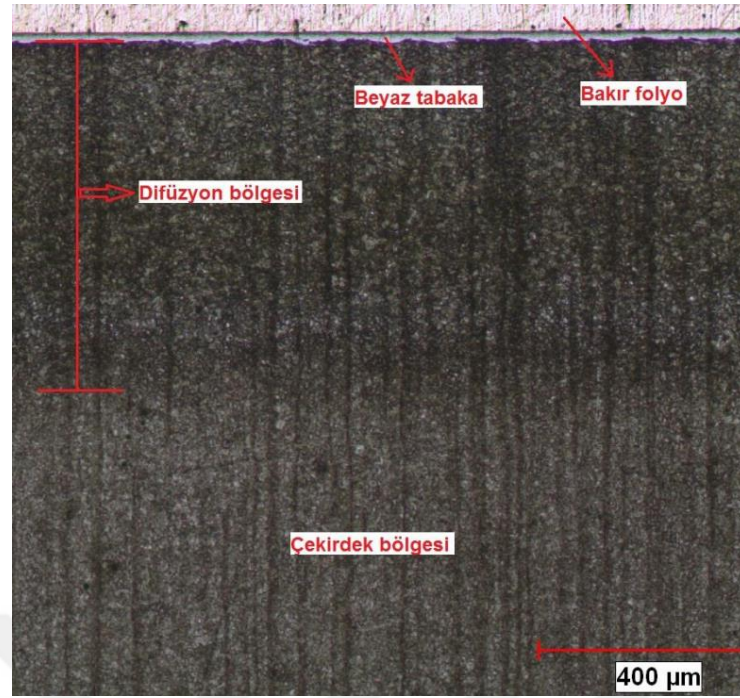
Şekil 2.2. Nitrasyon süresinin sert tabaka kalınlığı oluşumuna etkisi (Genel ve ark.,1999)

Gaz nitrasyon, tuz banyosunda nitrasyon ve iyon nitrasyon olmak üzere üç çeşit nitrasyon uygulama biçimi vardır. Gaz nitrasyon uygulanmasında iş parçaları özel kutular içine konularak fırınlara yerleştirilir. Gaz Nitrasyon işleminde fırın 510-550°C derece sıcaklıkta olmalıdır ve proses fırın içinde amonyak (NH_3) dolaşımıyla gerçekleşmektedir. İşlemin belirtilen sıcaklıkta gerçekleşmesinin sebebi amonyağın 500°C de ayrışmasıdır. Fırında tutma süresi yaklaşık olarak 10-24 saat olup 30-100 saat gibi normale nispeten uzun süreli uygulamalarda 0,8 mm'ye varan sert tabaka kalınlıkları oluşur (Tekin, 1987).

Tuz banyosunda nitrasyon uygulamasında, proses sıcaklığı 550-570°C arasındadır. Tutma süresi en fazla 2 saat civarındadır. Tuz nitrasyon uygulanmasında, iş parçaları nitrasyon ve nitrasyonu hızlandıran tuz karışımı içinde, 520-570°C sıcaklıkta, 10-12 saat gömülerek kutulara yerleştirilir. (Aktaş, 2016).

İyon nitrasyon işlemi diğer nitrasyon yöntemlerine göre daha modern bir yöntemdir. Çelik, dökme demir, titanyum gibi malzemelerin mekanik ve yüzey özelliklerini iyileştirmek için uygulanır. İyon nitrasyon işlemi özel vakumlu fırınlarda malzeme yüzeyine elektrik akımı yardımıyla proses gazlarının iyonize edilip malzemelere yönlendirilmesiyle gerçekleşir. İyon nitrasyon teknolojisi ilk defa 1932 yılında İsviçreli mühendis Bernard Berghaus tarafından Almanya'da keşfedildi, fakat ilk endüstriyel uygulaması Almanya ve İsviçre'nin bu yönteme yönelmesiyle 1967'de gerçekleştirilmiştir. İşlem en güncel hali olan elektrik akımıyla azot içeren proses gazlarının iyonlaştırılarak malzemeye çarptırılması halini 1970'lerde almıştır (Yılmaz, 2008).

Nitrasyon uygulanmış malzemenin yüzey tabakası Şekil 2.3'te görüldüğü gibi 3 kısımdan oluşmaktadır; bunlardan en üstteki tabaka "beyaz tabaka", hemen altında "yayınım tabakası" ve merkeze gidildiğinde de "çekirdek bölgesi" olarak adlandırılır (Şirin, 2004).



Şekil 2.3. Nitrasyon uygulanmış malzemenin yüzey tabakaları (Korkmaz,2020)

2.2. Isıl İşlemlerin Parçaların Boyut Toleransına ve Yüzey Kalitesine Etkisi

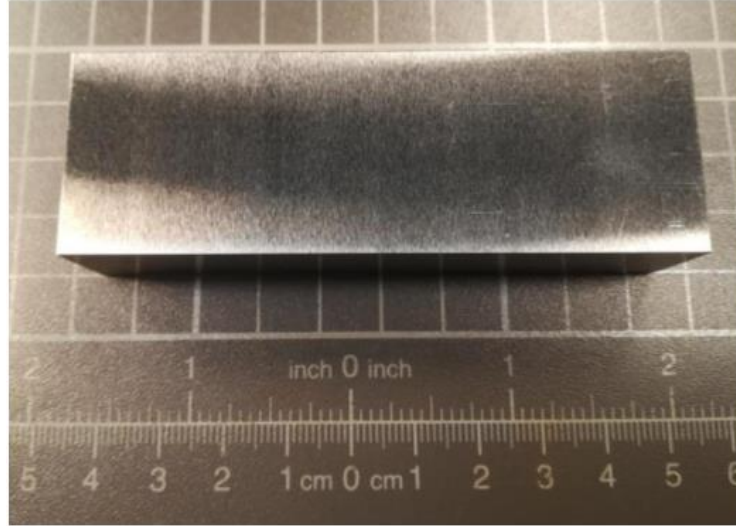
Malzemelere uygulanan ısıt işlemlerde hızlı soğutma sırasında parçaların tüm kesiti aynı hızda soğuyamayacağı için parçanın farklı bölgelerinde farklı oranlarda ısıt büzölmeler meydana gelmektedir. Bu durum da termal gerilmelerin yanında parçaların boyutlarında ve geometrisinde sapmalar meydana getirmektedir. Özellikle çeliklere uygulanan ısıt işleminde boyutlarda meydana gelen değışikliklerden ve yüzeyde meydana gelen oksit filmleri etkilerinin giderilmesi için parçalara kaba işlemeden sonra ısıt işlem uygulama, sonrasında ince işleme şeklinde çözümler uygulanmaktadır. Bunun yanında parçalara fıkstörlere bağlanarak su verilmesi de uygulanan bir diğerk çözümdür. Parçalara hızlı soğutma yapılmayan nitrasyon gibi işlemlerde bile her ne kadar boyutsal değışiklikler olmayacağı düşünölse de parçayı alıştırma toleransları dışına çıkartabilecek boyutsal değışimler yaşanabilmektedir. Isıt işlemler sonrasında parçaların yüzeylerinde ve boyutlarında meydana gelen etkiler, ek önlemler ve işlemlerle giderilmeye çalışıldığı için parça üretim süresi ve maliyetlerini artırmaktır. Bu nedenle parça tasarımı aşamasında ısıt işlemlerin etkisi dikkate alındığında, ısıt işlemler sonrasında ek bir prosese ihtiyaç kalmadan parçanın çalışma için gerekli şartlarda imal edilebilmesinin mümkün olacağı düşünölmektedir.

Endüstride bir ürünün seri imalatına başlanılmadan önce gerekli AR-GE

alışmaları yapılır ve oluşabilecek hatalar saptanmaya çalışılır. Sertleştirmek, yorulma dayanımını artırmak vb. amaçlarla ve kullanım yerlerine göre makine elemanlarına farklı ısııl işlemler uygulanmaktadır. Uygulanan ısııl işlemler sonucunda farklı termal genleşme katsayılarına göre malzemeler genleşmektedir ve hacimlerinde artış oluşmaktadır. Kontrollü soğutma sonucunda östenitten martenzite dönüşme gibi vb. faz dönüşümleri olmakta ve yeni dizilen atomların hacim değişimine sebep olduğu bilinmektedir. Bu değişim bir makine elemanı tasarım aşamasındayken hesaplanmalıdır. Aksi takdirde birbiriyle çalışan ve hassas çalışma toleransına sahip parçalar düzgün çalışmaz. Örneğın bir tabanca kızak ve mekanizması arasında 0,1 mm verilmiş çalışma boşluğunun ısııl işlem öncesi mi yoksa sonrası mı verilmesi gerektiğine dikkat edilmelidir. Isıl işlem sonucu dişi parçanın küçülmesi ve erkek parçanın büyümesi sonucunda parçalar montajlanmayabilir ya da düzgün çalışmayabilir. Bu gibi durumların sonucunda eğer gerekli hesaplamalar yapılmazsa maliyet açısından zararlar oluşmaktadır.

Isıl işlemlerin olumsuz etkilerinden sakınmak için ısııl işlemlerin parçaların boyut toleransına ve yüzey kalitelerine etkileri hakkında bilgi sahibi olmak önem arz etmektedir. Literatürde konu ile ilgili yapılan çalışmalar tarandığında **ok az sayıda çalışmada ısııl işlemlerin boyut toleranslarına ve yüzey kalitelerine etkilerinin araştırıldığı** görülmüştür.

Konu ile ilgili Dobrocki ve ark. (2020) tarafından yapılan bir çalışmada namlu, vidalı mil ve dişi gibi parçaların üretiminde kullanılan AISI 4140 ıslah çeliğinden imal edilmiş deney numunelerine önce ısııl işlem uygulayıp ardından plazmada ve gazda nitrasyon işlemi yaparak deney numunelerinin geometrisindeki değişmeler incelenmiştir. Çalışmada, şekil 2.4'teki gibi boyutları 90x30x20 mm olan ve 0,3 mm taşlama payı bırakılan 4140 ıslah çeliği numunelerden oluşan 5 adet parça önce izelge 2.1'de görülen bir dizi ısııl işleme tabi tutulmuştur.



Şekil 2.4. Dobrocki ve ark. (2020) çalışmasında nitrasyon uygulanan deney numunesi

Çizelge 2.1. Dobrocki ve ark. (2020) çalışmasında deney numunelerine uygulanan ısıt işlemler

Normalizasyon	Su verme	Temperleme (Menevişleme)
860 °C/ 45 dk / hava	840 °C/ 45 dk/ su	600 °C/ 100 dk/ yağ

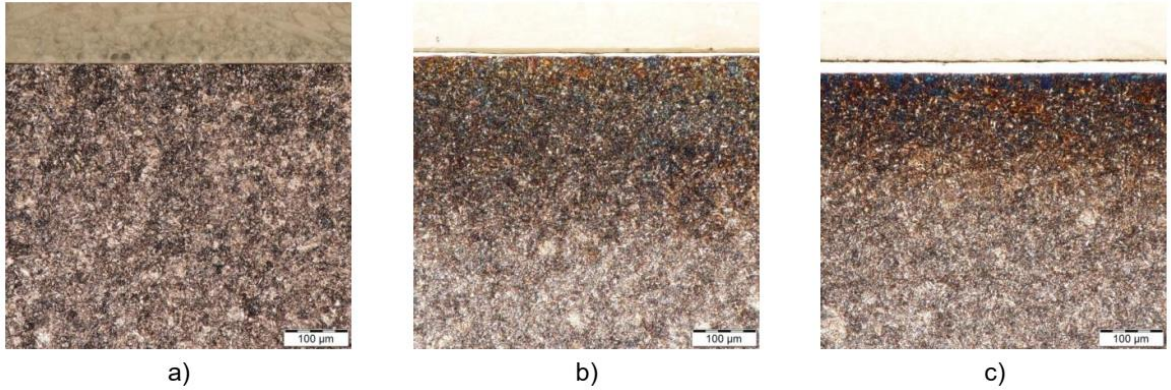
Uygun mekanik özelliklere sahip ince taneli perlitik bir yapı ısıt işlemlerle elde edildikten sonra $Ra = 0,4 \mu\text{m} - 0,8 \mu\text{m}$ yüzey pürüzlülüğü elde etmek amacıyla numuneler taşlanmıştır. Taşlama sonrası CMM ölçüm cihazında 5 kez ölçümü gerçekleştirilen numuneler nitrasyon işlemi için hazır hale getirilmişlerdir. Numunelerin plazma ve gaz nitrasyon işlemini gerçekleştirecek fırınların 0,25mm- 0,35mm difüzyon tabakası kalınlığına karşılık gelecek şekilde sıcaklık ve işlem süresi cinsinden parametreleri Çizelge 2.2'deki gibi ayarlanmıştır.

Çizelge 2.2. Dobrocki ve ark. (2020) çalışmasında nitrasyon işlemi parametreleri

İşlem	Sıcaklık (°C)	Zaman (s)	Atmosfer
Plazma Nitrasyon	520	14	$1\text{N}_2: 3\text{H}_2$
Gaz Nitrasyon	530	7	$\text{NH}_3/ \text{N}_2/ \text{H}_2$

Numunelere uygulanan ısıt işlemler ve nitrasyon işlemleri sonrasında mikroyapıları incelenmiş ve Şekil 2.5'te görüldüğü gibi a'da temperlenmiş martenzit ve ince perlitik, b'de plazma nitrasyonu sonrasında malzemenin yüzeyinde sürekli çok ince nitrür beyaz tabakası; c'de ise gaz nitrasyonu sonrasında daha kalın nitrür beyaz tabakası gözlemlenmiştir. Yine nitrasyon işlemiyle meydana gelen difüzyon tabakası ve çekirdek bölgesi de şekilde görülmektedir. Bu tabakaların derinlikleri ve yüzey sertliği Çizelge 2.3'te verilmiştir. Derinlikler ve sertlikler 5 farklı numunede 5 farklı noktada ölçülmüş

ve sonuç olarak ortalama değerler verilmiştir. Çizelge görüleceği üzere plazma nitrasyonun beyaz tabaka kalınlığı gazda nitrasyona göre çok daha az olmasına rağmen difüzyon tabakası derinliği daha fazladır. Ayrıca gazda nitrasyon işleminde ulaşılan sertlik değeri daha fazla olmuştur.



Şekil 2.5. 4140 çeliğine uygulanan a) ısıt işlemler, b) plazma, c) gazda nitrasyon işlemleri sonrasında mikroyapı görüntüleri

Çizelge 2.3. Nitration işlemleri sonrasında difüzyon ve beyaz tabakaların derinlikleri ve sertlikleri Dobrocki ve ark. (2020)

İşlem	Difüzyon tabakası kalınlığı (mm)	Beyaz tabaka kalınlığı (mm)	Yüzey sertliği HV10
Plazma Nitration	0,319	6,4	665
Gaz Nitration	0,224	18,4	705

Nitrasyon işlemleri sonrasında numuneler CMM cihazıyla prizmatik numunenin 90 mm boyutundan 5'er kez ölçülmüştür. Yapılan ölçümler sonucunda parça boyutlarında; plazma nitrürlemede $0,032 \pm 0,001$ mm artış ve gaz nitrürlemede $0,036 \pm 0,002$ mm artış gözlenmiştir. Çalışmada diğer boyutlardaki değişimler verilmemiştir.

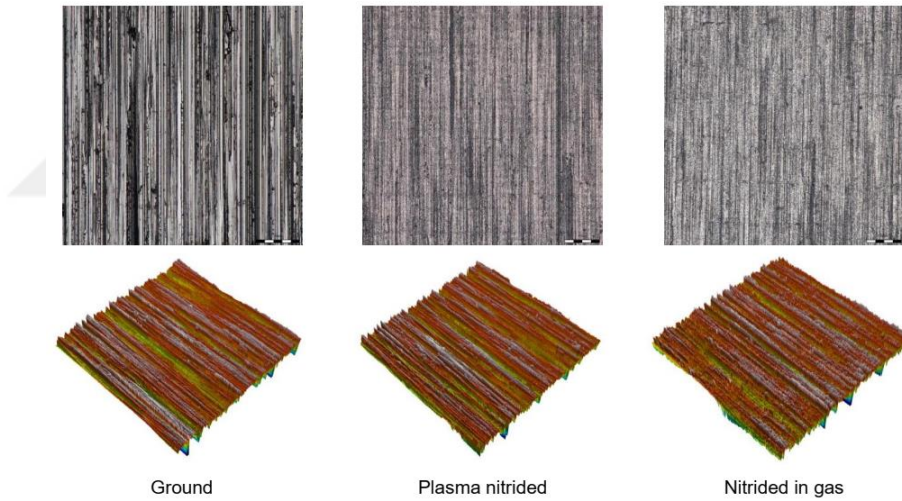
Yüzey pürüzlülüğü ile ilgili ısıt işlemler ve nitration işlemleri sonrasında numunelerin Ra, Rz, Rp ve Rt değerleri ölçülmüş ve Çizelge 2.4'te görülen değerler elde edilmiştir. Her iki nitrürleme işleminden sonra yüzey pürüzlülük parametrelerinde azalma olduğu sonuçlardan açıkça görülmektedir. Ancak genel olarak nitrürleme işlemlerinden sonra zemin yüzeyleri ve yüzeylerin pürüzlülük parametrelerinde önemli bir değişiklik olmadığı söylenebilir.

Çizelge 2.4. Yüzey pürüzlülük ölçümlerinin sonuçları Dobrocki ve ark. (2020)

Parametre (mm)	Zemin yüzeyi	Plazma Nitration		Gaz Nitration	
		Ölçülen	Azalma	Ölçülen	Azalma

		Değer		Değer	
Ra	$0,96 \pm 0,06$	$0,87 \pm 0,06$	-0,09	$0,87 \pm 0,11$	-0,09
Rq	$1,30 \pm 0,05$	$1,18 \pm 0,09$	-0,12	$1,16 \pm 0,17$	-0,14
Rz	$7,06 \pm 0,18$	$6,26 \pm 0,35$	-0,80	$6,43 \pm 0,59$	-0,63
Rt	$7,16 \pm 0,18$	$6,38 \pm 0,27$	-0,78	$6,52 \pm 0,59$	-0,14

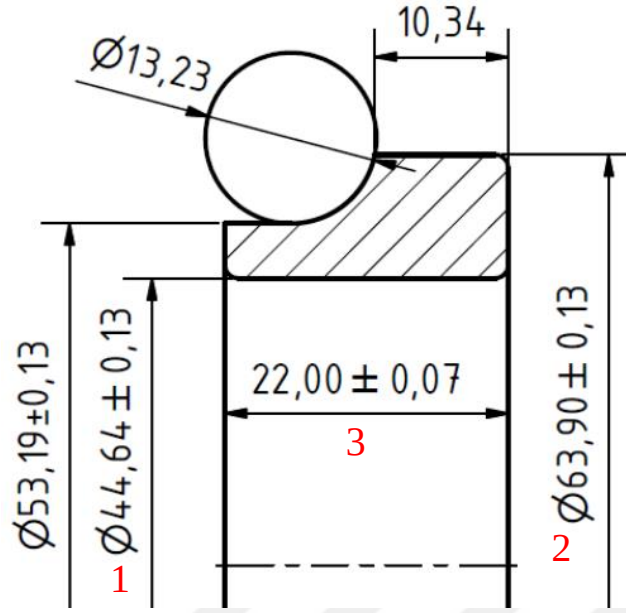
Ayrıca yapılan çalışmada ısıt işlemler ve her iki nitrasyon işlemi sonucunda parçaların yüzey morfolojisi de Şekil 2.6'daki gibi ölçülmüştür. Görüntülerde zemin yüzeyinde taşlama takımının izleri görülmektedir. Taşlama yönüne paralel olarak koyu derin oluklar ve açık gri tepeler fark edilmektedir. Nitrürleme işlemlerinden sonra karanlık oluklar (vadiler) kaybolmuştur; bu vadilerin veya olukların yayınan azotla birlikte nitrür bileşiği ile dolduğunu göstermektedir. Bu da yüzey pürüzlülüğünün azalmasına neden olmuştur. Her bir yüzeyin 3B dokusu benzer bir morfolojiye sahiptir. Nitrürleme işlemlerinden sonra çıkıntılarının tepe noktaları hafifçe yuvarlatılmıştır.



Şekil 2.6. Değerlendirilen yüzeylerin morfolojisi (500x büyütülmüş) ve bunların 3B dokusu Dobrocki ve ark. (2020)

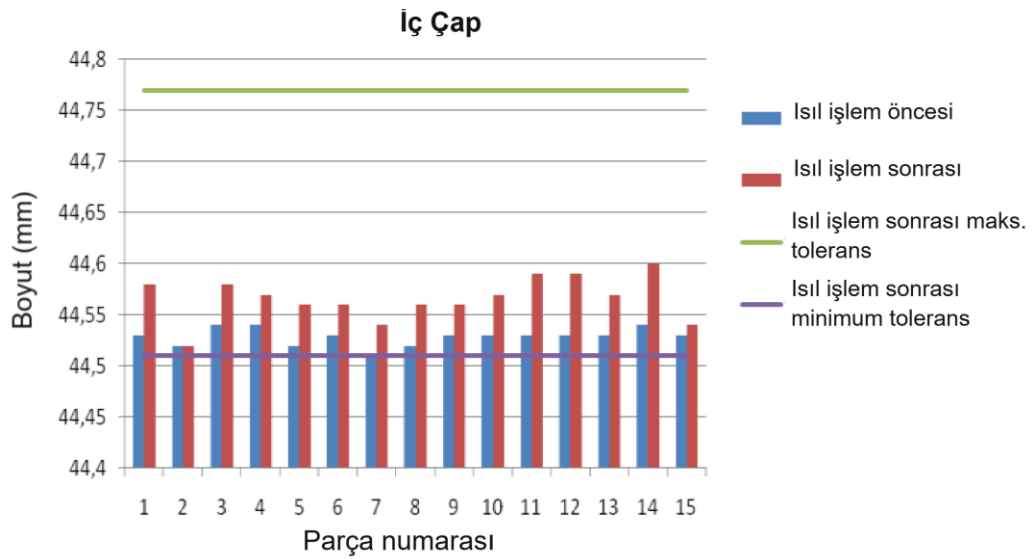
Başka çalışmada Vicen ve ark. (2018) 100Cr6 rulman çeliğinden imal edilen bir rulmanın boyutlarını ıslah işlemi öncesi ve sonrası ölçüp değişimleri kaydederek rulman tekerleği iç halkasına uygulanan ısıt işlemin, boyutunu nasıl değiştirdiğini incelemişlerdir.

Rulman bilezikleri su verme işlemi için fırına koyulmadan hemen önce CMM cihazıyla ölçülmüştür ve fırına Şekil 2.7'deki gibi yerleştirilmiştir.



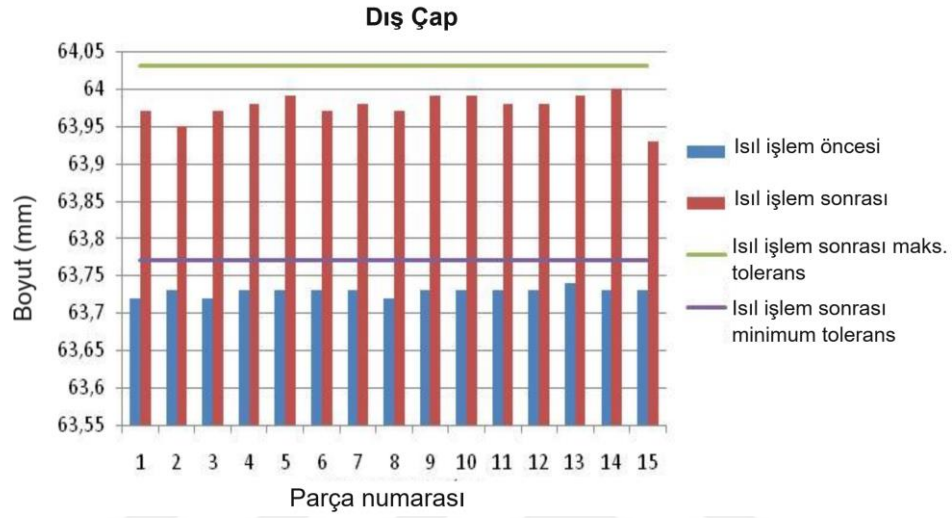
Şekil 2.9. Rulmanlı yatakta iç bilezik üzerinde ısıtılma işleminden sonra yapılan boyut ölçümleri Vicen M. ve ark. (2018)

15 adet parça için ayrı ayrı iç ve dış çap ölçülerin ısıtılma işlem öncesi ve sonrası sonuçları Şekil 2.10 ve Şekil 2.11’de verilmiştir. Şekil 2.10’da mavi ile ısıtılma işlem öncesi iç çap değerleri kırmızı ile de ısıtılma işlem sonrası iç çap değerleri gösterilmiştir. Buna göre iç çap ölçüleri ısıtılma işlem öncesinde 44,51- 44,54 mm arası gelirken ısıtılma işlem sonrasında 44,52-44,60 mm aralığında ölçülmüştür. En büyük değişim 0,06 mm olarak ölçülmüşken 15 deney numunesinden sadece 2 numaralı numunede değişim gözlenmemiştir. Ortalama çap büyümesi ise 0,037 mm olarak ölçülmüş olup iç çaptaki değişimler parçanın tasarımında belirlenen tolerans aralığında kalmıştır.



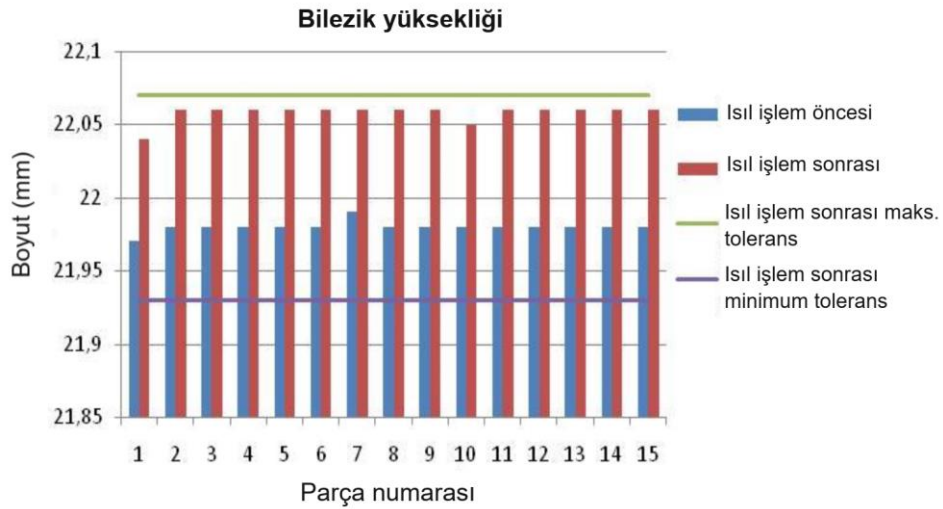
Şekil 2.10. Rulman iç çaplarının ısıtılma işlem öncesi ve sonrası değişimi Vicen M. ve ark. (2018)

Şekil 2.11’de ısıt işlem öncesi dış çap ölçüleri mavi ile gösterilmiş olup 63,72-63,74 mm aralığında gelirken ısıt işlem sonrası dış çap ölçüleri kırmızı ile gösterilmiştir ve 63,95-64,00 aralığında gelmiştir. Dış çapın maksimum değişimi 0,27 mm olarak ölçülürken minimum değişimi 0,2 mm olarak ölçülmüştür. Isıt işlem sonrası ortalama dış çap değişimi 0,247mm olarak hesaplanmış olup dış çaptaki değişimler parçanın tasarımında belirlenen tolerans aralığında kalmıştır.



Şekil 2.11. Rulman dış çaplarının ısıt işlem öncesi ve sonrası değişimi Vicen M. ve ark. (2018)

Şekil 2.12’de ısıt işlem öncesinde 15 numunenin genişlikleri sadece 1. parça için 21,97 mm ve 7. Parça için 21,99 mm ölçülmüşken diğer numuneler 21,98 mm olarak ölçülmüştür. Genişlikteki en küçük ve en büyük değişim 0,07 ve 0,08 mm olarak ölçülmüştür. Isıt işlem sonrası ortalama genişlik artışı 0,078mm olarak hesaplanmış olup genişlikteki ölçüsel değişim de parçanın tasarımında belirlenen tolerans aralığında kalmıştır.



Şekil 2.12. Rulman yüksekliklerinin ısıt işlem öncesi ve sonrası değişimi Vicen M. ve ark. (2018)

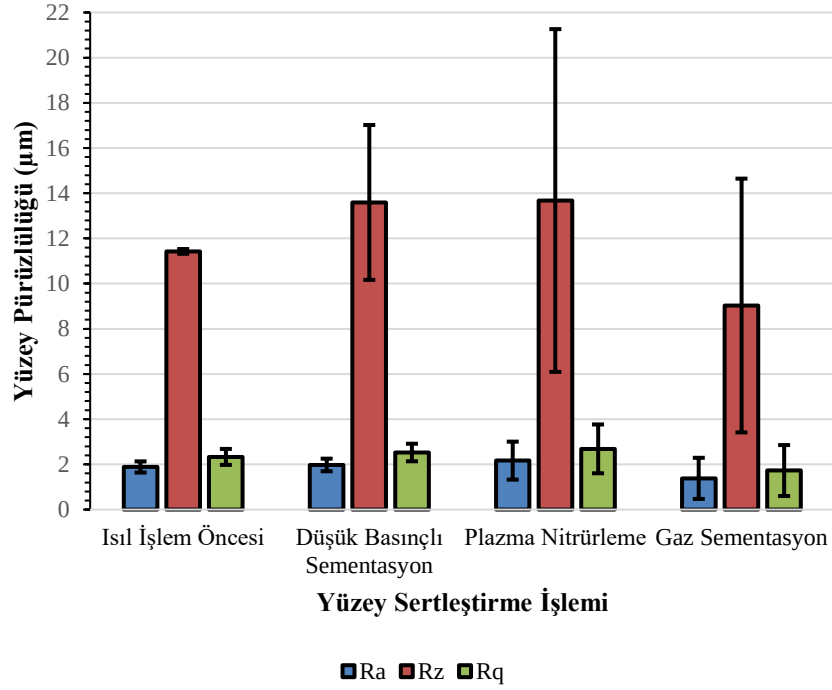
Bu çalışma ısıtılma işlemdeki boyut büyümesinin geometriye göre değişkenlik gösterip göstermemesini ya da iç çap ve dış çaptaki boyut değişimlerinin et kalınlığı gibi etkenlere bağlı olup olmadığını görmek için yeterli bilgi vermemektedir.

Gençoğlu (2019) yaptığı çalışmada AISI 8620 ve AISI 5115 çeliklerinden azdırma tezgahında imal edilen dişli çarklara Çizelge 2.5'te detayları belirtilen plazma nitrüleme, düşük basınçlı sementasyon ve gaz sementasyon işlemlerini uygulayıp numunelerin sertlik değeri, yüzey pürüzlülük değerlerindeki ve boyutlarındaki değişimi karşılaştırmıştır.

Çizelge 2.5. AISI 8620 ve AISI 5115 çeliklerine uygulanan işlemler ve şartları Gençoğlu (2019)

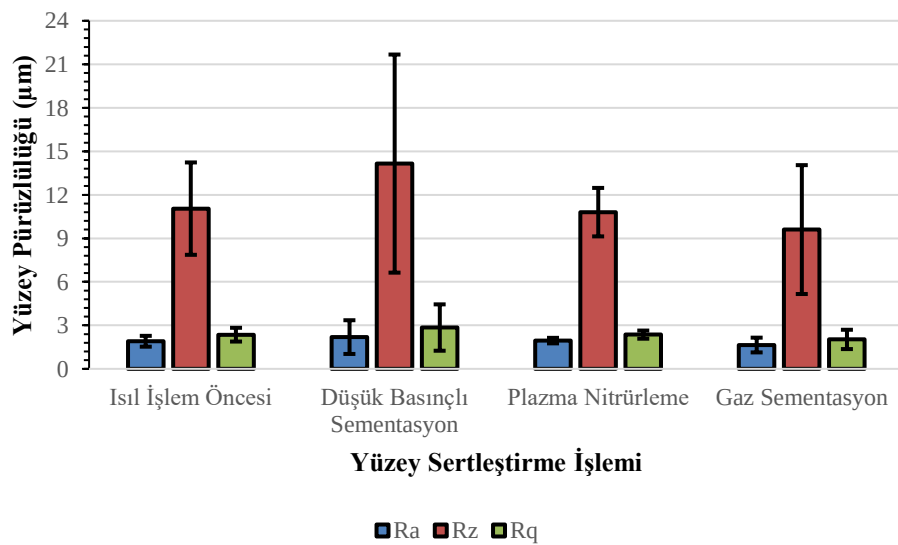
Isıl İşlem	Sıcaklık, Atmosfer potansiyeli ve süre	Sertleştirme ortamı	Temperleme (Sıcaklık/ Süre)
Plazma Nitrüleme	450 °C / 30 h, Gaz basıncı: 2 mbar Gaz oranları: (N ₂ :H ₂): 3:1 Isıtma 4 h ve soğutma 4 h vakum altında	-	-
Düşük Basınçlı Sementasyon (LPC)	Nötral ortamda numune sıcaklıkları 700 °C den 900 °C ye 45 dakikada çıkarıldı. Ortam basıncı: 700 mbar 1.adım: 350 ml C ₂ H ₂ , 970 °C, 15 dakika+ 2. adım: 100 ml C ₂ H ₂ , 970 °C, 10 dakika+ 3.adım (3 kez): 80 ml C ₂ H ₂ , 970 °C, 10 dakika + Sertleştirme için numune sıcaklığı 860 °C ye indirilmiştir.	Yağ / 70°C	200 °C / 120 dakika
Sementasyon	960 °C, 1.35 % C, 2 h + 960 °C, 0.75 % C, 1 h + 820 °C, 0.75 % C, 1 h	Yağ / 100 °C	170 °C / 120 dakika
Sementasyon (Double Quenching çift sertleştirme: DQ)	1. Sertleştirme 960 °C, 1.35 % C, 2 h + 960 °C, 0.75 % C, 1 h + 820 °C, 0.75 % C, 1 h	Yağ / 100 °C	170 °C / 120 dakika
	2. Sertleştirme 925 °C, 1.20 % C, 1 h 40 dakika+ 925 °C, 0.75 % C, 30 dakika+ 860 °C, 0.75 % C, 30 dakika.	Yağ / 60 °C	160 °C / 70 dakika

AISI 5115 malzemeden üretilen dişli çark numunelerine uygulanan yüzey sertleştirme işlemlerinin öncesinde ve sonrasında her bir numuneden üçer farklı bölgeden yapılan Ra, Rz ve Rq profillerine ait yüzey pürüzlülüğü ölçümleri sonucunda ortaya çıkan değişim Şekil 2.13'teki grafikte verilmiştir. Numunelerin yüzey sertleştirme işlemlerinden önceki yapılan ölçümleri sonucunda Ra cinsinden elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerinde gaz sementasyon işlemi haricinde ciddi bir değişim olmazken gaz sementasyon işlemi sonrasında iyileşme göstermiştir. Rz profilinde ise düşük basınçlı sementasyon ve plazma nitrüleme işlemlerinde birbirine yakın yükselmişken yine gaz sementasyon işleminde iyileşme göstermiştir. Son olarak Rq profilinde ise düşük basınçlı sementasyon ve plazma nitrüleme işleminde küçük bir artış gaz sementasyon işleminde ise düşük miktarda iyileşme göstermiştir.



Şekil 2.13. AISI 5115 malzemeden imal edilen dişli çarkların yüzey pürüzlülüğü değerleri Gençoğlu (2019)

Çalışmadaki diğer malzeme olan AISI 8620 malzemeden imal edilen dişli çarklarda yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümleri neticesinde ortaya çıkan Ra, Rz ve Rq profillerine ait değerler ise Şekil 2.14’te verilmiştir. Her üç yüzey pürüzlülüğü profilinden elde edilen değerlerde düşük basınçlı sementasyon işleminde artış gözlemlenirken gaz sementasyon işleminde azalma, plazma nitrürleme işleminde ise bir ciddi bir değişim olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 2.14. AISI 8620 malzemeden imal edilen dişli çarkların yüzey pürüzlülüğü değerleri Gençoğlu (2019)

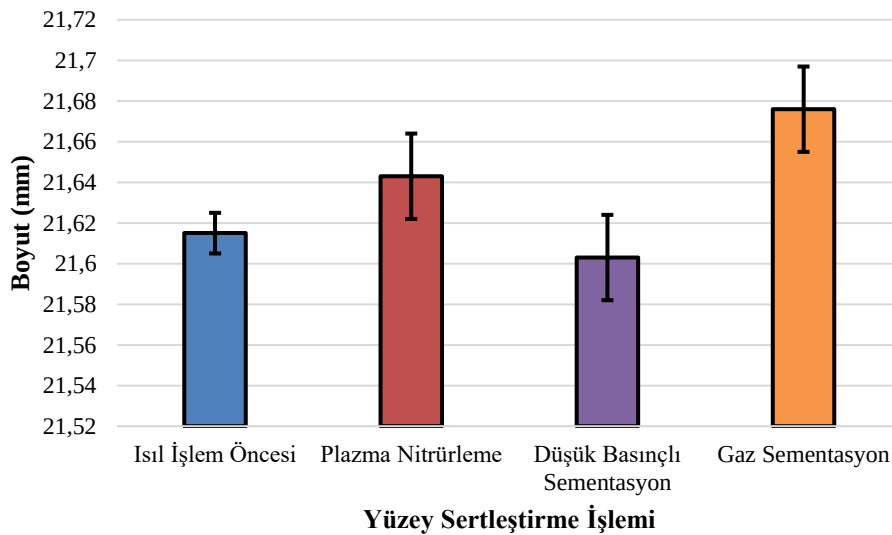
Yüzey pürüzlülüğünün düşük olması gereken uygulamalarda, yüksek yüzey pürüzlülüğü değerleri sürtünmeyi artırarak verimliliği düşürür ve sıcaklığı yükseltir. Bu durum, yağlayıcının akışkanlığını azaltarak parçalardaki aşınma riskini artırır. Bu nedenle, yüzey sertleştirme işlemleri sonrasında yüzey iyileştirme işlemlerinin uygulanması gereklidir.

Aynı çalışmada farklı yüzey sertleştirme işlemlerinin dişli çarklar üzerindeki boyut değişimine etkisini araştırmak maksadıyla 0,001 mm hassasiyetli Mitutoyo marka mikrometre ile Şekil 2.15'teki gibi ölçümler alınmıştır.



Şekil 2.15. AISI 5115 (solda) ve AISI 8620 (sağda) malzemeden imal edilmiş dişli çarkların yüzey sertleştirme işlemleri sonrası boyut ölçümü Gençoğlu (2019)

AISI 5115 malzemeden imal edilmiş dişli çarka uygulanan farklı yüzey sertleştirme işlemleri neticesinde meydana gelen boyut değişikliği Şekil 2.16'da verilmiştir.

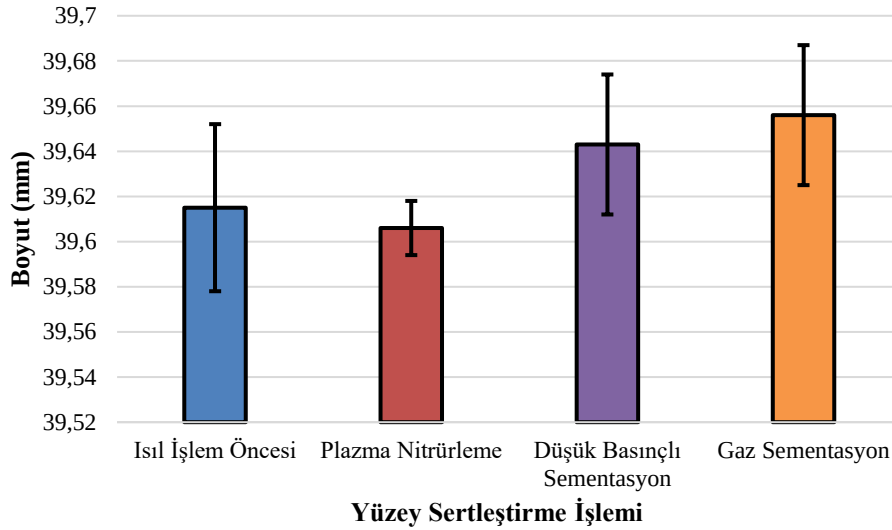


Şekil 2.16. AISI 5115 malzemeden imal edilmiş dişli çarkların yüzey sertleştirme işlemleri sonrası boyut değişimi Gençoğlu (2019)

Grafikte görüldüğü üzere en fazla artış gaz sementasyon işleminde gerçekleşirken

onu plazma nitrürleme takip etmiştir. Düşük basınçlı sementasyon işleminde ise diğer iki işlemin aksine boyutunda azalma meydana gelmiştir.

Şekil 2.17'deki grafikte AISI 8620 malzemeden imal edilmiş dişli çarka uygulanan farklı yüzey sertleştirme işlemleri sonucunda meydana gelen boyut değişikliği verilmiştir.



Şekil 2.17. AISI 8620 malzemeden imal edilmiş dişli çarkların yüzey sertleştirme işlemleri sonrası boyut değişimi Gençoğlu (2019)

AISI 5115 malzemeden imal edilen dişli çarkta olduğu gibi en fazla artış gaz sementasyon işleminde saptanmış olup onu düşük basınçlı sementasyon işlemi takip etmiştir. Plazma nitrürleme işlemi sonrasında ise diğer iki işlemin aksine boyutta küçülme meydana gelmiştir. Dişlinin boyutsal değişimi ve çarpılmaları, geometrik özellikleri, malzemenin karbon ve alaşım oranları, karbürleme atmosferinin karbon seviyesi, karbürleme ve sertleştirme sıcaklıkları, sertleştirme ortamı, ortamın sıcaklığı ve karıştırma gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Gaz karbürleme sırasında yüksek işlem sıcaklıklarında uzun süreli uygulamalar, tanelerin büyümesine yol açarak bu durumun oluşmasına neden olmuştur (Randak, A. ve ark. 1969).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde tez çalışmasında kullanılan malzemeden, numunelerin hazırlanmasından, ısıtım işlemlerin nasıl uygulandığından ve tolerans ölçümlerinin nasıl gerçekleştirildiğinden bahsedilmiştir.

3.1. Materyal

Deneylerde nitrasyon uygulanan malzeme AISI 4340 olarak bilinen ve içinde nitrür oluşturu elementler bulunan 34CrNiMo6 ıslah çeliğidir. Genellikle fazla yüke maruz kalan krank milleri ve eksantrik millerde ayrıca yüzey sertliğinin önemli olduğu dişli ve namlu gibi parçaların üretiminde tercih edilir. Malzeme soğuk çekilmiş ve tavllanmış durumda temin edilmiş olup dolayısıyla 34CrNiMo6'nın +QT +C varyantıdır.

Kullanılan AISI 4340 malzemenin kimyasal bileşimi ARL 3460 marka optik emisyon spektrometresi ile analiz edilmiştir. Analiz sonuçları Çizelge 3.1.'deki gibidir.

Çizelge 3.1. AISI 4340 ıslah çeliğinin % ağırlık cinsinden kimyasal bileşimi

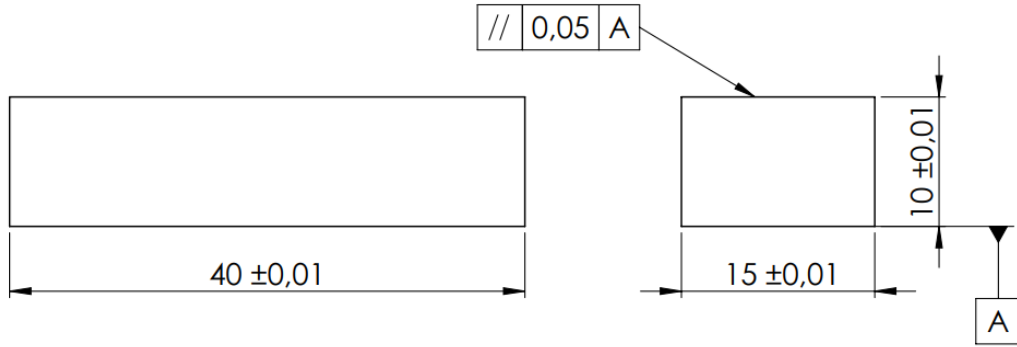
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,39	0,2469	0,7048	0,0107	0,0068	0,7933	0,2297	1,6917	0,0715
Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	Fe
0,0093	0,0883	0,0033	0,0028	0,0076	0,0047	0,0011	0,0057	Kalan

3.2. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Nitrasyon işleminin parçaların boyut ve geometrik toleransına etkilerinin incelenmesi için üç farklı geometri kullanılmıştır. Parçaların kesit kalınlığındaki değişim ile azotun difüzyonla yayındığı derinliğin değişkenliği ve dairesel ile düz geometrilerdeki ölçü değişiminin difüzyon derinliğine etkisinin araştırılması amacıyla farklı geometriler seçilmiştir. Böylece difüzyon derinliğine bağlı olarak boyut ve geometrik toleranslardaki değişkenlik araştırılmıştır. Seçilen geometrilerden ilki Şekil 3.1'de verilen düz dikdörtgen prizması şeklinde parça, ikincisi Şekil 3.2'deki ortasında kanal içeren prizmatik parça ve sonuncusu ise Şekil 3.3'teki iç ve dış çaptan oluşan içi boş dairesel parçadır.

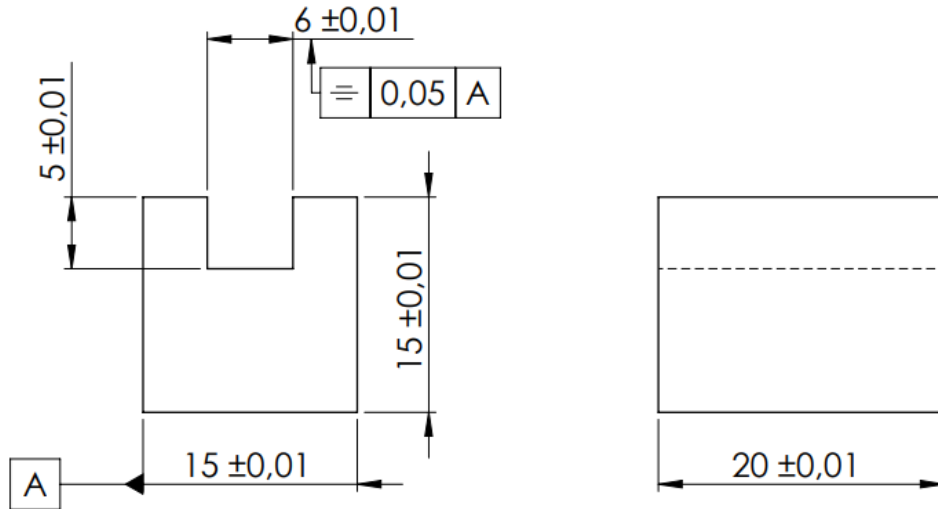
Çalışmada nitrasyon işleminin boyut toleransı ve yüzey kalitesine etkisi incelendiğinden dolayı Şekil 3.1'deki deney numunesinin teknik resimde belirtilen

doğrusal ölçülerinde meydana gelen tolerans değişikliği belirlenmiştir. Yine parçada alt ve üst yüzeylerin paralellik toleransındaki değişim ölçülmüştür.



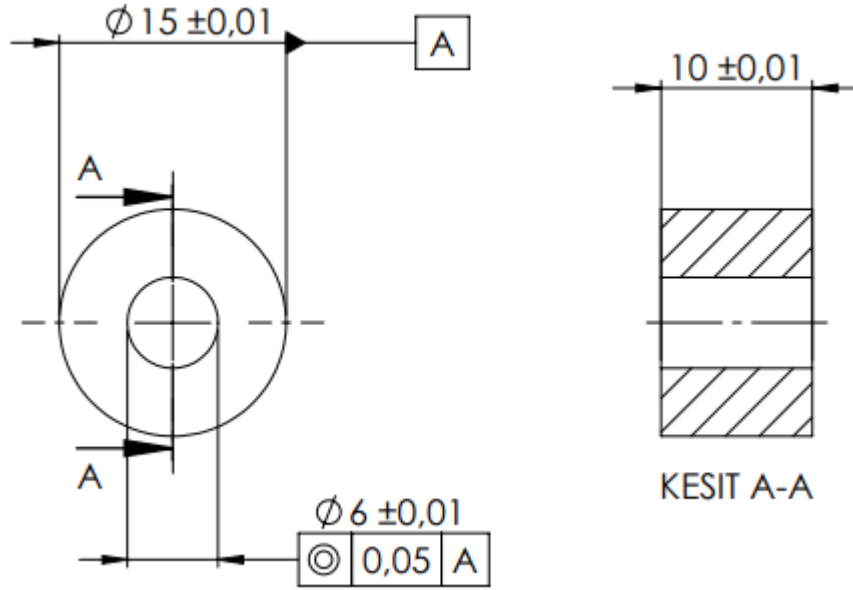
Şekil 3.1. Ölçüleri 10X15X40 mm olan düz dikdörtgen prizma

Şekil 3.2'deki deney numunesinin teknik resimde belirtilen ölçülerinden 6 mm genişlikli ve 5 mm derinlikli kanalın ölçüsündeki değişimin yanında Şekil 3.1'deki parçanın dış ölçüsündeki değişimlerle karşılaştırmak için 10 ve 15 mm kesit ölçüleri ile 20 mm boy ölçüsündeki değişim de ölçülmüştür. Ayrıca parçanın simetriklik toleransındaki değişimler de izlenmiştir.



Şekil 3.2. Ölçüleri 15X15X20 mm olan ve 5mm derinliğinde 6 mm genişliğinde kanallı prizmatik parça

Şekil 3.3'teki deney numunesinin teknik resminde belirtilen iç, dış çaplarının ve kalınlığının ölçü toleransı ve iç çapın dış çapa göre eş merkezlilik toleransı ölçülerek değerlerdeki değişimler belirlenmiştir.



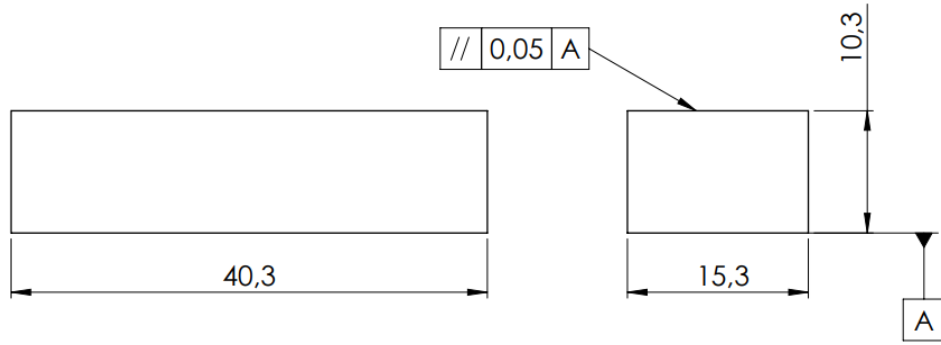
Şekil 3.3. Ölçüleri $\varnothing 6 \times \varnothing 15 \times 10$ mm ölçülerinde dairesel parça

Nitrasyon işleminin parça toleranslarında meydana getireceği değişkenliğin sınırlı olması beklendiği için numunelerin üretimindeki toleransları mümkün olduğunca dar tutulmuştur. Bu nedenle parçalara frezeleme ve tornalama işleminden sonra taşlama işlemi uygulanmıştır. Bu kapsamda parçalar teknik resimlerinde verilen toleranslara uygun olacak şekilde imal edildikten sonra öncelikle elde edilen anma boyutları ve geometrik toleransları tespit edilmiş, daha sonra nitrasyon işlemi sonucunda aynı boyut ve geometrik toleransları tekrar ölçülerek değerlerde meydana gelen değişiklikler belirlenmiştir. Tez kapsamında parçaların ölçü ve geometrik yani konum/şekil toleranslarındaki değişimlerin iki farklı nitrasyon tabakası kalınlığı için araştırılması planlanmıştır. Böylece 3 farklı geometri, 2 farklı nitrasyon tabakası kalınlığı ve üçer tekrar için toplamda 18 adet deney numunesi hazırlanmıştır.

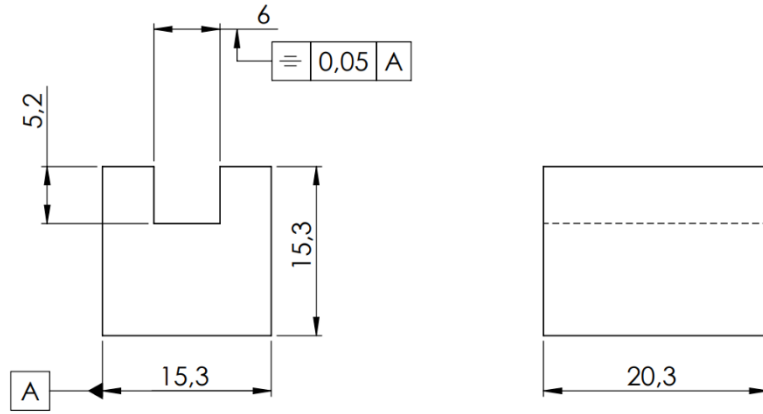
3.3. Parçaların Talaşlı İmalat Yöntemiyle Üretilmesi ve Taşlanması

Geometrileri belirlenen ve toleransları yukarıda belirtilen düz prizmatik, kanallı prizmatik ve silindirik parçalar altışar adet olacak şekilde CNC dikey işleme merkezinde taşlama payları bırakılarak üretilmiş ardından yüzey taşlama makinesinde taşlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Silindirik parça ise CNC tornada imal edilmiş olup hedeflenen toleranslar ince işleme ile elde edilmiştir. Bu nedenle taşlama işlemi yapılmamıştır.

Taşlama öncesi pay bırakılan numunelere ait imalat teknik resimleri Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Ölçüleri 10X15X40 mm olan düz lamanın taşlama öncesi imalat teknik resmi



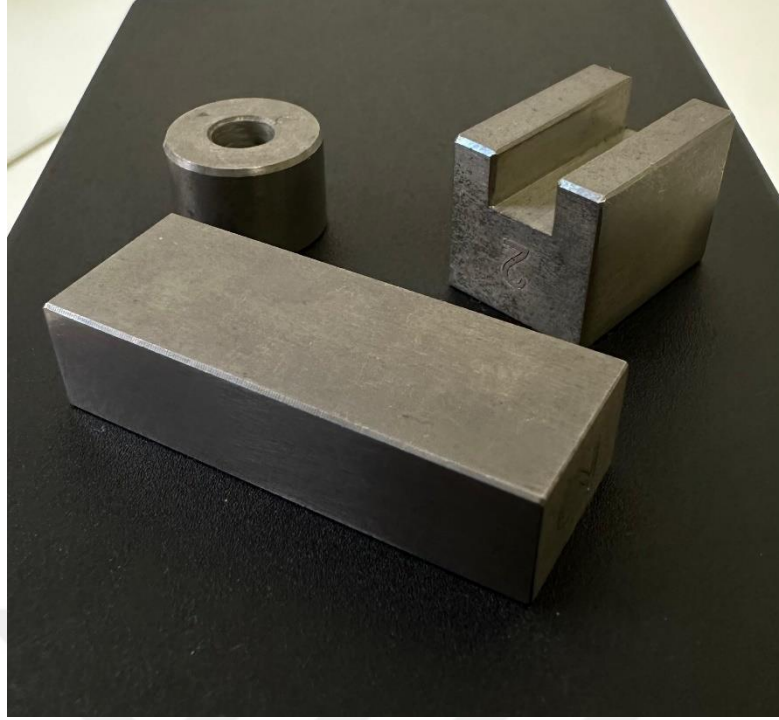
Şekil 3.5. Ölçüleri 15X15X20 mm olan ve 5mm derinliğinde 6 mm genişliğindeki kanallı parçanın taşlama öncesi imalat teknik resmi

İmal edilen deney numuneleri birbirinden ayırt edilebilmesi amacıyla lazer markalama cihazında numaralandırma işlemi yapılmıştır. Numunelere uygulanan nitrasyon işlemine göre numaralandırma işlemi Çizelge 3.2.’deki gibidir. 3 farklı geometrideki numunelerin 6 saatlik nitrasyon uygulananları 1, 2 ve 3 şeklinde, 12 saatlik nitrasyon uygulananlarıysa 4, 5 ve 6 şeklinde numaralandırılmıştır.

Çizelge 3.2. Numuneler uygulanan nitrasyon işlemleri ve markalamaları

İşlem	Markalama
6 saat nitrasyon	1-2-3
12 saat nitrasyon	4-5-6

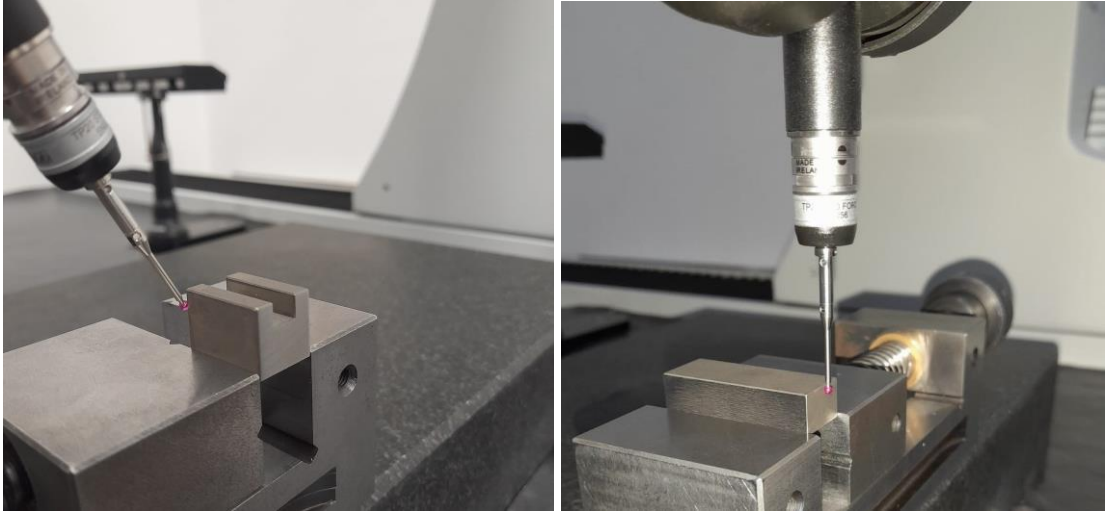
Üretim işlemi tamamlanan numuneler Şekil 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.6. Üretim işlemi tamamlanan ve markalama işlemi yapılan numunelere ait birer örnek

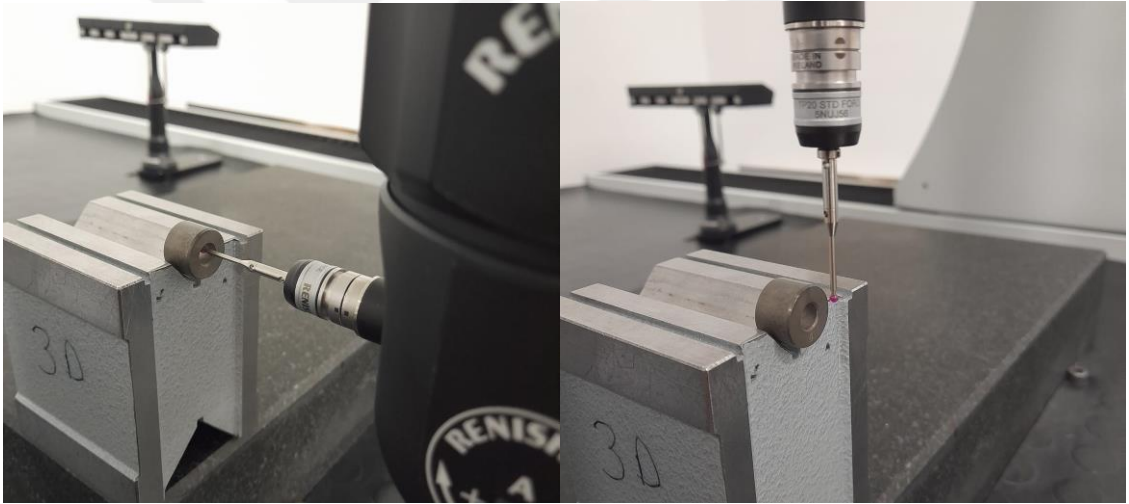
3.4. Parçaların Ölçüm İşlemleri

Parçaların teknik resimlerde belirtilen ölçüleri Coord3 marka ARES10.7.5 model, Renishaw ph20 prob kafasına ve 2mm çapta 30mm boyda olan proba sahip 3 boyutlu CMM ölçüm cihazıyla ölçülmüştür. Ölçüm laboratuvarının ortam sıcaklığı $22\pm 1^{\circ}\text{C}$ 'dir. Numuneler 3'er kez ölçülmüştür. Yani 3 farklı geometrideki 6'şar parça 3 kez olmak üzere toplamda 54 nitrasyon öncesi 54 de nitrasyon sonrası olacak şekilde 108 ölçüm işlemi yapılmıştır. Tekrarlanan ölçüm işlemleri tamamen aynı şartlarda gerçekleştirilmiştir. Numunelerin boyut ölçümleri yapılırken Şekil 3.7'de görüldüğü gibi birbirine paralel yüzeylerde dört farklı noktaya prob dokundurularak boyutu meydana getiren düzlemler belirlenmiş ve ilgili ölçü CMM cihazının TouchDMIS isimli yazılımı vasıtasıyla belirlenen düzlemler arası mesafeden tespit edilmiştir.



Şekil 3.7. Kanallı prizmatik ve düz prizmatik geometri numunelerinin boyut ve geometrik tolerans ölçümleri

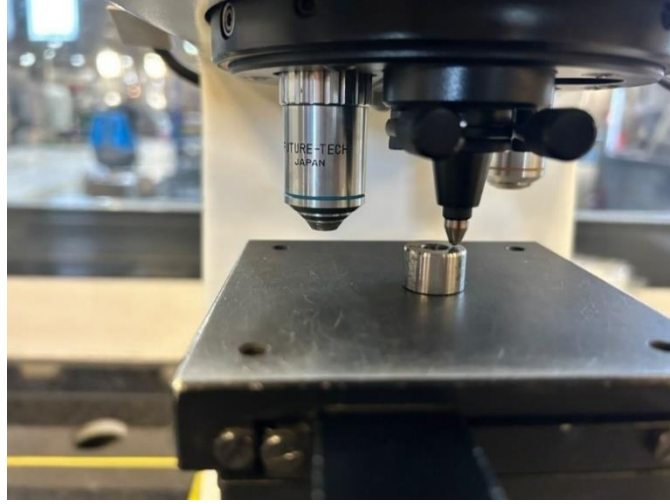
Bu işlem her bir ölçüm tekrarı için yapılmıştır. Çap ölçüleri de Şekil 3.8’deki gibi yine dairelerin dört farklı noktasına probun dokundurulmasıyla belirlenmiştir.



Şekil 3.8. Silindirik numunelerinin boyut ve geometrik tolerans ölçümleri

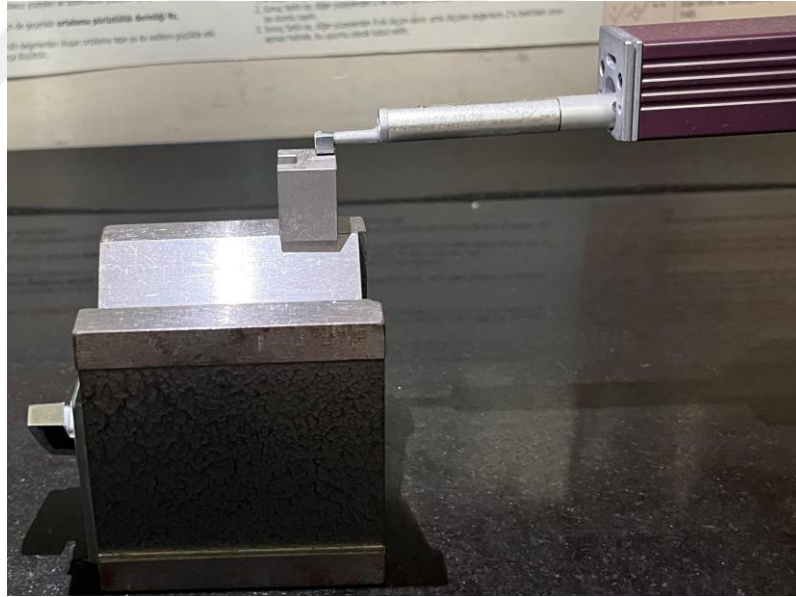
Paralellik toleransı, eş merkezlilik toleransı ve simetriklik toleransı ölçümleriyse yine birden fazla farklı noktalara probun dokundurulmasıyla ve CMM yazılımının çözümlemesiyle belirlenmiştir.

Parçaların yüzey sertliklerinin ölçümünde uygulanan yükün az olması nedeniyle ince parçalara ve yüzey sertliklerinin ölçümünde uygun bir yöntem olan Vickers ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri Şekil 3.9’da görülen Future-tech marka FM-700e model Vickers mikro sertlik ölçüm cihazıyla yapılmıştır. Nitrasyon işleminden önce ve sonra 300 g yük altında bir Vickers uç 10s yükleme süresi uygulanarak her bir numune yüzeyinin 3 farklı noktasından ölçüm alınarak ortalama değerler hesaplanmıştır.



Şekil 3.9. Mikrosertlik Ölçüm Cihazı

Pürüzlülük değerleri Ra cinsinden μm olarak $22 \pm 1^\circ$ ortam sıcaklığına sahip ölçüm laboratuvarında Şekil 3.10’da bir ölçüm örneğinde görüldüğü gibi her bir numune için nitrasyon öncesi ve nitrasyon sonrası referans yüzeylerden 3’er tekrar yapılarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülük ölçümünde Mitutoyo marka 178-560-01D model ölçüm cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.10. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü

Çalışmada hem nitrasyon öncesi hem de nitrasyon sonrası için tekrarlı bir şekilde yapılan tüm boyut, geometrik sertlik ve yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde ortalama değerler ve standart sapmaları hesaplanmıştır. Standart sapma hesaplamaları Microsoft Excel yazılımında =STDSAPMA.S fonksiyonu ile gerçekleştirilmiştir.

Standart sapma, bir veri kümesindeki değerlerin ortalamadan ne kadar saptığını

ölçen bir istatistiksel metriktir. Standart sapmanın hesaplanmasında kullanılan iki farklı formül vardır: örneklem standart sapması ve popülasyon standart sapması.

Popülasyon Standart Sapması (STDSAPMA.P) tüm popülasyona ait verilerin standart sapmasını hesaplamak için kullanılır. Popülasyon standart sapması Denklem 3.1 ile hesaplanır.

$$\sigma = \sqrt{[\sum(x_i - \mu)^2 / N]} \quad (3.1)$$

Burada:

- σ : Popülasyon standart sapması
- x_i : Her bir veri noktası
- μ : Popülasyonun aritmetik ortalaması
- N : Popülasyondaki toplam veri sayısıdır

Örneklem Standart Sapması (STDSAPMA.S) bir popülasyondan alınan örneklem verilerin standart sapmasını hesaplamak için kullanılır. Örneklem Standart Sapması Denklem 3.2 ile hesaplanır

$$s = \sqrt{[\sum(x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)]} \quad (3.2)$$

Burada:

- s : Örneklem standart sapması
- x_i : Her bir veri noktası
- $\bar{x}$: Örneklem verilerinin aritmetik ortalaması
- n : Örneklemdeki toplam veri sayısı

Tezde yapılan ölçümlerde ölçüm sayısı ve tekrarı üç olduğu için örneklem standart sapması kullanılmıştır.

3.5. Parçalara Nitrasyon İşlemi Uygulanması

Nitrasyon işlemi Şekil 3.11’de görülen Teknovak marka yatay tip 2 ton kapasiteli nitrasyon fırınında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.11. Nitrasyon işleminin gerçekleştiği fırın

Her bir geometride üçer adet numuneye 6 ve 12 saat olmak üzere iki farklı nitrasyon işlemi uygulanmıştır. Nitrasyon işleminde numuneler fırına yerleştirildikten sonra proses adımları başlatılmaktadır. Nitrasyon gaz ortamında yapılmıştır. Gazda nitrasyon işlemi, Çizelge 3.3'te verilen şartlarda sırasıyla fırın atmosferinin ısıtılması, azot gazı ile fırını yıkama, NH_3 gazıyla nitrasyon işlemi, nitrasyon sonrası NH_3 ile soğutma ve son olarak da N_2 ile soğutma adımlarıyla çeliklere uygulanmıştır. NH_3 gazıyla nitrasyon işlemi sırasında fırın atmosferine saatte 2m^3 NH_3 (amonyak) gazı verilmiştir. Nitrasyon işleminde uygulanan her bir adımın amacı Çizelge 3.4'te anlatılmıştır. Her iki nitrasyon işlem süresinde de diğer tüm şartlar aynıdır.

Çizelge 3.3. Nitrasyon Prosesi Şartları

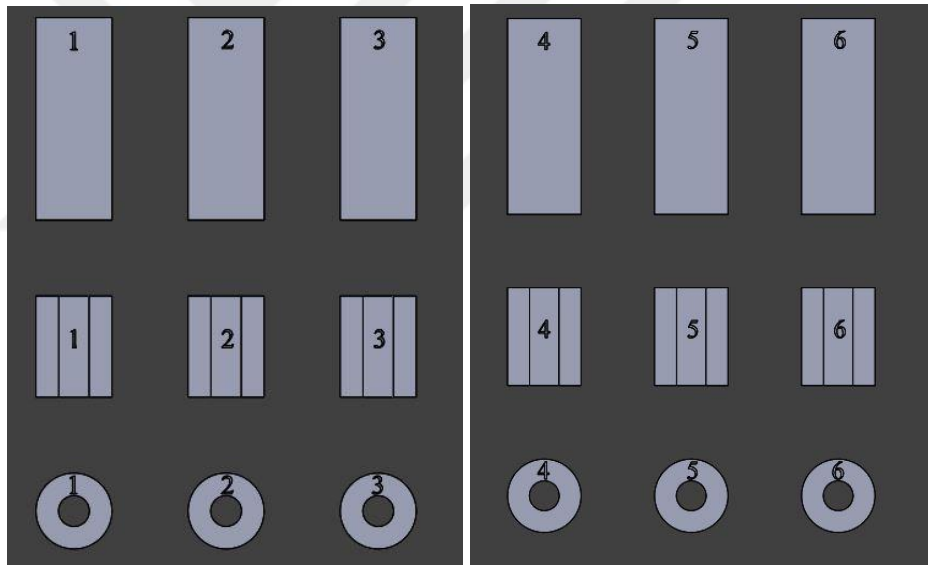
Proses Adımı	Fırın Atmosferini Isıtma	N_2 ile Yıkama	Nitrasyon İşlemi	Nitrasyon Sonrası NH_3 ile soğutma	N_2 ile soğutma
Proses Sıcaklığı($^{\circ}\text{C}$)	460	520	540	450	95
Proses Süresi(saat)	4	2	6 ve 12	3	3

Çizelge 3.4. Nitrasyon işlemi adımlarının uygulanış amaçları

Sıra No	Adım	Amaç
1	Azot Gazı ile Fırını Yıkama	Oksijen ve diğer yabancı gazlar, nitrasyon sırasında istenmeyen reaksiyonlara yol açabilir. Azot gazı, bu tür reaksiyonları engelleyerek

		daha kontrollü bir ortam sağlar. Ayrıca, fırındaki oksijenin giderilmesi, nitrasyon işleminin verimli olmasını ve çeliğin yüzeyinde istenmeyen oksitlerin oluşumunu engeller.
2	NH ₃ Gazıyla Nitrasyon İşlemi	Amonyak gazı, fırındaki yüksek sıcaklıkta azota ayrışır ve çeliğin yüzeyine azot atomları aktarır. Bu, çeliğin yüzeyinde nitrür bileşiklerinin oluşmasını sağlar ve yüzey sertliğini artırır. NH ₃ gazı, nitrasyon işlemi için en yaygın kullanılan kaynaktır çünkü azot sağlamanın yanı sıra, işlem sıcaklıklarında güvenli ve verimli bir şekilde ayrışır.
3	Nitrasyon Sonrası NH ₃ ile Soğutma	Nitrasyon işlemi sırasında, çelik yüksek sıcaklıklara ulaşır. NH ₃ gazı ile soğutma, çeliğin hızlı ve kontrollü bir şekilde soğumasını sağlar. Ayrıca, NH ₃ gazı soğutma işlemi sırasında, sıcaklık düşüşü esnasında çeliğin yüzeyinde oluşan azotun daha dengeli bir şekilde tutulmasına yardımcı olur.
4	N ₂ ile Soğutma	Azot gazı, nitrasyon işlemi sonrasında yavaş ve kontrollü bir soğutma sağlar. Bu, çeliğin iç yapısının homojen bir şekilde sertleşmesini ve iç gerilmelerin minimize edilmesini sağlar. NH ₃ gazı ile yapılan soğutma, çeliğin hızlı soğutulmasına yol açabilecekken, N ₂ gazı ile yapılan soğutma daha yavaş bir soğuma hızına sahiptir, bu da çeliğin daha düzgün bir mikro yapı kazanmasına yardımcı olur.

Altı ve on iki saatlik işlem uygulamasında numuneler fırına Şekil 3.12'deki gibi aralarında yeterli boşluk olacak şekilde yerleştirilmiştir.



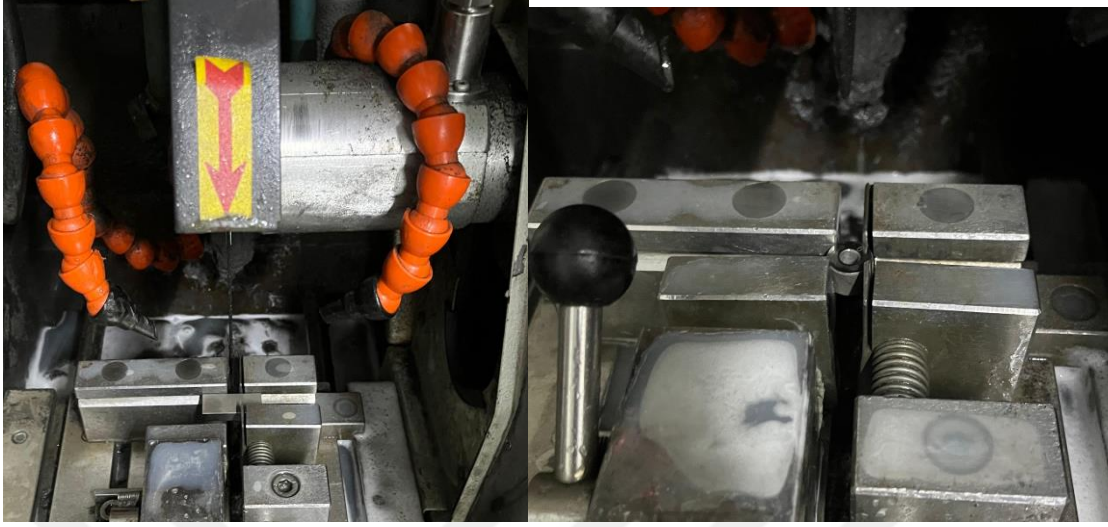
Şekil 3.12. Altı saatlik (1, 2, 3) ve on iki saatlik (4, 5, 6) nitrasyon işleminde numunelerin fırına yerleşim biçimi

3.6. Nitrasyon Tabakasının Görüntülenmesi ve Ölçümü

Nitrasyon işlemi uygulanan numunelerin optik mikroskopta beyaz tabaka kalınlıklarının görüntülenmesi için numuneler

Optik mikroskopta beyaz tabaka kalınlığının numunenin dış duvarlarındaki dağılımını görebilmek için Şekil 3.13'teki yapısında SiC elmas tozları bulunan abrasiv kesme diskine sahip SERVOCUT marka M 250 model abrasiv kesme testeresinde

yapılmıştır. Kesme esnasında ortaya çıkan ısıyı azaltmak amacıyla numunede korozyona yol açmayacak bor yağı, su karışımı soğutucu sıvı kullanılmıştır.



Şekil 3.13. Abrasiv kesme testeresinde deney numunelerinin kesit alma işlemi

Kesit alma işlemi tamamlandıktan sonra numunelerin kaba zımparalama işlemi Şekil 3.14'teki METKON marka FORCIPOL 2V model zımparalama ve parlatma makinesinde sırasıyla 60 kum, 120 kum, 240 kum ve 320 kum Al_2O_3 zımparalarla yapıldıktan sonra saf alkolle temizlenip kurutulmuştur.



Şekil 3.14. Numune hazırlamada kullanılan zımparalama ve parlatma cihazı

Ardından numunelerin daha kolay tutulabilmesi, yatay zeminde daha düz durabilmesi ve ayrıca parlatma işlemi esnasında düz kenarların düzlüğünün

korunabilmesi için Şekil 3.15'teki METSPRE marka BC-45 model sıcak bakalite alma cihazında 190°C sıcaklıkta 15 dakika sürede siyah bakalite alma tozu kullanılarak bakalite alma işlemi yapılmıştır.

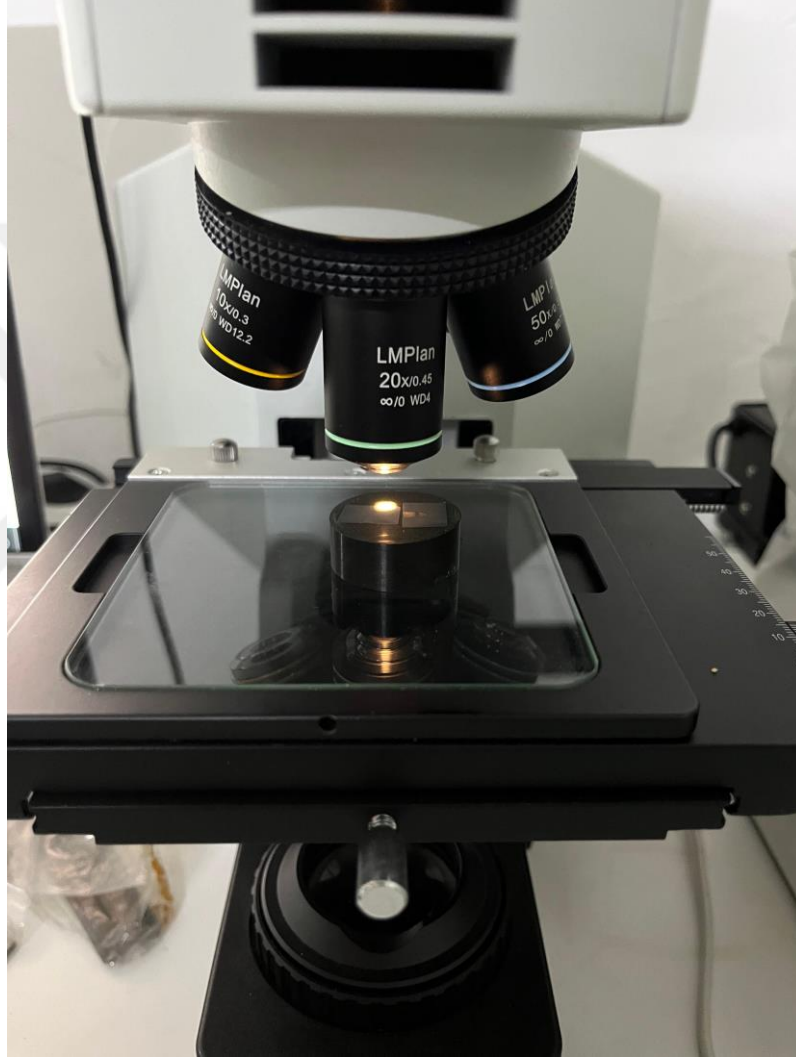


Şekil 3.15. Numune hazırlamada kullanılan bakalitleme cihazı

Bakalite alınan numunelerin yüzeyi halen mikroskopta incelendiğinde düzgün iç yapı görülemeyecek kadar pürüzlü olduğundan Şekil 3.14'teki cihazla 600 kum ve 800 kum Al_2O_3 zımparalarla ince zımparalama işlemi yapılmıştır. Zımparalama işlemi esnasında hem aşınan metalleri zımpara yüzeyinden uzaklaştırmak amacıyla hem de numunenin fazla ısınmasını önlemek için su kullanılmıştır. Ayrıca zımparalama işlemi elle yapıldığından zımpara izlerinin ortadan kaldırılması amacıyla her bir zımpara geçişi arasında numuneler 90° döndürülerek zımparalanmıştır.

Tüm zımparalama işlem adımları tamamlandıktan sonra numuneye mikroskopta bakıldığında ayna gibi parlak olması ve çizik olmaması için parlatma işlemi uygulanmıştır. Parlatma işlemi Şekil 3.14'teki cihazın sağ tarafında bulunan parlatma çuhasına sıvı formdaki aşındırıcı elmas tozu sıkılarak parlatma işlemi yapılmıştır.

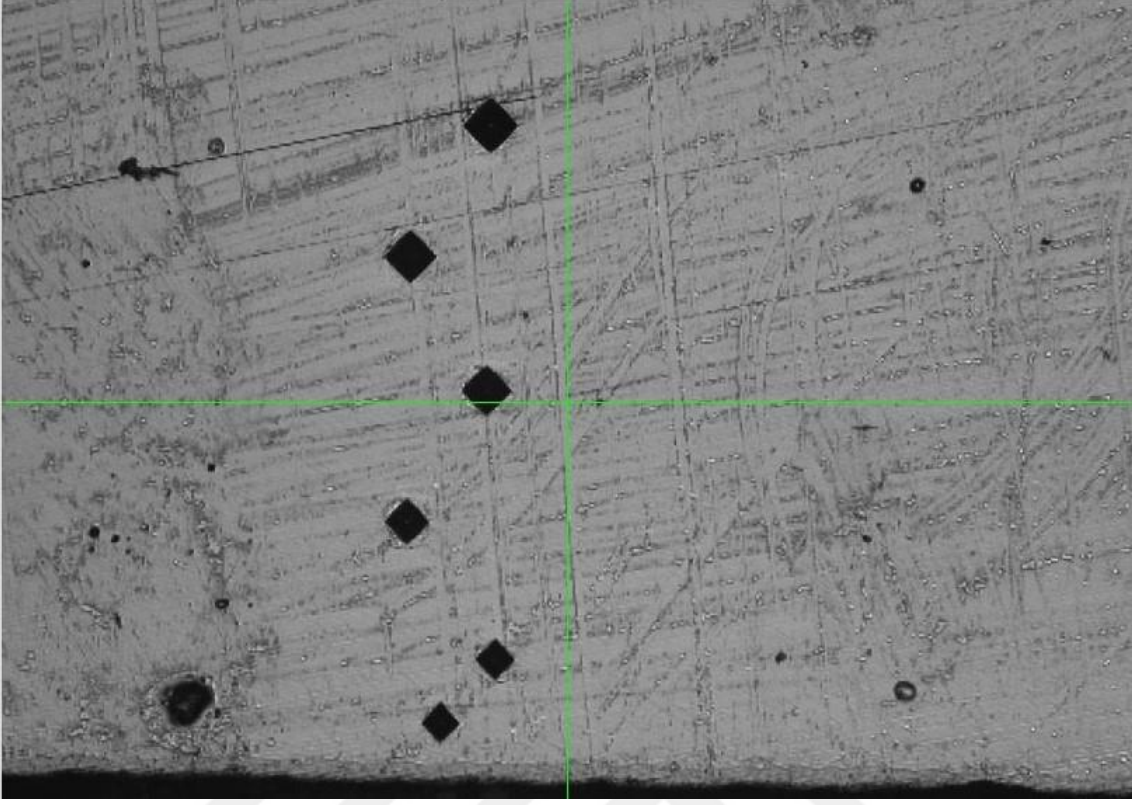
Parlatma işleminden hemen sonra saf alkolle kurutulan numuneler optik mikroskopta 100X te çizik olmadığından emin olunduktan sonra dağlama işlemi için hazır hale gelmiştir. Dağlama işlemi için Nital%2 dağlama solüsyonu kullanılmıştır. Dağlama işlemi ferrit, perlit ve martensit gibi farklı fazları birbirinden ayırmak ve her bir fazı daha net görme amacıyla ve beyaz tabakanın daha görünür hale gelmesi amacıyla yapılmaktadır. Tüm hazırlama işlemleri tamamlanan bakalite alınmış numuneler Şekil 3.16’da görülen optik mikroskopta beyaz tabaka kalınlıkları incelenmiştir.



Şekil 3.16. Beyaz tabaka kalınlıklarının optik mikroskop cihazında incelenmesi

Optik mikroskopta beyaz tabaka görüntülemesi tamamlanan numunelerin Şekil 3.9’deki vickers sertlik ölçüm cihazıyla difüzyon derinliğinin belirlenebilmesi için sertlik taraması işlemi yapılmıştır. Sertlik taraması işlemi yüzeye 50 μm mesafeden başlanarak önce 100 μm mesafeden ölçüm alınmış sonrasında ise 100 μm aralıklarla çekirdek sertliğine yaklaşıncaya kadar yapılmıştır. Sertlik taraması esnasında peş peşe yapılan sertlik ölçümlerinde Vickers ucun oluşturduğu eşkenar dörtgen şeklindeki

görüntü Şekil 3.17'deki gibidir.



Şekil 3.17. Sertlik taraması sonucu numunede oluşan oyuntular

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde nitrasyon işlemi sonucunda boyut ve geometrik toleranslardaki değişimler, yüzey pürüzlülüğü ve sertliğe nitrasyon işleminin etkileri konusundaki sonuçlar sunulmuştur.

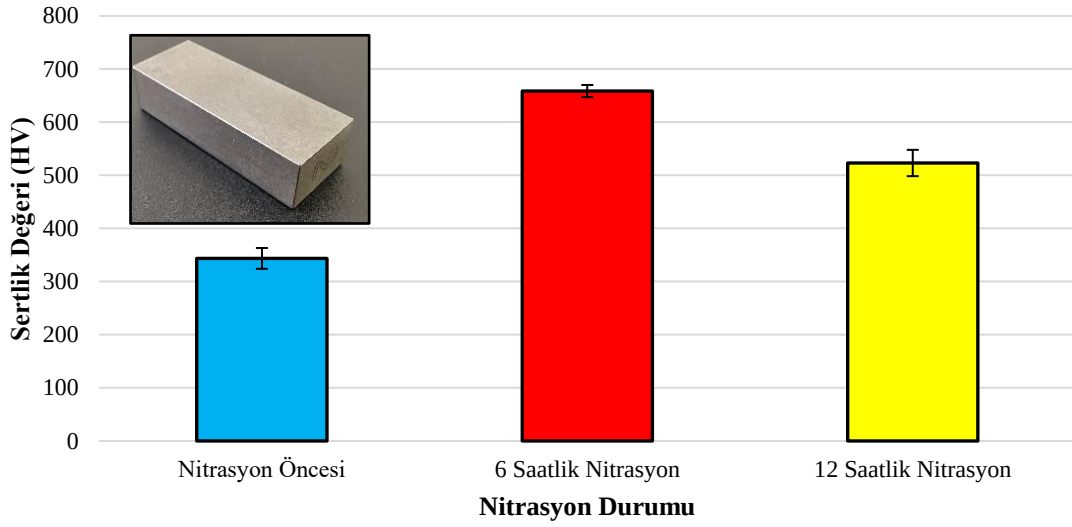
4.1. Parçaların Sertlik Değerine Nitrasyon İşleminin Etkisi

Düz prizmatik, kanallı prizmatik ve ortası delik olan silindirik parçalara 6 ve 12 saat olmak üzere iki farklı sürede uygulanan nitrasyon işleminin yüzey sertliğine etkileri araştırılmıştır. Her bir geometride 6 adet nitrasyon öncesi parça, 3 adet 6 saatlik ve 3 adet 12 saatlik nitrasyon uygulanan parçaların sertlik ölçümleri her bir parça için üçer kez tekrarlanmış olup toplamda yapılan 108 adet ölçüme göre **ölçümlerin standart sapması** %68 güvenilirlikle ± 4 HV bulunmuştur. Bundan sonraki belirtilen tüm ölçümlerin ve deney tekrarlarının standart sapma değerleri %68 güvenilirlikle verilmiştir. Sonuç grafiklerinde de her bir nitrasyon durumunda tekrarlanabilirlik sonuçları %68 güvenilirlikteki hata çubuklarıyla gösterilmiştir.

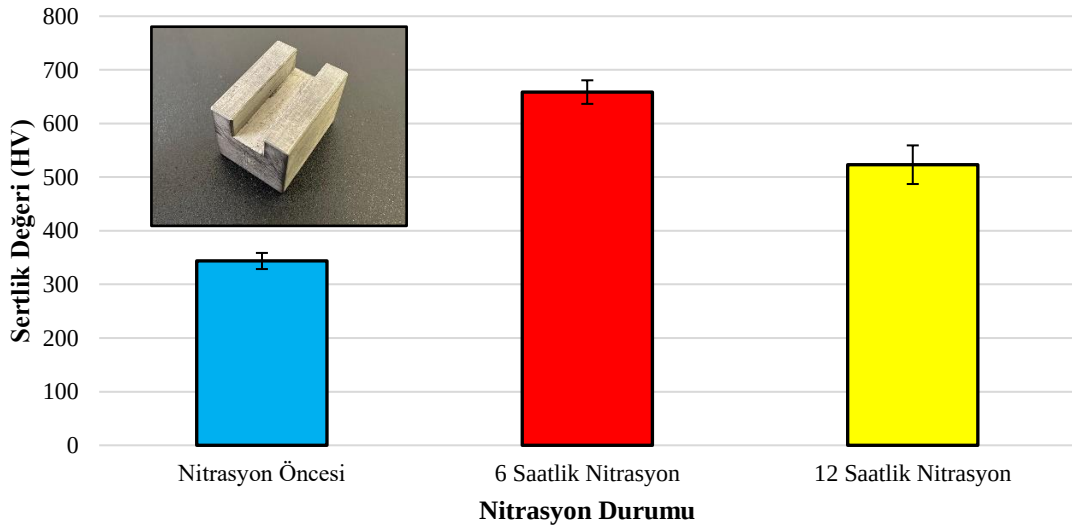
Düz prizmatik parça için elde edilen sonuçlar Şekil 4.1’de verilmiştir. Düz prizmatik parçanın nitrasyon öncesi ve nitrasyon sonrası sertlik değerleri karşılaştırılmıştır. Nitrasyon öncesi sertlik değerleri 6 düz prizmatik parçadan elde edilen ortalama değerdir. Nitrasyon öncesinde 6 adet numunenin ortalama sertlik değeri 344 ± 20 HV bulunmuştur. 6 saatlik nitrasyon işlemi sonrasında sertlik değeri 659 ± 11 HV değerine, 12 saatlik nitrasyon işlemi sonrasında ise 523 ± 25 HV değerine yükselmiştir. Böylece 40x10x15 mm boyutlarındaki düz prizmatik parçanın yüzey sertliğinde 6 ve 12 saatlik nitrasyon işlemi sonucunda ortalama olarak sırasıyla %91,6 ve %52,2 oranında artış olduğu hesaplanmıştır.

Kanallı prizmatik parçaya uygulanan nitrasyon işleminin yüzey sertliğine etkisi Şekil 4.2.’de verilmiştir. Bu parçada sertlik değerleri kanalın kesitine dik olan dış yüzeyden yine üç farklı bölgeden ölçülmüştür. Nitrasyon öncesindeki sertlik ölçümlerinin sonucunda ortalama sertlik değeri 340 ± 15 HV bulunmuştur. Numunelerin sertlik değeri 6 saatlik nitrasyon sonrasında 681 ± 22 HV değerine, 12 saatlik nitrasyon işlemi sonrasındaysa 568 ± 36 HV değerine yükselmiştir. Böylece üzerinde 6 mm genişliğinde kanal bulunan 20x15x15 mm boyutlarındaki kanallı prizmatik parçanın yüzey sertliğinde 6 ve 12 saatlik nitrasyon işlemi sonucunda ortalama olarak sırasıyla %100,3 ve %67

oranında artış olduğu hesaplanmıştır.



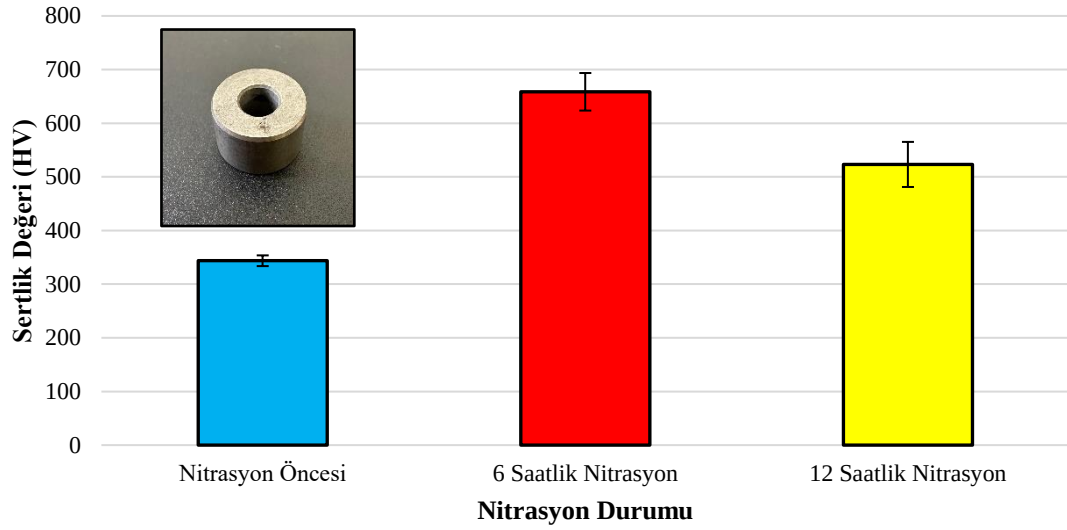
Şekil 4.1. Düz prizmatik parça nitasyon öncesi ve sonrası sertlik farklılığı



Şekil 4.2. Kanallı prizmatik parça nitasyon öncesi ve sonrası sertlik farklılığı

Silindirik parçada 6 ve 12 saat nitasyon sonucundaki sertlik değerlerinin karşılaştırılması Şekil 4.3'te verilmiştir. Silindirik parçadaki sertlik değeri değişimi düz prizmatik ve kanallı prizmatik parçadaki sertlik değişimlerine benzemektedir. Nitasyon öncesindeki sertlik ölçümlerinin sonucunda ortalama sertlik değeri 339 ± 10 HV olarak hesaplanmıştır. Numunelerin sertlik değeri 6 saatlik nitasyon sonrasında 654 ± 35 HV değerine, 12 saatlik nitasyon işlemi sonrasında 503 ± 42 HV değerine yükselmiştir. Böylece üzerinde 6 mm çapında delik bulunan 15 mm çap ve 10 mm yüksekliğindeki

silindirik parçanın yüzey sertliğinde 6 ve 12 saatlik nitrasyon işlemi sonucunda ortalama olarak sırasıyla %92,9 ve %48,4 oranında artış olduğu hesaplanmıştır.

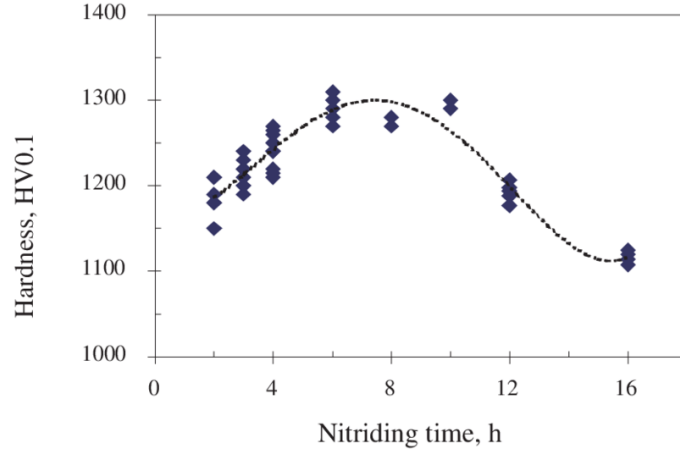


Şekil 4.3. Silindirik Parça Nitrasyon Öncesi ve Sonrası Sertlik Farklılığı

Nitrasyon süresinin AISI 4340 malzemenin yüzeyinde meydana gelen sertlik artışına etkisi üç farklı geometri için de Çizelge 4.1’de özetlenmiştir. Buna göre tüm geometrilerde 6 saatlik nitrasyon işleminde ortalama sertlik 664 ± 14 HV, 12 saatlik nitrasyon işleminde ise 531 ± 33 HV olmuştur. Nitrasyon öncesi duruma göre sertlik artışı 6 saatlik nitrasyon işleminde %95 iken, 12 saatlik nitrasyon işleminde %55,8 olmuştur. Böylece nitrasyon süresi arttıkça yüzey sertliğinde azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Sürenin artmasıyla yüzey sertliği değerinin azalmasına yüzeyde sertlik sağlayan ve beyaz tabakayı oluşturan nitrür bileşiklerinin zamanla parça içerisine doğru yayılması ve beyaz tabaka kalınlığının azalırken difüzyon tabakası kalınlığının artmasının neden olduğu düşünülmüştür. Bu durum literatürle de desteklenmiş olup Çapa ve ark. (1999) tarafından yapılan çalışmada AISI-H13 sıcak iş çeliğine 2 saatten 16 saate kadar olan farklı sürelerde uygulanan nitrasyon işlemlerinin sonucunda numunelerin sertlik değerleri Şekil 4.4’teki gibi elde edilmiştir. Bu çalışmada da sertlik değerinin 8 saate kadar artarken sonrasında azalmaya başladığı görülmektedir.

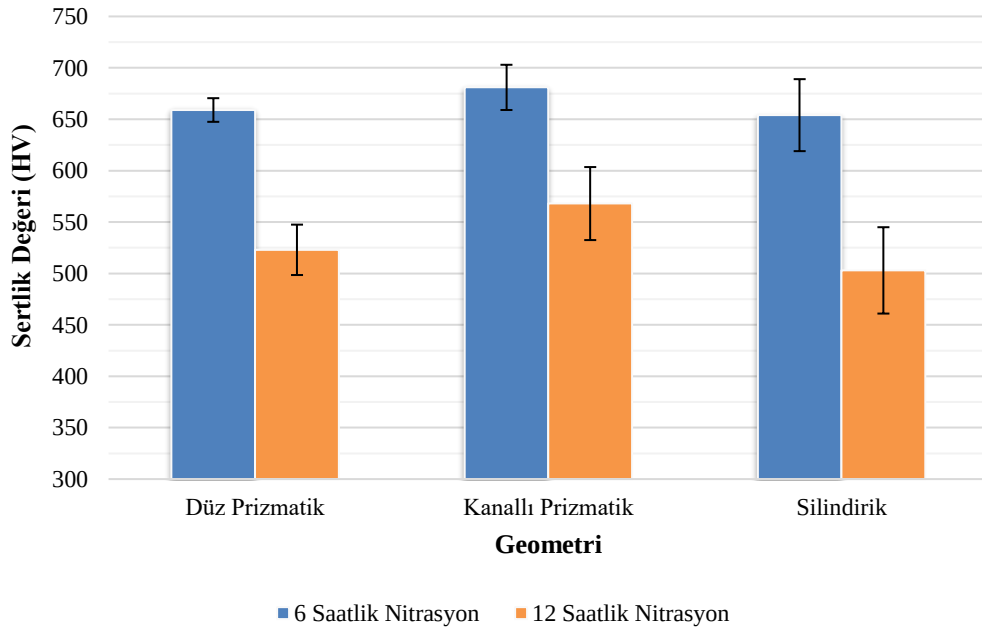
Çizelge 4.1. Farklı geometrideki parçalara uygulanan nitrasyon işlemi sonrasında sertlik değerindeki artışı

	Nitrasyon Öncesi	6 Saatlik Nitrasyon	12 Saatlik Nitrasyon
Düz Prizmatik	344±20	659±11,5	523±24,5
Kanallı Prizmatik	340±15	681±22	568±35,5
Silindirik	339±10	654±35	503±42
Ortalama	341±3	664±14	531±33



Şekil 4.4. Nitrasyon işlem süresi yüzey sertliği ilişkisi Çapa ve ark. (1999)

Numune geometrisinin nitrasyon işlemiyle meydana gelen sertlik artışına etkisi Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 6 saatlik nitrasyon işleminde hata bantları da dikkate alındığında geometrinin nitrasyon işlemiyle kazanılan sertlik değerine etkisinin olmadığı görülmektedir. 12 saatlik nitrasyon işleminde ortalama sertlik değerleri kanallı prizmatik parçada diğerlerine göre daha yüksek olup 6 saatlik nitrasyona göre daha fazla değişim göstermiştir. Ancak hata bantlarıyla birlikte değerlendirildiğinde yine 12 saat için de geometrinin sertliğe etkisinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

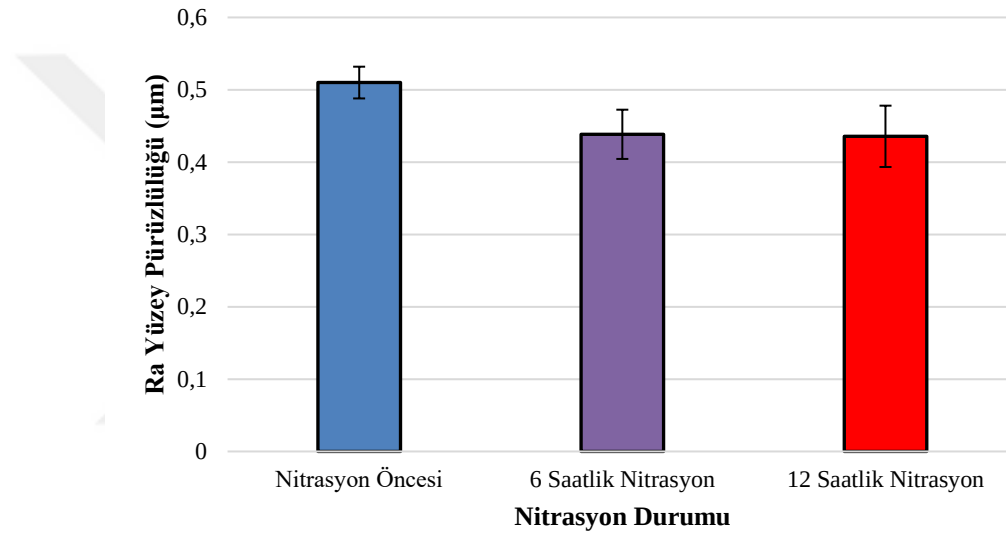


Şekil 4.5. 6 ve 12 saat nitrasyon uygulamasının numune geometrilerine göre değişimi

4.2. Nitrasyon İşleminin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Nitrasyon işleminin parçaların yüzey pürüzlülüğüne etkisi sertlik ölçümlerinde kullanılan 6 adet nitrasyon öncesi parça, 3 adet 6 saatlik ve 3 adet de 12 saatlik nitrasyon uygulanan parçalar üzerinde yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümleri ile araştırılmıştır. Ölçümler her bir parça için üçer kez tekrarlanmış olup toplamda 108 adet yapılan ölçümün ortalama standart sapması %68 güvenilirlikle $\pm 0,03 \mu\text{m}$ bulunmuştur.

Düz prizmatik parçaya uygulanan 6 ve 12 saatlik nitrasyon işlemi sonucunda numunelerin R_a cinsinden ortalama yüzey pürüzlülük değerlerindeki değişimi Şekil 4.6'daki gibidir.

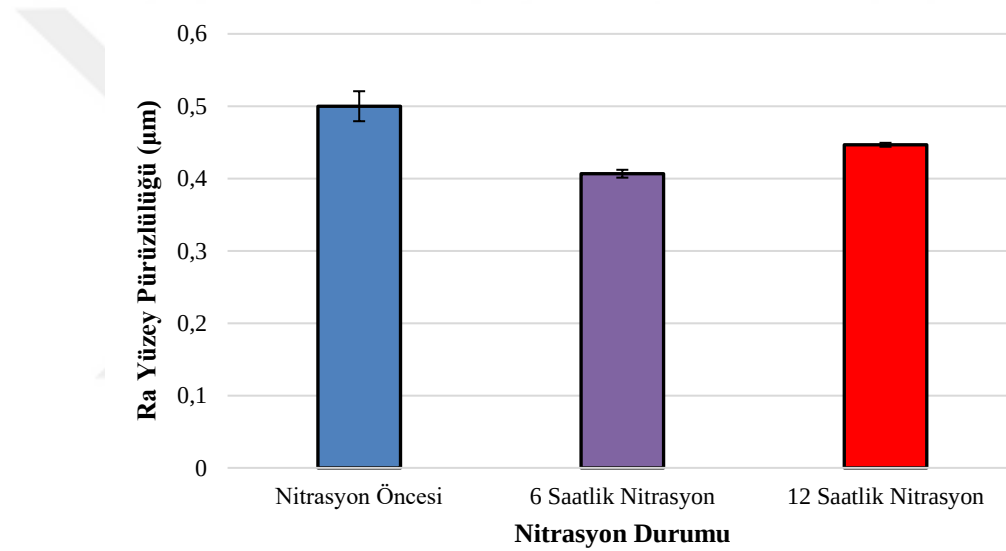


Şekil 4.6. Düz prizmatik parça nitrasyon öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değişimi

Nitrasyon öncesi yüzey pürüzlülük değeri 6 düz prizmatik parçadan elde edilen değerlerin ortalamasıdır. 6 adet numunenin ortalama yüzey pürüzlülük değeri $0,51 \pm 0,02 \mu\text{m}$ bulunmuştur. 6 saatlik nitrasyon işlemi sonrasında ortalama yüzey pürüzlülük değeri $0,438 \pm 0,03 \mu\text{m}$, 12 saatlik nitrasyon işlemi sonundaysa $0,435 \pm 0,04 \mu\text{m}$ değerinde ölçülmüştür. Dolayısıyla farklı sürelerdeki nitrasyon işlemi sonrasında yüzey pürüzlülüğü aynı değerde elde edilmiştir. Ortalama değerlere göre nitrasyon işlemiyle yüzey pürüzlülüğü bir miktar azalsa da deney tekrarlarının ve ölçümlerin belirsizliği dikkate alındığında bu azalma sınırlı düzeydedir. Ayrıca farklı numunelerden elde edilen yüzey pürüzlülüğünün belirsizliği olan $\pm 0,03 \mu\text{m}$ ve $\pm 0,04 \mu\text{m}$ değerleri ölçümün belirsizliği olan $\pm 0,03 \mu\text{m}$ değerine çok yakın çıkmıştır. Böylece numuneler arasındaki tekrarlanabilirliğin oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

Kanallı prizmatik parçalara 6 ve 12 saatlik nitrasyon uygulanması sonucunda

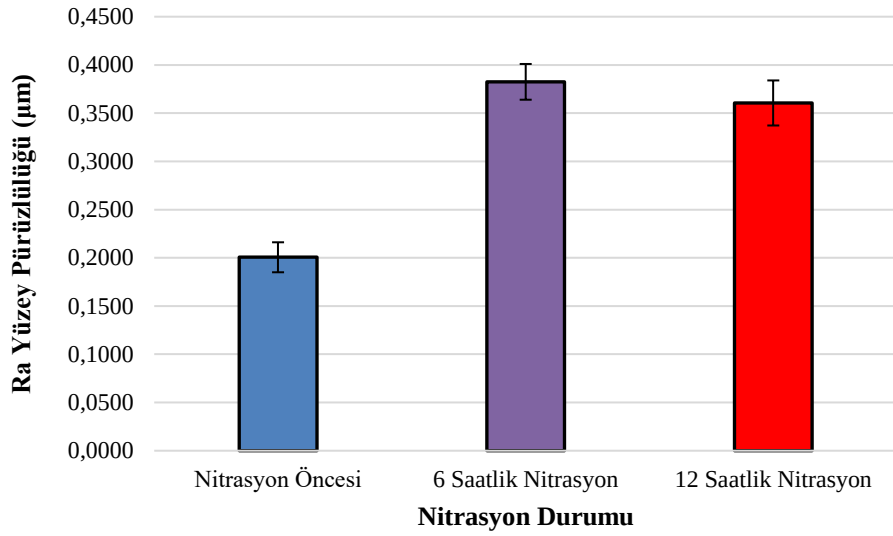
yüzey pürüzlülük değerlerinde meydana gelen değişim Şekil 4.7’de verilmiştir. Kanallı prizmatik parçanın nitrasyon öncesi ve sonrasındaki yüzey pürüzlülük ölçümleri kanal kesitine dik olan dış yüzeyden yapılmıştır. Nitrasyon öncesinde 6 adet numunenin ortalama yüzey pürüzlülük değeri düz prizmatik parçaya çok yakın değerde $0,5\pm0,02$ μm bulunmuştur. 6 saatlik nitrasyon işlemi sonrasında ortalama yüzey pürüzlülük değeri $0,39\pm0,005$ μm değerine 12 saatlik nitrasyon işlemi sonundaysa ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri $0,44\pm0,002$ μm değerine gerilemiştir. Kanallı prizmatik parçada tekrarlar arasındaki belirsizlik çok az çıktığı için nitrasyon işlemiyle pürüzlülüğün azaldığı ve 12 saatlik nitrasyon sonucunda pürüzlülüğün 6 saate göre $0,05$ μm daha fazla çıktığı bulunmuştur.



Şekil 4.7. Kanallı prizmatik parça nitrasyon öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değişimi

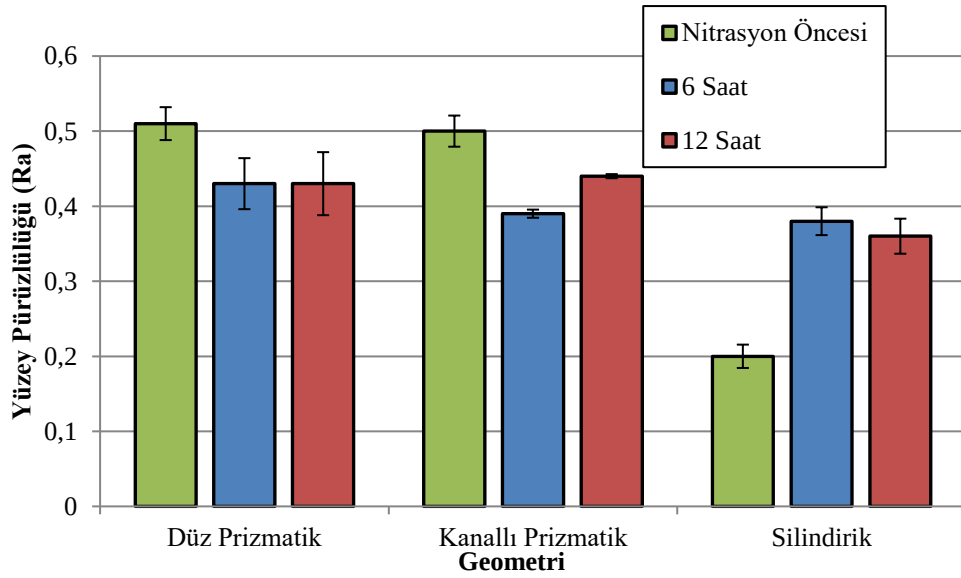
Silindirik parçaya uygulanan 6 ve 12 saatlik iki farklı nitrasyon işlemi sonucunda parçaların yüzey pürüzlülüğü değerindeki değişimi gösteren grafik Şekil 4.8’de gösterilmiştir. CNC tornada ince işlemeyle üretilen silindirik parçanın nitrasyon öncesi ve sonrasında yüzey pürüzlülüğü ölçümleri alın yüzeyinden yapılmıştır. Nitrasyon öncesinde 6 adet numunenin ortalama yüzey pürüzlülük değeri $0,2 \pm 0,01$ μm bulunmuştur. Bu değer frezeleme yöntemiyle üretilen prizmatik parçalara göre çok daha azdır. 6 saatlik nitrasyon işlemi sonrasında ortalama yüzey pürüzlülük değeri $0,38\pm0,02$ μm değerine 12 saatlik nitrasyon işlemi sonundaysa ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri $0,36\pm0,02$ μm değerine yükselmiştir. Nitrasyon işlemiyle prizmatik parçaların yüzey pürüzlülüğünde çok az azalma meydana gelirken silindirik parçada önemli oranda artış

görülmektedir.



Şekil 4.8. Silindirik parça nitrasyon öncesi ve sonrası yüzey pürüzlülük değişimi

Her bir geometri ve nitrasyon süresi için yüzey pürüzlülük değerlerindeki değişim toplu olarak Şekil 4.9’da verilmiştir. Buna göre nitrasyon işlemiyle geometri, süre ve başlangıç yüzey pürüzlülüğünden bağımsız olarak 0,36 ila 0,44 µm aralığında yüzey pürüzlülük değeri elde edildiği görülmektedir.

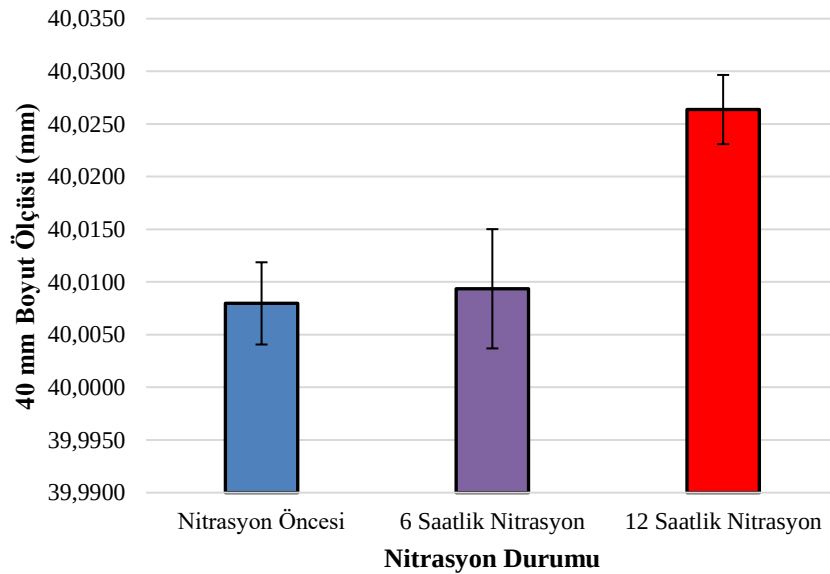


Şekil 4.9. Nitrasyon süresi ve geometri değişkenlerine göre yüzey pürüzlülük değerinin değişimi

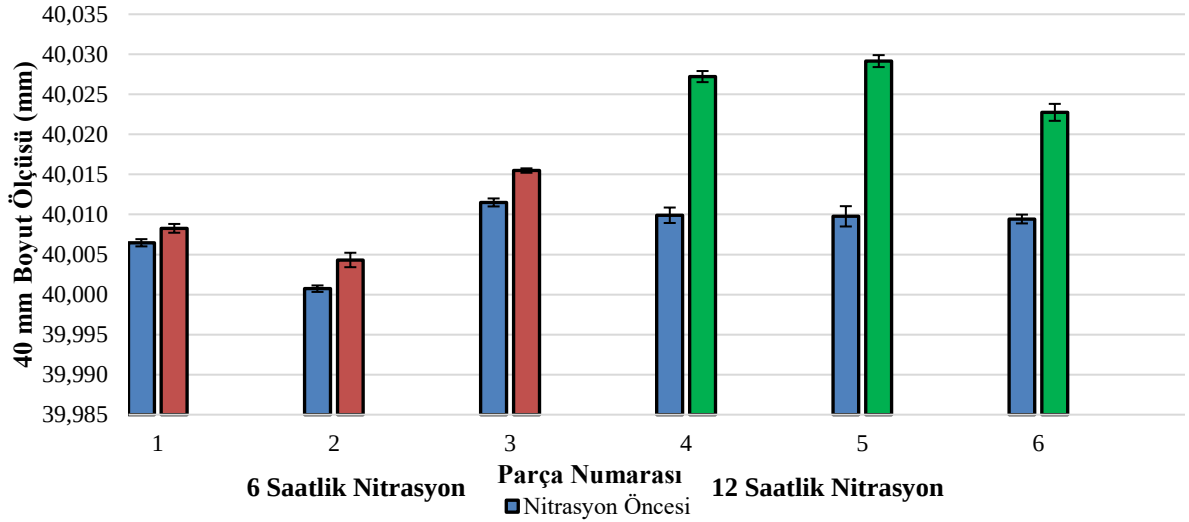
4.3. Nitrasyon İşleminin Boyut ve Geometrik Toleransa Etkisi

4.3.1. Düz prizmatik parça

Nitrasyon işleminin parçaların boyut ve geometrik toleransa etkisi sertlik ve yüzey pürüzlülük ölçümlerinde kullanılan 6 adet nitrasyon öncesi parça, 3 adet 6 saatlik ve 3 adet de 12 saatlik nitrasyon uygulanan parçalar üzerinde yapılan boyut ölçümleri ile araştırılmıştır. Ölçümler her bir parça için üçer kez tekrarlanmış olup toplamda 108 adet yapılan ölçümün ortalama standart sapması %68 güvenilirlikle $\pm 0,0004 \mu\text{m}$ bulunmuştur. Nitrasyon işleminin düz prizmatik parçanın 40 mm boyutuna etkisi Şekil 4.10'da verilmiştir. Nitrasyon öncesinde 6 adet numunenin 40 mm boyutunun ortalama değeri $40,008 \pm 0,004 \text{ mm}$ bulunmuştur. Üç parçanın ortalama ölçüsü 6 saatlik nitrasyon işlemi sonrasındaki $40,009 \pm 0,005 \text{ mm}$ değerine, 12 saatlik nitrasyon işlemi sonrasında ise $40,026 \pm 0,003 \text{ mm}$ değerine yükselmiştir. Belirsizlik değerleri de dikkate alındığında 6 saatlik işlem süresinin boyuta etkisinin olmadığı görülmektedir. Nitrasyon süresi 12 saate çıktığında boyuttaki artış $18 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.11'de 40 mm boyutundaki değişim her bir parçada ayrı ayrı gösterilmiştir. Her bir parça kendi arasında kıyaslandığında 6 saatlik nitrasyon işleminde de az da olsa boyutta net şekilde bir artış meydana geldiği anlaşılmakta olup bu değer ortalama olarak $3 \mu\text{m}$ hesaplanmıştır. 12 saatlik nitrasyonda da ölçü değerinde tüm parçalarda artışın 6 saatlik nitrasyona göre daha fazla olduğu görülmektedir ve bu değer de $16,7 \mu\text{m}$ olmuştur.



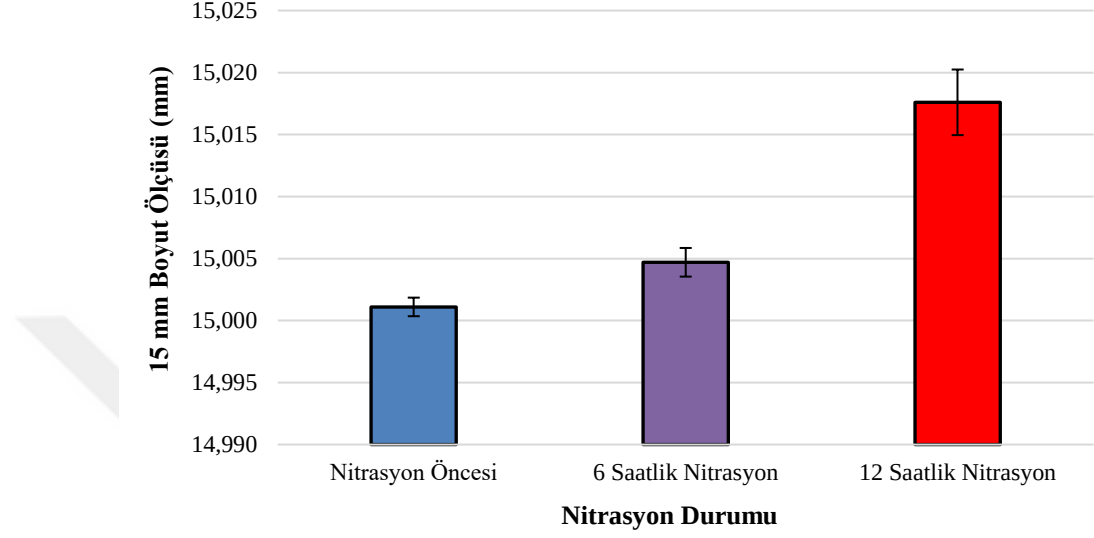
Şekil 4.10. Nitrasyon süresinin düz prizmatik parçanın 40 mm boyutundaki değişime etkisi



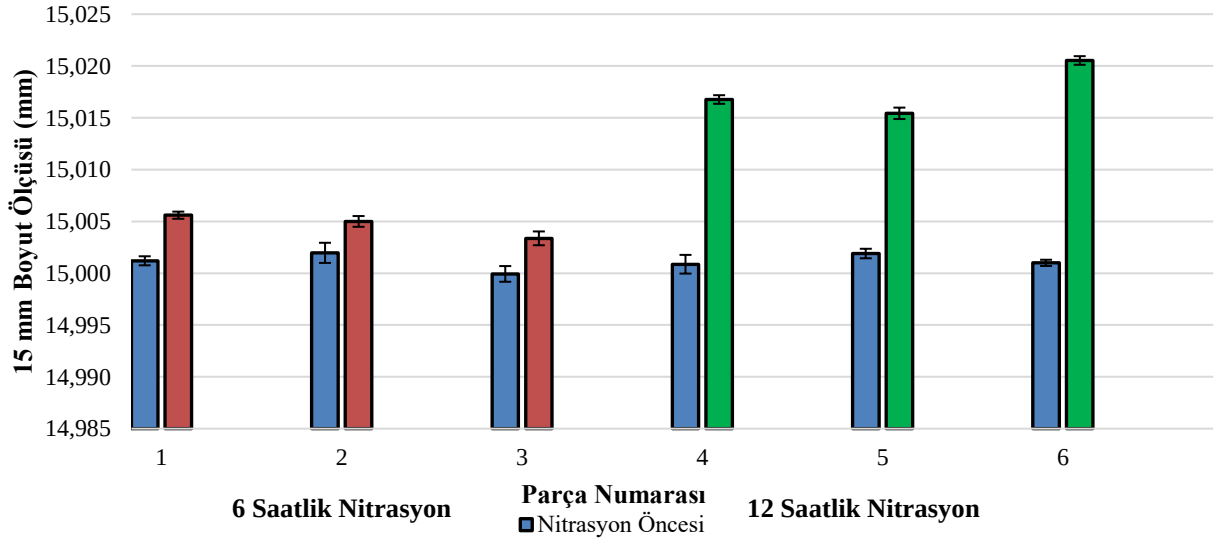
Şekil 4.11. Nitrasyon süresinin düz prizmatik parçanın 40 mm boyutundaki değişime etkisi

Düz prizmatik parçaya uygulanan nitrasyon işlemleri sonrasında 15 mm boyutunun uğradığı değişimi gösteren grafik Şekil 4.12'deki gibidir. Nitrasyon öncesinde 6 adet numunenin 15mm boyutunun ortalama değeri $15,0011 \pm 0,007$ mm bulunmuştur. 6 saatlik nitrasyon işlemi sonrasındaki ortalama değer $15,0047 \pm 0,005$ mm'ye yükselirken, 12 saatlik nitrasyon işlemi sonrasında ise $15,0176 \pm 0,0013$ mm'ye yükselmiştir. 6 saatlik nitrasyon işlemi sonucunda boyut artışı $3,6 \mu\text{m}$ ve 12 saatlik nitrasyon işlemi sonucunda $16,5 \mu\text{m}$ olmuştur. Düz prizmatik parçanın 15 mm boyutunun tüm numunelere göre karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.13'te verilmiş olup her bir parçanın boyutundaki değişim ayrı ayrı incelendiğinde de yine 6 saatlik nitrasyonun $3,6 \mu\text{m}$ ve 12 saatlik nitrasyonun da $16,6 \mu\text{m}$ boyut artışına neden olduğu hesaplanmıştır. Bu değerlerin 40 mm boyutta meydana gelen değişimlere oldukça yakın olması nitrasyon işleminin ölçüde meydana getirdiği değişkenliğin boyuttan bağımsız olduğunu göstermektedir. Bu sonucu düz prizmatik parçanın 10 mm boyutunun uğradığı değişim de doğrulamakta olup 6 ve 12 saatlik nitrasyon işlemleri sonucunda meydana gelen değişiklik Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Nitrasyon öncesinde 6 adet numunenin 10mm boyutunun ortalama değeri $10,0044 \pm 0,002$ mm bulunmuştur. 6 saatlik nitrasyon işlemi sonrasındaki değer $10,0084 \pm 0,0025$ mm değerine, 12 saatlik nitrasyon işlemi sonrasında ise $10,0174 \pm 0,0024$ mm değerine yükselmiştir. 10 mm ölçüsü için ortalama boyut artışı 6 saatlik nitrasyonda $4 \mu\text{m}$, 12 saatlik nitrasyonda $13 \mu\text{m}$ hesaplanmıştır. 12 saatlik nitrasyondaki boyut artışının ortalama değeri, 40 ve 15 mm boyutlarındaki sırasıyla $16,7$ ve $16,6 \mu\text{m}$ 'lik artışa göre daha az olsa da 10 mm lik boyuttaki standart sapma değerleri dikkate alındığında minimum $4,6 \mu\text{m}$, maksimumda ise $21,4 \mu\text{m}$ 'lik aralık

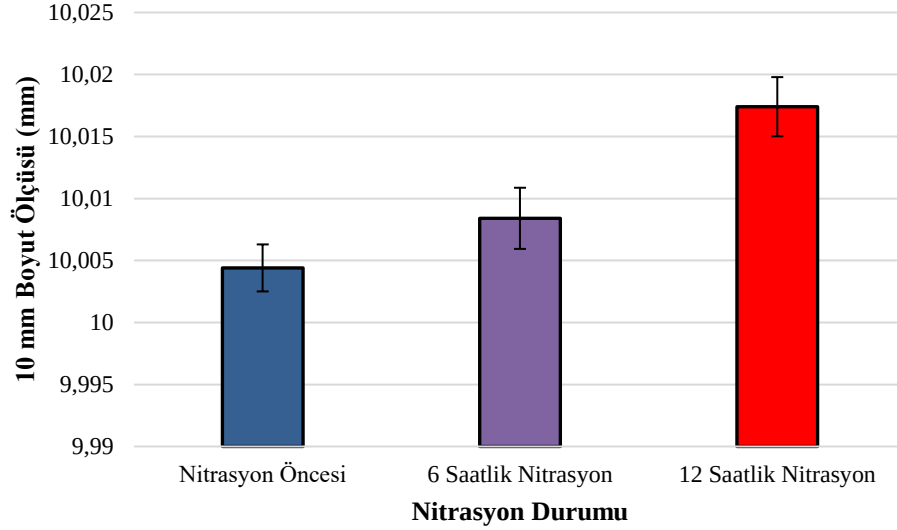
hesaplandığından diğer parçalardaki boyut artışına benzer bir netice elde edilmiştir. 10 mm ölçüsünde parçalar arasındaki farklılığın yüksek olması nedeniyle boyut değişimi de geniş bir aralıkta seyretmiştir. Boyut artışının tüm parçalar için karşılaştırması Şekil 4.15'te verilmiş olup parçalar arasında ölçüsel farklılığın 40 ve 15 mm boyutlarına göre daha fazla olduğu grafikten de görülmektedir.



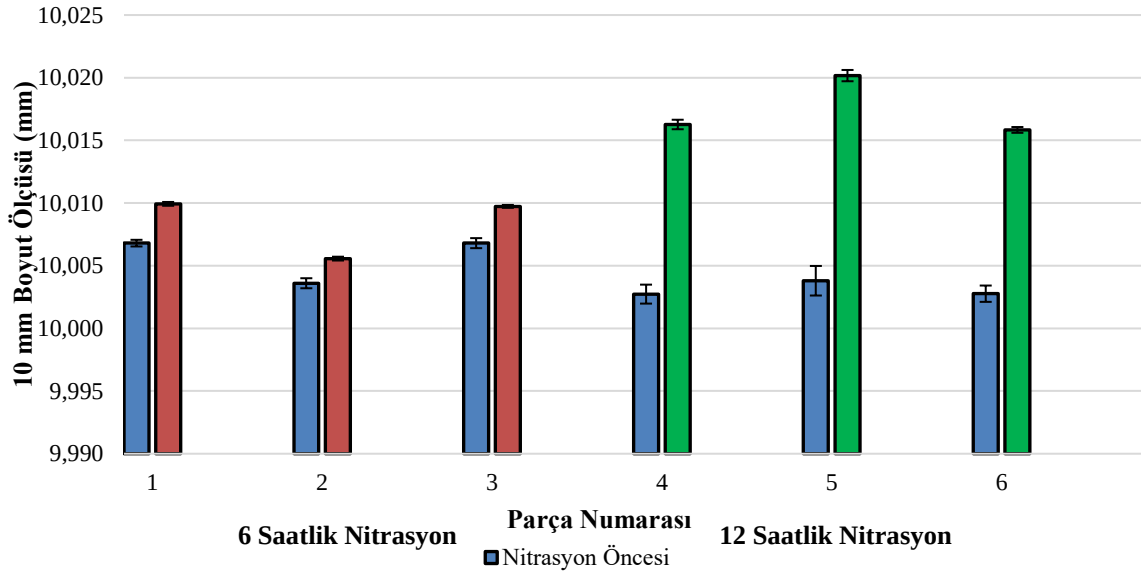
Şekil 4.12. Nitrasyon süresinin düz prizmatik parçanın 15mm boyutundaki değişime etkisi



Şekil 4.13. Nitrasyon süresinin düz prizmatik parçanın 15 mm boyutundaki değişime etkisi



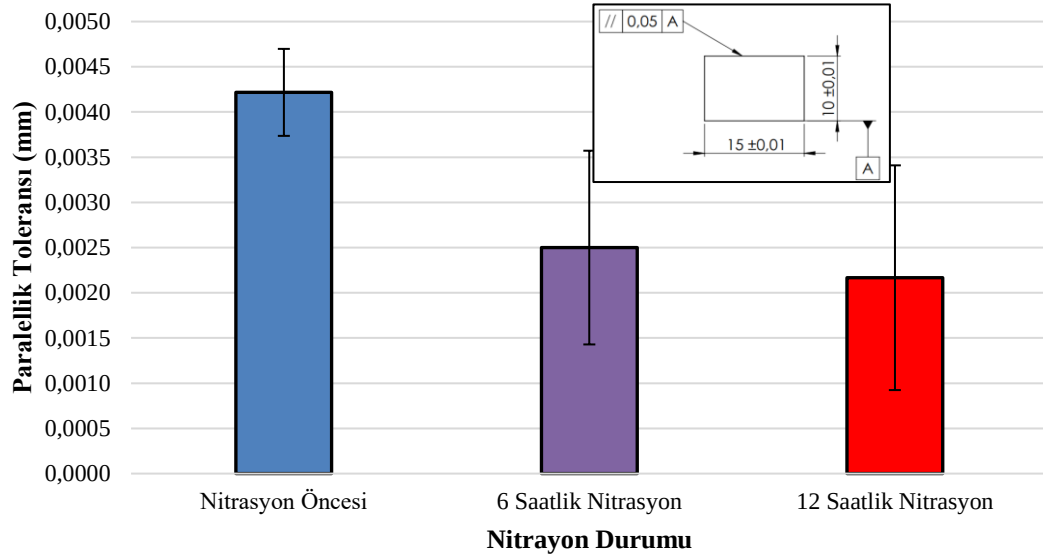
Şekil 4.14. Nitrasyon süresinin düz prizmatik parçanın 10 mm boyutundaki değişime etkisi



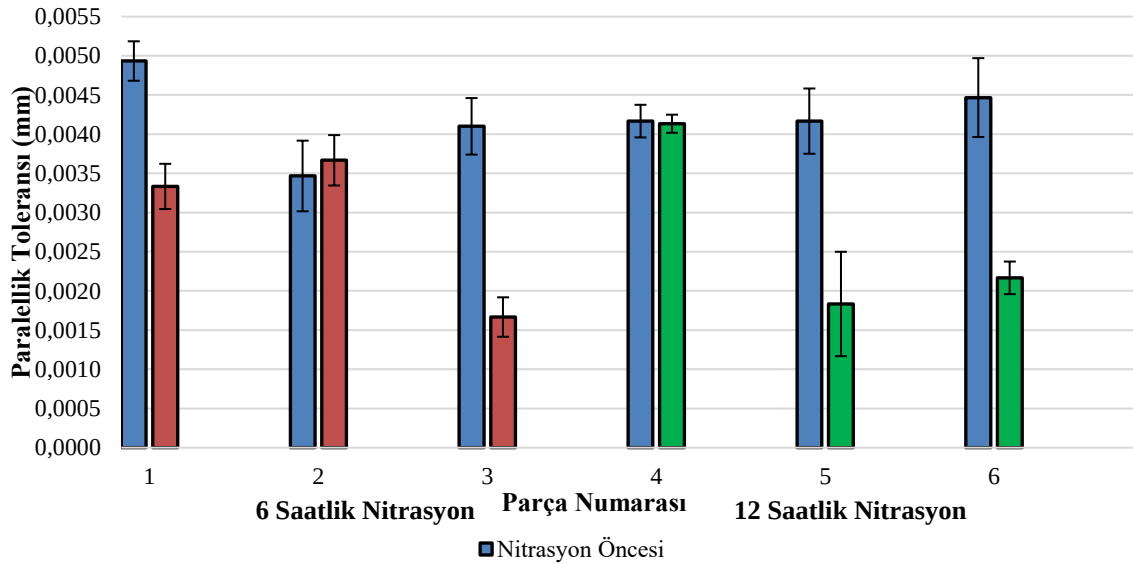
Şekil 4.15. Nitrasyon süresinin düz prizmatik parçanın 10 mm boyutundaki değişime etkisi

Düz prizmatik parçanın paralellik toleransındaki değişimin 6 ve 12 saatlik nitrasyon işlemine göre karşılaştırılması Şekil 4.16'daki grafikte gibidir. 6 adet düz prizmatik parçanın nitrasyon öncesi paralellik toleransı tasarımda 0,05 mm verilmesine rağmen onda birinden daha az bir değer olarak $0,0042 \pm 0,0004$ mm elde edilmiştir. Bu değer 6 saatlik nitrasyon işlemi sonrasında $0,0025 \pm 0,001$ mm değerine, 12 saatlik nitrasyon sonrasında $0,0022 \pm 0,001$ mm olmuştur. %68 güvenilirlilikteki belirsizlik değeriyle nitrasyon işlemiyle paralellik toleransında net bir değişim olduğu söylenememektedir. Şekil 4.17'de verilen tüm numunelerin paralellik toleranslarındaki değişimler incelendiğinde 6 saatlik nitrasyon için 1 ve 3 numaralı numuneler, 12 saatlik

nitasyonda ise 5 ve 6 numaralı numunelerde net bir değer azalması dolayısıyla toleransta iyileşme görölse de sadece bu parçalar dikkate alındığında paralellik toleransının nitasyon süresinden bağımsız olarak $4,4\ \mu\text{m}$ 'den $2,3\ \mu\text{m}$ 'ye azaldığı hesaplanmıştır. Bu değerler oldukça küçük olduğu ve bazı parçalarda net bir azalmadan bahsedilemediği için nitasyon işleminin paralellik toleransında bir etkisinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 4.16. Nitasyon süresinin düz prizmatik parçanın paralellik toleransındaki değişime etkisi



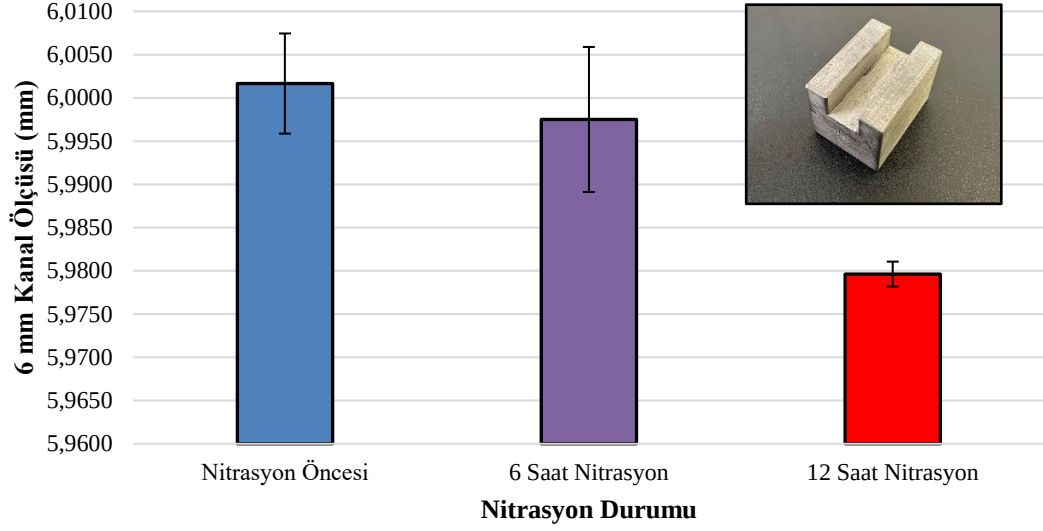
Şekil 4.17. Nitasyon süresinin düz prizmatik parçanın 0,05 paralellik toleransındaki değişime etkisi

4.3.2. Kanallı prizmatik parça

Dış geometrik boyutlara nitasyonun etkisi düz prizmatik parçada her bir boyut için incelendiğinden dolayı kanallı prizmatik parçada kanal genişliğinin ölçüsel toleransı

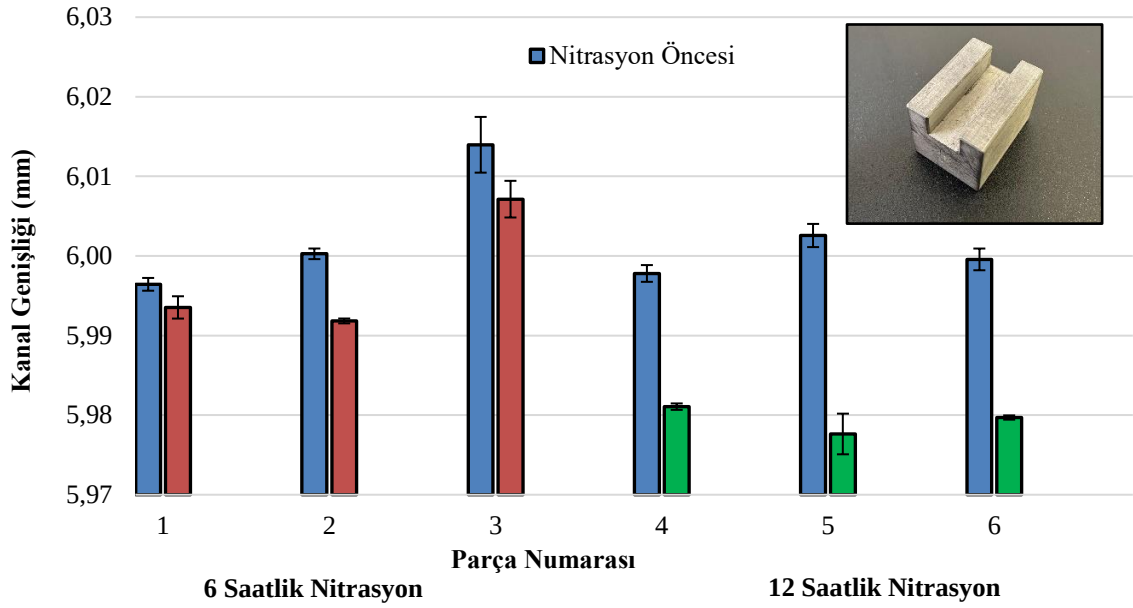
ve simetriklik toleransı incelenmiştir. Dış geometrik boyutlardaki değişim ayrı grafikler halinde verilmemiş, yüzde değişim olarak incelenmiştir.

Nitrasyon işleminin kanallı prizmatik parçanın 6 mm genişliğindeki kanal ölçüsüne etkisi Şekil 4.18’de verilmiştir.



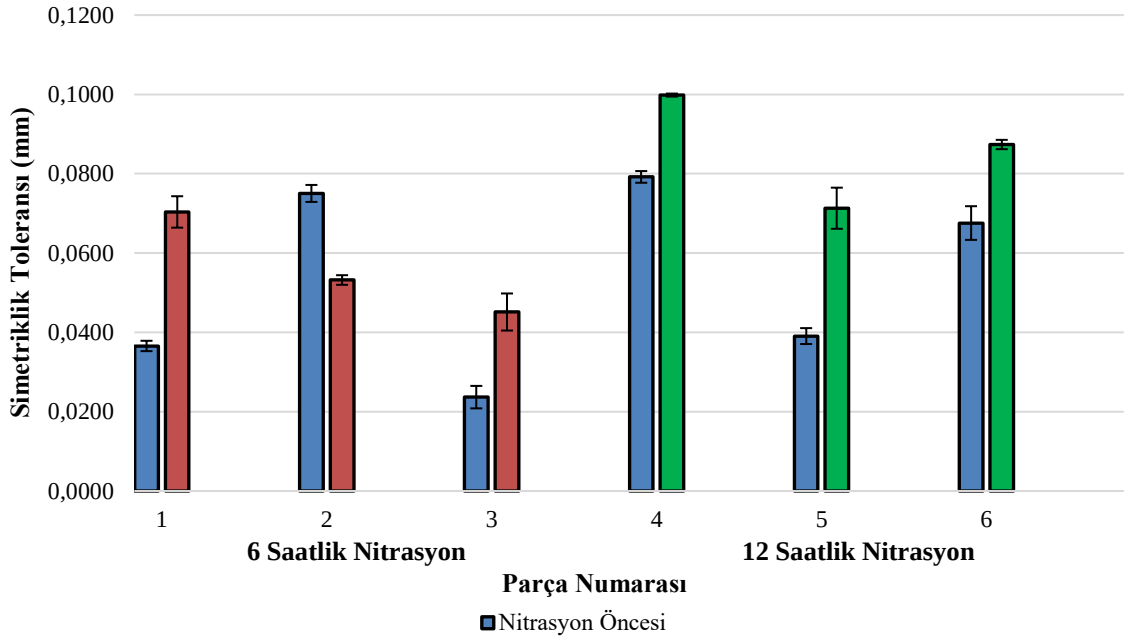
Şekil 4.18. Nitrasyon süresinin kanallı prizmatik parçanın 6 mm kanal genişliği ölçüsüne etkisi

Nitrasyon öncesi değerleri 6 adet kanallı prizmatik parçanın işlem öncesinde ölçülen ortalama değerdir. Bu değer $6,0017 \pm 0,05$ mm’dir. 6 saatlik nitrasyon işlemi sonucunda bu değer $5,9975 \pm 0,008$ mm, 12 saatlik nitrasyon işlemi sonucundaysa $5,9796 \pm 0,001$ mm olmuştur. Düz prizmatik parçadaki değişime benzer şekilde işlem süresi arttıkça boyuttaki değişim oranının da arttığı, ancak bir iç ölçü olan kanal genişliğinin dıştan dışa ölçülerdeki büyümenin aksine küçüldüğü belirlenmiştir. Kanal genişliğindeki ortalama küçülme 6 saatlik nitrasyonda $4,2 \mu\text{m}$, 12 saatlik nitrasyonda $22,1 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır. Kanal genişliği ölçüsünün her bir parçadaki değişimi ayrı ayrı Şekil 4.19’da verilmiştir. Burada 6 saatlik nitrasyon işleminde 2 numaralı parça haricinde kanal genişliği değişiminin ölçüm tekrarları belirsizliği altında kaldığı görülmektedir. 12 saatlik nitrasyon işleminde ise kanal genişliğinin net bir şekilde azaldığı görülmekte olup ve ortalama azalma değeri $20,6 \mu\text{m}$ hesaplanmıştır. Bu değer de düz prizmatik parçadaki boyutsal değişime yakındır. Böylece nitrasyon işleminin kanallı bir parçaya, düz prizmatik bir parça ile benzer etkide bulunduğu söylenebilir.



Şekil 4.19. Nitrasyon işlemi ile kanal genişliği ölçüsünün her bir parçadaki değişimi

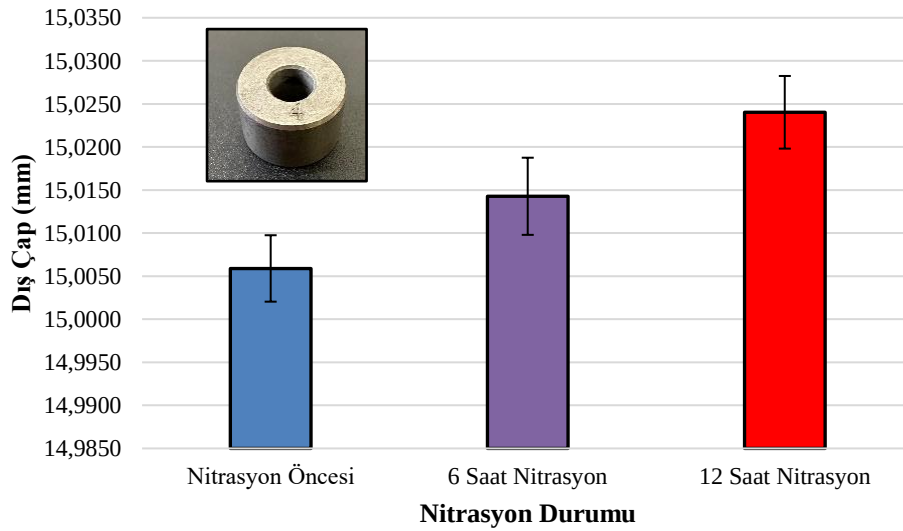
Kanallı prizmatik parçanın 6 mm kanalının 15 mm genişliğine göre 0,05 mm olarak tasarlanan simetriklik toleransının nitrasyon işlemiyle değişimi incelendiğinde nitrasyon öncesi 6 adet numunenin ortalama simetriklik toleransı $0,047 \pm 0,013$ mm olarak tespit edilmiş olup tasarımda verilen 0,05 mm değerini sağlamıştır. Ancak parçalar arasında değişkenlik fazla olduğu için 0,05 mm değerinin elde edilemediği parçalar da mevcuttur. Bu nedenle nitrasyon işleminin simetrik toleransına etkisi her bir parçanın kendi arasında karşılaştırılması ile Şekil 4.20'de verilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere 6 saatlik nitrasyon işleminde 2 numaralı parça hariç tüm numunelerde artış olduğu görülmekte olup ortalama artış bu parça hariç $27,6 \mu\text{m}$ hesaplanmıştır. 2 numaralı parça imal edilirken de 0,05 mm simetrik toleransı sağlanamadığı için değerlendirme dışı tutulmuştur. 12 saatlik nitrasyon işleminde ise simetriklik toleransının tüm parçalarda açıkça arttığı görülmekte olup ortalama artış değeri $20,3 \mu\text{m}$ hesaplanmıştır.



Şekil 4.20. Nitrasyon işlemi ile kanallı prizmatik parçanın simetriklik toleransının her bir parçadaki değişimi

4.3.3. Silindirik parça

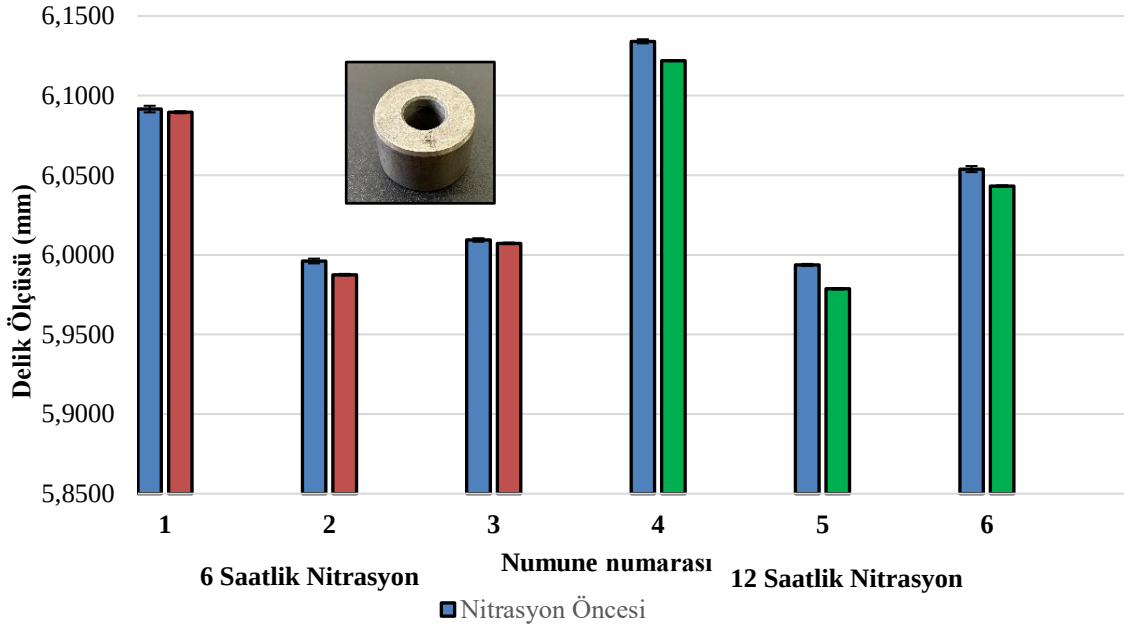
Silindirik parçanın 6 ve 12 saatlik nitrasyon işlemi sonucunda Ø15 mm dış çapındaki değişim Şekil 4.22'deki grafikte verilmiştir.



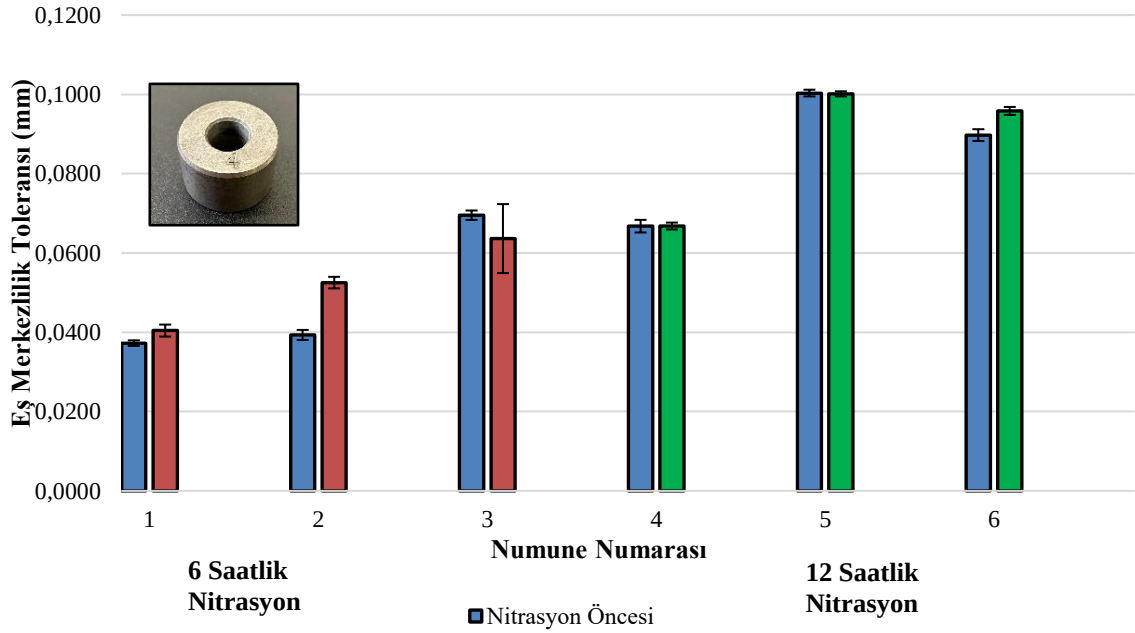
Şekil 4.22. Nitrasyon süresinin silindirik parçanın Ø15mm dış çapındaki değişimine etkisi

Silindirik parçaya ait nitrasyon öncesi ortalama dış çap değeri 6 adet numunenin üçer tekrarlı ölçülmesiyle $\text{Ø}15,0059 \pm 0,003$ mm hesaplanmıştır. Dış çap ölçüsü 6 saatlik nitrasyon işlemi sonrasında $15,0143 \pm 0,004$ mm değerine, 12 saatlik nitrasyon işlemi sonucundaysa $15,024 \pm 0,004$ mm değerine ulaşmıştır. Silindirik parçaya ait Ø6 mm delik

boyutunda 6 adet numunenin imalat sonrası üçer kez tekrarla ölçülen değeri $5,9988 \pm 0,006$ mm çıkmıştır. Matkapla delme işleminde 0,1 mm gibi büyük toleranslar normal olup bu çalışmada da 0,12 mm elde edilmiştir. Bu nedenle delik ölçüsünde nitrasyon işlemiyle değişim her bir parça için birbirinden ayrı olarak Şekil 4.23'te incelenmiştir. Buna göre 6 saatlik nitrasyon işlemi sonucunda $3,7 \pm 3,2$ μ m ve 6 saatlik nitrasyon işlemi sonucunda $12,7 \pm 2$ μ m delik çapında azalma meydana gelmiştir. Silindirik parçanın 0,05 mm eş merkezlilik toleransının nitrasyon işlemi sonrasındaki değişimini gösteren grafik Şekil 4.24'teki gibidir. Eş merkezlilik toleransı imalat sonrasında 0,037 mm ila 0,10 mm aralığında elde edilmiş olup değişkenliğin büyük olması delik delme işleminin matkapla yapılmış olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle nitrasyon işlemiyle eş merkezlilik toleransındaki değişim her bir parça için kendi arasında değerlendirildiğinde 2 numaralı parça haricinde eş merkezlilik toleransında bir değişim olmadığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.23. Nitrasyon süresinin silindirik parçanın Ø6 mm delik çapındaki değişime etkisi



Şekil 4.24. Nitrasyon işleminin silindirik parçanın 0,05 mm eş merkezlilik toleransının değişimine etkisi

Parçalara uygulanan farklı süredeki nitrasyon işlemi sonrasında boyut değerlerindeki değişim Çizelge 4.2’de özetlenmiştir. Düz prizmatik parçanın her üç boyutunda 6 saatlik nitrasyon işleminde ölçü artışı 12 saatlik nitrasyon işlemine göre daha azdır. Değerleri birbirinden oldukça farklı olan 40, 15 ve 10 mm ölçülerinde aynı nitrasyon süresi için değişim miktarlarının birbirine çok yakın çıktığı görülmektedir. Ortalama boyut toleransı değişim değerleri 6 saatlik nitrasyonda $3,53 \pm 0,5 \mu\text{m}$, 12 saatlik nitrasyonda ise $15,43 \pm 2,1 \mu\text{m}$ ’dir. Paralellik toleransında ise nitrasyon işlemiyle bir değişiklik olmamıştır. Kanallı prizmatik parçanın dış ölçülerinde 6 saatlik nitrasyonda ortalama $5,03 \pm 1,43 \mu\text{m}$, 12 saatlik nitrasyonda ise $14,6 \pm 3,63 \mu\text{m}$ artış olmuştur. Kanal ölçüsünde ise sırasıyla 6 ve $20,6 \mu\text{m}$ daralma meydana gelmiştir. Simetriklik toleransı açısından bir karşılaştırma yapıldığında ise başlangıçta ortalama $47 \mu\text{m}$ olan simetrik toleransında $+27,6$ ve $+20,3 \mu\text{m}$ değeriyle her iki nitrasyon süresinde de artış olduğu yani simetrikliğin olumsuz yönde etkilendiği görülmüştür. Silindirik parçanın dış çap ölçüsünde 6 saatlik nitrasyonda diğer geometrilerdeki ölçülere nazaran daha büyük bir artış olduğu görülse de standart sapmalar dikkate alındığında dış çapın artışı diğer boyutlardan çok farklı değildir. 12 saatlik nitrasyonda ise dış çap değişimi diğer geometrilerin ölçü değişimiyle daha uyumludur. Silindirik parçanın eş merkezlilik toleransına nitrasyon işlemi etki etmemiştir. Nihai olarak nitrasyon işlemiyle boyut toleransında, geometriden ve ölçü değerinden bağımsız bir şekilde değişimlerin meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır. **Bu değişimler 6 saatlik nitrasyon işleminde 3,5 ila 6**

μm aralığında, 12 saatlik nitrasyon işleminde ise 15 ila 19 μm aralığındadır. Nitrasyon işleminin boyutta meydana getirdiği maksimum 19 μm ölçü değişkenliği dikkate alındığında, bu değişkenliğin parça imalatında seçilen toleranslarda dikkate alınması gereken durumlar bulunmaktadır. Bu durumlar Çizelge 4.3'te genel tolerans dereceleri (IT nitelikleri) tablosunda işaretlenmiştir. Buna göre tolerans derecesi IT01 ile IT5 arasında olan ve master yapımı gibi çok hassas imalatlarda nitrasyon işlemi bütün çap gruplarında tolerans dışına çıkılmasına neden olmaktadır. Genel makine imalatında kullanılan IT5 ve IT13 aralığındaki tolerans niteliklerinde ise Çizelge 4.3'te kırımızı ile işaretlenen tolerans derecelerini tamamen bozduğu, turuncu ile işaretlenen tolerans derecelerini ise değer olarak 0,01 mm'nin altına düşürerek imalatı zorlaştırdığı değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.2. Parçalara uygulanan farklı süredeki nitrasyon işlemi sonrasında boyut ve geometrik tolerans değerlerindeki değişim

Parça Geometrisi	Boyut ve Geometrik Tolerans	6 Saatlik Nitrasyon	12 Saatlik Nitrasyon
Düz Prizmatik	40 Ölçüsü	+3,1 μm	+16,7 μm
	15 Ölçüsü	+3,6 μm	+16,6 μm
	10 Ölçüsü	+4 μm	+13 μm
	Ortalama	+3,53±0,5 μm	+15,43±2,1 μm
	0,05 Paralellik Toleransı	Değişim yok	Değişim yok
Kanallı Prizmatik	15 mm Yükseklik Ölçüsü	+4,2 μm	+18,5 μm
	15 mm Genişlik Ölçüsü	+6,7 μm	+14 μm
	20 mm Uzunluk Ölçüsü	+4,2 μm	+11,3 μm
	Ortalama	+5,03±1,43 μm	+14,6±3,63 μm
	6 mm Kanal Genişlik Ölçüsü	-6 μm	-20,6 μm
	0,05 mm Simetriklik Toleransı	+27,6 μm	+20,3 μm
Silindirik	Ø 15 Dış Çap Ölçüsü	+11 ± 5 μm	+19,1 ± 0,7 μm
	Ø 6 Delik Ölçüsü	-3,7 ± 3,2 μm	-12,7 ± 2 μm
	10 Yükseklik Ölçüsü	+2 ± 0,3 μm	+9,9 ± 1,5 μm
	0,05 Eş Merkezlilik	Değişim yok	Değişim yok

Çizelge 4.3. Nitrasyon işlemiyle boyutta meydana gelen değişimler neticesinde Uluslararası Tolerans Derecelerinin (IT Nitelikleri) Etkilenmesi

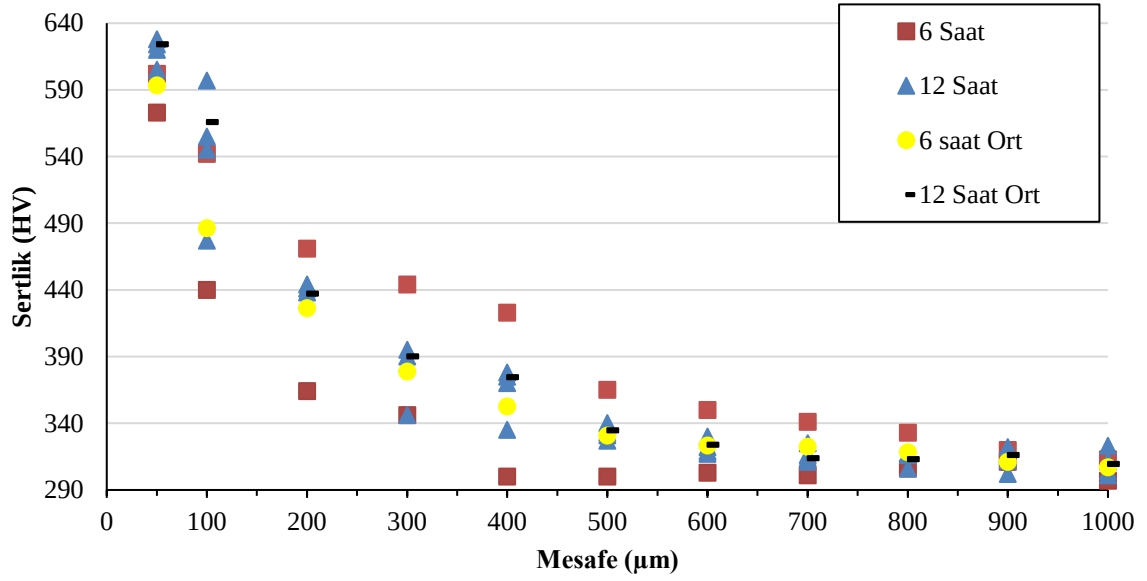
Çap Grupları mm	Uluslararası Tolerans Derecesi																			
	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1-3	0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600	-	-
3-6	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750	-	-
6-10	0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900	1500	-
10-18	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100	1800	2700

18-30	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300	2100	3300
30-50	0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600	2500	3900
50-80	0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900	3000	4600
80-120	1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200	3500	5400
120-180	1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500	4000	6300
180-250	2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850	2900	4600	7200
250-315	2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200	5200	8100
315-400	3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300	3600	5700	8900
400-500	4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000	6300	9700

4.4. Nitrasyon İşleminin Nitrasyon Derinliğine Etkisi

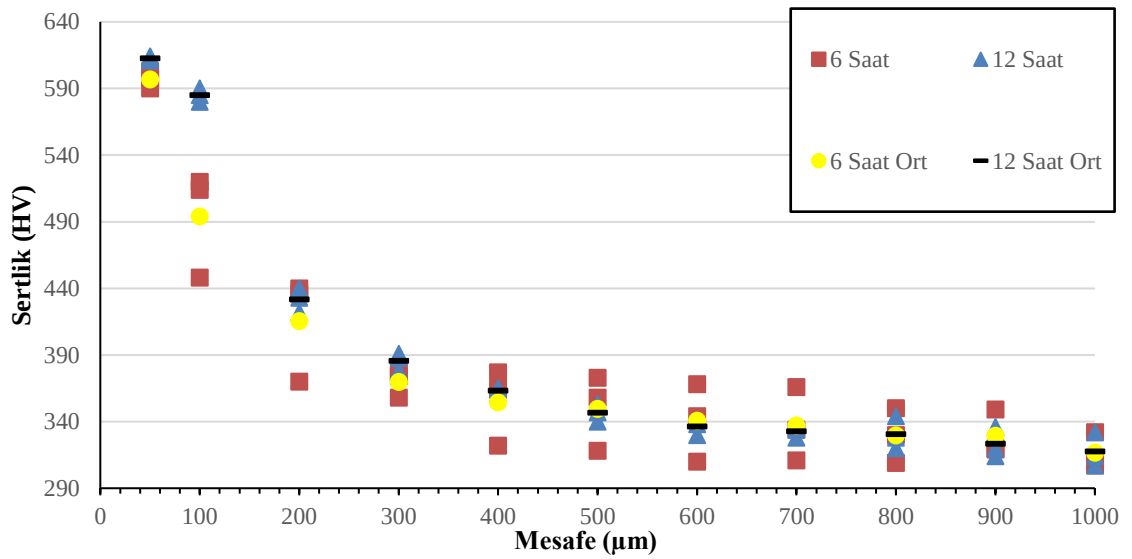
Nitrasyon işleminin parçaların nitrasyon derinliğine etkisi sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve boyut ölçümlerinde kullanılan 6 ve 12 saat nitrasyon uygulanan üçer adet parçadan yapılan sertlik taraması ile araştırılmıştır. Böylece toplamda 18 adet parça üzerinde sertlik dağılımı ölçülmüştür. Difüzyon derinliği değeri her bir numunenin kesitinden ilk nokta 50 μm ve son nokta 1000 μm olacak şekilde toplamda 11 noktadan sertlik değeri ölçülerek elde edilmiştir. Sertlik taraması esnasında numunelerin nitrasyon öncesi sertlik değerinin %10 fazlasına ulaşıldığı nokta difüzyon derinliği olarak kabul edilmiştir. Buna göre parçaların nitrasyondan önceki ortalama sertlik değeri olan 340 HV'nin %10 fazlası olan 374 HV değeri sınır değer olarak alınmıştır.

Düz prizmatik parçanın 6 ve 12 saate göre sertlik dağılımı Şekil 4.25'teki gibidir. Grafikte 6 saatlik nitrasyon işleminde numunelerin sertlik dağılımları arasında farklılık göze çarpmaktayken 12 saatlik nitrasyon işleminde dağılımlar birbirine çok yakın çıkmıştır. Ortalama dağılım eğrileri kıyaslandığında 6 saatlik nitrasyon işleminde difüzyon derinliği 300 μm iken sürenin artmasıyla nitrasyon derinliği de artış göstererek 12 saatlik nitrasyon işleminde 400 μm olmuştur.



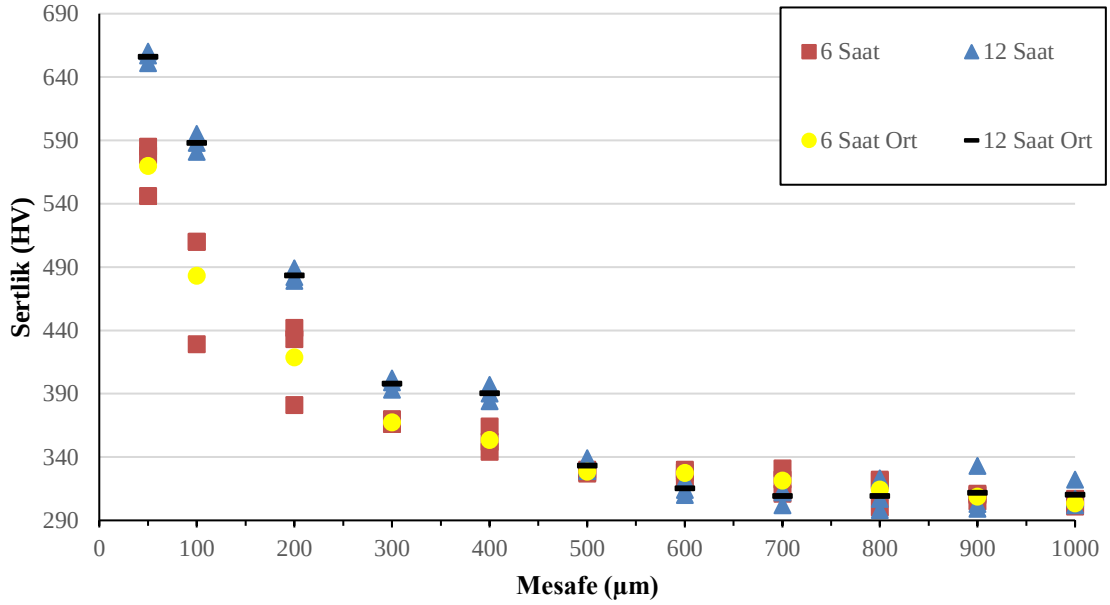
Şekil 4.25. Düz prizmatik parçanın kesitten sertlik taramasına göre difüzyon derinliği

Kanallı prizmatik parçanın 6 ve 12 saatlik nitrasyon işlemi sonrasındaki sertlik dağılımı Şekil 4.26’da verilmiştir. 6 saatlik nitrasyon işlemi sonucunda difüzyon derinliği 285 µm, 12 saatlik nitrasyon işlemi sonucunda ise 350 µm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.26. Kanallı prizmatik parçanın kesitten sertlik taramasına göre difüzyon derinliği

Silindirik parçanın Sertlik dağılımı Şekil 4.27’deki gibi olup difüzyon derinliği 6 ve 12 saatlik nitrasyon işlemi sonucunda sırasıyla 280 µm ve 430 µm olarak tespit edilmiştir.

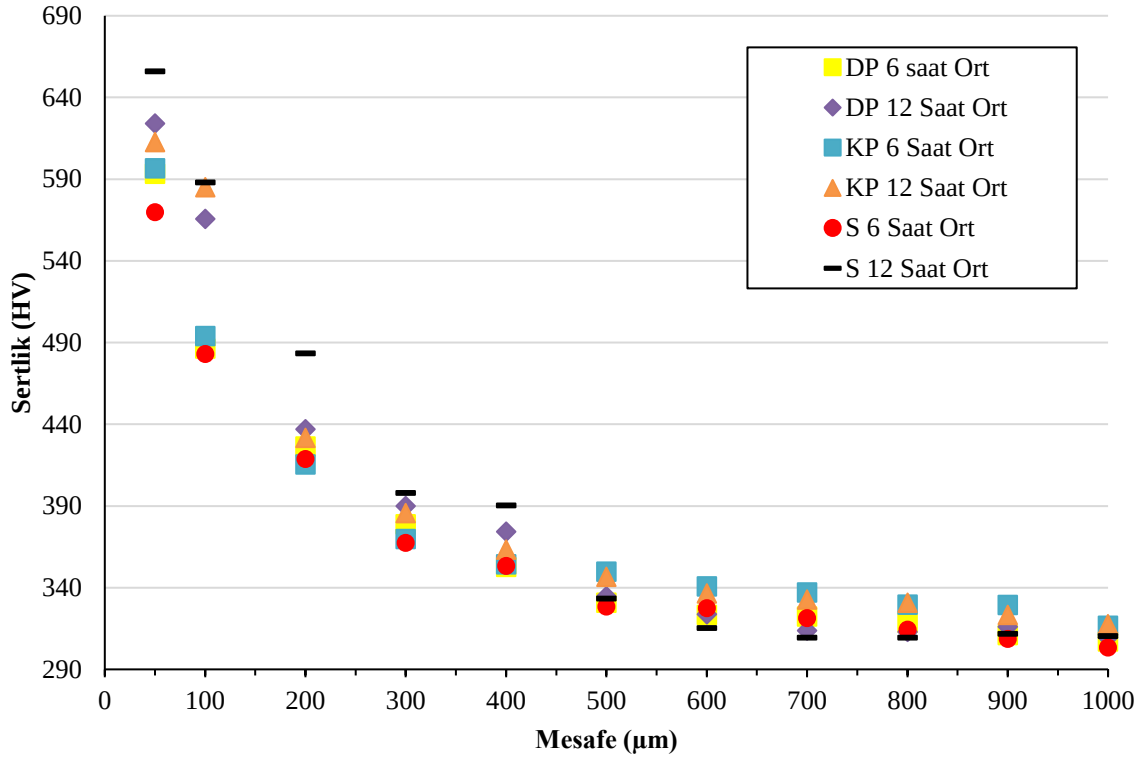


Şekil 4.27. Silindirik parçanın kesitten sertlik taramasına göre difüzyon derinliğine göre sertlik değeri

Difüzyon derinliklerinin farklı geometrilerde kıyaslaması Çizelge 4.5'te verilmiştir. Difüzyon derinliği tüm parçalarda nitrasyon süresi ile artmıştır. Difüzyon derinliklerinde parçalar arasında farklılık görülse de ortalama sertlik değerlerinin Şekil 4.28'deki kıyaslamasına göre sertlik değerlerinin 280 ila 400 μm mesafeler arasında birbirinden önemli bir farkının olmayışı ve sertlikteki artışın yaklaşık aynı mesafeden başlaması nedeniyle difüzyon derinliğinin 6 saatlik sürede parça geometrisinden bağımsız olarak $288 \pm 10 \mu\text{m}$, 12 saatlik sürede de $393 \pm 40 \mu\text{m}$ değerine ulaştığı sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4.5. Numuneler uygulanan farklı sürelerdeki nitrasyon işlemi sonucunda difüzyon derinliklerinden okunan sertlik değerleri

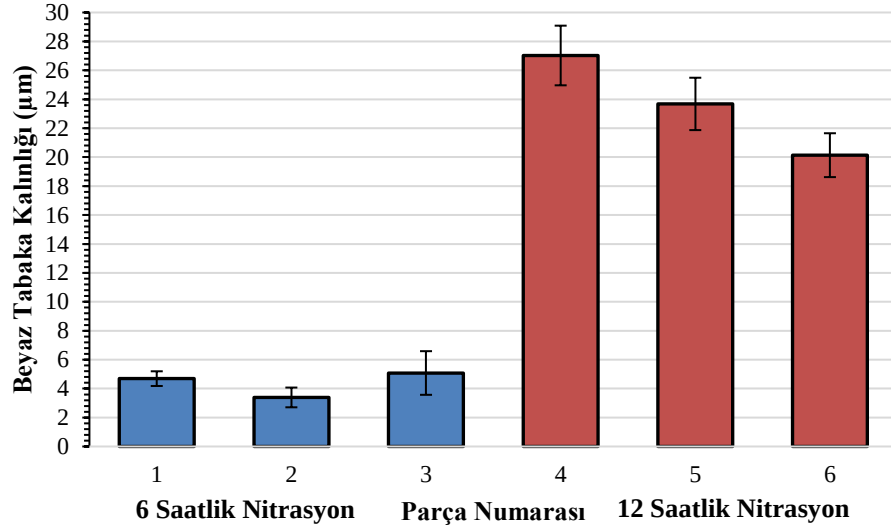
	6 Saat	12 Saat
	Difüzyon derinliği (μm)	Difüzyon derinliği (μm)
Düz Prizmatik	300	400
Kanallı Prizmatik	285	350
Silindirik	280	430
ORT	288 ± 10	393 ± 40



Şekil 4.28. Düz Prizmatik (DP), Kanallı Prizmatik (KP) ve Silindirik (S) parçaların ortalama sertlik dağılımı

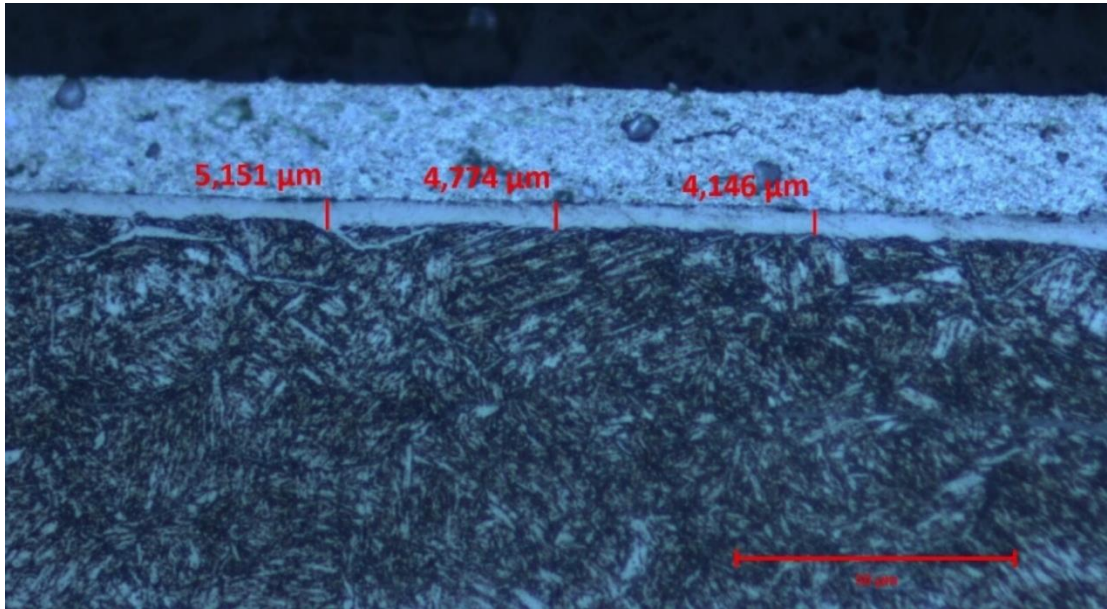
4.5. Nitrasyon İşleminin Beyaz Tabaka Kalınlığına Etkisi

Numunelere uygulanan 6 ve 12 saatlik nitrasyon işlemlerinin yüzeyde oluşturduğu beyaz tabaka kalınlığı üzerindeki etkisi, optik mikroskop altında yapılan beyaz tabaka kalınlığı incelemeleriyle araştırılmıştır. Toplamda 18 numune üzerinde beyaz tabaka kalınlığı incelenmiştir. Beyaz tabaka kalınlığı değerleri bakalite alınan her bir numunenin optik mikroskop altında incelenmesiyle elde edilmiştir. Şekil 4.29’da toplamda 6 adet düz prizmatik parçanın 6 ve 12 saatlik nitrasyon işlemleri neticesinde yüzeyinde oluşan beyaz tabaka kalınlıklarının değerleri verilmiştir.

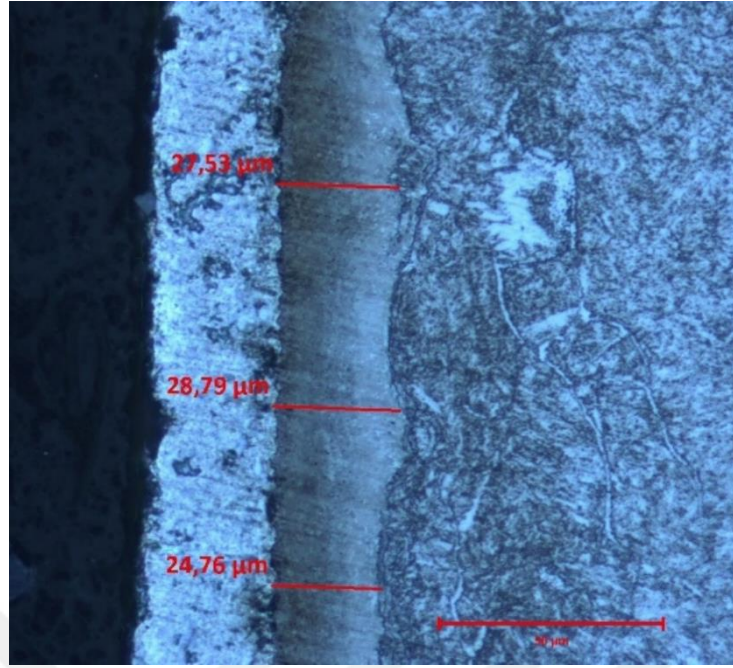


Şekil 4.29. Nitasyon süresinin düz prizmatik parçanın beyaz tabaka kalınlığına etkisi

6 saatlik nitasyon işleminde beyaz tabaka kalınlığı 3-5 μm iken 12 saatlik nitasyon işleminde ise beyaz tabaka kalınlığı 20-27 μm olarak tespit edilmiştir. Nitasyon süresindeki artışla beraber beyaz tabaka kalınlığındaki artış açıkça görülmektedir. Şekil 4.30'da düz prizmatik parçanın 6 ve 12 saatlik nitasyon işlemine uğrayan sırasıyla 1 ve 4 numaralı numunelerin optik mikroskop altındaki beyaz tabaka kalınlığı görüntüleri verilmiştir.



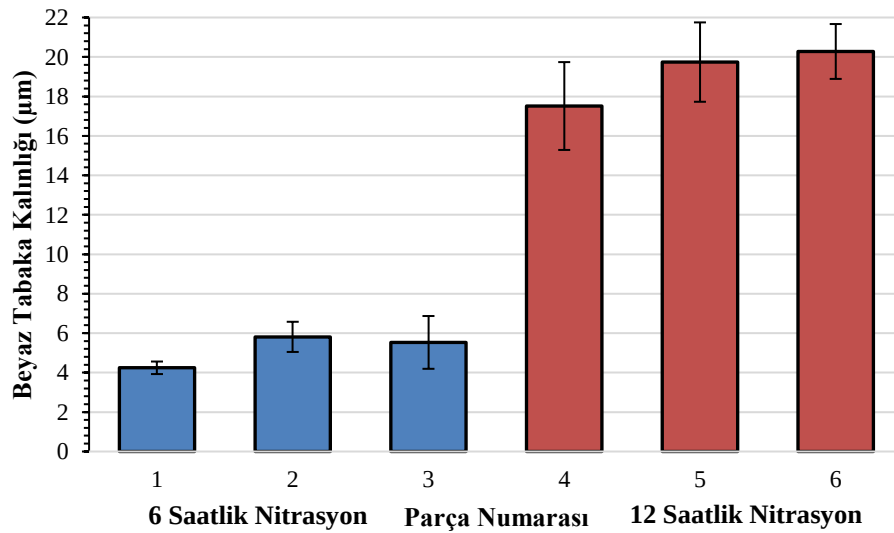
a)



b)

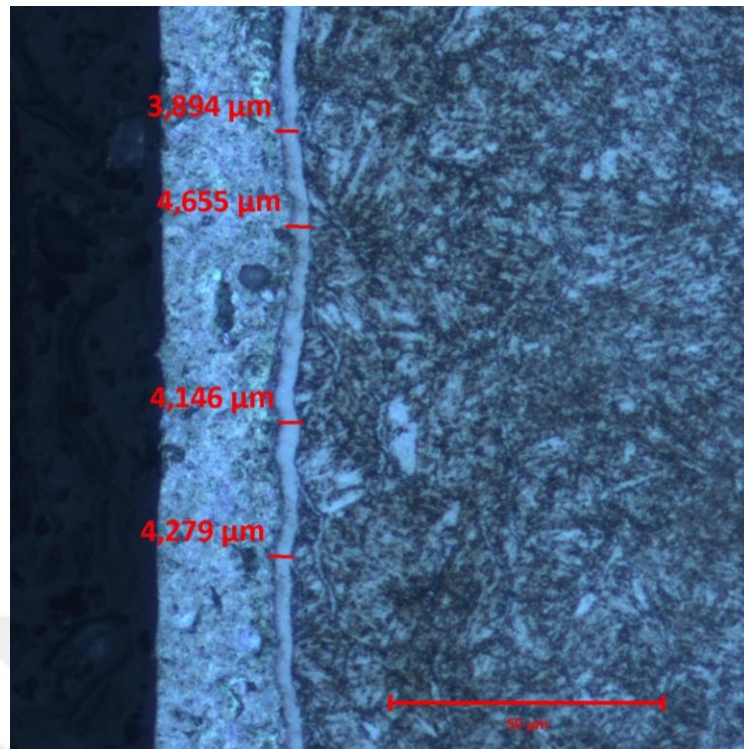
Şekil 4.30. Nitasyon işlemi uygulanan düz prizmatik parçanın kesitten beyaz tabaka kalınlığı görüntüsü (500x) a) 6 saat b) 12 saat

Şekil 4.31’de kanallı prizmatik parçanın 6 ve 12 saatlik nitasyon işlemleri sonucunda oluşan beyaz tabaka kalınlıklarının grafiği verilmiştir.

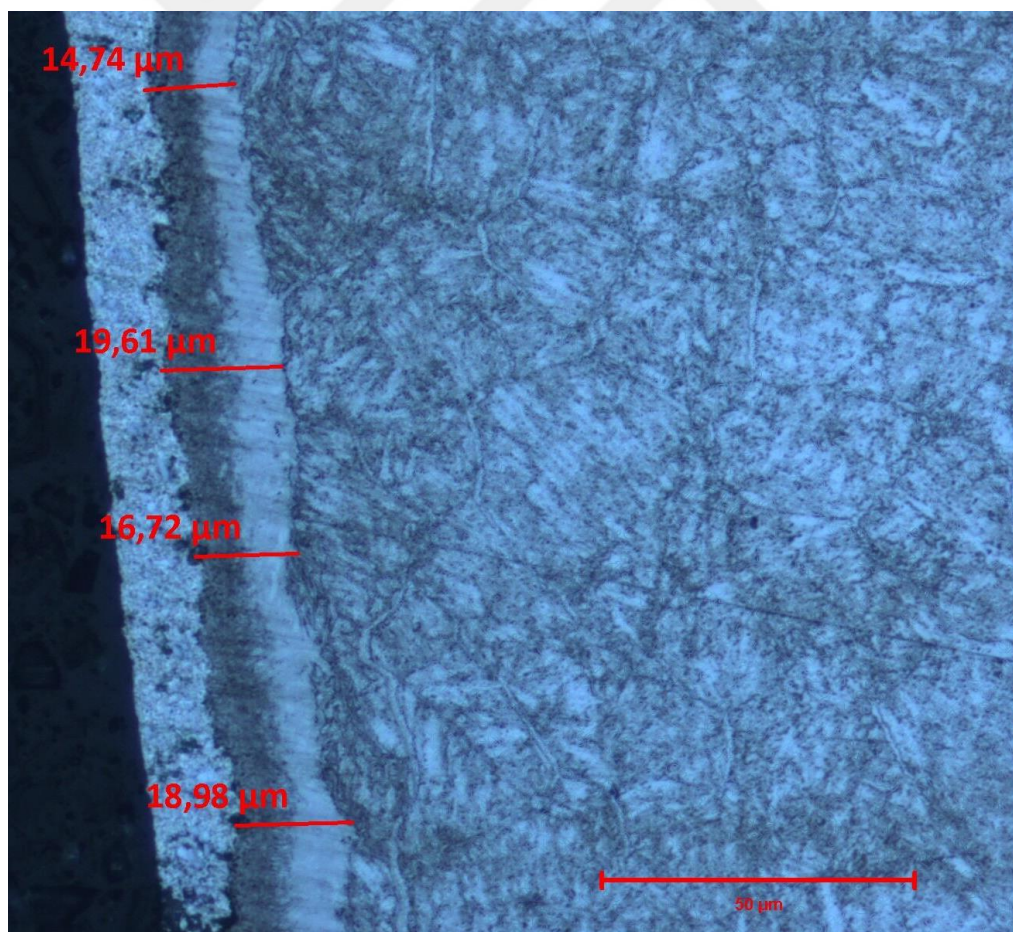


Şekil 4.31. Nitasyon süresinin kanallı prizmatik parçanın beyaz tabaka kalınlığına etkisi

6 saatlik nitasyon işlemi sonucunda 4-6 µm beyaz tabaka oluşmuşken sürenin artmasıyla beyaz tabaka kalınlığı 12 saatlik işlemde 17-20 µm değerine yükselmiştir. Şekil 4.32’de 6 ve 12 saatlik nitasyon işlemine tabii tutulan kanallı prizmatik parçanın optik mikroskop altındaki beyaz tabaka kalınlığı görüntüleri görülmektedir.



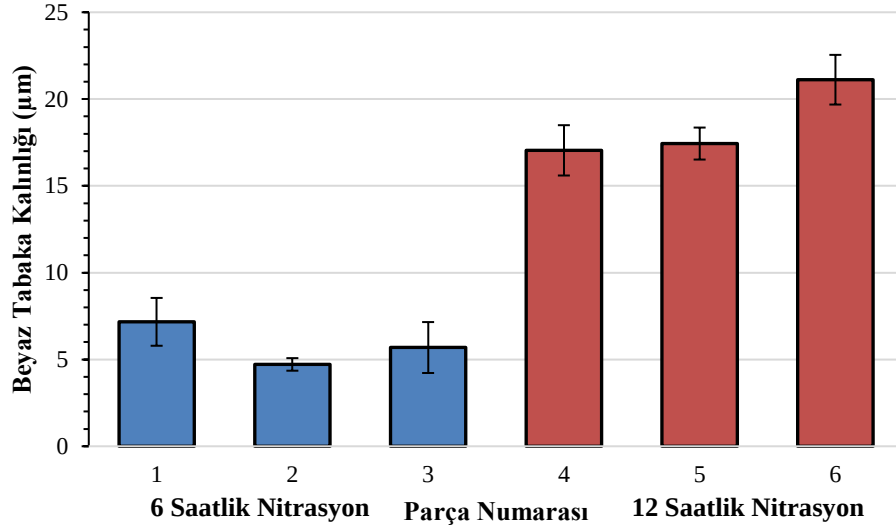
a)



b)

Şekil 4.32. Nitrasyon işlemi uygulanan kanallı prizmatik parçanın kesitten beyaz tabaka kalınlığı görüntüsü (500x) a) 6 saat b) 12 saat

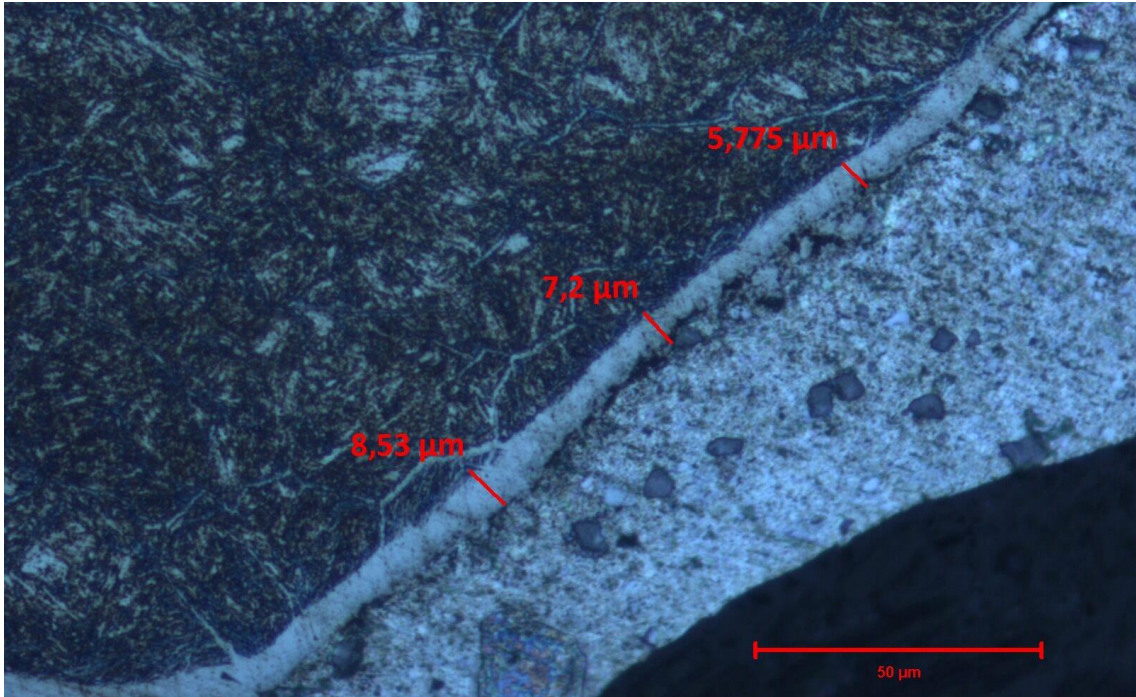
Silindirik parçanın yüzeyinde 6 ve 12 saatlik nitrasyon işlemi uygulaması neticesinde oluşan beyaz tabaka kalınlıkları Şekil 4.33'teki grafikte verilmiştir.



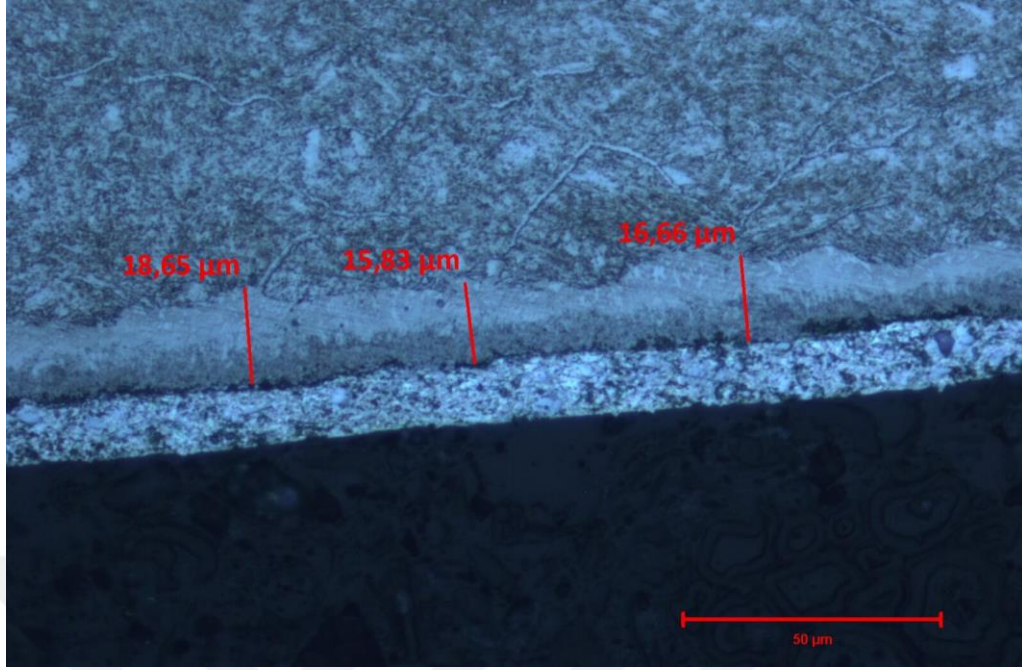
Şekil 4.33. Nitrasyon süresinin silindirik parçanın beyaz tabaka kalınlığına etkisi

Silindirik parçanın 6 saatlik nitrasyon işlemi uygulaması sonucunda kesitinden ölçülen beyaz tabaka kalınlığı 5-7 µm iken nitrasyon süresinin 12 saate çıkmasıyla beyaz tabaka kalınlığı 17-21 µm değerine ulaşmıştır.

Şekil 4.34'te silindirik parçanın 6 ve 12 saatlik nitrasyon işlemine tabii tutulan numunesine ait optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.



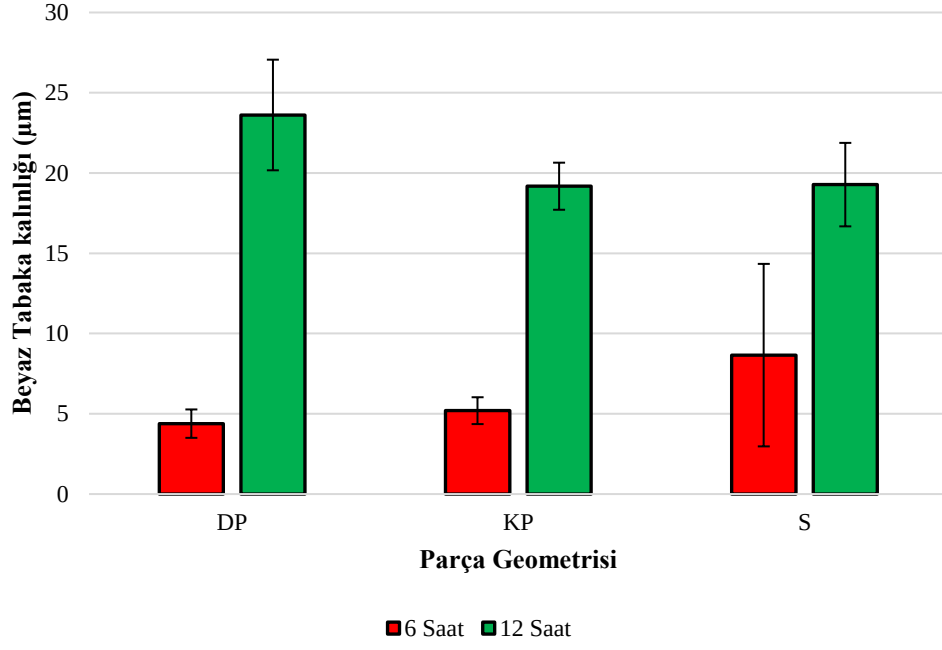
a)



b)

Şekil 4.34. Nitrasyon işlemi uygulanan silindirik parçanın kesitten beyaz tabaka kalınlığı görüntüsü (500x) a) 6 saat b) 12 saat

Şekil 4.35'te beyaz tabaka kalınlıkları farklı geometriler için karşılaştırılmıştır. Şekilden beyaz tabaka kalınlığına sadece nitrasyon süresinin etki ettiği, geometrinin beyaz tabaka kalınlığı üzerinde etkisinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. 6 saatlik nitrasyon süresiyle beyaz tabaka kalınlığı $6 \pm 2,2 \mu\text{m}$ 12 saatlik nitrasyon işlemiyle ise beyaz tabaka kalınlığı $20,2 \pm 2,5 \mu\text{m}$ olmuştur. Nitrasyon işlemi, çeliğin yüzeyine azot atomlarının difüzyonuyla gerçekleştiğinden dolayı süre uzadıkça, azot atomlarının yüzeydeki konsantrasyonu artmış ve daha derinlere doğru ilerlemiştir. Bu da beyaz tabakanın kalınlaşmasına yol açmıştır.



Şekil 4.35. Düz prizmatik (DP), kanallı prizmatik (KP) ve silindirik (S) parçalarda beyaz tabaka kalınlığı

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu çalışmada, AISI 4340 çelik numunelere uygulanan nitrasyon işleminin, parçaların boyut ve geometrik toleransları ile yüzey pürüzlülüğü, yüzey sertliği ve difüzyon derinliği üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmada düz prizmatik, kanallı prizmatik ve silindirik olmak üzere 3 farklı geometrik tasarıma sahip ve her bir geometriden altışar adet numuneden üçü 6 saat üçü de 12 saatlik nitrasyon işlemine tabii tutulmuştur. Parçalar üzerinde yapılan ölçümler neticesinde elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Nitrasyon işlemi sonucunda boyut toleransında, geometriden ve ölçü değerinden bağımsız bir şekilde değişimlerin meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır. Bu değişimler 6 saatlik nitrasyon işleminde 3,5 ila 6 μm aralığında, 12 saatlik nitrasyon işleminde ise 15 ila 19 μm aralığındadır.
- Nitrasyon işleminin boyutta meydana getirdiği maksimum 19 μm ölçü değişkenliği dikkate alındığında, bu değişkenliğin genel makine imalatında kullanılan IT5 ve IT9 aralığındaki tolerans derecelerinden çoğunda tolerans dışına çıkılmasına neden olduğu veya tolerans derecelerini değer olarak 10 μm 'nin altına düşürerek imalatı zorlaştırdığı bulunmuştur.
- Prizmatik parçanın paralellik toleransında nitrasyon işlemiyle bir değişiklik olmamıştır.
- Kanallı prizmatik parçada başlangıçta ortalama 47 μm olan simetrik toleransında 6 saatlik nitrasyon işleminde +27,6 ve 12 saatlik nitrasyon işleminde +20,3 μm değerinde artış olduğu yani simetrikliğin olumsuz yönde etkilendiği görülmüştür.
- Silindirik parçanın eş merkezlilik toleransına nitrasyon işlemi etki etmemiştir.
- Başlangıçta 0,5 μm yüzey pürüzlülüğüne sahip olan prizmatik parçaların yüzey pürüzlülüğünde nitrasyon işlemiyle çok az azalma meydana gelirken, başlangıç yüzey pürüzlülüğü 0,2 μm olan silindirik parçada önemli oranda artış meydana gelmiştir. Nitrasyon işlemiyle geometri, süre ve başlangıç yüzey pürüzlülüğünden bağımsız olarak 0,36 ila 0,44 μm

aralığında yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.

- Üç geometride de 6 saatlik nitrasyon işleminde 12 saatlik nitrasyon işlemine göre daha fazla yüzey sertliği görülmüştür. Nitrasyon öncesinde geometriden bağımsız olarak 341 ± 3 HV olan ortalama yüzey sertliği 6 saatlik nitrasyon işleminde 664 ± 14 HV ve 12 saatlik nitrasyon işleminde 531 ± 33 HV olmuştur. Böylece 6 ve 12 saatlik nitrasyon işleminde sırasıyla %95,8 ve %55 oranında sertlik artışı meydana gelmiştir.
- Difüzyon derinliğinin 6 saatlik nitrasyon işlemiyle parça geometrisinden bağımsız olarak 288 ± 10 μm , 12 saatlik sürede de 393 ± 40 μm değerine ulaştığı sonucuna varılmıştır.
- Beyaz tabaka kalınlığına da difüzyon derinliğine benzer şekilde sadece nitrasyon süresinin etki ettiği, geometrinin beyaz tabaka kalınlığı üzerinde etkisinin olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. 6 saatlik nitrasyon süresiyle beyaz tabaka kalınlığı $6 \pm 2,2$ μm 12 saatlik nitrasyon işlemiyle ise beyaz tabaka kalınlığı $20,2 \pm 2,5$ μm olmuştur.

5.2 Öneriler

İleride yapılacak çalışmalara ışık tutması açısından nitrasyon işleminin parçaların boyut ve geometrik toleransına etkisi araştırmalarına aşağıdaki öneriler sunulmuştur:

- Sıcaklık, NH_3 miktarı ve parçanın fırın içerisindeki konumu gibi nitrasyon parametrelerinin etkilerinin incelenmesi,
- Nitrasyon işlemi sırasında meydana gelen boyutsal ve geometrik değişimlerin, termal genleşme ve kimyasal difüzyon süreçlerini içeren bir simülasyon modeli oluşturulması,
- Nitrasyon işlemi sırasında meydana gelen mikro yapısal değişimlerin, yüzey sertliği ve geometrik stabilite üzerindeki etkisi daha derinlemesine incelenebilir. Bu bağlamda, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), XRD (X-Işını Difraksiyonu) gibi ileri analiz tekniklerinden yararlanılması,
- Bu çalışmada kullanılan üç temel geometriye ek olarak, endüstride sıklıkla kullanılan daha karmaşık geometrilere de (örneğin, dişliler, miller) benzer analizler yapılması,
- Bu çalışmadaki araştırmanın nitrasyon işlemine uygun AISI 4140 ıslah çeliği, 1.2344, 1.2343, 1.2606 gibi sıcak iş takım çelikleri ve nitrasyon çelikleri için

de yapılması ve farklı malzemelerde boyut ve geometrik tolerans değişikliklerinin kıyaslanması,

- Numunelerin uzun süreli kullanımda performanslarının aşınma, yorulma veya korozyon testlerine tabi tutularak değerlendirilmesi, gibi araştırmalar önerilir.



KAYNAKLAR

- Bryson, W. E. (2014). Heat Treatment, Selection, and Application of Tool Steels. Amerika Birleşik Devletleri: ASM International.
- Callister, D. W., G. Rethwisch, D. (2015). Malzeme bilimi ve mühendisliği 8. basımdan çeviri. Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti,. (Orijinal basım tarihi 2011).
- Davis J. R. (2002). Surface Hardening of Steels: Understanding the Basics. Amerika Birleşik Devletleri: ASM International.
- Dobrocky D., Pokorný Z., Studený Z., Joska Z., Procházka J., Svoboda E. (2020). The Influence Of Nitriding On The Geometric Accuracy Of Parts Of Special Technology, Proceedings 29th International Conference on Metallurgy and Materials, 617-626.
- Dossett, J., ASM Handbook, V.4: Heat Treating, OH: ASM International; p. 376-436, 1991.
- Forgeng, W. W. (2006). Introduction to Heat Treatment of Steel. Amerika Birleşik Devletleri: The Goodheart-Willcox Company.
- Gençoğlu, S. (2019), Farklı Isıl İşlemlerin AISI 8620 ve AISI 5115 Çelik Dişli Çarkların Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, 54s
- Genel K., Demirkol M., Çapa M. (2000). Effect Of Ion Nitriding On Fatigue Behaviour Of AISI 4140 Steel, Materials Science and Engineering: A, 279, 1–2, 207-216.
- Korkmaz, K. (2020) Gaz Nitrürleme Sonucu Oluşan Beyaz Tabakanın Nitrasyon Çeliğinin Aşınma Davranışına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 85s
- Randak, A., Eberbach, R. (1969) Einfluß der Austenitkorngröße auf Einige Eigenschaften des Stahls 16MnCr5. HTM Härtereitechnische Mitteilungen, 24 (3), 201–209.
- Smith, W. F. (2004). Foundations of Materials Science and Engineering. McGraw-Hill Education.
- Seybolt, A.U. (1969). Some Observations on the Metallurgy of Ion Nitriding Trans., of Metall. Society of AIME., 254,769-779
- Şirin, Ş. Y., 2004. İyon Nitrürleme Yüzey Sertleştirme Isıl İşleminin AISI 4340 Çeliğinin Yorulma Dayanımına Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 180s.
- Tekin, A. (1987) : Çelik ve Isıl işlem, Bofors El Kitabı , S. 376-423
- Vicen M., Fabian P., Bronček J., Drbúl M. (2018). How The Heat Treatment Influences Changes Of Dimensions Of Structural Components, Applied Engineering Letters, 3, 2 47- 51.
- Yılmaz, H., (2008) Titanyum ve Titanyum Alaşımlarının Yüzey Özelliklerinin Plazma (İyon) Nitrürleme ile Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 68s