

# PLAZMA NİTRÜRLEME İŞLEMİNİN 316L OSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİĞİNİN MALZEME ÖZELLİKLERİNE MİKRO VE NANO ETKİSİ

**M. Cem İğdil**

Tayangu Danışmanlık,  
mci@tayangu.com.tr

**Murat Tosun\***

İTÜ Makina Fakültesi,  
Makina Mühendisliği Bölümü  
tosunmur@itu.edu.tr

**Levent Trabzon**

Doç. Dr., İTÜ Makina Fakültesi,  
Makina Mühendisliği Bölümü  
levent.trabzon@itu.edu.tr

## ÖZET

Bu çalışmada, çok sayıda 316L ostenitik paslanmaz çelik malzemeden numuneye, malzemenin korozyon dayanımını etkilemeden, yüzeysel mekanik ve malzeme özelliklerini geliştirmek amacıyla düşük sıcaklıkta, 400-500 °C, plazma nitrürleme işlemi uygulanmıştır. Yapılan nitrürleme işlemlerini iki gruba ayırırsak: Bir grup; %10 N<sub>2</sub> - %90 H<sub>2</sub> gaz karışımı ve 450 °C sabit parametreler olarak alınıp 15, 30, 60, 120, 240 dakikalık nitrürleme süreleri gerçekleştirilmiş, diğer gruptaki nitrürleme işlemleri; nitrürleme süresi bir saat süreyle sınırlanılarak %5, %10 ve %25 N<sub>2</sub> içeren ortamlarda 400, 450 ve 500 °C’lerde yapılmıştır. Çalışma sonucunda bazı malzeme özelliklerinin geliştiği gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Plazma nitrürleme, 316L, ostenitik paslanmaz çelik

## Micro and Nano Effects of Plasma Nitridation on Material Properties of 316L Austenitic Stainless Steel

## ABSTRACT

In this study, 316L austenitic stainless samples were applied low temperature (400-500 °C) plasma nitriding to improve mechanical and material properties on the surface of material without deterioration of its corrosion properties. Experiments could be separate two groups. Some of nitridation were performed at %10 N<sub>2</sub> - %90 H<sub>2</sub> gas mixture and 450 °C nitridation temperature with a duration of 15, 30, 60, 120 and 240 minutes separately. In other group, the nitridation process is on only one hour. Three different gas mixtures of %5, %10 and %25 N<sub>2</sub> were used at 400, 450 and 500 °C. Improvement of some properties were observed.

**Keywords:** Plasma nitriding, 316L, austenitic stainless steel

\* İletişim yazarı

Geliş tarihi : 20.07.2012

Kabul tarihi : 10.08.2012

20-21 Ekim 2011 tarihlerinde Makina Mühendisleri Odası tarafından İstanbul’da düzenlenen Geleceğin Teknolojileri Sempozyumu’nda sunulan bildiri, yazarınlarca güncellenerek ve genişletilerek bu makale hazırlanmıştır.

İğdil, M. C., Tosun, M., Trabzon L. 2012. "Plazma Nitrürleme İşleminin 316L Ostenitik Paslanmaz Çeliğinin Malzeme Özelliklerine Mikro ve Nano Etkisi," TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 53, sayı 630, s. 54-68.

## 1. GİRİŞ

Sağlamlığı ve biouyumluluğu açısından biyomedikal uygulamalar, tıbbi aletler ve implantların üretiminde tercih edilen malzemelerin başında gelen 316L paslanmaz çelik (yüzde bileşimi Tablo 1) ayrıca sertliği, korozyona dayanımı gibi özellikleriyle kimyasal ve yiyecek endüstrisinde, basınçlı kaplar gibi, kullanılır.

Tablo 1. Bazı Paslanmaz Çeliklerin Yüzde Kimyasal Bileşimi

Çelik Tipi	Yüzde bileşim (%)					
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
316L	0.01	1.76	0.21	17.2	15.3	2.7

316L ostenitik paslanmaz çelik kübik yüzey merkezli (kym) kafes yapısına sahip olup kafes sabiti 3,594’tür. Bazı mekanik özellikleri Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 2. 316L Paslanmaz Çeliğin Mekanik Özellikleri

Akma dayanımı $\sigma_{0.2}$ (Mpa)	Çekme dayanımı $\sigma_c$ (Mpa)	Kopma uzaması $\epsilon_k$ (%)	Sertlik VSD (kgf/mm <sup>2</sup> )
980	1050	35	300

### 1.1 Plazma (İyon) Nitrürleme

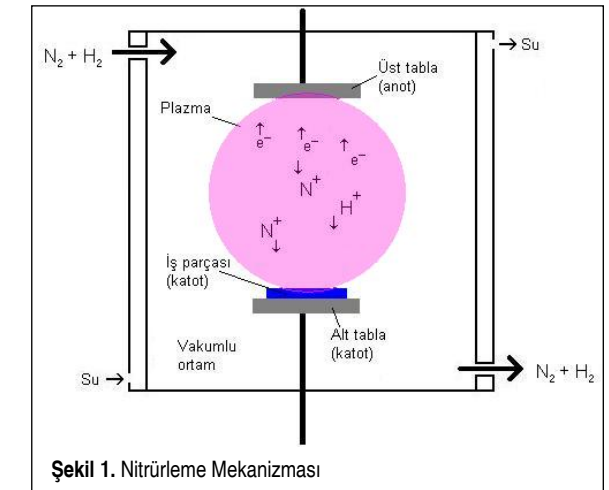
Plazma nitrürleme yöntemi 20-30 yıllık bir geçmişe sahiptir. Adını işlem sırasında kullanılan azot veya gaz karışımının oluşturduğu plazmadan alan yöntemde temel prensip, vakumlu bir ortamda azot atomlarının elektrik verilerle iyonlaştırılması ve katot (negatif kutup) olarak yerleştirilen parça yüzeyine çarptırılmasıdır. Bu işlem, 1-10 mbar basınçlı vakum ortamında, 400-1000 V gerilim altında uygulanan doğru akımın (DC) azotu



iyonlarına ayırması ve iyon haline gelen azot atomlarının malzeme yüzeyine çarparak difüze olmalarıyla gerçekleşir. Doğru akımın kullanılması plazma ortamının sürekliliğinin sağlanması içindir.

Şekil 1’de, nitrürleme mekanizmasını temel alarak, nitrürlemek istenilen parçalar, vakumlu ortamı yaratabilmek için, kapalı bir kap içine yerleştirildikten sonra kap içindeki hava dışarıya atılır. Kap içindeki vakumun sağlanmasından sonra ortama verilen azot, elektrik enerjisi yardımıyla iyonlaştırılır ve plazma oluşması sağlanır. Plazma içindeki pozitif yüklü azot iyonları negatif kutup (katot) halindeki parça yüzeyine çarpar. Bu çarpma sırasında azot, iyonlaşırken aldığı fazla enerjisini parçaya geçirirken, hem bu enerji hem de çarpmanın etkisiyle malzeme yüzeyine difüze olur. Kullanılan gaz N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> gaz karışımı veya amonyak (NH<sub>3</sub>) olabilir.

Nitrürlemede amonyak (NH<sub>3</sub>) kullanılabilmesi gibi, işlem



sırasında sadece azot gazı (N<sub>2</sub>) veya azotun (N<sub>2</sub>) yanında hidrojen (H<sub>2</sub>), argon (Ar) gibi malzemeyle etkileşime girmeyecek gazlar da kullanılabilir. Hidrojen (H<sub>2</sub>) gazı kullanılarak yapılan nitrürlemede, vakumlu ortama yerleştirilmiş parçalar, ilk olarak sadece hidrojen gazının ortama verilmesi ve enerji uygulanması sonucunda akım boşalımı (glow discharge) denilen ve parça yüzeyinin hidrojen bombardımanına tutulması olarak tanımlayabileceğimiz işleme maruz kalırlar. Akım boşalımı sırasında serbest kalan fazla enerjinin bir kısmı, elektron saçılması şeklinde parça yüzeylerinde ışıma meydana getirmektedir. Oluşan bu ışığın rengi kullanılan gaza göre değişmektedir. Parça yüzeyinin temizlenmesi aşamasında kullanılan hidrojen (H<sub>2</sub>) gazı, açık mavi bir renkte ışık görülmesine sebep olurken, nitrürleme aşamasına geçildiğinde ortama giren azot (N<sub>2</sub>) atomlarının etkisiyle ışığın rengi mor renge dönüşür. Bu renk farkının nedeni ise, her gazın fazla enerjisini verirken açığa çıkan enerjinin farklı olması ve bunun da ışımının dalga boyunun farklı değerler almasına sebep olmasıdır. Kullanılan gazın, ışıma sırasında oluşan ışığın rengini değiştirmesinden başka nitrürlemeyi etkileyici özelliklerinin de bulunduğu bilinmektedir. Ortamda sadece hidrojen (H<sub>2</sub>) bulunuyor olması, malzemeye herhangi bir azot difüzyonu olmaması anlamına geldiği gibi, hidrojenin paslanmaz çelikle etkileşime girmemesi sonucu parçaya hidrojen difüzyonu olmamasını da sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, hidrojen (H<sub>2</sub>) atomlarının parça yüzeyine çarpmaları; parça yüzeyindeki yağ, oksit tabakası gibi nitrürlemeyi olumsuz etkileyebilecek katmanların malzeme yüzeyinden uzaklaştırılmasını sağlar [2-7]. Hidrojenin (H<sub>2</sub>) böylelikle azot difüzyonunu kolaylaştırıcı etkide bulunduğu, 430 °C gibi düşük sıcaklıklarda da azot difüzyonunu arttırıcı etkileri bilinmektedir [6].

İşlem sırasında kap içindeki gaz, 1 ile 10 torr arasındaki düşük basınç altında tutularak plazma oluşumunun kolaylaştırılması sağlanır. Bunu sağlarken basınç değerinin iyi ayarlanması gerekir. Basıncın çok düşük tutulması, ortamdaki gaz miktarının da çok az olması anlamına gelmesinden dolayı hem plazma

sürekliliği hem de nitrüleme oranı olumsuz etkilenir. Yeterli vakumun sağlanamaması durumunda ise oluşması istenilen plazma ortamı için gereken enerji miktarı artacaktır.

Nitrüleme sıcaklığı 400 ile 600 °C arasında değişebilmektedir. Diğer nitrüleme yöntemlerinde nitrüleme, 550 °C sıcaklığın altında pek yapılmazken, plazma nitrülemeyle çok daha düşük sıcaklıklarda da başarılı nitrüleme işlemleri yapılabilmektedir [6-13]. Sıcaklığın artırılması diğer nitrüleme yöntemlerindeki gibi fırın yardımıyla değil, akım boşalımıyla parçaya geçirilen enerjiyle olmaktadır. Ortama verilen akım artırılarak nitrülenen parçaların sıcaklığı artırılır. İşlem sırasında uygulanan gerilim, nitrüleme sıcaklığına bağlı olarak 400 – 1000 V arasında değişmektedir. Sıcaklık artışının yavaş olması istendiğinden; plazma oluşumu için eşik bir değer diyebileceğimiz 400 V'luk gerilim verildikten sonra parçaların sıcaklığının artışının azalmasıyla, akım yükseltilerek sıcaklık artışı bir değerde tutulmaya çalışılır. Nitrüleme için kullanılan gazın azot (N<sub>2</sub>) veya amonyak (NH<sub>3</sub>) olması durumunda sıcaklık artışı sırasında azot difüzyonu meydana gelirken, N<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> gaz karışımı kullanılması durumunda, sıcaklık artışı sırasında sadece hidrojen (H<sub>2</sub>) ortama verileceğinden, azot (N<sub>2</sub>) difüzyonu oluşmaz. Böylelikle sadece istenilen sıcaklıkta nitrüleme yapılmış olunur.

Gerek plazma nitrüleme gerekse diğer yöntemlerle yapılan nitrüleme sonrasında parça yüzeyinde oluşan nitrür, iki tabakadan oluşmaktadır. Yüzeide beyaz tabaka adı verilen gevrek, sert ve nispeten ince olan kısım bulunurken, yüzeyden derine inildikçe görülmeye başlanılan kısım yayınım tabakasıdır.

## 1.2 Beyaz Tabaka

En dıştaki nitrür tabakası olan beyaz tabaka, adını, nital (%3-5 HNO<sub>3</sub> + alkol) ile dağlandıktan sonra beyaz renkte görünmesinden dolayı alan kısımdır. Nitrüleme koşulları ve süresi ayarlanarak 20 µm kalınlığa kadar oluşumuna izin verilebilen bu tabaka sert, gevrek ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Kalınlığın daha fazla artırılması durumunda; tabakada çatlaklar oluşabileceği ve bunun da yorulma dayanımını olumsuz etkileyeceği bilinmektedir. Beyaz tabakada, γ' (Fe<sub>4</sub>N) ve ε (Fe<sub>2</sub>N ve Fe<sub>3</sub>N) fazları veya bunların karışımı görülebilmektedir. γ' (Fe<sub>4</sub>N) yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahipken, ε (Fe<sub>2</sub>-3N) hegzagonal yapıdadır. Beyaz tabakanın sadece bu metaller arası bileşiklerden oluşuyor olması sertliğinin, malzemenin kimyasal bileşiminden bağımsız olmasını sağlamaktadır. Ayrıca beyaz tabakanın mekanik özellikleri, bu fazların bulunma miktarlarına ve tabakanın kalınlığına büyük ölçüde bağlıdır. Beyaz tabakada γ' (Fe<sub>4</sub>N) fazının oluşumu, yumuşak ve sünek olması nedeniyle, aşınma dayanımının düşük, darbelere dayanıklı uygulamalarda tercih edilirken, ε (Fe<sub>2</sub>-3N) fazının oluşumu, aşınma dayanımının yüksek olması istenen parçalarda tercih edilir. Her iki fazın birden oluşması duru-

munda fazların büyümelemlerindeki (hacimsel genişlemelerindeki) farktan dolayı iç gerilmeler oluşur. Ayrıca beyaz tabaka ile yayınım tabakası arasındaki arayüzün dayanımı da zayıftır. İç gerilmelerin oluşmasının yanı sıra kristal bağlarının da zayıf olması, ince tabaka oluşmasıyla beyaz tabakanın küçük yükler altında bile çatlamasına sebep olmaktadır. Bu yüzden beyaz tabakanın oluşumu yorulma çatlağı başlangıcını hızlandıracığı düşünülerek özellikle değişken dinamik zorlanmalara maruz kalacak parçaların nitrülenmesinde istenmez. Beyaz tabakanın istenmediği ancak nitrüleme sırasındaki şartlar dolayısıyla oluşması durumunda; ek bir takım kimyasal veya mekanik işlemler uygulanarak, beyaz tabakanın kaldırılması mümkündür. Fakat bu işlemler pahalı ve zor olmalarından dolayı hem maliyetleri hem de üretim zamanını arttırır. Bunlar göz önüne alınarak beyaz tabakanın oluşmasını önlemek amacıyla bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan biri nitrüleme sırasında gaz karışımın ayarlanarak karışım içindeki azot oranının düşük tutulmasıdır. Azotun gaz karışımının %5'inden az olması durumunda beyaz tabaka oluşumu görülmemektedir. Bu durumda parça yüzeyinde krom, molibden, alüminyum, vanadyum, titanyum gibi malzemedeki alaşım elementlerinin nitrürlerinin oluşturduğu çökeltilerinin difüzyon tabakası görülür. Azot miktarı gaz karışımının %15'i ile %30'u arasında tutulursa γ' (Fe<sub>4</sub>N) fazının tek fazlı olarak bulunduğu çok ince bir tabaka oluşumu görülür. Azot miktarı gaz karışımının %60-70'i seviyelerinde ise, %1-3 oranında metan gaz karışımında bulundurulacak oluşacak yapının ε (Fe<sub>2,3</sub>N) kristalinden oluşması sağlanabilir. Nitrüleme süresinin artması; beyaz tabakanın ve yayınma (difüzyon) tabakasının kalınlığının büyümesine neden olmaktadır. Beyaz tabaka oluşumunun önüne geçmek için kullanılan diğer bir yöntem ise kademeli nitrüleme olarak adlandırılan ve nitrüleme sırasında kullanılan azot miktarının işlem sonunda azaltılarak nitrülenmenin bitirilmesi. Azotun azaltılmasının yanı sıra azotun tamamen kesilip, sadece soygaz kullanılarak (tercih edilen argon) ve sıcaklığın da bir süre korunması sağlanıp yüzeyde oluşan azotça zengin tabakanın, parçanın iç kısımlarına yayınması istenir. Bu yöntemle beyaz tabaka kalınlığının yanında nitrüleme süresi de kısılır [1, 5, 6, 9, 11-13].

## 1.3 Yayınım (Difüzyon) Tabakası

Nitrüleme ile yüksek oranlarda azotun, malzeme yapısına girmek istemesiyle yüzeye yakın kısımlardaki alaşım elementleri, arayer atomları olmaları nedeniyle malzeme içine doğru hareket ederler. Alaşım elementlerinin malzeme içine itildikçe ilerlemeleri yavaşlar. Bu bir anlamda malzemeye difüze edilen azotun da ilerleyişinin yavaşlaması anlamına gelmektedir. Bunun sonucu olarak beyaz tabakadaki yüksek azot yoğunluğunun yüzeyden uzaklaştıkça azaldığı görülür. Azalan azot yoğunluğu ile ε (Fe<sub>2,3</sub>N) şeklinde oluşmuş olan yüksek azot oranlı bileşikler, görece daha düşük oranına sahip; ancak daha kararlı durumdaki γ' (Fe<sub>4</sub>N) ve α'' (Fe<sub>16</sub>N<sub>2</sub>)

gibi nitrürlere dönüşür. Oda sıcaklığına soğuma sırasında oluşan bu nitrürler, kafes yapılarının fazla azotu daha sıcak durumdaki malzemenin iç kısımlarına doğru kusmasıyla azot, alaşım elementlerle etkileşime girerek nitrürler oluşturur. Özellikle paslanmaz çeliklerde CrN ve Cr<sub>2</sub>N nitrürlerinin çökeltileri görülmektedir. Yayınma tabakası olarak da azotun alaşım elementlerle yaptığı nitrürlerden oluşan kısım anlatılmaktadır. Çökeltiler hem tane sınırlarında hem de tane içlerinde olmaktadır. Yayınma tabakasındaki sertlik artışının da bu çökeltilerin, kafes yapısındaki çarpılmaların daha fazla büyümesi ve dislokasyonların kilitlenerek ilerlemelerinin yavaşlamasıyla oluştuğu düşünülmektedir. Yayınma tabakasında; kafes yapısının azota doyması ve nitrür çökmesinin bir sonucu olarak, yapı genişlemeye çalışacak; buna karşılık malzemenin iç kısımlarındaki yapının bunu engellemesiyle artık gerilmeler de görülecektir. [1, 5, 6, 9, 11-13].

## 2. NİTRÜLEME VE DİĞER DENEY AŞAMALARI

### 2.1 Nitrüleme Aşaması

Deneylerde 316L ostenitik paslanmaz çelik malzemeden 20 mm uzunluğunda, 10 mm genişliğinde, 3 mm kalınlığındaki numuneler kullanıldı. Nitrüleme işlemiyle hem yüzey pürüzlülüğündeki hem de sertlikteki değişimin ölçülebilmesi için dikdörtgen prizma şeklindeki numunelerin iki büyük yüzeyinden biri, nitrüleme öncesi ayna parlaklığında parlatıldı. Bu işlem, 180 numaralı zımparadan başlayarak sırasıyla 320, 400, 600, 1200 numaralı zımparalarla parlatılarak yapıldı.

Parçalar plazma (iyon) nitrüleme yöntemiyle nitrürlendi. Plazma nitrüleme yöntemi için kullanılan düzenek, parçaların nitrülenmesi için gerekli vakumlu ortamı sağlayan silindirik kap, gerekli elektrik enerjisini sağlamakta ve voltajı ayarlamakta kullanılan güç kaynağı (2 Kw DC), pompa (8L/dak), gaz oranını ayarlamada kullanılan su tankı, hidrojen ve azot gazlarının bulunduğu tüpler, nitrüleme sıcaklığını ölç-



Şekil 2. Nitrüleme Mekanizmasının Görünümü

mekte kullanılan termocouple ve basıncı ölçmekte kullanılan "U" civa sütunlu manometreden oluşmaktadır. Deney düzeninin tamamı Şekil 2'de görülmektedir.

Nitrüleme sırasında hidrojen gaz akış hızı, 270 cm<sup>3</sup>/dak. civarında tutulurken, azot gazının akış hızı, karışımın oranına göre ayarlandı. Nitrüleme 10 torr'luk vakum altında gerçekleştirildi. Deney sırasındaki sıcaklık ölçümlerini sağlamak için kullanılan Ni-Cr-Ni termo-eleman çifti, parça sıcaklıklarını ölçmek amacıyla, parçaların deney sırasında üzerine kondukları katot diske bağlandı. Ortalama 600 V'luk bir gerilim altında gerçekleştirilen nitrüleme, doğru akım güç kaynağı aracılığıyla sıcaklıklar, sürekli kontrol edilerek ayarlandı.

Parçalara azot difüze edilen bu aşamada çok sayıda parça üzerine farklı nitrüleme şartlarında uygulamalar gerçekleştirildi. Yapılan nitrüleme deneyleri genel olarak iki guruba ayrılabilir. Bir grup parça için sabit gaz oranı ve sıcaklıkta değişik sürelerde nitrüleme yapılırken (Tablo 3), diğer grup parçalar için sabit bir süre seçerek gaz oranlarını ve sıcaklıkları değiştirerek (Tablo 4) nitrülenmeleri sağlandı. Böylece nitrüleme sonucu malzemedeki değişimler nitrüleme süresi, sıcaklığına ve gaz oranına bağlı olarak incelendi.

Tablo 3. %10 N<sub>2</sub> ve 450 °C'de Yapılan Nitrüleme İşlemlerinin Süreleri

Azot oranı\ nitrüleme sıcaklığı	450 °C
%10	15 dakika
	30 dakika
	60 dakika
	120 dakika
	240 dakika

Tablo 4. Bir Saat Süreyle Yapılan Nitrülenmelerin İşlem Parametreleri

Azot oranı/ nitrüleme sıcaklığı	400 °C	450 °C	500 °C
%5	1 saat	1 saat	1 saat
%10	1 saat	1 saat	1 saat
%25	1 saat	1 saat	1 saat

Sabit gaz oranı ve sıcaklıkta tekrarlanan deneylerde gaz oranı %10 N<sub>2</sub> (azot) %90 H<sub>2</sub> (hidrojen) olacak şekilde seçildi. Sabit sıcaklık ise literatürde yapılan araştırmalar sonucu, beyaz tabaka oluşumunun görülmeye başlandığı eşik sıcaklık olan 450 °C olarak belirlendi. %10 N<sub>2</sub> gaz oranında, 450 °C'de gerçekleştirilen deneylerde süre 15, 30, 60, 120, 240 dakika olacak şekilde belirlendi.

Sabit süre seçilerek yapılan deneylerde, nitrüleme süresi bir

saat olarak alındı. Bir saatlik nitrülemeler % 5, % 10 ve % 25'lik N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> gaz karışımlarının her biri için 400, 450 ve 500 °C olacak şekilde toplam dokuz farklı nitrüleme şartını sağlayarak gerçekleştirildi.

Yapılan nitrüleme işlemlerinin tamamı Tablo 5'te görülmektedir.

**Tablo 5.** Yapılan Nitrüleme İşlemleri

Nitrüleme süresi	Azot oranı		
	%5	%10	%25
15 dakika		450 °C	
30 dakika		450 °C	
60 dakika	400 °C, 450 °C, 500 °C	400 °C, 450 °C, 500 °C	400 °C, 450 °C, 500 °C
120 dakika		450 °C	
240 dakika		450 °C	

Parçalar, nitrülenmeden önce trikloretilen (trichloroethylene) dolu karıştırıcıda bir süre bekletilerek temizlenmesi sağlanmıştır. İlk temizlikleri trikloretilen (trichloroethylene) ile yapılan parçaların, nitrüleme aşamasında vakumlu ortamda sadece H<sub>2</sub> gazının ortama verilip; akım uygulanması sonucu iyonize olan hidrojen atomlarının, parça yüzeylerini bombardıman edip temizlenmeleri de sağlanmıştır. Bu işlemin iki amacı vardır. Birincisi parçaların sıcaklığını nitrüleme yapılacak sıcaklığa çıkarmak, diğeri ise parça yüzeylerinde oluşmuş yağ, oksit gibi pislik tabakalarının temizlenmesini sağlamaktır. Nitrüleme işlemleri sırasında hazırlanan parçalar, yan yüzleri üzerinde duracak şekilde yerleştirilerek, hem parlatılmış hem de parlatılmamış yüzeylerinin nitrülenmesi sağlandı.

Yapılan nitrülemeler sonrasında parçaları, değişik deney ve ölçümlere maruz bırakarak nitrüleme ile 316L ostenitik paslanmaz çelik malzememizin uğradığı değişimler incelendi.

## 2.2 Vikers Sertlik Ölçme Cihazı

Vickers sertlik ölçme cihazıyla nitrülenmiş parçaların sertlikleri ölçüldü. Vickers sertlik ölçüm cihazı 0,01 kgf (98,07 mN), 2 kgf (19,614 mN) kuvvet aralığına sahiptir. Ölçümler sırasında sertlik değerlerinin, malzemenin (316L ostenitik paslanmaz çeliğin) nitrülenmemiş haldeki sertlik değeri olan 380-400 vikers değerlerine yaklaştığı duruma kadar sertlik ölçme kuvveti artırıldı. Sertlik ölçümü elmadan yapılmış basık dört kenarlı piramit şeklindeki uçla yapıldı (Uç açısı 136°). Elmas ucun parçaya kuvvet uygulaması sonucu parçada bıraktığı dikdörtgen şeklindeki izin köşegenleri ölçüldü. Bu köşegen uzunluklarının makina tarafından gerekli hesaplamaları yapmasıyla sertlik değeri bulundu. Hesaplama kullanılan formül (denklem 2.1) verilmiştir [14].

$$VSD = \frac{1,8544 F}{d_1 d_2} \text{ dir.} \quad (2.1)$$

VSD, vickers sertlik değeri

F, uygulanan kuvvet (VSD için N)

d1, d2, oluşan izin köşegen uzunlukları

Vickers sertlik ölçümü, serliği ölçülecek malzemenin sertlik değerinin yüksekliğine bağlı olarak, ölçümün doğruluğu açısından uygulanan kuvvetin büyük olmasını gerektirir. Özellikle uzun süreli (bir saat ve üzeri) nitrülenmiş numunelerin sertliklerinin yüksek olması, vickers sertliğinin ölçülürken büyük kuvvetler kullanılmasını gerektirir. Fakat nitrülenmiş numunelerin katmanlı yapıya sahip olması ve bu katmanların ince olması nedeniyle, sertlik ölçümünde uygulanan kuvvetin artmasıyla, nitrür tabakasının altında kalan kısmın sertlik ölçümünün olumsuz etkilemesine sebep olur. Çeşitli kuvvetlerle yapılan vickers sertlik ölçümünde, her numune için farklı kuvvetlerde farklı sertlik değerleriyle karşılaşıldı.

Yapılan vickers sertlik ölçümlerinin, nitrülenmiş 316L ostenitik paslanmaz çelik numunelerin sertlik değerini doğru vermemesine karşın, farklı kuvvetlerle malzemenin farklı derinliklerine kadar olan kısmının sertliğinin ölçülmesinden yola çıkarak yapılacak bazı hesaplarla kabaca nitrür tabakası kalınlığı bulunabilir. Çok sağlıklı bir değer olmasa da kendi arasında karşılaştırma yapmak için kullanılabilir bu değerler, vickers ölçüm düzeneğinin yapısından yararlanılarak yapılan bir hesaplama dayanmaktadır. Vickers ölçümünde kullanılan ucun piramit şeklinde olduğu, tepe açısının 136° olduğu bilinmektedir. Sertlik ölçümü sırasında malzemeye batırılan uç, malzeme üzerinde dörtgen bir şekil oluşturmakta ve oluşan dörtgenin köşegen uzunluklarının yardımıyla sertlik hesaplanmaktadır. Köşegen uzunlukları, aynı zamanda ucun malzemeye ne kadar battığını da göstermektedir. Bu da yaklaşık olarak köşegenlerin beşte biri değerindedir.

## 2.3 Ultra Mikrosertlik Ölçümleri

Cihaz Fischer- HP 100 XY PROG Ultra Mikrosertlik Cihazı ve Classen MFK model görüntüleme ve ölçülendirme sisteminden oluşan ekipman aracılığıyla, nitrülen parçaların mikro değerlerde sertlikleri ölçüldü. Cihaz, 0,4-1000 mN arasındaki yükün değişik hızlarda uygulanabildiği ve iz derinliğini ölçme prensibiyle sertlik, sertlik profili, elastik ve sürünme özellikleri belirleyebilen bilgisayar kontrollü sistemden oluşmaktadır. Yumuşak ve sert ince kaplamaların taban etkisinden bağımsız sertliklerini ölçme olanağı sunmasından dolayı, nitrülen parçaların taban etkisini (nitrülenmemiş kısmının ölçme etkisini) azaltacak şekilde sertliklerini ölçebilmemize olanak sağlamaktadır. Ölçümler sırasında uygulanan kuvvet değerleri 20, 100, 300, 900 mN seçildi. Yükler 60 adımda uy-

gulandı, her adımın da bir saniyelik bekleme periyotlarıyla birbirini takip etmesi sağlandı.

Ultra mikro sertlik ölçümleri sonucu elde edilen datalar, çeşitli çıkarımlardan yararlanılarak incelenen malzeme hakkında farklı bilgilerin elde edilmesinde de kullanıldı. Ultra mikro sertlik ölçümü sırasında, malzemenin sertlik ölçme ucunun hareketine karşı verdiği tepkiler kaydedilip, çeşitli bilgilerin elde edilmesinde kullanılmaktadır.

Sertlik ölçme ucunun hareketi sırasında, uca verilen enerjinin önemli bir kısmı ölçme yapılmakta olunan malzemeye geçmektedir. Malzemede oluşan bu enerji artışı, oluşan iz yardımıyla tanımlanabilmektedir. Piramit uçları için oluşan izin hacmi, batma derinliğinin küpü ile; yüzeyleri, karesi ile orantılıdır. Enerjideki artış tanımlanırken hacim ve uca değen bölgeler ayrı ayrı ele alınır. Bu işlemler sırasında dinamik etkiler göz ardı edilir.

Bu kabuller doğrultusunda, aktarılan enerji W ile gösterilecek olursa

$$W = \bar{w}_v k_v S^3 + \bar{w}_A k_A S^2 \quad (2.2)$$

V hacmi, A alanı göstermek koşuluyla  $\bar{w}$  ortalama enerji artışı, k sertlik ölçme ucunun şekil faktörünü, batma derinliğini ifade etmektedir.  $\bar{w}k$  s yerine, özgül enerji artışını ifade eden e kullanılırsa, 2.2 denkleminin batma derinliğine göre ikinci dereceden türevi ( $d^2W/ds^2$ ), uygulanan kuvvetin batma derinliğine göre türevine ( $dF/ds$ ) eşittir. F, sertlik ölçmede kullanılan kuvveti göstermek üzere 2.2 denklemi

$$\frac{d^2W}{ds^2} = 6e_v s + 2e_A = \frac{dF}{ds} \quad (2.3)$$

dönüşür.

$$F = Hcs^2 \quad (2.4)$$

2.4 denkleminde H, sertlik, c, geometrik faktör olmak üzere, 2.3 denkleminde yerleştirilirse 2.5 denklemi elde edilir [15].

$$\frac{dF}{ds} = 2Hcs \quad (2.5)$$

## 2.4 Yüzey Profilometresi

Mahr Perhen S&P Perthometer Profimometre ve Focodyn Optik Prob. dokunmalı (mekanik) ve dokunmasız (optik) problemler kullanarak bilgisayar kontrollü iki ve üç boyutlu yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapabilmektedir. Bu cihaz yardımıyla nitrüleme sonrası parçalarımızın yüzey pürüzlülüğünün değişimi incelendi.

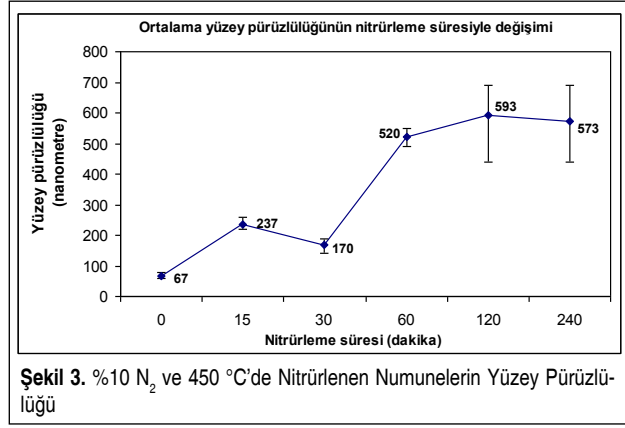
## 2.5 Düşük Açılı X-ray Işınları Difraktometresi

Philips PW 3710 X-ışınları difraktometresi hem x-ray ışın kaynağı hem de dedektör kısmının açılarının ayrı ayrı kontrol edilebilmesi sayesinde; ince filmlerin difraktometrik analiz, reflektans ölçüleri ile ince film kalınlık tayini ve iç gerilim analiz olanakları sunmaktadır. Bu cihaz yardımıyla, nitrülen parçaların x-ray ışınları ölçümlerini gerçekleştirdik. Cihaz 40 V voltaj ve 40 mA akıma ayarlandı. Oluşan Cu-Kα x-ray ışınları, 1,54 Å dalga boyunda ( $\lambda=1,54 \text{ \AA}$ ) olup parçaların ölçümleri sırasında yüzeye, parçanın nitrülenme süresine bağlı olarak değişik açılarda gönderildi. Yaptığımız ölçümlerde tarama alanı olarak 30-80° seçildi. Yapılan ölçümler sırasında tarama hızı 0,02 %/dak. seçildi. Böylelikle nitrülenmiş parçaların kafes yapılarındaki değişimler incelendi.

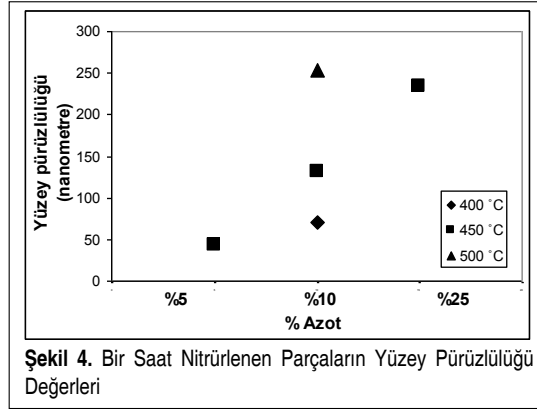
## 3. DENEY SONUÇLARININİRDELENMESİ

### 3.1 Yüzey Pürüzlülüğü ve AFM Fotoğrafları

Nitrüleme deneyleri yapılırken, nitrülen malzemenin kullanım alanları, kullanıldığı yerlerde dikkat edilen şartlar gibi, bazı noktalara dikkat edildi. Nitrülediğimiz 316L ostenitik paslanmaz çeliğin ağırlıklı olarak kullanıldığı yerlerden biri, implant olarak insan vücuduna yerleştirilen çeşitli parçaların üretimidir. İnsan vücuduna yerleştirilmesinde biyouyumluluğu, gerilmelere karşı dayanımı gibi, malzeme özelliklerinin uygun olmasından dolayı seçilen 316L ostenitik paslanmaz çeliğin, implant olarak kullanılabilmesi için bazı geometrik şartları da sağlaması gerekmektedir. İnsan vücuduna yerleştirildiğinde, üzerine binebilecek yükler sonucu hareket etmesiyle vücutta yaralanmalara sebep olmaması için, mümkün olduğunca yuvarlak hatlara ve düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olması gerekmektedir. Bunlar geometrik şartlar olduğundan implantın tasarım aşamalarında dikkat edilebilir. Fakat nitrüleme sonrasında yüzey pürüzlülüğünde oluşabilecek değişimin baştan tahmin edilebilmesi önceden yapılacak deneyler örnek alınarak yapılabilir. Bu yüzden yaptığımız deneylerde bu durumu göz önünde bulundurarak, nitrülediğimiz bazı parçaların yüzey pürüzlülüklerini inceledik. Nitrüleme sonrası yüzey pürüzlülüğünü incelediğimiz parçalar, implant parçaların üretiminde uygulanan ve implantın yüzey pürüzlülüğünü azaltan kimyasal parlatma işlemine uygulanan parçalar arasından seçilerek, sadece bu parçaların yüzey pürüzlülüğü incelendi. Kimyasal parlatma işlemine tabi tutulan parçaların nitrülenmeden önceki yüzey pürüzlülük değerleri, 67 nanometre civarındayken %10, 450 °C'deki bir saatlik nitrülenmeden sonra yüzey pürüzlülüğü 520 nanometre, iki saatlik nitrülenmeden sonra ise 573 nanometre değerlerine çıktı. 450 °C'de yapılan nitrüleme sonrası parçalardaki yüzey pürüzlülüğü değerleri aşağıda verilmiştir. Bu değerler ortalama yüzey pürüzlülüğü olarak adlandırılan Ra değerleridir (Şekil 3).



Şekil 4 çeşitli  $N_2$  oranlarında ve sıcaklıklarda bir saat nitrüleme sonucu elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerlerini göstermektedir. Nitrüleme işlemleri sonucu, yüzey pürüzlülüğünün, azot oranıyla doğru orantılı olarak arttığı görüldü. Bununla birlikte nitrüleme sıcaklığının da yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkili olduğu anlaşıldı. Nitrülemenin yapıldığı sıcaklık yükseldikçe, yüzey pürüzlülüğünün arttığı görüldü [17,18].



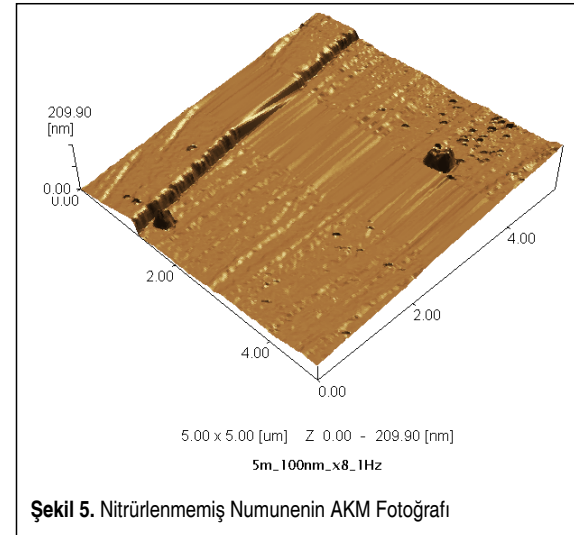
Nitrüleme sonrası parçalar üzerinde karartılar oluştuğu görüldü. Bu karartılar parça yüzeyinin bir kısmında çok, bir kısmında az şekilde oluşmuştur. Yapılan ilk yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde bu karartılara dikkat etmeden, yüzey üzerinden rastgele bölgelerden ölçümler yapılmıştır. Daha sonra tekrar parlatma diyebileceğimiz, çuhada alümina ile parlatma olayını (çuhada parlatma işlemi, parça üzerinden 1 mikrondan daha az bir parça kaldırma işlemi yapmaktadır), karartıları giderecek kadar (1-2 saniye) parçalar parlatıldı. Tekrar parlatma işleminden sonra yaptığımız yüzey pürüzlülüğü ölçümleri sonucu Tablo 6'daki değerler elde edildi. Tekrar parlatma işleminden sonra numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin, nitrüleme öncesi değerlere düştüğü görüldü [18].

Yüzey pürüzlülüğündeki değişimi daha iyi anlayabilmek için AKM (Atomik Kuvvet Mikroskobu, Atomic Force Microscope) ile nitrülenmemiş (Şekil 5) ve 240 dakika nitrülenmiş

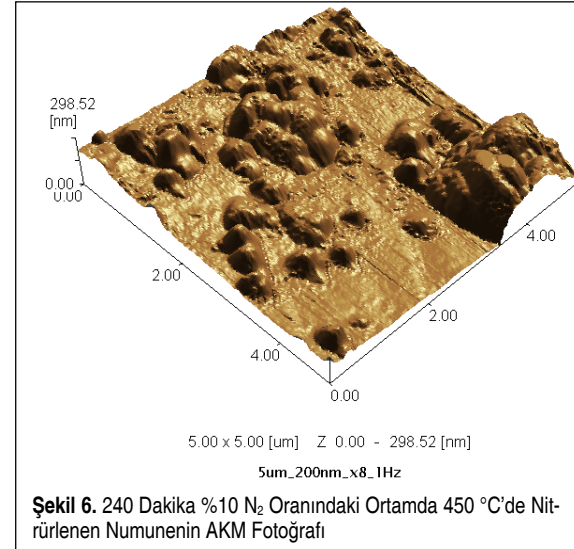
(Şekil 6) numunelerden ölçümler alındı. Bu ölçümler sırasında, tekrar parlatma işlemi uygulanmamış parçalar kullanıldı ve parçaların yüzeyleri üzerindeki karartılara dikkat edilerek, yüzey üzeri mat ve parlak bölgeler olarak ayrılıp, her numune için iki yüzeyden ölçümler alındı. Farklı büyüklüklerdeki alanlar taranarak yapılan ölçümlerde, nitrülenmenin etkileri açık şekilde görülmektedir. Oluşan tepicikler nitrülenmenin yüzey pürüzlülüğünü arttırdığını göstermektedir [18].

Tablo 6. %10  $N_2$  ve 450 °C'de Nitrülen Numunelerin Parlatıldıktan Sonraki Yüzey Pürüzlülüğü

Nitrüleme süresi	Yüzey pürüzlülüğü (nanometre)
Nitrülenmemiş	45
15 dakika	71
30 dakika	97
60 dakika	85
120 dakika	57
240 dakika	61



Şekil 5. Nitrülenmemiş Numunenin AKM Fotoğrafı



Şekil 6. 240 Dakika %10  $N_2$  Oranındaki Ortamda 450 °C'de Nitrülen Numunenin AKM Fotoğrafı

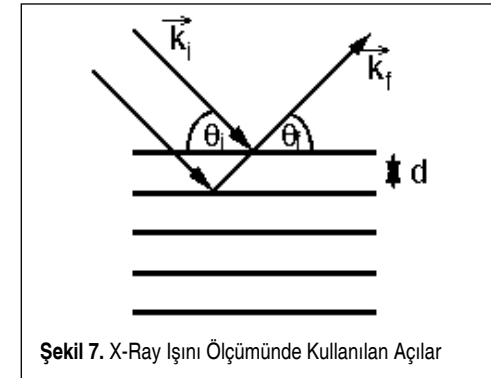
Gaz oranını %10  $N_2$ , nitrüleme sıcaklığını 450 °C sabit alarak yapılan bu nitrüleme işlemleri dışında, farklı gaz ve sıcaklıklarda da nitrüleme işlemleri yapıldı. Tekrar parlatma işleminden sonra yüzey pürüzlülüğündeki değişimin, 400 °C üzerindeki nitrüleme işlemlerinde, nitrüleme sıcaklığı veya gaz karışımındaki azot oranına bağlı olarak büyüdüğü görülmektedir. Tablo 7'ye göre daha yüksek sıcaklıkta veya daha yüksek azot oranıyla yapılan nitrüleme işlemlerinin yüzey pürüzlülüğünü daha fazla arttırdığı görülmüyor [18].

Tablo 7. Bir Saat Nitrüleme Yapılan Numunelerin Yüzey Pürüzlülüğü

Nitrüleme sıcaklığı °C	Azot oranı		
	%5	%10	%25
400	72	71	
450	44	131	235
500	82	253	493

### 3.2 X-ray Işınları Ölçümleri

X-ray, foton adı verilen, bir miktar enerjiden oluşan bir tür elektromanyetik yayındır. X-ray ışınları bir malzeme üzerine yönlendirildiğinde, malzemenin kristal yapısına bağlı olarak yansır. Bragg kanunu olarak bilinen bu ilişki yardımıyla kristal düzlemlerine karşılık gelen difraksiyon açısı arasında bağıntı kurulur. Malzemede bu düzlemler ayırteci bir özellik olup, büyük oranda, malzeme bileşimine göre değişir. Böylelikle X ışını ölçümüyle malzeme yapısındaki bileşenler belirlenebilir. Şekil 7'den anlaşılacağı üzere, malzemeye gönderilen x-ray ışınları birbirine paralel ve eş uzaklıktaki düzlemlerden yansır. Bragg kanunu



$$\theta_i = \theta_r = \theta \quad (3.1)$$

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (3.2)$$

Yansıma, ykm kafes yapılarında, (h k l) olarak gösterilen düzlemin h, k, l indislerinin hepsinin ya tek ya da çift sayı olduğu durumlarda bulunan düzlemlerde gerçekleşir. Gözlenen düzlemler arasındaki uzaklık denklem 3.3 kullanılarak hesaplanabilir.

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (3.3)$$

Denklem 3.3 ile x-ray ışını ölçümleri sonucu bulunacak d (düzlemler arası uzaklık) değerleri yardımıyla kristal yapının kafes sabiti hesaplanabilir.

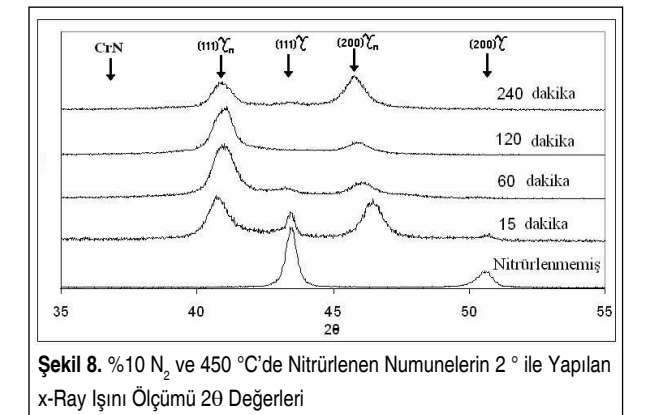
Denklem 3.3, yüzey merkezli kübik (ykm) kristal düzenine sahip ostenitik yapılar için kullanılmakta olup, nitrüleme sonrasında kafesin geometrisindeki değişimin çok küçük değerlerde kalacağı kabul edilerek, nitrüleme sonrası durum içinde kullanıldı.

Nitrüleme süresinin kısa tutulmuş olması nedeniyle oluşan nitrü tabakasının kalınlığının ince olması, yapılan x-ray ışını ölçümleri, ince filmlerin x-ray ışını ölçümlerindeki gibi x-ray ışınları yüzeyle 2° açı yapacak şekilde gönderildi, dolayısıyla sadece nitrülenmiş filmin kristal özelliği incelendi.

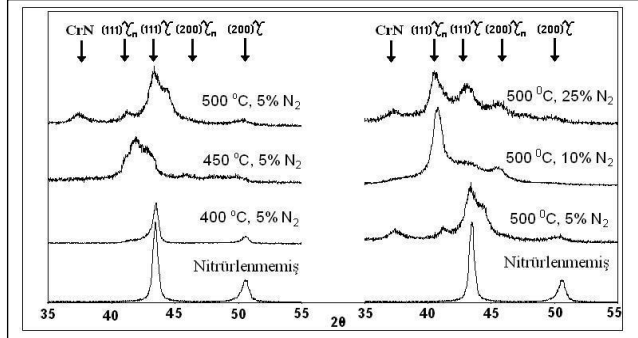
X-ray ışınlarıyla yapılan ölçümler sonucu hem nitrüleme ile yapıda oluşan farklı faz oluşumları belirlendi hem de kafes sabiti hesaplandı.

316L ostenitik paslanmaz çelik malzemenin hacimce %10  $N_2$  gaz oranında 450 °C'de yapılan nitrülemeleri sonucunda, x-ray ışını ölçümleri Şekil 8'de görülmektedir. Şekil 8'in en altında nitrülenmemiş malzemenin x-ray ışını ölçümü görülmektedir. Buradan da anlaşılacağı üzere nitrülenmemiş malzemede karbid oluşumuna rastlanmamaktadır. Bunun nedeni malzemede düşük C miktarıdır. Nitrüleme sonrasında da anlatılan koşullarda ne CrN ne de başka bir karbid oluşumu görülmektedir [16,18].

Nitrülemeyle ostenit kristalleri yapısına giren N atomları, kristal kafesini genişlemeye zorlamaktadır. Grafiklerde görülen  $\gamma$ , nitrülenmemiş malzemenin kristal yapısını temsil ederken,  $\gamma_n$ , nitrüleme sonrası şişmiş kristal yapısını göstermektedir. Azotun, kristal kafesini şişmeye zorlaması sonucu olarak (111)  $\gamma_n$  ve (200)  $\gamma_n$  düzlemlerinin, (111)  $\gamma$  ve (200)  $\gamma$  düzlemlerine göre daha küçük  $2\theta$  değeri olduğu görülmekte-



Şekil 8. %10  $N_2$  ve 450 °C'de Nitrülen Numunelerin 2° ile Yapılan X-Ray Işını Ölçümü 2θ Değerleri



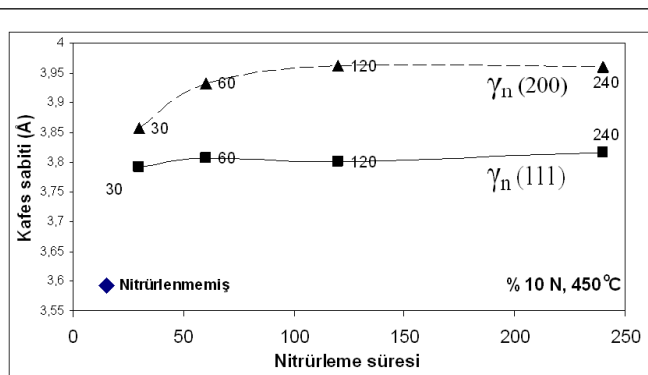
Şekil 9. Bir Saat Nitrlleme Yapılan Numunelerin 2<sup>o</sup> Açılı ile Yapılan X-Ray Ölçümleri 2θ Değerleri

dir. X-ray ışını ölçümlerinde 2θ değerinin sola kayması (azalması) kafes sabitinin arttığını göstermektedir. [18]

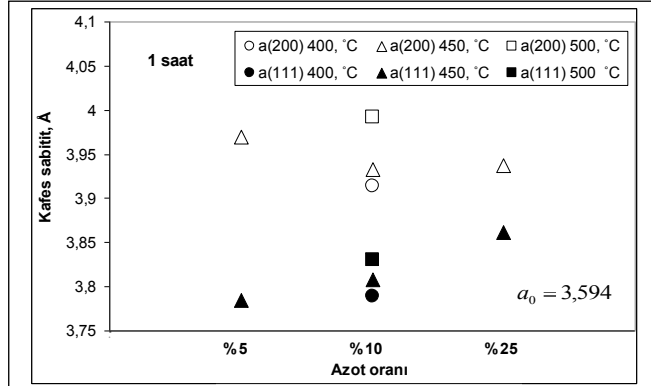
Şekil 9, bir saatlik %5, %10 ve %25 N oranına sahip, 400 °C, 450 °C ve 500 °C'de yapılan nitrllemelerin x-ray ışını ölçümleri görülmektedir. 500 °C ve/veya %25 N içeren nitrllemelerde CrN oluşmaktadır [18].

450 °C ve %10 N içeren ortamda farklı nitrlleme sürelerinde yapılmış deneyler sonucunda oluşan yapının, x-ray ışınları ölçümleri sonucu elde edilen bilgiler yardımıyla kafes sabitleri hesaplandı (Şekil 10). Belirtilen şartlarda yapılan nitrllemeler sonucu kafes sabiti, (111)  $\gamma_n$  düzleminde pek fazla değişmezken, (200)  $\gamma_n$  düzleminde 120 dakikalık nitrllemeye kadar artışı görüldü. Bu durum, kübik yapının, kenarlarının farklı miktarlarda değişmesi sonucu, tetragonal yapıya dönüşüğünü gösterdi [18].

Şekil 11'de görüleceği üzere, nitrlleme sıcaklığı artışının hem (111) hem de (200) düzlemlerindeki kafes sabiti değerlerinin artmasına neden olduğu anlaşıldı. Bunun yanı sıra (111) düzleminde kafes sabitinin nitrlleme sırasındaki azot oranının artışıyla birlikte arttığı görüldü. Bunun nedeni azot atomlarının sıcaklık ve gaz oranıyla doğru orantılı olarak ostenit kafes yapısına nüfuz etmesi ve kafes yapısını aynı oranda genişletmesidir [18].



Şekil 10. %10 N<sub>2</sub> ve 450 °C'de Nitrlenmiş Numunelerin Kafes Sabiti



Şekil 11. Bir Saat Nitrlenmiş Numunelerin Kafes Sabiti Değerleri

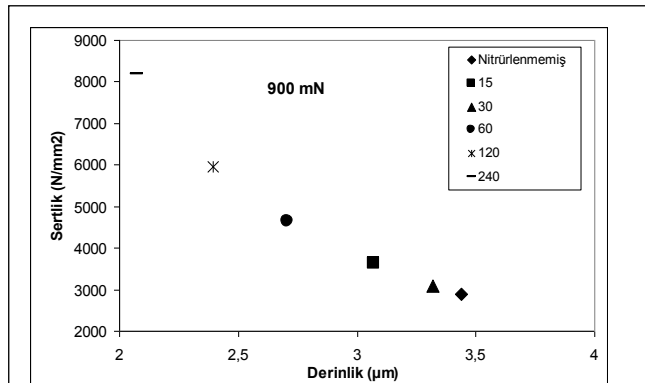
### 3.3 Sertlik Ölçümleri

Serlik ölçümleri hem vickers hem de ultra mikro sertlik olarak iki şekilde yapıldı. Yapılan vickers sertlik ölçümleri, homojen yapıya sahip malzemelere uygulandığından, iki farklı tabakadan oluşan bir yapıya sahip durumdaki nitrlenmiş 316L ostenitik paslanmaz çelik numunelerin, farklı yükler altındaki sertliklerine bakıldı [18].

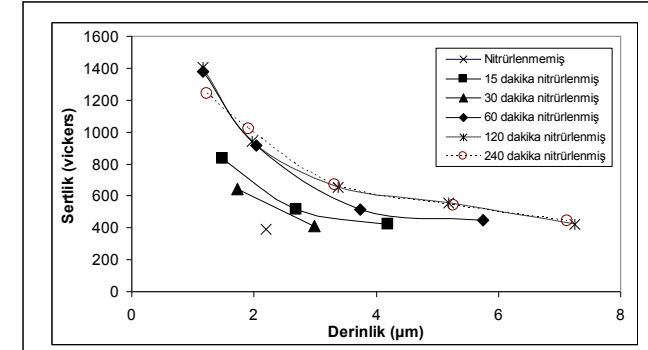
Ultra mikro sertlik ölçümlerinde de nitrlenmiş numunelerin, nitrlenmemiş 316L ostenitik çelik malzemeye göre, sertliklerinin arttığı açıkça görüldü (Şekil 12) [18].

Nitrlleme süresinin sertlik artışıyla orantılı olarak arttığı, sertlik ölçümü sırasında ucun batma derinliğinin buna bağlı olarak düştüğü görüldü [18].

Ölçümler sonucunda, bir nitrl tabakasının oluştuğu, oluşan nitrl tabakası sonucu da sertliğin arttığı görüldü. Sertlik ölçme ucunun nitrlleme süresiyle ters orantılı olarak numuneye batma miktarı azalmaktadır. Nitrl süresinin artmasıyla oluşan nitrl tabakasının kalınlığı artmaktadır. Nitrl tabakasının kalınlığının artması, ölçme sırasında nitrlenmiş tabakanın altında kalan nitrlenmemiş kısmın, sertlik ölçümüne etkisini azaltmaktadır (Şekil 12) [18].



Şekil 12. Nitrlenmemiş ve %10 N<sub>2</sub> ve 450 °C'de Nitrlenmiş Numunelerin Ultra Mikro Sertlik Cihazıyla Ölçülmüş Sertlik Değerleri



Şekil 13. Nitrlenmemiş ve %10 N<sub>2</sub> ve 450 °C'de Nitrlenmiş Numunelerin Derinliğe Bağlı Vickers Sertliği Değerleri

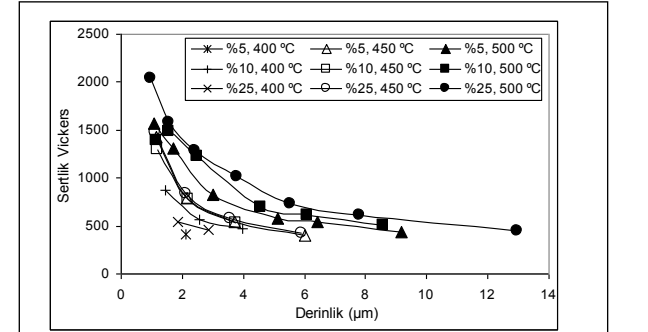
316L ostenitik paslanmaz çelik malzemenin nitrlenmiş numunelerinin vickers sertlik ölçümleri yapılırken, ölçüm kuvveti 25 gr'dan başlayarak, nitrlenmemiş 316L ostenitik çelik malzemenin sertliği olan 400 vickers değerlerine yakın ölçümler alınana kadar ölçüm kuvveti artırılarak sertlik değerleri ölçüldü. Serlik ölçümleri sırasında, piramit ucun malzemede bıraktığı dörtgen izin köşegen uzunlukları yardımıyla, sertlik ölçüm derinlikleri bulundu [18].

Grafiklerden nitrlleme şartlarının nitrl tabakasının kalınlığı üzerine etkileri görülmektedir. Şekil 13, %10 N içeren ortamda, 450 °C'de yapılan nitrllemelerin grafiğini göstermektedir. Nitrlleme süresinin artmasıyla oluşan nitrl tabakası kalınlığı artmakta ve daha yüksek sertlik değerleri görülmektedir. Şekil 13'te, nitrlleme süresi arttıkça yapılan ölçüm sayısının arttığı görülmektedir. Bu da, nitrl tabakasının büyümesi sonucu, nitrlenmemiş tabakanın sertlik ölçümüne etkisinin ancak daha büyük yüklerle yapılan sertlik ölçümlerinde ortaya çıktığını göstermektedir [18].

Nitrlleme sıcaklığının artması sertlik artışını etkilemektedir. Bunun nedeni, sıcaklıkla birlikte oluşan nitrl tabakası kalınlığının artması bunun da nitrlenmemiş alt tabakanın sertlik ölçümüne etkisinin azalmasına neden olmasıdır. Bunun sonucu olarakta yüzeyden yapılan sertlik ölçümlerinde, yüksek sıcaklıklarda nitrlenen numunelerin daha büyük sertlik değerlerine sahip olduğu görüldü. %10 N, bir saatlik nitrllemeler sonucu, 400 °C'de nitrlenmiş numune 25 gram ile yapılan ölçümlerde 848 vickers sertlik değerine sahipken, 450 °C'deki numune 1296 vickers, 500 °C'deki numune 1741 vickers sertliğe sahiptir. Nitrlenmemiş numunenin sertliği ise 358 vickers civarındadır (Şekil 14) [18].

316L ostenitik paslanmaz çelik malzemeden yapılmış numunelerden eşit nitrlleme süresinde nitrlenmiş parçaların incelenmesi sonucu, nitrllemenin yapıldığı gaz karışımındaki azot (N) oranının artmasının, sertlik değerinin değişimini arttırdığı görüldü [18].

Nitrllemenin yapıldığı ortamdaki azot oranının sertlik artışında etkili olduğu görüldü. Azot oranı yüksek nitrlleme



Şekil 14. Bir Saat Nitrlenmiş Numunelerin Derinliğe Bağlı Vickers Sertlik Değerleri

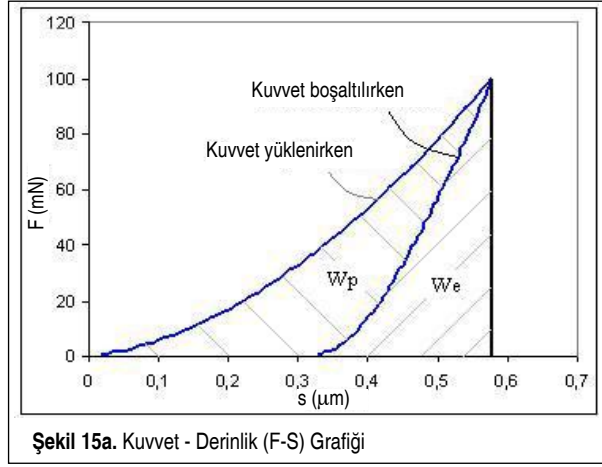
yapılmış numunelerin sertliklerinin de yüksek olduğu ölçüldü. Bir saatlik ve 450 °C'de %5, %10, %25 N oranlarıyla yapılmış nitrllemeler sonucunda, 25 gram ile yapılan vickers ölçümleri %5 N içeren numunenin 1022 vickers, %10 N içeren numunenin 1296 vickers, %25 N içeren numunenin 1815 vickers sertliğe sahip olduğu görüldü (Şekil 14) [18].

Şekil 14 farklı nitrlleme sıcaklıkları ve gaz oranlarının, sertlik - derinlik karşılaştırmasının ilişkisini gösteriyor. Grafik, azot oranı ile sertlik değerleri arasında doğru orantılı bir bağıntı olduğunu göstermektedir. Aynı şekilde bir diğer durumda, sertlik değerleri ile nitrlleme sıcaklığı arasında bulunduğu gözükmemektedir. Her iki durumda da sertlik değerinin artışı oluşan nitrl tabakası kalınlığındaki büyümenin bir etkisidir [18].

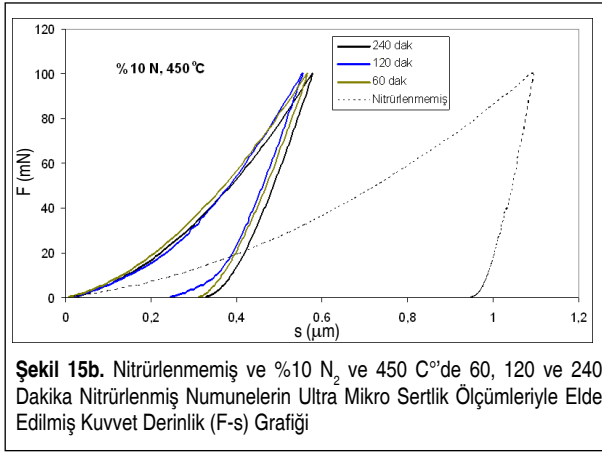
Vickers sertlik ölçümleri sonrasında, hem %10 N, 450 °C'de farklı sürelerde hem de bir saatlik farklı gaz oranları ve sürelerde nitrlenmiş 316L ostenitik paslanmaz çelik numuneler, ultra mikro sertlik testlerine tabi tutuldu. Ultra mikro sertlik ölçümleri sırasında kullanılan kuvvetin vickers sertlik ölçümlerinde kullanılanlardan daha düşük olması, ölçüm cihazının daha hassas olması ve ölçüm sonuçları kullanarak farklı analizlerin yapılabilmesi, malzeme hakkında daha detaylı bilgilere ulaşılabilmesini sağladı. Ultra mikro sertlik ölçümlerinde kullanılan kuvvetin vickers sertlik ölçümüne göre düşük olması, nitrlenmiş tabakanın altında kalan nitrlsüz bölgenin, ölçümlere etkisini azaltmakta, hatta hiç etki göstermemektedir. Ultra mikro sertlik ölçümleri sırasında, ucun malzemeye batışı ve çıkışı esnasında malzemeye batma miktarı ve kuvveti sürekli olarak kaydedilmektedir. Bu sayede malzemenin çeşitli özellikleri hakkında bilgi elde edilebilmektedir [18].

Yapılan ultra mikro sertlik deneyleri sırasında en büyüğü 900 mN olan yükler kullanıldı. Her yük 60 eşit adımda uygulanacak şekilde ayarlamalar yapıldı. Her adımın uygulanma süresi bir saniye seçildi. Mikro sertlik deneyleri sonrasında elde edilen dotalarla, kuvvet - derinlik grafikleri bulundu [18].

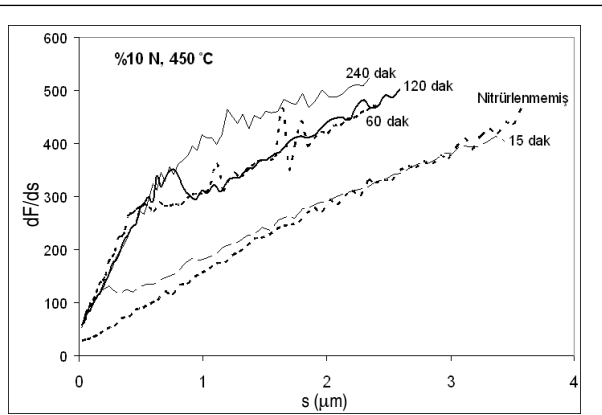
Kuvvet - derinlik (F-s) grafiği (Şekil 15.a), sertlik ölçümü



Şekil 15a. Kuvvet - Derinlik (F-S) Grafiği

Şekil 15b. Nitrülenmemiş ve %10 N<sub>2</sub> ve 450 °C'de 60, 120 ve 240 Dakika Nitrülenmiş Numunelerin Ultra Mikro Sertlik Ölçümleriyle Elde Edilmiş Kuvvet Derinlik (F-s) Grafiği

sırasında numuneye kuvvet yüklenirken ve boşaltılırkenki sertlik ölçme ucunun numuneye dalma derinliğini göstermektedir. Kuvvetin yüklenirken ve boşaltılırkenki iki durumunu gösteren çizgi arasındaki alan, numunenin uğradığı plastik deformasyonun enerjisini (Wp) göstermektedir. Nitrülenmiş numunelerde bu enerjinin düştüğü görülmektedir (Şekil 15b). Grafiğin tepe noktasından ucun basma derinliği eksenine inilen dik çizgi ile yükün kaldırılmasını gösteren çizgi arasında

Şekil 16. Nitrülenmemiş ve %10 N<sub>2</sub> ve 450 °C'de Nitrülenmiş Numunelerin Ultra Mikro Sertlik Ölçümleriyle Elde Edilmiş dF/ds - s Grafiği

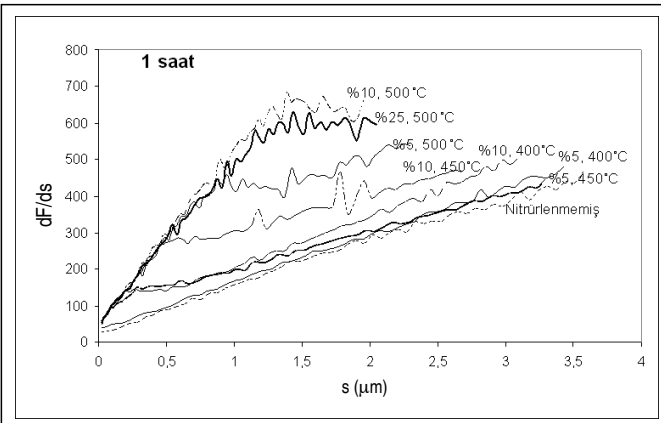
kalan alan ise numunelerin uğradığı elastik deformasyonun enerjisini (We) göstermektedir (Şekil 15a). Elastik deformasyona harcanan enerjinin, nitrülenmiş numunelerde, nitrülenmemişe göre daha düşük olduğu da görülmektedir (Şekil 15b) [18].

Şekil 16'da %10 N<sub>2</sub> ve 450 °C'de yapılan nitrülemelerin ultra mikro sertlik ölçümleri sonucu elde edilmiş dF/ds - s grafiği görülmektedir. Eğrilerin eğimi o noktadaki sertlik değerini vermektedir. Eğrilerin yatay eksenle yaptığı açı arttıkça, sertliğin arttığı anlaşılmaktadır. Nitrülenmiş malzemenin sertleştiği ultra mikro sertlik ölçümlerinde de görülmektedir [18].

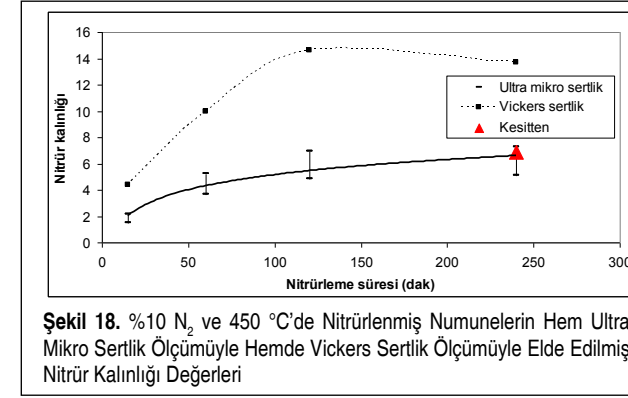
Nitrülenmemiş numune hariç, eğriler belirli bir yere kadar aynı eğimi göstermektedir. Kırılma noktası olarak tanımlayabileceğimiz bu nokta, nitrülenmemiş malzemenin ölçümü etkilemeye başladığı nokta olarak kabul ediliyor. Bu noktanın, nitrür tabaka kalınlığının 1/7 - 1/10'u arasında bir değere sahip olduğu düşünülmektedir [18].

%10 N<sub>2</sub>, 450 °C'de 15 dakika nitrülen numunenin vickers sertlik ölçümlerinde, sertliğinin nitrülenmemiş numuneye göre pek değişmediği görülmeye karşın, 15 dakika nitrülen numunenin ultra mikro sertlik ölçümleriyle elde edilen datalar sonrası çizilen dF/ds-s grafiği, başarılı bir nitrüleme yapıldığını göstermektedir (Şekil 16). Ayrıca, aynı grafikte kırılma noktasına kadar olan eğrinin eğiminin diğer nitrülenmiş numunelerinkilerle aynı değerde olduğu görülmüştür. Bu da, altta kalan nitrülenmemiş tabakanın sertlik ölçümüne olan etkisinin ortadan kaldırılabilmesi durumunda, daha uzun süre nitrülenmiş diğer numunelerle aynı sertlik değerinin ölçülebileceğini göstermektedir [18].

Farklı gaz oranları ve sıcaklıklarda yapılan bir saatlik nitrülemelerin dF/ds - s sonuçları görülen Şekil 17'de, %5 N ve 400 °C'de yapılmış nitrülemelerde, N atomlarının ostenit kafesine pek giriş yapmadığı görülmektedir. Diğer numuneler dikkate alındığında, numunelerin yüzeye yakın kısımlarında yani alttaki nitrülenmemiş tabakanın etkisinin görülmediği, sade-



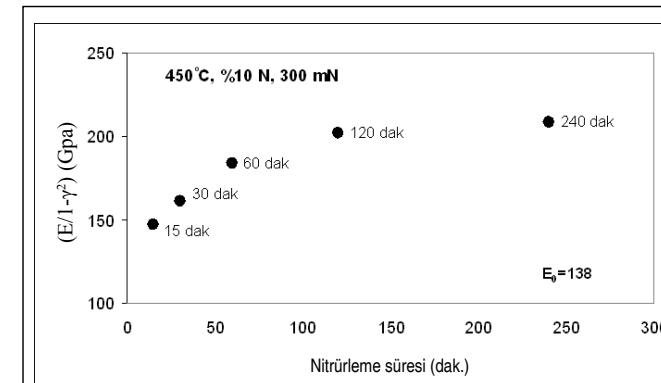
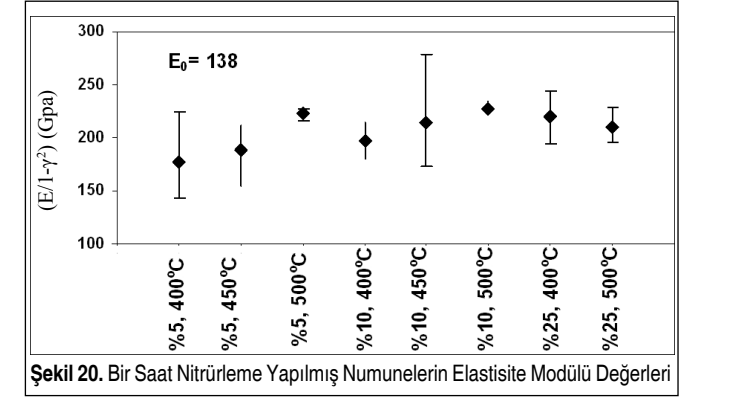
Şekil 17. Nitrülenmemiş ve Bir Saat Nitrülenmiş Numunelerin Ultra Mikro Sertlik Ölçümüyle Elde Edilmiş dF/ds - s Grafiği

Şekil 18. %10 N<sub>2</sub> ve 450 °C'de Nitrülenmiş Numunelerin Hem Ultra Mikro Sertlik Ölçümüyle Hemde Vickers Sertlik Ölçümüyle Elde Edilmiş Nitrür Kalınlığı Değerleri

ce nitrülenmiş tabakanın sertliğinin ölçülmesi durumunda, sertlik değerlerinin eşit olduğu anlaşılmaktadır. Bu numunelerin x-ray ışını grafikleri (Şekil 19) incelendiğinde, numunelerin bazılarında CrN oluşumuna rastlandığı görülmektedir. Bunlar göz önüne alındığında CrN oluşumunun sertlik değerini etkilemediği görülmektedir. Buradan, CrN oluşturmadan da yüksek sertlikte nitrür tabakasına sahip numuneler oluşturulabileceği anlaşıldı [18].

dF/ds - s grafiklerindeki eğrilerin kırılma noktalarının s (ucun batma derinliği) değeri yardımıyla nitrür tabakasının kalınlığı hakkında bilgi edinilmesini sağlamaktadır. Nitrür tabakası kalınlığı, kırılmanın görüldüğü noktanın s değerinin 7 ile 10 katı arasındaki bir değere sahiptir. Ultra mikro sertlik ölçümüyle bulunmuş nitrür tabaka kalınlığı, vickers sertlik ölçümleri kullanılarak tahmin edilen nitrür tabaka kalınlığına göre çok daha küçük değerlerde bulunmaktadır. Bu, vickers sertlik ölçümleriyle yapılan nitrür tabaka kalınlığı tahminlerinin olandan büyük kabul edildiğini göstermektedir (Şekil 3.16) [18].

Şekil 18'de, %10 N<sub>2</sub>, 450 °C'de 240 dakika nitrülenmiş numunenin kesitten alınan ultra mikro sertlik ölçümü sonucu, nitrür kalınlığını gösteren kırmızı üçgen, yüzeyden yapılan ultra mikro sertlik ölçümlerinin, nitrür kalınlığını bulmada daha doğru bir yaklaşım olduğunu göstermektedir [18].

Şekil 19. %10 N<sub>2</sub> ve 450 °C'de Nitrülenmiş Numunelerin Elastisite Modülü Değerleri

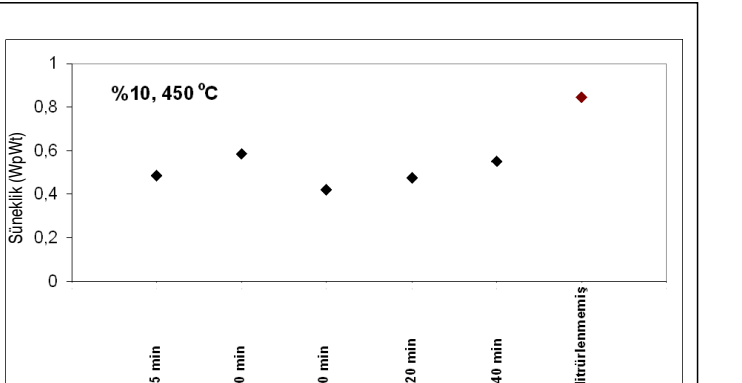
Şekil 20. Bir Saat Nitrüleme Yapılmış Numunelerin Elastisite Modülü Değerleri

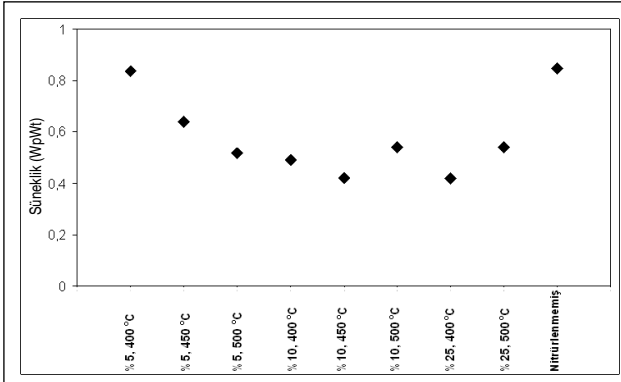
Ultra mikro sertlik ölçümü sırasında malzemenin elastisite modülü de bulunabilir. Elastisite modülünün (E/1-γ<sup>2</sup>) 316L ostenitik malzemenin çeşitli nitrüleme şartlarına göre değişimlerini Şekil 19 ve 20 göstermektedir [18].

%10 N<sub>2</sub> gaz oranına sahip 450 °C'de değişik sürelerde yapılmış nitrülemeler sonucu 316L ostenitik çelik malzemenin elastisite modülünde meydana gelen değişim Şekil 19'da görülmektedir. Elastisite modülünün nitrüleme zamanının artmasıyla azalan bir artım gerçekleştirdiği görülmektedir. Bu, nitrüleme tabaka kalınlığının, nitrüleme süresine bağlı olarak değişimiyle benzerlik göstermektedir. Nitrüleme sonucu %33 mertebelerinde artış gözlenmiştir. Şekil 19'da görülen zamana bağlı artış, aslında nitrür tabakasının kalınlığının artmasıyla alttaki nitrülenmemiş kısmın etkisinin azalması sonucudur [18].

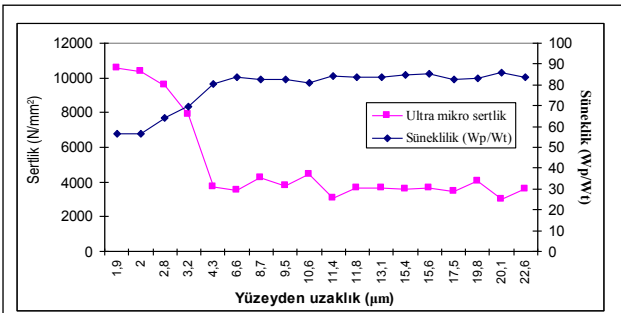
Şekil 20'de görülen grafik, bir saat nitrüleme sonucu 316L ostenitik paslanmaz çeliğin elastisite modülündeki değişimi göstermektedir. Bu değerler sadece nitrür tabakasını içeren ölçümler sonucu (altlık malzeme etkisi olmadan) elde edilmiştir. Plazma nitrüleme şartlarının elastisite modülünün değerini değiştirmediği görülmektedir (Şekil 9). Fakat CrN oluşumuna rastlanmış numunelerin elastisite modülünün diğerlerine göre daha yüksek olduğu da dikkat çekicidir [18].

Şekil 21'de, %10 N<sub>2</sub> ve 450 °C'de çeşitli sürelerde nitrülen-

Şekil 21. %10 N<sub>2</sub> ve 450 °C'de Yapılan Nitrülenmeler Sonucu Elde Edilen Süneklik Değerleri



Şekil 22. Bir Saat Süreyle Çeşitli Gaz Oranları ve Sıcaklıklarda Yapılmış Nitrülemeler Sonucu Elde Edilen Süneklik Değerleri



Şekil 23. %10 N<sub>2</sub>, 450 °C'de 240 Dakika Nitrülen Numunenin Kesitten Yapılan Ölçümler Sonrası Elde Edilen Sertlik ve Süneklik Değerleri

miş numunelerin ultra mikro sertlik ölçümlerinden elde edilmiş datalar aracılığıyla elde edilmiş süneklik değerleri görüldü. Nitrülemeyle sünekliğin değiştiği, nitrüleme süresiyle sünekliğin pek değişmediği görüldü [18].

Bir saat süreyle %5, %10 ve %25 azot oranlarında 400, 450, 500 °C'lerde yapılan nitrülemeler sonucunda sünekliğin, nitrüleme sırasında kullanılan gazın azot oranı ve nitrüleme sıcaklığıyla değişmediği görüldü (Şekil 22). %5 N<sub>2</sub>, 400 °C'de bir saat nitrülen numunenin sünekliğinin pek değişmediği görüldü. Bunun nedeni olarak, numunenin diğer dataları incelendiğinde, bu şartlarda nitrülenimin pek gerçekleşmemesinden olduğu sonucuna varıldı [18].

Şekil 23'te, %10 N<sub>2</sub>, 450 °C'de 240 dakika nitrülenmiş numunenin kesitten yapılan ultra mikro sertlik deneyleri sonucu elde edilen sertlik ve süneklik değerleri görülmektedir. %10 N<sub>2</sub>, 450 °C'de 240 dakika nitrülenmiş numunenin tahmini nitür kalınlığı değerine uygun olarak (Şekil 18), hem sertlik hem de süneklik değerlerinin yüzeyden 6,9 µm içeride bir değişime uğradığı görüldü. Bu değer süneklik değerlerinin interpolasyonu bulunmuştur [18].

#### 4. SONUÇLAR

Düşük sıcaklıktaki plazma nitrülemesi sonucu 316L ostenitik

paslanmaz çeliğin özelliklerinin, testlerden elde edilen sonuçlarından dikkat çekici olanlarını şöyle sıralamak mümkündür.

Nitrülenimin, yüzey pürüzlülüğünü kötüleştirici yönde etki yaptığı görüldü. Bu etki nitrüleme süresinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı; ancak belirli bir değerden yukarıya çıkmadığı şekilde görüldü. Nitrüleme süresinin uzamasının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki olumsuz etkisi gibi nitrüleme sıcaklığının ve nitrülemeye kullanılan azot gazı oranının da yüzey geometrisini bozucu etkide bulunduğu anlaşıldı. Nitrüleme süresi ve azot oranı arttıkça numunelerin yüzey pürüzlülükleri de arttı. Yüzey pürüzlülüğündeki bu artışın nitrülenilen parçaların üzerinde oluşan karartıların giderilmesi durumunda eski değerine düştüğü görüldü [18].

Nitrülenimin, %10 N<sub>2</sub> ve 450 °C'de yapılması durumunda, denenen en uzun süre olan 240 dakikalık nitrüleme süresinde bile CrN oluşmadığı görüldü. CrN fazının oluşumunun, bir saat nitrüleme yapılan numunelerden % 25 N<sub>2</sub> oranına sahip nitrülemeler ile 500 °C'de nitrüleme yapılan numunelerde meydana geldiği görüldü [18].

450 °C ve %10 N içeren ortamda farklı nitrüleme sürelerinde yapılmış deneyler sonucunda kafes sabitinin, (111)  $\gamma_n$  düzleminde pek fazla değişmezken, (200)  $\gamma_n$  düzleminde 120 dakikalık nitrülemeye kadar artışı görüldü. Bu da nitrüleme süresinin artmasıyla, kübik yapının, kenarlarının farklı miktarlarda genişlemesi sonucu, tetragonal yapıya dönüştüğünü gösterdi. Kafes sabitindeki artış, bir başka değişle kübik yapıdaki genişlemenin, daha yüksek nitrüleme sıcaklıklarında veya ortamdaki azot oranının yükselmesiyle arttığı görüldü. Bu da nitrüleme sonucu kafes yapıya giren azotun kafesi genişlemeye zorladığını göstermektedir [18].

Yüzeyden yapılan sertlik ölçümlerinde sertliğin, nitrüleme süresi, nitrüleme sıcaklığı ve azot oranlarının her birine ayrı ayrı bağlı olarak doğru orantılı değiştiği görüldü. Fakat, gerek bu dataların dikkatle incelenmesi, gerekse kesitten yapılan sertlik ölçümleri sonucu, sertlikteki bu değişimlerin; nitrüleme kalınlığının artışıyla, nitrülenmiş tabaka altındaki nitrülenmemiş kısmın sertlik ölçümüne etkisinin azalmasından kaynaklandığı anlaşıldı. Oluşan nitür tabakasının sertliğinin sabit kaldığı, nitrüleme parametrelerine bağlı olmadığı görüldü. Bu, düşük sıcaklıklarda, kısa nitrüleme sürelerinde ve düşük azot oranlarında da yüksek sertlikte nitür tabakası oluşturulabildiğini gösterdi [18].

Yüzeyden sertlik ölçümü yapılması gereken durumlarda, vickers sertlik ölçümleriyle tahmin edilebilecek nitür kalınlığının, mevcut olandan çok daha yüksek olacağı görüldü. Nitür tabakası kalınlığı tahminin, kademeli kuvvet uygulanarak, kuvvetin, sertlik ölçme ucunun batma derinliğine göre türünün, batma miktarına bağlı değişiminin incelenmesiyle daha doğru sonuçlar vereceği görüldü [18].

İlk yapılan deneylerin sonuçlarına bakarak elastik modülünün nitrüleme süresine bağlı olarak değiştiği düşünülmüş olsa da, daha sonra bunun, sertlik ölçümlerinde rastlanılan durum gibi, nitür tabakasının kalınlığının artmasıyla, nitrülenmemiş malzemenin ölçümlere etkisinin azalmasından kaynaklandığı anlaşıldı. Nitrülenimin elastiklik modülünü arttırdığı; ama nitrüleme parametrelerinin direk etkisinin olmadığı görüldü. Burada dikkat çeken bir nokta ise CrN oluşumuna rastlanılmış numunelerin elastiklik modüllerinin nitrülenmiş diğer numunelere göre biraz daha yüksek olduğudur [18].

Nitrülemeyle malzemenin sünekliğinin düştüğü; ama değişimin nitrüleme koşullarıyla bağlantılı olmadığı görülmektedir.

#### SEMBOLLER

A	: Alan
A	: Kafes sabiti
AFM	: Atomic Force Microscope
AKM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
c	: Geometrik faktör
d	: Düzlemler arası uzaklık
d <sub>1</sub> , d <sub>2</sub>	: Sertlik ölçümü sırasında oluşan izin köşegen uzunlukları
DC	: Doğru akım
e	: Özgül enerji artışı
E	: Elastiklik modülü
F	: Uygulanan kuvvet
h, k, l	: İndis
H	: Sertlik
k	: Sertlik ölçme ucunun şekil faktörü
K <sub>p</sub> , K <sub>r</sub>	: Işın
N	: Sabit
s	: Batma derinliği
V	: Hacim
VSD	: Vickers sertlik
W	: Aktarılan enerji
Wp	: Plastik deformasyonun enerjisi
We	: Elastik deformasyonun enerjisi
$\bar{w}$	: Ortalama enerji artışı
YMK	: Yüzey merkezli kübik
$\alpha$	: Ferrit yapısındaki çelik
$\alpha''$	: Fe <sub>16</sub> N <sub>2</sub>
$\gamma'$	: Fe <sub>4</sub> N

$\gamma$	: Nitrülenmemiş kristal yapısı
$\gamma$	: Poison oranı
$\gamma_n$	: Nitrülenmiş kristal yapısı
$\epsilon$	: Fe <sub>2</sub> N ve Fe <sub>3</sub> N
$\epsilon$ -karbonitrürü	: Fe <sub>2-3</sub> C <sub>x</sub> N <sub>y</sub> nitürü
$\epsilon_k$	: Kopma uzaması
$\lambda$	: Dalga boyu
$\theta_i, \theta_f$	: Işının yatayla yaptığı açılar
$\sigma_{0,2}$	: Akma dayanımı
$\sigma_c$	: Çekme dayanımı

#### KAYNAKÇA

1. Genel, K. 2000. "İyon Nitrülenmiş AISI 4140 Çeliğinin Yorulma ve Krozyonlu Yorulma Davranışı," Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
2. Baycık, H. 1999. "İyon Nitrülenmiş H13 Sıcak İş Çeliğinin Sıcaklık ve Zaman ile Sertlik Değerlerinin Değişimi," Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
3. Bakkal, M. 1999. "İyon Nitrülenimin Östemperlenmiş AISI 8660 Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Etkisi," Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
4. Randal, N. X., Renevier, N., Michel, H. ve Collignon, P., 1997. "Correlation Between Processing Parameters and Mechanical Properties as a Function of Substrate Polarisation and Depth in a Nitrided 316L Stainless Steel Using Nano-indentation and Scanning Force Microscopy," Vacuum, 48, 849-855.
5. Gülmez, T. 1998. "Ostenitik Paslanmaz Çelik Ortopedik İmplantların İyon Nitrülemeyle Yorulma Dayanımlarının Arttırılması," Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
6. Marot, L., Le Bourhis, E., Straboni, A. 2002. "Improved nitridation Efficiency and Mechanical Property of Stainless Steel Surface After N2-H2 Plasma Nitridation at Low Temperature," Materials letters, 56, 76-79.
7. Menthe, E., Rie, K.-T., Schultze, J. W., Simson, S. 1995. "Structure and Properties of Plasma-Nitrided Stainless Steel," Surface & Coatings Technolog, 74-75, 412-416.
8. Collins, G. A., Hutchings, R., Short, K. T., Tendys, J., Li, X., Samandı, M. 1995. "Nitriding of Austenitic Stainless Steels by Plasma Immersion Ion Implantation," Surface & Coatings Technolog, 74-75, 417-424.
9. Cho, K. S., Lee, C. O. 1980. "The Effects of Carbon on Ion Nitriding, Journal of Engineering Materials and Technology," 102, 229-233.
10. Bordji, K. Jouzeau, J.-Y., Mainard, D., Payan, E., Delagoutte, J.-P., Netter, P. 1996. "Evaluation of the Effect of

- Three Surface Treatments on the Biocompatibility of 316L Stainless Steel Using Human Differentiated Cells,” *Biomaterials*, 491-500.
11. **Menthe, E., Rie, K.-T.**1999. “Further Investigation of the Structure and Properties of Austenitic Stainless Steel After Plasma Nitriding, *Surface & Coatings Technolog*, 116-119, 199-204.
  12. **Liang, W., Bin, X., Zhiewei, Y., Yaqin, S.** 2000. “The Wear and Corosion Properties of Stainless Steel Nitrided by Low-pressure Plasma-Arc Source Ion Nitriding at Low Temperratures, *Surface & Coatings Technolog*, 130, 304-308.
  13. **Öztürk, O., Williamson, D. L.** 1995. “Phase and Composition Depth Distribution Analyses of Low Energy, High Flux N Implanted Stainless Steel, *J. Appl. Phys*, 77 (8), 3839-3850.
  14. **Weissavach, W., Anik, S., Anik, E. S., Vural. M.** 1996. “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi Muayenesi,” Birsen yayınevi, İstanbul.
  15. **Kazmanli, M.K., Rother, B., Ürgen, M., Mitterer, C.**, 1998. “Indentification of Cracks Generated by Indentation Experiments in Hard-Coating Systems,” *Surface & Coatings Technolog*, 107, 65-75.
  16. **Trabzon, L., İğdil, M. C.** 2004. “On the Materials Properties of thin Film Plasma-Nitrided Austenitic Stainless Steel,” *Surface & Coatings Technolog*, 200 (2006) 4195 - 4200 .
  17. **Trabzon, L., İğdil, M. C.** 2005. “Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel After Low Temperature N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> Plasma Nitridation, *Proceedings of The 1st International Conference on Diffusion in Solids and Liquids*,” July 6-8, 2005, University of Aveiro, Aveiro, Portugal
  18. **İğdil, M. C.** 2005. “Düşük Sıcaklıkta Yapılan Plazma Nitürleme İşleminin 316L Ostenitik Paslanmaz Çeliğinin Malzeme Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi,” Yüksek lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

<http://omys.mmo.org.tr/muhendismakina/>

TMMOB MAKİNA MÜHENDİSLERİ ODASI

Mühendis ve Makina Dergisi

Online Makale Yönetimi

| ANA SAYFA (GİRİŞ SAYFASI) |

» HOŞGELDİNİZ

**YAZAR GİRİŞİ**

e-Posta :

Şifre :

[Yeni Kullanıcı](#) | [Şifremi Unuttum](#)

MÜHENDİS VE MAKİNA DERGİSİ'ne makale gönderebilmek için sisteme kayıt olmanız gerekmektedir. Kayıt olabilmek için sol kısımda yer alan [Yeni Kullanıcı] bağlantısına tıklayınız.

Daha önce kayıt olduysanız, e-posta adresiniz ve şifrenizi girmeniz yeterlidir.

Şifrenizi hatırlamıyorsanız, şifrenizin e-posta adresinize gönderilebilmesi için [Şifremi Unuttum] bağlantısına tıklayınız.

Sistemle ilgili sorularınızı [yayin@mmo.org.tr](mailto:yayin@mmo.org.tr) e-posta adresine gönderebilirsiniz.

**makalelerinizi online sistem üzerinden ulaştırabilirsiniz**