



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ATIKTAN TÜRETİLMİŞ YAKITLAR (ATY) TESİSİNDE KULLANILAN  
KIRICI BIÇAKLARIN ÇALIŞMA VERİMLİLİĞİNDE PLAZMA  
NİTRÜRLEME İŞLEMİNİN ETKİSİ**

**Furkan BOSTANCI**

Doç. Dr. Hakan AYDIN  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA-2017

**Her Hakkı Saklıdır**



**ATIKTAN TÜRETİLMİŞ YAKITLAR (ATY)  
TESİSİNDE KULLANILAN KIRICI BIÇAKLARIN  
ÇALIŞMA VERİMLİLİĞİNDE PLAZMA NİTRÜRLEME  
İŞLEMİNİN ETKİSİ**

**Furkan BOSTANCI**

## TEZ ONAYI

Furkan BOSTANCI tarafından hazırlanan “Atıktan Türetilmiş Yakıtlar (ATY) Tesisinde Kullanılan Kırıcı Bıçakların Çalışma Verimliliğinde Plazma Nitrüleme İşleminin Etkisi.” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Doç. Dr. Hakan AYDIN

**Başkan :** Doç. Dr. Hakan AYDIN  
Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı



İmza

**Üye :** Prof. Dr. Ali BAYRAM  
Uludağ Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı



İmza

**Üye :** Prof. Dr. Ali Rıza YILDIZ  
Bursa Teknik Üniversitesi  
Doğa Bilimleri, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



**Yukarıdaki sonucu onaylarım.**



**Prof. Dr. Ali BAYRAM**  
Enstitü Müdürü

12.04/2017

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

11.04/2017

İmza

  
Furkan BOSTANCI

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ATIKTAN TÜRETİLMİŞ YAKITLAR (ATY) TESİSİNDE KULLANILAN KIRICI BIÇAKLARIN ÇALIŞMA VERİMLİLİĞİNDE PLAZMA NİTRÜRLEME İŞLEMİNİN ETKİSİ

Furkan BOSTANCI

Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç. Dr. Hakan Aydın

Plazma nitrüleme yüzey sertleştirme işlemi, özellikle otomotiv endüstrisinde, metalurji alanında ve takım imalat endüstrisinde uygulama alanı bulan, düşük alaşımlı çelikler, takım çelikleri gibi bir çok metal ile alaşımların aşınma dirençlerini arttıran bir yüzey sertleştirme yöntemidir. ATY (atıktan türetilmiş yakıtlar) tesisleri, metal içerikli olmayan çeşitli katı atıkların mekanik kırıcılardan bir dizi parçalanma operasyonları ile yanmaya hazır katı yakıt oluşumunu sağlayan tesislerdir. Bu tez çalışmasında, bir çimento fabrikasında yer alan ATY tesisindeki mekanik kırıcı bıçakların çalışma verimi konu alınmıştır.

Çalışmada test edilen kesici bıçaklara 3 farklı zaman reçetesinde (12h, 24h,18h,) plazma nitrüleme işlemi uygulanmıştır. Test yapılan parçalar üzerinde yapılan analizlerde, en yüksek yüzey sertlik değerleri 18 saat PN uygulanmasıyla elde edilmiştir. Bıçak yüzeylerinde elde edilen nitrür tabaka derinliği en fazla 24 saat PN uygulamasıyla elde edilmiştir. Aşınma analizlerinde ise en iyi sonuçlar ise 18 saat ve 24 saat PN uygulanmış yerli kesici bıçak numunelerinde görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** ATY, aşınma direnci, plazma nitrüleme, sertlik.

**2017, xi + 125 sayfa.**

**ABSTRACT**  
MSc Thesis

**INVESTIGATION OF PLASMA NITRIDING TREATMENT EFFECTS ON  
EFFECTIVENESS OF SHREDDER BLADES THAT IS USED IN REFUSE  
DERIVED FUEL (RDF) FACILITY**

Furkan BOSTANCI

Uludag University  
Graduate School of Natural Sciences and Applied  
Department of Mechanical Engineering

**Supervisor:** Assoc. Prof. Hakan AYDIN

A Plasma nitriding surface hardening is a surface hardening method that increases the wear resistance of many kind of metal and alloys such as low alloy steels, tool steels, which find application in the automotive industry, metallurgy industry and tool manufacturing industry. RDF (refused derived fuels) facilities are installations that provide solid fuel formation makes ready for burning by a series of crushing operations of a variety of non-metallic solid wastes from mechanical crushers. In this thesis study, a working efficiency of the mechanical shredder blades in RDF plant located in a cement factory was taken into consideration.

In this study plasma nitriding was applied to the shredder blades and tested by three different process period (12h, 18h, 24h,). In all analysis on the tested parts, the highest hardness values were obtained by PN application for 18 hours. The max. depth of the nitride layer obtained obtained by PN application for 24 hours. In the case of wear analysis, the best results had been seen on domestic shredders with 18 and 24 hours PN applied.

**Key words:** RDF, wear resistance, plasma nitriding, hardness

**2017, xi + 125 pages.**

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması ve lisansüstü eğitimim boyunca beni yönlendiren, tez çalışmasının her safhasında desteklerini esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Hakan AYDIN'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Yüksek lisans eğitimimin her aşamasında görüş ve önerilerinden faydalandığım, laboratuvar çalışmalarımda bana destek veren Arş. Gör. Oğuz TUNÇEL ve Arş. Gör. Mümin TUTAR'a teşekkür ederim.

Çalışmalarda ve testlerde kullandığım ekipmanlarda gerek tecrübesiyle, gerek faaliyetleriyle destek olan Er&Mir Tekstil ve Makine San. Tic. Ltd. Şti. firması sahibi Dr. Ersin KORKMAZ'a, tüm deneme çalışmalarının Bursa Çimento Fabrikası ATY tesisinde fiili olarak devreye alınmasında gerek maddi gerekse iş gücü desteğinin teminini sağlayan Çevre Müdürü İbrahim ÇOĞAL'a, ve işgücü desteğini bizden esirgemeyen ATY tesisi çalışanları Hakan HASTÜRK ve Yusuf ALPEK'e ayrıca teşekkür ederim.

Beni büyüten, eğitimimde ve tüm gelişimimde her anlamda yanımda olan bugünlere getiren aileme sonsuz teşekkür ederim.

Furkan BOSTANCI

11/04/2017

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	iv
KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	5
2.1. ATY Tanımı, Üretimi Ve Çimento Üretiminde ATY'nin Yeri .....	5
2.1.1. ATY, Atıktan Türetilen Yakıtların Tanımı .....	5
2.1.2. ATY Kapsamına Giren Atıklar ve Kalite Standartları .....	6
2.1.3. ATY Üretim Aşamaları .....	11
2.1.3.1. Kurutma .....	12
2.1.3.2. Kaynağından ayırma (Ayıklama) .....	13
2.1.3.3. Metallerin Ayıklanması .....	14
2.1.3.4. Metal Dışı Manuel Ayıklama .....	14
2.1.3.5. I. Mekanik Ayırma (Pre-Shredding) .....	15
2.1.3.6. Ayırma (Shredding) ve Eleme .....	16
2.1.3.7. II. Kademe Mekanik Ayırma .....	16
2.1.3.8. Granür Hale Getirme, Peletleme .....	16
2.1.4. Çimento Üretiminde ATY'nin Yeri .....	18
2.1.5. Ülkemizde ATY Potansiyeli .....	23
2.1.6. ATY Tesisi Kurulum Maliyeti .....	25
2.1.6.1. ATY Üretim Tesisi Ekipmanları ve Yatırım Maliyetleri .....	26
2.2. ATY Tesislerinde Kullanılan Kırıcılar .....	27
2.2.1. Parçalayıcı (Shredder) Sistemleri .....	27
2.2.2. Parçalayıcı / Kırıcı (Shredder) Çeşitleri .....	30
2.2.2.1. Ön Parçalayıcılar (Pre – Shredders) .....	30
2.2.2.2. İkincil Parçalayıcılar (Seconder – Shredders) .....	31



2.2.3. Parçalayıcı (Shredder) Ekipmanları .....	33
2.2.3.1. Rotor(Shaft).....	33
2.2.3.2. Kesici Bıçaklar (Knives) .....	34
2.2.3.3. Kafes (Screen).....	35
2.2.4. Kesici (Parçalayıcı) Bıçakların Aşınma Dayanımının Arttırılması .....	36
2.3. Plazma Nitrürleme İşlemi.....	37
2.3.1. Plazma Nitrürleme Metodu .....	37
2.3.2. Plazmanın Nitrürlemenin Mekanizması .....	38
2.3.2.1. Plazmanın Nitrürleme Yöntemiyle Oluşan Faz Yapıları.....	40
2.3.2.2. Nitrürlenebilirlik .....	41
2.3.3. Plazma Nitrürleme Teçhizatı .....	42
2.3.3.1. Vakum Pompası Ekipmanı .....	44
2.3.3.2. Vakum Kabı Ekipmanı .....	44
2.3.3.3. Güç Kaynağı.....	45
2.3.3.4. Gaz Vericileri .....	45
2.3.4. İşlem Parametreleri .....	45
2.3.5. Plazma Nitrürleme Uygulanmış Yüzey Tabakası.....	45
2.3.5.1. Beyaz Tabaka .....	46
2.3.5.2. Difüzyon Bölgesi .....	48
2.3.6. Plazma Nitrürlemenin Avantajları .....	48
2.3.7. Plazma Nitrürlemenin Sınırları .....	49
2.4. Metallerde Aşınma Davranışı.....	50
2.4.1. Aşınma Tanımı .....	50
2.4.2. Aşınmaya Etki Eden Faktörler .....	51
2.4.3. Aşınma Zaman İlişkisi .....	52
2.4.4. Aşınma Mekanizmaları.....	53
2.4.4.1. Adhesiv Aşınma Mekanizması.....	56
2.4.4.2. Abrasif Aşınma Mekanizması.....	58
2.4.4.3. Yorulma Aşınması Mekanizması.....	60
2.4.4.4. Korozif Aşınma Mekanizması .....	60
2.4.4.5. Eroziyon Aşınma Mekanizması .....	60
2.4.5. Aşınmanın Azaltılması İçin Gerekli Önlemler.....	61
2.4.6. Aşınmanın Mukavemetinin Arttırılması.....	62

2.4.7. Sürtünme-Aşınma Deney Düzenekleri .....	62
2.4.8. Aşınma Miktarlarını Ölçme Yöntemleri.....	64
2.4.8.1. Ağırlık Farkı Yöntemi .....	64
2.4.8.2. Kalınlık Farkı Yöntemi.....	65
2.4.8.3. İz Değişimi Ölçme Yöntemi.....	65
2.4.8.4. Bilgisayar Destekli Aşınma Test Yöntemi (BDAT).....	66
2.4.8.5. Radyonüklid Tekniği İle Aşınmanın Ölçülmesi (RNT) .....	66
2.4.8.6. On-Line İzleme Metodu .....	67
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	68
3.1. Materyal .....	68
3.2. Yöntem.....	71
3.2.1. Plazma Nitrüleme (PN) .....	71
3.2.2. Metalografik Muayeneler .....	72
3.2.3. Mikro Sertlik Ölçümleri.....	72
3.2.4. Aşınma Saha Denemeleri .....	73
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	75
4.1. Mikro Yapı .....	75
4.1.1. İKB Numunelerin Mikro Yapısı .....	75
4.1.2. YKB Numunelerin Mikro Yapısı.....	79
4.2. Mikro Sertlik Ölçümleri .....	84
4.2.1. İKB Numunelerinin Sertlik Değerleri.....	85
4.2.2. YKB Numunelerinin Sertlik Değerleri .....	90
4.3. Aşınma Saha Denemelerinin İncelenmesi.....	95
4.3.1. İKB Aşınma Saha Denemelerinin İncelenmesi.....	96
4.3.2. YKB Aşınma Saha Denemelerinin İncelenmesi .....	104
4.3.3. İKB-YKB Aşınma Değerleri Karşılaştırması.....	112
5. SONUÇLAR.....	118
KAYNAKLAR.....	120
ÖZGEÇMİŞ.....	125

## KISALTMALAR DİZİNİ

- AISI – American Iron And Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Standardı)  
ATY – Atıktan Türetilmiş Yakıtlar  
DIN – German Institute for Standardization  
RDF – Refused Derived Fuel  
PN – Plazma Nitrürleme  
KKA – Kentsel Katı Atık  
SLF – İkame Sıvı Yakıt  
NCV – Net Kalorifik Değer  
YKB – Yerli Kesici Bıçak  
İKB – İthal Kesici Bıçak  
RPM – Revolutions per minute (dakikadaki devir sayısı)  
PVD – Fiziksel Buhar Çöktürme  
CVD – Kimyasal Buhar Çöktürme  
STL – STereoLithography, Tersine Mühendislik İle Oluşturulmuş Matematik Model

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 1. 1. Bir Çimento fabrikasındaki ATY işletmesi.....	2
Şekil 1. 2. ATY tesisi mekanik işlemler sonrası geri dönüşüme hazır atıklar.....	3
Şekil 1. 3. ATY tesislerinde kullanılan kırıcı örneği.....	3
Şekil 1. 4. ATY kırıcı içerisindeki tambur ve kesici bıçaklar.....	4
Şekil 2. 1. ATY çevrimine tabii olan atıklara örnekler a. Tekstil b. Plastik c. Karışık sanayi atıkları d. Karışık evsel atıklar.....	5
Şekil 2. 2. ATY üretim şematiği.....	12
Şekil 2. 3. Katı atık boyutsal sınıflandırma eleği.....	15
Şekil 2. 4. Katı atığın I. kırıcıya alınması.....	15
Şekil 2. 5. Hava separatörü çalışma şematiği.....	16
Şekil 2. 6. Peletlenmiş ATY.....	17
Şekil 2. 7. Tabaka/Tuğla halinde ATY.....	17
Şekil 2. 8. İşlem yapılmamış ATY.....	17
Şekil 2. 9. 2011 yılında çimento endüstrisinde değerlendirilen alternatif yakıtlar.....	22
Şekil 2. 10. Alternatif yakıtların gelecek dönemlerde hedeflenen kullanım yüzdesi.....	23
Şekil 2. 11. ATY üretim tesisinin iş akış şematiği.....	26
Şekil 2. 12. Bir ATY üretim tesisinde kullanılan I. kırıcı genel görünümü.....	29
Şekil 2. 13. Kırıcı çalışma prensibi.....	29
Şekil 2. 14. Bir ATY üretim tesisinde kullanılan birincil kırıcı tamburu genel görünümü..	31
Şekil 2. 15. Bir ATY üretim tesisinde kullanılan ikincil kırıcı tamburu genel görünümü ...	32
Şekil 2. 16. ATY tesislerinde genel kırıcı işletme akış diyagramı.....	32
Şekil 2. 17. Tek rotorlu kırıcı örneği.....	33
Şekil 2. 18. Çift rotorlu kırıcı örneği.....	34
Şekil 2. 19. Kırıcı bıçak rotor montajı örneği.....	34
Şekil 2. 20. Kırıcı bıçak örnekleri.....	35
Şekil 2. 21. Farklı ebat ve geometride kafesler.....	35
Şekil 2. 22. Kafesin kırıcı üzerindeki yerleşimi.....	35
Şekil 2. 23. Plazma nitrürleme mekanizması.....	39
Şekil 2. 24. Fe-N (demir-azot) denge diyagramı.....	40
Şekil 2. 25. Alasım elementlerinin nitrürasyon sertliğine etkisi.....	42
Şekil 2. 26. Plazma nitrürasyon cihazının şematik gösterimi.....	43
Şekil 2. 27. Plazma nitrürasyon uygulaması örneği.....	43
Şekil 2. 28. Plazma nitrürasyon yüzey tabakaları.....	46
Şekil 2. 29. Plazma nitrürasyon prosesi.....	48
Şekil 2. 30. Bir ATY tesisinde kullanılan bir kesme bıçağına ait aşınma görünümü.....	50
Şekil 2. 31. Aşınma Zaman Grafiği.....	52
Şekil 2. 32. Aşınma Türleri.....	53
Şekil 2. 33. Aşınma sistemi anahtar kelimeleri ve temas tipleri.....	55
Şekil 2. 34. Dört Aşınma Tipinin Şematik Gösterimi.....	56
Şekil 2. 35. Mikro Soğuk Kaynak Oluşumu.....	57
Şekil 2. 36. İki ve üç elemanlı abrasif aşınma oluşumu.....	59
Şekil 2. 37. Yorulma aşınması mekanizması.....	60
Şekil 2. 38. Eroziyon aşınma.....	61
Şekil 2. 39. Sürtünme aşınma deney düzenekleri.....	63

Şekil 3. 1. Çalışmalarda kullanılan yerli(soldaki) ve ithal(sağdaki) kesici bıçakları .....	68
Şekil 4. 1. İKB $V_0$ (PN uygulanmamış) numunesine ait mikro yapı görüntüsü (200x) .....	75
Şekil 4. 2. İKB $V_1$ (12h PN uygulanmış) numunesine ait mikro yapı görüntüsü (200x) .....	77
Şekil 4. 3. İKB $V_2$ (18h PN uygulanmış) numunesine ait mikro yapı görüntüsü (200x) .....	77
Şekil 4. 4. İKB $V_3$ (24h PN uygulanmış) numunesine ait mikro yapı görüntüsü (200x) ....	78
Şekil 4. 5. İKB numuneleri PN Zaman-Nitrür tabaka derinliği .....	78
Şekil 4. 6. YKB $Y_0$ (PN uygulanmamış) numunesine ait mikro yapı görüntüsü (200x) .....	79
Şekil 4. 7. YKB $Y_1$ (12h PN uygulanmış) numunesine ait mikro yapı görüntüsü (200x) ...	80
Şekil 4. 8. YKB $Y_2$ (18h PN uygulanmış) numunesine ait mikro yapı görüntüsü (200x)....	80
Şekil 4. 9. YKB $Y_3$ (24h PN uygulanmış) numunesine ait mikro yapı görüntüsü (200x)....	81
Şekil 4. 10. YKB numuneleri PN Zaman-Nitrür tabaka derinliği .....	81
Şekil 4. 11. İKB ve YKB numuneleri PN Zaman-Nitrür tabaka derinliği kıyaslaması.....	82
Şekil 4. 12. PN Nitrürlemede zaman-difüzyon derinliği ilişkisi (Rakhit, 2000) .....	83
Şekil 4. 13. PN Nitrürlemede alaşım elementi-nitrür derinliği ilişkisi (Thelning, 1984) .....	83
Şekil 4. 14. Mikro Vickers sertlik ölçümü.....	85
Şekil 4. 15. İKB- $V_1$ Numunesi sertlik ( $HV_{0,01}$ ) grafiği.....	87
Şekil 4. 16. İKB- $V_2$ Numunesi sertlik ( $HV_{0,01}$ ) grafiği.....	88
Şekil 4. 17. İKB- $V_3$ Numunesi sertlik ( $HV_{0,01}$ ) grafiği.....	89
Şekil 4. 18. YKB- $Y_1$ Numunesi sertlik ( $HV_{0,01}$ ) grafiği.....	91
Şekil 4. 19. YKB- $Y_2$ Numunesi sertlik ( $HV_{0,01}$ ) grafiği.....	92
Şekil 4. 20. YKB- $Y_3$ Numunesi sertlik ( $HV_{0,01}$ ) grafiği.....	93
Şekil 4. 21. PN zamanına göre sertlik karşılaştırması (12 saat) .....	94
Şekil 4. 22. PN zamanına göre sertlik karşılaştırması (18 saat) .....	94
Şekil 4. 23. PN zamanına göre sertlik karşılaştırması (24 saat) .....	95
Şekil 4. 24. $V_0$ aşınma sonrası optik tarama görünümü.....	96
Şekil 4. 25. $V_0$ aşınma sonrası optik tarama görünümü - $V_0$ master data kıyaslaması .....	96
Şekil 4. 26. $V_0$ aşınma sonrası kenar hattı aşınma analizi .....	97
Şekil 4. 27. $V_0$ aşınma sonrası maksimum aşınma kesit analizleri.....	97
Şekil 4. 28. $V_1$ optik tarama görünümü (12h PN).....	98
Şekil 4. 29. $V_1$ optik tarama görünümü- $V_0$ master data kıyaslaması (12h PN).....	98
Şekil 4. 30. $V_1$ kenar hattı aşınma analizi (12h PN) .....	99
Şekil 4. 31. $V_1$ maksimum aşınma kesit analizleri (12h PN).....	99
Şekil 4. 32. $V_2$ optik tarama görünümü (18h PN).....	100
Şekil 4. 33. $V_2$ optik tarama görünümü - $V_0$ master data kıyaslaması (18h PN).....	100
Şekil 4. 34. $V_2$ kenar hattı aşınma analizi (18h PN) .....	101
Şekil 4. 35. $V_2$ maksimum aşınma kesit analizleri (18h PN).....	101
Şekil 4. 36. $V_3$ optik tarama görünümü (24h PN).....	102
Şekil 4. 37. $V_3$ optik tarama görünümü - $V_0$ master data kıyaslaması (24h PN).....	102
Şekil 4. 38. $V_3$ kenar hattı aşınma analizi (24h PN) .....	103
Şekil 4. 39. $V_3$ maksimum aşınma kesit analizleri (24h PN).....	103
Şekil 4. 40. $Y_0$ aşınma sonrası optik tarama görünümü.....	104
Şekil 4. 41. $Y_0$ aşınma sonrası optik tarama görünümü - $Y_0$ master data kıyaslaması .....	104
Şekil 4. 42. $Y_0$ aşınma sonrası kenar hattı aşınma analizi .....	105
Şekil 4. 43. $Y_0$ aşınma sonrası maksimum aşınma kesit analizleri.....	105
Şekil 4. 44. $Y_1$ optik tarama görünümü (12h PN).....	106
Şekil 4. 45. $Y_1$ optik tarama görünümü - $Y_0$ master data kıyaslaması (12h PN).....	106
Şekil 4. 46. $Y_1$ kenar hattı aşınma analizi (12h PN) .....	107
Şekil 4. 47. $Y_1$ maksimum aşınma kesit analizleri (12h PN).....	107
Şekil 4. 48. $Y_2$ optik tarama görünümü (18h PN).....	108

Şekil 4. 49. Y <sub>2</sub> optik tarama görünümü - Y <sub>0</sub> master data kıyaslaması (18h PN) .....	108
Şekil 4. 50. Y <sub>2</sub> kenar hattı aşınma analizi (18h PN) .....	109
Şekil 4. 51. Y <sub>2</sub> maksimum aşınma kesit analizleri (18h PN).....	109
Şekil 4. 52. Y <sub>3</sub> optik tarama görünümü (24h PN).....	110
Şekil 4. 53. Y <sub>3</sub> optik tarama görünümü - Y <sub>0</sub> master data kıyaslaması (24h PN).....	110
Şekil 4. 54. Y <sub>3</sub> kenar hattı aşınma analizi (24h PN) .....	111
Şekil 4. 55. Y <sub>3</sub> maksimum aşınma kesit analizleri (24h PN).....	111
Şekil 4. 56. Ortalama aşınma grafiği- İKB .....	112
Şekil 4. 57. Ortalama aşınma grafiği- YKB .....	113
Şekil 4. 58. Ortalama aşınma karşılaştırma İKB-YKB.....	113
Şekil 4. 59. Maksimum aşınma grafiği- İKB.....	114
Şekil 4. 60. Maksimum aşınma grafiği- YKB .....	114
Şekil 4. 61. Maksimum aşınma karşılaştırma İKB-YKB .....	115
Şekil 4. 62. Aşınma hacim analizi-İKB .....	115
Şekil 4. 63. Aşınma hacim analizi-YKB .....	116
Şekil 4. 64. Aşınma hacim karşılaştırması-İKB / YKB.....	116
Şekil 4. 65. Saha deneme numuneleri.....	117

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2. 1. Çimento üretim tesislerinde kullanılan ATY için şartnameler.....	8
Çizelge 2. 2. ATY üretiminde kullanılan I.sınıf atıkların kodlaması .....	9
Çizelge 2. 3. ATY üretiminde kullanılan II.sınıf atıkların kodlaması .....	9
Çizelge 2. 4. ATY üretiminde kullanılan III.sınıf atıkların kodlaması.....	9
Çizelge 2. 5. ATY üretiminde kullanılan IV.sınıf atıkların kodlaması .....	10
Çizelge 2. 6. ATY üretiminde kullanılan V.sınıf atıkların kodlaması.....	10
Çizelge 2. 7. Çimento üretiminde kullanılan geri kazanılmış yakıt bileşimi.....	10
Çizelge 2. 8. ATY kalitesi. ....	18
Çizelge 2. 9. Global çimento üretimi 2014-2015 .....	19
Çizelge 2. 10. ATY üretiminde atıklar için sınırlamalar .....	20
Çizelge 2. 11. ATY üretimi içerisinde ağır metallerin bulunma sınırı yüzdesel oranları.....	20
Çizelge 2. 12. Alternatif yakıtların ısı değerleri .....	21
Çizelge 2. 13. ATY hazırlama tesislerinde hazırlanacak yakıtın özellikleri .....	22
Çizelge 2. 14. Ülkemizde evsel kaynaklı KKA içeriği % .....	24
Çizelge 2. 15. ATY tesisinde kullanılan ekipmanların maliyetleri .....	26
Çizelge 3. 1. DIN 1.2379 / AISI D2 çeliği genel özellikleri .....	69
Çizelge 3. 2. Standart D2 çeliği kimyasal bileşimi (% ağırlıkça).....	69
Çizelge 3. 3. İthal ürün kesici bıçak(İKKB) kimyasal bileşimi (Kosgeb-Bursa Lab.).....	69
Çizelge 3. 4. Yerli ürün kesici bıçak(YKB) kimyasal bileşimi (Kosgeb-Bursa Lab.) .....	69
Çizelge 3. 5. İthal ve Yerli ürün kesici bıçak kimyasal bileşimi önemli farklar .....	70
Çizelge 3. 6. Değişik alaşım elementlerinin çeliğin özelliklerine etkileri .....	70
Çizelge 3. 7. Deneysel çalışmalarda yapılan PN reçeteleri .....	71
Çizelge 3. 8. PN işlemi kesici bıçak test kodlamaları.....	72
Çizelge 3. 9. Saha aşınma denemeleri .....	74
Çizelge 4. 1. İKB ve YKB numuneleri Nitrür tabakası derinliği-Zaman çizelgesi .....	82
Çizelge 4. 2. İKB-V <sub>0</sub> Numunesi sertlik (HV <sub>0,01</sub> ) ölçüm sonuçları (PN Uygulanmamış) .....	85
Çizelge 4. 3. İKB-V <sub>1</sub> Numunesi sertlik (HV <sub>0,01</sub> ) ölçüm sonuçları (12 saat PN).....	85
Çizelge 4. 4. İKB-V <sub>2</sub> Numunesi sertlik (HV <sub>0,01</sub> ) ölçüm sonuçları (18 saat PN).....	88
Çizelge 4. 5. İKB-V <sub>3</sub> Numunesi sertlik (HV <sub>0,01</sub> ) ölçüm sonuçları (24 saat PN).....	89
Çizelge 4. 6. YKB-Y <sub>0</sub> Numunesi sertlik (HV <sub>0,01</sub> ) ölçüm sonuçları (PN Uygulanmamış)....	90
Çizelge 4. 7. YKB-Y <sub>1</sub> Numunesi sertlik (HV <sub>0,01</sub> ) ölçüm sonuçları (12 saat PN) .....	91
Çizelge 4. 8. YKB-Y <sub>2</sub> Numunesi sertlik (HV <sub>0,01</sub> ) ölçüm sonuçları (18 saat PN) .....	92
Çizelge 4. 9. YKB-Y <sub>3</sub> Numunesi sertlik (HV <sub>0,01</sub> ) ölçüm sonuçları (24 saat PN) .....	93
Çizelge 4. 10. İKB ve YKB numuneleri aşınma karşılaştırması .....	112

## 1. GİRİŞ

Tükenebilir doğal kaynak olan enerjinin üretilmesi adına Dünya’da günümüz koşullarında halen en çok kullanılan fosil yakıtların maliyeti giderek artmakta ve enerji üretimdeki verimlilik düşüş göstermektedir. Buna çözüm olarak alternatif enerji kaynakları araştırılmaya ve geliştirilmeye çalışılmaktadır. Çimento sektöründe Türkiye 2015 yılı içerisinde yaklaşık olarak 70,9 milyon ton üretim ile yüksek bir rakama ulaşarak toplam üretimin 8 milyon ton payını yurt dışına ihraç etmiştir. 2015 yılı raporuna göre Türkiye genelinde toplamda 68 çimento fabrikasının var olduğu düşünüldüğünde, atıkların bu sektörde alternatif yakıt olarak kullanılmasının ne derece önem arz ettiği bir kez daha ön plana çıkmaktadır (Anonim 2015a).

Atıklardan meydana gelen alternatif yakıt kaynağı, çimento sektöründe yakılarak enerji elde edilebilecek ideal koşullara sahiptir. Bu anlamda döner fırınlar en uygun saha teşkil etmektedir. Alternatif yakıt olarak kullanılacak atıklarda yer alan organik bileşenler döner fırında prosesin yüksek şartlardaki ısı ve işlem süreleriyle birlikte oksitleyici ortam koşullarının etkisiyle çevreye zarar vermeden yok edilebilirler. Bu kapsamda kullanım ömrü biten taşıt lastikleri, atık yağlar, arıtma sonrası oluşan çamurlar, atık kağıtlar, ahşap atıkları, plastik içerikli tüm malzemeler ve solventler çimento sektöründe alternatif yakıt olarak kullanılan temel atık türleridir. Atıkların alternatif yakıt olarak bu şekilde değerlendirilmesi sonucunda fosil yakıt kullanımı azaltılabilir ve çevre sağlığına katkı yapılabilir (Özel 2011).

Bu tez çalışması kapsamındaki tüm saha denemeleri, Bursa Çimento Fabrikası A.Ş. ATY tesisi bünyesinde gerçekleştirilmiştir.





**Şekil 1.1.** Bir çimento fabrikasındaki ATY işletmesi

Enerji geri dönüşümünü sağlayan, yüksek miktarda farklı tür ve özelliklere sahip atıkların işlenebilmesi için kurulan ATY tesislerinden tüm değişken şartlara uyum sağlayıcı özellikler göstermesi beklenmektedir. Kuru veya çamur olarak toplanan farklı türdeki atıkların geri dönüşüm sonunda ortaya çıkan kaloriferik değer aynı olmadığı gibi tesisin işletme şartlarına da etkisinin aynı olması beklenemez. ATY tesisinde bulunan atıkları kırıcı elekler de bu değişkenlere özel olarak fizibilite aşamasında belirlenmektedir.

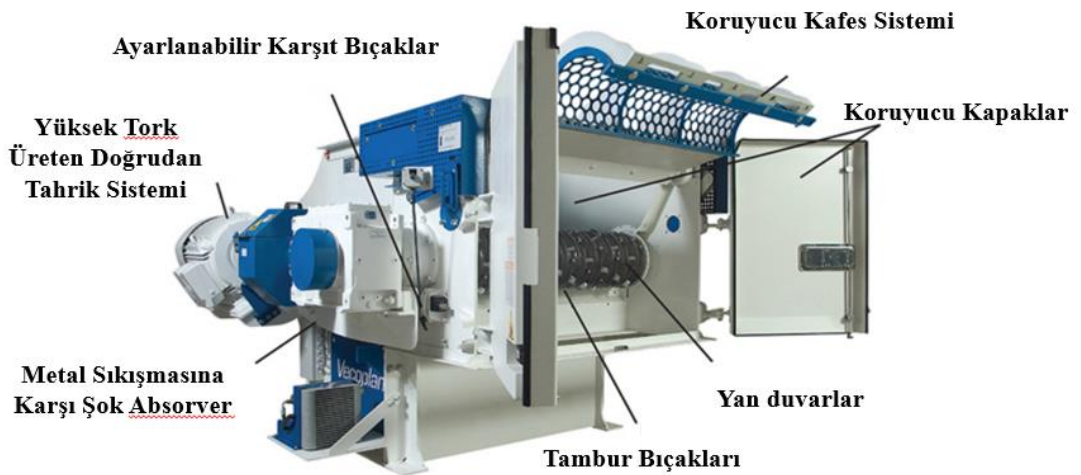
Kırma Eleme Tesisleri'nde en yüksek verim ve kalitenin en optimum koşullarda gerçekleştirilebilmesi adına, tesisin fizibilitesi, makine ve teçhizatın belirlenmesi, parçalanacak atıkların kimyasal - yapısal özellikleri değerlendirilerek tasarlanmalı aynı zamanda yetkin kişiler ile üretimi ve kurulumu gerçekleştirilmelidir (Arman 2014).

Atıkları boyutsal olarak çimento ocaklarında yakılabilecek seviyeye getirmek ve atıklara karışmış geri dönüşüme tabi olmayan (cam, metaller, metal içeren bileşikler, taş, kimyasal vb) maddeleri ayırmak için tesislerde mekanik olarak kırma/eleme işlemleri bir dizi halinde uygulanmaktadır.



**Şekil 1.2.** ATY tesisi mekanik işlemler sonrası geri dönüşüme hazır atıklar (Anonymous 2013).

ATY işletmelerinde kullanılan mekanik kırıcılar çok çeşitli olup sistemin gereklerine uygun şekilde seçilmesi büyük önem taşır. Kırıcılar üzerinde bulunan kesici bıçakların dizaynından, malzemesine, bıçakların diziliminden sayısına kadar bir çok parametre bu gereksinimin değişkenlerini oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında incelenen ATY tesisi kırıcılarında kullanılan DIN 1.2379 (AISI D2) soğuk takım iş çeliği irdelenmiştir. Tesiste yer alan iki kırıcıda, atıkları öğüten kesici bıçakların işlevi ve işletme performansı incelenmiş olup, tesisin çalışma verimine etki eden bu kesicilerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi üzerinde durulmuştur.



**Şekil 1. 3.** ATY tesislerinde kullanılan bir kırıcı örneği

Soğuk takım iş çelikleri, yüksek sertlik dayanımının yanında, yüksek tokluk, basınç ve aşınma direncine haizdirler. Soğuk iş takım çeliklerinin fazlaca kullanımlarında en önemli sebep, piyasada kolayca bulunabilmeleri, maliyet avantajları ve uzun takım dayanımlarıdır. Kesicilerde kullanılan DIN 1.2379 (D2) soğuk takım iş çeliği yüksek darbe ve eğilme direnciyle karşılaşırlar (<http://www.bohlerturkiye.com/>).



**Şekil 1. 4.** ATY kırıcı içerisindeki tambur ve kesici bıçaklar

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. ATY Tanımı, Üretimi Ve Çimento Üretiminde ATY'nin Yeri

Bu bölüm kapsamında ATY tanımı, atıkların kalite standartları, ATY'nin üretim aşamaları ile çimento sektöründeki yeri, ülkemizdeki ATY potansiyeli ve tesis kurulum maliyetleri konu edinilmiştir.

#### 2.1.1. ATY, Atıktan Türetilen Yakıtların Tanımı

Atıktan türetilen yakıt, (refused derived fuel-RDF) ya da ülkemizde bilinen kısaltmasıyla ATY, evsel veya ticari-endüstriyel atıklardan geri dönüşebilen materyallerin (cam, metal, kimyasallar gibi) ayıklanmasından sonra arta kalan yanabilen, geri dönüşümü olmayan materyallerden elde edilen alternatif bir katı yakıttır. Sonuç olarak kazanılan parçalanmış atıklardan meydana gelen ve ısıl değeri yaklaşık 3500 kcal/kg olan atıklar çimento döner fırınlarında kullanılabilir fiziksel ebatlara düşürmek üzere II. parçalayıcıda kırılarak kullanıma uygun hale getirilir (Tübitak LTD.2009). Geri dönüşümlerinde yüksek kalorifik açığa çıkaran söz konusu yakıtlar, çimento sektöründe üretimde ve enerji dönüşümü sağlayan tesislerde değerlendirilebilmektedir (Alp 2011).



a.

b.

c.

d.

**Şekil 2. 1.** ATY çevrimine tabii olan atıklara örnekler a. Tekstil b. Plastik c. Karışık sanayi atıkları d. Karışık evsel atıklar (Anonim 2016a).

Yüksek ısıl değerdeki bu ticari atıklar, geri dönüşüm tesislerinde işlem görerek (parçalama – ayırma), çimento üretiminde ihtiyaç duyulan yüksek kalorinin temininde katkı sağlamak amacıyla, çimento döner fırınlarına alternatif yakıt olarak beslenerek çevre korunmasına faydalı olmaktadır (Anonim 2015b). Atıklardan ATY üretimi

safhaları öğütme işlemi, ayıklama ve sınıflandırma ve metallerin uzaklaştırılması şeklinde sıralanabilir. Bu prosesleri takiben numunelerin eşdeğer formu alması için peletleme denilen işlem ve finalinde depolanma gerçekleşir. Peletleme prosesi, atık tanelerinin yuvarlatılarak belli bir ebatta toplanmasının sağlanması ve granül formunu alması işlemidir (Sika 2000).

Oluşturulan peletlerin fosil yakıt olan kömüre nazaran kirliliğinin olmaması, enerji kazancı, kömüre nazaran çevreci yapısı ve çok daha düşük miktarda toz kirliliği oluşturmasından ötürü avantaj sahibidir. ATY, MSW (Evsel atıklar)'nin öğütülme işlemleri veya otoklav prosesinde buharın basınç ile uygulanmasıyla üretilebilir. Bunun sağladığı fayda ağır metallerin doğadan uzaklaşmasıdır. KKA yani Kentsel katı atıkların kullanılması ile mekanik ısı, mekanik biyolojik etkileşim ya da atıkların otoklav prosesi sonrasında ATY elde edilmiş olur. ATY tekil olarak çimento ocaklarında enerji üretmek için kullanılabilir. Atıkların geri dönüşümüne hizmet eden güç santrallerinde kömüre alternatif olarak 9:1 oranda ATY yakılabilir (Anonymous, 2008).

ATY dönüşüm teknolojisine sahip atık çevrim tesisleri, ülkenin ihtiyaç duyduğu enerji talebinin % 3'ünü sağlayabilecek potansiyelde bir enerjiye sahiptir. İlave olarak, ferro metal, alüminyum ve cam gibi inorganik maddelerin geri dönüşümleri toplam enerji kullanımının ilave % 1'ini daha düşürecektir. ATY üretim işlemleri neticesinde dönüşümü sağlanmış atıkların ticari değeri sayesinde de ilave ciddi bir gelir sağlanabilmektedir (Soylu, 2006).

ATY terimi bazı ülkelerde KKA (kentsel katı atık) ya da endüstriyel işlemlerin sonucu olarak ortaya çıkan malzemenin (atıkların) içinden ayrılmış yüksek kalorifik ısı değerine sahip bölümü için kullanılmaktadır. Buna ilave olarak yardımcı yakıt ya da SLF (ikame sıvı yakıt) terimleri, homojen ya da karışım olabilen endüstriyel atıklar için kullanılmaktadır. Bu tip yakıtlara, taşıt lastikleri, çözücüler, atık yağlar, arıtma çamurları, hayvansal yağlar, kanalizasyon çamuru örnek olarak verilebilir. Bu teknik terimler ayrıca, ambalaj malzemeleri ya da ticari/endüstriyel kaymaklı çeşitli artıklar, hurda otomotiv atıkları, biyokütle atıklarını da kapsamaktadır. Genellikle KKA ile birlikte, ticari ve

endüstriyel atıkların ortak prosesi sonrasında hazırlanan yakıtlar ATY tanımına uymaktadır (European Commission 2003).

### 2.1.2. ATY Kapsamına Giren Atıklar ve Kalite Standartları

Geri dönüşümlü malzemelerden üretilmiş yakıtların en baz kalite standartlarını belirleyerek, endüstriyel sahalarda kullanılan ikincil yakıtların kullanımını destekleyecek ve bu sayede çevre kirliliğini önleyecek ulusal girişimler mevcuttur (Özel 2011).

ATY üretiminde kullanılan atıklar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

#### 1. Evsel Kaynaklı Katı Atıklar

#### 2. Endüstriyel / Ticari Kaynaklı Atıklar

- ✚ Kağıt-karton , plastik ve paketlenme atıkları ve kağıt üretimi atık çamurları
- ✚ Üretim sonrası oluşan atıklar
- ✚ Ömrü tamamlanmış lastikler
- ✚ Biokütle atıkları
- ✚ Bitkisel ve hayvansal kaynaklı atıkları
- ✚ Kontamine edilmemiş ahşap malzeme atıkları
- ✚ Kurutulmuş evsel atık su arıtma sonrası çamurları
- ✚ Tekstil malzemeleri üretim atıkları
- ✚ Otomotiv atıkları (metal ihtiva etmeyen)

#### 3. Yüksek ısı değere olan tehlikeli sınıf atıklar;

- ✚ Kullanım sonrası atık yağlar
- ✚ Endüstriyel ve Anod çamurları
- ✚ Emprenye edilmiş talaş atıkları
- ✚ Atık solventler
- ✚ Halı atıkları
- ✚ Çeşitli tekstil atıkları
- ✚ Çocuk bezi üretimi atıkları

Listede yer alan atıkların türevleri de bu gruplara dahil edilebilir (Alp 2011).

Geri dönüşümü olan atıklarda, standartların ortaya konması amacıyla Avrupa Atık İşleme Tesisleri Federasyonu – EURITS çalışmaları takip etmekte olup, yayınladığı standartlar kullanılmaya başlanmıştır (European Commission 2003).

**Çizelge 2. 1.** Çimento üretim tesislerinde kullanılan ATY için şartnameler (European Commission 2003)

Parametreler	Kriterler	
	Özel İçerikli Yakıt	Hafif İçerikli Yakıt
Isıl Değeri	5708 ila 7500 kcal/kg	5995 ila 7500 kcal/kg
Parlama Noktası	21°C'den az	21°C'den az
15°C'de Özgül Yoğunluk	0.9 ila 1.1 kg/dm <sup>3</sup>	0.8 ila 0.95 kg/dm <sup>3</sup>
Viskozite Değeri	Pompalama uyg.	1 ila 5 est, 50 C sıc.
Kül Oranı	5 ila 10 %	0,6 ila 0,8 %
Su Oranı	Max. 30 %	Max. 10 %
Klor- Cl Değeri	Max. 1 %	Max 1 %
Kükürt- S Değeri	Tanımsız	Max. 0,5 %
Krom- Cr Değeri	Max. 300 ppm	Max. 30 ppm
Vanadyum- V Değeri	Tanımsız	Max. 50 ppm
Z Değeri	Tanımsız	Max. 300 ppm
Çinko- Zn Değeri	Max. 2000 ppm	Tanımsız
Kadmiyum-Cd Değeri	Max. 10 ppm	Max. 5 ppm
Kurşun-Pb Değeri	Max. 350 ppm	Max. 100 ppm
Nikel- Ni Değeri	Tanımsız	Max. 10 ppm
Civa- Hg Değeri	Tanımsız	Max. 5 ppm
PCB	Tanımsız	Max. 5 ppm

Bu değerler Avrupa Birliği'ne bağlı bazı üye yerlerinde üretimi gerçekleştirilen yakıtların analiz sonuçları baz alınarak hazırlanmıştır. Kentsel Atıklardan (KKA) türemiş olan ATY, özel ticari atıklardan türetilen atıklara oranla genelde daha az net ısıl değere (NCV – Net Calorific Value) sahiptir. Kentsel katı atıktan üretilmiş ATY'de bulunan civa (Hg) miktarı daha fazladır. İlave olarak civa için üst sınır ATY'nin civa oranlarına göre önemli oranda farklılık taşımamaktadır. Çimento fırınlarında alternatif yakıt amacıyla üretilen ATY'in tüm özellikler geniş bir yelpazede değişim gösterir, bu gösterge de, çimento fırınlarının esnek bir üretim tesisi olduğuna kanıt olmaktadır. Özetle, iki farklı tür ATY sınıflandırması sunulmuştur; birincisinde kül oranı düşük, diğerindeyse yüksektir. Yüksek kül değerine haiz ATY sınıfının kalorifik değeri daha azdır (Anonymous, 2001).

**Çizelge 2. 2.** ATY üretiminde kullanılan I.sınıf atıkların kodlaması (Anonymous, 2001)

<b>1. Sınıf Atıklar: Ahşap, kağıt, karton, mukavva kutular</b>	
kod: 02 01 03	Bitki dokusundan oluşan atıkları
kod: 02 01 07	Ormancılık işlemleri atıkları
kod: 03 01 01	Ağaç kabuğu ve mantar
kod: 03 03 01	Ağaç kabuğu ve odun atıkları
kod: 03 03 02	Yeşil sıvı çamuru
kod: 03 03 07	Atık kağıt ve kartonun hamur haline getirilmesi sırasında mekanik olarak ayrılan ıskartalar
kod: 15 01 01	Kağıt - karton ambalaj atıkları
kod: 15 01 03	Ahşap ambalaj atıkları
kod: 17 02 01	Ahşap atıkları
kod: 20 01 01	Kağıt ve karton

**Çizelge 2. 3.** ATY üretiminde kullanılan II.sınıf atıkların kodlaması (Anonymous, 2001)

<b>2. Sınıf Atıklar: Tekstil, Elyaf</b>	
kod: 04 02 09	Kompozit malzemeler
kod: 04 02 10	Organik maddeler ( yağ, mum)
kod: 20 01 10	Giysi Atıkları
kod: 20 01 11	Tekstil atıkları

**Çizelge 2. 4.** ATY üretiminde kullanılan III.sınıf atıkların kodlaması (Anonymous, 2001)

<b>3. Sınıf Atıklar: Plastikler</b>	
kod: 02 01 04	Plastikler ( ambalaj hariç)
kod: 12 01 05	Plastik yongalar ve çapak artıkları
kod: 12 01 13	Kaynak atıkları
kod: 15 01 02	Plastik ambalaj atıkları
kod: 15 01 05	Kompozit ambalaj atıkları
kod: 15 01 06	Karışık ambalaj atıkları
kod: 17 02 03	Plastik



**Çizelge 2. 5.** ATY üretiminde kullanılan IV.sınıf atıkların kodlaması (Anonymous, 2001)

<b>4. Sınıf Atıklar: Diğer Malzemeler</b>	
kod: 09 01 07	Gümüş - gümüş bileşenleri içeren fotoğraf filmi ve kağıdı
kod: 09 01 08	Gümüş - gümüş bileşenleri içermeyen fotoğraf filmi ve kağıdı
kod: 09 01 10	Pilsiz tek kullanımlık fotoğraf makineleri
kod: 19 09 04	Kullanılmış aktif karbon
kod: 19 09 05	Doymuş veya kullanılmış iyon değitirme reçinesi

**Çizelge 2. 6.** ATY üretiminde kullanılan V.sınıf atıkların kodlaması (Anonymous, 2001)

<b>5. Sınıf Atıklar: Isıl Değeri Yüksek Atıklar</b>	
kod: 19 05 01	Şehir belediye ve türevi atıkların fraksiyonları
kod: 19 05 02	Hayvansal ve bitkisel kaynaklı atıkların fraksiyonları
kod: 19 05 03	Standart harici kompost
kod: 20 01 08	Bozunabilen mutfak ve çeşitli gıda atıkları
kod: 20 02 01	Bozunabilen atıklar
kod: 20 02 03	Bozunmayan diğer atıklar
kod: 20 03 01	Karışık belediye atıkları
kod: 20 03 02	Pazardan kaynaklı kalıntılar
kod: 20 03 03	Sokak temizleme kaynaklı alıntılar

Çizelgelerde belirtilen sınıflandırmalara uygun olarak sınıflandırılmı geri dönüşüm atıklarının, net ısıl değeri, Cl ve Hg bileşiklerini barındırılan raporları Çizelge 2.7’de gösterilmiştir.

**Çizelge 2. 7.** Çimento üretiminde kullanılan geri kazanılmış yakıt bileşimi (Özel 2011)

<b>Sınıflandırılan Özellik</b>	<b>Ölçü</b>	<b>Birim</b>	<b>Sınıflar- Dereceler</b>				
			<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>
Net Kalorifik Değer	Ort. Değer	MJ/kg	$\geq 25$	$\geq 20$	$\geq 15$	$\geq 10$	$\geq 3$
Cl	Ort.Değer	%	$\leq 0.2$	$\leq 0.6$	$\leq 1$	$\leq 1.5$	$\leq 3$
Hg	Medyan % 80. Dereceden	mg/MJ	$\leq 0.02$ $\leq 0.04$	$\leq 0.03$ $\leq 0.06$	$\leq 0.08$ $\leq 0.16$	$\leq 0.15$ $\leq 0.30$	$\leq 0.5$ $\leq 1$

ATY’nin kalite göstergesi çevre faktörleri (emisyon değeri), kullanıcının tesisi işletme riski (teknoloji açısından) ve yatırım maliyeti sınıflandırmaları değerlendirilerek tespit

edilir. En önemli ekonomik kıstaslar olarak kalorifik değer, teknolojik açıdan klor elementi ve emisyon açısından ise civa kriterleri yer almaktadır. Bu tarzda sınıflandırma biçimi ATY üretim teknolojilerinin ortaya konmasına, bu sahada iştirak göstereceklerin teknolojik alt yapılarının ve lisanslandırma gereksinimlerinin basitleştirilmesine, ATY tüketicilerinin de işlem ve teknolojik yeterlilikleri ile ilgili olarak hangi ATY türlerini kullanabileceklerinin tespitinde fayda sağlayacaktır (Alp 2011).








### **2.1.3. ATY Üretim Aşamaları**

ATY tipik olarak pelet, tuğla ya da dağınık döküntü şeklinde üretilir. Üretim öncelikle karışık atıkların toplanması ve uygun şekilde sınıflandırılarak ayıklanması ile başlar. Kalorifik değere sahip olan tekstil, ahşap, endüstriyel atıklar, lastikler, kauçuklar, kağıt ve plastik gibi malzemeler yanma için de önem arz etmektedir. Ayrıştırma kapsamında cam, metal, kırılması mümkün olmayan büyüklükteki malzemeler, tehlikeli kimyasallar, alev alabilen tehlikeli bileşikler üretim öncesi elemine edilmek zorundadır. Ancak; ne yazık ki tanımdaki gibi ideal bir ayrıştırma sahada tam bir verimlilikle sağlanamaz.

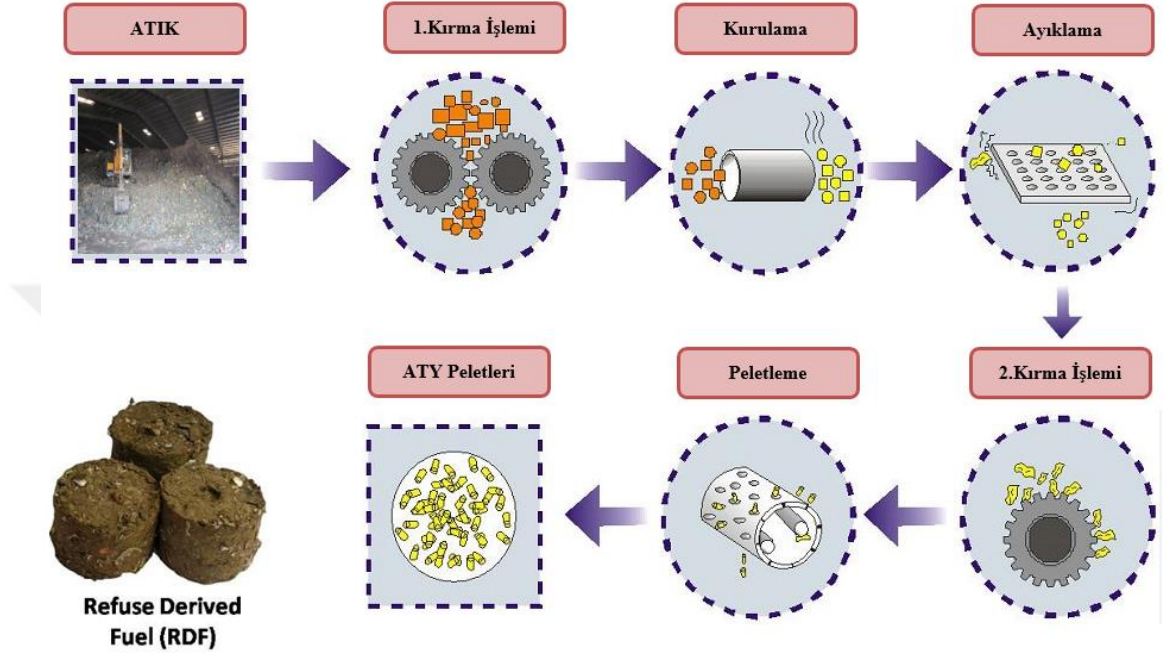
ATY üretimine etken olan bir diğer parametre ise çevre şartları olup bunların en önemlisi nem değeridir. ATY içerisindeki organik maddelerin içerdiği yüksek nem dolayısıyla atık karışımının da içerdiği nem oranı yüksektir (Anonymous 2013).

ATY'nin üretimi bir dizi aşama içerir. Bu adımlar ve bunların sırası ayrıca kullanılan ekipmanların türü atıkların özelliklerine ve çevre şartlarına göre farklılık gösterebilir (A. Gendebien ve ark.2003)

Evsel atıklardan ATY üretiminde gerekli temel işlemler;

-  Kaynaktan ayırma
-  Kurutma
-  1.Boyut azaltma
-  Ayıklama ve Eleme
-  2. Boyut azaltma
-  Paketleme ve peletleme
-  Depolama

Ön arıtıcı görevindeki tesislerde metal içerikler ve inert katılar ayıklanarak, organik bölümler de elemine edilerek kompostlaştırma benzeri ek stabilizasyon işlemleri amacıyla uzaklaştırılırlar. Böylelikle yüksek ısıl değerdeki atık fraksiyonlarına sahip kağıt, tekstil ve plastik vb. kuru bileşiklerin oluşumu sağlanır (Alp 2011).



Şekil 2. 2. ATY üretim şematığı (Anonymous 2013).

### 2.1.3.1. Kurutma

Çevre şartları, mevsimsel dönemler, atık depolama tesisinin fiziksel şartları ve gelen katı atığın içerdiği nem oranı ATY hazırlanmasında ilk aşama olan kurutmanın gerekliliği kararına etki eden parametrelerdir. Güneş altında, sıcak hava ile ya da bunların kombinasyonu ile kurutma işlemi yapılabilir. Bu aşamanın tesisin kapasitesi ve beklentileri göz önüne alındığında pratikte genellikle tercihe bağlıdır. Mekanik olarak kurutma çok fazla miktarda enerji gerektirdiğinden işletmelerin tercih etmediği bir yöntemdir (Anonymous 2013).

### 2.1.3.2. Kaynağından ayırma (Ayıklama)

ATY üretim sahalarında yaklaşık olarak 1 haftalık ihtiyaca dayalı atıklar çeşitli türde enzimler kullanılarak depolanabilmektedir. Bu safhada iki ayrı işlem tekniği bulunmaktadır; bu işlemler, pozitif ve negatif derecelendirme olarak söylenebilir. KKA kentsel tür atıklardan alternatif yakıt üretiminde uygulanan bu işlemde arzu edilen kalite derecesine göre, negatif veya pozitif değerlendirme kriteri uygulanır. Atık hammaddenin yüksek olması hedef ise negatif derecelendirme önerilir ve pozitif derecelendirmeye göre ürün için elde edilen malzeme daha fazla miktardadır ancak; ürün miktarı daha azdır.

- ✓ Pozitif Derece Sistemi: Sadece yüksek ısı kalori oranına sahip materyallerin ve zararı bulunamayan materyallerin seçimidir. Bu metot, daha yüksek oranlarda materyalin atık doldurma alanına gitmesine ancak; daha yüksek kaliteye sahip atık yakıtın ortaya çıkmasına yöneliktir.
- ✓ Negatif Derece Sistemi: Sadece final çıktıda arzu edilmeyen materyalleri seçip alır (örnek olarak; atıklar yakıldığında problemlere sebep olabilmesinden dolayı atık materyallerin içerisinde klorlu malzemelerin eksiltilmesi zorunluluğu, başka bir ihtimal olarak ta atıkların içerisindeki plastik PVC materyallerin oransal olarak eksiltilmesi). Bu metot sayesinde atık doldurma alanına gidecek materyallerin oranı düşürülebilir, aksi halde yüksek oranda zararlı materyal içerme ihtimali olan diğer maddeler ürüne karışabilir.

Zararlı bazı materyaller ise seçilemez çünkü; bunlar atıklara sıkıca tutunma göstermiş ya da içerisinde hapsolmuş ve gizlenmiştir. Tarayıcılar dahi bunları fark edemezler. Üzerlerine tabii olan proses adımlarının sıklığına ve de katı atıktan meydana gelmiş yakıttan hedeflenen özelliklerle ilişkili olarak, atık yükleme sahasına aktarılacak materyallerin oranı geniş çapta farklılık gösterebilir.

Atık metotlarının bazıları yalnızca tepkime göstermeyen materyalleri ve metalleri ayırmaya tabi tutar ve paralelinde organik madde ve nem oranlarını ve miktarlarını da azaltır. Arta kalan materyal direkt olarak ürüne gider ve böylelikle, otomatik olarak çöp dolumu için aktarılacak materyal oranını düşürülür (Pretz ve ark. 2003).

### **2.1.3.3. Metallerin Ayıklanması**

- a. Materyalin ilerleyiş rotasının tam üzerine ve konveyör hattının üzerine uzunlamasına bir geometride bant üstüne manyetik ayırıcının konulması.
- b. Manyetik özellikte tamburlu ayırıcı kullanarak materyali yeniden ayırma, çünkü küçük ferritik parçalar halen manyetik olmayan katmanın alt yüzeyinde bulunabilmektedir.
- c. Bant üzerindeki materyalin yüksekliğini azaltmak amacıyla bant hızını artırmak.
- d. Manyetik tamburlu ayırıcı için materyalin yukarı hattan beslenmesi.

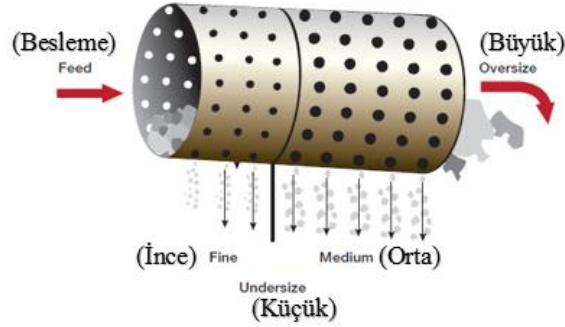
Manyetik özellikte ayırıcıları, ayıklama aracı olarak, ferritik materyalleri ayırmak amacıyla kullanılabilirler, örnek olarak; hafif ambalajlardan teneke kutu ayrılabilir. Bu gibi metotlar aynı zamanda, atıktan tüm ferritik materyali ayıklamak gibi değerli bir hizmet amacıyla da kullanılır. Böylelikle, süren gelen proseslerde olası problemleri engeller ve ürünün kalitesini artırır, örnek olarak; kablo atıkları geri dönüşümünde herhangi bir ferritik materyali elemine etmek için, hareketli parçalayıcı kesicilerin körelmesini ya da sıkışarak kilitlenmesini önlemek amacıyla ve bakır içerikli malzemenin arındırılması adına daha önceden manyetik ayırıcılar kullanılır.

Layout yerleşiminde bant konumuna uyan boylamasına hizalama düzeni tercih sebebidir, bu da ilerleyen materyalden dağınık haldeki parçacıkların efektif olarak ayrılmasına destek sağlar. Ayıklama görevindeki mıknatıs, materyale nazaran enlemesine hizalanmış ise boylamasına hizalamaya göre, mıknatıs çekim kuvvetinin daha yüksek oranda fazla olmalıdır. Bazen ferritik olmayan malzemeler ferritik olanların üstünde yer alabilir ve mıknatıs kuvvetinin öncelikle bunları yemesi gerekir. Genelde, bant üstü manyetik ayıklayıcılar çok fazla verimlere ulaşabilmektedirler (Pretz ve ark. 2003).

### **2.1.3.4 Metal Dışı Manuel Ayıklama**

Mekanik prosesler başlamadan önce, büyük parça ahşap, taş, büyük parça tekstil atıkları gibi atıklar manuel olarak ayıklanır. Bunun için kısa mesafe konveyörler araç olarak kullanılabilir. Bu hatta ilave olarak bazı tesislerde atıkları boyutlarına göre sınıflandırma işlemi de yapılabilmektedir. Bu işlem genellikle döner silindir eleklerde yapılır. Bu

elekler üzerinde bulunan farklı ebatlardaki boşluklardan dökülen katı atıklar boyutlarına göre ön sınıflandırmaya tabi tutulmuş olur.



Şekil 2. 3. Katı atık boyutsal sınıflandırma eleği (Anonymous 2013).

#### 2.1.3.5. I. Mekanik Ayırma (Pre-Shredding)

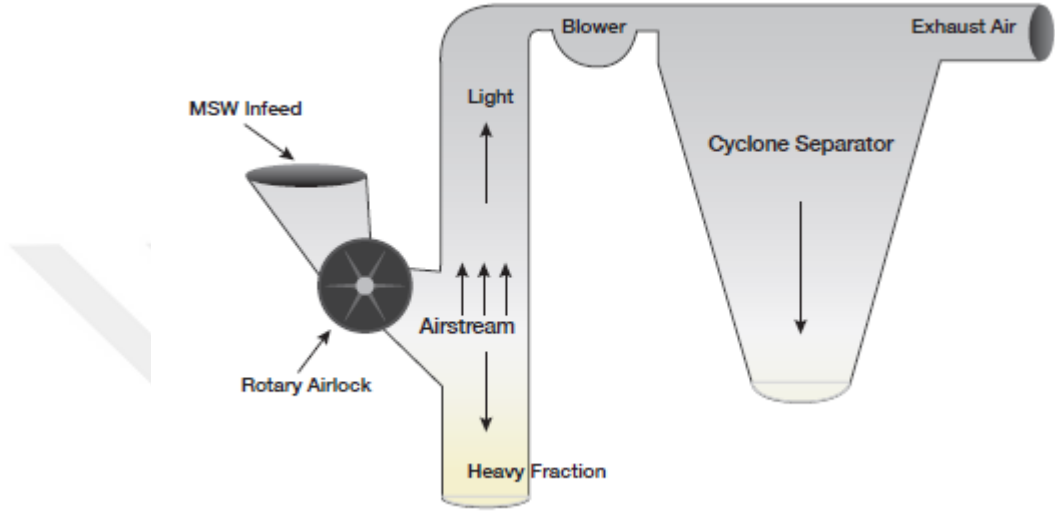
Genellikle bu aşama için iki tip makine kullanılmaktadır. Bunlar sallantılı çekiçli tamburlar ve kesme öğütücülerdir. Çekiçli tamburlar atıkların geçiş yönünde sallantılı çalışan çelikler içermektedir. Kayma hareketleriyle akış halindeki atıkları sıkıştırarak parçalanmasını sağlarlar. Üzerindeki çekiçler belli frekanslarda yüzey yenileme ya da yenilenmeye ihtiyaç duyarlar. Kesme öğütücüler ise tek ya da çift tamburlu olarak eş eksenli çalışırlar ve yukarıdan dökülen katı atıkların silindirler arası sıkıştırarak kırılmasını sağlarlar (Anonymous 2013).



Şekil 2. 4. Katı atığın I.kırıcıya alınması

### 2.1.3.6. Ayırma (Shredding) ve Eleme

Bu aşamada, yüksek güçlü fanlar yukarı yönde hava koridoru oluştururlar. Hafif malzemeler yukarı çıkarken ağır malzemeler ise aşağı düşer. Hava akımı, kağıt, plastik gibi hafif malzemeleri yukarı yönde taşır. Bu ayırmanın kalitesi, hava akımının gücü ile yukarı taşıyabildiği malzeme türü ve miktarıyla ölçülür (Anonymous 2013).



Şekil 2. 5. Hava separatörü çalışma sistematığı (Anonymous 2013).

### 2.1.3.7. II. Kademe Mekanik Ayırma

I.kademe kırıcı mekanik prosesi ve takip eden hava separatörü ara prosesi sonrasında atıklar II. Kademe kırıcıya boyutu küçülmüş, yabancı ve istenmeyen maddelerden arındırılmış şekilde gelir. I. Kademe kırıcı ile aynı sistemde çalışan bu proses adımı sonrasında katı atıklar peletlenmeye hazır boyuta indirgenir.

### 2.1.3.8. Granür Hale Getirme, Peletleme

Tüm ayırma ve mekanik kırma adımları tamamlandığında, hazır ATY pelet ya da tabaka haline gelmeye hazırdır. Farklı malzemelerin aynı paketleme içerisinde olduğu bu son aşamada nihai ürünün son şekli tercihe bağlıdır. Çimento fabrikalarında hızlı beslemeye tabi tutulan ATY genellikle filolarda sıkıştırılmış halde bulunurken, uzun süreli depolanma durumunda ise peletleme ve tabaka haline getirme tercih edilmektedir.



**Şekil 2. 6.** Peletlenmiş ATY (Anonymous 2013)



**Şekil 2. 7.** Tabaka/Tuğla halinde ATY (Anonymous 2013)



**Şekil 2. 8.** İşlem yapılmamış ATY (Anonymous 2013)



**Çizelge 2. 8.** ATY kalitesi (Alp 2011).

<b>ATY Türü</b>	<b>Kalorifik Değer (MJ/kg)</b>	<b>Kül ( % ) Oranı</b>	<b>Klor ( %w) Oranı</b>	<b>Sülfür( %w) Oranı</b>	<b>Nem( %w) Oranı</b>
<b>Evsel Atıklar</b>	12 ila 16	15 ila 20	0,5 ila 1	-	10 ila 35
<b>Ticari Atıklar</b>	16 ila 20	5 ila 7	<0,1- 0,2	<0.1	10 ila 20
<b>Endüstriyel Atıklar</b>	18 ila 21	10 ila 15	0,2 ila 1	-	3 ila 10
<b>Hafriyat Atıkları</b>	14 ila 15	1 ila 5	<0.1	<0.1	15 ila 25

#### **2.1.4 Çimento Üretiminde ATY'nin Yeri**

Son 50 yıl boyunca, küresel çimento üretimi her yıl 200 milyon ton yükselerek bugünkü rakam olan yılda 1,8 milyar ton kapasitesine ulaşmıştır. Bu üretim kapasitesinin etkisiyle ilgili süreçler küresel CO<sub>2</sub> salınımı % 7 artış göstermiştir (Joseph Davidovits 2010).

**Çizelge 2. 9.** Global çimento üretimi 2014-2015 (<http://minerals.usgs.gov/>)

World Production and Capacity (estimated)	Cement production <sup>e</sup> (mio tons)			Clinker capacity <sup>e</sup> (mio tons)	
	2014	2015		2014	2015
China	2480,0	2350,0	↓	2000,0	2000,0
India	260,0	270,0	↑	280,0	280,0
USA (includes Puerto Rico)	83,2	83,4	↑	105,6	106,0
<i>Turkey</i>	75,0	77,0	↑	69,0	69,0
Brazil	72,0	72,0	↔	60,0	60,0
Russia	68,4	69,0	↑	80,0	80,0
Indonesia	65,0	65,0	↔	59,0	59,0
Iran	65,0	65,0	↔	78,6	79,0
South Korea	63,2	63,0	↓	50,0	50,0
Vietnam	60,5	61,0	↑	80,0	80,0
Japan	53,8	55,0	↑	55,0	55,0
Saudi Arabia	55,0	55,0	↔	55,0	55,0
Egypt	50,0	55,0	↑	46,0	46,0
Mexico	35,0	35,0	↔	42,0	42,0
Thailand	35,0	35,0	↔	50,0	50,0
Germany	32,0	32,0	↔	31,0	31,0
Pakistan	32,0	32,0	↔	44,0	44,0
Italy	22,0	23,0	↑	46,0	46,0
Other countries (rounded)	573	603	↑	369	368
World total (rounded)	4.180	4.100	↓	3.600	3.600

2011 yılı rakamlarına göre Türkiye, Avrupa ülkeleri içerisinde birinci, Dünya genelinde ilk beşte sırada yer almaktadır. 2011 yılı sonunda yaklaşık 90 milyon m<sup>3</sup> hazır beton ve 68 Mton değerinde çimento üretimi gerçekleşmiştir. Belirtilen bu rakamlar çevresel, sosyal ve ekonomik problemlere de sebep olabilmektedir. Döner fırınlarda çimento üretimi sonrasında ortaya çıkan CO<sub>2</sub> gazının salınımını düşürmek ve doğal kaynaklarından daha efektif yararlanmak adına alternatif yakıtların ve hammaddelerin kullanımı gün geçtikçe artış göstermektedir.

Özellikle de atık ısının fayda kazanımıyla boşa harcanan ısı enerjisi elektrik enerjisine çevrilmekte ve atık özelliği bulunan yaşam döngüsü sona ermiş lastikler, atık yağlar, plastikler ve benzer atık materyaller enerji kaynağı (yakıt) olarak kullanılmaktadır. İlave olarak, belediyeler ile ortak çalışma ile su arıtım tesisleri çamurları fosil yakıtlara alternatif olarak değerlendirilmektedir (Engin Y. ve ark. 2012).

**Çizelge 2. 10.** ATY üretiminde atıklar için sınırlamalar (Anonim, 2007)

<b>Kriter / Parametre</b>	<b>Max. Sınır Şartları</b>
Halojen içerikli Organik bileşenler	Kilo başına maksimum % 1
Yetersiz parçalanabilir Halojen içerikli organik bileşenler (PCB gibi).	Maksimum 50 mg / kg
Solvent (PAH veya VOC'ler)	< % 15
Parlama derecesi	> 55°C

**Çizelge 2. 11.** ATY üretimi içerisinde ağır metallerin bulunma sınırı yüzdesel oranları (Anonim, 2007)

<b>Element</b>	<b>Sembol</b>	<b>Max. [mg/kg]</b>
Kurşun	Pb	<600
Kadmiyum	Cd	<10
Krom	Cr	<400
Bakır	Cu	<500
Nikel	Ni	<300
Çinko	Zn	<4000

Çimento üretimi için yanma işleminin yapıldığı sinterleme bölümünde 1450 ila 1500 °C olan sıcaklık değeri, tüm tehlikeli atıkların imha olabileceği 1200°C min. değer 12 farklı organik atığın bozulmasına katkı sağladığı görülmüştür (Anonim, 2007).

Döner Fırınlarda atık yakmanın avantajları;

1. İmha olacak katma değersiz atıklar finansal açıdan değerlendirilir.
2. Fosil yakıt tüketiminin düşürülmesiyle karbondioksit salınımı düşer.
3. Kül oluşumu gözlenmez.
4. Atık malzemelerin yanabilen kısmı alternatif yakıt olarak değerlendirilir geri kalanı da klinker içerisinde hammadde şeklinde bulunur.
5. Atık malzemelerin yanmasıyla suya veya toprağa salınım olmaz.

Çimento üretiminde faydalanılan ATY'nin işleme, niteliklerine ve atmosfer salınımlarına tesiri sınır derecenin altında bulunması gereklidir. Başka bir parametre, yakıtların kalorifik değeridir (Ayhan 2012). Çizelge 2.12'de alternatif yakıtların kalorifik katkı değeri verilmiştir. Söz konusu değerler materyalin özellikleriyle ilişkili olarak farklılık gösterebilir. Bu sebeple değerler ortalama olarak varsayılmıştır.

**Çizelge 2. 12.** Alternatif yakıtların ısısal değerleri (Ayhan 2012).

<b>Alternatif Yakıt</b>	<b>Ortalama Kalorifik Değer (kcal/kg) (Petrokok ~ 7500)</b>
Ömrü Biten lastik	5500
Plastik (endüstriyel)	5000
Atık yağlar	9000
Solventler	7500
Parçalanmış kağıt	3400
Yağlı kontamine atıklar	3500
Bitki atıkları	4760
Atıktan türetilmiş yakıt (ATY)	2800
Aritma Çamurları	3000
Kontamine atıklar (ambalaj-giysi)	3000

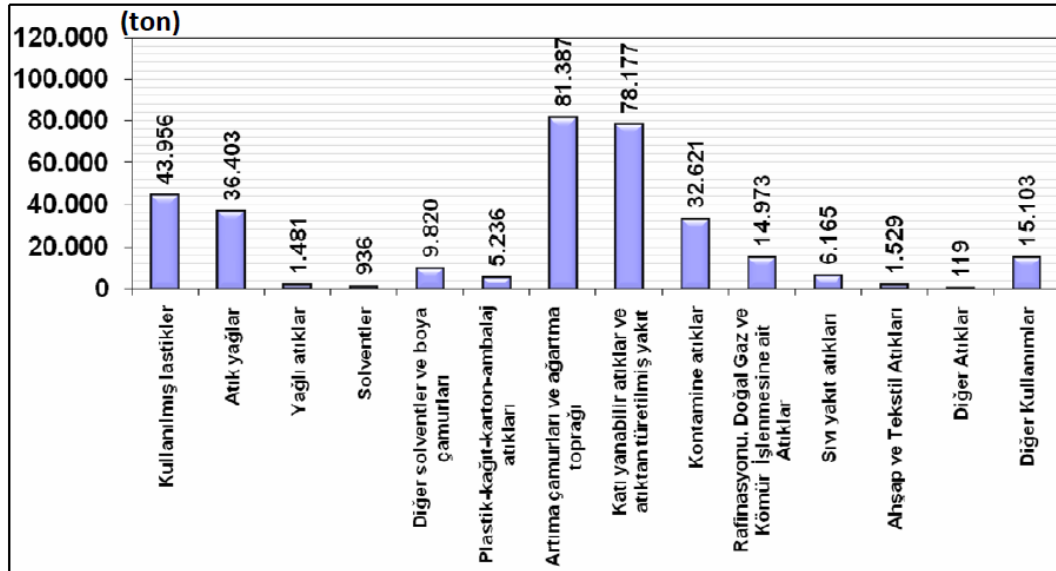
Alternatif yakıtların sahada kullanımının çimento üretiminde oluşturduğu bazı problemler de vardır. Özellikle yüksek oranda CI ve S bileşeni içeren yakıtlar tıkanmaya ve çimento fırınlarında arzu edilmeyen üretim aksamalarına yol açabilir. Bu sebeple çimento fabrikaları sürdürülebilir üretim amacıyla bu problemlerle yüzleşerek ve geliştirici / iyileştirici faaliyetleri sürdürmektedir. İlave olarak klorür oranı çimentoda sınırlı olduğundan özellikle PVC içeren atık malzemeler belirli oranlarda

kullanılabilmektedir. Genellikle fosil kaynaklı yakıtlar ve alternatif yakıtlar optimum şartlarda eş zamanlı olarak kullanılmaktadır (Ekincioglu Ö. Ve ark. 2012).

**Çizelge 2. 13.** ATY hazırlama tesislerinde hazırlanacak yakıtın özellikleri (Ayhan 2012)

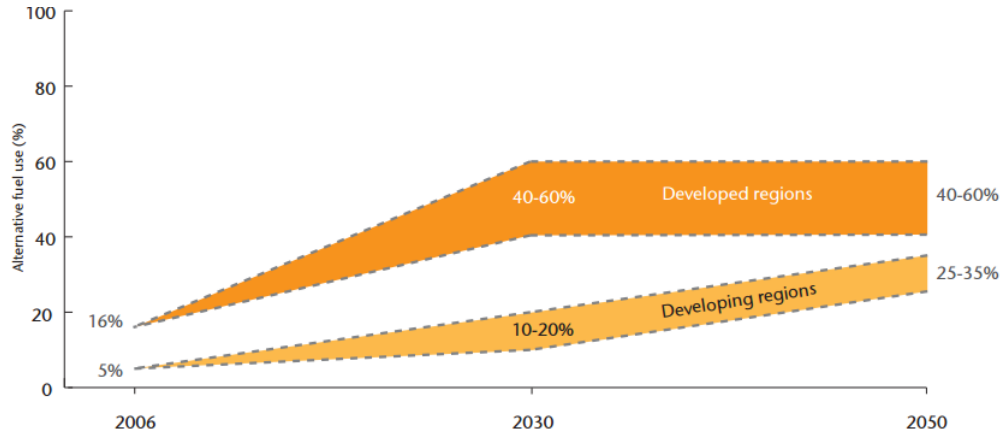
Parametre	Sınır Değer
Kalorifik değer, kcal/kg	> 2500
Tane boyutu, mm	< 50
Nem oranı, %	< 35
Klor İçeriği, %	< 1
Hg, µg/MJ	< 330
Ağır metal toplamı, mg/MJ	< 2500
PCB, ppm	< 5
Solvent içeriği, %	< 15

Şekil 2.9'da 2011 yılı itibarıyla çimento üretiminde yakıt amacıyla kullanılan atıkların ton değerleri verilmiştir.



**Şekil 2. 9.** 2011 yılında çimento endüstrisinde değerlendirilen alternatif yakıtlar (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı 2012)

İlerleyen dönemde alternatif yakıt kullanım oranının çimento üretimde artarak devam edeceği düşünülmektedir. Şekil 2.10'da gösterildiği üzere 2006 yılı içerisinde alternatif yakıt kullanım oranı gelişmiş ülkeler genelinde %16 seviyesindeyken, gelişen ülkeler genelinde %5 civarındadır. 2050 yılında bu oranın gelişmiş ülkelerde %40-60, gelişen ülkelerde %25-35 bandında yer alması öngörülmektedir.



**Şekil 2. 10.** Alternatif yakıtların gelecek dönemlerde hedeflenen kullanım yüzdesi (International energy agency 2009)

### 2.1.5. Ülkemizde ATY Potansiyeli

Atıkların doğaya tahribat vermeden imha edilmesi öncelikle çevre ve insan sağlığı olmak üzere ekonomiyle de yakından bağlantılıdır. Ülkemizde her yıl yaklaşık olarak 26 milyon ton evsel atık üretimi olmaktadır. Rakamı incelediğimizde; kişi başı ortalama atık miktarının 1 kg civarında olduğu hesaplanabilir. Artan nüfus ve ekonomik gelişmişlik seviyesiyle bu rakımın artış göstermesi ve öngörüye göre 20 sene içerisinde iki kat artması beklenmektedir. Görülüyor ki 2030 yılına gelindiğinde toplamda evsel atıkların miktarı 50 milyon ton değerinin üzerine çıkacaktır (Saraç M. ve ark.2013).

Türkiye'de üretim yapan çimento fabrikalarının klinker kapasiteleri 2010 yılı sonu baz alındığında 63,5 milyon tonun üzerindedir. Türkiye; Dünyadaki çimento üreticileri arasında 4. sırada yer almaktadır. Üretim değerlerinin bu yüksek rakamlara ulaşmış olması, ATY'den yararlanmanın önemi bir kez daha gözler önüne sermektedir (Anonim 2013).

Çimento üretiminde materyallerinin kullanımıyla, tüketilen enerji miktarı ton klinker başına 900 kcal'den 750–720 kcal'e inmektedir fakat; 27 farklı katkı içeren çimento standardı olmasına rağmen, katkılı çimentoların ülkemizdeki üretimi az miktardadır. Üretimdeki artış oranı, katkılı çimento fiyat değerlerini aşağıya çekmek marifetiyle talebi fazlalaştırarak gerçekleştirilebilir (Güven,T. 2008).

**Çizelge 2. 14.** Ülkemizde evsel kaynaklı KKA içeriği % (Tolay, 2011)

<b>Atık Bileşenleri</b>	<b>Şehir</b>	<b>Kasaba</b>	<b>Kırsal</b>
Kağıt Atıkları	8	6	4
Karton Atıkları	5	4	3
Plastik Atıkları	10	8	5
Metal Atıkları	4	3	2
Yiyecek ve bahçe atıkları	50	55	60
Cam Atıkları	4	3	2
Tehlikeli atıklar	0.5	0.5	0.5
Yanıcı olmayan kalıntılar	13	16	20
Yanıcı kalıntıları	5,5	4,5	3,5

Çimento fabrikaları ATY tesisine kabul edilen atıklar;

#### **Sıvı Türden**

- Atık yağlar
- Sintine atıkları
- Boya atıkları
- Solvent atıkları

#### **Katı Türden**

- Taşıt lastikleri,
- Yağlı bez atıkları,
- Yağ bulaşmış giysiler,
- Eldiven ve çeşitli tekstil ürünleri,
- Hadde sabun malzemesi,
- Ağartma toprağı,
- Yerel yönetim evsel atıkları,

- Tehlikeli olmayan inert atıklar

### **Çamur Türünden**

- Biyolojik arıtma çamuru,
- Kimyasal arıtma çamuru,
- Evsel arıtma çamuru,
- Tank dibi çamuru
- Boya artık çamuru

### **Sanayi atıkları,**

- Otomotiv endüstrisi tekstil atıkları
- Otomotiv endüstrisi plastik atıkları
- Çeşitli tekstil atıkları
- Ambalaj atıkları
- Kompozit atıklar
- Kağıt ve karton
- Cam elyaf üretim atıkları
- Ahşap üretim atıkları
- Etiket üretim atıkları (Anonim 2013)

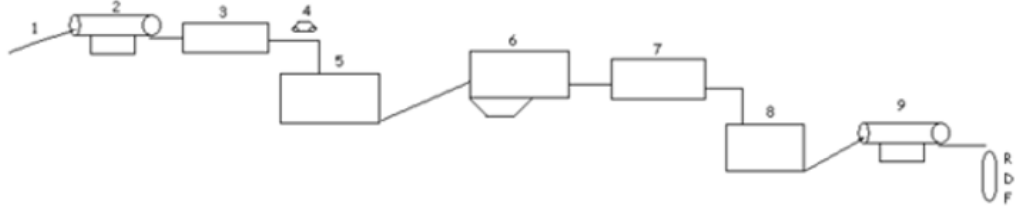
### **2.1.6. ATY Tesisi Kurulum Maliyeti**

ATY tesisinde kullanılacak ekipmanların seçiminde, atığı işleyebilecek özellikte ekipman teminine dikkat edilmelidir. Seçilecek ekipmanın kapasitesi, teknik özellikleri, marka ve modeli ekipman fiyatlarının değişken olmasına yol açar. Elde edilmek istenilen ATY'nin kalitesine ve miktarına göre de tesiste kullanılan ekipmanlar çeşitlendirilebilir veya sayıca/kapasitece artırılabilir (Nithikul, J., 2007).



### 2.1.6.1 ATY Üretim Tesisi Ekipmanları ve Yatırım Maliyetleri

ATY üretim tesisi genel iş akışı şematığı Şekil 2.11’de verilmiştir.



- 1- Atık yükleme bantı
- 2- Poşet parçalayıcı döner elek
- 3- Ayıklama separatörü
- 4- Magnetik Separatör
- 5- Kaba kırıcı (ilk parçalayıcı)
- 6- Balistik separatör veya hava separatörü
- 7- Ayıklama ünitesi
- 8- İnce kırıcı (son parçalayıcı)
- 9- Kurutucu

Şekil 2. 11. ATY üretim tesisinin iş akışı şematığı. (Nithikul, J., 2007).

Çizelge 2.15’de ATY üretiminde kullanılan ekipmanların yaklaşık yatırım masrafları verilmiştir. Bu maliyetlere elektrik ve pano montaj, mekanik montaj, transport ve devreye alma maliyetleri ve tesisin kurulacağı saha masrafları yansıtılmamıştır.

Çizelge 2. 15. ATY tesisinde kullanılan ekipmanların maliyetleri (Nithikul, J., 2007).

Kullanılan Ekipmanlar	Yaklaşık Fiyatları
Poşet parçalayıcı döner elek	250.000€ - 450.000€
Kaba kırıcı (ön parçalayıcı)	240.000€ - 395.000€
Magnetik separatör	15.000€ - 45.000€
Balistik separatör	195.000€ - 300.000€
Son parçalayıcı	225.000€ - 475.000€
Kurutucu	500.000€ - 1.000.000€
Konveyörler	750€/m - 2.000€/m
Vibration cüte	75.000€ - 120.000€
Hava sınıflandırıcı	60.000€ - 110.000€
Manyetik separatör	20.000€ - 50.000€
<b>TOPLAM</b>	<b>1.75 M € - 3 M €</b>

## **2.2. ATY Tesislerinde Kullanılan Kırıcılar**

ATY tesislerinde yapılan dönüşümün ilk ve en önemli aşaması parçalama / kırma işlemleri olarak belirtilebilir. Bu safhada kullanılan parçalayıcı sistemleri ve ekipmanları aşağıdaki bölümlerde detaylı bir şekilde tariflenmiştir.

### **2.2.1. Parçalayıcı (Shredder) Sistemleri**

Kırma işlemi, boyut azaltma işleminin ilk safhasıdır. Tesise gelen atıkların ihtiva ettiği çeşitli bileşenlerin birbirinden serbest duruma almak, işleme uygun ebat veya yüzey alanı ya da kullanım sebebine yönelik ebat sağlamak hedefi ile yapılmaktadır.

Kırma işleminde görev alan makineler, kırıcı şeklinde isimlendirilir. Parçalara baskı, darbe ve kesme kuvveti etkisiyle daha küçük parça ebatlarına getiren ekipmanlardır.

Kırma makineleri özellikle ürünün niteliklerine, makine yatırım masrafları ve enerji sarfiyatı vb. tasarım özellikleri yönünden ilerleme göstermektedir. Kırma prosesi 2000-5 mm arasındaki tane ebatlarına uygulanmaktadır. 200-10 cm boyutlarında yapılan kırma işlemine iri boyutlu kırma; 100-5 mm arasındakine ise ince boyutlu kırma denir (Arman Y. 2014).

Kırıcılar, sıkıştırılmış ya da preslenmiş materyalleri düşük hızda ve yüksek torkta daha da küçük bölünlere parçalayarak, hafif ve küçük ebatlarda materyallere dönüşmesine destek sağlarlar. Bu sayede, geri dönüşüm süreci hattının daha başlangıcında, daha efektif küçük bölünlere parçalanmasına, atık materyallerin daha verimli dizilmesi ve ayrıştırılmasına imkan oluştururlar.

Kırıcılar yardımıyla geri dönüşüm sisteminde başka makine ve teçhizatların kapasite değerleri yükseltilebilir ve bu sayede besleme hatlarının kısaltılmasında, yakıt tüketimi ve salınımının düşürülmesinde fayda yaratılır.

Bir kırıcıya gönderilen metal balya, farklı türde atık materyali (çöp, plastik malzeme, taşıt lastiği vb.) ya da taşıtı parçalayarak öğütme amacıyla materyalin türüne bağlı olarak bir ya da iki adet döner shaft sisteminde olabilir.

Her bir şaftın üzerinde kırma prosesini daha efektif hale getirecek kırıcı bıçaklar bulunmaktadır. Kırılan, parçalanmış materyaller akabinde ayıklama ve ayrıştırma operasyonları için konveyör bantlar yardımıyla sonraki safhalara aktarılır.

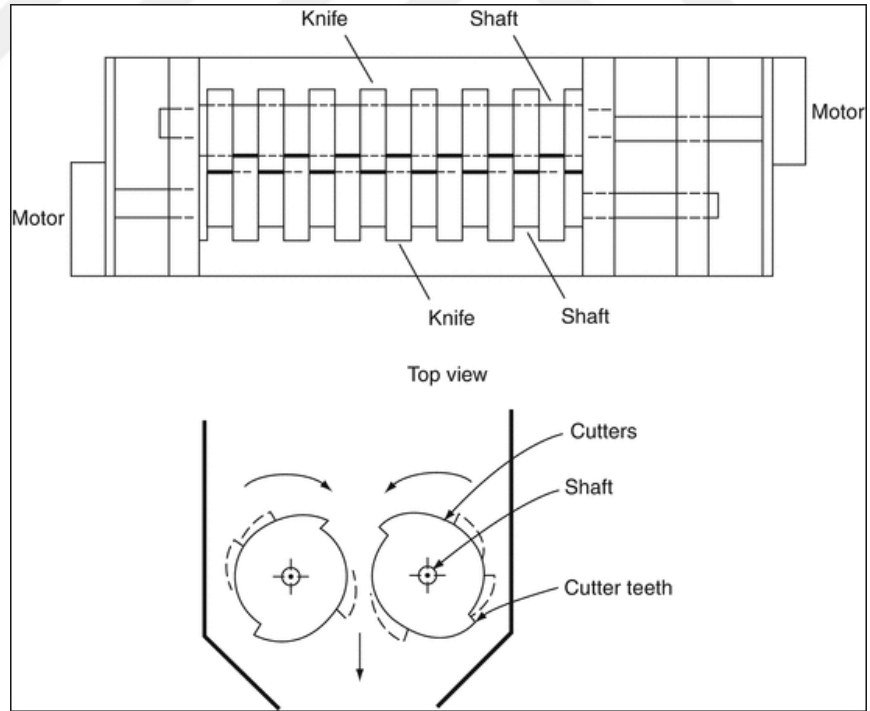
Kırıcıların dönüşüm tesislerine sağladığı faydalar aşağıda özetle;

- ✚ Atık malzemelerin ayıklanma ve dönüşüm süreçlerinden önce daha küçük boyutlara bölünebilmesi.
- ✚ Hurda materyallerin depolama hacimlerinin düşürülmesi
- ✚ Tesiste yer alan başka teçhizatların işletme verimliliğinin yükseltilmesi.
- ✚ Daha az enerji sarfiyatı (TMMOB 2011).

Şekil 2.12’de bir ATY tesisinde kullanılan I. kırıcıya ait görsel verilmiştir. Şekil 2.13’te ise bu kırıcı sistemlerine ait teknik çalışma prensibinin gösterildiği model yer almaktadır. Genellikle çift tambur sistemiyle çalışan bu kırıcılar toplanan atıkların ilk olarak kaba kırım işlemini gerçekleştirirler. Büyük ebatla ve çok çeşitli malzeme beslenmesinden ötürü şok kuvvetlerine ve aşırı yüklenmelere maruz kalabilirler. Genellikle I. kırıcıya ait kapasite değeri tesisin tüm kapasitesinin belirlenmesinde ana belirleyici faktör olarak görülmektedir. Burada atıkların parçalanması ve birim zamanda oluşturulacak yarı ham peletlerin miktarı genel olarak kapasitenin ana belirleyici faktörüdür.



Şekil 2. 12. Bir ATY üretim tesisinde kullanılan I.kırıcı genel görünümü



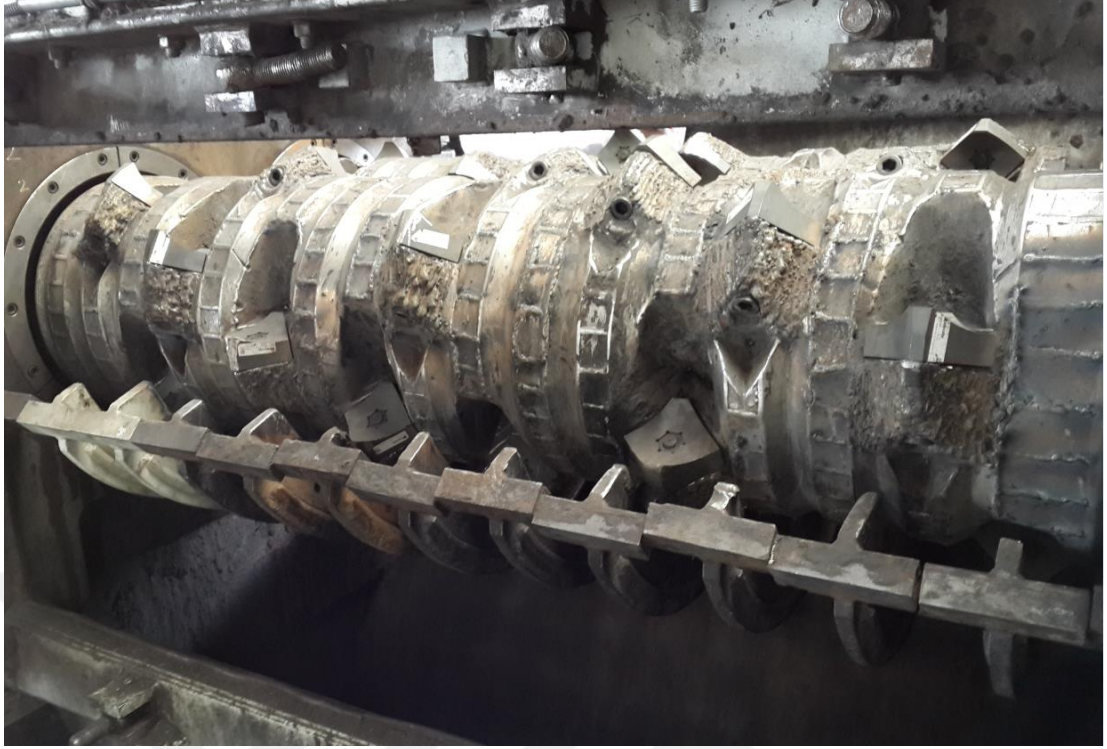
Şekil 2. 13. Kırıcı çalışma prensibi (Anonymous 2001)

### 2.2.2. Parçalayıcı / Kırıcı (Shredder) Çeşitleri

Parçalayıcılar ya da kırıcılar dönüşüm sahalarında parçalama/ kırma ve ayrıştırmanın efektifliğini yükseltmek amacıyla iki farklı türde isimlendirilmektedir. Düşük devir değerlerinde çalışan ikili şafta ve yüksek parçalama-kırma etkisine sahip ön kırıcı / parçalayıcılar (pre shredders); daha yüksek devir değerinde, düşük parçalama etkisi ve kuvvetiyle hafif ve küçük materyalleri kırarak parçalayan ikincil kırıcılar/parçalayıcılar “seconder shredders” (Anonymous 2001).

#### 2.2.2.1. Ön Parçalayıcılar (Pre – Shredders)

- ✚ Ağır ve yüksek hacimli çalışmalarda etkin olarak kullanılmaktadırlar
- ✚ Balyalanmış ya da sıkıştırılmış metal atıkların parçalanmasında kullanılırlar.
- ✚ İki adet bağımsız çalışan döner şaft sistemine sahiptirler.
- ✚ Proses esnasında çok yüksek şok kuvvetler oluşmaktadır.
- ✚ Şok yükler sebebiyle sıklıkla hızlarında düşme sorunları olabilmektedir.
- ✚ Sıklıkla kalkış ve duruş yapabilirler.
- ✚ Şaftların maksimum devir hızı 20 rpm (d/dak) şeklindedir.
- ✚ Tahrik sistemleri ve mekanik aksamları yönünden zor ekipmanlardır (Anonymous 2001)



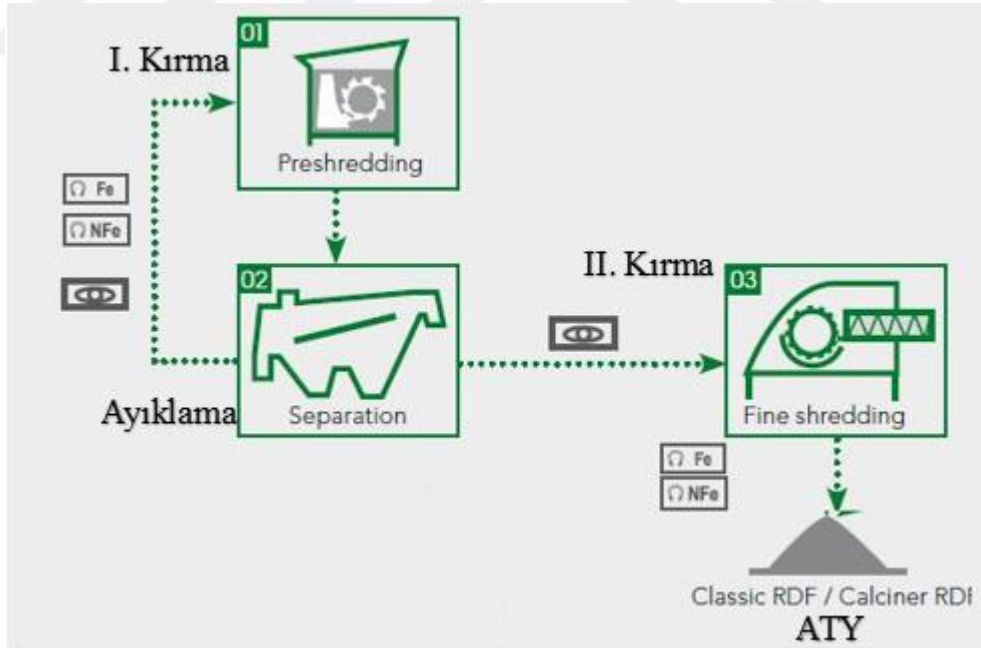
**Şekil 2. 14.** Bir ATY üretim tesisinde kullanılan birincil kırıcı tamburu genel görünümü

#### **2.2.2.2. İkincil Parçalayıcılar (Seconder – Shredders)**

- ✚ Birincil kırıcıdan gelen daha hafif hacimli atıkların parçalanmasında kullanılırlar
- ✚ Çalışma esnasında şok kuvvetler meydana gelmektedir.
- ✚ Şok yükler nedeni ile sıklıkla yük altında hızdan düşme problemlerine maruz kalırlar.
- ✚ Çok sıklıkla duruş, kalkış ve tersine dönüş hareketi yaparlar.
- ✚ Şaftların max. dönüş hızı 10 ile 100 rpm (d/dak)' dır.
- ✚ Çalışma ortamı ve şartları açısından zorlu uygulamalardır (Anonymous 2001).



Şekil 2. 15. Bir ATY üretim tesisinde kullanılan ikincil kırıcı tamburu genel görünümü



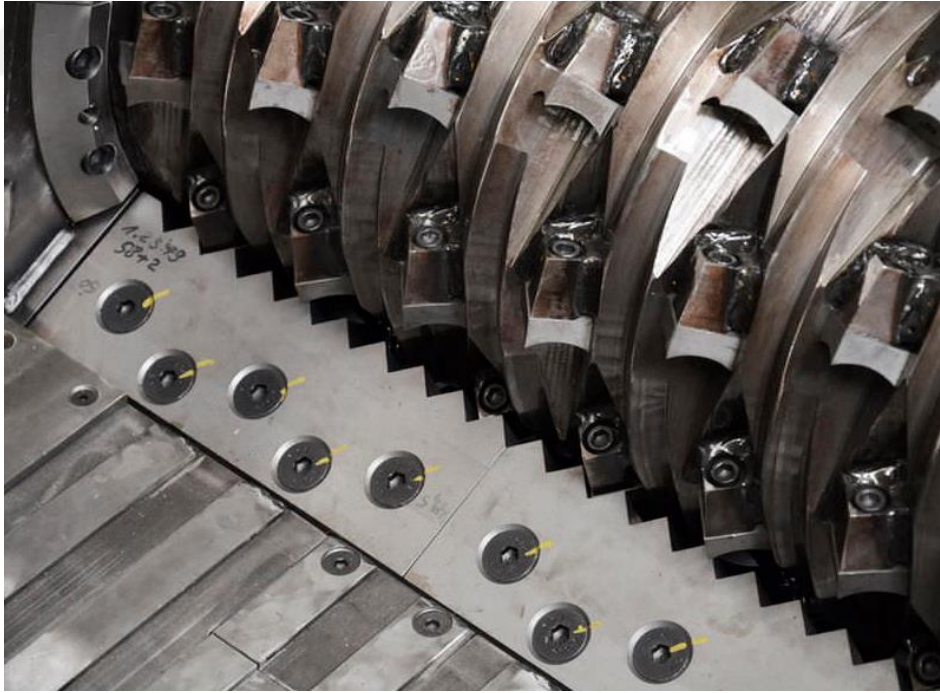
Şekil 2. 16. ATY tesislerinde genel kırıcı işletme akış diyagramı (Komptech 2011)

### 2.2.3. Parçalayıcı (Shredder) Ekipmanları

Temelde aynı amaca hizmet eden I. ve II. seviye kırıcılar, yapılarında buldukları ekipmanlar ile de benzerlik gösterirler. Besleyici elektrik motorları, kesici bıçakların dizildiği tek ya da ikiz rotorlar, rotorlar arasındaki testere tip bıçaklar bu benzerlik içerisinde sayılabilir ekipmanlardır (Anonymous 2001).

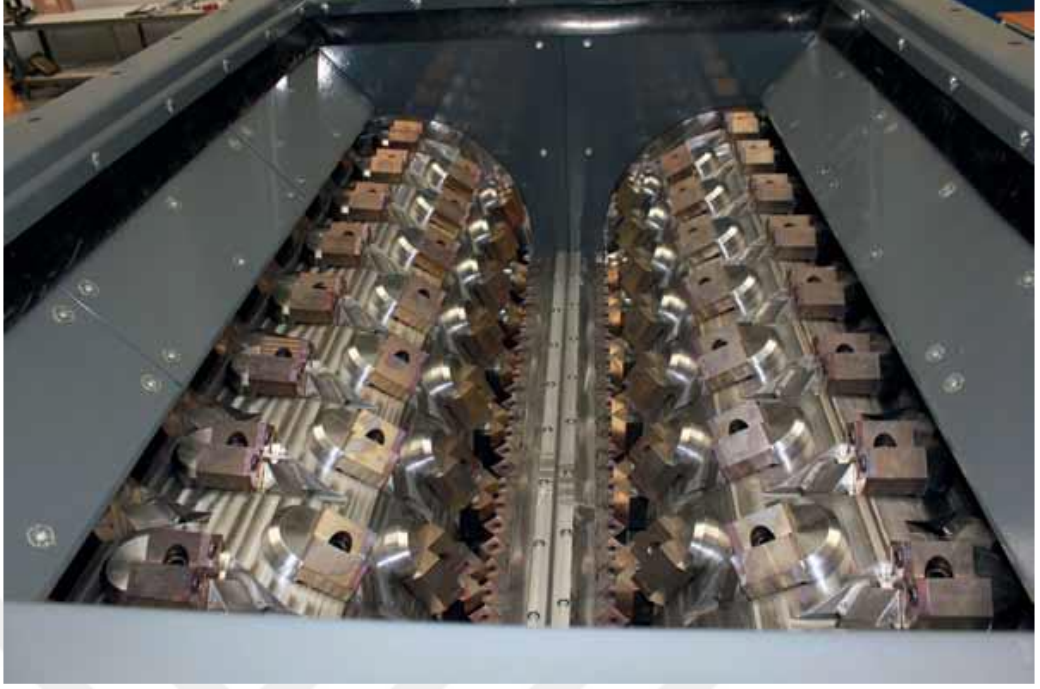
#### 2.2.3.1. Rotor (Shaft)

Tek ya da çift sıra düzende hareket rotorları üzerinde, üzerinde değişken sayıda, boyutta, geometride ve dizilişte yerleştirilmiş kesici bıçaklar bulunur. Elektrik güç kaynağından beslenen rotorlar atık ebadı/yoğunluğu gibi işletim şartlarına göre farklı devirlerde çalışma ayarına sahiptir. Kesici bıçakların diziliş düzeni, sayısı ve geometrisi ticari firmaların ürünlerinde farklılıklar göstermektedir. Maden cevheri ve büyük endüstriyel atıkların öğütülmesi ve parçalanmasında çok rotorlu kırıcılar da yaygın olarak kullanılmaktadır (Anonymous 2001).



Şekil 2. 17. Tek rotorlu kırıcı örneği (Anonim 2016b)





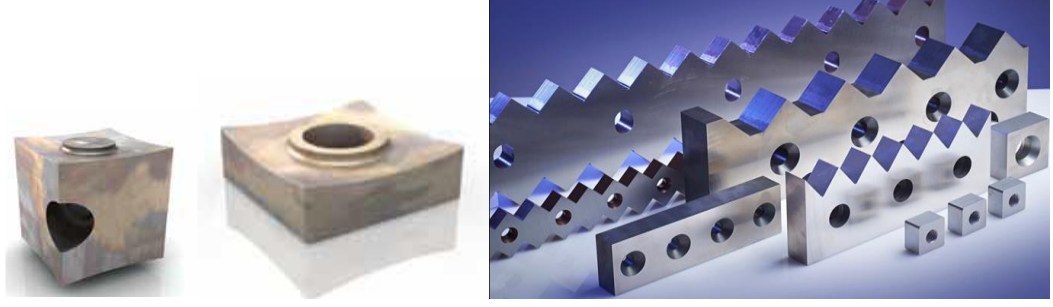
**Şekil 2. 18.** Çift rotorlu kırıcı örneği (Anonim 2016c)

#### **2.2.3.2. Kesici Bıçaklar (Knives)**

Kesici bıçaklar, farklı uygulamaların talepleri doğrultusunda çok farklı geometrilere sahip olabilir. Rotor üzerindeki karşıt bıçağın konumu proses sonrasında istenen kırılmış parçaların büyüklüğüne göre seçilir ve rotor üzerinde konumlandırılır. Bıçaklar, rotor üzerindeki boşluklarda holder denilen yataklara bağlantı elemanlarıyla basit olarak yerleştirilerek kullanılır (Anonymous 2001).



**Şekil 2. 19.** Kırıcı bıçak rotor montajı örneği



**Şekil 2. 20.** Kırıcı bıçak örnekleri

### 2.2.3.3 Kafes (Screen)

Kesici bıçakların seri kesme işlemiyle boyutları küçültülen kaba atıklar metal kafes denilen metal elekten geçerek bir sonraki aşamaya aktarılır. Burada amaç bir sonraki aşamaya gidecek olan ön kırılmış malzemenin istenilen boyutlara indirgenmiş olarak prosesi tamamlamasının sağlanmasıdır. Genellikle kafesler 3-6mm plakalardan yapılır ve I. ve II. kırıcıya göre delik çapları farklılıklar gösterir (Anonymous 2001).



**Şekil 2. 21.** Farklı ebat ve geometride kafesler



**Şekil 2. 22.** Kafesin kırıcı üzerindeki yerleşimi

#### 2.2.4. Kesici (Parçalayıcı) Bıçakların Aşınma Dayanımının Arttırılması

Yüzey mühendisliği alanı, aşınma sorunlarına çözüm getirmek amacıyla son dönemde sanayi alanında geniş çapta uygulama fırsatı bulmuştur. Bu tip sorunlar imalat esnasında yüzey kaplama gibi tekniklerin kullanılmasıyla etkin bir oranda ortadan kaldırılabilir. Yüzey mühendisliği alanı 21.yy'ın ilk yıllarında sert kaynak prosesi, alevle sertleştirme prosesi, gaz karbürleme ve nitrüleme prosesiyle fazlaca gelişim göstermiş ve PVD (fiziksel buhar çöktürme metodu), CVD (kimyasal buhar çöktürme metodu) ve iyon implantasyon tekniği ile önemli derece gelişim göstermiştir. Yüzey kaplama metotları, korozyon direnç değerini arttırmak, elektriksel ve mekanik işlev özelliklerini iyileştirmek ya da dekoratif amacıyla nükleer, optik, uzay, otomotiv ve mühendislik sorunlarında geniş bir oranda uygulanmaktadır (Bhushan and Gupta, 1991).

Sert ve ince ayrıca aşınma ve korozyon etkisine dayanımlı kaplama türleri kesici takımlarında etkin bir aplikasyon sahası bulmuştur. Düşük proses sıcaklık değerlerinde tatbik edilen PVD metodunun bulunması, taban materyalin mukavemet değeri değiştirilmeden takım çeliklerinin üzerine kaplama fırsatı vermiştir. Olağanüstü fiziksel, mekanik ve metalurji niteliklerden ötürü uygulanan TiN vb.ince film yapıda kaplama türleri, takım dayanım ömrünün ve kesme hız değerinin arttırılması yönünden verimlidir. Diş açma takımları, matkap uçları, kılavuz vb. kesici takımların aşınma ömrünü arttırmak amacıyla PVD tekniğiyle seramik kaplama yapılabilir (Kramer, 1983). Son dönemde, kaplama (PVD, CVD, iyon) prosesiyle termokimyasal proseslerin bir etkileşimi olan ve dubleks yüzey kaplama şeklinde isimlendirilen yepyeni bir fikir oluşmuştur. Dubleks yüzey kaplama prosesi tatbik edilen materyallerde hedef, taban malzemesinin yük taşıma özelliğini (kapasitesini) yükselterek, materyalin korozyon ve aşınma direnci kabiliyetini arttırmaktadır (Yasumaru ve ark., 1993, Rie and Broszeit, 1995). Böylelikle aşırı yük uygulamasında çalışma zorunluluğunda kalmak durumunda olan taban materyalinde, plastik deformasyon meydana gelmeyecek aynı zamanda kaplamanın bozunması önlenmiş olacaktır ancak; bu proses tatbik edilirken termo kimyasal işlem ayrı, kaplama prosesi ayrı ve dubleks kaplama sonucu meydana gelen ara yüzey başka bir kriter olarak ortaya çıkacaktır. Uygulanan prosesin karmaşıklığının fark edilmesiyle birlikte proses sıcaklığı, gaz karışım oranı, yüzey pürüzlülük değeri, taban malzemesinin türü, beyaz

tabaka oluşması vb. çeşitli parametreler ışığında en uygun sonuçların bulunması hedeflenmiştir.

### **2.3. Plazma Nitrürleme İşlemi**

Plazma nitrürleme PN (glow discharge) teknolojisi İsviçreli mühendis Bernard Berghaus öncülüğünde 1932 senesinde Almanya’da bulunmuş, fakat endüstriyel tatbiki Almanya ve İsviçre’de bu alandaki faaliyetlerin olgunlaşmasıyla 1967 senesinde gerçekleşmiştir. Tekniğin önemi anlaşılacak, farklı uygulamalar için, geliştirme faaliyetlerine girilmiş ve Japonya’da 1973 senesinde başarı sağlanmıştır (Fancey ve ark. 1995). Düşük alaşımli çelikler, paslanmaz çelikler, takım çelikleri, demir vb. metal ve alaşımları plazma nitrürleme metodu ile sertleştirilebilir. Söz konusu malzemelerin iyon nitrülenmesinde çoğunlukla azot ve hidrojen gazlarının karışımı uygulanmaktadır. Fakat söz konusu karışıma alternatif olabilecek gaz atmosferleri olarak azot + argon azot + neon karışımlarının çeşitli oranlardaki karışımlarının prosese tesirleri üzerine uygulamalar tatbik edilmiştir (Hudis 1973).

#### **2.3.1. Plazma Nitrürleme Metodu**

Plazma nitrürleme (PN) metodu otomotiv sanayinde, metalurji alanında ayrıca takım imalatı sektöründe yer alan, malzemelerin yüzeylerinin sertlik değerleri arttırarak, aşınmaya karşı dayanımlarını ve kullanım dayanımlarını yükseltmede oldukça efektif olan bir yüzey sertleştirme metodudur (Özdemir, Erten 2005).

Yüksek teknoloji bir yüzey sertleştirme metodu olarak bilinen plazma nitrürasyonu, çelik, dökme demir, titanyum ve sinterlenmiş malzemelerin metalurjik, mekanik ve yüzey özelliklerinin iyileştirilmesinde uygulanmaktadır. Vakum ortamında uygulanan bu proses, farklı diğer nitrürasyon metodları ve ısıl işlem metodlarına nazaran daha çevreci olması ve hem metalurjik hem de yüzey kalitesi yönünden en iyi sonucu göstermektedir. İşlem sıcaklığı düşük olduğundan, iş parçalarında boyutsal çarpılmaların düşürülmesi ve çekirdek niteliklerinin olumsuz yönde etkilenmemesi sağlanır. Yüksek aşınma direnci, ve yapışma direnci ile birlikte yüksek bir yüzey sertliği elde edilir. Fakat özellikle endüstride gelişmiş ülkelerde son dönemde plazma nitrürleme (glow discharge) tekniği geniş çapta

uygulanmaya başlanmıştır (Edenhofer 1974). PN ile yüzey sertleştirme prosesi sayesinde çeliğe kazandırılan özellikler aşağıda özetle;

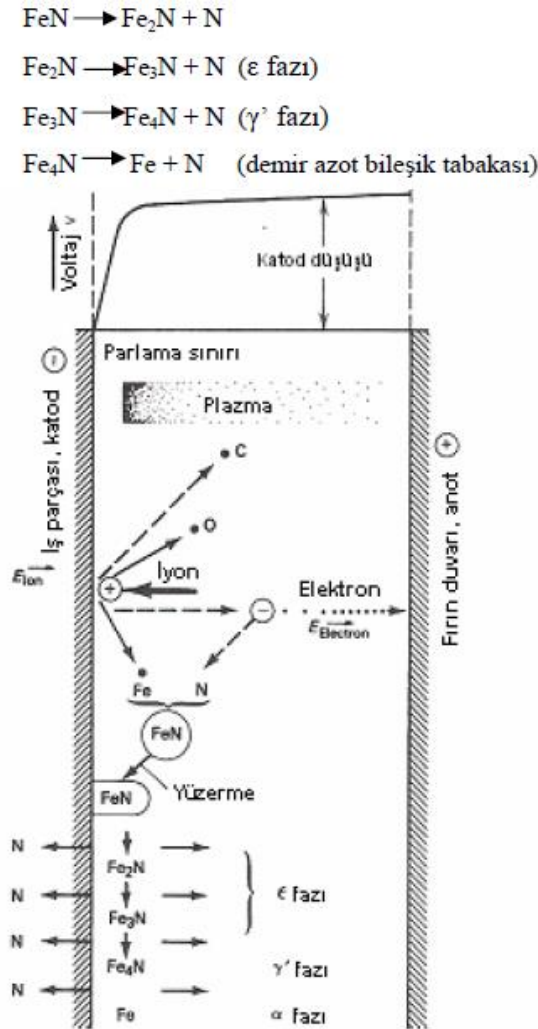
- ✚ Yüzey sertliğinin artırılması ve aşınma mukavemetinin artırılması,
- ✚ Temperlenmeye karşı yüksek oranda direnç ve sıcaklık sertliği,
- ✚ Düşük yorulma çentik hassasiyeti ve yüksek yorulma mukavemet değeri
- ✚ Paslanmaz olmayan çeliklerin korozyon direncinin artırılması
- ✚ Yüksek boyutsal kararlılık(Thelning 1994).

### 2.3.2. Plazmanın Nitrürlemenin Mekanizması

Plazma nitrürlemede kontrol parametreleri zaman, sıcaklık, basınç, akım, voltaj, gaz akışı ve gaz karışım oranıdır. İşlem sızdırmaz bir gaz ortamda bulunan iki elektrod arasında, uygulanan elektriksel güç sonucu meydana gelen akıma dayanır. Sızdırmaz ortam içindeki gaz elektriksel iletken olarak davranarak akımı bir taraftan diğerine taşır. Gaz atomları uyarılır ve düzenli hedefi olmayan çok kısa bir yol üzerinde hareketlenerek birbirleriyle çarpışır. Bu çarpışmayla enerji açığa çıkarak elektrodlar arasında parlama meydana gelir. Parlamanın rengi kullanılan gaza bağlıdır. Normal atmosfer basıncı ve sıcaklığında ortaya çıkan enerji ısı sağlayabilmek için çok düşüktür (Pye 2003).

Basınç 0,1Pa seviyelerine indikçe moleküller arası çarpışma mesafesi arttığından, çarpışma sırasında açığa çıkan enerji yüksek olsa da, yolun uzunluğundan dolayı çarpışma frekansı azaldığından ortaya çıkan enerji ısı kaynağı olarak kullanılamaz. 50-500 Pa arasındaki basınçlarda malzeme ve parça geometrisine bağlı olarak basınç ayarlanarak parça yüzeyinde oluşacak parlama sağlanır. Parlama olmadığı sürece nitrürleme işlemi de gerçekleşmez. Basıncın çok yüksek olması kesintili parlamaya, çok düşük olması ise bulanık parlamaya sebep olarak etkin bir nitrürleme elde edilmesini engeller. Doğru basınç koşullarında voltaj yüksek olduğunda parlamalı deşarj (glow discharge) şimşek çakması şeklinde (ark deşarjı) olacaktır, voltaj alçak olduğunda da parlama oluşmayacaktır. İşlem sırasında hidrojen ve azot gazları amonyak olarak değil de karışım halinde olduklarından istenilen oranlarda kullanılabilirler ve böylece beyaz tabaka oluşumu kontrol edilebilir (Pye 2003).

Plazma nitrüleme sırasında parça yüzeyinde farklı reaksiyonlar oluşur. Çelik bir parçanın plazma nitrülenmesi sırasında oluşan reaksiyonlar dörde ayrılır. Birinci reaksiyonda enerji verilmiş elektronlar vasıtasıyla iyonize ve nötr azot atomları üretilir. İkinci reaksiyonda azot iyonlarının bombardımanının etkisiyle parça yüzeyindeki demir ve demir dışı ihtivalar püskürtülür. Üçüncü reaksiyonda püskürtülen demir atomlarının çarpışma etkisiyle yüzeyde demir nitürler (FeN) oluşur. Bu reaksiyonda yüzey atomik olarak temizlenir. Dördüncü reaksiyonda sürekli plazma bombardımanı sonucu kararsızlığı artan yüzeydeki FeN bozularak  $\epsilon$  fazını,  $\gamma'$  fazını ve demir azot bileşik tabakasını oluşturur. Bu mekanizma Şekil 2.23'de görülebilir (Pye 2003).

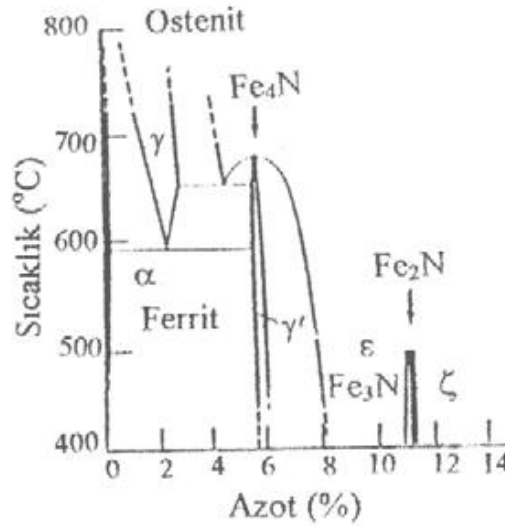


Şekil 2. 23. Plazma nitrüleme mekanizması (Pye 2003)

Plazma oluşturmada kesintisiz doğru akım veya darbeli doğru akım olmak üzere iki yöntem kullanılabilir. Kesintisiz doğru akım yönteminde iş parçası yüzey alanına bağlı olarak belli bir doğru akım uygulanır. Voltaj gereksinimi basınca göre değişir. Bu sistemde işlem ısısı iyonik bombardımandan ortaya çıkan kinetik enerjiden elde edildiğinden, fırının ısıtılması gerekmez. Darbeli doğru akım yönteminde parça geometrisine bağlı olarak uygulanan akım kesiklidir. Güç kaynağından uygulanan akımın en yüksek olduğu tepe noktası sabit iken, uygulama süresi değiştirilebilir (Pye 2003).

### 2.3.2.1. Plazmanın Nitrüleme Yöntemiyle Oluşan Faz Yapıları

PN nitrüleme tekniğiyle, yüzey üzerinde iki farklı tabaka meydana gelmektedir. Dış taraftaki tabaka, beyaz tabaka (compound layer), iç taraftaki tabakaysa difüzyon tabakası olarak adlandırılır (diffusion zone). Fe-N denge diyagramına göre, % 5.7 - 6.1N arasında YMK kafes formunda  $Fe_4N$  fazı; % 11-11.35N arasında hegzagonal kafes formunda  $Fe_{2.3}N$  fazı meydana gelir (Spalvins 1993). Demir azot (Fe-N) denge diyagramı Şekil 2.24'te gösterilmektedir (Stahlschlüssel 1983).



Şekil 2. 24. Fe-N (demir-azot) denge diyagramı (Stahlschlüssel 1983)

Plazma nitrüleme prosesinin ana reaksiyon sistematığı, saçılan demirin azot atomlarıyla birlikte reaksiyona uğraması böylece kararsız bir yapıda FeN meydana getirmesidir (Spalvins 1989). Bu mekanizma dört safhada gerçekleşmektedir (Kwon ve ark. 1986).

- 1.safha :  $e \Rightarrow N = N^+ + 2e$
- 2.safha :  $N^+ \Rightarrow \text{Katot} \Rightarrow \text{Saçılan Fe}$
- 3.safha :  $\text{Saçılan Fe} + N \Rightarrow \text{FeN}$
- 4.safha : Katot yüzeyinde FeN oluşumu

Oluşan FeN kararsız yapıdadır ve  $\text{Fe}_2\text{N}$ ,  $\text{Fe}_3\text{N}$  ve  $\text{Fe}_4\text{N}$  şeklinde oluşum gösterir. Ayrıca, oluşan  $\text{Fe}_4\text{N}$  metalde yer alan  $\text{Fe}_3\text{C}$  ile  $\text{Fe}_3\text{CFe}_4\text{N}$  formuna, sonrasında seri bir şekilde reaksiyonlarla beyaz tabaka,  $\text{Fe}_3\text{CFe}_4\text{N} \Rightarrow \text{Fe}_3\text{CFe}_3\text{N} \Rightarrow \text{Fe}_{2-3}\text{N}$  halini alabilir “% 0.35C’li düşük alaşımlı çeliğe 500°C sıcaklık ve 5 Torr basınç değerinde 3 saat boyunca plazma nitrüleme uygulanmıştır” (Cho ve Lee 1980).

Çoğunlukla % 5’den daha düşük azot ve hidrojen karışımında beyaz tabaka oluşumu gözlenmez. % 15-30 azot ve hidrojen karışımında  $\gamma'$  fazı ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ), yaklaşık % 60-70 azot, % 1-3 metan ve hidrojen karışımında ise çoğunlukla  $\epsilon$  fazı ( $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ) oluşumu gözlenir (Kovacs ve Russell, 1986).

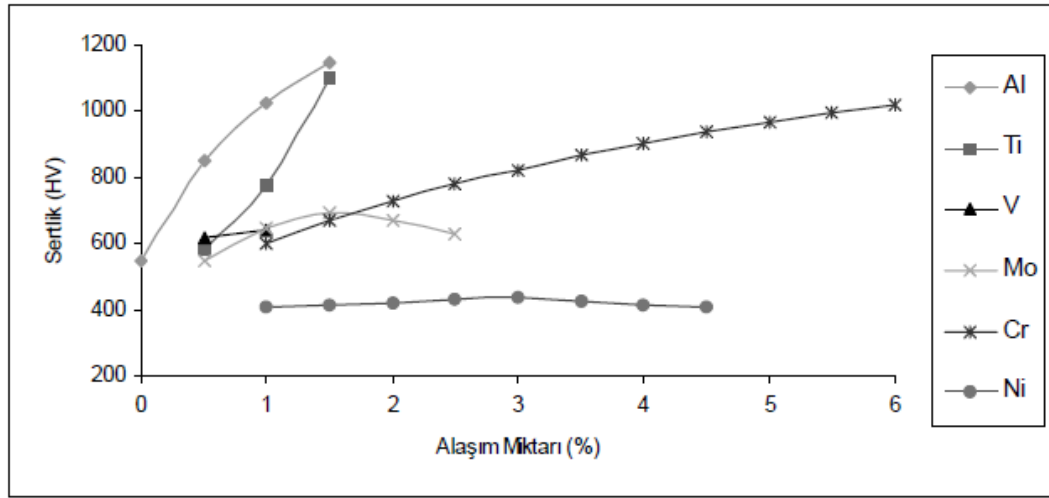
$\gamma'$ - $\text{Fe}_4\text{N}$  tek fazı, ince kristal tane yapısına haizdir.  $\gamma'$ -  $\text{Fe}_4\text{N}$ ’de yüksek yoğunlukta dislokasyon, yığılma hataları ve de ikiz alt yapısı bulunmaktadır. Süregelen iyon bombardımanıyla, her zaman büyük oranda nokta hataları tespit edilir ve grup nokta hatalarının daha büyük olmasından ötürü bir dislokasyon boşluğuna toplanabilir. Bu nedenle, kafes yapısı boşlukları, küçük dislokasyon boşlukları ile dislokasyon ağları meydana gelir (Li F. 1989).  $\epsilon + \gamma'$  çift faz tabakasıysa  $\gamma'$  kristalinin arasında dağılım gösteren paralel çizgi  $\epsilon$ - $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ’den oluşur. Yüksek yoğunlukta kristal hatalar, tek fazın dayanım ve tokluk değerlerini yükseltir, çift faza nazaran daha fazla dayanım ve tokluk oluşturur. İnce,  $\gamma'$ - $\text{Fe}_4\text{N}$  faz yapısındaki tabaka diğerleri içerisinde en sünek yapıda olandır (Karamış ve Gerçekçioğlu 1993).

### 2.3.2.2. Nitrülenebilirlik

Çeliğin azotu absorbe etme kabiliyetine nitrülenebilirlik denir. Aynı zamanda azotun sağladığı sertlik artışı anlamına gelmektedir. Yüksek yüzey sertliğinin arzu edildiği şartlarda nitrüleme yapılacak bir çelik için tercih çoğunlukla Al, Cr, Mo vb. nitrür



oluşturabilen elementler üzerinedir. Şekil 2.25'te alaşım elementlerinin nitrürasyon sertliğine etkisi gösterilmektedir.



Şekil 2. 25. Alaşım elementlerinin nitrürasyon sertliğine etkisi (Özdemir, Erten 2005)

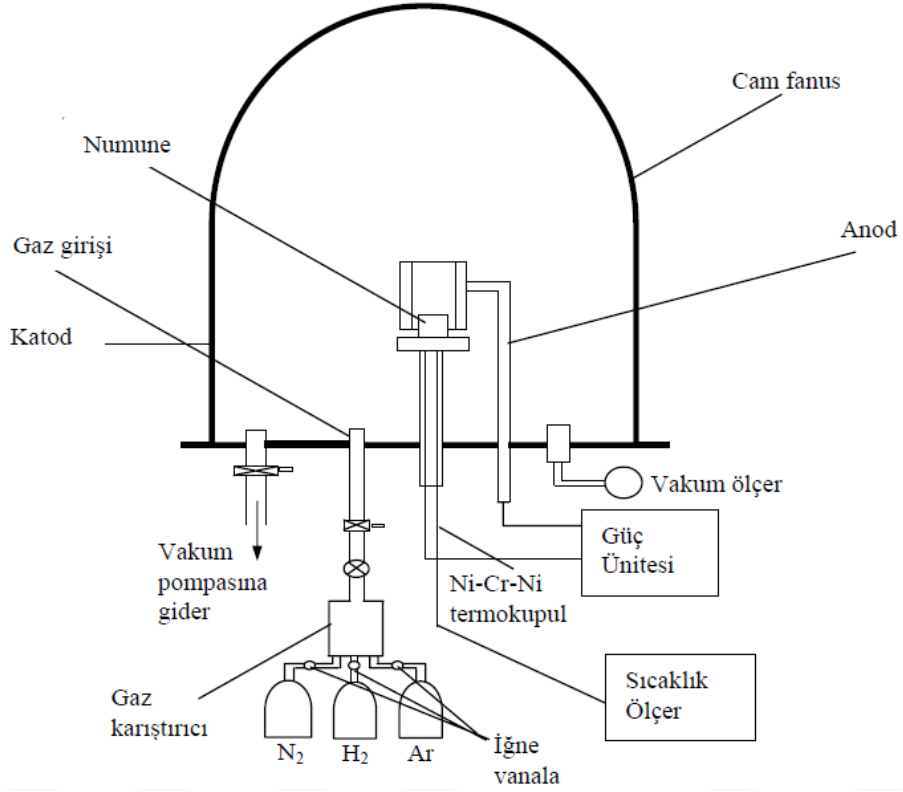
Nitrürasyon sonrası yüzey sertliğinde en büyük etkiye sahip element yukarıdaki Şekil 2.25'de görüldüğü gibi alüminyumdur. Ayrıca, çeşitli alaşım elementleri içeren çeliklerde alaşım elementlerinin ayrı olarak kullanılmaları halinde çok yüksek sertlikler elde edilmektedir.

Çeliğin nitrürlenebilirliğine mikro yapının etkisi iki şekildedir. Yüksek oranda serbest ferritli mikro yapı azotun yayınması için, düşük karbürü ise hem azotun yayınması, hem de sertlik artışı için uygundur (Bakkal 1999).

### 2.3.3. Plazma Nitrüleme Teçhizatı

Bir plazma nitrüleme teçhizatı vakum fırını, güç kaynağı ve gaz karıştırma paneli ve gaz akış kontrolünden oluşan gaz sisteminden oluşur. İşlem süresini kısaltmak için dışarıdan ısıtma ve hızlı soğutucu sistemler kullanılabilir. Plazma nitrüleme parametrelerini izlemek ve kontrol etmek için mikroişlemciler kullanılabilir. Doğru akım güç kaynağı plazma nitrüleme işleminin en önemli parçasıdır. Nitrüleme sırasında istenen sıcaklığa erişebilmek için, 0 ile 1000V arası voltaj ve hazneye parçanın büyüklüğüne uygun, genelde 25-450A arası, akım sağlayabilmelidir. Gaz karıştırma paneli uygun hidrojen ve azot karışımını ayarlamakta kullanılır. Plazma nitrüleme işlemi genelde 1-10 mmHg

aralığındaki basınçlarda gerçekleştirilir; basınç gaz akış kontrolü paneli ve vakum pompası aracılığıyla ayarlanır (O'Brien ve Goodman, 1990).



Şekil 2. 26. Plazma nitrürasyon cihazının şematik gösterimi (Çelik ve ark. 2000)



Şekil 2. 27. Plazma nitrürasyon uygulaması örneği (<http://www.miheu.si/sl/>)

### 2.3.3.1. Vakum Pompası Ekipmanı

PN düzeneğinin en temel unsurlarından biri olan vakum pompası arzu edilen vakum değerini kısa bir zamanda oluşturmaktadır. Vakum pompalar  $1,013 - 1,013 \times 10^{-3}$  bar (760-1 Torr) kaba vakum,  $1,013 \times 10^{-3} - 1,013 \times 10^{-6}$  bar ( $1 - 10^{-3}$  Torr) ince vakum,  $1,013 \times 10^{-6} - 1,013 \times 10^{-9}$  bar ( $10^{-3} - 10^{-6}$  Torr) yüksek vakum,  $1,013 \times 10^{-9} - 1,013 \times 10^{-16}$  bar ( $10^{-6} - 10^{-13}$  Torr) çok yüksek vakum olarak tariflenir (Bengisu, 1983).

### 2.3.3.2. Vakum Kabı Ekipmanı

Vakum kabı ebatlarının minimum olması gereklidir. Nedeni, vakum yapılacak hacmin mümkün mertebe en küçük değerde tutulmak istenmesidir. Vakum kabı sızdırmazlık ekipmanıyla birbirine bağlanan birisi sabit, diğeri ise hareketli fanus bölümü olmak üzere iki ana bölümden meydana gelir. Hareketli olan kısım proses anında reaksiyonları inceleyebilmek amacıyla vakuma dirençli camdan yapılabileceği gibi, üzerine cam pencere eklenmiş metal bir silindir olarak ta yapılabilir. Bu sistemde, fanus anod özelliğinde kullanılabilir. Vakum kabı ekipmanının en temel bileşeni sabit bölüm olan ve üzerine bağlantıların yapıldığı kısımdır. Sabit yapıdaki bu bölüm tabla olarak isimlendirilir. Tabla oksitlenmeyi engellemek amacıyla paslanmaz çelik malzemeden üretilebileceği gibi karbonlu çelikten de üretilebilir. Tabla üzerindeki unsurlar;

- ✚ Vakum girişi
- ✚ Elektrik bağlantıları
- ✚ Gaz ve hava girişleri
- ✚ Basınç ve sıcaklık ölçer

Mekanizmada ihtiyaç duyulan vakuma erişilmesi, sistemi meydana getiren unsurların birbirleriyle birleşimlerinin sızdırmazlığı ile oluşturulabilir. Vakum girişi, pompa ile vakum kabını birleştiren bir borudan oluşur. Hidrojen, azot ve hava girişleri tablaya tek bir bağlantı ile sağlanmış ve gaz karışımı önceden oluşturularak vakuma beslenmiştir.. Parlak boşalmanın iş parçasıyla anod çubuğu ucu arasında oluşturmak amacıyla anod ve katodun kap içerisindeki kısımlarının üzerlerinin izolasyonu seramik ile oluşturulmalıdır. Seramik malzeme sıcaklıktan etkilenmeyen yapıdadır (Bengisu, 1983).

### **2.3.3.3. Güç Kaynağı**

Plazma nitrürleme sisteminin sağlıklı olarak çalışmasına etkiyen ana bölümlerden biridir. Doğru akım güç kaynakları yüzey mühendisliğinde uygulanmaktadır ancak; son zamanlarda darbeli doğru akım, pulsed DC, veren güç kaynaklarından da yararlanılmaktadır (Bengisu, 1983).

### **2.3.3.4. Gaz Vericileri**

Plazma nitrürlemede kullanılan gazlar  $N_2+H_2$ ,  $N_2+H_2+Ar$  bileşikleri olabileceği gibi, isteğe göre bu karışımlara hidrokarbon gazı eklenmiş bileşiklerde kullanılabilir. Azot gazı nitrürlemeyi tetiklerken, hidrojen gazı azottan daha düşük disyasyon ve iyonizasyon enerjisine haiz olmasından ötürü parlak boşalma sürecini başlatabilmek ve parçanın yüzeyinin temizlenme ihtiyacı için lazımdır (Topçuoğlu 2010).

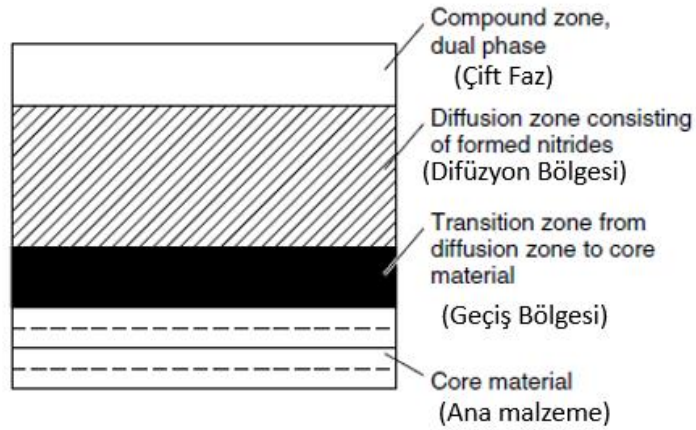
### **2.3.4. İşlem Parametreleri**

Gaz içindeki azot miktarı az olduğu takdirde tek fazlı beyaz tabakanın oluşumu zorlaşır. Örnek verilirse, argon gazı, azot oranını azaltması sonucunda saf difüzyon tabakası oluşur. Karbon miktarının az olması durumunda ise beyaz tabaka kalınlığını artırır, fazla olması ise tersi bir durum yaratıp tabakanın kalınlığını düşürür. İyon nitrürlemenin en büyük avantajı alçak sıcaklıklarda ( $300-600^{\circ}C$ ) sertliğin derinliğe nüfuz etmesi ve yüksek yüzey sertliği elde edilmesidir. Bu işlemler plazmada termodinamik dengeleme şartlarının sağlanmasıyla yürür. İlave bir ısıtmaya gereksinim duyulmaz. Verilen bir nitrürleme süresi için artan sıcaklıkla yüzey sertliği düşmekte, sertlik profili içeri doğru yatıklaşmaktadır. Düşük sıcaklıklarda ise yayılan azot miktarının az olması nedeniyle yüzey sertliği yine düşebilmektedir. Yüksek yüzey sertliği için her malzemedeki farklı sıcaklık aralıkları tanımlanabilir (Bakkal 1999).

### **2.3.5. Plazma Nitrürleme Uygulanmış Yüzey Tabakası**

PN, en üst bölümde “beyaz tabaka”, altında “difüzyon tabakası” en alt kısımda “çekirdek bölgesi” olarak isimlendirilen temel malzeme olarak üç ana kısımda değerlendirilebilir. PN prosesinde, azotun çeliğe nüfuzietindeki en üst yüzey, azotun en yüksek değerinde yer

aldığı alandır. Söz konusu tabaka oldukça sert ve kırılğan özelliktedir. Yüzey üzerinden içeri yönde ilerlemede azotun, demir kafes yapısında ara yer atomu şeklinde yer aldığı veya çeliğin içindeki nitrürleştirici elementler ile oluşturduğu ince dağılım göstermiş alaşım nitrürlerinin yer aldığı difüzyon tabakasına ulaşılır. Malzemenin iç kısımlarına doğru ise azot miktarı ve neticesinde sertlik düşer ve son olarak azotun yayılım göstermemiş çekirdek kısmına ulaşılır. Beyaz tabakası ile difüzyon tabakası yapı özellikleri, PN uygulanmış malzemelerin özelliklerini belirleyen en temel unsurdur. Beyaz tabaka, PN uygulanmış malzemelerin tribolojik ve korozyif özelliklerinin iyileşmesine destek verirken, difüzyon tabakası da malzemelerin tribolojik özellikleri ile yorulma direncini iyileştirici yönde tesir eder. Katı, sıvı, gaz nitrürleme metotlarının aksine, PN methodunda beyaz tabaka ve difüzyon tabakasının yapı özelliklerini ve tabaka gelişimini gerilim, gaz basıncı, gaz bileşimi, sıcaklık ve de zaman gibi değişkenlerin kontrolüyle hedeflenen seviyede sabitleme şansı bulunmaktadır (Şirin 2004).



**Şekil 2. 28.** Plazma nitrürasyon yüzey tabakaları (ASM International 2003)

### 2.3.5.1 Beyaz Tabaka

Malzemenin en dışındaki beyaz nitrür tabakası, ismini nital (%3- 5 HNO<sub>3</sub> + alkol) ile dağlama işlemi sonrasında beyaz renk almasından ötürü alan bölümdür. Nitrürleme şartları ile zamanı belirlenerek 20 µm kalınlık seviyesine kadar oluşmasına müsaade edilen bu tabaka sert, gevrek ve aşınmaya karşı dayanımlıdır. Kalınlık seviyesinin daha fazlaştırılması halinde; tabakada çatlaklar meydana gelebileceği gibi yorulma

dayanımını negatif yönde etkileyeceği bilinen bir durumdur. Beyaz tabakada,  $\gamma'$  ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ) ve  $\epsilon$  ( $\text{Fe}_2\text{N}$  ve  $\text{Fe}_3\text{N}$ ) fazları ya da bileşimi oluşabilmektedir.  $\gamma'$  ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ) yüzey merkezli kübik yapıdayken (YMK),  $\epsilon$  ( $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ) hegzagonal form yapısına sahiptir. Beyaz tabakanın yalnızca bu metaller arası bileşiklerden meydana gelmesi sertliğinin, materyalin kimyasal bileşiminden bağımsız oluşunu desteklemektedir. Aynı zamanda beyaz tabakanın mekanik yapı özellikleri, ilgili faz yapılarının yer alma miktarlarına ve tabakanın kalınlığıyla önemli oranda ilişkilidir. Beyaz tabakada  $\gamma'$  ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ) fazının meydana gelmesi, sünek ve de yumuşak yapıda olması sebebiyle aşınma dayanımının düşük, darbelere dayanıklı uygulamalarda,  $\epsilon$  ( $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ) fazının oluşumu, aşınma direncinin yüksek olması arzu edilen malzemelerde tercih sebebidir (İğdil ve ark. 2012).

Beyaz tabaka oluşumunda fazların kalınlık değeri, türü ve sayısı, özelliklerin tayininde önemlidir. PN esnasında kullanılan gaz karışımı, faz türleri temel değişken olmaktadır. PN'de atom bombardımanının nitrür oluşumunda görevi oldukça önemlidir. Bu prosten ötürü başlangıçta yüzey üzerinde beyaz tabaka oluşmaktadır. Beyaz tabakanın kalınlığı, prosesin azot gazı ya da azot-hidrojen bileşimiyle oluşması sonucunda yüzey üzerinde farklı bir tabaka meydana getirmektedir (Sevil 2008).

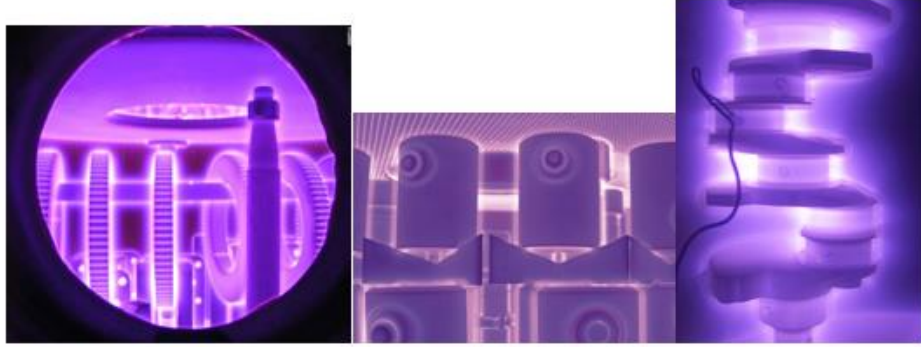
İyonların yüzeye çarpmaları esnasında, kinetik enerjilerini malzemeye taşıması sebebiyle yüzeyin ısınması ve sıcaklığın artması sağlanır. Bu sebeple özel bir ısıtma elemanına ihtiyaç yoktur. Asal gazlardan birinin karışım içerisinde bulunması, iş parçasının yüzeyinin prosten önce temizlenmesine imkan verir. Yüzeye nitrürleme uygulanacak malzemenin, PN sıcaklığına kadar yalnızca  $\text{H}_2$  gazında elektriksel boşalımın olması ile PN yapılacak yüzeyden içeri yönde azotun difüzyonuna engel olacak kir ve oksit artıklarının arındırılması ve yüzeyin aktifleştirilmesiyle azotun daha iyi difüzyonu gerçekleşir.

PN prosesi, saf halde azot, amonyak veya azot ile hidrojenin ya da uyumlu bir hidrokarbon bileşimiyle oluşan gaz koşullarında gerçekleştirilir. İşle düşük basınç değerlerinde olduğundan dolayı proses sırasında gaz sarfiyatı çok azdır. İş parçasının sıcaklık ölçümü hassas ısı algılama cihazları ile yapılır ve güç kaynağındaki çıkış değişkenleri ayarlanır. Proses sıcaklığı PN uygulanmış materyalin yapısıyla ilişkili olarak

400-600°C sıcaklığında değişir. PN işleminin avantajlarından biri de, uygulanan gerilim değerinin ayarlanmasıyla 350 - 450 °C gibi düşük sıcaklık değerlerinde çalışabilme imkanındır. Proses zamanı, materyalin cinsine ve arzu edilen difüzyon tabaka kalınlığıyla ilgili olarak 10 dk ile 50 saat arasında farklılık gösterebilmektedir (Sevil 2008).

### 2.3.5.2 Difüzyon Bölgesi

Difüzyon bölgesi PN prosesini takiben oluşan azot miktarının ve sertliğin düşük olan kısmıdır. Yayınım bölgesi materyal içerisindeki derinliği proses değişkenlerine materyalin türüne göre farklılık gösterir. Ortalama 1 mm ve daha derinliklerde bu değişim gerçekleşebilir. Ortaya çıkan difüzyon tabakası yüzeyde gerilmeler barındırır ve bu da materyalin dayanımını artırır. Difüzyon tabakası kalınlığı proses sıcaklığı ve zaman ile birlikte artarken azot miktarının artışıyla azalır (Sevil 2008).



Şekil 2. 29. Plazma nitrürasyon prosesi (<http://www.miheu.si/sl/>)

### 2.3.6. Plazma Nitrürlemenin Avantajları

Günümüzde dünya genelinde endüstriyel alanda kullanımı artış gösteren ve ülkemizde de yeni yeni uygulama fırsatı bulan PN mekanizmaları endüstriyel anlamda oldukça fazla avantaja sahiptir. Söz konusu bu avantajlar;

- ✚ PN sistemi termo kimyasal bir tekniktir, plazma prosesinde zehir içermeyen maddelerden faydalanılır ve böylelikle çalışma sahası temizdir, ayrıca çevre kirliliği oluşturacak unsurlar bulunmamaktadır.
- ✚ Alışlagelmiş uygulamalar ile kıyaslandığında, iyonize edilmiş gazın saçılma davranışından faydalandığından proses süresi daha azdır. Proses süresi PN'de

15-20 dk ile 48 saate arasında iken, gaz nitrüleme prosesinde bu zaman 80 ile 100 saat diliminde değişim göstermektedir.

- ✚ Parlak boşalma ile iş parçası doğrudan ısıtıldığı için, ekstra ısıtma ve sıcaklık değerini korumak adına bir teçhizata ihtiyaç olmamaktadır.
- ✚ Proses düşük gaz basınç değerlerinde yapıldığından, gaz kullanımını düşüktür. Gaz sarfiyatının düşük olması sebebiyle işletme maliyeti önemli oranda azdır.
- ✚ Parça ile ilişkili olarak nitrüleme sıcaklığı (380°C den 860°C ye kadar) ayarlanabilir. Sıradan yüzey sertleştirme işlemlerine kıyasla daha düşük sıcaklıklarda proses gerçekleştirilebilir.
- ✚ Proses vakumlu bir bölge içerisinde olduğundan, yüzey üzerinde oksitlenme oluşmaz ve yüzey pürüzlülük değeri çok azdır. Böylelikle nitrüleme sonrası parçaya ek bir operasyon gerekmemektedir. İlave olarak, ölçüsel form değişmesi neredeyse olmamaktadır ve fazların oluşmasını daha efektif olarak kontrol altında tutma fırsatı bulunmaktadır.
- ✚ Gaz karışım oranının ayarlanması sayesinde beyaz tabaka içeriğini ayarlama olanağı mevcuttur. Böylelikle PN proses sürecinde optimum mekanik karakteristikler sağlanabilir.
- ✚ Farklı geometride yüzey formlarına haiz malzemeler nitrüleme prosesine uygun olup, bu malzemelerin her bölümünde homojen nitrür tabakası elde edilebilir.
- ✚ Yüzey sertleştirme uygulanması arzu edilmeyen yerler maskelenebilir.
- ✚ Proses otomasyon sistemi için uygun bir yöntemdir.

PN yöntemi başka alışlagelmiş nitrüleme metotlarına nazaran (gaz nitrüleme, tuz banyosunda nitrüleme vb.) neredeyse her alanda avantaj sahibidir. Sistemin kurulumu safhasında ilk yatırım maliyetleri yüksek olduğu halde, işletme sonrasında bu ekonomik anlamda hiçbir negatiflik oluşturmamaktadır (Kahraman ve ark. 2008).

### **2.3.7. Plazma Nitrülemenin Sınırları**

Plazma nitrüleme işleminin yüksek sermaye gerektirmesi, yapılacak teçhizat bağlantıların hassas olması gereksinimi ve karbon çeliklerinin nitrülemesinde sıvı



nitrüleme kadar ekonomik olmaması, ve aynı şarj bünyesinde yalnızca eş ebat ve eş kesitteki malzemelere nitrüleme uygulanabilmesi işlemin sınırlarındandır (Pye 2001).

## 2.4. Metallerde Aşınma Davranışı

### 2.4.1. Aşınma Tanımı

Aşınma konusunda birçok tarifler yapılmış ve tek bir tanım şeklinde konu anlatılamadığından, çoğu zaman anlatımlara ek açıklamalar ilave edilmek zorunda kalınmıştır.

1976'da yayımlanan DIN 50320 normuna göre “aşınma terimi, katı cisim yüzeyinden tribolojik zorlanma neticesinde kesintisiz olarak ilerleyen malzeme kaybı olayıdır” (Karamış 1985). Ayrıca tamamlayıcı iki ek ile açıklamaya gerek görülmüş ve aşınmanın, malzeme ve form değişimi ya da küçük malzeme parçalarının kopma suretiyle ayrılması şekillerinde kendini gösterebileceğine vurgu yapılmıştır. Temas halindeki yüzeylerde sürtünme kuvvetleri güç kayıplarına, aşınma ise işleme toleranslarının bozulmasına sebep olmasından dolayı aşınma aşırı önem arz eden bir parametre olmuştur (Anonim 2015c).



**Şekil 2. 30.** Bir ATY tesisinde kullanılan bir kesme bıçağına ait aşınma görünümü

Temastaki katı yüzeyler üzerinde malzeme kaybı üç farklı biçimde olabilir. Kayıplar; bölgesel erime, kimyasal çözünme ve yüzeyden fiziksel olarak kopmalardır. Pratikte aşınma bünyesinde, daha çok yüzeyden fiziksel olarak kopan parçacıkların neden olduğu hasarlar hesaplanmaktadır. Aşınma mekanizmasında; temel parça (aşınan), karşı parça (aşındıran), ara malzeme, yük ve hareket aşınmanın ana unsurlarını meydana getirir. Tüm

bu unsurların meydana getirdiği sistem "Tribolojik Sistem" şeklinde adlandırılır. Aşınma mekanizmasındaki önemli unsurlardan biri de çevre koşullarıdır.

Aşınma, çoğunlukla önceden tespit edilen hasar türüdür. Temas halindeki parça yüzeyleri oksit filmleri ya da yağlayıcılar ile korunsalar dahi, mekanik yüklemelerin etkisiyle oksit tabakasının ya da yağlamanın bozulması, iki yüzeyin birbiriyle direkt temasına neden olabilir. Temasla oluşan sürtünme parçanın işletme şartlarındaki ömrünü ve performansını kısıtlayan aşınmaya neden olur. Söz konusu hasar uygun yağlama, filtreleme, uygun materyal seçimi ve uygun dizayn vb. faktörlerle azaltılabilir ancak; asla tamamen ortadan kaldırılamaz (Kato ve Adachi 2001).

#### **2.4.2. Aşınmaya Etki Eden Faktörler**

Aşınmaya etki eden birçok farklı faktör olmakla birlikte, genel anlamda etki eden faktörleri dört temel çerçevede toplayabiliriz,

##### **I-Ana Malzemeyle ilgili faktörler**

- ✚ Parçanın kristal yapısı
- ✚ Parçanın sertlik değeri
- ✚ Elastisite modülü
- ✚ Parçanın deformasyon davranışı
- ✚ Parçanın yüzey pürüzlülük değeri
- ✚ Parçanın ebatları

##### **II- Karşı malzemeyle ilgili faktörler ve aşındırıcı etkisi**

##### **III- Ortam Koşulları**

- ✚ Sıcaklık değeri
- ✚ Nem oranı
- ✚ Atmosfer şartları

##### **IV-Servis Koşulları**

- ✚ Basınç değeri
- ✚ Hız değeri
- ✚ Kayma yolu (Anonim, 2012).

### 2.4.3. Aşınma Zaman İlişkisi

Aşınma pratikte ikiye ayrılır;

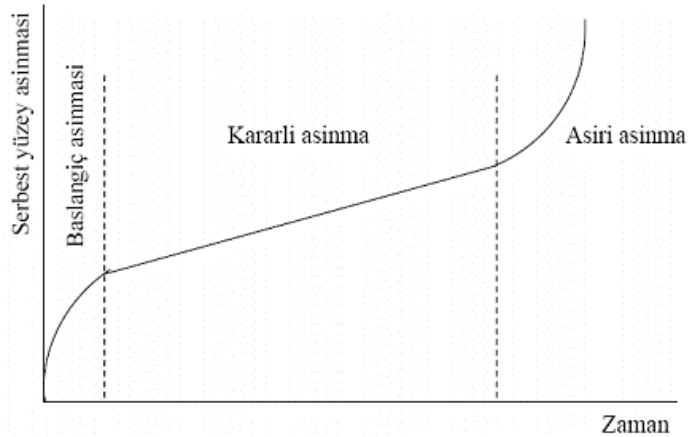
1. Zaman ile gelişen aşınma
2. Aniden meydana gelen aşınma

Zamanla meydana gelen aşınmayı üç safhada incelemek mümkündür;

1.Safha (Rodaj safhası): Bu safha birbirine alıştırma safhasıdır. Bu safhada parçanın ilk hareketi sırasında şiddetli derecede bir aşınma olur. Bu nedenle malzemelerin birbirilerine alıştırması iyi yapılması ve kısa zamanda gerçekleştirilmesi bu safhaya ait başlıca koşuldur. Genelde alıştırma, yüksüz normal hızlardan daha düşük hızlarda yapılır. Alıştırmamanın etkin ve kısa zaman içerisinde tamamlanması için I. safhaya ait özel ağırlıklardan yararlanır.

2.Safha: Bu safhadaki aşınma 1. Safha'ya göre daha yavaş ilerler. Fakat zamanla aşınma oranı artmakta ve şiddetli aşınmalar bu safhadan sonra meydana gelmektedir.

3.Safha: Bu safhada artan aşınma hızı ile şiddetli aşınmalar meydana gelir. Sistemde önemli hasarlar oluşabilir.



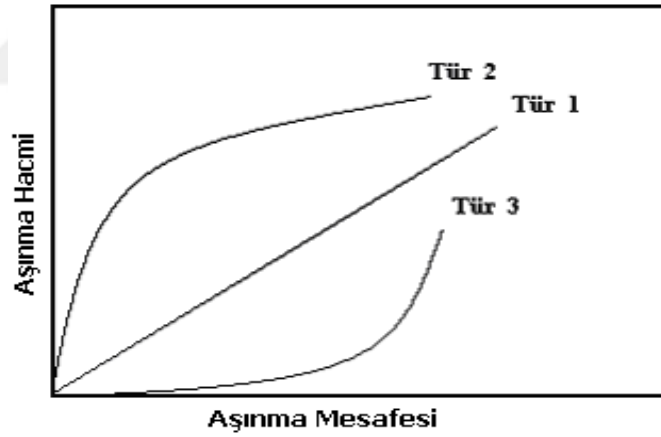
Şekil 2. 31. Aşınma Zaman Grafiği (Özdemir, Erten 2003)

Aşınan elamana ait, işletme koşullarıyla ilgili olarak uygun bir aşınma sınırı belirlenirse, aşınma zaman diyagramından parçanın normal çalışma zamanı (ömür) belirlenir. Bu zaman tamamlandıktan sonra parçanın değiştirilmesi gerekir(Anonim 2015c).

#### 2.4.4 Aşınma Mekanizmaları

Aşınma sistemleri, sürtünme esnasında oluşan karmaşık farklılıklara bağlı olarak belirlenir. Çoğunlukla aşınma, tek bir aşınma sistemi boyunca yer almaz. Sistemde bu şekilde her bir çeşit aşınmadaki ayrı her bir aşınma sisteminin anlaşılması oldukça önem arz etmektedir.

Aşınma, kimyasal bozulma ya da iletişim ara yüzeyinde erimesiyle mikro çatlama nedeniyle, fiziksel ayrılma şeklinde, parçanın kaldırılması suretiyle oluşmaktadır. Bu anlamda aşınmanın farklı birkaç modu vardır. Aşınma şiddeti, aşınma yüzey pürüzlülüğü ve aşınma parça şekli, aşınmanın sınıflandırılması anlamında önemli ip uçları sağlamaktadır (Gür 2006).



Şekil 2. 32. Aşınma Türleri (Gür 2006)

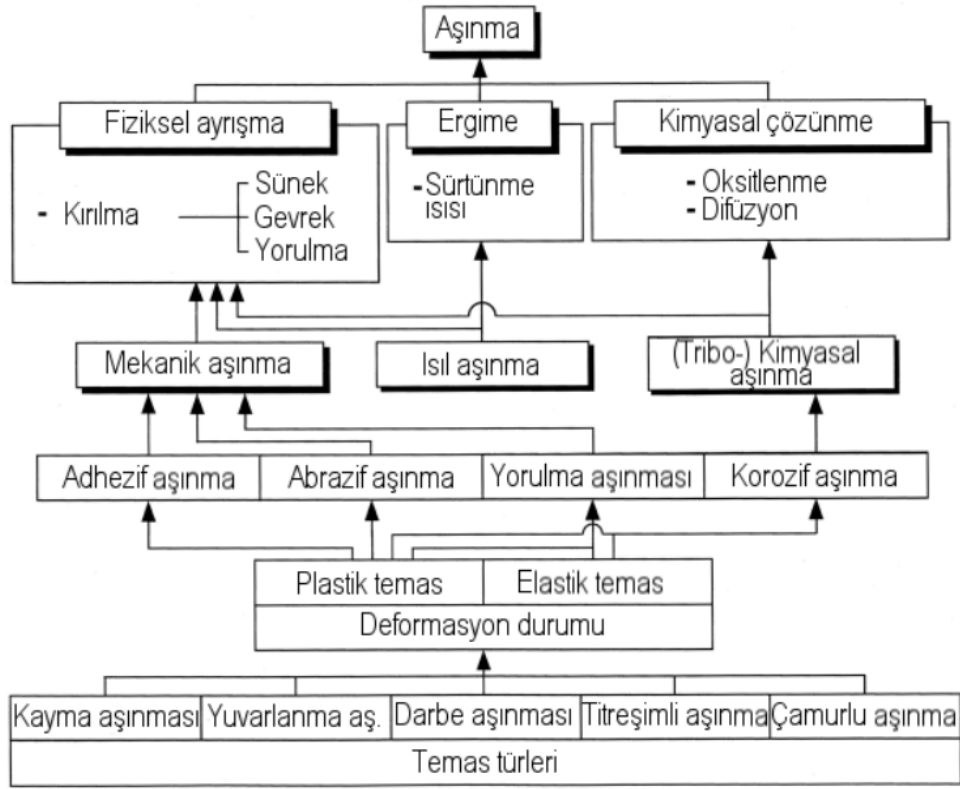
Şekil.2.32’de aşınma eğrileri gösterilmiştir. 1. Tür, bütün sürecin tamamında sabit değerde bir aşınma oranını göstermektedir. 2. Tür, başlangıç anı yüksek bir aşınma oranından düşük bir orandaki sabit aşınmaya kadarki sürecin geçişini göstermektedir. Aşınmanın bu tipi, metallerde oldukça sık gözlenir. 3. Tür, bu türden bir çatlama kırıklığı

oluřturmakta, bařlangıç seviyesindeki ařınmanın dūřuk oranın yūksek bir orandaki ařınmaya, daha kōtū bir geçişini gōstermektedir. (Chiou ve ark. 1985).

Aşınma, aşınma yūzeyinin aldığı hal ve kaybolan parçacıkların miktarıyla değerlendirilmektedir. Aşınma seviyesi, aşınma oranı, ōzel aşınma derecesi ve aşınma katsayılarıyla tanımlanmaktadır. Aşınmanın oranı, ayrı ayrı tūm aşınma mesafesi ve aşınma yūklemesi için aşınmanın şiddeti şeklinde belirtilir Aşınma katsayısı ise, belirli aşınma oranı ve aşınan parçanın sertliğiyle belirtilir (Archard 1953).

Aşınmayı tariflendiren birçok terim bulunmaktadır ve bu terimler her zaman birbirlerine kıyasla farklılık içermezler. Bu durum çoğunlukla aşınma sistemlerini birbiri ile karıştırılmasına neden olmaktadır. Bu sebeple, aşınma sistemleri analizinin incelenmesi esnasında anlaşılabilirliğini daha iyi sağlamak adına aşınmanın tanımlayıcı anahtar kelimeleri Őekil 2.33.'de belirtilmektedir (Gūr 2006).

Ařınma oranı, dinamik, çevresel ve malzeme parametrelerinden oluřan bir sūrtūnme mekanizması içerisindeki kūuk bir deđiřimle bile, būyūk oranda deđiřiklik gōsterir (Bayer 1994).

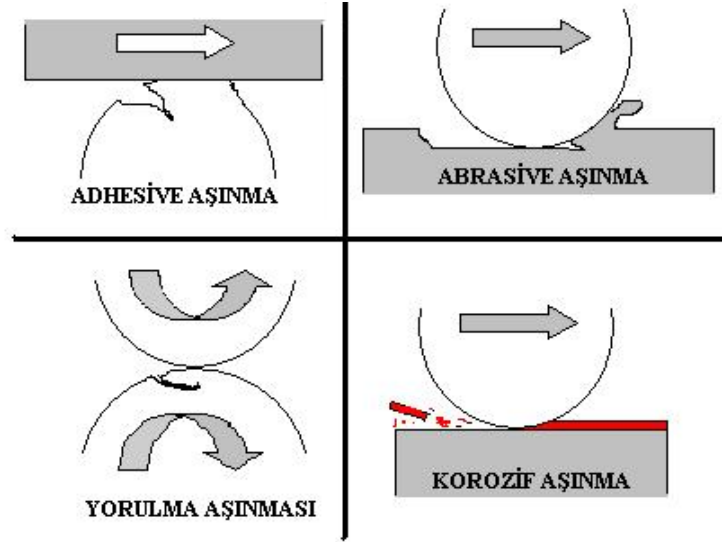


**Şekil 2. 33.** Aşınma sistemi anahtar kelimeleri ve temas tipleri (Gür 2006)

Aşınmada temas çeşitleri; aşınma mekanizmaları ile bağlantılı olduğu için, temas ara yüzeyindeki gerçek ve anlaşılır temas şartları, bu temas yapılandırmalarıyla ilgili ayrıntılar olmadan da tespit edilebilir. Temasın şiddet değeri, bu aşınma sistemlerinin en kolay ve basit bir şekilde ve doğrudan anlaşılması bakımından elastik temas veya plastik temas olmaktadır. Sürtünme mekanizması ise, dinamik parametreler, malzeme parametreleri ve atmosferik parametreler olarak belirtilmektedir (Anonim 2015c).

Aşınma mekanizmaları aşağıdaki gibi 4 gruba ayrılabilir;

- ✚ Adhesiv aşınma mekanizması,
- ✚ Abrasiv aşınma mekanizması,
- ✚ Korozif aşınma mekanizması.
- ✚ Yorulma aşınma mekanizması.

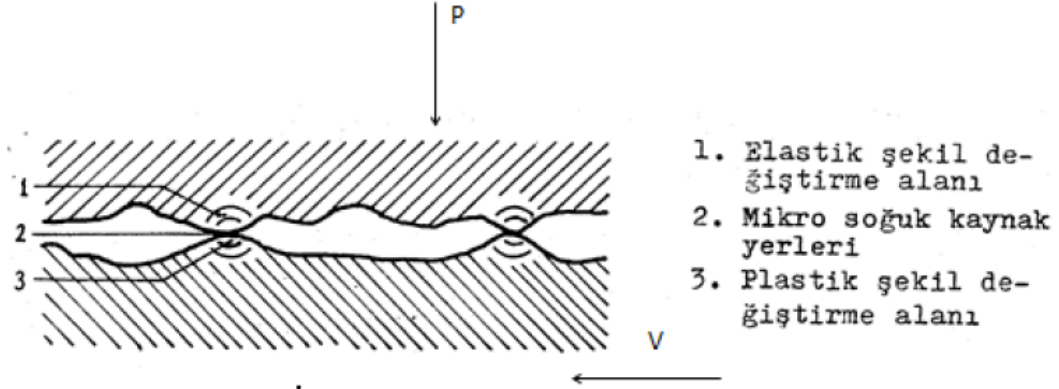


Şekil 2. 34. Dört Aşınma Tipinin Şematik Gösterimi (Gür 2006)

#### 2.4.4.1 Adhesiv Aşınma Mekanizması

Plastik temas halindeki iki yüzeyin nispi kayma direnci için yeterince yapışkan gücüne sahip olmasıyla, geniş plastik deformasyonunun sıkıştırma ve aynı zamanda kırılma altında temas alanında ortaya çıkmasıyla aşınma meydana gelmektedir. Böylelikle temas alanları içindeki bu geniş deformasyon, bir çatlamanın başlamasına ve gerilmeyle kırılmanın birleşik çatlama şeklinde üretilmesine neden olur. Temas ara yüzeyindeki çatlak uzandığında, aşınan malzeme, yapışkan transferinin tamamlanması sonrasında şekillenmektedir. Temas ara yüzeyinde yeterli yapışma oluştuğunda, meydana gelen bu aşınma türü, adhesiv aşınma olarak isimlendirilmektedir (Kato ve Adachi 2001).

Bowden ve Tabor'a göre bu mikro kaynak bölgelerinin izafi hareket sırasında koparılması (kesilmesi) için gereken kuvvet veya enerji, sürtünme kuvveti şeklinde uygulanan kuvvetle karşılanır.



**Şekil 2. 35.** Mikro Soğuk Kaynak Oluşumu (Anonim 2015c).

Adhesiv aşınma tipi, en yaygın aşınma tipi olmasına rağmen çoğunlukla hasarı hızlandırıcı tesirde değildir. “Adhesiv aşınma bir metal yüzeyinin diğer bir metal yüzeyindeki bağıl hareketi esnasında birbirlerine yapışmış yüzeydeki pürüzlerin kırılması sonucunda meydana gelir.” Eğer iki metal aynı sertlikteyse aşınma her iki yüzeyde de meydana gelir. Metaller arasındaki yağlamanın kusursuz olması, yüzeye etki eden kuvvetin azaltılması ve parçanın sertliğinin artırılması adhesiv aşınmayı düşürür. Sonucunda adhesiv aşınma; yüzeye tesir eden normal yük, kayma yolu ile ve aşınan parçanın yüzey sertliğiyle ilişkilidir. (Chiou ve ark. 1985).

#### Adhezyon aşınmasının önlenmesi;

- ✚ Eş çalışacak malzeme çiftlerinin uygun seçimi,
- ✚ İyi bir yağlama sisteminin temini (sürtünme azalır, ısı uzaklaştırılır. Böylece mikrokaynak bölgeleri önlenir),
- ✚ Uygun yağlayıcı maddelerinin kullanılması,
- ✚ Yüzey pürüzlülüğü düşük yüzeylerin kullanılması,
- ✚ Metal-metal temasının önlenmesi (fosfat kaplama gibi kimyasal filmlerin oluşturulması),
- ✚ Sert kaplama tabakalarının oluşturulması işlemleriyle sağlanabilir (Anonim 2015c).



#### 2.4.4.2 Abrasif Aşınma Mekanizması

İki yüzey arasındaki etkileşim ara yüzeyi meyilli ya da eğri bir temas varsa, aşınma bu kayma içerisinde oluşur. Abrasiv aşınma türü tüm aşınma maliyet değerlerinin neredeyse %63'ünü kapsamaktadır. Abrasiv aşınma, sert partiküllerinin ya da sert çıkıntılarının katı bir yüzey doğrultusunda hareketi ve karşı koymasıyla meydana gelir (Koç ve Mutlu, 2005).

Abrasif aşınmanın oluşum hızı, parça yüzeyine tesir eden kuvvet düşürülerek azaltılabilir. Bu sayede aşınan küçük parçacıklar yüzeye daha az batar ve çapakların kaldırılması esnasında daha az iz oluşumu sağlanabilir.

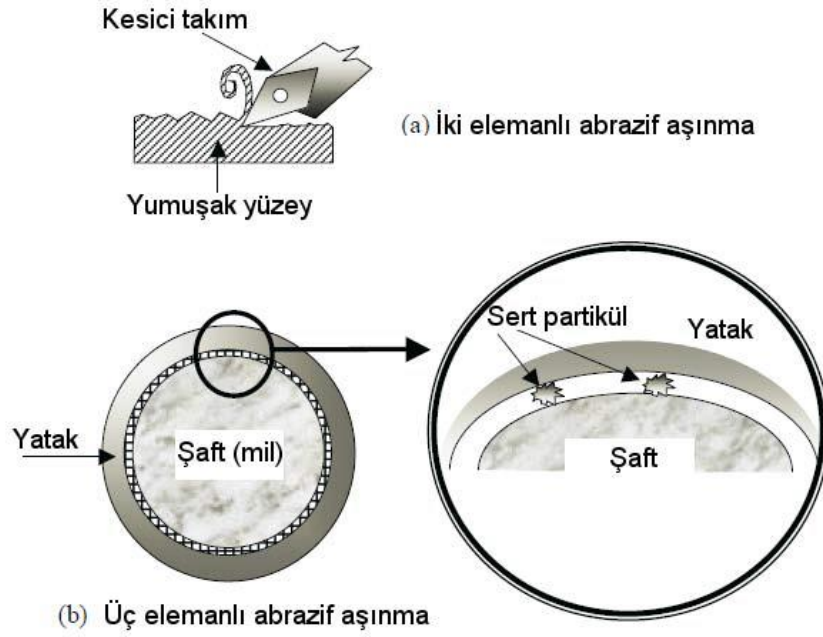
Parça yönünden abrasif aşınma seviyesini düşürmek için,

- ✓ Alaşımın daha sert seçilmesi,
- ✓ Sertliğin artırılması için ısıl işlem tatbik edilmesi,
- ✓ Parça yüzeyinin sert bir tabakayla kaplanması önerilir.

Bu faaliyetlerle abrasif aşınmanın oluşum süreci uzatılabilir. Abrasif aşınma türü endüstriyel ekipmanlarda malzeme kayıplarının temel nedenidir. Aşındırıcı malzeme serbest durumda iki metalin arasında yer alıyorsa ya da sadece metali aşındıran sabit ya da serbest durumda taneler var ise;

- İki etkenli (elemanlı) abrasif aşınma,
- Üç etkenli (elemanlı) abrasif aşınma

İfadeleriyle bir sınıflandırma yapılabilir (Anonim 2015c).



**Şekil 2. 36.** İki ve üç elemanlı abrasif aşınma oluşumu (Stokes 2008)

Metaller arası sürtünmeler esnasında aşınma iki elemanlı abrasif ya da adhesiv şekilde başlar ve üç elemanlı abrasif aşınma şeklinde ilerler. Böyle durumlarda metalin arasına giren toz, mineral taneleri, çizilme sonucu serbest duruma geçen mikro talaşlar ve parçalanmış oksit parçacıkları ara malzemeyi yani üçüncü elemanı oluşturmuş olur. Serbest duruma gelene mikro talaş parçaları çoğunlukla temel malzemeden daha fazla sert olduklarından (üç elemanlı) abrasif aşınma, aşınmanın hızını arttırmaktadır (Anonim, 2012).

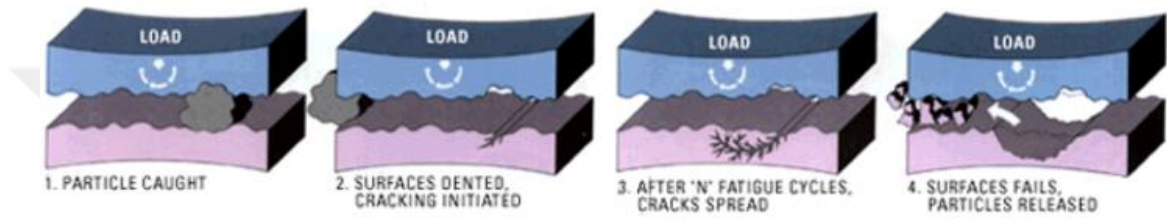
#### Abrazyon aşınmasının önlenmesi;

- ✚ Yüzeyler sertleştirilmelidir (en efektif yöntemdir ancak; bu durumda parçanın gevrek bir şekilde kırılım riski artmaktadır)
- ✚ Ortam kaynaklı sert yapıda maddelerin yüzeylerin arasına dolmaması iyi bir sızdırmazlık ekipmanı ile sağlanabilir.
- ✚ Makineler ve mekanizma unsurları talaş artıklarından ve diğer tüm kirliliklerden düzenli olarak sıkça arındırılmalıdır (Anonim 2015c).

#### 2.4.4.3. Yorulma Aşınma Mekanizması

Parçalar arasında temas tekrarı, aşınma parçacıklarının oluşması bakımından adhesiv ve abrasiv aşınma için gerekli değildir. Bu şekildeki temas dönüşleri sonrası oluşan aşınma, yorulma aşınması şeklinde isimlendirilmektedir (Xianqiang Pei ve ark. 2005).

Olay özellikle rulmanlı yataklar, dişli çarklar, kam mekanizmaları gibi yuvarlanma hareketi yapan parçaların yüzeylerinde, çok küçük çukurcukların (pitting) meydana gelmesi şeklinde ortaya çıkar.



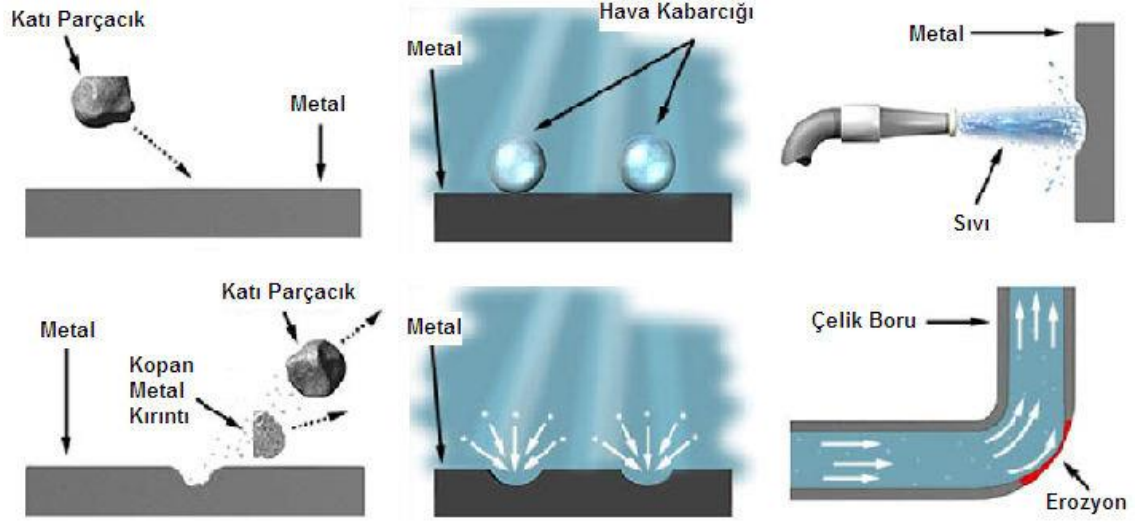
Şekil 2. 37. Yorulma aşınması mekanizması (Anonim 2015c).

#### 2.4.4.4. Korozi Aşınma Mekanizması

Aşınma gerçekleşen yüzeyler, aynı zamanda korozi şartlarına da uğrarsa bu korozi aşınma olarak adlandırılır. Kimyasal korozyon olayı tek başına gerçekleşeceği gibi diğer aşınma etkileriyle birlikte oluşabilir. Yüzey üzerine sıkı bir şekilde tutunan film tabakaları meydana getiren kimyasal reaksiyonlar yüzey aşınmasına engel olur. Ancak; film kırılabilir ve yüzeye gevşek olarak tutunmuşsa aşınma hızı büyük oranda artar. Çünkü sürtünme hareketi sırasında film tabakaları çatlar ve dağılır (Kato ve Adachi 2001).

#### 2.4.4.5. Erozi Aşınma Mekanizması

Erozyon diğer adıyla hidro abrasif aşınma, akıcı özellikte malzemelerin oluşturduğu bir aşınmadır türüdür. Sıvılar, gazlar akışları esnasında malzemelerin sınır yüzeylerinde patlama ya da çarpışma tesiri yaratarak yüzeyden parçacıklar koparır ve girdaplar tesiriyle dalgali yüzey oluştururlar. Böylelikle aşınma çok daha hız kazanır (Burwell 1957-58).



Şekil 2. 38. Erozif aşınma (Bağcı 2010)

#### 2.4.5. Aşınmanın Azaltılması İçin Gerekli Önlemler

- ✚ Aşınmaya dayanıklı malzeme seçimi parçanın çalıştığı ortamdaki mevcut aşınma türü ve şiddeti belirtilerek yapılmalıdır.
- ✚ Parçanın geometrik tasarımını aşınmayı en aza indirecek şekilde tasarlanmalıdır.
- ✚ Sadece aşındırıcı ortamla temas halindeki yüzeyler veya tüm yüzey alanı, esas malzemenin özelliklerinden daha üstün özelliklere sahip ve mevcut aşınma türüne daha dayanıklı bir malzeme ile kaplanmalıdır.
- ✚ Parçanın üretim aşamasında herhangi bir imalat hatasına (gözenek, cüruf, çatlak, kalıcı çekme gerilmeleri, istenmeyen mikro yapı, yüksek yüzey pürüzlülüğü vb.) yer verilmemelidir.
- ✚ Parça dayanım limitlerini aşan yükleme şartlarında (yüksek basınç, yüksek sıcaklık ve yüksek hız gibi) kullanılmamalıdır.
- ✚ Bir yağın viskozitesi sıcaklığa göre değişir. Viskozite indeksi büyük olan yağlar, sıcaklık ile özellikleri daha az değişim gösteren yağlardır. Yağlayıcı ile çalışan ortamlarda yüksek viskozite değerli ve yüksek basınca dayanıklı yağlar (fosfor ve kükürt katkılı) kullanılarak yağ filminin çabuk bozulması önenebilir. Bununla beraber, katkılı yağların oksidasyon aşınmasını artırıcı bir rol oynadığı da düşünüldüğünde malzeme seçiminde daha dikkatli olunmalıdır.
- ✚ Soğutucu seçimi, parçanın çalışma ortamına uygun biçimde olmalıdır.

- ✚ Yağlayıcı ve soğutucunun uygun bir filtreleme işleminden geçirilerek içindeki aşındırıcı partüküllerin sisteme tekrar girmesine engel olunmalıdır.
- ✚ Yağlayıcının kontrolleri düzenli olarak yapılmalı ve en düşük kullanım limiti belirlenerek belli aralıklarla yenilenmelidir (Anonim 2015c).

#### **2.4.6. Aşınmanın Mukavemetinin Arttırılması**

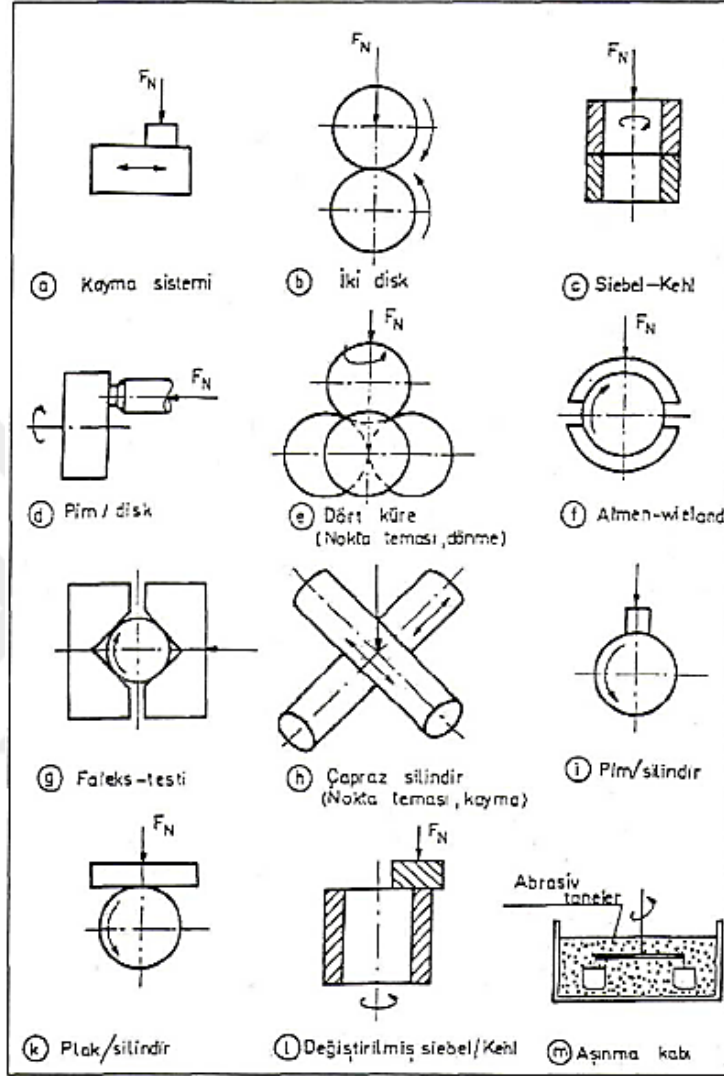
Sürtünme kuvvetinin etkisini düşürmek suretiyle aşınmayı azaltma çalışmaları hem en eski, hem de en büyük katkısı olan araştırma doğrultularından birisidir. Bu çalışmalar ise “sürtünme sistemini yağlama” esasına dayanır. Hidrodinamik yağlamanın mümkün olmadığı, yetersiz yağlamanın söz konusu olduğu veya kullanma konforu ve temizlik açısından yağlamanın istenmediği yer ve makinaların varlığı göz önüne alınırsa, sürtünme ve aşınmayı düşürme çalışmalarının sürtünme elemanları üzerinde yoğunlaştırılması gerektiği ortaya çıkar. Aşınma mukavemetini arttırmak için sürdürülen araştırma doğrultuları şu esaslarda özetle toplanabilir:

- ✚ Aşınma direnci yüksek malzemelerin araştırılması ve geliştirilmesi
- ✚ Sürtünme-aşınma yüzeylerinin kaplama teknolojisinin geliştirilmesi
- ✚ Sürtünme çiftlerinin (malzeme yönünden birbirine göre) uygun seçimi,
- ✚ Aşınan yüzey bölgesine yabancı atomların difüzyonuyla, temel malzeme özelliklerinin bilinçli olarak değiştirilmesi ve yöntemleri,
- ✚ Soğuk deformasyon ile yüzey bölgesi özelliklerinin (sertlik, iç gerilme, tekstür gibi) değiştirilmesi,
- ✚ Isıl işlemlerle temel malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi (Anonim 2015c).

#### **2.4.7. Sürtünme-Aşınma Deney Düzenekleri**

Gerek sürtünme ve aşınmanın azaltılması veya kontrol edilmesi ve gerekse diğer malzeme özellikleriyle optimizasyonu, sistematik bir araştırmayı gerektirmektedir. Sistematik bir araştırma ise ancak çalışma koşulları, istenilen yönde değiştirilebilen ve/veya deney sırasında sabit tutulabilen model-deney düzenekleri yardımıyla olur. Laboratuvarlarda kullanılan sürtünme-aşınma deney cihazı belirli şartlarda (mesela belirli yüzey basıncı, kayma hızı, sıcaklık altında) aşınmanın oluşumu, değişimi ve miktarının

ayin edilmesine imkân verir. Ancak bu düzenekler ön görülen şartlarda çalışan, amprık esaslara göre yapılmıştır. Bu nedenle elde edilen sonuçlar genel olmaktan ziyade, aşınma durumu hakkında bir sınırlama yapmaya yararlar.



Şekil 2.39. Sürtünme aşınma deney düzenekleri (Demirci 1982)

Şekil 2.39'da gösterilen bu deney düzenekleri çoğu defa aşınmanın nasıl meydana geldiğini değil, şartlara göre nasıl değiştiğini incelemeye yararlar. Tribolojik sorunların çözümünde kullanılacak bir deney düzeneğinin seçimi, simule edilecek gerçek sistemin özellikleri göz önüne alınarak yapılır veya o doğrultuda yaklaşırsa, laboratuvarında bulunan deney sonuçlarının teknik sistemlere aktarılması sorunu o kadar azaltılmış olur. Bu yaklaşım için kriter, sisteme etki eden unsurlar ve bunların sonucu olan etken

aşınma mekanizmalarıdır. Temas geometrisi (nokta, çizgi ve yüzey temasları), hareket şekli ve sıcaklık gibi unsurlar doğru bir simülasyon için gerçek sistemle aynı şekil ve büyüklükte olmalıdır. Hız, sürtünme süresi (veya yolu) ve yükleme miktarı gibi unsurların belirli oranlarda küçülterek deney standında uygulanması, sonuçların gerçek sistemlere aktarılmasında ek sorunlar doğurmadığı gibi, ayrıca uygulama kolaylığı sağlayacaktır (Anonim 2015c).

#### **2.4.8. Aşınma Miktarlarını Ölçme Yöntemleri**

Endüstride kullanılan makina ve ekipmanlarının kullanım süreleri son derece önemlidir. Makina parçalarının çabuk aşınması onların kullanım sürelerini kısalttığı gibi, maliyetlerini de arttırmaktadır. Aynı zamanda bu makina ve ekipmanların bakım ve onarımı için geçen süreler ise, üretimde önemli oranda aksamalara yol açmaktadır. Bu nedenlerden ötürü, makine imalatı sürecinde aşınmaya uğrayacak parçaların üretiminde kullanılacak malzemelerin aşınma direncinin yüksek olması gerekir. Aşınmada esas, sabit kayma hız değeri ve basınç kuvvetinde kütleli aşınma kaybının kayma yoluna göre belirlenmesidir. Ayrıca aşınma boyunca; sürtünme katsayısı ya da buna bağlı olarak sürtünme kuvveti, aşınan taneciklerin şekli, aşınan yüzeyin sıcaklığı, yüzey oksidasyonu ile yüzeyin sertliğindeki değişimlerinden de değişken parametre olarak faydalanılmaktadır. Abrasiv aşınma için en çok kabul gören test mekanizmasıdır (Anonim 2015c).

Aşınma miktarını ölçme sistemlerinden uygun olanın belirlenmesi, sürtünme çiftlerinin materyal özelliklerine ve tribolojik sistemin yapısıyla ilgili olarak gerçekleştirilmelidir. Yüksek derecede hassasiyet, kolay ve seri şartlara uygunluk, sistemlerde ve modellerde eş zamanlı uygulanabilmesi, ekonomik olması, ölçme sistemlerinden beklenen özelliklerdir.

##### **2.4.8.1. Ağırlık Farkı Yöntemi**

Ekonomik açıdan uygunluğu ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesi içerisinde olması nedeniyle, en fazla kullanılan yöntem ağırlık farkı yöntemidir. Her ölçüm sonucunda deney numunesinin yerinden çıkarılıp işlem yapılması ise bu metodun

olumsuz tarafıdır. Ağırlık azalmasının ölçülmesi 0,0001 ya da 0,00001 gr hassasiyet değerinde, duyarlı bir terazi yardımı ile yapılabilir. Aşınma birimi gram ya da miligram türünden belirtilirse metre ya da kilometre olarak tespit edilen sürtünme yoluna göre birim sürtünme yoluna eşdeğer ağırlık kaybı (g/m) ya da (mg/m) ile belirtilir.

Ağırlık azalmasından yola çıkarak kullanılan materyalin yoğunluğu ve deney örneği üzerine tesir eden yükleme ağırlığı göz önüne alınarak, birim yol ve birim yükleme ağırlığına eşdeğer hacim kaybından yola çıkılarak bulunur. Bu tanımdan hareket edilerek en fazla kullanılan ağırlık farkı ölçme yönteminde faydalanılan bağıntı özetle;

$$W_a = \Delta G/d.M.S$$

$$W_a = \text{Aşınma Oranı (mm}^3\text{/Nm)}$$

$$\Delta G = \text{Ağırlık kaybı (mg)}$$

$$M = \text{Yükleme ağırlığı (N)}$$

$$S = \text{Aşınma yolu (m)}$$

$$d = \text{Cismin yoğunluğu (gr/cm}^3\text{)}$$

Aşınma oranının ( $W_a$ ) tersi aşınma direncidir ve ( $W_r$ ) olarak ifade edilir:

$$W_r = 1/W_a \text{ (Nm/mm}^3\text{)} \text{ (Anonim 2015c).}$$

#### **2.4.8.2. Kalınlık Farkı Yöntemi**

Aşınma süresince meydana gelecek ebat değişiminin ölçülmesi başlangıç değeriyle mukayese edilmesi neticesinde tespit edilir. Bu değerden hareket edilerek hacimsel kayıp ve birim hacimdeki aşınma değeri tespit edilebilir. Kalınlık hassas ölçme ekipmanları kullanılarak  $-1, +1 \mu\text{m}$  duyarlılıkta ölçülmelidir (Anonim 2015c).

#### **2.4.8.3. İz Değişimi Ölçme Yöntemi**

Sürtünme yüzeyine geometrisi belli olan bir izin (küre, koni v.b.) plastik deformasyonla oluşturulması ve oluşturulan bu izin karakteristik bir boyutunun (çap, köşegen v.b.) deney boyunca ölçülmesi esasına dayanır. Uygulamada en fazla faydalanılan alet “Vickers Sertlik Ölçme Cihazı”dır (Anonim 2015c).



#### **2.4.8.4. Bilgisayar Destekli Aşınma Test Yöntemi (BDAT)**

Bu yöntemde aşınma ve aşınma değişkenlerine ait veriler, esas itibari ile pim disk aşınma test mekanizmasına ilave edilen veriler, kontrol kartı üzerinden bilgisayara aktarılır ve hazırlanan paket programlarda değerlendirilir. Implant Sciences Corp. tarafından geliştirilen ISC-200PC real-time pim-disk aşınma test yöntemi en çok rağbet gören örneklerden biridir. Bu yöntemde numune, devir sayısı değiştirilebilen bir tabla üzerine yerleştirilmekte ve yük, hız, sürtünme katsayısı veya devir sayısı gibi değişkenler tespit edilebilmektedir. Ayrıca temas yüzeyinde oluşan Herz basıncı da ölçülebilmektedir. Ayrıca, pim üzerine uygulanan Herz basıncı sonucunda pim ve disk yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin profili bir çizici ile belirlenmektedir. Bu yöntemin en önemli üstünlüğü, aşınma testlerinin daha hızlı ve daha az numune ile yapılabilmesine olanak sağlamasıdır (Anonim 2015c).

#### **2.4.8.5 Radyonüklid Tekniği İle Aşınmanın Ölçülmesi (RNT)**

İlk defa Almanya'da Daimler-Benz AG tarafından geliştirilen bu metotla tribolojik sistem hakkında diğer ölçme yöntemlerinde elde edilemeyen daha detaylı bilgiler elde edilebilmektedir. Radyoaktif nükleidler yardımıyla aşınma miktarının tespiti, aşınma sırasında aşınan tanelerce emilen gama ışınının ölçümü temeline dayanır.

Bu teknikte, test parçası atomik parçacıklarca bombardımana tutulur. Bunun sonucunda kararlı yapıdaki test parçası, radyoaktif yani kararsız çekirdek halini alır. Atomik partiküller termal nötronlardır ve nükleer reaktörlerden elde edilir. Aşınma testi sonucu aşınan tanecikler yağ ile ölçme odasına gönderilir. Ölçme odasına taşınan aşınma partiküllerinin toplam radyoaktiflikleri scintillation detektörü ile belirlenir. Toplam radyoaktiflik ile toplam aşınma miktarı arasında doğrusal bir ilişki belirlenmiştir. Böylece, aşınma miktarı tespit edilen partikül aktifliğine kalibre edilerek bulunmaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajı, gerçek işletme şartlarında test yapılabilmesidir. Ayrıca, yüzeyde kısmi bir bölge aktif hale getirilerek sınırlı bir bölgede çok küçük aşınma miktarlarını ölçmek mümkündür. Yalnızca metalik malzemelere uygulanması, teknolojisi ve maliyetinin yüksekliği yaygın olarak kullanılmasını engellemektedir (Anonim 2015c).

#### **2.4.8.6. On-Line İzleme Metodu**

Lazer diyot tarafından üretilen ışığın fiber optik vasıtasıyla iş parçası üzerine gönderilmesi ve iş parçası üzerinden yansıyan ışığın başka bir fiber optik vasıtasıyla alınarak foto diyot üzerine düşürülmesi sonucunda foto diyot çıkışından alınan voltaj değerlerinin analog/dijital dönüştürücü vasıtasıyla bilgisayarda depolanması esasına bağlı dolaylı bir ölçme yöntemidir. Aşınma, yansıyan ışık şiddeti ile orantılıdır. Fiber optik, algılayıcı-yükseltici (foto diyot) ve analog dijital dönüştürücü, optik algılama sisteminin temel elemanlarını oluşturmaktadır (Anonim 2015c).

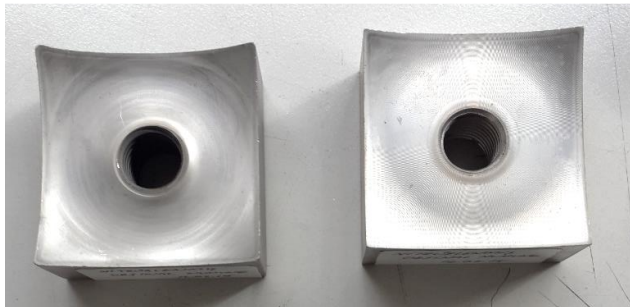


### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölüm kapsamında, tez çalışmasındaki tüm denemelerde kullanılan DIN 1.2379 / AISI D2 çeliğinin mekanik özellikleri ve bu malzemeden üretilmiş olan ATY tesisi kırıcı bıçaklarının çalışma verimliliği arttırmak amacıyla uygulanan PN işleminin içeriği konu edinilmiştir.

#### 3.1. Materyal

Çalışmalar kapsamında, çimento fabrikası ATY tesisinde yer alan mekanik kırıcı üzerindeki kesme bıçakları incelenmiştir. Çalışmaların gerçekleştirildiği II. mekanik kırıcı tek rotorlu olup, belli bir diziliş şeklinde toplamda 114 adet kırıcı bıçağa sahiptir. Kare prizma şeklinde olan bu bıçakların 4 kenarı keskin geometrik özellikte olup, çalışma şartlarının kısıtlamalarından dolayı sadece karşılıklı 2 kenarı efektif olarak kırma ve parçalama işlemleri için kullanılabilir. Kırma ve parçalama işlemlerini gerçekleştiren kırıcı bıçakların karşılıklı 2 kenarı aşındıktan sonra ilgili bıçak çalışma ömrünü tamamlayarak yenisi ile değiştirilmektedir. Çimento firması ATY tesisinde yer alan bu II. kırıcıda, yaklaşık aynı geometride ancak; farklı tedarikçilerden temin edilen yerli ve ithal ürün olarak Şekil 3.1 'de görüleceği üzere 2 farklı bıçak kullanılmaktadır. Çizelge 3.1.'de denemelerde kullanılan DIN 1.2379 / AISI D2 çeliğine ait genel mekanik özellikler verilmiş olup, Çizelge 3.2'de ise malzemenin standart kimyasal bileşimi verilmiştir. Testlerde kullanılan ithal ve yerli kesici bıçakların kimyasal kompozisyonları Çizelge 3.3 ve 3.4'te detaylarıyla verilmiştir. Çizelge 3.5'te iki farklı kesicinin kimyasal kompozisyonları arasındaki fark gösterilmiş olup, Çizelge 3.6.'da ise kimyasal elementlerin çeliğin mekanik özelliklerine etkisinden bahsedilmiştir.



**Şekil 3. 1.** Çalışmalarda kullanılan yerli (soldaki) ve ithal(sağdaki) kırıcı kesici bıçakları

**Çizelge 3. 1.** DIN 1.2379 / AISI D2 çeliği genel özellikleri (Anonim 2016d)

DIN 1.2379 / AISI D2 ÇELİĞİ ÖZELLİKLERİ	
Malzeme Türü	Soğuk Takım İş Çeliği
Kullanım Yeri	Kesme ve bükme kalıpları, derin çekme kalıpları
DIN Normu	1.2379 ya da X 155 CrVMo 12 1
AISI Normu	D2
Yumuşatma Tavı Derecesi	800-850 °C
Gerilim Alma Derecesi	650-700 °C
Yoğunluk (Oda Sıc.)	7,70 g/cm <sup>3</sup>
Mekanik Özellikler	Yüksek tokluk ve yüksek aşınma direnci
Sertleştirme Sonrası Sertlik	63-65 HRC

**Çizelge 3. 2.** Standart D2 çeliği kimyasal bileşimi (% ağırlıkça) (Anonim 2016d)

Element	C	Cr	Mn	Si	Mo	V
%	1.50±0.10	11.75±0.5	0.30±0.10	0.30±0.10	0.75±0.10	1.00±0.10

Çalışmalarda kullanılan İKB ve YKB'ye ait kimyasal analizler Kosgeb Bursa laboratuvarında yapılan analizleri aşağıda sırası ile Çizelge 3.3 ve 3.4.'te verilmiştir.

**Çizelge 3. 3.** İthal ürün kesici bıçak (İKB) kimyasal bileşimi (Kosgeb-Bursa Lab.)

Element	C	Cr	Mn	Si	Mo	V	Ni	Al	Ti	W
%	1.568	11.61	0.458	0.383	0.878	0.736	0.542	0,032	0,001	0,149

**Çizelge 3. 4.** Yerli ürün kesici bıçak (YKB) kimyasal bileşimi (Kosgeb-Bursa Lab.)

Element	C	Cr	Mn	Si	Mo	V	Ni	Al	Ti	W
%	1.485	11.79	0.327	0.458	0.986	0.718	0.136	0,016	0,006	0,082

Yerli ürün ve ithal ürün soğuk takım çeliği olan kesici bıçaklar kimyasal bileşimleri yönünden kıyaslandığında Çizelge 3.5'te belirtilen farklar göze çarpmaktadır.

**Çizelge 3. 5.** İthal ve Yerli ürün kesici bıçak kimyasal bileşimi önemli farklar

	% C	% Cr	% Ni	% Mn	% Mo
İKB	1.568	11.61	0.542	0.458	0.878
YKB	1.485	11.79	0.136	0.327	0.986
$\Delta$	<b>0.083</b>	<b>0.18</b>	<b>0.406</b>	<b>0.131</b>	<b>0.108</b>

Çizelge 3.5.'te  $\Delta$  ile tanımlanan fark, ithal ve yerli kesici bıçakların kimyasal kompozisyonlarında yer alan elementlerin yüzdesel olarak farkını göstermektedir. Çizelgeden de görüleceği üzere, iki farklı tedarikçiden temin edilen D2 çeliklerinden ithal olan ürün yerli ürüne göre karbon oranı olarak % 0.083, nikel oranı olarak % 0.406 (4 kat), mangan oranı olarak % 0.131 fazla alaşım elementi ihtiva etmekte olup, yerli ürün ise ithal ürüne göre krom oranı olarak %0.18, molibden oranı olarak %0.108 oranında daha fazla alaşım elementi ihtiva etmektedir. Alaşım elementlerinin çeliğin yapısal özellikleri üzerine etkisi özet halinde Çizelge 3.6'da gösterilmektedir.

**Çizelge 3. 6.** Değişik alaşım elementlerinin çeliğin özelliklerine etkileri (Anonim, 2015c)

<b>ÖZELLİK</b> <b>ELEMENT</b>	<b>Sertleşebilirlik</b>	<b>Aşınma Dayanımı</b>	<b>Tokluk</b>	<b>Meneviş Kalcılığı</b>	<b>Sıcak Sertlik</b>	<b>Boyut Kalcılığı</b>
Karbon C	+	+++	---	+	+	0
Krom Cr	++	++	-	+	+	+
Molibden Mo	+	++	-	++	++	+
Vanadyum V	+	+++	-	++	++	+
Volfram W	+	++	-	++	++	+
Nikel Ni	+	0	++	0	0	+
Kobalt Co	-	0	-	+	+	0
Manganez Mn	+	0	++	0	0	+

### 3.2. Yöntem

Saha çalışmalarında kullanılan ATY tesisi kırıcı bıçaklarının çalışma verimliliklerini mekanik olarak arttırmak için plazma nitrüleme yüzey kaplama metodu kullanılmıştır. Yönteme ait tüm detaylar aşağıdaki bölümlerde paylaşılmıştır.

#### 3.2.1. Plazma Nitrüleme (PN)

Çalışmada kullanılan kesici bıçaklar 3 farklı zaman reçetesine uygun olarak PN işlemine tabii tutulmuştur. Yapılan 3 farklı test çalışmasında PN sıcaklığı olarak 450°C ve gaz karışım oranı N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> 3:1, basınç değeri ise 250 Pa olarak sabit değerde tutulmuştur. 3 farklı reçetede değişken parametre olarak zaman alınmıştır. Çalışma kapsamında yapılan PN çalışmalarının özeti Çizelge 3.7'de detaylarıyla gösterilmiştir.

**Çizelge 3. 7.** Deneysel çalışmalarda yapılan PN reçeteleri

Test No	Sıcaklık (°C)	Süre (h)	Gaz oranı (N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> )	Basınç (Pa)	PN Uygulanan Numune Adedi
1	450°C	12	3/1	250	3 İKB + 3YKB
2	450°C	18	3/1	250	45 İKB + 15 YKB
3	450°C	24	3/1	250	25 İKB + 25YKB

PN işlemi uygulanan ithal ve yerli kesici bıçaklar test şartlarını tanımlayacak şekilde kodlanarak izlenebilirliği sağlanmış ve ATY tesisinde kullanılmıştır. Çizelge 3.8'de bu izlenebilirlik kodlama sistemi tariflenmiştir.

Çalışmalar kapsamında kesici bıçaklara tüm PN işlemleri, Er&Mir Tekstil Makine San. Tic. Ltd. Şti.'de Plateg PP60 Puls Plazma Nitrüleme cihazı kullanılarak tatbik edilmiştir.

**Çizelge 3. 8.** PN işlemleri kesici bıçak test kodlamaları

<b>İthal Kesici Bıçaklar İKB</b>	V <sub>0</sub>	Alındığı gibi (PN uygulanmamış)
	V <sub>1</sub>	12 saat işlem 450°C 250Pa 3 N <sub>2</sub> /1 H <sub>2</sub>
	V <sub>2</sub>	18 saat işlem 450°C 250Pa 3 N <sub>2</sub> /1 H <sub>2</sub>
	V <sub>3</sub>	24 saat işlem 450°C 250Pa 3 N <sub>2</sub> /1 H <sub>2</sub>
<b>Yerli Kesici Bıçaklar YKB</b>	Y <sub>0</sub>	Alındığı gibi (PN uygulanmamış)
	Y <sub>1</sub>	12 saat işlem 450°C 250Pa 3 N <sub>2</sub> /1 H <sub>2</sub>
	Y <sub>2</sub>	18 saat işlem 450°C 250Pa 3 N <sub>2</sub> /1 H <sub>2</sub>
	Y <sub>3</sub>	24 saat işlem 450°C 250Pa 3 N <sub>2</sub> /1 H <sub>2</sub>

### 3.2.2. Metalografik Muayeneler

Tüm numuneler hassas kesme cihazında kesilerek yüzeye dik yönde bakalite alınmıştır. Kesit yüzeyleri sırasıyla 180, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2000 no'lu su zımparası ile zımparalanmıştır. Daha sonra 1 µm ve 0,3 µm'luk alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) parlatma solüsyonları ile parlatılmıştır.

Dağlama işlemi için numuneler %5'lik Nital kullanılarak 10 saniye bekletilmiştir. Mikroyapılar Nikon Eclipse MA100 marka optik mikroskop kullanılarak 100, 200, 500, 1000 büyütme altında incelenmiş ve Clemex görüntü analiz sistemi ile fotoğrafları bilgisayar üzerinden alınmıştır.

### 3.2.3. Mikro Sertlik Ölçümleri

Sertlik ölçümleri Vickers yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Ölçümlerde DUROLINE-M sertlik ölçüm cihazı kullanılmış, 10 g yük ve 10 s bekleme ile ölçümler alınmıştır. PN uygulanmış numunelerde metalografik muayene için hazırlanan numunelerden sertlik dağılımları ölçülmüştür. Tüm sertlik ölçümlerinde beş adet ölçüm yapılarak aritmetik ortalama alınmıştır. Ayrıca aşağıdaki istatistikî bilgiler hesaplanmıştır.

**Standart sapma,  $\sigma$**  : Veri değerlerinin aritmetik ortalamadan ( $\bar{X}$ ) farklarının karelerinin toplamının ortalamasının karekök değeridir  $\left( \sqrt{\frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \right)$

**Standart hata** : Aritmetik ortalamada oluşan hatanın bir ölçüsüdür ( $\sigma / \sqrt{n}$ )

**Varyasyon katsayısı**: Standart sapmanın ortalama değere göre yüzde kaç oranda değişim gösterdiğini gösterir  $\left( \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100 \right)$

**Range** : Veri değerleri içerisinde en büyük ve en küçük değer farkıdır. ( $X_{max} - X_{min}$ )

### 3.2.4. Aşınma Saha Denemeleri

Saha denemelerinin gerçekleştirildiği çimento fabrikasına ait ATY tesisi 2011 yılında kurulmuş olup, bölgedeki fabrikaların tekstil, plastik, ahşap, sünger, karton, kauçuk, keçe, kurutulmuş çamur, otomotiv sanayi atıkları, yağlı bezler ve kullanılmış kağıtlar gibi maddi değeri kalmayan malzemelerini kullanarak geri dönüşüme kazandırmaktadır. Tesis bünyesinde yer alan 1 adet 25 ton/saat kapasiteli I. kırıcı, 1 adet 10 ton/saat kapasiteli II. seviye kırıcı ve ATY tesis ekipmanları ile faaliyetine devam etmektedir. I. kırıcıda yer alan 2 adet döner rotor üzerinde 26+26 olmak üzere toplamda 52 adet rotor kesici bıçağı ve 8 adet rotor altı testere tipi sabit bıçaklar mevcuttur. II. kırıcıda ise tek rotor üzerinde toplamda 114 rotor bıçağı ve alt ve üst tablalara sabitlenmiş 12 testere tipi sabit bıçak mevcuttur.

Bursa sanayisinden temin edilen endüstriyel atıklar büyük manyetik mıknatıs ile metal ayrıştırma işlemine tabi tutularak 25 ton/saat kapasiteli ön kırıcıda kırılıp 100-200 mm'ye parçalanmaktadır ve devamında metal seperatörden geçirilip içerisindeki metal tekrar ayrıştırılmaktadır. Sonrasında havalı seperatörden geçirerek malzeme içerisindeki taş, toprak, cam vs. gibi inert malzemeler sistemin dışına alınmaktadır. Bu ön işlemlerden geçen malzeme 10 ton/saat kapasiteli nihai kırıcıda 30 mm altına parçalanarak peletlenir ve çimento üretimi için alternatif yakıt olarak kullanıma hazır hale gelmektedir. Kırıcılar aylık ortalama 2500-3000 ton işlenmiş atık üretme ve günlük ortalama 2500-3500 kalori değerinde fayda ısıyı klinker hattına besleme yapabilme kapasitesine sahiptir.



ATY tesisi faaliyeti başlangıcından bu yana geçen 5 yıllık süre içerisinde yaklaşık 120 bin ton atık geri dönüşüme kazandırmıştır. Bunun yanı sıra tesisin faaliyeti sayesinde 2011 yılı içerisinde 16 bin 972 ton, 2012 yılı içerisinde 19 bin 26 ton, 2013 yılı içerisinde 24 bin 89 ton, 2014 yılı içerisinde 18 bin 188 ton, 2015 yılında ise 20bin 419 ton kömür tasarrufunda bulunulmuştur.

Saha denemeleri II. kırıcı rotor kesici bıçakları üzerinde aşağıdaki çizelge 3.9'a göre uygulanmış ve sonuçlandırılmıştır. Saha denemeleri tamamlanan kırıcı bıçaklar II.kırıcı üzerinden sökülerek 3 boyutlu aşınma analizi yapılmıştır. Bu analiz için 3 boyutlu optik ölçüm cihazı olan GOM ATOS II kullanılmıştır. Bu ölçüm sisteminde güçlü halojen bir ışık kaynağı sayesinde ölçüm yapılacak cisim üzerine dokusal özellikleri farklı olan fringe'ler düşürülür (ızgara projeksiyonu). Cismin yüzeyinde yansıyan bu projeksiyonlar cismin şekline göre deformasyon ve kırınımlara uğrar. Projeksiyon sistemiyle belirli bir açı yapacak biçimde yönlendirilmiş yüksek çözünürlükteki bir kamera sistemi bu deformasyon ve kırınım bilgilerini toplar ve nokta bulutu oluşturur. Bu sistemler sayesinde çok sayıda nokta kümelerinin koordinatı çok kısa bir süre içerisinde ölçülür. Bu sayede cismin yüzey bilgisini içeren nokta bulutu oluşturulmuş ve tersine mühendislik uygulamaları için katı model oluşturulmuş olur. Analize öncelikle sahada kullanılmamış İKB ve YKB ile başlanmış ve bu bıçaklar üzerinden master 3D matematik modeller oluşturulmuştur. Bıçakların her açıdan fotoğrafları çekilmek suretiyle 3D matematik modelleri oluşturulmuş ve master data ile karşılaştırılarak aşınmış bölgelerden ölçü alınarak aşınma analizleri gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan STL datalar üzerinden tüm bıçakların aşınma sonrası hacim değerleri hesap edilmiş ve ölçüsel analizin yanı sıra hacimsel olarak ta aşınma analizi gerçekleştirilmiştir.

**Çizelge 3. 9.** Saha aşınma denemeleri

Test No	PN Süresi (h)	Kesici Bıçakların Saha Çalışma Süresi (h)
1	12	52
2	18	52
3	24	52

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

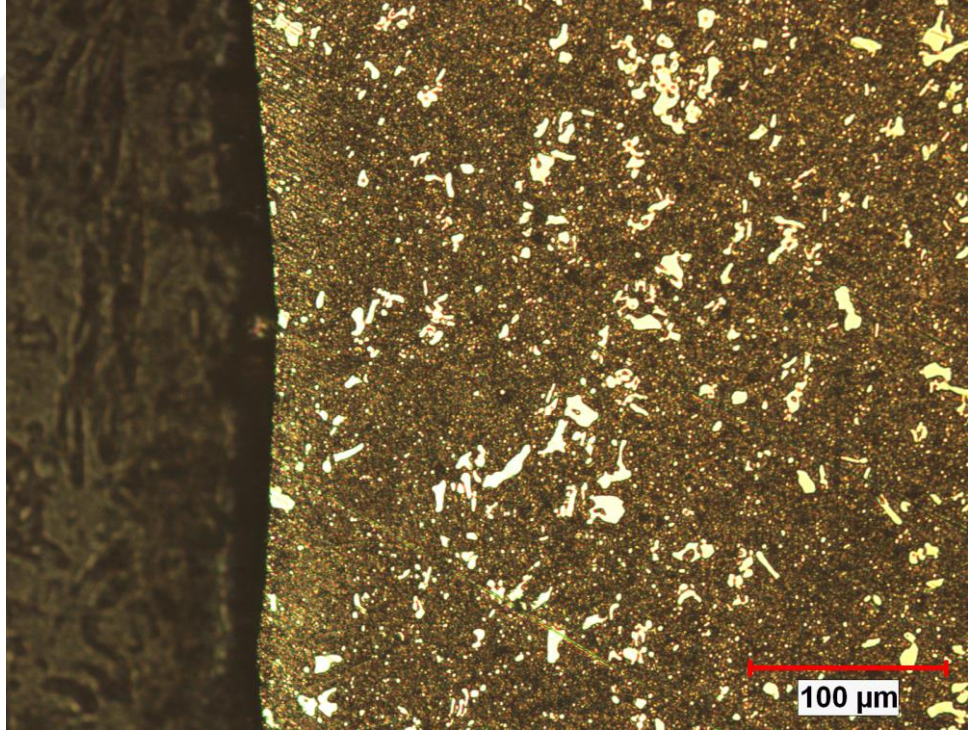
Yapılan çalışmaların sonucu olarak saha denemelerine ait numuneler üzerinden sertlik analizi, mikro yapı analizi ve aşınma analizi gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara ait detaylar aşağıdaki ilgili bölümlerde açıklanmıştır.

### 4.1. Mikro Yapı

PN uygulanmış İKB ve YKB numuneleri üzerinden mikro yapı analizleri gerçekleştirilmiş olup detayları aşağıdaki maddelerde belirtilmiştir.

#### 4.1.1. İKB Numunelerin Mikro Yapısı

PN uygulanmamış İKB  $V_0$  numunesine ait mikro yapı görüntüsü Şekil 4.1'de, 12h PN uygulanan  $V_1$  numunesi, 18h PN uygulanan  $V_2$  numunesi ve 24h PN uygulanan  $V_3$  numunesine ait optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4'te verilmiştir.



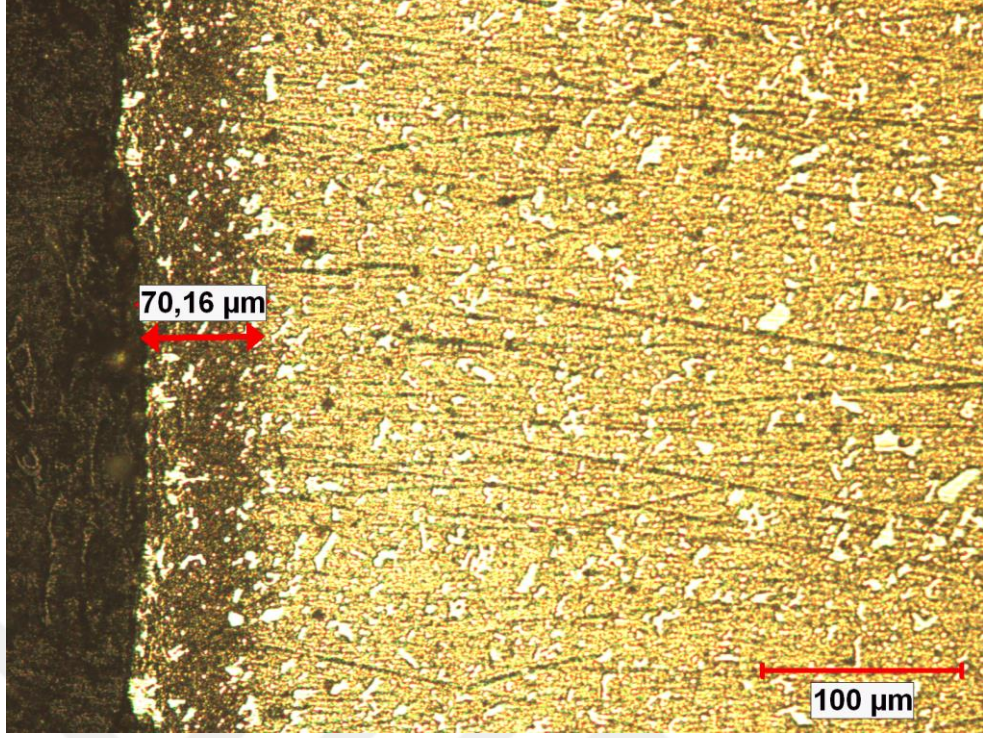
Şekil 4. 1. İKB  $V_0$  (PN uygulanmamış) numunesine ait mikro yapı görüntüsü (200x)

Saf demir nitrürlendiğinde üç farklı Fe-N fazı oluşur: 1) Azot, hacim merkezli kübik (HMK) Fe kafes içerisinde oktahedral düzende arayer atomu olarak rasgele dağılmış vaziyette bulunur. 2) Yüzey merkezli kübik (YMK) Fe kafes içerisinde oktahedral düzende ara yer atomu olarak düzenli bir şekilde bulunduğu  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N fazı. 3) Hegzagonal sıkı paket (HSP) Fe kafes içerisinde oktahedral düzende ara yer atomu olarak kısmen düzenli bir şekilde bulunduğu  $\epsilon$ -Fe<sub>2</sub>N fazı. Nitrüleme şartları  $\epsilon$  fazı oluşumunu desteklerse bu faz yüzeyde oluşur.  $\gamma'$  fazı ise  $\epsilon$  fazının altında oluşur. Bileşen tabakası olarak adlandırılan bu bölgenin altında Azotun  $\alpha$ -Fe içerisinde ara yer olarak çözüldüğü yayılım tabakası bulunur. Örneğin Krom, Azotun demir matris içerisindeki aktivitesini düşürdüğünden dolayı demir nitrür oluşumunu azaltır. YMK CrN ve hegzagonal Cr<sub>2</sub>N çökelti fazları birbirleri ile uyumlu veya yarı uyumlu şekilde çekirdeklenir ve büyür. Nitrüleme süresinin artması ile CrN partikülleri büyür. (Schacherl ve ark. 2004, çeviri: Korkmaz 2009).

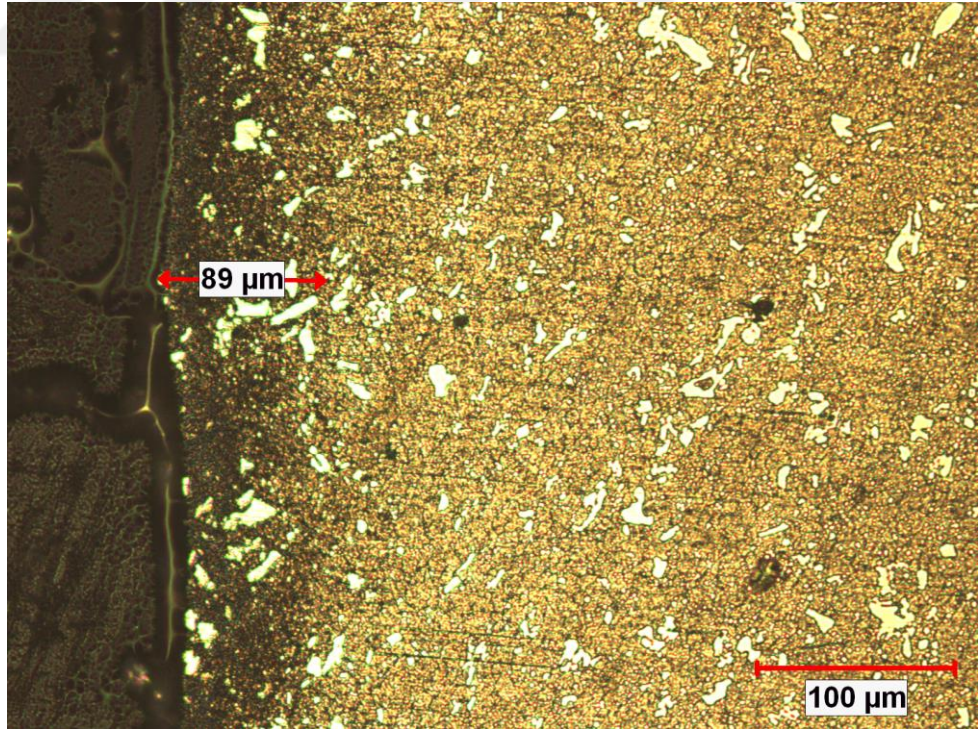
Matris yapının normal Azot taşıma kapasitesinin aşılması durumunda ortaya çıkan fazla Azot üç şekilde bulunabilir: 1) Dislokasyonlarda tutulan, 2) Matris/çökelti ara yüzünde absorbe edilen, 3)  $\alpha$ -Fe matris içinde ek olarak çözülmüş halde (matris gerilme altındadır). Matris çökelti ara yüzünde absorbe edilen fazla Azot, nitrüleme süresi arttıkça CrN ile  $\alpha$ -Fe ara yüzünde tutunamayabilir ve birleşerek moleküler Azot oluşur. Bunun sonucu olarak yapıda boşluklar (porozite) meydana gelir (Devi 1998, çeviri: Korkmaz 2009).

12 saat PN işlemi uygulanmış V<sub>1</sub> İKB numunesinde nitrülenme difüzyon bölgesi belirgin olup, mikro yapı görüntülerinden alınan ölçümlerde difüzyon bölgesi yaklaşık olarak 70 $\mu$  olarak ölçülmüştür.

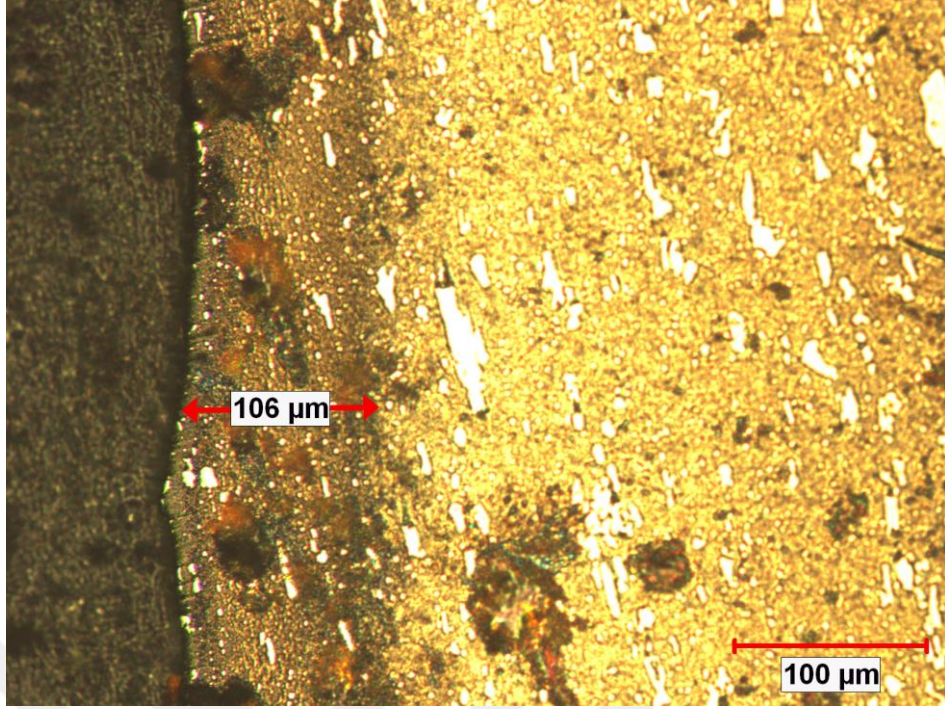
18 saat PN işlemi uygulanmış V<sub>2</sub> ve 24 saat PN işlemi uygulanmış V<sub>3</sub> İKB numunelerinde nitrülenme difüzyon bölgesi belirgin olup, mikro yapı görüntülerinden alınan ölçümlerde difüzyon bölgesi yaklaşık olarak V<sub>2</sub> için 89  $\mu$ , V<sub>3</sub> için yaklaşık 106 $\mu$  olarak ölçülmüştür.



Şekil 4. 2. İKB V<sub>1</sub> (12h PN uygulanmış) numunesine ait mikro yapı görüntüsü (200x)

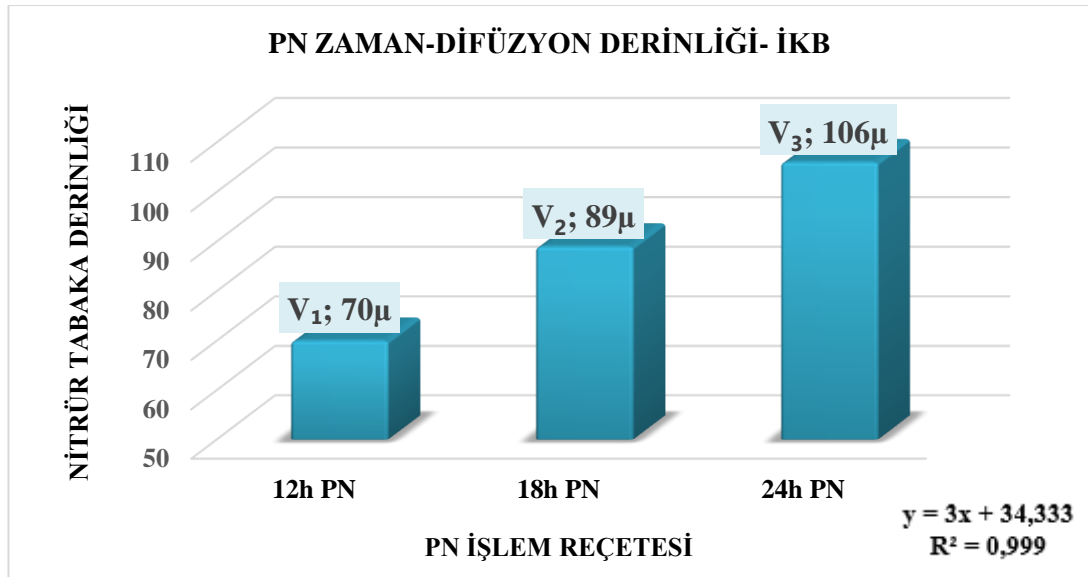


Şekil 4. 3. İKB V<sub>2</sub> (18h PN uygulanmış) numunesine ait mikro yapı görüntüsü (200x)



Şekil 4. 4. İKB V<sub>3</sub> (24h PN uygulanmış) numunesine ait mikro yapı görüntüsü (200x)

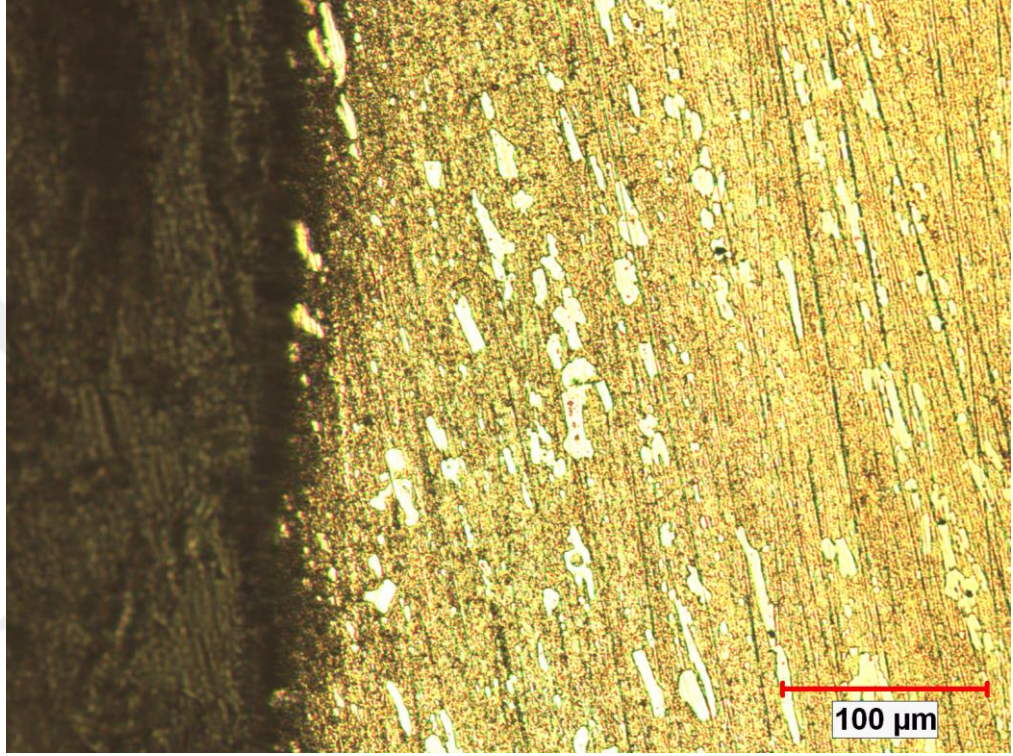
Yapılan mikro yapı analizinde nitrürleme difüzyon derinliğinin zamanla doğru orantılı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. Şekil 4.5'te verilen PN zaman ile nitrür difüzyon derinliği grafiğinde lineer korelasyon katsayısı  $R^2 = 0,999$  olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4. 5. İKB numuneleri PN Zaman-Nitrür tabaka derinliği

#### 4.1.2. YKB Numunelerin Mikro Yapısı

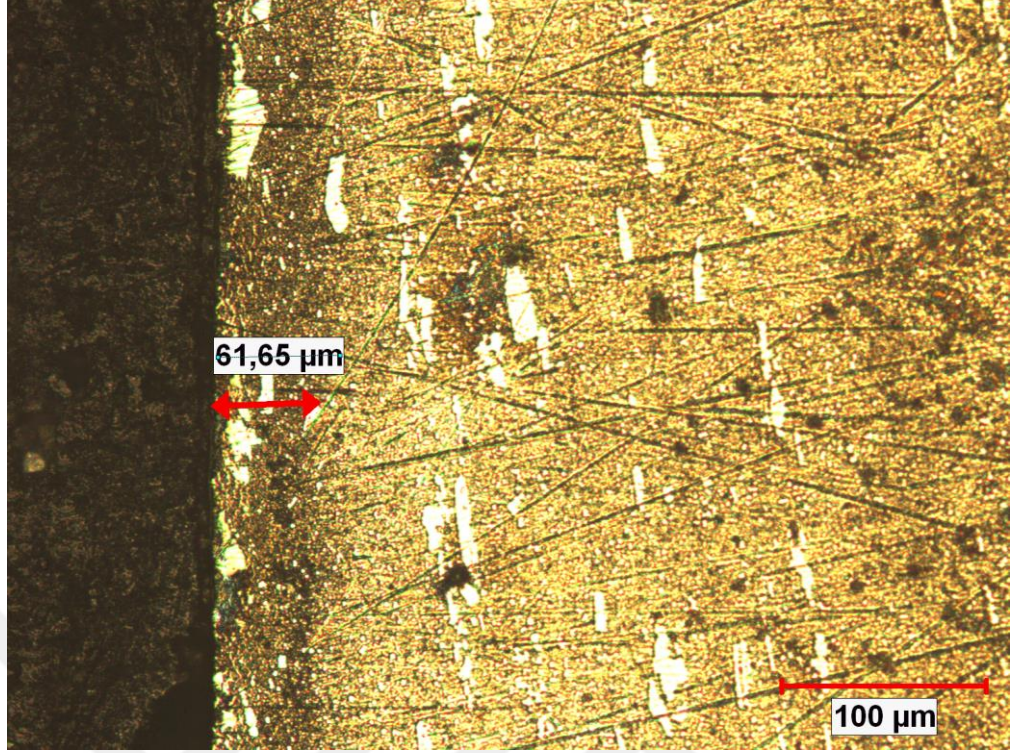
PN uygulanmamış YKB  $Y_0$  numunesine ait optik mikroskop görüntüsü Şekil 4.6'da, PN uygulanmış YKB numuneleri olan  $Y_1$  (12h),  $Y_2$  (18h) ve  $Y_3$  (24h) numunelerine ait görüntüler sırasıyla Şekil 4.7, 4.8 ve 4.9'da gösterilmiştir.



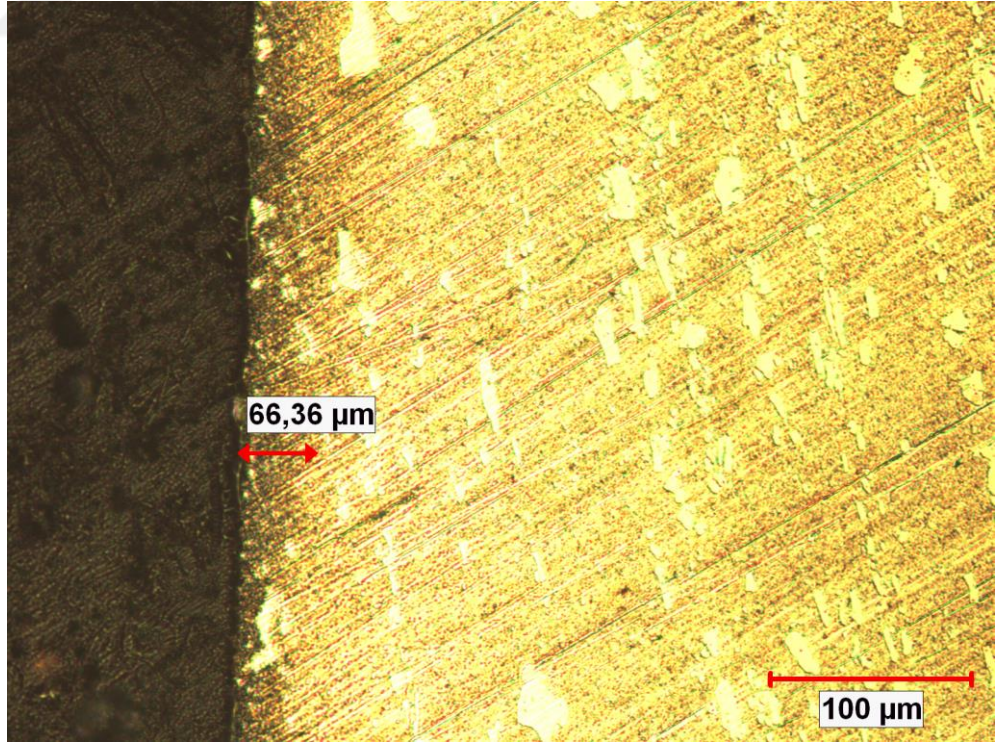
**Şekil 4. 6.** YKB  $Y_0$  (PN uygulanmamış) numunesine ait mikro yapı görüntüsü (200x)

PN uygulanmış tüm YKB numunelerinde difüzyon bölgesi belirgin olup, 12 saat PN işlemi uygulanmış  $Y_1$  numunesinde mikro yapı görüntülerinden alınan ölçümlerde difüzyon bölgesi yaklaşık olarak  $62\mu$ , 18 saat PN uygulanmış  $Y_2$  numunesinde  $66\mu$ , 24 saat PN uygulanmış  $Y_3$  numunesinde ise  $70\mu$  olarak ölçülmüştür.

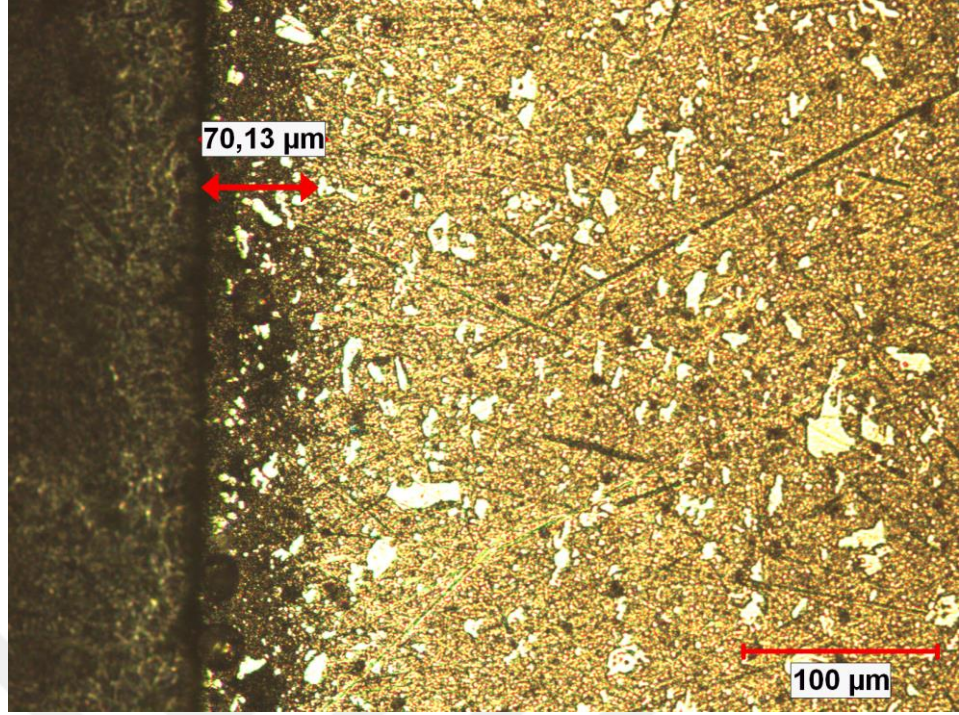
Optik mikroskop ile ölçülen difüzyon tabaka derinliklerinin PN işlem zaman parametresine göre değişimi YKB için Şekil 4.10'da, İKB ve YKB için karşılaştırmalı grafik Şekil 4.11'de verilmiştir. İKB ve YKB numuneleri için PN tabaka derinliği- zaman ilişkisi Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4. 7. YKB Y<sub>1</sub> (12h PN uygulanmış) numunesine ait mikro yapı görüntüsü (200x)

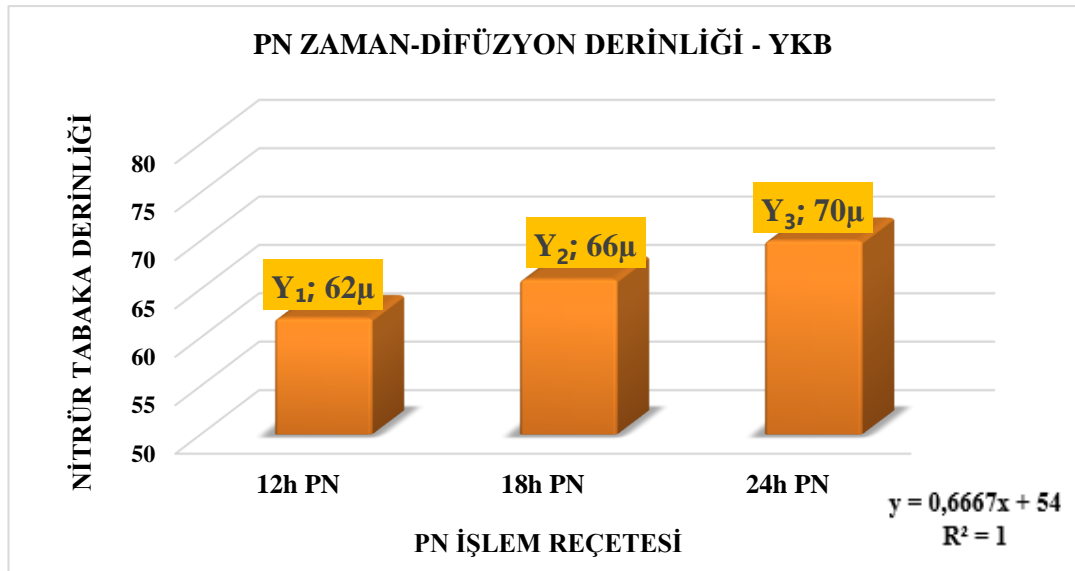


Şekil 4. 8. YKB Y<sub>2</sub> (18h PN uygulanmış) numunesine ait mikro yapı görüntüsü (200x)



Şekil 4. 9. YKB Y<sub>3</sub> (24h PN uygulanmış) numunesine ait mikro yapı görüntüsü (200x)

Yapılan mikro yapı analizinde nitrüleme difüzyon derinliğinin zamanla doğru orantılı olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. Şekil 4.10'da verilen PN zamanı ile nitrür difüzyon derinliği grafiğinde lineer korelasyon katsayısı  $R^2 = 1$  olarak tespit edilmiştir.



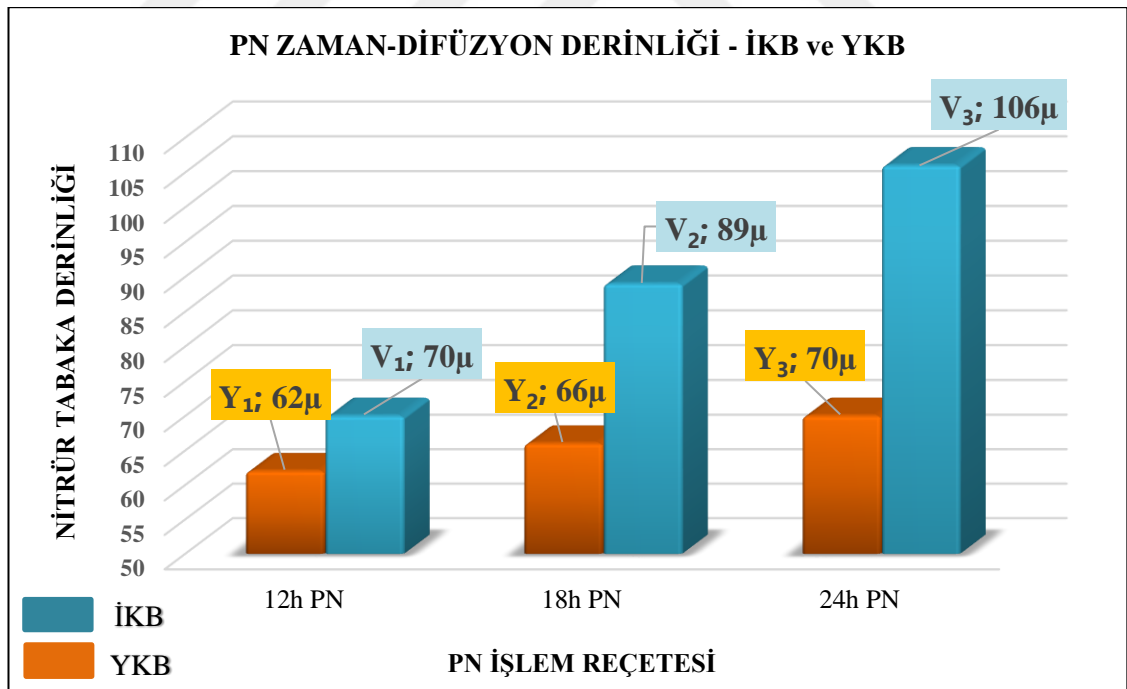
Şekil 4. 10. YKB numuneleri PN Zaman-Nitrür tabaka derinliği



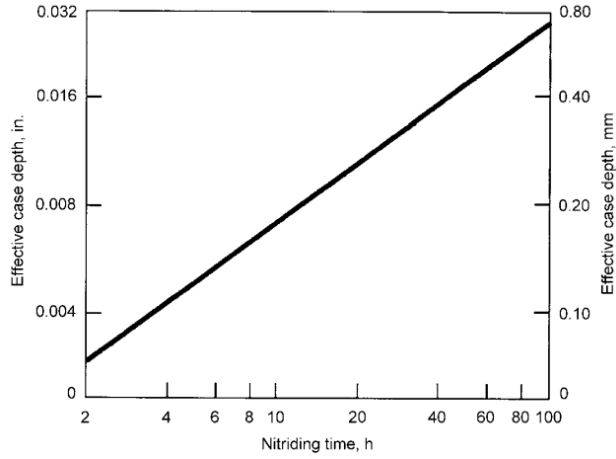
**Çizelge 4. 1.** İKB ve YKB numuneleri Nitrür tabakası derinliği-zaman çizelgesi

PN Reçetesi	Numune	Dif. Tabaka Derinliği
12h	V <sub>1</sub>	70μ
	Y <sub>1</sub>	62μ
18h	V <sub>2</sub>	89μ
	Y <sub>2</sub>	66μ
24h	V <sub>3</sub>	106μ
	Y <sub>3</sub>	70μ

İthal ve yerli kesici bıçak numunelerine (İKB-YKB) 3 farklı zaman reçetesine göre uygulanan PN işlemi sonrasında, difüzyon derinliğinin işlem zamanıyla doğru orantılı olarak lineer artış gösterdiği tespit edilmiştir. Difüzyon derinliğinin zamanla değişimi Şekil 4.11’de gösterilmiştir.

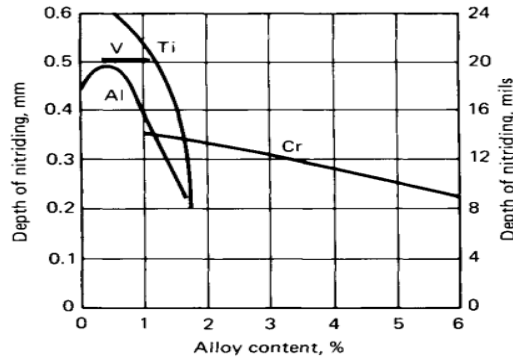


**Şekil 4. 11.** İKB ve YKB numuneleri PN Zaman-Nitrür tabaka derinliği kıyaslaması



**Şekil 4.12.** PN Nitrülemede zaman-difüzyon derinliği ilişkisi (Rakhit, 2000)

Şekil 4.12'de gösterildiği gibi PN proses zamanının artması, nitrüleme difüzyon derinliğini lineer olarak arttırmaktadır. Bu doğrultuda şekil 4.11'de verilen difüzyon derinlik değerleri literatür ile paralellik göstermekte olup en yüksek difüzyon derinliği 24h PN işlem uygulamasında elde edilmiş, en az derinlik ise 12h PN işlem uygulamasında tespit edilmiştir. İKB ve YKB numuneleri için difüzyon bölgesi, Şekil 4.12 'de gösterilen eğride olduğu gibi zaman parametresine göre lineer olarak artış göstermiştir.



**Şekil 4.13.** PN Nitrülemede alaşım elementi-nitrür derinliği ilişkisi (Thelning, 1984)

Alaşım elementlerinden Al, Cr, V, W ve Mo nitrüleme sıcaklığında kararlı ve kuvvetli nitrürler oluşturan önemli nitrür yapıcı özelliklere sahiptir. Özellikle Al elementinin

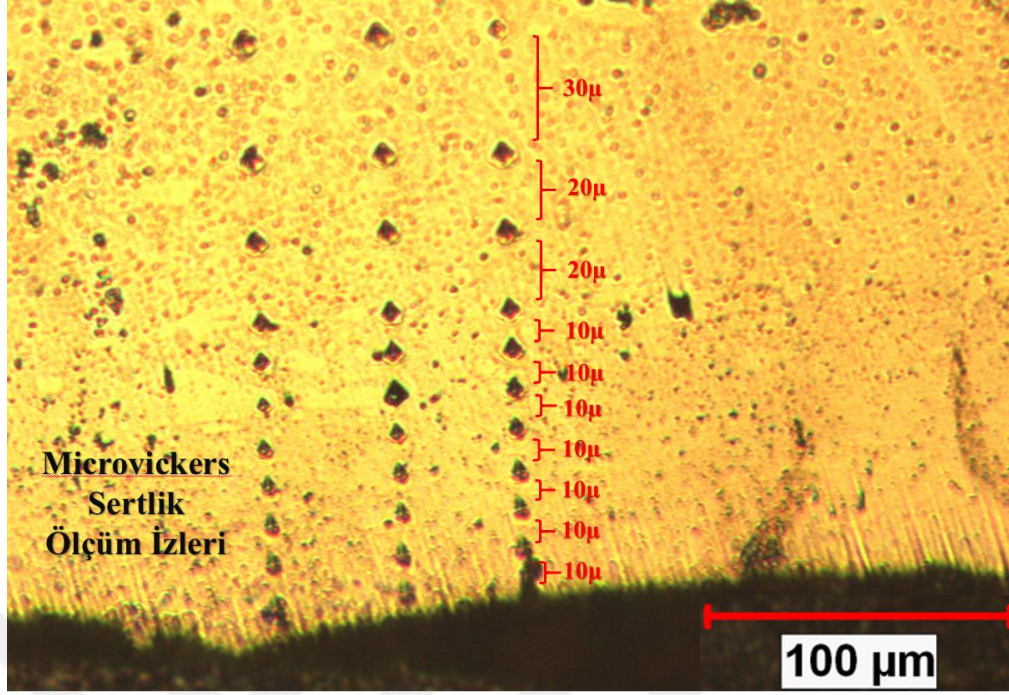
çelikte yaklaşık % 0.85 - % 1.5 oranında bulunması önemli derecede nitrürlenme kabiliyetini artırır (Krauss, 2002).

İKB ve YKB kesici bıçak çelikleri içerisindeki kimyasal kompozisyon farklılığının bu sonucu doğurduğu açıktır.

#### **4.2. Mikro Sertlik Ölçümleri**

PN işlemi uygulanmamış İKB ve YKB numunelerinden 10'ar adet ölçüm alınarak ortalama çekirdek sertlikleri ölçülmüştür. Şekil 4.14 'te gösterildiği gibi, PN işlemi uygulanmış İKB ve YKB numunelerinden yüzeyden itibaren 10 $\mu$  aralıklar ile 5'er ölçüm alınarak ortalama sertlik değerleri elde edilmiştir. Temel malzeme yakınlarında ise ölçüm aralıkları arttırılmıştır. Ölçümler sonucunda İKB numunesi için ortalama sertlik değeri 694 HV<sub>0,01</sub>, YKB numunesi için ortalama sertlik değeri 662 HV<sub>0,01</sub> olarak tespit edilmiştir.

İKB numunelerinde daha fazla % oranda yer alan C, V ve Mn gibi çeliğin sertliğini arttırıcı yönde etki eden alaşım elementleri neticesinde İKB numunelerinin ortalama sertlik değerinin daha yüksek olması daha önce Çizelge 3.6'da verilen alaşım elementlerinin çeliğin sertliğine etkisi ile paralellik göstermiştir. Çizelgelerde sırasıyla PN uygulanmamış ve uygulanmış İKB ve YKB numunelerinin sertlik ölçüm sonuçları verilmiştir;



Şekil 4. 14. Mikro Vickers sertlik ölçümü

#### 4.2.1. İKB Numunelerinin Sertlik Değerleri

PN uygulanmamış İKB  $V_0$  numunesinden ölçülen sertlik değerleri Çizelge 4.2’de, PN uygulanan  $V_1$ ,  $V_2$  ve  $V_3$  numunelerine ait sertlik değerleri ise sırasıyla Çizelge 4.3, 4.4 ve 4.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 4. 2. İKB- $V_0$  Numunesi sertlik ( $HV_{0,01}$ ) ölçüm sonuçları (PN Uygulanmamış)

Ölçümler		Aritm. Ort.	Std. Sapma	Range	Varyasyon %	Std. Hata
690,2	713	<b>693,84</b>	<b>12,46</b>	<b>35,10</b>	<b>1,80</b>	<b>5,57</b>
680,9	685,8					
677,9	700,4					
705,1	690,3					
710,1	684,7					

PN işlemi sırasında azot malzeme yüzeyinden içeriye doğru yayılır, sonuç olarak nitrürlenmiş bir bölge oluşur ve genellikle bileşen tabakası ve bunun hemen altında yer alan yayılım tabakası olarak ikiye ayrılır. Yayılım tabakasında azot arayer atomu şekline çözünür veya alaşım elementleri ile nitrür çökeltileri oluşturur (Pye 2003). Nitrür

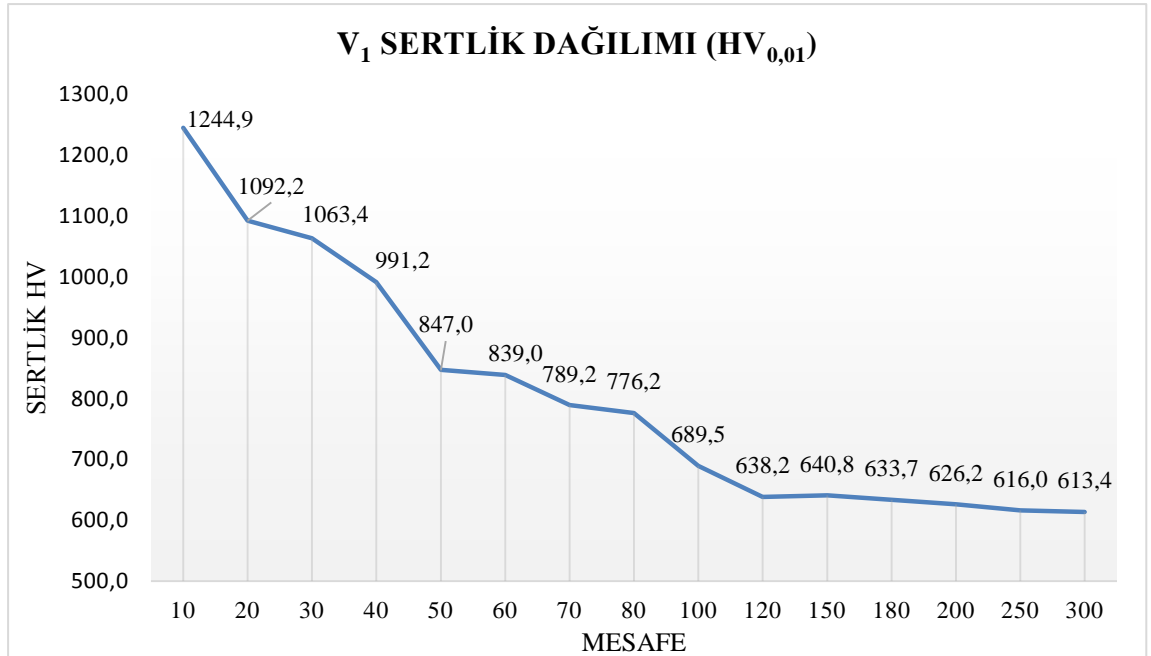
çökeltileri (Cr, Mo, V nitrür vb.) kafesi bozar, matris yapı ile aralarındaki uyumsuzluk nedeni ile gerilme alanları oluşur, dislokasyonları sıkıştırır. Böylece sertlik önemli oranda artar (Berg 2000, Schacherl 2004).

PN işlem sıcaklığındaki beklemeden dolayı numunelerde temperleme etkisi ortaya çıkmıştır. Çünkü su verilmiş çeliklerin gevrekliğini gidermek için 150-650°C aralığında temperleme işlemi yapılır. PN işlemi 450°C' de gerçekleştirildiğinden dolayı temperleme etkisi ortaya çıkacağı açıktır. Yüksek karbonlu çeliklerde Fe<sub>3</sub>C çökmesi ve bunun sonucu olarak da kübik martenzitin kafes gerilmelerinin düşmesi neticesinde sertlik düşüşü görüldüğünden bu durum beklenmektedir.(Bargel 1980, çeviri: Korkmaz 2009).

- ✚ Sertliğin malzeme yüzeyinde daha derin difüzyon değerlerine inmesi açısından 24 saat PN işlemi beklenildiği üzere en iyi sonucu vermiştir. Aynı ölçüm mesafelerinde V<sub>3</sub> numunesinde V<sub>2</sub> ve V<sub>1</sub> numunelerine göre daha yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür.
- ✚ Yüzeye en yakın noktadaki sertlik en fazla V<sub>2</sub> (1457 HV<sub>0,01</sub>) daha sonra V<sub>3</sub> ve V<sub>1</sub> numunelerinde ölçülmüştür.

Çizelge 4. 3. İKB-V<sub>1</sub> Numunesi sertlik (HV<sub>0,01</sub>) ölçüm sonuçları (12 saat PN)

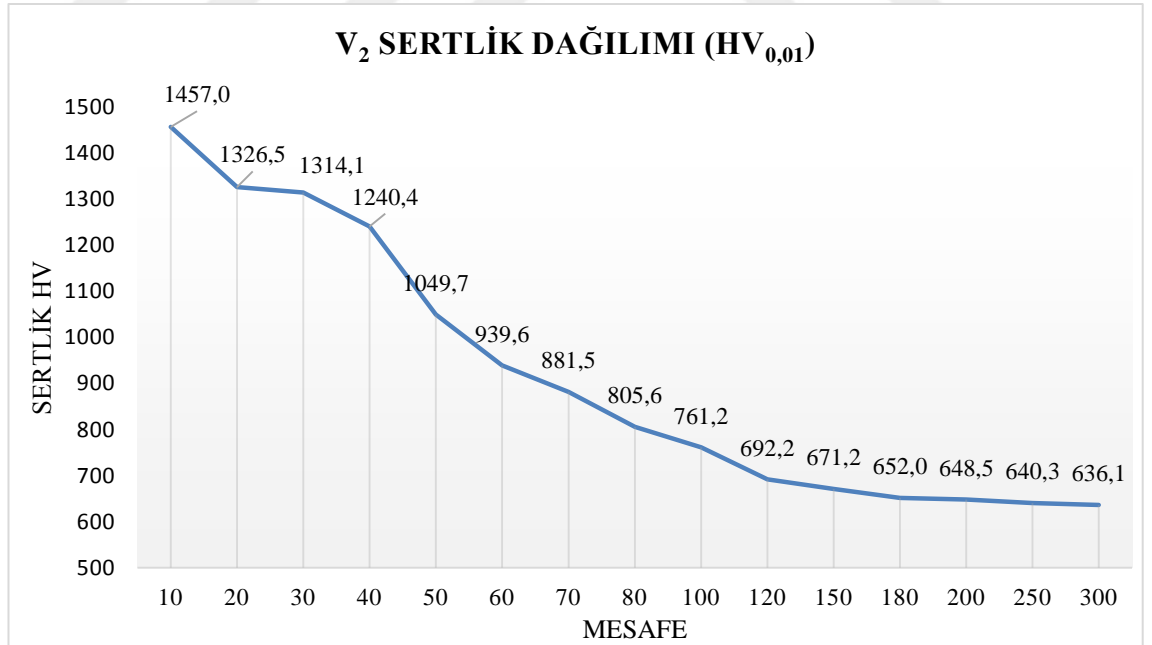
Mesafe μ	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	Aritm. Ort.	Std. Sapma	Range	Varyasyon %	Std. Hata
10	1219,2	1251,1	1244,3	1229,9	1280,1	<b>1244,9</b>	23,3	60,9	1,9	10,4
20	1103,2	1051,2	1159,2	1110,4	1036,8	<b>1092,2</b>	49,2	122,4	4,5	22,0
30	1026,7	1020,4	1100,6	1080,6	1088,6	<b>1063,4</b>	37,1	80,2	3,5	16,6
40	936,4	957,9	1050,2	1010,4	1001,3	<b>991,2</b>	44,9	113,8	4,5	20,1
50	821,9	857,6	857,1	850,4	848,1	<b>847,0</b>	14,6	35,7	1,7	6,5
60	828,4	845,4	836,6	848,3	836,1	<b>839,0</b>	8,0	19,9	0,9	3,6
70	799,2	781,2	778,3	791,1	796,0	<b>789,2</b>	9,1	21,2	1,2	4,1
80	772,3	770,1	766,3	790,5	782,0	<b>776,2</b>	9,9	24,2	1,3	4,4
100	691,3	686,6	694,5	693,7	681,2	<b>689,5</b>	5,5	13,3	0,8	2,5
120	633,0	628,6	647,9	640,4	641,0	<b>638,2</b>	7,5	19,3	1,2	3,4
150	630,3	638,8	640,5	644,7	649,9	<b>640,8</b>	7,3	19,6	1,1	3,3
180	632,5	634,6	630,8	637,2	633,4	<b>633,7</b>	2,4	20,6	0,4	1,1
200	620,3	616,1	636,1	631,6	627,0	<b>626,2</b>	8,1	21,6	1,3	3,6
250	613,4	606,1	624,3	621,2	615,4	<b>616,0</b>	7,1	22,6	1,2	3,2
300	612,1	615,6	607,1	618,1	614,2	<b>613,4</b>	4,2	23,6	0,7	1,9



Şekil 4. 15. İKB-V<sub>1</sub> Numunesi sertlik (HV<sub>0,01</sub>) grafiği

Çizelge 4. 4. İKB-V<sub>2</sub> Numunesi sertlik (HV<sub>0,01</sub>) ölçüm sonuçları (18 saat PN)

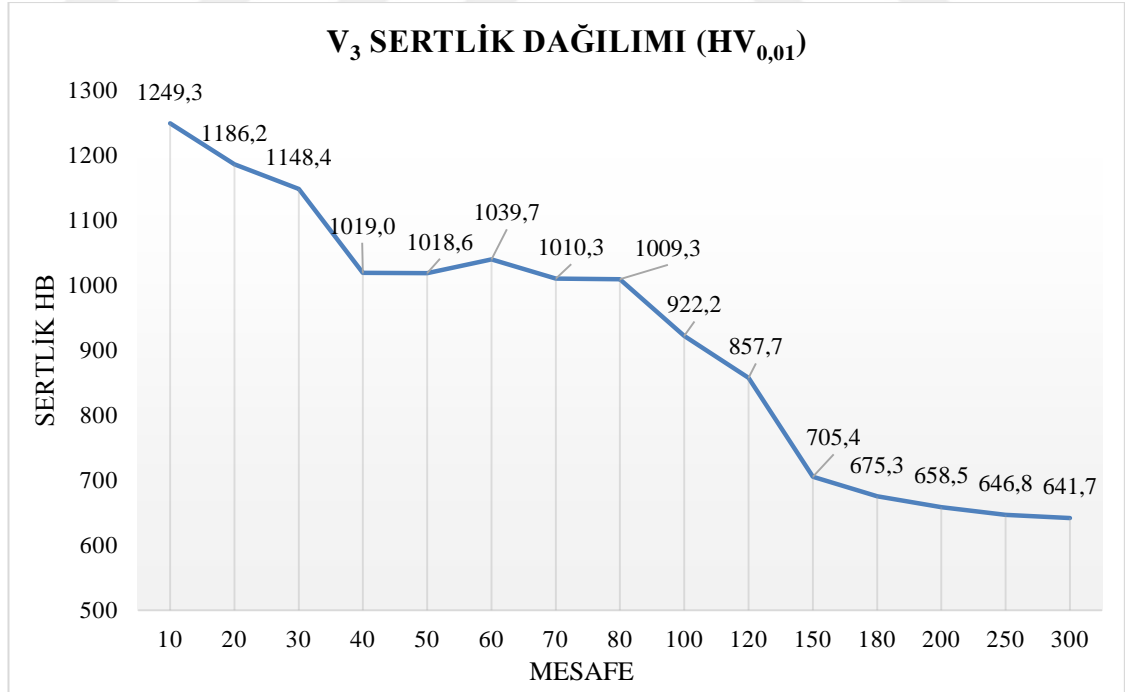
Mesafe μ	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	Aritm. Ort.	Std. Sapma	Range	Varyasyon %	Std. Hata
10	1468,4	1460,5	1451,7	1483,3	1421,3	<b>1457,0</b>	23,11	62,00	1,59	10,34
20	1305,3	1337,7	1330	1317,7	1341,7	<b>1326,5</b>	14,96	36,40	1,13	6,69
30	1300,3	1317,1	1331,7	1314,4	1306,9	<b>1314,1</b>	11,84	31,40	0,90	5,30
40	1178,8	1205,5	1270,6	1282,2	1265	<b>1240,4</b>	45,49	103,40	3,67	20,34
50	1008,7	1090,9	1055,4	1050,4	1043,3	<b>1049,7</b>	29,38	82,20	2,80	13,14
60	943,3	936,1	953,3	945,3	920	<b>939,6</b>	12,55	33,30	1,34	5,61
70	891,5	870,6	878,3	868,1	899,2	<b>881,5</b>	13,43	31,10	1,52	6,01
80	790,5	805,3	814,4	801,3	816,3	<b>805,6</b>	10,47	25,80	1,30	4,68
100	750,5	750,4	771,3	763,7	770	<b>761,2</b>	10,21	20,90	1,34	4,57
120	690,5	698,6	693,2	679,5	699,3	<b>692,2</b>	8,01	19,80	1,16	3,58
150	680,3	664,3	691,7	660,4	659,5	<b>671,2</b>	14,18	32,20	2,11	6,34
180	653,6	651,3	664,2	650	641,2	<b>652,0</b>	8,25	33,20	1,27	3,69
200	650,1	655,4	641,8	644,6	650,6	<b>648,5</b>	5,35	34,20	0,83	2,39
250	645,4	633,6	640,2	639	643,5	<b>640,3</b>	4,55	35,20	0,71	2,04
300	641,1	638,1	638,3	630,9	632,2	<b>636,1</b>	4,36	36,20	0,69	1,95



Şekil 4. 16. İKB-V<sub>2</sub> Numunesi sertlik (HV<sub>0,01</sub>) grafiği

Çizelge 4. 5. İKB-V<sub>3</sub> Numunesi sertlik (HV<sub>0,01</sub>) ölçüm sonuçları (24 saat PN)

Mesafe μ	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	Aritm. Ort.	Std. Sapma	Range	Varyasyon %	Std. Hata
10	1228,7	1251,7	1290,1	1239,6	1236,3	<b>1249,3</b>	24,28	61,40	1,94	10,86
20	1188,5	1194,3	1180	1176,8	1191,2	<b>1186,2</b>	7,46	17,50	0,63	3,34
30	1130,6	1201,1	1151	1126,4	1132,8	<b>1148,4</b>	30,94	74,70	2,69	13,84
40	1026,7	1020,1	1012,4	1016,9	1019	<b>1019,0</b>	5,21	14,30	0,51	2,33
50	1036,7	1016,7	1007,3	1014,9	1017,3	<b>1018,6</b>	10,89	29,40	1,07	4,87
60	1034,4	1016,9	1015,2	1011,7	1120,1	<b>1039,7</b>	45,82	108,40	4,41	20,49
70	1004	1001,7	1012,2	1009,5	1024,3	<b>1010,3</b>	8,86	22,60	0,88	3,96
80	1008,3	1011,7	1001,8	1010,1	1014,6	<b>1009,3</b>	4,79	12,80	0,47	2,14
100	900,4	960,4	915,8	922,4	912,2	<b>922,2</b>	22,78	60,00	2,47	10,19
120	839,5	876,4	856,8	854	861,7	<b>857,7</b>	13,34	36,90	1,55	5,96
150	716,4	708,2	699,1	700,9	702,2	<b>705,4</b>	7,05	17,30	1,00	3,15
180	690,1	671,5	673,4	678,5	663,1	<b>675,3</b>	9,95	18,30	1,47	4,45
200	647,3	669,1	644,2	667,2	664,9	<b>658,5</b>	11,82	19,30	1,80	5,29
250	655,2	652,1	637,5	641	648,2	<b>646,8</b>	7,43	20,30	1,15	3,32
300	644,2	651,7	636,1	634,8	641,7	<b>641,7</b>	6,80	21,30	1,06	3,04



Şekil 4. 17. İKB-V<sub>3</sub> Numunesi sertlik (HV<sub>0,01</sub>) grafiği



#### 4.2.2. YKB Numunelerinin Sertlik Değerleri

PN uygulanmamış YKB Y<sub>0</sub> numunesinden ölçülen sertlik değerleri Çizelge 4.6'da, PN uygulanan Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub> ve Y<sub>3</sub> numunelerine ait sertlik değerleri ise sırasıyla Çizelge 4.7, 4.8 ve 4.9'da verilmiştir. PN işleminde zaman değişkeninin sertliğe etkisi İKB ve YKB numunelerinde karşılaştırmalı olarak sırasıyla Şekil 4.21, 4.22 ve 4.23'te verilmiştir.

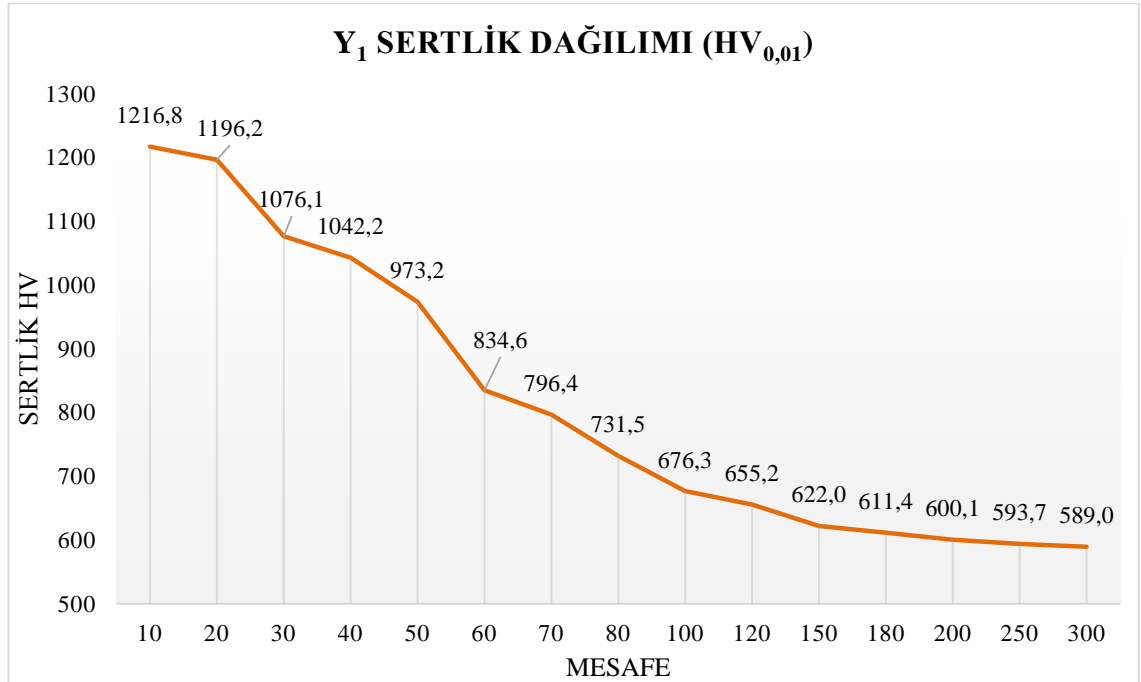
- ✚ Sertliğin malzeme yüzeyinde daha derin difüzyon değerlerine inmesi açısından 24 saat PN işlemi beklenildiği üzere en iyi sonucu vermiştir. Aynı ölçüm mesafelerinde Y<sub>3</sub> numunesinde Y<sub>2</sub> ve Y<sub>1</sub> numunelerine göre daha yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür.
- ✚ YKB numuneleri içerisinde yüzeye en yakın noktadaki ortalama sertlik maksimum 1465 HV<sub>0,01</sub> olarak 18 saat PN uygulanmış Y<sub>2</sub> numunesinde gözlemlenmiştir. Y<sub>1</sub> ve Y<sub>3</sub> için ise bu noktadaki sertlik değeri sırasıyla 1217 ve 1238 HV<sub>0,01</sub> olarak gözlemlenmiştir.
- ✚ YKB numuneleri İKB numunelerine göre % olarak daha fazla ihtiva ettikleri Cr ve Mo alaşım elementleri sayesinde yüksek sertlik değerlerine ulaşmıştır. Değerler Şekil 2.25'te verilen alaşım elementlerinin PN sertliğine etkisi grafiği ile paralellik göstermiştir.
- ✚ İKB numunelerinde daha fazla % oranda bulunan karbon sertlik artışında etken olmuştur. Ayrıca İKB numunelerinde % oranda daha fazla Mn alaşım elementi bulunması sertliğin daha derin kesitlere ulaşmasına fayda sağlamıştır.

**Çizelge 4. 6.** YKB-Y<sub>0</sub> Numunesi sertlik (HV<sub>0,01</sub>) ölçüm sonuçları (PN Uygulanmamış)

Ölçümler		Aritm. Ort.	Std. Sapma	Range	Varyasyon %	Std. Hata
613,1	660,1	<b>662,04</b>	<b>25,28</b>	<b>72,70</b>	<b>3,82</b>	<b>11,30</b>
660	672					
658,3	682,4					
685,2	685,8					
624,3	679,2					

**Çizelge 4. 7.** YKB-Y<sub>1</sub> Numunesi sertlik (HV<sub>0,01</sub>) ölçüm sonuçları (12 saat PN)

Mesafe μ	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	Aritm. Ort.	Std. Sapma	Range	Varyasyon %	Std. Hata
10	1221,1	1218,7	1202,3	1217,6	1224,3	<b>1216,8</b>	8,50	22,00	0,70	3,80
20	1188	1173,2	1219,2	1207,4	1193,1	<b>1196,2</b>	17,75	46,00	1,48	7,94
30	1076,7	1042,3	1051,2	1103,2	1107	<b>1076,1</b>	29,38	64,70	2,73	13,14
40	1051,1	995,7	1103,2	1026,7	1034,5	<b>1042,2</b>	39,57	107,50	3,80	17,70
50	957,9	964,3	986,7	984,1	973	<b>973,2</b>	12,39	28,80	1,27	5,54
60	904,9	799,8	839,5	824,7	804,1	<b>834,6</b>	42,44	105,10	5,09	18,98
70	807,6	806,1	788	788,4	791,9	<b>796,4</b>	9,67	15,70	1,21	4,33
80	735,9	727,1	730,3	724,1	740,3	<b>731,5</b>	6,56	16,20	0,90	2,94
100	699,2	689,4	633	685,8	674	<b>676,3</b>	25,82	66,20	3,82	11,55
120	683,3	660,2	644,7	647,9	640,1	<b>655,2</b>	17,36	43,20	2,65	7,77
150	616,1	641,6	628,2	613	611,1	<b>622,0</b>	12,82	44,20	2,06	5,73
180	605,3	618,5	610	622	601,2	<b>611,4</b>	8,75	45,20	1,43	3,91
200	624,7	598,3	582,2	591,6	603,8	<b>600,1</b>	15,93	46,20	2,65	7,12
250	589	593,4	598,6	592,4	595,2	<b>593,7</b>	3,54	47,20	0,60	1,58
300	579,5	590,7	592	599,2	583,6	<b>589,0</b>	7,67	48,20	1,30	3,43



**Şekil 4. 18.** YKB-Y<sub>1</sub> Numunesi sertlik (HV<sub>0,01</sub>) grafiği

Çizelge 4. 8. YKB-Y<sub>2</sub> Numunesi sertlik (HV<sub>0,01</sub>) ölçüm sonuçları (18 saat PN)

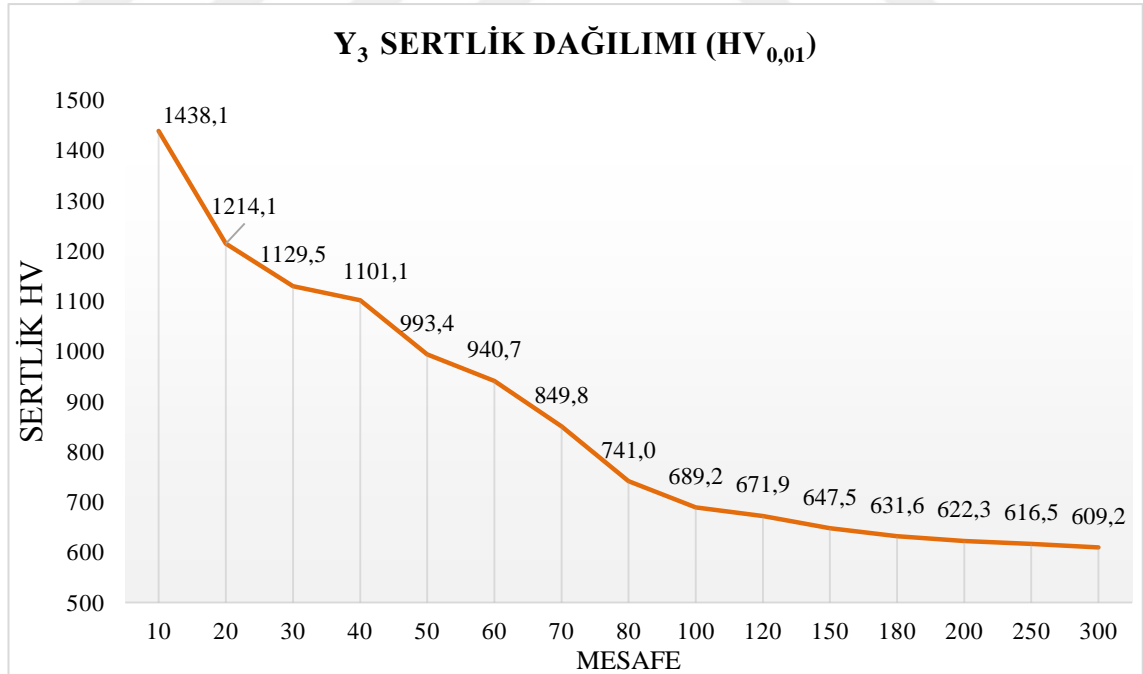
Mesafe μ	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	Aritm. Ort.	Std. Sapma	Range	Varyasyon %	Std. Hata
10	1470,4	1460,2	1446,3	1466,6	1482,1	<b>1465,1</b>	13,20	35,80	0,90	5,90
20	1318,7	1344,7	1327,7	1338,6	1327	<b>1331,3</b>	10,28	26,00	0,77	4,60
30	1284,2	1298,6	1277	1304,3	1301,2	<b>1293,1</b>	11,83	27,20	0,91	5,29
40	1103,2	1130	1121,2	1117,1	1132,5	<b>1120,8</b>	11,67	29,30	1,04	5,22
50	927,7	911,5	933,7	954,1	941,1	<b>933,6</b>	15,81	42,50	1,69	7,07
60	872,8	870,7	881	876,1	861,3	<b>872,4</b>	7,31	19,70	0,84	3,27
70	790,4	772,3	744,6	754,4	757,8	<b>763,9</b>	17,84	45,80	2,34	7,98
80	705,5	700,2	694,3	718,8	707,6	<b>705,3</b>	9,15	24,50	1,30	4,09
100	680,2	694,3	691,7	690	679,9	<b>687,2</b>	6,72	14,40	0,98	3,01
120	684,3	690,1	697,3	688,7	686,5	<b>689,4</b>	4,94	13,00	0,72	2,21
150	644	634,8	651,1	631,6	631	<b>638,5</b>	8,75	14,00	1,37	3,92
180	619,2	638,2	629,4	619,9	628,3	<b>627,0</b>	7,81	15,00	1,25	3,49
200	628,1	605,6	602	618	611,9	<b>613,1</b>	10,37	16,00	1,69	4,64
250	592,9	610,8	606,2	602,7	602	<b>602,9</b>	6,60	17,00	1,09	2,95
300	603,7	600	602,8	593,9	608,2	<b>601,7</b>	5,27	18,00	0,88	2,36



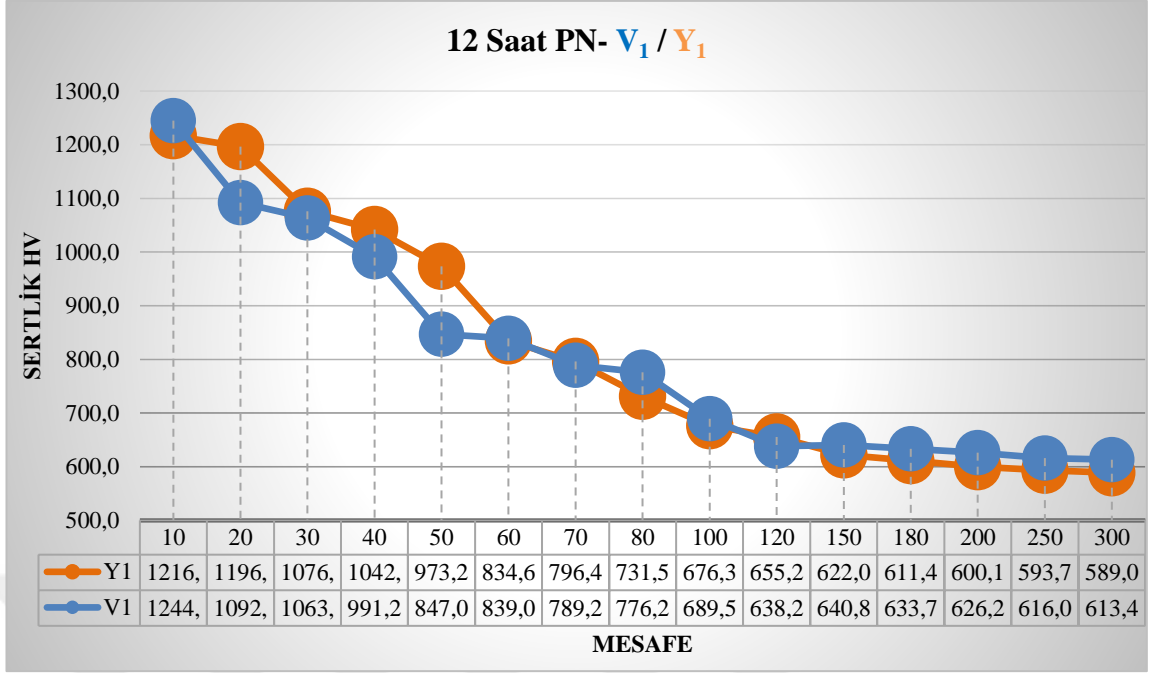
Şekil 4. 19. YKB-Y<sub>2</sub> Numunesi sertlik (HV<sub>0,01</sub>) grafiği

Çizelge 4. 9. YKB-Y<sub>3</sub> Numunesi sertlik (HV<sub>0,01</sub>) ölçüm sonuçları (24 saat PN)

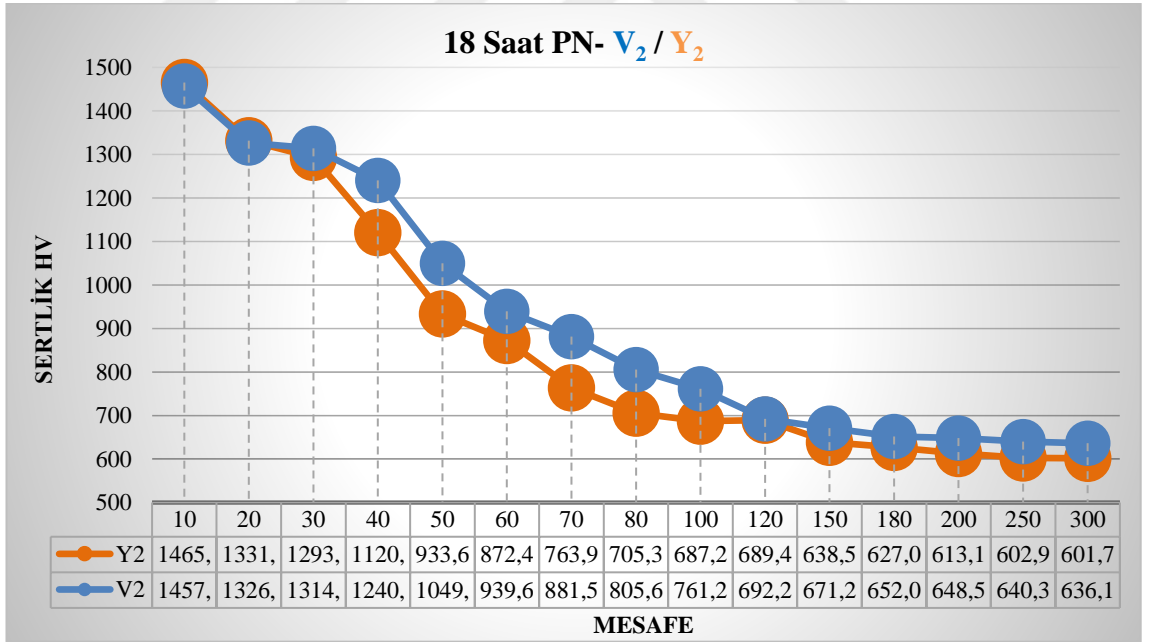
Mesafe μ	1.Ölçüm	2.Ölçüm	3.Ölçüm	4.Ölçüm	5.Ölçüm	Aritm. Ort.	Std. Sapma	Range	Varyasyon %	Std. Hata
10	1471,5	1410,4	1480,6	1403,8	1424	<b>1438,1</b>	35,58	76,80	2,47	15,91
20	1251,1	1199,5	1201,2	1211,1	1207,6	<b>1214,1</b>	21,21	51,60	1,75	9,49
30	1130,6	1112,9	1151,2	1122	1130,8	<b>1129,5</b>	14,19	38,30	1,26	6,35
40	1104,2	1098,3	1106,6	1097,3	1099,1	<b>1101,1</b>	4,07	9,30	0,37	1,82
50	1006,4	988	993,6	1000,4	978,4	<b>993,4</b>	10,86	28,00	1,09	4,86
60	941,2	958,4	933,1	944	926,6	<b>940,7</b>	12,05	31,80	1,28	5,39
70	838,8	876,4	857,6	840,9	835,5	<b>849,8</b>	17,13	40,90	2,02	7,66
80	724,2	747,9	761,1	740,1	731,6	<b>741,0</b>	14,34	36,90	1,94	6,42
100	688,2	680,7	698,6	679	699,4	<b>689,2</b>	9,61	20,40	1,39	4,30
120	674,4	680,6	670,1	644,4	690	<b>671,9</b>	17,10	45,60	2,54	7,65
150	639,2	649,2	663,6	641	644,5	<b>647,5</b>	9,78	46,60	1,51	4,37
180	631	626	632,4	635,2	633,3	<b>631,6</b>	3,47	47,60	0,55	1,55
200	619,1	629,3	628,2	617,1	618	<b>622,3</b>	5,91	48,60	0,95	2,64
250	627,5	614,8	611	618,7	610,5	<b>616,5</b>	6,98	49,60	1,13	3,12
300	618	607,1	609	608,6	603,4	<b>609,2</b>	5,38	50,60	0,88	2,41



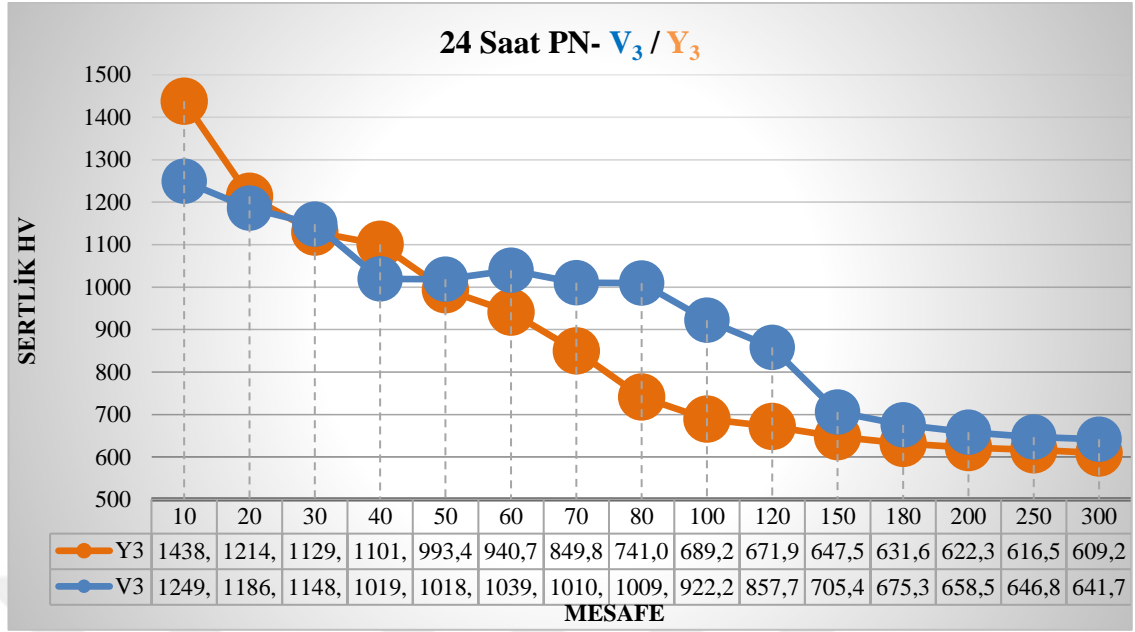
Şekil 4. 20. YKB-Y<sub>3</sub> Numunesi sertlik (HV<sub>0,01</sub>) grafiği



Şekil 4. 21. PN zamanına göre sertlik karşılaştırması (12 saat)



Şekil 4. 22. PN zamanına göre sertlik karşılaştırması (18 saat)



**Şekil 4. 23.** PN zamanına göre sertlik karşılaştırması (24 saat)

### 4.3. Aşınma Saha Denemelerinin İncelenmesi

Bölüm 3.2’de yer alan Çizelge 3.9’da tariflendiği üzere PN yapılmış İKB ve YKB kesici bıçakları ATY tesisindeki II. kırıcıda 52 saat kesintisiz çalışma süresiyle test edilmiştir. Saha denemeleri esnasında PN yapılmış kesici bıçaklar ile birlikte hiçbir işlem yapılmamış İKB ve YKB örnekleri de aynı kırıcı tamburunda yer almış ve birlikte prosesi tamamlamışlardır. Bu sayede PN yapılmış ve yapılmamış kesici bıçaklar birbiri ile kıyas edilmiştir. Yine daha önce bölüm 3.2 ‘de belirtildiği gibi II.kırıcı üzerinde toplam 114 adet kesici bıçak mevcuttur. Saha denemeleri, 1.test parametresi olan 12 saat PN uygulanmış kesici bıçaklar ile toplamda 3 hafta süreyle, 2.test parametresi olan 24 saat PN uygulanmış kesici bıçaklar ile toplamda 5 hafta süreyle ve 3 test parametresi olan 18 saat PN uygulanmış kesici bıçaklar ile toplamda yine 5 hafta süreyle yapılarak deneysel aşınma testleri sonuçlandırılmıştır. Takip eden bölümlerde bu denemelerin İKB ve YKB kesicileri olarak sonuçları yer almaktadır. Tüm aşınma analizleri optik tarama özelliğini kullanan tersine mühendislik ölçüm cihazı GOM ATOS II cihazı ile numune parçalardan stl data oluşturulmak suretiyle yapılmıştır.

### 4.3.1. İKB Aşınma Saha Denemelerinin İncelenmesi

Kesici bıçaklara ait kısaltma simgelerinin tanımları aşağıdaki gibidir;

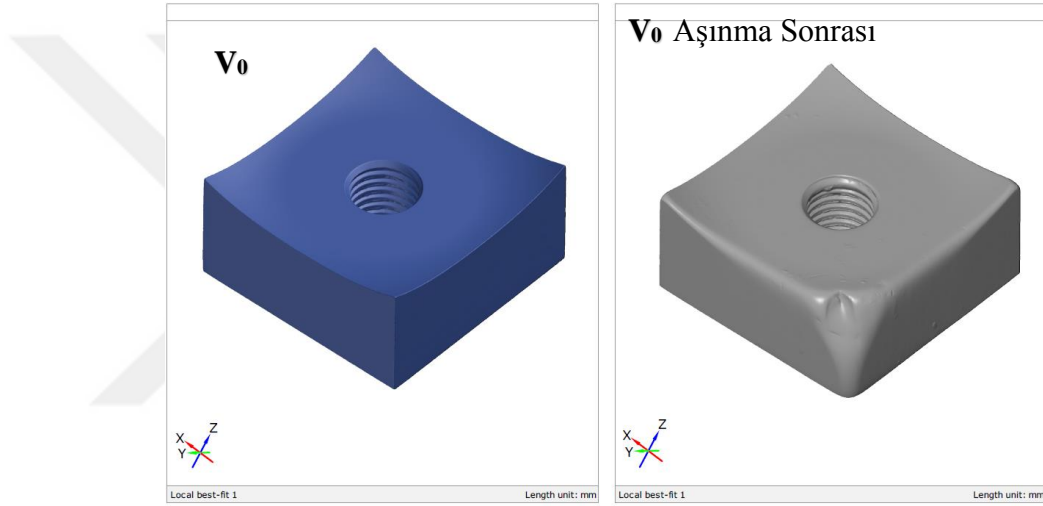
$V_0$  : PN uygulanmamış ölçüm için master kabul edilen İKB

$V_1$  : 12 saat PN uygulanmış İKB

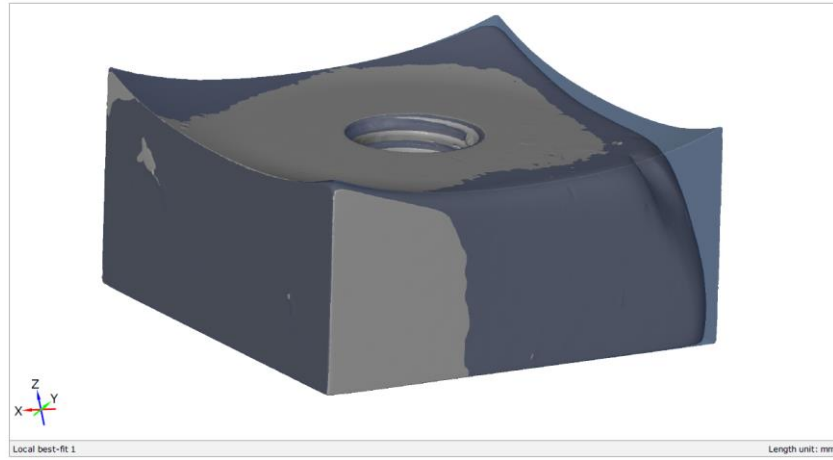
$V_2$  : 18 saat PN uygulanmış İKB

$V_3$  : 24 saat PN uygulanmış İKB

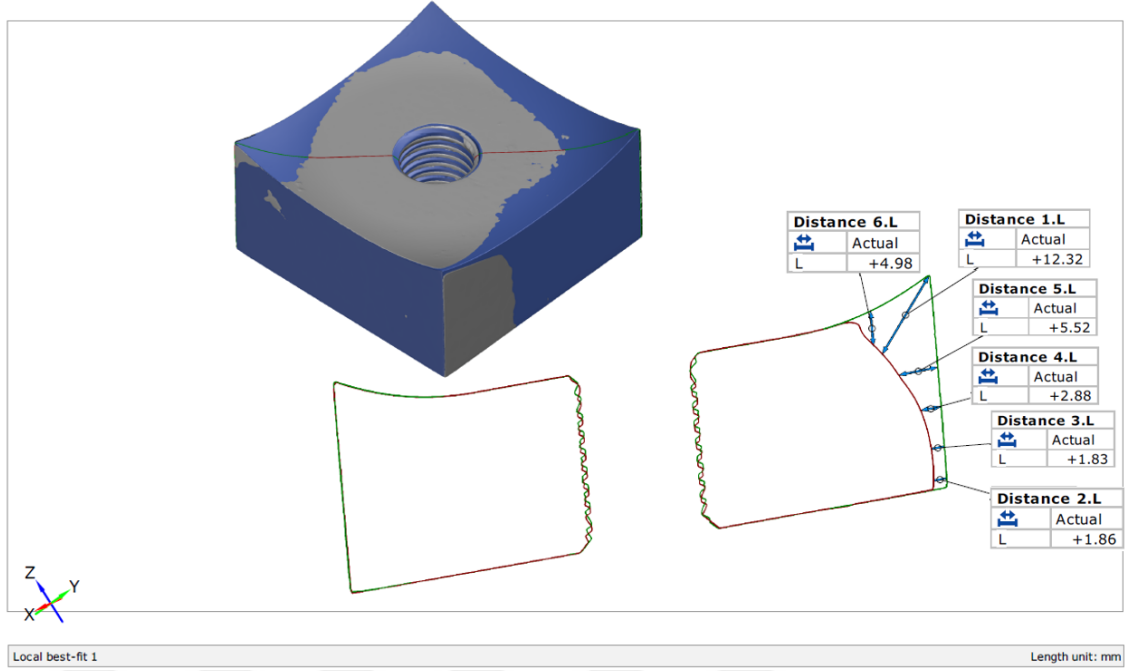
İKB numunelerine ait aşınma analiz görselleri Şekil 4.24 ve Şekil 4.39 arasında verilmiştir.



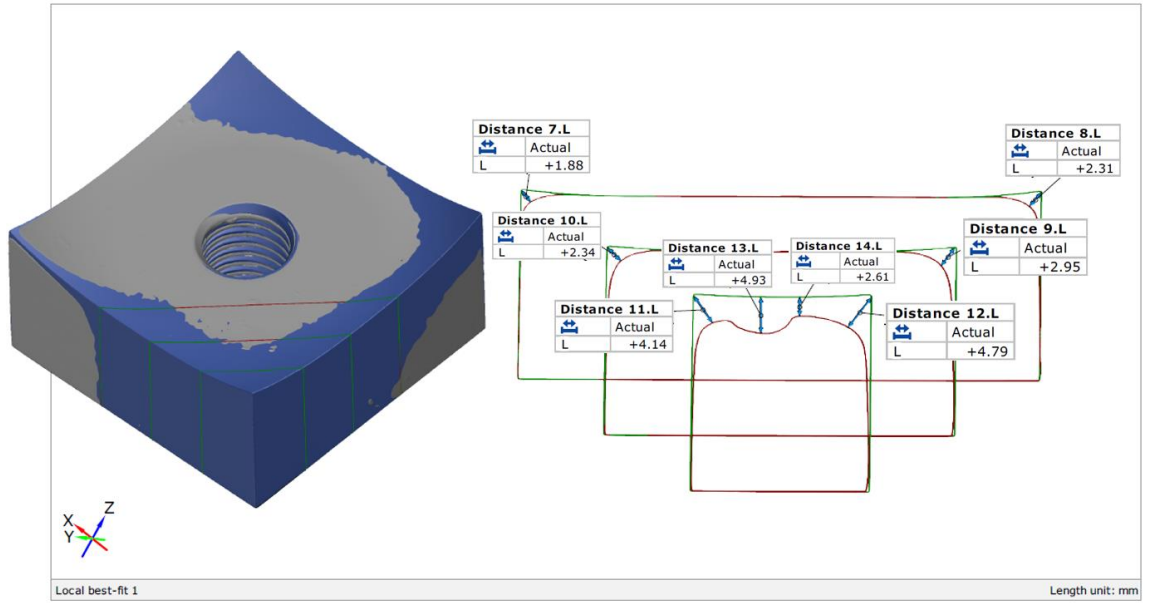
Şekil 4. 24.  $V_0$  aşınma sonrası optik tarama görünümü



Şekil 4. 25.  $V_0$  aşınma sonrası optik tarama görünümü -  $V_0$  master data kıyaslaması

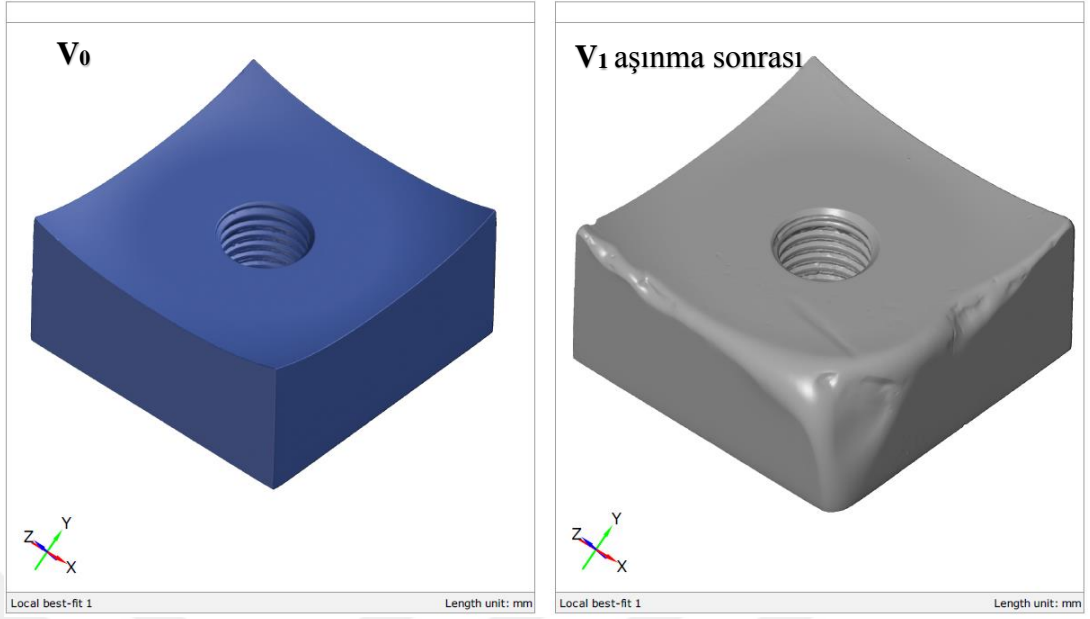


Şekil 4. 26.  $V_0$  aşınma sonrası kenar hattı aşınma analizi

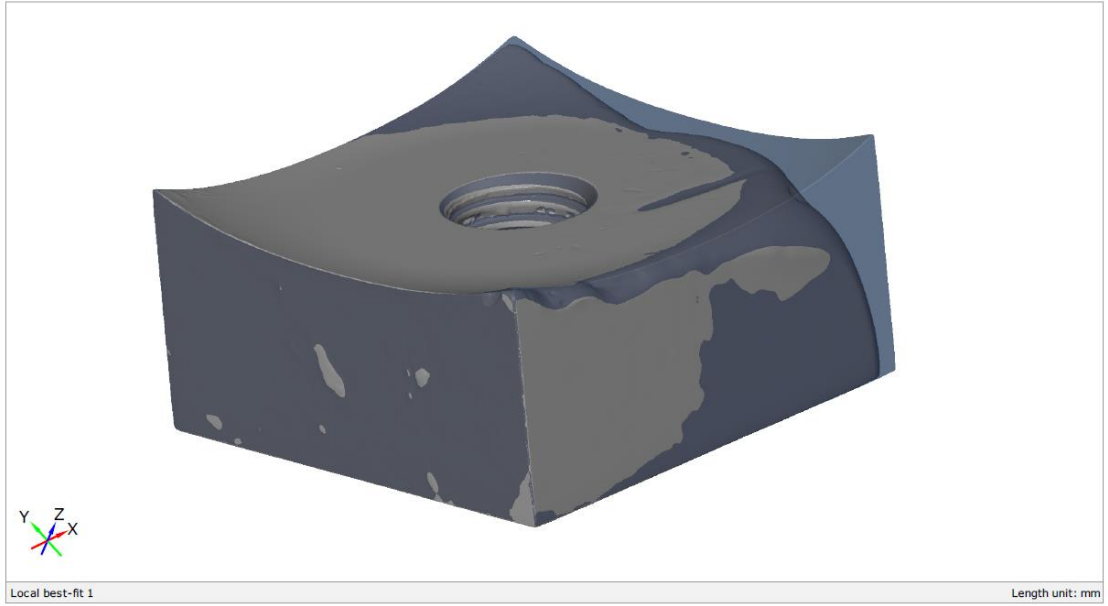


Şekil 4. 27.  $V_0$  aşınma sonrası maksimum aşınma kesit analizleri

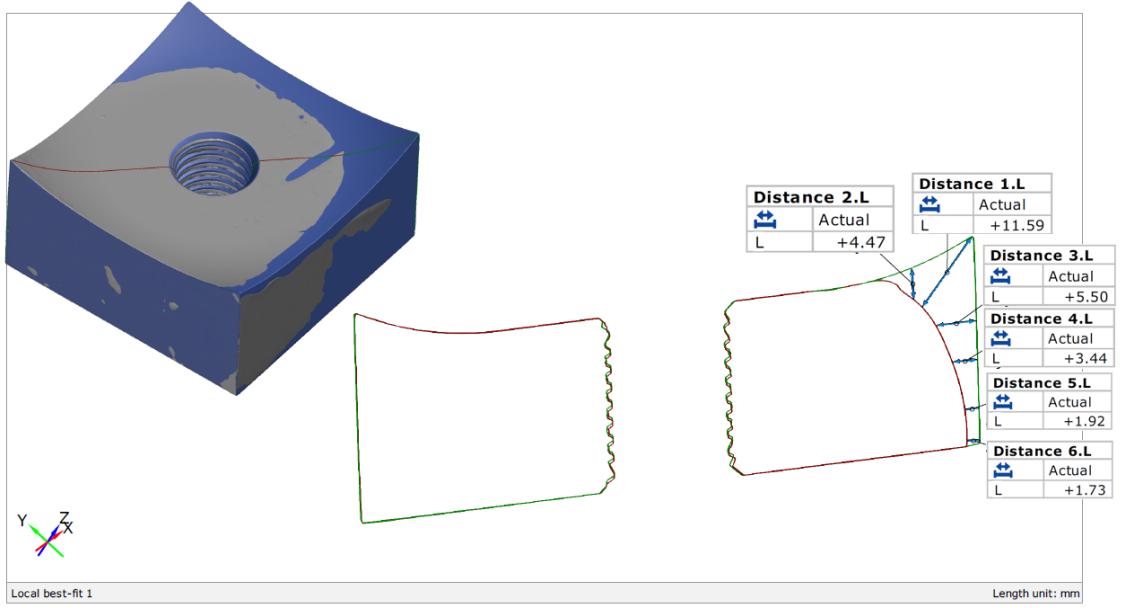




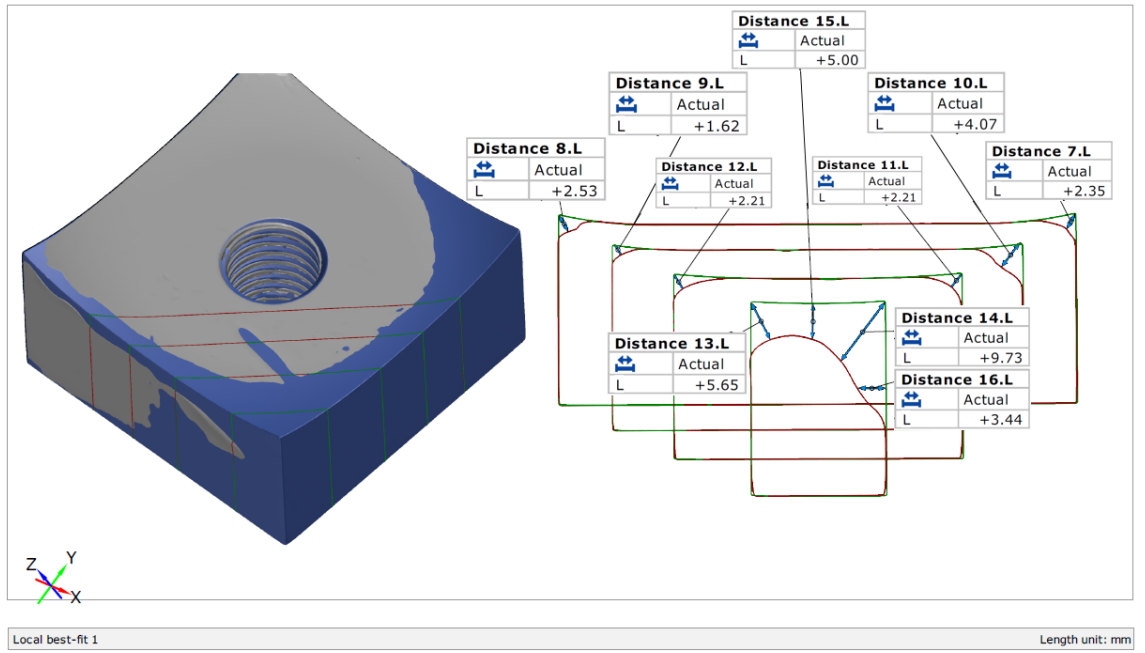
Şekil 4. 28. V<sub>1</sub> optik tarama görünümü (12h PN)



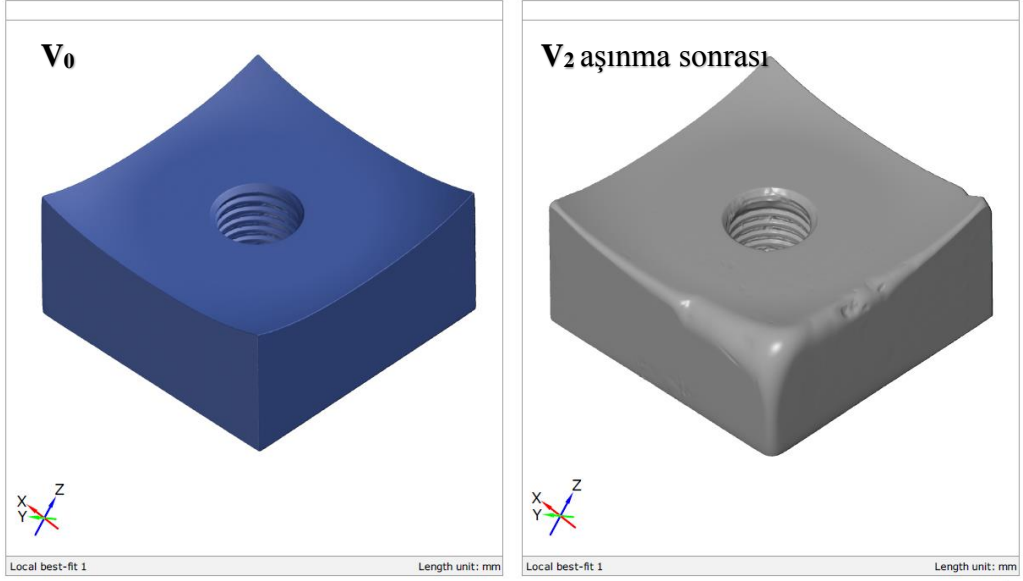
Şekil 4. 29. V<sub>1</sub> optik tarama görünümü- V<sub>0</sub> master data kıyaslaması (12h PN)



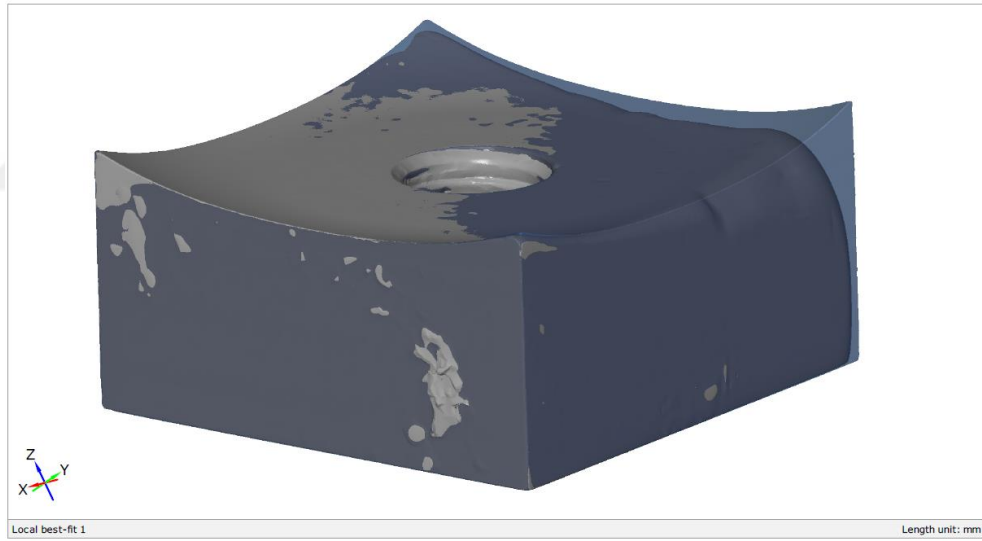
Şekil 4. 30.  $V_1$  kenar hattı aşınma analizi (12h PN)



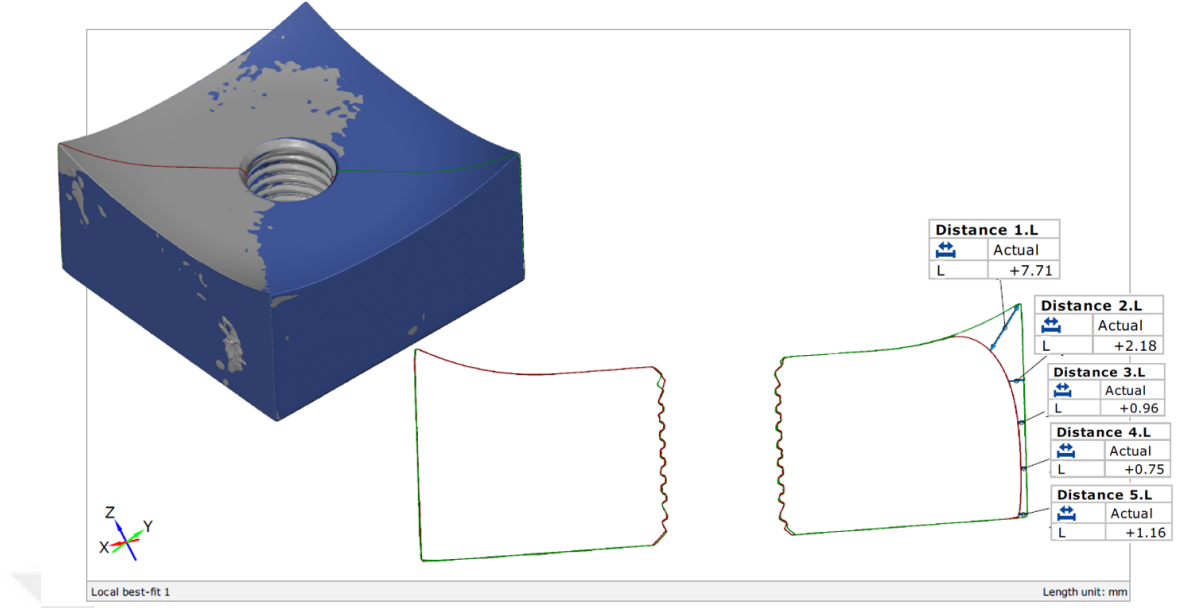
Şekil 4. 31.  $V_1$  maksimum aşınma kesit analizleri (12h PN)



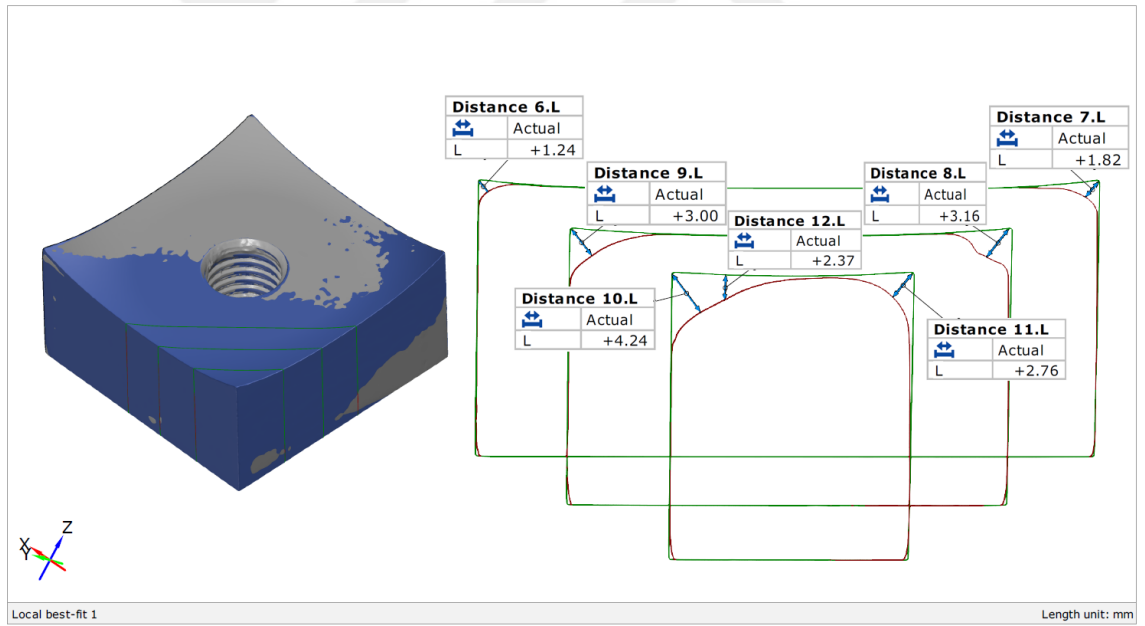
**Şekil 4. 32.** V<sub>2</sub> optik tarama görünümü (18h PN)



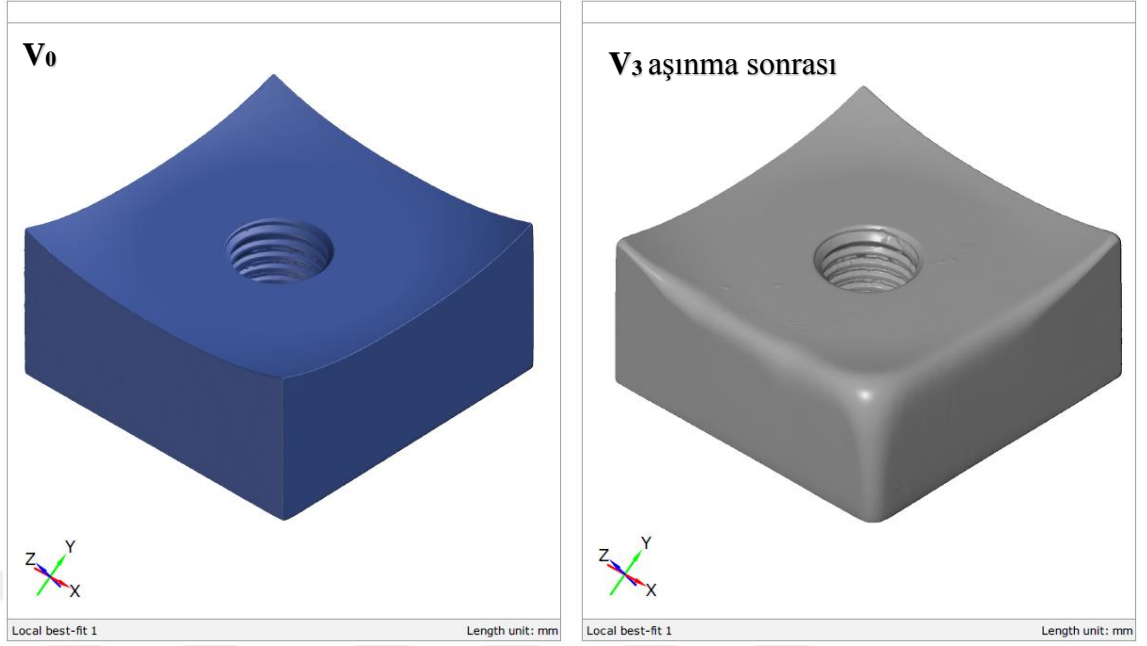
**Şekil 4. 33.** V<sub>2</sub> optik tarama görünümü - V<sub>0</sub> master data kıyaslaması (18h PN)



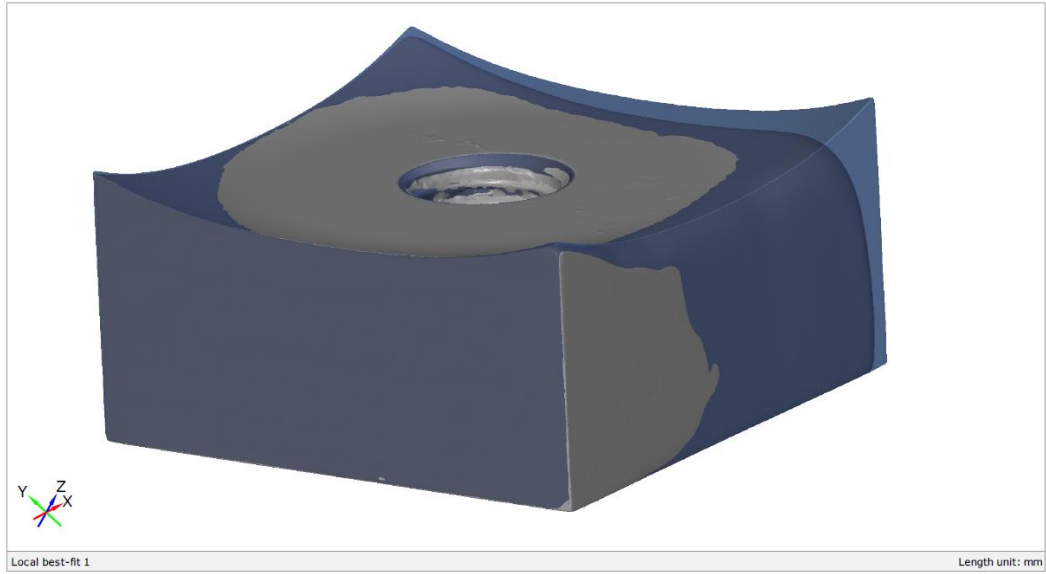
Şekil 4. 34. V<sub>2</sub> kenar hattı aşınma analizi (18h PN)



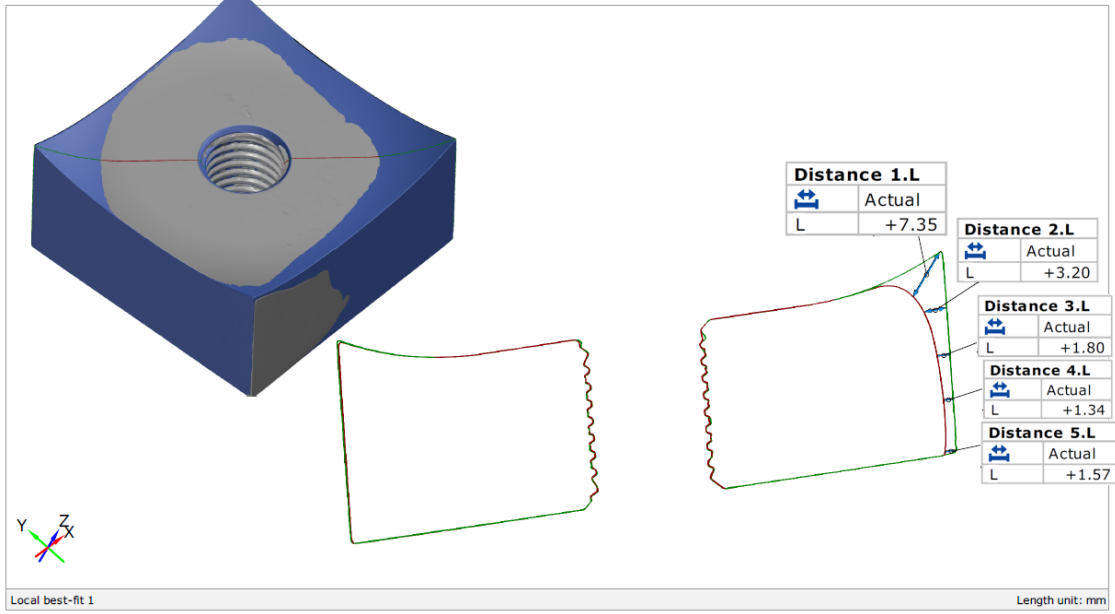
Şekil 4. 35. V<sub>2</sub> maksimum aşınma kesit analizleri (18h PN)



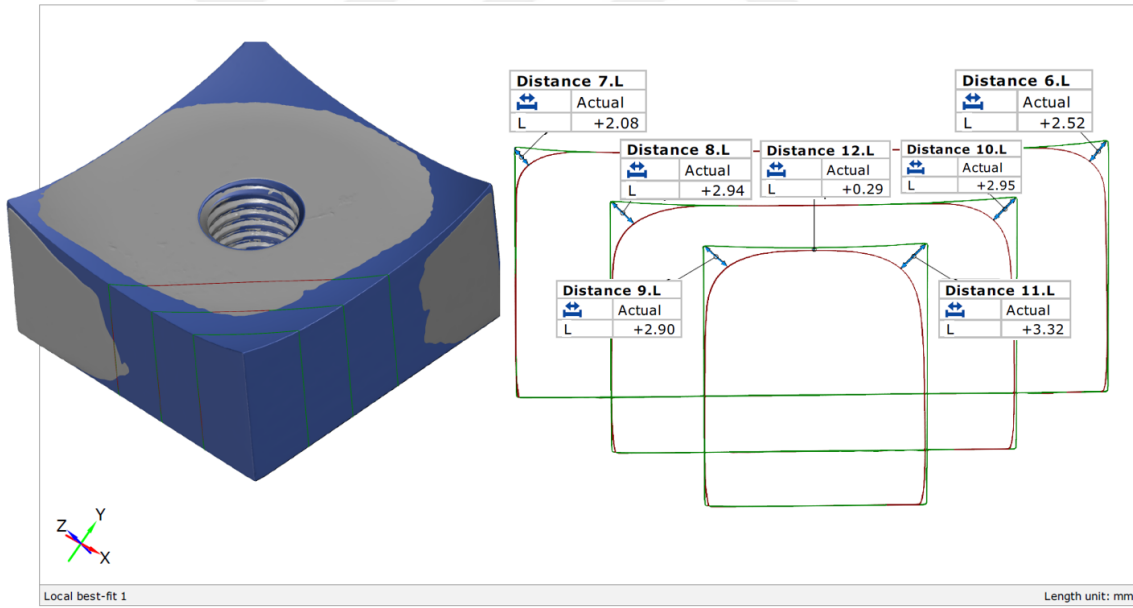
Şekil 4. 36.  $V_3$  optik tarama görünümü (24h PN)



Şekil 4. 37.  $V_3$  optik tarama görünümü -  $V_0$  master data kıyaslaması (24h PN)



Şekil 4. 38.  $V_3$  kenar hattı aşınma analizi (24h PN)



Şekil 4. 39.  $V_3$  maksimum aşınma kesit analizleri (24h PN)

### 4.3.2. YKB Aşınma Saha Denemelerinin İncelenmesi

Kesici bıçaklara ait kısaltma simgelerinin tanımları aşağıdaki gibidir;

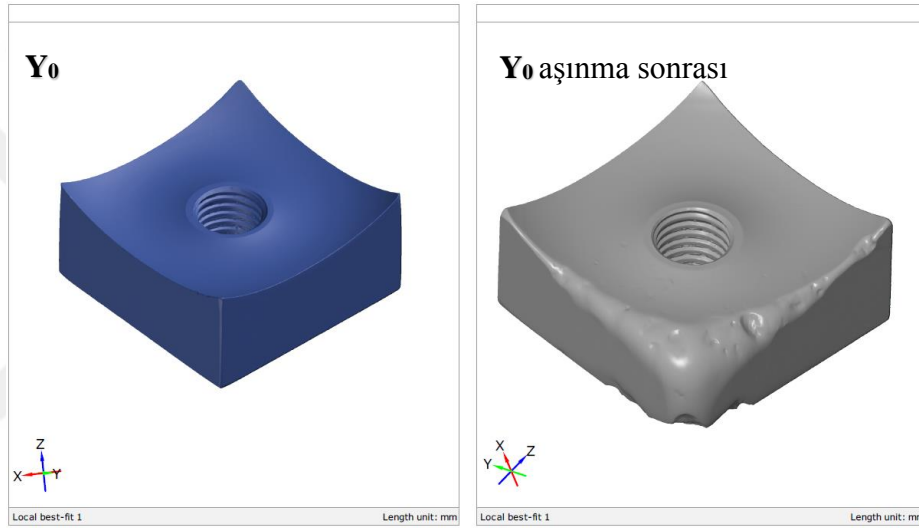
**Y<sub>0</sub>** : PN uygulanmamış ölçüm için master kabul edilen YKB

**Y<sub>1</sub>** : 12 saat PN uygulanmış YKB

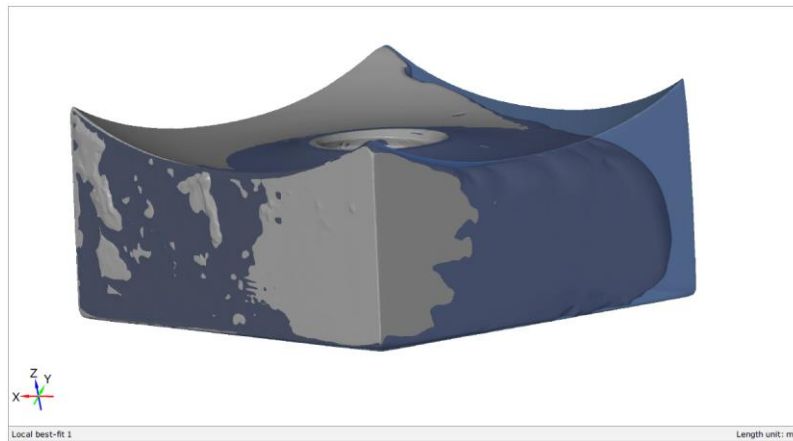
**Y<sub>2</sub>** : 18 saat PN uygulanmış YKB

**Y<sub>3</sub>** : 24 saat PN uygulanmış YKB

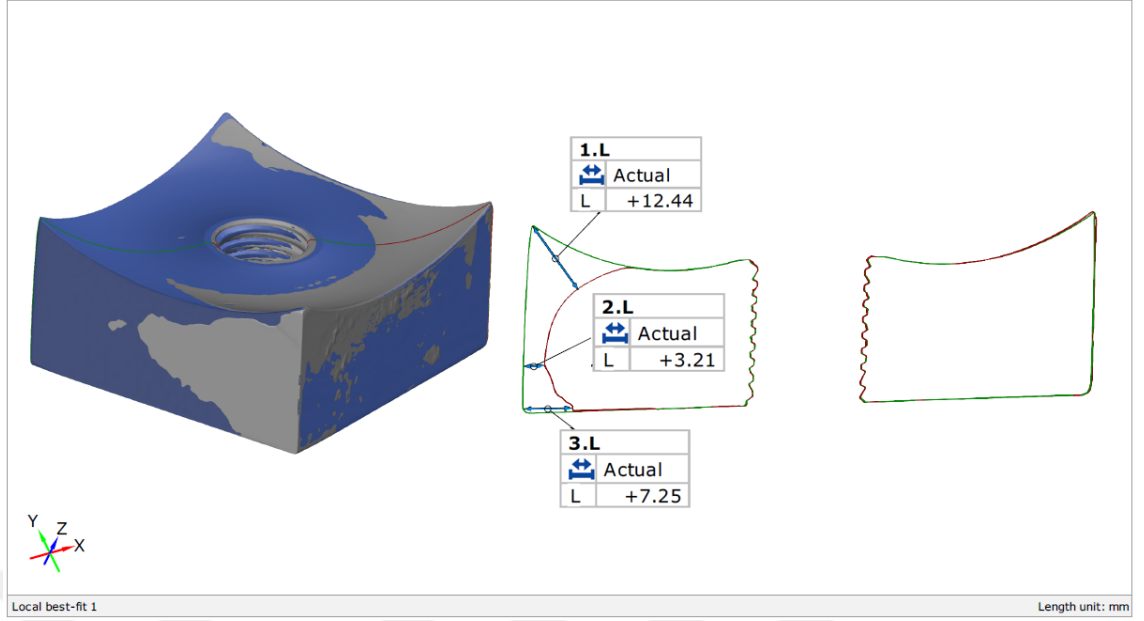
YKB numunelerine ait aşınma analiz görselleri şekil 4.40 ve şekil 4.55 arasında verilmiştir.



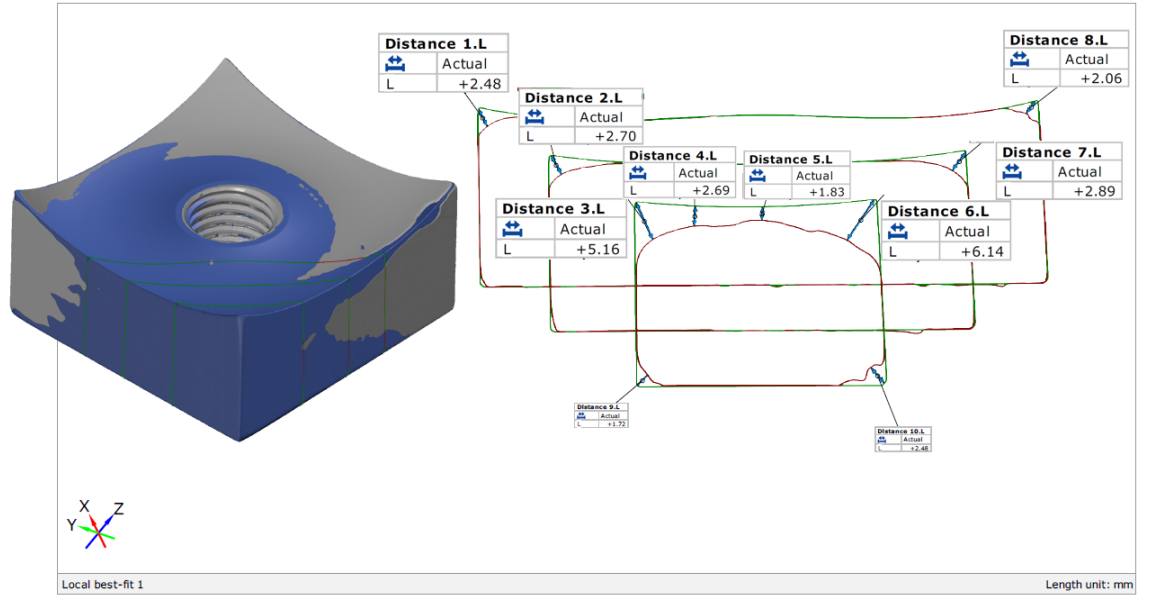
Şekil 4. 40. Y<sub>0</sub> aşınma sonrası optik tarama görünümü



Şekil 4. 41. Y<sub>0</sub> aşınma sonrası optik tarama görünümü - Y<sub>0</sub> master data kıyaslaması

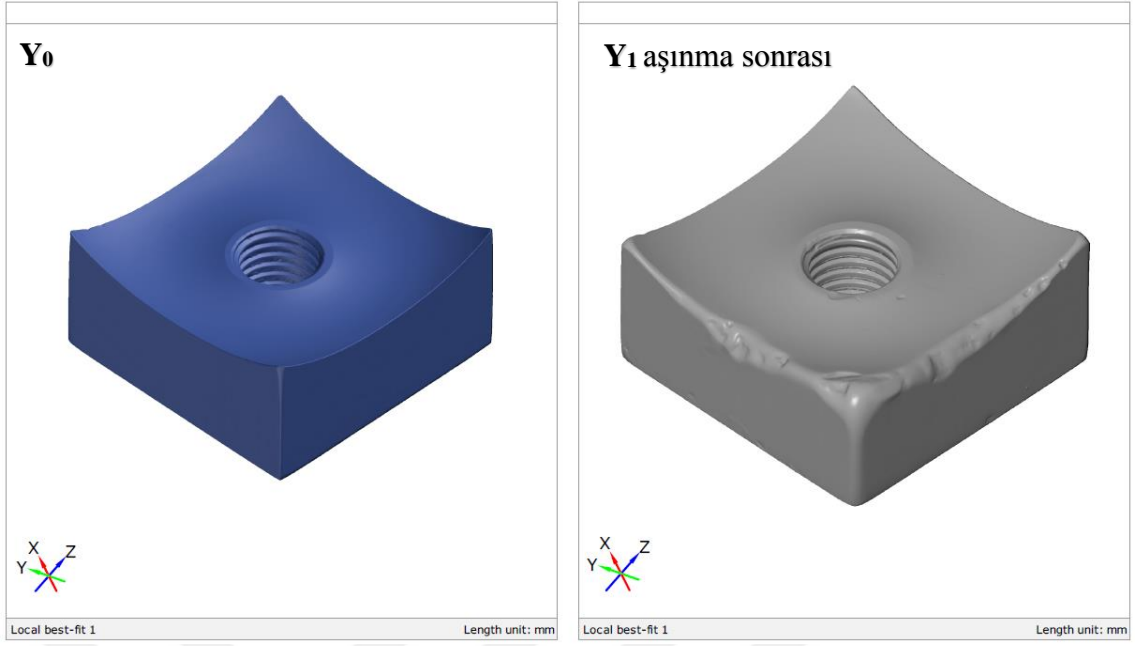


Şekil 4. 42.  $Y_0$  aşınma sonrası kenar hattı aşınma analizi

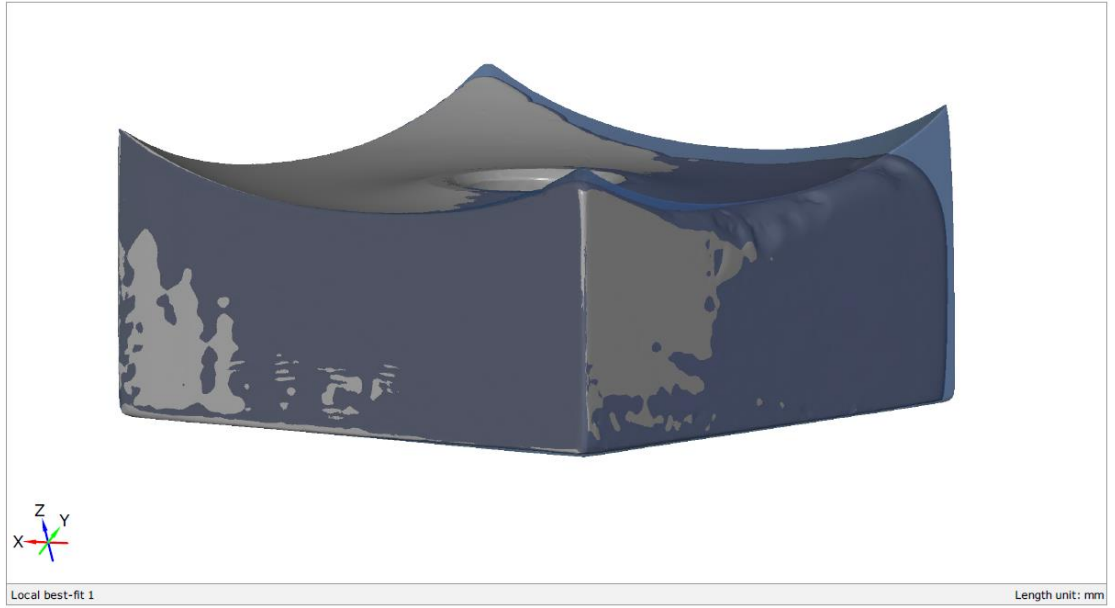


Şekil 4. 43.  $Y_0$  aşınma sonrası maksimum aşınma kesit analizleri

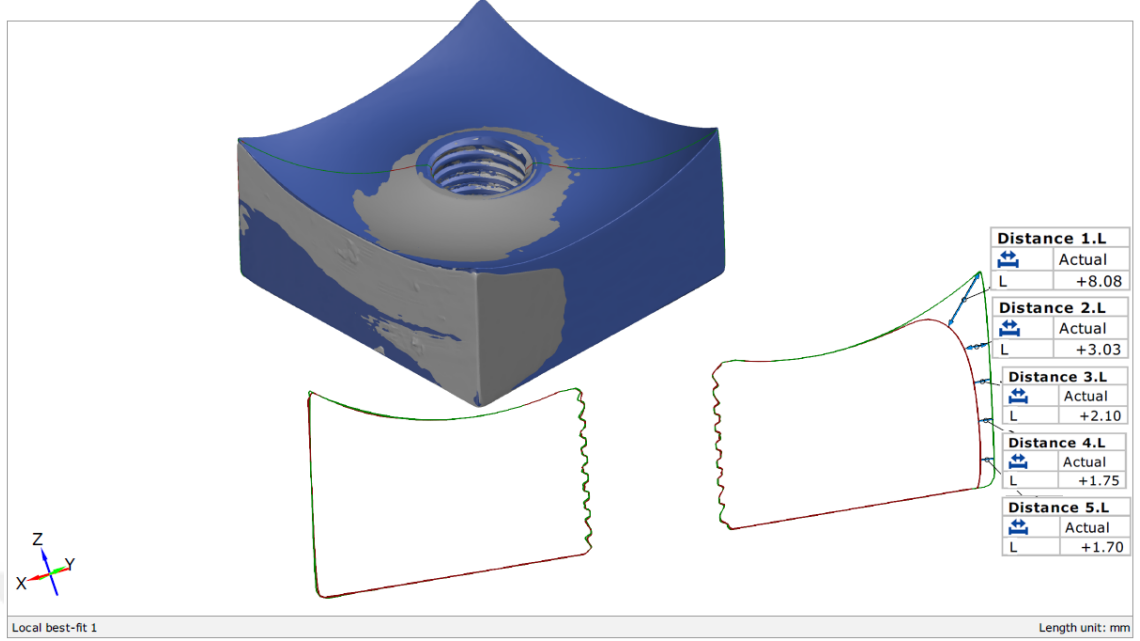




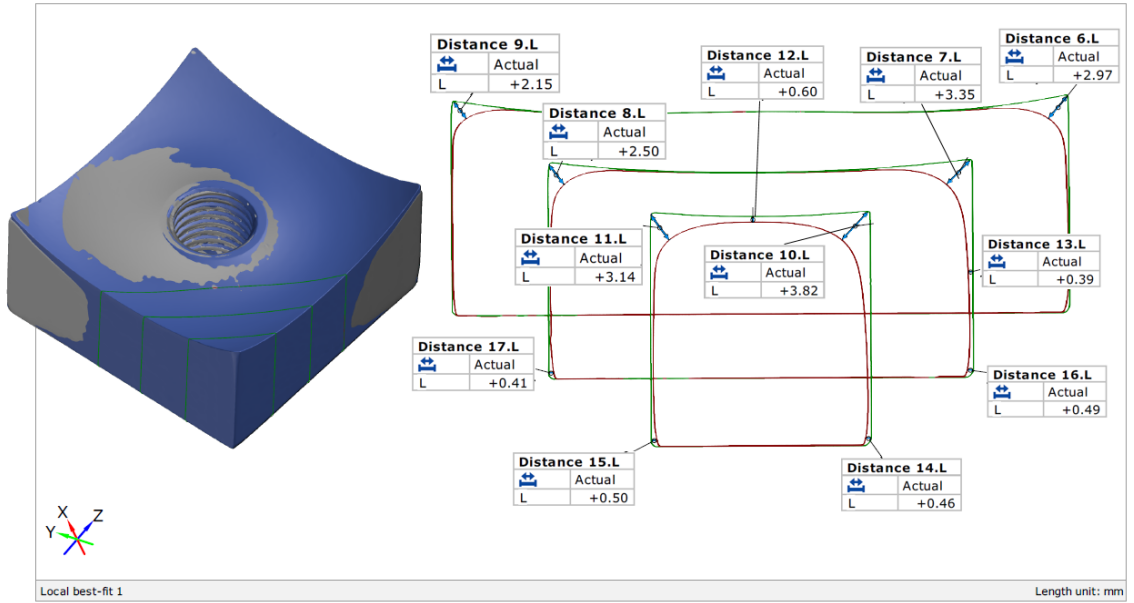
**Şekil 4. 44.** Y<sub>1</sub> optik tarama görünümü (12h PN)



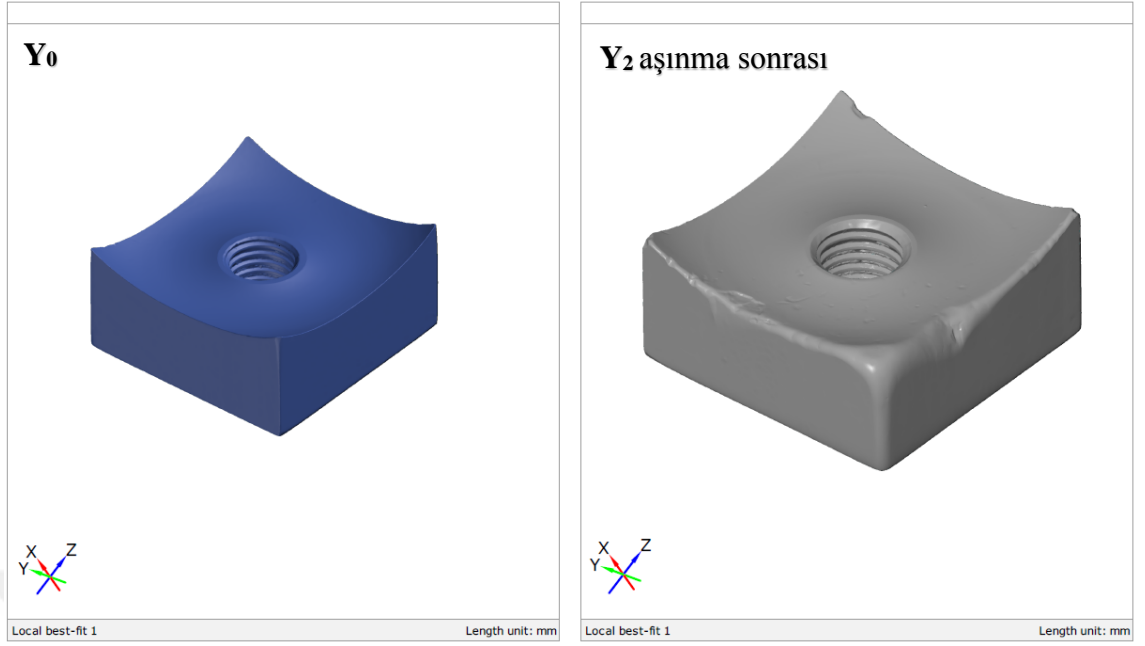
**Şekil 4. 45.** Y<sub>1</sub> optik tarama görünümü - Y<sub>0</sub> master data kıyaslaması (12h PN)



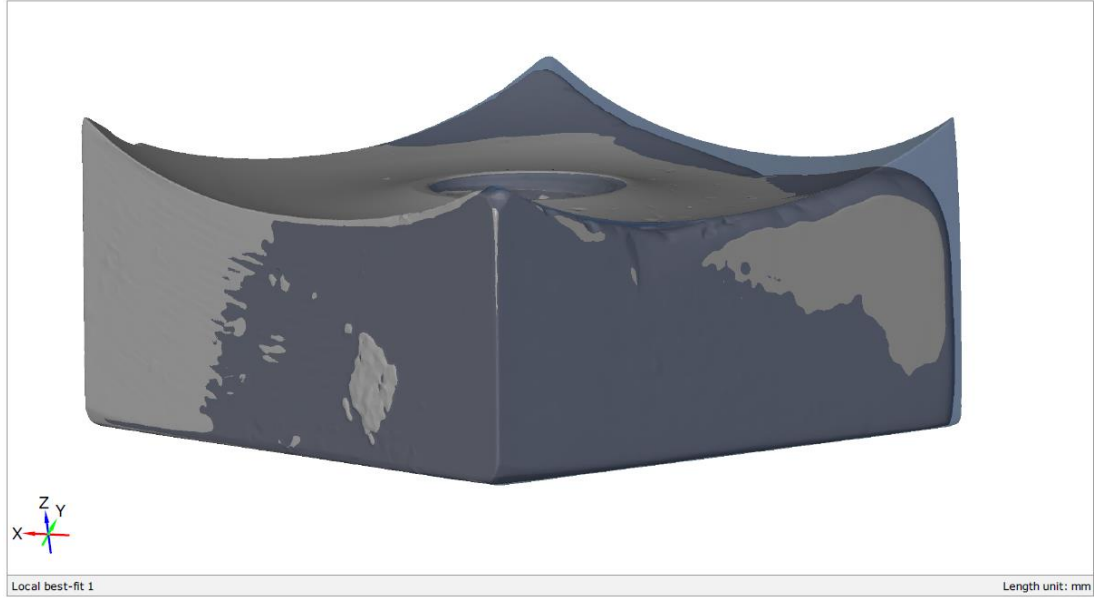
Şekil 4. 46.  $Y_1$  kenar hattı aşınma analizi (12h PN)



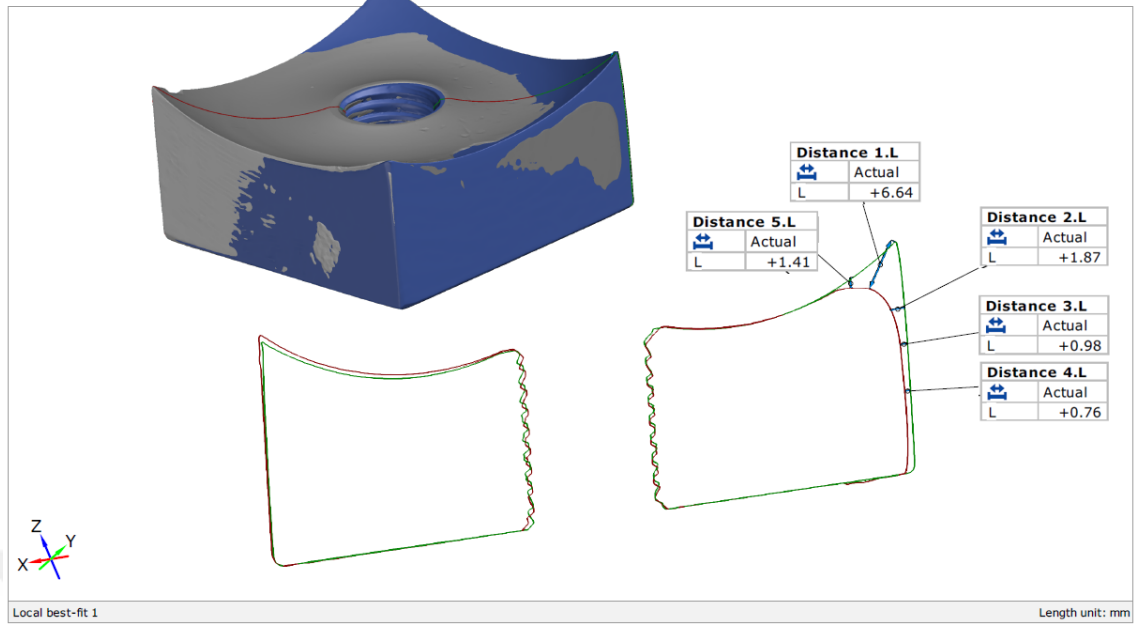
Şekil 4. 47.  $Y_1$  maksimum aşınma kesit analizleri (12h PN)



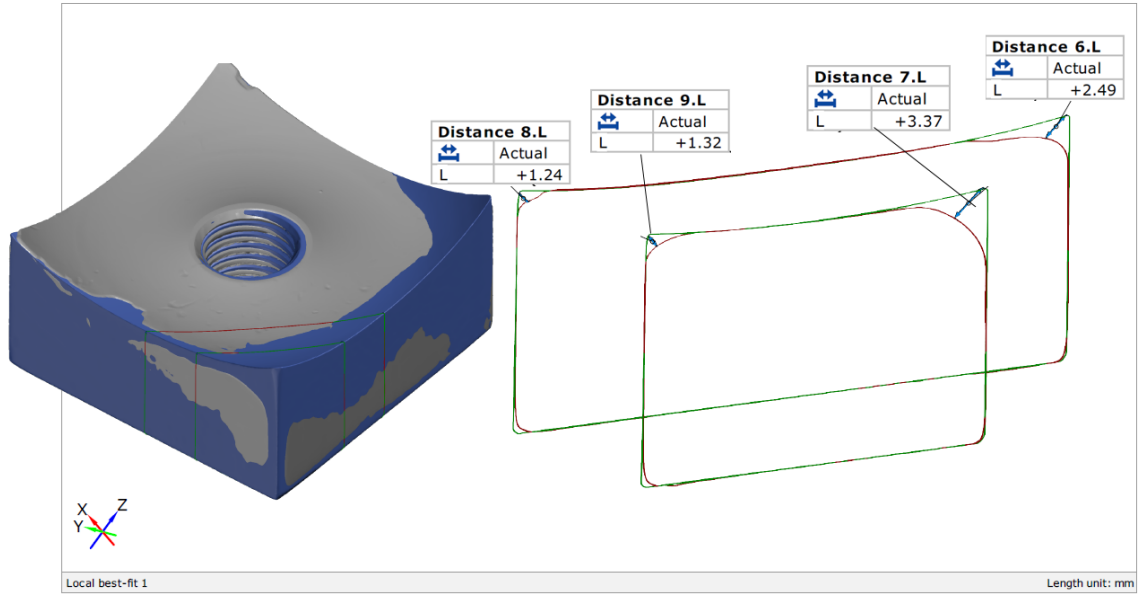
**Şekil 4. 48.** Y<sub>2</sub> optik tarama görünümü (18h PN)



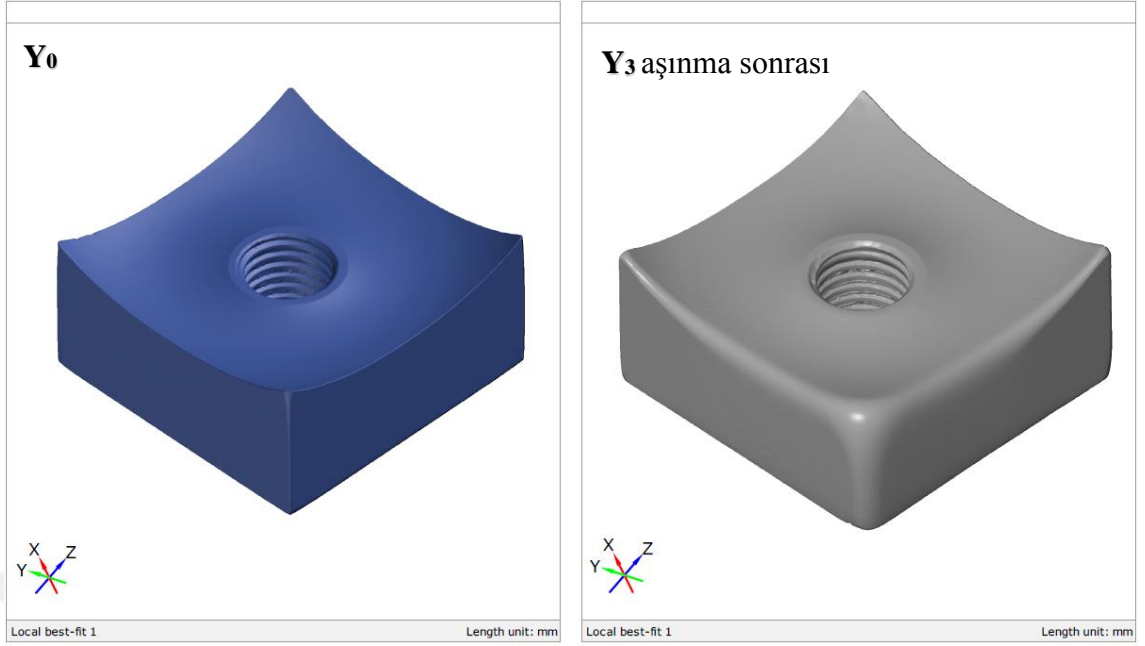
**Şekil 4. 49.** Y<sub>2</sub> optik tarama görünümü - Y<sub>0</sub> master data kıyaslaması (18h PN)



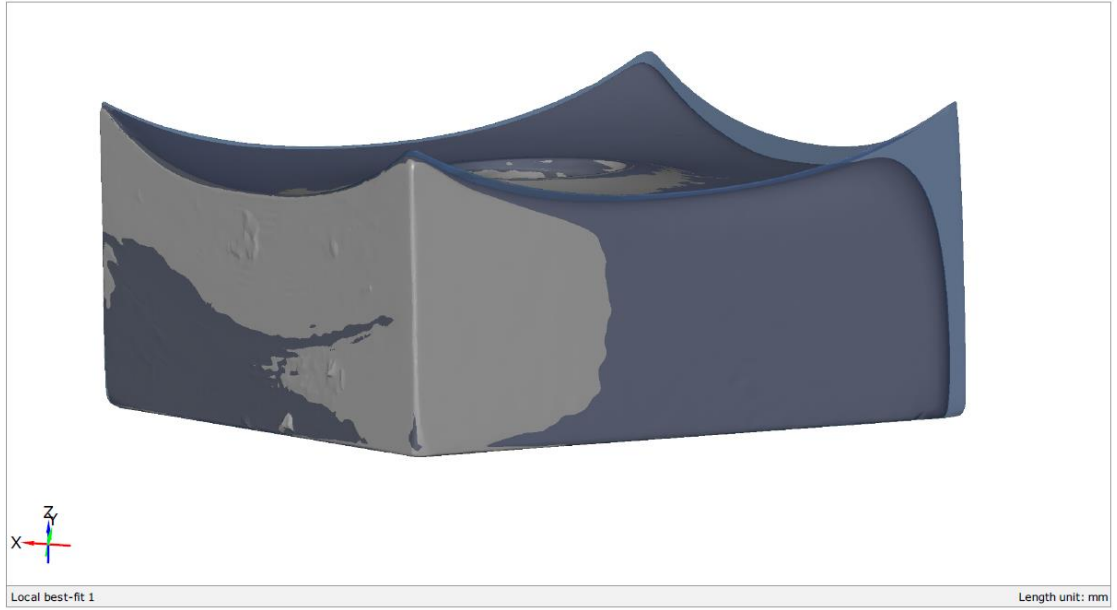
Şekil 4. 50. Y<sub>2</sub> kenar hattı aşınma analizi (18h PN)



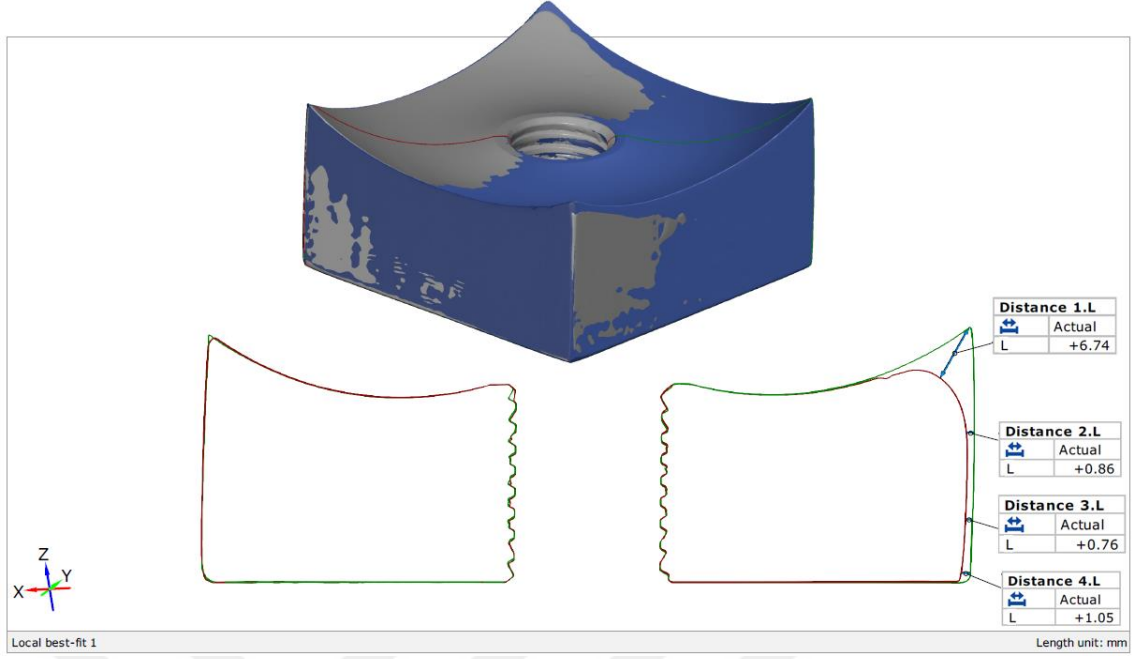
Şekil 4. 51. Y<sub>2</sub> maksimum aşınma kesit analizleri (18h PN)



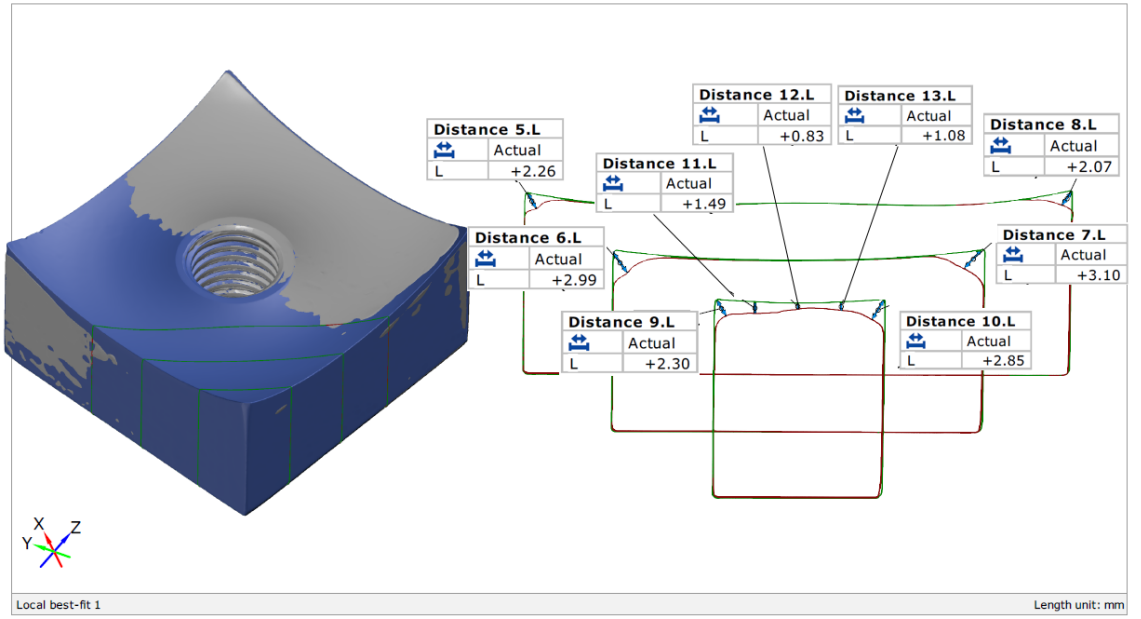
Şekil 4. 52.  $Y_3$  optik tarama görünümü (24h PN)



Şekil 4. 53.  $Y_3$  optik tarama görünümü -  $Y_0$  master data kıyaslaması (24h PN)



Şekil 4. 54. Y<sub>3</sub> kenar hattı aşınma analizi (24h PN)



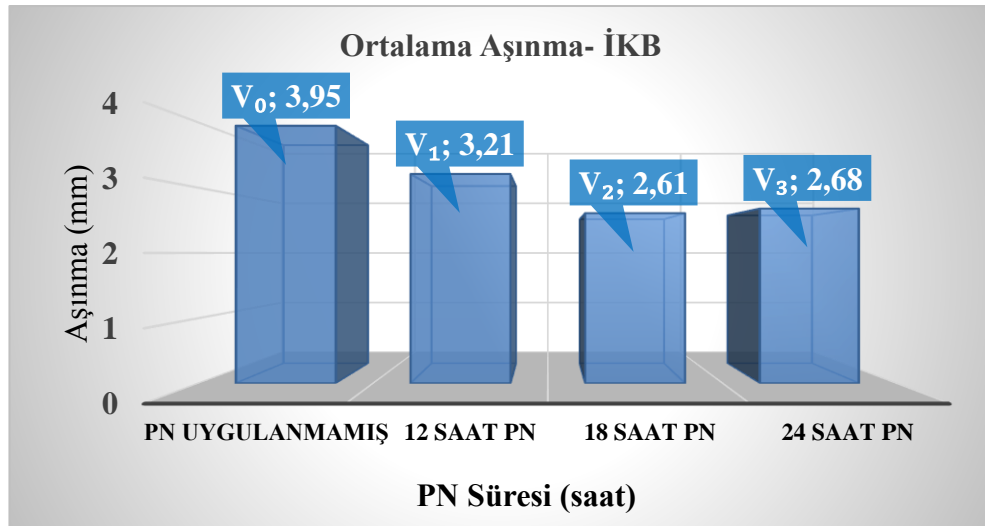
Şekil 4. 55. Y<sub>3</sub> maksimum aşınma kesit analizleri (24h PN)

### 4.3.3. İKB-YKB Aşınma Değerleri Karşılaştırması

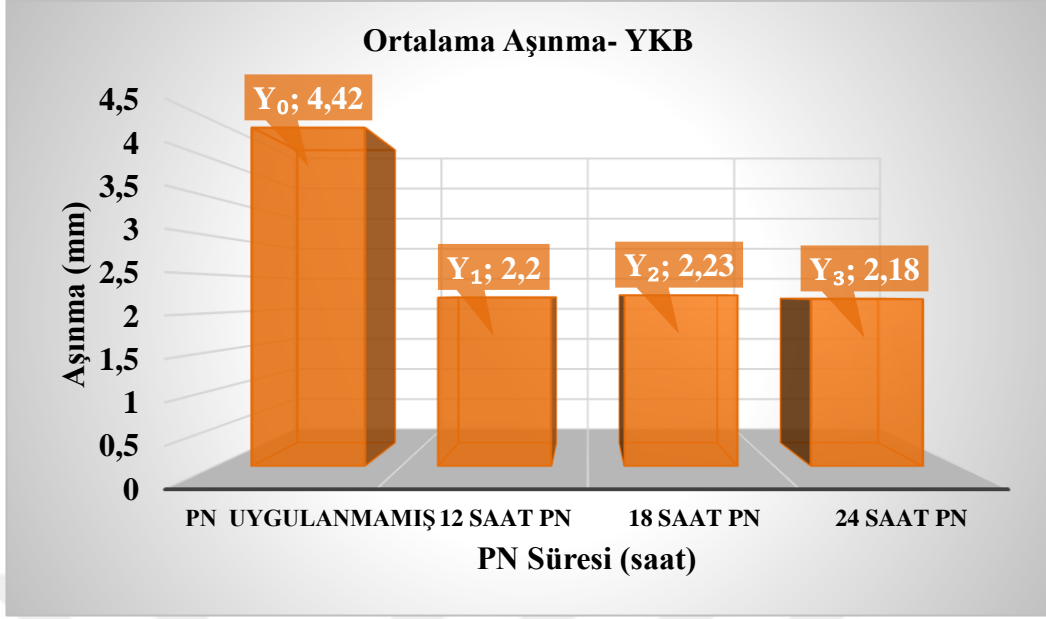
Kesici bıçakların kırıcı tambur üzerine çalışma yerleşim düzenine göre en çok aşınan keskin kenarlardan alınan ölçümler ile maksimum aşınma, keskin kenarı takip eden hat boyunca paralel alınan kesitler ile kenar hattı boyunca oluşan ortalama aşınma miktarı mm cinsinden hesap edilmiştir. Oluşturulan stl datalar üzerinden yapılan hacim hesabı ile de bıçaklarda meydana gelen hacim kaybı ise mm<sup>3</sup> cinsinden hesaplanmıştır.

Çizelge 4. 10. İKB ve YKB numuneleri aşınma karşılaştırması

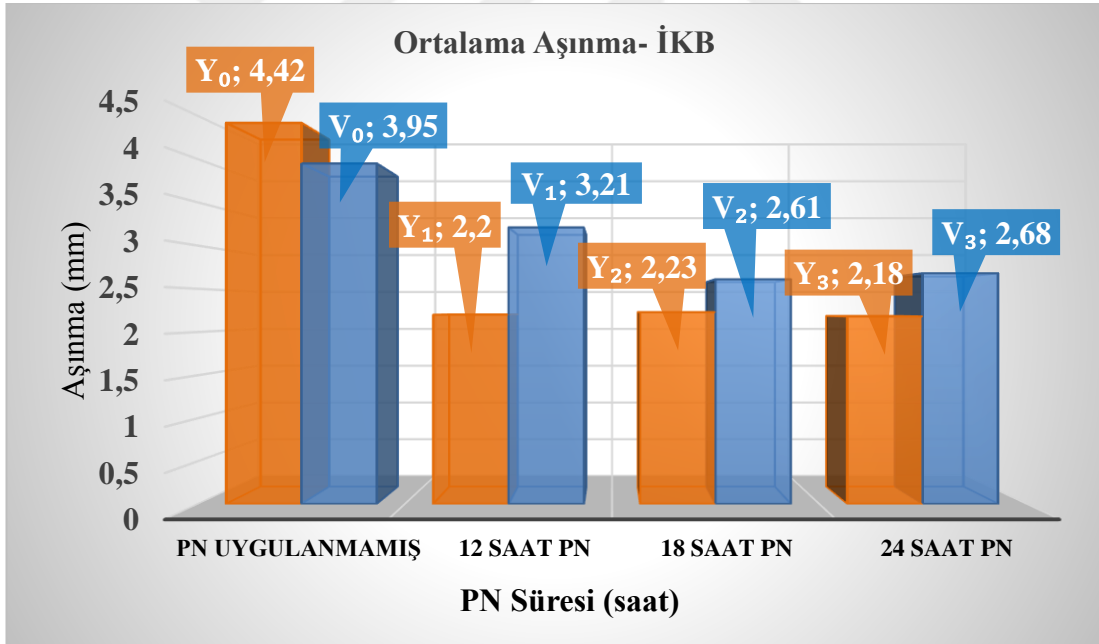
Test Şartları	Numune	Maks. Aşınma (mm)	Ort. Aşınma (mm)	Hacim mm <sup>3</sup>	Hacim Azalması mm <sup>3</sup>
Master Numuneler	V <sub>0</sub>	-	-	85810	-
	Y <sub>0</sub>	-	-	77754	-
PN Uygulanmamış aşınma sonrası V <sub>0</sub> -Y <sub>0</sub>	V <sub>0</sub>	12,32	3,95	84095	1715
	Y <sub>0</sub>	12,44	4,42	75606	2148
12h PN	V <sub>1</sub>	11,59	3,21	84152	1658
	Y <sub>1</sub>	8,08	2,20	76162	1592
18h PN	V <sub>2</sub>	7,71	2,61	85001	809
	Y <sub>2</sub>	6,64	2,23	76580	1174
24h PN	V <sub>3</sub>	7,35	2,68	84459	1351
	Y <sub>3</sub>	6,74	2,18	76896	858



Şekil 4. 56. Ortalama aşınma grafiği- İKB

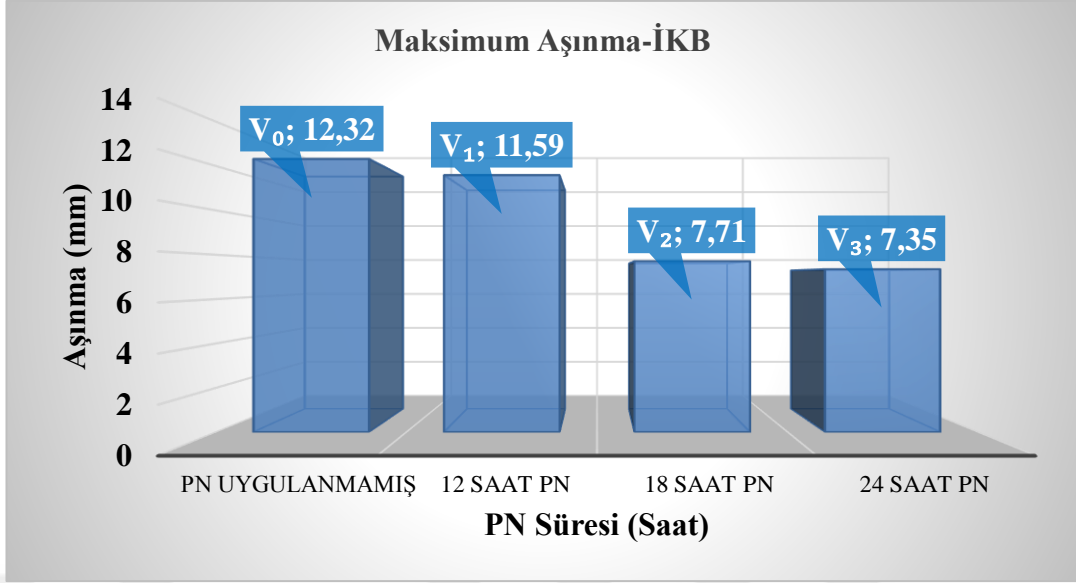


Şekil 4. 57. Ortalama aşınma grafiği- YKB

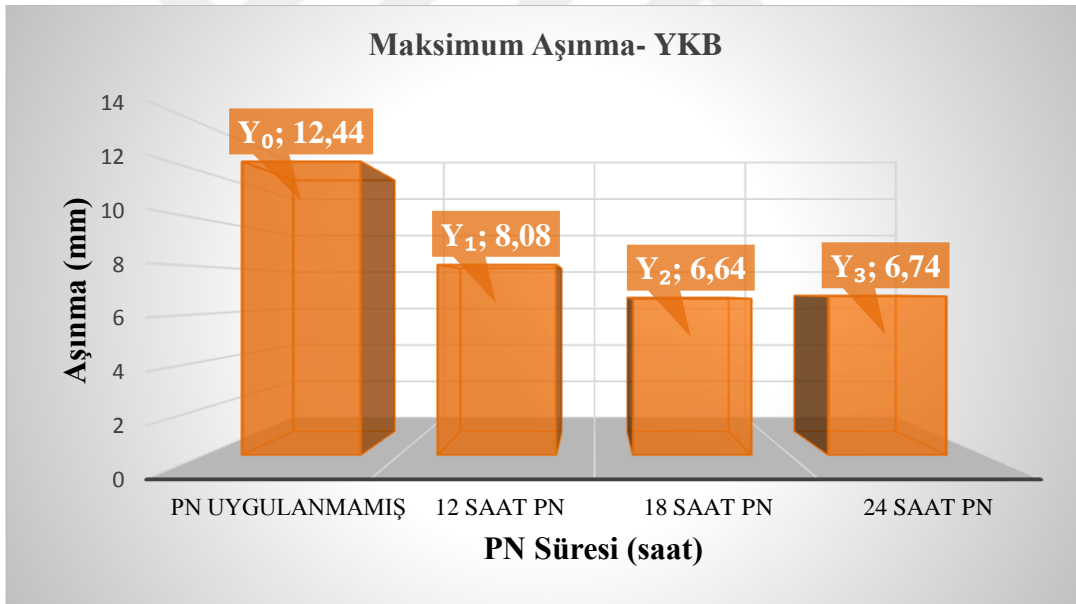


Şekil 4. 58. Ortalama aşınma karşılaştırma İKB-YKB

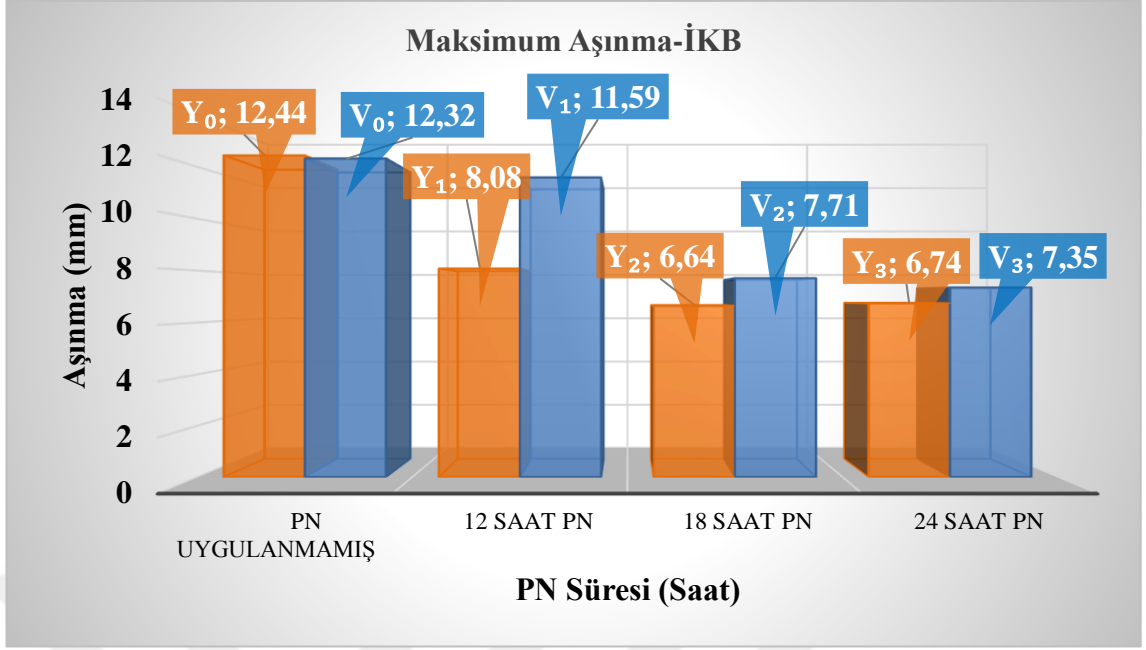




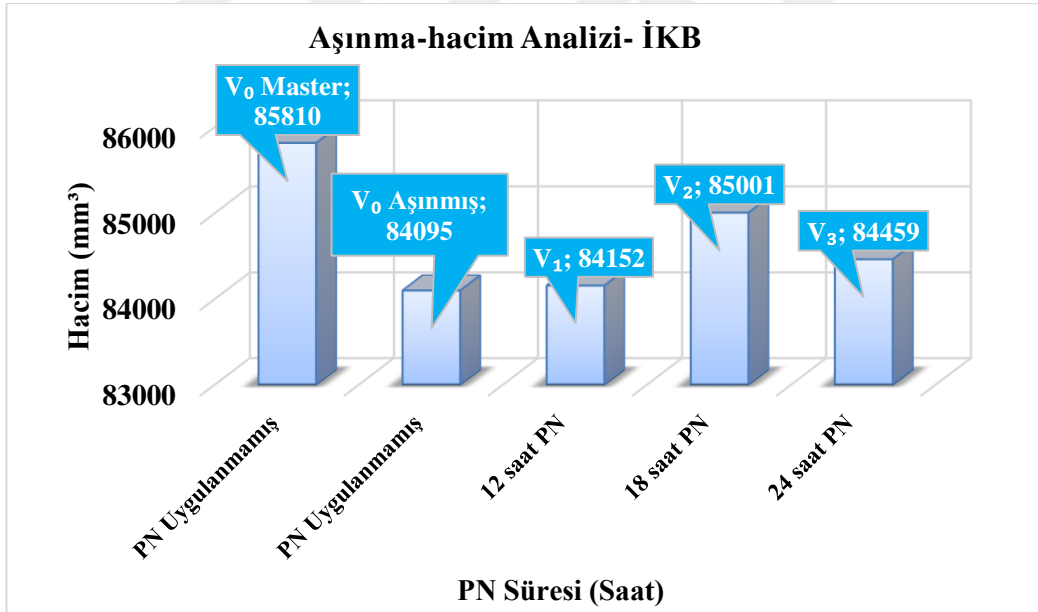
Şekil 4. 59. Maksimum aşınma grafiği- İKB



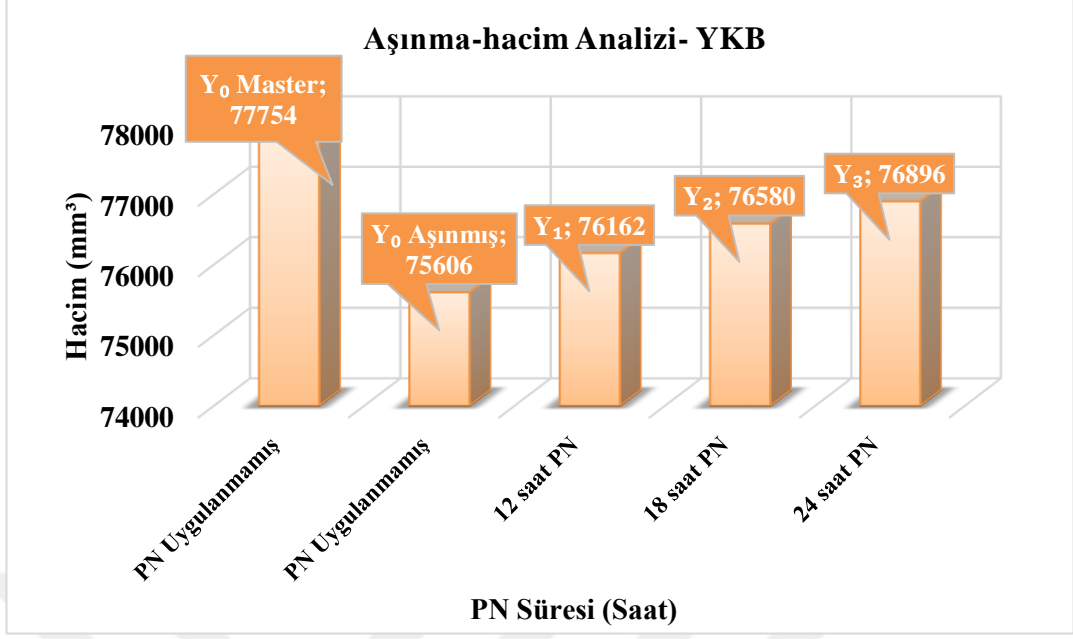
Şekil 4. 60. Maksimum aşınma grafiği- YKB



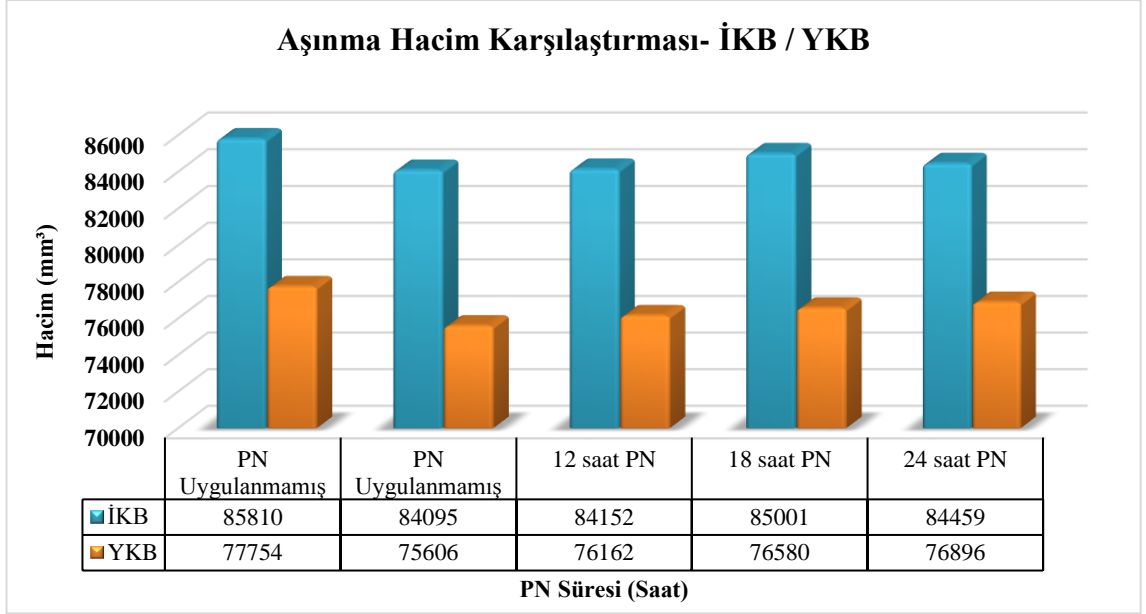
Şekil 4. 61. Maksimum aşınma karşılaştırma İKB-YKB



Şekil 4. 62. Aşınma hacim analizi-İKB



Şekil 4. 63. Aşınma hacim analizi-YKB



Şekil 4. 64. Aşınma hacim karşılaştırması-İKB / YKB



**Şekil 4. 65.** Saha deneme numuneleri

Optik tarama metodu ile oluşturulan STL modellerinden hacim hesabı  $\text{mm}^3$  biriminden hesap edilmiştir. PN uygulanmamış master parçalarda hacim değeri  $V_0$  için  $85810 \text{ mm}^3$ ,  $Y_0$  için  $77754 \text{ mm}^3$  olarak bulunmuştur. İKB numunelerinde en çok hacim azalması PN uygulanmamış  $V_0$  aşınma sonrası numunesinde olup  $1715 \text{ mm}^3$  değerindedir. Bu değere en yakın PN uygulanmış İKB numunesi ise  $V_1$  olup hacim azalması  $1658 \text{ mm}^3$  bulunmuştur.  $V_3$  numunesinde hacim azalması  $1351 \text{ mm}^3$  olarak gerçekleşmiştir. Aşınma hacim analizinde İKB numunelerinde en iyi performans  $809 \text{ mm}^3$  değeri ile  $V_2$  (18h PN) numunesinde gerçekleşmiştir

YKB numunelerinde ise en çok hacim azalması PN uygulanmamış aşınma sonrası  $Y_0$  numunesinde olup  $2148 \text{ mm}^3$  değerindedir. Bu değere en yakın PN uygulanmış YKB numunesi ise  $Y_1$  olup hacim azalması  $1592 \text{ mm}^3$  olarak bulunmuştur.  $Y_2$  numunesinde hacim azalması  $1174 \text{ mm}^3$  olarak gerçekleşmiştir. Aşınma hacim analizinde YKB numunelerinde en iyi performans  $858 \text{ mm}^3$  değeri ile  $Y_3$  (24h PN) numunesinde gerçekleşmiştir.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki maddelerde listelenmiştir;

- Yapılan mikro yapı analizlerinde, ithal kesici bıçak (İKB) numuneleri içerisinde en geniş PN difüzyon bölgesinin  $V_3$  numunesinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Yerli kesici bıçak (YKB) numuneleri içerisinde ise, en geniş difüzyon bölgesinin  $Y_3$  numunesinde gerçekleştiği tespit edilmiştir. Kesici bıçakların kendi içerisindeki değerlendirmelerinde, proses zamanı olarak en fazla PN işlemi uygulanan (24 saat) kesici bıçaklarda difüzyon derinliğinin en geniş değerlere ulaşması literatür ile paralellik göstermiştir. Ayrıca yine PN proses zamanı ile difüzyon bölgesi derinliği tüm İKB ve YKB numunelerinde doğru orantıda değişim göstererek, proses zamanının artışı ile difüzyon derinliği lineer olarak artış göstermiştir. YKB kesici bıçaklarının difüzyon bölge derinliklerinin İKB numunelerine göre daha düşük değerlerde kalması kesici çeliklerin kimyasal kompozisyonlarındaki farklılıklar ile ilişkilidir.
- Yapılan mikro sertlik ölçümlerinde İKB numunesinin çekirdek sertliği yaklaşık 693,84  $HV_{0,01}$ , YKB numunesinin ise yaklaşık 662,04  $HV_{0,01}$  olarak ölçülmüştür. İKB numunesinin YKB numunesine göre çekirdek sertlik değerinin daha yüksek olması, İKB numunelerinin kimyasal kompozisyonlarında sertliğini arttıran alaşım elementleri olan C, V ve Mn elementlerinin daha fazla % oranda yer almasıyla ilişkilidir. Sertlik değerlerinin daha derin difüzyon derinliklerine inmesi beklenildiği gibi proses zamanı olarak en fazla PN işlemi uygulanan  $V_3$  ve  $Y_3$  numunelerinde gerçekleşmiştir. Aynı ölçüm mesafelerinde  $V_3$  ve  $Y_3$  numunelerinin kendi gruplarındaki sertlik değerleri diğer numunelere göre daha yüksek ölçülmüştür.
- Optik tarama ölçüm metodu kullanılarak tersine mühendislik yöntemiyle kesici bıçakların çalışma esnasında aktif olarak aşınmaya maruz kalan kenar hattından yapılan maksimum aşınma analizine göre; en fazla aşınma beklenildiği gibi PN uygulanmamış  $Y_0$  ve  $V_0$  numunelerinde gerçekleşmiştir. Bu analize göre tüm

kesici bıçaklar içerisinde  $Y_0$  numunesi en fazla aşınan numune olmuştur. Tüm kesici bıçaklar içerisinde en az aşınma 18 saat PN işlemi uygulanan  $Y_2$  numunesinde gerçekleşmiştir.

Kesici bıçakların çalışma esnasında aktif olarak aşınmaya maruz kalan kenar kesitlerinden eşit aralıklar alınarak yapılan ortalama aşınma analizine göre; en fazla aşınma beklenildiği gibi PN uygulanmamış  $Y_0$  ve  $V_0$  numunelerinde gerçekleşmiştir. Bu analize göre tüm kesici bıçaklar içerisinde  $Y_0$  numunesi en fazla aşınan numune olmuştur. Tüm kesici bıçaklar içerisinde en az aşınma 24 saat PN işlemi uygulanan  $Y_3$  numunesinde gerçekleşmiştir. Yapılan iki farklı ölçüsel aşınma analizine göre YKB numuneleri İKB numunelerine göre daha iyi aşınma performansı göstermiştir.

- ✚ Tersine mühendislik metodu ile oluşturulan matematik modeller (STL datalar) üzerinden yapılan hacim azalma analizine göre; kesici bıçaklarda en fazla hacim kaybı  $Y_0$  ve  $V_0$  numunelerinde tespit edilmiştir.

En az hacim kaybı  $809\text{mm}^3$  değeri ile 18 saat PN prosesi uygulanan  $V_2$  numunesinde gerçekleşmiştir. YKB numunelerinde ise en az hacim kaybı  $858\text{mm}^3$  değeri ile 24 saat PN prosesi uygulanan  $Y_3$  numunesinde gerçekleştirmiştir. İKB ve YKB numunelerinde gerçekleşen hacim kayıpları, ortalama aşınma analizinde bulunan sonuçlar ile paralellik göstermektedir.

## KAYNAKLAR

- Alp, K. 2011.** ATY Üretimi Kullanımı ve Etkileri, ÇOB Atık Yön. Sempozyumu, 26 Nisan 2011, İstanbul.
- Anonim, 2007.** Sürdürülebilir Çimento Üretimi, Avrupa Çimento Sanayinde Alternatif Yakıt Ve Hammaddelerin Birlikte İşlenmesi, Brüksel- Belçika, TÇMB çeviri.
- Anonim, 2012.** İÜ, Metalurji ve Malzeme Müh. Böl. Lab. 2 Ders Notları, İstanbul.
- Anonim, 2013.** Atık Yönetmeliği, [http://www.bursacimento.com.tr/wp-content/uploads/2014/11/atik\\_alim\\_listesi.pdf/](http://www.bursacimento.com.tr/wp-content/uploads/2014/11/atik_alim_listesi.pdf/) (Erişim Tarihi: 20.01.2016).
- Anonim, 2015a.** 2015 Veriler Raporu, <http://www.tcma.org.tr/> (Erişim Tarihi: 17.03.2016).
- Anonim, 2015b.** Şirket Tanıtımı ve Ürün Bilgisi Broşürü, [http://www.bursacimento.com.tr/wp-content/uploads/2015/11/web\\_katalog.pdf/](http://www.bursacimento.com.tr/wp-content/uploads/2015/11/web_katalog.pdf/) (Erişim Tarihi: 18.01.2016).
- Anonim, 2015c.** Triboloji, Metallerde Aşınma Türleri ve Sınıflandırılması.
- Anonim, 2016a.** ATY Çevrimine Tabii Olan Atıklara Örnekler, <http://www.andritz.com/products-and-services/> (Erişim Tarihi: 12.07.2016).
- Anonim, 2016b.** Production Brochure, <http://www.directindustry.com/> (Erişim Tarihi: 02.04.2016).
- Anonim, 2016c.** Prd. Brochure, <http://www.metso.com/recycling/> (Erişim Tarihi: 24.01.2016).
- Anonim, 2016d.** AISI D2 / DIN 1.2379 Soğuk Takım İş Çeliği
- Anonymous, 2001.** Solid Recovered Fuels, Quality Assurance RAL-GZ 724.
- Anonymous, 2008.** Briefing Autoclaving, Mechanical and Biological Treatment (MBT).
- Anonymous, 2013.** Understanding Refused Derived Fuel, <http://www.no-burn.org/> (Erişim Tarihi: 09.02.2016).
- Archard, J.F. 1953.** Contact and Rubbing of Flat Surfaces, *J. Appl. Phys.*, 24, 981-988.
- Arman, Y. 2014.** Kırma-Elleme ve Taşıma Makineleri Seminer Notları, Ankara.
- Ayhan, S. 2012.** “Çimento Sektöründe Atıktan Enerji Geri Kazanımı ve Yasal Mevzuat , 18<sup>th</sup> International Energy and Environment Fair and Conference, İstanbul.
- Bağcı, M. 2010.** Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Selçuk Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Bakkal, M. 1999.** İyon Nitrürlemenin Östemperlenmiş AISI 8660 Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bayer, R.G. 1994.** Mech. Wear Prediction and Prevention, Marcel Dekker, New York, 280.
- Bengisu, O. 1983.** Vakum Mühendisliği. DEU., Mühendislik Fak. Yayını, İzmir.
- Bhushan, B. and Gupta, K. B. 1991.** Handbook of Tribology. McGraw-Hill, U.S.A.
- Bohler Türkiye, 2016.** Soğuk Takım İş Çelikleri. <http://www.bohlerturkiye.com/> (Erişim Tarihi: 14.06.2016).
- Burwell, J.T. 1957.** Survey of Possible Wear Mechanisms, *Wear*, 1, 119–141.

- Chiou, Y.C., Kato, K., and Kayaba, T. 1985.** Effect of Normal Stiffness in Loading System on Wear of Carbon Steel; Severe Mild Wear Transition, *J. Tribology*, 107: 491-495.
- Cho, K. S., Lee, C.O. 1980.** The effects of Carbon on Ion-Nitriding,, *Journal of the Engineering Materials and Technology*, 102: 229-233.
- Çelik, A., Karakan, M., Alasaran, A. 2000.** Gaz Karışımlarının İyon Nitrüleme Üzerine Etkisi, Dokuz Eylül Üniv., *Fen ve Mühendislik Dergisi 2 (2)*: 87-94
- Davidovits, J. 2010.** Geopolymer Institute, a research institution based in Saint- Quentin, Picardie, France.
- Demirci, A. H. 1982.** “Ötektoidaltı Alaşımsız Çeliklerin Isıl İşlemlere Bağlı Olarak Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi ve Optimizasyonu”, *Doçentlik Tezi*, E. Ü. Makine Fakültesi.
- Devi, U., Mohanty, M. 1998.** Plasma-Nitriding of Tool Steels For Combined Percussive Impact and Rolling Fatigue Wear App. *Surface & Coatings Technology*, 107: 55-64.
- Edenhofer, B. 1974.** Physical and Metallurgical Aspects of Ion Nitriding. *Heat Treatment of Metals*, 1, 23-28.
- Ekincioglu, O., Gurgun, A.P., Engin, Y., Tarhan, M., Kumbaracıbaşı, S. 2012.** Effects of Alternative Fuels and Raw Materials in Sustainable Cement Production, 10th International Congress on Advances in Civil Engineering, Middle East Technical Univ., Ankara, Turkey.
- Engin, Y., Tarhan, M., Kumbaracıbaşı, S. 2011.** Çimento Endüstrisinde Sürdürülebilir Üretim, Akçansa Çimento San. Ve Tic. A.Ş. İstanbul.
- European Commission, Directorate General Environment, 2003.** Refuse Derived Fuels Current Practice And Perspectives. Final report, [http://www.cement.ca/images/stories/eu\\_-\\_directorate\\_general\\_environment.pdf/](http://www.cement.ca/images/stories/eu_-_directorate_general_environment.pdf/) (Erişim Tarihi: 22.03.2016).
- Fancey K.S., Leyland A., Egerton D., Torres D., Matthews A. 1995.** The Influence of Process Gas Characteristics on The Properties of Plasma Nitrided Steel, *Surface and Coating Tech.*, 76-77: 694-699.
- Gendebien, A., Leavens, A., Blackmore, K., Godley, A., Lewin, K., Whiting, K.J., Davis, R., Giegrich, J., Fehrenbach, H., Gromke, U., del Bufalo, N.& Hogg, D. 2000.** Refused Derived Fuel, Current Practice and Prespectives (B4-3040/2000/306517/MAR/E3), Final Report, Commission of EC Directorate General Environment WRc, Swindon.
- Gür, A.K. 2006.** Aşınma Mek., Fırat Üniv., Fen Bil. Enstitüsü, Doktora Semineri, Elazığ.
- Güven, T.Y. 2008.** Katı Atıkların Çimento Fırınlarında Bertaraf Edilmesi Ve Yakıt Olarak Kullanılması, *Türkiye Kalkınma Bankası Yayını*, Temmuz – Eylül 2008 Sayı: 49, Sayfa: 29.
- Hudis, M. 1973.** Study of Ion-Nitriding, *Journal Appl. Phys.*, 44 (A): 1489-1496.
- İğdil, M. C., Tosun, M., Trabzon, L. 2012.** Plazma Nitrüleme İşleminin 316L Ostenitik Paslanmaz Çeliğinin Malzeme Özelliklerine Mikro Ve Nano Etkisi, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 53(630): 54-68.



- Kahraman, F., Karadeniz, Ö., Durmuş, H. 2009.** Plazma Nitrülenmiş Wiroloy Nikel Krom Alaşımının Sertlik Değişiminin Yapay Sinir Ağları İle İncelenmesi. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük Üniv., (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük.
- Karamış, M. B., Gerçekçiöglü, E. 1993.** Plazma Nitrülenmiş Paslanmaz Çeliklerin Yüzey Tabaka Özellikleri, 5. Denizli Malzeme Sempozyumu, 7-9 Nisan 1993, Bildiri Kitabı, 541-550, Denizli.
- Karamış, B. 1985.** Toprak İşleme Aletlerinde İş Organının Aşınmasının Etüdü, MKE Çelik Türleri Kataloğu, 1972, Ankara
- Karuss, G. 1990.** Heat Treatment and Processing Principles, ASM International, p286
- Kato, K., Adachi, K. 2001.** Wear Mechanism, Modern Tribology Handbook, Chapter 7.
- Koç, R., Mutlu, İ. 2005** Poli-Oksi-Metilen (Pom) Ve Kompozitlerinin Abrasiv Aşınma Davranışları, *Teknoloji Dergisi*, 2: 199–205
- Komptech GmbH, 2011.** RDF, <https://www.komptech.com/> (Erişim Tarihi: 11.03.2016).
- Korkmaz, E.E. 2009.** İyon İmplantasyonu ve Plazma Nitrüleme Yöntemi ile Yüzeyi Sertleştirilmiş Soğuk İş Takım Çeliklerinin İyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Uludağ Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Kowacs, W., Russell, W. 1986.** An Introduction to Ion nitriding-What is it? Why is it Used? Where is it Used?, First Ion Nitriding International Conference, September 15–17 1986, Cleveland-Ohio, USA.
- Kramer, B. M. 1983.** Requirements for Wear Resistant Coating, *Thin Solid Films*, 108.
- Kwon, S.C., Lee, G.H., Yoo, M. C. 1986.** A Comparative Study Between Pulsed D. C. Ion Nitriding behavior in specimens with blind holes, in Spalvins T (ed.) Proc.'86 International Conference on Ion Nitriding, 15-17 September, Cleveland, OH.
- Li, F. 1989.** On Micro-Structure Of Ion-Nitrided Layer. Proceedings of ASM's 2nd International Conference on Ion Nitriding/Carburising, 18-20 September, Cincinnati, Ohio, USA.
- Miheu, 2016.** Production Brochure, <http://www.miheu.si/sl/> (Erişim Tarihi: 16.01.2016).
- Nithikul, J. 2007.** Potential Of Refuse Derived Fuel Production From Bangkok Municipal Solid Waste, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of MSc in Environmental Eng. and Management, Chulalongkorn Univ., Bangkok, Thailand.
- Nitriding Behaviour in Specimens With Blind Holes**, First Ion Nitriding International Conference, Cleveland-Ohio, USA, 15-17 September, 77-82.
- O'Brien, J.M. and Goodman, D. 1990.** Plasma (Ion) Nitriding, in Metals Handbook Heat Treating, 4: 420-425, American Society for Metals, Ohio.
- Özdemir, U., Erten, M. 2005.** Plazma Nitrüleme Parametrelerinin Değişen Malzeme Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İstatistiksel Analizi, *Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, Ocak 2005 1: 37-45.
- Özdemir, U., Erten M. 2003,** Talaşlı imalat Sırasında Kesici Takımda Meydana Gelen Hasar Mekanizmaları Ve Takım Hasarını Azaltma Yöntemleri, *Havacılık Ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 1: 37- 50
- Özel, A. 2011.** Çimento Üretiminde Atı Kullanımı Ve Çevresel Etkileri, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Pretz, T., Khoury, A., Uepping, R., Glorius, T. & Tubergen, J. Van. 2003.** BREF ,Waste treatment - Solid recovered fuels Editors: RWTHAachen I.A.R.,European Recovered Fuel Organisation (ERFO).
- Pye, D. 2003.** Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing, ASM International, Materials Park, Ohio 44073-0002.
- Rakhit, A.K. 2000.** Nitriding Gears, Chap. 6, Heat Treatment of Gears: A Practical Guide for Engineers, ASM International, p 133–158
- Rie, K. T. and Broszeit, E. 1995.** Plasma Diffusion Treatment and Duplex Treatment-Recent Development and New Application. *Surf. Coat. Tech.*, 76-77, 425-436.
- Saraç, M., Uludağ, O. 2008.** Dünya’da ve Türkiye’de Atıktan Enerji Üretimi, [http://www.emo.org.tr/ekler/f2f63d16f6466cc\\_ek.pdf/](http://www.emo.org.tr/ekler/f2f63d16f6466cc_ek.pdf/) (Erişim Tarihi: 07.02.2016).
- Schacherl, R.E., Graat, P.C.J. 2004.** The Nitriding Kinetics of Iron-Chromium Alloys; The Role of Excess Nitrogen: Experiments and Modelling. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35: 3387-3398.
- Sevil, C. 2008.** Ostenitik Paslanmaz Çeliklerin İyon Nitrürasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Sika, P. 2000.** Energy from MSW, RDF Pelletization, A Pilot Indian Plant, Department of Science & Technology, Government of India.
- Soylu, M. 2006.** Çimento Üretiminde İstatistikler, Enerji Tüketimi, Sürdürülebilirlik, Hacettepe, Ankara.
- Spalvins, T. 1993.** Tribological and Microstructural Characteristics Of Ion-Nitrided Steels, *Thin Solid Films*, 108, 157-163.
- Spalvins, T. 1989.** Advances and Directions Of Ion Nitriding/Carburizing, Proceedings of ASM’s 2<sup>nd</sup> International Conference on Ion Nitriding/Carburising, Cincinnati, Ohio, USA.
- Stahlschlüssel, 1983.** Foundations of Theoretical Mechanics, Springerlag, p. 185.
- Stokes, J. 2008.** Theory and Application of the High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Thermal Spray Process, Dublin City University ISBN 1-87232-753-2 (ISSN 1649-8232).
- Şirin, Ş. Y. 2004.** İyon Nitrürleme Yüzey Sertleştirme Isıl İşleminin AISI 4340 Çeliğinin Yorulma Dayanımına Etkisinin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Yenilenebilir Enerji Genel Müd. 2012.** Faaliyet Raporu 2012
- Thelning, K.E. 1994.** Steel and Heat Treating, Marcel Decler Inc., New York, 260-320.
- Thelning, K.E. 1984.** Steel and Its Heat Treatment, 2nd ed., Butterworths, p 450
- TMMOB Makine Müh. Odası, 2011.** 6. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi, İzmir.
- Tolay, M. 2003.** Katı Atıklardan ve Biyokütleden Enerji Üretimi Teknolojileri ve Entegre Katı Atık Yönetiminde Fizibilite Çalışmaları, <http://www.dektmk.org.tr/upresimler/MTOLAY.pdf/> (Erişim Tarihi: 15.04.2016).
- Topçuoğlu, G. 2010.** PN Yöntemiyle Demir Dışı Metallerin Nitrürlenmesi, DEÜ, İzmir.
- Tübitak, 2009.** Türkiye’de Evsel Nitelikli Atıklar, Bülten Şubat 2010 Sayı: 98.
- US Geological Survey, 2014.** Cement report, <http://minerals.usgs.gov/> (E.T.: 13.07.2016).

**World Business Council For Sustainable Development and International Energy Agency 2009.** Cement Technology Roadmap.

**Yasumaru, N., Tsuchida, K., Saji, E. and Ibe, T. 1993.** Mech. Properties of Type 304 Austenitic Stainless Steel Coated With TiN After Ion-Nitriding. *Mat. Transactions, JIM*, 34 (8), 696-702.

**Xianqiang, P., Qihua, W., Jianmin, C. 2005.** Tribological responses of Phenolphthalein Poly (ether sulfone) on proton irradiation; Elsevier, *Wear*, 719-724.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Furkan BOSTANCI

Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa-1990

Yabancı Dili : İngilizce, İtalyanca

Eğitim Durumu (Kurum Yıl)

Lise : Bursa Cumhuriyet Lisesi Y.D.A., 2008

Lisans : Erciyes Üniversitesi, 2012

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : TOFAŞ (2015-....)

: Franz Kiel A.Ş. (2013-2015)

İletişim (e-posta)

: furkan.bostanci@tofas.com.tr