



**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AISI 8620 ÇELİĞİNİN KOROZYON ÖMRÜNÜN BORLAMA
PROSESİ İLE ARTIRILMASI**

**HAMZA EFE
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Salih Uğur BAYÇA**

KIRIKKALE-2022



**T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AISI 8620 ÇELİĞİNİN KOROZYON ÖMRÜNÜN BORLAMA
PROSESİ İLE ARTIRILMASI**

**HAMZA EFE
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DANIŞMAN
Doç. Dr. Salih Uğur BAYÇA**

KIRIKKALE-2022

Hamza EFE tarafından hazırlanan “AISI 8620 ÇELİĞİNİN KOROZYON ÖMRÜNÜN BORLAMA PROSESİ İLE ARTIRILMASI” adlı tez çalışması, aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile Kırıkkale Üniversitesi Enstitüsü Savunma Teknolojileri Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Salih Uğur BAYÇA

Metalürji ve Malzeme Müh, Kırıkkale Üniversitesi İmza

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Prof. Dr. Mehmet TÜRKER

Metalürji ve Malzeme Müh, Kırıkkale Üniversitesi İmza

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye : Prof. Dr. Ramazan ÇITAK

Metalürji ve Malzeme Müh, Gazi Üniversitesi İmza

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 13/06/2022

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Recep ÇALIN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

...../...../.....

Hamza EFE

ÖZET

AISI 8620 ÇELİĞİNİN KOROZYON ÖMRÜNÜN BORLAMA PROSESİ İLE ARTIRILMASI

EFE, Hamza
Kırıkkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Savunma Teknolojileri, Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Doç. Dr. Salih Uğur BAYÇA
2022, 76 sayfa

Bu çalışmanın amacı AISI 8620 çeliğinin korozyon ömrünün borlama işlemi ile artırmaktır. Bu amaçla, AISI 8620 çeliği 700 °C sıcaklıkta 4, 8, 12 ve 16 saat, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda 2, 4, 6 ve 8 saat borlama sürelerinde borlama işlemleri yapılmıştır. Böylece çelik yüzeyini korozyona dayanıklı ve seramik bir metal borür tabaka ile kaplamaktır. Borlama işlemi katı borlama yöntemi için patenti alınmış Baybora-1 borlama ajanı kullanılarak yapılmıştır. Numunelerin metal-borür tabakası ve geçiş tabakasının morfolojisi SEM cihazı ile belirlenmiştir. Borlanmış numunelerin yüzeyinde oluşan metal-borür tabakasının faz analizleri XRD cihazı ile yapılmıştır. Borlanmış ve borlanmamış çelik numunelerin korozyon deneyi ASTM G31-72 standardına göre sıcak sülfürik asit çözeltisinde (56°C) yapılmıştır. Numunelerin korozyon dayanımı ağırlık kaybı yöntemi ile belirlenmiştir. Borlama işlemi sonucunda, alt tabaka çeliği ile karşılaştırıldığı zaman seramik demir borür tabakanın sertliği yaklaşık 9 kat artış gözlenmiştir. Borlanmış çeliğin korozyon direnci, borlanmamış çeliğin korozyon direncinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Borlama işleminde, sonradan su verme gibi işlemlere gerek olmadığı için malzeme de istenmeyen çarpılmalarında önüne geçilebilir.

Anahtar Sözcükler: AISI 8620, Borlama, Korozyon Testi, Sertlik, Yüzey sertleştirme,

ABSTRACT

INCREASING THE CORROSION LIFE OF AISI 8620 STEEL BY THE BORIDING PROCESS

EFE, Hamza
Kırıkkale University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Defense Technologies, Master Thesis
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Salih Uğur BAYÇA
2022, 76 pages

The aim of this study is to increase the corrosion life of AISI 8620 steel by boriding. For this purpose, boriding processes of AISI 8620 steel were carried out at 700 °C for 4, 8, 12 and 16 hours, at 900 and 950 °C for 2, 4, 6 and 8 hours. Thus, the steel surface is covered with a ceramic metal boride layer that is resistant to corrosion. Boriding process was carried out using Baybora-1 boronizing agent, which was patented for use in solid boronizing method. The metal-boride layer of the samples and the morphology of the transition layer were determined by SEM. The phase analyzes of the metal-boride layer formed on the surface of the borided samples were made with the XRD. Corrosion tests of borided and non-borided steel samples were carried out in hot sulfuric acid solution (56C) using ASTM G31-72 standard. The corrosion resistance of the samples was determined by the weight loss method. As a result of the boriding process, a ceramic iron boride layer with a hardness of about 9 times that of the substrate was obtained. It has been determined that the corrosion resistance of borided steel is higher than the corrosion resistance of non-borided steel. Since there is no need for subsequent processes such as quenching in the boriding process, unwanted distortions of the material can be avoided.

Keywords: AISI 8620, Boronizing, Corrosion Test, Microstructures. Hardness, Surface hardening, Boriding.

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum çalışmada konu tespitinden deney çalışmalarına kadar her safhasında yanımda olan ve desteğini eksik etmeyen tecrübelerini benimle paylaşan değerli Danışman hocam Sayın Doç. Dr. Salih Uğur BAYÇA' ya, teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Bor Elementi.....	2
1.1.1. Bor Madeni	2
1.1.2. Bor Elementi Özellikleri.....	2
1.1.3. Bor Elementinin Fiziksel Özellikleri	2
1.2. Bor Bileşikleri	3
1.2.1. Bor Karbür (B ₄ C).....	3
1.2.2. Bor Nitrür (BN)	3
1.2.3. Boridler	3
1.2.4. Bor Halojenürler	4
1.2.5. Bazı Bor Bileşiklerin Sertlikleri	4
1.3. Borür Tabakası Özellikleri	4
1.3.1. Borür Tabakası Oluşumu, Büyümesi ve Gelişmesi	4
1.3.2. Borür Tabakaları ve Kalınlıkları.....	5
1.3.3. Sertlik.....	6
1.3.4. Aşınma	6
1.3.5. Korozyon Direnci	6
1.3.6. Bor Tabakasındaki Kalıntı Gerilmeler.....	6
1.3.7. Borlanabilen Malzemeler.....	6
1.3.8. AISI 8620 Çeliği.....	7
1.3.9 AISI 8620 Çeliğinin Kullanım Alanları.....	8

2. YÜZEY SERTLEŞTİRME YÖNTEMLERİ.....	9
2.1. Yüzeyin Kimyasal Yapısını Değiştirmeden Yapılan Yüzey Sertleştirme Yöntemleri.....	10
2.1.1. Martenzitik Dönüşüm	10
2.1.2. Alevle Yüzey Sertleştirme	10
2.1.3. Endüksiyonla Yüzey Sertleştirme.....	11
2.2. Yüzeyin Kimyasal Yapısını Değiştirerek Yapılan Yüzey Sertleştirme Yöntemleri.....	13
2.2.1. Semantasyonla Yapılan Yüzey Sertleştirme İşlemleri.....	13
2.2.1.1. Katı Semantasyon	13
2.2.1.2. Gaz Semantasyon.....	14
2.2.1.3. Sıvı Semantasyon.....	14
2.2.2. Nitrürasyon	15
2.2.3. Borlama.....	15
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	18
4. ÇALIŞMANIN AMACI.....	23
5.1. Malzeme	24
5.2. Borlama İşlemi	25
5.3. Korozyon testi	26
5.4. Karakterizasyon.....	27
5.5. Metal Borür Tabaka Kalınlıklarının Ölçülmesi.....	27
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	28
6.1. 700 °C’de Yapılan Borlama İşlemi Sonuçları	28
6.1.1. İç Yapı İncelemeleri.....	29
6.1.2. XRD Sonuçları.....	32
6.1.3. Korozyon Test Sonuçları	34
6.2. 900 °C’de Yapılan Borlama İşlemi Sonuçları	35
6.2.1. İç Yapı İncelemeleri.....	36
6.2.2. XRD Sonuçları.....	41
6.2.3. Mikrosertlik Değerleri	43
6.2.4. Korozyon Test Sonuçları	43
6.2.5. SEM EDS Sonuçları	46
6.3. 950 °C’de Yapılan Borlama İşlemi Sonuçları	50
6.3.1. İç Yapı İncelemeleri.....	50

6.3.2. XRD Sonuçları.....	55
6.3.3. Mikrosertlik Değerleri	57
6.3.4. Korozyon Test Sonuçları	58
6.3.5. SEM EDS Sonuçları	60
7. BORLAMA İŞLEMİNİN KİNETİĞİ	64
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
8.1. Sonuçlar.....	69
8.2. Öneriler.....	70
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ.....	77



ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE	SAYFA
1.1. Bor elementinin fiziksel özellikleri [7]	3
1.2. Bazı bor bileşiklerin sertlikleri [9]	4
1.3. AISI 8620 Çeliğinin kimyasal içeriği [18].....	7
2.1. Frekans aralıklarına göre, sertleşme derinlikleri [21]	12
5.1. Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi	25
6.1. AISI 8620 çeliğinin 700°C sıcaklıkta borlama koşulları.....	28
6.2. 700 °C’de borlanan numunelerin korozyon test koşulları.....	34
6.3. 8620 çeliğinin 900 °C sıcaklıkta borlama koşulları	36
6.4. 900°C’de borlanan numunelerin korozyon test koşulları.....	44
6.5. 8620 çeliğinin 950 °C sıcaklıkta borlama koşulları	50
6.6. 950 °C’de borlanan numunelerin korozyon test koşulları.....	58
7.1. Borlanan numunelerin ortalama borür derinlikleri ve standart sapmaları.....	65
7.2. Borlanan numunelerin difüzyon katsayıları	67
7.3. Borlanan numunelerin aktivasyon enerjisi ve frekans faktörü.....	68
7.4. Literatürde yapılan çalışmaların aktivasyon enerjileri	68

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL	SAYFA
1.1. Borlama işlemi sırasında borür yapısının gelişimi [11]	4
1.2. Çeşitli oluşumlarla meydana gelen metal borür tabakaları [13]	5
2.1. Alevle yüzey sertleştirme [21]	11
2.2. Elektrik akımı frekansı ile endüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi [21]	12
2.3. Katı semantasyon yapılışı [22].....	14
2.4. Sıvı semantasyon [23]	15
5.1. Borlama yapılacak numunenin görüntüsü.....	24
5.2. Borlama yapılacak potanın kapatılmış görüntüsü	25
5.3. Manyetik karıştırıcı ocağında korozyon testi uygulaması	26
6.1. Borlanan numunelerin potadan çıkarılmış görüntüleri.....	28
6.2. 700 °C’de 4 saat borlanmış numunenin SEM görüntüsü	29
6.3. 700 °C’de 8 saat borlanmış numunenin SEM görüntüsü	30
6.4. 700 °C’de 12 saat borlanmış numunenin SEM görüntüsü	30
6.5. 700 °C’de 16 saat borlanmış numunenin SEM görüntüsü	31
6.6. 700 °C’de 4 saat borlanan numunenin XRD analizi	32
6.7. 700 °C’de 8 saat borlanan numunenin XRD analizi	32
6.8. 700 °C’de 12 saat borlanan numunenin XRD analizi	33
6.9. 700 °C’de 16 saat borlanan numunenin XRD analizi	33
6.10. 700 °C’de 4, 8, 12 ve 16 saat borlanmış numunelerin korozyon grafiği	35
6.11. 900 °C’de 2 saat borlanan numunenin 100x metalografik görüntüsü.....	36
6.12. 900 °C’de 2 saat borlanan numunenin SEM görüntüsü	37
6.13. 900 °C’de 4 saat borlanan numunenin kenarından 100x metalografik görüntüsü	37
6.14. 900 °C’de 4 saat borlanan numunenin SEM görüntüsü	38
6.15. 900 °C’de 6 saat borlanan numunenin 100x metalografik görüntüsü.....	39
6.16. 900 °C’de 6 saat borlanan numunenin SEM görüntüsü	39

6.17. 900 °C’de 8 saat borlanan numunenin kenarından 100x metalografik görüntüsü	40
6.18. 900 °C’de 8 saat borlanan numunenin SEM görüntüsü	40
6.19. 900 °C’de 2 saat borlanan numunenin XRD analizi	41
6.20. 900 °C’de 4 saat borlanan numunenin XRD analizi	41
6.21. 900 °C’de 6 saat borlanan numunenin XRD analizi	42
6.22. 900 °C’de 8 saat borlanan numunenin XRD analizi	42
6.23. 900 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saat borlanan numunelerin sertlik grafiği.....	43
6.24. 900 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saat borlanmış numunelerin korozyon grafiği	44
6.25. 900 °C’de 2 saat borlama sonunda, a) 1 saat b) 10 saat ve c) 24 saat korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri.....	46
6.26. 900 °C’de 4 saat borlama sonunda, a) 1 saat b) 10 saat ve c) 24 saat korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri.....	47
6.27. 900 °C’de 6 saat borlama sonunda, a) 1 saat b) 10 saat ve c) 24 saat korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri.....	48
6.28. 900 °C’de 8 saat borlama sonunda, a) 1 saat b) 10 saat ve c) 24 saat korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri	49
6.29. 950 °C’de 2 saat borlanmış numunenin 100x metalografik görüntüsü.....	50
6.30. 950 °C’de 2 saat borlanan numunenin SEM görüntüsü	51
6.31. 950 °C’de 4 saat borlanan numunenin kenarından 100x metalografik görüntüsü	51
6.32. 950 °C’ de 4 saat borlanan numunenin SEM görüntüsü	52
6.33. 950 °C’de 6 saat borlanan numunenin kenarından 100x metalografik görüntüsü	52
6.34. 950 °C’de 6 saat borlanan numunenin SEM görüntüsü	53
6.35. 950 °C’de 8 saat borlanan numunenin 100x metalografik görüntüsü.....	53
6.36. 950 °C’de 8 saat borlanan numunenin SEM görüntüsü	54
6.37. 950 °C’de 2 saat borlanan numunenin XRD analizi	55
6.38. 950 °C’de 4 saat borlanan numunenin XRD analizi	55
6.39. 950 °C’de 6 saat borlanan numunenin XRD analizi	56
6.40. 950 °C’de 8 saat borlanan numunenin XRD analizi	56
6.41. 950 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saat borlanan numunelerin sertlik grafiği.....	57

6.42. 950 °C’ de 2, 4, 6 ve 8 saat borlanmış numunelerin korozyon grafiği	59
6.43. 950 °C’de 2 saatlik borlama sonunda, a) 1 saat b) 10 saat ve c) 24 saat korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri.....	60
6.44. 950 °C’de 4 saatlik borlama sonunda, a) 1 saat b) 10 saat ve c) 24 saat korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri.....	61
6.45. 950 °C’de 6 saatlik borlama sonunda, a) 1 saat b) 10 saat ve c) 24 saat korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri.....	62
6.46. 950 °C’de 8 saat borlama süresinde, a) 1 saat, b) 10 saat ve c) 24 saat korozyon süresine maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri	63
7.1. 700 °C’de Borlanan numunelerin x^2 ve t grafiği.....	65
7.2. 900 °C’de borlanan numunelerin x^2 ve t grafiği	66
7.3. 950 °C’de borlanan numunelerin x^2 ve t grafiği	66
7.4. 700 °C, 900 °C ve 950 °C’de Borlanan numunelerin aktivasyon enerjileri	67

KISALTMALAR DİZİNİ

704	700°C’de 4 saat borlanmış AISI 8620 çeliği
708	700°C’de 8 saat borlanmış AISI 8620 çeliği
7012	700 °C’de 12 saat borlanmış AISI 8620 çeliği
7016	700 °C’de 16 saat borlanmış AISI 8620 çeliği
902	900 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliği
904	900 °C’de 4 saat borlanmış AISI 8620 çeliği
906	900 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliği
908	900 °C’de 8 saat borlanmış AISI 8620 çeliği
952	950 °C’de 2 saat borlanmış AISI 8620 çeliği
954	950 °C’de 4saat borlanmış AISI 8620 çeliği
956	950 °C’de 6 saat borlanmış AISI 8620 çeliği
958	950 °C’de 8 saat borlanmış AISI 8620 çeliği

1.GİRİŞ

Savunma sanayisinde kullanılan malzemelerin yüzey sertliği gerektiren yerlerde zamanla korozyon, aşınma gibi etkilerle kullanım ömürleri kısalmaktadır. Özellikle askeri araçlarda kullanılan makine elamanlarının zor ve uzun süreli arazi şartlarında kullanım ömürlerinin uzun olması beklenir. Kullanım ömrü az olan bir makine elamanının bozulması askeri stratejiye olumsuz etkisi olabilir. Bu sebeple özellikle askeri araçlarda kullanılan malzemeler, mekanik özelliklerini uzun süreli muhafaza etmesi gerekebilir. Bazı makine elamanlarında yüzey sertliği ve korozyon dayanımı, istenen özellikler arasındadır. Yüzey sertliği ve korozyon dayanımı istenen makine elemanların ömrünü uzatmanın yolu; borlama gibi, yüzeyleri sert bir tabakayla kaplayarak mümkün olabilir. Borlama çeliklerin yüzeyinde, çok sert bir tabaka oluşturma özelliğinden dolayı yaygınlaşan bir yüzey sertleştirme çeşididir. Bir termokimyasal işlem olan borlama, çeliğin yüzeyine bor atomlarının difüzyonu ile yapılır. Bu işlem sonunda malzemenin yüzeyinde aşırı sert tabaka olan metal borür tabakası meydana gelir. Borlama işlemi sonucunda, metal yüzeyi mikrometre kalınlığında bir metal borür tabakası ile kaplanır. Metal borür tabakası seramik özellikler gösterdiği için oluşan metal borür tabakası aslında bir seramik kaplamadır. Bu nedenle, alt tabaka metali ile metal borür tabakasının korozyon direnci birbirinden farklıdır. Metal borür tabakasının korozyon direnci, alt tabaka metalin korozyon direncinden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu yüzden, metallerin korozyon dayanımını artırmak için metalin, metal borür tabakası ile kaplamak günümüzde tercih edilmeye başlanmıştır. Mühendislik malzemelerinin zor arazi koşullarında uzun süre üstün mekanik özelliklerini koruması ve uzun süre periyodik bakım gerektirmeyecek nitelikte olması istenir. Çeliklerin ve demir dışı metallerin korozyonu zamanla mekanik sistemlerin ömrünü kısaltmakla kalmaz, aynı zamanda periyodik bakım süreleri açısından ek maliyetler olarak karşımıza çıkar.

AISI 8620 çeliği; dişli, pim, burç, mil gibi zorlanmalı aşınan yerlerde ve dış yüzeylerinin aşırı sert, iç kısımların ise yumuşak istendiği yerlerde kullanılan bir semantasyon çeliğidir. Makine imalat sanayisinde korozyona ve aşınmaya maruz kalındığında, büyük oranlarda malzeme kayıpları meydana gelmektedir. Ülkemizde

bu oran, 1991 yılı için yaklaşık 4,5 milyar dolar civarında olduğu varsayılmaktadır [1].

1.1. Bor Elementi

1.1.1. Bor Madeni

Ülkemiz, bor madeni yönünden oldukça zengin bir ülkedir. Dünya rezervlerinin yaklaşık %72 si ülkemizdedir. Bor madeni çok çeşitli bir kullanım alanı olmakla birlikte çeliklere ve bazı metallere yüzey sertliği kazandırması yönünden vazgeçilmez yeri vardır. Uzun yıllar ülkemiz bor madeni olarak zengin bir ülke olarak bilinse de 19.yy' dan itibaren bor madeninin önemi ortaya koyan çalışmalara başlanmıştır. Önceleri ülkemizdeki bor yataklarını yabancı ülkeler işlediyse de 1935 Maden Tetkik Arama enstitünün kurulmasıyla ülkemiz işlemeye başlamış ve bir süre sonra bor madeni işletmesini Etibank devralmıştır. Ülkemizde Emet, Kırka ve Bigadiç'te önemli bor yatakları vardır. Dünyada en fazla bor mineral ve bileşikleri üretimi ülkemiz ve Birleşik Devletleri yapmaktadır [2-6].

1.1.2. Bor Elementi Özellikleri

Dünyada en fazla çıkarılan maden olarak bor ellibirinci sıradadır. Doğada boratlar ve borosilikatlar şeklinde bulunur. Periyodik sistemde üçüncü grubun başında bulunur ve yaklaşık 2075°C derecede ergir. Bor elementi yapı özelliği ve tane büyüklüğüne bağlı kimyasal özellik gösterir. Su ile yüksek sıcaklıklarda tepkimeye girerek borik asit ve bazı yan ürünler elde edilir, kristalin bor kolay kolay tepkimeye girmezken, amorf bor yüksek hızla tepkimeye girer. Bor elementi minerallerle de tepkimeye girebilir. Tepkimeler, konsantrasyon ve sıcaklığa bağlı hızlı yavaş olabilirler [7].

1.1.3. Bor Elementinin Fiziksel Özellikleri

Bor elementinin çok yaygın bir kullanım alanı mevcuttur. Gün geçtikçe kullanım alanları daha fazla çeşitlilik göstermektedir. Kullanım alanlarını, sahip olduğu özellikler belirler. Sahip olduğu bazı fiziksel özellikler, Çizelge 1.1'de verilmektedir.

Çizelge 1.1. Bor elementinin fiziksel özellikleri [7]

Atom Kütlesi	10,811 (g/mol)
Kaynama noktası	3 727 (°C)
Termal genleşme katsayısı	8,3 µm/(m.K), (0 °C)
Elektriksel iletkenlik	1,0 E-12 µS/cm
Isıl iletkenlik	0,274 W/cm.K
Yoğunluğu	2,34 g/cm ³ , (25 °C’de)
Görünüşü	Sarı-Kahverengi ametal kristal
Elastik modülü	Kütle: 320/GPa
Sertliği	Mohs: 9,3 Vickers:49 000 MN.m-2
Buharlaşma ısısı	489,7 kJ/mol
Ergime noktası	2075 °C
Molar hacmi	4,68 cm ³ /mol
Fiziksel durumu	Katı, (20 °C ve 1 atm’de)
Spesifik ısısı	1,02 J/g.K 0,348 Pa (300°C’de)

1.2. Bor Bileşikleri

1.2.1. Bor Karbür (B₄C)

Bor elementinin karbonla yaptığı tek bileşiktir. 1800-2000°C’ lerde grafit kalıplarda preslenerek masif olarak üretimi mümkündür. Saf bor karbür biraz parlak olup, 2,52 g/cm³ yoğunluğunda ve 2450 °C’de ergimektedir. Yüksek sertliğinden ötürü aşındırıcı malzemeler imalatı yapılır [8].

1.2.2. Bor Nitrür (BN)

Beyaz renkte ve hafif bir malzemedir. Kübik olarak yüksek sertlikte olmasının yanında Elektrik ve ısı iletkenliği de düşük bir malzemedir. Aşındırıcı malzemelerdendir [8].

1.2.3. Boridler

Bu bileşikler metalik özellik gösterirler. Metallerin veya oksitlerinin bor ile tepkimeye girmesiyle meydana gelirler. Yüksek sertlik, yüksek ergime noktası, yüksek korozyon dayanımı özelliklerine sahiptir. Oksitlenmeye karşı oldukça dayanıklı özelliklerinden dolayı. Bazı çelik ve metallerin yüzey kaplamasında kullanılır [8].

1.2.4. Bor Halojenürler

Elementlerden; F, Cl, Br ve I gibi halojenlerin bor ile yaptığı bileşikler olarak meydana gelir. Genelde bor-fiber imalatı için kullanılırlar [8].

1.2.5. Bazı Bor Bileşiklerinin Sertlikleri

Bazı bor bileşiklerinin mohrs sertlik değerleri Çizelge 1.2.' de verilmiştir.

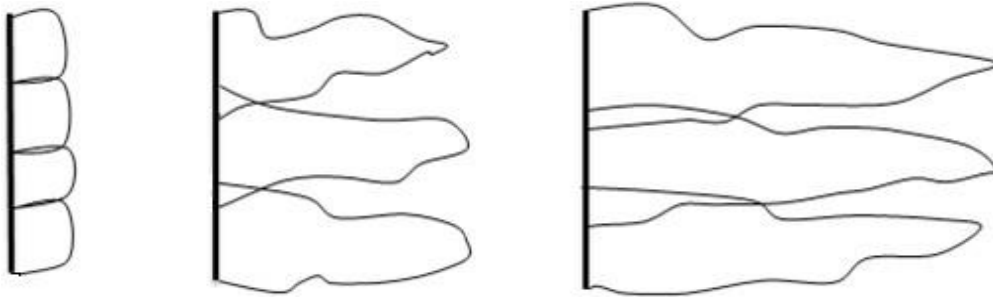
Çizelge 1.2. Bazı bor bileşiklerinin sertlikleri [9]

MALZEME	MOHRS SERTLİK
Bor (element)	9,30
Bor Karbür (B ₄ C)	9,32
Elmas	10,00

1.3. Borür Tabakası Özellikleri

1.3.1. Borür Tabakası Oluşumu, Büyümesi ve Gelişmesi

Şekil 1.1 'de bor tabakasının oluşumu gösterilmektedir. İlk olarak borlayıcı ortam ve malzeme yüzeyinde bir tepkime meydana gelir. Difüzyon başlamasıyla yüzeyde çekirdeklenme meydana gelir. Devam eden süreyle birlikte çekirdeklenen yapı borür tabakasına dönüşerek iç kısımlara yayılır. Bu şekilde meydana gelen borür tabakasının dış yüzeyinde FeB içerdeki kısımda ise Fe₂B yapıları oluşur [10].



Şekil 1.1. Borlama işlemi sırasında borür yapısının gelişimi [11]

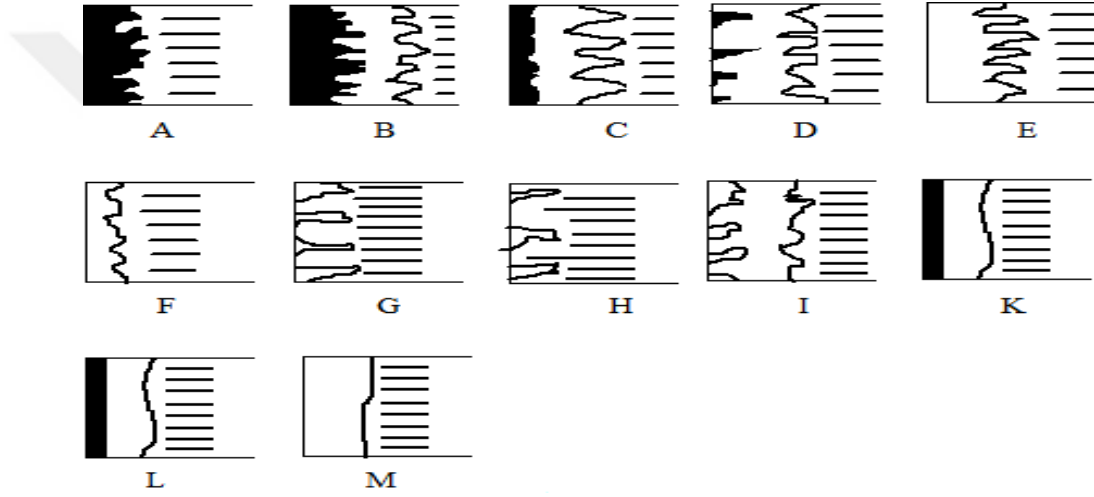
Borlama ısı işlemi sırasında bor elementi metal yüzeyinden difüzyon olmaktadır. Difüzyon sonucunda metal yüzeyinde metal borür tabakası oluşur. Demir esaslı metallerde yüzeylerde artan sıcaklıkla beraber metal borür tabaka kalınlığı da artmaktadır. Borlama sonucunda yüzeyde sert borür fazları oluşmaktadır. Oluşan bu

tabakalar tek fazlı Fe_2B tabakası şeklinde olabileceği gibi ikili faz şeklinde Fe_2B+FeB gibide olabilir. Oluşan fazlar, borür tabakasının şeklini ve büyüklüğünü, bor malzemesinin kimyasal yapısı da, bor tabakasının sertliğini etkiler [12].

1.3.2. Borür Tabakaları ve Kalınlıkları

Farklı borlama çeşitleri yapılarak Şekil 1.2.'de gösterildiği gibi çeşitli borür yapıları sağlanabilir [13].

Borür tabakası; yöntem, borlama yapılan malzemenin özelliğine, proses koşullarına ve kullanılan tozun kimyasal içeriğine bağımlı olarak düz yada testere dişi şekillerde gerçekleşebilir.



Şekil 1.2. Çeşitli oluşumlarla meydana gelen metal borür tabakaları [13]

A'da sadece gevrek faz olan FeB yapısı, B' de gevrek faz FeB ile Fe_2B bir arada oluşan yapı, C' de ise FeB ve Fe_2B ikili yapılar meydana gelmiş yapı ve FeB biraz daha ince oluşan yapı, D' de İkili FeB dişleri ayrılmış yapı, E' yalnız Fe_2B güçlü testere dişi şeklinde oluşan yapı, F' de sadece Fe_2B zayıf testere şeklinde oluşmuş yapı, G' de Fe_2B testere dişi şeklinde oluşan yapı, H' de Fe_2B testere dişi aralıklı ve az oluşmuş yapı, I' da ara bölgede oluşan yapı, K' de diş yapısı bozulmuş halde oluşan yapı, L' de testere dişi düz halde oluşan yapı, M' de tek yapı ve düz şeklinde oluşan yapılar görülmektedir. Bu yapılar istenen yapı görüntüleri E ve F yapılarındadır ve yalnızca Fe_2B ' den oluşan tekli yapı görüntüsüdür [13].

Sıcaklığın tespit edilmesinde demir bor denge diyagramı kullanılır. Borlama sıcaklığı, $1149^{\circ}C$ altında olmalıdır. Bu sıcaklık aynı zamanda ötektik noktadır. Bu sıcaklığın üstünde yapılan borlama işlemlerinde ergimeler oluşabileceğinden, bor

yapısı olumsuz etkilemektedir. Borlama işleminde sıcaklık kadar zaman da önemli parametrelerden bir tanesidir. Borlama neticesinde oluşan borür tabakası testere dişi şeklindedir. Yüksek sıcaklıkla beraber difüzyon mekanizmasıyla bazen tek bazen de ikili yapı elde edilir [14]. Demir esaslı malzemelerin içeriğindeki karbon oranı miktarına bağlı difüzyonda artış yada azalma meydana gelmekte ve oluşan borür yapısını etkilemektedir [15].

1.3.3. Sertlik

Malzemeye, borlamayla kazandırılan en önemli özellik, sertliktir. Bu sertlik değerleri 2000 ile 3000 HV ye kadar olabilmekte ve çelik malzemede oluşan FeB ve Fe₂B yapısına bağlıdır.

1.3.4. Aşınma

Malzemenin aşınma katsayısı düşük olduğunda, aşınmaya karşı dayanıklı olur. Borlama işlemiyle oluşan borur tabakasında, çok düşük aşınma katsayısı değerleri elde edilir. Uygun sıcaklıkta ve sürelerde yapılan borlama işlemleri neticesinde aşınmaya dayanıklı malzemeler elde edilir [15].

1.3.5. Korozyon Direnci

Borür tabakası H₂SO₄ ve H₃PO₄ gibi güçlü asitlerle çinko ve kurşun gibi metallerin sıvı karışımlarında borlanmış malzemelerin korozyona karşı direnci yüksek olmaktadır [13].

1.3.6. Bor Tabakasındaki Kalıntı Gerilmeler

Kalıntı gerilmeler metal borür tabakasındaki mekanik özellikleri olumsuz etkiler. İç gerilmeler borlanan malzemenin tüm yüzeyine dağılmalıdır. Bunun için bor tabakası yapıda girintili çıkıntılı olması ve Fe₂B faz yapısına sahip olmalı ve (Fe₂B+FeB) gibi yapılar oluştuğunda iç gerilmelerden kaynaklı çatlamlar meydana gelebilir [16].

1.3.7. Borlanabilen Malzemeler

Borlama yapılan metallerden bazılarına örnek verilecek olursak; AISI 8620, AISI 1010, AISI 1020, AISI 1040 AISI 4140, AISI 5140, 310 paslanmaz çelik, alaşımlı ve alaşımsız çelikler, sinterlenmiş metaller. Düşük alaşımlı çeliklere, yüzey sertleştirme işlemlerini uygulayarak kullanılabilirler. Silisyum oranının % 0,5’den fazla olan

alaşımli çelik malzemelerde ve içeriğinde alüminyum bulunan çelikler; bor tabakasında çözünemedikleri için kırılğan bir bor tabakası oluşturlar. Bu sebeble borlama için uygun değildir [17]. Genel olarak demir esaslı malzemeler, döküm çelikleri, ıslah çelikleri, takım çelikleri ve sinterleme yapılan çeliklere borlama işlemi yapılabilir [13].

1.3.8. AISI 8620 Çeliği

Semantasyon çeliği olarak da bilinen AISI 8620 çeliği, demir, çelik imalat endüstrisinin de vazgeçilmez bir yere sahiptir. AISI 8620 çeliği; nikel, krom ve molibden gibi alaşım elementleri içermesi sebebiyle mekanik özellikler bakımından da diğer düşük karbonlu alaşımsız çeliklere göre geniş kullanım alanı sunar. Mekanik özellikler bakımından iyi mukavemet ve tokluk özelliğiyle de diğer karbonsuz çeliklere göre tercih sebebi olabilmektedir. Bu özelliklerine bağlı olarak AISI 8620 çeliğine uygulanan semantasyon ve borlama işlemleri sonucunda, yüksek aşınma direnci gibi bir özellik kazandırılır. Tüm bunlarla birlikte uzun bir kullanım süresi, oldukça sağlam bir yapı ve dayanıklılık söz konusu da olabilmektedir.

AISI 8620 çeliğinin östenit bölgesinde, difüzyonla yüzeyindeki karbon veya bor oranının yükselmesiyle yüzey kısmının sertleşmesi sağlanır. Aynı zamanda AISI 8620 çeliği, düşük karbon içeriyle sertlik değerlerinde değişkenlik gösterebilen bir çelik türüdür. Çizelge 1.3.'te AISI 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi verilmiştir. Ayrıca kaynak kabiliyeti de yüksek olan bu çelikler kaynaklı imalat endüstrisinde de kullanılır [18].

Çizelge 1.3. AISI 8620 Çeliğinin kimyasal içeriği [18]

MALZEMENİN STANDARTLARI								
DIN			AISI /SAE			EN		
1.6523			8620			20NiCrMo2		
MALZEMENİN KİMYASAL BİLEŞİMİ (%)								
C	Si	Mn	Pmax	Smax	Cr	Mo	Ni	V
0.17 -0.23	0.04	0.65 - 0.95	0.035	0.04	0.35 - 0.70	0.15 - 0.25	0.40 - 0.70	-

Sementasyon eliklerinde sementasyon için; alt tabaka metal yüzeyindeki karbon oranının artırılarak yüzey kısmına sertlik kazandırılması sağlanır. Borlama işleminde de karbon yerine bor kullanılmaktadır.

1.3.9 AISI 8620 eliğinin Kullanım Alanları

Yüzeyin kimyasal yapısı değiştirerek yapılan yüzey sertleştirme işlemleri sonunda; yüzeyde sert, aşınmaya dayanıklı, çekirdekte ise yumuşak ve tokluk özellikler kazandırılır. AISI 8620 kalite çeliği, her türlü mühendislik ürünü makinelerin, makine parçalarında ve de aparatlarında kullanılır. Otomotiv sanayisinde, üretilen araçlarda AISI 8620 çeliğe rastlamak mümkündür. Dolayısıyla yedek parça sektörü de sementasyon çeliğine ihtiyaç duyar. Diğer taraftan 8620 eliği, Zorlama ve sürtünme olan parçalarda, makine ve otomobillerde, dişli ark, pim, mil, şalter kovani, soğuk şişirilerek ve fişkırtılarak şekillendirilen piston pimleri, zincir baklaları ve benzeri parçalarda kullanılır. Sürtünme ve çarpmaya dayanıklı dış yüzey, yumuşak i çekirdek sayesinde daha işlevsel parçalar imal etmeyi mümkün kılar. Kısaca çekirdekte yumuşak ve tokluk özellikler, yüzeyde ise sert ve aşınmaya dayanıklı özellikler istenen ayrıca darbeli yerlerde kullanımı tercih edilen esnek bir yapı çeliğidir [19]. Dövme kam mili, çeşitli bağlantı elemanları ve dişliler gibi çeşitli parçalarda 8620 çeliğini sık rastlanılır. Bunun yanı sıra diğer yüksek alaşımlı çeliklere kıyasla oldukça ekonomik olduğu da söylenebilir.

2. YÜZEY SERTLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Yüzey sertleştirmeye her alanda olduğu gibi savunma sanayisinde de ihtiyaç duyulur. Özellikle iç kısmın tok yüzeyin ise sert olması gereken yerlerde dişli makine elemanları gibi veya aşınması muhtemel yüzeylerin olduğu yerlerde yüzey sertleştirme yapılmasına gerek duyulur. Yüzey sertleştirme işlemleri en genel anlamda çeliğin iç kısmı yumuşak tutularak yüzey kısmının farklı derinliklerde sert olacak şekilde sertleştirilmesi işlemidir. Yüzey sertleştirme işlemlerini iki ana guruba ayırılır bunlar;

- Yüzeyin kimyasal yapısını değiştirerek yapılan yüzey sertleştirme işlemi
- Yüzeyin kimyasal yapısını değiştirmeden yapılan yüzey sertleştirme işlemleridir.

Yüzeyin kimyasal yapısını değiştirerek yapılan yüzey sertleştirme işlemlerinde; çeliğin, kimyasal içeriğine ek olarak bazı elementlerin, sıcaklık artışıyla beraber difüzyonla çelik yüzeyin kimyasal yapısının değişimidir. Yüzeyin kimyasal yapısını değiştirmeden yapılan yüzey sertleştirme işlemlerinde ise; çeliğin kimyasal içeriğini değiştirmeden, sadece kimyasal yapı dönüşümüyle yapılan ve yüzeyde martenzit yapı oluşturma işlemidir. Yüzeyin kimyasal yapısını değiştirmeden yapılan yüzey sertleştirme işlemleri başlıca şunlardır:

- Alevle yüzey sertleştirme işlemi
- Endüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi

Yüzeyin kimyasal yapısını değiştirerek yapılan yüzey sertleştirme işlemleri ise,

- Semantasyonla yüzey sertleştirme
- Nitrürasyonla yüzey sertleştirme işlemi
- Borlama ile yüzey sertleştirme yöntemleridir

Alevle, endüksiyonla, semantasyonla, nitrürasyonla yapılan yüzey sertleştirme işlemleri şimdiye kadar kullanılan klasik yüzey sertleştirme yöntemleri olup her bir yöntemin çeliğe kazandırdığı sertlik özellikleri vardır. Fakat borlama gibi son

yıllarda yaygınlaşan yüzey sertleştirme yönteminde ise diğer yöntemlere göre daha fazla sertlik kazandırmak mümkün olduğu gibi korozyon direnci, seri üretim ve geniş bir çelik yapısı çeşidine uygulanabilirliğini bakımından avantaj sağlamaktadır. Yüzeyin kimyasal yapısı değiştirilmeden yapılan yüzey sertleştirme işlemleri genel olarak, parçayı hızlı ısıtıp, hızlı soğutma prensibine dayanır. İç taraf ısınmadan hızlı bir şekilde yüzeyi östenit bölgesine çıkararak tekrar hızlı su verme işlemleridir. Bu işlem sonunda yüzeyde sert ve kırılgan bir yapı olan martenzit yapısı oluşmaktadır.

2.1. Yüzeyin Kimyasal Yapısını Değiştirmeden Yapılan Yüzey Sertleştirme Yöntemleri

Yüzeyin kimyasal yapısını değiştirmeden yapılan yüzey sertleştirme işlemlerinde, çeliğin yüzeyinde sert bir martenzitik yapı elde edilir. Çeliğin yüzeyi hızlı ısıtılıp, hızlı soğutulduğunda yüzeyde sert bir martenzitik yapı, iç kısımda ise yüzeye göre daha tok bir yapı kazandırılır.

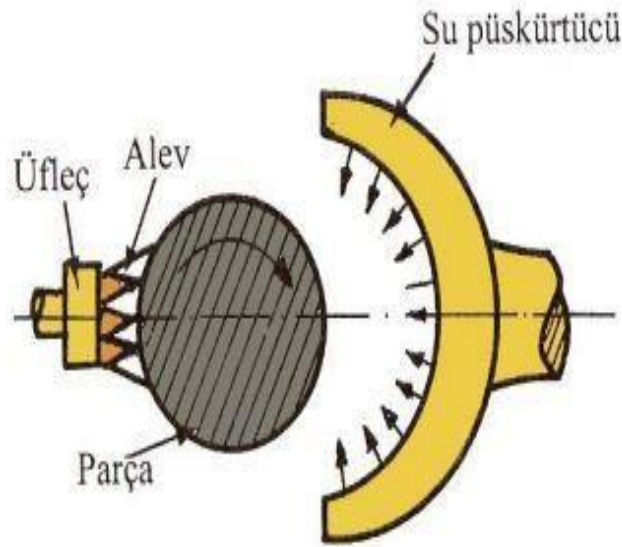
2.1.1. Martenzitik Dönüşüm

Martenzitik dönüşüm, çeliğe su verme (Hızlı soğutma) işlemi sonucunda oluşur. Martenzitik yapı difüzyonsuz katı hal dönüşümü olarakta bilinir. Martenzitik yapı oluşumu; çeliğin östenit bölgesinde tavlanması sonucunda karbon atomları YMK kafes yapısı içinde çözünür. Çelik östenit bölgesinde YMK yapıdayken hızlı su verildiğinde, YMK yapı aşırı doymuş HMK (Hacim merkezli tetraganol) yapıya dönüşerek martenzitik dönüşüm işlemi gerçekleşmiş olur [20].

Alevle, semantasyonla ve endüksiyonla yapılan yüzey sertleştirme işlemlerinde yüzeyde martenzit yapı oluşumu gereklidir.

2.1.2. Alevle Yüzey Sertleştirme

Şekil 2.1.' de alevle yüzey sertleştirme işlemi gösterilmektedir. Alevle yüzey sertleştirme işlemleri genellikle orta karbonlu çeliklere uygulanan yüzey sertleştirme yöntemidir. İşlem için genellikle oksit –asetilen alevi tercih edilir. Çelik yüzeyi tavlandıktan sonra iç tarafı ısınmadan su verme işlemi yapılır. Genellikle fırına giremeyecek kadar büyük ebatlı ve bölgesel yüzey sertleştirme istenen yerlerde tercih edilen yüzey sertleştirme işlemidir.



Şekil 2.1. Alevle yüzey sertleştirme [21]

Alevle yüzey sertleştirmede dikkat edilmesi gereken önemli husus ise iç tarafın östenit bölgesine ulaşmadan hızlıca su verilmesidir. Eğer iç taraf östenit bölgesine kadar ısınırsa, su verme sonrası hızlı soğuma olacağından, çeliğin iç tarafı da sertlik alabilir. Bu durumda çatlama riski oluşabilir. Alevle yüzey sertleştirmede yüzeyin yetersiz ısınması durumunda ise yeterli derinliğe ulaşmadan sertleşme yapıldığında istenilen sertlik derinliğini elde edilmez. Çünkü sertleşme yüzeyden içe doğru başlar o yüzden ısınmanın yüzeyden uygun bir şekilde istenilen derinliğe kadar ilerlemesi gerekir. Orta karbonlu çeliklere uygulanan alevle yüzey sertleştirme işleminde kırılabilirliği gidermek için 185°C ile 240°C 'ler arasında gerilim giderme işlemi uygulanmalıdır. Uygulanan gerilim giderme işlemi sonrasında yüzeyinin sertliğinin birkaç HRC düştüğünü gözlemlenir. Alevle yüzey sertleştirme işleminde çarpılma denilen millerde ortaya çıkan şekil değişikliği söz konusu olur. Bunun için az çarpılma koşullarını oluşturulabilir veya yüzey sertleştirme işleminden sonra hassas doğrultma ve düzeltme işlemleri uygulanabilir [21].

2.1.3. Endüksiyonla Yüzey Sertleştirme

Şekil 2.2'de Endüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi gösterilmiştir. Alevle yüzey sertleştirme işlemi gibi hızlı ısıtıp hızlı soğutma prensibine dayanır. Orta karbonlu çeliklere uygulanan endüksiyonla yüzey sertleştirme işleminin alevle yüzey sertleştirmeden en büyük farkı gerekli olan ısınnın yanıcı veya yakıcı gazlarla değil, elektrik akımından elde ediliyor olmasıdır. Genellikle bakır iletkenlerden oluşmuş

sargı bobinine; yüzey sertleştirme işlemi yapılacak malzeme yüzeyine, sargılarını bobinlerini değıdirmeden, manyetik alan oluşturacak şekilde konumlanması gerekir. Bu esnada bakır borular yüksek sıcaklıklara maruz kalacağı için içerisinde geçen soğutma sıvısı ile soğutulmalıdır.



Şekil 2.2. Elektrik akımı frekansı ile endüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi [21]

Endüksiyonla yüzey sertleştirme işleminin de kullanılan elektrik akım frekans aralığı genellikle 10000-500000 Hz arasındadır. Çizelge 2.1.'de frekans aralıklarına göre sertleşme derinlikleri verilmektedir.

Çizelge 2.1. Frekans aralıklarına göre, sertleşme derinlikleri [21]

Frekans (Hz)	Elektrik enerjisinin girme derinliği (mm)	Sertleşme derinliği mm
1.000	1,50	4,60-8,90
3.000	0,90	3,80-5,10
10.000	0,50	2,50-3,80
120.000	0,15	1,50-2,50
500.000	0,08	1,0-2,0
1.000.000	0,05	0,25-0,75

Endüksiyonla yüzey sertleştirme işleminden sonrada yine 180 – 250 °C' leri arasında menevis yapmak gerekir. Yapılan meneviş sonrası yine sertlikte birkaç HRC düşüş olmaktadır [21].

Yüzeyin kimyasal yapısı değıştirilerek yapılan yüzey sertleştirme işlemleri ise, çelik parçanın yüzeyinin kimyasal yapısını değıştirerek yapılan ve suverme işlemi uygulanarak veya uygulanmayarak (nitritasyon ve borlama) yapılan ısıl işlemleri

kapsar.

2.2. Yüzeyin Kimyasal Yapısını Değiştirerek Yapılan Yüzey Sertleştirme Yöntemleri

2.2.1. Semantasyonla Yapılan Yüzey Sertleştirme İşlemleri

Semantasyonla yüzey sertleştirme işlemleri; düşük karbonlu çelik malzemeleri difüzyonla yüzeylerinden itibaren karbon atomlarını belli bir derinliğe kadar nüfuz ettirilip sonrasında su verme işlemi yaparak, yüzeyde martenzitik yapı kazandırılması süreçlerini kapsar. Semantasyona uğrayacak çeliklerin düşük karbonlu ve alaşımsız olmalarına dikkat edilmelidir. Karbon oranı yüksek bir çelikte, arzu edilen semantasyon derinliğini ve iç tarafta tokluk özelliği sağlanamayabilir. Semantasyonun üç çeşit uygulaması vardır. Bunlar;

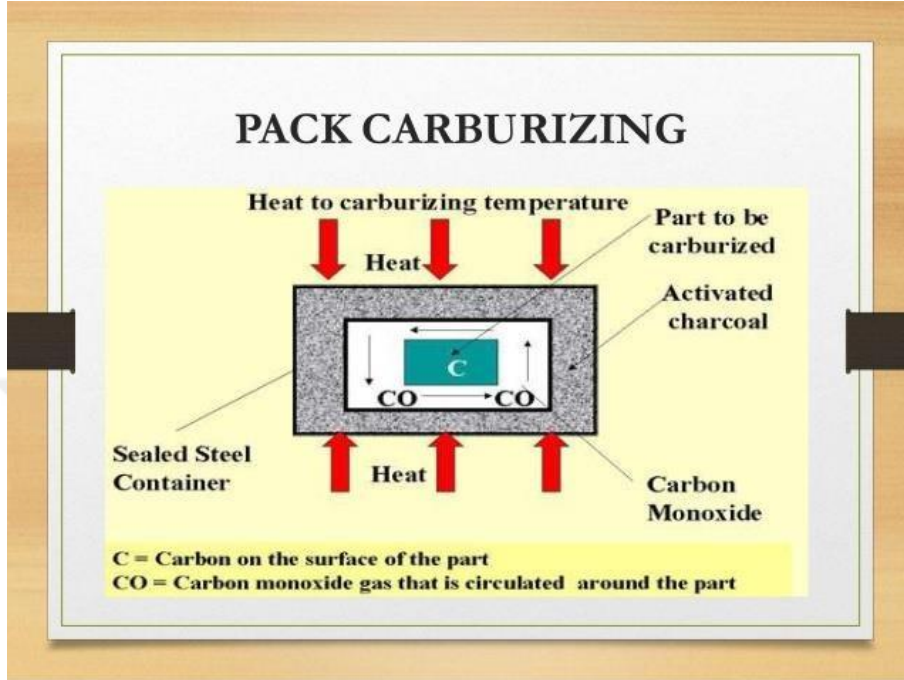
- Katı semantasyon
- Sıvı semantasyon
- Gaz semantasyon

Günümüzde hem seri üretim açısından hem de çevre ve işçi sağlığı açısından gaz semantasyon tercih edilmekte ve diğer semantasyon yöntemlerinin yerini almakta fakat ilk kurulum aşamasının maliyeti diğer yöntemlere göre yüksektir.

2.2.1.1. Katı Semantasyon

Şekil 2.3.' te katı semantasyonun yapılışı gösterilmektedir. Bu yöntemde karbon difüzyonu için kömür kullanılır. Kapalı bir kutu içerisine etrafını kömür kaplayacak şekilde, semantasyon yapılacak parçalar yerleştirilir. Parçalarda eğer vidalı kısımlar ya da sertleşmesi istenmeyen bölgesel yerler var ise bu kısımlara ısıya dayanıklı boya sürülür, boya sürüldükten sonra yüzey sertleştirme işlemi atmosfer kontrollü fırınlarda östenit bölgesine çıkarılır. İstenilen karbon derinliğine göre belli süre bekledikten sonra çelik parça kutu içerisinden hemen çıkarılarak su verme işlemi uygulanır. Oda sıcaklığına kadar kutu içerisinde soğuduktan sonra da klasik sertleşme işlemi gibi tekrar östenitleme sıcaklığına çıkartarak sonrasında hızlı su vererek de yüzeyi sertleştirerek martenzit tabakası kazandırılabilir. Martenzit tabaka sert ve kırılgan bir yapı olduğundan su verme sonrası menevişleme yaparak sertliği ve kırılganlığı biraz düşürebiliriz. Burada dikkat edilmesi gereken nota ise; kutunun

hava almayacak şekilde tam kapanması gerekir ve içersine %10 tuz ilavesi ile de aktifleşmeyi artırabiliriz. Bilinen en eski ve en ucuz yöntemdir. Fakat yüzeyin karbon oranını kontrol etmek çok güç ve uygulanışı zahmetli olduğundan günümüzde pek tercih edilmemektedir [22].



Şekil 2.3. Katı semantasyon yapılışı [22]

2.2.1.2. Gaz Semantasyon

Gaz semantasyon işlemi pratikliğiyle, çevre, iş sağlığı, çekirdek kontrolü ve sertleşme derinliği avantajlarıyla günümüzde çok yaygın kullanılan yüzey sertleştirme yöntemidir. Katı semantasyon işlemindeki gibi düşük karbonlu çelik parçalara uygulanır. Bu işlemde, diğer semantasyon yöntemlerindeki gibi östenit bölgesinde, çeliğin yüzeyinden itibaren belli derinliğe kadar difüzyonla karbon atomları geçer. İşlem sonunda su verme ve menevişleme işlemleri yapılmalıdır [22]. Kontrolü en kolay ve ekonomik yöntem olan gaz semantasyonda, karbon verici olarak CO veya CH₄ gazı gibi hidrokarbonlar kullanılır.

2.2.1.3. Sıvı Semantasyon

Şekil 2.4.'te tuz banyosunda sıvı semantasyon yapılışı gösterilmektedir. Çelik parçanın yüzeyindeki karbon miktarı tuz banyosu aracılığı ile artırılır. Sodyum siyanürlü (NaCN) ve potasyum siyanürlü (KCN) tuz banyoları kullanılır. Yüksek sıcaklıkta siyanür parçalanarak karbon verir. Karbürizasyonu kolaylaştırmak için

azot gazından faydalanılır. Aktifleştirici olarak baryum klorür veya stronsiyum klorür katılır. Fakat bu işlem insan ve çevre sağlığı açısından zehir içerdiğinden dolayı, terk edilmeye başlanmış olup yerine gaz semantasyon tercih edilmektedir [23].



Şekil 2.4. Sıvı semantasyon [23]

2.2.2. Nitrürasyon

Bu yöntem düşük alaşımlı çeliklere (krom-alüminyum, krom-molibden-vanadyum) uygulanan bir yüzey sertleştirme işlemidir. Diğer bilinen yüzey sertleştirme yöntemlerinin dışında sertleşme için kritik sıcaklığın üstüne çıkılmaz ve sıcaklığı 500-550°C olan amonyak gazı ortamında bekletilerek çelikte, ince ve çok sert bir tabaka oluşturulur. Bu işlem, gaz ortamında yapıldığı gibi sıvı ortamlarda yani azot veren tuz banyolarında da yapmak mümkündür. Amonyak gazı yüksek sıcaklıklarda azot ve hidrojene ayrışarak çeliğin yüzeyine azot ve hidrojen difüzyon ile girmeye başlar. Belli bir süre sonra yüzeyde nitrür tabakası oluşur. Oluşan bu tabaka çok sert ve ince bir tabakadır. Diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine göre su verme işlemine gerek yoktur. Bu yöntem fazla zaman harcayan bir yöntem olmakla beraber diğer yöntemlere göre de düşük sıcaklıklarda yapılır [23].

2.2.3. Borlama

Borlama ile yüzey sertleştirme işlemi son yüzyılda yaygınlaşan bir termokimyasal yüzey sertleştirme işlemi olup, yüzeyin kimyasal yapısı değiştirilerek yapılan ve diğer yüzey sertleştirme işlemlerine göre çok fazla sertlik elde edilen bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Borlama işlemlerinde, malzemenin yüzeyinden ısı etkisiyle

difüzyon ile bor atomların çeliğin yüzeyinden içeri doğru geçer. Çeliğin içerisindeki elementlere göre metal borür ve belli bileşikler oluşturarak çok sert bir tabaka kazandırma işlemidir. Borlama işlemi başlangıcını; malzeme yapısında mevcut bulunan tane sınırları, dislokasyonlar, atom boşlukların olduğu bölgelerde difüzyonla beraber ilk borür (Fe_2B) tabakaları oluşur. Bu noktalarda tıpkı sıvı metalin katılaşmaya başladığı anda benzer çekirdek oluşumu gibi Fe_2B çekirdekleri oluşur ve büyür. Borlamada ilk oluşan Fe_2B bileşiği, borlayıcı ortama ve çeliğin yüzeydeki reaksiyona girebilecek elementleri arasında reaksiyon oluşarak meydana gelir. Tanelerin yüzeyde oluşturduğu çekirdek, zamanla büyür ve ince bir bor tabakası ortaya çıkar. Bor; Fe_2B ve FeB bileşiğinde çeliğin yüzeyinde yayılır, metal borür taneleri diğer taraflara büyümesinin yavaşlamasıyla kolonsal bir yapı meydana gelir. Kısaca önce Fe_2B fazı oluşur. Ortamda yeterli bor konsantrasyonu ile beraber FeB fazı da oluşur. Borlamanın son aşamasında oluşan FeB fazı, Fe_2B fazından daha kısa zamanda büyür ve FeB fazının yapısı Fe_2B fazının yapısından mekanik olarak daha zayıftır. Borlama yöntemi; katı, sıvı, gaz, plazma gibi çeşitli yöntemlerle yapılmaktadır. Katı borlamada borlanacak çelik malzeme, yaklaşık %5 B_4C , %5 KBF_4 ve %90 SiC içeren karışımlar ile beraber bir seramik veya kapalı hava almayacak kutu içerisine konularak östenitleme sıcaklığında yapılır. Bu yöntemde kapalı ortamın sızdırmaz ve hava geçirmeyecek özellikle olması gerekir. Yöntem uygulanışı itibarıyla katı semantasyona benzeyen bir yöntemdir. Fakat semantasyondaki gibi sonradan veya hemen sonra su vermeye yani sertleştirmeye gerek olmadan tatbik edilen yöntemdir. Bu haliyle kutu semantasyona göre borlama işlemi enerji, işçilik ve maliyet açısından ekonomiklik sağlamakta, fakat elde edilen sertlik derinliği açısından dezavantaj sağlamaktadır. Sıvı borlamada ise boraks, borik asit ve ferro-silis karışımlarından oluşan tuz banyosuna çelik numune daldırılır ve yine östenitleme sıcaklığında belli süre bekletildikten sonra çıkarılır. Bu yöntem, genellikle katı borlamaya göre daha homojen ve daha hızlı difüzyon olmaktadır. Gaz ve plazma borlamada BCl_3 , TMB (trimetil borat), TEB (triethyl boran) ve BF_3 gibi bor kaynakları ile H_2 ile Ar gazları kullanılmaktadır [24].

Yukarıda bahsedilen yüzey sertleştirme yöntemlerine göre borlama ile yüzey sertleştirme kıyas yapıldığında borlama ile yapılan yüzey sertleştirme işlemleri yöntem itibarıyla semantasyon ile yüzey sertleştirme işlemine benzer. Borlamayı, semantasyondan ve diğer yüzey sertleştirme işlemlerinden ayıran en üstün özelliği

ise elde edilen sertliğin diğ er y ontemlere g ore  ok fazla oluşudur. Bu  zelliği aynı zamanda nitr rasyonla elde edilen sertlikten bile fazla oluşuyla hem nitr rasyona hemde semantasyona alternatif bir y ontem olarak kullanılabilir. Aynı zamanda diğ er y uzey sertleştirme y ontemlerine g ore sonradan su verme gibi ek maliyet ve iş ilik oluşturabilecek işlemler de olmadığı i in işletme maliyeti daha d ş kt r.



3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Atik vd. [25] çalışmalarında, AISI 1010, AISI 1040, AISI D2 takım çeliği ve AISI 304 paslanmaz çeliklerine uygulanan borlama sonunda, bor tabakası ve aşınma dirençlerini inceleyip diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine göre incelediler. Borlama işlemlerini 900 °C’de ekabor tozuyla 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerde gerçekleştirdiler. 8 saat borlama süresine maruz bırakılan, karbonca ve alaşım elementleri açısından en düşük orana sahip AISI 1010 çeliğinde metal borür tabakası kalınlığını 130 µm, AISI 304 çeliğinde 85 µm ve AISI D2 takım çeliğinde ise 45 µm olarak ölçmüşlerdir.

Özbek vd. [26] AISI W4 çeliğine 850, 900 ve 950 °C’ lerde Ekabor-1 tozuyla 1, 2, 4 ve 6 saat sürelerde borlama yapmışlardır. Borlama işlemi sonucunda, testere dişi metal borür tabakası elde etmişlerdir. Borlama süresinin artışıyla metal borür tabakasının kalınlıklarında arttığını rapor etmişlerdir. Sertlik değerleri 1407-2093 HV arasında ve Fe₂B nin tokluğu FeB den 4 kat fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Gunes vd. [27] Ekabor-2 tozu kullanarak AISI 310 çeliğine 2 ve 6 saat sürelerde, 850 ve 1050 °C’lerde katı borlama işlemi uygulayarak borlamaya bağlı olarak paslanmaz çeliğin yüzeyinde borür tabakası oluştuğunu rapor etmişlerdir. XRD sonuçlarına göre yapı içerisinde FeB, Fe₂B, CrB, Cr₂B, NiB, Ni₂B, Ni₃B yapılarının oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Isıl işlem uygulanmamış AISI 310 çeliğin sertlik değeri 276 HV sertliği ölçülürken, borlama işleminden sonra ise 1628-2284 HV aralığında olmak üzere 9 kat sertlik artışı gözlemlemişlerdir. Zaman ve sıcaklıkla orantılı olarak da meydana gelebilen metal borür tabaka kalınlığı 7,82 – 56,72 µm arasında ölçülmüşlerdir. Bu çalışmada, borlanmış çeliğin aşınma oranı borlanmamış çeliğe göre aşınma direnci 7 katına ulaştığını belirlemişlerdir.

Delikanlı vd. [28] 1050 çeliğini 950 °C’de 3 saat süreyle % 80 susuz boraks (tinkal) ve % 20 ferrosilisyum tozu kullanarak borlamışlar. Borlama işlemi sonucunda elde edilen metal borür tabakasında 496 -1290 HV sertlik ölçmüşlerdir. Geçiş tabakasında ise bu değeri 300-334 HV olarak belirlemişlerdir. Matris bölgesinde 260-266 HV sertlik değeri ölçülmüşlerdir. Sertlik değerlerinin yüzeyden içeri doğru azaldığı

gözlemişlerdir. Bunun nedeni olarak içeriğindeki karbon oranının da etkisiyle (karbon oranı ve diğer elementlerin artışı sertlik tabakası derinliğini azaltır) semantasyondaki gibi difüzyonun yüzeyden içeri doğru gidildikçe azalması şeklinde açıklamışlardır. Buna bağlı olarak da metal borür tabakasının azaldığına ifade etmektedirler.

Uslu vd. [29] AISI 1040 ve AISI P20 çeliklerine 800, 875 ve 950 °C’lerde 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerde katı borlama işlemi uygulamışlardır. Her iki çelikte de artan sürelerle ve sıcaklıklara bağlı olarak metal borür tabaka kalınlığının arttığını gözlemlemişlerdir. Bunun nedeni, iki çeliğin de karbon oranlarının yaklaşık olarak aynı içeriğe sahip olmasından kaynaklı olabileceğini ifade etmektedirler. Yapılar incelendiğinde ise üç farklı yapı ortaya çıktığı gözlemlemişlerdir. FeB, Fe₂B borür tabakasını oluştururken diğer yapılar geçiş bölgesi ve matris olduğu belirlemişlerdir. Borlama süresi ve sıcaklık, malzeme bileşimine ve tokluğana etkisi olduğundan, borlama süresi artış beraberinde kırılma tokluk değerini düşürdüğü sonucuna varmışlardır. Borlama süresinin artışı beraberinde daha sert ve gevrek olan FeB yapısını oluşturarak tokluk değerini olumsuz etkilediğini rapor etmişlerdir.

Barut vd. [30] AISI 5140 ve AISI 420 çeliklerine 2, 4 ve 6 saat süreyle 850, 900 ve 950 °C’lerde borlama işlemi uygulamışlardır. Borlama işlem sonucunda, artan borlama süresi ve borlama sıcaklığına bağlı olarak oluşan metal borür tabakasının kalınlığının arttığını gözlemlemişlerdir. Çelikte bulunan alaşım elementlerinin bu metal borür tabakanın kalınlığını etkilediği belirtmişlerdir. AISI 420 çeliğinde oluşan borür tabakasının düz bir yapıda olduğunu, AISI 5140 çeliğinde ise bu tabakanın testere dişi yapıda olduğu rapor elde etmişlerdir. Borür kalınlığı ise AISI 5140 çelik malzemede daha fazla olduğu görmüşlerdir. AISI 5140 AISI 420 çeliklerinde FeB, Fe₂B, CrB, MnB fazları oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Yüzey sertliklerinde de 4 ile 6 kat artış olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, borlama işlemi sonucunda aşınma oranlarının azaldığı gözlemlemişlerdir.

Ulutan vd. [31] SAE 4140 çeliğini 2, 4 ve 6 saat sürelerde 1223, 1273 ve 1323 K sıcaklıklarda numuneleri borlanmıştır, borlama süresi ve borlama sıcaklığının artması ile metal borür tabakasının kalınlığının da arttığını beyan etmişlerdir. Bu tabaka derinliklerini ise 57 – 290 µm arasında ölçmüşlerdir. En fazla metal borur tabaka kalınlığını 1050 °C’deki 6 saat borlama işlemi ile kazandırılmış ve sertlik değeri de 1200-1750 HV arasında ölçmüşlerdir. Borlanmış numuneler ile

borlanmamış numuneler aşınma özellikleri bakımından kıyaslandığında borlanmış numunelerin aşınma direnci 3 ile 4 kat daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Aşınma direncinin en yüksek olduğu numunenin 900 °C’de 6 saat borlanan numunede olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Er vd. [32] 950°C’ de 2, 4 ve 6 saat süreyle AISI 1030 ve AISI 1050 çelik numunelerini katı borlama işlemine tabi tutmuşlardır. Bu işlem sonucunda, borlama yapılmamış numunelere göre yüzey sertliklerinde 8 ile 10 kat bir sertlik artışı kazandırmışlardır. 950°C’de sabit kalarak artan süreyle birlikte borlanmış tabaka kalınlıklarında artış aynı cins numunelerin artan metal borür tabakala kalınlıkları ile kıyaslandığında aşınmanın azaldığını gözlenmişlerdir. Ayrıca AISI 1030, AISI 1050 çelikleri aşınma dirençleri kıyaslandığında birbirine yakın değerler çıktığını gözlemlemişlerdir.

Topuz [12] soğuk iş takım çeliğini (AISI O2) 850, 950 ve 1050°C sıcaklıklarda 1 ve 4 saat süreyle borlama işlemi uygulamışlardır. Artan borlama sıcaklığı ve borlama süreyle birlikte borür tabaka kalınlıklarında orantılı bir artış gözlemlemiştir. Borlama sıcaklık artışının metal borür tabakalarında faz ayrışmalarına sebep olduğunu rapor etmişlerdir. Bunun nedeni, FeB ve Fe₂B fazlarının termal genleşme katsayılarının farklı oluşundan kaynaklandığı ifade etmektedir. Faz ayrışmalarının artan borlama süreden ziyade artan borlama sıcaklıkla daha fazla arttığı gözlemlemiştir. Soğuk iş takım çeliğinde ideal borlama sıcaklığı 850 °C olarak belirtmiştir.

Çelik vd. [33] 900, 950 ve 1050°C’lerde AISI 1030 çeliğini 2, 4 ve 6 saat süre ile katı borlama işlemi uygulamışlar. Artan borlama sıcaklık ve borlama süresine bağlı olarak metal borür tabaka kalınlığının arttığını gözlemlemişlerdir. Bu işlem sonucunda borlama metal borür tabaka kalınlıklarını 80,6 – 340,9 µm arasında, sertlik değerleri ise, 1227-1625 HV arasında ölçmüşlerdir. Al₂O₃ zımpara kâğıdıyla yapılan aşınma testi sonucu en az aşınmanın 950 °C’de 6 saat borlanan numunede en fazla aşınmanın ise 1050 °C’de 4 saat borlanan numunede olduğunu belirlemişlerdir. SiC zımpara kâğıdı ile yapılan aşınma testi sonucunda en az aşınmanın 900 °C’de 4 saat borlanan numunede, en fazla aşınmanın ise 1050 °C’de 2 saat borlanan numunede olduğu gözlemlemişlerdir. Al₂O₃ zımpara kâğıdıyla yapılan aşınma testinde en az aşınma çıkan 950 °C’de 6 saat borlanan numune borlanmamış numuneye göre 24,5 kat daha az aşındığı tespit etmişlerdir.

Uluköy vd. [34] metal borur tabakasını ana matraste tutunmasını sağlayan faz Fe₂B fazı olduğu belirlenmiş ve bu faz, malzeme yüzeyinde oluşan metal borür tabakasının altında olup en üst tabakasında ise FeB faz tabakası oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

Gunes [35] AISI 420, AISI 5120 çeliklerine 950 °C’de 5 saat süreyle borlama işlemi uygulanarak, borür yapılarının morfolojileri incelemişlerdir. AISI 5120 çeliğinin metal borür tabakası testere dişi yapıda, AISI 420 çeliğin ise çeliğinin metal borür tabakası düz olduğunu gözlemlemiştir. Metal borür tabakaların kalınlıkları ise AISI 420 çeliğinde 50,62 µm AISI 5120 çeliğinde ise bu değer 148,74 µm olarak ölçmüştür. Borlanmamış AISI 420 çeliğin sertliği 340 HV iken borlandıktan sonra bu sertlik değerleri 1854-2147 HV olarak ölçülmüştür. Borlanmamış AISI 5120 çeliğin sertliği 224 HV iken borlandıktan sonra bu sertlik değerleri 1498-1892 HV olarak ölçülmüştür. AISI 420 çeliğin aşınma oranı daha düşük çıkmış ve yaklaşık 5 kat aşınma dayanımının arttığı gözlemlemişlerdir.

Taktak [36] 800 ve 950 °C sıcaklıklarda AISI H13 sıcak iş takım çeliğine ve SAE 304 çeliğine 3, 5 ve 7 saat sürelerde borlama işlemi uygulamış ve borlanmış numunelere XRD analizleri yapmıştır. Yapılan analiz sonuçlarına göre H13 çeliğinde FeB, Fe₂B ve CrB bileşikleri olduğunu, SAE 304 çeliğinde ise FeB, Fe₂B, CrB ve Ni₃B fazları olduğunu gözlemlemiştir. Artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak metal borür tabakasında kalınlıklarında artış gözlemiş ve aynı parametrelerde borlanan çeliklerde, paslanmaz çeliğin sertliğinin daha yüksek çıktığı gözlemiştir. Sertliğin diğer H13 çeliğinden yüksek çıkmasındaki temel etken SAE 304 çeliğinin içeriğindeki Cr ve Ni elementlerin oluşturduğu bileşikler olduğunu belirtmişlerdir.

Uluköy vd. [37] metal borür tabakasının ana matrise tutunmasını sağlayan Fe₂B fazını oluştuğu ve metal borür tabakasının en üst kısmında ise FeB tabakası oluştuğu gözlemlemiştir. Borlama sonucunda sertlik değerinde, aşınma direnci ve korozyon dayanımında da artışlar olduğunda belirtmişlerdir.

Krelling vd. [38] 1000 °C’ de AISI 1020 çeliğini 4 saat süreyle borlamış ve borlama sonunda XRD analizi yaparak işlem sonunda oluşan fazlar tespit etmeye çalışmıştır. SEM görüntülerinden metal borür yapısı incelemişlerdir. Borlanmış numunelerin aşınma davranışları, borlanmamış numunelere göre daha yüksek çıktığını belirtmişlerdir. XRD analizinde, ısıtıl işlem uygulanmış numunede metal borür tabakası oluştuğunu ve bu tabaka derinliği 177 µm geldiğini ölçmüştür. Yapıda Fe₂B

fazı oluştuğu yapılan analiz sonucu tespit etmişlerdir.

Turku vd. [39] dűřűk karbonlu mikroalařımlı çeliklere 850  C' de 2, 4, 6 ve 8 saat sűrelerde Ekabor-2 tozu kullanarak borlama yapmıřlardır. Borlama iřlem sonucunda, yűzeyde metal borűr tabakası oluřtuđunu gűzlemlemiřlerdir. Oluřan bu tabakada űc ayrı yapıdan meydana geldiđi ve bu yapıların içerisinde FeB, Fe₂B bileřikleri oluřtuđunu yaptıkları analiz sonrasında belirlemiřlerdir. Borlama iřlemi sonucunda yűzeyde 9 kat sertlik artıřı elde etmiřlerdir.

Yılmaz vd. [40] kompozit olan FeCu-Grafit'ten (demir esaslı) toz metal parçalar űreterek bir kısmına borlama, diđer kısmına da borlama+bilyalı dűvme iřlemleri uygulamıř ve iřlem sonunda sadece borlanan FeCu-Grafitin ařınma dayanımı 24 kat fazla çıktıđını gűzlemlemiřlerdir. Borlanmış+bilyalı dűvűlmű FeCu-grafitin ise 7 kat fazla çıktıđı belirlemiřlerdir.

etin [41] borlanmış Hadfield eliklerini 800  C ve 1000  C sıcaklıklarda borlama işlemi uygulamışlardır. Borlama sırasında oksijenin olumsuz etkisini gidermek için, oksijeni tutabilecek redűkleyici kullanmanın  nemli olduğunu ve borlamada sertliğin  nemli bir  zellik olduğunu ifade etmiştir. Alaşımlı eliklerde 2500 HV titanyumda ise 3000 HV sertlik değerlerine kadar çıkabileceğini belirtmişlerdir.

Tabur [42] 800, 900 ve 950  C sıcaklıklarda Hardox eliđi ve AISI 8620 eliđine 2, 4 ve 6 saat sűrelerde katı borlama ısıl iřlemi yapıldıktan sonra ařınma testi uygulamıřlardır. Ařınma testi 10N, 20N, ve 30N'luk yűkler altında Al₂O₃ ařındırıcıyla 0,2 m/s hızında numunelere uygulanmıřtır. Borlanmış numunelerin iřlem gűrmeyen numunelere gűre ařınma direncinin yűksek çıktıđı gűzlemlemiřlerdir. Artan borlama sűresi ve borlama sıcaklıđına bađlı olarak borűr tabaka kalınlıđında artıř meydana geldiđini ifade etmiřlerdir.

4. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu çalışmada, özellikle savunma sanayisinde, yüzey sertliği gerektiren makine parçalarının korozyona dayanıklılığının yanı sıra ekonomik olması da beklenir. Bu amaçla, AISI 8620 çeliği borlama işlemi için numune olarak seçilmiştir. AISI 8620 çeliğine farklı süre ve farklı sıcaklıklarda Baybora-1 ajanıyla borlama işlemi uygulanmıştır. Borlanmış numunelere, ASTM G31-72'ye göre farklı sürelerde korozyon testi yapılmıştır. Test sonrasında korozyon dirençleri belirlenerek, korozyon direncine en uygun borlama sıcaklık ve borlama süreleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Malzeme

Borlama yapılacak numuneler AISI 8620 semantasyon çeliğinden seçilmiştir. Şekil 5.1.'de borlanacak numunenin görüntüsü verilmektedir. Numuneler tornada boyutları 15 mm çapında ve 20 mm yüksekliğinde silindir olarak hazırlandı.



Şekil 5.1. Borlama yapılacak numunenin görüntüsü

Katı borlama işleminde, AISI 304 paslanmaz çelik malzemeden yapılmış 130x100 mm silindirik bir pota kullanılmıştır (Şekil 5.2).

Bu çalışmada, AISI 8620 çeliği numune olarak seçilmiştir. AISI 8620 çeliği düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çelik grubunda olduğu için metal borür tabaka kalınlığı yüksek olması beklenmektedir.

Düşük karbonlu çeliklerin borlama işleminde daha kalın metal borür tabakası olduğu literatürde rapor edilmiştir. Düşük karbonlu ve düşük alaşımlı çelikler için metal borür tabaka kalınlığı 50 ila 250 μm ve yüksek alaşımlı çelikler için 25 ila 76 μm arasındadır [43,44]. Çizelge 5.1. de borlanmamış AISI 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi verilmiştir.

Çizelge 5.1. Borlanmamış AISI 8620 çeliğinin kimyasal bileşimi

Element	%
C	0,1920
Si	0,2700
Mn	0,8370
Cr	0,5200
Mo	0,2340
Ni	0,5710
P	0,0134
S	0,0134
Co	0,0123
Al	0,0423
Fe	97,200

Çeliğin kimyasal analizinde % 0,192 C, % 0,270 Si, % 0,837 Mn, % 0,013 P, % 0,013 S, % 0,520 Cr ve % 0,57 Ni, % 0,23 Mn ve % 97,2 Fe içerdiği belirlenmiştir. AISI 8620 çeliğinin düşük alaşımlı çelik grubunda olduğu Çizelge 5.1.'de verilen kimyasal bileşimden anlaşılmaktadır.

5.2. Borlama İşlemi

Bu çalışmada, patenti alınmış ve Baybora-1 olarak marka tescili yapılmış olan bir borlama ajanı kullanılmıştır. Borlama ajanı patenti Bayça [45] tarafından alınmıştır.

Borlama işlemi, bir çelik pota içerisine Baybora-1 ajanı ile birlikte numuneler 700, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda borlama işlemleri yapılmıştır.



Şekil 5.2. Borlama yapılacak potanın kapatılmış görüntüsü

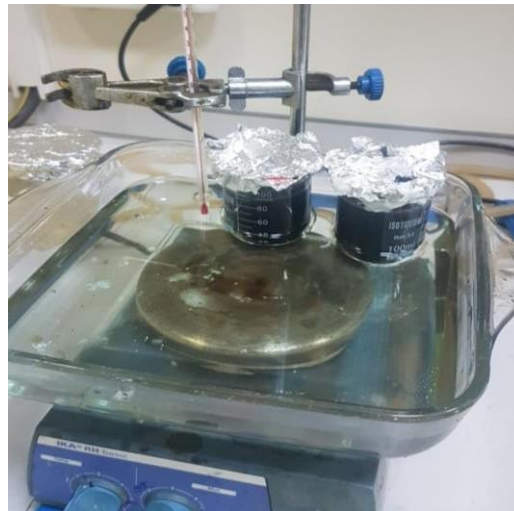
Borlama işlemi yapılan potanın görüntüsü Şekil 5.2’de verilmiştir. Borlama işlemine hazır haline getirilen pota içerisindeki numuneler Magmaterm marka fırına konulmuştur. Fırında, belirli bir süre ve sıcaklıkta ısıtılan pota fırında soğumaya bırakılmıştır.

5.3. Korozyon testi

AISI 8620 çeliğinin korozyona direncini belirlemek için ağırlık kaybı yöntemi kullanılmıştır. ASTM G31-72 standardında belirtilen ağırlık kaybı yöntemi kullanılarak korozyon testi yapılmıştır [46]. Ağırlık kaybı ölçümleri, oda sıcaklığında 200 mL test çözeltileri içeren 250 mL’lik bir beherde yapılmıştır. Çelik numuneler zımpara kağıdı ile temizlenmiş ve 0.1 mg hassasiyetteki bir terazide tartılmıştır. Çelik numuneler % 10 sülfürik asit ve % 90 saf su içeren 56 °C sıcaklıktaki çözeltiye daldırılmış ve belirli bir süre bekletilmiştir. Korozyon çözeltisinden çıkan çelik numuneler saf su ile yıkanmış ve kurutulmuştur. Korozyon oranı, aşağıda verilen denklem ile hesaplanmıştır.

$$CR = \frac{W}{d A t}$$

Burada CR , cm/saat cinsinden korozyon hızı, W numunenin g cinsinden ağırlık kaybıdır, A numunenin cm^2 cinsinden yüzey alanıdır, d numunenin g/cm^3 cinsinden yoğunluğu ve t numunenin çözeltide bekletilme süresidir.



Şekil 5.3. Manyetik karıştırıcı ocağında korozyon testi uygulaması

5.4. Karakterizasyon

Metal borür fazlar bir PHILIPS PW-3710 marka X-ışını difraktometresi kullanılarak belirlenmiştir. Tarama hızı 2 derece/dak, tarama eksen 2 teta/teta, tarama modu sürekli ve örnekleme genişliği 0,200 derece idi. Sertlik ölçümleri bir Galileo Durometria İtalyan sertlik test cihazı kullanılarak yapıldı. Ölçümler, HV 100 g yük altında 20 mikron aralıklarla gerçekleştirildi. Her bölüm için 10 ölçüm alınmış ve ortalama değer kullanılmıştır.

5.5. Metal Borür Tabaka Kalınlıklarının Ölçülmesi

Her bir sıcaklıkta ve sürede borlanmış numunelerde oluşan metal borür tabaka kalınlıkları (x_1, x_2 vb) ölçülür. Bu ölçülen kalınlıkların ortalamaları eşitlik 6.2 ile hesaplanır.

$$Tabaka\ kalınlığı = x_{ort} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6.1)$$

$$x_{ort} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 \dots \dots x_n}{n} \quad (6.2)$$

Standart sapma hesabında ise bulunan x_{ort} değeri ölçülen her bir borür derinliğinden çıkartılarak karesi alınır sonra karesi alınan her bir değer toplanarak toplam ölçüm âdetinden bir eksik olacak şekilde bölünür ve karekök işleminden sonra standart sapma değerleri eşitlik 6.3 kullanılarak bulunur. Bulunan bu değerler x_{ort} değerlerinin toleransı olarak ifade edilebilir.

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - x)^2 + (x_2 - x)^2 + (x_3 - x)^2 + \dots}{n - 1}} \quad (6.3)$$

Metal borür tabaka kalınlığı = $x \pm$ standart sapma

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

6.1. 700 °C’de Yapılan Borlama İşlemi Sonuçları

AISI 8620 çeliğinin borlama işlemi 700, 900 ve 950 °C olmak üzere üç farklı sıcaklıklarda yapılmıştır. Bu borlama işlemleri, borlama sıcaklığına göre bölümlere ayrılarak bu çalışma kapsamında verilmiştir.

Bu bölümde, 700 °C sıcaklık ve 4, 8, 12 ve 16 saat borlama sürelerinde yapılan borlama işlemi sonuçları verilmiştir. Çizelge 6.1.’de 700 °C sıcaklıkta borlama yapılan AISI 8620 çeliğinin numune kodu gösterimi ve borlama süreleri verilmiştir. Şekil 6.1.’de borlanan numunelerin potadan çıkarılmış görüntüleri verilmektedir.

Çizelge 6.1. AISI 8620 çeliğinin 700°C sıcaklıkta borlama koşulları

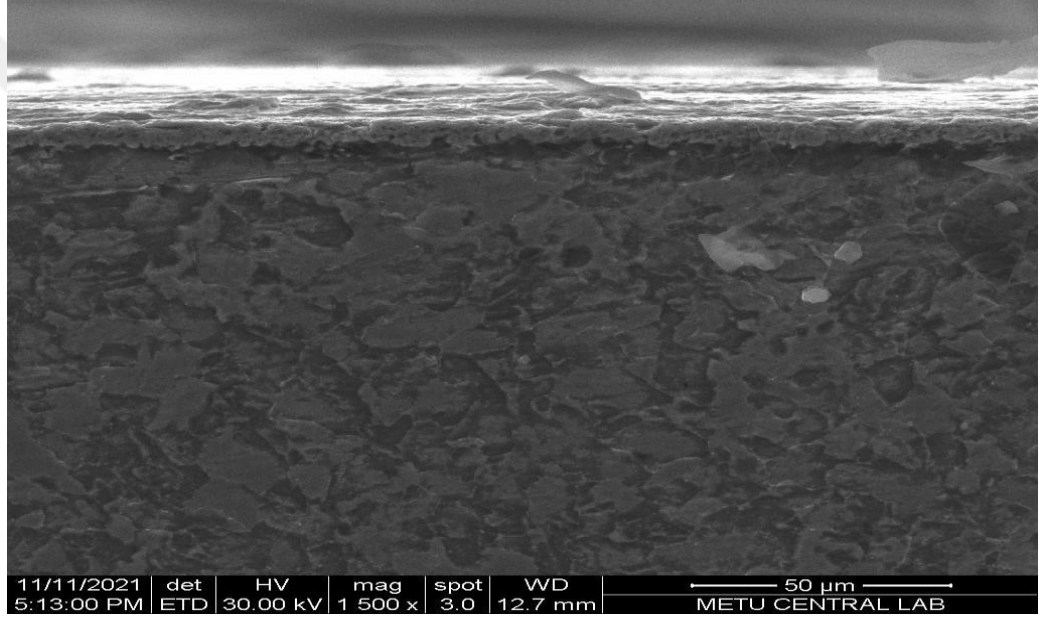
Numune Kodu	Borlama Sıcaklığı (°C)	Borlama Süresi
		Saat
704	700	4
708	700	8
712	700	12
716	700	16



Şekil 6.1. Borlanan numunelerin potadan çıkarılmış görüntüleri

6.1.1. İç Yapı İncelemeleri

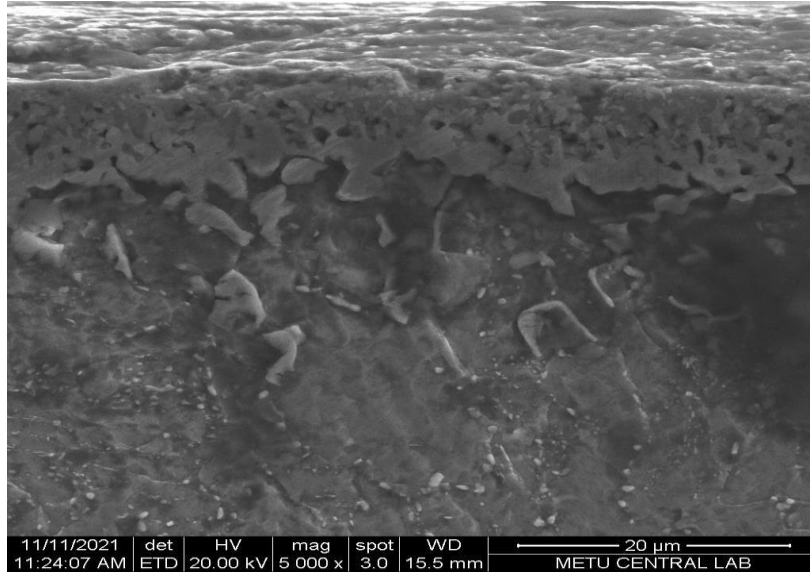
700 °C’de numuelere yapılan borlama işlemlerinde, metal borür tabakaları elde edildi. AISI 8620 çeliğini 700 °C’de 4 saat borlama ısı işlem sonucunda oluşan metal borür tabakasının SEM görüntüsü Şekil 6.2.’de verilmiştir. Bu işlem sonucunda, yüzeyde metal borür tabakası olduğu görüldü. Çeliklerde, nitrürasyon dışında diğer yüzey sertleştirme yöntemlerinde, difüzyon ve diğer su verme sertleştirme işlemleri için; östenit bölgesine çıkılmasına ihtiyaç duyulur. Fakat 700 °C’de çeliğin HMK yapısı bozulmadan ve östenit bölgesine çıkılmadan metal borür tabakası elde edildi. 700 °C’de oluşan metal borür tabakası oluşumunda kullanılan Baybora-1 borlama ajanı etkisinden söz edilebilir.



Şekil 6.2. 700 °C’de 4 saat borlanmış numunenin SEM görüntüsü

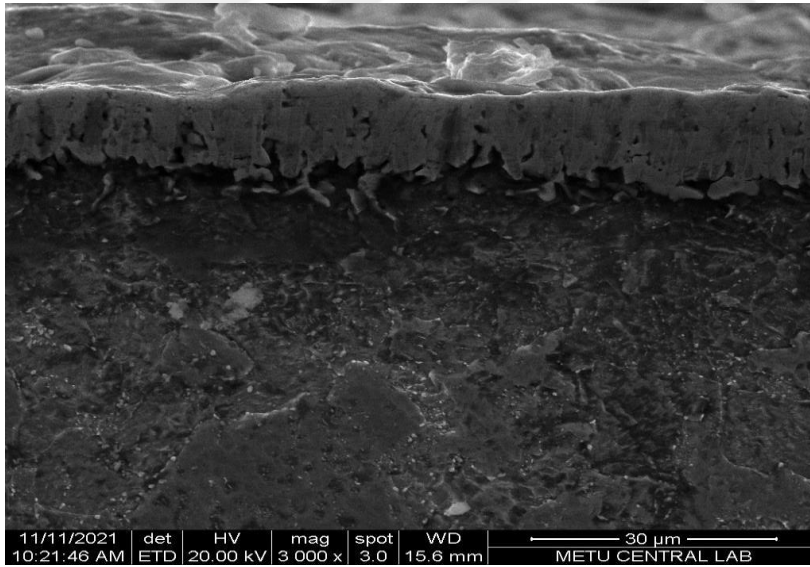
700 °C’de 4 saat borlanan numunenin SEM görüntülerine göre oluşan metal borür tabakası zayıf testere dişi şeklinde olduğu görülmüştür. 700 °C’de 4 saat borlanan numune yüzeyinde, ortalama $6,92 \pm 0,65 \mu\text{m}$ metal borür tabaka kalınlığı olduğu ölçülmüştür. Geçiş bölgesi kalınlığı ise $77,82 \mu\text{m}$ ye kadar ulaştığı görülmüştür.

Şekil 6.3.’de 700 °C’de 8 saat borlanan numunenin SEM görüntüsü incelendiğinde metal borür tabakasının zayıf testere dişleri şeklinde olduğu, fakat 4 saatlik borlamaya göre, metal borür tabakasının kalınlığının çok az arttığı görülmüştür.



Şekil 6.3. 700 °C’de 8 saat borlanmış numunenin SEM görüntüsü

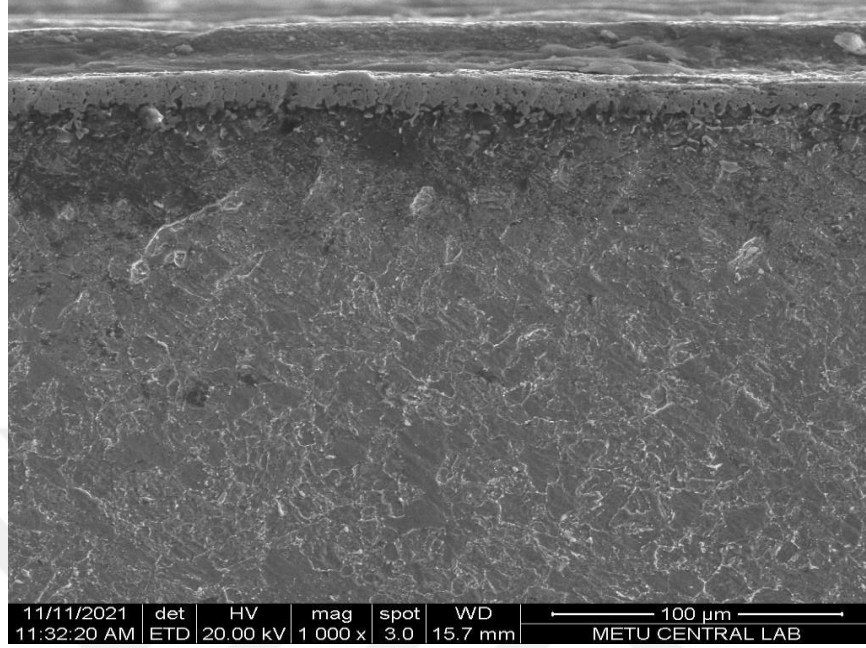
700 °C’de 8 saat borlanmış numunenin yüzeyinde $10,30 \pm 1,96 \mu\text{m}$ metal borür tabaka kalınlığı elde edildiği görülmüştür.



Şekil 6.4. 700 °C’de 12 saat borlanmış numunenin SEM görüntüsü

Şekil 6.4.’te 700 °C’de 12 saat borlanmış numunenin SEM görüntüsü incelendiğinde metal borür tabaka kalınlığının arttığı fakat borür tabakasının zayıf testere dişi şeklinde olduğu görülmüştür. 700 °C’de 12 saat borlanan numune yüzeyinde, $14,50 \pm 2,44 \mu\text{m}$ metal borür tabaka kalınlığının elde edilmiştir.

Şekil 6.5.'te 700 °C'de 16 saat borlanmış numunenin SEM görüntüsü verilmiştir. 700 °C'de 16 saat borlanmış numunenin yüzeyinde, metal borür tabaka kalınlığı $14,57 \pm 1,08 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.5. 700 °C'de 16 saat borlanmış numunenin SEM görüntüsü

700 °C'de 12 saatlik borlamaya göre yaklaşık olarak birbirine yakın metal borür tabaka kalınlıkları elde edilmiştir. Zayıf testere dişli şeklinde olduğu görüldü de, SEM görüntüsüne bakıldığında, borür tabakasının, 12 saat 8 saat ve 4 saatlik sürelerde yapılan borlama işlemlerine göre, testere dişi yapının daha güçlü olduğu görülmüştür.

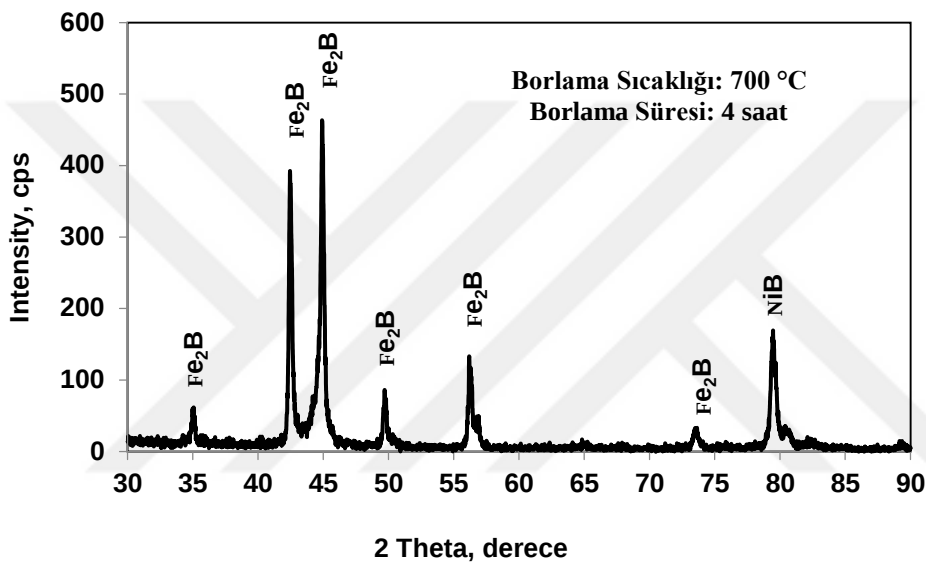
Güneş [47] AISI 8620 çeliğini, değişik pasta karışımlarında plazma pasta ve ticari Ekabor tozu kullanılarak 700 °C, 750 °C, 800 °C'de 2, 5 ve 7 saat sürelerde borlamışlar ve belirli kalınlıklarda metal borür tabakası elde etmiştir. 700 °C sıcaklıkta ve 7 saatlik sürenin sonunda $4 \mu\text{m}$ kalınlığında metal borür tabakası elde etmişlerdir.

700 °C'de 4, 8, 12 ve 16 saat sürelerde gerçekleştirilen borlama işlemlerinde, en az metal borür tabaka kalınlığı ve zayıf testere dişlerine 4 saatlik sürede yapılan borlama işleminde ölçülmüştür. Testere dişi görünüsü Östenitleme bölgesi altında yapılan borlama işleminde, sertlik ölçümü yapılacak kadar derinlikte metal borür tabakaları elde edilmediğinden sertlik ölçümü yapılamadı. Fakat 700 °C'de borlama ısı işlemi yapılarak çeliğin HMK yapısı bozulmadan borür tabakası elde edilerek,

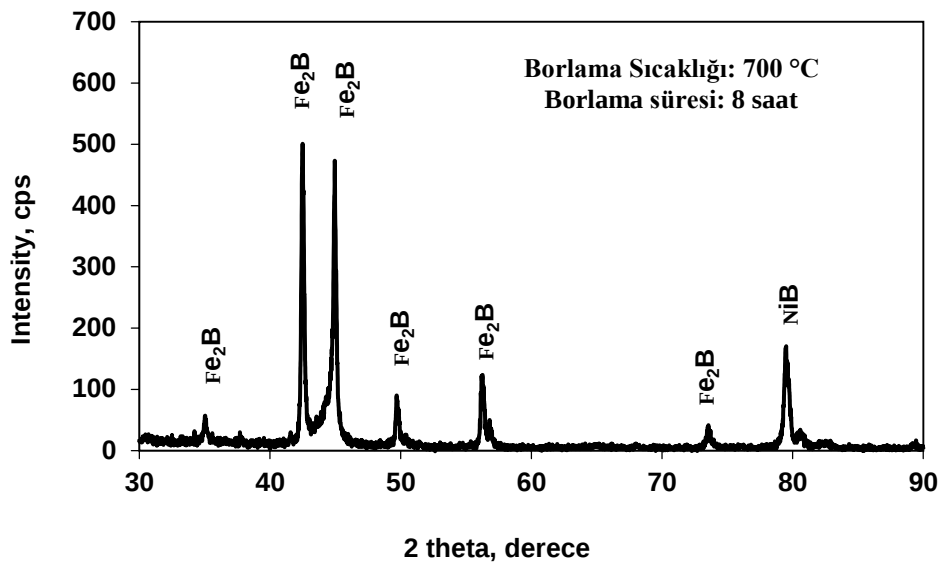
yüksek sıcaklıkta gözenekliliğe bağlı bozulmaların önüne geçilebilir. 700 °C’de daha fazla uzun süre borlama yapılmasıyla da daha fazla borür derinliği ve güçlü testere dişi yapısı elde edilebilir.

6.1.2. XRD Sonuçları

Borlama işlemi sonucunda metal yüzeyinde oluşan metal borür tabakasının kimyasal bileşimi XRD analizi ile belirlenmiştir. Borlama sonuçlarına göre; Şekil 6.6. ve 6.7’de, 700 °C’de 4 saat ve 8 saat yapılan borlama işlemlerinde borür tabakasında yüzeyden içeri doğru Fe₂B, NiB bileşikler oluştuğu görüldü.

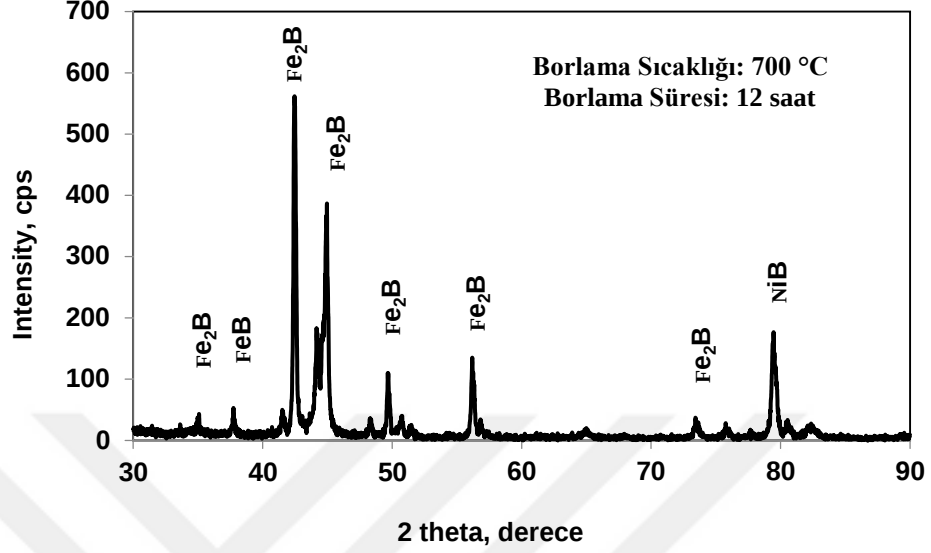


Şekil 6.6. 700 °C’de 4 saat borlanan numunenin XRD analizi

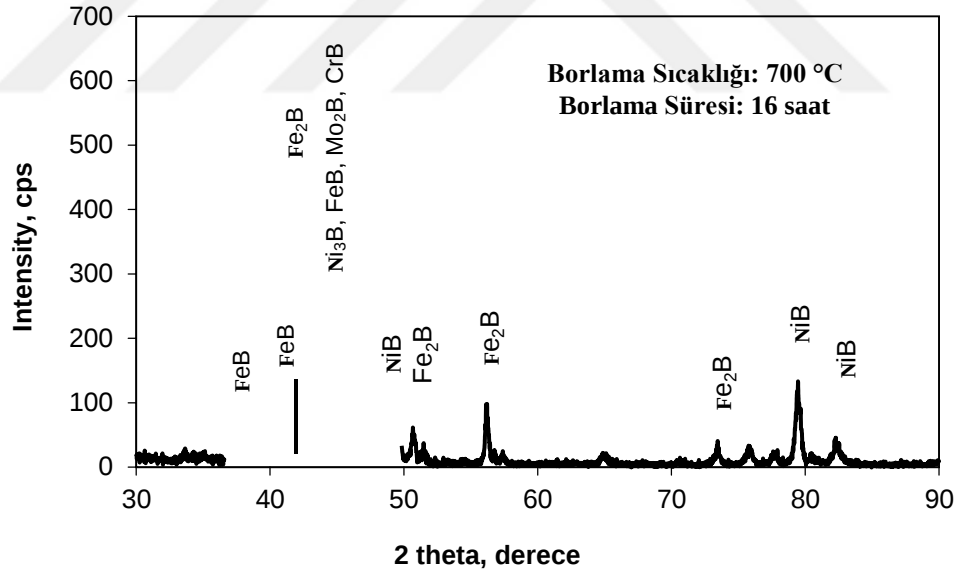


Şekil 6.7. 700 °C’de 8 saat borlanan numunenin XRD analizi

Şekil 6.8.'de 700 °C'de 12 saat yapılan borlama işleminde; Fe₂B, FeB, NiB bileşikleri görüldü. Şekil 6.9.'da 700°C'de 16 saat yapılan borlama işleminde ise FeB, Fe₂B, Ni₃B, FeB, Mo₂B, CrB ve NiB bileşikleri görüldü.



Şekil 6.8. 700 °C'de 12 saat borlanan numunenin XRD analizi



Şekil 6.9. 700 °C'de 16 saat borlanan numunenin XRD analizi

700 °C'de 16 saatlik borlama işleminde sürenin artmasıyla birlikte yüzeyde oluşan Fe₂B, fazı FeB fazına dönüştüğü için FeB fazında artış görülmüştür. Artan süreyle Ni₃B, Mo₂B, CrB bileşikleri de oluştuğu gözlemlendi. 4 saat, 8 saat ve 12 saat yapılan borlama işlemlerinde ise numunenin dış yüzeyinde FeB fazı görülmemiştir.

700 °C sabit sıcaklıkta borlama işlemine tabi tutulan çeliğin XRD analizlerinde borlama süresi 4 – 12 saat arasında olduğu zaman majör faz olarak sadece Fe₂B fazı gözlenmiştir. Borlama süresi 16 saat olduğu zaman çelik yüzeyinde Fe₂B, FeB, Ni₃B, Mo₂B ve CrB fazları oluşmuştur. Bu fazlar içerisinde Fe₂B fazının alt tabaka çeliğe yapışması çok kuvvetlidir. Ancak FeB fazının alt tabakaya yapışması kuvvetli olmadığı için bu FeB tabakası kolayca uzaklaşmaktadır. Bu nedenle, sürtünmeli çalışan makine parçalarında bu FeB tabakası çok kısa sürede aşınmaktadır. AISI 8620 çeliğinin 700 °C sabit sıcaklıkta, borlama süresi 12 saat den az olmalıdır. Bu süreye ulaşıldığı zaman çelik yüzeyinde FeB fazı da gözlenmektedir.

AISI 8620 çeliğine 700 °C’de 4, 8, 12 ve 16 saat sürelerde yapılan borlama işlemleri sonucunda borür tabakasının kalınlığı sertlik ölçülecek kadar yeterli düzeyde olmadığı için sağlıklı sertlik ölçümleri yapılamamıştır.

6.1.3. Korozyon Test Sonuçları

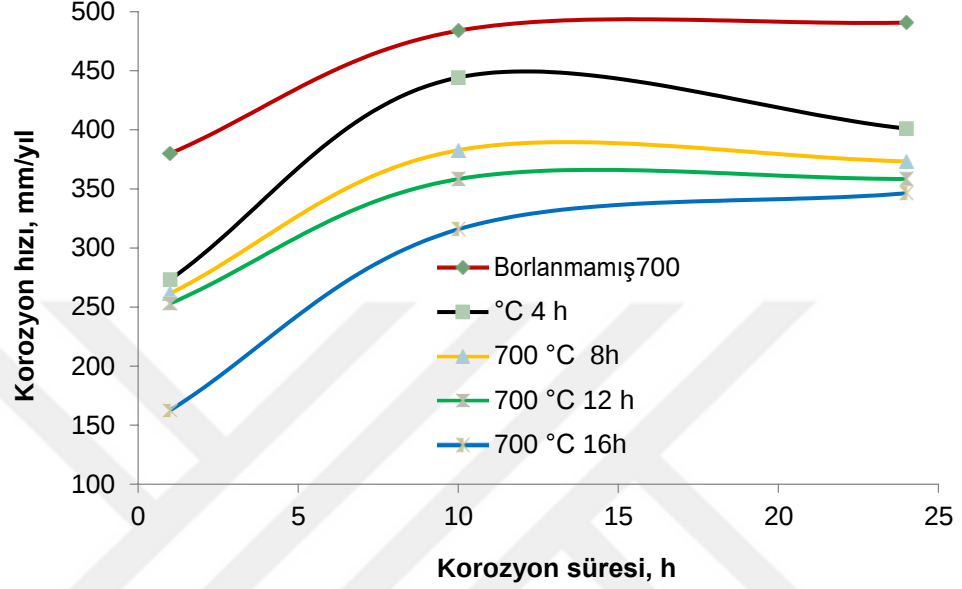
Numuneler farklı süreler ve sıcaklıklarda borlandıktan sonra korozyona, en zor şartlarda hangi sıcaklıkta ve hangi sürede borlanan numunenin dayanıklı olabileceğini belirlemek için korozyon testi yapılmıştır. 700 °C’de borlanmış numunelerin korozyon test koşulları Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2. 700 °C’de borlanan numunelerin korozyon test koşulları

Numune Kodu	Borlama İşlem Süresi saat	Korozyon Test Sıcaklığı (°C)	Korozyon Test Süresi saat	Korozyon Test Süresi saat	Korozyon Test Süresi saat
704	4	56	1	10	24
708	8	56	1	10	24
712	12	56	1	10	24
716	16	56	1	10	24

Şekil 6.10.’da 700 °C’de 4, 8, 12 ve 16 saat borlanmış numunelerin korozyon grafiğine göre; 1 saatlik korozyon testi yapılan numunelerin sonuçlarında, en az malzeme kaybı; 700 °C’de 16 saat yapılan borlama işleminde olduğu gözlenmiştir. 10 saatlik korozyon testi yapılan numunelerin sonuçlarına göre, en az malzeme kaybı; 700 °C’de 16 saat korozyon testi yapılan borlama işleminde olduğu gözlenmiştir. 24 saatlik yapılan korozyon test sonuçlarına göre de en az malzeme

kaybı; 700 °C’de 16 saat yapılan borlama işleminde görülmüştür. 700 °C’de borlanan numuneler kendi aralarında mukayese edildiğinde çıkan sonuçlarına göre en az malzeme kayıpları 16 saat borlanan numunelerde olduğu görülmüştür. 700 °C sıcaklıkta borlanmış numunelerin korozyon dayanımı borlanmamış numunelerin korozyon dayanımından daha yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.10. 700 °C’de 4, 8, 12 ve 16 saat borlanmış numunelerin korozyon grafiği

Korozyon süresinin artması ile korozyon hızı artmıştır. Borlanmamış numunenin korozyon hızı borlanmış numunelerin korozyon hızından daha yüksektir. En düşük korozyon hızı 700 °C sabit sıcaklıkta 12 saat borlama yapılmış numunede gözlenmiştir.

6.2. 900 °C’de Yapılan Borlama İşlemi Sonuçları

Bu bölümde, sıcaklığın borlama işlemi üzerine etkisini araştırmak için borlama sıcaklığı olarak 900 °C çalışılmıştır. 900 °C’de yapılan borlama işleminin numune kodu ve borlama süreleri Çizelge 6.3’de verilmiştir.

Çizelge 6.3. 8620 çeliğinin 900 °C sıcaklıkta borlama koşulları

Numune Kodu	Borlama Sıcaklığı(°C)	Borlama Süresi Saat
902	900	2
904	900	4
906	900	6
908	900	8

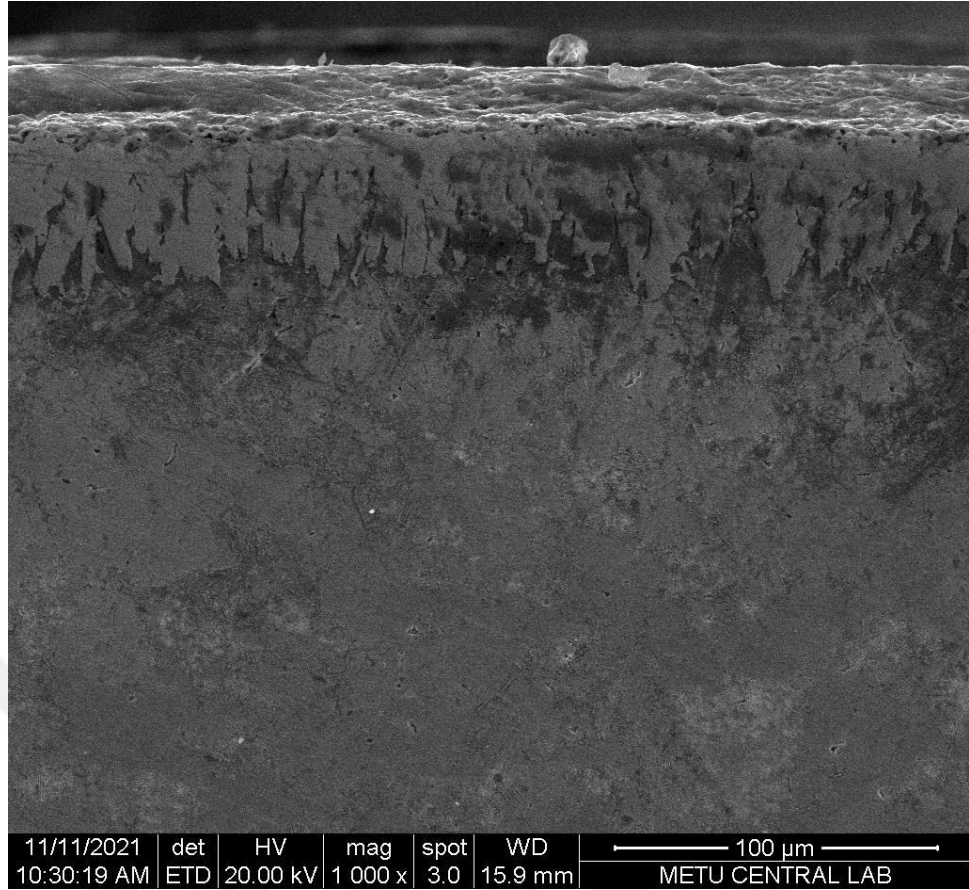
6.2.1. İç Yapı İncelemeleri

Şekil 6.11.'de 900 °C'de 2 saat borlanan numunenin metalografik görüntüsü ve Şekil 6.12.'de SEM görüntüsü verilmiştir.



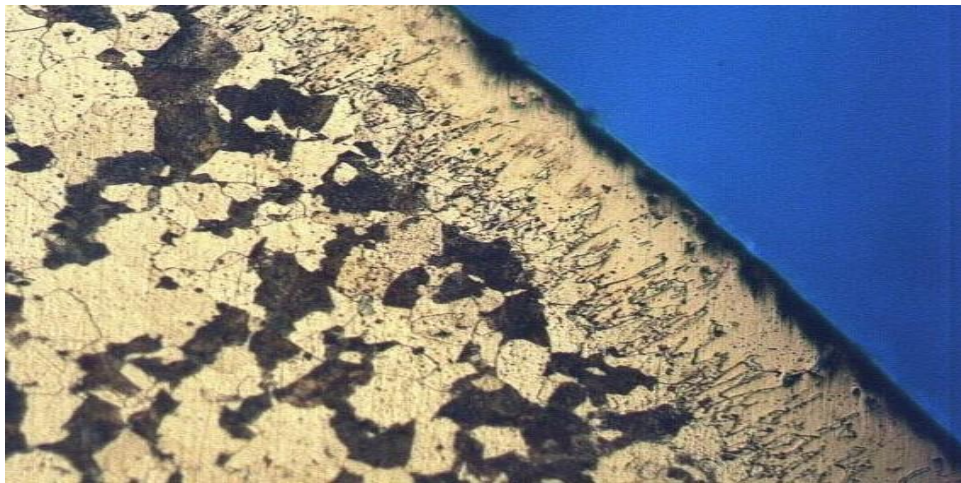
Şekil 6.11. 900 °C'de 2 saat borlanan numunenin 100x metalografik görüntüsü

900 °C'de 2 saat yapılan borlama işlemi; 700 °C'de 4 saat, 8 saat, 12 saat ve 16 saat yapılan borlama işlemlerine göre, metal borür tabaka kalınlığının arttığı ve daha güçlü testere dişi şekli oluştuğu görülmüştür. 900 °C'de 2 saat borlanan numunenin yüzeyinde 39,43 µm metal borür tabaka kalınlığı elde edilmiştir. Geçiş bölgesi ise $138,43 \pm 10,20$ µm olarak ölçülmüştür.

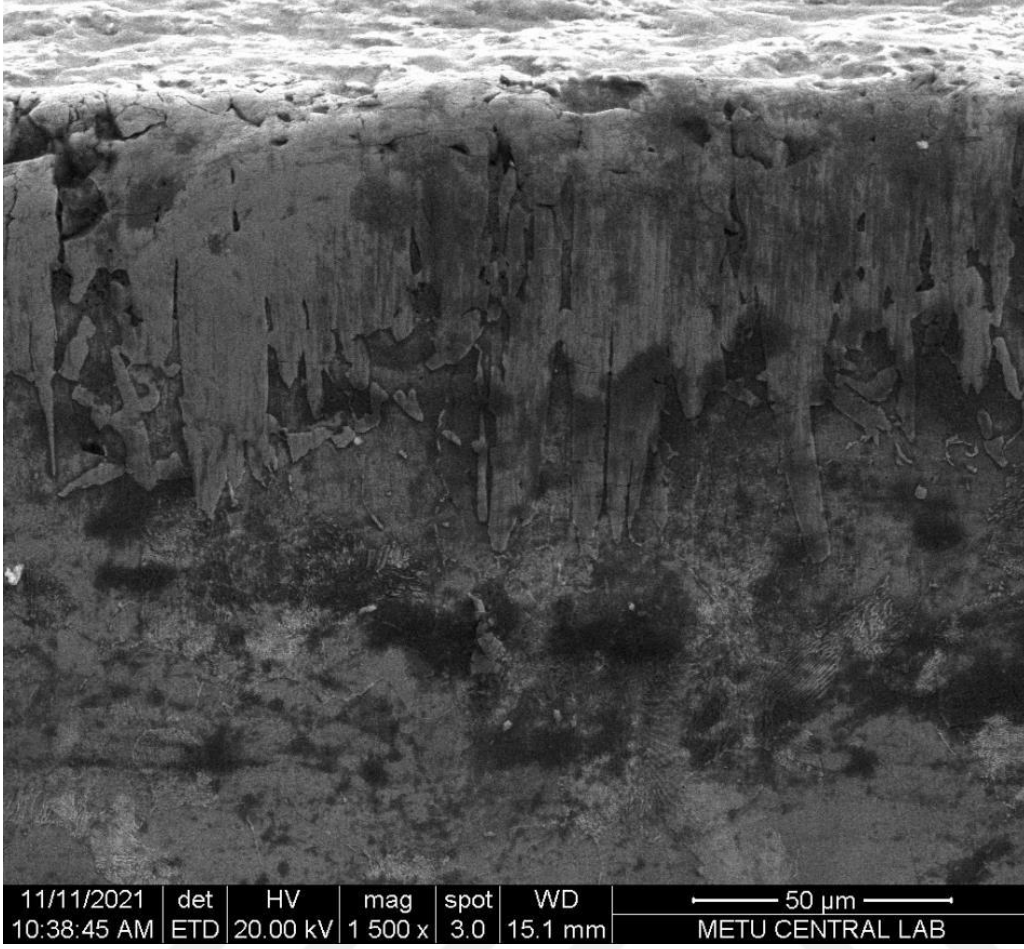


Şekil 6.12. 900 °C’de 2 saat borlanan numunenin SEM görüntüsü

Şekil 6.13.’de 900 °C’de 4 saat borlanan numunenin metalografik görüntüsü ve Şekil 6.14.’te SEM görüntüsü verilmiştir. 900 °C’de 2 saat yapılan borlama işlemine göre, metal borür tabaka kalınlığının arttığı ve daha güçlü testere dişi şekli olduğu görülmüştür. 900 °C’de 4 saat borlanan numune yüzeyinde, ortalama $73,03 \pm 22,22$ µm metal borür tabaka kalınlığı ölçülmüştür.



Şekil 6.13. 900 °C’de 4 saat borlanan numunenin kenarından 100x metalografik görüntüsü

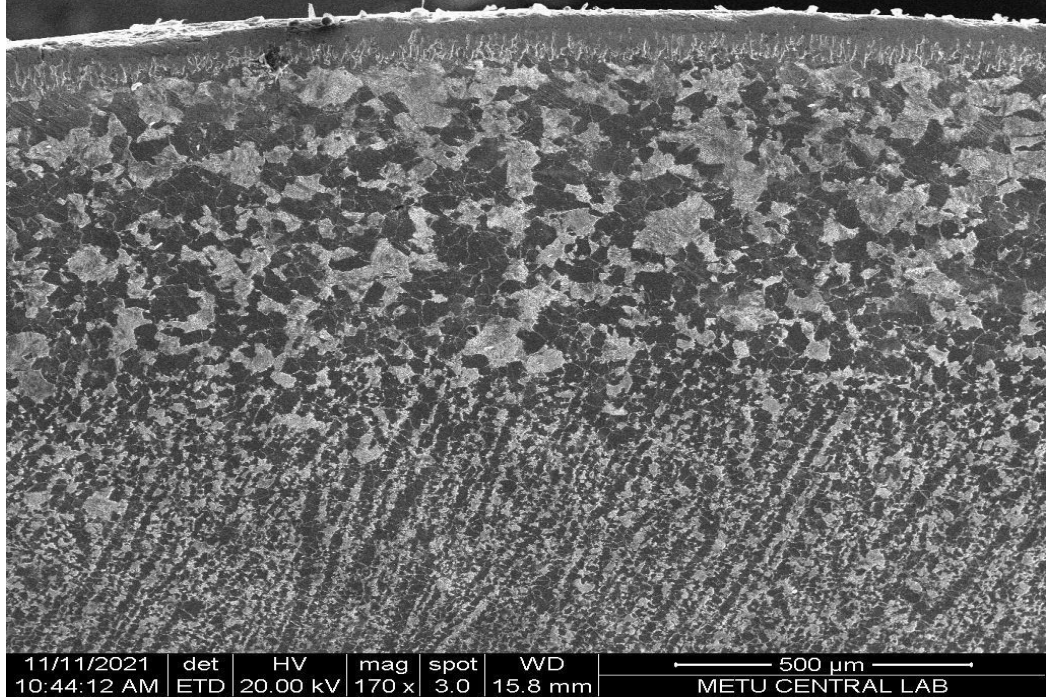


Şekil 6.14. 900 °C’de 4 saat borlanan numunenin SEM görüntüsü

Şekil 6.15’de 900 °C’de 6 saat borlanan numunenin metalografik görüntüsü ve Şekil 6.14.’te SEM görüntüsü verilmiştir. 900 °C’ de 4 saat yapılan borlama işlemine göre, borür tabasının büyüdüğü ve daha güçlü testere dişi şekli olduğu gözlenmiştir. 900 °C’de 6 saat borlanan numune yüzeyinde, $86,07 \pm 20,80 \mu\text{m}$ metal borür tabakası kalınlığı ölçüldü. Geçiş bölgelerindeki tane yapısının büyüdüğü gözlenmiştir.

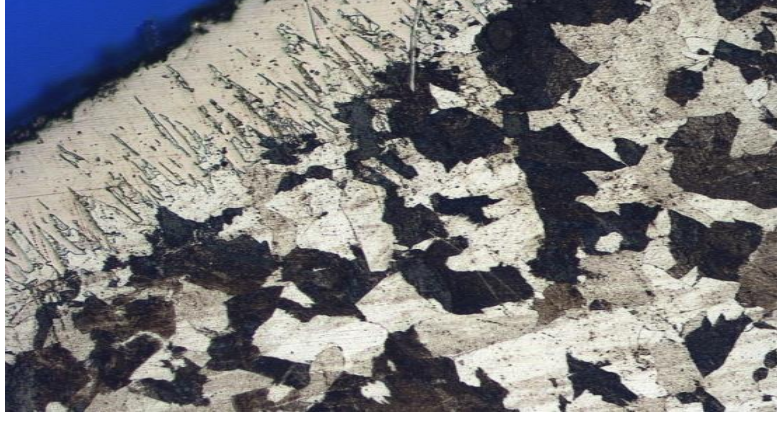


Şekil 6.15. 900 °C’de 6 saat borlanan numunenin 100x metalografik görüntüsü

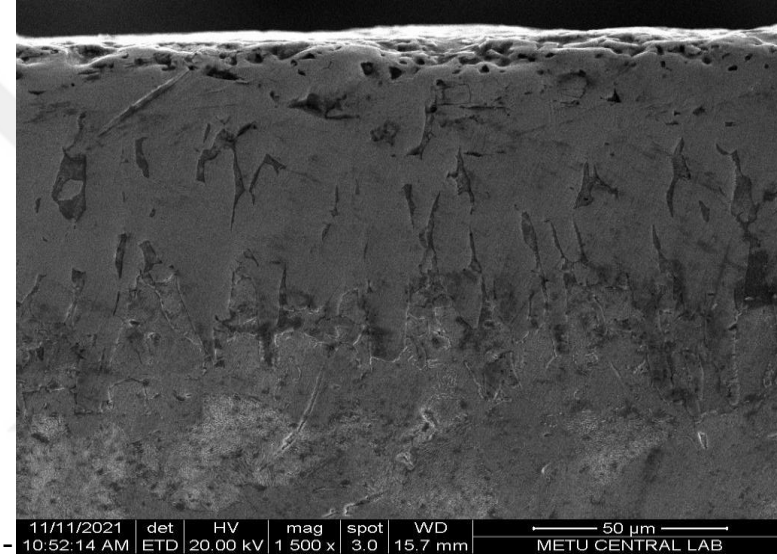


Şekil 6.16. 900 °C’de 6 saat borlanan numunenin SEM görüntüsü

Şekil 6.17.’de 900 °C’de 8 saat borlanan numunenin metalografik görüntüsü ve Şekil 6.18.’de SEM görüntüsü verilmiştir. 900 °C’de 8 saat borlanan numunenin SEM görüntülerinde ise $93,61 \pm 16,60 \mu\text{m}$ metal borür tabaka kalınlığı elde edilmiştir. Metal borür tabakasının güçlü testere dişi şeklinde olduğu gözlenmiştir. Geçiş bölgelerindeki tane yapısının büyüdüğü gözlenmiştir.



Şekil 6.17. 900 °C’de 8 saat borlanan numunenin kenarından 100x metalografik görüntüsü

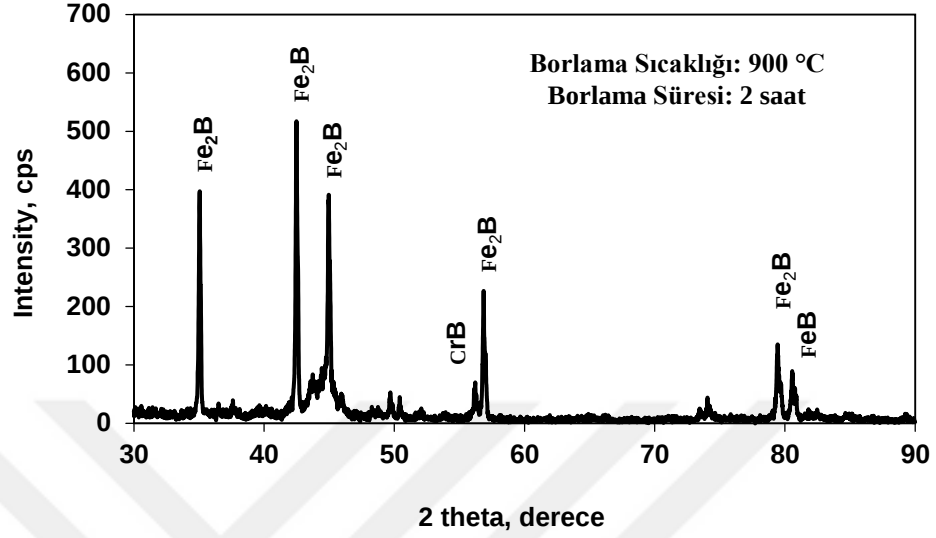


Şekil 6.18. 900 °C’de 8 saat borlanan numunenin SEM görüntüsü

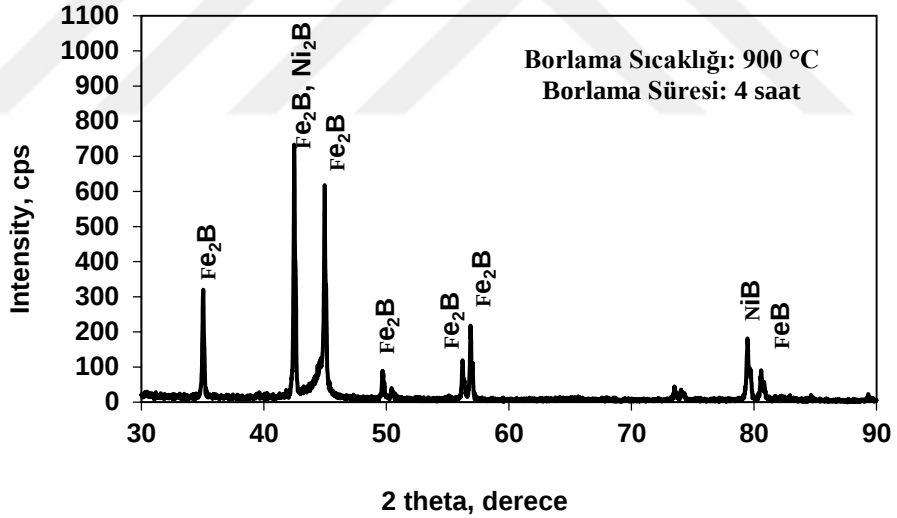
900 °C sıcaklıkta 6 ve 8 borlanmış numunelerin metal borür tabaka kalınlıkları birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Genel olarak, düşük karbonlu çeliklerdeki metal borür tabakası testere dişi bir morfoloji gözlenmektedir [48-50]. Testere dişi şeklinde yapı oluşumu, borür tabakası ve matris arasındaki güçlü mekaniksel bağlanmayı sağlar. Bu yapının oluşum şekli, borlama sıcaklığı ve borlama süresine bağlı olup aynı zamanda çeliğin içerisindeki alaşım elementlerinin miktarında bağlıdır [42,51]. Bunlara ek olarak tane yapısı büyüklüğü ve yapı içerisindeki dislokasyonlar da testere dişi oluşum şeklini etkileyebilir. Dislokasyonlardaki boşluklardan ve tane sınırlarından bor atomları, diğer düzlemlere göre daha hızlı difüzyon olabilir. Bu şekilde bir yaklaşımında, kolonsal veya testere şeklinde bir oluşumun ortaya çıkmasında etkisi olabilir.

6.2.2. XRD Sonuçları

Şekil 6.19.'da 900 °C'de 2 saat yapılan borlama işleminde borür tabakasında; yüzeyden içeri doğru Fe₂B, CrB, FeB, bileşikleri olduğu görüldü.

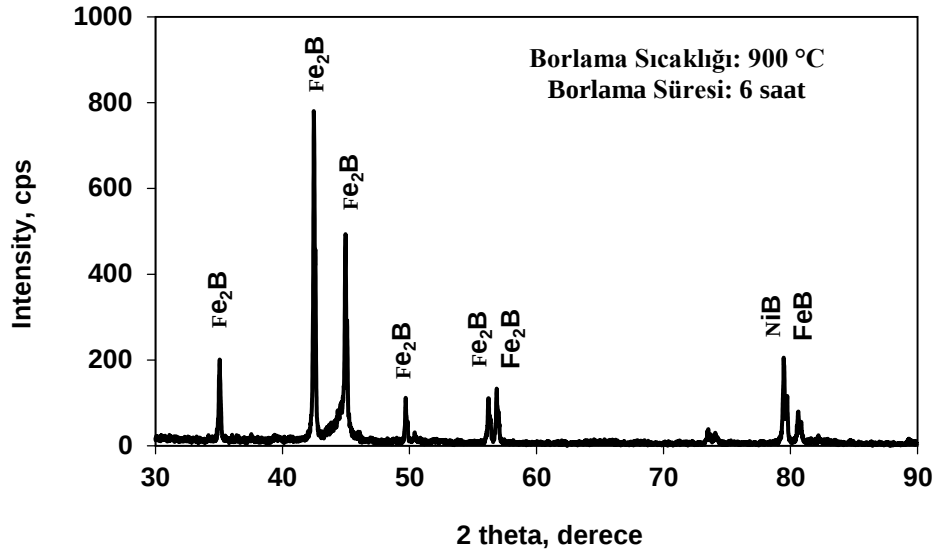


Şekil 6.19. 900 °C'de 2 saat borlanan numunenin XRD analizi

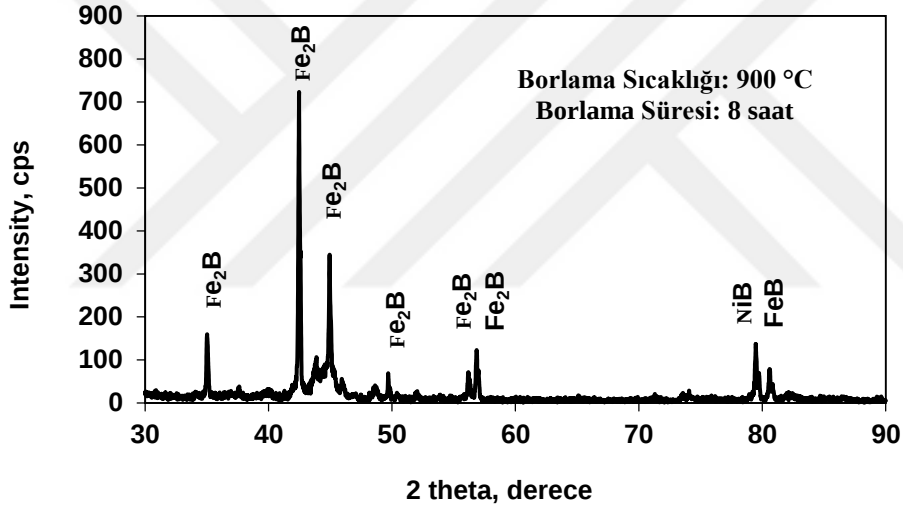


Şekil 6.20. 900 °C'de 4 saat borlanan numunenin XRD analizi

Şekil 6.20.'de 900 °C'de 4 saat yapılan borlama işleminde borür tabakasında; Fe₂B, NiB, FeB bileşikleri görüldü. Şekil 6.21. ve Şekil 6.22.'de 900 °C'de 6 ve 8 saat yapılan borlama işleminlerinde Fe₂B, NiB, FeB bileşikleri görüldü.



Şekil 6.21. 900 °C’de 6 saat borlanan numunenin XRD analizi

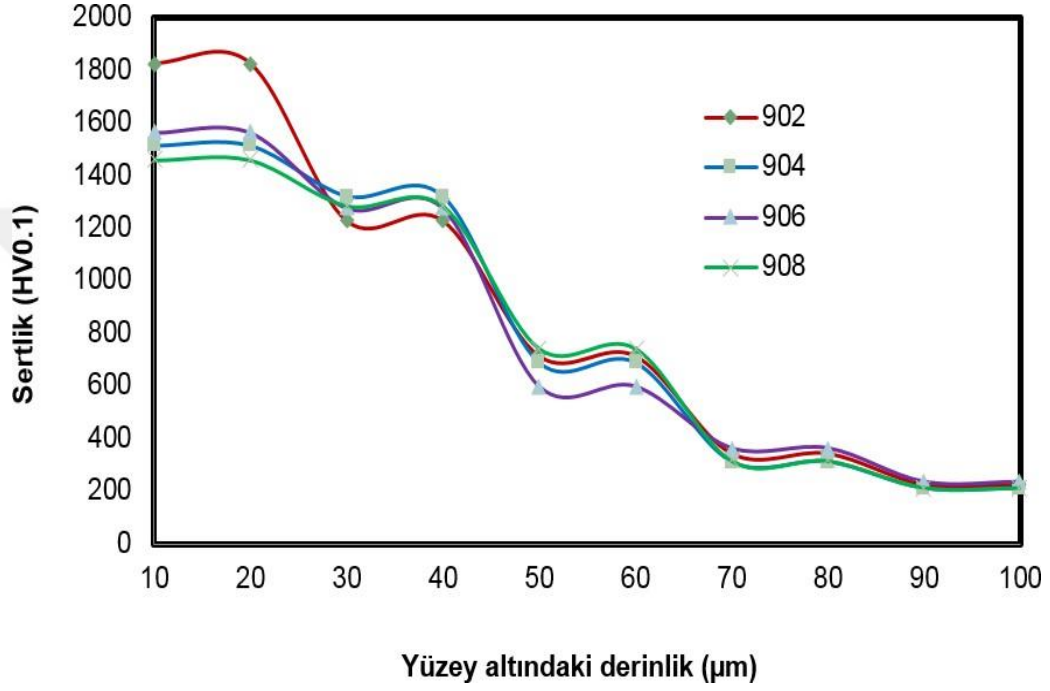


Şekil 6.22. 900 °C’de 8 saat borlanan numunenin XRD analizi

Baybora -1 ajanıyla, 900 °C’de yapılan borlama işlemlerin de borür tabakasında yüzeyden içeri doğru, Fe₂B bileşikler FeB bileşiğine dönüşmeden yapısını koruduğu gözlemlendi. 700 °C’de yapılan borlama işlemlerinde 8 saatten fazla süren borlama işlemlerinde yüzeyde FeB fazı olduğu görüldü. Borlama süresinin sabit sıcaklıkta artmasıyla yüzeydeki Fe₂B fazının FeB fazına dönüştüğü aynı zamanda çeliğin içerisindeki alaşım elementlerine göre borür bileşiği olduğu ve bunun için de sıcaklık kadar sürenin de çok etkili olduğu söylenebilir [27,29,30,37].

6.2.3. Mikrosertlik Değerleri

900 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saat borlama işlemleri sonucunda elde edilen sertlik değerleri Şekil 6.23.’te verilmiştir. Ölçümler her 20 µm aralıklarda vickers sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Ölçümler neticesinde 1827 HV sertlik değerine kadar ulaşıldığı ve belli aralıklarla ölçülen sertlik değerleri, birbirlerine yakın değerler aldığı görülmüştür.



Şekil 6.23. 900 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saat borlanan numunelerin sertlik grafiği

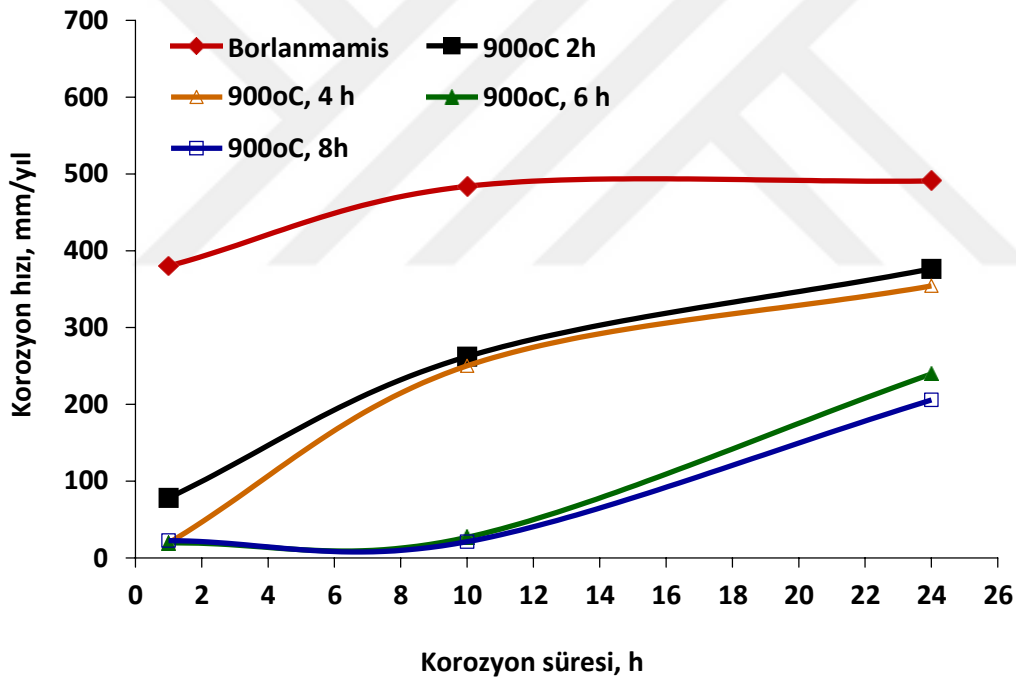
6.2.4. Korozyon Test Sonuçları

AISI 8620 çelik numuneler 900 °C sıcaklıkta ve 2, 4, 6 ve 8 saat borlanmıştır. Borlanmış numunelerin H₂SO₄ sıcak sulu çözeltideki (56 °C) yapılan korozyon koşulları Çizelge 6.4’te verilmiştir.

Çizelge 6.4. 900°C’de borlanan numunelerin korozyon test koşulları

Numune Kodu	Borlama İşlem Süresi Saat	Korozyon Test Sıcaklığı (°C)	Korozyon Test Süresi Saat	Korozyon Test süresi Saat	Korozyon Test Süresi Saat
902	2	56	1	10	24
904	4	56	1	10	24
906	6	56	1	10	24
908	8	56	1	10	24

Şekil 6.24.’te 900 °C’de 2 saat, 4 saat, 6 saat ve 8 saat borlanan numunelerin korozyon test grafiği oluşturulmuştur. 1 saatlik korozyon test sonuçları incelendiğinde, en az malzeme kaybı, 900 °C’de 4 ve 6 saat borlanan numunelerde çıkırsa da, 8 saat borlanan numunede de bu değerlere yakın bir değer çıktığı görüldü.



Şekil 6.24. 900 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saat borlanmış numunelerin korozyon grafiği

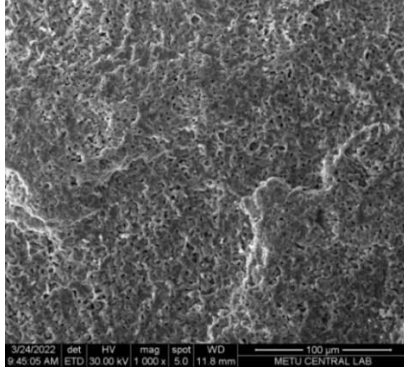
10 saatlik korozyon test sonuçlarına göre en az malzeme kaybı; 900 °C’de 8 saat yapılan borlama işleminde çıktığı gözlemlendi. 24 saatlik yapılan korozyon test sonuçlarına göre en az malzeme kaybı; 900 °C’de 8 saat yapılan borlama işleminde çıktığı gözlemlendi. 900 °C’de borlanan numuneler kendi aralarında mukayese edildiğinde en az malzeme kayıpları, 8 saat borlanan numunelerde olduğu görüldü.

900 °C’de borlanan numunelerin korozyon test sonuçlarıyla, hiç borlama yapılmayan numunelerin korozyon test sonuçları incelendiğinde borlama yapılan numunelerin korozyon direnci daha yüksek çıktığı belirlendi. 900 °C’de borlanan numunelerin, hiç borlama yapılmayan numunelerin 1 saatlik korozyon testi sonuçlarına göre 19 kat, 10 saatlik korozyon testi sonuçlarına göre 23 kat ve 24 saatlik korozyon testi sonuçlarına göre 2,3 kat korozyona karşı dirençli olduğu belirlendi. 24 saatlik korozyon testi sonunda borür tabakasının büyük miktarda korozyona uğradığı, fakat halen bazı bölgelerde borür tabakası olduğu görüldü. 10 saatlik ve 1 saatlik korozyon testi sonuçlarına göre, borür tabakasının yüzeysel miktarlarda korozyona uğradığı, numunelerin ağırlık miktarındaki azalmasıyla ortaya çıktığı gözlemlendi. 900 °C’de 8 saat borlamaya kadar olan numunelerin, artan borür derinliği ile artan korozyon direnci arasında doğru orantı olduğunu söylenebilir.

700 °C, 900 °C ve 950 °C’lerde yapılan borlama işlemlerin sonunda uygulanan korozyon test sonuçlarına göre, en iyi korozyon direnci 900 °C’de 8 saat borlanan numunede çıktığı gözlemlendi. 950 °C’de 8 saat borlanan numunelerin korozyon direnci ile 900 °C’de 8 saat borlanan numunelerin korozyon direnç değerlerinin birbirlerine yakın değerler aldığı görüldü. Bunun sebebi, numunelerin yüzey alanlarındaki küçük farklılıklar olabilir. 900 °C ve 950 °C’lerde yapılan borlama işlemleri 700 °C’lerde yapılan borlama işlemlerine göre, korozyon dayanımları daha yüksek çıktığı gözlemlendi. Genel olarak sonuçlara bakıldığında, AISI 8620 çeliğine östenit bölgesinde 8 saat borlama işlemi yapılmasıyla korozyon dayanımı yüksek çıktığı gözlemlendi. Östenit bölgesinde (900°C, 950°C) Baybora -1 ajanıyla yapılan borlama işlemlerinde, sürenin artırılmasıyla (8 saate kadar) berebar numunede; korozyona dayanıklılık, sertlik artışı, borür tabakası artışı elde edilebileceği gözlemlendi.

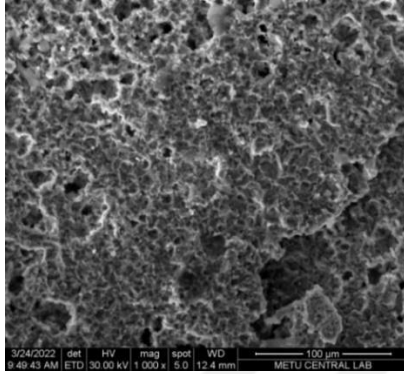
6.2.5. SEM EDS Sonuçları

900 °C’de 2 saat borlama sonucunda, 1, 10 ve 24 saat korozyon süresine maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri Şekil 6.25.’de verilmiştir.



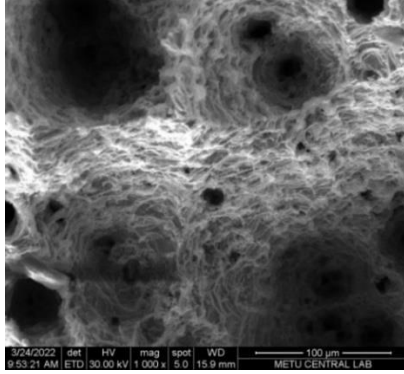
a)

Element	Korozyon süresi, 1 saat
C	-
O	-
Fe	98,70
Cr	0,65
S	-
Ni	0,65



b)

Element	Korozyon süresi, 10 saat
C	13,35
O	11,83
Fe	72,55
Cr	0,83
S	1,05
Ni	0,59



c)

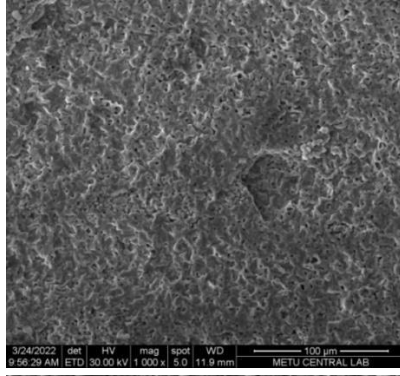
Element	Korozyon süresi, 24 saat
C	20,96
O	14,90
Fe	61,37
Cr	0,95
S	1,43
Ni	0,40

Şekil 6.25. 900 °C’de 2 saat borlama sonunda, a) 1 saat b) 10 saat ve c) 24 saat korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri

Şekil 6.25.’de 900 °C’de ve 2 saat borlama süresinde, 1 saat korozyon süresine maruz kalmış numunenin SEM EDS analizi sonuçları incelendiğinde; %98,70 Fe, %0,65 Cr ve %0,65 Ni içerdiği gözlemlendi. 10 saatlik korozyona maruz kalan numunede %72,55 Fe ve %11,83 oksijen gözlemlendi. 24 saatlik korozyona maruz numunede ise, %61,37 Fe ve %14,90 oksijen içeriği belirlendi. Korozyon süresinin artması sonucu demir oranı azalmış ve oksijen oranı arttığı görüldü.

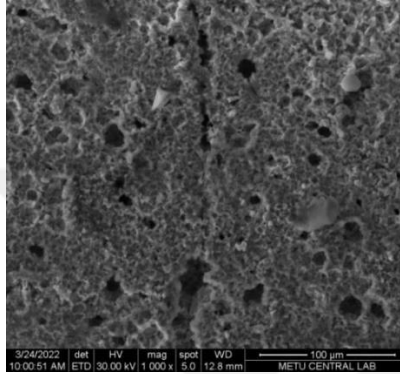
900 °C’de 4 saat borlama sonucunda, 1 saat, 10 saat ve 24 saat korozyona maruz

kalmış numunelerin SEM EDS analizleri Şekil 6.26'da verilmiştir.



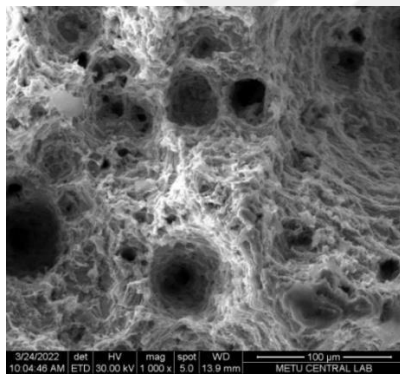
a)

Element	Korozyon süresi, 1 saat
C	8,36
O	3,95
Fe	85,72
Cr	0,68
S	0,58
Ni	0,71



b)

Element	Korozyon süresi, 10 saat
C	11,27
O	10,11
Fe	76,20
Cr	0,73
S	1,07
Ni	0,62



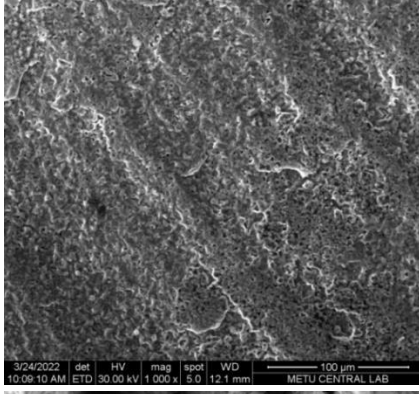
c)

Element	Korozyon süresi, 24 saat
C	13,37
O	18,60
Fe	64,23
Cr	0,88
S	2,09
Ni	0,83

Şekil 6.26. 900 °C'de 4 saat borlama sonunda, a) 1 saat b) 10 saat ve c) 24 saat korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri

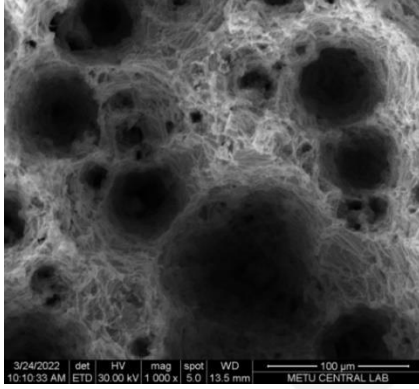
Şekil 6.26'da 900 °C'de 4 saat borlama sonucunda, 1 saatlik korozyona maruz kalmış numunenin SEM EDS analizi sonuçları incelendiğinde %85,78 Fe, %0,68 Cr ve %0,71 Ni içerdiği gözlemlendi. 10 saatlik korozyona maruz kalan numunede, %76,20 Fe ve %10,11 oksijen gözlemlendi. 24 saatlik korozyona maruz kalan numunede, %64,23 Fe ve %18,60 oksijen içerdiği gözlemlendi. Korozyon süresinin artması sonucu demir oranı azalmış ve oksijen oranı arttığı görüldü.

900 °C'de 6 saat borlama sonunda 1 saatlik, 10 saatlik ve 24 saatlik korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri Şekil 6.27'de verilmiştir.



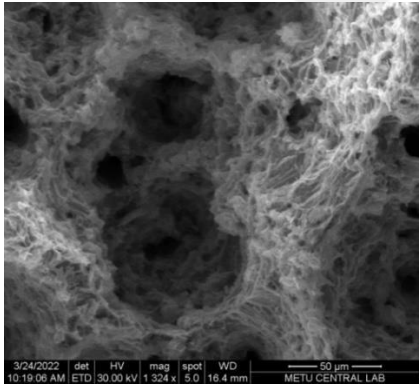
a)

Element	Korozyon süresi, 1 saat
C	14,17
O	4,07
Fe	79,86
Cr	0,68
S	0,40
Ni	0,82



b)

Element	Korozyon süresi, 10 saat
C	7,42
O	15,01
Fe	73,55
Cr	1,19
S	1,75
Ni	1,09



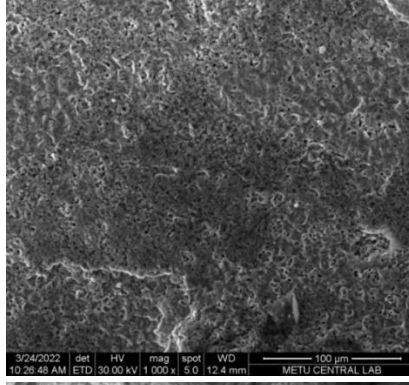
c)

Element	Korozyon süresi, 24 saat
C	25,75
O	17,38
Fe	56,20
Cr	0,00
S	0,68
Ni	0,00

Şekil 6.27. 900 °C’de 6 saat borlama sonunda, a) 1 saat b) 10 saat ve c) 24 saat korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri

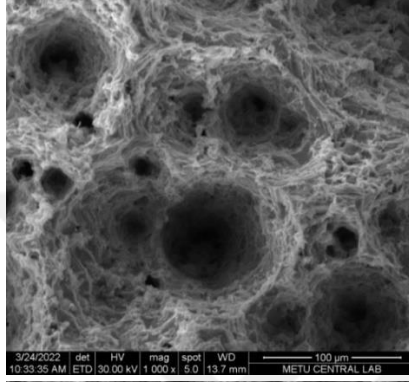
Şekil 6.27’de 900 °C’de 6 saat borlama sonunda 1 saatlik, korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri sonucunda, %79,86 Fe, %0,68 Cr ve %0,82 Ni içerdiği gözlemlendi. 10 saatlik korozyona maruz kalan numunede, %73,55 Fe ve %15,01 oksijen gözlemlendi. 24 saatlik korozyona maruz kalan numunede, %56,20 Fe ve %17,38 oksijen içerdiği gözlemlendi. Korozyon süresinin artması sonucu demir oranı azalmış ve oksijen oranı arttığı görüldü.

900 °C’de 8 saat borlama sonunda 1 saatlik, 10 saatlik ve 24 saatlik korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri Şekil 6.28’de verilmiştir.



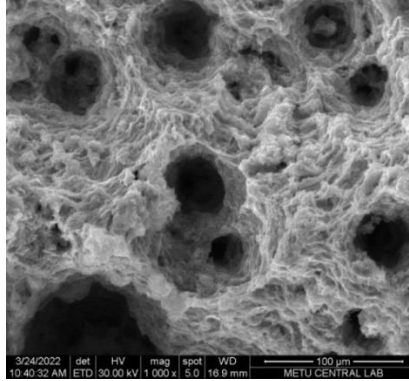
a)

Element	Korozyon süresi, 1 saat
C	18,80
O	4,61
Fe	74,39
Cr	0,70
S	0,89
Ni	0,61



b)

Element	Korozyon süresi, 10 saat
C	12,60
O	13,82
Fe	70,33
Cr	1,19
S	1,37
Ni	0,69



c)

Element	Korozyon süresi, 24 saat
C	12,91
O	28,46
Fe	55,18
Cr	0,55
S	2,90
Ni	0,00

Şekil 6.28. 900 °C’de 8 saat borlama sonunda, a) 1 saat b) 10 saat ve c) 24 saat korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri

Şekil 6.28’de 900 °C’de 8 saat borlama sonunda 1 saatlik, korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri sonucunda, %74,39 Fe, %0,70Cr ve %0,61 Ni içerdiği gözlemlendi. 10 saatlik korozyona maruz kalan numunede %70,33 Fe ve %13,82 oksijen gözlemlendi. 24 saatlik korozyona maruz kalan numunede, %55,18 Fe ve %28,46 oksijen içeriği gözlemlendi. Korozyon süresinin artması sonucu demir oranı azalmış ve oksijen oranı arttığı görüldü.

6.3. 950 °C’de Yapılan Borlama İşlemi Sonuçları

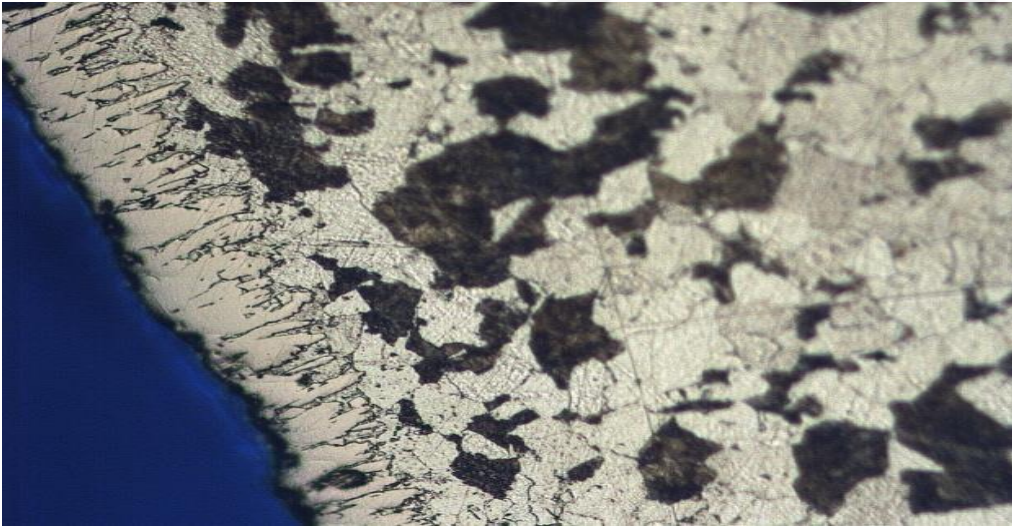
Bu bölümde, sıcaklığın borlama işlemi üzerine etkisini araştırmak için borlama sıcaklığı olarak 950 °C çalışılmıştır. 950 °C’de yapılan borlama işleminin numune kodu ve borlama süreleri Çizelge 6.5’te verilmiştir.

Çizelge 6.5. 8620 çeliğinin 950 °C sıcaklıkta borlama koşulları

Numune Kodu	Borlama Sıcaklığı(°C)	Borlama Süresi
952	950	2saat
954	950	4 saat
956	950	6 saat
958	950	8 saat

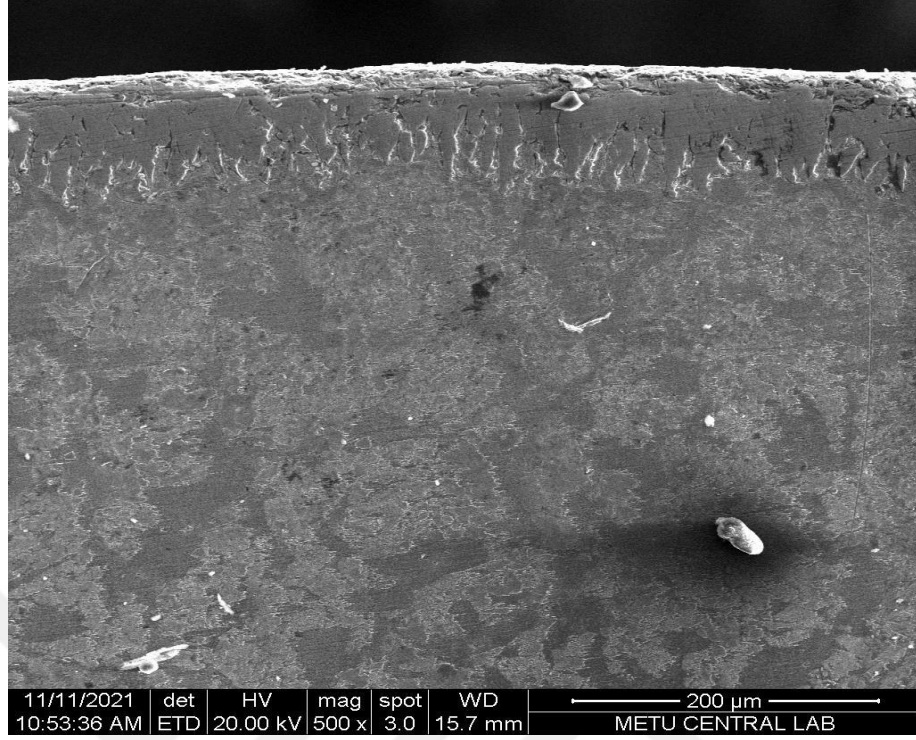
6.3.1. İç Yapı İncelemeleri

Şekil 6.29’da 950 °C’de 2 saat borlanan numunenin, metalografik görüntüsü ve SEM görüntüsü Şekil 6.30’da verilmiştir.



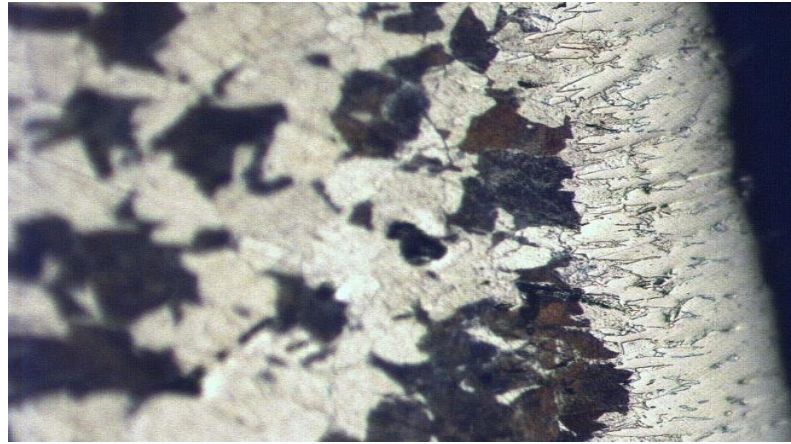
Şekil 6.29. 950 °C’de 2 saat borlanmış numunenin 100x metalografik görüntüsü

SEM görüntüsü incelendiğinde; 900 °C’de 2 saat yapılan borlama işlemine göre metal borür tabakasının kalınlığı arttığı ve daha güçlü testere dişi şekli olduğu görüldü. 950 °C’de 2 saat borlanan numunenin borür tabaka kalınlığı, ortalama $65,02 \pm 15,74 \mu\text{m}$ olarak ölçüldü.

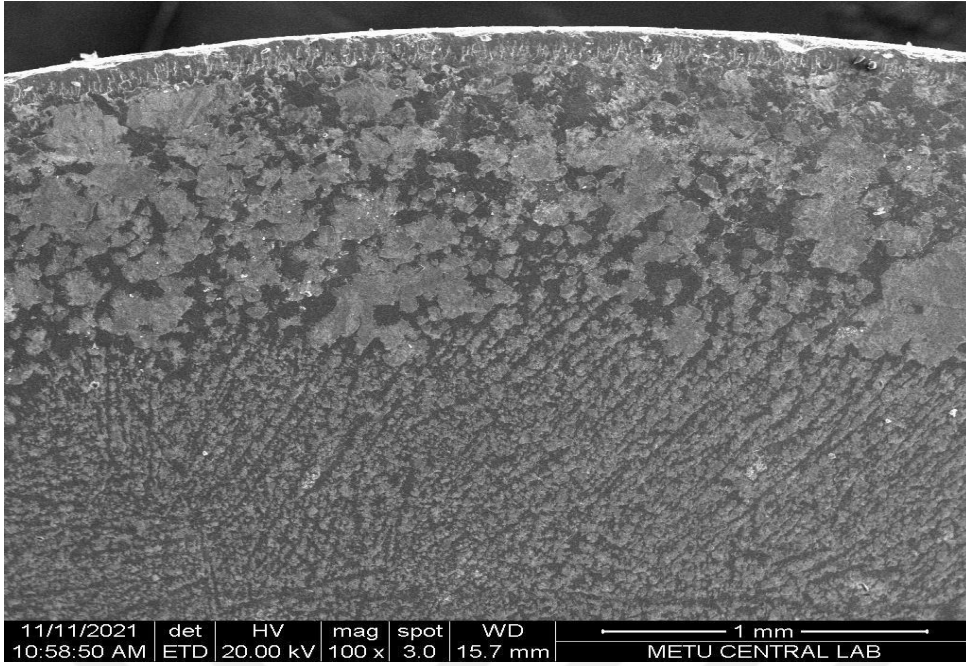


Şekil 6.30. 950 °C’de 2 saat borlanan numunenin SEM görüntüsü

Şekil 6.31’de 950 °C’de 4 saat borlanan numunenin, metalografik görüntüsü ve Şekil 6.32’de SEM görüntüsü incelendiğinde; 950 °C’de 2 saat yapılan borlama işlemine göre metal borür tabakasının kalınlığı arttığı ve daha güçlü testere dişi şekli oluştuğu görüldü. 950 °C’de 4 saat borlanan numunenin borür tabaka kalınlığı, ortalama $180,54 \pm 30,66 \mu\text{m}$ olarak ölçüldü. Geçiş bölgesinde tane yapılarının da büyüdüğü gözlemlendi.

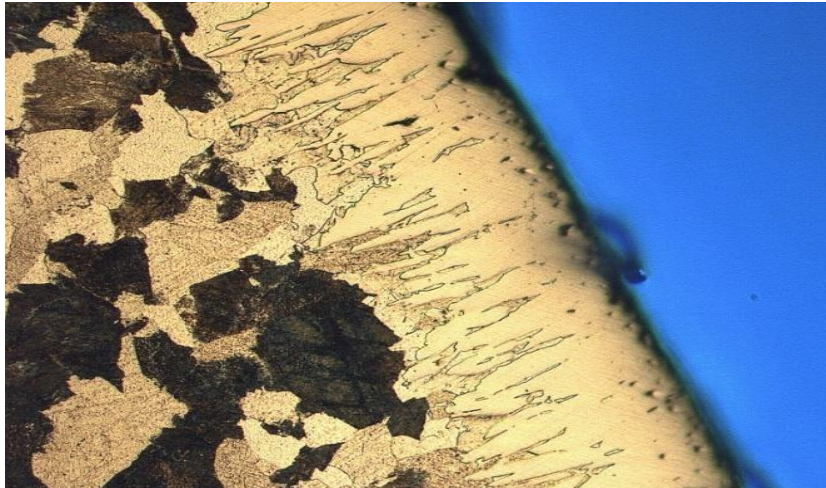


Şekil 6.31. 950 °C’de 4 saat borlanan numunenin kenarından 100x metalografik görüntüsü

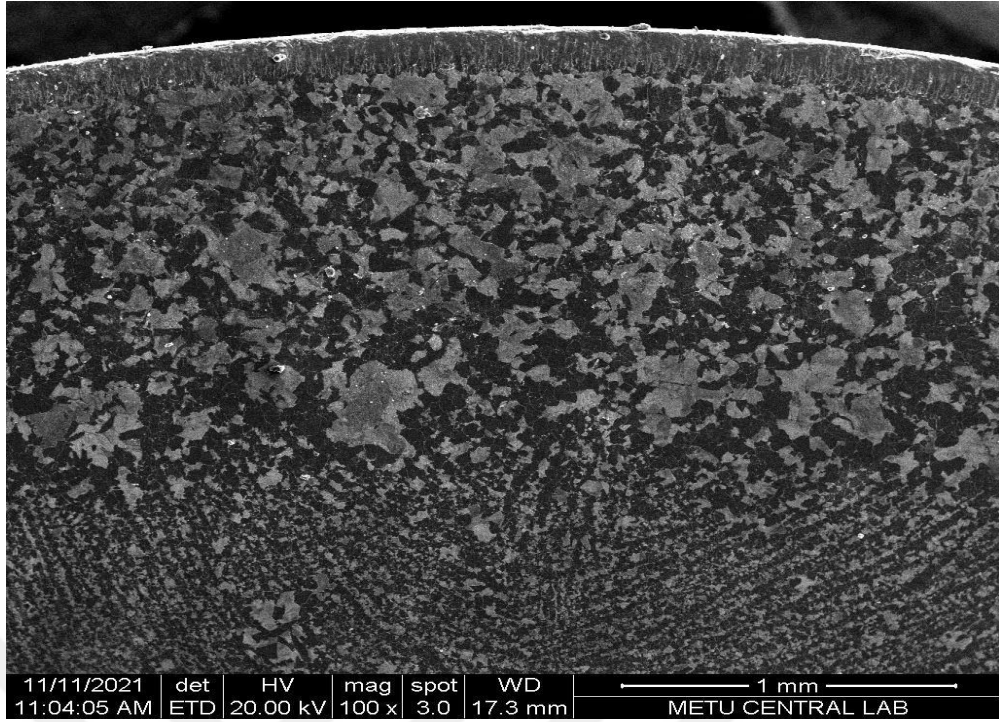


Şekil 6.32. 950 °C’ de 4 saat borlanan numunenin SEM görüntüsü

Şekil 6.33’de 950 °C’de 6 saat borlanan numunenin, metalografik görüntüsü ve Şekil 6.34’te SEM görüntüsü incelendiğinde; 950 °C’de 4 saat ve 900 °C’de 6 saat yapılan borlama işlemlerine göre, metal borür tabakasının kalınlığı arttığı ve daha güçlü testere dişi şekli oluştuğu görüldü. 950 °C’de 6 saat borlanan numunenin borür tabaka kalınlığı, ortalama $140,50 \pm 16,43$ µm olarak ölçüldü. Geçiş bölgesinde tane yapılarının da büyüdüğü gözlemlendi.

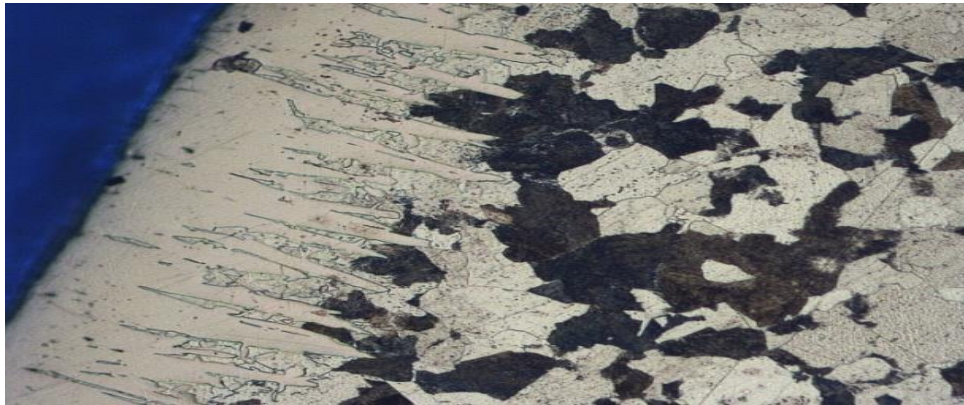


Şekil 6.33. 950 °C’de 6 saat borlanan numunenin kenarından 100x metalografik görüntüsü

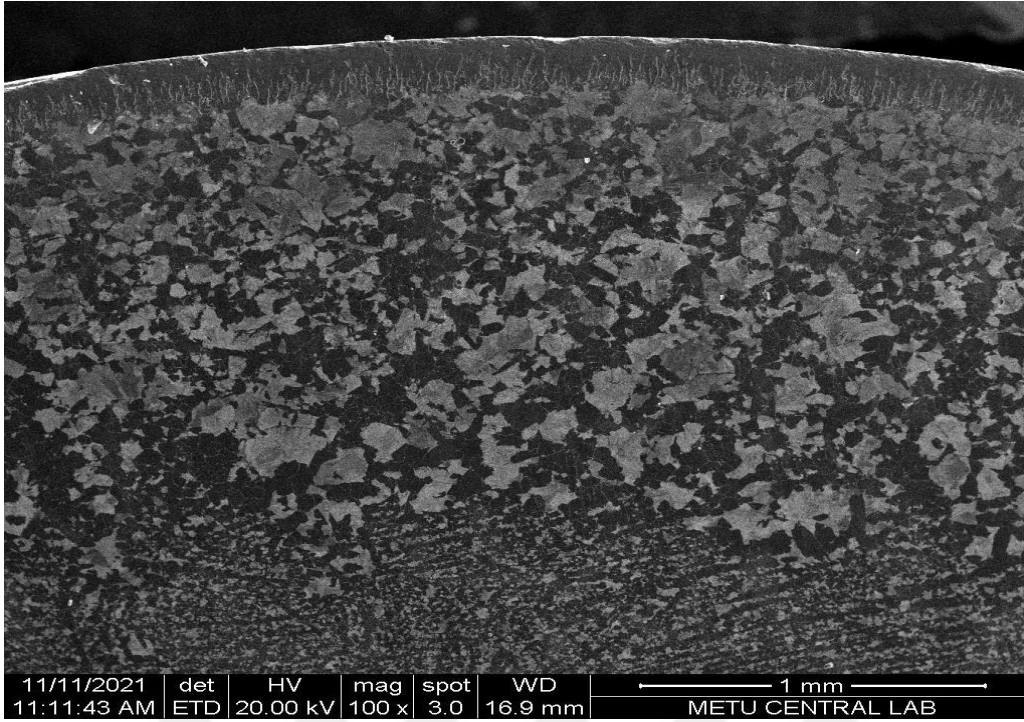


Şekil 6.34. 950 °C’de 6 saat borlanan numunenin SEM görüntüsü

Şekil 6.35’te 950 °C’de 8 saat borlanan numunenin, metalografik görüntüsü ve Şekil 6.36’da SEM görüntüsü incelendiğinde; 950 °C’de 6 saat ve 900 °C’de 8 saat yapılan borlama işlemlerine göre, metal borür tabakasının kalınlığı arttığı ve daha güçlü testere dişi şekli olduğu görüldü. 950 °C’de 8 saat borlanan numunenin borür tabaka kalınlığı, ortalama $178,10 \pm 16,43 \mu\text{m}$ olarak ölçüldü. Geçiş bölgesinde tane yapılarının da büyüdüğü gözlemlendi.



Şekil 6.35. 950 °C’de 8 saat borlanan numunenin 100x metalografik görüntüsü



Şekil 6.36. 950 °C’de 8 saat borlanan numunenin SEM görüntüsü

950 °C’de 8 saatten fazla sürelerde borlama işlemine devam ediliyor olsa idi, büyüyen tane yapısından dolayı borür tabakası ilerlemesi zorlaşacağı için sıcaklığında etkisiyle borür tabakasında gözenekli bir yapı meydana gelebilirdi. Artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak daha fazla borür derinliği elde edebilmek için borlama işlemi öncesi dekarbürizasyon işlemi yapılabilir.

Uluköy vd. [37] yaptığı çalışmada AISI 8620 çeliğinden imal edilmiş dişlilere; karbürleme, dekarbürleme ve borlama işlemleri uygulayarak, çelikteki mikroyapı ve sertlik değişikliklerini incelemişlerdir. İnceleme sonucunda dekarbürizasyon uygulanan dişlilerin En yüksek sertlik değerine ulaştığını belirlemişlerdir.

Karbon ve diğer alaşım elementlerinin, tane büyümesine etkisi olabileceği için dekarbürizasyon yöntemi ile yüzeydeki karbon yakılarak sonrasında uygulanacak borlama işlemiyle karbon ve diğer elementlerin oluşturabileceği tane büyümesi sebebiyle zorlaşan, borür tabakasının ilerlemesi daha kolay hale getirilebilir. Böylece daha derin bir borür tabakası elde etmek mümkün olabilir. Fakat dekarbürizasyon yöntemi sonrası malzeme kaybı ve yüzeyde tufal gibi oluşumlar olabileceği için malzemenin gerekli ölçülerden biraz fazla ve yüzeyinin çok iyi temizlenmesi gerekecektir.

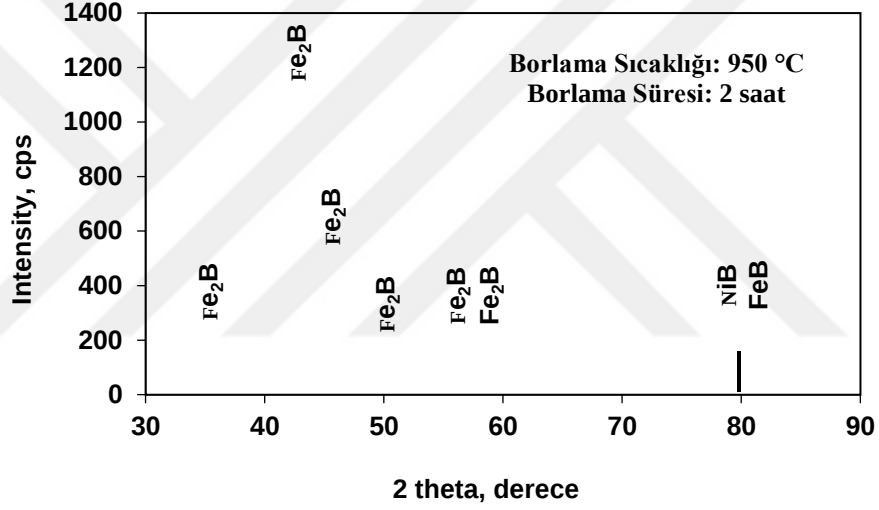
Metalografik ve SEM görüntüleri genel olarak incelendiğinde; En az borür

tabakasının 700 °C’de 4 saat borlamayla 6,92 µm ölçüldü. En fazla borür tabaka kalınlığı ise 950 °C’de 8 saat borlamayla 210,98 µm olarak ölçüldü. Artan sıcaklık ve süreyle doğru orantılı olarak; borür tabakasında artış, güçlü testere dişi şekli ve geçiş bölgesinde büyüyen tane yapıları olduğu görüldü.

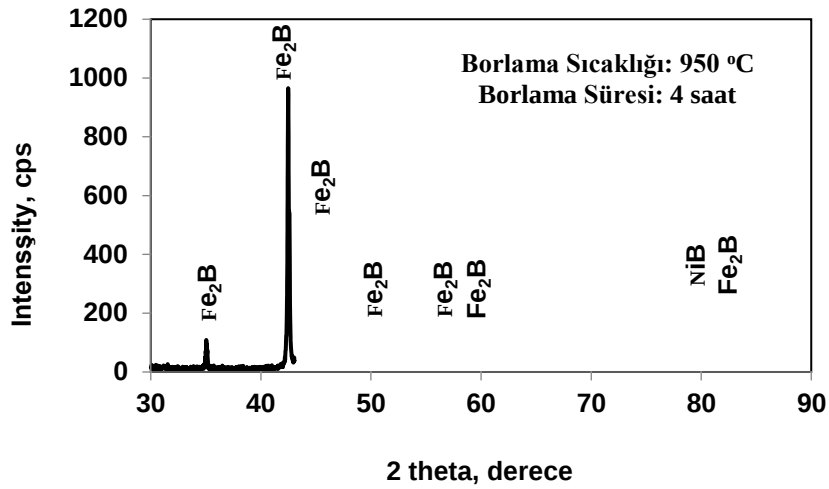
Bayça vd. [52] AISI 1010 çeliğini 950°C sıcaklıkta 2, 4 ve 6 saat sürelerde borlamışlardır. Borlanmış numune yüzeyindeki demir borür tabakasının kalınlığı sırasıyla 45±12 µm, 126±15 µm ve 155±13 µm olarak ölçülmüşlerdir.

6.3.2. XRD Sonuçları

Şekil 6.37 ve Şekil 6.38’de 950 °C’de 2 saat ve 4 saat borlanan numunenin borür tabakasında yüzeyden içeri doğru, Fe₂B, NiB, bileşikleri olduğu görüldü.

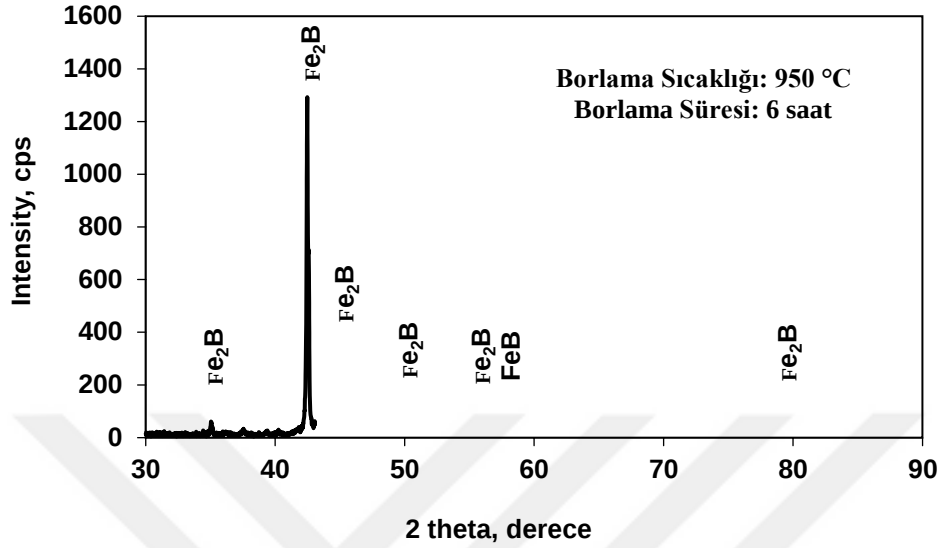


Şekil 6.37. 950 °C’de 2 saat borlanan numunenin XRD analizi

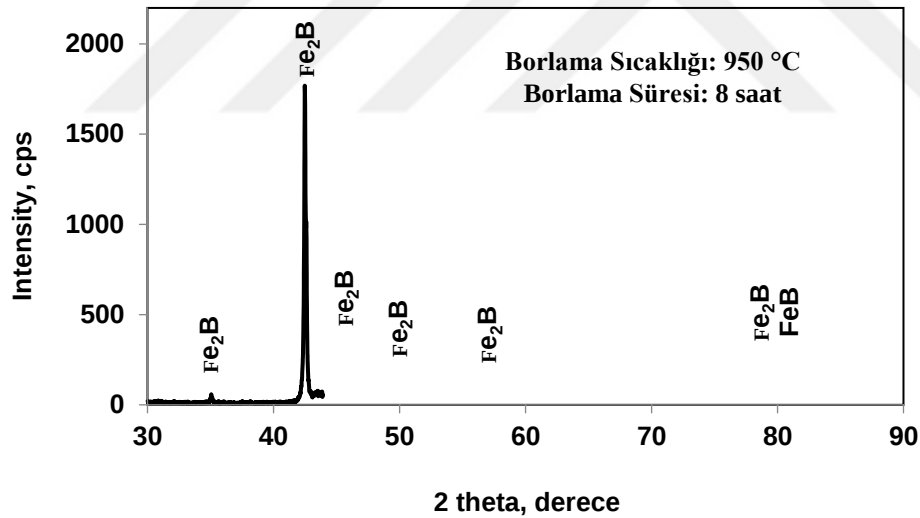


Şekil 6.38. 950 °C’de 4 saat borlanan numunenin XRD analizi

Şekil 6.39'da 950 °C'de 6 saat yapılan borlama işleminde yüzeyden içeri doğru, sadece Fe₂B bileşiği olduğu görüldü. Şekil 6.40'ta 950 °C'de 8 saat yapılan borlama işleminde yüzeyden içeri doğru Fe₂B, FeB bileşikler görüldü.



Şekil 6.39. 950 °C'de 6 saat borlanan numunenin XRD analizi



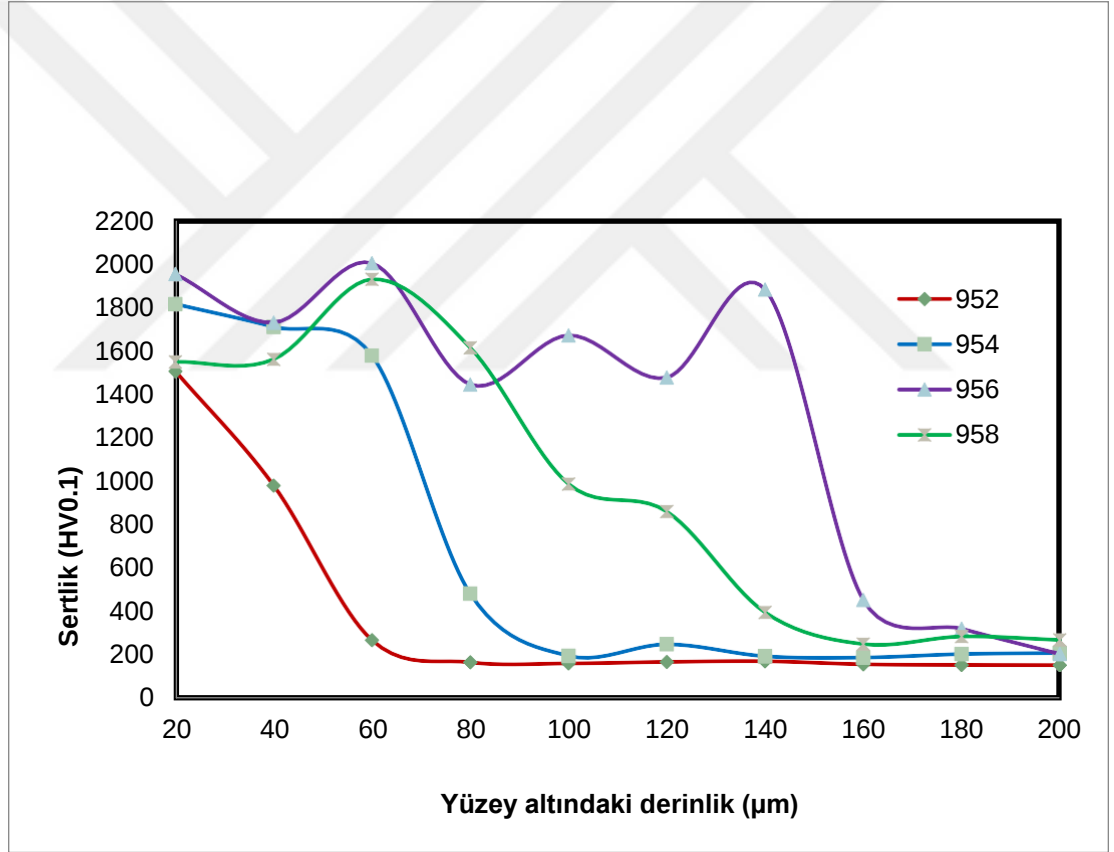
Şekil 6.40. 950 °C'de 8 saat borlanan numunenin XRD analizi

950 °C'de yapılan borlama işlemlerinde sadece 6 saat yapılan borlama işleminde Fe₂B bileşiği oluşumu görülmüş olmasıyla birlikte; 2, 4 ve 6 saat yapılan borlama işlemlerinde de Fe₂B bileşiği oluşumuna benzer özelliklerde olduğu, yapılan XRD analiziyle tespit edildi. Benzer durumların 900 °C'de 2,4,6 ve 8 sürelerde de borlama işlemlerinde olduğu gözlemlendi. Genel olarak 700 °C, 900 °C ve 950 °C'lerde Baybora-1 ajanı kullanılarak yapılan borlama işlemlerinde yüzeyde Fe₂B bileşiği oluşumu,

sadece 700°C 16 saat borlanan numunede olduğu gözlemlendi. 700 °C’de 12 saat borlanan numunede ise FeB fazının yeni oluşmaya başladığı görüldü. Bu sonuçlara göre artan sürenin, yüzeydeki Fe₂B fazının FeB fazına dönüşümünde etkili olduğu düşünülebilir.

6.3.3. Mikrosertlik Değerleri

950 °C’de 2,4,6,8 saat borlama işlemleri sonucunda elde edilen sertlik değerleri Şekil 6.41’de verilmiştir. Ölçümler her 20 µm aralıklarda vickers sertlik ölçüm cihazında yapıldı. Ölçümler neticesinde 2004 HV sertlik değerine kadar ulaşıldığı ve belli mesafelerdeki ölçümlerde en yüksek sertlik değerleri 950 °C’de 6 saat borlanan numunede ölçüldü.



Şekil 6.41. 950 °C’de 2, 4, 6 ve 8 saat borlanan numunelerin sertlik grafiği

Borlamayla östenit bölgesinde artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak, elde edilen sertliklerin ve sertlik derinliklerinin belli bir noktaya kadar doğru orantılı olduğu söylenebilir.

6.3.4. Korozyon Test Sonuçları

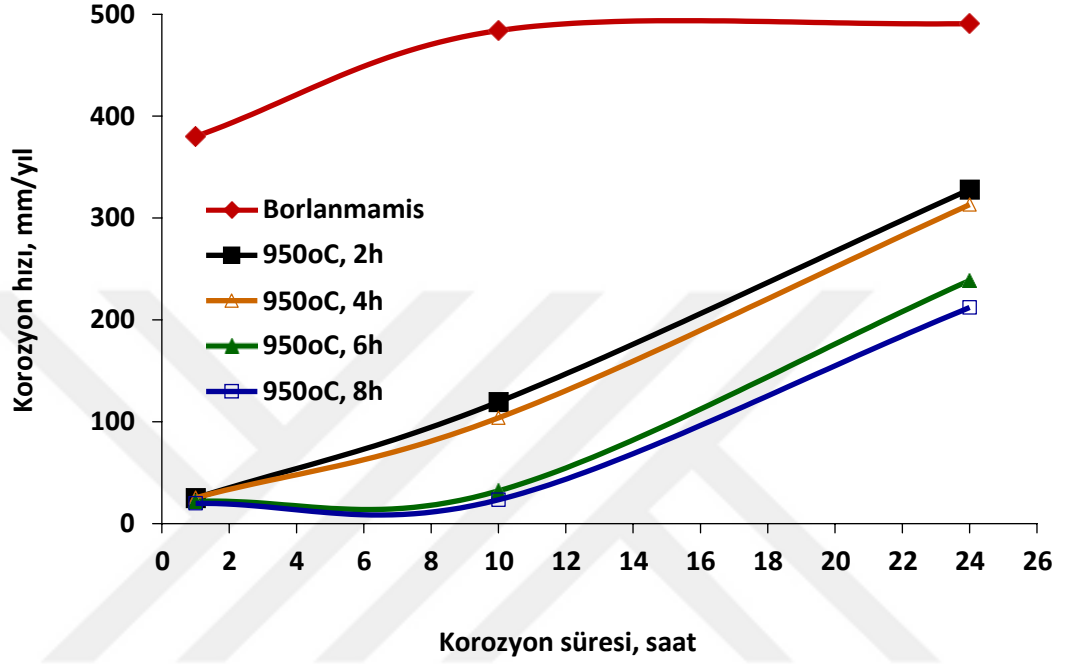
AISI 8620 çelik numuneler 950 °C sıcaklıkta ve 2, 4, 6 ve 8 saat borlanmıştır. Borlanmış numunelerin H₂SO₄ sıcak sulu çözeltideki (56 °C) yapılan korozyon koşulları Çizelge 6.6 da verilmiştir.

Çizelge 6.6. 950 °C’de borlanan numunelerin korozyon test koşulları

Numune Kodu	Borlama İşlem Süresi Saat	Korozyon Test Sıcaklığı (°C)	Korozyon Test Süresi Saat	Korozyon Test Süresi Saat	Korozyon Test Süresi Saat
952	2	56	1	10	24
954	4	56	1	10	24
956	6	56	1	10	24
958	8	56	1	10	24

Şekil 6.42’de 950 °C’de 2 saat, 4 saat, 6 saat ve 8 saat borlanan numunelere yapılan korozyon test grafiği verilmektedir. Grafikteki sonuçlara göre; 1 saatlik korozyon test sonuçlarına göre en az malzeme kaybı, 950 °C’de 8 saat borlanan numunede çıksada, 6 saatlik borlanan numunenin de bu değere yakın bir sonuç aldığı görüldü. 10 saatlik yapılan korozyon test sonuçlarına göre az malzeme kaybı, 950 °C’de 8 saat yapılan borlama işleminde çıktığı gözlemlendi. 24 saatlik yapılan korozyon test sonuçlarına göre de az malzeme kaybı, 950 °C’de 8 saat yapılan borlama işleminde çıktığı gözlemlendi. 950 °C’de borlanan numuneler kendi aralarında mukayese edildiğinde çıkan sonuçlarına göre, en az malzeme kayıpları 8 saat borlanan numunede olduğu görüldü. 950 °C’de borlanan numunelerin korozyon testi sonuçlarıyla, hiç borlama yapılmayan numunelerine yapılan test sonuçları mukayese edildi. 950 °C’de borlanan numunelerin, hiç borlama yapılmayan numunelerin 1 saatlik korozyon testi sonuçlarına göre 19 kat, 10 saatlik korozyon testi uygulanan numunelere göre 20 kat ve 24 saatlik korozyon testi uygulanan numuneler ise 2,3 kat korozyona karşı dirençli olduğu belirlendi. 24 saatlik korozyon testi sonunda borür tabakasının büyük miktarda korozyona uğradığı, fakat halen bazı bölgelerde borür tabakası olduğu görüldü. 10 saatlik ve 1 saatlik korozyon testi sonuçlarına göre, borür tabakasının

yüzeysel miktarlarda korozyona uğradığı, numunelerin ağırlık miktarındaki azalmasıyla ortaya çıktığı gözlemlendi. 950 °C’de 8 saat borlamaya kadar olan numunelerin, artan borür derinliği ile artan korozyon direnci arasında doğru orantı olduğunu söylenebilir.

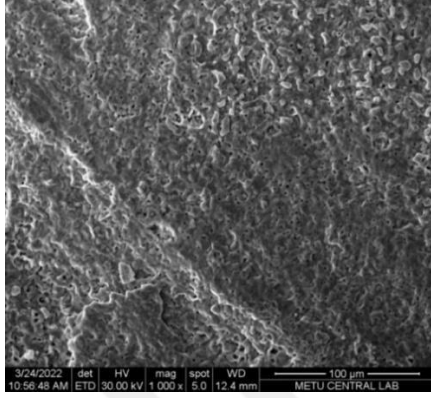


Şekil 6.42. 950 °C’ de 2, 4, 6 ve 8 saat borlanmış numunelerin korozyon grafiği

Bayça vd. [53] AISI 5140 çeliğini Baybora-1 borlama ajanı ile borlamışlardır. AISI 5140 çeliğinin korozyon direnci, 950°C’de 6 saat uygulanan borlama işlemi ile önemli ölçüde arttığını rapor etmişlerdir.

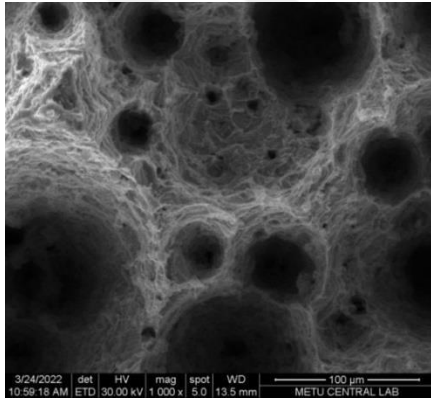
6.3.5. SEM EDS Sonuçları

950 °C’de 2 saat borlama sonunda 1 saatlik, 10 saatlik ve 24 saatlik korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri Şekil 6.43’de verilmiştir.



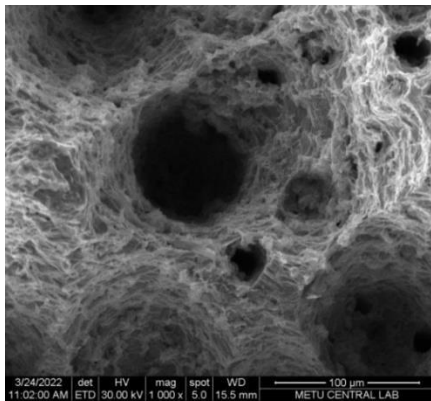
a)

Element	Korozyon süresi, 1 saat
C	3,17
O	4,25
Fe	90,88
Cr	0,74
S	0,60
Ni	0,36



b)

Element	Korozyon süresi, 10 saat
C	9,34
O	15,40
Fe	72,73
Cr	0,63
S	1,90
Ni	0,00



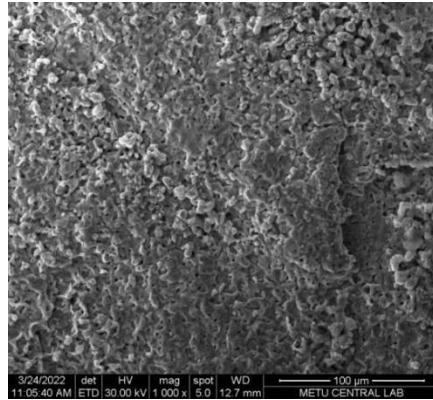
c)

Element	Korozyon süresi, 24 saat
C	15,46
O	21,77
Fe	60,07
Cr	0,57
S	2,12
Ni	0,00

Şekil 6.43. 950 °C’de 2 saatlik borlama sonunda, a) 1 saat b) 10 saat ve c) 24 saat korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri

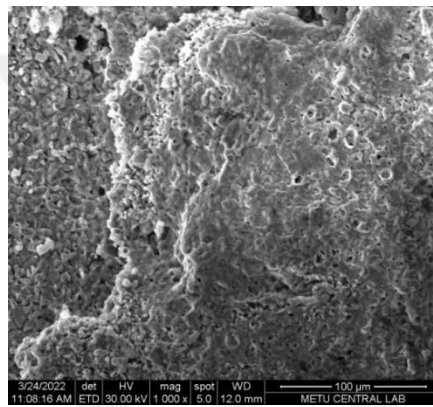
950 °C’de 2 saat borlama sonunda 1 saatlik, korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri sonucunda, %90,88 Fe ve %0,74 Cr içerdiği gözlemlendi. 10 saatlik korozyona maruz kalan numunede %72,73 Fe ve %15,40 oksijen gözlemlendi. 24 saatlik korozyona maruz kalan numunede, %60,07 Fe ve %21,77 oksijen içeriği belirlendi. Korozyon süresinin artması sonucu demir oranı azalmış ve oksijen oranı artmıştır.

950 °C’de 4 saat borlama sonunda; 1 saatlik, 10 saatlik ve 24 saatlik korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri Şekil 6.44’de verilmiştir.



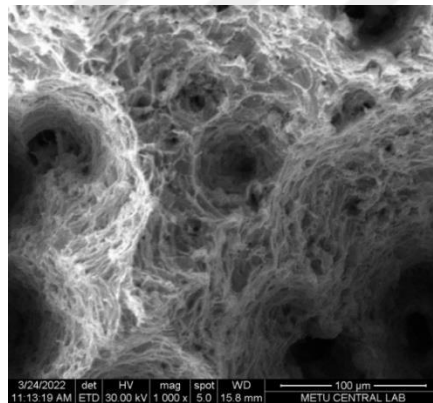
a)

Element	Korozyon süresi, 1 saat
C	4,27
O	8,64
Fe	83,34
Cr	0,75
S	2,02
Ni	0,98



b)

Element	Korozyon süresi, 10 saat
C	5,26
O	11,43
Fe	79,63
Cr	0,57
S	2,18
Ni	0,93



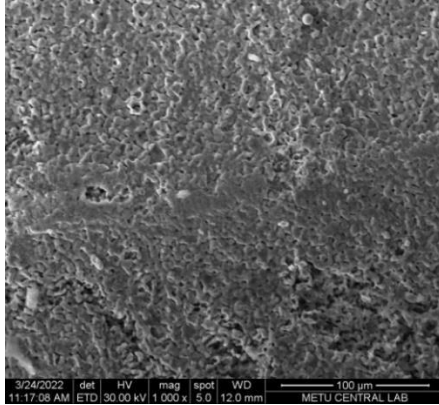
c)

Element	Korozyon süresi, 24 saat
C	20,82
O	16,59
Fe	59,84
Cr	0,80
S	1,34
Ni	0,61

Şekil 6.44. 950 °C’de 4 saatlik borlama sonunda, a) 1 saat b) 10 saat ve c) 24 saat korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri

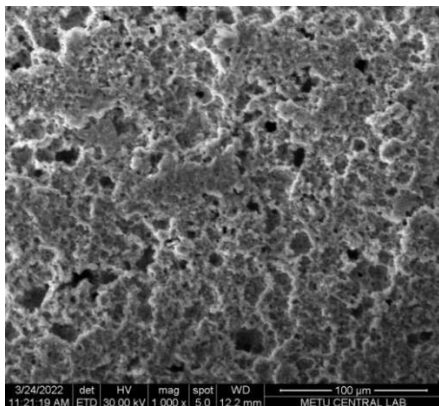
950 °C’de 4 saat borlama sonunda 1 saatlik, korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri sonucunda; %83,34 Fe, %0,75 Cr ve %0,98 Ni içerdiği gözlemlendi. 10 saatlik korozyona maruz kalan numunede, %79,63 Fe ve %11,43 oksijen gözlemlendi. 24 saatlik korozyona maruz kalan numunede, %59,84 Fe ve %16,59 oksijen içeriği belirlendi. Korozyon süresinin artması sonucu demir oranı azalmış ve oksijen oranı artmıştır.

950 °C’de 6 saat borlama sonunda; 1 saatlik, 10 saatlik ve 24 saatlik korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri Şekil 6.45’ te verilmiştir.



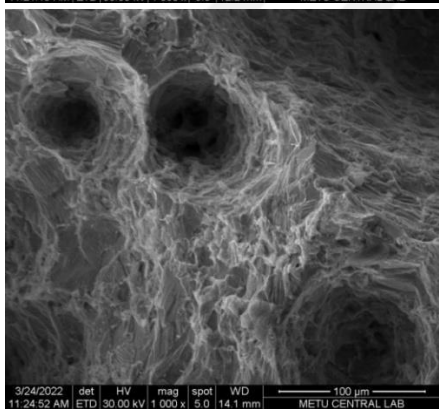
a)

Element	Korozyon süresi, 1 saat
C	9,16
O	3,57
Fe	82,76
Cr	0,81
S	0,59
Ni	0,78



b)

Element	Korozyon süresi, 10 saat
C	10,07
O	11,95
Fe	74,58
Cr	0,58
S	1,70
Ni	0,22



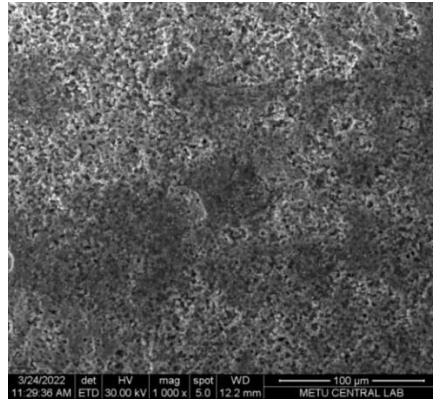
c)

Element	Korozyon süresi, 24 saat
C	14,13
O	10,20
Fe	71,72
Cr	1,03
S	0,87
Ni	0,76

Şekil 6.45. 950 °C’de 6 saatlik borlama sonunda, a) 1 saat b) 10 saat ve c) 24 saat korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri

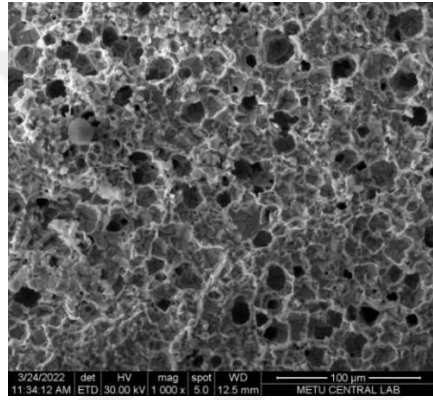
950 °C’de 6 saat borlama sonunda 1 saatlik, korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri sonucunda; %82,76 Fe, %0,81 Cr ve %0,78 Ni içerdiği gözlemlendi. 10 saatlik korozyona maruz kalan numunede, %74,58 Fe ve %11,95 oksijen gözlemlendi. 24 saatlik korozyona maruz kalan numunede, %71,72 Fe ve %10,20 oksijen içeriği belirlendi. Korozyon süresinin artması sonucu demir oranı azalmış ve oksijen oranı artmıştır.

950 °C sıcaklık ve 8 saat borlama süresinde, 1, 10 ve 24 saat korozyon süresine maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri Şekil 6.46’da verilmiştir.



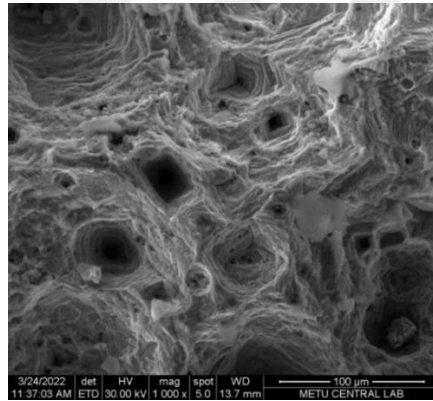
a)

Element	Korozyon süresi, 1 saat
C	22,35
O	3,65
Fe	71,61
Cr	0,76
S	0,29
Ni	0,84



b)

Element	Korozyon süresi, 10 saat
C	10,44
O	9,54
Fe	77,48
Cr	0,75
S	0,66
Ni	0,71



c)

Element	Korozyon süresi, 24 saat
C	18,33
O	14,83
Fe	62,63
Cr	0,72
S	1,95
Ni	0,36

Şekil 6.46. 950 °C’de 8 saat borlama süresinde, a) 1 saat, b) 10 saat ve c) 24 saat korozyon süresine maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri

950 °C’de 6 saat borlama sonunda 1 saatlik, korozyona maruz kalmış numunelerin SEM EDS analizleri sonucunda; %71,61 Fe, %0,76 Cr ve %0,84 Ni içerdiği gözlemlendi. 10 saatlik korozyona maruz kalan numunede, %77,48 Fe ve %9,54 oksijen gözlemlendi. 24 saatlik korozyona maruz kalan numunede, %62,63 Fe ve %14,83 oksijen içeriği belirlendi. Korozyon süresinin artması sonucu demir oranı azalmış ve oksijen oranı artmıştır.

7. BORLAMA İŞLEMİNİN KİNETİĞİ

Aktivasyon enerjisi metal borür tabakası kalınlığı ve borlama işlem sıcaklığına göre değişiklik göstermektedir. Çizelge 7.1.'de borlanan numunelerin metal borür kalınlıkları ortalama olarak verilmektedir. Bu değerlere göre aktivasyon enerjisi Arrheniuss Eşitliği (7.1 ve 7.2) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$D = D_0 e^{-\frac{E}{RT}} \quad (7.1)$$

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{E}{RT} \quad (7.2)$$

Burada D metal borür tabakası difüzyon büyüme hız katsayısı, D_0 frekans faktörü (m^2/s), E metal borür tabakası oluşumun aktivasyon enerjisi (J/mol), T borlama sıcaklığı (K), R ideal gaz sabiti ($8,3144 \text{ J/mol.K}$) olarak alınmıştır. Borlama işleminde, metal borür tabakasının büyüme kinetiği parabolik bir yasaya sahiptir ve kalınlığı ile işlem süresi arasındaki ilişki aşağıdaki Eşitlik (7.3 ve 7.4) de verilmiştir.

$$x^2 = D t \quad (7.3)$$

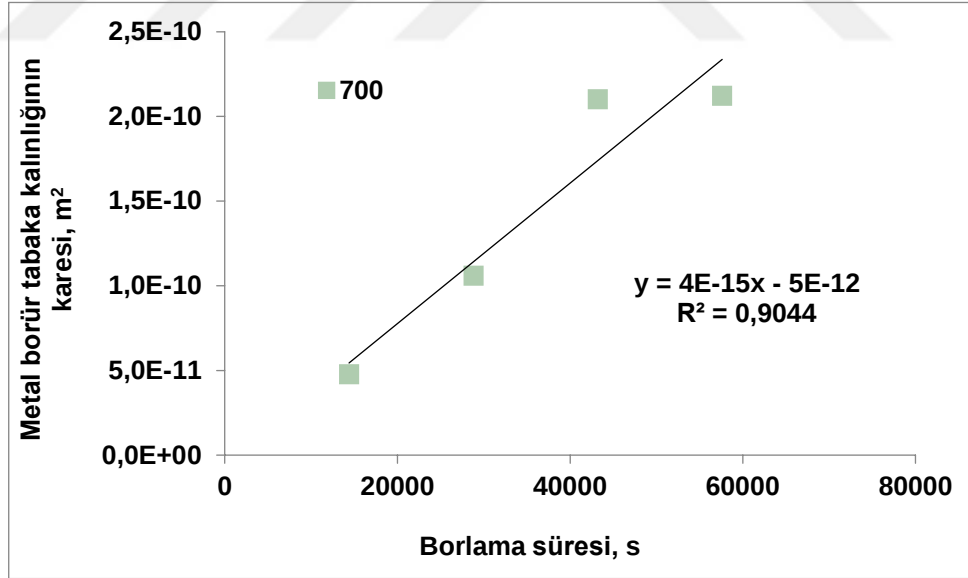
$$D = \frac{x^2}{t} \quad (7.4)$$

Burada x metal borür tabaka kalınlığı (m), t borlama süresi (saniye, s) ve D metal borür tabakası difüzyon büyüme hız katsayısı, m^2/saniye olarak alınmıştır. Çizelge 7.1'de borlanan numunelerin ortalama borür kalınlıklarına bağlı standart sapmaları verilmektedir.

Çizelge 7.1. Borlanan numunelerin ortalama borür derinlikleri ve standart sapmaları

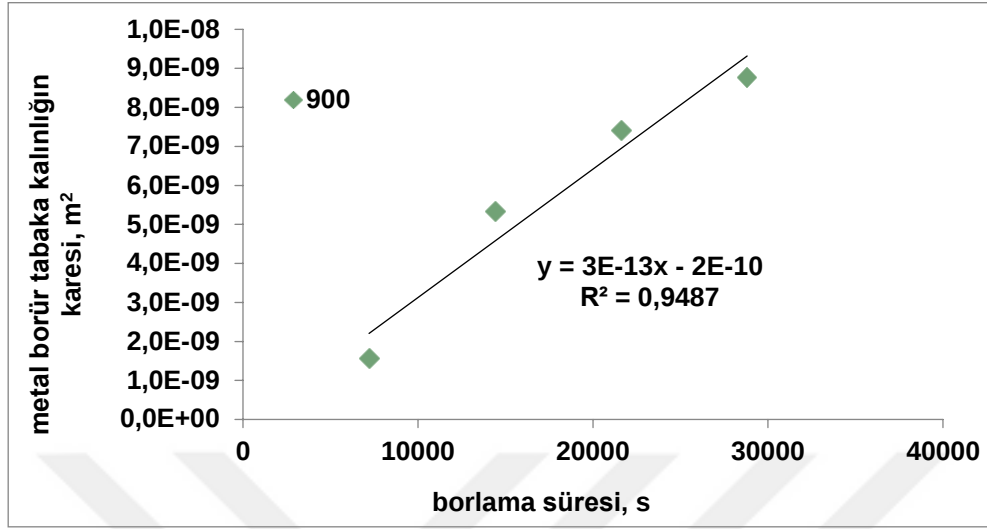
Borlama Sıcaklığı, °C	Borlama süresi, saat	Metal borür tabaka kalınlığı, μm	Standart sapma, μm
700	4	6.92	± 0.65
700	8	10.30	± 1.96
700	12	14.50	± 2.44
700	16	14.57	± 1.08
900	2	39.43	± 10.20
900	4	73.03	± 22.22
900	6	86.07	± 20.80
900	8	93.61	± 16.60
950	2	65.02	± 15.74
950	4	80.54	± 30.66
950	6	140.50	± 16.43
950	8	178.10	± 18.79

Şekil 7.1.'de 700 °C'de 4, 8, 12 ve 16 saat borlanan numunelerin aktivasyon enerji değeri verilmektedir.



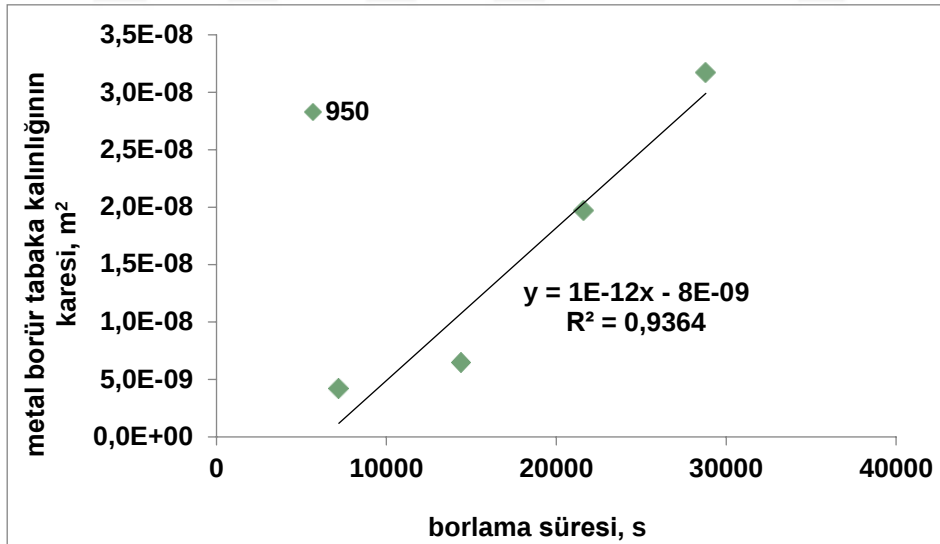
Şekil 7.1. 700 °C'de Borlanan numunelerin x^2 ve t grafiği

Şekil 7.2.'de 900 °C'de 2, 4, 6 ve 8 saat borlanan numunelerin aktivasyon enerji değeri verilmektedir.



Şekil 7.2. 900 °C'de borlanan numunelerin x^2 ve t grafiği

Şekil 7.3.'te 950°C'de 2, 4, 6 ve 8 saat borlanan numunelerin aktivasyon enerji değeri verilmektedir.



Şekil 7.3. 950 °C'de borlanan numunelerin x^2 ve t grafiği

Çizelge 7.2’de borlanan numunelerin difüzyon katsayıları verilmektedir.

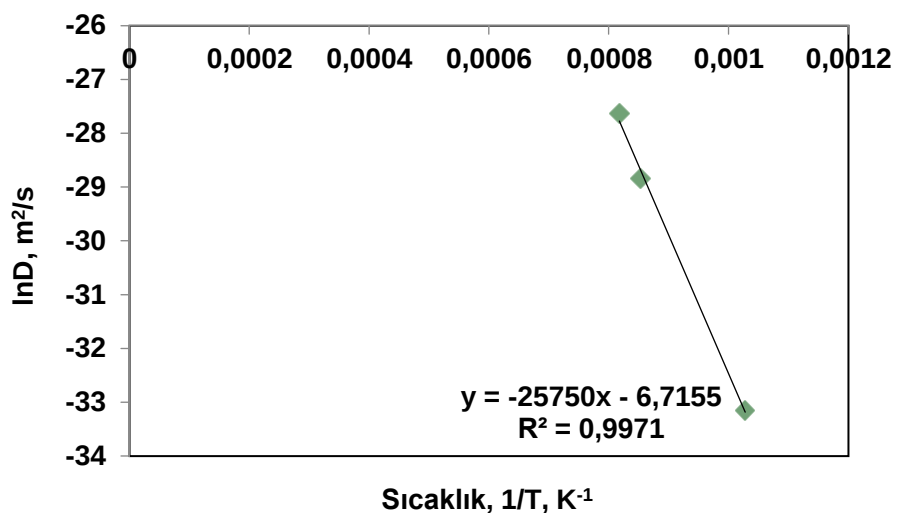
Çizelge 7.2. Borlanan numunelerin difüzyon katsayıları

Borlama Sıcaklığı, °C	Difüzyon katsayısı, D m ² /s	lnD
700	4,0E-15	-33,15
900	3,0E-13	-28,83
950	1,0E-12	-27,63

Difüzyon katsayılarını hesapladıktan sonra metal borür tabakalarının aktivasyon enerjilerini belirlemek için $\ln D$ ve $1/T$ diyagramları çizilmiştir. $\ln D$ ve $1/T$ arasında çizilen diyagramlardan ve eşitlik (7.1) kullanılarak aktivasyon enerji (E) değeri bulunmuştur.

Diyagramda bulunan eğrilerin ordinatının kesim noktası frekans faktörü değeri olan (D_0), eğrinin eğimi ise $(-E/R)$ yi vermektedir. R ise sabit değer olan $R = 8,3144 \text{ kg.m}^2/\text{s}^2.\text{K.mol}$ dur. Çizelge 7.3.’ te borlanan numunelerin aktivasyon enerjisi ve frekans faktörü değeri verilmektedir.

Şekil 7.4.’te 700 °C, 900 °C ve 950 °C’de borlanmış numunelerin aktivasyon enerji değeri verilmektedir.



Şekil 7.4. 700 °C, 900 °C ve 950 °C’de Borlanan numunelerin aktivasyon enerjileri

AISI 8620 çelik numuneler Baybora-1 borlama ajanı kullanılarak 700, 900 ve 950 °C sıcaklıklarda borlanmış ve aktivasyon enerjisi 214,09 kJ/mol olarak bulundu. Borlanan numunelerin aktivasyon enerjisi ve frekans faktörü Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3. Borlanan numunelerin aktivasyon enerjisi ve frekans faktörü

E kJ/mol	lnDo	Do
214,09	-6,7155	$1,212 \times 10^{-3}$

Literatürde, birçok araştırmacı farklı çelikleri borlama işlemine tabi tutmuşlar ve aktivasyon enerjisini hesaplamışlardır. Çizelge 7.4'te literatürde yapılan bazı çalışmaların aktivasyon enerjileri verilmiştir.

Çizelge 7.4. Literatürde yapılan çalışmaların aktivasyon enerjileri

Malzeme	Aktivasyon enerjisi kJ/mol	Kaynaklar
AISI H13 çelik	186,2	[54]
AISI 316 çelik	199,0	[55]
AISI 5140 çelik	223,0	[56]
AISI 4340 çelik	234,0	[56]
AISI D2 çelik	170,0	[56],
AISI P20 çelik	213,9	[57]
AISI 420 çelik	222,9	[58]
AISI 8620 çelik	214,09	Bu çalışma

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

AISI 8620 çeliği patentli borlama ajanı [48] olan Baybora-1 borlama tozu ile 700, 900 ve 950°C sıcaklıklarda farklı sürelerde katı borlama yöntemi ile borlama işlemi yapılmış ve sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1) 700°C’de 4, 8, 12 ve 16 saat sürelerde gerçekleştirilen borlama işlemlerinde, en fazla metal borür tabaka kalınlıkları 12 ve 16 saat süreyle borlanmış numunelerde görülmüştür. 16 saat borlanmış numunede güçlü testere yapısı elde edilmiştir. En az borür tabaka kalınlığı ve zayıf testere dişi yapısına, 4 saatlik süreyle borlanmış numunede gözlenmiştir. 900°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerde borlanan numunelerde, artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak metal borür tabaka kalınlıklarında artış gözlenmiştir. Oluşan metal borür tabakası güçlü testere dişi şeklindedir. 900°C’de artan süreye bağlı olarak geçiş bölgesindeki tane yapılarında büyüme gözlemlendi. Geçiş bölgelerindeki tane yapılarının büyümesinin sebebi; difüzyonla bor atamlarının, karbon atomlarını içeriye doğru itmesiyle geçiş bölgelerindeki tane yapılarının büyümesine neden olduğu düşünülebilir. 950°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat sürelerde yapılan borlama işlemlerinde, metal borür tabakalarında, artan süreyle daha güçlü testere dişi şekli oluşmuştur. 950°C’de en fazla borür tabaka kalınlığı 8 saat süreyle yapılan borlama işlemi sonucunda gözlemlendi. 8 saat borlama işlemi sonucunda, $178,10 \pm 18,79$ µm kadar borür tabakası kalınlığı elde edilmiştir.

2) 700°C’de 4 ve 8 saat yapılan borlama işlemlerinde metal borür tabakasında yüzeyden ana faz Fe₂B iken az miktarda NiB fazları gözlenmiştir. 700°C’de 4, 8 ve 12 saat yapılan borlama işlemlerinde ise, dış yüzeyde FeB fazı gözlenmemiştir. 700 °C’de 16 saat borlama işleminde yüzeyde Ni₃B, Mo₂B, CrB bileşikleri de oluşmuştur. 900°C’de 2, 4, 6 ve 8 saat yapılan borlama işleminde metal borür tabakasında ana faz Fe₂B oluşmuştur. Buna ek olarak, az miktarda NiB, CrB ve FeB bileşikleri oluşmuştur. 950°C sıcaklıkta ve 2, 4 ve 8 saat borlanmış numunelerin XRD analiz sonuçlarına göre metal borür tabakasında ana faz Fe₂B oluşmuştur. Az miktarda FeB ve NiB, bileşikleri oluşmuştur. 950°C’de 6 saat yapılan borlama işleminde yüzeyden içeri doğru sadece Fe₂B bileşiği oluşmuştur.

3) Maksimum 1827 HV sertlikte demir borür tabakası 900°C ve 2 saat borlama

süresinde elde edilmiştir. Ancak demir borür tabakasının sertliği numunenin içine doğru azalmıştır. 900°C’de ve 4, 6 ve 8 saat borlama işlemi sonucunda 1500 HV sertlikte demir borür tabakaları oluşmuştur. En yüksek sertlik AISI 8620 çeliği 950°C’de 6 saat borlama süresinde işlem yapılan numunde oluşmuştur. En düşük sertlik 1550 HV sertlik değeri ile 950°C’de ve 2 saat borlama süresinde elde edilmiştir. 950°C’de ve 6 saat borlama işlemi ile daha kalın ve yüksek sertlikte metal borür tabakası oluşmuştur.

4) 700°C’de borlanmış numunelerin korozyon davranışı en az malzeme kayıplarının 16 saat borlanan numunede olduğu görülmüştür. 700°C sıcaklıkta borlanmış numunelerin korozyon direnci borlanmamış numunelerin korozyon direncinden daha düşüktür. 900°C’de borlanan numunelerin korozyon testi sonuçlarına göre, en az malzeme kayıpları 8 saat borlanan numunede olduğu görülmüştür. 900°C’de borlanan numunelerin korozyon dayanımları, borlanmamış numunelerin korozyon direncinden daha yüksek olduğu gözlenmiştir. 950°C’de borlanan numunelerin korozyon testi sonuçlarına göre, en az malzeme kayıpları 8 saat borlanan numunede olduğu görüldü. 950°C’de borlanan numunelerin korozyon dayanımları, borlanmamış numunelerin korozyon dayanımlarından daha yüksektir.

8.2. Öneriler

1) Kullanılan Baybora-1 ajanıyla, 700 °C’de çeliğin HMK yapısını bozmadan borlama ısıl işlemleri yapılabilir. 700 °C’de çeliğin HMK yapısının bozulmaması; yüksek sıcaklıkta, gözenekliğe bağlı bozulmaların ve malzemede çarpılmaların önüne geçilebilir.

2) 900 °C’de artan süreye bağlı, geçiş bölgesindeki büyüyen tane yapılarının metal borür tabakası kalınlığını engellendiği düşünülebilir. Tane yapısı kontrolü mümkün olduğu durumlar oluşursa, östenit bölgesinde artan sıcaklık ve süreyle orantılı olarak metal borür tabakası kalınlığı artırılabilir.

3) Artan sıcaklık ve süreye bağlı olarak daha fazla metal borür tabakası kalınlığı elde edebilmek için borlama işlemi öncesi dekarbürizasyon işlemi yapılabilir. Dekarbürizasyon yöntemiyle yüzeydeki karbon azaltılarak, sonrasında uygulanacak borlama işlemiyle borür tabaka kalınlığı artırılabilir.

4) Diğer alaşımlı çeliklere kıyasla daha ekonomik olan AISI 8620 çeliğini Baybora-1

ajarıyla, borlayarak; öncelikle savunma sanayisinde, yüzey sertliği ve korozyon dayanımı gerektiren yerlerde kullanılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Khoee, S.M.M. (1992). Ergimiş Boraks Banyosunda Çeliklere Vanadyum Karbür Kaplama, Doktora Tezi. *İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [2] LYDAY, P.A. (1985). *Boron, Mineral Facts and Problems*. Bureau of mines USA.
- [3] United States Borax and Chemical Corporation (1977). *The story of borax*, Los Angeles, U.S. Borax.
- [4] United States Borax and Chemical Corporation (1972). *100 Years of U.S. Borax*, Anniversary Booklet of 100 Year of U.S. Borax.
- [5] Anonim (1973). Boraks. *Kimya Mühendisleri Odası, Kimya Mühendisliği Dergisi*, 6 (60), Ankara.
- [6] Anonim (1982). Bor Mineralleri-10, *MTA Yayınları*, Sayı:187, Ankara.
- [7] Tombal, T., Özkan, Ş., Ünver, İ.ve Osmanlıoğlu, A. (2016). Bor bileşiklerinin özellikleri, üretimi, kullanımı ve nükleer reaktör teknolojisinde önemi. *Bor Dergisi*, 1 (2) 86-95.
- [8] Özer, M. (2011). Üç farklı çeliğe katı borlama işleminin yapılmasının iç yapı ve sertlik üzerine etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. *Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir.
- [9] Taşcı, A. (1993). Borlanmış Çeliklerin Aşınma ve Korozyon Dayanımları. Yüksek Lisans Tezi. *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [10] Bayça, S.U., Şahin, S., (2004). Borlama, *Mühendis ve Makine Dergisi*, 45 (532) 51-59.
- [11] Xu, CH., Gao, W., Yang, YL. (2001). Superplastic Boronizing of a Low Alloy Steel- Microstructural Aspects, *Journal of Materials Processing Technology*, 108, 349-355.
- [12] Topuz, P. (2016). DIN 1.2842 çeliğinin borlanması ile oluşan borür tabakası üzerine borlama sıcaklık ve süresinin etkileri, *Bor Dergisi*, İstanbul, 1 (1) 15-19.

- [13] Mathuschka, A.G. (1980). Boronizing, *Carl Hanser Verlag*, Munchen Wien, Germany.
- [14] Baştürk, S., Erten, M. (2006). Borlama ile Yüzey Sertleştirme Çalışmaları” *Mühendis ve Makine*, 47 (563) 57-74.
- [15] Bozkurt, N. (1984). Bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme, Doktora Tezi. *İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [16] Yünker, U. (2000). Borlanmış Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa.
- [17] Atik, E. (2001). Farklı bir yüzey sertleştirme yöntemi: Borlama. *Makine ve Metal Dergisi*, 117, 24-28.
- [18] Erdemirler Met. Mak. İnş. Yapı. Mlz. San. Tic. Ltd. Şti. (2022). Semantasyon çelikleri. <http://www.erdemirlermetal.com/urunler/> İndirilme Tarihi: 15.03.2022.
- [19] Kalite Metalurji (2022). 8620 Semantasyon çeliği. <http://kalitemetalurji.com.tr/urunlerimiz/> İndirilme Tarihi: 15.03.2022.
- [20] Askeland, DR. (2002) *Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri* (Çeviri: Mehmet Erdoğan). Ankara: Nobel Yayıncılık.
- [21] Anonim (2011). Isıl Yüzey Sertleştirme Modülü. *Milli Eğitim Bakanlığı Metal Teknolojisi Alanı*, Ankara.
- [22] Insapedia-İnşaat Teknik Bilgi Sitesi (20 Mart 2022). Semantasyon- Karbürleme nedir? <https://insapedia.com/sementasyon-karburlleme-nedir/> İndirilme Tarihi: 20.03.2022.
- [23] Anonim (2011). Karbon Oranı Düşük Çeliklerde Sertleştirme Modülü. *Milli Eğitim Bakanlığı Metal Teknolojisi Alanı*, Ankara.
- [25] Atik, E., Yunker, U., Meriç, C. (2003). The effects of conventional heat treatment and boronizing on abrasive wear and corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 steels. *Tribology International*. 36, 155–161.
- [26] Ozbek, I., Bindal, C. (2002). Mechanical properties of boronized AISI W4 steel. *Surface and Coatings Technology*. 154, 14–20.
- [27] Gunes, I., Yıldız, I. (2016). Investigation of adhesion and tribological behavior of borided AISI 310 stainless steel. *Revista Materia*, 21, 61-71.
- [28] Delikanlı, K., Çalık, A. ve Uzun, H.A. (2003). Sade karbonlu bir çeliğin borlama özelliklerinin incelenmesi. *BAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5 (1) 99-110.
- [29] Uslu, İ., Cömert, H. (2004). Borlanan AISI 1040 ve AISI P20 kalıp çeliklerinin

bazı mekanik özellikleri. *SAU Fen bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8 (1) 24-30.

- [30] Barut, N., Yavuz, D. ve Kayalı, Y. (2014). Borlanmış AISI 5140 ve AISI 420 çeliklerinin difüzyon ve adhezyon davranışlarının incelenmesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 14 (1) 1-8.
- [31] Ulutan, M., Yildirim, M., Çelik, O. ve Buytoz, S. (2010). Tribological properties of borided AISI 4140 steel with the powder pack-boriding method. *Tribology Letters*, 38, 231– 239.
- [32] Er, Ü., Par, B. (2004). Bor yayınımla yüzeyi sertleştirilmiş AISI 1030 ve AISI 1050 çeliklerinin abrazyon aşınma dayanımlarının incelenmesi. *Osman Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17 (1).
- [33] Çelik, ON., Akbayır, Ö., Gaşan, H., Er, Ü. ve Aydınbeyli, N. (2007). Borlanmış AISI 1030 çeliğinin abrazyon aşınma özellikleri. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21, (1).
- [34] Uluköy, A., Can A.Ç. (2006). Çeliklerin borlanması, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12 (2) 189-198.
- [35] Gunes, I. (2014). Investigation of tribological properties and characterization of borided AISI 420 and AISI 5120 steels. *Transaction Indian Institute of Metals*, 67 (3) 359-365.
- [36] Taktak, S. (2007). Some mechanical properties of borided AISI H13 and 304 steels. *Materials and Design*, 28 (6) 1836–1843.
- [37] Ulukoy, A., Can, A. C., Ozmen, Y. ve Tasgetiren, S. (2015). Borocarburing of decarburized gears made from 21NiCrMo2 (AISI 8620) steel. *Journal of Materials: Design and Applications*, 229 (3) 226-235.
- [38] Krelling, A.P., Costa, C.E., Milan J.C.G., Almeida E.A.S. (2017). Micro-abrasive wear mechanisms of borided AISI 1020 steel. *Tribology International*, 111, 234– 242.
- [39] Turku, N., Doğan Ş., Uçar, N. ve Çalık A. (2014). Borlama süresinin düşük karbonlu mikro alaşımlı çeliklerin sertlik değerleri üzerine etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9 (2) 147-151.
- [40] Yılmaz S., Ünlü B. ve Varol R. (2008). Borlama ve bilyalı dövmenin demir esaslı malzemelerde aşınma ve mikro yapı özelliklerine etkisi. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4 (1) 1-8.
- [41] Çetin M. (2003). Borlanmış hadfield çeliklerinin aşınma dayanımını incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya.

- [42] Tabur, M. (2008). Bor karbür kaplanmış AISI 8620 ve hardox 400 çeliklerinin abrasiv aşınma davranışlarının incelenmesi. Doktora Tezi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- [43] Campos-Silva, I., Ortiz-Dominguez, M., Cimenoglu, H., Escobar-Galindo, R., Keddam, M., Elias-Espinosa, M., Lopez-Perrusquia, N. (2011). Diffusion model for growth of Fe₂B layer in pure iron. *Surf. Eng.*, 27, 189–195.
- [44] Hernandez-Sanchez, E., Velazquez, J.C. (2018). Kinetics of growth of iron boride layers on a low-carbon steel surface. In *Laboratory Unit Operations and Experimental Methods in Chemical Engineering*; Basha, O.M., Badie, M., Eds. IntechOpen: London, UK.
- [45] Bayça, S.U., (2021). *Bir katı borlama ajanı*. Patent no: TR2021/007143.
- [46] ASTM G31-72 (2004). Standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals. ASTM, USA.
- [47] Güneş, İ. (2010). AISI 8620 Çeliğinin değişik pasta karışımlarında plazma pasta borlanması ve yüzey özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon.
- [48] Calik, A., Duzgun, A., Ekinçi, A.E., Karakas, S. ve Ucar, N. (2009). Comparison of hardness and wear behaviour of boronized and carburized AISI 8620 steels. *Acta Physica Polonica A*, 116, 1029-1032.
- [49] An, J., Li, C., Wen, Z., Yang, Y.L., Sun, S.J. (2012). A study of boronizing of steel AISI 8620 for sucker rod. *Metal Science and Heat Treatment* 53, 598 – 602.
- [50] Gunes, I., Ulker, S. ve Taktak, S. (2013). Kinetics of plasma paste boronized AISI 8620 steel in borax paste mixtures. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces* 49, 567–573.
- [51] Meriç, C., Şahin, S., Backir, B. ve Köksal, N.S. (2006). Investigation of the boronizing effect on the abrasive wear behaviour in cast irons. *Materials and design*, 27 (9) 751-757.
- [52] Bayça, S.U., Bican, O. (2022). Increasing of corrosion resistance of AISI 1010 steel by boride coatings. *Inpress*.
- [53] Bayça, S.U., Bican, O., Yamanel, B., Hekimoğlu A.P. ve Çalış, M. (2020). The effect of solid boriding time on the structure, hardness and corrosion properties of AISI 5140 steel. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 56 (3) 591–597.
- [54] Genel, K. (2006). Boriding kinetics of H13 steel. *Vacuum*, 80 (5) 451-457.
- [55] Ozdemir, O., Omar, M.A., Usta, M., Zeytin, S., Bindal, C. ve Ucisik, A.H. (2008). An investigation on boriding kinetics of AISI 316 stainless steel.

Vacuum, 83, 175-179.

- [56] Sen, S., Sen, U. ve Bindal C. (2005). An approach to kinetic study of borided steels. *Surface and coatings technology*, 191, 274-285.
- [57] Kayalı, Y. (2015). Investigation of diffusion kinetics of borided AISI P20 steel in microwave furnace. *Vacuum*, 121, 129-134.
- [58] Kayalı, Y. (2013). Investigation of the kinetics of borided stainless steels. *The physics of metal and metallurgy*, 114, 1061-1068.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: HAMZA EFE
Doğum Tarihi	:
Yabancı Dil	: İngilizce
Eğitim	: Eğitim Birimi
Lisans	: Gazi Üniversitesi/TEF/Metal Öğr.
Lisans	: Bozok Üniversitesi/MMF/Makine Müh.
Çalıştığı Kurumlar	: Yıllar
Kemerköy Elektrik Üretim A.Ş	: 2007-2007
MKE Ağır Silah ve Çelik Fab.	: 2007-2014
Kırıkkale Mesleki ve Tek. An. Lis.	: 2014-2019
Gazi Mesleki ve Tek. An. Lis.	: 2019-2022

Yayımları

BAYÇA, S.U. ve EFE, H. (2022). 21NiCrMo2 Çeliğinin Korozyon Hızına Borlama İşleminin Etkileri. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*. Cilt 14 (1), 1-9.

Araştırma Alanları : Isıl İşlem, Korozyon, Kaynak Yön