

**Proje No: 105M061**

**Termal Püskürtme Tekniği ile Yüksek Performanslı  
Zn/Al 85/15 Kaplamaların Üretimi ve  
Karakterizasyonu**

Prof.Dr. Fevzi YILMAZ  
Doç.Dr. Fatih ÜSTEL  
Doç.Dr. Ahmet TÜRK  
Yrd. Doç.Dr. Akın AKINCI

Eylül 2007  
SAKARYA

<b>İÇİNDEKİLER</b>	i,ii
<b>ÖNSÖZ</b>	1
<b>GİRİŞ</b>	2
<b>ÖZET</b>	4
<b>BÖLÜM I. LİTERATÜR ÖZETİ</b>	6
1.1. Giriş	6
1.2. Elektrik (Tel) Ark Sprey Prosesi	8
1.3. EAP Kaplamalar ve Kaplamalara Etki Eden Faktörler	9
1.3.1. Püskürtme Mesafesinin Etkisi	10
1.3.2. Voltaj ve Amperin Etkisi	10
1.3.3. Atomize Gaz Tipinin ve Gaz Basıncının Etkisi	11
1.4. Elektrik Ark Püskürtme Kaplama Malzemeleri	12
<b>BÖLÜM II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>	17
2.1. Kaplamaların Üretim Aşamaları	17
2.1.1. Kaplamaların Üretilmesi	17
2.1.2. Endüstriyel Uygulamalara Yönelik Düktil Boru Kaplama Çalışmaları (Zn ve Zn/Al 85/15)	
2.1.3. Tuz Püskürtme Testi	20
<b>BÖLÜM III. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME</b>	25
3.1. Kaplama Kalınlığı ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü (Zn-Al)	25
3.1.2. Kaplama Kalınlığı ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü (Zn)	26
3.2. X-Işını Difraksiyonu / Analizi	27
3.3. Mikroyapı İncelemeleri	31
3.4. Kaplamaların SEM İncelemesi	34
3.5. Endüstriyel Numunelerle İlgili Mikroskobik Çalışmalar	35
3.5.1. Mikroyapı İnceleme Sonuçları	35
3.6. Detaylı Mikroyapı İnceleme Sonuçları	37
3.6.1. Zn Kaplamasının SEM İncelemesi ve EDS analizi	37
3.6.2. Zn/Al 85/15 Kaplamasının SEM İncelemesi ve EDS analizi	38
3.6.3. Zn/Al 85/15 Kaplamasının SEM İncelenmesi	39
3.7. Hızlandırılmış Korozyon Deneyi (Tuz Püskürtme Korozyon Testi)	43

3.7.1. Al esaslı numuneleri Korozyon Testi (3 bar, 200A)	43
3.7.2. Zn esaslı numuneleri Korozyon Testi (Zn kaplaması: 3 bar, 100A)	45
3.7.3. Zn/Al esaslı numuneleri Korozyon Testi	47
3.8. Endüstriyel numunelerin tuz testi (Düktil Demir Boru)	49
3.8.1. Endüstriyel Numuneler için Tuz testi sonuçlarının Değerlendirilmesi	52
3.8.2. Tuz Testi Sonrası Numunelerin Yüzey İncelemesi (SEM+EDS)	53
3.9. Anodik polarizasyon Eğrileri	58
<b>BÖLÜM IV. DEĞERLENDİRME</b>	62
<b>REFERANSLAR</b>	63
<b>EK-1 TUZ PÜSKÜRTME DENEYİ ASTM B 117 VE ASTM 1654 STANDARDLARINA GÖRE NUMUNELERİN DEĞERLENDİRİLMELERİ</b>	64



## ÖNSÖZ

Günümüzde önemli kayıplara neden olan korozyonu engellemek ve minimum seviyeye indirmek, konu ile ilgilenen uzmanların en önemli hedeflerinden birisidir. Bu amacı gerçekleştirmek için genellikle metalik, seramik kaplamalar ve boyalar tercih edilmektedir. Demir çelik esaslı malzemelerin korozyona karşı korunması için yıllardan beri çinko esaslı kaplamalar kullanılmaktadır. Günümüzde daldırma ve püskürtme yöntemi ile uygulanan Zn-Al esaslı kaplamalar, metalik malzemeleri korozyondan korumak amacı ile kullanılmaya başlanmıştır. Bu kapsamda tercih edilen kaplamalar daldırma yöntemi ile kaplanan Zn-%5 Al ötektik alaşımı ve püskürtme yöntemler ile kaplanan Zn-% 15 Al alaşım kaplamalardır. Bu alaşım kaplamalar günümüzde ticari olarak demir çelik esaslı malzemeleri korozyondan korumak amacıyla kullanılmaktadır.

TUBİTAK MAG grubu tarafından desteklenen söz konusu projede, elektrik ark püskürtme yöntemi ile çelik ve dökme demir altlıklar üzerine farklı parametreler kullanılarak kaplanan Zn-Al (85/15) alaşım kaplamasının standart tuz püskürtme yöntemi ile korozyon performansı, aynı yöntemle üretilen Zn esaslı kaplamalarla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Kaplamaların pasifleşme davranışı ve korozyon hızları potansiyostat testleri sonucunda belirlenmiştir. Kaplamaların, korozyon öncesi ve sonrasında yapısal karakterizasyonu metalografik yöntemler (Optik Mikroskop, SEM) ve XRD kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tuz püskürtme korozyon testi sonrası test numunelerinin yüzey topografyaları ve oluşan korozyon ürünleri yine aynı yöntemler ile incelenmiştir. Ayrıca, kaplamaların yüzey kalitesi, yüzey pürüzlülük ölçümleriyle belirlenmiş ve kaplamaların üretim parametreleri ile korozyon davranışı arasındaki ilişki incelenmiştir.



## GİRİŞ

Korozyona karşı termal püskürtme teknikleri ile mühendislik malzemelerinin kaplanması son yılların öncelikli uygulamaları arasındadır. Tel ark püskürtme tekniği ile Zn, Zn/Al 85/15, Al ve Al5Mg kaplamalar en çok araştırma yapılan ve korozyondan koruma amaçlı olarak endüstriye aktarılan uygulamalardır.

01.09.05 tarihinde yürürlüğe giren proje çalışmamız ilk 6 ayda literatür araştırma ve proje teçhizatının (METCO Tel Ark püskürtme sistemi, Tuz Püskürtme Korozyon Test Cihazı gibi) temini çalışması yürütülmüştür. Maalesef, bürokrasi ve döviz kuru değişiklikleri nedeni ile ancak ikinci 6 aylık dönem içerisinde bu teçhizatlar temin edilebilmiştir. Bu ilk iki dönemde endüstriyel örnekler ve sanayide kendi ürettiğimiz kaplamaların karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. 3. Dönemde kaplama ve tuz püskürtme ağırlıklı korozyon deneyleri yürütülmüştür. Son dönemde (4. Altı aylık dönem) korozyon sonuçlarını değerlendirme, laboratuvar ve endüstriyel çalışma sonuçlarını bütünleme faaliyetleri yürütülmüştür. 01.09.2007 tarihinde sonlanan bu proje ile hedeflenen bütün proje adımları gerçekleştirilmiştir.

Projede aşağıda adları verilen öğretim elemanları ve araştırmacılar görev almıştır.

- Prof. Dr. Fevzi YILMAZ
- Doç. Dr. Fatih ÜSTEL
- Doç. Dr. Ahmet TÜRK
- Yrd. Doç. Dr. Akın AKINCI
- Met. Yük. Mühendisi Ahmet GÜLEÇ (Proje ile ilgili tez çalışmasını tamamlamıştır)
- Met. Yük. Mühendisi Özgür CEVHER (Proje ile ilgili tez çalışmasını tamamlamıştır)
- Met. Mühendisi Eren Yüksek (Ark sprey konusunda tezi devam ediyor)
- Met. Mühendisi Talip Çobanoğlu (Tezi devam ediyor)
- Met. Mühendisi Emin İrfan Karaali (Tezi devam ediyor)

Proje kapsamı ile ilgili olarak aşağıdaki akademik faaliyetler yürütülmüştür.



## 1. Bildiriler (Sunulan ve Gönderilen)

- Güleç A., Üstel F. Türk A., Cevher Ö. Akıncı A. Yılmaz F., "Ark Sprey Kaplama Teknolojisi ve Uygulamaları", 13. Uluslararası Metalurji-Malzeme Kongresi 09-11 Kasım 2006, İstanbul
- 2008 Yılı Thermal Spray (Crossing Borders) 2-4 June 2008 Maastricht-Hollanda'da gerçekleştirilecek konferans için 3 adet bildiri özeti gönderilmiş ve kabul edilmiştir.
  - a) Corrosion performance of arc sprayed Zn, Zn/Al 85/15 coatings on ductile iron pipe
  - b) Study on corrosion resistance behaviors of Zn, Al, Zn/Al 85/15 coatings that produced by twin wire arc spray technique on steel substrate
  - c) The effect of process parametres on the microstructure and mechanical properties of arc sprayed Zn, Zn/Al, Al coatings
- Güleç A., Üstel F., Yılmaz F., "Comparision of the corrosion performance of Zn and Zn/Al (85/15) coatings that produced by twin wire arc spray technique", 3 rd IMS International Conference on Applications of Traditional and High Performance Materials in Harsh Environment, January 23-24, 2008, Sharjah UAE.

## 2. Makaleler ( 5 adet yurt içi)

- Akıncı A., Korozyon Deneyleri ile Kaplamaların Değerlendirilme Yöntemleri", Yüzey İşlemler Dergisi, Sayı 56, Eylül-Ekim 2007.
- Akıncı A., "Koruma Amaçlı Kaplamaların Nötral Tuz Püskürtme (sis) Korozyonu", Sayı 55, Sf. 64-74, Temmuz-Ağustos 2007.
- Güleç A., Üstel F., Yılmaz F., "Elektrik Güç İletim Hatlarında Korozyon ve Önlenmesi", Elektrik Dergisi, Sayı 213, sf. 164-169, 02/2007.
- Yüksek E., Altuncu E., Şeker Y., Üstel F., "Plazma Sprey Kaplama Yöntemi ve Teknolojik Uygulamaları-Bölüm I, " Galvanoteknik Dergisi, 12/2006
- Yüksek E., Altuncu E., Şeker Y., Üstel F., "Plazma Sprey Kaplama Yöntemi ve Teknolojik Uygulamaları-Bölüm II" Galvanoteknik Dergisi, 2/2007
- Yılmaz F., Üstel F., "Elektrik Ark Sprey Teknolojisi", Galvanoteknik Dergisi, 10/2006.



## ÖZET

Bu proje kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar ardışık 4 dönem halinde yapılmış olup aşağıda özetlenmiştir.

### a) Birinci Periyod

Proje çerçevesinde ilk 6 aylık dilimde literatür çalışmaları ve proje ekipmanlarının alınımına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ekonomimizde yaşanan kur dalgalanmaları nedeniyle makine ve teçhizat ilk dilimde temin edilememiştir. Üretim eksikliğini gidermek amacıyla endüstriden temin edilen numuneler üzerinde analiz ve karakterizasyon çalışmalarına başlanılmıştır.

Bu ilk dönemin değerlendirilmesi amacıyla ark spreynin kaplamalarının endüstriyel kullanım alanı olan yüksek gerilim hatlarında ark spreynin potansiyeli ve sorunların çözümüne yönelik olarak arazi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yerinde araştırmalar yapılarak sorun kaynağında incelenmiştir. Projenin diğer endüstriyel uygulama alanı olan su iletim hatlarında kullanılan düktil demir borularındaki koruyucu kaplamalar ve alternatifleri tartışılmıştır.

İlk periyoddaki deneysel çalışmalar mikroyapı ve faz incelemelerini kapsamıştır. İncelemelerde, ark spreyle üretilen kaplamalar kalınlık homojenliği, porozite ve arayüzey adhezyonu şeklinde optik mikroskop, kaplama bileşimi ve detaylı iç yapı incelemelerinde ise elektron mikroskobu kullanılmıştır.

Endüstriyel ortamda üretilen Zn/Al 85/15 kaplaması 140 µm kalınlığında ve sertliği 50 H<sub>0.5</sub> olarak ölçülmüştür. SEM ve EDS analizlerinde kaplamada kullanılan Zn/Al 85/15 alaşımının oksitlendiği ve tabaka bünyesinde ZnO ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> varlığı tespit edilmiştir.

### b) İkinci Periyod

Bu dönemde ark spreynin cihazı ve diğer test donanımları laboratuara kurulmuş ve Zn/Al 85/15, Zn ve Al kaplamaları araştırma grubu tarafından üretilmiştir. Üretim aşamasında; ön hazırlık işlemleri (kumlama parametreleri), kaplama aşamasına yönelik ön çalışmalarla kaplama parametreleri belirlenmiştir. Üretim aşamasında muhtelif gaz akım ve atomizasyon gaz basınçları değiştirilerek çalışmalar gerçekleştirilmiş ve kaplama özelliklerine yönelik ilişkiler kurulmuştur. Optimum kaplama parametreleri olarak 200 amper tel ergitme akımı ve 3 bar atomizasyon gaz basıncı belirlenmiştir.

Üretim aşamasını müteakiben numunelerin kaplama kalınlığı homojenliği, yüzey kalite özellikleri (Ra, Rz) her üç tür kaplama için belirlenmiştir. Nihai test numunelerin ileri seviye analizleri bu periyotta gerçekleştirilmiştir.

Kaplamaların XRD analizlerinde üretim parametrelerine bağlı olarak faz analizleri yapılmış, kaplamaların Zn, Al ve bunların oksitlerinin bir karışımı olduğu gözlemlenmiştir. Üretim parametreleri ile kaplamaların faz yapısı arasında bir ilişki kurulamamıştır. Nihai numunelerin mikroyapı incelemelerinde, kaplama kalitesinin artan akım ve atomizasyon gaz debisiyle arttığı, düşük gaz debisinde ise yüzey kalitesi ve mekanik özelliklerin azaldığı tespit edilmiştir.

İkinci periyod sonunda tuz testine yönelik çalışmalara başlanılmış, standartlara uygun ölçülerde numuneler üretilmiş ve yalıtımları yapılmıştır.

### **c) Üçüncü Periyod**

Üçüncü periyod kaplamaların hızlandırılmış korozyon testinin (tuz testi) uygulanmasıyla tamamlanmıştır. Hazırlanan numuneler, pH 6.5–7.2 arasında 2000 saatin üzerinde tuz püskürtme testine tabi tutulmuştur. Bu test uygulamasında, endüstride kullanılan düktil demir borular da daha önceki numuneler gibi aynı şartlarda kaplanmıştır. Laboratuvar koşullarında kaplanan bu düktil demir borulardan hazırlanan numuneler diğer test numuneleri ile aynı şartlar altında deneye tabi tutulmuştur.

Tuz püskürtme testinin değerlendirmesi, deney numunesi yüzeyinde oluşan kırmızı pasa ve zamana bağlı olarak artan yoğunluğuna göre yapılmıştır. 250 saatlik kısa süreli tuz püskürtme testi sonuçlarında Zn, Zn/Al 85/15 ve Al kaplamasının korozyon performansı yönünden bir farklılığı tespit edilememiştir.

### **d) Dördüncü Periyod (Son Dilim)**

Projenin son diliminde 2000 saatin üzerinde gerçekleştirilen tuz testi sonucu kaplamalarda özellikle Zn kaplama yüzeyinde kırmızı pas oluşumu %50 fazla olarak tespit edilmiş ve deneylere son verilmiştir. Tuz püskürtme testi sonrasında, 6.5–7.2 pH aralığındaki korozyon testlerinde Al en yüksek performansı göstermiş, Zn/Al 85/15 ikinci sırada korozyon direngenliği göstermiştir.

Bu periyodda son aşama olarak kaplamaların anodik polarizasyon eğrileri çıkarılmış ve I<sub>cor</sub> değerlerinden korozyon performansları hem kaplama türüne hem de üretim parametrelerine bağlı olarak değerlendirilmiştir.

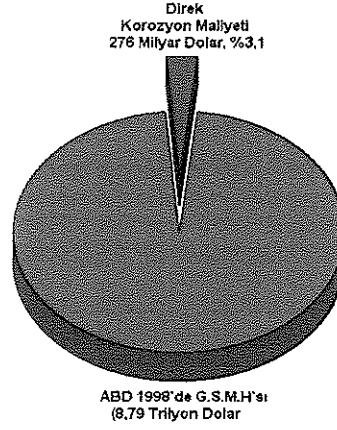




## BÖLÜM I. LİTERATÜR ÖZETİ

### 1.1. Giriş

Korozyon, aşınma veya bu hasar mekanizmalarının metalik malzemeler üzerindeki kombine etkileri her yıl endüstriyel ekonomilerde milyarlarca dolar kayba neden olmaktadır. Özellikle korozyon hasarı, metalik malzemelerde en sık görülen hasar mekanizmasıdır. Ulusların gayri safi milli hâsıllarının (GSMH) %7'ye yakın kısmının aşınma ve korozyon nedenli hasarlara gittiği düşünülürse bu problemin önemi daha iyi anlaşılır. Geçen 22 sene boyunca ABD 52 temel hava felaketlerinden-hortum, fırtına, kasırga, tropikal yağmurlar, kuraklık ve aşırı soğuklar gibi-zarar görmüştür. Bu zararın toplam maliyeti 380 milyar dolar iken, ABD'de 1998'de yapılan korozyon maliyet araştırması çalışmasında metalik malzemelerin direkt korozyon maliyeti 276 milyar dolar/yıl olarak bulunmuştur. Bu rakam ABD'nin GSMH'nin %3,1'ine tekabül etmektedir (Şekil 1.1) [1].



Şekil 1.1. ABD korozyon maliyetlerinin GSMH'daki payı [1]

Metalik malzemeler yıllardan beri özellikle yapı malzemesi olarak her alanda kullanılmaktadır. Korozyon, metalik malzemelerin hasara uğramasına ve servis ömürlerinin kısılmasına neden olan temel sebeplerden biridir. Birçok metalik yapı; toprak, su ve atmosfer gibi doğal korozif ortamlarda servis vermekte ve bu ortamlarda korozyona uğrayıp işlevlerini yitirmektedir. Metalik malzemelerdeki korozyon otomobillerde, ev eşyalarında, su iletim sistemlerindeki borularda, köprülerde ve birçok şehir yapısında görülür. Özellikle demir esaslı malzemelerde görülen korozyon büyük mali kayıplara sebep olmaktadır. Korozyon nedenli kayıpların en büyüğü hizmet sektöründe (içme su-atık su iletim/dağıtım elektrik hizmetleri ve gaz iletim/dağıtım hizmetleri) görülmüştür [2]. Burada en büyük paydaş içme-atık su iletim/dağıtım hatlarıdır.

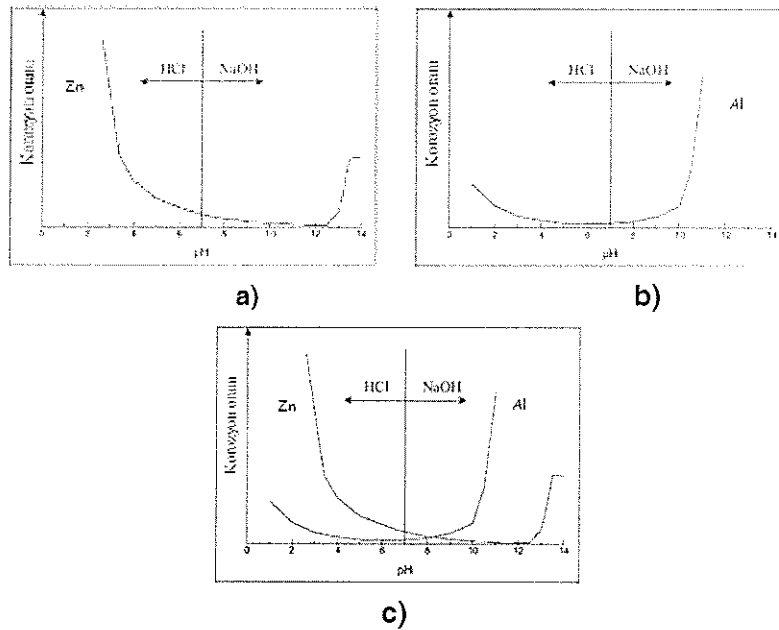
Metalik kaplama uygulamaları, doğal korozif ortamlarda (toprak, su ve atmosfer) malzemelerin servis ömürlerinin artırılması için en çok kullanılan korozyon koruma metodudur. Bu amaçla en çok kullanılan metalik kaplamalar çinko, alüminyum ve çinko-alüminyum alaşım kaplamalarıdır[3].

Çinkonun kurban anot olarak davranması ve çinko korozyon ürünlerinin kaplamada bulunabilen süreksizlikleri (kaplamanın kalkması, ayrılması ve çizilmesi durumu) doldurup bariyer oluşturmaya, çinkoyu koruyucu kaplama olarak en çok tercih edilir yapmıştır. Alüminyumun yüzeyde kararlı oksit tabakası oluşturup oksijen difüzyonuna karşı bir bariyer oluşturma özelliği ile yüksek korozyon koruma performansına sahip olduğu bilinmektedir [4].

Bu metalik kaplamalar, sıcak daldırma galvaniz, elektroliz ve termal sprej gibi birçok teknik ile uygulanmaktadır. Çelik yapıların korozyona karşı korunmasında sıcak daldırma galvanizleme tekniği en çok uygulanan tekniktir [5].

Bunun yanında çinko/alüminyum alaşımları ise her iki metalin korozyon koruma özelliğini bir arada bulundurmaya ve çinkonun yetersiz kaldığı ortamlarda uygulanmaktadır. Çinko ve alüminyum alaşım kaplamalar otomotiv, taşımacılık ve havacılık endüstrisinde korozyon koruyucu kaplama olarak geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Çinko ve alüminyum termal sprej kaplama olarak çeliklere uygulanmaktadır. Bunun nedeni çinko ve alüminyumun korozyon mekanizmasını bir arada bulundurup dual bir korozyon koruma sağlamaktır. Çinko ve alüminyumun çeliğe göre daha elektronegatif olması önemli bir husustur. Bu özellikler nedeniyle kaplamada oluşacak bir süreksizlikte (çatlak, kırık ve ayrılma gibi) çinko veya alüminyum ve çelik arasında galvanik çift oluşur. Bu mekanizma ile kaplama anod olarak davranıp tercihli korozyona uğrayacaktır ve katodik koruma sağlanmış olacaktır [6].

Çinko kaplamaların korozyon koruyuculuk alanı korozyon oranı-pH diyagramında sadece bazik bölgede bulunmakta (Şekil 2 a), alüminyumun korozyon koruyuculuk alanı ise asidik bölgede yer almaktadır (Şekil 2 b). Geniş pH aralığındaki toprak yapısında (asidik, bazik karakterli) kullanılan metalik malzemeleri korozyondan korumak için her iki metalin korozyon koruma mekanizmasının sinerjik etkisini sağlamak amaçlı çinko-alüminyum alaşım kaplamaları büyük önem kazanmıştır (Şekil 2 c).



Şekil 1.2. pH-korozyon oranı diyagramları, a) Zn, b) Al, c) Zn/Al 85/15 [7]

*[Handwritten signature]*

Bu dual korozyon koruma etkisi ağırlıkça % 85/15 Zn/Al alaşım ile tel ark sprey kaplamalarda optimum olarak sağlanmaktadır. Kaplamada Zn'un kurban anot etkisi ile Al'un kararlı oksit oluşturma özelliği bir aradadır [7]. Elektrik ark püskürtme kaplama prosesinde atomize gaz olarak hava kullanıldığından oksijene afinitesi yüksek olan bu malzemelerin kaplanması sırasında oksit oluşmaktadır. Özellikle tel alaşım bileşimlerinden biri olan Al proses esnasında ergiyerek ve 1–2 milisaniyede oksitlenerek  $Al_2O_3$ 'ü oluşturur [8–10]. Bu proses sırasında Zn oksitlenmesi Al'a göre daha düşük olmaktadır [11]. Bu nedenle tel ark sprey Zn/Al 85/15 kaplamalar %10  $Al_2O_3$  (8–10  $\mu m$ ) ile disperse edilmiş metal matrisli kompozit (MMK) olarak tanımlanırlar [12]. Bu alaşım kaplamalar yüksek korozyon koruma performansına sahip olup dünyada çeşitli uygulama alanları mevcuttur. Özellikle endüstriyel ve deniz atmosferinde kullanılan çelik yapıların uzun süreli korozyon dayanımları için Zn/Al 85/15 kaplamaları genişçe kullanılmaktadır.

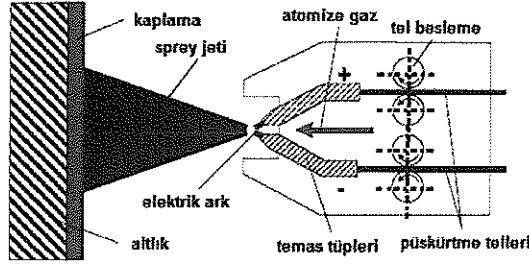
## 1.2. Elektrik (Tel) Ark Sprey Prosesi

Elektrik ark püskürtme (EAP) yöntemi termal püskürtme tekniklerinde içerisinde maliyeti en düşük ve en yüksek birikme oranına sahip kaplama prosesidir [13–14]. Püskürtme oranı çoğunlukla kullanılan püskürtme tel malzeme cinsine ve tel çapına bağlı olarak değişmektedir [15]. Elektrik ark püskürtme prosesi diğer termal püskürtme yöntemlerine göre birçok avantaja sahip olup endüstriyel uygulamalar için ilgi çekici bir kaplama prosesi olmuştur. Elektrik ark püskürtme prosesinin avantajları;

- a) Yüksek püskürtme-birikme oranı ve yüksek verimlilik,
- b) Kontrol parametrelerinin az sayıda olmasına bağlı olarak kolay işletim,
- c) Düşük ana ve işletim maliyeti,
- d) Küçük yüksek sıcaklı bölgesi ve böylece yeterli derecede soğuk altlıklar,
- e) Elektrodlar için su soğutmaya ihtiyaç duyulmaması, böylece boyutsal kullanım kolaylığı sağlaması ve
- f) Yüksek saflıkta kaplamaların üretilebilirliğidir [16].

Amerika'da yapılan bir araştırmada 2000 yılındaki termal püskürtme uygulamalarının %15' EAP prosesidir. Başka bir araştırmada Yeni Zelanda'daki termal püskürtme uygulamaların yaklaşık %35'i yine EAP uygulamalarıdır [16]. Gelişmiş ülkelerde ve özellikle Avrupa'da bu kaplama teknoloji 1900'lü yılların başından itibaren kullanılmaya başlanmıştır. EAP ülkemiz endüstrisinde yoğun olarak kullanılmadığından ülkemiz için bakir bir teknoloji sayılmaktadır. Bu yüzden bu prosesin karakteristik yapısı ve avantajlarının belirlenmesi ve kaplama özelliklerinin bilinmesi endüstriyel kullanım açısından büyük öneme sahiptir. EAP kaplamaların özelliklerinin incelenmesi özellikle korozyon uygulamaları açısından önemlidir.

Tel ark sprey prosesi, iki kaplama telinin püskürtme tabancası ucuna beslenerek burada tellerin birbiri ile temas eden bölgesinde bir ark oluşturup ergimesi ve ergiyen metalin kaplama yüzeyine atomize gaz vasıtasıyla yönlendirilerek önceden hazırlanmış altlık yüzeyine biriktirilmesi yöntemidir (Şekil 1.3). Genellikle atomize gaz olarak basınçlı hava kullanılır. Azot, argon ve karbondioksit kullanımı da söz konusudur.



**Şekil 1.3.** Elektrik ark püskürtme tekniği [7]

Tel ark spray yönteminin en büyük avantajı yüksek birikme oranı ve düşük maliyettir. Bu nedenle endüstriyel uygulamalarda aşınma ve korozyon koruyucu kaplama olarak yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Tel ark spray kaplamalar kalın kaplama olarak plastik enjeksiyon kalıplarından ince kaplama olarak da elektrik devrelerine kadar çok geniş uygulama alanlarına sahiptir [17]. Tel ark spray kaplama yöntemi, yüksek püskürtme-birikme oranı ve yüksek verimlilik yanında az sayıda kontrol parametreleri içerir. Bu yöntemin kolay işletim, düşük kurulum ve işletim maliyeti, yeterli derece soğuk altlıkların kullanılabilmesi, elektrodlar için su soğutmaya ihtiyaç duyulmaması ve yüksek saflıkta kaplama üretilebilirliği gibi birçok avantajı bulunmaktadır [18].

### 1.3. EAP Kaplamalar ve Kaplamalara Etki Eden Faktörler

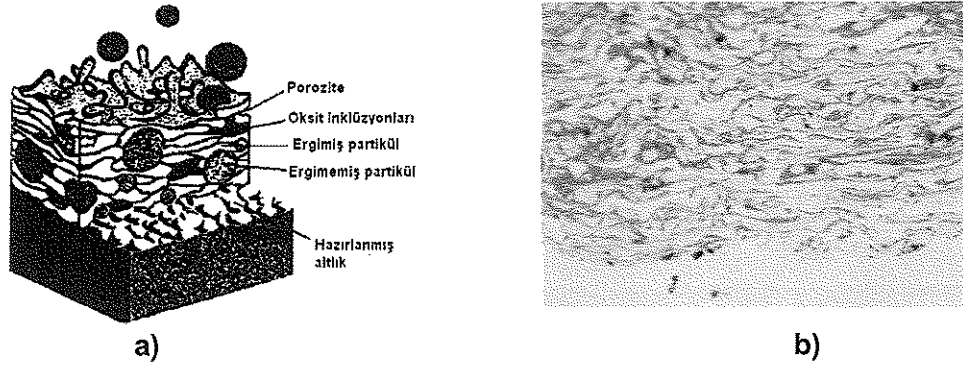
Elektrik ark spray kaplama yapısı diğer termal spray kaplama yapıları gibi, kaplama malzemesinin ergimesiyle oluşan damlacıkların altlık yüzeyine çarpmasını kapsar. Damlacıklar birlikte deformasyona uğrayıp hızlı bir şekilde katlaşır, birbiri üzerine birikmesi ile splatlar oluşur [19]. Yüksek hız ile yüzeye çarpmalarda ergimiş partiküller yüzeyde ince levha şeklini alırlar. Altlığa doğru ısı akışına bağlı olarak çok hızlı şekilde soğuyan bu splatlar (levhasal yapılar) ani olarak katlaşırlar ve deforme olurlar. Bu levhalar başarılı bir şekilde birbirleri üzerine tutunarak birikirse ince bir kaplama yapısı oluşmuş olur. Termal püskürtme prosesinde kaplama yapısındaki empüriteler kaplama yapısı ile birlikte biçimlenir. Bu kaplamalar genellikle dört temel bileşenden meydana gelir. Bunlar; porozite, oksit inklüzyonları, ergimiş partiküller ve ergimemiş partiküllerdir (Şekil 1.4.).

Elektrik ark spray ile ilgili yapılan araştırmalar kaplama mikroyapısının çoğunlukla spray parametrelerine bağlı olduğunu göstermiştir. Kaplama yapısı, ergimiş metal partiküllerinin yüzeye çarpma hızları, deformasyonları ve hızlı katlaşmaları ile biçimlenir. Böylece kaplama yapısının oluşumu ve kaplamanın mekanik özellikleri oluşan partiküllerin boyutları ve altlığa doğru aldıkları yoldaki kinetik enerjilerine bağlı olmaktadır. Proses parametreleri (ark spray tabanca nozul sistemi, akım-voltaj ilişkisi ve tel besleme oranları) oluşan partikülleri ve buna bağlı olarak kaplama yapısını belirler.

EAP prosesinde kullanılan uygulama parametre aralıkları Tablo 1'de verilmektedir. Ergimiş damlacıkların hava jeti içerisindeki boyut dağılımları ve kinetik enerjileri kaplamaların mikroyapılarını etkilemektedir. Ark spray sisteminde oluşan partiküllerin boyut dağılımları 2 ile 200 µm arasındadır [20]. Bu partikül boyut dağılımına bağlı olarak da kaplama yapısı ve mekanik özellikler değişmektedir.

*(Handwritten signature)*

Atomize gaz basıncı, tel besleme oranı, voltaj, akım, sprej mesafesi ve metalik kaplama tel malzemesine bağlı olarak kaplamaların mikroyapısı ve mekanik özellikleri değişmektedir



Şekil 1.4. a) Elektrik ark sprej kaplama yapı bileşenleri [12], b) 13 Cr'lu çelik kaplama mikroyapısı

Tablo 1.1. Elektrik ark sprej proses parametre aralıkları [15]

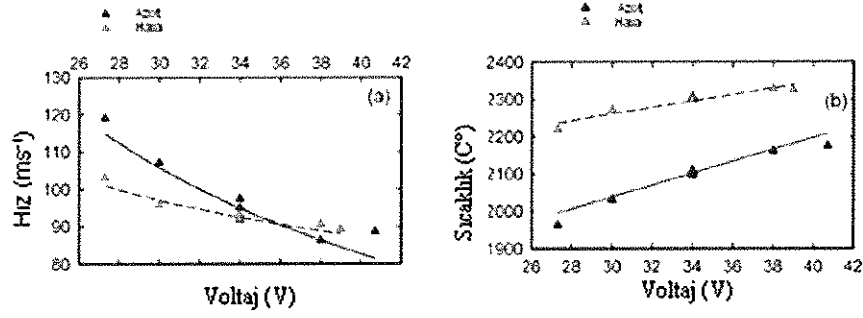
Parametreler	Değer aralıkları
Ark voltajı	25–40 V
Ark akımı	50–400 A
Tel besleme hızı	1–10 m/s
Püskürtme mesafesi	10–15 cm
Atomize gazlar	Hava, azot, karbondioksit
Atomize gaz akış oranı	1–80 m <sup>3</sup> /saat
Sağlanan basınç	0.2–0.7 MPa

### 1.3.1. Püskürtme mesafesinin etkisi

Tavsiye edilen sprej mesafeleri Tablo 1.1. değerinden fazla olup 125 mm ila 200 mm'dir. Standart olan ise 150 mm dir. Sprej mesafesinin az olması oluşan dropletlerin hava ile temas zamanını düşüreceğinden kaplamada oksit içeriği düşük olacaktır. Sprej mesafesinin artması ile de hem oksit oranı artacak ve hem de dropletlerin hızı düşeceği için yüzeye iyi yapışma ve dağılma olmayacaktır. Sonuç olarak kaplamanın porozite içeriği yükselecektir.

### 1.3.2. Voltaj ve Amperin Etkisi

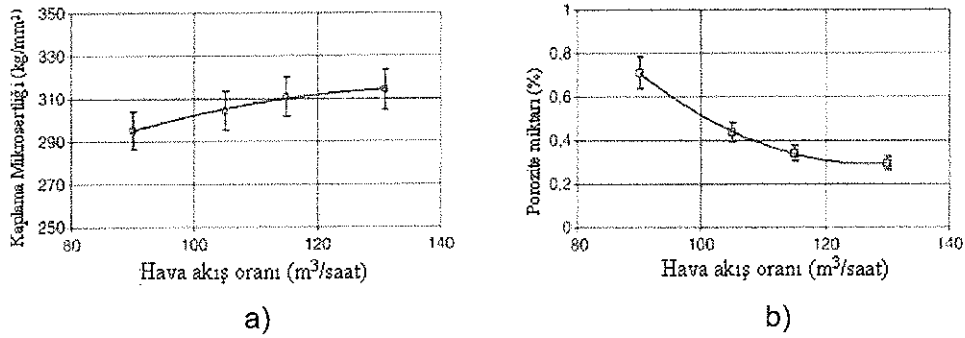
Elektrik ark sprej prosesinde, kaplama malzemesinin ergimesi için gerekli ısı kaynağı tellerin uçlarında oluşan elektrik arkından temin edilir. İstenilen özelliklerde kaplama üretilebilmesi için tel uçlarında oluşacak arkın kararlı olması gereklidir. Ark voltajındaki artış ark sıcaklığını artırır. Püskürtme süresince ark sıcaklığının artması püskürtme sıcaklığını da arttıracaktır. Diğer taraftan ark voltajındaki artış püskürtme hızını düşürmektedir (Şekil 1.5.) [21]. Bunun yanında ark sprej sisteminde akımın artması ile tel besleme hızı artmakta olup, voltaj ve akımın hem teli ergitecek hem de iyi bir besleme sağlayacak şekilde optimum değerlerde olması gerekmektedir. Bu değerlerdeki sapmalar kaplama kalitesini de etkileyecektir.



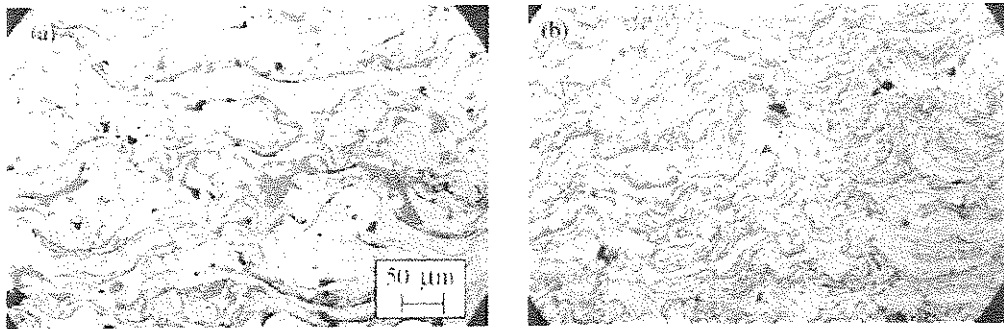
Şekil 1. 5. Ark voltajının spray hızı ve sıcaklığına etkisi [21]

### 1.3.3. Atomize gaz tipinin ve atomize gaz basıncının etkisi

Elektrik ark spray prosesinde atomize gaz olarak genellikle hava kullanılır. Atomize gaz olarak havanın kullanılması partiküllerin oksitlenmesine neden olur ve oksitli kaplama yapıları elde edilir. Bunun yanında oksidasyonu azaltmak için azot, argon ve karbondioksitte kullanılır. Püskürtme prosesinde atomize gaz olarak azot kullanılmasının en temel etkisi, damlacık yüzeylerindeki ekzotermik reaksiyonları ve oksidasyonu engelleyerek püskürtme sıcaklıklarını düşürmesidir. Böylelikle kaplamalardaki oksit miktarı azalır. Fakat buna bağlı olarak kaplamanın sertliği düşer (Şekil 1.6.). Böylece atomize gaz olarak azot kullanıldığında partikül soğuma hızı hava kullanılmasına göre daha yüksek olacaktır [22].



Şekil 1.6. a) Düşük hava akışındaki kaplama mikroyapısı (94 m³/saat), b) yüksek hava basıncındaki kaplama mikroyapısı (130 m³/saat) [22]



Şekil 1.7. a) Hava akış oranı ve mikrosertlik ilişkisi, b) hava akış oranı ve porozite miktarı ilişkisi [16]

Handwritten signature or mark.

Elektrik ark sprey kaplamaların mekanik özelliklerini etkileyen en temel parametre atomize gaz basıncıdır [23,24]. Atomize gaz basıncındaki artış partikül hızını arttıracığı için daha ince lamelli kaplama yapısı oluşacaktır (Şekil 1.7.) [22,23]. Gaz akış hızının artışı ile altlık yüzeyine yayılma daha iyi olacağından daha yoğun kaplamalar elde edilebilmektedir [25].

#### 1.4. Elektrik Ark Püskürtme Kaplama Malzemeleri

Metalik bütün teller bu proses ile kaplanabilmektedir. Kaplamanın yapılabilmesi için gereken ise sadece kaplamada kullanılacak tellerin iletken olmasıdır. Tel beslemeli termal sprey prosesleri, toz beslemeli olanlara göre enerji kullanımı, ergimiş partikül formasyonu, birikme oranı ve kullanım açısından daha verimlidir. Telin ucundan partiküller atomize olarak tamamen ergirler, böylece birikme verimliliği genellikle yüksektir. Bunlara ek olarak tel beslemenin kullanılmasının en önemli nedeni aynı şekildeki toz beslemeden daha ucuz olmasıdır. Her malzemenin tel olarak bu işlem için üretilmesi mümkün olmaktadır. Güvenli besleme için tel malzemesinin yeterli bir esnekliğe sahip olması gerekir. Böylece yeterli bir mukavemet telin zarar görmesini ve yeterli bir süneklik de telin kırılmasını önlemiş olur.

Endüstriyel alanda kaplamalar için kullanılacak tel malzemeler kullanım yeri ve amacına göre değişiklik gösterir. Tablo 1.2'de bazı tel malzemeleri ve kullanım yerleri verilmektedir.

Tablo 1.2. Endüstriyel uygulamalar için bazı tel malzemeleri [7]

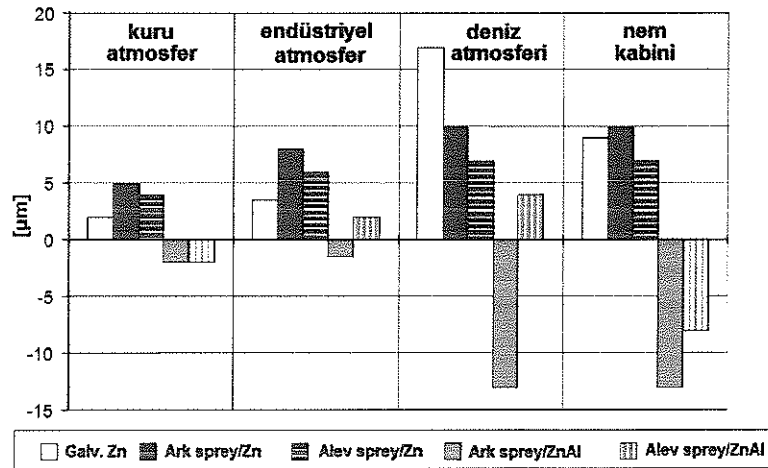
Zn	Korozyon koruma
Zn/Al 85/15	Endüstri ve deniz atmosferinde korozyon koruma, SO <sub>2</sub> 'li ortamlarda yüksek direnç
Al	Endüstri ve deniz atmosferinde korozyondan koruma, 800°C ve yukarıdaki yüksek sıcaklık korozyon dayanımı ve gıda endüstrisinde
AlMg5	Deniz atmosferinde korozyon dayanımı
NiTi	Mükemmel bağ tabakası kaplaması
%13 Cr'lu çelik	Aşınma dayanımı, zayıf korozyon direnci
FeCrAl	Yüksek sıcaklık korozyon dayanımı
Mo	Kazımalı korozyona karşı dayanım
NiCr 80 20	Korozyon dirençli kaplamalar ve seramik üst kaplama için ara tabaka kaplaması

Endüstriyel uygulamalarda çeşitli komponentlerin servis ömrünün uzatılması gerekli olmaktadır. Elektrik ark sprey kaplamalarla kaplanmış komponentlerin agresif ortamlardaki hasara uğrama süresi uzatılır. Bazen de bu ihtiyaç duyulan özellikler metal kaplamalar ile sağlanamayabilir. Bu nedenle özlü tel ile kaplama uygulamaları önem kazanmıştır. Kaplamada istenen üstün mekanik özellikler özlü tel kaplaması ile sağlanabilmektedir. Böylelikle komponentlerin aşınma ve/veya korozyona karşı direnci artırılabilen ve servis ömürleri uzatılabilmektedir. Özlü telde seramik özler ile onu çevreleyen metal çubuk elektrik ark sprey ile kaplanmakta ve sonuçta kompozit karakterli bir kaplama ortaya çıkmaktadır. Tablo-3'de tellerin içinde bulunan bazı öz malzemeleri ve genel uygulama verilmektedir.

Tablo 1.3. Elektrik ark sprej ile özlü tel kaplamalar ve uygulama alanları [7]

Özlü tel	Uygulamalar
FeCMnSi	Kuru atmosferde yüksek aşınma dirençli kaplamalar
FeCrBSi	Aşınma dirençli kaplamalar, iyi genel korozyon dayanımı ve iyi bağ mukavemeti
FeCrBSi+WCCoCr	Mükemmel aşınma dayanımı, iyi genel korozyon direnci ve iyi bağ mukavemeti
FeCrSi	Aşınma dayanımı ve yüksek sıcaklık korozyon dayanımı (900°C'nin üstü)
NiCr 50 50	Yüksek sıcaklık korozyon dayanımı (900°C üstü)
NiBSi+WC	Yüksek abrasif aşınma dayanımlı kaplamalar, iyi genel korozyon direnci
NiCrBSi	Islak atmosferde yüksek korozyon direnci, iyi aşınma dayanımı

Bu konu ile ilgili yapılan çalışmalarda termal sprej Zn/Al 85/15 kaplamaların özellikle endüstriyel ve deniz atmosferinde Zn ve Al kaplamalara göre daha yüksek korozyon dayanımı olduğu belirtilmektedir. M. Zecho ve arkadaşlarının [26] yaptığı çalışmada sıcak daldırma galvaniz Zn kaplama, termal sprej Zn ve Zn/Al 85/15 kaplamaları çeşitli atmosfer koşullarında korozyon oluşumu ve gelişimi açısından kıyaslamıştır.

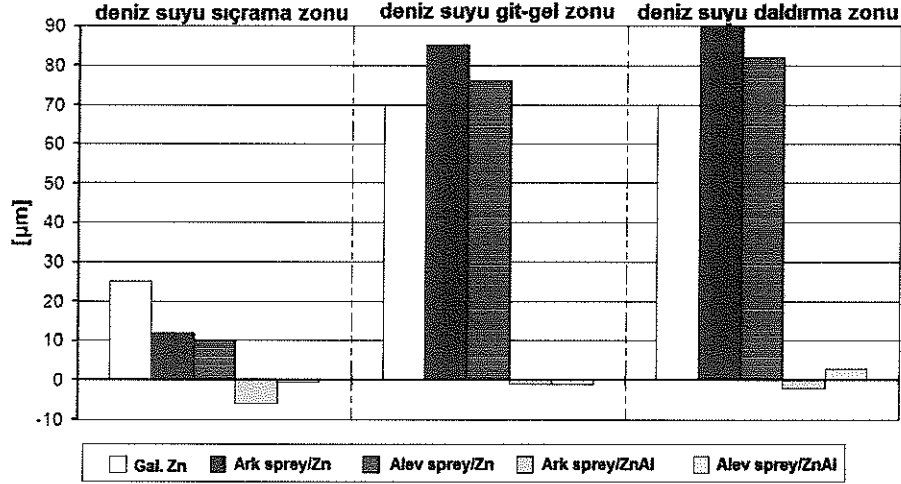


Şekil 1.8. Farklı atmosferlerde 3 yıllık alan testi ile kaplamalarda meydana gelen kalınlık değişimi [26]

*(Handwritten signature)*



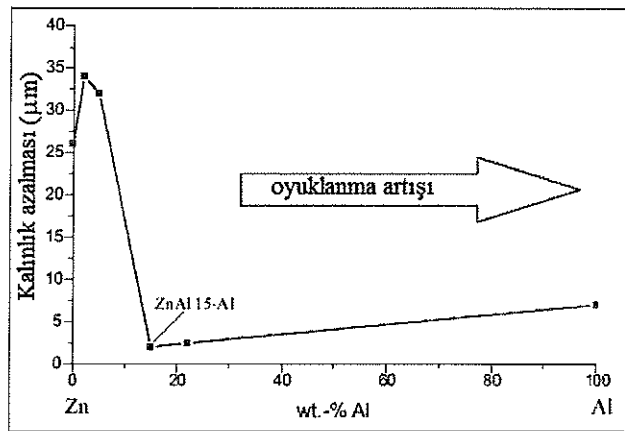
Çeşitli atmosferlerde korozyon performansları kıyaslanan galvanizleme Zn, termal sprej Zn ve Zn/Al 85/15 kaplamalardan özellikle deniz atmosferi, nemli atmosferde ve endüstriyel atmosferde Zn/Al 85/15 kaplamaların Zn kaplamalara (galvanizleme ve termal sprej) göre daha yüksek korozyon performansına sahip olduğu Şekil 1.8'de görülmektedir. En düşük kalınlık azalması Zn/Al 85/15 kaplamada görülmektedir.



Şekil 1.9. Deniz suyunda 3 yıl test sonucu kaplamalarda meydana gelen kalınlık değişimi [26]

Benzer test deniz suyunda yapılmış olup Zn/Al 85/15 kaplamaların Zn kaplamalara göre çok yüksek bir korozyon performansı gösterdiği tespit edilmiştir (Şekil 1.9).

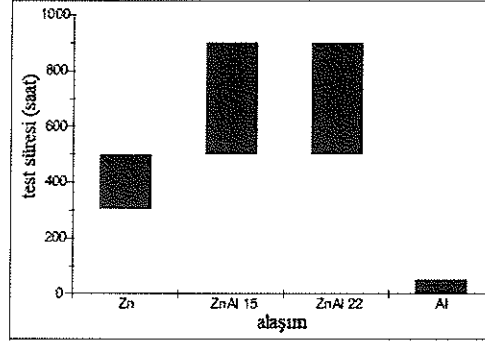
M. Knepper ve J. Spriesterbach'ın [5] yapmış olduğu bir diğer çalışmada tel ark sprej yöntemi ile çelik üzerine uygulanan Zn ve Zn/Al alaşımlarının korozyon performansları tuz püskürtme testi ile karşılaştırılmıştır. 168 saat tuz püskürtme testi sonrası kaplamadaki kalınlık azalması değerlendirilmiştir (Şekil 1.10). Test sonucu kütle azalması değerlendirilmesinde çinkoya alüminyum ilavesi ile tuz püskürtme koşullarında korozyon direnci çarpıcı olarak artmaktadır.



Şekil 1.10. 168 saatlik tuz püskürtme testi sonrası alüminyum içeriğine bağlı olarak kalınlıktaki azalma [5]

*(Handwritten signature)*

Bu çalışmada tuz püskürtme testi boyunca Zn ve Zn/Al alaşım kaplamaların kırmızı pas oluşumuna göre korozyon performansı da değerlendirilmiştir. Buna göre Zn kaplama için kırmızı pas oluşum aralığı 300 – 500 saat iken Zn/Al alaşım kaplamaları için 500 – 900 saat arasında değişmektedir. Bu sonuç da Şekil 1.11'de görülmektedir.



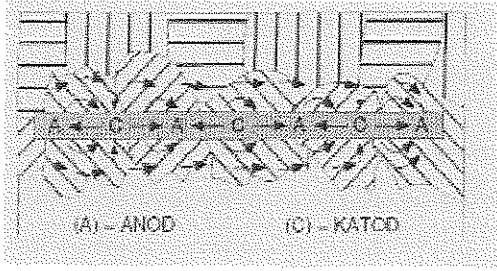
Şekil 1.11. Tuz püskürtme testinde kaplamalardaki kırmızı pas oluşumu [5]

D.J. Varancalle ve arkadaşlarının [6] yaptığı bir başka çalışmada Zn/Al alaşımları olan tel ark sprey Zn/Al 70/30 ile Zn/Al 85/15 kaplamaları karakterize edilerek ASTM B 117 şartlarında 1000 saat süren tuz püskürtme testi sonrası korozyon performansları değerlendirilmiştir. Test sonrasında Zn/Al 70/30 alaşım kaplamasının ortalama korozyon direncinin, Zn/Al 85/15 alaşım kaplamasının ortalama korozyon direncinden yüksek olduğu tespit edilmiştir.

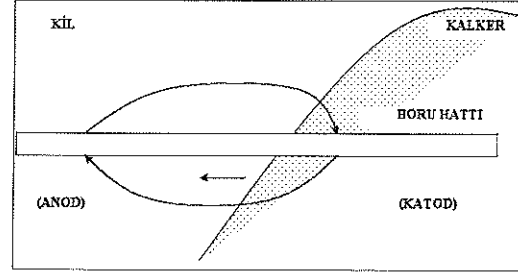
Düktil demir modern toplumlarda su iletim ve dağıtım hatlarında en çok kullanılan boru malzemesidir. Yüksek mukavemet, tokluk ve ince et kalınlığında üretilme avantajlarından dolayı gün geçtikçe de kullanımı yaygınlaşmaktadır. Su iletim ve dağıtım hatlarında kullanılan düktil demir boru hasarlarının birincil nedeni korozyondur. Özellikle homojen olmayan toprak yapısı (farklı pH, Cl<sup>-</sup> iyon yoğunluğu, toprak özdirenci ve sülfat içeriği gibi) nedeniyle toprak içine gömülmüş bu malzemeler hızlı bir şekilde korozyona uğrayarak servis dışı kalmaktadır (Şekil 1.12) [27-31].

Toprak altında servis veren düktil demir boruların korozyon kontrolünün sağlanması için uygulanan yöntemlerden biri de tel ark sprey Zn ve Zn/Al 85/15 kaplamalardır. Bu kaplamaları takiben bitüm veya epoksi son kat boya (polimer kaplama) uygulanır [32]. ABD'de ise sadece polietilen giydirme yapılarak borular kullanılmaktadır. Düktil demir boru üretimi aşamasındaki ısı işlem nedeniyle yüzeyde oluşan oksit tabakasının korozyon koruma için yeterli olduğu belirtilmektedir [33–36]. Avrupa ve Japonya'da ise sadece düktil demir üretiminden sonra tel ark sprey Zn ve Zn/Al 85/15 kaplamalar uygulanmaktadır [34]. Düktil demirlerde Zn/Al 85/15 kaplama uygulaması yeni bir eğilim olup Zn kaplamaya göre daha yüksek koruma gösterdiği tam olarak ortaya konulmamıştır.

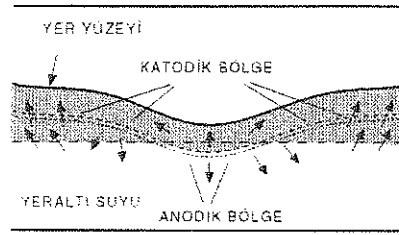
*(Handwritten signature)*



a)



b)



c)

**Şekil 1.12.** Heterojen toprak yapısına bağlı olarak korozyon hücrelerinin meydana gelmesi; a) Kısa mesafede toprakta farklı bölgelerin oluşumu ile korozyon hücrelerinin oluşması, b) Uzun mesafede heterojen toprak yapısına bağlı olarak boruda oluşan galvanik hücre, c) Çözülmüş tuz konsantrasyonunun farklı oluşundan ileri gelen korozyon [31].

*J*

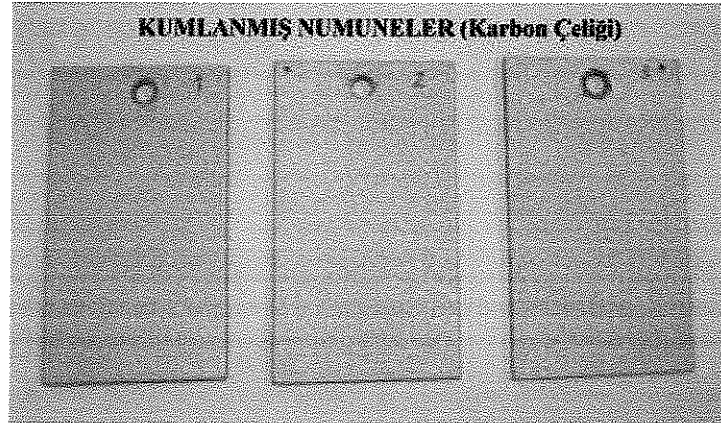
## BÖLÜM II. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Optimizasyon amaçlı ön kaplamalar ve deneyler, farklı parametrelerde üretilen numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Uygulamalarda, tel ergitme akımı ve atomizasyon gaz (hava) basıncı değiştirilerek numuneler üretilmiştir. Numuneler XRD ve mikroyapısal analizlerle karakterize edilmiştir. Belirlenen bu sonuçlara bağlı olarak optimum kaplama parametreleri belirlenmiş ve bu şartlarda numuneler üretilmiştir.

### 2.1. Kaplamaların Üretim Aşamaları

Deneysel numuneler olan Zn/Al 85/15 ve Zn esaslı kaplamalar farklı iki parametre değiştirilerek (akım ve atomizasyon gaz basıncı) üretilmiştir. Öncelikle kaplama akımları, 100 A, 200 A, 300 A ve 350 A aralığında değiştirilmiştir. Daha sonra ise 1.5, 3, 4.5 bar atomizasyon gaz basıncında kaplamalar üretilmiştir. Üretilen kaplamaların yüzey kalite değerleri (Ra, Rz), kalınlıkları ve yapışma mukavemetleri belirlenmiştir.

Kaplamaların adhezyonunun mekanik olmasından dolayı, tüm numunelere kaplama öncesi kumlama işlemi uygulanmıştır (Şekil 2.1). Kumlama sonrası elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri 5,6 mm tarama mesafesinde; Ra:98 µm ve Rz:124 µm olarak ölçülmüştür. Ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerleri, iyi bir yapışma mukavemeti için (2.4-3.1 MPa) uygun değerlerdir [37].



Şekil 2.1. Kumlama sonrası çelik numunelerin yüzey görüntüsü

#### 2.1.1. Kaplamaların Üretilmesi

Kaplamalar, manuel olarak belirli bir sistematik hareket doğrultusunda üretilmiştir. Tablo 2.1'de kaplamaların üretim parametreleri verilmiştir. Manuel üretim, tabaka kalınlığının homojen olmamasına neden olmuştur.

*(Handwritten signature)*

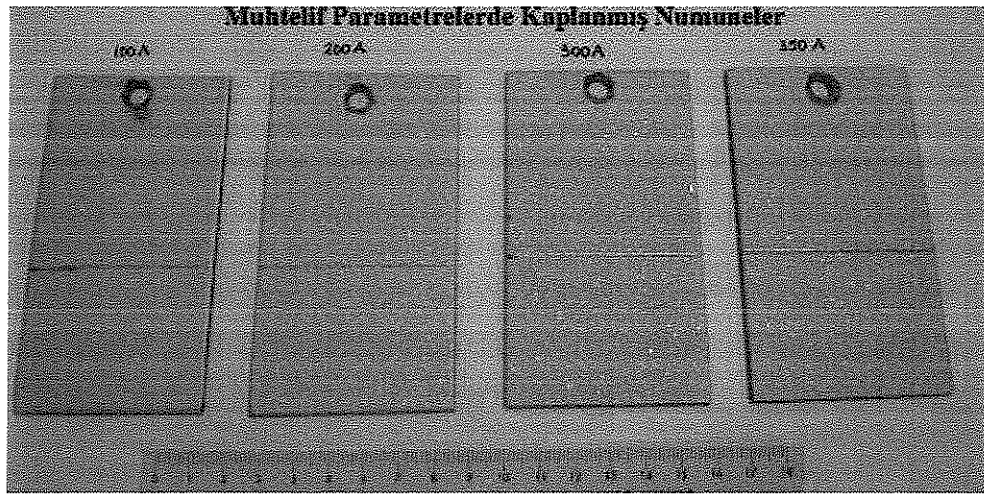
Tablo 2.1. Kaplama üretim parametreleri (Zn ve Zn/Al 85/15 alaşımları için)

Parametreler	I-Numune 100 Amper	II-Numune 200 Amper	III-Numune 300 Amper	IV-Numune 350 Amper
Püskürtme Mesafesi, (mm)	150 mm sabit			
Kaplama Akımı, A, (amper)	100	200	300	350
Voltaj, V, (volt)	23	22	20	20
Tel Besleme Hızı (cm/dk)	Artan ampere bağlı olarak artmaktadır.			
Hava Basıncı (bar)	3	1,5 - 3- 4,5	3	3

Şekil 2.2'de kaplama süreci ve kaplanmış bir numunenin fotoğrafı görülmektedir. Her bir akım değerinde en az 3 numune üretilmiş olup (Şekil 2.3), numuneler daha sonra küçük parçalara kesilerek faz analizi, mikroyapı incelemeleri ve mekanik testler için kullanılmıştır.



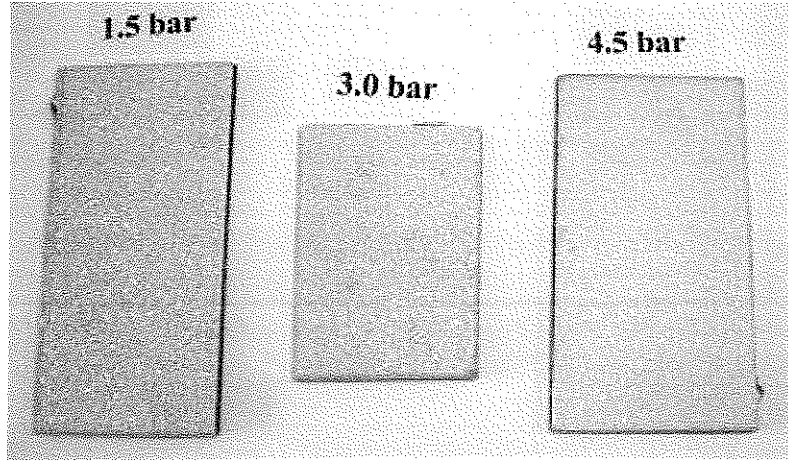
Şekil 2.2. Kaplama operasyonu (Zn/Al 85/15) ve kaplanmış numunenin görüntüsü



Şekil 2.3. Farklı ergitme akımlarında kaplanmış Zn/Al 85/15 numuneler (100–200-300-350 A)

*(El yazması)*

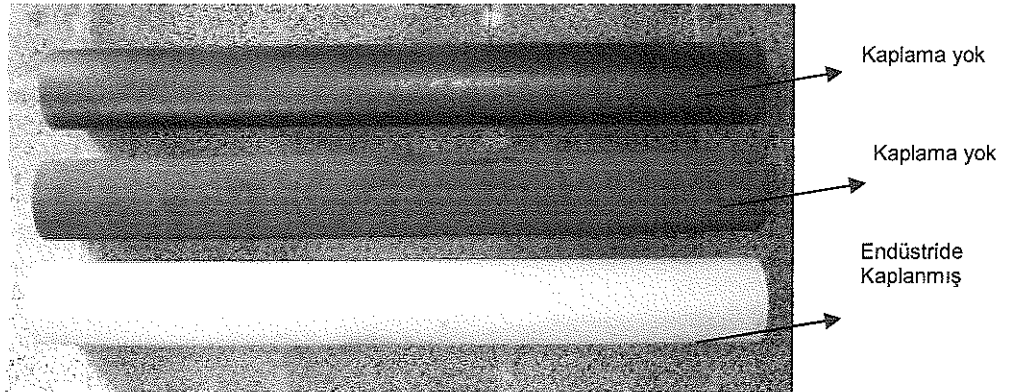
Değişen atomizasyon gaz hava basıncına bağlı olarak farklı yüzey kalitesinde üretilen kaplamalar Şekil 2.2 ila Şekil 2.4'de görülmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi artan gaz basıncında kaplamaların yüzey kalitesinde bir artma/ iyileşme tespit edilmiştir.



Şekil 2.4. Farklı atomizasyon gaz basıncında üretilen Zn/Al 85/15 numunelerin görünümü

### 2.1.2. Endüstriyel Uygulamalara Yönelik Düktil Demir Boru Kaplama Çalışmaları (Zn ve Zn/Al 85/15)

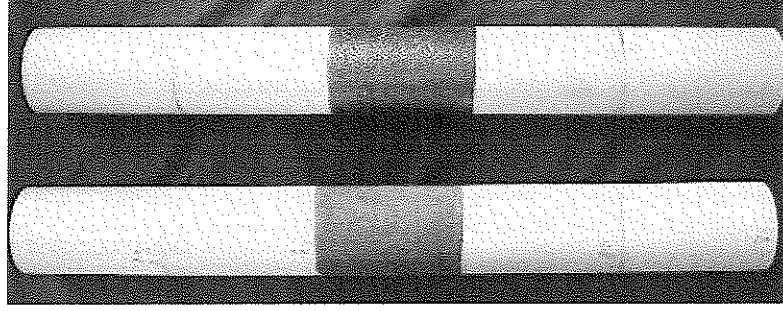
Endüstriden temin edilen ısıtım işlem uygulanmamış, 900°C de 1 saat süreyle tavlınmış ve farklı kalınlıklarda kaplama uygulanmış düktil borular Şekil 2.5'de görülmektedir. Günümüzde su iletım hatlarında kullanılan borulara (Ø100mm) standartlarda belirtildiği şekilde 200 g/m<sup>2</sup> ağırlığında Zn kaplanmıştır.



Şekil 2.5. Düktil demir borular a) Isıtım işlem görmemiş b) Tavlınmış c) Endüstride kaplanmış

Endüstriyel uygulamalar ile karşılaştırma amacıyla projemiz çerçevesinde laboratuvarımızda farklı kalınlıklarda kaplanma uygulanmış düktil demir boru numuneleri Şekil 2.6'da görülmektedir. Boruların ağırlığı ve yüzey alanları belirlenerek kaplama öncesi tartımlarla kaplama sonrası tartımlar arasında yapılan hesaplama sonucunda borulara yaklaşık 200 g/m<sup>2</sup> ile 400g/m<sup>2</sup> ağırlıklarında Zn ve Zn/Al 85/15 kaplamaları uygulanmıştır.

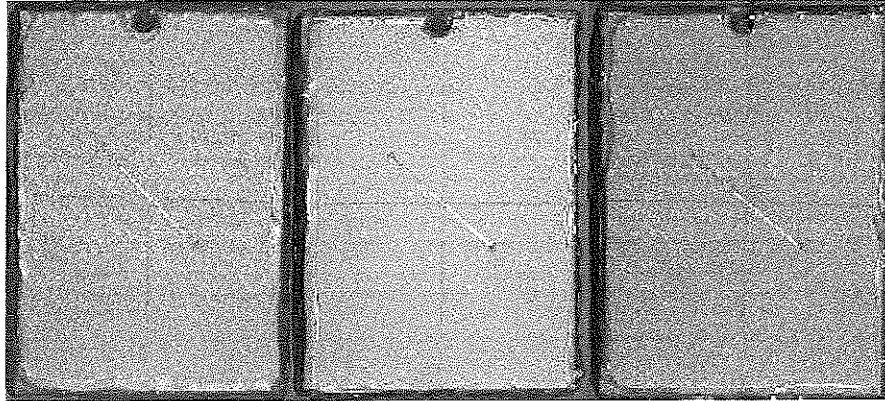
*(Handwritten signature)*



Şekil 2.6. Laboratuvar koşullarında EAS yöntemi ile farklı kalınlıklarda kaplanmış numuneler

### 2.1.3. Tuz Püskürtme Testi

Zn ve Zn/Al 85/15 kaplanmış numuneler, hızlandırılmış korozyon testi olan tuz püskürtme testine tabi tutulmadan önce numunelerin kaplanmayan tüm kısımları silikon ile izole edilmiştir (Şekil 2.7). Tuz püskürtme testinde 150x100x3 mm ölçülerinde, standartlara uygun şekilde hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Kaplamalar, ağırlık oranları 200 gr/m<sup>2</sup> ve 400 gr/m<sup>2</sup> olacak şekilde üretilmiş olup kalınlıkları 40 µm ve 100 µm arasında değişmektedir. Korozyon testi için hazırlanan Zn, Zn/Al 85/15 ve Al numunelerin çizilmiş haldeki yüzey görüntüleri Şekil 2.7'de verilmiştir.

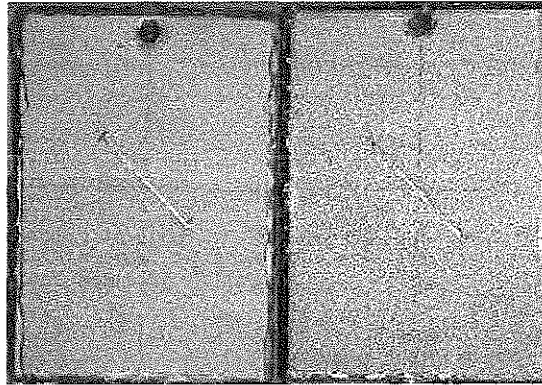


3B 100A Zn

3B 200A Zn

3B 300A Zn

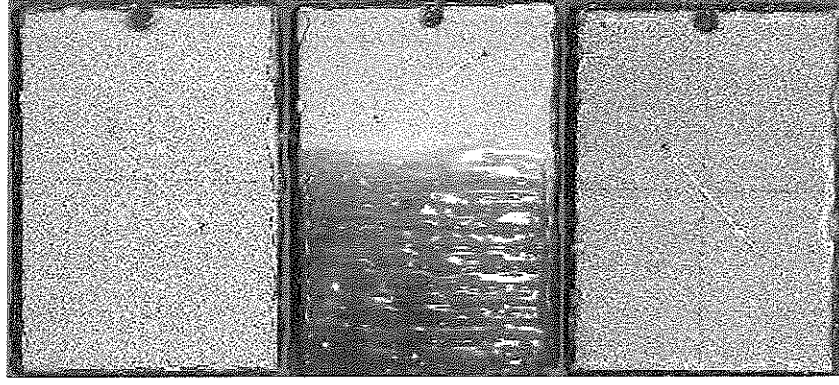
a) Farklı parametrelerde Zn kaplanmış ve çizilmiş numuneler



3B 150A Zn/Al 85/15 3B 200A Zn/Al 85/15

b) Farklı parametrelerde kaplanmış Zn/Al 85/15 numuneler

*(Handwritten signature)*

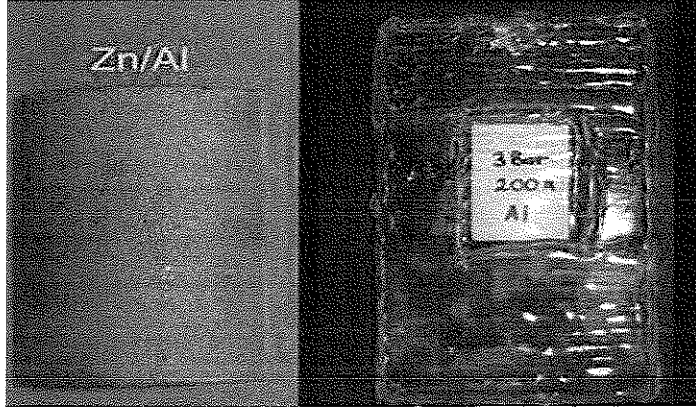


3B 200A Al      3B 250A Al      3B 300A Al  
c) Farklı parametrelerde kaplanmış Al numuneler

Şekil 2.7. İzole edilmiş tuz testine hazır numuneler a) Zn ; b) Zn/Al 85/15 ve c) Al

Numune yüzeylerine standartlarda belirtildiği şekilde kenar ve köşelerden 2.5 cm uzaklıkta "I" formunda bir çizik açılmıştır. Bu amaçla özel yapım WC-Co uçlu bir kalem kullanılmıştır.

Ayrıca, ticari olarak satılan galvanizlenmiş sac numuneler ve endüstride kullanılan düktil boru parçalarına kaplama uygulanmış ve diğer test numuneleri de benzer şekilde hazırlanmıştır (Şekil 2.8). Boru yüzeyine uygulanan uzunluğu 5 cm ve genişliği 1 mm olan bir çizik oluşturulmuştur.



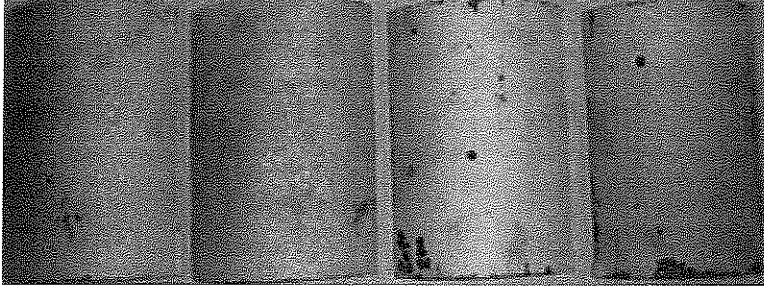
Şekil 2.8. Kaplanmış ve izole edilmiş numunelerin görüntüsü

Daha sonraki aşamada ise kaplanmış borulardan 150x100 mm ölçülerinde parçalar kesilerek tuz püskürtme testi için hazırlanmıştır. Kaplama öncesi bir grup boru malzemesine tavlama ısıl işlemi uygulanmış ve sonrasında kaplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan numuneler Şekil 2.9-Şekil 2.11'de görülmektedir.

*(Handwritten signature)*



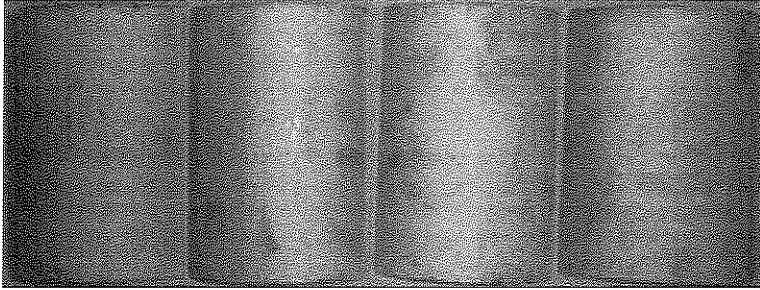
a) Grup I. (Isıl işlem görmemiş farklı kalınlıklarda Zn ve Zn/Al 85/15 kaplanmış)



Şekil 2.9. Altlıkları ısıl işlem görmemiş numuneler

Zn 200      Zn 400      Zn/Al 200      Zn/Al 400

b) Grup II. (Isıl işlem uygulanmış farklı kalınlıklarda Zn ve Zn/Al 85/15 kaplanmış)

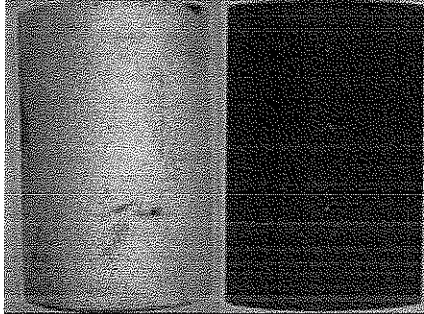


Şekil 2.10. Altlığa ısıl işlem uygulanmış ve daha sonra kaplanmış numuneler

Zn 200 T      Zn 400 T      Zn/Al 200 T      Zn/Al 400 T

(T: tavllanmış)

c) Grup III. (Zn kaplamalı düktil demir boru ve tavllanmış düktil demir boru (Zn kaplamasız))



Şekil 2.11. Endüstriden temin edilen boru parçaları

Zn 200 E      Tavllanmış boru

(E: Endüstri'de kaplanmış)

#### • Koroziyon Ortamının Hazırlanması

Kaplamaların tuz püskürtme korozyon testleri ASTM B117 standardında belirtilen şekilde gerçekleştirilmiştir. Test ortamı, saf su ve %5'lik NaCl içeren bir tuz çözeltisinden meydana gelmiştir. Test çözeltisinin; pH, microsiemens değeri ve sıcaklığı test parametreleri olarak seçilmiştir.

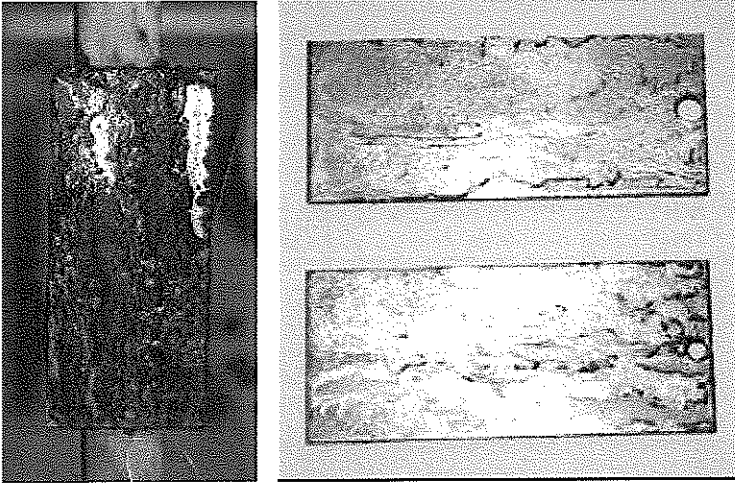
Parametre / Değerler		Koroziyon Çözeltisinin pH	6.5-7.2
Sıcaklık	35 °C	Tuz çözeltisi buharının	25 °C
Çizik Genişliği	1 mm	Çizik Derinliği	1 mm

*(Handwritten signature)*

- **Numunelerin Yerleştirilmesi ve Test Süreci**

Korozyon testlerinin, ASTM B117' de belirtildiği şekilde kontrol amacıyla bir tane kaplanmamış normal çelik plaka test ortamına yerleştirilmiştir. Bu standarda göre, bu plaka yüzeyinde meydana gelen korozyonun, ağırlık kaybı olarak %20 seviyesinin altında olması gerekmektedir (ASTM B117). Testler sonrası, referans numunelerin yüzey görüntüleri Şekil 2.12'de verilmiştir.

Numuneler, Şekil 2.13'de görüldüğü gibi test ortamına 15–30°'lik açı ile yerleştirilmiştir. Numunelerin yüzeyinde korozyon ürünü olan kırmızı pas oluşumunun kontrol aralığı, test bilgilerinin (sıcaklık, pH) alınması ve kontrol edilmesi 24 saatlik periyotlarda yapılmıştır.



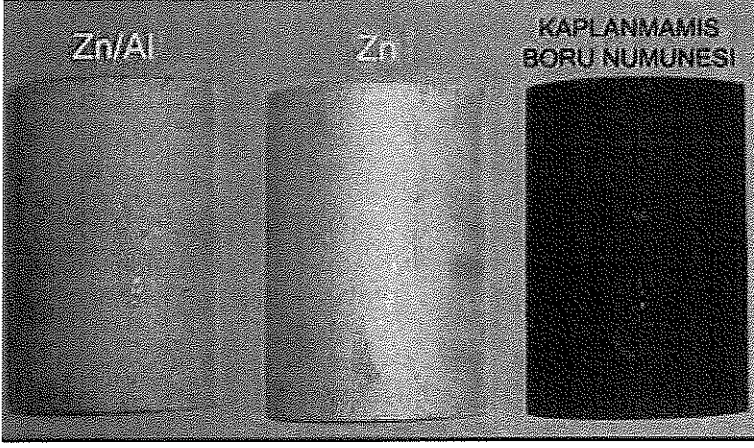
Şekil 2.12. Referans numuneler a) Korozyona uğramış sac b) Temizlenmiş sac halinde



Şekil 2.13. Test numunelerinin test ünitesindeki yerleşimi

Endüstriden temin edilen ve laboratuvarımızda kaplanan düktül boru parçaları da tuz testine tabi tutulmuştur (Şekil 2.14).

*(El yazması)*



Şekil 2.14. Yüzeyi ark spreyle Zn/Al 85/15 ve Zn kaplanmış düktil boru parçaları

*J*

## BÖLÜM III. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME

### 3.1. Kaplama Kalınlığı ve Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü (Zn/Al)

a) Tabaka kalınlığı ölçüm ve sonuçları, manuel kaplamanın sonucu olarak bir numune yüzeyinde farklı noktalarda farklı tabaka kalınlığı elde edildiğini göstermektedir (Tablo 3.1). Kaplama kalınlığındaki bu dalgalanma, kaplamaların manuel olarak üretilmesinin bir sonucu olmakla birlikte, kullanılan ark sprey cihazının prensibi ile de ilgilidir. Yüksek akımda çalışan cihaz, tabancaya daha hızlı bir şekilde tel beslemektedir. Bu durum üretilen tabaka kalınlığının artmasına yol açmaktadır. Kaplama parametrelerinin belirlenmesinde, cihazı üreten firmanın tavsiye ettiği parametrelerle birlikte, tarafımızdan modifiye edilen kaplama parametreleri de kullanılmıştır.

b) Üretilen kaplamaların yüzey pürüzlülüğü değerleri Tablo 3.2'de görülmektedir. Artan kaplama akımında yüzey kalite değerlerinin yükseldiği diğer bir ifadeyle, yüzey kalitesinin bozulduğu Tablo 3.2'de görülmektedir. Bu durum, artan akım yoğunluğunda sistemin tabancaya hızlı tel beslemesi neticesinde gelişen bir durum olmakla birlikte, hızlı tel besleme sonucu bu teller tamamen ergitmek için yeterli zamanı bulamamakta ve kaplama tam ergimemiş metal damlacıklarının birikmesi ile oluşmaktadır [21]. Bu durum, yüzey kalitesinin azalmasına sebep olmaktadır.

Tablo 3.1. Kaplama kalınlığı-numune pozisyonu ilişkisi (atomizasyon gaz basıncı sabit, 3 bar)

Ölçme Pozisyonu	Kaplama Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )			
	I-Numune 100 Amper	II-Numune 200 Amper	III-Numune 300 Amper	IV-Numune 350 Amper
Üst Kısımdan	84,110,92	178,150,184	494,432,384	450, 412, 450
Orta Kısımdan	166, 152,154	352,338,416	550,542,648	594,534, 520
Alt Kısımdan	164, 134, 138	364,288,294	522, 440, 430	438,458,468

Tablo 3.2. Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri ( $R_z$ ,  $R_{\text{max}}$ ), (gaz basıncı 3 bar sabit).

Ölçme Pozisyonu (ölçme mesafesi $L_c$ : 5,6 mm)	Yüzey Pürüzlülüğü, $R_z$ / $R_{\text{max}}$			
	I-Numune 100 Amper	II-Numune 200 Amper	III-Numune 300 Amper	IV-Numune 350 Amper
Üst Kısımdan	45,9/51,2	62,4/93,8	62,0/75,1	70,2/85,9
Orta Kısımdan	51,4/71,9	55,5/71,2	59,1/76,4	63,4/92,7
Alt Kısımdan	45,8/58,6	50,5/59,8	66,1/82,0	67,3/76,6

Farklı atomizasyon gaz basınçlarında üretilen kaplamaların kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü değerleri Tablo 3.3'de görülmektedir. Gaz basıncının artması, kaplamaların

kalınlığını azaltmaktadır. Bu durum oluşan kaplama yapısının yoğunluğu ile ilişkilidir. Yůksek gaz basıncında ۆretilen kaplamalarda, kaplamayı oluşturan metal damlacıkları yůksek kinetik enerjiye sahip olurlar. Bu durum, kaplamanın yoğunluğunun artmasına yol aęar. Gaz basıncının artması kaplamaların yۆzey kalitesini geliştirmiştir [15,21]. Důřük gaz debisinde ۆretilen kaplamaların yۆzeyi çok kaba olduğundan yۆzey pۆrۆzlۆlۆđü değer, ۆlۆm cihazının sınırları dışında kaldığından herhangi bir değer numune ۆzerinden alınamamıştır.

Tablo 3.3. Hava basıncına bağlı tabaka kalınlığı ( $\mu\text{m}$ ) ve yۆzey pۆrۆzlۆlۆđü değerleri (Rz)

Ölçme Pozisyonu Lc: 5,6 mm	Hava Basıncı: 1,5 bar		Hava Basıncı: 3,0 bar		Hava Basıncı: 4,5 bar	
	Tabaka Kalınlığı	Yۆzey Pۆrۆzlۆlۆđü	Tabaka Kalınlığı	Yۆzey Pۆrۆzlۆlۆđü	Tabaka Kalınlığı	Yۆzey Pۆrۆzlۆlۆđü
Üst Kısımdan	288,185, 262	Ölçülemedi (yۆzey çok pۆrۆzlۆ)	178, 150,184	62,4 / 93,8	142,130, 200	
Orta Kısımdan	318, 320,310		352,338, 416	55,5 / 71,2	180, 160,228	36,5
Alt Kısımdan	294, 246, 278		364,288, 294	50,5 / 59,8	122,116, 158	

### 3.1.2. Kaplama Kalınlığı ve Yۆzey Pۆrۆzlۆlۆđü Ölçümü (Zn)

Saf Zn telinin pۆskürtölmesiyle ۆretilen kaplamaların ۆretiminde Zn/Al 85/15 alaşımında kullanılan ۆretim parametreleri kullanılmıştır (Tablo 3.4). Kaplamaların kalınlık ve yۆzey pۆrۆzlۆlۆđü (Tablo 3.5) ۆlۆmleri benzer şekilde gerçekleştirilmiştir.

Saf Zn telinin ergime sıcaklığı Zn/Al 85/15 alaşımından ۆretilen tele gۆre daha dۆřüktür [5] . Bu durum, kaplama kalınlığı ve yۆzey pۆrۆzlۆlۆđü değerlerine etki etmiştir. Zn telinden ۆretilen kaplamaların kalınlığı daha az, yۆzey kalitesi ise Zn/Al 85/15 alaşımına gۆre daha yۆksektir.

Tablo 3.4. Kaplama kalınlığı-numune pozisyonu ilişkisi (gaz basıncı sabit, 3 bar)

Ölçme Pozisyonu (ölme mesafesi Lc: 5,6 mm)	Kaplama Kalınlığı (mikron)			
	I-Numune 100 Amper	II-Numune 200 Amper	III-Numune 250 Amper	IV-Numune 300 Amper
Üst Kısımdan	80, 78, 106	182, 156,150	180, 256, 184	286, 220, 204
Orta Kısımdan	160, 130, 126	196, 184,174	154, 126, 112	222,242,194
Alt Kısımdan	138, 112, 106	154, 124,174	152,122, 150	194,270, 280

*(Handwritten signature)*

Tablo 3.5. Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri (Rz, Rmax)

Ölçme Pozisyonu (ölçme mesafesi Lc: 5,6 mm)	Yüzey Pürüzlülüğü, Rz - Rmax			
	I-Numune 100 Amper	II-Numune 200 Amper	III-Numune 250 Amper	IV-Numune 300 Amper
Üst Kısımdan	19,8- 34,1	24,7- 32,4	25,8- 31,7	23,1- 45
Orta Kısımdan	17,4- 22,6	25,9- 29,5	22,1- 27,3	26,5- 32,3
Alt Kısımdan	22,4- 24,6	22,1- 31	22- 28,1	22,3- 27,9

Zn/Al 85/15 alaşımı tellerinin farklı parametrelerde kaplanmasıyla üretilen kaplamaların yüzey pürüzlülüğü, yüzeylerin çok kaba olması nedeniyle ölçülemezken, saf Zn kaplamasının yüzey pürüzlülüğü değerleri daha düşük olarak ölçülmüştür (1,5 bar gaz basıncında üretilen tabaka dışında).

Tablo 3.6. Hava basıncına bağlı tabaka kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü, (Sabit akım, 200 A)

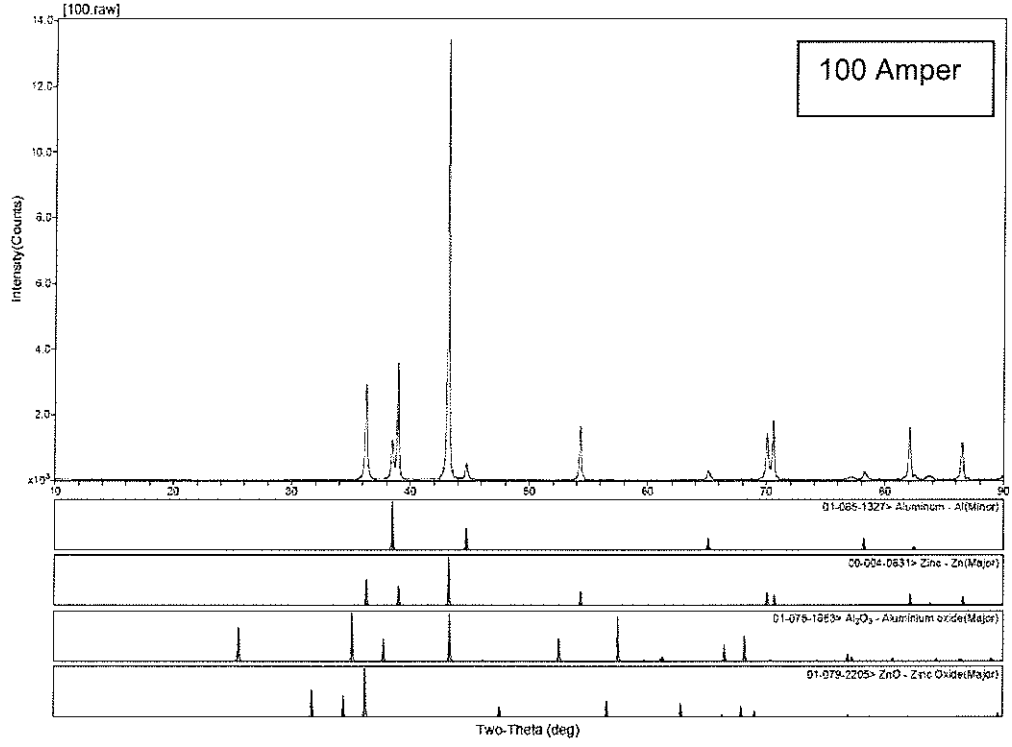
Ölçme Pozisyonu Lc 5.6 mm	Hava Basıncı: 1,5 bar		Hava Basıncı: 3,0 bar		Hava Basıncı: 4,5 bar	
	Tabaka Kalınlığı	Yüzey Pürüzlülüğü	Tabaka Kalınlığı	Yüzey Pürüzlülüğü	Tabaka Kalınlığı	Yüzey Pürüzlülüğü
Üst Kısımdan	254, 260, 360	Ölçülemedi (yüzey çok pürüzlü geldi)	182, 156,150	24,7- 32,4	216, 142,112	21,4- 27,9
Orta Kısımdan	298, 388, 218		196, 184,174	25,9- 29,5	104, 75, 82	19- 23,6
Alt Kısımdan	216, 180, 162		154, 124,174	22,1- 31	80, 86, 96	19,6- 23,5

### 3.2. X-Işını Difraksiyonu / Analizi

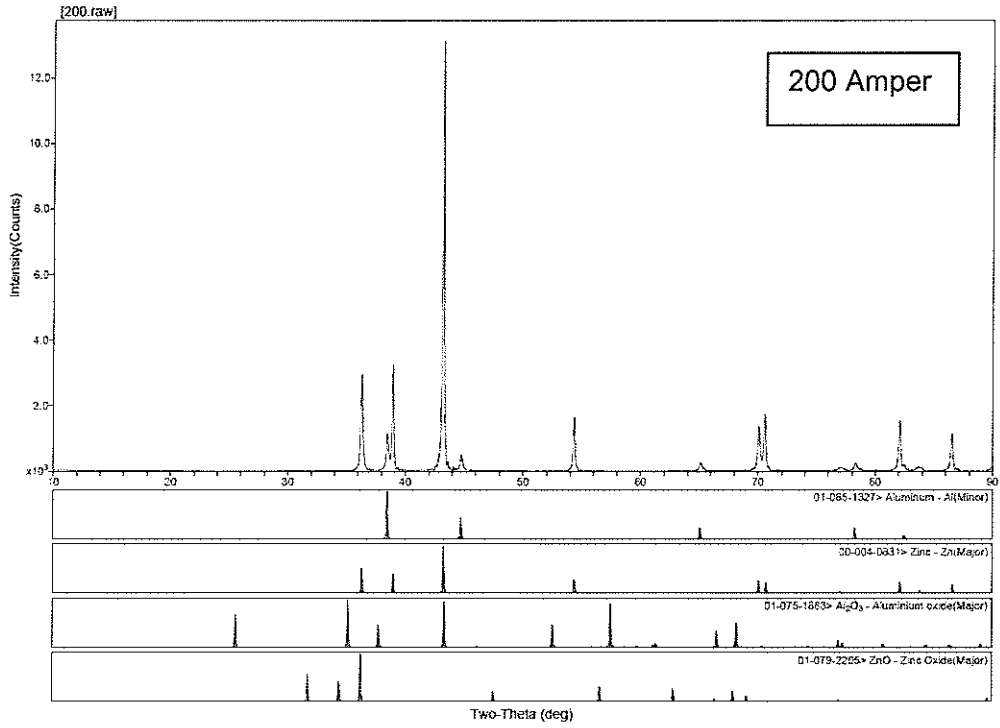
Kaplamalarda oluşan fazların belirlenmesinde Rigaku model bir X-ışını cihazı kullanılmıştır. Ölçüm parametreleri olarak, 2°/dk hızla 10–90° arasında ölçüm gerçekleştirilmiştir. Kaplamaların faz yapısının değerlendirilmesi hem otomatik hem de elle yapılmıştır.

#### • Zn/Al 85/15 Kaplamaları

Bu kaplamaların faz yapısında tespit edilen fazlar, üretim parametresi olan amperden bağımsız olarak Zn ve Al meydana gelmiştir. Tabaka içerisinde mutlaka ZnO ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> türü bileşenlerin varlığı proses gereği kaçınılmaz olmakla birlikte püskürtme sürecinde oluşan alüminyumoksit ya çok incedir yada soğuma/katılma hızına bağlı olarak amorf karakterde olabilmektedir. Elde edilen X-ışınları difraksiyon çıktıları aşağıda verilmiştir (Şekil 3.7–3.9).

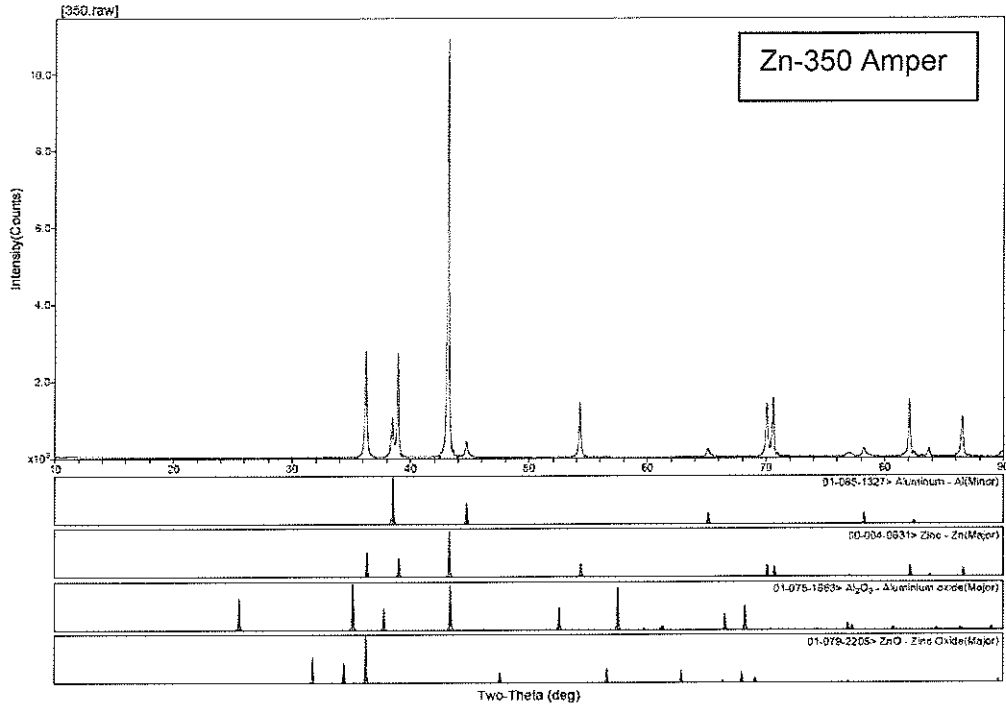


Şekil 3.7. 100 A'de üretilen Zn/Al 85/15 kaplamasının XRD çıktısı.



Şekil 3.8. 200 A'de üretilen Zn/Al 85/15 kaplamasının XRD çıktısı

8



Şekil 3.9. 350 Amperde üretilen Zn/Al 85/15 kaplamasının XRD çıktısı.

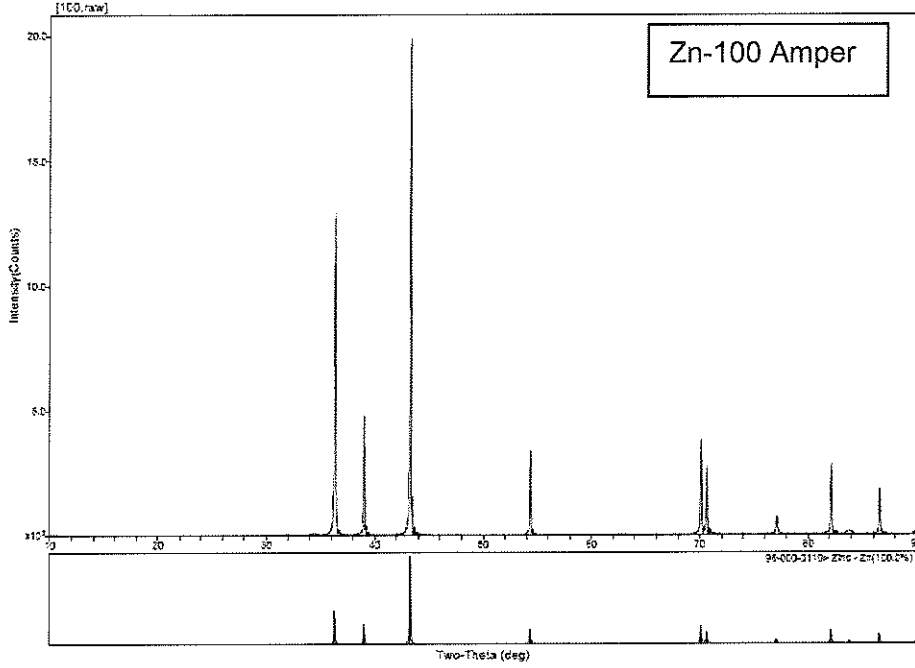
Farklı parametrelerde üretilen Zn/Al 85/15 kaplamalarının tüm XRD çıktılarında Al ve Zn ait pikler tespit edilmiştir. Fakat bu fazların yanı sıra kaplama tabakasında ZnO ve  $Al_2O_3$  fazının da oluşması beklenmektedir [8,11]. Farklı akım yoğunluklarında üretilen kaplamaların XRD çıktıları birbirine benzemekte olup, artan akım yoğunluğunun faz ve oksit yapısı üzerine etkisi net bir şekilde tespit edilememiştir.

- **Zn Kaplamaları**

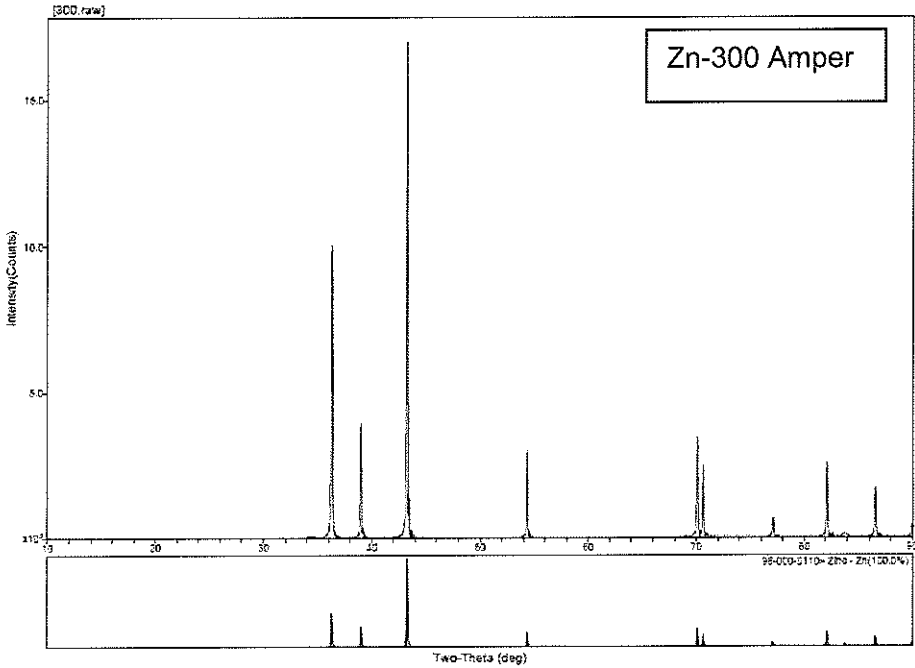
Düşük ve yüksek akım yoğunluğunda üretilen Saf Zn kaplamasının XRD çıktıları Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de görülmektedir. Zn kaplamasının faz analizinde sadece saf Zn ya ait X-ışınları pikleri gözlenmiştir. ZnO fazının oluştuğuna dair bir pik gözlenmemiştir. Bunun nedeni Zn'in tel ark spreyci kaplama prosesindeki oksidasyonunun düşük olmasıdır [11]. Ayrıca artan akım yoğunluğunun kaplamanın faz yapısına bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

*J*





Şekil 3.10. 100 A'de üretilen saf Zn kaplamasının XRD çıktısı



Şekil 3.11. 300 A'de üretilen saf Zn kaplamasının XRD çıktısı

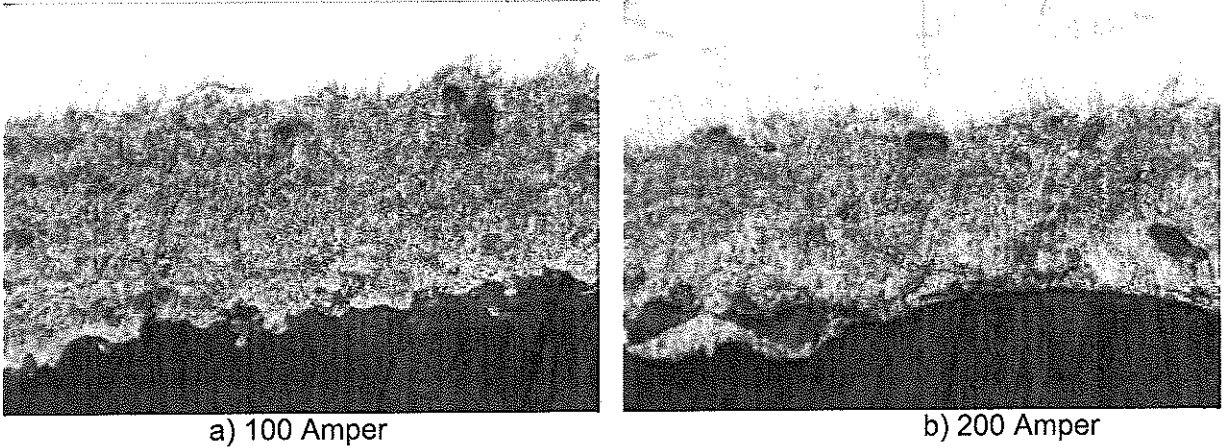
XRD analizinde Zn ve ZnO difraksiyon çizgileri  $2\theta$ 'nın  $36^\circ$  olan noktasında üst üste çakışmaktadır. Bu durumda oluşan yapının Zn veya ZnO olduğu konusunda bir yanılığ olabilir. Fakat numune yüzeyinde yapılan EDS analizlerinde oksit varlığı, oluşan tabakanın ZnO karakterli olduğunu göstermektedir.

*(Handwritten signature)*

### 3.3. Mikroyapı İncelemeleri

Numunelerin mikroyapı incelemelerinde klasik metalografik teknikler, kısmen modifiye edilerek kullanılmış ve numuneler kesme, zımparalama ve parlatma aşamalarından geçirilmiştir. Kalıplama operasyonu, soğuk reçine tercih edilerek yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri optik mikroskop yardımıyla yapılmış olup, incelemelerde özellikle kaplama-altlık ara yüzeyine ve oksit yapıların belirlenmesine yönelik incelemeler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.12).

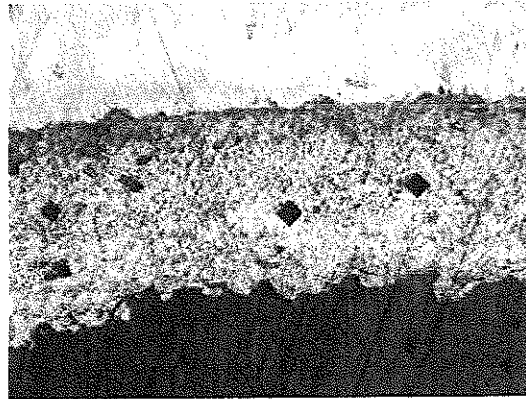
- Zn/Al Kaplamasının Mikroyapıları



Şekil 3.12. Zn/Al 85/15 kaplamasının mikroyapısı (100A, 3bar)

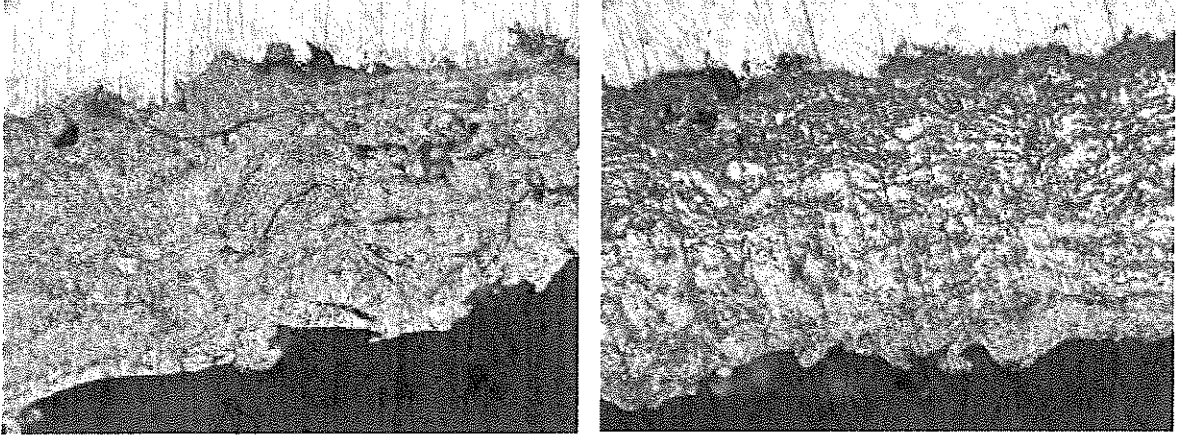
Şekil 3.12'den görüldüğü gibi, çinko ve alüminyumdan meydana gelen kaplama tabakasında gri ve kahverengi oluşumlar dikkati çekmektedir. Kaplamada az miktarda porozite (siyah bölgeler) varlığı gözlenmektedir. Kaplamanın çelik altlığa (üst beyaz taraf) adhezyonu iyidir. Ara yüzeyde herhangi bir boşluk görülmemiştir. 200 A'de üretilen kaplamada da 100 amperdeki kaplamaya benzer şekilde yoğun ve altlığa adhezyonu güçlü bir tabaka yapısı gözlenmiştir. Zn ve Al bileşenleri yine iki farklı renk tonunda görülmektedir.

Artan akım yoğunluğuna bağlı olarak kaplamanın yapısı daha yoğun bir hale geçmiştir (Şekil 3.14; Şekil 3.15). Kaplama yüzeyinden alınan sertlik izleri de net bir şekilde görülmektedir. Kaplama kalınlığı homojen ve adhezyonu iyidir. Göze çarpan bir nokta ise kaplama kalınlığının artan ergitme gücü olan akım ve tel besleme hızı ile doğru orantılı olarak arttığıdır. Artan akım gücüne bağlı olarak kullanılan tellerin ergime derecesi artmaktadır [15].



Şekil 3.13. Zn/Al 85/15 kaplamasının mikroyapısı (300 A, 3bar)

Farklı atomizasyon gaz basıncında üretilen kaplamaların mikroyapı görüntüleri Şekil 3.8-3.9'da verilmiştir. Kaplama tabakalarının bulk (yoğun ve sıkı bir yapıya sahip) olmasında en önemli parametrenin gaz basıncı olduğu görülmektedir.

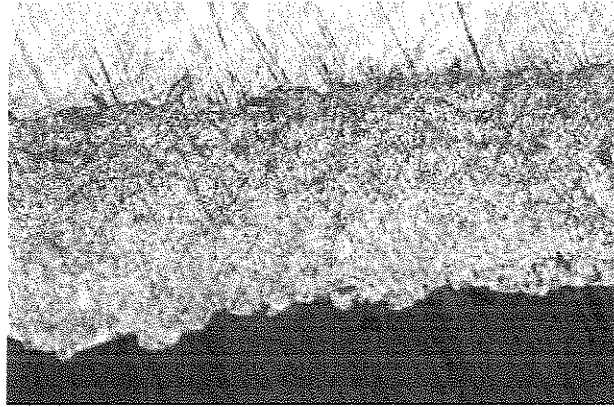


a) 1,5 bar

b) 3 bar

Şekil 3.14. Zn/Al 85/15, kaplamalarının mikroyapısı (200 A sabit akımda)

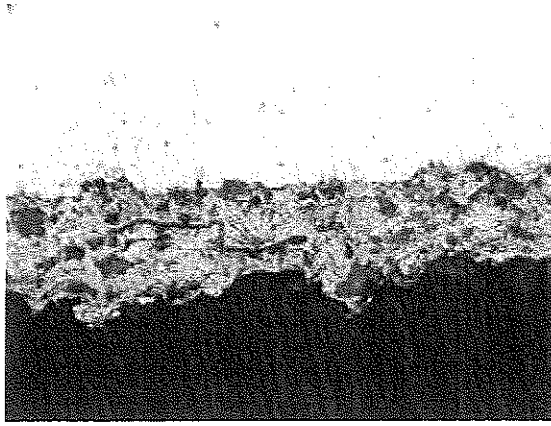
Atomizasyon gaz basıncının 1,5 bar olması tabakanın kompaktlaşmamasına neden olmaktadır. Düşük gaz basıncı, tabakayı oluşturan partiküllerin yeterli kinetik enerjiye sahip olamamasına yol açmış olup, tabakada yüzeye yayılan her bir damlacığın ayrık olarak bulunduğu görülmektedir. Artan gaz basıncının kaplamaların yoğunluğunu arttırdığı görülmektedir (Şekil 3.9).



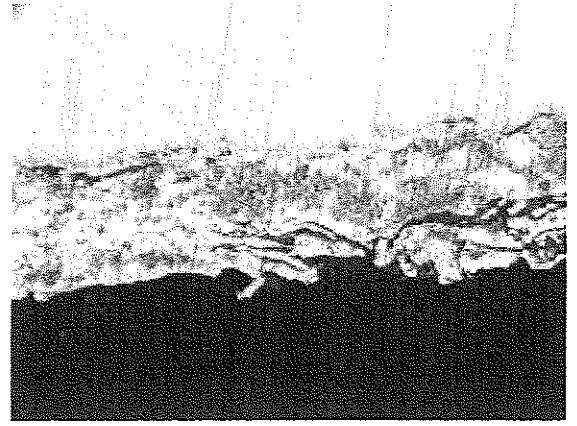
Şekil 3.15. 4,5 bar'da üretilen Zn/Al 85/15, (akım 200 A) kaplamanın mikroyapısı

#### • Zn Kaplamasının Mikroyapıları

Saf Zn kaplamalarının mikroyapı incelemeleri Zn/Al 85/15 incelemelerine benzer şekilde yapılmış ve Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de verilmiştir. Kaplamaların porozite içerdiği ve bazı durumlarda lameller arası delemantasyonların varlığı (200A de üretilen numune; Şekil 3.16b) tespit edilmiştir. Artan akım miktarı kaplamanın daha kalın ve bütünlük içinde olmasını sağlamıştır (Şekil 3.17).

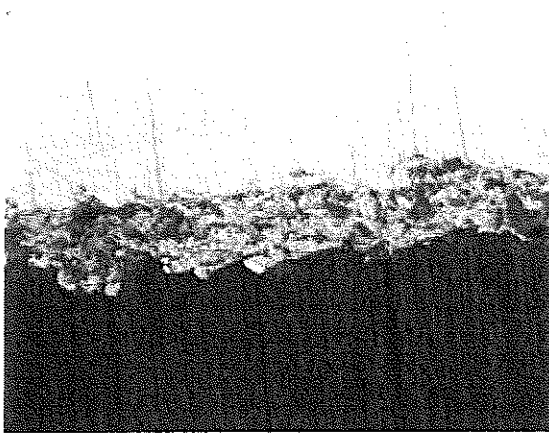


a) 100 Amper

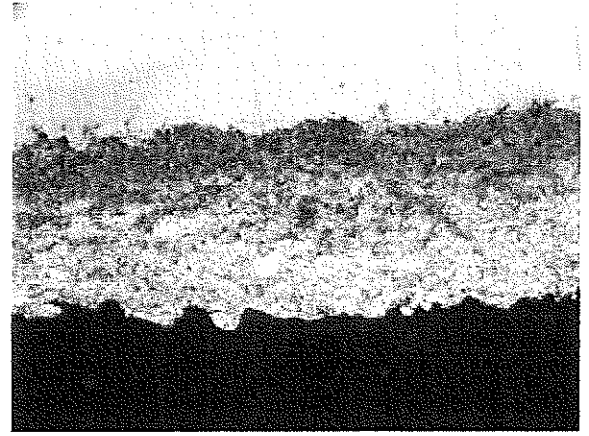


b) 200 Amper

Şekil 3.16. Saf Zn kaplamasının mikroyapı görüntüleri ( basınç sabit: 3 bar)



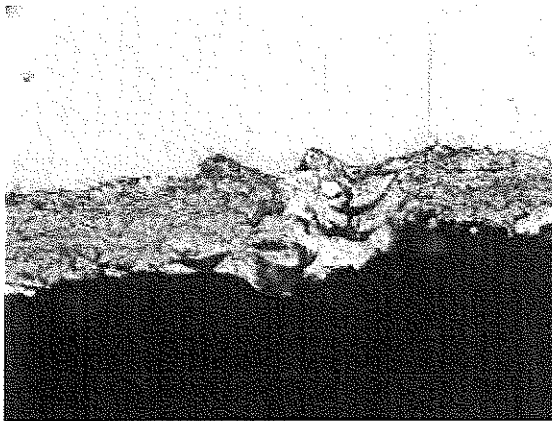
a) 250 Amper



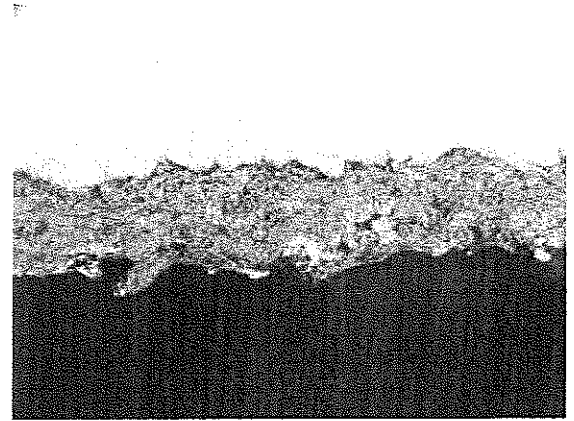
b) 300 Amper

Şekil 3.17. Saf Zn kaplamasının mikroyapı görüntüleri ( basınç sabit: 3 bar)

Şekil 3.18'den görüldüğü gibi, düşük atomizasyon gaz basıncında üretilen kaplama tabakasında lameller arası ayrılma söz konusudur. Artan gaz basıncı ile birlikte kaplamaların kompaktlığı artmaktadır (Şekil 3.18b,c).

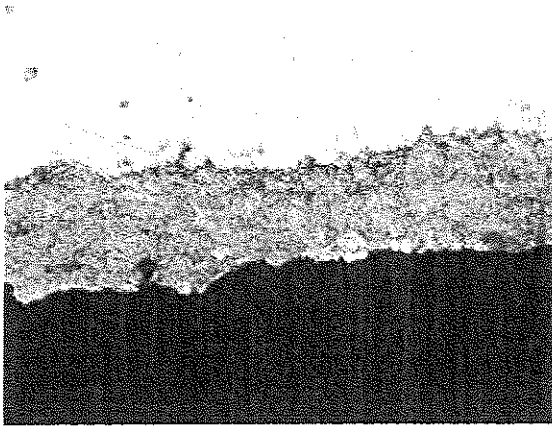


a) 1.5 bar



b) 3 bar

*J*

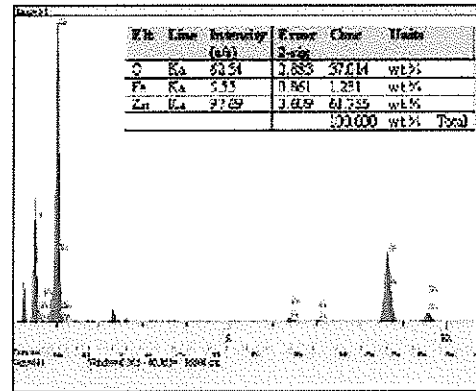
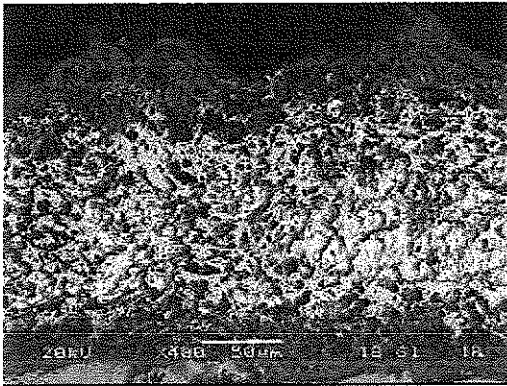


c) 4,5 bar

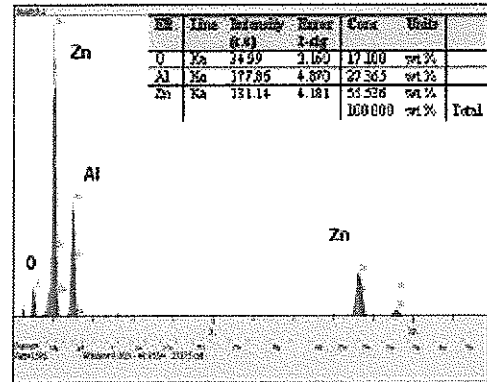
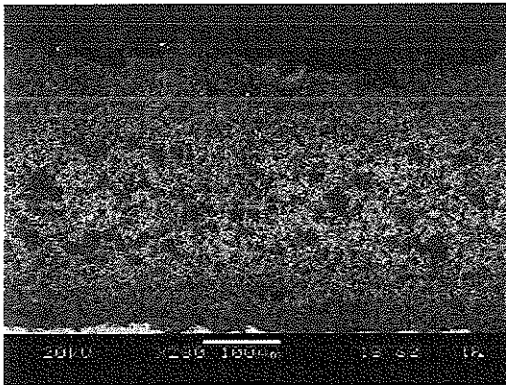
Şekil 3.18. Saf Zn kaplamasının mikroyapı görüntüleri (I:sabit: 200 A)

### 3.4. Kaplamaların SEM İncelemesi

Kaplamaların genel olarak mikroyapı özelliklerinin belirlenmesine yönelik olarak gerçekleştirilen SEM analizlerinde tüm kaplamaların lamelli bir morfolojiye sahip olduğu görülmektedir (Şekil 3.19). SEM analizlerinde Zn ve Zn/Al kaplamalarının kaplama kalınlıkları homojendir. Al kaplamasının tabaka kalınlığı daha az görülmektedir. Gerçekleştirilen EDX analizlerinde kaplamaların, ana metalinin oksit ürünleri ile karışım şeklinde bir bileşime sahip olduğu görülmüştür. SEM ve EDX analizleri korozyon testi sonrasında da gerçekleştirilmiştir.

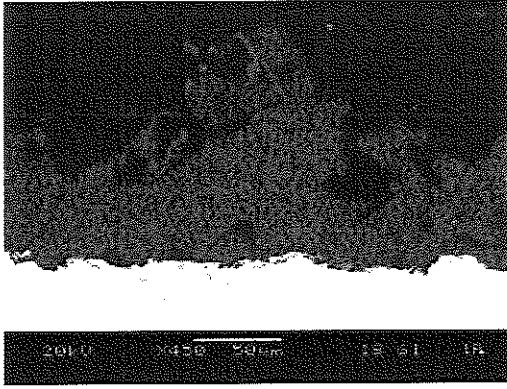


a) Zn kaplamasının SEM mikroyapı görüntüsü, oksit ürünü ZnO, altlık ürünü Fe



b) Zn/Al kaplamasının SEM mikroyapı görüntüsü, oksit ürünü ZnO ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

8



El.	Line	Intensity	Error	Count	Unit
O	Zn	13.64	1.340	8.872	wt%
Al	Zn	1.34057	134.6	91.28	wt%
				133.003	wt% Total

c) Al kaplamasının SEM mikroyapı görüntüsü, oksit ürünü  $Al_2O_3$

Şekil 3.19. Zn, Al ve Zn/Al 85/15 kaplamalarının SEM görüntüleri ve EDS analizleri

### 3.5. Endüstriyel Numunelerle İlgili Mikroskobik Çalışmalar

Proje çerçevesinde, endüstriyel çalışmalar olarak su iletim hatlarında kullanılan dökme demir borulara Zn ve Zn/Al 85/15 kaplamaları yapılmıştır. Ayrıca kullanılan borulara uygulanan ön ısıtma işlemi ile kaplama performansı arasındaki ilişki araştırılmaya çalışılmıştır. Projeye ilgi duyan Samsun Makine Sanayi (SMS) temin edilen kaplanmış borular ile laboratuvarımızda kaplanan borular karşılaştırılmalı olarak karakterizasyona tabi tutulmuştur.

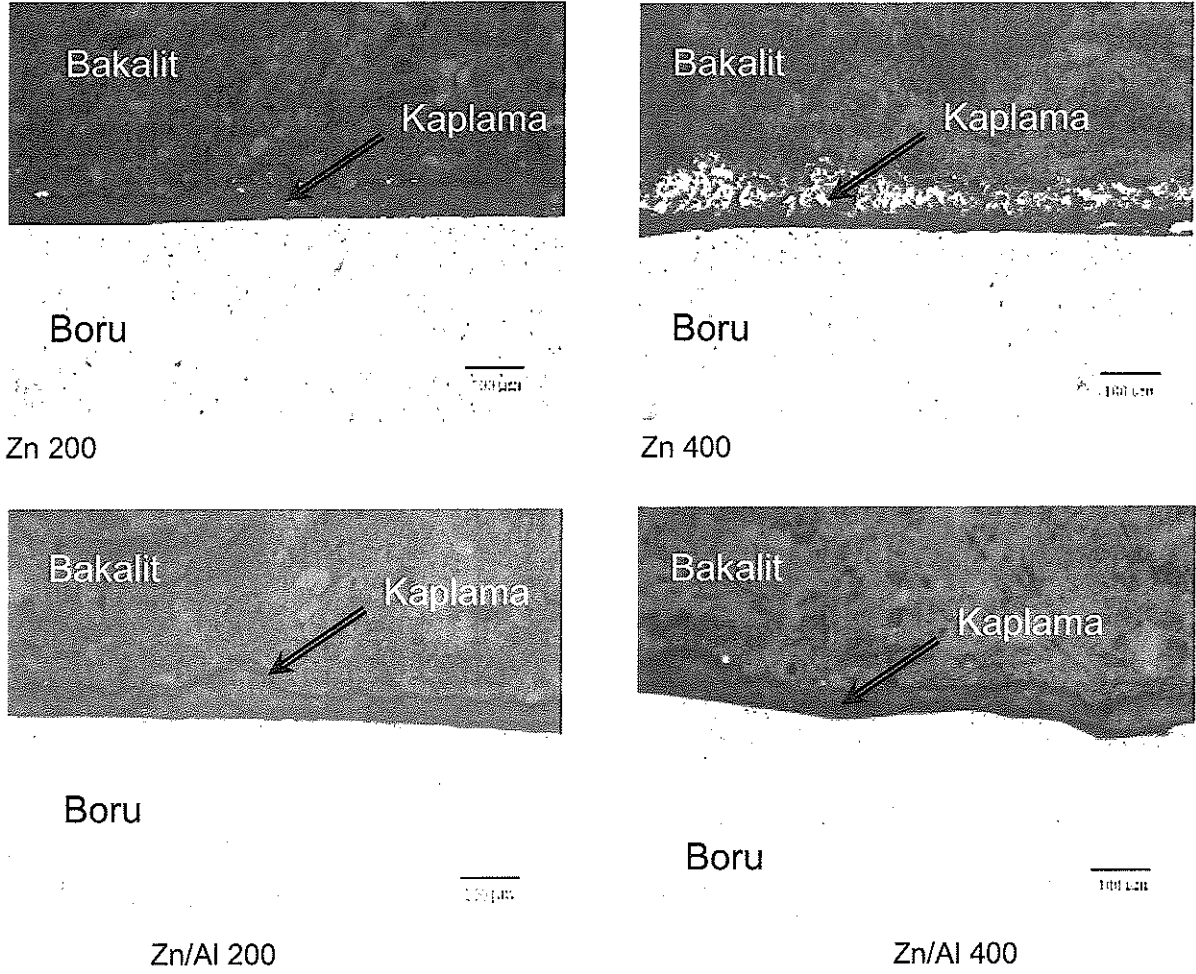
#### 3.5.1. Mikroyapı İnceleme Sonuçları (Tavllanmış ve Tavlınmamış Numuneler)

Isıl işlem görmüş ve görmemiş düktil boruların kaplama sonrası mikroyapı görüntüleri Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'de görülmektedir. Bu mikroyapı incelemelerinde ısıtma işlemine maruz bırakılan düktil boru yüzeyinde oluşturulan oksit tabakasının kaplama ile olan ara yüzeyindeki etkileşim göz önünde tutulmuştur.

- **Isıl İşlem Görmemiş Numuneler**

Bu numunelerde kaplama ile altlık malzeme arasında herhangi bir zon görülmemiştir. Arayüzey düzgündür ve herhangi bir boşluk veya delaminasyon görülmemiştir.

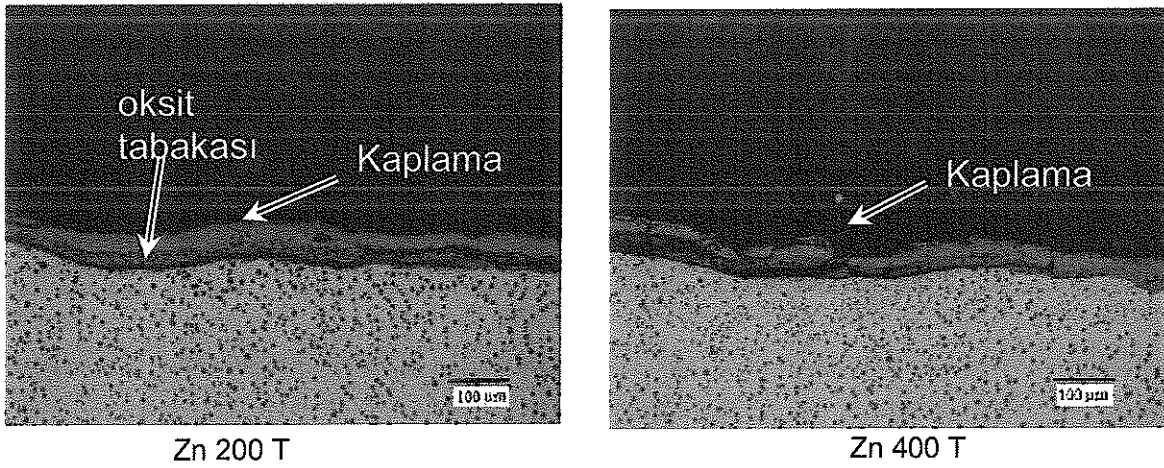
*(Handwritten signature)*



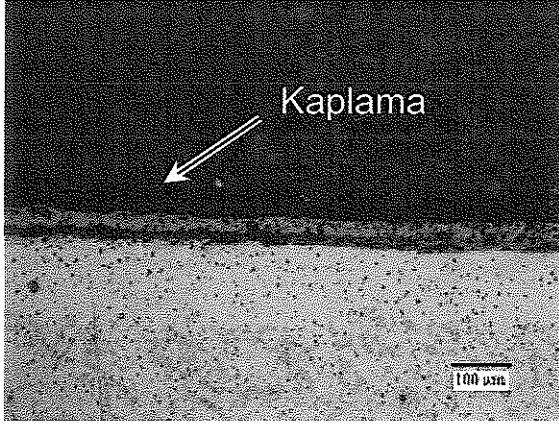
Şekil 3.20. Isıl işlem görmemiş farklı kalınlıklarda Zn ve Zn/Al 85/15 kaplanmış numunelerin mikroyapı görüntüleri

#### b) Isıl İşlem Görmüş Numuneler

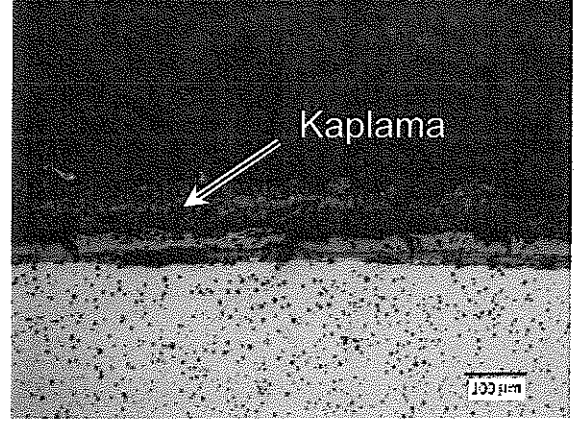
Isıl işlem görmüş numunelerde oksit zonu belirgin bir şekilde görülmektedir. Genel olarak kaplama kalınlığının homojen olduğu ve tüm yüzeyi kapladığı gözlenmiştir.



Handwritten signature or mark.



Zn/Al 200 T

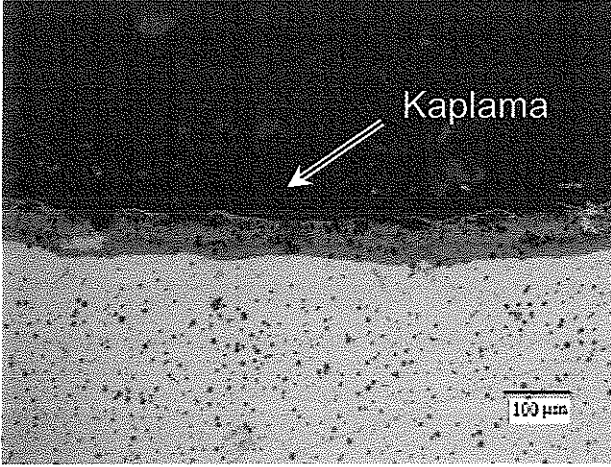


Zn/Al 400 T

Şekil 3.21. Isıl işlem uygulanmış Zn ve Zn/Al 85/15 numunelerin mikroyapı görüntüleri

### c) Ticari olarak üretilmiş Zn kaplanmış düktil boru mikroyapısı

Şekil 3.22'de ise SMS'den temin edilen Zn kaplanmış düktil demir borudan elde edilen optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Bu mikroyapı da laboratuvar ortamında kaplanmış malzemelerden elde edilen görüntülere benzerdir.



Şekil 3.22. Isıl işlem görmüş ve Zn kaplanmış numunenin mikroyapı görüntüsü

## 3.6. Detaylı Mikroyapı İnceleme Sonuçları

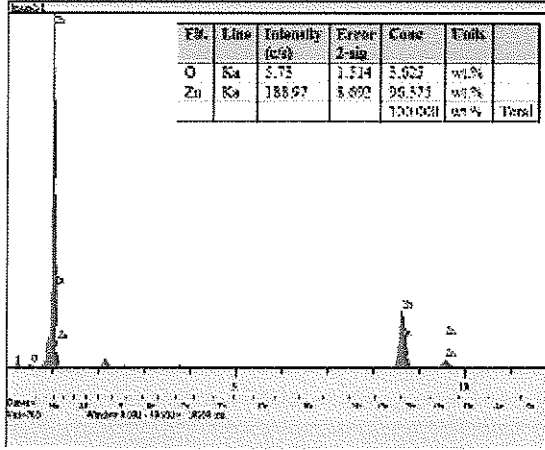
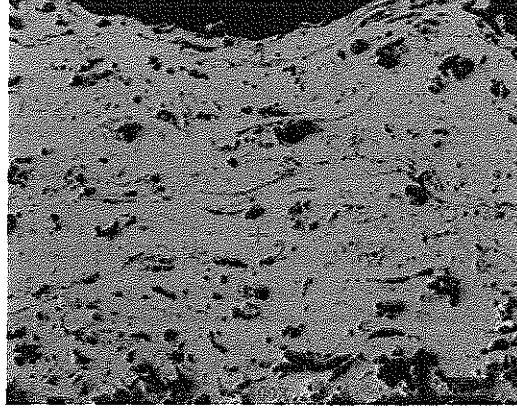
### 3.6.1. Zn Kaplamasının SEM İncelemesi ve EDS analizi

Üretilen kaplamaların detay incelemeleri ve kompozisyonlarının belirlenmesine yönelik olarak elektron mikroskobu çalışmaları yapılmıştır. Şekil 3.23'e Zn kaplamasının SEM görüntüsü görülmektedir. Ark spreyle üretilen kaplama karakteristik lamelli bir yapıya sahiptir. Kaplamanın içerisindeki siyah bölgeler poroziteyi göstermektedir. Kaplama içerisindeki 1 ve 2 noktalarından EDS analizi alınmıştır.

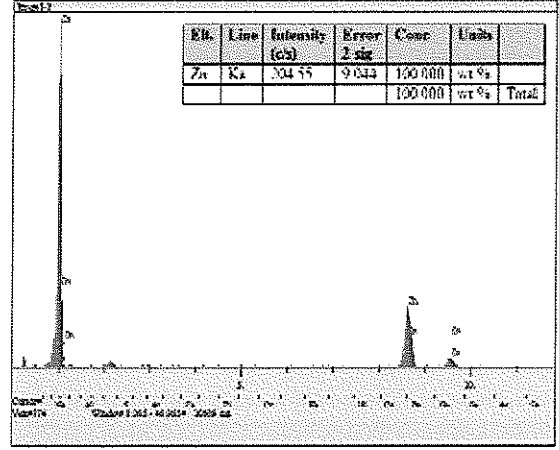
*(Handwritten signature)*



EDX analizlerinde kaplamanın ağırlıklı olarak Zn dan oluştuğu tespit edilmiştir. Ayrıca bir miktar oksit varlığı 1 nolu noktadan yapılan EDS analizinde görülmüştür.



1 Nolu bölgenin EDS analizi

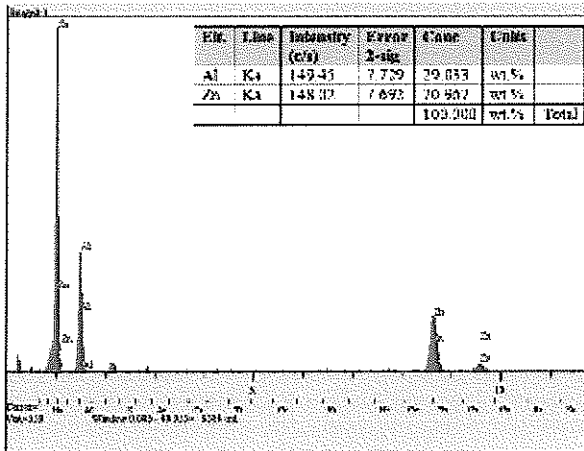
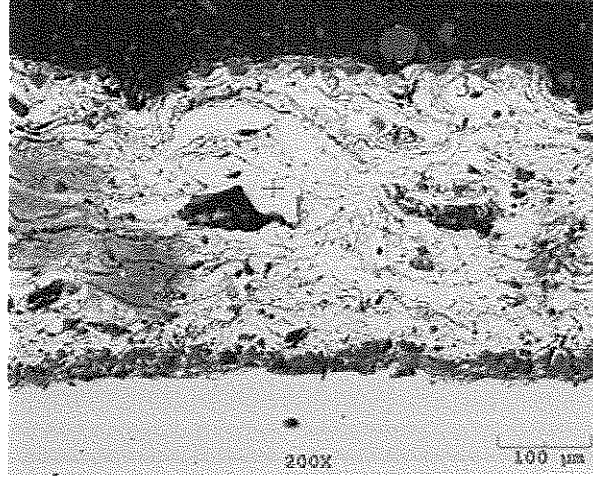


2 Nolu bölgenin EDS analizi

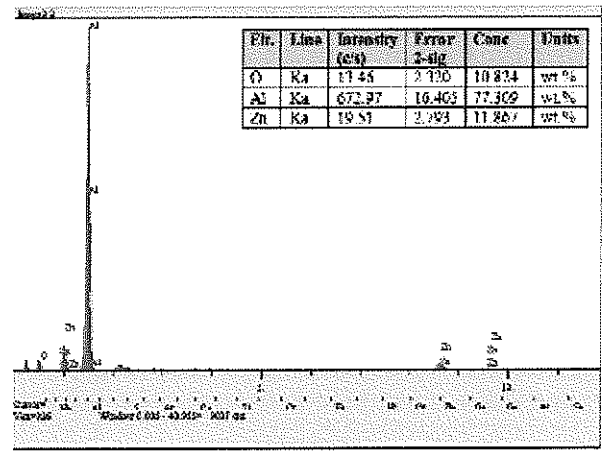
Şekil 3.23. Zn kaplanmış numunenin SEM görüntüsü ve EDS analizleri

### 3.6.2. Zn/Al 85/15 Kaplamasının SEM İncelemesi ve EDS analizi

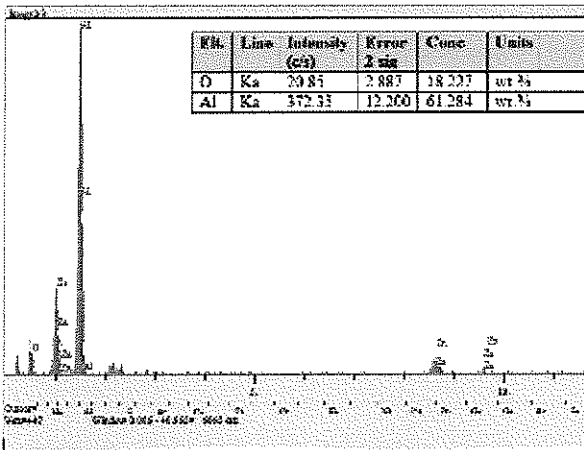
Zn/Al kaplaması Zn kaplamasına benzer şekilde lamelli bir yapıya sahiptir. SEM resminden ilk göze çarpan nokta, Zn kaplamasından farklı olarak tabakadaki homojenlik daha azdır. Kaplama, bir alaşım hüviyetinde olup Zn ve Al esaslıdır. Tabaka bünyesinde büyük partikül şeklinde oluşumlar gözlenmiştir. Kaplamanın EDS analizleri yapının Zn, Al ve bunların oksitlerinden oluştuğunu göstermektedir (Şekil 3.24).



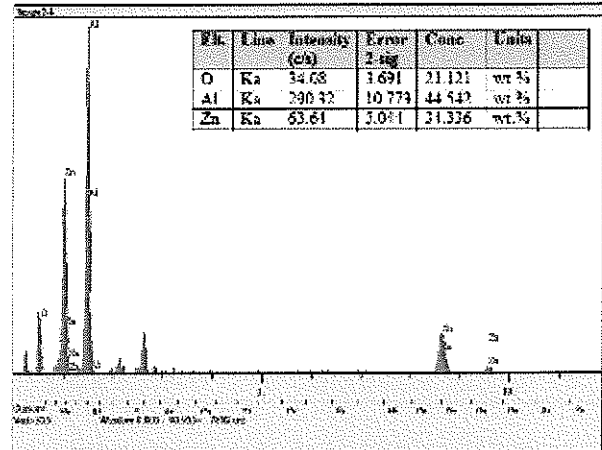
1 nolu bölgenin EDS analizi



2 nolu bölgenin EDS analizi



3 nolu bölgenin EDS analizi



4 nolu bölgenin EDS analizi

Şekil 3.24. Zn/Al 85/15 kaplamasının SEM görüntüsü ve EDS analizleri

### 3.6.3. Zn/Al 85/15 Kaplamasının SEM İncelenmesi

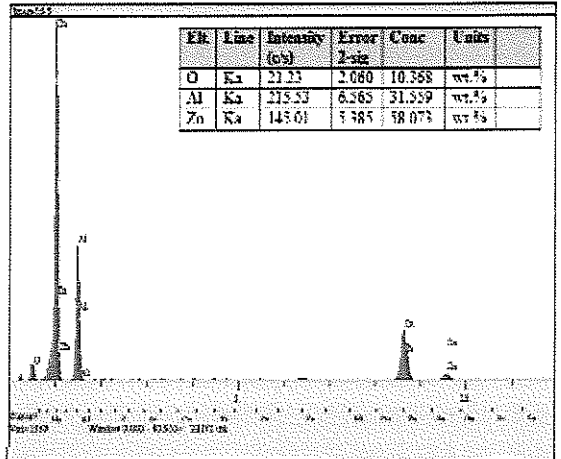
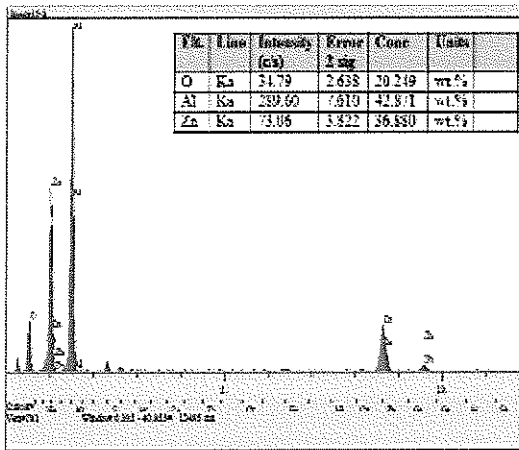
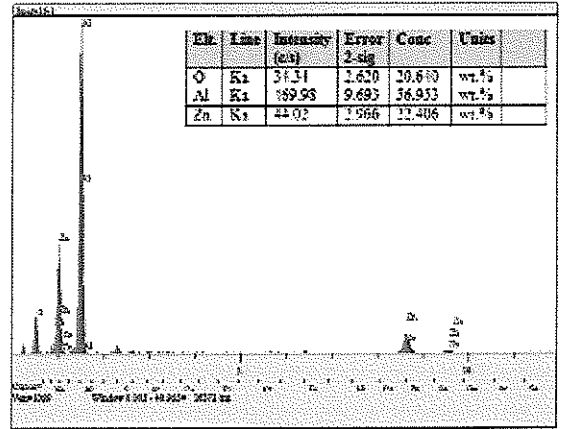
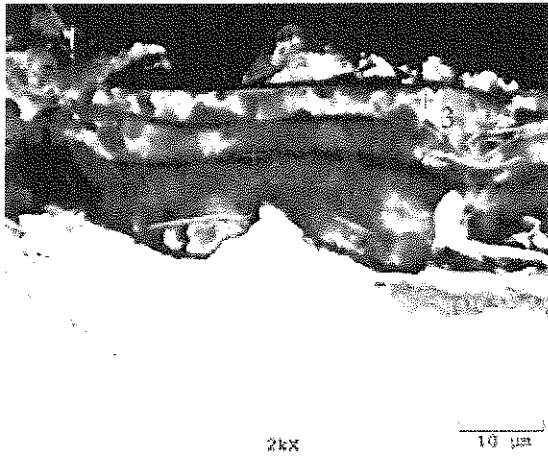
Zn-Al kaplamaları farklı tel akımlarında ve atomizasyon gaz basınçlarında üretildiği daha önce ifade edilmişti. Ark sprey kaplamalarında artan atomizasyon gaz basıncı kaplamanın

ince lamelli bir yapıya sahip olmasını sevk eder. Kaplama akımının artmasıyla tellerin daha iyi bir şekilde ergimesi gerçekleşir buna bağlı olarak artan gaz basıncı sonucunda ergimiş partiküller daha küçük taneciklere atomize olur ve bunun sonucu kaplamanın lamelli yapısı inceler.

Şekil 3.25'de düşük tel akımı ve düşük atomizasyon gaz basıncında üretilen kaplamanın SEM mikrografı ve EDS analizleri verilmiştir.

Kaplama her bir dropletin (ergimiş metal damlacığı) altlık yüzeyinde yayılmasıyla oluşan lamelli yapı açıkça görülmektedir. Yetersiz olan hava basıncı sonucu lamelli yapılar birbiri ile kaynaşmamıştır. Her bir lamelli tabaka arasında oksit zonu (siyah renkte) görülmektedir.

EDS analizlerinde Zn, Al elementleri ve bunların Oksijen pikleri göze çarpmaktadır. Kaplama kalınlığı homojen olmayıp, genel olarak kaplamanın özelliklerinin kötü olduğu mikroyapı resminden anlaşılmaktadır (örn. yapışma mukavemetinin düşük olması)

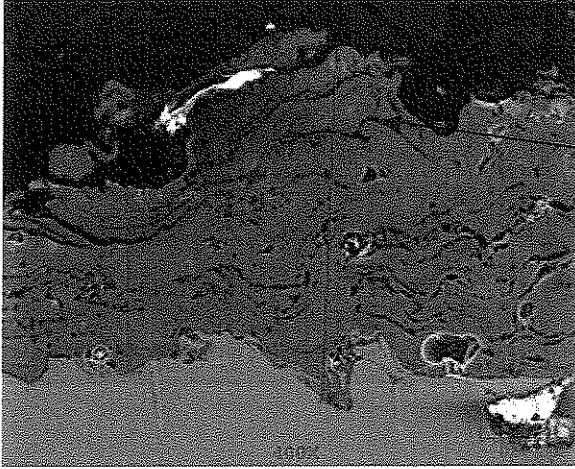


Şekil 3.25. Zn/Al 85/15 kaplaması (1,5 bar ve 150 A)

Artan akım ve atomizasyon gaz debisinde elde edilen kaplamanın SEM resmi Şekil 3.26'da verilmiştir. Genel olarak kaplamanın daha yoğun ve ince bir lamel yapısına sahip olduğu gözlenmektedir. Kaplama-altlık arayüzeyinde herhangi bir porozite ve adhezyon problemi

8

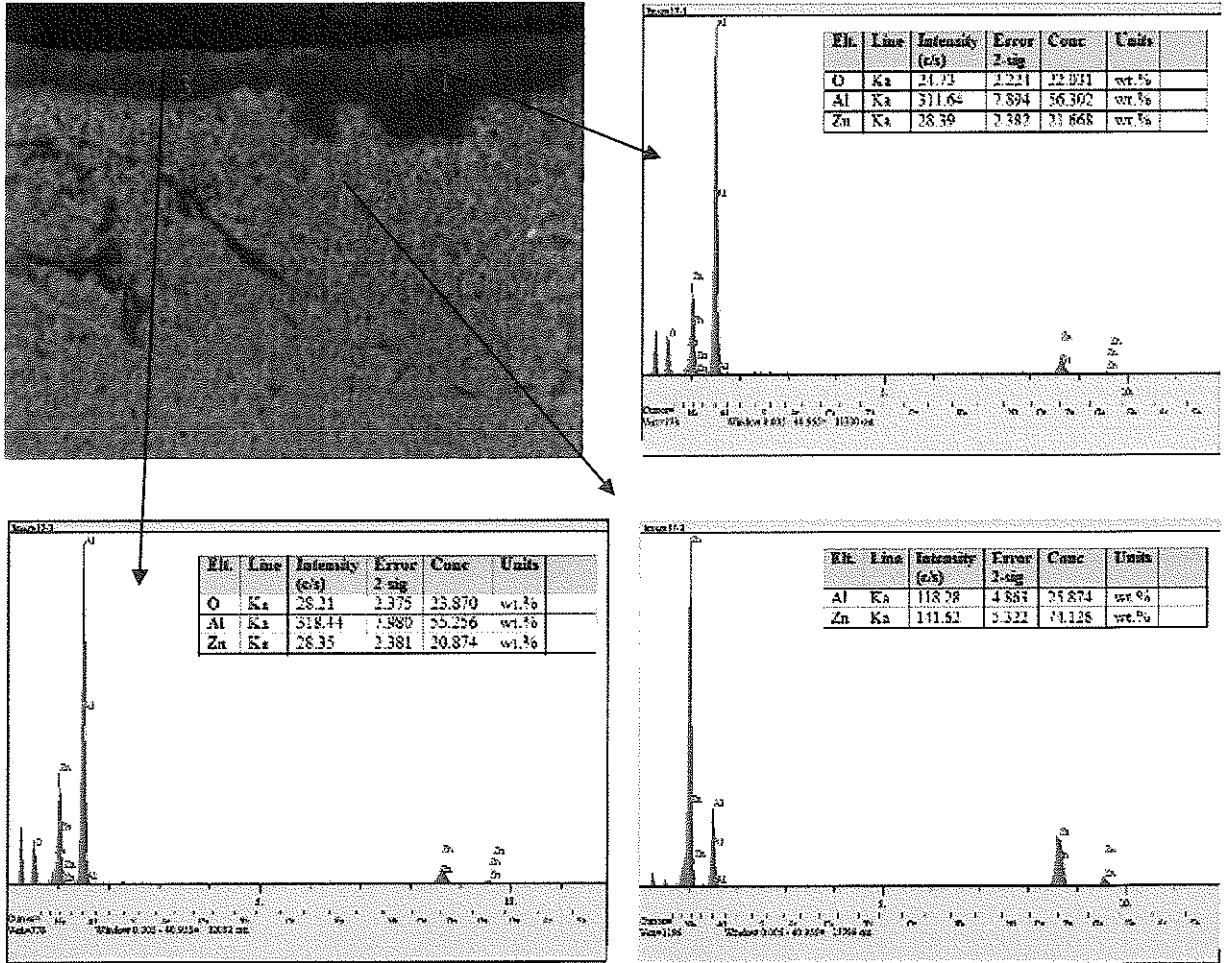
gözlemlenmemiştir. Dropletlerin yayılmasıyla oluşan lamelli yapının ara yüzeylerindeki oksit tabakasının kalınlığı oldukça azdır.



Arayüzey oksiti

Şekil 3.26. Zn/Al 85/15 kaplaması 3 bar 250 A

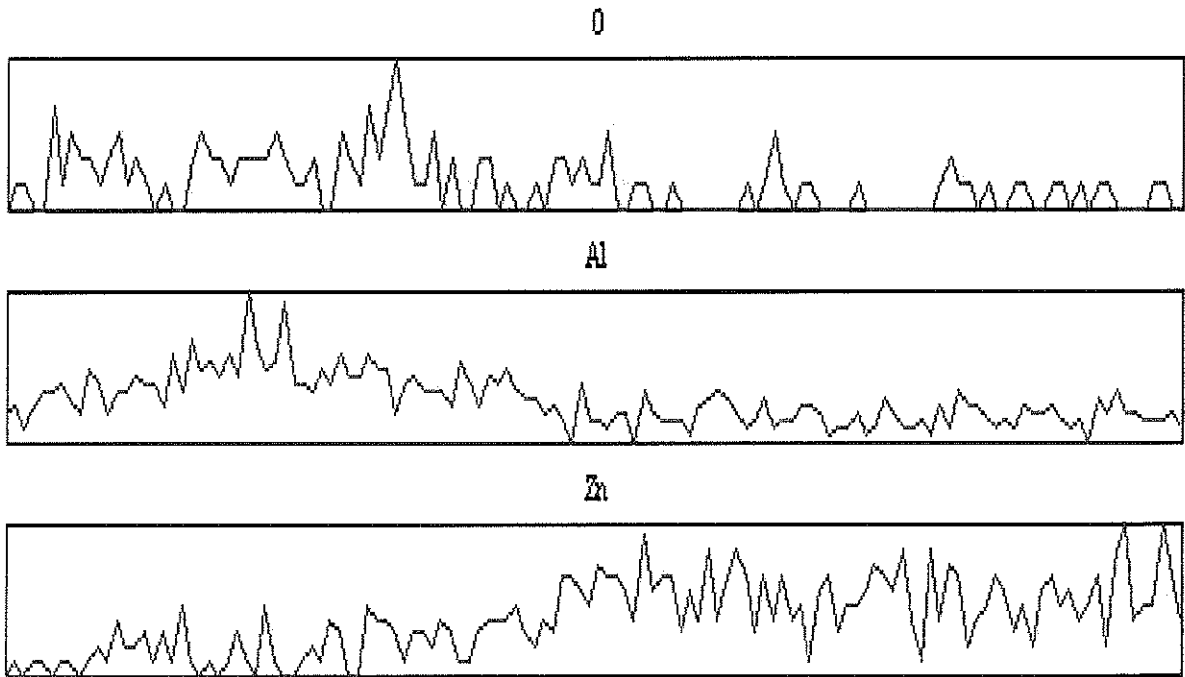
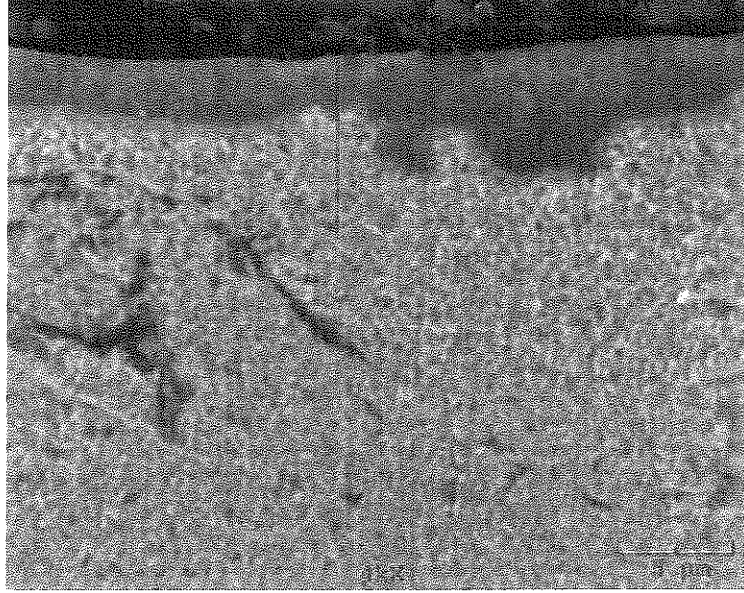
Kaplama yüzeyinin daha yüksek SEM analizlerinde farklı bir zon göze çarpmaktadır. Bu zonun kalınlığı 3-6 mikron arasında değişmektedir (Şekil 3.27). Gerçekleştirilen EDS analizlerinde bu bölgenin alüminyumca zengin olduğu görülmekte olup daha önce yapılan çalışmalarda da bu yapı belirtilmiştir [9,10].



Şekil 3.27. Zn/Al 85/15 kaplamasının üst yüzeyinin SEM detay görüntüsü ve EDS analizleri

*[Handwritten signature]*

Numunenin üst yüzeyinden iç kısımlarına doğru uygulanan çizgi analizi de noktasal olarak alınan EDS analizlerini desteklemektedir. Yüzeyin üst tarafında alüminyumca bir zenginleşmenin olduğu görülmüştür (Şekil 3.28). Ayrıca bünyede oksijen varlığı bu zonun  $Al_2O_3$  olma ihtimalini akla getirmektedir. Söz konusu noktanın analizinde XPS ve Auger analizi gereklidir fakat mevcut imkânlarla bu analiz gerçekleştirilememiştir.



Şekil 3.28. Zn/Al 85/15 kaplamasının üst yüzeyinin çizgi analizi (üst yüzeyden altlığa doğru)

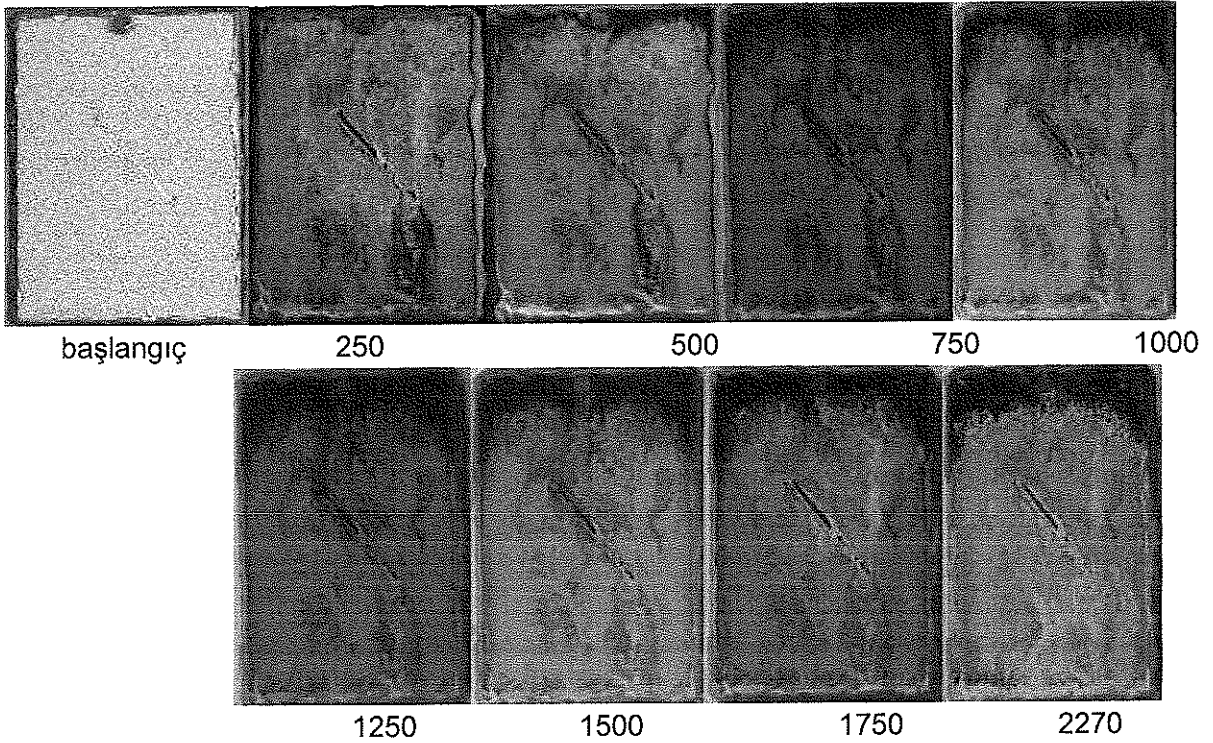
*[Handwritten signature]*

### 3.7. Hızlandırılmış Korozyon Deneyi (Tuz Püskürtme Korozyon Testi)

Hızlandırılmış korozyon testi olan tuz püskürtme testi ASTM B 117'ye göre yapılmıştır. Test Standardlarda belirtilen şekilde numune yüzeyinde kırmızı pas oluşuncaya kadar sürdürülmüştür. Test süresince numunelerin yüzeyi her 250 saatte bir fotoğraflanmıştır. Deney 2270 saat sonrasında Zn numunelerde kırmızı pas miktarının toplam yüzey alanının %50'ni geçmesi nedeniyle bitirilmiştir.

#### 3.7.1. Al esaslı numuneleri korozyon testi (3 bar, 200A)

Al kaplanmış numunelerin üretim parametresi 3 bar ve 200 amperdir. Şekil 3.29'da numunelerin başlangıç ve sonrasında her 250 saat sonrası yüzey fotoğrafları verilmiştir. Numunelerin yüzey görüntülerinden kaplama yüzeyinde 2270 saat sonrasında herhangi bir kırmızı pas görülmemiştir. Numune yüzeyine açılan çizik etrafında da herhangi bir kırmızı pas oluşumu gözlenmemiştir. Numunelerin üst yüzeyinde görülen kırmızı oluşumlar, izolasyon kusuru olup numuneni köşelerinde iyi bir sızdırmazlığın sağlanmadığını göstermektedir.

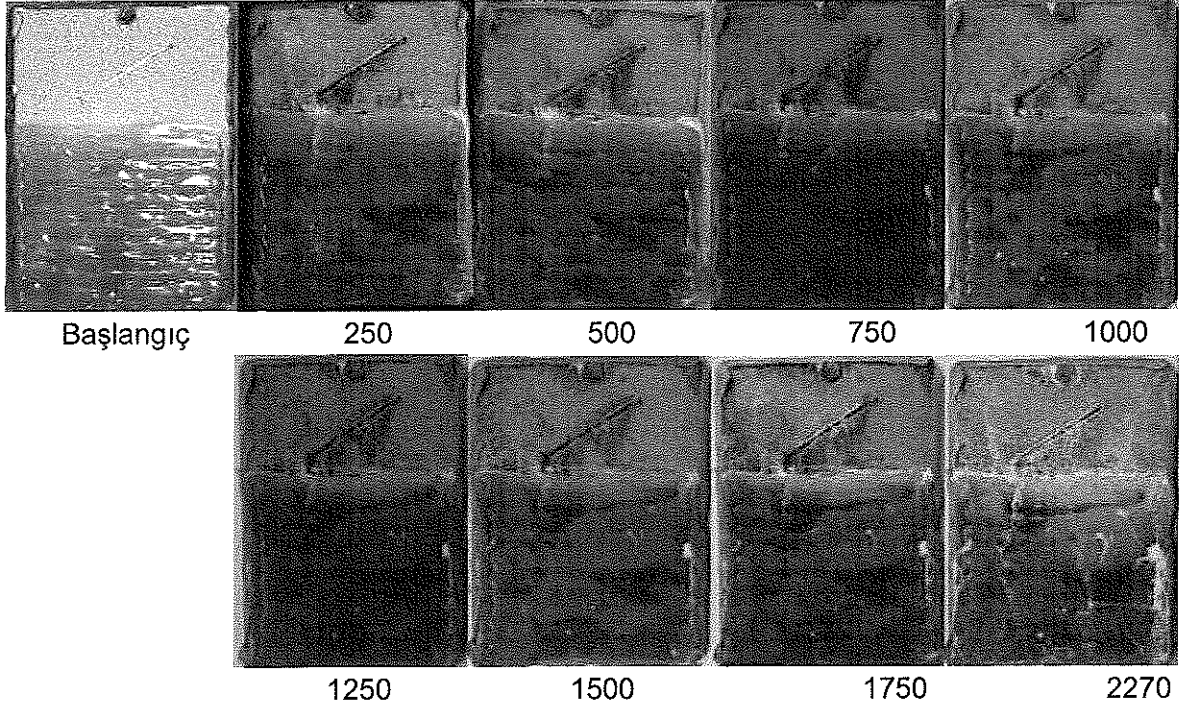


Şekil 3.29. Al esaslı kaplamaların tuz testi sonrası üst yüzey görüntüleri

Ark spreyle farklı akımlarda üretilen kaplamaların üst yüzey görüntüleri Şekil 3.30 ve Şekil 3.31'de görülmektedir. Resimlerden Al kaplaması için üretim parametresinin, tabakanın tuz testine etki eden bir parametre olmadığı anlaşılmaktadır. Bilindiği gibi Al kaplaması pH: 6.6–7 arasında en yüksek dirence sahiptir. Tuz püskürtme testinin pH da bu aralıkta olduğu için Al tabakasının korozyona uğramaması doğaldır.

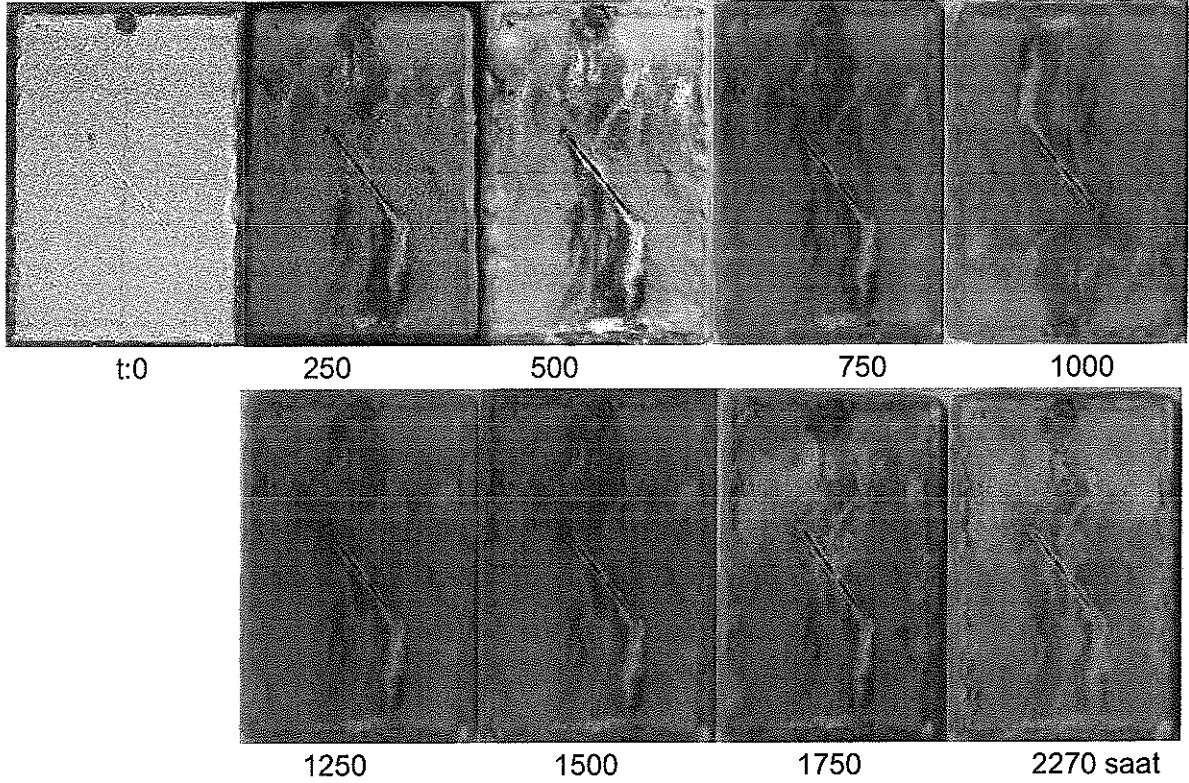
*(Handwritten signature)*

a) Al esaslı numuneleri Korozyon Testi (3 bar, 250A)



Şekil 3.30. Al esaslı kaplamaların tuz testi sonrası üst yüzey görünümleri

b) Al esaslı numuneleri Korozyon Testi (3 bar, 300A)



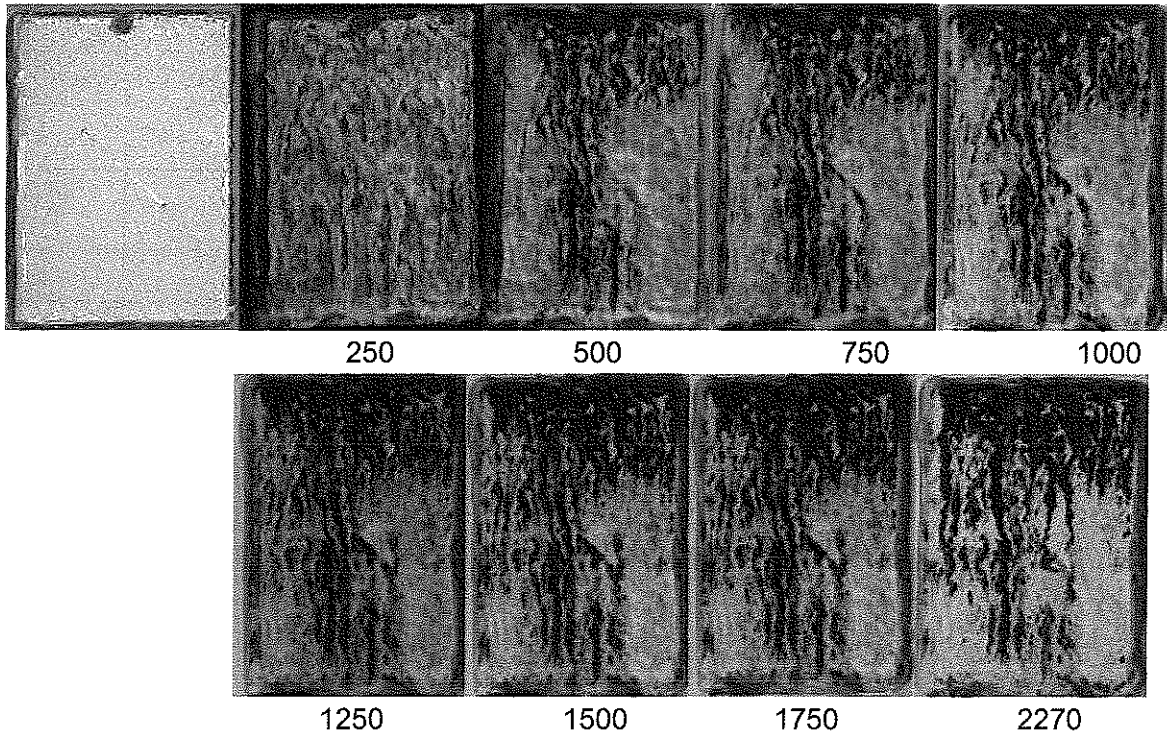
Şekil 3.31. Al esaslı kaplamaların tuz testi sonrası üst yüzey görünümleri (3 bar, 300 A)

*(Handwritten signature)*

### 3.7.2. Zn esaslı numuneleri korozyon testi (Zn kaplaması: 3 bar, 100A)

Ark spreyle üretilen Zn kaplamalar, diğer yöntemlerde biriktirilen kaplamalara benzer şekilde kurban anot olarak davranmışlardır. Kaplamaların tuz testinde kırmızı pas oluşumu yaklaşık 1000 saatten sonra çok az bir miktarda (%5<) görülmeye başlamış, 2270 saat sonrasında ise yaklaşık %5 oranında görülmüştür (Şekil 3.32).

Çinko, kaplaması yüzeyde beyaz pas oluşmuş ve bu şekilde korozyonu önlemiştir. Zn koruyuculuk değeri tabaka kalınlığı ile ilişkilidir. Daha kalın bir Zn kaplamasının korozyondan koruma ömrü daha uzundur. Öyle ki 3 bar ve 300 amperde üretilen, diğer bir ifadeyle daha kalın olarak yüzey biriken Zn kaplamasının koruyuculuk değeri 200 amperde üretilen tabakaya göre daha yüksektir (Şekil 3.32-3.34).

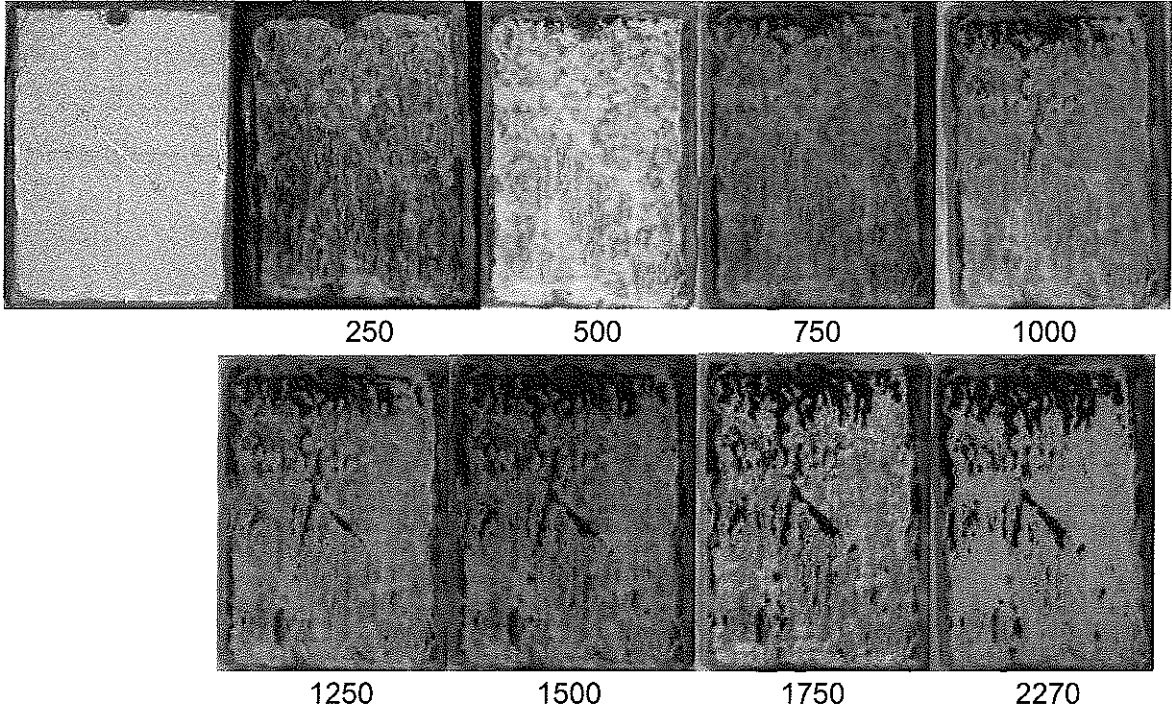


Şekil 3.32. Zn kaplaması 3 bar ve 100 A üretilmiş

8



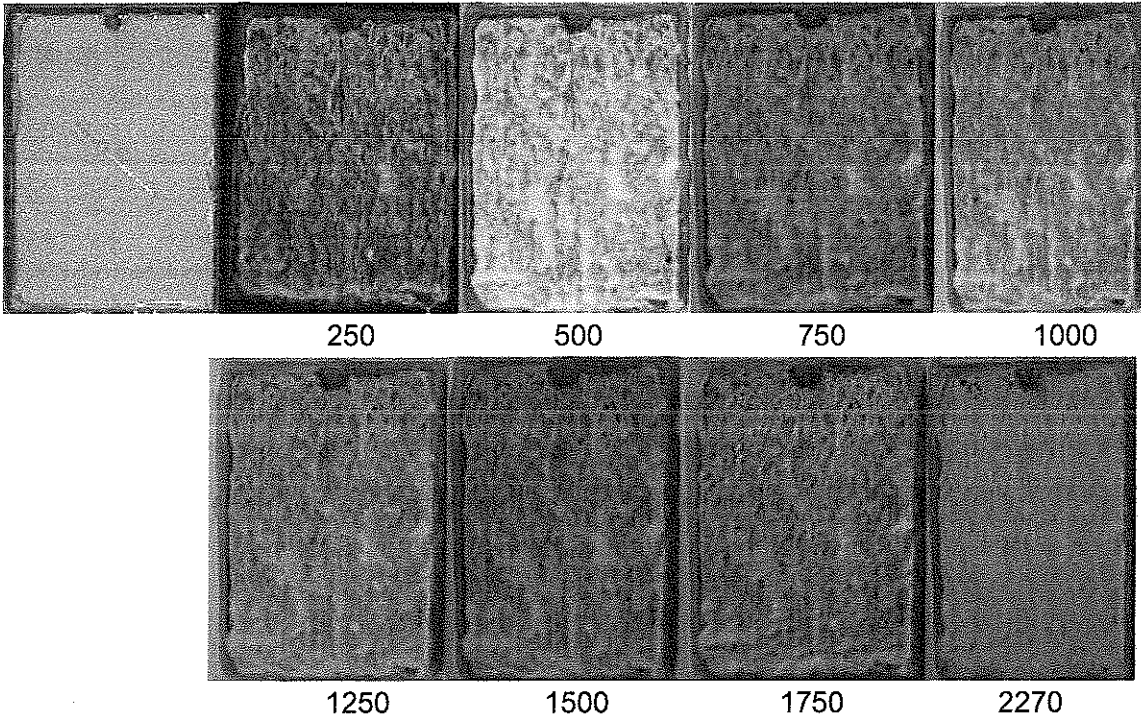
a) Zn esaslı numuneleri Korozyon Testi ( 3 bar, 200A)



Şekil 3.33. Zn kaplaması 3 bar ve 200 A üretilmiş

Kaplama kalınlığına bağlı olarak 2270 saat sonrasında bile mükemmel korozyon direnci gözlenmiştir. Yüzey beyaz pas oluşumu açık bir şekilde görülmektedir. Numune yüzeyindeki koruma 250 saat sonrasında yüzeyde beyaz pasın oluşumu ile başlamıştır (Şekil 3.34) [36].

b) Zn esaslı numuneleri Korozyon Testi (3 bar, 300A)



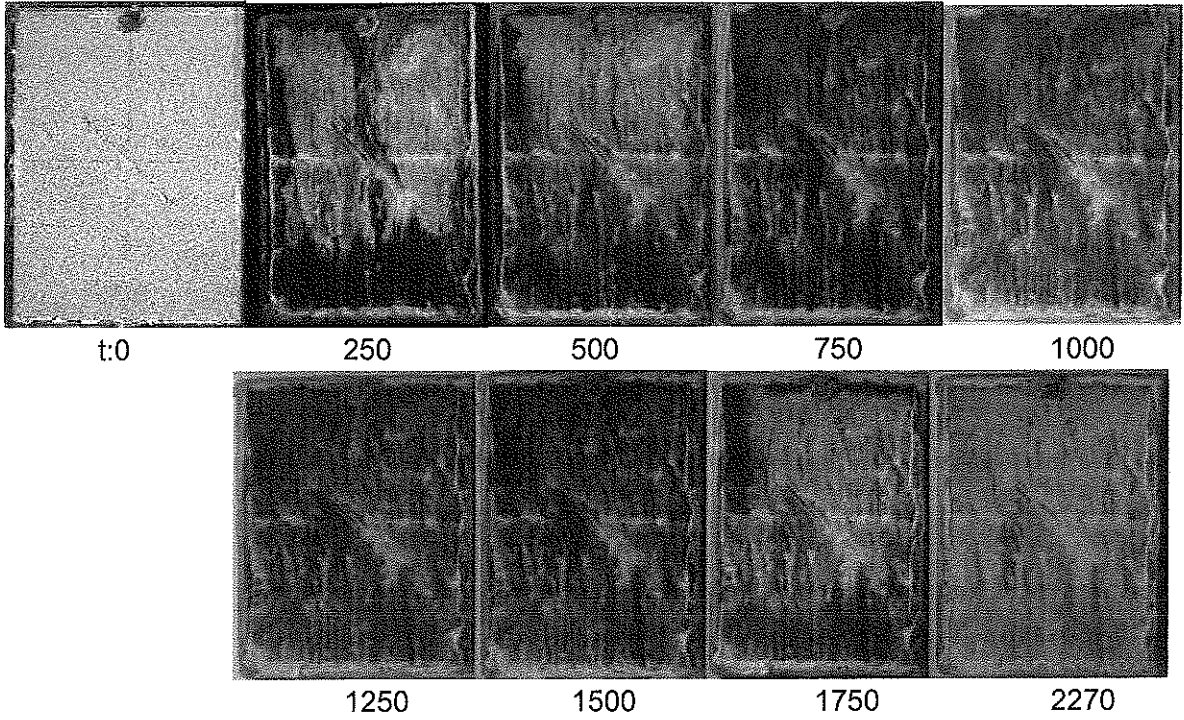
Şekil 3.34. Zn kaplaması 3 bar ve 300 A üretilmiş tabaka

*(Handwritten signature)*

### 3.7.3. Zn/Al esaslı numunelerin korozyon testi

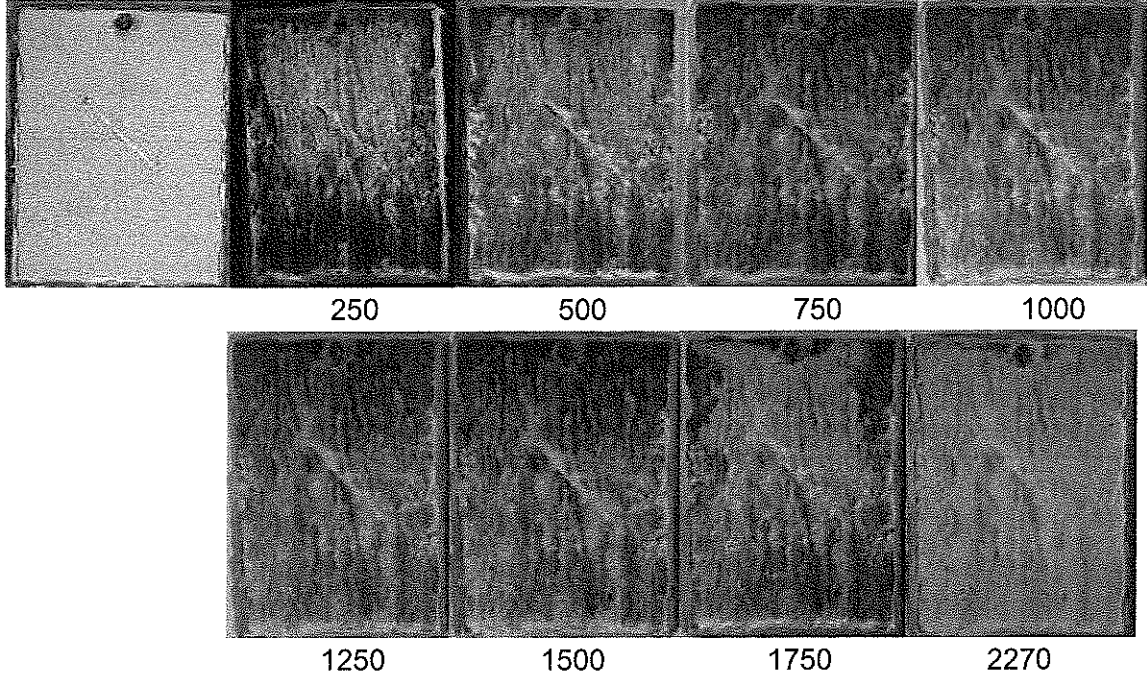
Zn/Al kaplamasının olarak tuz testine dirençli olduğu ve kaplama üretim parametrelerinin korozyon direnci üzerine bir etkisi olmadığı gözlenmiştir. Kaplamanın 100 amperde üretilmesi (ince tabaka) veya yüksek amperde üretilmesi (kalın tabaka, 250 A) bir önem arz etmemektedir. Numunelerin yüzeyinde herhangi bir kırmızı pas oluşumu gözlenmemiştir.

Numune yüzeylerinde hem Zn hem de Al kaplamasını çağrıştıran bir yüzey görüntüsü meydana gelmiştir. Numune yüzeyinde açılan çizikler Zn ürünü beyaz pas ile doldurulmuş, diğer bölgelerde ise alüminyumun pasivasyonu oluşmuştur (Şekil 3.35).

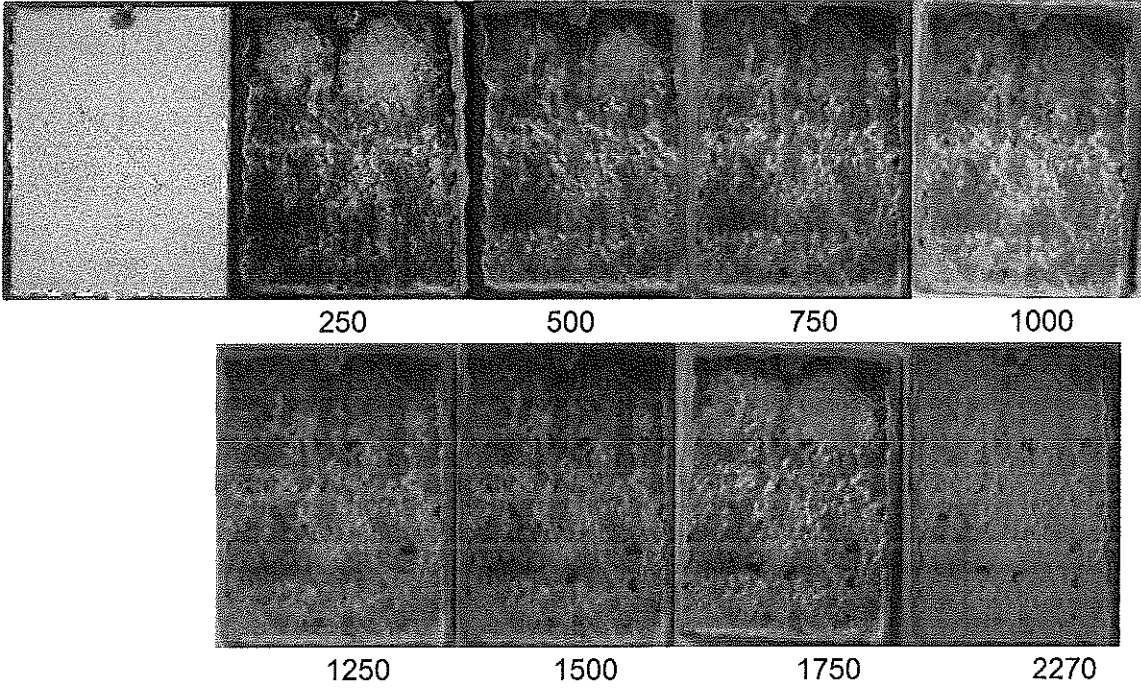


a) Zn/Al 85/15 esaslı numuneleri Korozyon Testi (3 bar sabit tutulmuş, 100A)

*[Handwritten signature]*



b) Zn/Al 85/15 esaslı numuneleri korozyon testi (3 bar sabit, 150A)



c) Zn/Al 85/15 esaslı numuneleri korozyon testi (3 bar sabit, 250A)

Şekil 3.35. Zn/Al kaplamasının tuz/korozyon testi sonrası yüzey görüntüleri a) 100 A b) 150 A ve c) 250 A

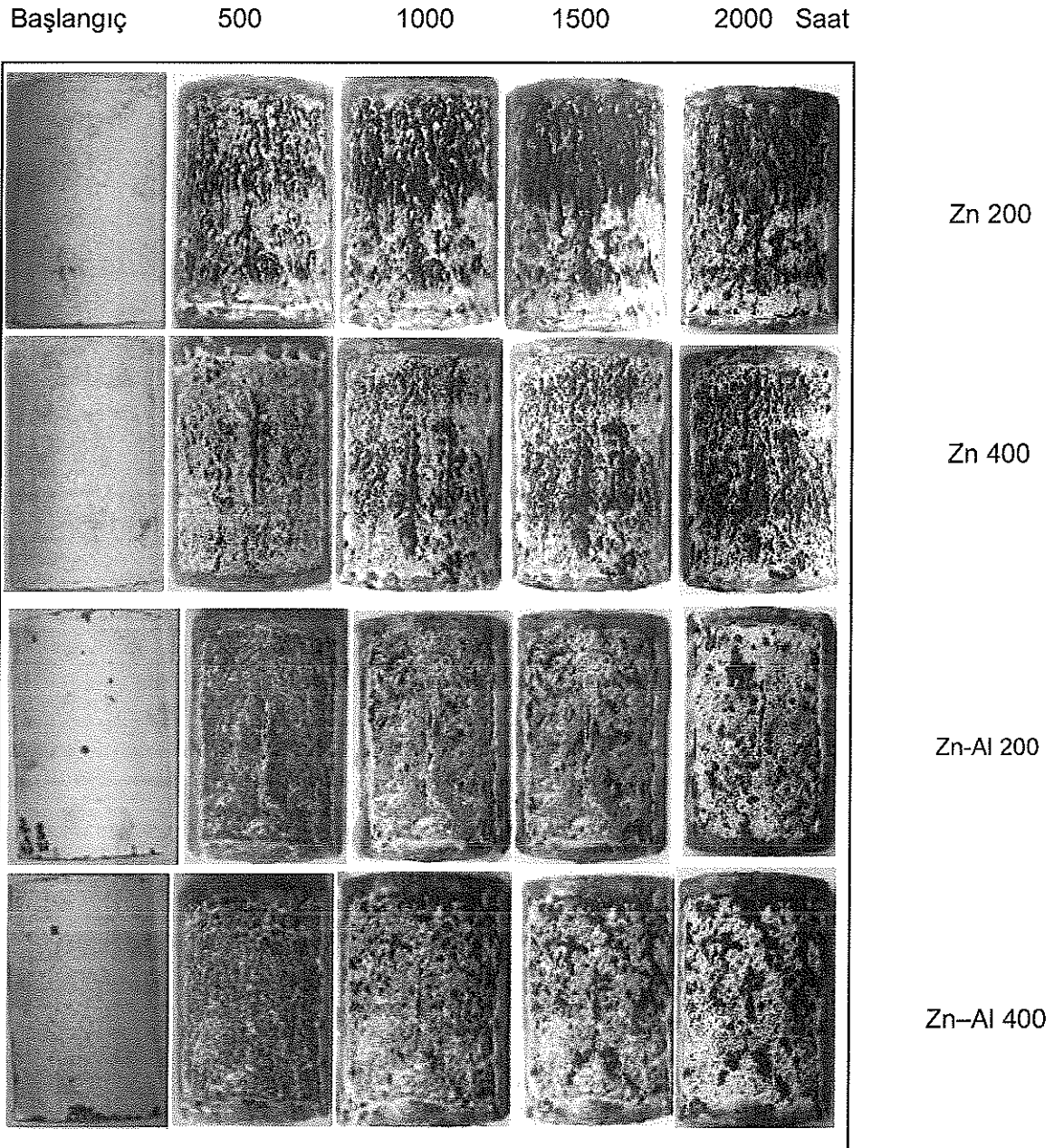
*(Handwritten signature)*

### 3.8. Endüstriyel numunelerin tuz testi (Düktil Demir Boru)

Endüstriden temin edilen düktül borular, test plakaları ile aynı şartlarda tuz püskürtme testine tabi tutulmuştur. Endüstriden temin edilen borular, herhangi bir yüzey hazırlama işlemine tabi tutulmadan kaplanmıştır. Borulara iki farklı kalınlıkta kaplama yapılmış ve kaplama kalınlığının korozyon direncine etkisi de araştırılmıştır.

Hızlandırılmış korozyon testi sonrasında Zn esaslı numunelerde hızlı bir kırmızı pas oluşumu gözlenmiştir. Artan kaplama kalınlığı Zn kaplamalarında korozyon direncinin artmasına sebep olmuştur (Şekil 3.36). Bu sonuç plaka testlerinden elde edilen sonuçlara paraleldir.

a) Grup I. – Isıl işlem görmemiş numuneler (Zn 200, Zn 400, Zn/Al 200 ve Zn/Al 400)

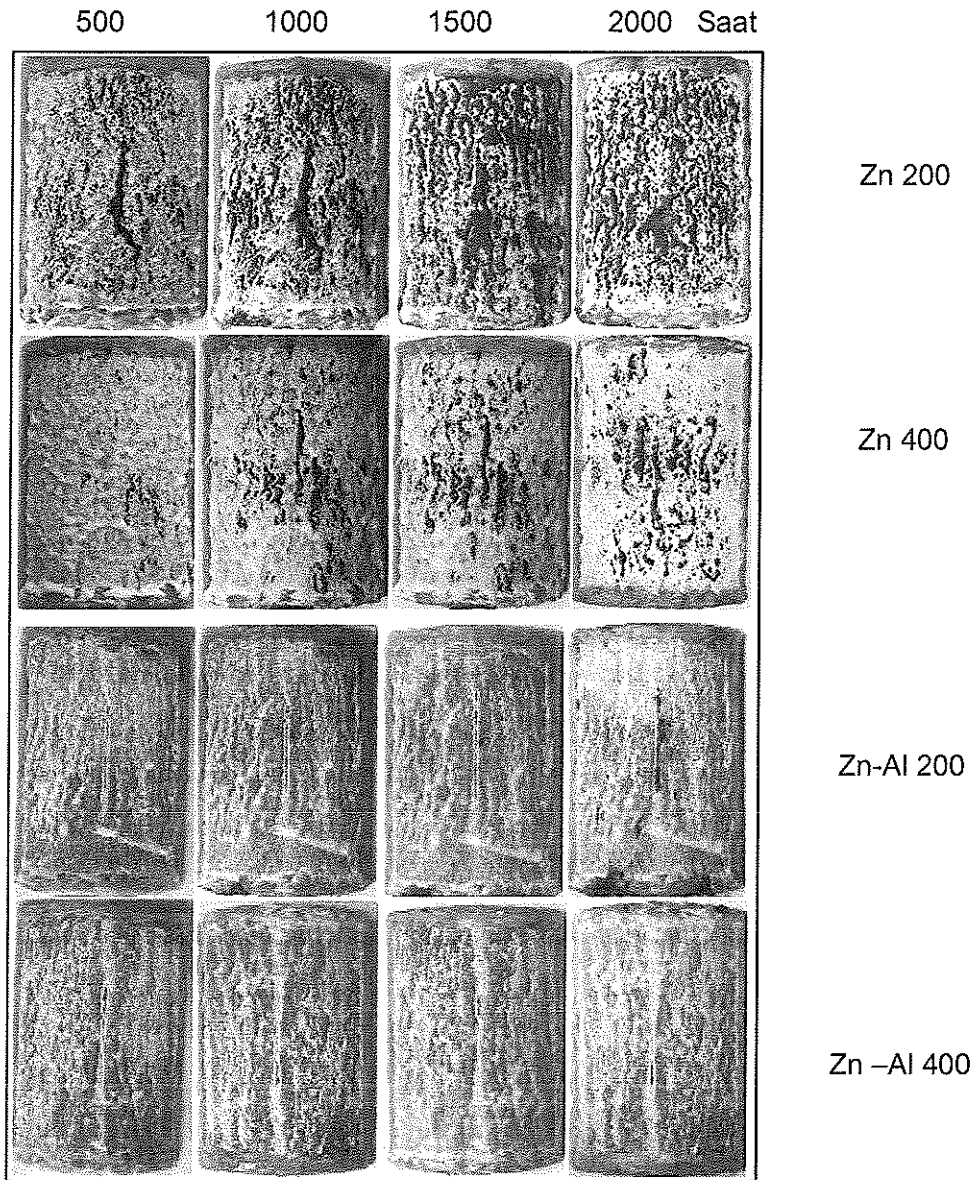


Şekil 3.36. Isıl işlem görmemiş numunelerin korozyon testi süresindeki performanslarının karşılaştırılması

Bu numunelerde yüzey hazırlama işlemi olan kumlama yapılmamıştır. Bu yüzden kaplamalarda kısmi dökülmeler ve atmalar söz konusudur. Korozyon altlık malzemesi olan boru yüzeyinden başlamakta olup, kaplamanın kabarmasına ve yüzeyden dökülüp ayrılmasına neden olmaktadır.

Şekil 3.37'de görüldüğü gibi Zn/Al 85/15 kaplaması Zn kaplamasından daha iyi bir korozyon direnci göstermektedir. Ayrıca kaplama kalınlığının korozyon davranışı üzerine olan etkisi belirgin bir şekilde tespit edilmemiş/gözlenmemiştir.

b) Grup I. – Isıl işlem görmüş boru yüzeyine uygulanan kaplamalar



Şekil 3.37. Isıl işlem görmüş numunelerin korozyon testi süresindeki performanslarının karşılaştırılması

Şekil 3.37'de verilen kaplama öncesi tavlama ısıl işlemi uygulanmış, Zn ve Zn/Al 85/15 kaplanmış malzemelerin tuz testi sonrası incelemelerinde bu numunelerde kaplamanın daha iyi yüzeye yapıştığı /adhezyonun yüksek olduğu söylenebilir. Buna bağlı olarak numunelerin

korozyon performansları ısıtıl işlem görmemiş numunelere kıyasla daha yüksektir. Bunun nedeni boru yüzeyinde ısıtıl işlemle suni olarak oluşturulan  $FexOy$  tabakası ile yüzeye biriktirilen Zn veya Al arasında iyi bağ oluşması olabilir. Dolayısıyla altlık kaplama tarafından daha iyi korunarak kabarma ve dökülmeye imkân vermemektedir.

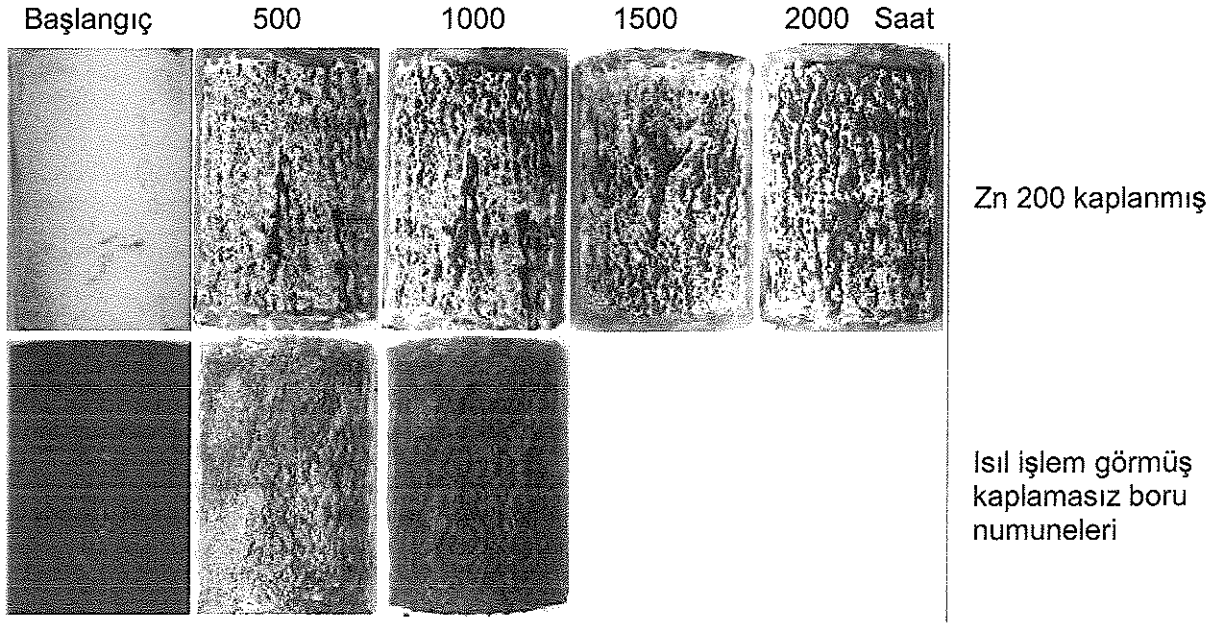
Genel olarak Zn/Al 85/15 tabakasının Zn kaplamasına göre daha iyi korozyon direnci gösterdiği görülmektedir. Zn kaplanmış numunelerin yüzeyinde görülen kırmızı pas alanlarının daha fazla olması bu durumun göstergesidir.

(Numunenin yüzeyi çiziktir, çizikler kapatılmış ve korozyondan koruma fonksiyonu sağlanmış olmaktadır.) Yüzeyde oluşan ZnO korozyon ürünü çizikleri doldurarak korozyona karşı korumayı sağlayan en önemli bileşendir.

Zn 500 saate kadar korozyon karşı koruma gösterirken, sürenin artmasıyla azalan kaplama kalınlığı ve kurban edilen Zn miktarının azalmasıyla Zn kaplama koruyuculuk vasfını gösteremez duruma düşmektedir.

c) Endüstriden temin edilmiş, ısıtıl işlem görmüş boru yüzeyine Zn kaplanmış numuneler

Endüstride kaplanmış olan numuneler, laboratuvar ortamında kaplanan numunelerin yanına koyularak aynı şekilde tuz testine tabi tutulmuştur (Şekil 3.38).



Şekil 3.38. Ticari olarak üretilmiş  $200 \text{ gr/cm}^2$  kalınlığında Zn kaplamalı düktil demir boru numunesi ile ısıtıl işlem görmüş yüzeyi oksitli düktil demir boru numunesi

Endüstriden temin edilen Zn kaplanmış numunelerin tuz testi performansı, laboratuvar ortamında  $200 \text{ g/m}^2$  olarak üretilen Zn kaplamalarla aynı koruyuculuk özelliğini göstermiştir.

Düktil demir numunesi yüzeyinde oluşturulan oksit tabakasının [28,29,30] nolu referanslarda belirtildiğinin tam tersine tek başına koruyuculuk özelliği göstermediği tespit edilmiştir.

8

ABD'de kaplama ihtiyacına gerek olmadığı düktil boruların tavlınmış bir şekilde kullanılabileceği ifade edilmektedir [33].

Bu çalışma, oksit tabakasının kaplamanın altlık yüzeyine yapışmasını arttırdığını dolayısıyla koruyuculuğunu arttırdığını göstermiştir.

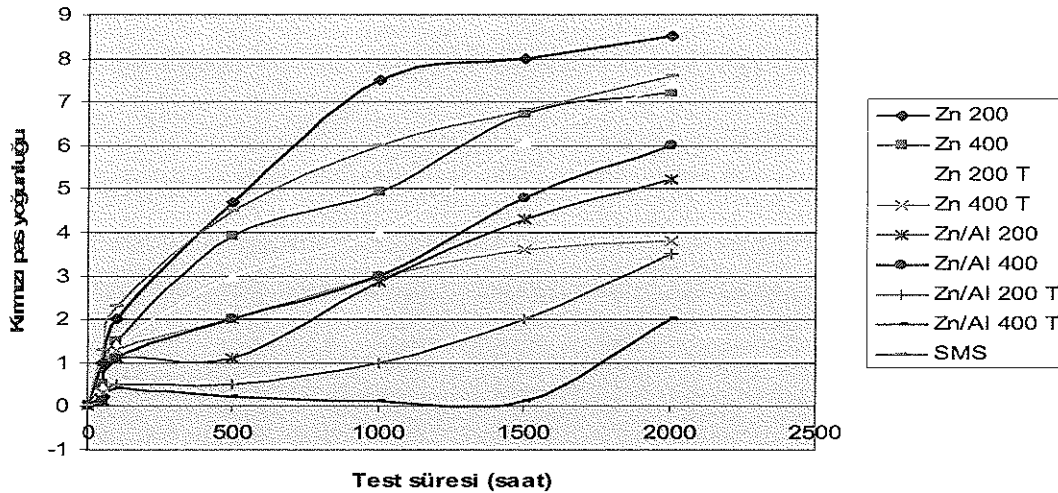
### 3.8.1. Endüstriyel Numuneler için Tuz testi sonuçlarının Değerlendirilmesi

Tuz testine tabi tutulan boru numunelerinin ilk değerlendirilmesi kısa sürelerde (50 ve 100 saat) yapılmıştır. Bu sürelerde numunelerde herhangi bir değişim gözlenmediği için, test inceleme periyodları [5, 6, 9] nolu referanslara da uygun olarak, 500 saatlik periyotlarda gerçekleştirilmiştir. ASTM standardına göre yapılan değerlendirmeler Tablo 3.7'de ve grafiksel olarak Şekil 3.39'da verilmiştir.

Tablo 3.7. Test numunelerinin korozyon testi boyunca kırmızı pas yoğunluğuna göre değerlendirilmesi (ASTM G 46-92 standardına göre).

Test Numunesi	50	100	500	1000	1500	2000	2500
Zn 200	1	2	4,7	7,5	8	8,5	
Zn 400	0,5	1,5	3,9	4,9	6,7	7,2	
Zn 200 (tavlanmış)	0,4	1,4	3	4	6,1	7,4	
Zn 400 (tavlanmış)	0,3	1,3	2	3	3,6	3,8	
Zn/Al 200	0,1	1,1	1,1	2,85	4,3	5,2	
Zn/Al 400	0,1	1,1	2	3	4,8	6	
Zn/Al 200 (tavlanmış)	0,25	0,5	0,5	1	2	3,5	5
Zn/Al 400 (tavlanmış)	0,2	0,4	0,2	0,1	0,1	2	3
Endüstri numunesi SMS	1,3	2,3	4,5	6	6,8	7,6	

Korozyon Performans Grafiği



Şekil 3.39. Test numunelerinin korozyon testi boyunca kırmızı pas yoğunluğuna göre performans değerlendirilmesi

8

Sonuç olarak, Zn kaplamalar da kırmızı pas yoğunluğu başlangıçta sürekli artan eğilim gösterirken daha sonra yaklaşık 1000 saat sonrasında kırmızı pas yoğunluğu daha az artan bir eğilim göstermektedir. Zn/Al 85/15 kaplamalarda ise 1500 saate kadar durgun veya düşük seviyede bir kırmızı pas oluşumu gözlemlenirken sürenin 1500 saatten daha da fazla olması durumunda kırmızı pas yoğunluğu biraz daha hızlı bir şekilde artmaktadır.

Grafikten tavllanmış ve tavlınmamış numunelerin kırmızı pas yoğunluğunun farklı olduğu da görülmektedir. Tavlınmış numunelerin koruyuculuk-korozyon performansı tavlınmamış numunelere göre daha yüksektir.

Şekil 3.39'daki grafiğin incelemesinde, Zn ve Zn/Al 85/15 kaplamalarında artan tabaka kalınlığına bağlı olarak kırmızı pas yoğunluğu azalmaktadır. Zn esaslı kaplamalar grafiğin üst bölgesinde, Zn-Al kaplamalar ise alt tarafta toplanmıştır. Bu durum Zn/Al 85/15 kaplamaların tuz testinde, Zn kaplamalara göre daha koruyucu olduğunu göstermektedir. 2000 saatin üzerinde bile yüzeyde koruyucu tabakalar mevcuttur.

### 3.8.2. Tuz Testi Sonrası Numunelerin Yüzey İncelemesi (SEM+EDS)

Tuz testine tabi tutulan numunelerin üst yüzeyinde SEM incelemeleri ve noktasal olarak EDS analizleri yapılmıştır.

#### a) Zn kaplamasının yüzey analizi

Zn kaplamasının yüzey fotoğrafı ve EDS analiz noktaları Şekil 3.40'da görülmektedir. SEM fotoğrafında yüzeyde çubuksu ve lifli bir türde korozyon ürününü çağrıştıran bir oluşum gözlenmiştir. Yapılan EDS analizlerinde yüzeyin tamamen ZnO ürünü olduğu, çubuksu/lifsi oluşumunda aynı bileşimi gösterdiği tespit edilmiştir.

Şekil 4.41'de ise farklı bir bölgenin analiz ve görüntüsü verilmiştir. Fotoğrafın alındığı noktada yüzey daha düzgün olup, çubuksu/lifsi bir oluşum gözlenmemiştir. Her iki yüzeyin SEM analizinde herhangi bir altlık ürünü olan Fe ve Fe türevlerine rastlanılmamıştır. Bu durum, Zn kaplamasının hala yüzeyde yeterli bir kalınlıkta olduğunu ispatlamaktadır. Çinkonun koruyuculuk değerinin bir süre daha devam etmesi mümkündür.



1 EDS analiz noktaları

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	79.12	28.249
Zn	Ka	205.50	71.751
			100.000

2

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	106.41	35.909
Zn	Ka	181.41	64.091
			100.000

3

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	88.36	30.419
Zn	Ka	202.79	69.581
			100.000



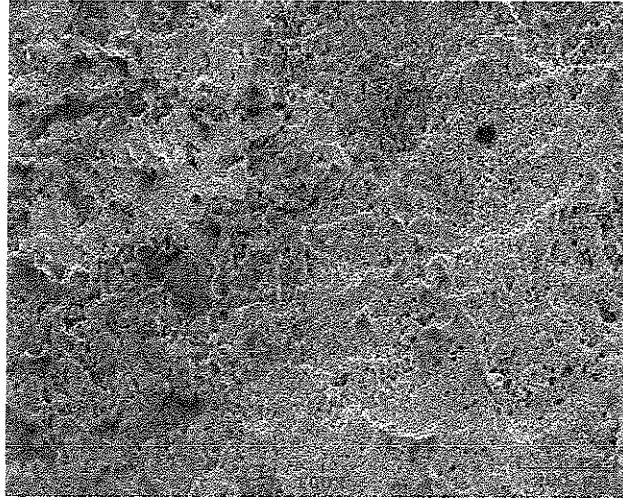
Şekil 3.40. Zn kaplamasının SEM görüntüsü ve EDS analiz tabloları

1 EDS analiz noktaları

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	84.30	34.561
Zn	Ka	154.35	65.439
			100.000

2

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	80.01	35.901
Zn	Ka	136.46	64.099
			100.000



Şekil 3.41. Zn kaplamasının SEM görüntüsü ve EDS analiz tabloları

**b) Al kaplamasının yüzey analizi**

Tuz testi sonrası Al kaplamasının SEM görüntüsünde iki farklı renk konsantrasyonuna sahip oluşum gözlenmektedir. Bu noktalardan 1,2 ve 3 yapılan analizlerde Al konsantrasyonu değişiminde herhangi bir fark gözlenmemiştir. Yüzeyde bulunan oksidin varlığı yüzeyde koruyucu bir  $Al_2O_3$  filminin oluştuğunun göstergesidir. Yüzeyin ikincil elektron görüntüsünde kaplamanın çatlamış bir yüzeye sahip olduğu görülmüştür (Şekil 3.42).

*J*

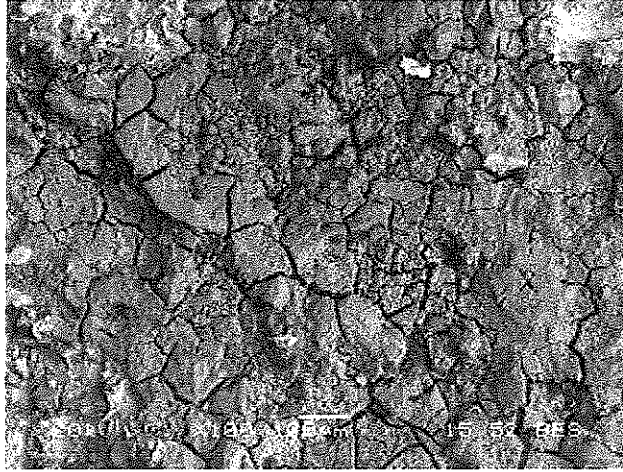
### 1 EDS analiz noktaları

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	401.12	66.875
Al	Ka	713.47	33.125
			100.000



### 2

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	212.95	62.991
Al	Ka	485.45	37.009
			100.000



### 3

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	205.98	61.342
Al	Ka	520.18	38.658
			100.000

Şekil 3.42. Al kaplamasının SEM görüntüsü (üst normal, alt backscatter) ve EDS analiz tabloları

### c) Zn/Al 85/15 kaplamasının yüzey analizi

Zn/Al 85/15 kaplamasının tuz testi sonrasındaki yüzey görüntüsü ve EDS analiz noktaları Şekil 3.43'de görülmektedir. Kaplamanın SEM görüntüsünde yüzeyin çok düzgün olmadığı ve birçok tepelik ve çukurlara sahip olduğu görülmektedir. Bu oluşumun sebebi, Zn kaplamasının bu noktalarda çözünerek kurban anot olarak koruyuculuk göstermesi, Al bileşeninin ise çözünmeden yüzeyde bulunmasıyla izah edilebilir. Numunenin bu noktasında yüzey tümüyle Zn/Al 85/15 kaplaması tarafından tuz korozyonuna karşı korunmuştur. Bu bölgede herhangi bir demir varlığı gözlenmemiştir. EDS analizlerine göre yüzeyde muhtemelen Zn ve Al dan oluşan ZnO ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> türevli bir tabaka mevcuttur.

Şekil 3.44'de ise numunenin farklı bir noktasından alınan SEM fotoğrafı ve EDS analiz değerleri görülmektedir. Bu şekilde numunenin yüzeyinin daha düzgün olduğu görülmektedir. Yüzeyden alınan EDS analizleri Şekil 3.43'de verilen analizden farklı olarak Fe varlığı tespit edilmiştir. Kaplama tabakası belirli noktalarda incelmış ve altlık malzemesi dedekte edilmiştir. Bu durum kaplama kalınlığının homojen olmamasının bir sonucudur. Analizlerde Zn, Al ve oksijen varlığı da gözlenmiştir.

*(Handwritten signature)*

1 EDS analiz noktaları

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	101.77	43.895
Al	Ka	43.31	7.673
Zn	Ka	100.23	48.431
			100.000

2

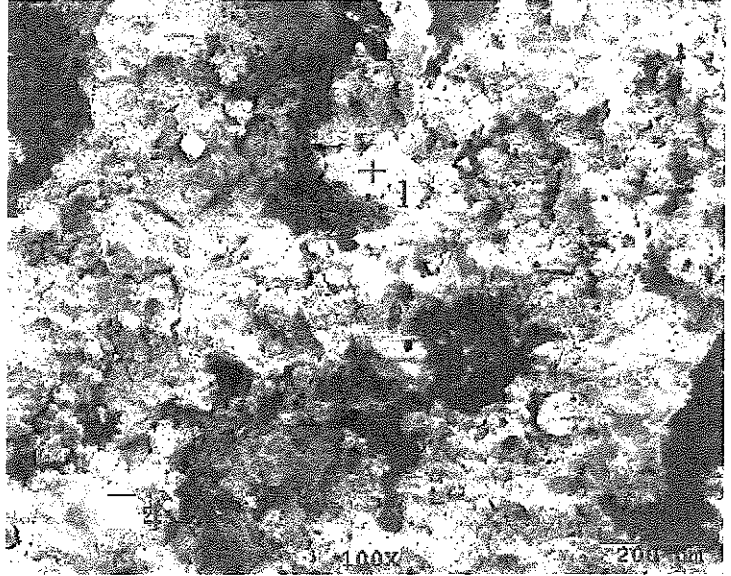
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	43.10	21.200
Al	Ka	12.02	2.462
Zn	Ka	168.70	76.338
			100.000

3

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	81.63	31.163
Al	Ka	19.49	3.134
Zn	Ka	172.13	65.703
			100.000

4

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	227.45	58.728
Al	Ka	90.53	9.696
Zn	Ka	93.46	31.576
			100.000



Şekil 3.43. Zn/Al 85/15 kaplamasının SEM görüntüsü ve EDS analiz tabloları

*(Handwritten signature)*

1 EDS analiz noktaları

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	293.44	56.039
Fe	Ka	283.47	42.388
Zn	Ka	4.81	1.572
% wt			100.000

2

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	58.32	26.331
Al	Ka	5.22	1.053
Fe	Ka	184.23	44.903
Zn	Ka	50.43	27.713
			100.000

3

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	115.95	66.944
Al	Ka	4.05	1.125
Zn	Ka	37.82	31.932
			100.000

4

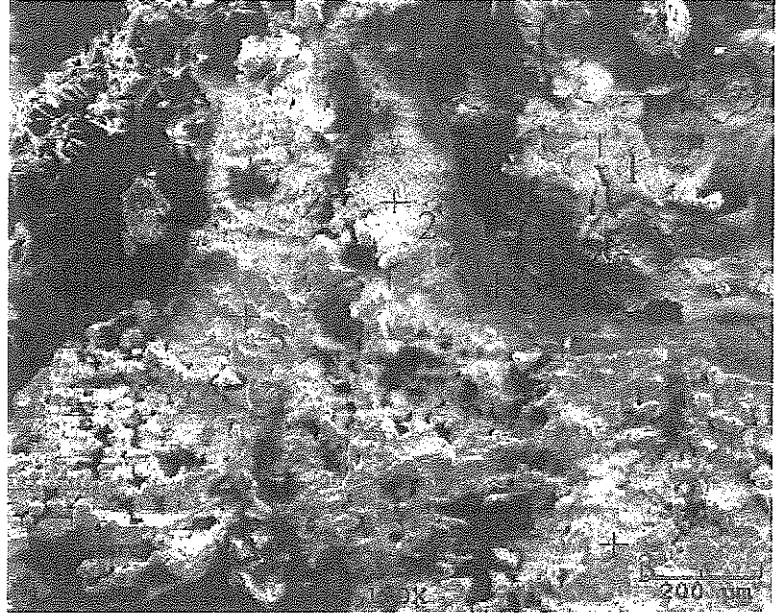
Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	249.27	52.572
Al	Ka	76.97	6.896
Fe	Ka	21.85	2.272
Zn	Ka	145.90	38.259
			100.000

5

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	131.81	47.674
Al	Ka	40.39	6.168
Zn	Ka	109.48	46.158
			100.000

Tüm alan

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Conc
O	Ka	165.62	49.053
Al	Ka	57.70	7.151
Zn	Ka	125.21	43.797
			100.000

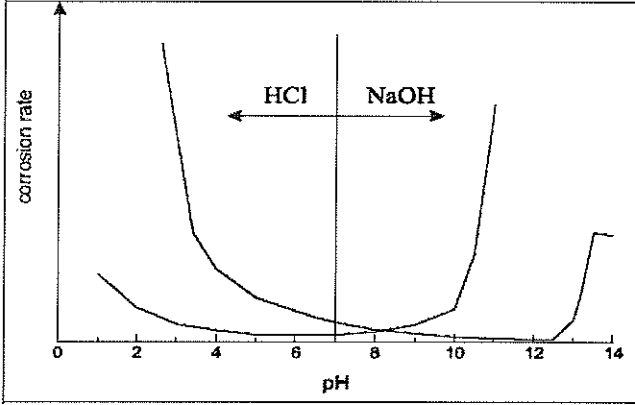


Şekil 3.44. Farklı bir noktadan alınan Zn/Al 85/15 kaplamasının SEM görüntüsü ve EDS analizleri

*(Handwritten signature)*

### 3.9. Anodik polarizasyon Eğrileri

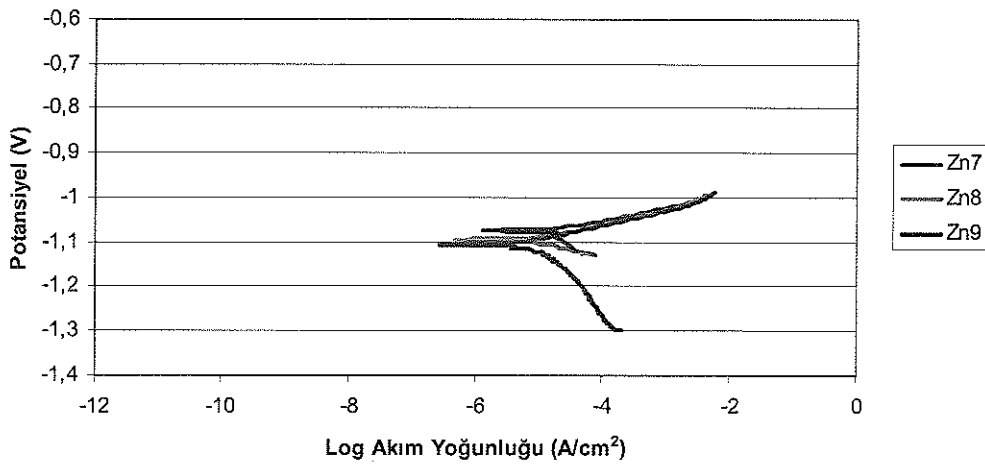
Deney şartları %3,5 NaCl çözeltisi içerisinde 10 milivolt/sn tarama hızında anodik polarizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Anodik polarizasyon eğrileri Tafel eğimlerinden otomatik olarak hesaplanmıştır. Tablolarda görülen  $I_{corr}$  değerinin büyüklüğü korozyon hızını ifade etmektedir. Şekil 3.45'de literatürden elde edilen Zn/Al 85/15 kaplamaların pH değerine bağlı olarak korozyon hızları görülmektedir. Çalışmamızda seçilen pH aralığı 6,2–7,0 arasında değişmektedir.



Şekil 3.45. pH değeri ve korozyon ortamına bağlı olarak Zn/Al kaplamasının korozyon hızı

#### a) Zn esaslı kaplamaların anodik polarizasyon eğrileri

Farklı parametrelerde üretilmiş olan Zn esaslı kaplamaların polarizasyon eğrilerinde herhangi bir pasifleşme bölgesi gözlenmemiştir. Zn ortamın pH bağılı olarak sürekli olarak kurban anot olarak altlığı korumaktadır (Şekil 3.46). Farklı parametrelerde kaplanmış Zn kaplamaların  $I_{corr}$  değerlerinde belirgin bir fark gözlenmemiştir.



Numuneler	$i_{corr}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	E (i=0) (mV)
Numune 7 Zn ( x bar, y amper)	0,0147	-1088
Numune 8 Zn	0,0123	-1103
Numune 9 Zn	0,0173	-1116

Şekil 3.46. Zn kaplamaların anodik polarizasyon eğrileri ve  $I_{corr}$  değerleri tablosu

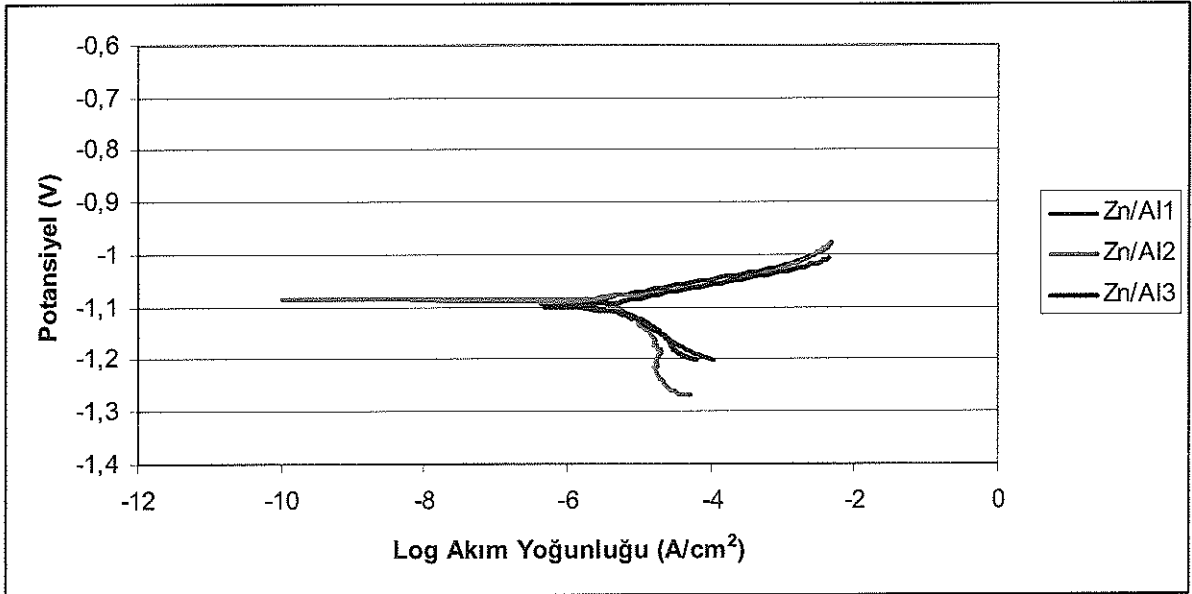
Handwritten signature or mark.

## b) Zn/Al 85/15 kaplamalarının anodik polarizasyon eğrileri

Farklı üretim parametrelerinde üretilen Zn/Al 85/15 kaplamaların anodik polarizasyon eğrileri Şekil 3.47'de görülmektedir. Farklı akım değerlerinde üretilen Zn/Al 85/15 kaplamalarının anodik polarizasyon eğrilerinde herhangi bir farklılık gözlenmemektedir. Zn/Al 85/15, kaplaması kurban olarak, herhangi bir pasif bölge göstermez ve sürekli ortamda harcanarak koruculuk özelliği göstermiştir.

Tafel eğimlerinde bulunan  $i_{corr}$  değerlerinden 3 nolu numunenin en yüksek korozyon direnci gösterdiği görülmektedir. Zn polarizasyon eğrilerinden herhangi bir pasifleşme bölgesi gözlenmemiştir. Bu beklenen bir durum olup, test ortamında Zn kurban olarak sürekli çözünerek altlık malzeme olan plakayı (Fe esaslı) korumaktadır. Yüzeşte herhangi bir pasif film tabakası meydana gelmediği eğrilerden anlaşılmaktadır. Pasivasyon zonu söz konusu değildir.

Zn-Al kaplamalarının düşük akım yoğunluğunda ve gaz basıncında üretilmiş olması bile koruyuculuk vasfı üzerine bir etkisi gözlenmemiştir. Polarizasyon eğrilerinde Zn/Al 85/15 grafiğinde Zn çözünmesi nedeniyle bir pasivasyon görülmemiştir.



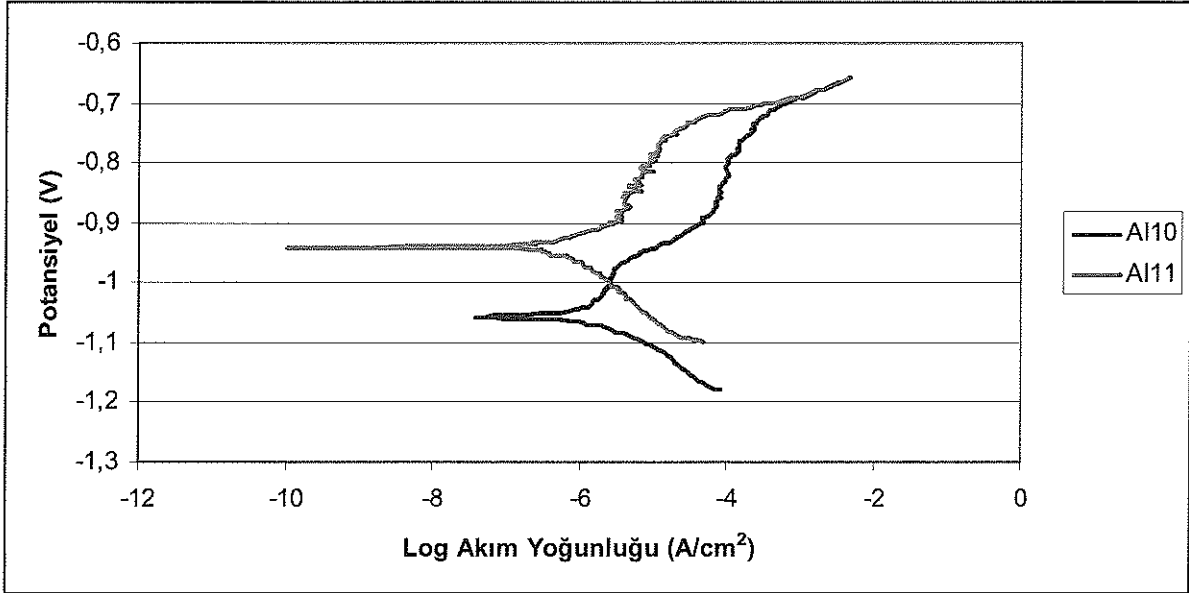
Numuneler	$i_{corr}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	E (i=0) (mV)
Numune 1 Zn/Al	0,004	-1097
Numune 2 Zn/Al	0,0114	-1096
Numune 3 Zn/Al	0,0023	-1104

Şekil 3.47. Zn/Al kaplamaların anodik polarizasyon eğrileri ve  $i_{corr}$  değerleri tablosu

8

### c) Al kaplamalarının anodik polarizasyon eğrileri

Al esaslı kaplamaların polarizasyon eğrilerinde bir pasifleşme bölgesi gözlenmektedir.  $i_{corr}$  değerinin diğer Zn ve Zn-Al esaslı kaplamalara göre çok düşük çıkması bu durumu desteklemektedir. Kaplamanın üretim parametresinin de belirgin bir özelliği gözlenmemiştir (Şekil 3.48).



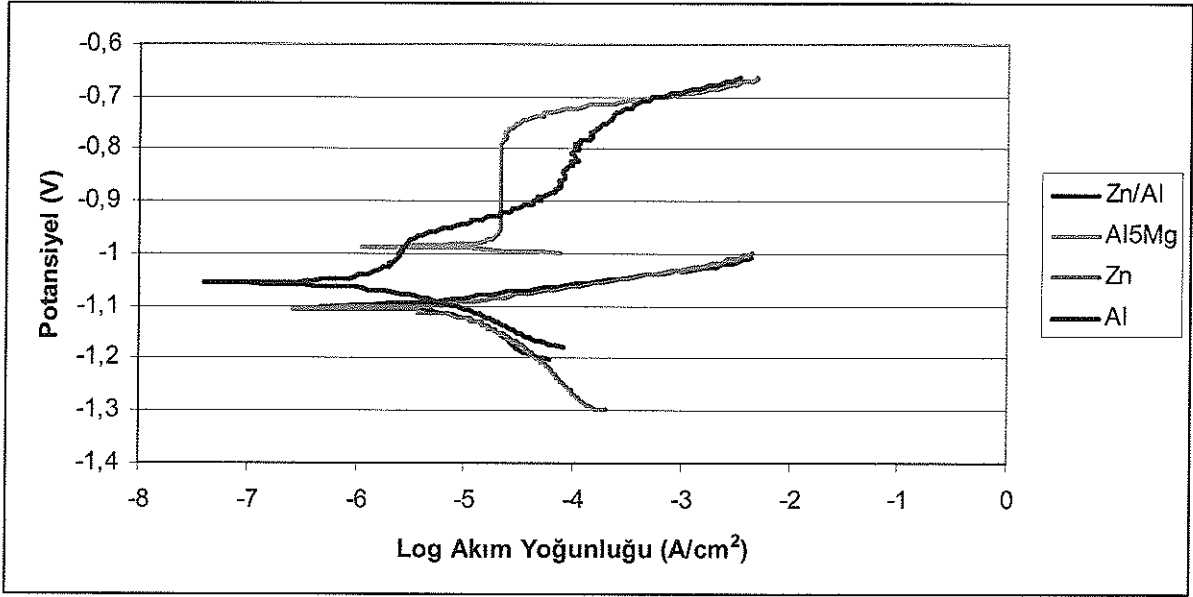
Numuneler	$i_{corr}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	E (i=0) (mV)	E <sub>oyuklanma</sub> (mV)
Numune 10 Al	0,00316	-1059	-930
Numune 11 Al	0,00074	-950	-723

Şekil 3.48. Al numunelerinin anodik polarizasyon eğrileri ve  $i_{corr}$  değerleri tablosu

### d) Zn, Zn/Al ve Al kaplamalarının toplu polarizasyon eğrileri ve değerlendirme

Zn, Zn/Al 85/15, Al ve Al5Mg kaplamalarının anodik polarizasyon eğrileri Şekil 3.49'da toplu olarak verilmiştir. Bu eğrilerden Al ihtiva eden Al5Mg ve Al kaplamasında pasifleşme görülürken (Al5Mg için anodik polarizasyon eğrileri ayrıca verilmemiştir). Zn kaplamasında ise herhangi bir pasifleşme bölgesi söz konusu değildir (kırmızı eğri).

Şekil 3.45'de verilen literatür grafiğine göre Al esaslı kaplamalar gösterdikleri pasifleşme bölgeleri ile en az korozyon hızı göstermiştir. En iyi korozyondan koruma özelliği pasivasyon ile birlikte Al5Mg, Al, Zn/Al 85/15 ve Zn şeklinde sıralanmıştır.



Numuneler	$i_{corr}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	E (i=0) (mV)
Zn/Al	0,0023	-1104
Al <sub>5</sub> Mg	0,0143	-985
Zn	0,0173	-1116
Al	0,00316	-1059

Şekil 3.49. Zn, Al ve Zn/Al 85/15 kaplamaların karşılaştırmalı olarak anodik polarizasyon eğrileri ve  $i_{corr}$  değerleri tablosu

8



## BÖLÜM IV. DEĞERLENDİRME

### 4.1. Genel

Yürütülen proje kapsamında ülkemiz, sanayimiz ve metalurji-malzeme bilimi camiası ve üniversitemiz/üniversitelerimizin kazanımları aşağıda verilmiştir.

Termal sprej sahasında ilk kez bir araştırma kurumu ark sprej kaplama teknolojisi konusunda bir proje faaliyeti gerçekleştirmiş ve bu konuda bir bilgi birikimi oluşturulmuştur. Sakarya Üniversitesi termal sprej laboratuvarı termal sprej konusunda daha da etkin ve yetkin hale geçmiştir. Proje çerçevesinde kazanılan donanım, lisans araştırma projeleri ve yüksek lisans tezleri kapsamında kullanılmış ve kullanılacaktır. Bu konuda yurt içinde gerçekleştirilen bildiri ve makale çalışmaları ile teknolojinin tanıtımı ülkemizin bilim ve endüstriyel kuruluşlara tanıtılması yönünde adımlar atılmıştır. Proje kapsamında özellikle yurt dışı odaklı konferanslarda sunulmak üzere toplam 5 adet bildiri gönderilmiştir. Yeni bildiri ve makalelerin hazırlanması çalışmaları sürmektedir.

### 4.2. Bilimsel

Projenin temel hedefi, ark sprej yöntemiyle üretilen kaplamaların üretim optimizasyonu ve buna bağlı olarak korozyon performansının (tuz püskürtme ve anodik polarizasyon teknikleri) belirlenmesidir.

Zn ve Zn/Al 85/15 kaplamalar tel ark püskürtme tekniği ile üretilmiş ve kaplama proses parametreleri belirlenmiştir. Çelik ve düktil demir altlık yapısı, kumlama şartları, endüstriyel kaplamalar (sanayiden temin edilmiş numuneler), splat (kaplama tabakası) oluşumu ve porozite yapısı irdelenmiştir.

Zn/Al 85/15 kaplamaları hızlandırılmış korozyon testi sonrasında en yüksek korozyon direncini göstermiştir. Kaplamaların korozyon direnci pH değerine bağlı olarak değişmektedir. Zn/Al 85/15 kaplamasında korozyondan koruma fonksiyonu Zn/Al 85/15 kaplamasındaki çinkonun (Zn) kurban anot olarak korozyondan koruma sağlaması şeklindedir. Yapılan hızlandırılmış korozyon testlerinde ve anodik polarizasyon çalışmalarında korozyon performansı en düşük olan kaplama Zn, pH'ya bağlı olarak Al kaplama ve pH'dan bağımsız olarak en yüksek korozyon direncini Zn/Al 85/15 kaplaması göstermiştir. 2000 saatin üzerinde yapılan tuz püskürtme testlerinde herhangi bir korozyon ürünü tespit edilmemiştir. Zn/Al yüzeyde koruyucu tabaka oluşturmasında beyaz pas (ZnO) oluşumu ön plana çıkmaktadır.

Endüstriyel numuneler üzerine yapılan kaplamaların korozyondan koruma performansının uygulanan ilave işlemlerle geliştirilebileceği net bir şekilde ortaya koyulmuştur. Özellikle yapılan ilave bir tavlama işlemi, kaplamaların adhezyon özelliklerini ve buna bağlı olarak korozyon direncini geliştirdiği görülmüştür.

Sonuç olarak, projenin ön görüşü olan hedeflere başarıyla ulaşılmıştır. Bundan sonraki adımlar ark sprej teknolojisinin diğer projelerde kullanımına yönelik çalışmalarda bulunmak ve elde edilen proje sonuçlarını endüstriyel kullanımlara sunmaya çalışmaktır.



## REFERANSLAR

- [1] ..... "Corrosion-a natural but controllable process", *Materials Performance*, pp.3, July 2002
- [2] Syrett B.C., Gorman J.A., Arey M.L., Koch G.H., Jacobson G.A., "Cost of corrosion", *Materials Performance*, p:18–22, March 2002
- [3] Panossian Z., Mariaca L., Morcillo M., Flores S., Rocha J., Pena J.J., Herrera F., Corvo F., Sanchez M., Rincon O.T., Pridybailo G., Simancas J., "Steel cathodic protection afforded by zinc, aluminium and zinc/aluminium alloy coatings in the atmosphere" , *Surface and Coatings Technology* 190, pp: 244-248, 2005
- [4] Davids J.R., "Surface engineering for corrosion and wear resistance", ASM, 2001
- [5] Knepper M., Priestersbach J., "How to successfully battle corrosion: Thermally spray coatings of zinc and zinc alloys", *Surface Engineering*, pp.384–391, 1997
- [6] Varacalle D.J., Zeek D.P., Zanchunck V., Sampson E., Couch K.W., Benson D., and Cox G.S., "Experimental studies of twin-wire electric arc sprayed zinc/aluminum alloy coatings", *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 7, pp: 513–520, December 1998.
- [7] Krüger J., Knepper M., "Arc spray coating for industrial application", *International Thermal Spray Conference*, Essen, Germany, 4-6 March 2002
- [8] Gullien D.P., "Oxidation behavior of in-flight molten aluminum droplets in the twin-wire electric arc thermal spray process", Doctor of Philosophy thesis, Engineering and Applied Science, Idaho State University, May 2005
- [9] Rodriguez, E.M.H., Paredes, R.S.C., Wido, S.H., Calixto, A., "Comparison of aluminum coatings deposited by flame spray and electric arc spray", *Surface & Coatings Technology*, 2007, accepted
- [10] Deshpande, S., Sampath, S., Zhang, H., "Mechanisms of oxidation and its role in microstructural evolution of metallic thermal spray coatings – case study for Ni-Al", *Surface & Technology* 200, pp. 5395 – 5406, 2006
- [11] Covino, B.S. J., Cramer, S.D., Bullard, S.J., Holcomb G.R. and Collins W.K., McGill G.E., "Thermal spray anodes for impressed current cathodic protection of reinforced concrete structure", *Materials Performance*, pp:27-33, January, 1999
- [12] David J.R., "Handbook of Thermal Spray Technology", ASM Internatiol, 2004
- [13] Jandin G., Lia H., Feng Z.Q., Coddet C., "Correlations between operating condition, microstructure and mechanical properties of twin wire arc sprayed steel coatings", Received 22 April 2002; received in revised form 8 October 2002
- [14] Plance M.P., Liao H., Coddet C., "Relationships between in-flight particle characteristics and coating microstructure with a twin wire arc spray process and different working conditions", *Surface and Coatings Technology*, Volume 182, Issues 2-3, pp. 215-226, 22 April 2004.
- [15] Hussary N., "Investigations into the wire arc spraying process", thesis of Doctor of Philosophy, Univesrity of Minnesota, May 2003
- [16] Zhu Y.L., Liao H.L., Coddet C., Xu B.S., "Characterization via image analysis of cross-over trajectories and in homogenetiy in twin wire arc spraying", *Surface and Coating Technology* 162, pp:301-308, 2003
- [17] Rodijnen F.V., Knepper M. "Low energy arc spraying for applications in the capacitor industry", *International Thermal Spray Conference*, Essen, Germany, 4–6 March 2002



- [18] Newbery, A.P., Grant, P.S., "Oxidation during electric arc spray forming of steel", *Journal of Materials Processing Technology* 178, pp.256-269, 2006
- [19] Watanabe, T., Wang, X., Pfender, E. and Heberlein J., "Correlations between electrode phenomena and coating properties in wire arc spraying", *Thin Solid Films*, Volume 316, Issues 1-2, pp. 169-173, 21 March 1998
- [20] Steffens H.D., and Nassenstein K., "Influence of spray velocity on arc-sprayed coating structure", *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 8 (3), pp.454-560, September 1999
- [21] Newbery A.P., Grant P.S., Neiser R.A. , "The velocity and temperature of steel droplets during electric arc spraying", *Surface & Coatings Technology* 195, pp:91-101, 2005
- [22] Zhu Y.L., Liao H.L., Coddet C., Xu B.S., "Characterization via image analysis of cross-over trajectories and in homogenetiy in twin wire arc spraying", *Surface and Coating Technology* 162, pp:301-308, 2003
- [23] Hale D.L., Swank W.D., Haggard D.C., "In-flight particle measurement of twin wire electric arc sprayed aluminum", *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 7 (1), pp.58-63, March 1998
- [24] Jandin G., Planche M.P., Liao H., and Coddet C., "Relationships between in-flight particle characteristics and coating microstructure fort he twin wire arc spray process", *International Thermal Spray Conference*, Essen, Germany, 4-6 March 2002
- [25] Newbery, A. P., Rayment T., and Grant, P. S., "A particle image velocimetry investigation of in-flight and deposition behaviour of steel droplets during electric arc sprayforming", *Materials Science and Engineering A*, Volume 383, Issue 1, pp.137-145, 10 October 2004
- [26] Zecho M., Nürnberger K.M., "Field tests on thermally sprayed zinc-(aluminum)-coating on steel", *Otto-Graf- Journal*, Vol 10, pp.60–75, 1999
- [27] Aramaki K., "Effect of organic inhibitors on corrosion of zinc in an aerated 0.5. M NaCl solution", *Corrosion Science* 43, pp. 1985–2000, 2001
- [28] Kroon D.H., Lindemuth D., Sampson S., and Vincenzo T., "Corrosion protection of ductile iron pipe", *Materials Performance*, pp24–29, Jan. 2005
- [29] Bonds R.W., Horton A.M., Oliver G.L., Barnard L.M. "Corrosion control statistical analysis of iron pipe", *Materials Performance*, pp30-34, Jan. 2005
- [30] Szeliga M.J. and Simpson D. M., "Evaluating ductile iron pipe corrosion", *Materials Performance*, pp22-27, July 2003
- [31] Çizmecioglu Z., "İsale Hatlarının Katodik Korunması", İSKİ yayınları, 1998
- [32] PAM, Saint Gobain/Canalisation, "Drinking a-water supply natural", *Ürün kataloğu*, 2003
- [33] Horn L.G., "The design decision model for corrosion control of ductile iron pipelines", [www.dipra.org](http://www.dipra.org)
- [34] Yılmaz F., Gulec A., and Cevher Ö., "Ductile iron pipe in harsh environments", 2nd. Conference on Application of Traditional and High Performance Materials in Harsh Environments, School of Engineering American University of Sharjah, United Arab Emirate, January 17–19 2006
- [35] Bütüfür M., "Influence of the aluminum content of sprayed zinc coatings on corrosion protection of steell", (Ph.D), *Materialprüfungsanstalt Universitat Stuttgart, Otto-Graf-Institut*, 2006
- [36] Vourlias, G., Pistofidis, N., Chaliambalias, D., Chrissafis, K., Pavlidou El., and Stergioudis, G., "Resistance of zinc thermal sprayed coatings on different corrosive environments", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 87 (2007) 2, 401–409

- [37] TRAN T "The influences of preparation on the bond strength of zinc twin-wire arc spray coating on steel", Master thesis, The Faculty of the department of chemical and materials engineering, San Jose University, August 2004



EK-1

## TUZ PÜSKÜRTME DENEYİ ASTM B 117 VE ASTM 1654 STANDARLARINA GÖRE NUMUNELERİN DEĞERLENDİRİLMELERİ

Korozyon deneyleri(Tuz Püskürtme), düktil demir ve çelik üzerine yapılan kaplamalara uygulanmıştır. Kaplamalar, Al, Zn-Al ve Zn olmak üzere hem çeşit hem de kendi aralarında uygulanan kaplama proses parametreleri açısından farklılıklar arz etmektedir. Tuz püskürtme ortamı %5 NaCl ihtiva etmektedir. Deney başlama tarihi 17.04.2007 ve bitiş tarihi 30.07.2007 dir. Yaklaşık 3,5 ay süren deney süresince tuz püskürtme kabini 24 saat kontrol altında tutulmuş, enerji kesintisi sebebiyle meydana gelen istemsiz durmalar ve kontrol sırasında kaybedilen zamanlar toplam süreden düşülmüştür. Deney dakika olarak toplam 151200 dk sürmüştür. Bu toplam süreden 14950 dk durma zamanı çıkarıldığında numunelerin net olarak deneye maruz kalma süresi 136250 dk dır. Diğer bir deyişle deney net olarak 2270 saat sürmüştür. Deney süresince ortam sıcaklıkları, sabah 10.00 ve akşam 17.00 olmak üzere günde iki defa ölçülmüştür. Deney sırasında ölçülen en düşük ortam sıcaklığı 8,5 °C, en yüksek ortam sıcaklığı ise 34 °C dir. Bu sıcaklık aralığı standartların belirttiği değerlerdedir. Bununla birlikte deney sırasında, arıtılan suyun iletkenlik değeri ile hazırlanan ve püskürtülen çözeltilerin pH değerleri kontrol edilmiştir (Ek 1). Arıtılmış suyun iletkenlik değeri µs biriminden ölçülerek sürekli kontrol altında tutulmuştur. Hazırlanan ve püskürtülen çözeltinin pH değerinin 6,5-7,2 aralığında olmasına dikkat edilmiştir. Numuneler belirli aralıklarla cihazdan çıkarılarak fotoğraflanmışlardır. Korozyon cihazından elde edilen program grafikleri de Ek 2' de verilmektedir.

### ASTM D 1654 Standardına göre Korozyon deneyi ve sonrası numunelere yapılan işlemler

Çizilmiş ve çizilmemiş numuneler, kaplama malzemesine uygun olan deney yöntemlerinden (B117, D 610, D714, D 870, D 1014, D1735, D2247, D2803, D 4141, D 4587, G23, G26, G85, G87) biri veya birkaçı kullanılarak korozyona maruz bırakılmaktadır. Kesilmiş kenarlar çeşitli koruyucu bantlar, boyalar veya kaplamalar kullanılarak korunabilir veya koruma yapılmadan korozyona maruz bırakılabilir. Numunelerin temizliğinde kullanılan hava, 3 mm nozuldan, en az 80 psi basınçta, 0,24 m3/dk olarak sağlanmalıdır. Deney sonrasında delaminasyon veya kabarma gibi korozyon dolayısıyla hasar gören kaplamanın yüzeyden uzaklaştırılması amacıyla kullanılan kazıyıcı ekipman, rijit bir spatula veya keskin kenar ve köşeleri olmayan aletlerden biri olmalıdır.

### Çizilmiş numuneler için değerlendirme

#### 1. Yöntem (Basınçlı hava)

Her numune, korozyon deneyi sonrasında hafifçe yıkanır, daha sonra 45 C' de su buharı kullanılarak temizlenir. Çizik kenarındaki alanı etkileyen sıcak buhar mekanik olarak tabakaların kaldırılmasını sağlar. Buhar nozulu, yaklaşık 45° açı ile numune yüzeyine doğrultulur ve çizik boyunca 15 dk süre içinde işlem bitirilir. Uygulama süresi tamamlanmadığında numuneler su dolu plastik torbalara daldırılarak, oda sıcaklığında bekletilmeli ve kurumaları engellenmelidir.

#### 2. Yöntem (Kazıma)

Deney sonrası numuneler, hafifçe çalkalanır ve 45 C deki su buharı kullanılarak temizlenir. Temizleme sırasında daha öncede belirtilen özelliklerde spatula kullanılır. Akan suyun altında spatula yüzeye dik olarak tutulur ve çizige paralel bir şekilde ileri geri hareket ettirilerek

altlıktan korozyon sebebiyle ayrılmış kaplamaların temizlenmesi sağlanır. Yalnızca hasar görmüş kaplama kaldırılır, hasarsız bölüme dokunulmaz. Numune kabinden çıkartıldıktan sonra 15 dk içinde temizleme işlemi tamamlanmalıdır, aksi halde kurumayı engellemek için plastik su torbalarında saklanmalıdır. Çizik bölgesindeki kaplama kayıpları, Tablo 1' de önceden tanımlanan skala yardımıyla değerlendirilmektedir. Çizik bölgesinden maksimum ve minimum korozyon uzaklıkları mm olarak tespit edilerek ortalamaları alınmaktadır. Bu yöntem tek taraflı bir tanımlamadır. Bununla birlikte Tablo 2' de kullanılarak çizikten uzak alandaki korozyonda tanımlanabilmektedir. Bazı korozyon çalışmalarında numuneler Tablo 1 ve 2 kullanılarak değerlendirilmekte ve iki değer ortalaması alınarak birleşik katsayı bulunmaktadır.

Tablo 1. Çizikteki hasar oranı

<b>Çizik etrafındaki alanın çizik merkezine uzaklığı</b>	
<b>Milimetre</b>	<b>Değerlendirme Numarası</b>
Sıfır	10
0-0,5	9
0,5-1	8
1-2	7
2-3	6
3-5	5
5-7	4
7-10	3
10-13	2
13-16	1
16 dan büyük	0

Tablo 2. Çizilmemiş alandaki değerlendirme

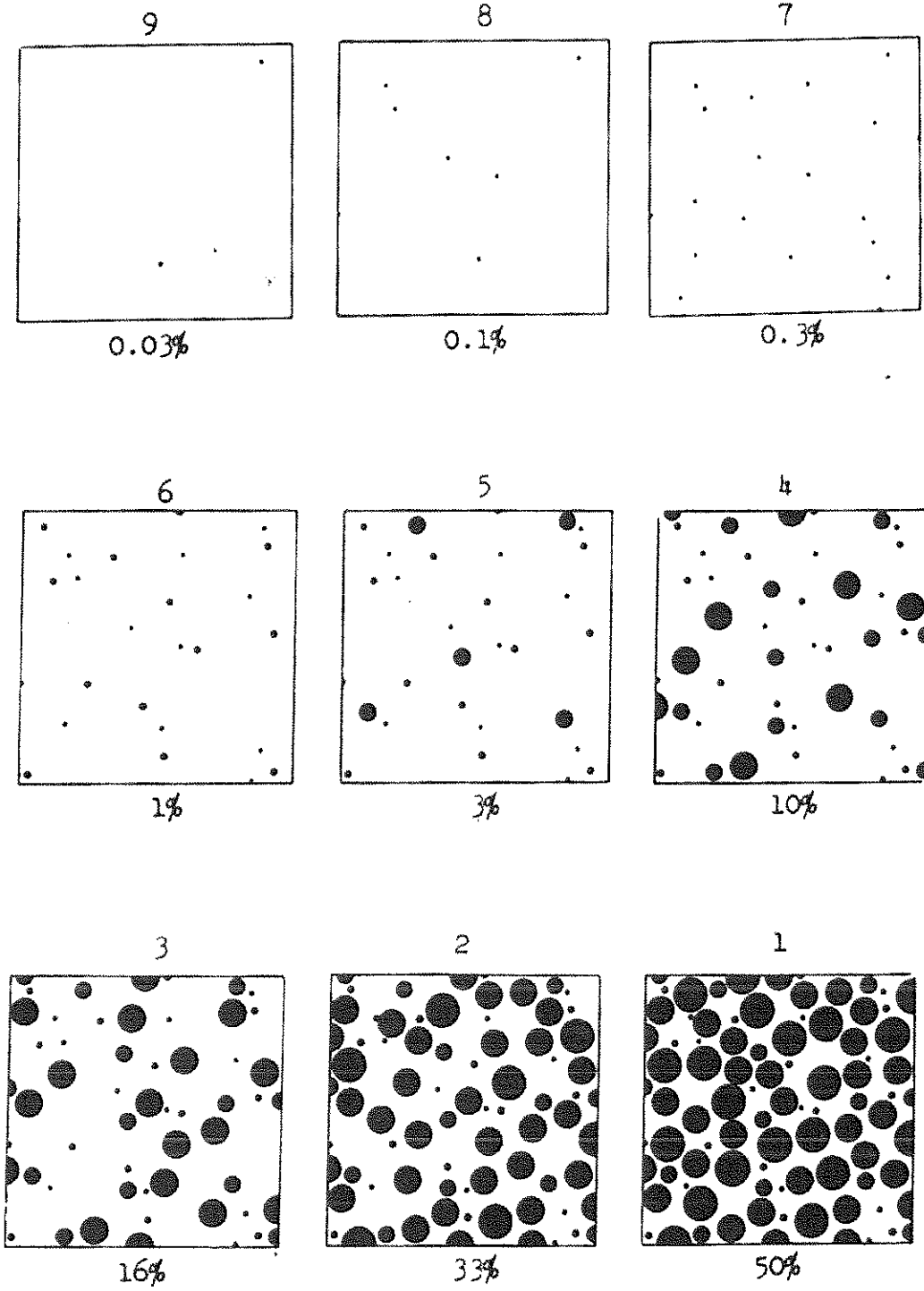
<b>Çizilmemiş alandaki korozyon</b>	
<b>Hasara uğrayan alan %</b>	<b>Değerlendirme Numarası</b>
Hasarsız	10
0-1	9
2-3	8
4-6	7
7-10	6
11-20	5
21-30	4
31-40	3
41-55	2
56-75	1
75 den büyük	0

### Çizilmemiş numuneler için değerlendirme

Deney sonrasında çıkartılan numuneler yıkanır ve 40 C deki su buharı ile muamele edilir. Yüzey bir peçete veya basınçlı hava yardımıyla kurutulur. Kurutma sırasında numune üzerindeki koroziye alana hasar verilmemelidir. Çizilmemiş numune üzerindeki kabarcıklar, noktalar ve diğer hasarlar tespit edilmelidir. ASTM D 714 ve D 610 standartları kullanılarak hasarlı alan tespit edilmektedir. Değerlendirme sırasında kenarlardan 12,7 mm uzaklık daki

alanlar ihmal edilmelidir. Hesaplanan alan % hasara çevrilmeli ve Tablo 2 deki hasar numarası bulunmalıdır.

**ASTM D 610 standardına göre numunelerin değerlendirilmesi**



*(Handwritten signature)*

**TÜBİTAK**  
**PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

<b>Proje No:</b> 105M061
<b>Proje Başlığı:</b> Termal Püskürtme Tekniği ile Yüksek Performanslı Zn/Al 85/15 Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu
<b>Proje Yürütücüsü ve Araştırmacılar:</b> Prof. Dr. Fevzi YILMAZ, Doç.Dr. Fatih ÜSTEL, Doç Dr. Ahmet TÜRK, Yrd. Doç.Dr Akın AKINCI
<b>Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:</b> Sakarya Üniversitesi – Esentepe Kampüsü, 54187, Sakarya
<b>Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi:</b>
<b>Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:</b> 01.09.2005 – 01.09.2007
<b>Öz (en çok 70 kelime):</b> <p style="text-align:center"><b>Abstract</b></p> <p><b>THE STRUCTURE AND CHARACTERIZATION OF ZINC/ALUMINUM 85/15 HIGH PERFORMANCE COATINGS PRODUCED BY THERMAL SPRAY TECHNIQUE</b></p> <p>Nowadays, the classical protective coating applications are insufficient at harsh working environments. Atmospheric and underground corrosion protection studies are directed towards the search of new materials. Metallic coating and paint applications became important area. These are because of increasing the metallic materials usage and necessity to extend the life span of the articles. Zinc coating by galvanizing is the well known metallic coating technique. Thermal spray coatings of Zn and Zn/Al, on the other hand, display many advantages and penetrated to industry. Zn/Al 85/15 coatings produced by wire arc spray technique, answers the need of techno-economical requirements. In this project, optimum spray parameters of Zn/Al coatings produced by electric arc technique were determined. The coatings produced under 3 Bar atomizing gas pressure and 200 Ampere melting current showed sufficient mechanical properties and corrosion behavior. The coatings produced were characterized by structurally and examined phase formation. In addition to these, accelerated corrosion tests (Salt Spray) and anodic polarization tests were carried out to see the corrosion performance. As a conclusion, Zn/Al 85/15 alloy coatings showed better corrosion protection than zinc and aluminum coatings alone. Zn/Al coatings, showed both sacrificial behavior experienced by Zn and protective insoluble zinc corrosion product formation. Aluminum on the other hand displays passive corrosion protection behavior by the formation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films on the surface.</p> <p><b>Özet</b></p> <p>Günümüzün ağırlaşan çalışma şartlarında klasik koruyucu kaplama uygulamaları yetersiz kalmaktadır. Atmosferik ve yeraltı korozyon uygulamalarına yönelik çalışmada, yeni malzeme arayışları söz konusudur. Metalik malzemelerin kullanımının artmasına bağlı olarak, çeşitli atmosfer koşullarında servis veren metalik malzemelerin servis ömürlerinin artırılması için metalik kaplama ve boya uygulamaları öne çıkmıştır. En çok bilinen koruyucu metalik kaplama yöntemi galvanizleme ile Zn kaplamadır. Bunun yanında birçok avantajı bir arada sağlayan termal püskürtme Zn ve Zn/Al kaplamalarda koruyucu kaplama olarak kullanılmaya başlanmıştır. Elektrik ark spreyle üretilen Zn/Al (85/15) kaplamaları, günümüzün tekno-ekonomik beklentilerini karşılamaktadır. Projede, elektrik ark sprey yöntemi ile uygulanan Zn/Al kaplamasının, optimum üretim parametreleri belirlenmiştir. Uygulamada kullanılan 3 bar atomizasyon gaz basıncı ve 200 Amper ergitme akımıyla üretilen kaplamalar, yeterli özellikler ve korozyon davranışı göstermiştir. Üretilen kaplamalar, yapısal ve faz yönünden karakterize edilmiştir. Ayrıca korozyon davranışının ortaya koyulması amacıyla hızlandırılmış korozyon testi (tuz püskürtme) ve anodik polarizasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak Zn/Al (85/15) alaşım kaplaması, Zn ve Al kaplamalarına göre daha üstün korozyon direnci göstermiştir. Zn/Al kaplaması, Zn bakımından hem kurban anot davranışı hem de suda çözünmeyen korozyon ürünleri ile koruma sağlar. Al ise yüzeyde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oluşumuyla pasifleşme davranışı göstererek korozyondan koruma sağlamaktadır.</p>
<b>Anahtar Kelimeler:</b> Elektrik ark sprey, Zn kaplama, Zn/Al 85/15 kaplama, korozyon <b>Keywords:</b> Twin wire arc spraying, Zn coatings, Zn/Al, coatings, corrosion
<b>Projeden Yapılan ve Yapılacak olan Yayınlar:</b>



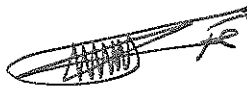
## 1. Bildiriler

- Güleç A., Üstel F. Türk A., Cevher Ö. Akıncı A. Yılmaz F., "Ark Sprey Kaplama Teknolojisi ve Uygulamaları", 13. Uluslararası Metalurji-Malzeme Kongresi 09-11 Kasım 2006.
- 2008 Yılı Thermal Spray (Crossing Borders) 2-4 June 2008 Maastricht-Netherlands'da gerçekleştirilecek konferans için 4 adet özet gönderilmiştir. Kabul edilmesi halinde söz konusu sunumlar gerçekleştirilecektir.
  - a) Corrosion Performance Of Arc Sprayed Zn, Zn/Al 85/15 Coatings On Ductile Iron Pipe
  - b) Study On Corrosion Resistance Behaviors Of Zn, Al, Zn/Al 85/15 Coatings That Produced By Twin Wire Arc Spray Technique On Steel Substrate
  - c) The Effect of Process parametres on the Microstructure and machanical properties of arc sprayed Zn, Zn/Al, Al coatings
- Güleç A., Üstel F., Yılmaz F., "Comparision of the corrosion performance of Zn and Zn/Al (85/15) coatings that produced by twin wire arc spray technique", 3 rd IMS International Conference on Applications of Traditional and High Performance Materials in Harsh Enviromen, January 23-24, 2008, Sharjah UAE. (Kabul edildi-Sunulacak)

## 2. Makaleler ( 4 tane yurt içi)

- Akıncı A., Korozyon Deneyleri ile Kaplamaların Değerlendirilme Yöntemleri", Yüzey İşlemler Dergisi, Sayı 56, Eylül-Ekim 2007.
- Akıncı Al., "Koruma Amaçlı Kaplamaların Nötral Tuz Püskürtme (sis) Korozyonu", Sayı 55, Sf. 64-74, Temmuz-Ağustos 2007.
- Güleç A., Üstel F., Yılmaz F., "Elektrik İletim Hatlarındaki Korozyon ve Önlenmesi", Elektrik Dergisi, Sayı 213, sf. 164-169, 02/2007.
- Yılmaz F. Üstel F., "Elektrik Ark Sprey Teknolojisi", Galvanoteknik Dergisi, 10/2006.

<b>2. Dönem İçinde İdari Gelişmeler</b>
<b>3. Proje Çalışma Takvimine Uygun Yürümüyorsa Gerekçeleri</b>
<b>4. Bir Sonraki Dönemde Yapılması Planlanan Çalışmalar</b>
<b>5. Destekleyen Diğer Kuruluşlarla İlgili Sorunlar Varsa Ayrıntıları ve Çözüm Önerileri</b>
<b>6. Dönem İçinde Yayınlanan ve Toplantılarda Sunulan Bildiriler</b>

PROJE YÜRÜTÜCÜSÜNÜN ADI SOYADI	İMZASI	TARİH
Prof. Dr. Fevzi Yılmaz		18.01.2008

NOT: Raporun tüm sayfaları proje yürütücüsü tarafından parafılanacak, sadece son sayfa imzalanacaktır.