

S235JR Çeliğinde Galvaniz Kaplamanın Korozyon Direncine Etkisi

Ahmet Sarı¹, Cemal Çarboğa^{2*}

¹Graduate School of Science and Engineering, Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Nevşehir, TURKEY

²Metallurgical and Materials Engineer Department, Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Nevşehir, TURKEY

Corresponding author: Cemal Çarboğa (e-mail: ccarboga@nevsehir.edu.tr).

Submitted on 28.01.2025, Revised on 29.01.2025, Accepted on 17.07.2025, Published online on 31.12.2025

ÖZET Bu çalışmada, S235JR çeliğinin, sıcak daldırma galvaniz yöntemiyle kaplanıp, korozyona karşı mukavemeti ve kaplamanın korozyon ortamında malzemeye etkisi araştırılmıştır. Galvaniz kaplama işlemi $450 \pm 5^\circ\text{C}$ yapılmıştır. Kaplanan numunelerin metalografik olarak hazırlanması sonrasında kaplama tabakası kesiti optik mikroyapı ve mikrosertlik analiz yöntemleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Optik mikroskop analizine göre kaplama tabakası kalınlığı işlem sıcaklığı ve süreye bağlı olarak artış göstermiştir. Mikrosertlik analizleri sonucunda ise kaplama tabakası yüzey sertliği maksimum 458 HV olarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde yapılan kaplama işleminin sıcaklık ve süre parametrelerine bağlı olarak malzeme yüzey özelliklerini iyileştirdiği sertlik değerlerinin arttığı görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELER S235JR Çeliği, Galvaniz, Korozyon, Kaplama.

ABSTRACT S235JR steel was coated with hot dip galvanization method and its resistance to corrosion and the effect of the coating on the material in the corrosion environment were investigated. Galvanizing process was carried out at $450 \pm 5^\circ\text{C}$. After metallographic preparation of the coated samples, the coating layer cross-section was characterized using optical microstructure and microhardness analysis methods. According to optical microscope analysis, the coating layer thickness increased depending on the process temperature and time. As a result of microhardness analysis, the surface hardness of the coating layer was determined as maximum 458 HV. As a result of the obtained results, it was observed that the coating process improved the material surface properties and increased the hardness values depending on the temperature and time parameters.

KEYWORDS S235JR Steel, Galvanized, Corrosion, Coating.

1. GİRİŞ

Galvanizli çelik, etkili korozyon direnci ve dayanıklılığı sayesinde çeşitli endüstrilerde vazgeçilmez bir malzeme haline gelmiştir. Çeliğin gücünü çinko kaplamanın koruyucu özellikleriyle birleştirerek uzun ömür ve dayanıklılık gerektiren uygulamalar için idealdir. Galvanizli çeliğin özelliklerini, üretim yöntemlerini, uygulamalarını, avantajlarını, dezavantajlarını ve gelecekteki eğilimlerini inceleyerek modern inşaat ve imalatları önemi oldukça yüksektir [1]. Galvanizli çeliğin performans ve uygulama alanlarının doğru değerlendirilebilmesi için, öncelikle çeliğin kendine özgü yapısal ve mekanik özelliklerinin anlaşılması gerekmektedir. Çelik, esas olarak demir ve karbondan oluşan, karbon içeriği tipik olarak ağırlıkça %0,2 ila %2,1 arasında olan bir alaşımdır. Diğer elementlerin eklenmesiyle birlikte karbon içeriğindeki değişiklikler,

her biri özel uygulamalara uygun olan farklı tür ve derecelerde çeliklerin ortaya çıkmasına neden olur. Galvanizli çelik, korozyona karşı korumak için çinko tabakasıyla kaplanmış çeliktir. Çinko, çelik ile çevre arasında bir bariyer görevi görerek nem ve oksijenin alttaki metale ulaşmasını engeller. Bu koruyucu kaplama, çelik ürünlerin ömrünü önemli ölçüde artırarak onları dış mekan ve endüstriyel uygulamalara uygun hale getirir. Galvanizleme işlemi, çeliğin yüzeyine çeşitli yöntemlerle bir çinko tabakasının uygulanmasını içerir. En yaygın galvanizleme yöntemleri; sıcak daldırma galvanizleme, elektrog galvanizleme, çinko sprey kaplama ve galvanizli kaplama yöntemleridir. Sıcak daldırma galvanizleme; çelik, 450 ile 460°C (842 ile 860°F) arasındaki sıcaklıklarda erimiş çinko banyosuna daldırılır. Isı, çinkonun çelikle birleşmesine neden olarak kalın ve dayanıklı bir kaplama oluşturur.

Sıcak daldırma galvanizleme, sağlam koruyucu özellikleriyle bilinir ve büyük yapısal bileşenlerde yaygın olarak kullanılır. Elektro galvanizleme ise; elektrokaplama işlemi yoluyla çinko kaplamanın uygulanmasını içerir. Bu işlemde çelik, çinko tuzları içeren bir çözeltiye daldırılır ve çözeltiden elektrik akımı geçirilerek çinkonun çelik yüzey üzerinde birikmesi sağlanır. Elektro-galvanizleme yoluyla üretilen çinko kaplama, sıcak daldırma galvanizlemeye elde edilenden daha ince ve daha düzgün olma eğilimindedir [2]. Çinko spreyci kaplama yöntemi; erimiş çinkonun çelik yüzeye püskürtme tekniği kullanılarak uygulanmasını içerir. Çinko spreyci kaplama genellikle tamir ve bakım uygulamalarında kullanılır ve orijinal galvaniz kaplamanın aşınmış olabileceği koruyucu bir katman sağlar. Galvanizli kaplamada; çelik önce sıcak daldırma galvanize edilir ve daha sonra kontrollü bir atmosferde ısıtılarak çinkonun bir kısmının çelik yüzeyindeki demir ile reaksiyona girmesi sağlanır. Bu, mükemmel boya yapışması ve korozyon direnci sağlayan bir kaplama ile sonuçlanır [3]. Tüm bu bilgilerin ışığında biz ise çalışmamızda sıcak daldırma galvaniz işlemi ile ilerleyerek istediğimiz sonuçları elde ettik. Farklı galvanizli çelik türleri, metrekaşe başına gram (g/m^2) cinsinden ölçülen çinko kaplamanın kalınlığı ile karakterize edilir. Yaygın türleri vardır. Bunlarda G30 kalitesi, yaklaşık 30 g/m^2 çinko kaplamaya sahiptir ve genellikle neme maruz kalmanın sınırlı olduğu iç mekan uygulamalarında kullanılır. Bizim kullandığımız kalite olan G60, yaklaşık 60 g/m^2 çinko kaplamaya sahiptir. Orta derecede dış mekan maruziyetine uygundur ve genellikle çatı kaplama panelleri ve dış cephe kaplamalarında kullanılır. G90 kalitesi, yaklaşık 90 g/m^2 lik bir kaplamaya sahiptir ve bu da onu daha zorlu ortamlar ve çitler, direkler ve yapısal kirşler gibi uygulamalar için uygun hale getirir. çinko-alüminyum kaplama, bazı galvanizli çelikler çinko ve alüminyum karışımı ile kaplanarak korozyon direnci ve ısı yansıtma özelliği artırılır [4]. Modern mühendislik uygulamalarında kullanılan metalik malzemelerin dayanıklılığı ve uzun ömürlü olması, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. Özellikle yapısal çelikler, inşaat, otomotiv, enerji ve altyapı sektörlerinde yoğun şekilde kullanıldığından dolayı korozyon gibi çevresel etkilere karşı korunmaları kaçınılmazdır. Bu bağlamda galvanizleme işlemi, çeliğin ömrünü artırmak amacıyla en yaygın başvurulmuş yüzey koruma yöntemlerinden biridir. Galvanizleme işlemi, çelik yüzeyine çinko gibi anodik özellik gösteren bir metal kaplayarak hem fiziksel hem de elektro-kimyasal koruma sağlamaktadır [5]. Bu çalışmada, düşük karbonlu bir yapı çeliği olan S235JR'nin sıcak daldırma galvaniz yöntemiyle kaplanması sonucu elde edilen korozyon

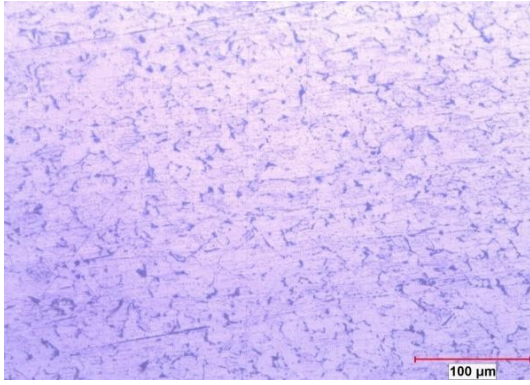
direnci değerlendirilmektedir. Galvanizlemenin bu çelik türü üzerindeki etkisi, mikro yapısal değişimlerle birlikte kaplama kalınlığı ve sertlik değerleri açısından analiz edilmiştir. Bununla birlikte, galvanizlemenin elektrokimyasal performansına dair Tafel eğrileri kullanılarak elde edilen veriler yorumlanmış ve sonuçlar literatürle karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEMLER

Bu tez çalışmasında düşük karbonlu yapı çeliği olan S235JR numuneleri kullanılmıştır. Numuneler, piyasada standart boyutlarda temin edilen 2 mm kalınlığında sac formunda tedarik edilmiştir. Bu çelik türü, Avrupa normlarına uygun olarak üretilmekte olup, iyi kaynaklanabilirlik ve şekillendirilebilirlik özellikleri ile tanınmaktadır. Malzemenin düşük karbon içeriği sayesinde galvanizleme öncesi yüzey hazırlığı kolaylıkla yapılabilmiştir. Çinko ise kaplama malzemesi olarak tercih edilmiştir. Çinko, periyodik tablonun 12. grubunda yer alan, anot özelliği yüksek, düşük erime noktasına sahip bir elementtir. Elektrokimyasal özellikleri sayesinde galvanik anot görevi görebilir ve çeliği korozyona karşı hem fiziksel hem de elektrokimyasal olarak koruyabilir [6]. Bu çalışmada %98 saflıktaki ticari çinko kullanılmıştır. Alan yazın araştırmasında çelikte oluşan aşınma, sürtünme, korozyon vb. negatif tesirleri önlemek için çeliklere farklı kaplama uygulamaları yapılabilmektedir. Kaplanmış olan çeliğin yanında kaplamada kullanılan malzeme de oldukça önemlidir. Bu tezde S235JR Çeliği üstüne galvaniz kaplama gerçekleştirilmiştir. Sıcak Daldırma Galvaniz (HDG) metodu uygulanmış olan kaplama işlemi yapılmıştır. Çinko (Zn), $419,5^\circ\text{C}$ erime sıcaklığına ve 907°C kaynama noktasına sahiptir. Çinko, Fe-Zn alaşımı oluşturma yeteneği ile galvanizleme işleminde ideal bir metal olarak kabul edilir. Çeliğin sıcak çinko banyosuna daldırılması sırasında çinkonun çelik yüzeyine difüzyon yoluyla bağlanmasıyla Zn-Fe fazları meydana gelir. Bu fazların oluşumu, yüzeyde mekanik dayanımı yüksek ve homojen kaplama kalınlığı sağlayan yapılar elde edilmesini sağlar [7].

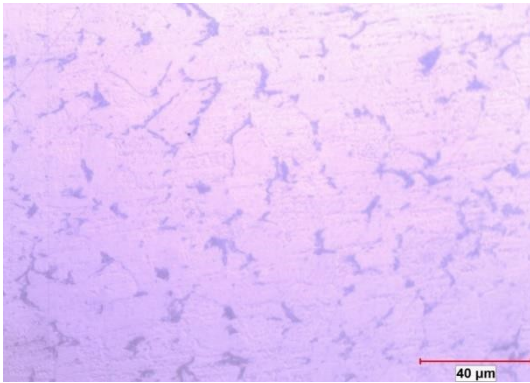
3. BULGULAR

S235JR çeliğinin galvaniz kaplandıktan sonra korozyona etkisi araştırılmıştır. Kaplama işlemi 455°C 'de sıcak daldırma galvaniz işlemi ile kaplanarak kaplama gerçekleştirilmiştir. Kaplanan numuneler optik mikroyapı, korozyon testi ve mikro sertlik analiz yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Kaplama yapılan numunenin optik mikroyapı fotoğrafları Şekil 3.1., Şekil 3.2., Şekil 3.3., ve Şekil 3.4.'te görülmektedir. Kaplama kalınlıkları ise Şekil 3.5., Şekil 3.6. ve Şekil 3.7.'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Sıcak Daldırma Galvanizleme ile kaplanmış S235JR numunesinin mikro yapı görüntüsü

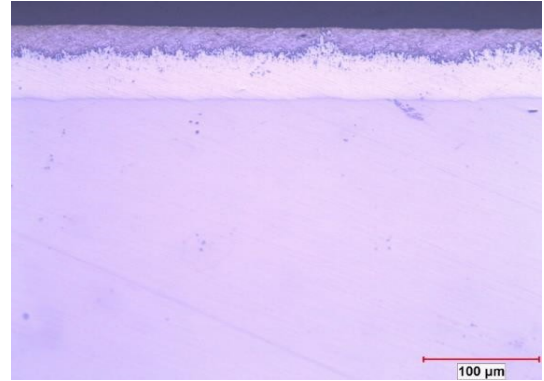
Şekil 3.1.'de sıcak daldırma galvanizleme işlemi uygulanmış S235JR yapısal çeliğin optik mikroskop altında elde edilen 100 mikrondaki mikro yapısı görülmektedir. Görselde, çeliğin ferrit- perlit matris yapısı belirgin bir şekilde izlenebilmektedir. Bu yapı, S235JR gibi düşük karbonlu yumuşak çeliklerde yaygın olarak gözlemlenen tipik bir mikro yapı olup, galvanizleme öncesinde de bu morfolojiyi taşımaktadır. Ferrit fazı açık renkli bölgelerle, perlit ise daha koyu ve ince tabakalı lameller şeklinde kendini göstermektedir



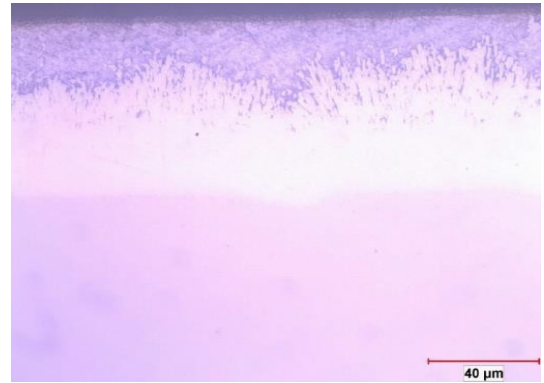
Şekil 3.2. Sıcak Daldırma Galvanizleme ile kaplanmış S235JR numunesinin mikro yapı görüntüsü

Şekil 3.2'de, sıcak daldırma galvanizleme işlemi uygulanmış S235JR çelik numunesine ait 40 mikrondaki mikroyapı görüntüsü yer almaktadır. Numune yüzeyinde görülen koyu renkli alanlar çinko kaplamanın mikro yapıdaki dağılımını yansıtmakta olup, bu bölgeler çinko ile demir arasında meydana gelen intermetalik fazları işaret etmektedir. Kaya ve arkadaşları, intermetalik fazlar çinko ile demirin reaksiyonu sonucu korozyon direncini etkilediği sonucuna ulaşmışlardır. Görseldeki mor tonlu yapı matrisin ferrit fazı olduğunu düşündürmektedir. Bu tür intermetalik fazlar, çinko ile demirin yaklaşık 450 °C sıcaklıkta reaksiyona girmesi sonucu oluşur. Oluşan bu

fazların, kaplama katmanının mekanik ve korozyon direnci üzerinde doğrudan etkili olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, Kaya ve arkadaşlarının literatürdeki çalışmalarıyla da örtüşmektedir [8].



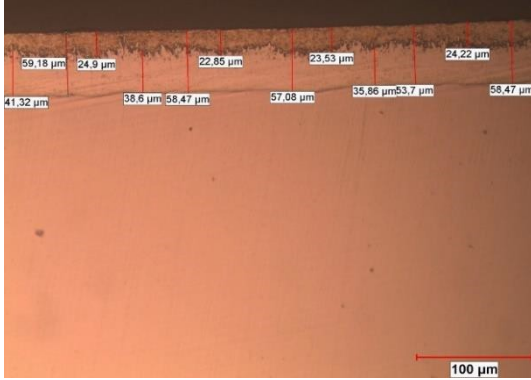
Şekil 3.3. Galvaniz kaplanmış S235JR numunesinin kaplama kalınlığının mikro yapı görüntüsü



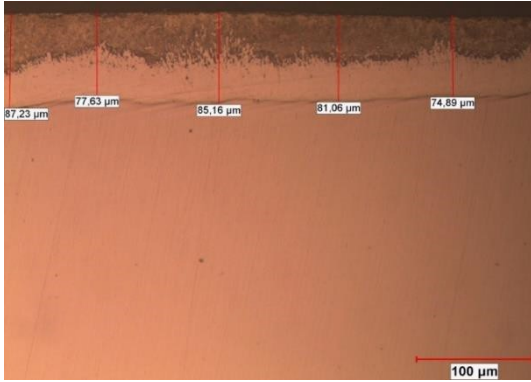
Şekil 3.4. Galvaniz kaplamaya tabi olmamış S235JR numunesinin mikro yapı görüntüsü

Şekil 3.3. ve Şekil 3.4.'teki bu mikroyapı görüntüsü de sıcak daldırma galvaniz yöntemiyle kaplanmış bir S235JR çeliği numunesine aittir. Görüntüde, üst kısımda yer alan koyu tonlu bölge çinko (Zn) kaplamayı, onun altındaki daha açık tonlu ve homojen yapı ise çelik (S235JR) altlığı temsil etmektedir. Görüntünün sağ alt köşesindeki ölçek çubuğu (100 µm) referans alınarak kaplama kalınlığının mikrometre mertebesinde olduğu gözlemlenmektedir. Sıcak daldırma galvaniz işlemi, çeliğin eritilmiş çinko banyosuna daldırılması ile yüzeyde Zn-Fe alaşımlarından oluşan çok katmanlı bir kaplama tabakası oluşmasını sağlar. Mikroyapı görüntüsünde bu tabakalar tipik olarak sırasıyla Gamma (Γ), Delta (δ), Zeta (ζ) ve en dışta saf çinko (η) tabakası olarak tanımlanır. Bu yapılar, demir ile çinko arasında difüzyonla oluşan intermetalik fazları temsil eder [9]. Bu görüntüde gözlemlenen kaplama kalınlığı yaklaşık 40–60 µm civarındadır ve bu değer, TS EN ISO 1461

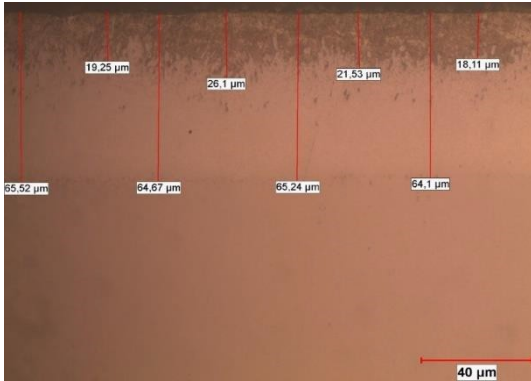
standardında belirtilen minimum kaplama kalınlık değerlerini karşılamaktadır. Ayrıca, mikroyapıdaki düzgün ve kontinü kaplama, işlemin kontrollü şartlarda gerçekleştirildiğini ve yüzeyin etkin bir şekilde korunduğunu göstermektedir [10].



Şekil 3.5. S235JR numunesinin kaplama kalınlığının 100 mikronda mikron değerleri ile birlikte mikro yapı görüntüsü



Şekil 3.6. S235JR numunesinin kaplama kalınlığının 100 mikronda mikron değerleri ile birlikte mikro yapı görüntüsü

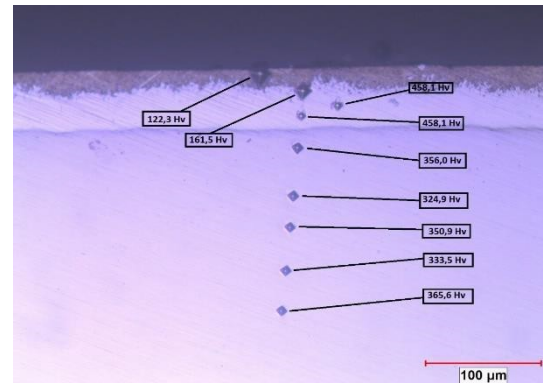


Şekil 3.7. S235JR numunesinin kaplama kalınlığının 100 mikronda mikron değerleri ile birlikte mikro yapı görüntüsü

Sıcak daldırma galvanizle oluşan bu çok katmanlı yapı, özellikle dış ortam koşullarında korozyon direncini büyük ölçüde artırır. Koleva ve arkadaşlarının literatürdeki çalışmasında belirttiği üzere, çalışmamızla paralel doğrultuda çinko tabakası ortamda çözünerek

önce kendisi korozyona uğrar ve böylece altındaki çeliği katodik koruma mekanizması ile korur [11].

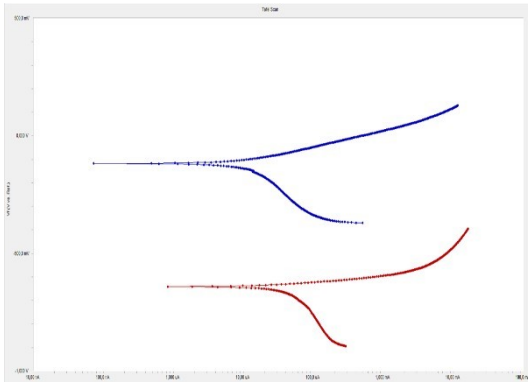
Şekil 3.5. ve Şekil 3.7.'deki mikro yapı görüntüsünde sıcak daldırma galvaniz ile kaplanmış S235JR çeliğinin kaplama kalınlıkları ölçülmüştür. Değerler yaklaşık 22,85 µm ile 59,18 µm arasında değişmektedir. Bu, sıcak daldırma galvanizlemede literatürde sıkça bildirilen tipik değer aralığıyla uyumludur. Çitak ve arkadaşlarının çalışmasında sıcak daldırma galvaniz kaplamalarda ortalama kalınlık genellikle 40–80 µm arasında değişmektedir. Bu görüntüde de elde edilen mikron değerleri bu aralığın alt ve orta sınırlarına denk gelmekte olup, kaplamanın yeterli ve standartlara uygun olduğunu göstermektedir [12]. Şekil 3.6'da verilen mikroyapı görüntüsünde, S235JR numunesinde ana malzeme ile kaplama tabakası arasındaki kalınlığın 74,89 µm ile 87,23 µm arasında değiştiği tespit edilmiştir. Galvaniz kaplama değerleri, ortalama olarak yaklaşık 40–80 µm aralığında bir kaplama kalınlığına işaret etmektedir. Ancak bu tür mikroskobik analizlerde, özellikle numunenin hazırlık aşamasında kullanılan bakalit kalıplama ve numune kenarındaki yerel pürüzlülükler, ölçüm sonuçlarını kısmen etkileyebilmektedir. Bu nedenle elde edilen değerlerin yaklaşık sonuçlar olduğu ve küçük sapmalar içerebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Kaya, H. ve Altuncu da sıcak daldırma galvaniz kaplama kalınlıklarının genellikle 60–80 µm aralığında olduğu ve ölçümlerde yüzey hazırlığının etkili olabileceği vurgulanmıştır. Bu bağlamda, elde edilen veriler literatürle uyumlu olup, kaplama kalınlıklarının teknik toleranslar dahilinde olduğu söylenebilir [13].



Şekil 3.8. Galvaniz kaplanmış S235JR numunesinin 100 mikronda sertlik ölçümlerinin mikro yapı görüntüsü

Şekil 3.8'de görülen bu mikro yapı görüntüsü, galvaniz kaplama sonrası oluşan katmanların ve alt tabaka çelikle olan etkileşiminin mekanik özellikler üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır. Sertlik ölçümleri, galvaniz kaplamanın dış yüzeyinden çelik gövdeye

kadar olan geçiş boyunca alınmıştır. Özellikle çinko kaplamanın çeşitli intermetalik fazları, farklı sertlik değerleriyle ayırt edilebilmektedir. Kaplama yüzeyine en yakın bölgede yer alan ölçüm noktalarında (örneğin 458,1 HV), sertlik değerleri oldukça yüksektir. Bu durum, çinko ile demir arasında oluşan Fe-Zn intermetalik fazlarının, özellikle δ (FeZn_7) ve Γ ($\text{Fe}_3\text{Zn}_{10}$) gibi fazların varlığını işaret eder. Burada belirtilen fazlar, çinko ile demir arasındaki reaksiyon sonucunda sıcak daldırma galvanizleme sırasında oluşan intermetalik fazlardır. Bu fazlar, galvaniz kaplama tabakasının farklı bölgelerinde yer alır ve kaplamanın mekanik ve korozyon özelliklerini etkiler. Kaya ve arkadaşlarının çalışmasında belirttiği gibi, bu intermetalik bileşikler çelik altlığına göre çok daha yüksek sertliğe sahiptir [14].



Şekil 3.9. Tafel ekstrapolasyon yöntemi ile kıyaslanan kaplamalı ve kaplamasız çeliklerin tafel ekstrapolasyon eğrisi

Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle galvanizli ve galvanizsiz numunelerin korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) değerleri belirlenmiştir. Testler 3,5% NaCl çözeltisinde gerçekleştirilmiş, her numune için üç tekrar alınarak ortalama değerler hesaplanmıştır. Şekil 3.9'da görüldüğü üzere, tafel eğrileri üzerinden yapılan değerlendirmelerde galvanizli numunelerin daha negatif E_{corr} değerlerine sahip olduğu ve I_{corr} değerlerinin anlamlı şekilde azaldığı görülmektedir. Bu, çinkonun galvanik anot görevi üstlendiğini ve çeliği koruduğunu açık şekilde göstermektedir. Tafel sonuçlarına göre, 120 saniye galvanizlenmiş numunede korozyon hızı minimum seviyeye inmiştir. Bu bulgu, galvanizleme süresi arttıkça koruyuculuk etkisinin optimize edildiğini ve çinko tabakasının geçirimsizliğinin arttığını göstermektedir. Ekstrapolasyon, grafik üzerinde elde edilen mevcut veri eğiliminden yola çıkarak gözlemlenmemiş alanlara yönelik yapılan ileriye dönük tahmin işlemidir. Başka bir ifadeyle; elinizde yalnızca 1., 2. ve 3. noktalar mevcutsa ve bu noktalar doğrusal bir doğrultuda sıralanıyorsa, 4. veya 5. noktaya ilişkin

herhangi bir veri olmaksızın, mevcut doğrultuyu referans alarak bu noktaların değerlerini tahmin etmeye yönelik yapılan işlem ekstrapolasyon olarak tanımlanır. Tafel ekstrapolasyon yönteminde eğri, potansiyel (E) ile logaritmik akım yoğunluğu ($\log i$) arasındaki ilişkiye göre belirlenir. Bu yöntemle, elektrokimyasal bir hücredeki anod ve katod reaksiyonlarının kinetiği analiz edilir. Tafel eğrisinde birinci basamak veri toplamadır. Numunenin elektrokimyasal davranışı, genellikle potansiyodinamik polarizasyon testi ile belirlenir. Bu testte elektrot potansiyeli belirli bir hızla değiştirilir ve karşılık gelen akım ölçülür. İkinci basamak grafik oluşturmaz. Ölçülen değerlerle E (potansiyel) – $\log(i)$ (akım yoğunluğunun logaritması) grafiği çizilir. Üçüncü basamak doğrusal bölgelerin seçimidir. Anodik ve katodik Tafel bölgeleri, eğrinin $\log(i)$ ile doğrusal davrandığı kısımlarıdır. Bu basamaklar genellikle korozyon potansiyelinin (E_{corr}) biraz uzağında yer alır. Dördüncü basamak ise eğriye doğruyu oturtmadır. Jones ve arkadaşlarının da çalışmasında olduğu gibi "Tafel Ekstrapolasyonu" anodik ve katodik doğrusal bölgeler ayrı ayrı doğrusal regresyon ile analiz edilir [15]. Bu doğruların kesişim noktası korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve bu noktadaki akım değeri korozyon akımı (I_{corr}) olarak alınır. Sonuç olarak; tafel eğrisi, potansiyelin logaritmik akım yoğunluğuna karşı grafiğe dökülmesiyle ve bu grafikte doğrusal bölgelerin belirlenip ekstrapolasyon yapılmasıyla elde edilir. Bu yöntem sayesinde malzemenin korozyon hızı hesaplanabilir. Tafel ekstrapolasyonu bağlamında; Grafikteki doğrusal anodik ve katodik tafel bölgelerini uzatarak (ekstrapole ederek), bu doğruların kesiştiği noktada korozyon potansiyeli ve akımı tahmini olarak bulunmuş olur. Çünkü bu değerler doğrudan ölçülmez, grafiksel olarak hesaplanır. Tafel ekstrapolasyon eğrisinde E_{kor} ve I_{kor} değerleri, bir metalin veya alaşımın korozyon davranışını anlamada temel parametrelerdir. Bunlar şunları ifade eder: E_{kor} (Korozyon Potansiyeli – E_{corr}) tanım olarak, elektrokimyasal hücrede akımın sıfır olduğu (anodik ve katodik reaksiyonların dengede olduğu) potansiyeldir. Anlamı ise metalin çevresiyle elektro-kimyasal etkileşime geçtiğinde doğal olarak ulaştığı potansiyeldir. Bu bilgiler ışığında şöyle bir yorumlama yapabiliriz; daha negatif bir E_{corr} değeri, metalin korozyona daha yatkın olduğunu gösterebilir. Ancak tek başına yorum yapmak yanıltıcı olabilir; I_{kor} ile birlikte değerlendirilmelidir. I_{kor} (Korozyon Akım Yoğunluğu – I_{corr}); korozyon tepkimesinin hızını temsil eden, birim yüzeyden geçen akım yoğunluğudur (genellikle A/cm^2 cinsinden verilir). Metalin korozyon hızının doğrudan ölçüsü anlamını taşır. Daha yüksek I_{corr} değeri, daha yüksek korozyon hızı demektir. Bu nedenle I_{corr} , metalin dayanıklılığı açısından kritik bir parametredir. Özetle; E_{corr} bize "korozyon eğilimini", I_{corr} ise

"korozyonun şiddetini/hızını" gösterir. Fontana ise 2005 yılında yaptığı çalışmada tafel ekstrapolasyonu yöntemini, metal yüzeyinde meydana gelen anod ve katod reaksiyonlarının potansiyel-akım yoğunluğu eğrisini inceleyerek korozyon potansiyelini ve korozyon akım yoğunluğunu belirler, diyerek açıklamıştır [16]. Bu parametreler, metalin korozyon hızını belirlemek için kullanılır. Biri metal yüzeyinde birim alan başına düşen elektron transfer miktarını ifade eder ve korozyon hızının önemli bir göstergesidir. Bir diğeri ise metalin elektrokimyasal dengesini temsil eder. Kaplamasız çelik (kırmızı eğri) şunları ifade eder: Kaplamasız S235JR çeliğinde daha yüksek değerler gözlenmiştir. Bu durum, çeliğin atmosferik koşullara maruz kaldığında hızlı bir şekilde korozyona uğrayacağını gösterir. Anot ve katot reaksiyonları çelik yüzeyinde serbestçe gerçekleşir ve galvanik koruma mekanizması olmadığı için korozyon hızı yüksektir. Galvaniz kaplı çelik (mavi eğri) ise şu sonucu vermiştir: Sıcak daldırma galvaniz ile kaplanmış çelikte değerler önemli ölçüde düşmüştür. Bu, çinko kaplamanın çeliği fiziksel olarak izole etmesinin yanı sıra, anodik koruma sağlamasıyla ilişkilidir. Çinko, çelikten önce oksitlenerek çelik yüzeyinde bir bariyer tabakası oluşturur. Ayrıca değerinin daha pozitif bir değere kayması, galvaniz kaplamanın çeliğin elektrokimyasal stabilitesini artırdığını göstermektedir. Tafel ekstrapolasyon yöntemiyle elde ettiğimiz iki eğri üzerinden korozyonla ilgili bazı önemli çıkarımlar yapılabilir. Tespit ettiğimiz değerleri yorumlarsak; korozyon potansiyeli mavi eğri - 118 V, kırmızı eğri -641 V'dir. Korozyon potansiyeli daha negatif olan metal (kırmızı eğri) daha anodik davranır, yani korozyona daha yatkındır. Bu durumda kırmızı eğriye ait örnek, mavi eğriye göre daha düşük bir korozyon direncine sahiptir. Korozyon akım yoğunluğu mavi egride 1.05×10^{-4} A'dır; kırmızı egride ise bu değer 3.3×10^{-4} A'dır. Korozyon akım yoğunluğu, korozyon hızının doğrudan bir göstergesidir. Daha yüksek ikor değeri, daha hızlı bir korozyon sürecini ifade eder. Bu durumda kırmızı eğriye ait numune, maviye göre yaklaşık 3 kat daha hızlı korozyona uğramaktadır. Genel bağlamda mavi eğriye ait numune, kırmızıya göre daha pasif, yani daha korozyon dirençlidir. Kırmızı eğriye ait numune, hem daha negatif potansiyele hem de daha yüksek korozyon akımına sahip olduğu için daha düşük korozyon dayanımı gösterir.

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Optik mikroyapı analizleri sonucunda, yüzey boyunca homojen bir dağılım gösteren ve maksimum 41,32 $\mu\text{m}'ye$ ulaşan bir kaplama kalınlığı belirlenmiştir. Artan sıcaklık ve süreyle birlikte kaplama tabakasının yüzey boyunca homojen dağılımı meydana gelirken kaplama tabaka kalınlığı da az da olsa artmıştır. Kaplama

tabakası yüzeyinden alınan mikrosertlik analiz sonucunda kaplama yüzeyinde en düşük sertlik 324,9 HV en yüksek sertlik 458,1 HV elde edilmiştir. Yine süreyle birlikte kaplama tabakası yüzey mikrosertlik değeri artmıştır. Galvaniz kaplamanın, çeliğin korozyon direncini artırdığı açıkça görülmektedir. Bu artışın temel nedenleri şunlardır: Bariyer Koruma; çinko kaplama, çelik yüzeyine oksijen ve nem ulaşmasını fiziksel olarak engeller. Katodik Koruma; çinko, çelikten daha anodiktir. Çinko korozyona uğradığında çelik yüzeyini koruyan bir ürün (çinko oksit ve hidroksit) oluşturur. Uzun Vadeli Koruma; galvaniz kaplama, korozyon hücrelerinin oluşmasını önler ve çeliğin dayanıklılığını artırır. Kaplamasız çelik, dış ortam koşullarında hızla paslanarak yapısal bütünlüğünü kaybederken, galvaniz kaplı çelik uzun süre boyunca güvenli bir kullanım sağlar. Tafel ekstrapolasyonu yöntemiyle yapılan analizler, galvaniz kaplamanın S235JR çeliğinin korozyon direncini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Bu, çeliğin dayanım süresini arttırmak ve bakım maliyetlerini azaltmak için sıcak daldırma galvanizin etkili bir yöntem olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, özellikle açık hava koşullarında kullanılan çeliklerin galvanizle kaplanması, endüstriyel uygulamalar için büyük avantaj sağlar. Tafel ekstrapolasyon sonuçları, galvaniz kaplanmış numune korozyon akım yoğunluğu 1.05×10^{-4} A/cm², galvaniz kaplanmamış numune ise 3.3×10^{-4} A/cm² olarak ölçülmüştür. Korozyon potansiyeli galvaniz kaplanmamış numune daha pozitif değere kayarak - 0,864 V'den, -0,745 V'ye yükselmiştir. Mavi eğriye ait numune, kırmızıya göre daha pasif, yani daha korozyon dirençlidir. Kırmızı eğriye ait numune, hem daha negatif potansiyele hem de daha yüksek korozyon akımına sahip olduğu için daha düşük korozyon dayanımı gösterir.

5. TEŞEKKÜR

Bu araştırma, ilk yazarın yüksek lisans tezinden üretilmiştir. Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam boyunca bana vermiş olduğu katkılarından ve her türlü desteğinden dolayı tez danışman hocam Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA'ya, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü Öğretim Üyesi Dr. Serkan DAL'a ve Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Doç. Dr. Kürşad Oğuz OSKAY'a ve meslek hayatıma başladığım günden itibaren beni her koşulda destekleyen, hayata ve mesleğime dair edindiğim bilgi ve tecrübelerin çoğunu öğrenmemi sağlayan, yapılan çalışmalarımda yardımcı olan NEVSAC METAL ailesine ve tesis müdürü Sn. Arif ÖBEKLİ'ye; teşekkürü bir borç bilirim.

KAYNAKÇA

- [1] Güven, V., "Sıcak Daldırma Yöntemi İle Sürekli Çinko Kaplama", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. 1999.
- [2] Ankara Üniversitesi, "Malzeme Bilgisi", Açık Ders Malzemeleri, Ders Notu. 2021. 18 Nisan 2025
- [3] Proemtia, "S235JR Çeliğinin Teknik Özellikleri ve Kullanım Alanları", <https://www.proemtia.com/blog/s235jr- celiginin- teknik-ozellikleri-ve-kullanim- alanlari>. 18 Nisan 2025 [4]. Nazife, Ö., "Yapı Malzemelerinde Korozyon ve Korozyondan Korunma Yöntemleri", Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 26(3), 1159-1178. 2021.
- [5] Asgari H, Toroghinejad MR, Golozar MA. "Effect of coating thickness on modifying the texture and corrosion performance of hot-dip galvanized coatings". *Current Applied Physics*, 9(1), 59-66, 2009.
- [6] Zhou, Y., Li, J., "Mechanical and Corrosion Characteristics of Hot-Dip Galvanized Coatings", *Materials Chemistry and Physics*, 191, 1–8. 2017.
- [7] Ziewiec, A., Gancarz, T., Tofil, S., "Characterization of Zinc Coatings Obtained by Hot-Dip Galvanizing", *Archives of Metallurgy and Materials*, 60(4), 3031–3036. 2015.
- [8] Kaya, A., Yıldırım, M., "Galvaniz Kaplamaların Mikroyapı Özellikleri ve Korozyon Davranışı", *Metallurji Dergisi*, 147(4), 18–24. 2012.
- [9] Zhang, X., "Hot-Dip Galvanizing of Steel Structures", Woodhead Publishing. 2011.
- [10] Türk Standartları Enstitüsü, TS EN ISO 1461:2009, "Metallerin Sıcak Daldırma ile Galvaniz Kaplanması – Bitmiş Ürünler İçin Gereklilikler". 2009.
- [11] Koleva, D.A., van Breugel, K., Koenders, E.A.B., "Corrosion Behavior of Steel in Reinforced Concrete Structures with Zinc Coating: A Review", *Construction and Building Materials*, 24(9), 1638–1645. 2010.
- [12] Çitak, S., Özkul, İ., "Sıcak Daldırma Galvaniz Kaplamanın Çelik Yüzeyindeki Davranışı", *Metallurji Dergisi*, 51(2), 33–40. 2016.
- [13] Kaya, H., Altuncu, E., "Sıcak Daldırma Galvaniz Kaplamaların Mikro Yapısal ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi", *Journal of Materials and Engineering Technologies*, 7(2), 123–130. 2019.
- [14] Kaya, Y., Türkmen, M., Bayram, A., "Sıcak Daldırma Galvaniz Kaplamalı Çeliklerin Sertlik ve Yapı Özelliklerinin İncelenmesi", *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(1), 50–58. 2020.
- [15] Jones, D.A., "Principles and Prevention of Corrosion", Prentice Hall. 1996.
- [16] Fontana, M.G., "Corrosion Engineering", McGraw-Hill Education. 2005.