

Farklı Kimyasal Yöntemlerle Kaplanmış Çelik Plakaların Farklı Yapıştırma Kalınlıklarda Tek Bindirmeli Birleştirme Yöntemiyle Birleştirilen Numunelerin Yorulma Analizleri Sonuçlarının Wöhler Eğrilerinde Karşılaştırılması

*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 27.04.2023

Kabul/Accepted: 07.01.2024

Yayımlandı/Published: 27.02.2024

Comparison of Fatigue Analysis Results of Steel Plates Coated with Different Chemical Methods and Samples Joined by Single Lap Joining Method at Different Bonding Thicknesses in Wohler Curves

Celalettin Baykara* 

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

Öz

18. yy. ikinci yarısında başlayan endüstri devriminden günümüze kadar yaşanan teknolojik gelişmeler içinde malzeme teknolojisinin günden güne gelişmesiyle bu malzemelerin birleştirme yöntemleri de geliştirilmektedir. Bu yöntemlerden biri de son 40 yıldır gelişme gösteren yapıştırıcı kimyasalların başarıyla kullanıldığı yapıştırma metodudur. Özellikle günümüzde otomotiv firmalarının araçlarının ağırlıklarını hafifletirme eğilimi arttığı için farklı türdeki ve düşük yoğunluktaki malzemelerin birleştirilmesinde alternatif olarak yapıştırıcı elemanın kullanıldığı Kimyasal Birleştirme Metodu hemen hemen her sektörde başarıyla kullanılmaktadır. Bu çalışmada, otomotiv sektöründe sac kaplamada sıklıkla kullanılan DC01A soğuk haddelenmiş çelik malzemenin doğal yüzeyine ilaveten astar boya ve kataforez kaplama olarak farklı kimyasal kaplama metotları uygulanmış olup, poliüretan bazlı bir yapıştırıcı elemanı ile farklı kalınlıklarda çelik numuneler birleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, yapıştırıcı ile birleştirilen iki çelik malzemenin yapıştırıcı elemanın hangi kalınlıkta ve hangi kaplama metodunun yüzeyinde güçlü ve esnek bir bağ oluşturduğunu araştırmaktır. Araştırma metodu olarak numunelere yorulma testleri uygulanmıştır. Yorulma testi sonucunda 3 mm yapıştırıcı kalınlığındaki kataforez kaplı numune 0,05 MPA gerilimde sonsuz ömre sahip olurken, diğer numuneler ömür testinde başarısız olmuştur. Yorulma testleri sonucunda elde edilen Gerilim (S) ve Çevirim (N) verileriyle Wöhler eğrileri oluşturularak sonuçlar değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, uygulanan testler sonuçlarında 3 mm.'ye kadar yapıştırma kalınlığında ve kataforez kaplı numuneler, astar boyalı numunelere göre daha iyi yapışma performansı sağlandığı tespit edilmiştir. Yüzeyinde kaplama olmayan numunelerin birleştirilmesinde yeterli dayanım elde edilememiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapıştırma tekniği; Tek bindirmeli yapıştırıcı bağlantı; Yorulma analizi; Kataforez kaplama; Astar boya.

Abstract

In the second half of 18th century As material technology develops day by day within the technological developments that have occurred since the industrial revolution that started, the joining methods of these materials are also being developed. One of these methods is the bonding method in which adhesive chemicals, which have been developed over the last 4 decades, are successfully used. Especially today, as the tendency of automotive companies to reducing the weight of their vehicles increases, the Chemical Joining Method, in which the adhesive element is used as an alternative for the joining of different types and low density materials, is used successfully in almost every industrial sector. In this study, in addition to the natural surface DC01A cold-rolled steel material, which is frequently used in sheet metal coating in the automotive industry, different chemical coating methods such as primer paint and cathodophoresis coating were applied, and samples of different thicknesses had been joined with a polyurethane-based adhesive element. The aim of this study is to investigate the thickness and coating method of the adhesive element of two steel materials joined with adhesive to create a strong and flexible bond on the surface. As a research method, fatigue tests were applied to the samples. The results were evaluated by creating Wöhler curves with the Stress (S) and Cycle (N) data obtained as a result of the fatigue tests. As a result of the fatigue test, the cathodophoresis coated sample with 3 mm adhesive thickness had infinite life at 0.05 MPA tension, while the other samples failed in the life test. As a result, as a result of the applied tests, it was determined that cathodophoresis coated samples with a bonding thickness of up to 3 mm provided better adhesion performance than primer painted samples. Sufficient strength could not be achieved when joining pieces without coating on their surfaces without any coating on the surface were failed

Keywords: Adhesive bonding technique; Single lap joint; Fatigue analysis; Cathodophoresis coating; Primer painting

1. Giriş

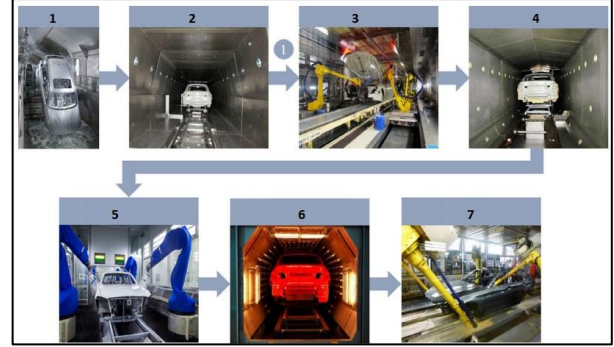
Günümüzde otomobil üreticileri ürünlerinin CO₂ salınımı, araç performanslarının müşteri istek ve ihtiyaçlarını kapsamaları için belli standartlar çerçevesinde uyulması gereken kanuni kısıtlardan dolayı daha hafif araç üretmek için düşük yoğunluğa sahip farklı tür malzemelerin birleştirilmesi zorunluluğunda kalmışlardır. Otomobil üreticileri, bu zorlukları aşmak ve rakiplerinden bir adım önde olmak istemeleri için küresel koşulları göz önünde bulunduran, rekabetçi, yenilikçi, müşterinin isteğini karşılayıp onu memnun edecek ürünler üretmek zorundadırlar (Baykara, 2023). Bu araştırmada, bir otomobil fabrikasındaki boya hattında çelik malzemeden üretilmiş bir otomobil karoserinin yüzeyine uygulanan kataforez kaplama ve astar boya üzerine yapıştırıcı metodu ile başka bir çelik malzemenin farklı kalınlıklarda yapıştırılarak hangi yüzeyde ve hangi kalınlıkta en mukavemetli yapıştırma mukavemeti elde edileceği araştırılmaktadır. Bu nedenle, kataforez kaplama, astar boyama ve yapıştırıcı metodu olmak üzere üç temel konu ele alınacaktır.

İlk konu olan kataforez kaplama, otomotiv üreticileri tarafından 1960'lardan beri karmaşık şekillere sahip metal yüzeylerin korozyona karşı koruyucu bir tabaka oluşturmasında yaygın olarak kullanılan bir kaplama teknolojisidir. Dünya çapında üretilen tüm araba karoserlerinin %98'inden fazla kataforez kaplama metodu kullanılmaktadır (Varisli ve Kaykaç 2016). Bu işlemler kısaca Çinko-Fosfatlama ve Elektro-kaplama olarak özetlenebilir (Tez, Kaykaç 2022).

Bir otomobil boya hattında Şekil 1'de gösterildiği gibi kataforez kaplama ve boyama işlemleri sırasıyla 1. Ön arıtma / Katodik daldırma kaplama, 2. Katodik daldırma kaplama-kurutucu, 3. Sızdırmazlık, 4. Sızdırmazlık kurutucusu, 5. Boyama işlemi, 6. Boya – kurutucu, 7. Boşluk koruması olmak üzere toplam yedi ana işlem adımından oluşmaktadır. (Grätzla et al., 2019). Ön arıtma işlemi, fosforik asitler nedeniyle çok şiddetli kimyasal etkiyi oluşturur. 190 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda, katodik daldırma boyama işlemi kurutucuda uygulanmaktadır. Böylelikle araç karoserisine kataforez kaplama yapılır, daha sonra metaller arasında kalabilecek boşluklara karşı, su, nem, kimyasal, gaz geçişini önlenmesi ve gözenekli yapısıyla titreşimleri emerek ses yalıtımını sağlaması için sızdırmazlık işlemi uygulanır (Tez, Paşa 2006). Bu işlemler sonrasında astar boya ve son kat boya uygulamasına geçilir.

İkinci önemli konu boya işlemidir. Boya işlemi de genel anlamda 1. Astar boya, 2. Ara kat boya, 3. Son kat boya

olmak üzere üç temel işlemden oluşur. Son kat boyadan sonra vernikleme işlemi yapılır. Boyanın uygulanacağı yüzeye ilk uygulanan pigmentli kaplama türüne astar boya adı verilir. Astar boyanın önemi; Yüzeye iyi yapışma sağlaması, olumsuz dış etkenlerin boya yapısının zamanla yüzeyden ayrılmasına direnç göstermesi, metal yüzeyleri pastan koruması, boya yapısının diğer katlarıyla uyumlu esneklikte olması, üzerine uygulanacak katların pürüzsüz görüntü vermesi olarak ifade edilebilir.



Şekil 1. Bir otomobil boyahanesinin işlem sırası.

Otomotiv sektöründe metal malzemeleri korozyon direncini arttırmak yönelik uygulanan kataforez işleminde yüksek performanslı epoksi, polyester ve üretan reçineler kullanılır. Kataforez kaplama 17-22 μm kalınlıkları arasında uygulanır. Astar boya uygulamasında ise polyester, melamin, baryum sülfat (BaSO_4) yer alır ve 30-50 μm kalınlıkları arasında uygulanır (Alsoufi et al. 2017).

En son önemli konu olan birleştirme metodu olarak yapıştırıcı tekniğinin kullanılmasıdır. Yaklaşık son yüzyılda, parçaların birleştirilmesinde kullanılan civatasomun, vida, tek veya çift taraflı perçin gibi mekanik birleştirmelerde kullanılan bu tip elemanlar iş parçaları üzerinde delik açılması söz konusudur. İş parçasında açılan delikten dolayı uygulanan yük karşısında oluşturacağı gerilim homojen olarak dağılmayacak ve parçayı zayıflatacaktır (Sadowski and Golewski 2014, Golewski et al. 2021). Kaynak metoduyla yapılan birleştirmelerde ise yüksek ısıdan dolayı iş parçalarının kaynak bölgesinde yüksek ısıdan dolayı termal gerilimlerin olması ve parça geometrisinde çarpılmalar meydana gelecektir (Ertaş et al. 2008, Sadowski et al. 2014, Więckowski et al. 2019). Ayrıca kaynak metoduyla birleştirilecek parçaların aynı tür olması gerekmektedir. Bu kısıtlayıcı nedenlerden dolayı farklı bir birleştirme metodunun kullanılmasının gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Yapıştırıcı metodu, günümüzde hemen hemen her sektörde yıllardır başarıyla kullanılmaktadır.

Yapıştırıcı elementi, yapıştırılacak iki iş parçasının yapıştırılacak yüzeyleri üzerine sıvı veya yarı sıvı formda bir yapıştırıcı yerleştirilerek birbirini birleştirebilen, ayrılmaya karşı direnç gösterebilen ve güçlü bir bağlantı elde edilebilmesini sağlayan bir kimyasal eleman olarak tanımlanmıştır. Yapıştırıcı ile birleştirilen parçalarda homojen bir gerilim dağılımı sağlamakla birlikte farklı malzeme türlerinin birbirleriyle birleştirilmesinde kullanılan kimyasal bir ara yüz elemanıdır. Yapıştırıcı metodunu geleneksel birleştirme teknolojisi ile karşılaştırıldığında, özellikle çok ince ve hassas parçaların birleşim yerlerindeki bozulmaların önlenmesi, heterojen bağlantıların üretilebilmesi, birleştirilecek parçaların üzerine delme işleminin olmaması, civata ve vida gibi ilave mekanik birleştirici elemanlarının gerektirmemesi, parça üzerinde kaynak izleri oluşturmaması, ısıdan dolayı çarpılma meydana gelmemesi ve yapının toplam ağırlığın azaltılması gibi birçok avantaj sağlar. Yapıştırıcı metodunda birincil görevi aynı veya farklı tür malzemelerin birleştirilmesini sağladığı gibi, ikincil görev olarak, titreşimleri sönmüleyerek birleştirmenin yorulma ömrünü artırır; Ayrıca, korozyonu ve sızdırmazlığı önleyen bir dolgu elemanı olarak da kullanılabilir (Braga, 2015). Bu avantajların yanında, yapıştırma metodunda düşük ve yüksek sıcaklıklara karşı direnç göstermemesi, raf ömrünün sınırlı olması, soyulma, kesme ve yarıma gibi kuvvetlere karşı mukavemet sağlaması için ilave olarak yüzey hazırlama işlemlerini gerektirmesi dezavantaj olarak değerlendirilir (Maggiore, 2020). Yapıştırma işleminden önce yapıştırılacak yüzey ön hazırlık işlemlerinin yapılması her ne kadar zaman ve işçilik olarak maliyet oluşturmaya karşın, yüksek mukavemet ve uzun süreli dayanıklılık sağlayan en önemli faktörler arasındadır (Clearfield et al. 1990; Davis 2003).

Günümüzde, yapıştırıcı bağlantılarının sağladığı birçok avantajlar nedeniyle endüstrinin her alanında uygulanmaktadır. Bu endüstriler arasında, makale konusunu da oluşturan otomotiv endüstrisinde birleştirme ve sızdırmazlık elemanı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Watson et al. 2019, Tan et al. 2021, Burchardt et al. 2018). Geleneksel araç gövde yapılarının birleştirilmesinde esas olarak metaller için geliştirilmiş bir bağlantı tasarımı olan civata ve perçin kullanılarak birleştirilmektedir. Bu durumda aracın yapısal ağırlığı arttırmaktadır. Gelişen malzeme teknolojisi nedeniyle ürünlerde kullanılan çelik, alüminyum ve kompozit gibi farklı tür malzemeler kullanılmaya başlanması nedeniyle bu malzemelerin birbirleriyle birleştirilmesinde yapıştırıcı metodu öne çıkmaktadır. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantılar, düşük

ağırlık, düşük maliyet ve gelişmiş hasar toleransı nedeniyle mekanik bağlantılara alternatif olarak kullanılması giderek artmaktadır (Jakubinek et al. 2015, Kupski and de Freitas 2021). Elektrikli ileten yapıştırıcılar sayesinde elektrik ve elektronik endüstrisinde başarıyla kullanılmaktadır. Elektrikli ve elektronik ekipman pazarında yapıştırıcılar, mekanik bağlantı elemanları, sert lehimleme, kaynaklama, lehimleme gibi termal birleştirme yöntemleriyle rekabet etmektedir (Ebnesajjad 2011, Yang et al.2013, Wu et al. 2014, Kwon et al. 2018). Yapıştırıcı metodu denizcilik uygulamaları ve gemi inşaatında (Baur, 2004, Davies, 2018), Ayakkabı sektöründe (Paiva et al. 2015) başarıyla kullanılmaktadır. İnşaat yapı sektöründe sıklıkla kullanılan metal ve inorganik levha gibi farklı türde malzemelerin sökülme sürecinde birbirinden ayrılması çok zordur ve daha sonra bu tür malzemeler geri dönüştürülemez veya tekrar kullanılamaz duruma gelmektedir. Son zamanlarda “sökülebilir yapıştırıcı” olarak adlandırılan yeni nesil yapıştırıcıların kullanılmasıyla birleştirilen bu tür malzemelere hasar vermeden sökülmesi sağlanmıştır (Ishikawa et al 2005). Diş hekimliğinde (Frassetto et al. 2016, Hartz et al. 2021). Cerrahide ve tıpta (Duarte et al. 2012, Traian and Chirila, 2022). Özellikle gıda sektöründe bakteriye karşı itinayla uygulanan paketleme ve etiketleme sektöründe (Wang et al. 2019, Al-Moghazy et al. 2020) yapıştırma metodunun başarıyla uygulandığı görülmektedir.

Yapıştırıcı bağ kuvveti, yapıştırılacak malzemenin ve yapışkan elementin mekanik ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle, endüstriyel uygulamalarda maksimum mukavemet elde etmek için yapıştırma bölgesinin dayanımını artırılmasına yönelik önemli parametreler vardır. (Banea et al. 2016). Bu parametrelerin en başında yapıştırılacak iş parçasının yüzeyinde pürüzlülük oluşturmaktır. Yüzey pürüzlülüğü, zımpara, taşlama veya kumlama işlemleriyle oluşturulup yapıştırıcı ile iş parçası arasında mekanik kilitleme meydana getirir (Budhe et al. 2015). Ayrıca oluşturulan yüzey pürüzlülüğü sonucunda iş parçası yüzeyi üç boyutlu olarak derinlik meydana getirir ve yapıştırma alanını artırır. Korana plazma metoduyla plastik ve kauçuk gibi malzemelerin yüzeyinde oluşturulacak termal katman oluşturulması (Goudardzi and Khedma 2015), tek bindirmeli, çift bindirmeli gibi çeşitli geometrik yapılarda birleştirme metodunun kullanılması yapıştırıcı bağlantılarda mukavemet sağlamaktadır. Birçok araştırmacı deneysel çalışmalarında daha çabuk sonuç elde etmek için tek bindirmeli birleştirmeler üzerinde çalışmayı tercih etmektedirler (Zhao et al. 2009). Güçlü ve dayanıklı bir yapışma bağı sağlanması için

yapıştırılacak iş parçasının ve yapıştırıcının kalınlığı (Zhao et al. 2011; Bamberg et al. 2018, Sahin and Akpınar 2021), yapıştırıcı hat uzunluğu (Lees 1987, Ferreira et al. 2002, Reis et al. 2005), yapıştırıcı elemanın soyulma gerilimini elimine edecek uç formunun belli bir açıyla şekillendirilmesi (Wang et al. 2000; Reza et al., 2014), yapıştırıcının türü (Nunes et al., 2015) ve yapıştırılacak malzemelerin yüzey temizliği önemli diğer parametrelerdir. Bu nedenle, yapıştırma işlemi öncesinde asidik ve alkalın banyo işlemleriyle yapıştırılacak yüzey üzerindeki yağ, kir gibi istenmeyen maddeler arındırılması gereklidir (Adams et al. 1997, Rudawska 2019). Bu nedenle, yapıştırılacak iş parçalarının özelliklerine göre uygun yüzey ön işlemlerinin seçimi önemli bir rol oynar (Maressa et al. 2015, Rotella et al. 2016, Williams et al. 2014).

Belirtilen literatür ışığında, bu makalede bir otomobil fabrikasının boya hattında araç karoserlerine uygulanan kataforez ve astar boya uygulanmış farklı yüzey kaplamalarına sahip olan metal numuneler, farklı yapıştırıcı kalınlıklarıyla birbirlerine birleştirilerek yorulma analizine tabi tutulmuştur. Amaç, en iyi yapışma mukavemeti sağlayan yüzey kaplaması ve yapıştırma kalınlığının tespit edilmesidir. Araştırma metodu olarak yorulma testi seçilmiştir. Test sonucunda, Gerilim-Çevirim değerleriyle oluşturulan Wöhler eğrilerini yorumlanarak en iyi yapışma yüzey kaplaması ve yapıştırıcı kalınlığı araştırılmıştır. Araştırma sonucunda, kataforez kaplama metodu, yapıştırılacak yüzeylerde alternatif bir yüzey hazırlığı olabileceği tespit edilmiştir. ANSYS programı ile yapılan numerik çalışma sonucu da bu çalışmada elde edilen deneysel çalışma sonuçlarını desteklemektedir (Baykara et al. 2023). Çelik malzemeler için yapıştırma tekniğinde kataforez kaplı yüzeylerin yapıştırma metodunda yüksek performans sağladığı için bu araştırma ile gelecekteki bilimsel çalışmalara ışık tutacağı beklenmektedir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Deneyde kullanılan malzemeler

Bu çalışmada, temel malzeme olarak otomotiv sektöründe araç gövdesinin dış saclamasında pres yardımıyla kolaylıkla şekillendirilebilen DC01A (ISO 1,0330) alaşımsız çelik plakalar kullanılmıştır. Bu çelik türüne ait kimyasal kompozisyonu Çizelge 1’de, mekanik özellikleri Çizelge 2’de gösterilmiştir (Int Kyn. 1).

Yapıştırıcı elemanı, otomotiv montajında yaygın olarak kullanılan ve Çizelge 3’de teknik özellikleri gösterilen

poliüretan bazlı tek bileşenli Sika 252 kullanılmıştır (Int Kyn. 2). Poliüretan bazlı yapıştırıcılar, suyun izosiyonat gruplarını içeren bir katkı maddesinin reaksiyonu neticesinde oluşurlar. Silikonlarda olduğu gibi, havadaki nemde bulunan su molekülünün yapıştırıcı elemanı içine nüfuz ederek yapıştırıcı bağlarının oluşturulmasını sağlar. Bunun sonucunda silikonlar ile aynı kürlenme meydana gelmesine karşın ürün açığa çıkmaz. Yapıştırıcının kürlenme hızı ortamın bağıl nemine bağlıdır.

Çizelge 1. DC01A soğuk çekilmiş çeliğinin kimyasal kompozisyon bilgileri

Cmax	Pmax	Smax	Mnmax	Simax	Timax
% 0,12	% 0,045	% 0,045	% 0,6	-	% 0,30

Çizelge 2. DC01A soğuk çekilmiş çeliğinin mekanik özellikleri

DC01A	
Akma Mukavemeti; Re (N/mm ²)	280
Çekme Mukavemeti; Rm (N/mm ²)	270-410
Uzama; Lo=80 mm (%)	28

Çizelge 3. Sikaflex – 252 yapıştırıcı özellikleri

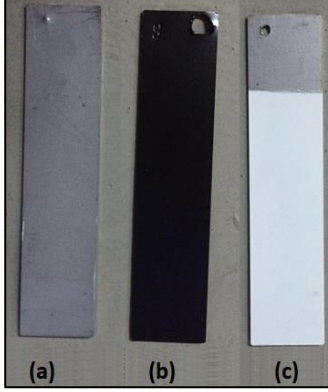
SIKA 252	
Kimyasal Yapısı	1-bileşenli poliüretan
Kürlenme Mekanizması	Nem ile kürlenir
Uygulama Sıcaklığı	10-35 ° C
Kabuk Bağlama Süresi	40 dakika
Açık Kalma Zamanı	35 dakika
Shore A Sertliği	50
Çekme Mukavemeti	3 MPa
Kopma Anında Uzama	% 400
Yırtılma Direnci	7 N/mm
Çekme-Kesme Mukavemeti	2,5 MPa

Sikaflex 252, poliüretan bazlı, havadaki nem ile kürlen ve dinamik yükleri sönmleme yeteneğine sahip bir yapıştırma elemanıdır. Bu tür yapıştırıcılar metal, plastik, cam gibi birçok farklı yüzeye çok kuvvetli bir şekilde yapışarak uzun ömürlü ve dayanıklı bir birleştirme sağlayabilirler. Poliakrilik hızlı yapıştırıcıların aksine titreşimlere ve yorulma yüklerine karşı rijit ve kırılğan olmayacak kadar elastik, diğer solvent bazlı yapıştırıcıların aksine en düşük değerdeki yüklere karşı bile akma eğilimi göstermeyecek kadar sert ve sağlam özelliklere sahiptir.

2.2. Deney numunelerinin hazırlanması

EN 10130: 2006 Avrupa standardına uygun DC01A çelik numuneler, kalınlığı 0,8 mm, eni 25 mm ve uzunluğu 110 mm boyutlarında kesildi, birbirlerine yapıştırılmadan önce 60 adet numune Şekil 2.a’da görüldüğü gibi hiçbir kimyasal kaplama veya boya uygulanmadan bırakıldı, diğer 60 adet numune ise Şekil 3.b’de görüldüğü gibi

otomotiv karoserisine boya hattında uygulanan işlemlerden biri olan $20\ \mu\text{m}$ kalınlığında katoferez kaplama uygulandı, en son 60 adet numune ise Şekil 3.c'de görüldüğü gibi $30\ \mu\text{m}$ kalınlığında astar boya uygulandı.



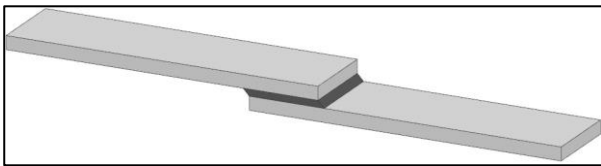
Şekil 2. Deney numunelerinin kimyasal yüzey kaplama işlemleri (a): Yüzeyde hiçbir kaplama yok, (b): Yüzey kataforez kaplama, (c) Yüzey astar boya kaplama

60 adet olarak hazırlanan test numuneleri Çizelge 4'de gösterildiği gibi her kalınlıkta ve her yüzey özelliklerine göre beş çift olmak üzere gruplandırılmıştır.

Çizelge 4. Deney numunelerinin farklı yapıştırıcı kalınlıklarında birleştirilerek gruplandırılması

Yapıştırıcı Kalınlıkları (mm)	Yüzey İşlemsiz Numuneler (çift)	Yüzey İşlemsiz Numuneler (çift)	Yüzey İşlemsiz Numuneler (çift)
1	5	5	5
2	5	5	5
3	5	5	5
4	5	5	5
5	5	5	5
6	5	5	5

Her gruptaki test numuneleri, TS EN ISO 9664, 1995 standardına uygun olarak Şekil 3'de gösterildiği gibi farklı kalınlıklarda birbirlerine yapıştırma metodu kullanılarak birleştirildi. Test numunelerini birleştirme tipi olarak daha çabuk deforme olması için tek bindirme birleştirme tekniği tercih edilmiştir.

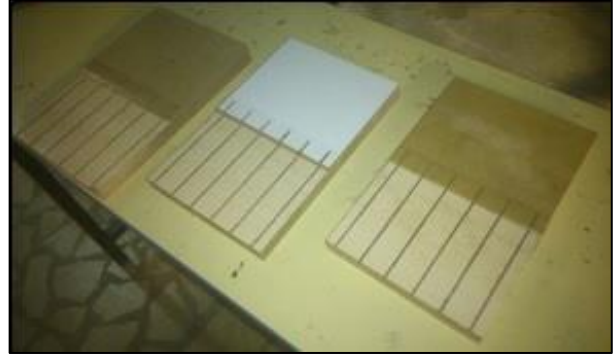


Şekil 3. Yüzeyine kimyasal işlem (Kataforez veya Astar boya) uygulanmış test numunelerinin yapıştırıcı yöntemiyle birleştirilmesi

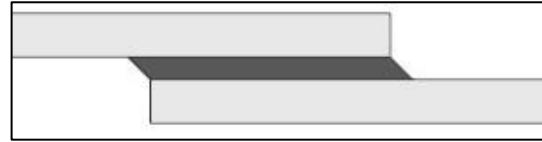
Deney sırasında, Şekil 4'de görüldüğü gibi farklı yapıştırıcı kalınlıklarını sağlamak amacıyla kalıpların üst tablalarının

yüksekliği 1, 2, 3, 4, 5, 6 mm kalınlıklarında ayarlanabilir duralit malzemeden tasarlanan özel bir kalıp üzerinde yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin soyulma etkisini azaltmak için Şekil 5'de görüldüğü gibi yapıştırma bölgesinin uç kısımları 45° eğimli hale getirildi. Bu sayede keskin kenarlı bir yapının çevrim sırasında yük uygulandığında, hızlı kopmalar önlenir ve çevrim ömrü uzatılır.



Şekil 4. Yapıştırıcı işleminde kullanılan kalıp



Şekil 5. Yapıştırıcı elementin soyulma gerilimine karşı uç formunun şekillendirilmesi

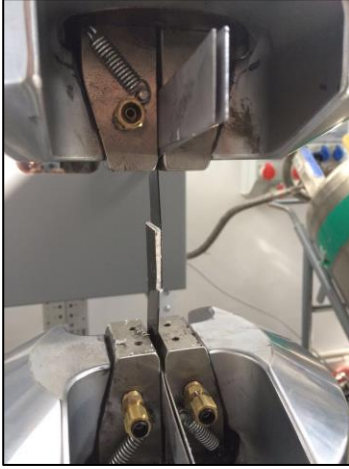
Yapıştırıcı, karakteristik olarak her ne kadar ortam neminde kürlense de 5 ve 6 mm. gibi yapıştırıcı kalınlıklarında, yapıştırıcı elementinin her bölgesinde homojen bir kürlenme sağlaması gerekir. Poliüretan yapılı yapıştırıcılar sıcaklık artışı ile daha hızlı kürlendiğinden çok kalın yapıştırma kalınlıklarına sahip numunelerin daha hızlı ve homojen kürlenmesi için ilave olarak 1.5 saat sürede ve 50°C sıcaklıkta gösterilen Proteherm 130/45 fırınında kürlenme işlemi uygulanmıştır. Kürlenme sırasında ortam nemi sağlamak için bir miktar su bulunan bir kap dahil edilmiştir (Int. Kyn. 3).

2.3. Yorulma Deney Aşamaları ve Yöntemleri

Yapıştırma metoduyla birleştirilen numuneler TS EN ISO 9664, 1995 yorulma testi standartlarında belirtilen yorulma test prosedürleri kullanılmıştır. Testler sonucunda S-N (Wöhler) eğrilerinde elde edilen sonuçlar hazırlanan grup bazında belirlenen parametrelere göre karşılaştırılmıştır. Yorulma testinde, MTS Landmark 100 kN kapasiteli servo hidrolik test cihazı kullanılmıştır. Testler esnasında standartlara uygun olarak 23°C ortam sıcaklığı ve % 50 ortam nemi cihaz tarafından sağlandı.

2.3.1. Numunelerin Yorulma Cihazına Bağlanması

Numuneler cihazın çenelerine z eksen yönünde dikey olarak bağlanmıştır. Şekil 6'da görüldüğü gibi numunenin yapısından kaynaklanan eksen kayıklığı ve bunun sonucunda oluşan burkulma momentinin engellenmesi için çene ile numune arasına yapıştırıcı kalınlığı kadar giyotinle kesilmiş lama olarak adlandırılan metal parça konulmuştur. Bu işlemin amacı merkez noktayı ortak eksen üzerine çekmektir. Her yeni numunenin cihaza bağlanmasından önce cihaza bir önceki testten kaynaklanan kaymaların giderilmesi için kalibrasyon yapılmıştır.



Şekil 6. Numunelerin yorulma cihazına bağlanması

2.3.2. Yorulma analizi test deney parametreleri

2.3.2.1. Uygulama gerilimi

Deneyde uygulanacak gerilim değeri, yorulma testinde en temel ve belirleyici parametresidir. Deney esnasında test numunelerinin yapısal formu değişip hasara uğrayacağından ve kısa zamanda deforme olmaması için deney cihazının çevrim esnasında çekme işlemini tamamladıktan sonra numuneyi serbest bırakıp tekrar çekecek şekilde yükleme oranı tek yönlü ($R = 0,1$) değişken bir dinamik yük uygulandı. Yüklerin eşik değeri olarak her test grubundan birer adet numune çekme testine tabi tutuldu ve gözlemlenen çekme dayanımının %50'si yükün eşik değeri olarak kabul edildi. Bu eşik değerden başlanarak diğer numunelerde 0,05 – 0,1 – 0,15 – 0,20, 0,30, 0,35 ve 0,45 MPa eşik değerindeki gerilim uygulanarak çevrim ömürlerindeki değişimler gözlemlendi.

2.3.2.2. Frekans

Standartlarda verilen verilere cihaz sıcaklık dengesini sağlasa da, 60 Hz. ve üzeri frekanslarda yapıştırıcının iç yapısında oluşan ısı etkisi nedeniyle birleştirmenin

kimyasal yapısında değişikliklerin olabileceği ve yorulma ömrünün azalabileceği görüldü. Testler için optimum frekans değeri 5Hz. Olmasına rağmen numunelerin boyutu ve birleştirme şekli ve yapıştırıcının elastikliğinden dolayı yer değiştirmenin yüksek boyutlarda olabileceği düşünüldü ve bunun üzerine yük frekansı 1Hz. olarak belirlendi. Belirlenen bu frekans değerlerinde test numunelerinde herhangi bir sıcaklık değişimi saptanmadı.

2.3.2.3. Çevresel ortam koşulları

Yorulma kavramı, sadece mekanik durumlardan değil, ortamdaki diğer değişkenlerden de etkilenir. Ortam sıcaklığı, bu değişkenlerin en etkili olanıdır. Sıcaklık ile birlikte yapıştırıcının bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri değişir. Buna bağlı olarak birleştirmenin stabilizesini sağlayan temel etmen olan adezyon ve kohezyon bağ kuvvetleri de bu durumdan etkilenebilir. Bu etkinin pozitif veya negatif yönde olması yapıştırıcının özelliğine bağlıdır. Sıcaklığın sebep olduğu başka bir etki de nemli ortamda çalışan bir sistemin sıcaklık artışı ile korozyona uğrama riskinin olmasıdır. Bu etkiler, aynı zamanda sadece yapıştırıcının değil, yapıştırılan malzemenin de bu koşullardan etkilenmesi mümkündür. Bu tür etkilerin hepsi yorulma gerilmelerinin değişimini ve ömrünü etkiler. Bu çalışmada yapılan testlerde TS EN ISO 9664, 1995 yorulma testi standartlarına göre ortam sıcaklığının 23 ± 5 °C olması sağlandı.

2.4. Yorulma test metodu

Yorulma testlerinin yorumlanmasında en kullanışlı yöntem olarak S-N (Wöhler) eğrileri kullanıldı. Düşey ekseninde numuneye uygulanan yük miktarı ve yatay ekseninde ise malzemenin kopmasına kadar geçen süredeki dayandığı çevrim sayısı kullanıldı. Bu iki parametrenin kesişim noktaları birleştirilerek grafiklerde sonsuz ömür değerleri belirlendi. Deney numunesi değişmez bir ortalama gerilme σ_M ile yüklendikten sonra, değişken yüklenme ile belirli bir genlik gerilmesiyle yüklendi. Bu arada deney numunesini kopartan çevrim sayısı olan N değeri, bir sayıcı ile saptandı. Deneyden deneye genlik gerilme değeri küçültülerek, test numunesini kopartan yükleme sayısı büyütüldü. Böylece elde edilen malzemenin mukavemet değeri olarak tanımlanan devamlı mukavemet değeri olan σ_D belirlendi. Burada elde edilen değerlerden gerilmeler sınırı Y eksenine, yüklemeler sayısı X eksenine konulursa S-N ya da diğer adıyla Wöhler eğri diyagramı elde edildi. Bu eğrilere göre numunelerin ortalama

gerilmelere karşı dayandığı yorulma çevrim ömürlerini ve sonsuz ömre karşı gelen gerilmenin tespit edilmesi sağlandı.

3. Bulgular

DC01A çelik malzeme kullanarak yapıştırma metodu ile birleştirilen numuneler üzerinde yapılan yorulma testleri sonucunda ele edilen bulgular aşağıdaki gibi açıklanmıştır.

3.1. Yapıştırma metoduyla birleştirilen numunelerin yorulma analizi

Yapıştırma metodunda daha önce bahsedildiği gibi üç farklı grupta yorulma analizi yapılmıştır. Bu gruplar aşağıda ifade edilmiştir.

- Metals numune yüzeyine hiçbir kaplama veya boya işlemi uygulanmayan ve 1-6 mm arasında yapıştırma kalınlıklarıyla birleştirilen grup
- Metals numune yüzeyine 20 µm kalınlığında katarforez kaplama uygulanmış ve 1-6 mm arasında yapıştırma kalınlıklarıyla birleştirilen grup
- Metals numune yüzeyine 30 µm kalınlığında astar boya kaplama uygulanmış ve 1-6 mm arasında yapıştırma kalınlıklarıyla birleştirilen grup.

Yukarda belirtilen üç grubu kapsayan yorulma analizi iki parametre üzerinde incelenmiştir.

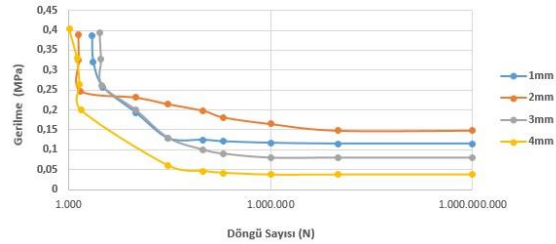
- Yüzey kaplamasına bağlı yorulma analizi sonuçları
- Yapıştırma kalınlıklarına bağlı yorulma analizi sonuçları

3.1.1. Yüzey kaplamasına bağlı yorulma analizi sonuçları

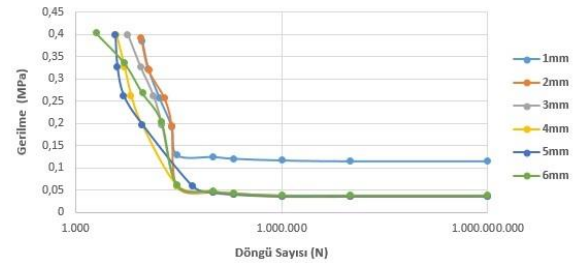
Birinci grup olan, numune yüzeylerine katarforez kaplama veya astar boya gibi hiçbir kimyasal kaplama olmayan ve 1-6 mm arası yapıştırma kalınlığıyla birleştirilen numunelerin yorulma analiz verileri Şekil 7’de gösterilmektedir.

Şekil 9’da görüldüğü gibi, yüzeyi herhangi bir kimyasal yöntemle kaplanmamış ve boyanmamış plakalarda 1 mm-4 mm kalınlığındaki yapıştırıcıya kadar olan S-N eğrisini içermektedir. 5 ve 6 mm kalınlıklardaki numuneler ilk döngülerde kopmuştur. Bu durum yapıştırıcı kalınlığının artırılmasında yapıştırıcı elementinin daha mukavemetli olmadığı sonucu çıkmıştır. Deneysel verilere göre 3 mm kalınlığındaki yapıştırıcının maksimum gerilme koşullarında daha uzun bir yaşam döngüsüne sahip olduğu görülmektedir.

İkinci grup olan, numune yüzeyine 20 µm kalınlığında katarforez kaplama uygulanmış ve 1-6 mm arası yapıştırma kalınlığıyla birleştirilen numunelerin yorulma analiz verileri Şekil 8’de gösterilmektedir.



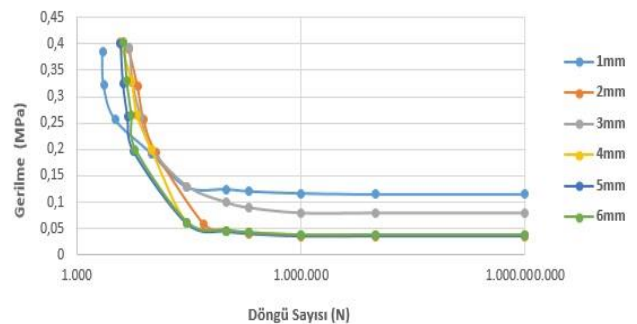
Şekil 7. Yüzeyinde herhangi bir kimyasal kaplama veya boya işlemi uygulanmayan numunelerin S-N eğrisi



Şekil 8. Yüzeyi katarforez kaplama işlemi uygulanmış numunelerin S-N eğrisi

Şekil 10’da görüldüğü üzere, en kalın yapıştırıcı kalınlığı olan 6mm yapıştırıcı kalınlığındaki numunelerde, deneye göre maksimum gerilme koşulunda en düşük yorulma ömrüne sahiptir. Daha sonraki yorulma ömrü düşük yapıştırma kalınlıkları 5mm, 4mm, olarak takip etmektedir.

Üçüncü grup olan numune yüzeyine 30 µm kalınlığında astar boya uygulanmış ve 1-6 mm arası yapıştırma kalınlığıyla birleştirilen numunelerin yorulma analiz verileri Şekil 9’da gösterilmektedir.

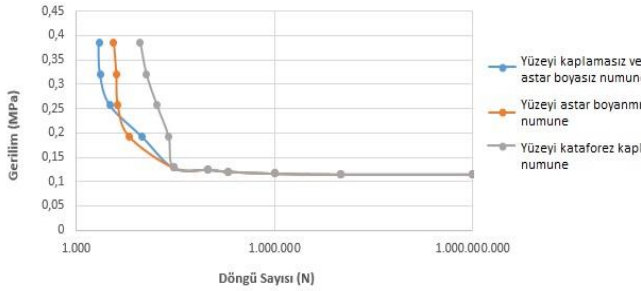


Şekil 9. Yüzeyi astarla boya işlemi uygulanmış numunelerin S-N eğrisi

3 mm kalınlığındaki yapıştırıcı ve astarlanmış yüzeye yapıştırılan 2 mm kalınlığındaki yapıştırıcılar, deney sonuçlarına göre maksimum gerilme noktasında diğerlerine göre en yüksek yorulma ömrü değerine sahiptir. İkinci en yüksek gerilim koşulunda, 2 mm kalınlığındaki yapıştırıcı daha uzun bir yorulma ömrü sergiler. 1 mm kalınlığındaki yapıştırıcı, deneye göre maksimum stres koşulunda en düşük yorulma ömrü göstermektedir.

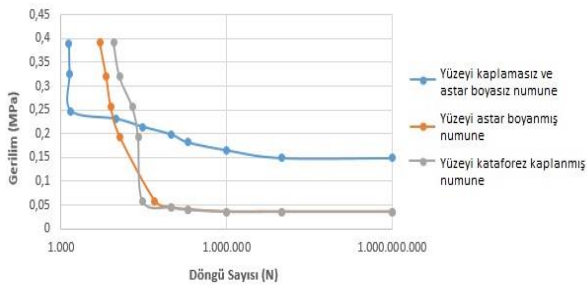
3.1.2. Yapıştırma kalınlıklarına göre yorulma analizi sonuçları

Bu bölümde alternatif olarak, her üç grupta 1-6 mm yapıştırma kalınlıklarındaki numunelerin yapıştırma kalınları baz alarak irdelenmiştir. Şekil 10'da görüldüğü gibi 1 mm kalınlığındaki yapıştırıcı numunelerde, yüzeyi kateforez uygulanmış numunelerin en iyi yorulma ömrüne sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 10. Her üç gruptaki numuneler için ortak olarak 1 mm yapıştırıcı kalınlığındaki birleştirmelerin S-N eğrisi

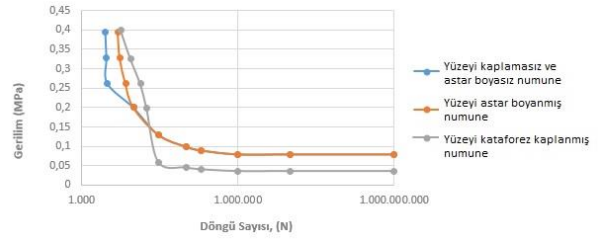
Şekil 11'de görüldüğü gibi 2 mm kalınlığındaki yapışkan kalınlığındaki numunelerde de kateforez kaplı numuneler, daha sonra da astar boya uygulanmış numunelerde en yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 11. Her üç gruptaki numuneler için ortak olarak 2 mm yapıştırıcı kalınlığındaki birleştirmelerin S-N eğrisi

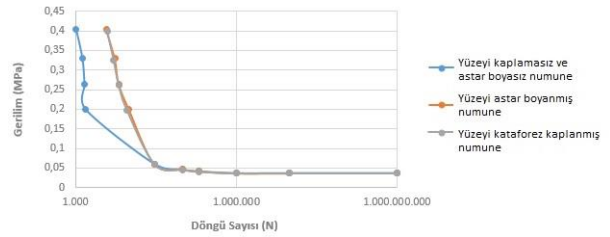
Şekil 12'de görüldüğü gibi 3 mm kalınlığındaki yapışkan kalınlığındaki numunelerde de kateforez kaplı numuneler en yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu

gözlemlenmiştir, daha sonra da astar boya uygulanmış numunelerde gözlemlenmiştir.



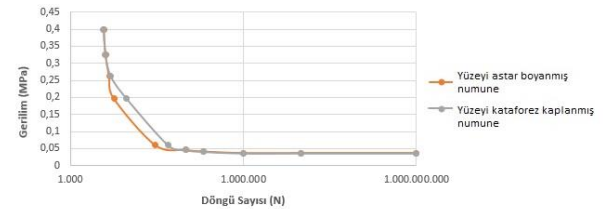
Şekil 12. Her üç gruptaki numuneler için ortak olarak 3 mm yapıştırıcı kalınlığındaki birleştirmelerin S-N eğrisi

Şekil 13'de görüldüğü gibi 4 mm kalınlığındaki yapışkan kalınlığındaki numunelerde de kateforez kaplama ve yüzeyi astar boyanmış numunelerde en yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu gözlemlenmiştir. Her ikisinde de yorulma ömürleri birbirlerine yakın çıkmıştır.



Şekil 13. Her üç gruptaki numuneler için ortak olarak 4 mm yapıştırıcı kalınlığındaki birleştirmelerin S-N eğrisi

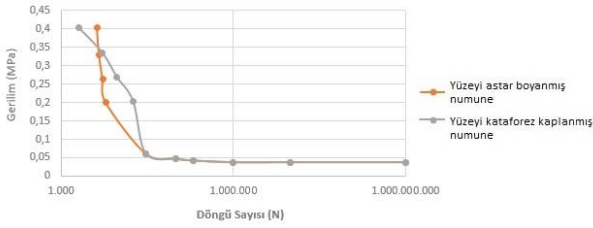
Şekil 14'de görüldüğü gibi 5 mm kalınlığındaki yapışkan kalınlığındaki numunelerde de kateforez kaplama ve yüzeyi astar boyanmış numunelerde en yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu gözlemlenmiştir. Her ikisinde de yorulma ömürleri birbirlerine yakın çıkmıştır.



Şekil 14. Her üç gruptaki numuneler için ortak olarak 5 mm yapıştırıcı kalınlığındaki birleştirmelerin S-N eğrisi

Şekil 15'de görüldüğü gibi 6 mm kalınlığındaki yapışkan kalınlığındaki numunelerde de kateforez kaplama ve yüzeyi astar boyanmış numunelerde en yüksek yorulma ömrüne sahip olduğu gözlemlenmiştir. Kateforez kaplamalı numuneler az da olsa yüzeyi boyanmış numunelerden daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Yüzeyinde hiçbir işlem yapılmamış numuneler en başarısız birleştirmeler olduğu belirlenmiştir.



Şekil 15. Her üç gruptaki numuneler için ortak olarak 6 mm yapıştırıcı kalınlığındaki birleştirmelerin S-N eğrisi

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, geleneksel olarak kullanılan birleştirme metodlarından olan civata, somun, vida gibi mekanik birleştirme (Banea, 2009; Wang, 2023) ve kaynak gibi termal termal olmayan kaynak yöntemleri de var birleştirme (Nonnenmann, 2022) yöntemlerine alternatif olarak çeşitli endüstri alanlarda yaygın bir şekilde kullanılan yapıştırıcı metodu çalışılmıştır. Çelik malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan yapıştırıcı metodu yapıştırıcı metodu yerine 'kimyasal yapıştırma' kullanılarak yapılan birleştirme' kullanılmalıdır. Günümüz endüstrisinde farklı uygulama alanlarında hızla artmakta olduğu gözlemlenmektedir (Nuhoğlu, 2023). Bu yüzden, bu çalışmada, yapıştırıcı metoduyla farklı yapıştırma kalınlıklarında birleştirilen, farklı yüzey kaplamalarına sahip çelik malzemelerin yorulma direnci sonrasında S-N (Wöhler) eğrilerinden (Andaloussi, 2022) elde edilen ömür değerleri birbirleri arasında kıyaslama yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında, kullanılan yapıştırıcı metodunun yapışma performansının artırılması ve yapıştırma işlemi öncesi yapıştırılacak malzemelerin yüzeyinde kuvvetli bir yapışma bağı oluşturmak için uygulanan mevcut yüzey hazırlama yöntemlerine ek olarak kateforez kaplama metodu alternatif bir yüzey ön hazırlığı olarak kullanılmıştır.

Endüstride ve bilimsel araştırmalarda yapıştırma işlemi öncesinde üzerinde yoğunlaşılacak üç temel yüzey hazırlığı sınıflandırması vardır. Birincisi, mekanik yüzey hazırlıklarıdır. Yapıştırma işlemleri öncesinde zımparalama, taşlama, kumlama, fırçalama gibi yapışma yüzeyini aşındıracak mekanik işlemlerin uygulanmasıyla, yapıştırılacak malzeme yüzeyini iki boyuttan üç boyuta çıkarılarak malzeme yüzeyine derinlik ve yükseklik oluşturulması için uygulanan yüzey pürüzlülüğü işlemidir (Akshay, 2017; Bowen, 2019). Bu işlem, yapıştırılacak yüzey alanının boyutlarını değiştirmeden, yapıştırılacak bölgenin yüzey alanını arttıracak ve mekanik kilitlemeye neden olmaktadır. Bu tür uygulamaların yapıştırma

mukavemetine sağladığı yüksek etkileri birçok araştırmacı tarafından ortaya başarılı bir şekilde ortaya koymuştur.

İkinci önemli yüzey hazırlığı fiziksel yüzey hazırlıklarıdır. Bu tür yüzey hazırlıklarına alev, plazma işlemleri ve korona deşarj gibi yüksek enerjili yüklere maruz bırakılan yüzey ön işlemlerdir (Komagata, 2020; Zanet, 2022; Takeda, 2019). Bu konuda da birçok araştırmacı farklı parametrelerde yapışma mukavemetini araştırdığı görülmüştür.

Üçüncü önemli yüzey hazırlığı kimyasal ön hazırlıklardır. Bu işlemlere asit ile aşındırma (Riesgo, 2023), yüzey kaplama (Nasresfahani, 2023), ve yapışma yüzeyini yağdan, tozda ve diğer yabancı maddeleri çeşitli çözücülerle temizlenmesidir (Tian, 2021). Yapıştırılacak bölge yüzeyinde uygulanan bu tür kimyasal ön hazırlıklar malzeme ile yapışkan elementi arasında ara yüz oluşturarak yüzey enerjilerinin artırılması, yapıştırıcı elementinin akma özelliğinin artırılması sonucunda yapıştırıcı moleküllerinin yapıştırılacak malzeme yüzeyini daha geniş alanda ıslatabilme kabiliyeti yükseltilerek adhezyon kuvvetinin oluşturmasını sağlayacak çalışmaları da birçok araştırmacıların odaklandığı temel konulardır.

Endüstriyel uygulama alanları üzerinde odaklanılan bu yüzey hazırlıklarına ilaveten bu çalışmada özellikle çelik malzemeden oluşan otomotiv araç karoserisini korozyondan koruma amaçlı karoser yüzeyine uygulanan kateforez kaplama üzerinde herhangi bir yapıştırma uygulamasına rastlanmamıştır. Bu çalışmayla bir otomobil fabrikasının boya hattında uygulanan kateforez ve astar boya uygulamaları sonrası yapıştırıcı performansı işleminin de uygulanabilir olduğu ve yüzeyi kateforez uygulanan numunelerde 3 mm yapışma kalınlıklarında birleştirilen malzemelerin yapıştırma performansının, yüzeyi astar boya uygulanmış numunelerden daha başarılı bir yapışma yüzey performansı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç karşısında, kimyasal ön hazırlık kapsamında yapışma yüzeylerinin kateforez kaplama ile de mümkün olabileceği kanıtlanmıştır. Böylelikle, otomotiv endüstrisinde yapıştırma işlemlerinin kateforez kaplama sonrası uygulanmasında daha başarılı bir sonuç vereceği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, araçların hafifletilmesi için araç gövdesi üzerinde kullanılacak daha hafif malzemelerin kateforez uygulama sonrası yapıştırma işlemlerinin yapılması daha verimli olacağı düşünülmektedir. Bunun sonucunda daha hafif araçlar üretilerek çevreye verilen CO2 emisyon salınımı azalması,

araç performanslarının artırılması, elektrikli araçlarda menzilin artması gibi olumlu etkilerin oluşturulmasında yapılacak bilimsel çalışmalara ışık tutacaktır. Bu çalışma ışığında, çelik malzemeden farklı malzemeler üzerinde çalışılması, yukarıda belirtilen yüzey ön hazırlıkların birkaç metodu aynı anda kombine olarak uygulanarak çalışılması veya epoksi bazlı gibi farklı yapıştırıcı türleri kullanılarak diğer araştırmacılar için bir fikir oluşturacaktır.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazar tüm etik standartlara uyduklarını beyan eder.

Yazarlık Katkı Beyanı

Celalettin Baykara: Kaynaklar, Araştırma, Deney, Yazma-rijinal taslak Görseleştirme, Analiz.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma, T.C. Karabük Üniversitesi bilimsel araştırma projeleri (BAP) koordinatörlüğü kapsamında, KBÜ-BAP-151-DS-041 numaralı, hızlı destek projesi olarak desteklenmiştir. Ayrıca, yazar, çelik malzeme tedarikinde Hyundai Assan Otomotiv Sanayi A.Ş.'ye, yapıştırıcı tedarikinde Sika Türkiye'ye, ve gözlemlerin bir bölümünde beraber yol aldığı Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği öğrencilerinden Ali Mert İLMENÖZ, Göksel KULA, Kamil AKDOĞAN, Onur ATAMAN'a ve proje onayında katkısı bulunanlara, makalenin olgunlaşmasına katkı koyan hakem ve editörlere, desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

5. Kaynaklar

- Adams, R.D., Comyn, J., Wake, W.C., 1997. Structural Adhesive Joints in Engineering, 2nd ed.; Chapman & Hall: pp. 244–265.
- Al-Moghazy, M., Mahmoud, M., and Nada, A. A. 2020. *Fabrication of cellulose-based adhesive composite as an active packaging material to extend the shelf life of cheese*. International Journal of Biological Macromolecules, **160**, pp.264-275.
- Alsoufi, M. , Bawazeer, T. , Alhazmi, M. and Azam, S., 2017. *The Effect of Detergents on the Appearance of Automotive Clearcoat Systems Studied in an Outdoor*

Weathering Test. Materials Sciences and Applications, **8**, 521-536.

- Andaloussi H.A., Mouton, L., Ahmad, A.S., Errotahabere, X., Mougin, S.M., Paboeuf, S., 2022. *Fatigue of adhesive bonding: World first fatigue S-N curve for FPSO application*. Procedia Structural Integrity, **38**, 238–250.
- Bamberg, P. A. M. G. P., Reisgen, U., Schiebahn, A., Barbosa, J. D. V., Marx, B., and Coelho, R. S., 2018. *Digital Image Correlation Analysis Of The Effects Of The Overlap Length, Adhesive Thickness And Adherends Yield Strength Over Similar And Dissimilar Joints Of High Strength Steel And Aluminum Alloys*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **83**, 69–75.
- Banea, M. D., Barros, S. de.Budhe, S., Ghumatkar, A., Sekhar, R., 2016. *Influence of Adherend Surface Roughness on the Adhesive Bond Strength*. Latin American Journal of Solids and Structures, **13(13)**, 2356–2370.
- Banea, M.D., da Silva, L.F.M., 2009. *Adhesively bonded joints in composite materials: an overview*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications, **223 (1)**, 1-18.
- Baur, P., Casari, P., Choqueuse, D., Davies, P. Roy, A., 2004. *Structural mechanical testing of a full-size adhesively bonded motorboat*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, **218(4)**, 259–265.
- Baykara, C., 2023. *Effect of single-lap joint different adhesive thickness on fatigue strength of metals with different surface coatings*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, **237 (17)**, 1– 18.
- Baykara, C., Teke, I.T, Ertas, A.H, 2023. *Effects of the single-lap joint on fatigue strength of metals with different surface coatings: a numerical solution*. TransSiberia, **402**, 11011.
- Bowen, L., Anand, N., Hossein, A., Soheil, S., 2019. *Analyzing effects of surface roughness, voids, and particle-matrix interfacial bonding on the failure response of a heterogeneous adhesive*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, **346**, 410-439.

- Braga D.F.O., De Sousa L.M.C, Infante V., Da Silva L.F.M., Moreira P.M.G.P., 2015. *Aluminium friction stir weldbonding*. Procedia Engineering, **114**, 223–31.
- Budhe, S., Ghumatkar, A., Birajdar, N., Banea, M.D., 2015. *Effect of surface roughness using different adherend materials on the adhesive bond strength*. Applied Adhesion Science, **3**, 1-10.
- Burchardt, B., Dilger, K., Frauenhofer, M., 2018. Handbook of Adhesion Technology, L.F.M. da Silva, A. Ochsner, R.D. Adams (Eds.), second ed., Springer, pp. 1333–1366.
- Clearfield H.M, McNamara D.K, Davis G.D., 1990. Surface preparation of metals. Brinson HF (ed) Handbook on engineered materials: adhesives and sealants, vol 3. ASM International, Metals Park, p 259.
- Davies P, Marine industry, 2018. Hand- book of Adhesion Technology , L.F.M. da Silva, A. Ochsner, R.D. Adams (Eds.), second ed., Springer, pp. 1391–1418.
- Davis, G.D., 2003. Handbook of adhesive technology, Mittal KL, Pizzi A (eds), CRC Press, p. 273.
- Duarte, A.P., Coelho, J.F., Bordado, J.C. , Cidade, M.T. Gil, M.H. , 2012. *Surgical adhesives: systematic review of the main types and development forecast*. Progress in Polymer Science, **37(8)**, 1031–1050.
- Ebnesajjad S., 2011. Handbook of adhesives and surface preparation. Sina Ebnesajjad, (ed) William Andrew, p. 259–300.
- Ertas, A. H., Yilmaz, Y. & Baykara, C., 2008. *An investigation of the effect of the gap values between the overlap portions of the spot-welded pieces on fatigue life*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, **222 (6)**, 881-890.
- Ferreira, J.A.M., Reis, P.N.B., Costa, J.D.M. and Richardson, M.O.W., 2002. *Fatigue Behaviour of Composite Adhesive Lap Joints*. Composites Science and Technology, **62(10- 11)**, 1373–1379.
- Frassetto, A., Breschi, L., Turco, G., Marchesi, G., Di Lenarda, R., Tay, F. R and Cadenaro, M. 2016. *Mechanisms of degradation of the hybrid layer in adhesive dentistry and therapeutic agents to improve bond durability—A literature review*. Dental Materials, **32(2)**, e41–e53.
- Ghumatkar, A., Sekhar, R., Budhe, S., 2017. *Experimental study on different adherend surface roughness on the adhesive bond strength*. Materials Today: Proceedings, **4(8)**, 7801–7809.
- Golewski, P., Nowicki, M. T., Sadowski, T., Pietras, D., 2021. *Bending degradation of thinwalled box beams made of aluminum omega profile and GFRP panel connected by mechanical fasteners*. Composite Structure, **282**, 115111.
- Goudarzi, R.H., Khedmati, M.R., 2015. *An experimental investigation of static load capacity of AL-GFRP adhesively bonded single lap and double butt lap joints*. Latin American Journal of Solids and Structures, **12**, 183-1594.
- Grätzla, T, Van Dijkstra, Y., Schramm, N., et.al., 2019. *Influence of the automotive paint shop on mechanical properties of continuous fibre-reinforced thermoplastics*. Composite Structures, **208**, 557-565.
- Hartz, J. J., Zeig, T., Attin, T., and Wegehaupt, F. J., 2021. *Adhesive application before hydrofluoric acid etching during repair procedure in dentistry*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **111**, 102960.
- Ishikawa, H., Seto, K., Shimotsuma, S., Kishi, N., & Sato, C. 2005. *Bond strength and debonding behavior of elastomer and emulsion-type dismantlable adhesives used for building materials*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **25(3)**, 193–199.
- Jakubinek, M. B., Ashrafi, B., Zhang, Y., Martinez-Rubi, Y., Kingston, C. T., Johnston, A. and Simard, B. 2015. *Single-walled carbon nanotube–epoxy composites for structural and conductive aerospace adhesives*. Composites Part B: Engineering, **69**, 87–93.
- Kaykaç, N.G., 2022. Investigation of Process Parameters on Properties of Epoxy Based Cathaphoretic Coatings, (The Degree of Doctor of Philosophy), The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 172.
- Kupski, J., Teixeira de Freitas, S., 2021. *Design of adhesively bonded lap joints with laminated CFRP adherends: Review, challenges and new opportunities for aerospace structures*. Composite Structures, **268**, 113923.
- Kwon, Y.T, Kim, Y.S., Lee, Y. , Kwon, S., Lim, M., Lee, Y., Kwon, S., Song, Y., Choa, Y.H and Yeo, W.H. , 2018. *Ultrahigh conductivity and superior interfacial adhesion of a nanostructured, photonic-sintered copper membrane for printed flexible hybrid*

- electronics. ACS Applied Materials and Interfaces, **10**, 44071–44079.
- Lees, W.A., 1987. Stress Distribution in-Bonded Joints: *An Exploration within a Mathematical Model*. International Journal of Materials and Product Technology, **2(2)**, 168–181.
- Maggiore, S., Pedemonte, M., Bazurro, A., Stagnaro, P., Utzeri, R., & Luciano, G., 2020. *Characterization of the effect of an epoxy adhesive in hybrid FSW-bonding aluminium-steel joints for naval application*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **103**, 102702.
- Nasresfahani, M.R., Asghari, S., 2023. *Review of nondestructive methods for evaluating adhesive bonding on anodized coatings*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **127**, 103491.
- Nonnenman, T, Beygi, R, Carbas, R.J.C, M.D. Banea, da Silva, L.F.M., Öchsner, A, 2022. *Synergetic effect of adhesive bonding and welding on fracture load in hybrid joints*. Journal of Advanced Joining Processes, **6**, 100122.
- Nuhoglu, K., Aktas, E, Tanoglu, M., Martin S., İplikçi, H., Barışık, M., Yeke, M., Türkdogan, C., Esenoglu, G., Dehneliler, S, İriş M.E., 2023. *Analysis of adhesively bonded joints of laser surface treated composite primary components of aircraft structures*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **126**, 103456.
- Nunes, S.L.S., Campilho, R.D.S.G., da Silva, F.J.G., de Sousa, C.C.R.G., Fernandes T.A.B., Banea M.D., da Silva, L.F.M., 2016. *Comparative failure assessment of single and double lap joints with varying adhesive system*. Journal of Adhesion, **92(7-9)**, 610-634.
- Paiva, R.M.M. , Marques, E.A.S., da Silva, L.F.M., Antonio, C.A.C., Aran-Ais, F., 2015. *Adhesives in the footwear industry*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, **203(2)**, 357–374.
- Paşa, Ç., (2006). Otomotivde boyama teknolojisi ve boya kurutma fırınının ekserji analizi, (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 131
- Reis, P.N.B., Antunes, F.J.V. and Ferreira, J.A.M., 2005. *Influence of Superposition length on Mechanical Resistance of Single-Lap Adhesive Joints*. Composite Structures, **67(1)**, 125–133.
- Reza, A., Shishesaz, M., Tahan, K.N., 2014. *The Effect of Viscoelasticity on Creep Behavior of Double-Lap Adhesively Bonded Joints*. Latin American Journal of Solids and Structures, **11**, 35-50.
- Riesgo, B.V.P., Rodrigues, C.S., Nascimento, L.P, May, L.G, 2023. *Effect of hydrofluoric acid concentration and etching time on the adhesive and mechanical behavior of glass-ceramics: A systematic review and meta-analysis*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **121**, 103303.
- Rudawska, A., 2019. *Surface Treatment in Bonding Technology*; Academic Press Elsevier, pp. 47–59.
- Sadowski, T., Golewski, P. 2014. *Effect of Tolerance in the Fitting of Rivets in the Holes of Double Lap Joints Subjected to Uniaxial Tension*. Key Engineering Materials, **607**, 49–54.
- Sadowski, T., Kneć, M., and Golewski, P., 2014. *Fatigue Response of the Hybrid Joints Obtained by Hot Spot Welding and Bonding Techniques*. Key Engineering Materials, **601**, 25–28.
- Sahin, R., & Akpınar, S., 2021. *The effects of adherend thickness on the fatigue strength of adhesively bonded single-lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **107**, 102845.
- Takeda, T., Yasuoka, T., Hoshi, H., Sugimoto, S., Iwahori, Y., 2019. *Effectiveness of Flame-based Surface Treatment for Adhesive Bonding of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Matrix Composites*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, **119**, 30–37.
- Tan, W., Na, J., Wang, G., Xu, Q., Shen, H., Mu, W., 2021. *The effects of service temperature on the fatigue behavior of a polyurethane adhesive joint*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **107**, 102819.
- Tian, F., Jett, K., Flaughner, R., Arora, S., Bergeron, B., Shen, Y., and Tay, F. 2021. *Effects of dentine surface cleaning on bonding of a self-etch adhesive to root canal sealer-contaminated dentine*. Journal of Dentistry, **112**, 103766.
- Traian V. Chirila, 2022. *Surgical adhesives based on silk fibroin: A critical account of past and current research*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **114**, 103109.
- TS EN ISO 9664, 1995. Yapıştırıcılar-Çekme kaymasına maruz yapısal yapıştırıcılarda yorulma özellikleri-Deney metotları. TSE, Ankara,17

- Varisli, D., Kaykac, N.G., 2012. *COx free Hydrogen Production over Cobalt Incorporated Silicate Structured Mesoporous Catalysts*. Applied Catalysis B: Environmental, **127**, 389–398.
- Varisli, D., Kaykac, N.G., 2016. *Hydrogen from ammonia over cobalt incorporated silicate structured catalysts prepared using different cobalt salts*. International journal of hydrogen energy, **41**, 5955-5968.
- Wang, C., Yusufu, D., and Mills, A. 2019. *A smart adhesive “consume within” (CW) indicator for food packaging*. Food Packaging and Shelf Life, **22**, 100395.
- Wang, C.H. and Rose, L. R. F., 2000. *Compact Solutions for the Corner Singularity in Bonded Lap Joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **20(2)**, 145–54.
- Wang, D., Li, Y., Zou, T., Fu, J., Liu, Z., 2023. *Increasing strength and fracture toughness of carbon fibre-reinforced plastic adhesively bonded joints by combining peel-ply and oxygen plasma treatments*. Applied Surface Science, **612**, 155768.
- Watson, B., Nandwani, Y., Worswick M.J. and Cronin, D.S., 2019. *Metallic multi-material adhesive joint testing and modeling for vehicle lightweighting*. International Journal of Adhesion and Adhesives, **95**, 102421.
- Więckowski, W., Lacki, P., Adamus, J., 2019. *Examinations of steel overlap joints obtained using the friction stir welding technology*. Archives Metallurgy and Materials. **64**, 393–399.
- Wu, H., Chiang, S. W., Lin, W., Yang, C., Li, Z., Liu, J., Wong, C. P., 2014. *Towards Practical Application of Paper based Printed Circuits: Capillarity Effectively Enhances Conductivity of the Thermoplastic Electrically Conductive Adhesives*. Scientific Reports, **4(1)**, 6275.
- Yang, C., Wong, C. P., and Yuen, M. M. F., 2013. *Printed electrically conductive composites: conductive filler designs and surface engineering*. Journal of Materials Chemistry C, **1(26)**, 4052.
- Yuya, K., Ikeda, H.; Fujio, Y., Nagamatsu, Y., Shimizu, H., 2020. *Surface modification of feldspar porcelain by corona discharge and its effect on bonding to resin cement with silane coupling agent*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, **105**, 103708.
- Zanet, A., Salvo, M, Caselegno, V., 2022. *Surface modification of SiC to improve joint strength via Corona plasma treatment*. Ceramics International **48**, 23492–23497.
- Zhao B, Lu Z-H. A, (2009), *Two-dimensional approach of single-lap adhesive bonded joints*. Mechanics of Advanced Materials and Structures, **16**, 130-159

internet kaynakları

- 1- <https://www.erdemir.com.tr>, (04.04.2023)
- 2- <https://tur.sika.com>, (04.04.2013)
- 3- <https://www.labomaronline.com>, (05.04.2023)