

# AISI 1040 Çeliğinde yapısal yapışma bağı dayanımının statik ve dinamik zorlama şartları altında incelenmesi

Yaprak Nisa OĞUZ<sup>1</sup>, Mustafa Burak GEDİKLİ<sup>2</sup>, Gülcan TOKTAŞ<sup>3\*</sup>, Ali ORAL<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Savaşlar Tesisat Taahhüt ve Ticaret LTD. ŞTİ

<sup>2</sup>Gesbey Enerji Türbini Kule Üretim San. ve Tic. A.Ş.

<sup>3</sup>Balikesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü

Geliş Tarihi (Received Date): 27.10.2023

Kabul Tarihi (Accepted Date): 28.11.2023

## Öz

Bu çalışmada; rüzgar türbin kulelerinin iç yüzeylerinde merdiven bağlantı elemanı olarak kullanılan braketlerin adezyon özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bunun için AISI 1040 çeliği parçalar akrilik tipi yapısal bir yapıştırıcı ile birleştirilerek numuneler hazırlanmıştır. Yapışma bağlantılarının statik (kayma ve eğilme) ve dinamik (yorulma) mekanik özellikleri belirlenmiştir. Yorulma deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için mevcut bir yay yorulma cihazının tasarımında değişiklikler yapılmıştır. Modelleme ve analiz programları yardımıyla cihazın tasarım doğrulama çalışmaları ve mekanik deney sonuçlarının analizleri yapılmıştır. Dinamik analizlerde cihazın iki kritik parçasında (biyel kolu ve ana parça) güvenlik faktörlerinin tasarım gereksinimleri için uygun olduğu görülmüştür. Statik ve dinamik deneyler sonucunda hatasız yapışma gerçekleşen numunelerde kohezyon tipi homojen ayrılma gözlenmiştir. Statik eşdeğer gerilme değerinin %50'si kadar değişken gerilme ve altındaki gerilmelerde yapışma bağına sonsuz ömre sahip olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** yapısal yapıştırıcı, AISI 1040, statik ve dinamik analiz, yorulma cihazı.

Yaprak Nisa OĞUZ, yaprak.1408@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3686-4113>

\*Gülcan TOKTAŞ, gzeytin@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-0455-2107>

Mustafa Burak GEDİKLİ, mustafaburak.gedikli@gri.com.es, <https://orcid.org/0000-0002-4606-7126>

Ali ORAL, a.oral@balikesir.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-9144-3821>

# Static and dynamic analysis of structural adhesion bond in AISI 1040 steel

## Abstract

*This study aims to examine the adhesion properties of brackets used as ladder fasteners on the inner surfaces of wind turbine towers. For this purpose, samples were prepared by combining AISI 1040 steel parts with an acrylic-type structural adhesive. Static (shear and bending) and dynamic (fatigue) mechanical properties of adhesive joints were determined. To perform fatigue tests, changes were made to the design of an existing spring fatigue device. Design verification studies of the device and analysis of mechanical test results were carried out with the help of modeling and analysis programs. In dynamic analysis, it was found that the safety factors in two critical parts of the device (connecting rod and main part) were suitable for the design requirements. As a result of static and dynamic tests, cohesion-type homogeneous separation was observed in the samples with flawless adhesion. It has been observed that the adhesive bond has an infinite life at variable stresses up to 50% of the static equivalent stress value and stresses below it.*

**Keywords:** Structural adhesive, AISI 1040, static and dynamic analysis, fatigue device.

## 1. Giriş

Yapıştırarak birleştirme, fiziksel veya kimyasal bir sertleşme reaksiyonuna giren metalik olmayan bir madde (yapıştırıcı) kullanarak parçaların yüzey yapışması (adezyon) ve iç mukavemet (kohezyon) yoluyla bir araya getirilmesi işlemidir [1]. Yapısal ve yapısal olmayan olmak üzere temelde iki çeşit yapışma bağları mevcuttur. Yapısal yapışma bağları, tasarım sınırları dahilinde bütünlük kaybı olmaksızın gerilimi iletebilmelidir. Bağlar, ayrıca bir parçanın yıllarca sürebilen çalışma ömrü boyunca dayanıklı olmalıdır. Yapısal bir bağ, yaşlanmaya karşı önemli bir dirence ek olarak 7 MPa'dan daha büyük bir kesme mukavemetine de sahip olmalıdır. Bununla birlikte, yapısal olmayan yapıştırıcıların önemli yükleri desteklemesi gerekmez, sadece hafif malzemeleri yerinde tutmakla görevlidirler [2]. Yapısal olmayan yapıştırmada, yapıştırıcı sızdırmazlık, elektrik yalıtımı, titreşim sönümlenme veya ses yalıtımı amacıyla kullanılabilir [3]. Basınca duyarlı bantlar ve ambalaj yapıştırıcıları yapısal olmayan yapıştırıcılara örnektir.

Yapısal yapıştırıcılar, geleneksel mekanik birleştirme tekniklerine kıyasla bir bağlantıya birçok avantaj sağlayabilir. Perçin ve civatalı bağlantıların aksine, yapıştırma yoluyla birleştirmede delik açılmasına gerek yoktur. Bu sebeple yapışma bağına sahip bağlantılar perçinli ve vidalı bağlantılara göre gerilmeleri daha homojen bir şekilde dağıtır, böylece bağlantılarda yüksek gerilme konsantrasyonlu bölgeler oluşmaz. Geometrideki ani bir değişiklik, gerilme dağılımını bozduğu ve bağlantıda maksimum gerilmelere neden olduğu için bağlantı mukavemetini azaltabilir. Yapışma bağlantısı, gerilmelerin yoğunlaşmasını önleyerek bağlantının dayanımını daha da artırır. Ayrıca, geleneksel birleştirmenin yapıştırıcılarla değiştirilmesiyle bir montajın ağırlığı önemli ölçüde iyileştirilebilir. Esnek yapıştırıcılar, farklı termal genleşme katsayılarına sahip farklı malzemeler arasındaki termal gerilmeleri de azaltabilir [4,5]. Ek olarak, yapışkanla birleştirme, birleştirilen parçalarda mikro yapısal değişiklikler ve çarpılma olmadan,

tasarım esnekliği ile farklı veya aynı malzemelerin birleştirilmesine ve imalat kolaylığına olanak sağlar [5,6].

Ayrıca, yüksek yük taşıma potansiyeli için daha geniş bir yük taşıma alanı, herhangi bir şekildeki ince veya kalın malzemenin birleştirilmesi için uygulanabilirlik, hermetiklik, şok yüklerin emilmesi, korozyon ve yorulmaya karşı direnç gibi faydalar da sağlamaktadır [3]. Bununla birlikte, yapıştırıcılar doğası gereği polimerdir ve bu nedenle daha karmaşık bir şekilde davranırlar, bu da performanslarının tahminini çok daha zor hale getirir. Sıcaklık ve nem gibi çevresel koşullar, yapıştırıcıda fiziksel ve kimyasal değişikliklere neden olabilir. Ayrıca harici yük altındaki davranışları yapıştırıcının kullanım ömrünü daha da azaltır [4,5].

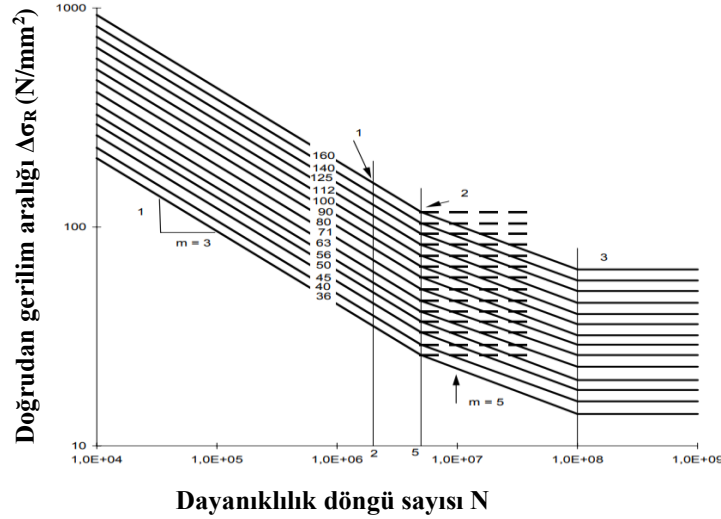
Yapışma bağlantıları, hafif malzeme gereksinimi nedeniyle başta otomotiv ve havacılık olmak üzere birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle, havacılık endüstrisinde kullanılan karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) için birincil birleştirme tekniği yapışma bağlantılarıdır. İnşaat mühendisliği, ulaşım, biyomekanik, denizcilik, elektronik vb. gibi diğer birçok endüstri yapıştırıcılardan yararlanır [5,7].

Yorulma, yapışma bağlarını içeren birçok yapısal bileşen için çok önemli bir yükleme türüdür. Tekrarlı gerilme altında, bir yapı statik dayanımının çok altında deformasyona uğrayabilir. Yapıştırıcılar, bağlantıların yorulma mukavemeti üzerinde önemli bir etkiye sahip olan büyük miktarda plastisite sergiler [5].

Yapışma bağlantıların dayanıklılığı, çevresel değişkenler (sıcaklık ve nem), yapıştırıcıların yaşlanması, dinamik yükler, gerilim hızı, sürünme etkisi ve yorulma hasarı gibi çeşitli koşullara bağlıdır. Yapışma bağlantılarının yorulma davranışı, geometrik faktörlerden, farklı yapışan ve yapıştırıcı malzemelerin kombinasyonundan, yükleme tipinden, yüzey hazırlığından ve kütleme döngülerinden etkilenebilir [8].

Bilindiği gibi rüzgar türbinleri rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren ve kullanımı son yıllarda hızla artan yenilenebilir enerji üretim aracıdır. Rüzgar türbini imalatında da geleneksel olan kaynak, perçin veya cıvata ile birleştirme yöntemleri kullanılmaktadır. Sürekli değişken rüzgar şiddetleriyle bu bağlantılar cıvata veya perçin ile yapılmışsa homojen olmayan gerilim dağılımından, kaynakla yapılmışsa dengesiz ısı dağılımından dolayı öngörülenden önce çatlamaya sebep olabilmektedir. Ayrıca, değişken rüzgar şiddeti ve gerilme etkisiyle bu bağlantılar tekrarlı gerilmelere maruz kalarak, kritik bağlantı bölgelerinde çatlaklar oluşmakta ve oluşan çatlaklar tekrar eden gerilmelerin etkisiyle büyüyerek yorulma kırılmalarına sebep olmaktadır.

Rüzgar türbin kulelerinin iç kısmında bulunan merdivenlerin kule duvarına montajında bağlantı elemanı olarak kullanılan braketler geleneksel olarak kaynakla birleştirilmektedir. Bu durumda kaynak işleminde dengesiz ısı dağılımı braket birleşim yerlerinde çatlaklara sebep olabilmekte ve bağlantının ömrünü kısaltmaktadır. Nitekim; TS EN 1993-1-9 numaralı “Çelik yapıların tasarımı” standardında [9] düz ve mekanik bağlantılar için (kaynak içermeyen) verilen kategori 160'daki yorulma sınırı kaynaklı bağlantılar için kategori 80'e düşmektedir ve yorulma mukavemet sınırı önemli ölçüde azalmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Doğrudan gerilim aralıkları için yorulma mukavemeti eğrileri [9].

Bu çalışmada geleneksel olarak kaynakla birleştirilen braket bağlantı parçalarının yapısal yapıştırma tekniği ile birleştirilmesi ve bağlantının ömrünün araştırılması amaçlanmıştır. Bunun için braketlerin kule duvarına bağlantısındaki malzeme ve geometrisi esas alınarak belirlenen numuneler akrilik bir yapıştırıcı ile birleştirilmiş ve bu bağlantılar mekanik özellikler açısından incelenmiştir. Bağlantıların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla bağlantı numunelerine statik (çekme, kesme) ve dinamik (yorulma) deneyler uygulanmıştır. Yorulma deneyleri için daha önce Gönen ve arkadaşlarının [10] spiral yay yorulması için tasarlayıp imal ettikleri çeki-bası gerilmeli yorulma cihazı yeniden revize edilerek tekrarlı bileşik (kayma ve eğilme) gerilme uygular duruma dönüştürülmüştür. Ayrıca, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapışma bağı için statik ve dinamik analizler yapılmıştır.

## 2. Deneysel Çalışmalar

Bu bölüm; numunelerin yapıştırılması, yorulma cihazının revizyonu, statik ve dinamik deney ve analiz bölümlerinden oluşmaktadır.

### 2.1. Yapıştırma işlemi

Deney numuneleri için kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Tablo 1 ve Tablo 2’de verilen AISI 1040 çelik numuneler kullanılmıştır. Deney numuneleri, türbin kulelerinde kullanılan braket bağlantı parçaları geometrisine uygun olarak 40 mm çapında silindirik yapışma yüzeyine sahiptir. Yapıştırma işleminden önce numune yüzeylerine ön hazırlık yapılmıştır. Bunun için yüzeyler toz ve kirden arındırılmış ve yüzeylere GL40-GL25 metal aşındırıcı ile 9 bar basınç altında 1.5 metre mesafeden kumlama işlemi yapılmıştır. Kumlama sonrası yüzeyler etil alkolle silinerek temizlenmiş ve kurutulmuştur.

Tablo 1. AISI 1040 çeliğinin kimyasal bileşimi (% ağırlık) [11].

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	Mo	V
0.380	0.140	0.730	0.025	0.015	0.040	0.040	0.005	0.060	0.009	0.002

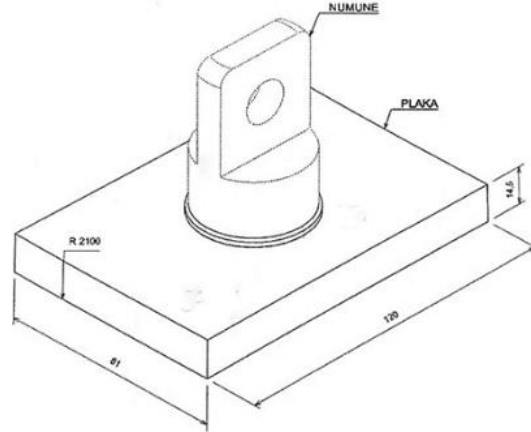
Tablo 2. AISI 1040 karbon çeliğinin mekanik özellikleri [11].

Çekme mukavemeti (MPa)	Akma mukavemeti (MPa)	Kayma mukavemeti (MPa)	Elastisite modülü (MPa)	Yüzde uzama (%)	Sertlik (HB)
600	361	410	190-210	25	190

Yapıştırıcı olarak yüksek mukavemetli ve endüstriyel uygulamalar için uygun olan akrilik yapısal bir yapıştırıcı seçilmiştir. Bu seçime, Gesbey Enerji Türbini Kule Üretim San. ve Tic. A.Ş. tarafından bir seri yapıştırıcılar üzerinde mekanik test çalışmalarından sonra karar verilmiştir. Kullanılan yapıştırıcının poisson oranı 0.4, Elastisite modülü(E) 1.17 MPa, kütle yoğunluğu  $0.99 \text{ g/cm}^3$  ve çekme mukavemeti 0.016 MPa'dır.

Statik deneylerde kullanılmak üzere AISI 1040 çelik plaka üzerine beş adet braket numunesi yapıştırılmıştır. Yapıştırıcı numune yüzeyini tamamen kaplayacak şekilde uygulanmıştır. Daha sonra deney numuneleri hızlı bir şekilde çelik plaka üzerine yapıştırılmıştır.

Şekil 2'de ölçüleri verilen yorulma numunesinin hazırlanması için de statik deneylerde uygulanan aynı yapıştırma yöntemi kullanılmıştır. Sadece yorulma numunelerinde yapıştırma işlemine geçilmeden önce Elcometer 123 yüzey profili göstergesi ile yüzey pürüzlülük değerleri ( $R_t$ ) ölçülmüştür. Ölçüm sonrası yüzeyler etil alkol ile temizlenerek kurutulmuştur. Ortalama hesaplanan yüzey pürüzlülük değeri alt parça ( $81 \times 120 \text{ mm}^2$  kesitli levha) için  $47.79 \mu\text{m}$ , üst parça (numune) için  $15.14 \mu\text{m}$ 'dir. Hem yorulma hem de statik test için hazırlanan numunelerin yapıştırma öncesi yükseklikleri belirlenmiş ve yapıştırma sonrası toplam yükseklikten çıkarılarak elde edilen yapıştırıcı kalınlıkları yaklaşık 1mm olarak tespit edilmiştir.

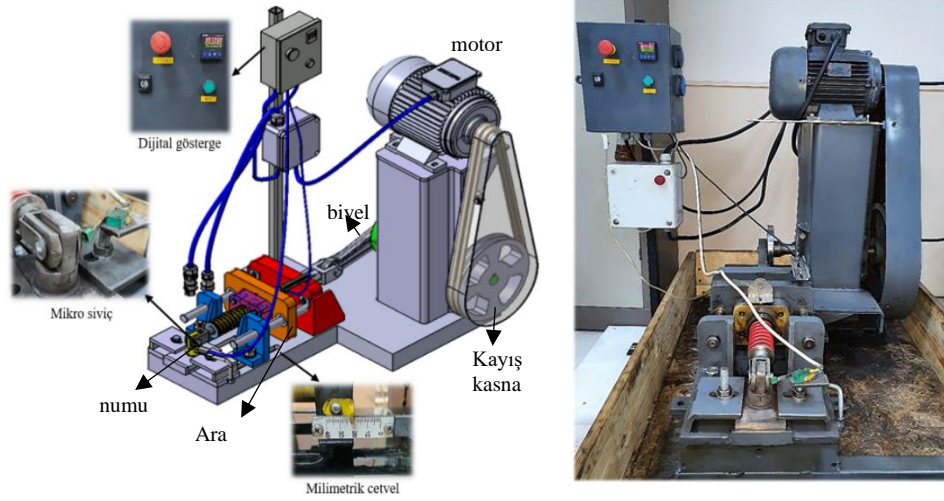


Şekil 2. Yorulma numunesi ve ölçüleri.

## 2.2. Yorulma cihazı

Yapıştırma bağının yorulma dayanımını deneysel olarak belirlemek amacıyla Şekil 3'te verilen bir kaymalı eğilme yorulma test cihazı geliştirilmiştir. Cihaz, 4 kW güç ve 1460 dev/dak ile tahrik edilmektedir. Kayış-kasnak mekanizması motor devrini 1/6 oranında düşürmekte ve motordan gelen dönme hareketi krank-biyel mekanizması ile yayı sıkıştıran öteleme hareketine dönüştürülmektedir. Bu esnada yayın sıkışma miktarına bağlı olarak cihaz, 0-F (N) arasındaki bası kuvvetini numuneye iletmektedir. Test

düzeneğinde dairesel kesitli yaylar yerine daha uzun ömürlü olan dikdörtgen kesitli kalıp yaylar tercih edilmiştir. Ara parça (kuvvet uygulama elemanı), istenilen kuvvetleri ( $F = k \times x$ ) elde edebilmek amacıyla yayı biyel kolu vasıtasıyla 20 ve 22mm sıkıştırarak istenilen zorlama kuvvetlerini numuneye iletmektedir.



Şekil 3. Yapıştırma bağı için geliştirilen kaymalı-eğilme yorulma cihazı.

Sabit olan alt tablanın yan tarafına yerleştirilen cetvel ile yay sıkıştırma miktarı ayarlanabilmektedir. Bu sayede test cihazında kullanılmak istenen yayların çapları ve boyları değişebilmektedir. Deneylerde numunelere uygulanan kuvvetlerin yük tekrar sayılarını belirlemek için bir sayaç kullanılmıştır. Sayaçtaki dijital göstergede karakter sayısı sınırlı olduğundan; sayaç her 10 yük tekrarında 1 birim artış sağlamaktadır. Alt tablaya yerleştirilen mikro anahtar yardımı ile numune koptuğu an elektriksel devre kesilerek sistem otomatik olarak durmaktadır. Herhangi bir beklenmeyen durumla karşılaşıldığında cihazı durdurmak için bir adet acil durdurma butonu mevcuttur.

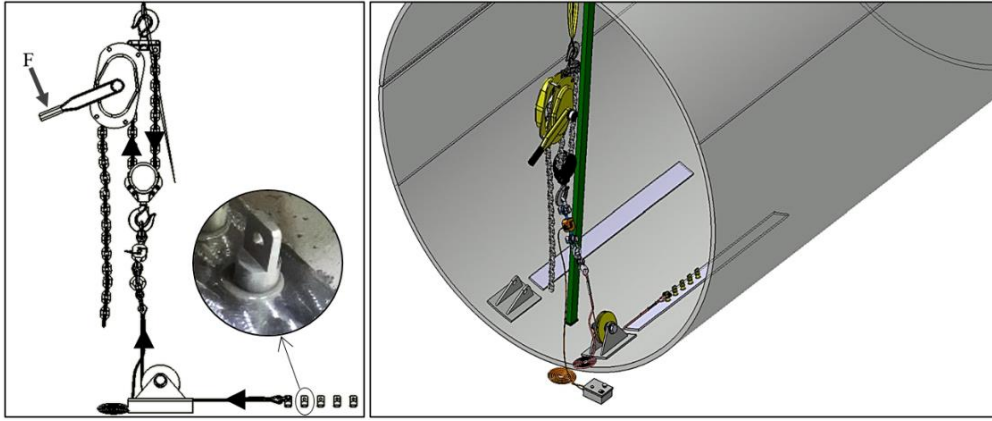
### 2.3. Statik ve dinamik deneyler

Kule içine yapıştırılan braketler kayma ve eğilme gerilmesine zorlandığından, yapıştırılan parçanın, gerçek uygulamadaki statik kayma ve eğilme gerilmesini belirleyebilmek için standart dışı bir deney düzeneği kullanılmıştır (Şekil 4). Bu düzende mekanik olarak uygulanan yük load cell yardımıyla dijital olarak kaydedilmektedir. Deneyler sonucunda ayrılmanın meydana geldiği maksimum ayrılma yükü elde edilmiştir. Kayma ve eğilme gerilmesine zorlanan numunenin ayrılma yükünün tespiti için beş adet numune test edilmiştir. Elde edilen kopma yükünden kayma gerilmesi ( $\tau_k$ ), eğilme gerilmesi ( $\sigma_e$ ) ve eşdeğer gerilme ( $\sigma_{eş}$ ) sırasıyla Eşitlik 1, 2 ve 3 yardımıyla hesaplanmıştır. Denklemlerdeki  $F_{maks}$  maksimum kuvveti,  $A_0$  yapışma kesitini,  $M_e$  eğilme momentini,  $I_x$  atalet momentini ve  $y$  tarafsız eksene olan mesafeyi ifade etmektedir.

$$\tau_k = \frac{F_{maks}}{A_0} \quad (1)$$

$$\sigma_e = \frac{M_e}{I_x} \cdot y \quad (2)$$

$$\sigma_{eş} = \frac{\sigma_e}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_e}{2}\right)^2 + \tau_k^2} \quad (3)$$



Şekil 4. Statik deney düzeneği.

Yorulma deneylerine statik deneylerden elde edilen bileşik gerilmenin yaklaşık %70'i kadar değişken gerilme uygulanarak başlanmıştır. Bu ve bunun altındaki tekrarlı gerilmeleri oluşturabilmek için strok mesafeleri ve rijitlikleri Tablo 3.3'te verilen yaylar kullanılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında  $R=0$  gerilme oranında toplam 30 adet numune ile yapılmıştır.

Tablo 3. Kullanılan yaylar, strok mesafesi, rijitlikleri ve uyguladıkları bası kuvvetleri.

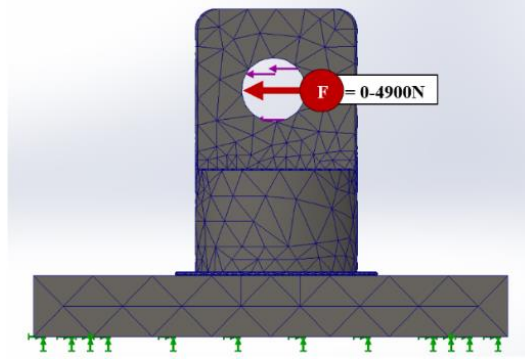
Yay tipi	Strok (mm)	Yay rijitliği (MPa)	Kuvvet (N)
R50-102	20	245	4900
R50-102	22	245	5390
S40-89	22	280	6164
G50-115	20	352	7040

#### 2.4 Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz

Bu bölümde, yapışma bağındaki statik ve dinamik analizler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır.

Yapışma bağına analizi için önce Solidworks kütüphanesine AISI 1040 çeliği ve akrilik yapıştırıcının mekanik özellikleri tanımlanmıştır (Tablo 2). Solidworks programıyla yapışma numunesinin modeli oluşturulmuş ve Solidworks'ün içerisinde bulunan *Simulation* eklentisiyle bu modelin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerin yapılabilmesi için ilk olarak modele mesh işlemleri yapılmıştır. Küçük eleman boyutları analiz sonuçlarındaki doğruluk oranını arttırdığından, gerilme dağılımının kritik olduğu bölgelerde daha ince mesh tercih edilmiştir (Şekil 5). Statik analizlerde mesh işleminden sonra analiz için gerekli olan sınır şartlar tanımlanmıştır. İlk olarak braketin alt kısmından sabitleme işlemi yapılarak analize başlanmıştır. Analizler; 4900N yük değerinde, 15909 toplam düğüm sayısı ve 9975 toplam eleman kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerilme kriteri olarak eşdeğer (von-Mises) gerilmeler dikkate alınmıştır.





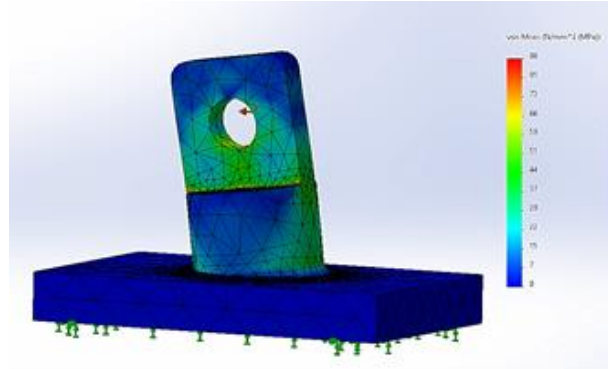
Şekil 5. Analizin sınır şartları görüntüsü.

Yorulma analizinde sıfır tabanlı ( $R=0$ ) yüklemeye tipi seçilmiş ve statik analizin parça üzerine 1.000.000 defa uygulanması istenmiştir. Test sonuçlarında elde edilen S-N eğrisi verileri programa elle girilmiştir.

### 3. Sonuçlar ve tartışma

#### 3.1. Yapışma bağı analizi

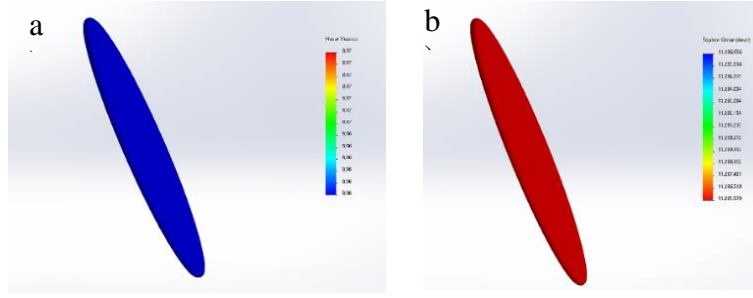
Şekil 6'da yapışma bağına 4900 N değerindeki sayısal hasar yükünün von-Mises gerilme dağılımı gösterilmiştir. Analiz sonucunda maksimum gerilme yapıştırıcı tabakasının kenar bölgesinde 87.86 MPa olarak bulunmuştur. Bu bölgeler kritik bölge olarak tanımlanmaktadır ve ilk olarak ayrılma bu bölgelerde meydana gelmektedir. Von-Mises gerilmesi sonucu parça akma sınırını geçmiş ve gözle görülür bir ayrılmaya sebep olmuştur.



Şekil 6. Yapışma bağına von-Mises gerilme dağılımı.

Yorulma analiz sonuçlarından, maksimum hasar yüzdesinin 8.87 olacağı ve 11.285.570 yük tekrarından sonra yapışma bölgesinde kopmaların meydana geleceği görülmüştür (Şekil 7). Analiz sonucunda başlangıçta girilen yük tekrar sayısından (1.000.000) 11 kat daha fazla yük tekrarına dayanabileceği ortaya çıkmıştır.

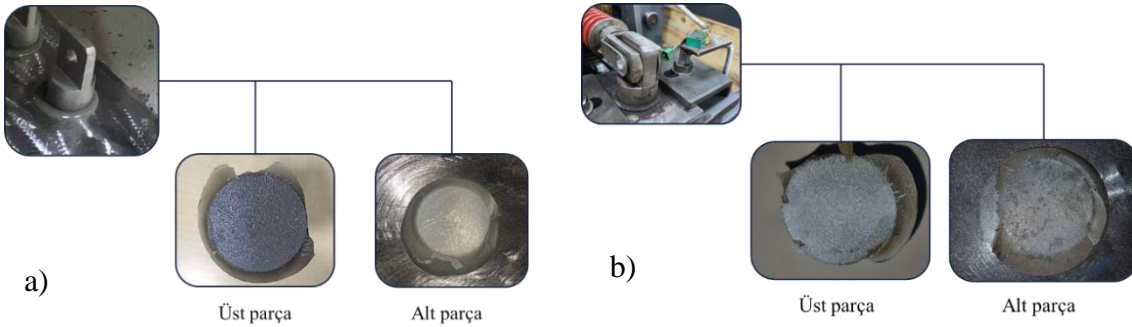




Şekil 7. Yorulma analizinde yapışma bölgesindeki a)hasar yüzdesi, b)ömür.

### 3.2. Statik ve dinamik deney sonuçları

Statik ve dinamik deneyler sonucunda ayrılan numunelerin yüzeyleri Şekil 8’de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde numunelerin yapıştırıcı kısmından (kohezyon) homojen bir şekilde ayrılma gösterdiği görülmüştür. Yapışan yüzeylerde herhangi bir boşluk veya süreksizlik gözlenmemiştir. Bu sebeple yapıştırma işleminin ve yapıştırıcı tipinin AISI 1040 karbon çeliği için uygun olduğu söylenebilir. Bununla beraber yorulma numunelerinin bazılarında kopma yüzeylerinin homojen olmadığı görülmüştür (Şekil 9). Buna sebep olarak, yapıştırma işlemi sırasında numune yüzeylerinin yapıştırıcı ile tamamen ıslatılmadığı söylenebilir. Bu numunelerde hatalı birleşme olduğundan bunlara ait deney sonuçları dikkate alınmamıştır.



Şekil 8. a)Statik deneyler ve b)dinamik deneyler sonucunda numunelerde kopma yüzeyleri.



Şekil 9. Yapışma hatası olan yüzeyler.

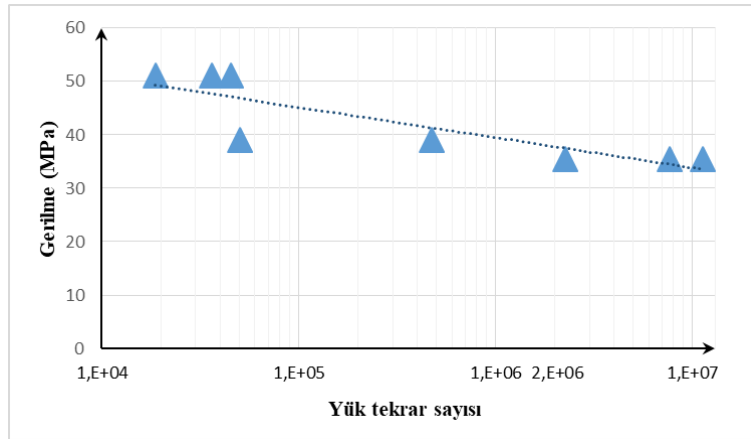
Statik deney düzeneğinden elde edilen maksimum kuvvet değerlerinden Eşitlik 1, 2 ve 3 yardımıyla kayma gerilmesi, eğilme gerilmesi ve eşdeğer gerilme değerleri hesaplanmıştır (Tablo 4). Buna göre ortalama kayma, eğilme ve eşdeğer gerilme değerleri sırasıyla 7.89 MPa, 71.05 MPa ve 71.13 MPa olarak bulunmuştur. Sonlu elemanlar

analizi ile hesaplanan maksimum gerilme değerinin (87.86 MPa) deneylerde elde edilen eşdeğer gerilme değerinden %23 oranında sapma gösterdiği görülmüştür.

Tablo 4. Statik deney sonuçları.

Ölçüm no	$P_{max}$ (N)	$\tau_{kayma}$ (MPa)	$\sigma_e$ (MPa)	$\sigma_{eş}$ (MPa)
1	10840	8.63	77.64	78.59
2	9908	7.88	70.96	67.89
3	8809	7.01	63.09	63.86
4	10271	8.17	73.56	74.46
5	9771	7.78	69.98	70.83
ortalama	9919.8	7.89	71.05	71.13

R=0 gerilme oranında hatasız yapıştırılan numunelere uygulanan tekrarlı bileşik (kayma ve eğilme) gerilmeler sonucunda elde edilen Wöhler eğrisi Şekil 10'da verilmiştir. Yapısal yapıştırıcıların yorulma deneylerine ilişkin standartta  $10^6$  tekrar sayısından sonra deneylerin sonlandırılabilmesi belirtilmektedir [12]. Şekilden de görüldüğü gibi, 35.52 MPa değişken eşdeğer gerilme değerinde yapışma bağı  $11 \times 10^6$  yük çevriminden sonra ayrılma göstermiştir. Bu tekrar sayısı standardın belirttiği değer 11 katı olduğundan 35.52 MPa değerinin altında yapışma bağına sonsuz ömürlü olduğu söylenebilir. Aynı zamanda bu gerilme değeri statik ortalama eşdeğer gerilmenin yarısına eşittir.



Şekil 10. Wöhler (S-N) eğrisi.

Deneylerde kullanılan bir numune atmosfere açık dış ortamda, 4905 N yük altında güneşli-sıcak, yağmurlu, rüzgarlı-soğuk ortamlarda korunmasız olarak dakikada 32 salınım yapacak şekilde denemeye alınmıştır (Şekil 11). Sarkaç koluna bağlanan yük bir pnömatik piston ile 90 saniyede bir itilerek sarkacın salınım yapması sağlanmaktadır. Atmosferik şartlarda 22.07.2022 – 22.10.2023 tarihleri arasında yaklaşık  $2.08 \times 10^7$  kez salınım yapmış olup makalenin yazıldığı tarihte hala deneme çalışması devam etmektedir.



Şekil 11. Atmosferik ortamda yapılan deney çalışması.

#### 4. Sonuçlar

Rüzgar türbin kulesi iç yüzeyinde merdiven bağlantı elemanı olan braketlerin, kule duvarına kaynak ile birleştirilmesi, kule yorulma mukavemeti açısından tercih edilmemektedir. Kule duvarlarına yerleştirilecek braketlerin yapışma bağı ile montajlanma olanakları araştırılan çalışmada; yapışma bağı (yapışan malzeme: AISI 1040 çeliği ve yapıştırıcı: akrilik tipte yapısal yapıştırıcı) statik ve dinamik açıdan incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Mevcut yay yorulma cihazının tasarımında değişiklikler yapılarak yapışma bağlantıları için birleşik tipte (kayma ve eğilme) tekrarlı gerilme uygulayan yorulma cihazı geliştirilmiş ve cihaz güvenilir deney sonuçları vermiştir.
- Statik deneyler sonucunda yapışma bağına ortalama kayma gerilmesi 7.89 MPa, eğilme gerilmesi 71.05 MPa ve eşdeğer gerilmesi ise 71.13 MPa olarak belirlenmiştir.
- Statik eşdeğer kopma gerilmesi değerinin %50'si kadar değişken gerilme ve altındaki gerilmelerde yapışma bağına sonsuz ömre sahip olduğu görülmüştür.
- Atmosferik şartlarda yapılan deney çalışmasında  $2.08 \times 10^7$  yük tekrarına karşın hala kopma olmaması, bu yapıştırıcıların kaynaklı birleştirmeye iyi bir alternatif olacağı şeklinde değerlendirilebilir.

#### Kaynaklar

- [1] EAA Aluminium Automotive Manual – Joining, 9. Adhesive bonding, Version 2015, European Aluminium Association.
- [2] Adhesives Technology Handbook, Second Edition, edit. Sina Ebnesajjad, William Andrew Press, USA, (2008).
- [3] Song J.H. ve Lim, J. K., Bonding strength in structural adhesive bonded joint, **Metals And Materials International**, 7, 5, 467-470, (2001).
- [4] Wilhelmsson S. ve Ågren J., Evaluation of the mechanical properties of structural adhesives cured under different environmental conditions, Yüksek Lisans Tezi, Makine mühendisliği - Ürün geliştirme TGMAI18h programı, (2021).
- [5] Gonzalez, C. E.C., Mora, R. P., Gutierrez, S. D. S., Taha-Tijerina, J. J., Arista, B. V. ve Pingarron, A. B., Fatigue strength evaluation and fracture behavior of joined

- dual phase steel/AA6061-T6 aluminum alloy, **Frattura ed Integrità Strutturale**, 48, 530-544, (2019). Doi: 10.3221/IGF-ESIS.48.51.
- [6] Barbosa, N.G.C., Campilho, R.D.S.G., Silva, F.J.G., Comparison of different adhesively-bonded joint types for mechanical structures, **Applied Adhesives Science**, 6, 15, (2018). <https://doi.org/10.1186/s40563-018-0116>.
- [7] Abdel Wahab, M. M., Fatigue in adhesively bonded joints: A review, **International Scholarly Research Network (ISRN) Materials Science**, Article ID 746308, 25 pages, (2012). Doi:10.5402/2012/746308.
- [8] Campos, A.A.M.A., de Jesus, A.M.P., Correia, J.A.F.O. ve Morais, J.J.L., Fatigue crack growth behavior of bonded aluminum joints, **Procedia Engineering** 160, 270-277, (2016).
- [9] EUROCODE 3: Çelik Yapıların Tasarımı- BÖLÜM 1-9: Genel Kurallar-Yorulma (TS-EN 1993-1-9), Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 2005.
- [10] Gönen, D., Oral, A. ve Cakır, M. C., Investigating the benefits of using circular die springs instead of rectangular die springs, **Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structure**, 38, 799–812, (2015). Doi: 10.1111/ffe.12269.
- [11] Kalite Belgesi, HASÇELİK SAN. VE TIC. A.Ş., 2020.
- [12] ISO 9664, Adhesives - Test methods for fatigue properties of structural adhesives in tensile shear, Switzerland-Geneve Patent, (1993).