

HİBRİT YAPIŞTIRMA-DÜZENİNİN BİNDİRME BAĞLANTI MUKAVEMETİNE ETKİLERİ

Özkan Öz*

Karabük Üniversitesi,
Teknoloji Fakültesi,
Endüstriyel Tasarım Mühendisliği,
Karabük
ooz@karabuk.edu.tr

Halil Özer

Yıldız Teknik Üniversitesi,
Makina Fakültesi,
Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul
halilozzer34@gmail.com

ÖZ

Yapıştırılmalı bağlantıların dayanımının artırılması, soyulma gerilmesi yoğunluğunun düşürülmesi ve kayma gerilmesinin bindirme yüzeyi boyunca daha homojen dağılımının sağlanması ile mümkündür.

Çalışma kapsamında, basit bindirmeli bağlantıların dayanımını arttırmak amacıyla, kullanılan yaygın yöntemler açıklanmış ve en az iki farklı yapıştırıcının beraber kullanıldığı derecelendirilmiş yapıştırma çizgisi yöntemi olan hibrit yapıştırma bağlantısı detaylı olarak incelenmiştir. Hibrit yapıştırma bağlantısı, rijit yapıştırıcının bindirme uzunluğunun ortasında, sünek yapıştırıcının kenarlarda kullanıldığı bağlantı çeşididir. Hibrit yapıştırma düzenini kullanmanın, gerilme dağılımları üzerine etkisi, yapıştırıcı uzunluk oranlarının değiştirilmesi durumu için grafiksel olarak gösterilmiş, ayrıca, yaygın olarak kullanılan diğer yöntemlere göre bağlantı dayanımı yönünden üstünlükleri belirtilmiştir. Yöntemin uygulanma şekli detaylı olarak incelenmiştir.

Sonuç olarak, hibrit yapıştırma düzenini kullanmanın, yapıştırıcı uzunluğu boyunca, özellikle rijit yapıştırıcının tekil olarak kullanıldığı duruma göre, kenarlarda soyulma ve kayma gerilmesi değerlerini önemli ölçüde azalttığı grafiksel olarak gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bağlantı dayanımı, hibrit yapıştırma bağlantısı, gerilme analizi

THE EFFECTS OF THE HYBRID ADHESIVE-ORDER ON STRENGTH OF THE ADHESIVELY-BONDED JOINT

ABSTRACT

Increasing the strength of adhesively-bonded joints is possible by reducing the peeling stress intensity and ensuring a more uniform distribution of shear stress along the adhesive bondline.

In the study, the most common methods used to increase the strength of the single-lap joints were explained and the hybrid (bi-adhesive) bonding method was examined in detail, in which at least two different adhesives were used together along the overlap length. Hybrid bonding method is a kind of technique that rigid adhesive is located in the middle of the overlap length and the flexible one is at the both ends. The effect of using the hybrid bonding scheme on the stress distributions was shown graphically for varying the adhesive bond-length ratio. Also, the advantages of the method over the other commonly used methods were described in terms of the joint strength. Application steps of the method were studied in detail.

As a result, it was graphically showed that using the hybrid adhesive-order along the overlap results in considerably decreased the peel and shear stress values at the edges, when compared to the mono bondline bonded with stiff adhesive only.

Keywords: Joint strength, hybrid adhesive joint, stress analysis

* İletişim Yazarı

Geliş tarihi : 29.05.2016

Kabul tarihi : 05.09.2016

Öz, Ö., Özer, H. 2016. "Hibrit Yapıştırma-Düzeninin Bindirme Bağlantı Mukavemetine Etkileri," Mühendis ve Makina, cilt 57, sayı 679, s. 63-72.

1. GİRİŞ

Yapısal yapıştırıcılar, otomotiv, havacılık ve gemi inşaat endüstrilerinde, parçaların montajında geniş şekilde kullanılmaktadır. Belirtilen bu endüstri alanlarında kullanılan levha montaj parçalarının düzlemsel yüzeylere sahip olması, levhaların yapıştırıcı kullanılarak, basit (tek bindirmeli) veya çift bindirmeli olarak birleştirilmesine imkân vermektedir.

Endüstride, düzlemsel yüzeylerin montajında yapıştırıcıların kullanılması önemli avantajlar sağlamaktadır. Cıvata, perçin ve kaynak gibi geleneksel birleştirme yöntemlerinin yerine yapıştırıcıların tercih edilmesi, bağlantıda delik ve çentik olmaması nedeniyle gerilme yığılması önlenmekte, buna karşın mukavemet/ağırlık oranı önemli oranda artabilmektedir. Örneğin havacılık endüstrisinde hafif bağlantıların tercih edilmesi ile sağlanacak 0.453 kg'lık ağırlık azalması, yıllık 1360 kg yakıt tasarrufu anlamına gelmektedir [1].

Yapısal yapıştırıcıların montaj parçalarında kullanılmasının, bağlantı ağırlığının azalması açısından önemli avantajlar getirmesine rağmen, tasarım parametrelerinin uygun şekilde belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Dolayısıyla, uygun şekilde tasarlanmayan yapıştırılmalı bağlantı, yapılabilecek en yanlış tercih olabilmektedir. Özellikle, basit bindirmeli (tek bindirmeli) bağlantılarda dönmeye bağlı moment etkisi, yapıştırıcı kenarlarında yüksek gerilme yoğunluklu bölgelerin oluşmasına neden olmaktadır. Yapıştırılmalı bağlantılarda ani hasar oluşumları, gerilme yoğunluğunun en yüksek olduğu bölgelerde meydana gelmektedir.

Yapıştırılmalı bağlantılarda ani hasar oluşumlarının engellenmesi, soyulma gerilmesi yoğunluğunun düşürülmesi ve kayma gerilmesinin yapıştırma uzunluğu boyunca homojen dağılımının sağlanması ile mümkündür.

Gerilme bileşenlerinin, bindirme kenarlarındaki yoğunluğunun azaltılması amacıyla, levha geometri ve özelliklerinin değiştirilmesi, farklı özellikte yapıştırıcıların kullanılması ve yapıştırıcı kenar geometrilerinin kontrol edilmesi gibi çözümler literatürde [2-6] geniş bir şekilde incelenmiştir. Ancak, yapıştırılan levhaların geometrisinde yapılacak değişiklikler fazladan imalat işlem basamağı ve maliyet anlamına gelmektedir. Levha geometrileri değiştirilmeden basit bindirmeli bağlantılarda dayanımının artırılması, bindirme uzunluğu boyunca, derecelendirilmiş yapıştırma çizgisi oluşturularak sağlanabilir. Derecelendirilmiş yapıştırma çizgisi, bindirme uzunluğu boyunca farklı özellikte en az iki yapıştırıcı (üç-bölge) kullanılarak veya tekil yapıştırıcı özelliklerinin, bindirme uzunluğu boyunca derecelendirilmesi (üçten fazla-bölge) ile elde edilebilir.

Bu çalışmanın amacı, basit bindirmeli bağlantılar için iki farklı yapıştırıcının beraber kullanıldığı derecelendirilmiş ya-

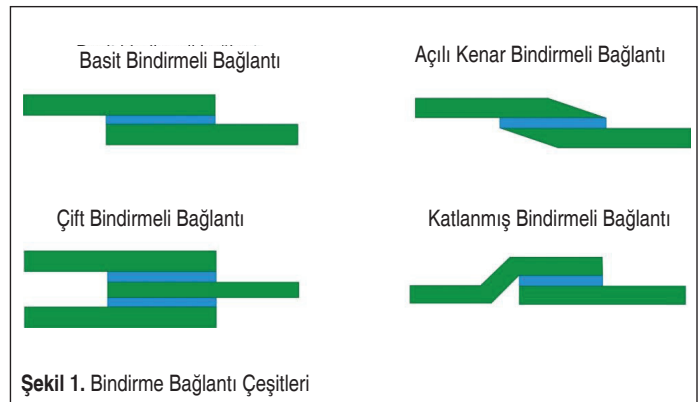
pıştırma çizgisi yöntemi olan hibrit yapıştırma bağlantısının incelenmesidir. Çalışmada, ilk olarak, bağlantı dayanımını arttırmak için yaygın olarak kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Çalışmanın devamında, hibrit yapıştırma bağlantısı tanımlanmış ve uygulama şekli detaylı olarak anlatılmıştır. Yöntemin, gerilme dağılımları üzerine etkisi, grafiksel olarak gösterilmiş; ayrıca, yaygın olarak kullanılan diğer yöntemlere olan üstünlükleri belirtilmiştir.

2. TEKİL-YAPIŞTIRICI KULLANILAN BAĞLANTILAR

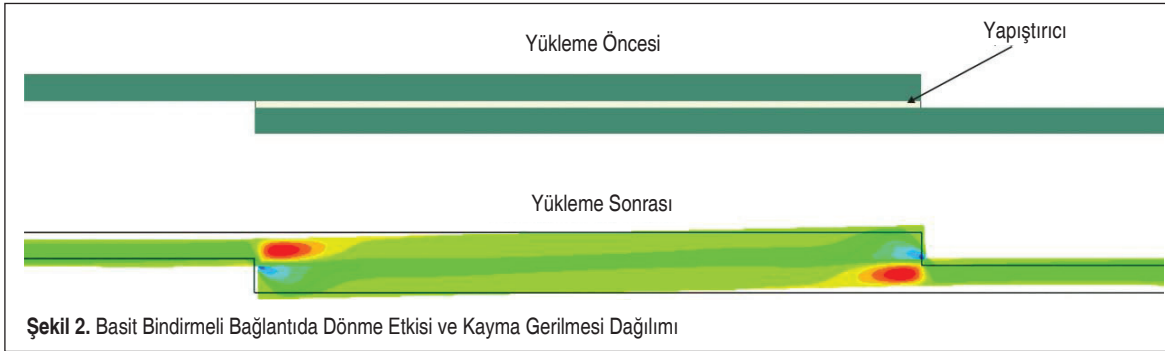
Yapıştırılanlar (levhalar) arasında yükün emniyetli bir şekilde iletilmesi, bağlantı dayanımının artırılması ile mümkündür. Şekil 1'de bindirmeli bağlantı çeşitleri gösterilmektedir. Bu bağlantılar içerisinde basit bindirmeli bağlantılar, en sık kullanılan bağlantı geometrisidir.

Basit bindirmeli bağlantılar imalat açısından en kolay geometriye sahiptir. Ancak, yükleme durumunda, bağlantıyı ayırma yönünde etkiye sahip olan soyulma gerilmeleri ile kayma gerilmeleri beraber meydana gelir. Diğer bağlantı çeşitlerine göre, soyulma gerilmesi etkisinin fazla olduğu basit bindirmeli bağlantılar, gerilme bileşenleri açısından daha karmaşık davranış göstermektedir. Bağlantıda, soyulma gerilmesinin de etkisi ile bindirme uzunluğunun kenarları ile ortasında kayma gerilmesi değerleri arasındaki fark önemli derecede artar. Şekil 2'de, yükleme öncesi ve sonrası, basit bindirmeli bağlantıda dış eksenli yükleme ile meydana gelen dönme etkisi ve kayma gerilmesi dağılımına ait sonlu eleman analiz sonuçları görülmektedir. Yükleme sonrası, yapıştırma kenarlarında kayma gerilmeleri maksimum değerine ulaşmaktadır. Şekil 2'de koyu mavi ve kırmızı ile gösterilen bölgeler sırasıyla, yapıştırıcı ve levhada oluşan maksimum gerilme değerlerini göstermektedir.

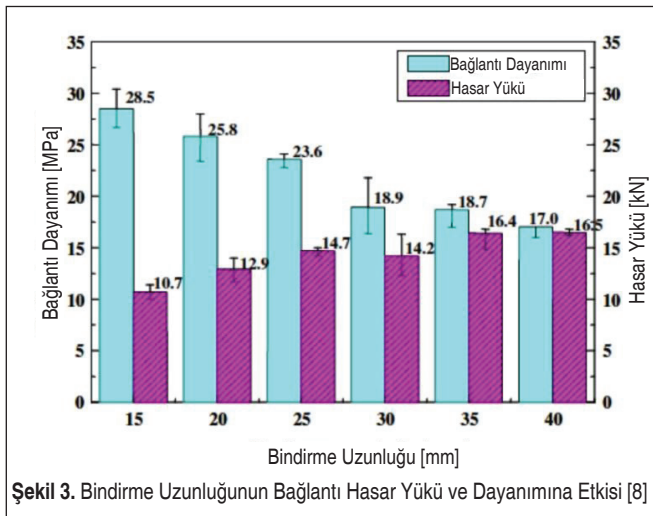
Literatürde, bağlantı dayanımı ve hasar yükünün artırılması amacıyla önerilen çeşitli yöntemler mevcuttur. En çok kullanılan yöntemler aşağıda kısaca özetlenecektir.



Şekil 1. Bindirme Bağlantı Çeşitleri



Şekil 2. Basit Bindirmeli Bağlantıda Dönme Etkisi ve Kayma Gerilmesi Dağılımı



Şekil 3. Bindirme Uzunluğunun Bağlantı Hasar Yükü ve Dayanımına Etkisi [8]

2.1 Yapıştırma Uzunluğunun Arttırılması

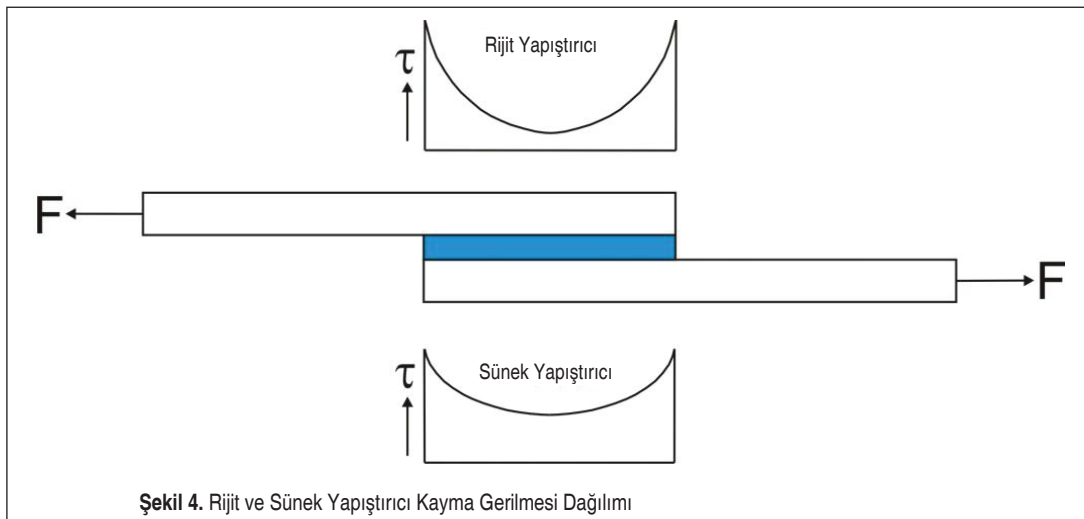
Bağlantı kayma dayanımı, bindirme alanına gelen maksimum gerilme olarak tanımlanabilir. Yapıştırma uzunluğunun artması ile bağlantı hasar yükü ve dolayısıyla yük taşıma kapasitesi artarken, bağlantı dayanımında azalma görülebilir (Şekil 3). Bağlantı dayanımında azalma, taşınan yükün bindirme uzunluğunun artmasıyla orantılı olarak artmadığı şeklinde açıklanabilir. Hasar yükü ve bindirme alanına bağlı olarak, kayma

bağlantı dayanımı Denklem (1) kullanılarak belirlenebilir [7]. Bağlantı dayanımındaki azalmaya sebep olarak, kayma gecikmesi etkisine (shear lag effect) bağlı olarak, yapıştırma çizgisi boyunca, yük taşımaya katkısı az olan orta kısımlarda, daha küçük gerilmeli bölgelerin bulunması gösterilebilir. Bağlantı dayanımında düşüşe rağmen, hasar yükünde meydana gelen değişim, belirli bir bindirme uzunluğu sınır değerinden sonra ihmal edilebilir seviyelere gelmekte ve maksimum değerine ulaşmaktadır [8].

$$\text{Bağlantı dayanımı} = \frac{\text{Maksimum yük}}{\text{Bindirme alanı}} \quad (1)$$

2.2 Yapıştırıcı Özelliklerinin Değiştirilmesi

Bağlantı dayanımının artırılması için, kullanılan yapıştırıcıların özellikleri ve yük altında gösterdikleri davranışın bilinmesi gerekmektedir. Bağlantı dayanımı ile yapıştırıcı dayanımı arasında önemli farklılıklar vardır. Özellikle, kayma ve soyulma gerilmelerinin beraber meydana geldiği basit bindirmeli bağlantılarda, kullanılan yapıştırıcının yüksek dayanıma sahip olması, bağlantı dayanımının da artacağı anlamına gelmemektedir. Bağlantı dayanımını belirleyen en önemli etken, yapıştırıcının yük altında gösterdiği gerilme dağılımı davranı-



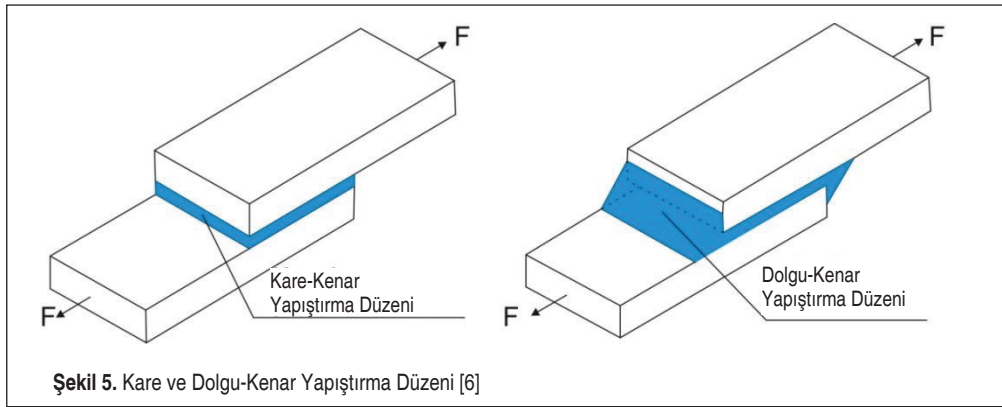
Şekil 4. Rijit ve Sünek Yapıştırıcı Kayma Gerilmesi Dağılımı

şidir. Yüksek dayanımlı rijit yapıştırıcı ile ilgili gerilme dağılımında, bindirme uzunluğu ortalarında yapıştırıcının yük taşımaya olan katkısı düşüktür ve buna bağlı olarak, kenarlarda yüksek gerilme yığılmaları meydana gelmektedir. Yüksek gerilme yığılması, ani hasar oluşumuna neden olan ve bağlantı dayanımını önemli oranda düşüren, istenmeyen bir durumdur. Bu durumda, yapıştırıcının dayanımı yüksek dahi olsa, tam kayma dayanımı kapasitesine (full shear strength capacity) ulaşmadan hasar meydana gelmektedir. Bağlantıda, rijit yapıştırıcıya göre daha düşük dayanıma sahip, sünek veya tok yapıştırıcıların kullanılması durumunda, yüksek dayanımlı rijit yapıştırıcı ile kıyaslandığında, bindirme uzunluğu boyunca daha uniform gerilme dağılımı elde edilmektedir (Şekil 4). Uniform gerilme dağılımının sağlanması ile birlikte, bindirme uzunluğunun orta kısımlarının da yük taşımaya olan katkısı önemli oranda artmaktadır. Böylece, yapıştırıcı kenarlarında oluşan pik gerilme değerleri düşerek yapıştırıcı tam kayma dayanımı kapasitesine yaklaşmakta ve bağlantı dayanımında artış sağlanabilmektedir.

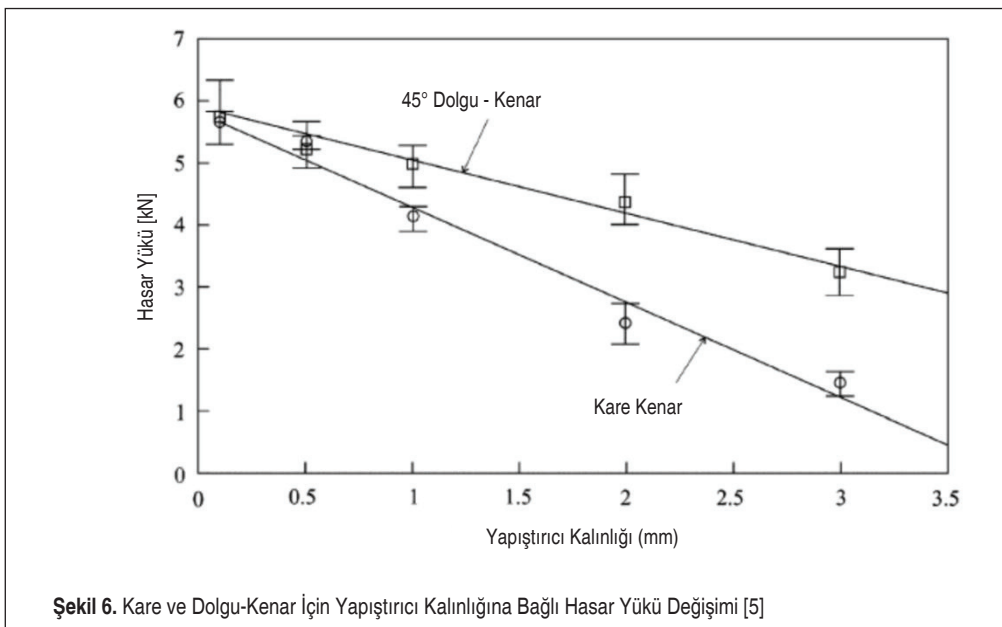
2.3 Yapıştırıcı Kalınlığının Değiştirilmesi

Yapıştırıcı kalınlığının değiştirmenin basit bindirmeli bağlantıların dayanımına etkisi, literatürde en fazla çalışma yapılan konular arasındadır. Yapılan çalışmaların büyük kısmında, yapıştırıcı kalınlığını artırmanın bağlantı dayanımını düşürdüğü belirtilmektedir [9-12]. Bununla birlikte, yapıştırıcı kalınlığını değiştirmenin, rijit ve sünek yapıştırıcı bağlantıların dayanımlarına etkisi farklılıklar gösterebilmektedir. Bağlantıda, rijit yapıştırıcı kullanılması durumunda, kalınlık artışının dayanımı düşürme yönündeki etkisi, bağlantıda sünek yapıştırıcı kullanılması durumuna göre oldukça fazladır. Kalınlık artışının bağlantı dayanımına etkisinin fazla olduğu rijit yapıştırıcılarda, ideal yapıştırma kalınlığının uygun olarak belirlenmemesi, bağlantı dayanımında %50'den daha fazla azalmaya neden olabilmektedir [13].

Yapıştırıcı kalınlığındaki artışın bağlantı dayanımını azaltması, aşağıda belirtilen farklı yaklaşımlar kullanılarak açıklanmaktadır:



Şekil 5. Kare ve Dolgu-Kenar Yapıştırma Düzeni [6]



Şekil 6. Kare ve Dolgu-Kenar İçin Yapıştırıcı Kalınlığına Bağlı Hasar Yüğü Değişimi [5]

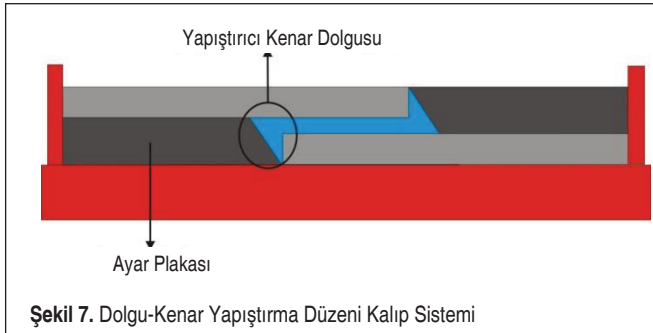
- Yapıştırıcı içerisinde boşlukların artması ve mikro-çatlakların sayısal olarak fazlaşması [14].
- Eğilme momentine bağlı meydana gelen gerilmelerin artması [5].

2.4 Dolgu-Kenar Yapıştırma Düzeninin Kullanılması

Bindirme uzunluğu kenarlarında oluşan gerilme yığılması, kenar yapıştırma düzeni değiştirilerek düşürülebilir ve bağlantı hasar yükü arttırılabilir (Şekil 5).

Basit bindirmeli bağlantı kayma dayanımı, kare-kenar yapıştırma düzeni yerine dolgu-kenar yapıştırma düzeni kullanılması durumunda, yapıştırıcı kalınlığındaki düşüş ile beraber, önemli oranda arttırılabilir (Şekil 6) [5].

Ancak, bağlantıda dolgu-kenar düzeninin oluşturulması zor ve karmaşıktır. Kenar düzenin değiştirilmesi ve istenen özelliklerde dolgu-kenar yapısının elde edilmesi amacıyla, özel kalıp sistemlerinin kullanılması zorunludur (Şekil 7). Ayrıca, yüksek viskozite değerine sahip yapıştırıcıların akma özelliği düşük olduğundan, küreleşme süresince her zaman dolgu-kenar yapısının elde edilmesi mümkün olmayabilir [15].



Şekil 7. Dolgu-Kenar Yapıştırma Düzeni Kalıp Sistemi

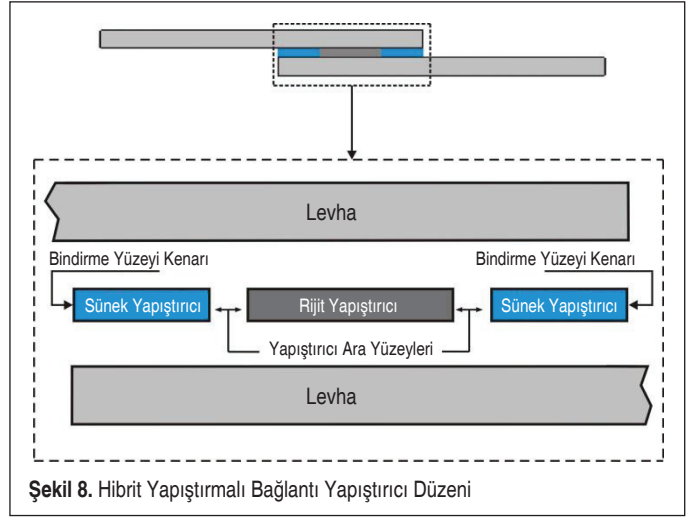
2.5 Yapıştırılan Malzeme (Levha) Özelliklerinin ve Kalınlığının Değiştirilmesi

Levha malzemenin kalınlığı ve mekanik özellikleri, bağlantı dayanımı açısından önemlidir. Düşük dayanımlı malzemelerde kalınlık artışı, uygulanan yüke karşı direnci arttırarak plastik şekil değiştirme miktarını düşürmektedir. Ancak, yüksek dayanımlı levha kalınlığının arttırılması ise eğilme momenti etkisinin artmasına neden olarak bağlantı dayanımını düşürücü yönde etki yapmaktadır [10].

3. DERECELENDİRİLMİŞ YAPIŞTIRMA ÇİZGİSİNE SAHİP BAĞLANTILAR

3.1 Hibrit Yapıştırırmalı Bağlantılar

Basit bindirmeli bağlantılarda bağlantı dayanımı, kullanılan yapıştırıcının özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermek-

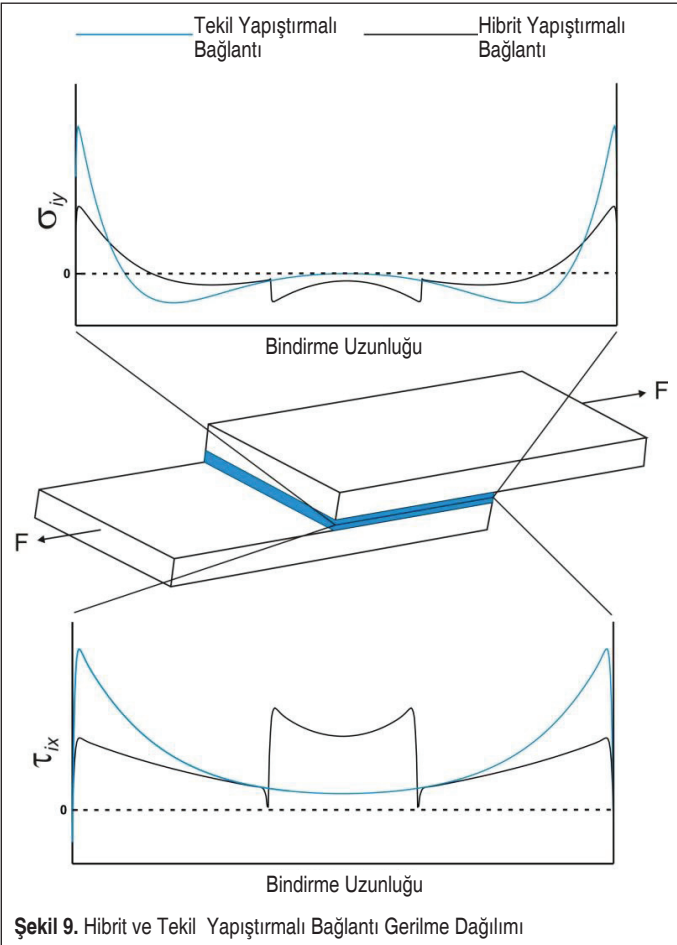


Şekil 8. Hibrit Yapıştırırmalı Bağlantı Yapıştırıcı Düzeni

tedir. Özellikle, yüksek elastisite modülüne (Young Modülü) sahip rijit yapıştırıcıların tekil kullanıldığı bindirme bağlantılarında, dönme etkisi büyüklüğüne bağlı olarak, bindirme kenarlarında yüksek yoğunluklu gerilme bölgelerinin oluşması nedeniyle, bağlantı dayanımı azalmaktadır. Rijit yapıştırıcı, sahip olduğu yüksek kayma dayanımı kapasitesine ulaşmadan, bağlantıda ani hasar oluşmaktadır. Bu durum, rijit yapıştırıcıların şekil değiştirme kabiliyetinin düşük olması ve içerisinde mevcut yapısal hatalara (boşluk, çatlak vb.) duyarlı olması ile açıklanabilir. Bağlantıda rijit yapıştırıcı kullanımına bağlı oluşan bu olumsuzluğu azaltmak ve bağlantı dayanımını arttırmak amacıyla, bindirme ortasında rijit yapıştırıcı, bindirme kenarlarında ise yüksek şekil değiştirme kapasitesine sahip, yapısal hatalara karşı duyarlılığı düşük olan tok veya sünek yapıştırıcılar kullanılarak hibrit (üç-bölgeli) yapıştırma düzeni oluşturulabilir.

Hibrit yapıştırırmalı bağlantıda, yapıştırma çizgisinin derecelendirilmesi amacıyla, bindirme bölgesinde en az iki farklı yapıştırıcı bir arada kullanılır (Şekil 8). Tekil yapıştırıcı durumunda, bindirme uzunluğu boyunca sadece rijit veya sünek yapıştırıcı kullanılmaktadır. Genel uygulama, bindirme bölgesinin ortasında rijit yapıştırıcı, kenarlarda ise sünek veya tok yapıştırıcının kullanılması şeklindedir. Bindirme bölgesinin ortasında kullanılan rijit yapıştırıcının elastisite modülü, sünek yapıştırıcıya göre yüksek, ancak şekil değiştirme kabiliyeti düşüktür. Bindirme uzunluğu boyunca yapıştırıcı özelliklerinin değiştiği (derecelendiği) hibrit yapıştırırmalı bağlantı yaklaşımı, ilk olarak Raphael [16] tarafından ortaya atılmıştır. Çalışmasında, önerdiği bu yöntem ile basit bindirmeli bağlantı mukavemetinin arttırılabileceğini öngörmüştür.

Şekil 9, hibrit ve tekil yapıştırırmalı bağlantılarda, yapıştırma çizgisi boyunca, karakteristik soyulma ve kayma gerilmesi dağılımlarını göstermektedir. Soyulma gerilmesi, kenarlarda yüksek çekme gerilmesi ve yapıştırıcı ara yüzeylerinde düşük



Şekil 9. Hibrit ve Tekil Yapıştırıcı Bağlantı Gerilme Dağılımı

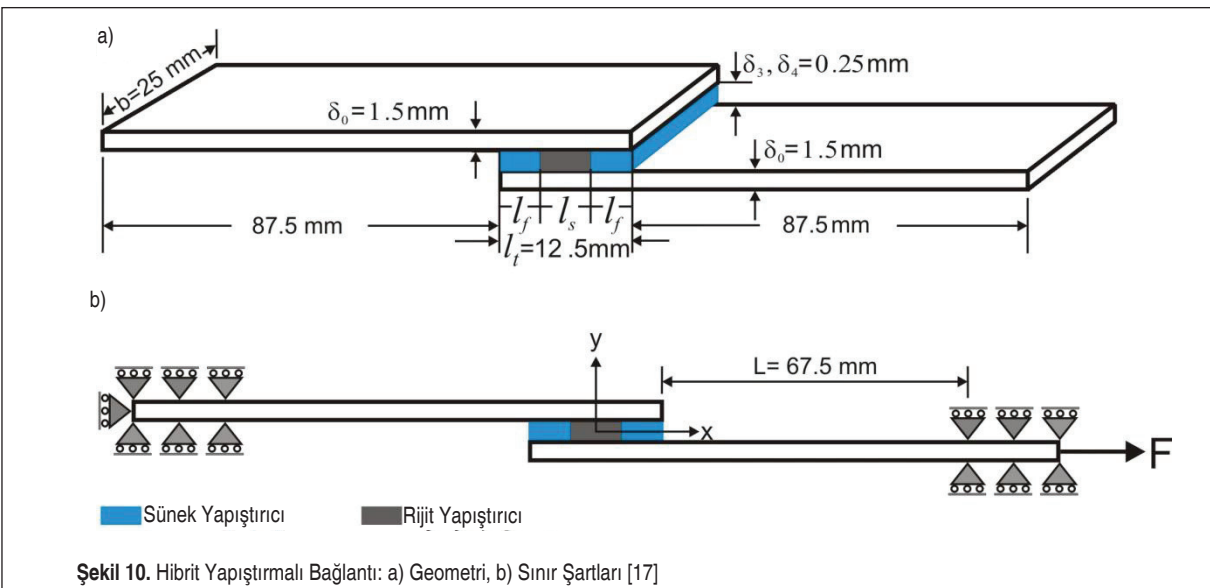
basma gerilmeleri oluşacak şekilde, bindirme uzunluğu boyunca değişmektedir. Bununla birlikte, kayma gerilmesi ise maksimum değerine yapıştırıcı ara yüzeylerinde ulaşmakta ve kenarlarda kayma gerilmesi değerleri düşmektedir.

Tekil yapıştırıcı bağlantı dayanımının artırılması için kullanılan ve yukarıda özetlenen metotlar, hibrit yapıştırma bağlantısı için de kullanılabilir. Hibrit yapıştırıcı bağlantı, özellikle rijit yapıştırıcının tekil olarak kullanıldığı yapıştırıcı bağlantıya göre daha yüksek dayanıma sahiptir. Tekil yapıştırıcı bağlantılarda gerilme yoğunluklu bölgeler kenarlarda oluşurken, hibrit yapıştırıcı bağlantı gerilme dağılımı tekil yapıştırıcı bağlantı gerilme dağılımına göre daha homojen davranış göstermektedir. Hibrit yapıştırma düzeni kullanılarak, bindirme yüzeylerinin orta kısımlarının yük taşımaya olan katkısının artırılması, yüksek elastisite modüllü rijit yapıştırıcının tam kayma dayanımı kapasitesine yaklaşmasını sağlar.

3.2 Yapıştırıcı-Uzunluk Oranlarının Hibrit Yapıştırıcı Bağlantı Gerilme Dağılımlarına Etkisi

Hibrit yapıştırıcı bağlantı yapıştırıcı-uzunluk oranlarının (ξ) gerilme dağılımlarına olan etkisinin gösterilmesi amacıyla, Şekil 10'da verilen basit bindirmeli bağlantı geometrisi kullanılmıştır. Bindirme uzunluğu ortasında rijit yapıştırıcı, kenarlarda ise sünek yapıştırıcı kullanılmıştır. Bağlantıda sünek yapıştırıcı uzunluğu l_f , rijit yapıştırıcı uzunluğu l_s ile belirtilmiştir. Yapıştırıcı-uzunluk oranları l_f/l_s şeklinde tanımlanmıştır. Yapıştırılan ve yapıştırıcıların kalınlıkları sırasıyla, 1.5 mm ve 0.25 mm olarak seçilmiştir. Bağlantının toplam bindirme uzunluğu ($2l_f + l_s$) 12.5 mm'dir. Bağlantının tekil yapıştırıcı bağlantı olması durumunda, bindirme uzunluğu boyunca sünek veya rijit yapıştırıcı tekil olarak kullanılmıştır.

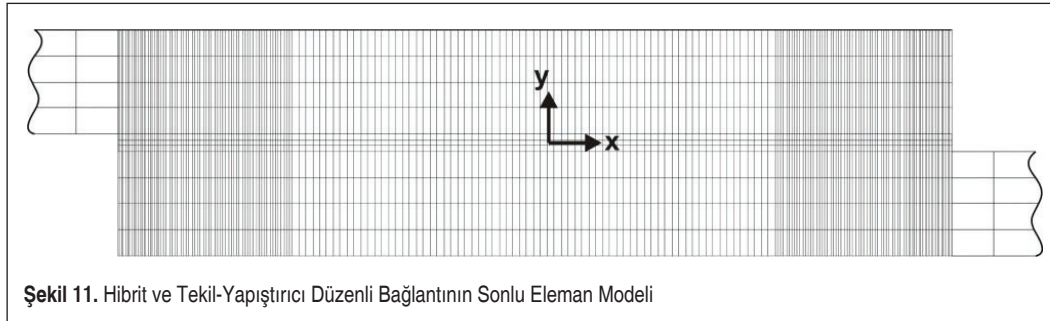
Yapıştırılan malzeme olarak 7075 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Hibrit ve tekil yapıştırıcı bağlantılarda, Henkel firması tarafından üretilen Hysol EA 9313 ve Terokal 5045 epoksi yapıştırıcılar kullanılmıştır. Çalışmada, Hysol EA



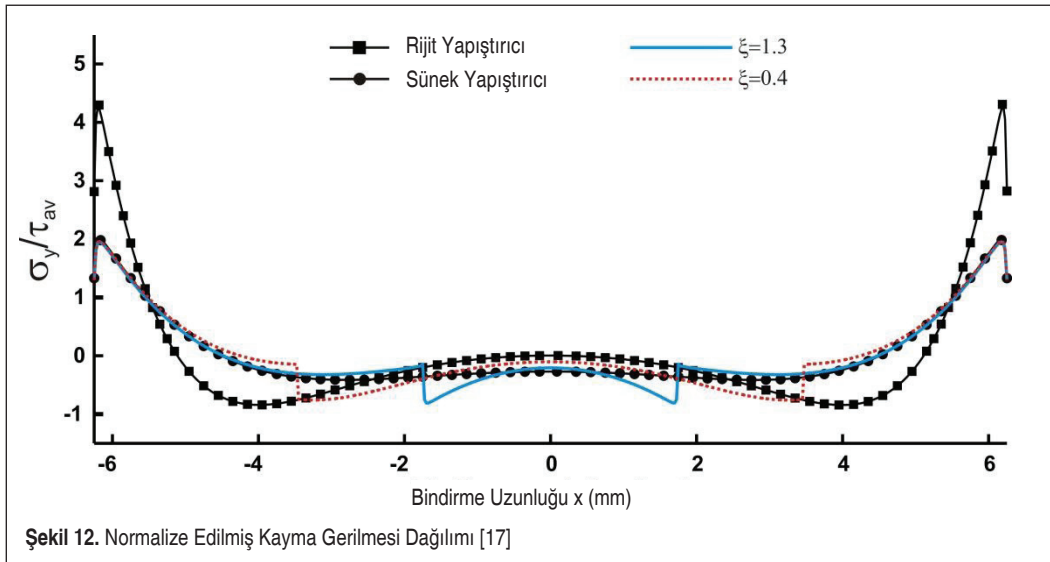
Şekil 10. Hibrit Yapıştırıcı Bağlantı: a) Geometri, b) Sınır Şartları [17]

Tablo 1. Levha ve Yapıştırıcıların Malzeme Özellikleri [17, 18]

	Levha (7075 Alüminyum Alaşımı)	Sünek Yapıştırıcı (Terokal 5045)	Rijit Yapıştırıcı (Hysol EA 9313)
Elastisite Modülü (GPa)	71.700	0.437	2.274
Kayma Modülü (GPa)	26.955	0.158	0.836
Poisson's Oranı	0.33	0.38	0.36
Kayma Dayanımı (MPa)	152	20	27.6
Kopma Uzaması (%)	10	11.3	8



Şekil 11. Hibrit ve Tekil-Yapıştırıcı Düzenli Bağlantının Sonlu Eleman Modeli



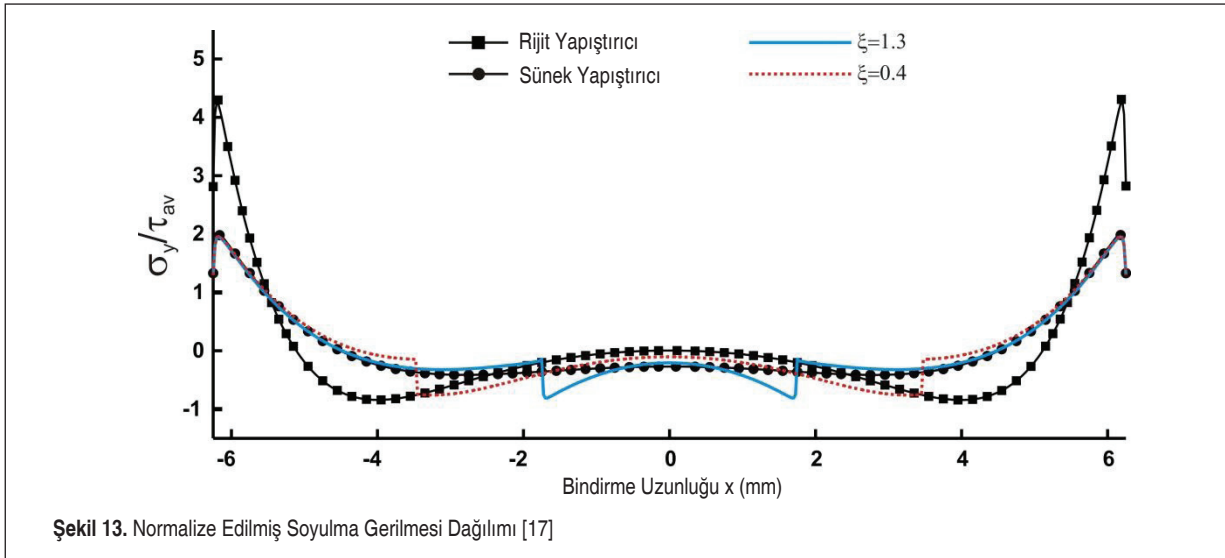
Şekil 12. Normalize Edilmiş Kayma Gerilmesi Dağılımı [17]

9313 ve Terokal 5045 sırasıyla, rijit ve sünek yapıştırıcı olarak tanımlanmıştır. Levha ve yapıştırıcıların malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Hibrit yapıştırırmalı bağlantı için iki farklı yapıştırıcı-uzunluk oranı ($\xi = l_f + l_s = 0.4, 1.3$) incelenmiştir. Alt limit olarak belirlenen 0.4 yapıştırıcı-uzunluk oranı daha fazla azaltıldığında, ikincil pik soyulma gerilmeleri oluşmakta ve bu gerilmeler bağlantının ayrılmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, yapıştırıcı-uzunluk oranının 0.4 değerine göre daha fazla artırılması ise uygulamada fiziki zorluklara neden olmakta ve pik gerilme değerlerinde de önemli bir farklılık oluşturmamaktadır [17]. Bağlantıda, alt levhanın sağ ucuna 3.6 kN statik yük uygulan-

mıştır. Şekil 11'de, bağlantının 2 boyutlu sonlu eleman modeli gösterilmektedir.

Şekil 12'de, tekil ve hibrit yapıştırırmalı bağlantıların kayma gerilmesi dağılımları görülmektedir. Şekil 12 incelendiğinde, tekil yapıştırıcı kullanılan bindirme bölgesinde, kayma gerilmesi dağılımının uniform olmadığı görülmektedir. Bu duruma sebep olarak, yük etkisi altında oluşan eğilme momentinin, özellikle bindirme kenarlarında, soyulma gerilmelerine neden olarak, gerilme yoğunluklu bölgeler meydana getirmesi gösterilebilir. Tekil-rijit yapıştırıcı kullanılması durumunda, soyulma gerilmelerinin gerilme yoğunluklu bölgeler üzerine etkisi tekil-sünek yapıştırıcı kullanılması durumuna göre



Şekil 13. Normalize Edilmiş Soyulma Gerilmesi Dağılımı [17]

daha fazladır. Tekil-sünek yapıştırıcı kullanılması durumunda gerilme dağılımı, bağlantıda rijit yapıştırıcı kullanılması durumuna göre daha uniform davranış göstermektedir ve kenarlarda oluşan gerilme yığılması önemli oranda düşmektedir.

Şekil 12 incelendiğinde, hibrit yapıştırıcı bağlantılarda, bindirme yüzeyi boyunca maksimum kayma gerilmesi değeri yapıştırıcı ara yüzeylerinde, minimum kayma gerilmesi değerlerinin kenarlarda olduğu görülmektedir. Yapıştırıcı-uzunluk oranının artması ile beraber, bindirme kenarlarında kayma gerilmesi artmasına rağmen, yapıştırıcı ara yüzeylerinde kayma gerilmesi azalmaktadır.

Şekil 13, tekil ve hibrit yapıştırıcı bağlantılar için soyulma gerilmesi dağılımlarını göstermektedir. Şekil 13 incelendiğinde, yapıştırıcı-uzunluk oranının, sünek yapıştırıcının tekil olarak kullanıldığı durum ile karşılaştırıldığında, bindirme uçlarında oluşan pik soyulma gerilmesine önemli bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Ancak, hibrit yapıştırıcı bağlantı kullanılması durumunda, kenarlarda oluşan pik soyulma gerilmesi değerleri, tekil-rijit yapıştırıcı bağlantı kullanımına göre önemli oranda düşmektedir.

Bu çalışmada, iki farklı yapıştırıcı-uzunluk oranı için elde edilen soyulma ve kayma gerilmesi dağılımları, literatürde, farklı yapıştırıcılar kullanılarak oluşturulan hibrit yapıştırıcı bağlantılardan elde edilen gerilme dağılımları ile benzer davranışa sahiptir [19]. Tekil-rijit yapıştırıcı bağlantı kullanımına göre, hibrit yapıştırma düzeninde elde edilen pik gerilme değerlerindeki azalma, bu çalışmada seçilen iki farklı yapıştırıcının ve yapıştırıcı-uzunluk oranlarının, bağlantı dayanımını artırıcı yönde etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

3.3 Hibrit Yapıştırıcı Bağlantıların Hazırlanması

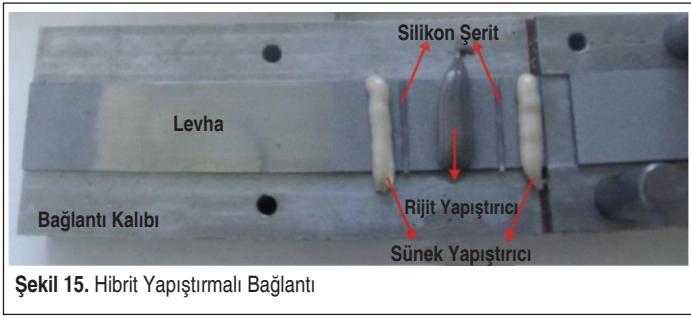
Hibrit yapıştırıcı bağlantı, dayanım açısından önemli avan-



Şekil 14. Tekil ve Hibrit Yapıştırıcı Bağlantı Hasar Yüzeyleri [19]

taj sağlamasına rağmen, tekil yapıştırıcı bağlantıya göre hazırlık aşaması daha karmaşıktır. Hibrit yapıştırıcı bağlantıların hazırlanmasındaki en önemli sorun, hibrit yapıştırma düzeninde kullanılan yapıştırıcıların, uygulanan basınç altında birbirine karışma ihtimalinin olmasıdır. Pires vd. [19] çalışmalarında, bindirme bölgesinde yapıştırıcıların birbirine karışmasını engelleyecek şekilde herhangi bir yöntem kullanılmamışlardır. Bağlantının hazırlanmasında, öncelikle rijit yapıştırıcı orta kısma uygulanmış, sonrasında, bindirme kenarları sünek yapıştırıcı ile doldurulmuştur. Hazırlanan hibrit yapıştırıcı bağlantı hasar yüzeyleri incelendiğinde, yapıştırıcıların birbirine karıştığı belirtilmiştir (Şekil 14).

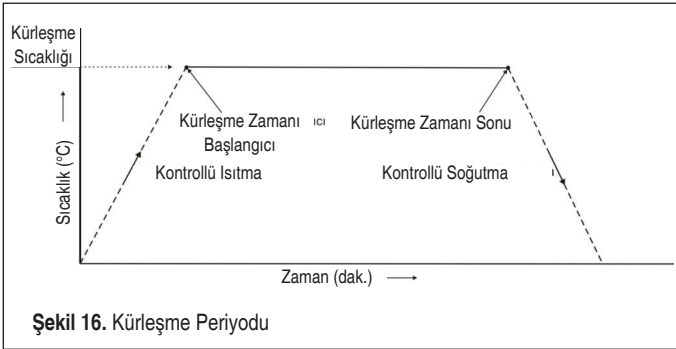
Yapıştırıcıların birbirine karışmasını engellemek amacıyla, sünek ve rijit yapıştırıcılar arasına, yapıştırma kalınlığında, yüksek kürleşme sıcaklıklarına dayanıklı silikon şerit kullanılması basit ve etkili bir yöntemdir (Şekil 15). Silikon şeritler



Şekil 15. Hibrit Yapıştırırmalı Bağlantı

Tablo 2. Tekil ve Hibrit Yapıştırırmalı Bağlantılar için Kürleşme Sıcaklıkları ve Süreleri [20]

	Yapıştırıcı	Sıcaklık (°C)	Süre (dak.)
Tekil	AV138	80	15
	2015	60	60
Hibrit	AV138+2015	60	60



Şekil 16. Kürleşme Periyodu

bindirme yüzeyinde yapışmayan bölgeler oluşturacağından kullanılan silikon şerit genişliğinin fazla olmamasına dikkat edilmelidir. Ayrıca, bağlantının hazırlık aşamasında, silikon şeritler levha yüzeylerine siyonakrilat yapıştırıcılar yardımıyla sabitlenerek yer değiştirmeleri engellenmelidir.

Hibrit yapıştırırmalı bağlantılarda iki farklı yapıştırıcı kullanılması, kürleşme sıcaklığı ve süresinin seçiminde dikkat edilmesini gerektirir. Seçilen kürleşme sıcaklığı ve süresi her iki yapıştırıcıda bozulmalara sebep olmayacak ve dayanım de-



Şekil 17. Bindirmeli Bağlantı

ğerlerini düşürücü yönde etki yapmayacak şekilde belirlenmelidir. Tablo 2'de, iki farklı epoksi yapıştırıcı için tekil ve hibrit yapıştırırmalı bağlantıda kullanılmalarına göre seçilen kürleşme sıcaklıkları verilmektedir.

Şekil 16, hazırlanan bağlantılar için kürleşme periyodunu göstermektedir. Fırın içerisinde yapılacak kürleşme süresince, sıcaklık değişimi ve kürleşme süresi, yapıştırma bölgesine yerleştirilen termokupl yardımıyla ölçüldü. Kürleşme süresi, yapıştırıcı, kürleşme sıcaklığına ulaştığı anda başlatılır ve belirlenen kürleşme süreleri sonunda bağlantılar fırın içerisinde çıkarılarak oda sıcaklığında soğumaya bırakılır.

Oda sıcaklığındaki numuneler kalıp içerisinden çıkartılarak bindirme uzunluğu kenarlarındaki fazla yapıştırıcılar jilet yardımıyla temizlenir. Şekil 17'de, çekme testi öncesi hazırlanan bindirmeli bağlantılar gösterilmektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, basit bindirmeli bağlantıların dayanımını arttırmak amacıyla kullanılan yaygın yöntemler açıklanmış ve en az iki farklı yapıştırıcının beraber kullanıldığı hibrit yapıştırma bağlantısı detaylı olarak incelenmiştir.

Bağlantı dayanımlarını, levha geometrisini değiştirerek arttırmayı amaçlayan yaygın olarak kullanılan yöntemler maliyet açısından değerlendirildiğinde, geometride yapılacak değişikliklerin fazladan imalat işlem basamağı oluşturması maliyet artışına sebep olacaktır. Yapıştırıcı geometrisinin değiştirilmesi ve dolgu kenar düzeninin kullanılması ise yüksek viskozite değerine sahip yapıştırıcıların akma özelliğinin düşük olmasından dolayı uygulamada sınırlama getirmektedir.

Yaygın olarak kullanılan yöntemlerden farklı olarak, yapıştırıcı ve levha özelliklerini değiştirmeden, hibrit yapıştırma düzenini kullanarak bağlantı dayanımının önemli oranda artırılacağı sonucuna varılmıştır.

Rijit yapıştırıcının ortada, sünek yapıştırıcının kenarlarda kullanıldığı hibrit yapıştırma bağlantısında, özellikle rijit yapıştırıcının tekil olarak kullanıldığı duruma göre, kenarlarda soyulma ve kayma gerilmesi değerlerinin önemli ölçüde düştüğü görülmüştür.

Hibrit yapıştırırmalı bağlantının gerilme dağılımları incelendiğinde, yapıştırıcı-uzunluk oranının, sünek yapıştırıcının tekil olarak kullanıldığı durum ile karşılaştırıldığında, yapıştırıcı kenarlarındaki pik soyulma gerilmesi değerleri üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte, hibrit yapıştırırmalı bağlantı kullanılması durumunda, kenarlarda oluşan pik soyulma gerilmesi değerleri, tekil-rijit yapıştırıcı bağlantı kullanımına göre önemli oranda düşmüştür. Tekil yapıştırma durumunda, maksimum kayma gerilmesi kenarlarda oluşurken, hibrit yapıştırırmalı bağlantılarda yapıştırıcı ara

yüzeylerinde kayma gerilmeleri maksimum değere ulaşmaktadır. Kenar pik kayma gerilmesi değerleri, yapıştırıcı-uzunluk oranı artıkça artmaktadır. Yapıştırıcı ara yüzeylerinde, kenarlarda meydana gelen artışa paralel olarak pik kayma gerilmesi değerlerinde düşüş görülmüştür. Pik gerilme değerlerindeki azalma ile beraber, bağlantı dayanımındaki artış, çalışmada kullanılan yapıştırıcı-uzunluk oranları ve yapıştırıcıların uygun seçildiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, uygun yapıştırıcılar ve yapıştırıcı-uzunluk oranları ile hazırlanan derecelendirilmiş yapıştırma çizgisinin bindirmeli bağlantılarda kullanımı ile kenarlardaki pik gerilme değerlerine bağlı oluşabilecek ani hasar oluşumları engellenerek, levhalar arasında yükün daha güvenli iletimi sağlanabilir ve dayanım arttırılabilir. Ancak, yöntemin yaygınlaşması ve otomasyon sistemlerinde kullanılabilirliği, yöntemin uygulama prosedürlerinde yapılacak iyileştirmelere bağlıdır.

SEMBOLLER

- l_f Sünek yapıştırıcı uzunluğu
 l_s Rijit yapıştırıcı uzunluğu
 δ_0 Levha kalınlığı
 δ_3 Sünek yapıştırıcı kalınlığı
 δ_4 Rijit yapıştırıcı kalınlığı
 ξ Yapıştırıcı-uzunluk oranı

KAYNAKÇA

1. **Bavi, O., Bavi, N., Shishesaz, M.** 2013. "Geometrical Optimization of the Overlap in Mixed Adhesive Lap Joints," *The Journal of Adhesion*, vol. 89, p. 948–972.
2. **Katnam, K. B., Crocombe, A. D., Khoramishad, H., Ashcroft, I. A.** 2010. "Load Ratio Effect on the Fatigue Behaviour of Adhesively Bonded Joints: An Enhanced Damage Model," *The Journal of Adhesion*, vol. 86, p. 257–272.
3. **Fessel, G., Broughton, J. G., Fellows, N. A., Durodola, J. F., Hutchinson, A. R.** 2007. "Evaluation of Different Lap-Shear Joint Geometries for Automotive Applications," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 27, p. 574–583.
4. **Campilho, R. D. S. G., De Moura, M. F. S. F., Domingues, J. J. M. S.** 2009. "Numerical Prediction on the Tensile Residual Strength of Repaired CFRP under Different Geometric Changes," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 29, p. 195–205.
5. **Grant, L. D. R., Adams, R. D., Da Silva, L. F. M.** 2009. "Experimental and Numerical Analysis of Single-Lap Joints for the Automotive Industry," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 29, p. 405–413.
6. **Van Ingen, J. W., Vlot, A.** 1993. *Stress Analysis of Adhesively Bonded Single Lap Joints*, Report, Report LR-740, Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering.
7. **Song, M. G., Kweon, J. H., Choi, J. H., Byun, J. H., Song, M. H., Shin, S. J., Lee, T. J.** 2010. "Effect of Manufacturing Methods on the Shear Strength of Composite Single-Lap Bonded Joints," *Composite Structures*, vol. 92, p. 2194–2202.
8. **Seong, M. S., Kim, T. H., Nguyen, K. H., Kweon, J. H., Choi, J. H.** 2008. "A Parametric Study on the Failure of Bonded Single-Lap Joints of Carbon Composite and Aluminum," *Composite Structures*, p. 135–145.
9. **Kahraman, R., Sunar, M., Yilbas, B.** 2008. "Influence of Adhesive Thickness and Filler Content on the Mechanical Performance of Aluminum Single-Lap Joints Bonded with Aluminum Powder Filled Epoxy Adhesive," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 205, p. 183–189.
10. **Da Silva, L. F. M., Critchlow, G. W., Figueiredo, M. A. V.** 2008. "Parametric Study of Adhesively Bonded Single Lap Joints by the Taguchi Method," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 22, p. 1477–1494.
11. **Da Silva, L. F. M., Rodrigues, T. N. S. S., Figueiredo, M. A. V., De Moura, M. F. S. F., Chousal, J. A. G.** 2006. "Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength," *The Journal of Adhesion*, vol. 82, p. 1091–1115.
12. **Xu, W., Wei, Y.** 2013. "Influence of Adhesive Thickness on Local Interface Fracture and Overall Strength of Metallic Adhesive Bonding Structures," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 40, p. 158–167.
13. **Cognard, P.** 2006. *Adhesives and Sealants: General Knowledge, Application Techniques, New Curing Techniques*, Elsevier, Amsterdam.
14. **Adams, R. D., Peppiatt, N. A.** 1974. "Stress Analysis of Adhesive-Bonded Lap Joints," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 9, no. 3, p. 185–196.
15. **Broughton, B., Gower, M.** 2001. *Preparation and Testing of Adhesive Joints*, Technical Report, no. 47, NPL Materials Centre, National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex.
16. **Raphael, C.** 1966. "Variable-Adhesive Bonded Joints," *Applied Polymer Symposia*, vol. 3, p. 99–108.
17. **Özer, H., Öz, Ö.** 2014. "A Comparative Evaluation of Numerical and Analytical Solutions to the Bi-Adhesive Single-Lap Joint," *Math. Probl. Eng.*, Article ID 852872, p. 1–16.
18. **Özer, H., Öz, Ö.** 2012. "Three Dimensional Finite Element Analysis of Bi-Adhesively Bonded Double Lap Joint," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 37, p. 50–55.
19. **Pires, I., Quintino, L., Durodola, J. F., Beevers, A.** 2003. "Performance of Bi-Adhesive Bonded Aluminium Lap Joints," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 25, p. 215–223.
20. **Öz, Ö.** 2015. "Hibrit Yapıştırma Bağlantı Hasarının Numerik ve Deneysel Olarak İncelenmesi," *Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.*