

Yapıştırma bağlantılı kompozitlerde yapıştırma geometrisininin gerilme dağılımına etkisi

The effects of adhesive geometry on the stress distribution in bonded joints

Levent KIRKAYAK^{1*} 

¹Makina Mühendisliği Bölümü, Makina Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
leventkirkayak@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 31.12.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 21.05.2018

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.54289

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Yapıştırma bağlantılı kompozit yapılar, bağlantı bölgelerinde oluşan soyulma ve kayma gerilmelerinin azaltılması ve gerilme yığılmasının önlenmesi, tasarımın toplam mukavemeti açısından önemlidir. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmada, tek tesirli bindirme bağlantılarında, farklı geometrik desenlerde ve iki farklı rijitliğe sahip yapıştırıcıların hibrit olarak bir arada kullanılmasının gerilme dağılımına etkisi, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Sonuç olarak, iki farklı yapıştırıcının bir arada kullanıldığı ve farklı yapıştırma geometrilerine sahip hibrit modellerde, tek tip ve sürekli yapıştırıcının kullanıldığı modele göre, soyulma ve kayma gerilmeleri açısından önemli azalma olduğu, ayrıca yapıştırma geometrisininin gerilme dağılımı etkilediği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yapıştırma bağlantılı kompozitler, Hibrit yapıştırma bağlantısı, Soyulma ve kayma gerilmeleri, Sonlu elemanlar analizi (SEA)

Abstract

Reducing shear and peel stress and stress concentrations is important in terms of increasing the total strength of adhesively bonded composite joints. In this regard, two types of adhesives with different rigidity and geometric pattern are used together by employing the hybrid bonding method and the effects of the geometric shape and rigidity on the stress distribution of the single lap joints are examined via the finite element method. As a result, the peel and shear stresses are reduced significantly by using hybrid models in which two different adhesives with different adhesive pattern are used when compared to single adhesive bonding joints.

Keywords: Composite bonded joints, Hybrid adhesive joint, Peel and shear stresses, Finite element analysis (FEA)

1 Giriş

Günümüzde yüksek mukavemetin yanında, hafifliğin de ön plana çıktığı yapılara yönelim hızla artmaktadır. Yapıştırma bağlantılı kompozit (YBK) yapılar kolay üretilebilirlik, hafif montaj ağırlığı, gerilim yığılmasının düşüklüğü, yük transferinin düzgünlüğü, yüksek yorulma ve hasar performansları sebebi ile endüstriyel uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. Ancak, bağlantı bölgeleri yapı için her zaman süreksizlik oluşturduğundan, yüklemeye altında potansiyel hasar bölgesidir. Genel olarak YBK yapılar için 4 temel hasar tipi mevcuttur; Yapıştırılan kompozit tabakada oluşan hasar, yapıştırıcıda meydana gelen hasar, yapıştırılan kompozit tabaka ile yapıştırıcı arasındaki bağın kopması ve yapıştırılan tabakanın akma sınırını geçmesi ile oluşan hasar. Bu hasar türlerinden yapıştırıcıda hasarın meydana gelmesi en yaygın görülen hasar türüdür [1]. Bu bağlantıların hasar süreçleri oldukça karmaşık olduğundan, endüstriyel uygulamalar için hasar mekanizmalarının iyi anlaşılması, bu tür bağlantıların kullanıldığı yapının servis ömrüne doğrudan etkilemektedir. Hasar oluşumu, genel olarak birkaç farklı parametrenin birleşmesi ile meydana gelebilmektedir. Bundan dolayı literatürde kompozit plakaların ve yapıştırıcının birlikte mekanik davranışının ve hasar oluşumunu belirlemeye yönelik birçok analitik, sayısal ve deneysel çalışma bulunmaktadır [1],[3]. Bu konudaki ilk çalışmalara örnek olarak, Erdoğan ve Ratwani'nin plaka ve tüplerdeki yapıştırma bağlantılarındaki gerilmeleri hesaplamak adına bir matematiksel model geliştirmesi verilebilir [4]. Ayrıca bu bağlantıların gerek statik, gerekse de dinamik davranışlarının analitik olarak modellenmesi konusunda çalışmalar devam etmekte olup en

son güncel analitik çalışmalardan biri, Chalita'nın eksenel harmonik yüklemeye altındaki boşluklu yapıştırıcı bağlantıların, dinamik davranışının analitik olarak incelemesidir [5].

Adams ve Peppiatt ise sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, düzlemsel gerilme yaklaşımı ile iki boyutlu olarak yapıştırılmalı bağlantıların mekanik davranışlarını incelemiştir [6]. Benzer şekilde Zhao ve diğ. sonlu elemanlar yöntemi ile tek bindirmeli bağlantılar için iki boyutlu malzeme modelleri geliştirmeye çalışmıştır [7].

Tek bindirmeli bağlantılar, YBK bağlantıların ise en genel türü olduğundan en çok araştırmanın da yapıldığı bağlantı tipidir. Bu bağlantı tipinde tasarım açısından kritik olan çekme gerilmesi dayanımı, soyulma ve kayma gerilmeleri dayanımı olarak ortaya çıkar. Kalınlıklara bağlı eksen farklılıklarından dolayı oluşan döndürme momenti, özellikle yapıştırıcının kenar bölgelerinde yüksek gerilme yığılmasına yol açmakta ve hasara neden olmaktadır. Bu bağlamda Kadıoğlu ve Es-Souni, tek bindirmeli yapıştırma bağlantısının çekme yüklerine ve eğilme momentine karşı mukavemetlerini, deneysel ve sayısal metodlar ile ele almışlar ve yapıştırılan parçaların elastikiyetinin, plastik şekil değişimine dolayısı ile bağlantının hasar mekanizmasında önemli bir etkisi olduğunu belirtmiş ve yapıştırıcının yük taşıma kapasitesinin, bağlantının mukavemeti için oldukça etkili bir parametre olduğunu ortaya koymuşlardır [8].

Hasar oluşumuna neden olan kritik gerilme bileşenlerinin azaltılması ve bağlantı bölgesindeki konsantrasyonun daha homojen olarak dağıtılması amacıyla çok çeşitli çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden biri yapıştırma geometrisininin değiştirilmesidir [9]-[10]. Buna örnek olarak

yapıştırma bölgesinde bindirme uzunlukları ile yapıştırılan parçaların genişliğinin ve kalınlığının değiştirilmesi [11],[12], ya da düzensel olmayan zigzag [13] ve sinüsoidal [14] konfigürasyonların kullanılması verilebilir. Böylelikle bindirme bölgesinin yapıştırıcı temas yüzeyinde ve dolayısı ile de tüm bağlantının yük taşıma kapasitesinde artış sağlanmaktadır.

Yapıştırılan parçaların rijitlikleri, bağlantının dayanımında oldukça önemli etken olup, buradaki artış bağın toplam yük taşıma kapasitesini arttırabilmekte ve yapıştırıcıda daha üniform bir gerilme dağılımı meydana gelmesine neden olmaktadır [15]. Yapıştırılan parçaların birbiri ile benzer ya da farklı özellikler taşıması, bağlantı bölgesinin gerilme dağılımını etkileyen diğer bir faktördür. Burada benzer özellikte parça kullanımı bağlantılarda tercih edilmesi gereken bir faktördür. Aldaş ve Şen yaptığı çalışmalarda, farklı metal plakaların yapışkanlı bağlantılarını incelemiş ve aynı malzemeden yapılan plakalardan oluşturulan karma bağlantıların daha düşük gerilmelere neden olduğunu göstermiştir [16],[17]. Bu konuda yapılan bir diğer çalışmada ise Hazimeh, farklı lif açlarına sahip kompozit yapıların yapıştırıcı bağlantılarında meydana gelen gerilme dağılımını darbe yükü altında incelemiş, ortaya çıkan hem kayma hem de soyulma gerilmelerinin lif aç değişiminden dolayı ile farklı aksel rijitliklerden etkilendiğini ortaya koymuştur [18]. Aynı şekilde Özel ve diğ. tek bindirmeli bağlantıların, çekme gerilmesi altındaki davranışlarını farklı malzeme ve geometrik konfigürasyon modelleri oluşturularak hem sayısal hem de deneysel yöntemlerle incelemiştir [19].

Bağlantı dayanımını etkileyen önemli bir parametre de yapıştırıcıya ait özelliklerdir. Yapıştırıcının tipi, rijitliği, kalınlığı, gevrek ya da sünek yapıda olması, bağlantıların mekanik davranışı doğrudan etkilemektedir [20],[21]. Kadioğlu gerçekleştirdiği çalışmada, sünek yapıştırıcıların şekil değişimine izin vermesinden dolayı, daha düşük gerilme konsantrasyonlarına neden olduğunu bağlantı dayanımını arttırdığını belirtmiştir [22].

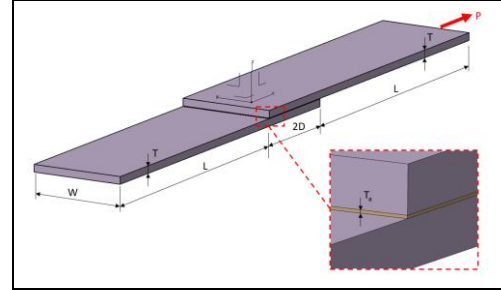
YBK bağlantılarında diğer bir etken ise ısı, nem, UV ışığı gibi çevresel etkenlerdir. Sıcaklık artışına bağlı olarak gerilme ve şekil değiştirmeler önemli oranda artmaktadır [23],[24]. Bundan dolayı yapıştırıcı olarak tek tip yapıştırıcı kullanmak yerine, farklı tipte sıcaklık dayanımı olan yapıştırıcıları bir arada kullanarak oluşturulan hibrit bağlantıların sıcaklık dayanımı arttırılabilmektedir [25]. Farklı türde yapıştırıcının bir arada hibrit şekilde kullanılarak bağlantı mukavemetinin artırılmasına yönelik ilk çalışma, 1966'da Raphael tarafından yapılmıştır [26]. 2007'de da Silva ve Adams bu yaklaşımı kullanarak, bağlantıların mekanik davranışlarını büyük sıcaklık değişimi altında incelemiştir [27]. Öz ve Özer ise bu hibrit yöntemin bağlantı mukavemeti üzerine etkilerini incelemiş ve gerilme değerlerinde iyileşme olduğunu belirtmiştir [28].

Bu çalışmanın amacı ise tek tesirli bindirme bağlantılarında farklı geometrideki yapıştırma desenlerine ve yapıştırıcının rijitliğine göre, yapıştırıcı üzerindeki gerilme dağılımını (soyulma ve kayma gerilmeleri) sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemesidir. Bunun için yukarıda belirtilen hibrit yaklaşım çerçevesinde iki farklı yapıştırıcının bir arada kullanıldığı, dört farklı tek bindirmeli bağlantı konfigürasyonu oluşturulmuş ve çekme yükü altındaki davranışları karşılaştırılmıştır.

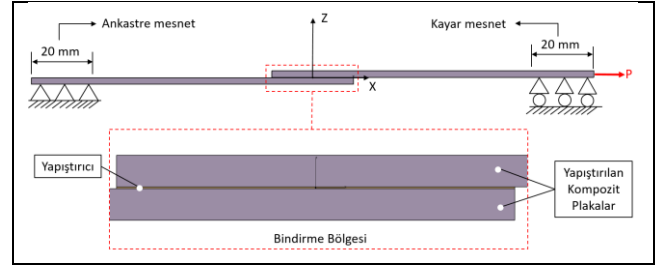
2 Metot

Çalışmada kullanılan geometrik boyutlar, Zhao ve diğ.'nin çalışması referans alınarak oluşturulmuştur [7]. Oluşturulan

modele ait sınır şartları Şekil 1'de verilmiştir. Üstteki yapıştırılan parçanın sağ ucuna, x eksenine doğrultusunda olacak şekilde üniform $P=4448$ N'luk yük uygulanmıştır. Altta yapıştırılan parçanın sol ucu 20 mm'lik uzunluk boyunca ankastre mesnetlenmiş, üst yapıştırılan parçanın sağ ucu ise 20 mm'lik uzunluk boyunca kesme (y eksenine) ve normal (z eksenine) yönlerinde tutulmuştur.



(a): Katı model geometrik ölçüleri.



(b): Sınır şartları.

Şekil 1: Tek bindirmeli yapıştırıcı bağlantının üç boyutlu katı modeli ve sınır şartları.

Tablo 1'de tek bindirmeli yapıştırıcı bağlantının genel ölçüleri verilmiştir. Yapıştırılan parçalar için tek yönlü grafit epoksi (XAS/914C) kompozit malzemesi ele alınmış ve fiber dizilimi $[0/45/45/0]_s$ sekiz tabakalı olacak şekilde seçilmiştir. Bağlantı konfigürasyonlarını oluşturmak adına üç farklı yapıştırıcı kullanılmıştır. Endüstriyel uygulamalarda da sıkça kullanılan bu yapıştırıcılar sırasıyla Hysol EA 9361, Hysol EA 9321 ve AV138/HV998'dir. Yapıştırıcılara ait mekanik özellikler Tablo 2'de, yapıştırılan kompozit tabakaların malzeme özellikleri de Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 1: Bağlantı ölçüleri.

L (mm)	2D (mm)	W (mm)	T (mm)	Ta (mm)
101.6	25.4	25.4	2	0.13

Tablo 2: Yapıştırıcıların malzeme özellikleri [32].

Özellikler	Hysol EA 9361	Hysol EA 9321	AV138/HV 998
Elastiklik Modülü E (GPa)	0.67	3.87	4.59
Poisson oranı ν	0.4	0.36	0.35
Akma Dayanımı σ_y (MPa)	4.23	21.99	36.49
Çekme Dayanımı σ_t (MPa)	7.99	45.97	41.01
Kırılma uzaması ϵ_f (%)	44.0	3.8	1.3
Tokluk U_T (MPa)	2.69	1.16	0.34

Tablo 3: Kompozit plakanın malzeme özellikleri.

Özellikler	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12} (GPa)
Yapıştırılan Kompozit Plaka	101.6	25.4	25.4	2

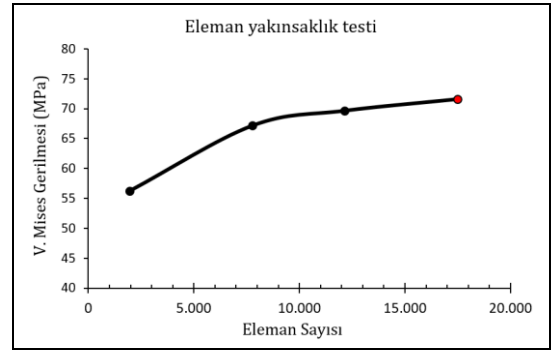
Yapıştırma bağlantılı kompozit yapıların sonlu elemanlar analizinde, yapıştırıcının iki boyutlu düzlem elemanlar ve izotropik malzeme tanımlaması ile modellenmesi oldukça kolaydır. Ancak yapıştırılan kompozit malzemelerin özellikle de birden fazla tabakaya sahip yapıların, sonlu elemanlar analizlerinde gerekli malzeme parametrelerinin, lif doğrultuları ve açılarını dikkate alarak modellenmesi oldukça karmaşıklık ve zorluk içermektedir. Bu zorluğun üstünden gelebilmek adına literatürde önerilen birçok farklı model bulunmaktadır [29],[30]. Bu modellerde, tüm tabakayı temsil edecek efektif elemanlar kullanılmakta ve bunların özellikleri klasik tabaka teorisi kullanılarak hesaplanmaktadır. Buna rağmen kompozit tabakanın doğasından kaynaklı bazı sıkıntılar hala bulunmaktadır. Bunlar; tabakaların ortotropik cisim olarak dikkate alındığından dolayı, tabaka gerilmeleri ve tabakalar arasındaki gerilmelerin doğruluğunun sorgulanmasıdır. Bu karşılaşılan problemlerin çözülmesi amacıyla Zhao ve diğ. ortotropik elastik mekanik teorisi dikkate alınarak yeni bir malzeme modeli sunmuştur. Literatürde karşılaştırılan referans çalışmalarla [31] iyi bir uyum sağlayan, modelleme kolaylığı ve hesaplama süresi avantajı sunan bu malzeme modeli, yapılan bu çalışmada tercih edilmiştir. Bu malzeme modeline göre yapıştırılan tek yönlü kompozit tabakalar, enine izotropik olarak, $E_2=E_3$, $\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}$, ve $G_{12}=G_{13}=G_{23}$ olacak şekilde modellenmiştir [7].

Yapıştırma geometrisinin ve rijitliklerinin, bağlantının mekanik davranışına etkisini incelemek adına, kompozit plakalar, iki boyutlu S4R kabuk eleman tipi kullanılırken, yapıştırıcı ise kalınlık boyunca 6 kat ağ örgülü üç boyutlu C3D8R lineer altıyüzlü eleman tipi kullanılarak modellenmiştir. İki boyutlu kompozit plakaların, malzeme ve kesit özellikleri ile beraber, ilgili katmanlardaki fiber yönleri, belirtilen açılar dikkate alınmıştır. Modelde, gerilim ve deplasmanları daha doğru elde edebilmek adına kritik bölgeler için daha sık ağ örgüsü kullanılmıştır. Kritik eleman boyu, 4 farklı eleman boyu ile gerçekleştirilen yakınsama testi sonucuna göre 0.3528 mm olarak belirlenmiştir. Bu teste ait sonuçlar Tablo 4'te ve Şekil 2'de verilmiştir.

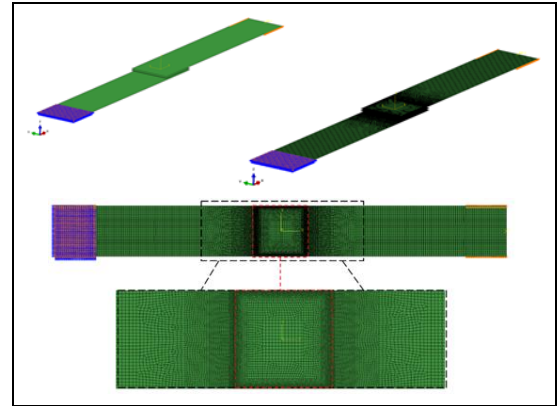
Referans alınan ve oluşturulan 4 adet hibrit modelin gerilme değerlerinin karşılaştırılacağı sonlu elemanlar modeli [7], tek bindirmeli ve tek bir yapıştırıcının sürekli olarak kullanıldığı modeldir. Kısaca (TYSM) diye adlandırılmış olan "Tek Yapıştırıcılı Sürekli Model", 165.363 düğüm ve 47.728 elemandan oluşmakta ve detayları Şekil 1 ve Şekil 3'te sırasıyla verilmektedir. Bu modele ilave olarak, aynı geometrik ölçülere fakat farklı elastik modüllerine sahip, iki farklı yapıştırıcının hibrit olarak bir arada kullanıldığı, süreksiz yapıştırma desenli dört farklı hibrit model oluşturulmuştur. Kısaca (HM_D) olarak adlandırılacak olan bu modeller desen tipi numaralarına göre sırasıyla HM_D1, HM_D2, HM_D3, ve HM_D4'tür ve Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu dört farklı hibrit modele ait analiz sonuçları, temel alınan tüm yüzeyde sürekli yapıştırıcının olduğu model (TYSM) sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 4: Yakınsama testinde kullanılan eleman boyutları.

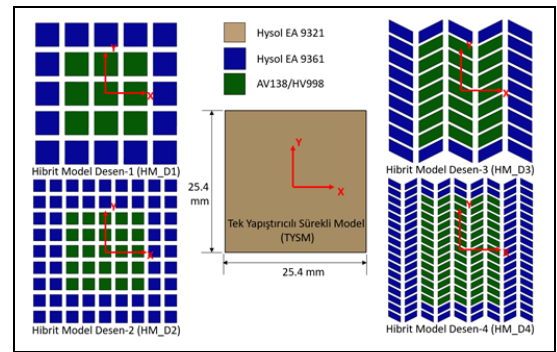
No	Eleman boyutu (mm)	Toplam eleman sayısı (yapıştırıcı)	V. Mises Gerilmesi (MPa)
1	1.0583	1944	56.19
2	0.5292	7776	67.16
3	0.4233	12150	69.65
4	0.3528	17496	71.59



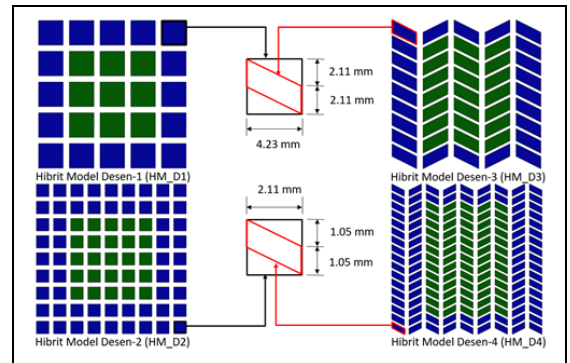
Şekil 2: Yapıştırıcı modellemesi için kullanılan kritik eleman boyunun yakınsaklık testi ile belirlenmesi.



Şekil 3: Tek bindirmeli yapıştırırmalı bağlantının sonlu elemanlar modeli, sınır şartları, gerilme karşılaştırma bölgesi ve ağ örgüsü yoğunluk değişimi.



(a): Dört hibrit modelin ayrı ayrı temel alınan sürekli yapıştırıcılı (TYSM) ile beraber gösterimi.

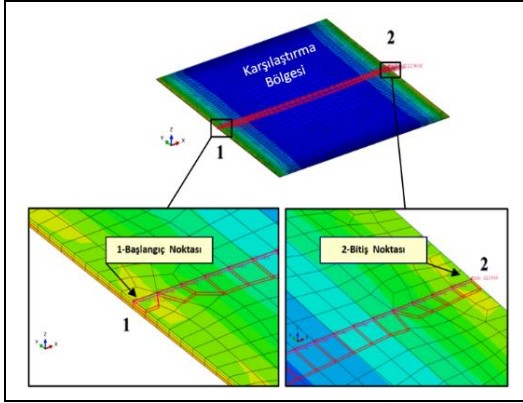


(b): Yapıştırma desenlerinin ölçüleri.

Şekil 4: Modellerin yapıştırma konfigürasyonları.

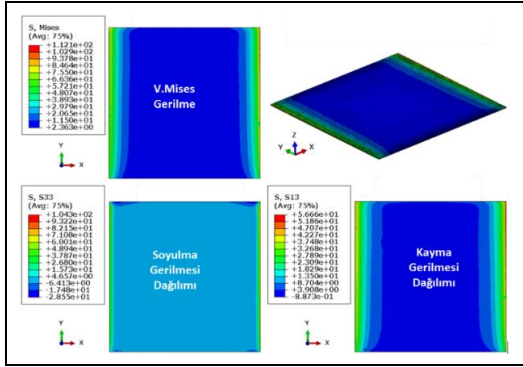
3 Bulgular

Tek bindirmeli yapıdırma bağlantılarının, iki boyutlu kompozit plakalar arasında, üç boyutlu olarak modellenen konfigürasyonların analizleri, ABAQUS-v6.14 sonlu elemanlar programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bağlantının yapıdırıcısında hasar oluşmasına sebep olan gerilmeler, soyulma ve kayma gerilmeleri olduğundan analiz sonuçları bu gerilmeleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Tüm modeller için, karşılaştırma bölgesindeki 6 katmanlı ağ örgüsüne sahip olan yapıdırıcının, orta katmanında x-ekseni boyunca oluşturulan yol üzerinde (Şekil 5), gerilme değerleri ele alınmış ve karşılaştırılmıştır.



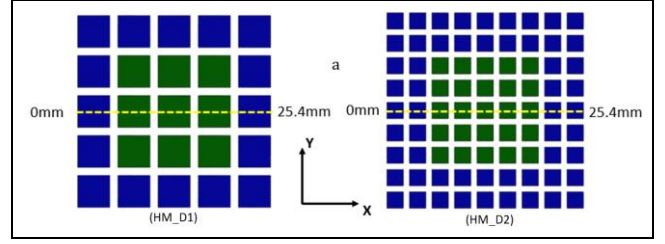
Şekil 5: Karşılaştırma bölgesinde oluşturulan gerilmelerin okunduğu orta katmandaki yol (eksen).

Sürekli yapıdırma halinin olduğu ve yapıdırma deseni kullanılmayan referans modelde (TYSM) ortaya çıkan en büyük gerilme (V.Mises) 112 MPa olurken, kayma ve soyulma gerilmeleri sırasıyla 104 MPa ve 57 MPa olarak ortaya çıkmaktadır (Şekil 6).

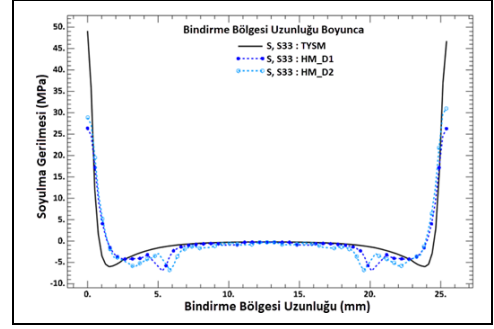


Şekil 6: Sürekli yapıdırımalı desensiz modelde(TYSM) ortaya çıkan gerilme dağılımları.

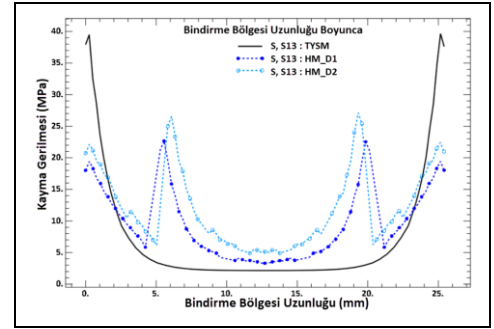
Sürekli kare şeklinde yapıdırma desenlerinin kullanıldığı hibrit HYM_D1 ve HYM_D2 modellerinde soyulma gerilmesi için, bindirme bölgesinin iki uç tarafındaki gerilme değerleri yaklaşık olarak 2.6 kat azalmakta ve 39MPa civarına inmektedir. Kayma gerilmesi için ise, bindirme bölgesinin iki uç tarafındaki gerilmeler, soyulma gerilmesinde olduğu gibi yaklaşık olarak 1.5 kat azalmakta ve 37 MPa olmaktadır. Bununla birlikte, yapıdırıcının orta bölgesinde bulunan, daha rijit olan yapıdırma kısmında, kayma gerilmesi değerlerinin yükseldiği gözlemlenmektedir. Ancak bu bölgedeki gerilmeler, uçtaki gerilme değerlerine yakın olmakla beraber, bindirme bölgesinde daha üniform bir gerilme dağılımının oluşmasını sağlamaktadır (Şekil 7).



(a): Bindirme bölgesi boyunca gerilim değerlerinin alındığı yol.



(b): HYM_D1, HYM_D2 ve TYSM konfigürasyonlarının soyulma gerilmeleri.



(c): HYM_D1, HYM_D2 ve TYSM konfigürasyonlarının kayma gerilmeleri.

Şekil 7: HYM_D1 ve HYM_D2 için soyulma ve kayma gerilmelerinin TYSM ile birlikte verilmesi.

Şekil 7'de yapıdırıcının orta düzleminden x eksenini boyunca alınan gerilmelere göre yapıdırıcının kare deseniyle ilgili değişimleri ve farklı elastik modülüne sahip yapıdırıcıların hibrit olarak bir arada kullanılması ile gerilme yığılmasının olduğu bölgelerde, hem soyulma gerilmesi, hem de kayma gerilmesi değerlerinde her iki model içinde ciddi bir düşüş gözlemlenmektedir. Bu düşüş, HYDM_1 ve HYDM_2 için sırasıyla soyulma gerilmesi için %63 ve % 62, kayma gerilmesi için ise %35 ve %30 oranlarındadır (Tablo 5).

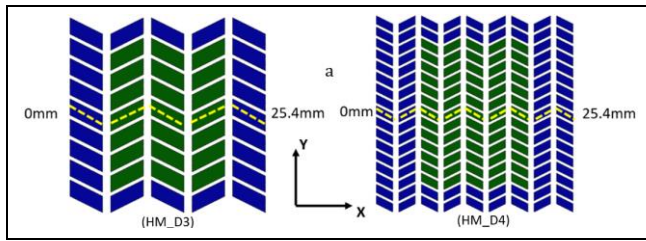
Tablo 5: Tüm modellerde ortaya çıkan maksimum gerilmeler ve TYSM'e göre yüzdelik azalma oranları

Modeller	V. Mises (MPa)	% fark	SG (MPa)	% fark	KG (MPa)	% fark
TYSM (referans)	112		104		57	
HYM_D1	66	41	39	63	37	35
HYM_D2	72	36	39.5	62	40	30
HYM_D3	63	44	40	62	36	37
HYM_D4	82	27	42	60	46	19

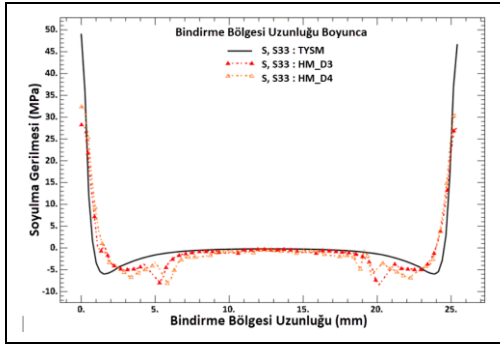
SG: Soyulma gerilmesi, KG: Kayma gerilmesi.

Sürekli paralel kenar desenlerinin kullanıldığı HYM_D3 ve HYM_D4 modellerinde de gerilme dağılımı açısından HYM_D1 ve HYM_D2 'ye benzer sonuçlar elde edilmiş ve maksimum V.Mises gerilmeleri HYM_D3 için 63MPa'a ve HYM_D4 için 82 MPa'a düşmüştür. HYM_D3 ve HYM_D4 için ortaya çıkan soyulma gerilmeleri sırasıyla 40MPa ve 42MPa, kayma gerilmeleri ise 36MPa ve 46MPa olarak elde edilmiştir (Tablo 5).

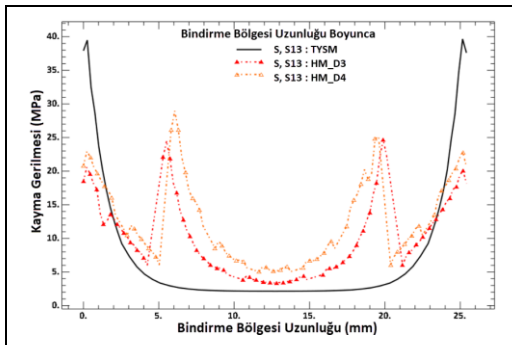
Şekil 8'de yapıştırıcının orta düzleminden X eksenin boyunca alınan gerilmelere göre, yapıştırıcının paralel kenar desenli ve farklı elastik modülüne sahip yapıştırıcıların hibrit olarak bir arada kullanılması ile gerilme yığılmasının olduğu bölgelerde, hem soyulma gerilmesi hem de kayma gerilmesi değerlerinde diğer modellerde olduğu gibi ciddi bir düşüş görülmektedir. Bu düşüş, HYM_D3 ve HYM_D4 için sırasıyla soyulma gerilmesi için %62 ve %60, kayma gerilmesi için ise %37 ve %19 oranlarındadır (Tablo 5).



(a): Bindirme bölgesi boyunca gerilme değerlerinin alındığı yol.



(b): HYM_D3, HYM_D4 ve TYSM konfigürasyonları soyulma gerilmeleri.



(c): HYM_D3, HYM_D4 ve TYSM konfigürasyonları kayma gerilmeleri.

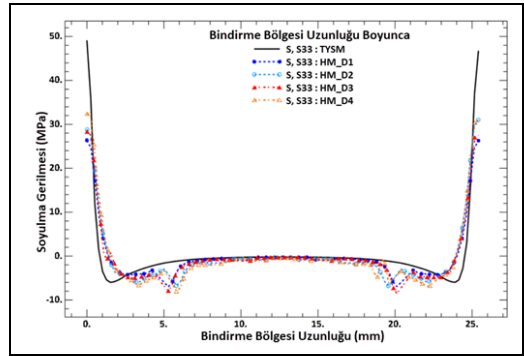
Şekil 8: HYM_D3 ve HYM_D4 için soyulma ve kayma gerilmelerinin TYSM ile birlikte verilmesi.

Hem soyulma gerilmesinde hem de kayma gerilmesinde, HYM_D1 ve HYM_D2 kendi içinde incelediğimizde, HYM_D1'in gerilme değerlerinin HYM_D2'ye göre, V.Mises ve kayma

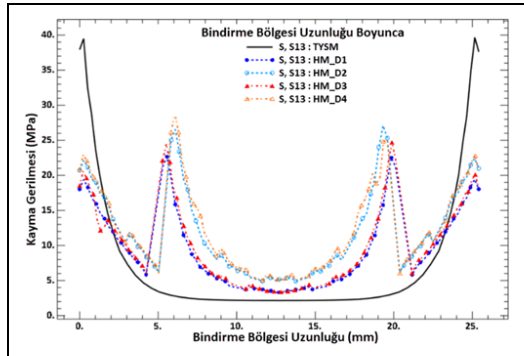
gerilmeleri açısından yaklaşık %5 oranında daha düşük olduğu görülmektedir. Aynı durum HYM_D3 ve HYM_D4'ü ele aldığımızda, HYM_D3'ün gerilme değerlerinin HYM_D4'e göre, V.Mises gerilmesinde %17, kayma gerilmesi için ise %18 daha düşük çıktığı görülmektedir. Bu sonuçlar, şekil değişiminde, desenlerin boyutlarının, gerilmeler üzerinde etkisinin olduğunu ortaya koymaktadır (Tablo 5).

Tablo 5'te tüm modellerde ortaya çıkan maksimum gerilmeler ve bu gerilme değerlerinin referans alınan TYSM de ortaya çıkan gerilme değerlerine göre ne kadar azalma gösterdiği % olarak verilmiştir. Bu analiz sonuçlarına göre HYM_D1 diğer tüm modellere göre, aynı kuvveler altında daha düşük gerilme değerleri ortaya çıkmaktadır ve referans model TYSM'e göre V.Mises gerilmesinde %41, soyulma gerilmesinde %63 ve kayma gerilmesinde %35 iyileşme sağlamaktadır.

Benzer şekilde tüm modellerin karşılaştırma bölgelerinden X eksenini boyunca elde edilen gerilmeler sırasıyla soyulma (Şekil 9) ve kayma gerilmeleri (Şekil 10) birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada referans alınan TYSM'te literatüre de paralel olarak, hem soyulma hem de kayma gerilmeleri için, bindirme bölgesinin her iki ucunda, gerilme yığılması meydana gelmektedir. Farklı elastik modüle sahip yapıştırıcıların hibrit olarak bir arada kullanılması, bu gerilme yığılmalarını azaltmakta etkili olduğu, gerçekleştirilen analizlerinin sonucunda ortaya çıkmaktadır. Farklı desenlerdeki modelleri, birbiri arasında incelediğimizde genel olarak hem soyulma hem de kayma gerilmeleri için, HYM_D1'in diğer tüm modellere oranla daha düşük gerilme seviyelerine sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. Bunun sonucu olarak, yapıştırma şeklinin ve boyutunun, gerilmeye etkisinde önemli bir faktör olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu bakımda her bir yapıştırma şekli için optimum bir boyutun olduğu söylenebilir.



Şekil 9: Tüm modeller için soyulma gerilmelerinin karşılaştırılması.



Şekil 10: Tüm modeller için kayma gerilmelerinin karşılaştırılması.

4 Tartışma

Bu çalışmada, farklı elastik modüllerine sahip olan yapıştırıcıların belli yapıştırma desenlerinde hibrit olarak bir araya getirilerek, yapıştırıcı bağlantının bindirme bölgesindeki soyulma ve kayma gerilmelerine etkileri incelenmiştir. Temel alınan yapıştırma şekli için, literatürde daha önce yapılan çalışmalarda sonuçlara paralel olarak, tek bindirmeli yapıştırıcı bağlantılarda, bindirme bölgesinin iki uç kısımlarında gerilme yığılmalarının olduğu gözlenmektedir. Bağlantının hasar mekanizmaları açısından, soyulma ve kayma gerilmeleri belirleyicidir. Yapılan analizlerden elde edilen sonuçlara göre yapıştırma bölgesinin uç kısımlarında şekil gerilme yığılmasının, bindirme bölgesinin orta bölgelerine göre, çok daha fazla olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, oluşturulan tüm modellerde bindirme bölgesinin kenar kısımlarına elastik modülü düşük olan ve şekil değişimine karşı daha düşük elastiklik modülüne sahip Hysol EA 9361 kullanılmıştır. Aynı şekilde, bindirme bölgesinin orta kısmında ise elastik modülü yüksek ve şekil değişimine daha fazla direnç gösteren AV138/HV998 kullanılmıştır. Bunun aksine, temel alınan modelde ise, bindirme bölgesinde sadece, elastik modülü ortalama bir değere sahip olan Hysol EA 9321 kullanılmıştır. Gerilme yığılmasının olduğu bindirme bölgesinin uç kısımlarında, hem soyulma hem de kayma gerilme değerlerinin, hibrit yapıştırıcı olan tüm modeller için, temel alınan ve tek yapıştırıcı kullanılan modele (TYSM) göre, yaklaşık olarak %40 seviyelerinde düştüğü gözlenmiştir. Gerilmelerin bu seviyede azalması, yapıştırıcı bağlantının ömrünü belirgin şekilde arttıracak sonucuna varılabilmektedir.

Hibrit yapıştırıcı modellerde, bindirme bölgesi uçlarındaki gerilme seviyelerinin düşmesinin yanında, yapıştırıcı üzerindeki gerilmelerin daha üniform olarak dağılması da bağlantının dayanımı açısından istenen bir durumdur. Özellikle kayma gerilmeleri için, bindirme bölgesinin orta kısımlarında, elastik modülü yüksek olan yapıştırıcıların üzerindeki kayma gerilmesi değerleri, bindirme bölgesi uçlarındaki gerilme değerleri civarında oluşmaktadır. Bu duruma göre, hibrit yapıştırıcı bağlantılarda, bindirme bölgesinin ne kadarlık bir kısmında, elastik modülü yüksek ya da düşük olan yapıştırıcının kullanılacağı, bağlantının dayanımı açısından son derece önemli olduğu ortaya çıkmaktadır.

Hibrit yapıştırıcı modeller kendi arasında incelendiğinde ise, iki temel desen, kare ve paralel kenar desenleri, bu iki desen içinde boyut farklılıklarının etkisini incelemek adına, iki farklı desen boyutuyla beraber toplamda dört adet hibrit yapıştırıcı bağlantılı model oluşturulmuştur. Bu çalışmada, desen farklılıklarından çok, desenlerin boyutlarının gerilmeler üzerinde daha etkili olduğu sonucuna varılmaktadır. Bu durumda, nasıl bindirme bölgesinde ne kadarlık bir alanın elastik modülü yüksek ya da düşük yapıştırıcı ile oluşturulacağı önemli ise, burada da bu desenlerin boyutlarının ne olacağı bağlantı dayanımı açısından etkili olduğu gösterilmiştir. Hem soyulma, hem de kayma gerilmeleri için daha büyük desen boyutuna sahip olan HYM_D1 ve HYM_D3, daha küçük desen boyutlarına sahip olan HYM_D2 ve HYM_D4'e göre biraz daha düşük seviyelerdedir.

İleriki çalışmalarda oluşturulan model sayısı artırılıp değişik yapıştırma geometrileri ve farklı elastik modüllerinde yapıştırıcılar kullanılarak kompozit yapıların yapıştırma bölgelerinde ortaya çıkan gerilme yığılmasının daha da azaltılması ve toplam mekanik mukavemetin artırılması

mümkün olabilir. Bunun için yapıştırma geometrisi optimizasyonu yapılabilir.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı elastik modüllerine sahip olan yapıştırıcıların belli yapıştırma desenlerinde hibrit olarak bir araya getirilerek oluşturulan yapıştırıcı bağlantının bindirme bölgesindeki soyulma ve kayma gerilmelerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Tüm hibrit model konsepti gerek soyulma gerekse de kayma gerilmelerinde etkilidir ve gerilme yığılmasını %40'a varan oranda azaltılabilmektedir,
- Hibrit yapıştırıcı modellerde, yapıştırıcı üzerindeki gerilmelerin daha üniform olarak ortaya çıkmaktadır. Bu ise yorulma dayanımı açısından önemlidir,
- Farklı desen konfigürasyonları ile oluşturulan hibrit modellerde, desenlerin boyutlarının bir başka ifadeyle yapıştırma geometrisinin, gerilme dağılımları üzerine etkili olduğu görülmüştür,
- Hibrit model anlayışı ile çok farklı desen konfigürasyonları ve yapıştırıcı tipi kullanılarak ortaya çıkan gerilme konsantrasyonları daha da azaltılabilir.

6 Kaynaklar

Bu çalışmaya olan katkılardan dolayı Ata Muğan ve Ferhat Demir'e teşekkür ederim.

7 Kaynaklar

- [1] Weißgraeber P, Becker W. "Finite fracture mechanics model for mixed mode fracture in adhesive joints". *International Journal of Solids and Structures*, 50(14-15), 2383-2394, 2013.
- [2] Da Silva LF, das Neves PJ, Adams RD, Spelt JK. "Analytical models of adhesively bonded joints-Part I: Literature survey". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(3), 319-330, 2009.
- [3] da Silva LF, das Neves PJ, Adams RD, Spelt JK. "Analytical models of adhesively bonded joints-Part II: Comparative study". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(3), 331-341, 2009.
- [4] Erdogan F, Ratwani M. "Stress Distribution in Bonded Joints". *Journal of Composite Materials*, 5(3), 378-393, 1971.
- [5] Challita G. "Analytical study of the dynamic behavior of a voided adhesively bonded lap joint under axial harmonic load". *International Journal of Solids and Structures*, 141, 183-194, 2018.
- [6] Adams R, Peppiatt N. "Stress analysis of adhesive bonded lap joints". *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 9(3), 185-196, 1974.
- [7] Zhao L, Wang Y, Qin T, Zhang J. "A new material model for 2D FE analysis of adhesively bonded joints". *Journal of Materials Science*, 20(4), 468-473, 2014.
- [8] Kadioğlu F, Es-Sounie M. "Use of thin adherends in adhesively bonded joints under different loading modes". *Science and Technology of Welding and Joining*, 8(6), 437-442, 2013.
- [9] Fessel G, Broughton JG, Fellows NA, Durodola JF, Hutchinson AR. "Evaluation of different lap-shear joint geometries for automotive applications". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(7), 574-583, 2007.

- [10] Campilho RD, De Moura MF, Domingues JJ. "Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 29(2), 195-205, 2009.
- [11] Gültekin K, Akpınar S, Özel A. "The effect of the adherend width on the strength of adhesively bonded single lap joint: Experimental and numerical analysis". *Composites Part B: Engineering*, 60, 736-745, 2014.
- [12] Pinto AM, Ribeiro NF, Campilho RD, Mendes IR. "Effect of Adherend Recessing on the Tensile Strength of Single Lap Joints". *The Journal of the Adhesion*, 90(8), 649-666, 2014.
- [13] Razavi SM, Esmaili E, Samari M, Razavi SM. "Stress analysis on a non-flat zigzag interface bonded joint". *The Journal of Adhesion*, 94(3), 199-217, 2018.
- [14] Ayatollahi MR, Samari M, Razavi SM, da Silva LF. "Fatigue performance of adhesively bonded single lap joints with non-flat sinusoid interfaces". *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 40(9), 1355-1363, 2017.
- [15] Reis PN, Ferreira JA, Antunes F, Antunes F. "Effect of adherend's rigidity on the shear strength of single lap adhesive joints". *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 31(4), 193-201, 2011.
- [16] Aldaş K, Şen F. "Karma bağlantı uygulanmış farklı metal plakalarda meydana gelen gerilmelerin incelenmesi". *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(2), 1-12, 2011.
- [17] Sen F, Aldaş K. "Effects of Using Different Metal Materials on Stresses in Metal-Composite Hybrid Joints". *Cankaya University Journal of Science and Engineering*, 8(1), 1-13, 2010.
- [18] Hazimeh R, Challita G, Khalil K, Othman R. "Influence of dissimilar adherends on the stress distribution in adhesively bonded composite joints subjected to impact loadings". *Mechanics of Composite Materials*, 50(6), 717-724, 2015.
- [19] Özel A, Yazıcı B, Akpınar S, Aydın M D, Temiz Ş. "A study on the strenght of adhesively bonded joints with different adherends". *Composites Part B: Engineering*, 62, 167-174, 2014
- [20] Apalak MK, Yildirim M. "Effect of adhesive thickness on transverse low-speed impact behavior of adhesively bonded similar and dissimilar clamped plates". *Journal of Adhesion Science and Technology*, 25(19), 2587-2613, 2011.
- [21] Da Silva LF, Rodrigues TN, Figueiredo MA, De Moura MF, Chousal JA. "Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength". *The Journal of Adhesion*, 82(11), 1091-1115, 2006.
- [22] Kadioğlu F, Adams R. "Non-linear analysis of a ductile adhesive in the single lap joint under tensile loading". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(23), 2831-2838, 2008.
- [23] Faruk ŞE, ALDAŞ K. "Sıcaklık değişiminin yapıştırılmalı ve pimli alüminyum plakalardaki gerilmeler üzerine etkisi". *TÜBAV Bilim Dergisi*, 3(4), 323-329, 2010.
- [24] Aldaş K, Şen F. "Karma bağlantılı kompozit plaklarda farklı sıcaklıklar etkisiyle oluşan gerilmelerin analizi". *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 3(1), 21-30, 2012.
- [25] Da Silva LF, Adams RD. "Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites". *International Journal of Adhesion & Adhesive*, 27(3), 227-235, 2007.
- [26] Raphael C. "Variable-adhesive bonded joints(Stresses in ordinary lap joint compared to variable adhesive joint)". *In Structural Adhesives Bonding Symposium*, Hoboken, New Jersey, USA, 1966.
- [27] Da Silva LF, Adams RD. "Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range". *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27(5), 362-379, 2007.
- [28] Öz, Özkan, and Halil Özer. "Hibrit Yapıştırma-Düzeninin Bindirme Bağlantı Mukavetine Etkileri". *Mühendis ve Makina*, 57(679), 63-72, 2016.
- [29] Yıldız H, Sarıkanat M. "Kalın kompozit kiriş ve levhaların sonlu elamanlar yöntemiyle analizi". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 147-153, 2000.
- [30] Feyel F. "A multilevel finite element method (FE2) to describe the response of highly non-linear structures using generalized continua". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 192(28-30), 3233-3244, 2003.
- [31] Tsai MY, Morton J. "The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in laminated composite single-lap joints". *Composite Structures*, 32(1), 123-131, 1995.
- [32] Da Silva LF, Rodrigues TN, Figueiredo MA, De Moura MF, Chousal JA. "Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength". *The Journal of Adhesion*, 82(11), 1091-1115, 2006.