

**ÇEKMEYE MARUZ ARA BOŞLUKLU ÇİFT TAKVİYELİ
YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARINDA GERİLME ANALİZİ****STRESS ANALYSIS IN DOUBLE-STRAP JOINTS WITH
INTERVAL GAP SUBJECTED TO TENSION****Şerif ÇİTİL¹, Şemsettin TEMİZ^{2*} ve Adnan ÖZEL³**¹*Kazım Karabekir Endüstri Meslek Lisesi, Palandöken, Erzurum*²*İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Böl., Malatya*³*Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Böl., Erzurum***Geliş Tarihi:** 4 Haziran 2012 **Kabul Tarihi:** 27 Eylül 2012**ÖZET**

Havacılık ve uzay sanayisinde, otomotiv sektöründe meydana gelen kazalar, özellikle uçakların kalkışı ve inişi esnasında pistte bulunan kum tanecikleri ve partiküllerin uçak gövde ve kanatlarına yüksek hızla çarpması sonucunda aşınma, yırtılma, çatlak gibi hasarlara sebebiyet vermektedir. Bu yırtılmış, çatlamış veya zayıflamış olan hasarlı bölgenin hassas bir şekilde onarılması gerekmektedir. Yırtık ve çatlak ilerlemesinin durdurulması veya zayıf olan bölgenin onarılması için hasarlı olan bölgenin kesilip çıkartılması ve kesilen bölgeye yama yapılması gerekmektedir. Hasara uğramış bölgeler genellikle küçük çaplı bölgeler olup onarılmasında komple bir parçayı yenilemek yerine hasarlı olan bölgede işlem yapmak, özellikle işçilik, maliyet ve zaman gibi kavramların çok önemli olduğu günümüz için uygun olacaktır. Hasarlı olan bölge kesilip çıkartılıp çift taraflı yama kullanıldığında yamalar arasında boşluk oluşmaktadır. Bu çalışmada aynı bindirme uzunluğunda kapaklarla farklı boylarda ara boşluklar oluşturulmuş, kapak kalınlığının, bindirme uzunluğunun, parça kalınlığının ve ara boşluk boyunun çekmeye maruz yapıştırma bağlantılarının mukavemeti üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, 4.35, 5 ve 6 mm kalınlığındaki AA 2024-T3 alüminyum levhalar, 40, 50 ve 60 mm bindirme uzunluklarında, 0.6, 0.8 ve 1 mm kalınlıklarında yüksek karbonlu çelikten imal edilmiş kapaklarla ve 10, 15 ve 20 mm ara boşluklu yapıştırılarak bağlantı numunesi elde edilmiştir. Yapıştırıcı malzemesi olarak CYTEC FM®73 yapısal film yapıştırıcı kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: yapıştırıcı, çift takviyeli bağlantılar, sonlu eleman yöntemi, gerilme analizi

* Sorumlu yazar: semsettin.temiz@inonu.edu.tr

ABSTRACT

The accidents happened in aviation, space industry, and automotive sector cause damages like abrasion, tearing and cracks as a result of sand particles in land field striking to the plane body and wings with high speed, especially at the moment of while planes are taking off and landing. Repairing of this deformed region which torn, cracked and weakened in a sensitive way is required. It is necessary to prevent crack and tear propagation or to remove deformed region by cutting and to patch the cut region for repairing weakened region. The regions deformed are generally small-diameter regions and especially in today's conditions where the issues like labor, cost and time have high significance; it is very convenient to perform operations within the deformed regions instead of replacing whole part. There occur gaps in between patches when the deformed region is cut and double sided patch is used. In this study, interval gaps of different length are formed with covers having same overlapping length; the effects of cover thickness, overlapping length and interval gap length on cementing connections subjected to mechanical properties and stress analysis were studied. For that purpose, connection samples were obtained by cementing aluminum sheets made of AA 2024-T3 with 4.35, 5, and 6 mm widths to the covers made of high carbon steel of 0.6, 0.8, and 1 mm width, with overlapping lengths of 40, 50, and 60 mm. CYTEC FM®73 structural film adhesive was used as cementing material.

Keywords: Adhesive, double-strap joint, finite element method, stress analysis

1. GİRİŞ

Havacılık ve uzay sanayisinde, otomotiv sektöründe meydana gelen kazalar, özellikle uçakların kalkışı ve iniş esnasında pistte bulunan kum tanecikleri ve partiküllerin uçak gövde ve kanatlarına yüksek hızla çarpması sonucunda aşınma, yırtılma, çatlak gibi hasarlara sebebiyet vermektedir. Bu yırtılmış, çatlamış veya zayıflamış olan hasarlı bölgenin hassas bir şekilde onarılması gerekmektedir. Yırtık ve çatlak ilerlemesinin durdurulması veya zayıf olan bölgenin onarılması için hasarlı olan bölgenin kesilip çıkartılması ve kesilen bölgeye yama yapılması gerekmektedir. Hasara uğramış bölgeler genellikle küçük çaplı bölgeler olup onarılmasında komple bir parçayı yenilemek yerine hasarlı olan bölgede işlem yapmak, özellikle işçilik, maliyet ve zaman gibi

kavramların çok önemli olduğu günümüz için uygun olacaktır. Hasarlı olan bölge kesilip çıkartılıp çift taraflı yama kullanıldığında yamalar arasında boşluk oluşmaktadır.

Endüstride işçilik, zaman ve malzeme gibi unsurlar maliyeti önemli ölçüde etkilediğinden dolayı birçok sanayi alanında hasara uğramış olan makine, araç, gereç ve avadanlığın tekrar yenilenmesi yerine tamirine gidilmektedir. Sonuç olarak yapılan bu tamiratın maliyetinin minimum olması istenmektedir. Bu amaçla günümüzde malzeme, işçilik ve zaman kaybını azaltmak için birçok çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam edilmektedir.

Uçaklarda meydana gelen hasar genellikle düşünüldüğünden daha fazla yaygındır ve çeşitli şekillerde değişik şiddetlerde meydana gelir. Hava alanında ihtiyaç olan mühimmat ve bagajları taşıyan araçlar yükleme ve indirme işlemi sırasında darbe ve basınç etkisiyle uçağın gövdesinde küçük ve saplanılamaz çöküntü yâda çatlaklara neden olabilir. Sürtünme ve darbelerle meydana gelen bu hasarların onarılması gerekir.

Uçağın uçuş boyunca kuşlarla çarpışmasıyla uçak dış parçalarında hasar meydana gelir. Kuşların ağırlığı ve çarpışma hızına bağlı olarak hasarın büyüklüğü değişebilir. Kuşların çarpışmasıyla oluşan hasarlar genellikle uçağın burun, kokpit penceresi, kanatları ve dengeleyicilerde meydana gelir. Yine yeterince büyük dolu yağdığı zaman uçağın doluyla temas ettiği bölgeleri üzerinde önemli ölçüde hasar meydana gelir. Yine yıldırım çarpması uçak gövdesinde küçük deliklerin yâda çökmenin meydana gelmesi için yeterli şiddette olabilir (Marques ve da Silva (2008)).

Tek ve çift takviyeli yapıştırma bağlantıları son zamanlarda özellikle kompozit malzemelerin yapıştırıcı ile birleştirilmelerinde yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Baker *et al.*(1999), sabit eğilme momenti altındaki CFRP (karbon fiber takviyeli plastik) levha ve alüminyumdan elde edilmiş petek özlü kompozit malzemelerin yapıştırıcıyla çift takviyeli kapaklarla tamir edilen uçak kanadı üzerinde oluşan şekil değiştirmeleri karakterize etmek için extensometre kullanmıştır. Ayrıca çekme yüküne maruz ve çift takviyeli olarak yapıştırılmış CFRP tabakalardaki gerilme davranışları Liu ve Wang (2007) tarafından çalışılmıştır.

Campilho *et al.*(2009) üç boyutlu karbon -epoksi kompozitlerin tek ve çift takviyeli yapıştırma bağlantılarının gerilme davranışlarını deneysel ve nümerik olarak çalışmışlardır. Deneysel olarak yapılan çalışmada farklı bindirme uzunlukları ve kapak kalınlıklarının hasar modu, rijitlik ve hasar yüküne etkisi araştırılmıştır. Tamir sonrası bağlantının davranışını anlamak için, rijitlik ve kapağı yüzeyden kaldıracak yükleri verecek şekilde nümerik simülasyon yapılmıştır. Sünek yapıştırıcının mekanik özelliklerinin belirlenmesinde mod I, mod II ile karışık modlu koheziv hasar modelini içeren koheziv elemanlar kullanılmıştır. Yapılan çalışmada en iyi sonuçlar 15 mm bindirme uzunluğundaki çift takviyeli kapaklar üzerinde oluşmuştur. Diğer taraftan kapak kalınlığının, dayanım üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını gözlemişlerdir.

Apalak ve Engin (1997) yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek ve çift bindirme bağlantılarının elastiklik ve plastiklik analizi ve tasarımı konusunda çalışmışlardır. Çalışmalarında düzlem şekil değiştirme kabulü altında farklı yükleme durumları için yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek ve çift bindirme bağlantılarında hasar bölgelerinin oluşumu ve gelişimini incelemişlerdir. Analizlerde geometrik bakımdan lineersizlikleri ve bağlantıyı oluşturan malzemelerden kaynaklanan lineersizlikleri dikkate almışlardır. Bu amaçla büyük yer değiştirme teorisi ve plastisite teorisini lineer olmayan sonlu eleman metodu yardımıyla probleme tatbik etmişlerdir. Çekme yüküne maruz tek bindirme bağlantısında hasar bölgelerinin sağ ve sol serbest uçlarda yapıştırıcı-plaka ara yüzeylerinde başladığını ve hasar bölgesi ucunda gerilme yığılmalarının oluştuğunu gözlemişlerdir.

Özellikle uçak ve otomotiv sektöründe gerek parçaların birleştirilmesinde gerekse hasara uğramış parçaların tamirinde kullanılan klasik çift takviyeli yapıştırma bağlantısında takviye kapakları, özellikle hava ile temasın olduğu bölgelerde parça yüzeyine yapıştırılmasından dolayı, parça yüzeyinden akan hava akışına direnç göstermektedir. Bu ve başka tür yapıştırma işlemi diğer konstrüktif ve estetik zorunluluklar nedeniyle, Çitil vd (2011) yapmış oldukları çalışmada yapıştırma işlemi klasik çift takviyeli bağlantılar yerine, takviye kapakları parça içine gömülerek

gerçekleştirilmiş ve bu durumda oluşan gerilme dağılımı ve taşınacak hasar yükü üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Temiz vd (2009) yaptıkları çalışmalarda tek tesirli yapıştırma bağlantısı diğer yapıştırma bağlantılarına göre daha çok kullanılmaktadır. Kaçık merkezli yükten ve yapıştırma bağlantısının en uç kısmında kayma gerilmelerinden ziyade soyulma gerilmeleri oluşmaktadır. Bindirme uzunluğuna boyunca oluşan soyulma (peel) gerilmeleri ve yapıştırıcıdaki kayma gerilmeleri bağlantının hasara uğramasına sebep olur. Açıkçası bu gerilmelerdeki azalmalar daha güçlü bağlantı ve daha fazla yük taşımasıyla sonuçlanmaktadır. Bu amaçla bindirme uzunluğunun uç kısımlarında belirli yay uzunluğunda eğri oluşturulabilecek elastik çelik metal parçaları kullanılmıştır. Uç kısımları belirli bir kavis verilen parçalar tek tesirli olarak basınç altında kürleştirme işlemi yapılarak birleştirilmişler. Yapıştırılmış elastik metalin eski haline dönme eğiliminden dolayı birleştirme alanındaki yapışkan tabakalarda artık gerilmeler oluşmasına sebebiyet vermiştir. Yapılan bu deneysel ve nümerik çalışma sonunda oluşan bu artık gerilmelerin yükleme kapasitesini oldukça arttırdığını saptamışlardır.

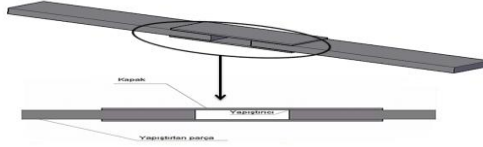
Bu çalışmada, özellikle uçak ve otomotiv sektöründe meydana gelen kazalar sonucunda uçakların gövde ve kanatlarında, otomobillerin kaporta gibi bölgelerinde meydana gelen aşınma, yırtılma ve çatlak gibi hasarların tamiri araştırılmıştır. Bu amaçla aynı bindirme uzunluğundaki kapaklarla farklı boylarda ara boşluklar oluşturulmuş çift takviyeli yapıştırma bağlantılarında, kapak kalınlığının, bindirme uzunluğunun, parça kalınlığının ve ara boşluk uzunluğunun mukavemet üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2. MATERYAL ve YÖNTEM

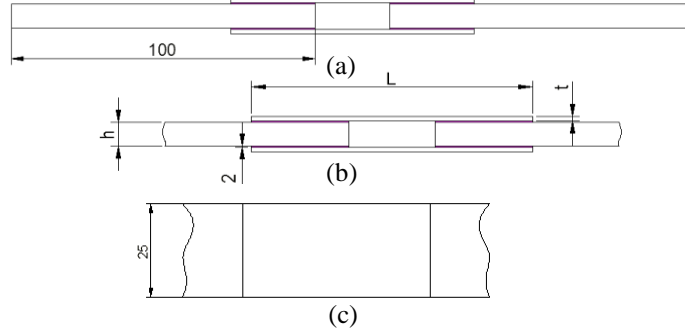
Bu çalışmada tamir amaçlı yapıştırma bağlantısında oluşan gerilme analizi sonlu eleman yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Aynı zamanda sonlu eleman yönteminde kullanılan modelin doğrulanması amacıyla, doğrulama deneyleri yapılmıştır.

Çalışma kapsamında, $h= 4.35, 5$ ve 6 mm kalınlığında, 100 mm boyunda ve 25 mm eninde alüminyum alaşımı (AA 2024-T3) levhalar kullanıldı. Yama (kapak) olarak $L=40, 50$ ve 60 mm bindirme

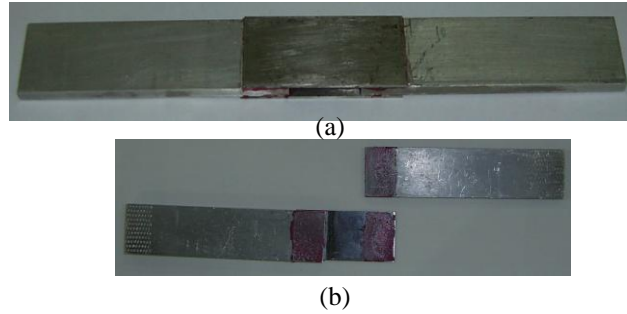
uzunluklarında $t=0.6, 0.8$ ve 1 mm kalınlığında (Şekil 1ve Şekil 2) paslanmaz çelik kullanılmıştır. Yama ve parçaların eni sabit olup 25 mm'dir. Yapıştırıcı olarak CYTEC FM®73 OST; -55°C ile 82°C sıcaklıkları arasında mükemmel yapısal performans sağlayan epoksi esaslı yapısal bir film yapıştırıcı kullanılmıştır. Yapıştırıcının kürleşebilmesi için, bağlantı numuneleri 120 dakikalık süre boyunca $0,5$ MPa basınçta ve 120°C sıcaklıkta bekletilmiştir. Çift takviyeli olarak yapıştırılan numunelerin üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme analizleri yapılmıştır. Sonlu elemanlarla oluşturulan modellerin doğrulanması için doğrulama deneyleri yapılmıştır (Şekil 3) .



Şekil 1. Deneylerde kullanılan bağlantı elemanları ve katı model kesiti



Şekil 2. Deneylerde kullanılan bağlantı elemanlarının a) ön görünüşü, b) ölçülendirilmiş ön görünüşü, c) üst görünüşü



Şekil 3. Deney numunesi; a) tamiri yapılmış b) çekme cihazında çekilmiş

Lineer olamayan sonlu eleman modelinin oluşturulmasında kullanılan malzeme, yapıştırıcı ve yama malzemelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Yapıştırılan parça (AA 2024-T3), Yapıştırıcı (FM 73), Yama malzemesi (yay çeliği) 'nin fiziksel ve mekanik özellikleri

	Alüminyum alaşım (AA2024T3)	Yapıştırıcı (FM 73)	Yama (Yay Çeliği)
E_a (MPa)	71875	2093.9	220000
ν_e	0.33	0.35	0.30
σ_y (MPa)	430	48	1280
σ_t (MPa)	482	55.4	1482
ε_t (mm/mm)	0.16	0.45	0.06

E_a : Elastisite modülü; ν_e : Poisson oranı; σ_y : Akma mukavemeti; σ_t : kopma mukavemeti; ε_t : Kopma uzaması;

3. BULGULAR ve TARTIŞMA

3.1.Deneysel sonuçlar

Sonlu eleman modelinin doğrulanması için parça kalınlığı $h=4.35$ mm, kapak kalınlığı $t=0.8$ ve 1 mm ve bindirme uzunluğu $L=50$ ve 60 mm için üçer adet numune FM 73 yapıştırıcı ile yapıştırılarak bağlantı numunesi elde edilmiş ve çekme cihazında 5 mm/dak çekme hızında çekilerek sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Deneysel ve nümerik sonuçlar incelendiğinde sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. Bu uyum, oluşturulan sonlu eleman modelinin doğruluğunu desteklemektedir.

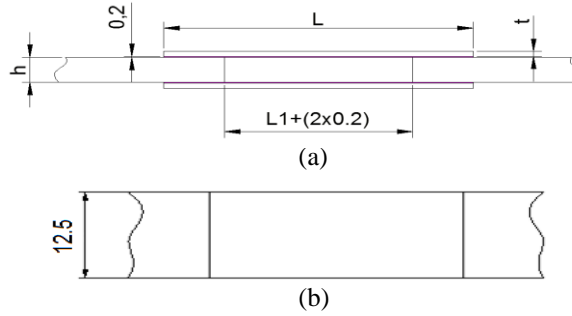
Tablo 2. $h=4.35$ mm parça kalınlığı, $L=50$ ve 60 mm bindirme uzunluğu, $t=0.8$ ve 1 mm kapak kalınlığı ve $L1=10, 15$ ve 20 mm ara boşluk uzunlukları için deneysel ve nümerik çekme hasar yükleri (N)

h (mm)	t (mm)	L1 (mm)	L (mm)	Deneysel Hasar Yükü, P_{DEN} (N)	(Nümerik) Hasar Yükü, P_{SEY} (N)	P_{SEY}/P_{DEN}
4,35	0,8	10	50	31529	28275	0,9
4,35	1	10	50	32081	27840	0,87
4,35	0,8	15	50	28716	25284	0,88
4,35	1	15	50	29551	24958	0,84
4,35	0,8	20	50	22759	22130	0,97
4,35	1	20	50	20984	21858	1,04
4,35	1	15	60	31065	30993	0,99

3.2.Nümerik sonuçlar

3.2.1. Hasar yükü sonuçları

Sonlu elemanlar analizlerinde L1 değerleri sırasıyla 10, 15 ve 20 mm, parça kalınlığı h sırasıyla 4.35, 5 ve 6 mm olarak alınmıştır. Yamanın bindirme uzunluğu L değerleri sırasıyla 40, 50 ve 60 mm ve kapak kalınlığı t sırasıyla 0.6, 0.8 ve 1 mm olarak alınmıştır. Parça ve kapak genişliği sabit olup 12.5 mm dir. Hasar yükü sonuçları Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5' de verilmiştir. Şekil 4'de sonlu elemanlarda kullanılan bağlantı elemanlarının iki boyutlu kesit görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4. Sonlu elemanlarda kullanılan L, L1, h, ve t parametrelere bağlı bağlantı elemanın a) ön görünüşü b) üst görünüşü

Tablo 2. L=40 mm bindirme uzunluğu, t=0.6, 0.8 ve 1 mm kapak kalınlığı, L1=10, 15 ve 20 mm ara boşluk uzunlukları ve h=4.35, 5 ve 6 mm parça kalınlığı için nümerik çekme hasar yükleri (N)

Parça kalınlığı (mm)	Kapak kalınlığı (mm)	L= 40 mm bindirme uzunluğu için nümerik çekme hasar yükleri (N)		
		L1=10 mm	L1=15 mm	L1=20 mm
4.35	0.6	21913	18596	15225
	0.8	21641	18379	15062
	1	21424	18183	14953
5	0.6	22000	18688	18375
	0.8	21813	18500	15313
	1	21625	18375	15125
6	0.6	22050	18825	15375
	0.8	22050	18600	15225
	1	21825	18450	15075

Tablo 4. L=50 mm bindirme uzunluğu, t=0.6, 0.8 ve 1 mm kapak kalınlığı, L1=10, 15 ve 20 mm ara boşluk uzunlukları ve h=4.35, 5 ve 6 mm parça kalınlığı için nümerik çekme hasar yükleri (N)

Parça kalınlığı (mm)	Kapak kalınlığı (mm)	L= 50 mm bindirme uzunluğu için nümerik çekme hasar yükleri (N)		
		L1=10 mm	L1=15 mm	L1=20 mm
4.35	0.6	28764	25665	22457
	0.8	28275	25284	22131
	1	27840	24958	21859
5	0.6	29125	25875	22625
	0.8	28688	25563	22375
	1	28313	25250	22063
6	0.6	28875	25875	22725
	0.8	29100	25875	22575
	1	28800	25650	22350

Tablo 5. L=60 mm bindirme uzunluğu, t=0.6, 0.8 ve 1 mm kapak kalınlığı, L1=10, 15 ve 20 mm ara boşluk uzunlukları ve h=4.35, 5 ve 6 mm parça kalınlığı için nümerik çekme hasar yükleri (N)

Parça kalınlığı (mm)	Kapak kalınlığı (mm)	L= 60 mm bindirme uzunluğu için nümerik çekme hasar yükleri (N)		
		L1=10 mm	L1=15 mm	L1=20 mm
4.35	0.6	35181	32299	29308
	0.8	34256	31592	28764
	1	33386	30994	28275
5	0.6	35750	32688	29688
	0.8	35125	32250	29250
	1	34438	31688	28813
6	0.6	35250	32550	29550
	0.8	35925	32775	29625
	1	35400	32400	29325

Nümerik hasar yüklerinin bulunduğu tablolar incelendiğinde, yapıştırılan parça ve kapak kalınlıklarındaki artışların hasar yüklerini düşürdüğü görülmektedir. Fakat kapak kalınlıklarındaki artışın hasar

yüklerinde neden olduğu düşüş, parça kalınlıklarındaki artışın hasar yüklerinde neden olduğu düşüşe göre daha azdır. Yani parça kalınlığının hasar yükü üzerindeki etkisi çok daha önemlidir. Yine ara boşluk uzunluğundaki artış hasar yükünü düşürmektedir. Ara boşluk uzunluğunun artmasıyla yapışma alanı azalacağından, hasar yükünün düşmesi beklenen bir sonuçtur. Ara parça boyundaki hasar yükü üzerine etkisi de parça boyundaki artışın hasar yükü üzerindeki etkisi kadar olamamaktadır. Ayrıca bindirme uzunluğu arttıkça bağlantıların hasar yükleri artmaktadır.

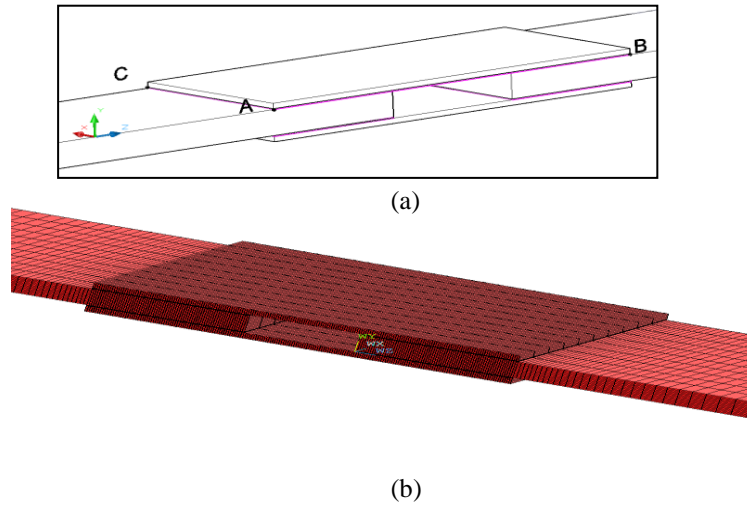
3.2.2. Gerilme dağılımı sonuçları

Gerilme dağılımı sonuçları için şekil 5'te görülen, yapıştırıcı-parça ara yüzeyindeki ve yapıştırıcı tabakasındaki A-B hattı incelenmiştir. Sonlu eleman analizinde, bağlantıların yama analizleri elastik; levha malzemesi ve yapıştırıcının analizleri elasto-plastik olmak üzere, gerilme analizleri sonlu elemanlar paket programı ANSYS 12 sürümü kullanılarak yapılmıştır.

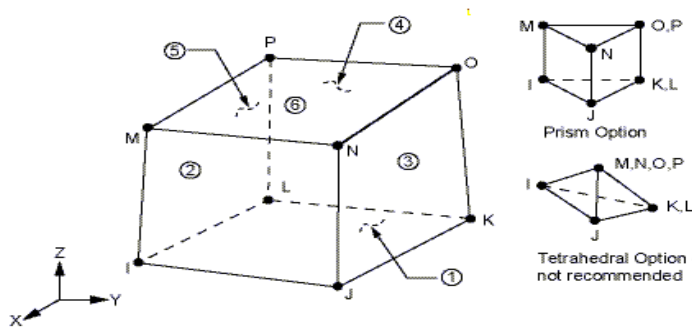
ANSYS, birçok mühendislik alanında karşılaşılan fiziksel olayları simülasyonunu mümkün kılan, kullanıcıya çözüm işlemlerini kolaylıkla gerçekleştirebilmeyi sağlayan çok amaçlı bir tasarım ve analiz programıdır. ANSYS programı sonlu elemanlar metodunu temel alır ve analizlerini bu metot tabanlı yapar. Program sonlu elemanlar formülasyonunu bilgisayar tabanlı analitik uygular. Bu programda önce çalışma ortamı seçilir. Daha sonra element tipi, malzeme özellikleri, model geometrisi oluşturma ve konfigürasyon, modeli sonlu sayıda elemana bölme (mesh), sınır şartları ve yüklerin girilmesiyle modelleme tamamlanır. Daha sonra program sonlu elemanlar formülasyonunu kullanarak modelimizin çözümüleme işlemini yapar. Çözümlemeden sonra modelin istenilen bölgeleri incelenebilir ve grafiksel değerler tespit edilebilir (Vasudevan 1989).

Şekil 5.b'de verilen modelin analizinde 8 düğüm noktasına sahip 3D dikdörtgen prizması olan Solid185 elemanı (Şekil 6) kullanılmıştır. Gerilme dağılımları açısından kritik bölge olan yapıştırma işleminin gerçekleştirildiği bölge, daha küçük elemanlara bölünmüştür.

Bütün yapıştırma bağlantıları için farklı parça kalınlıklarına eşit bir kuvvet elde etmek için farklı parça kalınlığına farklı basınç uygulanmıştır. Bu basınç dik yüzey alanı ile çarpıldığında eşit kuvveti vermektedir; 4.35 mm parça kalınlığı için 85 MPa, 5 mm parça kalınlığı için 73.95 MPa, 6 mm parça kalınlığı için 61.625 MPa yayılı yük etki edecek şekilde uygulanmıştır. Yani sonlu eleman modelinde h kalınlığına eşit kuvvet elde etmek için farklı basınç yükü yüklenirken gerilmeler elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Burada 85 MPa seçilmesinin nedeni en düşük hasar yükünü taşıyan yapıştırma bağlantısının yükü olduğu için seçilmiştir.



Şekil 5. Sonlu elemanlarda kullanılan bağlantı elemanını; a) üç boyutlu görüntüsü b) sonlu eleman modeli



Şekil 6. Sonlu eleman modelinde düğüm noktaları ve elemanları

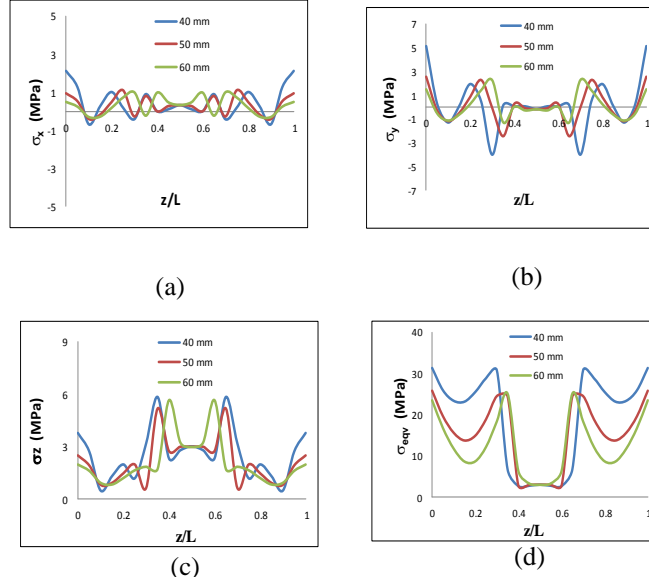
3.2.2.1 AB hattı boyunca gerilme dağılımı sonuçları

a. Bindirme uzunluğuna bağlı olarak gerilme dağılımı sonuçları

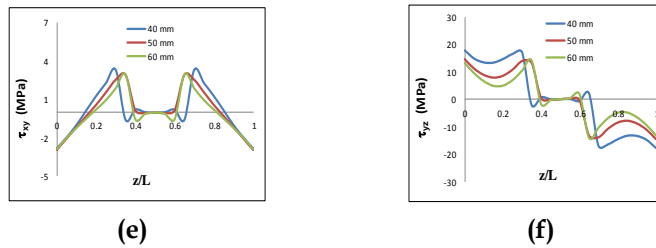
5 mm parça, 0.8 mm kapak kalınlığına ve 15 mm ara boyuna sahip çift takviyeli bağlantının A-B hattı boyunca normal ve von-Mises eşdeğer gerilme dağılımları farklı bindirme uzunlukları için şekil 6'da verilmiştir. σ_z dışındaki gerilmeler bindirme uzunluklarının uçlarında maximum çıkarken, σ_z gerilmelerinde maksimum gerilmeler ara boşluğun uçlarında meydana gelmiştir. Bunun nedeni şekil 5'te de görüldüğü gibi z doğrultusunda ara boşluk uçlarında meydana gelen süreksizliktir. Yine bindirme uzunluğunun etkisi bindirme uzunluğu uçlarında (A ve B noktalarında) ortaya çıkmaktadır. σ_{eqv} eşdeğer gerilme dağılımları incelendiğinde 40 mm'lik bindirme uzunluğuna sahip bağlantıda gerilmeler en yüksek, 60 mm bindirme uzunluğuna sahip bağlantıda gerilmeler en düşük çıkmıştır. Bu değerler hasar yükü sonuçları ile uyumlu çıkmıştır. 60 mm bindirme uzunluğuna sahip yapıştırma bağlantısı 40 mm bindirme uzunluğuna sahip yapıştırma bağlantısından daha fazla yük taşıdığı için, aynı yüke maruz bırakıldığında da daha az eşdeğer gerilmenin oluşması gerekmektedir.

Aynı boyutlara sahip çift takviyeli ara boşluklu yapıştırma bağlantıların farklı bindirme uzunluklarındaki kayma gerilmesi dağılımları şekil 7'de verilmiştir. τ_{xy} dağılımı incelendiğinde bindirme uzunluğu uçlarında negatif olup bindirme uzunluğu ortalarına doğru yaklaştıkça gerilmeler pozitif olmakta ve ara boşlukta sıfıra yaklaşmaktadır. τ_{xy} dağılımı üzerinde bindirme uzunluğunun bariz bir etkisi görülmemektedir.

τ_{yz} dağılımında bindirme uzunluğunun bir ucunda pozitif iken diğer ucunda negatif değerler almaktadır. Bindirme uzunluğunun ara boşluktaki kısmında τ_{yz} sıfıra yakın değerler almaktadır. Bindirme uzunluğunun τ_{yz} dağılımına kayda değer oranda etkisi görülmektedir. Ayrıca τ_{xy} ve τ_{yz} değerleri karşılaştırıldığında τ_{yz} kayma gerilmesi değerleri çok büyüktür.



Şekil 8. 5 mm parça, 0.8 mm kapak kalınlığına ve 15 mm ara boyuna sahip çift takviyeli bağlantının A-B hattı boyunca farklı bindirme uzunlukları için normal ve von-Mises eşdeğer gerilme dağılımları a) σ_x , b) σ_y , c) σ_z , d) σ_{eqv} gerilme dağılımları

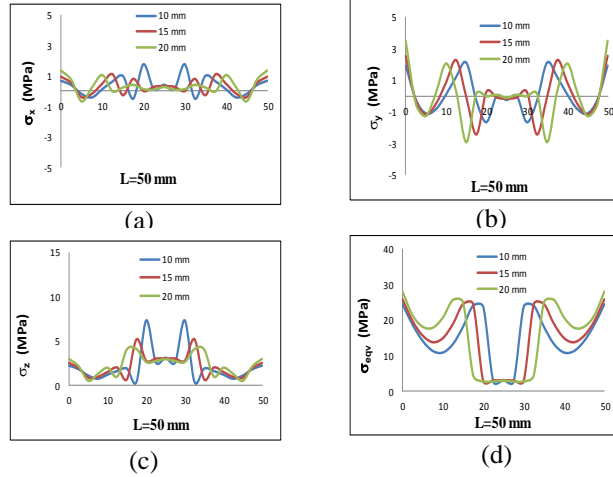


Şekil 9. 5 mm parça, 0.8 mm kapak kalınlığına ve 15 mm ara boyuna sahip çift takviyeli bağlantının A-B hattı boyunca farklı bindirme uzunlukları için kayma gerilme dağılımları a) τ_{xy} , b) τ_{yz}

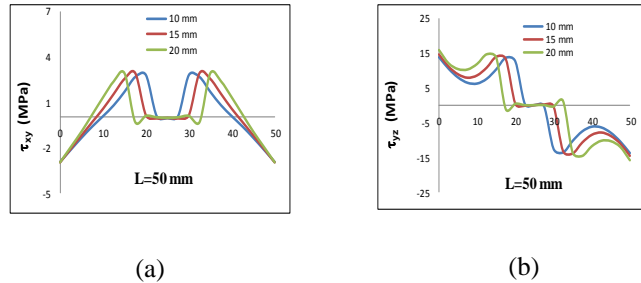
b. Ara boya bağlı olarak gerilme dağılımı sonuçları

5 mm parça, 0.8 mm kapak kalınlığına ve 50 mm bindirme uzunluğuna sahip çift takviyeli bağlantının A-B hattı boyunca normal, von-Mises eşdeğer ve kayma gerilme dağılımları farklı ara boşluk uzunlukları için sırasıyla şekil 8 ve 9'da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde normal gerilmelerin nispeten düşük çıktığı buna karşın τ_{yz} kayma gerilmesinin daha büyük çıktığı ve eşdeğer

gerilmelere τ_{yz} gerilmesinin baskın olduğu görülmektedir. Ara boşluk boyunun gerilme dağılımlarına önemli bir etkisi de görülmemektedir.



Şekil 10. 5 mm parça, 0.8 mm kapak kalınlığına ve 50 mm bindirme uzunluğuna sahip çift takviyeli bağlantının A-B hattı boyunca farklı ara boşluk boyları için normal ve eşdeğer gerilme dağılımları a) σ_x , b) σ_y , c) σ_z , d) σ_{eqv}

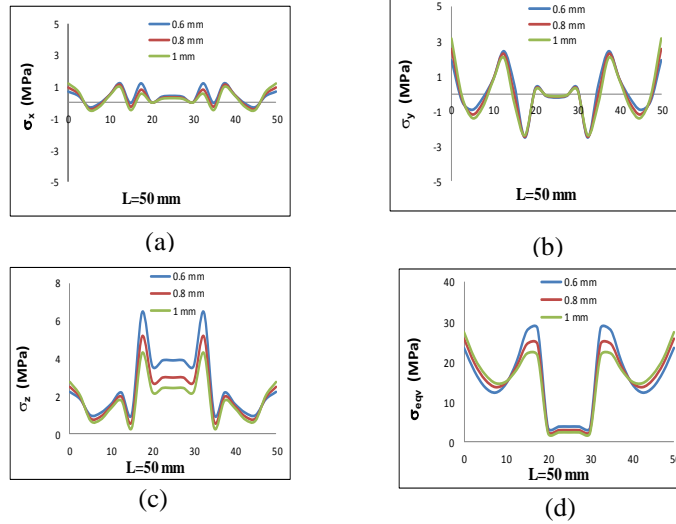


Şekil 11. 5 mm parça, 0.8 mm kapak kalınlığına ve 50 mm bindirme uzunluğuna sahip çift takviyeli bağlantının A-B hattı boyunca farklı ara boşluk boyları için kayma gerilme dağılımları a) τ_{xy} , b) τ_{yz}

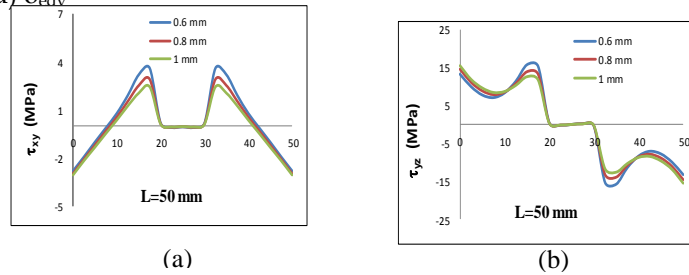
c. Kapak kalınlığına bağlı olarak gerilme dağılımı sonuçları

Kapak kalınlığının ara boşluklu çift takviyeli yapıştırma bağlantısında meydana gelen normal, eşdeğer ve kayma gerilme dağılımları üzerindeki etkileri sırasıyla şekil 10 ve 11'de görülmektedir. σ_x ve σ_z gerilmelerin üzerine kapak kalınlığının pek etkisi olmamasına karşın, σ_z ve eşdeğer gerilme dağılımında kapak

kalınlığındaki artış gerilme değerlerini düşürmektedir. Yine kayma gerilme dağılımlarında da kapak kalınlıklarının etkisi az olmaktadır.



Şekil 12. 5 mm parça kalınlığına, 15 mm ara boşluk boyuna ve 50 mm bindirme uzunluğuna sahip çift takviyeli bağlantının A-B hattı boyunca farklı kapak kalınlıkları için normal ve eşdeğer gerilme dağılımları a) σ_x , b) σ_y , c) σ_z , d) $\sigma_{eşdeğer}$

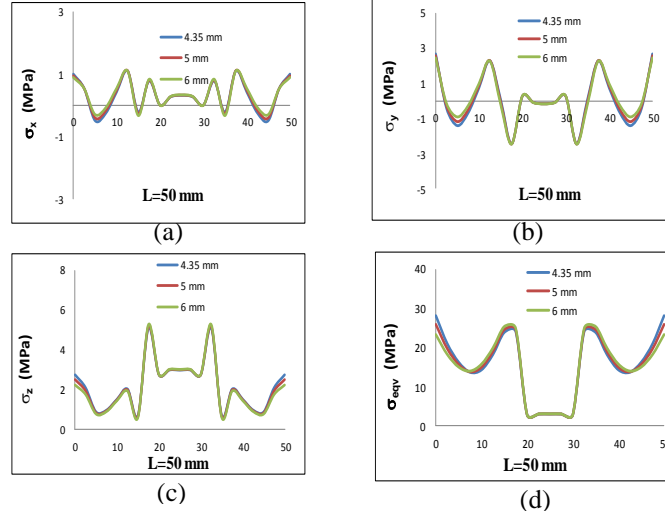


Şekil 13. 5 mm parça kalınlığına, 15 mm ara boşluk boyuna ve 50 mm bindirme uzunluğuna sahip çift takviyeli bağlantının A-B hattı boyunca farklı kapak kalınlıkları için kayma gerilme dağılımları a) τ_{xy} , b) τ_{yz}

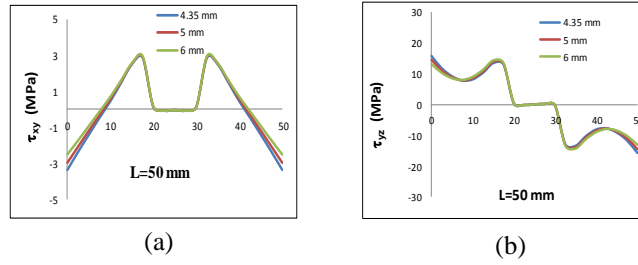
d. Parça kalınlığına bağlı olarak gerilme dağılımı sonuçları

15 mm ara boşluğuna, 0.8 mm kapak kalınlığına ve 50 mm bindirme uzunluğuna sahip çift takviyeli bağlantının A-B hattı boyunca normal, von-Mises eşdeğer ve kayma gerilme dağılımları farklı parça kalınlıkları için sırasıyla şekil 12 ve 13'de verilmiştir. σ_x , σ_z ve τ_{xy} gerilme dağılımları üzerinde parça kalınlığının etkisi pek

görünmezken, σ_z , τ_{yz} ve σ_{eqv} gerilme dağılımları üzerinde önemli etkisi vardır. Büyük parça kalınlıklarında gerilmelerin fazla çıkmasının nedeni bağlantının maruz kaldığı çekme yükü, parça kalınlığı arttıkça parça kalınlığı ile orantılı olarak artmasıdır.



Şekil 14. 0.8 mm kapak kalınlığına, 15 mm ara boşluk boyuna ve 50 mm bindirme uzunluğuna sahip çift takviyeli bağlantının A-B hattı boyunca farklı parça kalınlıkları için normal ve eşdeğer gerilme dağılımları a) σ_x , b) σ_y , c) σ_z , d) σ_{eqv} gerilme dağılımları



Şekil 15. 0.8 mm kapak kalınlığına, 15 mm ara boşluk boyuna ve 50 mm bindirme uzunluğuna sahip çift takviyeli bağlantının A-B hattı boyunca farklı parça kalınlıkları için kayma gerilme dağılımları a) τ_{xy} , b) τ_{yz} gerilme dağılımları

4. SONUÇLAR

Hasarlı bölgelerin tamiri esnasında hasarlı parçalar tamir edilirken hasarlı bölgeler çıkarıp atılır ve parçanın geri kalan kısmı

tamir edilerek tekrar yerine takılır. Bu esnada hasarlı bölgeler çıkarıldığı için bu bölge boş kalır ve genellikle çift taraflı bu boşluğun üzeri yamalarla (kapak) yapıştırılarak kapatılır. İşte bu çalışmada boşluklu çift takviyeli yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışlarına etki eden parametreler deneysel ve nümerik olarak incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda;

- Deneysel ve nümerik veriler uyumlu çıkmıştır.
- Bindirme uzunluğuna bağlı olarak; bindirme uzunluğu arttıkça yapıştırılan alan artmış ve doğal olarak da taşınan yük de artmıştır.
- Ara boşluk boyuna bağlı olarak; numunelerinde ara boşluk boyunun artması ile taşınan yük azalmıştır. Ara boşluk boyunun artması ile parça üzerindeki yapıştırılan alan azalmıştır.
- Kapak kalınlığı arttıkça taşınan yükün azaldığı görülmüştür. Kapak kalınlığı arttıkça malzememizin şekil değiştirme özelliği azalmakta, dolayısıyla gerilme artmakta ve taşınan yük azalmaktadır.
- Parça kalınlığı arttıkça taşınan yükün artmakta olduğunu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlar doğrultusunda ortası boş yapılı tamir çalışmalarında bindirme uzunluğunu ve parça kalınlığını mümkün olduğu kadar yüksek, ara boşluk boyu ve kapak kalınlığını ise minimum tutulması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- Apalak, M.K., Engin A., (1997). Geometrically Non-Linear Analysis of Adhesively Bonded Double Containment Cantilever joints, *Journal of Adhesion Science Technology*, 11(9), 1153-1195.
- Aydın, M.D., Temiz, Ş., Özel, A., 2003. Yapısal Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlendiği Deneysel Yöntemler. *Mühendis ve Makine Cilt 45, Sayı 536*.
- Baker, AA, Chester RJ, Hugo GR, Radtke TC.,1999 Scarf repairs to highly strained graphite/epoxy structure. *Int J Adhes Adhes* ;19:161-71.
- Campilho, R.D.S.G.,deMoura M.F.S.F., Ramantani D.A., Morais J.J.L., Dominues, J.J.M.S., (2009). Tensilebehaviourofthree dimensional

- carbonepoxy adhesively bonded single- and double-strap repairs
International Journal of Adhesion & Adhesives, 29, 678-686
- Çitil, Ş., Temiz, Ş., Altun, H., Özel, A., (2011). "Determination of Mechanical Properties of Double-Strap Adhesive Joint with an Embedded Patch", *J. Adhesion Sci. Technol.*, 25(18), 2555-2567.
- da Silva, L. F. M., Marques, E. A. S. (2008). Joint Strength Optimization of Adhesively Bonded Patches, *J. Adhesion* 84, 915-934,.
- Liu, X., Wang, G.,(2007). Progressive failure analysis of bonded composite repairs. *Compos Struct*; 81:331-40.
- Temiz, Ş. Aydın, M.D. Özel, A. Sancaktar, E. (2009). Increasing Single Lap Joint Strength by Adherend Curvature Induced Residual Stresses. *Ace-x Abstract Book*, Page 37.
- Vasudevan, A.K., Doherty, R.D., (1989). Aluminum Alloys-Contemporary Research and Applications, part 6, pp.171-184.
