

YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ DAYANIMI ÜZERİNE KÜRLEŞME BASINCININ ETKİSİ

Murat Demir AYDIN^a, Şemsettin TEMİZ^b ve Adnan ÖZEL^b

^a Atatürk Üniversitesi, Erzurum MYO, Makine Prog., Erzurum, Türkiye

^b Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Müh.Böl., Erzurum, Türkiye

ÖZET

Yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışını tahmin etmek önemlidir. Bunu başarabilmek için, yapıştırma bağlantısının davranışının doğru simülasyonu dikkate alınması gereken temel gereksinimlerinden biridir. Diğer taraftan, yapıştırma bağlantılarının yük taşıma kapasiteleri kürleşme boyunca uygulanan basınç ve sıcaklıktan etkilenir. Bu yüzden bu çalışmada, esnek ve basınç hassasiyetli bir yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarının yük taşıma kapasitelerinin kürleşme boyunca uygulanan basınçla değişimi deneysel olarak incelendi ve sonuçlar Sonlu Eleman Analizlerinden (SEA) elde edilenlerle karşılaştırıldı. Sonuç olarak, yapıştırıcıların akma kriterlerindeki eksiklikler ve şekil değiştirme oranına bağımlılık gibi diğer parametrelere ilave olarak, yapıştırma bağlantılarının mekanik davranışının doğru bir şekilde simülasyonu için yüksek sıcaklıklarda kürleşme boyunca uygulanan basıncın oluşturduğu termal artıkların dikkate alınması gerektiği görüldü.

Anahtar kelimeler: Yapıştırma bağlantısı, sonlu eleman yöntemi, gerilme analizi, kürleşme basıncı.

THE EFFECT OF CURING PRESSURE ON THE STRENGTH OF ADHESIVELY BONDED JOINTS

ABSTRACT

It is important to be able to predict the response of adhesively bonded joints. So as to succeed this, the accurate simulation of the behavior of adhesively bonded joints is one of the essential requirements. On the other hand, the load capabilities of adhesively bonded joints are affected by both applied pressure and temperature during cure. For this reason, in this study, the tensile load capabilities of Single Lap Joints (SLJs) bonded with a flexible adhesive which possesses pressure-sensitive property were experimentally investigated with respect to the applied pressure during curing operation and the experimental results were compared with Finite Element Analysis (FEA) results. Finally, in addition to other parameters such as the dependence on strain rate and the lack of yield criteria of adhesives, it was seen that the residual thermal stresses occurred due to the applied pressure during curing process at elevated temperature need to be taken into consideration in order to simulate accurately the mechanical behaviors of adhesively bonded joints.

Keywords: Adhesively bonded joint, finite element method, stress analysis, curing pressure.

1. GİRİŞ

Yüksek performans gerektiren uygulamalar için bir birleştirme yöntemi olarak yapıştırma bağlantılarının kullanımı gittikçe artmış ve bu uygulamalar içinde esnek yapıştırıcıların yapısal amaçlı kullanımları önem kazanmıştır. Düşük camsı geçiş sıcaklığı, düşük elastisite modülleri ve epoksi gibi yapısal yapıştırıcılarla karşılaştırıldığında hasar anına kadar göstredikleri büyük şekil değiştirme kabiliyetleriyle karakterize edilen esnek yapıştırıcılar yapısal olmayan birçok alanda (ayakkabı endüstrisi, paketleme ve sızdırmazlık alanları gibi) sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak, esnek yapıştırıcıların bu büyük şekil değiştirme kabiliyetleri ve birleştirilecek elemanlar üzerinde oluşan sıyırma gerilmelerini daha düzgün bir biçimde dağıtabilme özellikleri yapısal amaçlı alanlarda kullanımını artırmıştır. Diğer taraftan, bu tipteki yapıştırıcıların otomotiv sanayi gibi endüstriyel alanlara adaptasyonu mekanik davranışlarının iyi anlaşılmasını gerektirir [1-4].

Yapıştırma bağlantılarının güvenli ve verimli bir şekilde tasarımı doğru malzeme modelleri ve hasar kriterlerinin kullanımına bağlıdır. Ayrıca, yapıştırma bağlantılarında oluşan sıcaklık değişimleri yapıştırıcı ve yapıştırılan malzeme arasındaki uyumsuzluklardan dolayı çok farklı gerilme durumlarına sebep olur [5]. Günümüzde, yapısal amaçla birleştirilmiş yapıştırma bağlantılarının hasar davranışlarını tahmin eden ve dayanımları üzerine malzeme ve geometrik parametrelerin etkilerini tanımlayan iyi kurulmuş bir tasarım prosedürü bulunmamaktadır [1-12]. Birçok araştırmacı yapıştırma bağlantıları üzerine çalışma yapmıştır. Bunlardan birkaçından aşağıda bahsedilmiştir.

Bulk numunelerden elde edilen mekanik özelliklerin bir yapıştırma bağlantısında kullanıldığında ne yönde etki oluşturduğu yani yapıştırma bağlantısından elde edilen özelliklerle, bulk yapıştırıcı numunelerinden elde edilen özelliklerin örtüşüp örtüşmediğinin tespit edilmesi gereklidir. Esnek yapıştırıcılar kullanarak ürettikleri bulk numune ve farklı geometrik şekillere sahip yapıştırma bağlantılarında deneysel ve sayısal çalışmalar yapmışlar ve istatistiksel yöntemleri kullanarak bulk yapıştırıcının çekme dayanımı ile, bağlantının dayanımı arasındaki ilişkinin ampirik bağıntılarla ifade edilebilir [1-5].

Crocombe ve arkadaşları [9-10], yapıştırıcı tabakasındaki kayma ve soyulma gerilmelerini temsil eden diferansiyel denklemleri çözmüş ve elde ettikleri sonuçları, sonlu elemanlar yöntemi kullanarak elde ettikleri sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Daha sonra yaptıkları çalışmalarında ise, sonlu farklar ve sonlu elemanlar çözüm teknikleri yardımıyla yapıştırma bağlantıları üzerinde elasto-plastik gerilme analizi yapmışlardır.

Yapıştırma bağlantısı hazırlanırken uygulanan yüzey hazırlama yöntemi, ısıtma ve soğutma oranı, birleştirme işlemi süresince uygulanan basınç, erime ve yeniden kristalleşme sıcaklığında kalma süresi bağlantının dayanımı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin mekanik özellikleri arasındaki fark yukarıda bahsedilen özelliklerle birleşince yapıştırıcı-yapıştırılan malzeme ara yüzeylerinde artık gerilme oluşumuna neden olur. Ara yüzeydeki iç gerilmelerin varlığı yapıştırma bağlantısının performansı üzerinde farklı etkiler oluşturabilir. Bu etkiler ara yüzeyde oluşan gerilmelerin karakterine bağlıdır ve bağlantının performansı üzerinde büyük etkiye sahiptir [11-30].

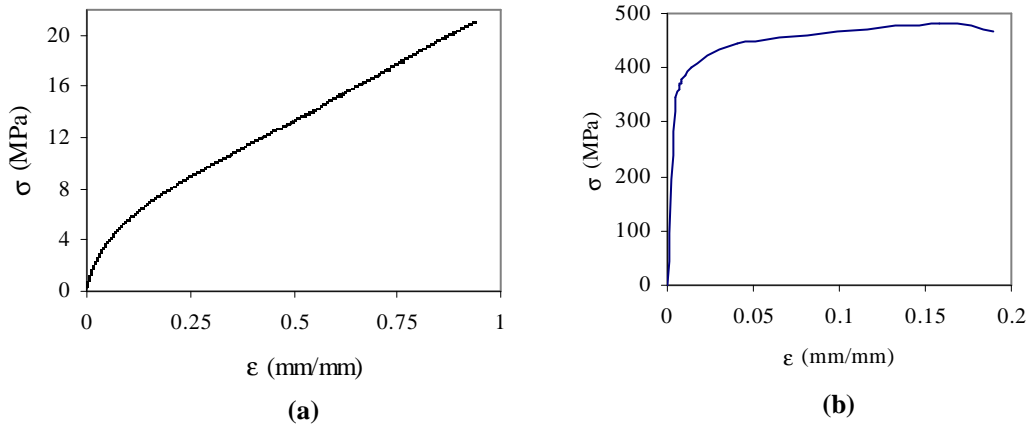
Adams ve arkadaşları, sıcaklık veya küreleşme ile yapıştırıcıdaki büzülme veya yapıştırılan malzemelerdeki uygunsuzluk nedeniyle oluşan ısıl etkiler, yapıştırma bağlantısının gerilme dağılımında ve dayanımında önemli değişimlere sebep olduğunu göstermişlerdir [8, 11].

Bu çalışmada, esnek ve basınç hassasiyetli bir yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarının yük taşıma kapasitelerinin kürleşme boyunca uygulanan basınçla değişimi deneysel olarak incelenmiş ve sonuçlar Sonlu Eleman Analizlerinden (SEA) elde edilenlerle karşılaştırılmıştır.

2. MALZEME ÖZELLİKLERİ VE NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

AA2024-T3; hafifliği, işlenebilirliği, yüksek korozyon dayanımı, yüksek dayanıma sahip olmalarından dolayı havacılık ve otomotiv endüstrilerinde kullanılan önemli alüminyum alaşımlarından biridir. Ayrıca, birçok uluslararası standart yapıştırıcıların bağlantıdaki performansını değerlendirirken bu alüminyum alaşımının kullanılmasını tavsiye etmektedir.

3M™ SBT 9244; basınca hassas bir akrilik banda sıcaklıkla kürleşen bir epoksinin emdirilmesiyle oluşturulmuş çift taraflı yapısal bağlantı bandıdır. Bu yeni bant, çelik, alüminyum, cam ve seramik gibi birçok materyalin birleştirilmesinde kullanılabilir. Bir çok uygulamada diğer mekanik birleştirme yöntemlerinin yerine alabilir. Bu bandın ana faydası parçaların birleştirilmesi ve kürleşme esnasında gerekli zamanı azaltması dolayısıyla daha ekonomik olmasıdır. Primer uygulamasını gerektirmez. Bu yapıştırıcı üzerine yapılan ilk araştırmalar bağlantının oluşturulmasından sonra bile bandın esnek davranış sergilediğini göstermiştir. Üretici firma bandın kürleşebilmesi için 0.1 MPa basınç ve 140°C sıcaklıkta 45 dakika bekletilmesini tavsiye etmektedir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan malzemelere ait çekme diyagramları: a) SBT9244; b) AA2024-T3.

Çizelge 1. Malzeme özellikleri.

	AA2024-T3 alloy	SBT 9244 adhesive
E_a (MPa)	71875	81.86
ν_e	0.33	0.35
σ_t (MPa)	482	20.96
ϵ_t (mm/mm)	0.1587	0.9449

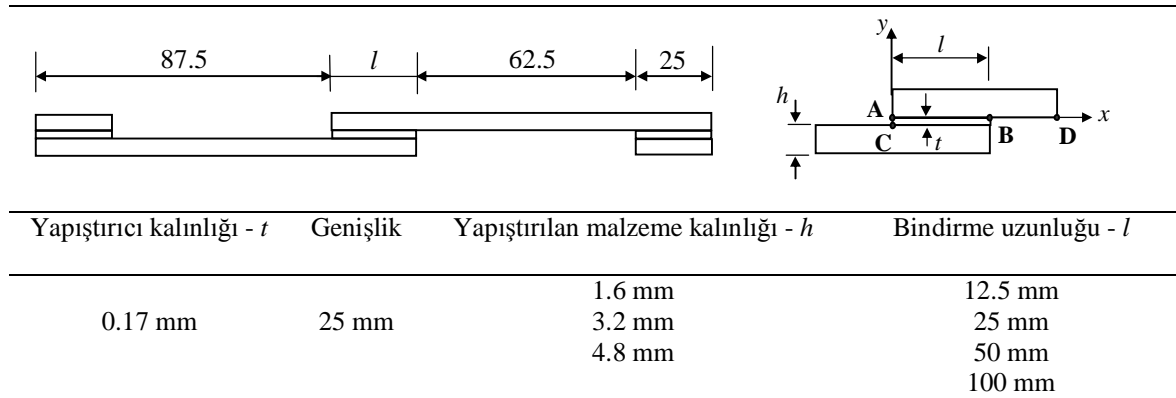
E_a : Young's modülü; ν_e : Poisson oranı; σ_t : Çekme dayanımı; ϵ_t : Çekme dayanımındaki şekil değişimi

Lineer olmayan sonlu eleman yöntemiyle gerilme analizi yapabilmek, çalışmada kullanılan yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin tek eksenli yük altındaki gerilme-şekil değiştirme davranışının bilinmesini gerektirir. Bu amaca yönelik olarak, yapıştırıcı (SBT 9244) ve

yapıştırılan malzemeden (AA2024-T3) numuneler hazırlanmış ve bu numuneler çekme deneyine tabi tutularak, şekil 1’de verilen gerilme-şekil değiştirme davranışları tespit edilmiştir [20].

Çekme deneyleri için yalnız 1.6, 3.2 ve 4.8 mm kalınlığındaki yapıştırılan malzemeler (AA2024-T3) kullanılarak dört farklı bindirme uzunluğunda (12.5, 25, 50 ve 100 mm) numuneler hazırlanmıştır. Ayrıca, deneylerde kullanılan tek tesirli bindirme bağlantısına ait malzeme özellikleri ve geometrik parametreler Çizelge 1 ve 2’de verilmiştir.

Çizelge 2. Nümerik ve deneysel çalışmada kullanılan geometrik parametreler.

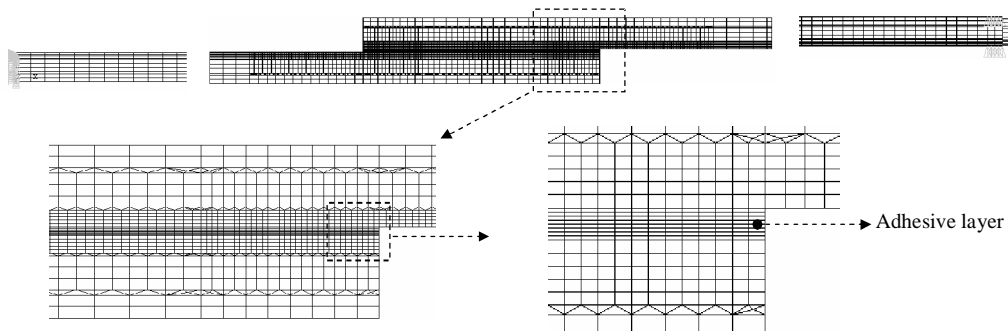


The diagram shows a cross-section of the adhesive joint with dimensions: 87.5 mm for the left grip, l for the adhesive length, 62.5 mm for the right grip, and 25 mm for the grip width. A coordinate system is shown with x and y axes, and points A, B, C, and D marked. The adhesive thickness is h and the adhesive layer thickness is t .

Yapıştırıcı kalınlığı - t	Genişlik	Yapıştırılan malzeme kalınlığı - h	Bindirme uzunluğu - l
0.17 mm	25 mm	1.6 mm	12.5 mm
		3.2 mm	25 mm
		4.8 mm	50 mm
			100 mm

Yapıştırma işlemi öncesi, yapıştırılan malzeme yüzeyleri (AA2024-T3) üzerinden yağ, gres, kir ve toz gibi atıklar asetonla temizlendikten sonra, kromik asitle anotlama ($H_2SO_4 + Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$) işlemine tabi tutulmuştur. SBT 9244 ile yapıştırma işlemi, sıcak bir pres içerisinde numunelere 45 dakika $145^\circ C$ sıcaklık uygulanarak gerçekleştirildi. Ayrıca, kürleşme basıncının etkisini gözlemleyebilmek için, iki farklı kürleşme basıncı (0.1 ve 0.5 MPa) uygulandı.

3. TEK TESİRLİ BİNDİRME BAĞLANTISININ SONLU ELEMAN MODELİ



Şekil 2. Çeki yüküne maruz tek tesirli bindirme bağlantısına ait sonlu eleman modeli ve uygulanan sınır şartları

Sonlu eleman analizlerinde kullanılan geometrik parametreler ve malzeme özellikleri sırasıyla Çizelge 1, 2 ve 3 te verilmiştir. Tek tesirli bindirme bağlantısının tüm gerilme analizleri, ANSYS (sürüm 10.0) sonlu eleman paket programı kullanılarak yapılmıştır [23]. Analizlerde yapıştırma bağlantısı, iki serbestlik derecesi ve 8 düğüm noktasına sahip düzlem dörtgen elemanlar (Plane 183) kullanılarak modellenmiştir. Gerilme dağılımları açısından kritik bölge

olan yapıştırma işleminin gerçekleştirildiği bölge daha küçük elemanlara bölünmüştür (Şekil 2). Ayrıca, hem yapıştırıcı (SBT 9244) ve yapıştırılan malzemelerin (AA2024-T3) tek eksenli gerilme-şekil değiştirme davranışlarına dayalı malzemenin lineer olmayan davranışı, hem de geometrik olarak lineer olmayan davranışı dikkate alınmıştır. Çeki yükü altındaki tek tesirli bindirme bağlantısının gerilme analizleri düzlem şekil değiştirme varsayımına dayandırılırken, eşdeğer gerilmeler (σ_{eq}) aşağıda detayı verilen Drucker-Prager akma kriterine göre hesaplanmıştır [21-22].

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 2 \cdot (|\sigma_c| - \sigma_t) \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = 2 \cdot |\sigma_c| \cdot \sigma_t \quad (1)$$

Burada σ_1 , σ_2 ve σ_3 asal gerilmeleri, σ_c ve σ_t bası dayanımı ve çeki dayanımlarını göstermektedir. (1) denklemini farklı bir biçimde aşağıda gösterildiği gibi yazılabilir.

$$q^2 + 3\sigma_t(\lambda - 1)\sigma_m = \lambda \cdot \sigma_t^2 \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad \sigma_m = \frac{J_1}{3}$$

Burada q , λ ve J_1 sırasıyla von-Mises eşdeğer gerilmesi, aynı plastik şekil değişiminde basıdaki akma dayanımının çekideki akma dayanımına oranı ve gerilme tensörünün birinci invariantını göstermektedir. Bu kriter ANSYS (sürüm 10.0) paket programı içinde bulunmakta ve aşağıda verildiği gibi temsil edilmektedir.

$$q^2 + \alpha \sigma_m = \sigma_y^2 (\bar{\epsilon}^{pl}) \quad (3)$$

Burada α ve $\sigma_y(\bar{\epsilon}^{pl})$ sırasıyla basınç hassasiyet katsayısı ve malzemenin akma gerilmesidir. Denklem (2) ile (3) karşılaştırılırsa α için aşağıdaki eşitlik türetilir.

$$\alpha = 3\sigma_t(\lambda - 1) \quad (4)$$

Bu modelde ihtiyaç duyulan malzeme parametreleri Çizelge 3 de verilmiştir. Bu parametrelerin belirlenmesi ile ilgili detaylı bilgi [1-4] referanslarından alınabilir.

Çizelge 3. Drucker-Prager malzeme modeli için gerekli parametreler (SBT 9244) [24-26].

$\sigma_y(\bar{\epsilon}^{pl})$	λ	α	$\tan \psi$
Şekil 1a	1.541	29.01	0.516

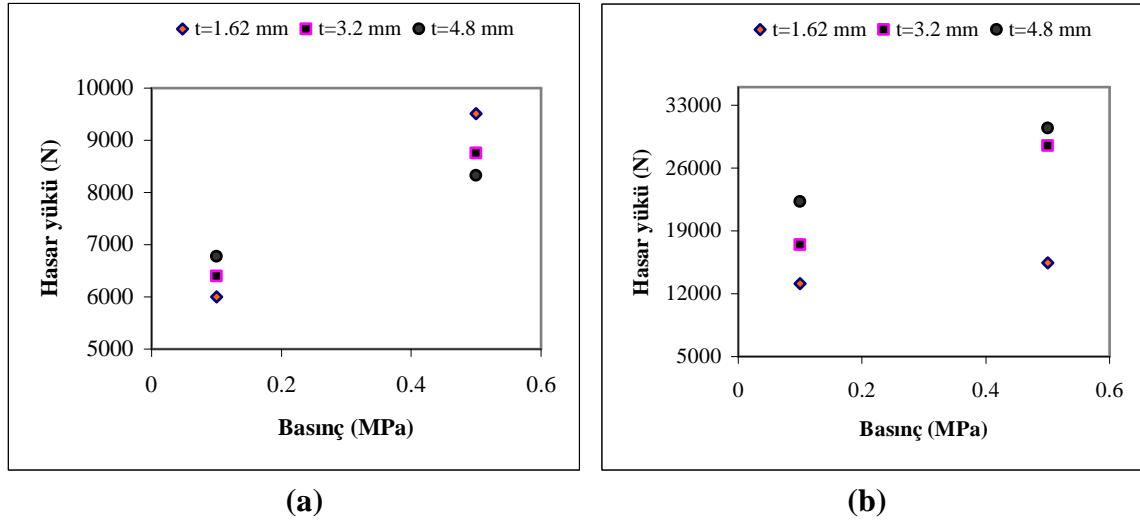
4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

4.1. Deneysel sonuçlar

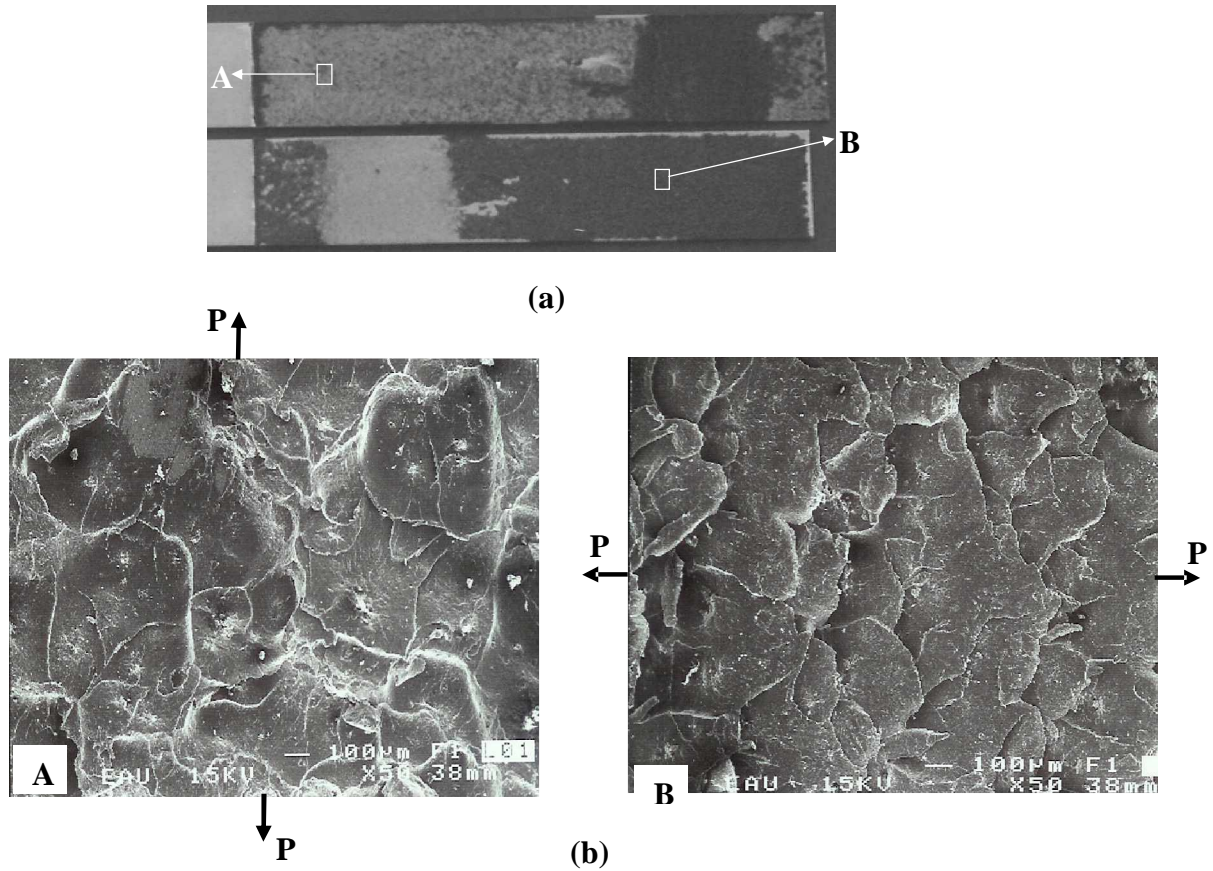
Deneylerin tümü bilgisayar kontrollü Shimadzu AG-I (50 kN) universal çekme cihazında 22°C ve %50 nem oranında 5 mm/dak.'lık çene hızında yapılmış ve her bir bağlantı tipi için dört yapıştırma bağlantısı test edilmiştir.

Şekil 3'te SBT 9244 kullanılarak birleştirilen tek tesirli bindirme bağlantısının kürleşmesi için uygulanan basıncın (0.1 ve 0.5 MPa), bağlantının hasar yükü üzerine etkisi görülmektedir.

Her iki diyagram anlaşılacağı gibi kürleşme esnasında uygulanan basınçta meydana gelen artış, bağlantının dayanımında artışa neden olmuştur.



Şekil 3. SBT 9244'ün kürleşmesi esnasında uygulanan basınçın hasar yükü üzerine etkisi **a-)** 25 mm bindirme uzunluğunda 1.62, 3.2 ve 4.8 mm yapıştırılan malzeme kalınlığında hazırlanmış numuneler **b-)** 100 mm bindirme uzunluğunda 1.62, 3.2 ve 4.8 mm yapıştırılan malzeme kalınlığında hazırlanmış numuneler.



Şekil 4. (a) 0.5 MPa basınç ve 100 mm bindirme uzunluklu yapıştırma bağlantısından kırılma yüzeyleri; (b) A ve B noktalarından SEM fotoğrafları.

Tüm numuneler incelendiğinde, bindirme uzunluğu ve yapıştırılan malzeme kalınlığına göre tek tesirli bindirme bağlantılarında hasarın üç farklı tipte gerçekleştiği gözlemlenmiştir:

- **Tip I:** Soyulma etkisi ve herhangi bir plastik deformasyon görülmedi. Yapıştırma bağlantısında hasar herhangi bir çatlak başlangıcı gözlemlenmeden anlık olarak gerçekleşti.
- **Tip II:** Soyulma etkisi ve plastik deformasyon görüldü. Yapıştırma bağlantısında hasar herhangi bir çatlak başlangıcı gözlemlenmeden anlık olarak gerçekleşti.
- **Tip III:** Yapıştırılan malzemelerde büyük plastik deformasyonlar oluştu ve bindirmenin yapıldığı bölgenin serbest uçlarında soyulma etkisi son derece belirgindi. Yapıştırma işleminin gerçekleştirildiği bölgenin serbest uçlarında çatlak başlangıcı gözlemlendi ve sonra çatlak her iki serbest uçtan bindirmenin merkezine doğru ilerledi. Bindirmenin merkezinde belirli bir hasar bölge uzunluğuna ulaşıldığında anlık kopma meydana geldi.

Şekil 4, SBT9244 kullanılarak hazırlanmış yapıştırma bağlantılarındaki kohesiv hasar yüzeylerinin farklı noktalarından çekilmiş SEM fotoğraflarını göstermektedir. Bu fotoğraflar, soyulma etkisinin oluşturduğu kopma yüzeylerini daha belirgin olarak ortaya koymaktadır.

4.2. Deneysel sonuçlar ile sonlu eleman analiz (SEA) sonuçlarının karşılaştırılması

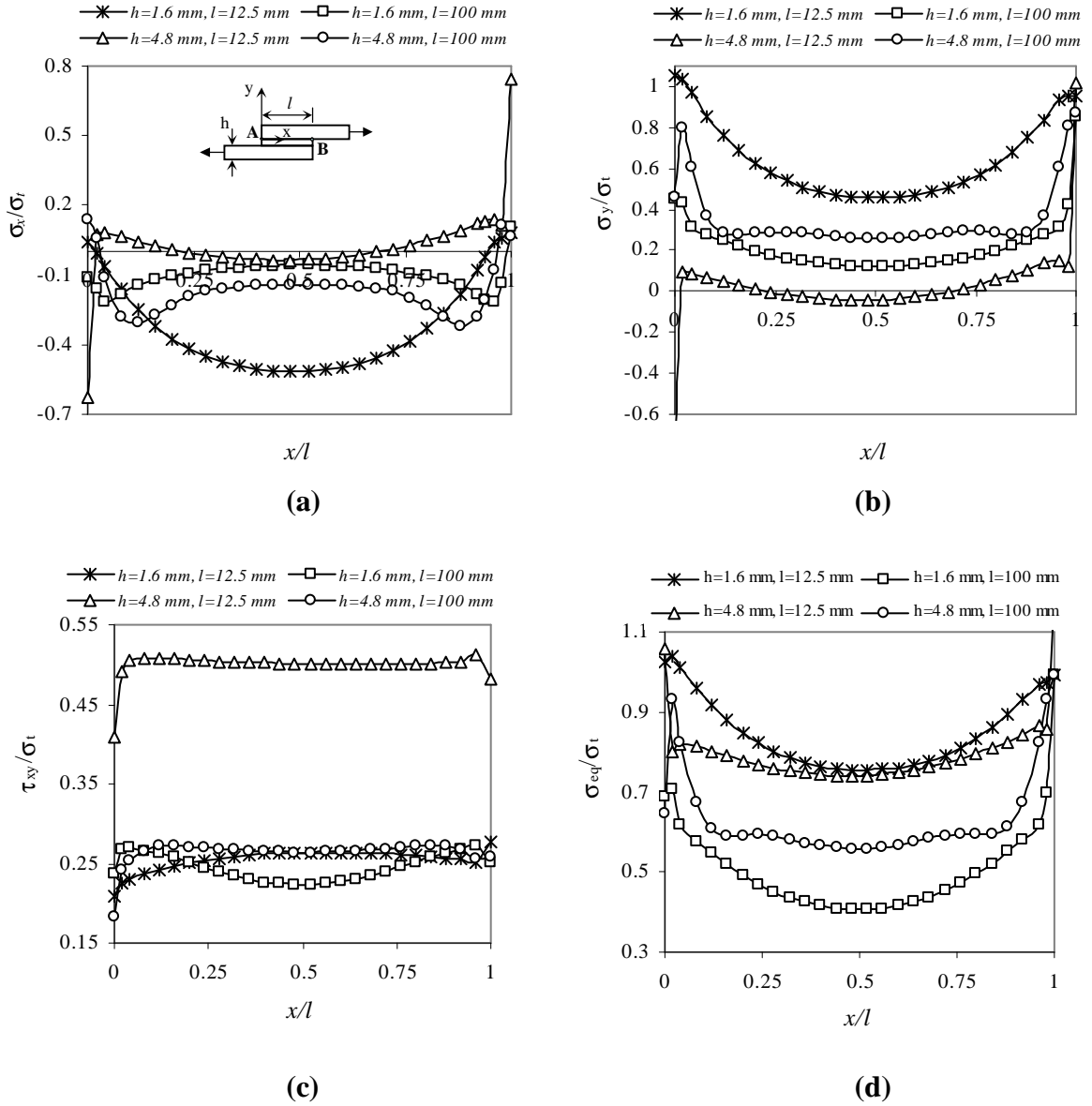
Sonlu eleman analizlerinde hasar yükü tahmin edilirken, yapıştırıcıların Çizelge 1 'de verilen çekme dayanımları dikkate alınmıştır. Tek tesirli bindirme bağlantısı yüklendiğinde, yapıştırıcı tabakasında iki eksenli gerilme (σ_x , σ_y ve τ_{xy}) durumu söz konusudur. Bu yüzden eş değer gerilmeler (σ_{eq}), denklem (3)'te verilen Drucker-Prager akma kriterine göre hesaplanmıştır ve eş değer gerilme yapıştırıcı tabakasının her hangi bir noktasında, yapıştırıcının çekme dayanımına (σ_t) ulaştığında hasarın oluştuğu varsayılmıştır.

Çizelge 4. Deneysel ve nümerik çalışmalardan elde edilen hasar yükleri.

Yapıştırılan malzeme kalınlığı h (mm)	Bindirme uzunluğu l (mm)	$P_{0.1}$ (N)	$P_{0.5}$ (N)	Hasar tipi	P^* (N)
1.6	12.5	-	$4572^{\pm 103}$	Type I	3523.5
	25	$5996.7^{\pm 404}$	$8330^{\pm 584}$	Type II	6480
	50	-	$14505^{\pm 312}$	Type III	12352.5
	100	$13106.7^{\pm 211}$	$15421.7^{\pm 430}$	Type III	16200
3.2	12.5	-	$4545.6^{\pm 223}$	Type I	3360
	25	$6396^{\pm 418}$	$8758.7^{\pm 188}$	Type I	6400
	50	-	$17546^{\pm 150}$	Type II	12000
	100	$17470^{\pm 451}$	$28506^{\pm 510}$	Type III	17600
4.8	12.5	-	$4554^{\pm 44}$	Type I	3600
	25	$6780^{\pm 219}$	$9506^{\pm 585}$	Type I	6960
	50	-	$18526^{\pm 456}$	Type I	13200
	100	$22256^{\pm 306}$	$30441^{\pm 289}$	Type II	21000

$P_{0.1}$: 0.1 MPa kürleşme basıncında elde edilen numuneler için hasar yükü; $P_{0.5}$: kürleşme basıncında elde edilen numuneler için hasar yükü; P^* : SE analizlerinden tahmin edilen hasar yükü.

Çizelge 4'te deneysel ve sonlu eleman analizlerinden tahmin edilen hasar yükleri verilmektedir. Deneysel ve sonlu elemanlar analizleri karşılaştırılırsa, SE analizlerinden elde edilen sonuçların, 0.1 MPa kürleşme basıncında hazırlanan numuneler üzerinden elde edilen deneysel sonuçlara yakınsarken, 0.5 MPa kürleşme basıncında hazırlanan numuneler üzerinden elde edilen deneysel sonuçlara yakınsamadığı görülür.



Şekil 5. Yapıştırıcı tabakası üzerindeki normal gerilme ve eşdeğer gerilme dağılımları (12.5 ve 100 mm bindirme uzunluğu ile 1.6 ve 4.8 mm yapıştırılan malzeme kalınlığındaki bağlantılar için): **(a)** normalize edilmiş σ_x gerilme dağılımı; **(b)** normalize edilmiş σ_y gerilme dağılımı; **(c)** normalize edilmiş τ_{xy} kayma gerilme dağılımı; **(d)** normalize edilmiş Drucker-Prager σ_{eq} eşdeğer gerilme dağılımı.

Yapıştırma bağlantısındaki sıcaklık değişimleri yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin termal özellikleri arasındaki büyük farktan dolayı, değişik gerilme durumlarına sebep olur. Öncelikle yapıştırma bağlantısının üretim aşamalarını düşünelim, yapıştırıcı ısıtıldığında viskozitesi düşer, yüzey ıslatma kabiliyeti ve akış özellikleri artar. Ayrıca, yapıştırıcının genleşme katsayısı yapıştırılandan daha büyük olduğu için, bu durum yapıştırılan malzemeye karşı ara yüzeyde bir reaksiyon yani artık gerilmeler oluşturur. Yapıştırıcıların yüksek sıcaklıklarda, düşük sıcaklıklara göre daha fazla şekil değiştirdikleri dikkate alınarak, kurluşma için gerekenden çok basınç uygulanması bu artık gerilmelerin büyüklüğünü artıracaktır. Katılaşma esnasında artık gerilmelerde belirli bir azalmanın olacağı düşüncesi doğrudur. Ancak, yapıştırıcı üzerine uygulanan basınç buna belirli bir oranda müsaade edecektir. Basıncıta

meydana gelen artış belirli bir noktaya kadar, bu artık gerilmelerin dolayısıyla da bağlantının dayanımında veya taşıyabildiği yük miktarında artışı beraberinde getireceği tahmininde bulunmak doğru olacaktır (Şekil 3 ve Çizelge 4).

Bağlantının dayanımı üzerine kürleşme için uygulanan basıncın etkisini açıklayabilmek, kürleşme anında oluşan termal genleşme, büzülme ve farklı sıcaklıklarda yüklü yapıştırıcının sergileyeceği mekanik davranışların bilindiği çok daha kapsamlı bir çalışma yapılmasını gerektirir.

Sonlu eleman sonuçları incelendiğinde en kritik noktaların yapıştırıcı-yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde ve bindirmenin serbest uçlarındaki zıt iki noktada olduğu görülür (Çizelge 1 içerisinde verilen şekilde görülen B ve C noktaları). Bu yüzden, yapıştırıcı tabakasındaki gerilme analizlerinde Çizelge 2 içindeki şekilde gösterilen A-B hattı dikkate alınmıştır. Yapıştırıcı tabakasında oluşan gerilme dağılımlarını karşılaştırabilmek için, A-B hattı boyunca yapıştırıcı tabakası üzerinden alınan gerilme dağılımları (σ_x , σ_y , τ_{xy} ve σ_{eq}), yapıştırıcının kendi çekme dayanımına bölünerek normalleştirilmiştir. Benzer şekilde farklı bindirme uzunluklarında oluşan gerilme dağılımlarını karşılaştırabilmek için, gerilme dağılımı hesaplanan noktanın yatay eksen üzerindeki koordinat değeri (x), kendi bindirme uzunluğuna (l) bölünerek normalleştirilmiştir (şekil 5).

Şekil 5a ve 5b yapıştırıcı tabakası üzerindeki A-B hattında oluşan normal gerilme (σ_x , σ_y) dağılımlarını gösterirken, Şekil 5c ve 5d aynı hat üzerinde oluşan kayma ve eşdeğer (τ_{xy} , σ_{eq}) gerilme dağılımlarını göstermektedir. Bu gerilme dağılımları maksimum değerlerine yapıştırıcı-yapıştırılan malzeme arayüzeyleri üzerindeki B ve C noktaları üzerinde ulaşır. Kayma (τ_{xy}) ve boyuna normal gerilme (σ_x) dağılımlarının büyüklüğü, soyulma gerilme (σ_y) dağılımlarına göre daha küçüktür (şekil 5a, b ve c). Bu yüzden, bindirmenin yapıldığı serbest uçlarda hasarın başlama ve ilerlemesi üzerine soyulma gerilmelerinin (σ_y) etkisi büyüktür.

4. SONUÇLAR

Bu çalışma çeki yüküne maruz tek tesirli bindirme bağlantısında gerilme ve hasar analiziyle ilgilidir ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Esnek karakterli yapıştırıcılar için kürleşme esnasında uygulanan basınçta meydana gelen artış, bağlantının dayanımında artışa neden olmuştur.
- Yapıştırılan malzeme kalınlığındaki artış tek tesirli bindirme bağlantılarının dayanımı ve hasarı üzerindeki kayma gerilmelerinin etkisini artırır.
- Yapıştırılan malzeme kalınlığındaki artış daha fazla eş değer gerilmelerin bindirmenin serbest uçlarından, merkeze doğru iletilmesine sebep olur. Bu aynı bindirme uzunluğunda yapıştırılan malzeme kalınlığındaki artışla, bağlantı dayanımındaki artışında sebidir.
- Tek tesirli bindirme bağlantılarında çatlak, yapıştırıcı tabakası içerisindeki B ve C noktaları veya bu nokta civarlarından başlar ve sonra her iki uça oluşmuş çatlaklar bindirmenin orta bölgesine doğru ilerleyerek birleşir.

KAYNAKLAR

1. Dean, G.D. and Crocker L.E., *Comparison of the measured and predicted deformation of an adhesively bonded lap-joint specimen*, NPL CMMT(A) 293, National Physical Laboratory, Teddington, UK, (2000).
2. Read, B.E., Dean, G.D. and Ferriss, D.H., *An elastic-plastic model for the non-linear mechanical behaviour of rubber-toughened adhesives*, NPL CMMT(A) 289, National Physical Laboratory, Teddington, UK, (2000).
3. Broughton, W.R., Crocker, L.E. and Urquhart, J.M., *Strength of adhesive joints: a parametric study*, NPL MATC(A) 27, National Physical Laboratory, Teddington, UK, (2000).
4. Dean, G.D., Crocker, L.E., Read, B., Wright, L., *Int. J. Adhes. Adhes.* **24**, 295-306 (2004).
5. Adams, R.D., Coppedale, J., Mallick, V. and Al-Hamdan, H., *Int. J. Adhes. Adhes.* **12(3)**, 185-190 (1992).
6. Wang, C.H. and Chalkley, P., *Int. J. Adhes. Adhes.* **20(2)**, 155-164 (2000).
7. Adams, R.D., *The mechanics of bonded joints structural adhesives in engineering*, Suffolk, ImechE Conference Publications (1986).
8. Harris, J.A. and Adams, R.D., *Int. J. Adhes. Adhes.* **4(2)**, 65-78 (1984).
9. Crocombe, A.D., *Int. J. Adhes. Adhes.* **15(1)**, 21-27 (1995).
10. Zgoul, M. and Crocombe, A.D., *Int. J. Adhes. Adhes.* **24(4)**, 355-366 (2004).
11. Adams, R.D. and Harris, J.A., *Int. J. Adhes. Adhes.* **7(2)**, 69-80 (1987).
12. Pires, I., Quintino, L., Durodola, J.F. and Beevers, A., *Int. J. Adhes. Adhes.* **23(3)**, 215-223 (2003).
13. Harrison, N.L. and Harrison, W.J., *J. Adhes.* **3**, 195-212 (1972).
14. Cho, D.H. and Lee, D.G., *J. Adhes. Sci. Technol.* **14**, 939-963 (2000).
15. Kim, Y.G., Lee, S.J., Lee, D.G. and Jeong, K.S., *J. Adhes.* **60**, 125-40 (1997).
16. Kim, Y.G. and Lee, D.G., *J. Adhes.*, **65**, 163-85 (1998).
17. Cho, J.H., Kong, D.I., Park, C.E. and Jin, M.Y., *J. Adhes. Sci. Technol.* **12(5)**, 507-521 (1998).
18. Humfeld, G.R. and Dillard, D.A., *J. Adhes.* **65**, 277-306 (1998).
19. Kim, J.K. and Lee, D.G., *J. Adhes. Sci. Technol.* **18**, 87-107 (2004).
20. Aydın, M.D., *Experimental and theoretical investigation of mechanical properties of the adhesive bonded single lap joint*, PhD Thesis, Dept. of Mechanical Eng., University of Atatürk (2003).
21. Drucker, D.C. and Prager, W., *Quarterly of Applied Mathematics* **10**, 157-165 (1952).
22. Raghava, R.S., Cadell, R.M. and Yeh, G.S., *J. Mater. Sci.* **8**, 225-232 (1973).
23. ANSYS®, The General Purpose Finite Element Software (Version 10.0), Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, Texas.
24. Aydın, M.D., Özel, A. and Temiz, Ş., *J. Adhes. Sci. Technol.* **18(14)**, 1589-1602 (2004).
25. Kadioglu, F. and Adams, R.D., *J. Adhes. Sci. Technol.* **16(2)**, 179-195 (2002).
26. Kadioglu, F., Vaughn, L.F., Guild, F.J. and Adams, R.D., *J. Adhes.* **78(5)**, 355-381 (2002).
27. Aydın, M.D., Özel, A. and Temiz, Ş., *J. Adhes. Sci. Technol.* **19(8)**, 705-718 (2005).
28. Chiu, W. K., Chalkley, P. D. and Jones, R., *Comput. Struct.* **53**, 483-489 (1994).
29. Chun, H.W. and Chalkley, P. D., *Int. J. Adhes. Adhes.* **20**, 155-164 (2000).
30. Ramani, K. and Zhao, W., *Int. J. Adhes. Adhes.* **17(4)**, 353-357 (1997).