

**YAPIŖTIRICIYLA BİRLEŖTİRİLMİŖ TEK TESİRLİ
KOMPOZİT- ALÜMİNYUM BAĞLANTILARDA
İSTİFLEME AÇISI VE BİNDİRME
UZUNLUĞUNUN HASAR YÜKÜNE ETKİSİ**

Betül YAZICI

**Yüksek Lisans Tezi
Makina Mühendisliğı Anabilim Dalı
Mekanik Bilim Dalı
Prof. Dr. Adnan ÖZEL
2014**

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ TEK TESİRLİ KOMPOZİT-
ALÜMİNYUM BAĞLANTILARDA İSTİFLEME AÇISI VE
BİNDİRME UZUNLUĞUNUN HASAR YÜKÜNE ETKİSİ**

Betül YAZICI

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Mekanik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2014**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

Yapıştırıcıyla Birleştirilmiş Tek Tesirli Kompozit-Alüminyum Bağlantılarda İstifleme Açısı ve Bindirme Uzunluğunun Hasar Yüküne Etkisi

Prof. Dr. Adnan ÖZEL danışmanlığında, Betül YAZICI tarafından hazırlanan bu çalışma 04/08/2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı – Mekanik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Adnan ÖZEL

İmza :

Üye : Doç. Dr. Habib UYSAL

İmza :

Üye : Doç. Dr. Hikmet ALTUN

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 28. / 08 / 2014 tarih ve 34. / 1085 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: 2012-438

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirilerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YAPIŞTIRICIYLA BİRLEŞTİRİLMİŞ TEK TESİRLİ KOMPOZİT- ALÜMİNYUM BAĞLANTILARDA İSTİFLEME AÇISI VE BİNDİRME UZUNLUĞUNUN HASAR YÜKÜNE ETKİSİ

Betül YAZICI

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Mekanik Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Adnan ÖZEL

Sunulan çalışmada, alüminyum ve farklı istifleme açlarına sahip kompozit malzemelerin yapısal yapıştırıcıyla birleştirilerek elde edilen tek tesirli bağlantı geometrisinin tek eksenli çeki yükü altında mekanik özellikleri araştırıldı. Yapıştırılan malzeme olarak AA2024-T3 alüminyum ve 16 tabakalı karbon epoksi, kompozit, yapıştırıcı olarak ise çift bileşenli yapısal yapıştırıcı DP460 kullanıldı. Deneysel çalışmada, AA2024-T3 alüminyum, $[0]_{16}$, $[0/90]_8$, $[45/-45]_8$ ve $[0/45/-45/90]_4$ istifleme açısına sahip kompozit malzemeler kullanılarak, Kompozit-kompozit (Tip I); alt ve üst yapıştırıcı aynı kalınlıkta ve dört farklı istifleme açısına sahip, Kompozit-alüminyum (Tip II); alt ve üst yapıştırıcı aynı kalınlıkta ve dört farklı istifleme açısına sahip, Kompozit-alüminyum (Tip III); aynı kalınlıkta alt yapıştırıcı olan kompozit ile üç farklı kalınlıkta ki üst yapıştırıcı olan alüminyum, Alüminyum-alüminyum (Tip IV); aynı kalınlıkta alt yapıştırıcı ile üç farklı kalınlıkta ki üst yapıştırıcı, Kompozit-kompozit (Tip V); $[0]_{16}$ istifleme açılı ve üç farklı bindirme uzunluğuna sahip, Alüminyum-alüminyum (Tip VI); üç farklı bindirme uzunluğuna sahip altı farklı bağlantı tipi üretildi ve tek eksenli çeki yükü uygulandı. Deneylerden elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, yapıştırılan malzemenin kalınlığı, bindirme uzunluğu ve takviye açısında ki değişikliklerin yapıştırıcıda ki gerilme dağılımları ile hasar yükünü etkilemiştir. Sayısal analizde alüminyum yapışkan tabaka lineer olmayan davranış sergilerken, kompozit yapışkan tabaka elastik malzemeler gibi lineer davranış sergilemiştir. Ayrıca alüminyum kullanılarak elde edilen bağlantı tipinin hasar yüküne göre, kompozit malzeme kullanılarak elde edilen bağlantı tipinin hasar yükünde önemli derecede artış olmuştur. Diğer taraftan kompozitin istifleme açıları bağlantının hasar yükünü önemli derecede etkilemiştir.

2014, 87 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Kompozit, Yapıştırıcı, Tabaka İstifleme Açısı, Sonlu Elemanlar Analizi,

ABSTRACT

Master Thesis

THE EFFECTS OF STACKING LOAD AND LENGHT OF CLAPBOARD IN MONO EFFICIDENT COMPOSITE-ALUMINUM CONNECTIONS ARE BONDED TOGETHER BY STACKING ON DAMAGE LOAD

Betül YAZICI

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Branch of Mechanical Science

Supervisor: Associate Professor. Adnan ÖZEL

In the presented study, mechanical properties of the single lap joint geometry, which was made out of aluminum or composite materials with different stacking angles and bonded by a structural adhesive, under uniaxial tensile loading were investigated. Aluminum alloy AA2024-T3 or carbon epoxy composite with 16 laminates was used as adherend, while DP460, a two-part structural adhesive, was applied as adhesive. In the experimental study, five different joint types, i.e., aluminum alloy AA2024-T3, composite materials with stacking angles of $[0]_{16}$, $[0/90]_8$, $[45/-45]_8$ and $[0/45/-45/90]_4$, were produced anuniaxial tensile loading was applied. In experimental studies, four different types of single-lap joints were produced and used namely; composite-composite (Type-I) with lower and upper adherends of the same thicknesses and four different stacking angles, composite-aluminum (Type-II) with lower and upper adherends of the same thicknesses and four different stacking angles, composite-aluminum (Type-III) with lower adherend (composite) of the same thickness but upper adherend of three different thicknesses, aluminum-aluminum (Type-IV) with lower adherend of the same thickness but upper adherend of three different thicknesses, composite-composite (Type-V) with $[0]_{16}$ stacking angles and three different overlap lenght, aluminum-aluminum (Type-VI) with three different overlap length. The results obtained from the experimental and numerical analyses showed that composite adherends with different fiber orientation angles, different adherend thicknesses and overlap length affected the failure load at the joint and stress distributions in the adhesive. In the numerical analysis, the composite adherends were assumed to behave as linearly elastic materials while the adhesive layer and aluminum adherend were assumed to be nonlinear. In addition that it is seen, failure load of the joint made out of composite material is significantly higher than the joint produced from aluminum. Meanwhile, stacking angles of the composite significantly affect the failure load of the joint.

2014, 87 Pages

Keywords: Adhesive; Composite; Joint design; ply stacking sequence; Finite element stress analysis; tension

TEŞEKKÜR

Çalışmamın her aşamasında benimle yakından ilgilenen, çalışmam boyunca araştırma zevki ve bilimsel düşünce disiplini aşılayıp ufkumu açan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Adnan ÖZEL'e minnet ve şükranlarımı sunmayı her zaman için bir borç bilirim.

Çalışmalarımın her aşamasında katkıda bulunan, deneyler esnasında tecrübe ve yardımlarından faydalandığım ve tez çalışmamın ön incelemesini yaparak bilgi ve tavsiyelerini paylaşan Sayın Yrd. Doç. Dr. Salih AKPINAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın esnasında yardımda bulunan Sayın Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ ve Sayın Doç. Dr. Murat Demir AYDIN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışmamı yürütmemde ve bitirmemde maddi desteği ile katkı sağlayan Atatürk Üniversitesi (BAP)'ne teşekkürü borç bilirim.

Öğrenim hayatımın her aşamasında, her türlü maddi ve manevi desteğini eksik etmeyen değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Betül YAZICI

Temmuz 2014

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	9
2.1. Giriş	9
2.2. Yapıştırma Bağlantıları	13
2.2.1. Gerilme çeşitleri	14
2.3. Yapıştırılacak Yüzeylerin Hazırlanması	17
2.3.1. Yüzey hazırlama metotları	20
2.3.1.a. Çözücüyle silme	21
2.3.1.b. Buharla yağ giydirme	21
2.3.1.c. Aşındırma	21
2.3.1.d. Buharla honlama.....	22
2.3.1.e. Ultrasonik temizleme.....	22
2.3.1.f. Kimyasal çözeltiyle temizleme	23
2.3.1.g. Diğer kimyasal ve mekanik metotlar.....	23
2.3.2. Primerler	24
2.4. Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	25
2.4.1. Bulk Numunelerden Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	25
2.4.2. Bağlantı Numunelerinden Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	26
2.5. Kompozit malzemeler	26
2.5.1. Kompozit malzeme türleri.....	28
2.5.2. Kompozitlerin mekanik davranışı	30
2.5.3. Kompozit malzemelerin özellikleri	32
2.5.4. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	32

2.5.5. Kompozit malzeme yapımında temel maddeler	34
2.5.6. Kompozit malzemelerin kullanımı	42
2.6. Elasto-plastik gerilme analizi	43
2.6.1. Plastisite teorisi.....	44
2.6.2. Biçim değiştirme enerji bileşenleri.....	44
2.6.3. Akma kriterleri	46
2.7. Plastik deformasyon sonucu oluşan artık gerilmeler.....	48
2.8. Tanjant (Tangential) modülü.....	49
2.9. Sonlu Elemanlar Metodu.....	50
2.9.1. Sonlu elemanlar metodunun avantajları	51
2.10. ANSYS Yazılım Programı	51
2.10.1. Preprocessing (Modelleme).....	51
2.10.2. Solution (Çözümleme)	54
2.10.3. Postprocessing (Sonuçları görüntüleme).....	56
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	57
3.1. Yapıştırılan Malzeme	57
3.2. Yapıştırıcı	60
3.3. Numuneler	61
3.3.1. Deneyde kullanılan bağlantı numunesi	61
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	70
5. SONUÇ	83
KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	88

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Kaynak, perçin ve yapıştırıcılarla birleştirmede oluşan gerilme dağılımları.	12
Şekil 2.2.	Gerilme tipleri	15
Şekil 2.3.	Bazı yaygın yapıştırma bağlantı tipleri	17
Şekil 2.4.	Yapıştırılacak yüzeylerdeki kirlerin adhezyonu düşürmesi	19
Şekil 2.5.	Donatılı veya pekiştirilmiş türüne göre kompozit malzemeler	27
Şekil 2.6.	Kompozitlerde kuvvet yönüne göre lifler ve Elastisite modülünün kompozitin bileşim oranı ile değişimi.....	31
Şekil 2.7.	Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.....	33
Şekil 2.8.	Elyaf ve matris malzemelerin gerilme uzama diyagramı.....	41
Şekil 2.9.	Asal gerilemeler	44
Şekil 2.10.	Von-Mises Kriteri	48
Şekil 2.11.	Yükün kaldırılması halinde $\sigma - \varepsilon$ diyagramı.....	48
Şekil 2.12.	Tang modülü	49
Şekil 3.1.	Gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrisi (AA2024-T3)	59
Şekil 3.2.	Gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrisi (DP 460).....	60
Şekil 3.3.	Tek tesirli bindirme bağlantı (TTBB) geometrisi.....	61
Şekil 3.4.	Deney numunelerinin üretilmesinde kullanılan kalıp.....	63
Şekil 3.5.	AA2024-T3 metalik malzemelerin yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı numunesi	64
Şekil 3.6.	AA2024-T3 metalik malzeme ile kompozitin yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı numunesi	64
Şekil 3.7.	AA2024-T3 metalik malzeme ile kompozitin yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı numunesi	65
Şekil 3.8.	AA2024-T3 metalik malzeme ile kompozitin yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı numunesi	65
Şekil 3.9.	AA2024-T3 metalik malzeme ile kompozitin yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı numunesi	66
Şekil 3.10.	Üretilmiş numuneler.....	67

Şekil 3.11.	Çekme deneylerinde kullanılan sınır şartları ve yükleme.....	68
Şekil 3.12.	Çekme yüküne maruz TTBB tipine ait üç boyutlu yükleme ve sınır koşullarının sonlu eleman modeli.	69
Şekil 4.1.	Beş farklı TTBB tipinden elde edilen maksimum hasar yüklerinin ortalaması (Tip-4b, Tip-1a, Tip-1b, Tip-1c ve Tip-1d).....	70
Şekil 4.2.	Kompozitin dört farklı istifleme açısına göre elde edilen maksimum hasar yükleri; a) Tip-I b) Tip-II.	71
Şekil 4.3.	Alüminyumun üç farklı kalınlığına göre elde edilen maksimum hasar yükleri; a) Tip-III b) Tip-IV.	72
Şekil 4.4.	İki farklı malzemeden elde edilen maksimum hasar yükleri a) [0]16 Kompozit-kompozit, b) AA2024-T3 Alüminyum – alüminyum.....	74
Şekil 4.5.	Yapıştırıcıyla birleştirilmiş TTBB kritik hasar yüzeyleri	76
Şekil 4.6.	Yapıştırıcıyla birleştirilmiş TTBB kritik hatlar; a) A-B hattı b) C-D ve E-F hattı.....	78
Şekil 4.7.	Yapıştırıcıyla birleştirilmiş TTBB kritik hatlar; a) A-B hattı b) C-D ve E-F hattı.....	81

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Pekiştirici liflerin özellikleri	29
Çizelge 2.2. Lifli Kompozitlerin Özellikleri	29
Çizelge 2.3. Cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri.....	38
Çizelge 2.4. Karbon Ve Grafit Elyafların Karşılaştırılması.....	40
Çizelge 2.5. Farklı elyaflardan oluşan kompozitlerin birim maliyetleri	41
Çizelge 3.1. AA 2024-T3'ün kimyasal bileşimi (% ağırlık)	57
Çizelge 3.2. AA 2024-T3'ün fiziksel ve mekanik özellikleri	58
Çizelge 3.3. T300/934 karbon/epoksi kompozitin mekanik özellikleri.....	59
Çizelge 3.4. Yapıştırıcının mekanik özellikleri	60
Çizelge 3.5. Deneyde kullanılan geometrik parametreler	62
Çizelge 4.1. TTBB tiplerinin deneysel ve sonlu elemanlardan elde edilen hasar yüklerinin ortalaması	76

1. GİRİŞ

Makine ve yapı elemanlarının birleştirilmesinde yapıştırıcıların kullanım potansiyeli giderek artmaktadır. Özellikle uzun zaman periyotlarında bağlantı güvenilirliğinin gerektiği havacılık, uzay, otomotiv, altyapı sistemi, tıp, elektronik paketleme, spor, inşaat ve deniz endüstrilerinde yapıştırıcılar, gün geçtikçe geleneksel bağlantı yöntemleri olan cıvata, perçin, lehim ve kaynağın yerini almaktadır.

Özellikle uçak, otomotiv sektöründe gerek parçaların birleştirilmesinde ve gerekse hasara uğramış parçaların tamirinde yapıştırma bağlantısı tercih edilmektedir. Ayrıca kompozit malzemelerin sağlam, esnek ve hafif oluşu nedeniyle hemen hemen tüm sektörlerde kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Kompozit malzemelerin kullanımının artması, kompozit malzeme ile farklı malzemelerin birleştirilmesi konusunda çalışmalar yapılmasını zorunlu kılmıştır.

Yapıştırıcı, malzemeleri bir arada tutan madde olarak tanımlanabilir. Yapışma, iki yüzeyin; moleküller, iyonlar ve atomlar arası etkileşimden dolayı çekim kuvvetleri ile bir arada tutturulması olarak tanımlanır. Yapıştırıcılar; sıvı, katı, macun ve bant gibi birçok fiziksel şekillerde bulunabilirler.

Birleştirme işlemine başlarken, yapıştırıcının birleştirilecek yüzeylerle iyi bir temasın sağlanması için sıvı formda olması gerekir. İyi bir temasın sağlanması ıslatma ya da yayılma olarak tanımlanır ve güçlü bir yapıştırma bağlantısının sağlanmasında çok önemli bir faktördür. Yapıştırıcı, yapıştırılan yüzeyi iyice ıslattıktan sonra katı hale geçer. Yapıştırıcının sıvı halden katı hale dönüşümü, çözücünün uzaklaşması, yapıştırıcının soğuması ya da kimyasal reaksiyonlarla sağlanır (Bowditch *et al.* 1986).

Farklı malzemelerin yapıştırılması özellikle son on yılda kompozit parçaların kullanımının artmasıyla popülerliğini arttırmıştır. Yapıştırıcı ile birleştirme tekniği çok

yönlü ve uygulama kolaylığından dolayı hemen hemen her malzemeye, her kalınlığa ve kompleks geometrilere uygulanabilir.

Vinson, gerekli kompozitin yapısal yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantılar alanında kapsamlı analitik çalışma yapmıştır. Ayrıca enine normal gerilme, sıcaklık ve nem değişimlerini, enine kesme deformasyon etkilerini içine alarak yapısal yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıyı analiz etmek için analitik araçlar geliştirmiştir (Pahoja 1972).

Haris and Adams (1984), yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin elastik, plastik davranışları yanında geometrik olarak non-lineer etkileri de dikkate aldıkları bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısı kullanarak hem pervazlı hem de pervazsız modeller üzerinde analizler yapmışlardır. Yapıştırılan malzemelerde von-Misses akma kriterini, dayanımı yüksek yapıştırıcılar için maksimum gerilme kriterini, esnek yapıştırıcılar için ise modifiye edilmiş von-misses akma kriterini kullanmışlardır. Elde ettikleri sonuçları teorik ve deneysel çalışmalarla karşılaştırmışlardır (Haris 1984).

Apalak *et al.* (2006) tek tesirli bir yapıştırma bağlantısında hasar analizini sayısal ve deneysel yöntemler kullanarak yapmışlardır. Tek yönde takviye edilmiş tabakalı kompozit levha kullanarak yapmış oldukları çalışmalarında yapıştırıcı ve kompozit levhada meydana gelen hasarı ayrı ayrı ele almışlardır. Sayısal çalışmalarını ilerlemeli hasar analizi metodunu kullanarak ANSYS sonlu elemanlar programında yapmışlardır. Sayısal hasar yüklerinin tespitinde, kompozit levhada meydana gelen hasarı Hashin ve yapıştırıcıda meydana gelen hasarı ise Von Mises hasar teorilerine göre elde etmişlerdir.

Aydın *et al.* (2007) Tek tesirli bir yapıştırma bağlantısında bağlantı mukavemeti üzerine kürleşme basıncının etkisini deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak araştırmışlardır. Sayısal hasar yüklerinin tespitinde Drucker Prager akma kriterlerini kullanmışlardır. Çalışma sonucu elde edilen deneysel ve sayısal hasar yüklerinin 0.1 MPa kürleşme basıncı için birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür.

Yarrington *et al.* (2005) farklı yapıştırma bağlantısı türleri için hasar analizini deneysel ve sayısal yöntemler kullanarak yapmışlardır. Her bir bağlantı türü için farklı hasar kriterlerinin kullanıldığı çalışmalarında, sayısal ve deneysel hasar yüklerinin birbirine yaklaşım oranı 0.77 ile 0.95 oranında elde edilmiştir.

Taib *et al.* (2005) epoksi reçine kullanılarak yapıştırma bağlantısı ile birbirine bağlanmış olan cam fiber/epoksi kompozit levhalarda hasar yüklerini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında farklı bağlantı şekilleri, yapıştırıcı kalınlığı ve levha mukavemetinin değişimi için hasar yüklerinin ve tipinin değişimini incelemişlerdir.

Fawzia *et al.* (2006) inşaat ve köprü yapılarında çelik malzemeleri güçlendirmek için levhalar üzerine CFRP kompozit malzemesi kaplayarak çelik plakaları çift takviyeli olarak yapıştırmışlardır ve elde ettikleri bu bağlantılarla deneysel ve nümerik olarak çalışmışlardır. Deneysel ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlarda bindirme uzunluklarını arttırdıkça taşınan hasar yükünün arttığını tespit etmişlerdir.

Tsai and Morton (1944a), yapıştırmanın yapıldığı bölgenin serbest uçlarındaki momentlerin hesaplanması üzerine büyük dönmelerin etkisini analiz etmişler ve yapılan yapıştırma bağlantısı kısa ise, serbest uçlarda oluşan momentler üzerine dönmelerin etkisini ifade etmişlerdir. Bununla birlikte Tsai and Morton (1944b) büyük bindirme uzunlukları için Goland and Reissner'in (1944) analizinin doğru sonuçlar vermediğini, kısa bindirme uzunlukları içinse oldukça doğru sonuçlar verdiğini bildirmişlerdir. Hart-Smith (1973) tarafından yapılan analiz, Goland and Reissner'in (1944) analizinden daha doğru sonuçlar vermesinden bu doğruluk büyük deformasyonları içermediğinden halen kısa bindirme uzunlukları için geçerlidir (Hart-Smith 1973).

Tsai *et al.* gerilme yüküne maruz kalan bir püskürtme dolgu ve tabakalı polimerik kompozit yapıştırıcıyla tek bindirmeli yapısal yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıları analiz etmişlerdir. Böyle bir malzeme ve bağlama şeklindeki mekanik deformasyondan

dolayı ortaya çıkan problemin eliminasyonu için sonlu eleman analiz yöntemini kullanmışlardır (Tsai 1995).

Khalili *et al.* (2008) tarafından yapılan bir çalışmada tek tesirli yapıştırma bağlantısı ile farklı oryantasyon açılara sahip kompozitleri birleştirerek farklı yükleme şartlarında incelemiştir. Bu çalışmada takviye açısı olarak 0^0 derecenin her yükleme şartında bağlantı mukavemeti açısından daha iyi sonuç verdiğini, 90^0 derecenin ise en kötü sonucu verdiği sonucuna varılmıştır.

Aynı veya farklı iki malzeme özelliklerine sahip plakaların birbirine dik açılarda birleştirilmesi gerektiğinde, ortak bir problem ortaya çıkmaktadır. Bağlantı geometrisi ve yükleme şartlarından dolayı, genellikle soyulma ve yarıma gerilmeleri meydana gelmektedir. Bu gerilmeleri azaltabilecek ve bağlantıdaki yapışma alanının çoğunluğunun basma gerilmesi altında olması sağlanacak şekilde plakalardan birinin veya ikisinin de şekillendirilmesi ile bu problemler çözümlenebilmektedir. Bu çözümler özellikle köşe bağlantılarının analiz edildiği ve tasarlandığı bir seri çalışmada (Khalil and Davies 1988; Davies and Khalil 1990; Apalak and Davies 1993, 1994; Apalak and Engin 1997) tarafından sunulmuştur. Apalak ve diğerleri çalışmalarında yapıştırıcının lineer veya lineer olmayan elastik izotropik bir malzeme kabul edildiği sonlu eleman tekniğini kullanarak, köşe bağlantılarında oluşturulan yapıştırıcı gerilmelerine ve bağlantının toplam mukavemetine geometri ve malzeme temelli özelliklerinin etkilerini incelemişlerdir. Düşük rijitliğe sahip olan bağlantıda büyük dönme ve yer değiştirmelerin olduğunu ve bu bölgelerin yapıştırıcı tabakası da ihtiva etmesi halinde, bağlantıdaki gerilme ve deformasyonların tahmininde lineer olmayan etkilerin önemli rol oynadığını göstermişlerdir. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş ankastre bağlantılarda geometrik bakımdan lineer olmayan davranışın, yükleme şartları ve geometriye bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Bu bağlantılar, uygulamalarda kullanılacak tarzda ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Bindirme bağlantılarında bağlantı mukavemetinin başarılı olarak tahmini için ilk adım, yük altında zayıflamaya neden olan gerilme, şekil değiştirme ve yapışma mekanizmasını iyi anlamaktır. En basit gerilme analizi, iki rijit plakayı (yapışan) ve aralarında sadece kayma tesiriyle şeklini değiştiren yapıştırıcıyı göz önüne alır. Bindirme bağlantılarında; bindirme bölgesi boyunca yapıştırılan parçaların çekme deformasyonları, bindirme uçlarında kayma gerilmelerinin yığılmasına neden olur. Volkersen (1938) “diferansiyel şekil değiştirme” olarak bilinen bu tesiri ilk göz önüne alan araştırmacıdır. Bu çalışmada tek tesirli bindirmeli bağlantılar, sadece yapıştırıcı tabakası kayma deformasyonlarına maruz ve deforme olmayan yapışanlardan oluşan bir boyutlu çubuk kabulüyle basit kayma modeli altında analiz edilmiş ve tek tesirli bindirmeli yapıştırıcı bağlantısının tam kayma gerilmesi altında olduğu kabul edilen bir klasik mekanik yaklaşım kullanılmıştır. Ancak bu bağlantılarda yük hattı ile simetri ekseninin çakışmaması, bağlantının dönmesine neden olur. Dolayısıyla yapıştırıcı bağlantısı, bindirme uçlarında kayma gerilmelerine ilaveten soyulma gerilmelerine de sahiptir. Bu nedenle yapışan malzemeler çekme etkisinden başka eğilme momentlerine de maruzdur. Goland and Reissner (1944), Volkersen’in analizinde ihmal edilen bu eğilme momentlerini de göz önüne alarak teoriyi düzeltmişler ve eksantrik yükleme etkilerini içeren tek tesirli bindirme bağlantısı için bir deformasyon modeli sunmuşlardır. Ancak Benson (1969), Goland and Reissner’in teorisinde eğilme momenti faktörünün türetilmesinde bindirme bölgesinin dönmesine müsaade ettiğini, ancak dönme olayının olmadığını kabul ederek bağlantıda iç gerilmeler türettiğini ve bunun düşük yükler için mümkün olmadığını ifade etmiştir.

Yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların deformasyon ve gerilme hallerinin daha doğru tespit edilebilmesi için, yapıştırılan malzemelerde ortaya çıkan eğilme, kayma ve normal gerilmelerinin de dikkate alınarak modellenmesi gerektiği açıktır. İlk olarak Renton and Vinson (1975) bu şartları göz önüne alarak, düzlem içi yüklere maruz tek tesirli bindirme bağlantısı şeklinde birbirine birleştirilmiş iki tabakalı kompozit plakanın lineer elastik davranışını belirlemek için bir analitik model sunmuşlar ve şu neticeleri elde etmişlerdir:

. Yapıştırıcıdaki dikey doğrultudaki normal gerilmeler, bindirme bölgesinin uçlarında en yüksek değere erişmektedir. İlgili bağlantıların simetrik olmamasından dolayı ortaya çıkan eğilme, artan düzlem içi yükleme ile birlikte orantılı artar.

. Yapıştırılan özdeş malzemeler için kayma ve çekme modüllerinin etkileri birleşir. Herhangi bir yay sistemi için, yay (kayma modülü) ne kadar direngen ise bağlantı uçlarındaki maksimum gerilmeler de o kadar büyüktür. Ancak bu etki kararlı bir şekilde lineer değildir ve düşük kayma modülü değerleri için bu maksimum gerilmeler, kayma modülü değerinin küçük düzensizliklerine oldukça hassasiyet gösterir. Bağlantı uçlarındaki bu yüksek gerilmeleri belirgin olarak azaltmak için başka bir yol ise daha az direngen bir yapıştırıcı kullanmaktır.

. Özellikle kırılğan bir yapıştırıcı ile tabaka yerleşimine normal gerilmenin hassasiyeti oldukça önemli olabilir. Şöyle ki, yapıştırılan malzemelerin yük taşıma kabiliyetinin artırılması kopmanın yapıştırıcıda meydana gelmesine sebep olacaktır, aksi halde yapıştırıcıda kopma beklenmeyebilir.

. Bindirme boyu artırılırken (bağlantının geri kalan kısmının toplam boyunun sabit olması şartıyla) yapıştırıcıda oluşan kayma ve normal gerilmelerinin her ikisi de düşecektir. Ancak belirli bir bindirme boyundan sonra bu etki ortadan kalkacaktır.

. Yapıştırılan daha direngen malzemeler, bindirme bölgesinin uçlarında gerilme yığılmalarına neden olan uç kayma gerilmesi ve moment değerlerini azaltacak olan yanal çökmeleri de düşürecektir.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların analizinde genellikle yapıştırıcı özelliklerinin lineer elastik veya lineer visko-elastik olduğu kabul edilmiştir. Yapıştırıcının ve yapışanların artan yük altında elastik-plastik özellikleri sıkça ihmal edilmiştir. Çözüm ise, yapıştırıcının ve yapışanların lineer olmayan özelliklerini içeren lineer olmayan

sonlu eleman metodu veya sonlu farklar metodu gibi sayısal tekniklerin kullanılmasıdır (Zienkiewicz and Taylor 1991). Yapıştırıcılı bindirme bağlantılarının gerilme analizinde lineer elastik veya elastik-plastik teorilere dayanan sonlu elemanlar metodu ilk defa Liu (1976) tarafından uygulanmıştır. Farklı bağlantı parametreleri (geometrik boyutlar, malzeme özellikleri, yükleme şartları gibi) için yapıştırıcı tabakasındaki gerilme dağılımlarını ve yığılmalarını incelemiş ve karşılaştırmıştır.

Yük taşıyan yapılarda yapıştırıcıyla birleştirmenin kullanımı, zaman ve maliyetin azaltılması, yüksek korozyon ve yorulma direnci, çatlak geciktirmesi ve iyi sönüm karakteristikleri gibi özelliklerinden dolayı hava/uzay ve otomotiv endüstrilerinde de büyük ilgi görmüştür. Dayanıklı ve güvenilir bağlantı tasarımları için gerilme analizleri yapılmalıdır. Sonlu eleman metodu gibi sayısal metotlar yoluyla gerilme analizleri daha kolay yapılabilmekte ve bilgisayar destekli tasarım sistemleri ile birleştirilebilmektedir.

Metalik malzemelerin birleştirilmesinde genellikle kaynak veya perçin, kompozit veya plastik malzemelerde ise perçin kullanılır. Perçinler fazla ağırlığa, gerilme yığılmalarına ve perçin delikleri birleştirme bölgesinin zayıflamasına ve kaynağın ise parçanın mekanik özelliklerinin zayıflatmasına neden olduğu gözlenmiştir.

Yukarıda belirtilen olumsuzluklar nedeniyle geleneksel birleştirme yöntemleriyle kompozit malzeme ile metal malzemelerin birleştirilmesi çok zor olduğu ve bunun için yapılacak olan bu çalışma ile geleneksel birleştirme yöntemlerinde meydana gelen olumsuzlukları metal ile kompozit malzemenin birleştirilmesinde yapıştırıcı ile bağlantı yöntemi kullanılarak giderilmesi hedeflenmektedir.

Bu çalışma ile yukarıda sayılan olumsuzlukların giderilmesi için yapıştırıcı kullanarak farklı malzemelerin birleştirmesinde dikkat edilecek hususlar önerilmektedir. Bu yöntemle parçaların bağlantı mukavemeti olumsuz bir şekilde etkilenmeden birleştirilebilecek ve aynı zamanda kompozit ile metal malzemelerinde birleştirilmesi mümkün olacaktır.

Yapılan bu çalışmada;

- Normal şartlarda farklı tip (sıvı ve film yapıştırıcılar) ve farklı mekanik davranış (esnek ve sert) sergileyen yapısal yapıştırıcılardan uygun boyutlarda bulk numuneler elde edilip mekanik davranışları belirlendi.
- Farklı metalik (özellikle havacılık uygulamalarında yoğun olarak kullanılan AA 2024-T3 vb.) ve kompozit malzemelerin mekanik özellikleri literatürden alındı (Akpınar 2012).
- Farklı takviye açısına sahip kompozit malzemelerle farklı kalınlıktaki metalik malzemeler yapıştırıcıyla tek tesirli bağlantı biçiminde yapıştırılarak bağlantı numuneleri elde edilip, bu bağlantı numunelerinin çeki yükü altındaki deneysel davranışları saptandı.
- Elde edilen bu numunelerinin ANSYS Paket programındaki modelini oluşturarak sayısal sonuçları elde edildi.
- Bağlantı numunelerinden elde edilen deneysel ve sayısal verileri karşılaştırıldı ve uyumlu oldukları gözlemlendi.
- Bağlantı numunelerinin parça kalınlığı, bindirme uzunluğu, kompozit tabaka sayısı ve takviye açısı gibi optimum geometrik parametreler tespit edildi.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Giriş

Yapıştırıcı, malzemeleri bir arada tutan madde olarak tanımlanabilir. Yapışma, iki yüzeyin; moleküller, iyonlar ve atomlar arası etkileşimden dolayı çekim kuvvetleri ile bir arada tutturulması olarak tanımlanır (Kinloch 1987).

Yapıştırıcılar; sıvı, katı, macun ve bant gibi birçok fiziksel şekillerde bulunabilirler.

Yapıştırıcıların iki temel yapıştırıcı ile birleştirme tipi vardır. Bunlar;

- Yapısal Yapıştırıcılar
- Yapısal Olmayan (Yapıştırma Şartlarına Göre) Yapıştırıcılar

Yapısal yapıştırma, tasarım sınırları içerisinde yapının sürekliliğini kaybetmeden yük taşıyabilen ve birleştirilecek elemanlara dayanım katan yapıştırıcı ile birleştirme sistemidir. Yapısal yapıştırıcılar, uzay sanayi, otomotiv endüstrisi, gemicilik, inşaat sektörü vb. birçok alanda kullanılmaktadır.

En önemli yapısal yapıştırıcılar şunlardır (Aydın 2003):

Akrilik: Bu yapıştırıcılar genellikle daha kirli ve daha az yüzey hazırlığını tolere edebilecek kimyasal içeriğe sahiptirler. İki bileşenli, esnek bağlantılı yapıştırıcılar olup kayma, soyulma ve darbe dayanımları iyidir.

Anaerobik: Bu yapıştırıcılar akrilik polyester reçine esaslı olup yüksek ve kohezif dayanım oluşturmalarına rağmen düşük yapıştırıcı dayanımına sahiptirler. Boşluk doldurma özellikleri iyi değildir.

Cyanoacrylate: Bu yapıştırıcılar akrilik monomer esaslı nispeten daha düşük viskoziteye sahip yapıştırıcılar olup darbe dayanımları düşüktür. Neme ve kimyasal

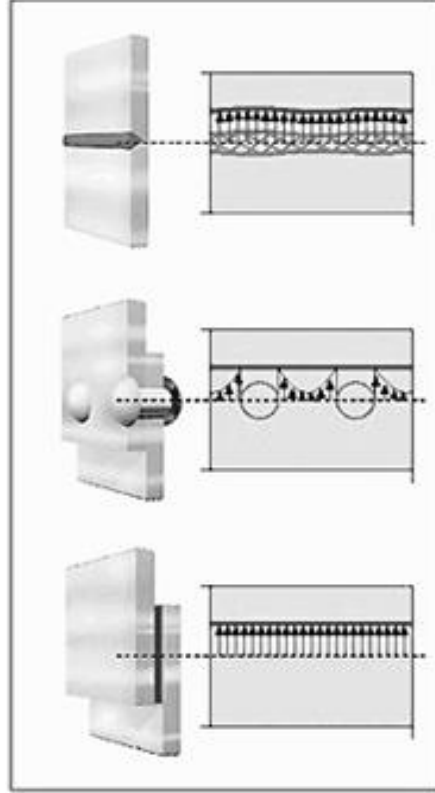
Alternatif bir birleştirme ve onarım metodu olan yapıştırıcıların diğer metotlara göre bir takım avantaj ve dezavantajları vardır.

Avantajları;

- Düzgün gerilme dağılımı (Şekil 2.1) ve daha büyük yük taşıma alanı temin edilmesi,
- Herhangi bir şekilde ince ve kalın malzemelerin birleştirilmesi,
- Benzer veya farklı malzemelerin birleştirilmesi,
- Yorulma ve tekrarlı yük dayanımı,
- Düzgün yüzeyli birleştirme olanağı,
- Değişik ortamlara karşı bağlantıda yalıtım olanağı sağlaması,
- Birçok teknolojiye kolaylıkla uygulanabilir olması,
- Isı ve elektrik iletkenliğine karşı yalıtkan olarak kullanılabilmesi,
- Yüksek darbe ve titreşim sönümleme kabiliyetine sahip olması,
- Dikkat çekici dayanım/ağırlık oranı,
- Mekanik birleştirme yöntemlerinden daha kolay ve ucuz olması.

Bu kadar avantaj sunmasına karşın yapıştırıcı kullanımının belirli dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- Parçaların birleştirilmesi zordur. Yüzey hazırlığı ve temizliği gerektirir.
- Yapıştırıcının mekanik özellikleri zaman ve sıcaklığa bağımlılık gösterir.
- Yapısal yapıştırıcılar, iyi mekanik özelliklere sahip olmalarına rağmen, soyulma mukavemetleri düşüktür (Orak 2007)
- Bağlantı ya da yapıştırıcının performansı ile ilgili verilerdeki eksiklikler.
- Yapıştırma bağlantısının ömrü maruz kaldığı çevresel etkilere bağımlıdır.
- Çekme ve kayma durumlarında mukavemet ve toklukları nispeten düşüktür.



Şekil 2.1. Kaynak, perçin ve yapıştırıcılarla birleştirmede oluşan gerilme dağılımları (Loctite 1998)

Yapıştırıcı ile malzeme birbirleriyle temas edince, yapıştırma bağlantısı sistemi doğar. Bu sistem, yapıştırıcıyı, malzemeyi, malzemeye uygulanan uygun yüzey işlemini ve bu üç bileşen arasında oluşan ara yüzey/ara fazı kapsamaktadır. Yapıştırma bağlantılarının durabilitesini değerlendirmek için, bu bileşenlerin dış yüklere, mekanik ya da çevresel faktörlere karşı nasıl tepki vereceğinin iyi anlaşılması gerekir. Yapıştırma bağlantıların performansı ve durabilitesi, bunların dışında malzeme ve yapıştırıcı özelliklerine, malzeme ve yapıştırıcı arasındaki fiziksel-kimyasal iç etkileşime, bağlantı şartlarına, bağlantı geometrisine, bağlantıdaki artık gerilmelere ve yapıştırma hattındaki hatalara bağlıdır. İyi bir yapışma ve optimum bağlantı performansı verecek yapıştırıcı-malzeme kombinasyonu için yukarıdaki faktörlerin hesaba katılması gerekir (Parvatareddy 1997). Birleştirme işlemine başlarken, yapıştırıcının birleştirilecek yüzeylerle iyi bir temasın sağlanması için sıvı formda olması gerekir. İyi bir temasın sağlanması ıslatma ya da yayılma olarak tanımlanır ve güçlü bir yapıştırma bağlantısının sağlanmasında çok önemli bir faktördür. Yapıştırıcı, yapıştırılan yüzeyi iyice ıslattıktan sonra katı hale

geçer. Yapıştırıcının sıvı halden katı hale dönüşümü, çözücünün uzaklaşması, yapıştırıcının soğuması ya da kimyasal reaksiyonlarla sağlanır (Bowditch *et al.* 1986).

Faklı malzemelerin yapıştırılması özellikle son on yılda kompozit parçaların kullanımının artmasıyla popülerliğini arttırmıştır. Yapıştırıcı ile birleştirme tekniği çok yönlü ve uygulama kolaylığından dolayı hemen hemen her malzemeye, her kalınlığa ve kompleks geometrilere uygulanabilir.

2.2. Yapıştırma Bağlantıları

Yapıştırıcıların en büyük fonksiyonu parçaları bir araya getirerek birleştirmektir. Geleneksel mekanik birleştirme yöntemlerinden daha uygun bir gerilme dağılımı sağlayarak yük iletimi sağlamak mümkündür. Bununla birlikte yapıştırıcılar daha düşük maliyet ve ağılıkta bağlantının oluşturulmasına ek olarak mekanik birleştirme yöntemlerine eşdeğer veya daha fazla bağlantı dayanımı sağlayabilmektedir.

Pürüzsüz bir yüzey yapıştırıcılarla birleştirme yönteminin avantajlarından biridir. Diğer birleştirme tekniklerinde meydana gelen düzensizlikler söz konusu değildir. Bu hem işlevsellik hem de görünüş açısından önemli bir özelliktir. Uzay sanayi dış süreksizliklerin minimize edilmesi ve mümkün olduğu kadar sıcaklıktan korunmak için böyle yapıları gerektirir. Bu tür yapılara, helikopter rotor bıçakları örnek olarak verilebilir.

Mekanik sönümleme yapıştırıcıların kullanımıyla bir yapıda gerçekleştirilebilir. Darbe ve tekrarlı yüklemelere karşı olan dayanımlarından dolayı yapıştırıcıların kullanımıyla yorulma dayanımı artırılabilir. Uygun bir şekilde dizayn edilmiş bağlantıda, genellikle yapıştırılan malzemeler yapıştırıcıdan önce yorulma gösterirler.

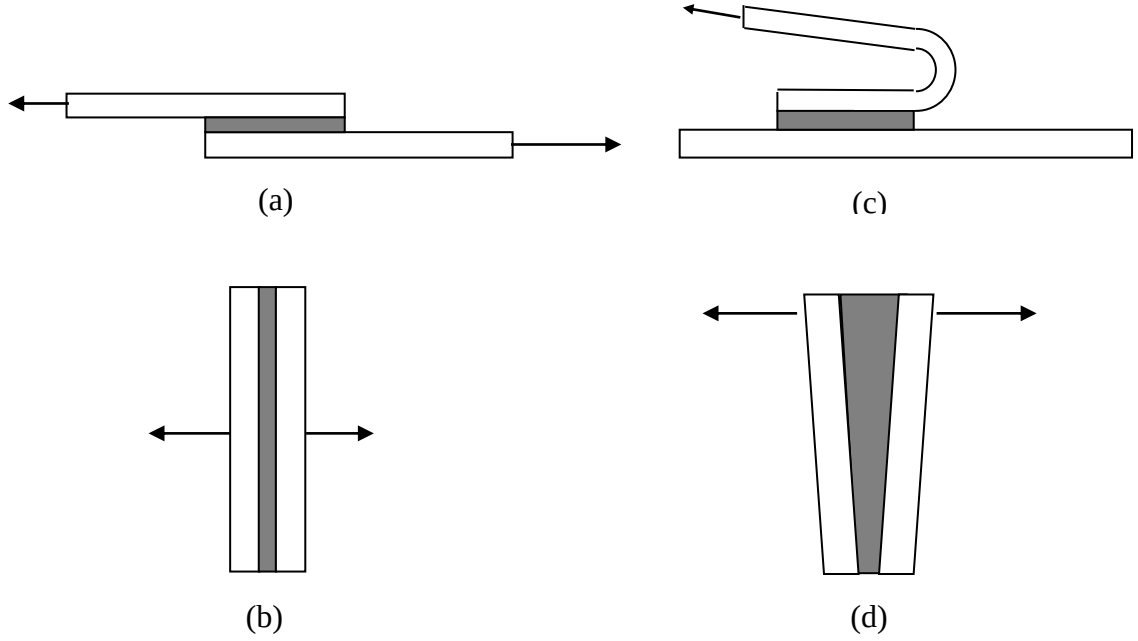
Yapıştırma bağlantısının dizaynında kullanılacak uygun yapıştırıcının seçimi önemli olduğundan dikkat edilecek hususlar;

- . Yapıştırıcı ile birleştirilmesi düşünülen malzemenin yapışabilme yeteneği
- . Çalışma şartları (uygulanacak yük tipi, elektrik veya termal iletkenlik, kimyasal faktörler)
- . Çevresel faktörler
- . Üretim prosesi ile ilgili parametrelerin belirlenmesi (uygulanma yöntemi, kürleşme şartları gibi)
- . Maliyet
- . Sağlık şartlarına uygunluk

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların analizinde genellikle yapıştırıcı özelliklerinin lineer elastik veya lineer visko-elastik olduğu kabul edilmiştir. Yapıştırıcının ve yapışanların artan yük altında elastik-plastik özellikleri sıkça ihmal edilmiştir. Çözüm ise, yapıştırıcının ve yapışanların lineer olmayan özelliklerini içeren lineer olmayan sonlu eleman metodu veya sonlu farklar metodu gibi sayısal tekniklerin kullanılmasıdır (Zienkiewicz and Taylor 1991). Yapıştırıcılı bindirme bağlantılarının gerilme analizinde lineer elastik veya elastik-plastik teorilere dayanan sonlu elemanlar metodu ilk defa Liu (1976) tarafından uygulanmıştır. Farklı bağlantı parametreleri (geometrik boyutlar, malzeme özellikleri, yükleme şartları gibi) için yapıştırıcı tabakasındaki gerilme dağılımlarını ve yığılmalarını incelemiş ve karşılaştırmıştır.

2.2.1. Gerilme çeşitleri

Yapıştırma bağlantılarında dört önemli gerilme etkili olur (Şekil 2.2). Bunlar; çekme, kesme, soyulma (peel) ve çekme-makaslama (cleavage) dır. Bağlantı mukavemetinden en yüksek verim elde etmek için bu gerilme çeşitleri göz önünde bulundurulmalıdır (Temiz 2003).



Şekil 2.2. Gerilme tipleri

* (a) Kesme, (b) Çekme (c) Soyulma (d) Çekme-makaslama

a. Kesme

Kesme yükleri, yapıştırılan alanın tümüne düzgün etki eder (Şekil 2.2.a). Bu tür yüklemde yapışma alanının tamamının etki altında olması, bağlantı ömrünü arttırarak ekonomiklik sağlar. Mümkün olduğu yerlerde bağlantılar, yükün büyük bir kısmı kesme yükü olarak iletilebilecek şekilde oluşturulmalıdır.

b. Çekme

Şekil 2.2.b’de görüldüğü gibi, bu tür yüklemde kuvvetler yapıştırıcı tabakasına dik olarak etkimektedir. Bu kuvvetlerden dolayı oluşan gerilme, yapışma alanına eşit şekilde dağılmaktadır. Ama bağlantıya sadece bu tür gerilmenin etkidüğinden emin olmak her zaman mümkün değildir. Eğer kuvvetler eksenden kaçık olarak etkimekte ise o zaman yapışma alanına gerilmenin eşit yayılma avantajı kaybolacak ve bağlantının bozulma ihtimali artacaktır. Önemli olan diğer bir nokta da, yapıştırılan malzemenin kalın olması gerektiğidir. Maruz kaldığı yük etkisi ile fark edilir oranda bir eğilme oluşmamalıdır. Aksi halde, gerilme dağılımı eşit olmayacaktır.

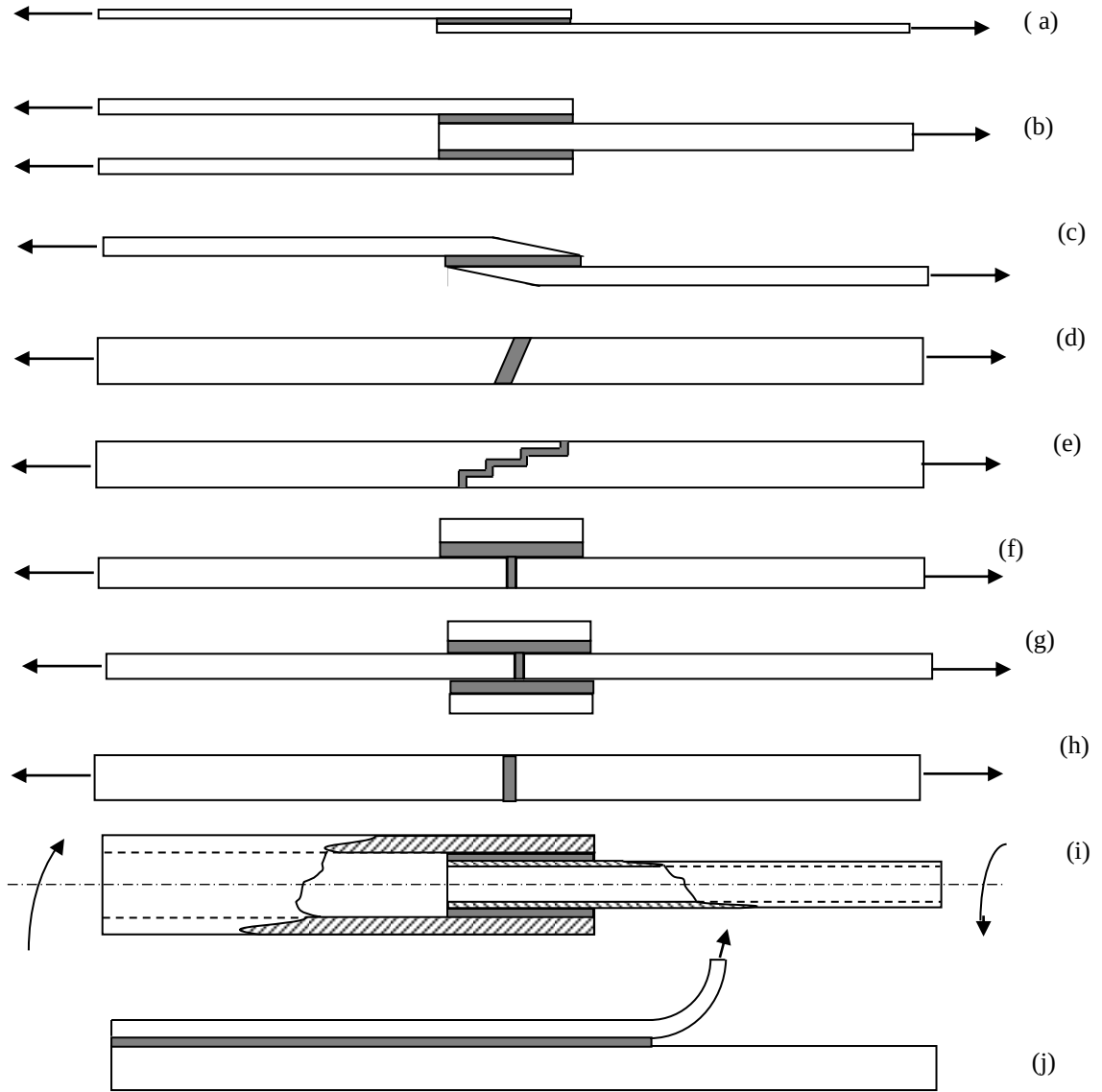
c. Soyulma

Bu tür gerilmenin oluşması için yapıştırılan malzemelerden biri veya her ikisi de esnek olmalıdır (Şekil 2.2.c). Bu tür yüklemede bağlantı sınırında oluşan gerilme çok yüksektir. Bağlantı çok geniş veya yük düşük olmadıkça yapıştırma bağlantısı çabuk bozulacaktır. Mümkün oldukça bu tür yüklemeden kaçınılmalıdır.

d. Çekme-makaslama

Bu tip yükleme, çoğunlukla eksenden kaçık çekme kuvvetinin veya momentin sonucudur. Önceki gerilmelerin aksine bu gerilme, yapışma alanına eşit olmayan şekilde etkimekte ve bağlantının bir tarafında yoğunlaşmaktadır. Bu gerilmeyi karşılamak için yeterli derecede yapışma alanına ihtiyaç vardır. Çekme veya kesme gerilmelerine göre bu alan daha fazla olduğu için bu tarz bağlantı tavsiye edilmez; çünkü maliyet artar (Kayacan 1988).

Mühendislikte kullanılan yapıştırma bağlantı tiplerinden en önemli olanları Şekil 2.3’de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.3. Bazı yaygın yapıştırma bağlantı tipleri

*(a) tek tesirli bindirme, (b) çift tesirli bindirme, (c) boyun bindirme, (d) açılı bindirme, (e) teraslama, (f) tek takviyeli bindirme, (g) çift takviyeli bindirme, (h) alın bağlantı, (i) silindirik bindirme, (j) soyulma (Temiz 2003), (Adams and Wake 1984)

2.3. Yapıştırılacak Yüzeylerin Hazırlanması

Yapıştırma bağlantıları, yapıştırıcı ve yüzeyler arasında tam temas olmamasından olumsuz etkilenirler. Başarılı bir yapıştırma için tasarımda, uygun bir yüzey hazırlama yöntemi ve uygun yapıştırıcı belirlenmelidir.

Yüzey hazırlığı, yapıştırıcı kullanılarak yapılan birleştirme yönteminin en kritik aşamasıdır. Yüzey hazırlamanın amacı; sürekli ve yüksek dayanımlı bir yapıştırma bağlantısı sağlayacak yapıştırılan malzeme yüzeylerinin oluşturulabilmesidir. Pratik olmamasına karşın, yapıştırılacak malzemelerin; (oksit, boya, krom ve fosfor gibi tabakalar araya girmeden) yapıştırıcıyla direkt temas etmesi istenir. Bu tabakalar “Zayıf Sınır Tabakalar” olarak adlandırılır. Böyle tabakaları ihtiva eden malzemeleri yapıştırma yöntemiyle bir araya getirme çabası, tozlu bir yüzeye, basınca hassas bant uygulamasına benzer. Bu şartlar altında yapıştırıcı, yapıştırılacak malzeme yüzeyleri ile asla temas içinde olmayacaktır. Yapıştırma için yapılan yüzey hazırlık yönteminin seçimi, sistemli bir yaklaşım gerektirir. Görünürde olan ya da olmayan birçok faktör bu seçimi etkiler. Parça boyutu ve kullanılan ekipmanlar görünürde olan faktörler arasındadır. Bağlantı dayanımının zayıflamasına neden olabilecek aktif kimyasalların hızlı tüketimi veya yabancı materyallerin toplanması, daha az görünürde olan faktörlere örnek olarak verilebilir.

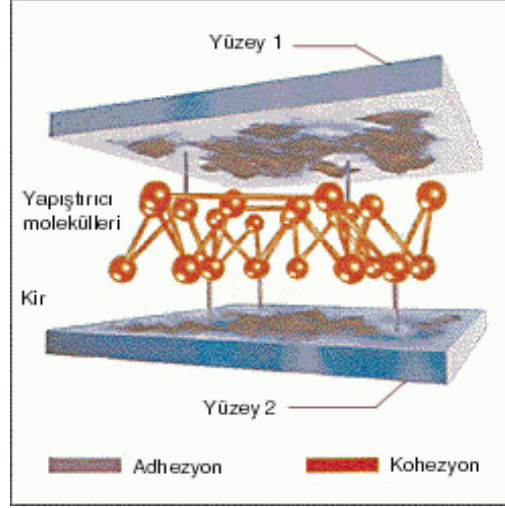
Tatmin edici bir yüzey hazırlığı yapılmadığı takdirde; bağlantı, yapıştırıcı-yüzey temas bölgesinden kopacaktır. Doğru yüzey hazırlama yapıldığında, yapıştırıcı ve/veya astardan beklenen kuvvet elde edilebilecek ve kopmalar yapıştırıcının kohezyon kuvvetinin aşılması ve yapıştırıcı tabakasının ikiye ayrılması şeklinde olacaktır. Yüzey hazırlama, yalnızca yapıştırma bağlantısının başlangıçtaki dayanımı için değil, aynı zamanda uzun süreli dayanımı için de çok önemlidir.

Yapışma kuvveti büyük ölçüde yapıştırılacak yüzeyler ile yapıştırıcı arasındaki adhezyon kuvveti tarafından belirlenir. Yapıştırıcılar, aynı veya farklı malzemeden yapılmış yüzeyler arasında bir çeşit köprüdür.

Yapışma mekanizması şunlara bağlıdır:

- . Yapıştırıcının yüzeye yapışma kuvveti- adhezyon
- . Yapıştırıcının iç kuvveti- kohezyon

Yüzeyler iyi temizlendiği ve ön-işlem yapıldığı oranda yapışma kuvvetinin artacağı iyi anlaşılmalıdır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Yapıştırılacak yüzeylerdeki kirlerin adhezyonu düşürmesi (Loctite 1998)

Adhezyon, iki farklı maddenin temas yüzeylerindeki yapışma kuvvetidir. Van der Waals kuvvetleri olarak adlandırılan çekim ve yüzeye tutunma fiziksel kuvvetleri, yapışmada en önemli faktördür. Eğer yapıştırıcı, mekanik olarak işlenmiş yüzeylerdeki pürüzlere tam olarak temas edemezse, bu moleküller arası kuvvetler oldukça zayıflar. Bu nedenle yapıştırıcının yüzey pürüzlerine tam olarak nüfuz etmesi ve bütün yüzeyi ıslatması gerekir. Dolayısıyla, yapıştırmanın kuvveti, hem yüzeyin ıslatılmasına (maksimum moleküller arası temas için) ve hem de yüzeyin yapışma özelliklerine bağlıdır. Belirli bir yapıştırıcı yüzey gerilimi için ıslatma, yapıştırıcı sürülen yüzeyin yüzey gerilimine ve yapıştırıcının viskozitesine bağlıdır. Yüzeyde kirlerin bulunması da ıslatmayı olumsuz etkiler.

Kohezyon, yapıştırıcı molekülleri arasında bulunan ve yapıştırıcıyı bir arada tutan kuvvettir. Şu kuvvetler kohezyona etki eder:

- Moleküller arası çekim kuvvetleri (van der Waals kuvvetleri),
- Polimer moleküllerinin kendi aralarında kenetlenmesi.

Bir zincirin kuvvetinin en zayıf halkası tarafından belirlenmesi kuralına uygun olarak, yapıştırma işleminde adhezyon ve kohezyon kuvvetleri yaklaşık eşit olmalıdır. Adhezyon kuvveti şu şekilde artırılabilir:

- .Yağ alma veya mekanik aşındırma ile istenmeyen yüzey tabakalarının temizlenmesi,
- . Primer ile kaplayarak aktif bir yeni yüzey oluşturulması,
- .Aşındırma, korona işlemi, düşük plazma işlemi vs. ile yüzey aktivitesinin değiştirilmesi.

Yüzey hazırlama yöntemleri en azından, yağı, gresi ve yüzeye tutunma kuvveti yapıştırıcınınkinden az olabilecek kaplamaları temizlemelidir. Birçok plastik ve metal malzemede, basit zımparalama veya çözeltiyle temizleme yöntemi kullanılır. Ancak bazı metallerde, iyi bir yapışma veya uzun vadeli ortam şartlarına dayanım elde etmek için bu basit yüzey hazırlama yöntemleri yeterli olmayabilir (Aydın 2003).

2.3.1. Yüzey hazırlama metotları

En çok kullanılan yüzey hazırlama metotları şunlardır:

- Çözücüyle silme
- Buharla yağ giderme
- Aşındırma
- Buharla honlama
- Ultrasonik temizleme
- Kimyasal çözelti ile temizleme (etching)
- Diğer kimyasal ve mekanik metodlar

2.3.1.a. Çözücüyle silme

En çok kullanılan fakat en az başarılı olduğu düşünülen bir metottur. Yüzeyler; üzerine temiz çözücü damlatılmış bir bez veya kağıtla silinerek temizlenirler. Bezler çözücü kabına dokundurulmamalıdır. Silinen yüzeylerde çizgi oluşması. Bezin veya çözücünün temiz olmadığını gösterir. Silme işlemi için kullanılan çözücüler toluen, metil etil keton, trikloroetilen ve asetonur. Küçük parçalar için çözücü içinde çalkalama ve sonra temiz, kuru azot içine salıverme; silme işleminden daha etkili olacaktır.

2.3.1.b. Buharla yağ giderme

Burada yapıştırılacak yüzeyler damıtılmış, yoğunlaşmış çözücü buharıyla yıkandığı için buharla yağ giderme silmeye tercih edilir. Çözücü buharlarının sıcaklığı kaynama noktasındadır ve ekseriyetle trikloroetilen veya perkloroetilen kullanılır. Buharla yağ giderme üstün bir temizleme metodudur. Trikloroetilen buharına bir dakika daldırma, ekseriyetle metallerin yağının tam olarak giderilmesi için yeterlidir.

2.3.1.c. Aşındırma

Yapıştırma bağlantılarının mukavemetine yüzey pürüzlülüğünün önemli derecede etkisi vardır. Bu etki, malzemenin yüzey alanını artırarak (dolayısıyla malzeme ve yapıştırıcı arasındaki kimyasal bağlar artar) sağlanır. Bu etki belirli bir sınıra kadardır.

İmalattan çıkmış parçaların yüzeyleri genellikle belli bir pürüzlülük değerine sahiptir. Ama parlatılmış ve taşlanmış veya ince işlenmiş yüzeyler, özellikle yapıştırma öncesi pürüzlendirilmedikçe yapışma mukavemetleri düşük olur. Etkili bir yüzey aşındırması sadece yüzey alanını artırmakla kalmaz ayrıca yüzeydeki yabancı madde tabakalarını da temizler. Buna ilaveten aşındırmanın yüzey ıslatmayı da geliştirdiği belirlenmiştir. Aşındırmada kullanılan yöntemlerden birkaçı kum veya zımpara kağıdıyla aşındırma; kum, tane veya hava püskürtme ve çelik yünle ovmadır. Kum püskürtme yapılıyorsa ince kum kullanılmalıdır ve püskürtme için kullanılan hava, kuru ve süzölmüş olmalıdır.

Bu durum özellikle nemli alanlarda önemlidir. Kum ayrıca temiz olmalıdır. Hava basıncı ve tane çeşidi, temizlenecek yüzeyin sertliğine bağlı olarak değişir.

Zımparalama için tane büyüklüğü 100 grit veya biraz daha ince olan zımpara kağıdı seçilerek yüzey zımpara izleri çeşitli yönlerde olacak şekilde hazırlanmalıdır.

Püskürtme için seçilecek aşındırıcılar alüminyum oksit (alumina), kuartz ve zımpara taneleri olabilir. Bunlar genel olarak çeliktir ve hafif alaşımlar için kullanılır. En iyi sonuçlar keskin kenarlı tanelerle elde edilir. Yuvarlak taneler (demir bilye ve cam boncuk gibi) uygun değildir, çünkü bunlar pürüz oluşturmaktan çok dövülmüş yüzey meydana getirirler. Yüzeylerine ikinci bir maden tabakası yapıştırılmış malzemelerde (Al-alaşımlarında olduğu gibi) ince olan kaplama tabakasının zarar görmemesi için zımparalama veya püskürtme yapılmaz. Bu gibi hallerde yüzeyler çelik veya alüminyum yünü ile ovulup temizlenir.

Aşındırma yöntemlerinden sonra yüzeyde kalan katı taneler temiz, kuru, basınçlı hava ile temizlenebilir. Pürüzlendirilen yüzeyler mümkünse hemen yapıştırılmalıdır. Aksi takdirde yüzeyler primerle kaplanmalıdır.

2.3.1.d. Buharla honlama

Çok küçük veya hassas metal parçaları için olağan aşındırma metotları çok kaba olabilir. Daha yumuşak ama yine aşındırma olan bu yöntem, buhar püskürtme veya hidro püskürtme olarak da bilinir. Bu işlem, suda asılı çok ince aşındırıcılar ve korozyon önleyiciler içeren bileşimlerin yüzeyi temizlemesi şeklindedir. Bu metot küçük parçaları temizlemek için faydalıdır ama honlama sonrası suda çalkalamaya gerek duyulur.

2.3.1.e. Ultrasonik temizleme

Sert, kırılğan malzemeleri efektif olarak temizlemek için dizayn edilen mekanik işlemdir. İş parçası ve takım arasındaki sıvıda taşınan aşındırıcı taneler vasıtasıyla iş

parçası yüzeyi yüksek hızda bombardıman edilerek temizlenir. Takım transdusere bağlıdır ve ultrasonik frekanslarda lineer olarak salınır. Böylece aşındırıcı taneler iş parçasına sevk edilir. Aşındırıcı taneler boron karpit ve benzerleri 270 diş ölçüsünde veya daha incedirler. Bu metot öncelikle küçük parçalar için kullanılır. Dalgaların hafifletilmemesi veya bozulmaması için parçalar sıvı içinde asılı kalmalı ve tank dibine dokundurulmamalıdır (Kayacan 1988).

2.3.1.f. Kimyasal çözeltiyle temizleme (etching)

Yüzeylerin kimyasal çözelti yöntemi ile temizlenmesi, en etkili yüzey temizleme metodudur. Bu temizleme metodu, yüzeyin daha güçlü olması ve daha fazla ıslatılabilirlik sağlanması için, yüzeyin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirir. Her malzeme yüzeyi, kendisine uygun ve farklı kimyasal işlem gerektirir. Birleştirilecek alan, hazırlanan asit çözeltisinin içine konulur ve birkaç dakika bekletilir. Zamanla kimyasal çözelti, malzeme yüzeyinden giderdiği pisliklerle kirleneceği ve konsantrasyonu değişeceği için periyodik olarak çözelti yenilenmelidir. Çözelti sıcaklığı da kontrol altında tutulmalıdır ve çözelti ile temas edilmemelidir. Çünkü bu tür çözeltiler genellikle sağlık açısından sakıncalıdır. Ayrıca pasta türü dağlama ürünleri de mevcut olup yüzeye sürülür ve hem yüzeyi temizler hem de kimyasal olarak yüzeyin özelliklerini değiştirir. Ancak pasta türü dağlama ürünleri asit banyolarından daha uzun zaman gerektirir (Petrie 1975).

2.3.1.g. Diğer kimyasal ve mekanik metotlar

Bu tür mekanik ve kimyasal metotlara son zamanlarda alev metodu, boşlukta iyonik bombardımanı ve elektrik cereyanı boşalması gibi fiziksel metotlar da eklenmiştir. Bu teknikler polietilen, polipropilen, politetrafloroetilen gibi asal plastikler için başarılı sonuçlar vermişlerdir. Ama bu metotlar malzemenin yüzey yapısını etkiler (mesela polietilen için yüzey oksidasyonunun etkilenmesi).

Yağın giderilmesi için diğer bir yöntemde deterjanla yıkamadır. Özellikle lanolin gibi gresler yüzeye sürülmüşse faydalı olur. Çünkü bu greslerin çözücülerle çıkarılması zordur. Yüzey yağının bir kimyevi madde ile alınmasından sonra parçalar genellikle soğuk su ile iyice çalkalanarak yıkanır ve yüzeylerdeki artıklar giderilir. Sonra çeşitli kimyevi maddelerle (çok sulu asit veya alkali banyoları gibi) ikinci bir işleme tabi tutulur. Bol su içinde tekrar yıkanır. Böylece yüzeylerde herhangi bir temizleyici madde artığı da kalmaması sağlanır. Bu şekilde hazırlanmış yüzeyler temiz bir yerde genellikle sıcak hava ile kurutulur. Bundan sonra yapıştırma işlemine geçilir. Temizlenmiş ve kurutulmuş parçaların uzun süre özellikle rutubetli yerlerde bırakılması, oluşabilecek oksit tabakalarından ötürü bağlantının mukavemetine büyük etki eder (Kayacan 1988).

2.3.2. Primerler

Primerlerin yüzey hazırlamadaki önemi gittikçe artmaktadır. Bir bağlantı sisteminde primerin fonksiyonu, aşağıdakilerden bir ya da birkaçı olabilir.

- . Yüzey temizlendikten sonra yüzeyi korumak,
- . Malzeme yüzeyinin serbest yüzey enerjisini ayarlamak,
- . Ara yüzeyin reolojik özelliklerini ayarlamak,
- . Esas malzeme ile yapıştırıcı arasındaki yüzeyin iç etkileşim ve çözünürlüğünü geliştirmek,
- . Esas malzeme ile yapıştırıcı arasındaki kimyasal reaksiyonu ilerletmek.

Kimi uygulamalarda koruyucu olarak primerlerin kullanımı uygun olmakla birlikte üretim maliyetini de artırır. Fakat kimi uygulamalarda da gerekli kimyasal reaksiyonları üretecek doğru primeri seçmek son derece önemlidir (Temiz 2003).

2.4. Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Bir yapıştırıcının mekanik özellikleri tespit edilirken, bulk formda veya bağlantı formunda numuneler kullanılır. Bağlantı formundaki numunelerin kullanılması uygulama yerindeki orijinal yükleme tipini tam temsil etmesine karşın, önemli iki dezavantajı da beraberinde getirir. Bu tipteki numunelerle yapıştırıcının herhangi bir mekanik özelliğinden çok, yapıştırılan malzemenin yapışabilmesi test edilir. Yapıştırılan malzeme yapıştırıcı tabakasının sebep olduğu gerçek gerilme durumundan etkilenir ve yapıştırma bağlantı numunesi sadece kayma yüküne maruz kalsa bile çekme yükü veya çekme-kayma yüklerinin kombinasyonundan dolayı hasar oluşabilir. Bağlantı formundaki numunelerin bu dezavantajları, bulk numunelerin kullanılmasıyla giderilebilir (Aydın 2003).

2.4.1. Bulk numunelerden yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Genellikle mekanik davranış, yük altında malzemelerin bünyesinde meydana gelen gerilme-şekil değiştirme arasındaki ilişkiyi açıklayan en genel kavramdır. Yapıştırıcıların mekanik özellikleri temelde iki farklı yükleme (çekme ve kayma) şartında tespit edilir.

a. Çekme deneyi

Yapısal yapıştırıcıların mekanik özellikleri, plastikler için geliştirilmiş standartlara uygun olarak hazırlanmış numunelerin çekme cihazına bağlanıp tek eksenli gerilme uygulanması ile belirlenebilir. Çekme deneyinden elde edilecek yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin güvenilirliği, uygulanan kuvvet altında oluşan yer değiştirmelerin doğru tespitini gerektirir. Bu, seçilen ölçüm sistemi kadar yapıştırıcının doğasına da bağlıdır. Genelde, uygulanan kuvvetin ölçülmesinde nadiren problemlerle karşılaşılmasına rağmen, yer değiştirmelerin ölçülmesinde çok büyük güçlüklerle karşılaşılır. Bu yüzden, çekme deneylerinde; şekil değişiminin belirlendiği ölçüm tekniği, deneylerde kullanılan

şekil değiştirme oranı ve miktarı ile numunelerin kalınlığı dikkate alınması gereken önemli noktalardır (Aydın 2003).

b. Kayma deneyleri

Plastikler için kayma deneyleri, çekme deneyleri kadar gelişmemiş ve yapıştırıcıların bulk kayma deneyleri için sınırlı çaba sarf edilmiştir. Bu yüzden bulk numunelerden kayma özelliklerin tespit edildiğı standart bir deney yöntemi bulunmamaktadır (Jeandrau 1991). Ancak, belirli yöntemler yapıştırıcıların kayma yükü altındaki mekanik davranışlarının belirlenmesinde kullanılabilir (Dean and Duncan 1996).

2.4.2. Bağlantı numunelerinden yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi

Bu durumda, yapıştırıcının ayırt edici mekanik özelliklerini belirleyebilmek için, yapıştırıcı tabakasında üniform ve tek eksenli gerilme ve kohezif hasar oluşturacak numunelerin kullanılması gereklidir. Ayrıca, bağlantı numunelerinin kullanıldığı tüm deneysel yöntemlerden elde edilen mekanik özelliklerin, yapıştırıcı tabakasındaki şekil değişim oranına bağımlılık göstermesi potansiyel problem olarak karşımıza çıkar ve yapıştırıcının akma dayanımı civarındaki gerilme seviyelerinde son derece artar. Bu yüzden; bulk ve bağlantı numunelerinden elde edilen kayma verileri karşılaştırılırken, bu gerçek dikkate alınmalıdır (Aydın 2003).

2.5. Kompozit Malzemeler

(Ünal 2012), Birbirlerinin zayıf yönünü düzelterek üstün özellikler elde etmek amacıyla bir araya getirilmiş değişik tür malzemelerden veya fazlardan oluşan malzeme sistemine kompozit malzeme denir. Cam elyafı poliyester levhalar, çelik donatılı beton elemanlar, otomobil lastikleri ve seramik metal karışımı olan sermentler bunlara örnektir.

Kompozitler çok fazlı malzeme sayılırlar. Yapılarında sürekli bir ana faz ile onun içinde dağılmış pekiştirici bir donatı fazı bulunur.

Faz: Bir malzemenin iç yapı yönünden farklı olan kısımlarına denir.

Bu faz iki tür bileşimle sağlanabilir:

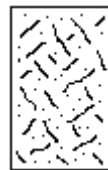
1- Mikroskobik

2- Makroskobik

Mikroskobik bileşim: Örneğin perlit çeliği, ferrit ve sementitin mikroskobik düzeyde homojen karışımlarından oluşur. Tek başına ferrit yumuşak ve düşük mukavemetli olup sert ve gevrek sementit ile birlikte yanyana ince tabakalar halinde dizilmek suretiyle yüksek mukavemetli ve yüksek tokluğa sahip perlit çeliğini oluştururlar.

Makroskobik bileşim: Boyutları 0,1 mm' nin üzerinde gözle görülebilirler. Sonradan bir araya getirilerek üstün özelliklerdeki kütleleri oluştururlar.

Kompozit malzemeler donatılı veya pekiştirilmiş türüne göre üç gruba ayrılır:



a) Taneli kompozitler

b) Lifli kompozitler

c) Tabakalı kompozitler

Şekil 2.5. Donatılı veya pekiştirilmiş türüne göre kompozit malzemeler (a,b,c)

Lifli ve tabakalı kompozitlerin sağladığı özelliklerdeki artış, taneli kompozitlere göre daha yüksektir. Taneli kompozitler için en önemli örnek betondur. Sert tanelilerin sünek

bir malzemeyle birleştirilip aglomera haline getirilen kompozitlere diğer bir örnek de asfalt betonudur.

Asfalt viskoz ve düşük mukavemetlidir. Taş ise sert ve gevrek, kütle halinde fazla şekil değiştirmeden çatlayarak kolayca kırılabilirler. Farklı boyutlardaki kırmataş ile asfaltın birleşerek hem sünek hem de yeter mukavemetli olan yol kaplaması malzemesini oluştururlar.

Tungsten karbür (WC) taneciklerinin CO metali ile yüksek sıcaklıkta basınç altında sinterlenmesi sonucu elde edilen kompozit çok sert olup yüksek hızlı kesme takımı üretimine elverişlidir. Uygulamada bunlara SERMET denir. Uygulamada en önemli kompozitler lifli olanlardır. Liflerin çapları yaklaşık 0,1mm civarında olup tek başına kullanılmazlar. Kalınlıkları arttığında kusur oluşma olasılığı nedeniyle mukavemetleri çok azalır. Bu lifler uygun bir malzemeyle istenen boyutta taşıyıcı kütlelere dönüştürülür. Bu bağlayıcı malzeme polyester ve epoksidir. Uygulamada donatı malzemesi olarak kullanılan liflerin çoğu kuvvetli kovalent bağa sahiptir. Aynı amaçla kullanılan metal liflerin mukavemeti de soğuk çekme ile artırılmaktadır. Lifler yönlenmiş veya rasgele dağılmış olabilir. Yönlenmiş lifler doğrultusunda mukavemet doğal olarak yanal doğrultudan çok daha büyük olur. Pekiştirici liflerin miktarı arttıkça kompozitin mukavemeti de yükselir. Yönlenmiş liflerde bu oran hacmen %80, rasgele yönlenmişlerde ise %40-50 arasında kalır.

2.5.1. Kompozit malzeme türleri

1. Polimer Kompozitler
2. Metal Kompozitler
3. Seramik Kompozitler

1-Polimer Kompozitler: Liflerle pekiştirilmiş polimer kompozitler endüstride çok geniş kullanma alanına sahiptir. Pekiştirici olarak cam, karbon kevlar ve boron lifleri kullanılır.

Çizelge 2.1. Pekiştirici liflerin özellikleri

Malzeme	Özgöl ağırlık gr / cm ³	Çekme mukavemeti N / mm ²	Elastisite modülü N / mm ²
Cam lifi	2,54	2410	70000
Karbon lifi	1,75	3100	220000
Kevlar lifi	1,46	3600	124000

Polimer kompozitlerde kullanılan en önemli bağlayıcı malzeme polyester ve epoksidir. Pekiştirici liflerin miktarı arttıkça kompozitin mukavemeti yükselir. Polimer kompozitlerin en önemli özellikleri yüksek özgül mukavemet(mukavemet/ özgül ağırlık) ve özgül elastisite modülüdür. Dolayısıyla bu özelliklerden dolayı diğer malzemelere üstün durumundadırlar. Örneğin yüksek mukavemetli çeliklerde özgül mukavemetin 110 Nm / gr olmasına karşın cam lifi – polyesterlerde 620 Nm/gr dır. Diğer taraftan karbon lifi epoksida 700 Nm/gr ve kevlar epoksida 886 Nm/gr dır. Diğer taraftan karbon liflerinin özgül elastisite modülü alüminyumunkinin 5 katı kadardır. Bu üstünlüklerinden dolayı polimer kompozitler uçak ve uzay endüstrisinde alüminyum alaşımlarına tercih edilir.

Çizelge 2.2. Lifli Kompozitlerin Özellikleri

Malzeme	Özgöl ağırlık gr/cm ³	Çekme mukavemet N/mm ²	Elastik mukavemet N/mm ²
Cam lifi – polyester	1,5 – 2,1	200 – 340	55000 – 130000
Karbon lifi – epoksi	1,5 – 1,8	1860	145000
Kevlar – epoksi	2,36	2240	76000
Boron lifi - epoksi	1,4	1240	176000

2-Metal Kompozitler (Metal Matrisli Birleşik Malzemeler MMC):

Bir metalik fazın bazı takviye malzemeleri ile eritme vakum emdirme, sıcak presleme ve difzyon kaynağı gibi ileri teknikler uygulanarak MMC’ ler elde edilirler. MMC ler

daha çok uzay ve havacılık alanlarında, mesela uzay teleskobu, platform taşıyıcı parçalar, uzay haberleşme cihazlarının reflektör ve destek parçaları vs. yerlerde kullanılır.

3-Seramik Kompozitler (Seramik Matrisli Birleşik Malzemeler CMC):

Bu amaçla yapısal ve fonksiyonel nitelikli yüksek teknoloji seramikleri kullanılmaktadır. Başlıcaları Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 , B_4C , CbN, TiC, TiB, TiN, AlN' dir. Bu bileşikler değişik yapılarda olup amaca göre bir yada bir kaçı beraber kullanılarak CMC ler elde edilir. Sandviç zırhlar, çeşitli askeri amaçlı parçalar imali ile uzay araçları bu ürünlerin başlıca kullanım yerleridir.

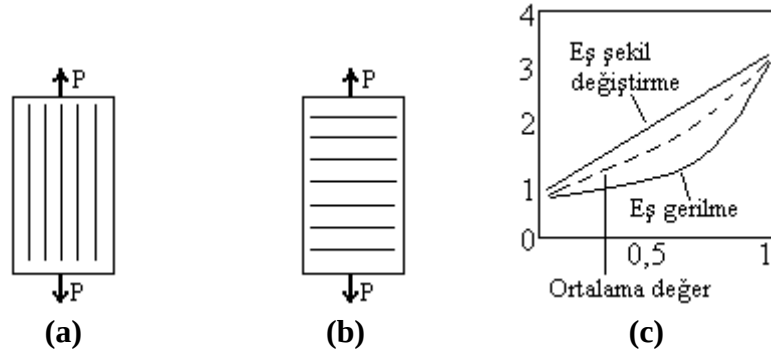
2.5.2. Kompozitlerin mekanik davranışı

Kompozitlerde lifler kuvvet yönüne paralel veya dik yönde veya rast gele dağılmış durumda bulunurlar. Lifler yönlenmiş durumda iken kompozit büyük ölçüde anizotrop olur. Lifler rast gele dağıtılmış ise düzlemsel boyutta izotrop olurlar.

Liflerle kuvvet birbirine paralel ise liflerle matris aynı miktarda şekil değiştirir. Buna eş şekil değiştirme hali denir. Matrisin elastisite modülü E_m , liflerini elastisite modülü E_f ve liflerin hacimsel oranı V_f ise kompozitin paralel doğrultudaki bileşke elastisite modülü

$$E_k = E_f \times V_f + V_f (1 - E_m) \quad (2.1)$$

olur.



Şekil 2.6. Kompozitlerde kuvvet yönüne göre lifler ve Elastisite modülünün kompozitin bileşim oranı ile değişimi (**a,b,c**) (Ünal 2012)

- a) Eş şekil değiştirme hali (Paralel lifler)
- b) Eş gerilme hali (Dik lifler)
- c) Elastisite modülünün kompozitin bileşim oranı ile değişimi (Rast gele lifler)

Kompozit malzemelerin çekme mukavemetleri liflerin kopmasıyla sona erer. En uygun kompozit yapısında lifler kuvvet doğrultusunda paraleldir.

Liflerin kuvvet yönüne dik olduğu hallerde makro ile lifler aynı yükü taşır. Eş gerilme hali bilinen bu yükleme karşısında kompozitin elastisite modülü;

$$E_k = \frac{E_m E_f}{E_m V_f + (1 - V_f) E_f} \quad (2.2)$$

Kompozit malzemenin çekme mukavemeti liflerin kopması ile sona erer. En uygun kompozit yapısında lifler kuvvet doğrultusuna paraleldir. E_f , T_f liflerin çekme mukavemeti, T_m liflerin koptuğu andaki şekil değiştirme için matristeki gerilme ve V_f liflerin hacimsel oranı ile kompozitin çekme mukavemeti.

$$T_k = T_f V_f + (1 - V_f) T_m \quad (2.3)$$

olur (Ünal 2012).

2.5.3. Kompozit malzemelerin özellikleri

1-Hafiflik: Polimer kompozitler genelde $1,5-2 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluğundadır. Metal kompozitler, $2,5-4,5 \text{ gr / cm}^3$ olmakla beraber özellerde sıçrama görülebilir. Seramik kompozitler ise ikisi arasındadır (Ünal 2012).

2-Rijitlik ve boyut kararsızlığı: Genleşme katsayıları nispeten düşük olup sert, sağlam bir yapı ve büyük bir boyut kararlılığı gösterir.

3-Yüksek mekanik özellikler: Çekme, basma, darbe, yorulma dayanımları çok yüksektir.

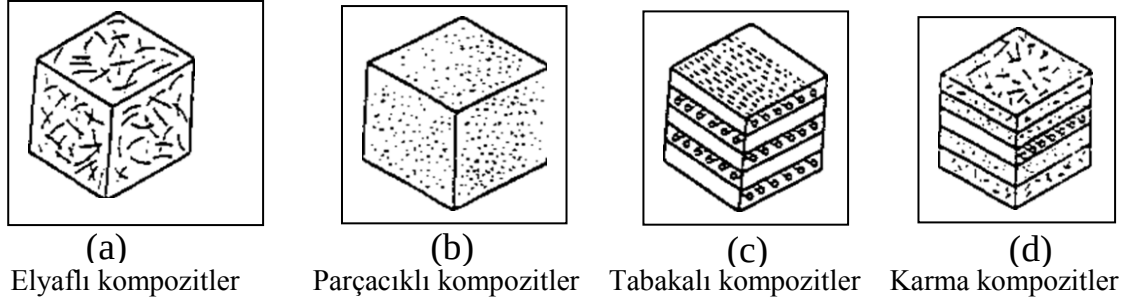
4-Yüksek kimyasal direnç: Kompozitler birçok kimyasal maddelere, bu arada asitler, alkaliler, çözücüler ve açık hava şartlarına karşı son derece direnç gösterirler. Kimya tesisleri için çok kullanılan malzemelerdir.

5-Yüksek ısı dayanımı: Kompozitlerin ısı dayanımı sıradan plastiklere göre yüksektir.

6-Elektriksel özellikler: Elektriksel özellikler kompozitlerde isteğe göre ayarlanabilir. Metal Matrisli Birleşik Malzemeler (MMC)'ler iletkenidir (Ünal 2012).

2.5.4. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Yapılarında çok sayıda farklı malzeme kullanılabilen kompozitlerin gruplandırılmasında kesin sınırlar çizmek mümkün olmamakla birlikte, yapıdaki malzemelerin formuna göre bir sınıflama yapmak mümkündür. Bu sınıflama şekli aşağıda verilmektedir (Ünal 2012).



Şekil 2.7. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

a) Elyafli kompozitler: Bu kompozit tipi ince elyafların matris yapıda yer almasıyla meydana gelmiştir. Elyafların matris içindeki yerleşimi kompozit yapının mukavemetini etkileyen önemli bir unsurdur. Uzun elyafların matris içinde birbirlerine paralel şekilde yerleştirilmeleri ile elyaflar doğrultusunda yüksek mukavemet sağlanırken, elyaflara dik doğrultuda oldukça düşük mukavemet elde edilir, iki boyutlu yerleştirilmiş elyaf takviyeleriyle her iki yönde de eşit mukavemet sağlanırken, matris yapısında homojen dağılmış kısa elyaflarla ise izotrop bir yapı oluşturmak mümkündür. Elyafların mukavemeti kompozit yapının mukavemeti açısından çok önemlidir. Ayrıca, elyafların uzunluk/çap oranı arttıkça matris tarafından elyaflara iletilen yük miktarı artmaktadır. Elyaf yapının hatasız olması da mukavemet açısından çok önemlidir.

Kompozit yapının mukavemetinde önemli olan diğer bir unsur ise elyaf matris arasındaki bağın yapısıdır. Matris yapıda boşluklar söz konusu ise elyaflarla temas azalacaktır. Nem absorpsiyonu da elyaf ile matris arasındaki bağı bozan olumsuz bir özelliktir.

b) Parçacıklı kompozitler: Bir matris malzeme içinde başka bir malzemenin parçacıklar halinde bulunması ile elde edilirler. İzotrop yapılardır. Yapının mukavemeti parçacıkların sertliğine bağlıdır. En yaygın tip plastik matris içinde yer alan metal parçacıklardır. Metal parçacıklar ısı ve elektriksel iletkenlik sağlar. Metal matris içinde seramik parçacıklar içeren yapıların, sertlikleri ve yüksek sıcaklık dayanımları yüksektir. Uçak motor parçalarının üretiminde tercih edilmektedirler.

c) Tabakalı kompozitler: Tabakalı kompozit yapı, en eski ve en yaygın kullanım alanına sahip olan tiptir. Farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların bileşimi ile çok yüksek mukavemet değerleri elde edilir. Isıya ve neme dayanıklı yapılardır. Metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Sürekli elyaf taviyeli tabakalı kompozitler uçak yapılarında, kanat ve kuyruk grubunda yüzey kaplama malzemesi olarak çok yaygın bir kullanıma sahiptirler.

Ayrıca, uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanı olan sandviç yapılar da tabakalı kompozit malzeme örneğidirler. Sandviç yapılar, yük taşımayarak sadece izolasyon özelliğine sahip olan düşük yoğunluklu bir çekirdek malzemenin alt ve üst yüzeylerine mukavemetli levhaların yapıştırılması ile elde edilirler.

d) Karma (Hibrid) kompozitler: Aynı kompozit yapıda iki yada daha fazla elyaf çeşidinin bulunması olasıdır. Bu tip kompozitlere hibrid kompozitler denir. Bu alan yeni tip kompozitlerin geliştirilmesine uygun bir alandır. Örneğin, kevlar ucuz ve tok bir elyafdır ancak basma mukavemeti düşüktür. Grafit ise düşük tokluğa sahip, pahalı ancak iyi basma mukavemeti olan bir elyafdır. Bu iki elyafın kompozit yapısında hibrid kompozitin tokluğu grafit kompozitden iyi, maliyeti düşük ve basma mukavemetide kevlar elyafı kompozitden daha yüksek olmaktadır (Ünal 2012).

2.5.5. Kompozit malzeme yapımında temel maddeler

Matris Malzemeleri: Kompozit yapılarda matrisin üç temel fonksiyonu vardır. Bunlar, elyafları birarada tutmak, yükü elyaflara dağıtmak ve elyafları çevresel etkilerden korumaktır. İdeal bir matris malzemesi başlangıçta düşük viskoziteli bir yapıda iken daha sonra elyafları sağlam ve uygun bir şekilde çevreleyebilecek katı forma kolaylıkla geçebilmelidir.

Kompozit yapılarda yükü taşıyan elyafların fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Örneğin matris malzemesi olmaksızın bir elyaf demeti düşünüldüğünde yük bir yada birkaç elyaf tarafından

taşınacaktır. Matrisin varlığı ise yükün tüm elyaflara eşit olarak dağılımını sağlayacaktır. Kesme yükü altındaki bir gerilmeye dayanım, elyaflarla matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kesme mukavemeti özelliklerini gerektirir. Elyaf yönlenmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris elyafa göre daha zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Matrisin kesme mukavemeti ve matris ile elyaf arası bağ kuvvetleri çok yüksek ise elyaf yada matriste oluşacak bir çatlağın yön değiştirmeksizin ilerlemesi mümkündür. Bu durumda kompozit gevrek bir malzeme gibi davrandığından kopma yüzeyi temiz ve parlak bir yapı gösterir. Eğer bağ mukavemeti çok düşükse elyaflar boşluktaki bir elyaf demeti gibi davranır ve kompozit zayıflar. Orta seviyede bir bağ mukavemetinde ise elyaf veya matristen başlayan enlemesine doğrultuda bir çatlak elyaf/matris ara yüzeyine dönüp elyaf doğrultusunda ilerleyebilir. Bu durumda kompozit sünek malzemelerin kopması gibi lifli bir yüzey sergiler (Ünal 2012).

1-Reçineler ve Özellikleri:

a) Epoksi reçineleri: Epoksi reçineleri bifenol A ile epiklorhidridin reaksiyon ürünü olup sertleştirici (katalist) ile karıştırıldığında adi sıcaklıkta veya fırınlama ile (70–90 derece) bir sonucu belli bir sürede sertleşir ve bir plastik görünümü alır. Önemli özellikleri olarak sıvı, viskoz sıvı veya katı hallerde bulunabilmeleri, elektrik, ısı, kimyasal dirençleri ile mekanik özelliklerinin yüksek olması, hava şartlarından etkilenmemeleridir. Depolanma süreleri oda sıcaklığında 24 aydır.

b) Polyesterler: Dibazik asitlerle gliserin, glikol gibi polialkollerin reaksiyonundan elde edilirler. Katı, sıvı termostat, termoplast gibi türlerde bulunur. Sıvı polyesterler, katalist ve hızlandırıcı kullanılarak kür edilirler. Sert, kimyasal maddelere ve hava şartlarına direnci çok yüksektir. Katı polisterler (LPET gibi) darbe dayanımlıdır.

c) Üretan reçineleri: Bir izosiyanatla bir polialkolün oda sıcaklığında katılma polimerizasyonu ile elde edilen üretanlar daha çok köpük lastik (esnek ve rijit) yapımında kullanılırlar. Kimyasal direnci iyidir. Yazılım özellikleri yüksektir.

d) Fenolik reçineler: Fenol formaldehit kondenzasyon ürünü olup, bu ham maddelerin bazen türevlerinde kullanılmaktadır. Katı ve sıvı türleri vardır. Yurdumuzda sıvı reçine üretimi vardır.

2-Elyaf Çeşitleri ve Özellikleri

Matris malzeme içinde yer alan elyaf takviyeler kompozit yapının temel mukavemet elemanlarıdır. Düşük yoğunluklarının yanı sıra yüksek elastite modülüne ve sertliğe sahip olan elyaflar kimyasal korozyona da dirençlidir. Günümüzde kompozit yapılarda kullanılan en önemli takviye malzemeleri sürekli elyaflardır. Bu elyaflar özellikle modern kompozitlerin oluşturulmasında önemli bir yer tutarlar. Cam elyaflar teknolojiye kullanılan en eski elyaf tipleridir. Son yıllarda geliştirilmiş olan bor, karbon, silisyum karbür ve aramid elyaflar ise gelişmiş kompozit yapılarda kullanılan elyaf tipleridir. Elyafların ince çaplı olarak üretilmeleri ile, büyük kütleli yapılara oranla yapısal hata olasılıkları en aza indirilmiştir. Bu nedenle üstün mekanik özellikler gösterirler. Ayrıca, elyafların yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olmalarının nedenleri aşağıda verilen özelliklere de bağlıdır (Ünal 2012).

1. Üstün mikroyapısal özellikler, tane boyutlarının küçük oluşu ve küçük çapta üretilmeleri.
2. Boy/çap oranı arttıkça matris malzeme tarafından elyaflara iletilen yük miktarının artması.
3. Elastite modülünün çok yüksek olması.

a) Cam elyaflar: Cam elyaflar, sıradan bir şişe camından yüksek saflıktaki kuartz camına kadar pek çok tipte imal edilirler. Cam amorf bir malzemedir ve polimerik yapıdadır. Üç boyutlu moleküler yapıda, bir silisyum atomu dört oksijen atomu ile

çevrilmiştir. Silisyum metalik olmayan hafif bir malzemedir, doğada genellikle oksijenle birlikte silis (SiO_2) şeklinde bulunur. Cam eldesi için silis kumu, katkı malzemeleri ile birlikte kuru halde iken 1260°C civarına ısıtılır ve soğumaya bırakıldığında sert bir yapı elde edilir.

Cam elyafların bazı özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

1. Çekme mukavemeti yüksektir, birim ağırlık başına mukavemeti çeliğinkinden yüksektir.
2. Isıl dirençleri düşüktür. Yanmazlar, ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar.
3. Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler.
4. Nem absorbe etme özellikleri yoktur, ancak cam elyafı kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Özel elyaf kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabilir.
5. Elektriği iletmezler. Bu özellik sayesinde elektriksel yalıtımın önem kazandığı durumlarda cam elyafı kompozitlerin kullanılmasına imkan tanırırlar.

Cam elyaf imalinde silis kumuna çeşitli katkı malzemeleri eklendiğinde yapı bu malzemelerin etkisi ile farklı özellikler kazanır. Dört farklı tipte cam elyaf mevcuttur.

1. A (Alkali) Camı: A camı yüksek oranda alkali içeren bir camdır. Bu nedenle elektriksel yalıtkanlık özelliği kötüdür. Kimyasal direnci yüksek, en yaygın cam tipidir.

2. C (Korozyon) Camı: Kimyasal çözeltilere direnci çok yüksektir.

3. E (Elektrik) Camı: Düşük alkali oranı nedeniyle elektriksel yalıtkanlığı diğer cam tiplerine göre çok iyidir. Mukavemeti oldukça yüksektir. Suya karşı direnci de oldukça iyidir. Nemli ortamlar için geliştirilen kompozitlerde genellikle E camı kullanılır.

4. S (Mukavemet) Camı: Yüksek mukavemetli bir camdır. Çekme mukavemeti E camına oranla %33 daha yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi bir yorulma direncine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle havacılıkta ve uzay endüstrisinde tercih edilir. Cam elyaflar genellikle plastik veya epoksi reçinelerle kullanılırlar.

Çizelge 2.3. Cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri (Ünal 2012)

Özellikler	Cam Tipi			
	A	C	E	S
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	2.50	2.49	2.54	2.48
Elastik modül (GPa)	-	69.0	72.4	85.5
Çekme mukavemeti (MPa)	3033.0	3033.0	3448.0	4585.0
Isıl genleşme katsayısı	8.6	7.2	5.0	5.6
Yumuşama sıcaklığı (°C)	727.0	749.0	841.0	970.0
Katkı Malzemeleri (%)				
SiO ₂	72.0	64.4	52.4	64.4
Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃	0.6	4.1	14.4	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	-
MgO	2.5	3.3	4.6	10.3
Na ₂ O, K ₂ O	14.2	9.6	0.8	0.3
B ₂ O ₃	-	4.7	10.6	-
BaO	-	0.9	-	-

b) Bor elyaflar: Bor elyaflar aslında kendi içlerinde kompozit yapıdadırlar. Çekirdek olarak adlandırılan ince bir flamanın üzerine bor kaplanarak imal edilirler. Çekirdek genellikle Tungstendir. Karbon çekirdek de kullanılabilir ancak bu yeni bir uygulamadır.

Bor-Tungsten elyaflar, sıcak tungsten flamanın hidrojen ve bortriklorür (BCl₃) gazından geçirilmesi ile üretilirler. Böylece Tungsten flamanın dışında bor plaka oluşur. Bor elyaflar değişik çaplarda üretilebilirler (0.05mm ile 0.2mm). Tungsten çekirdek ise daima 0.01 mm çapında üretilir. Bor elyaflar yüksek çekme mukavemetine ve elastik modüle sahiptirler. Çekme mukavemetleri 2758 MPa ile 3447 MPa'dır. Elastite modülü ise 400 GPa'dır. Bu değer S camının elastite modülünden beş kat fazladır. Üstün mekanik özelliklere sahip olan bor elyaflar, uçak yapılarında kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir. Ancak, maliyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle, son yıllarda yerlerini karbon elyaflara bırakmışlardır. Bor elyafların Silisyum Karbür (SiC) veya Bor

Karbür (B_4C) kaplanmasıyla yüksek sıcaklıklara dayanımı artar. Özellikle bor karbür kaplanması ile çekme mukavemeti önemli ölçüde artırılabilir. Bor elyafların erime sıcaklıkları $2040^{\circ}C$ civarındadır.

c) Silisyum karbür elyaflar: Bor gibi, Silisyum karbürün tungsten çekirdek üzerine kaplanması ile elde edilirler. 0.1 mm ila 0.14 mm çaplarında üretilirler. Yüksek sıcaklıklardaki özellikleri bor elyaflardan daha iyidir. Silisyum karbür elyaf $1370^{\circ}C$ 'ta mukavemetinin sadece %30'nu kaybeder. Bor elyaf için bu sıcaklık $640^{\circ}C$ 'tır. Bu elyaflar genellikle Titanyum matrisle kullanılırlar. Jet motor parçalarında Titanyum, Alüminyum ve Vanadyum alaşımlı matris ile kullanılırlar. Ancak Silisyum karbür elyaflar Bor elyaflara göre daha yüksek yoğunluğa sahiptirler. Silisyum karbürün karbon çekirdek üzerine kaplanması ile üretilen elyafların yoğunluğu düşüktür.

d) Alumina elyaflar: Alumina, Alüminyum oksittir (Al_2O_3). Elyaf formundaki alumina, 0.02 mm çapındaki alumina flamanın Silisyum dioksit (SiO_2) kaplanması ile elde edilir. Alumina elyafların çekme mukavemetleri yeterince yüksek değildir, ancak basma mukavemetleri yüksektir. Örneğin, alumina epoksi kompozitlerin basma mukavemetleri 2275 ila 2413 MPa'dır. Ayrıca, yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle uçak motorlarında kullanılmaktadırlar.

e) Grafit (Karbon) elyaflar: Karbon, yoğunluğu 2.268 gr/cm^3 olan kristal yapıda bir malzemedir. Karbon elyaflar cam elyaflardan daha sonra gelişen ve çok yaygın olarak kullanılan bir elyaf grubudur. Hem karbon hemde grafit elyaflar aynı esaslı malzemeden üretilirler. Bu malzemeler hammadde olarak bilinirler. Karbon elyafların üretiminde üç adet hammadde mevcuttur. Bunlardan ilki rayondur (suni ipek). Bu hammadde inert bir atmosferde $1000-3000^{\circ}C$ civarına ısıtılır ve aynı zamanda çekme kuvveti uygulanır. Bu işlem mukavemet ve tokluk sağlar. Ancak yüksek maliyet nedeniyle rayon elyaflar uygun değildirler.

Elyaf imalatında genellikle rayonun yerine poliakrilonitril (PAN) kullanılır. PAN bazlı elyaflar 2413 ila 3102 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler ve maliyetleri

düşüktür. Petrolün rafinesi ile elde edilen zift bazlı elyaflar ise 2069 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler. Mekanik özellikleri PAN bazlı elyaflar kadar iyi değildir ancak maliyetleri düşüktür.

Çizelge 2.4. Karbon ve Grafit Elyafların Karşılaştırılması (Ünal 2012)

Özellik	Grafit	Karbon
Safılık (%)	99	93-95
İşlem Sıcaklığı (°C)	> 1700	< 1700
Elastite Modülü (GPa)	>345	<345

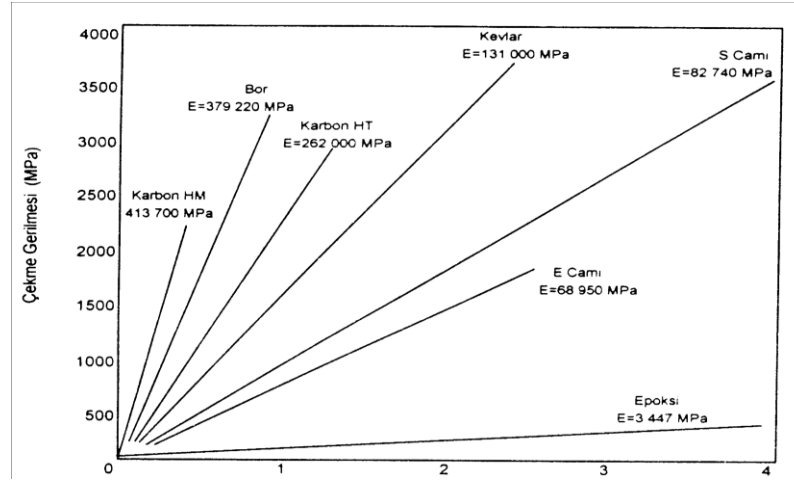
Karbon elyafların en önemli özellikleri düşük yoğunluğun yanı sıra yüksek mukavemet ve tokluk değerleridir. Karbon elyaflar, nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Bu nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Karbon elyaflar çeşitli plastik matrislerle ve en yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Ayrıca karbon elyaflar alüminyum, magnezyum gibi metal matrislerle de kullanılırlar.

f) Aramid elyaflar: Aramid "aromatik polyamid" in kısaltılmış adıdır. Polyamidler uzun zincirli polimerlerdir, aramidin moleküler yapısında altı karbon atomu birbirine hidrojen atomu ile bağlanmışlardır. İki farklı tip aramid elyaf mevcuttur. Bunlar Du Pont firması tarafından geliştirilen Kevlar 29 ve Kevlar 49'dur. Aramidin mekanik özellikleri grafit elyaflarda olduğu gibi elyaf eksenini doğrultusunda çok iyi iken elyaflara dik doğrultuda çok zayıftır. Aramid elyaflar düşük ağırlık, yüksek çekme mukavemeti ve düşük maliyet özelliklerine sahiptir. Darbe direnci yüksektir, gevrekliği grafitin gevrekliğinin yansı kadardır. Bu nedenle kolay şekil verilebilir. Doğal kimyasallara dirençlidir ancak asit ve alkalilerden etkilenir.

Her iki kevlar da 2344 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptir ve kopma uzaması %1.8'dir. Kevlar 49'un elastik modülü kevlar 29'unkinden iki kat fazladır. Kevlar elyafın yoğunluğu cam ve grafit elyafların yoğunluklarından daha düşüktür. Kevlar49/Epoksi kompozitlerinin darbe mukavemeti grafit epoksi kompozitlere oranla yedi kat,

bor/epoksi kompozitlere oranla dört kat daha iyidir. Uçak yapılarında, düşük basma mukavemetleri nedeniyle, karbon elyaflarla birlikte hibrid kompozit olarak, kumanda yüzeylerinde kullanılmaktadırlar. Aramid elyaflar elektriksel iletkenliğe sahip değildirler. Basma mukavemetlerinin iyi olmamasının yanısıra kevlar epoksi kompozitlerinin nem absorbe etme özellikleri kötüdür. Şekilde farklı elyaf malzemelerin ve epoksi matrisin gerilme-uzama diyagramı verilmiştir. Çizelgede ise farklı elyaf malzemelerin epoksi matris ile oluşturduğu yarı mamul tabaka maliyetleri, E camının maliyeti baz alınarak verilmektedir.

Kopma Uzaması (%)



Şekil 2.8. Elyaf ve matris malzemelerin gerilme uzama diyagramı (Ünal 2012)

Çizelge 2.5. Farklı elyaflardan oluşan kompozitlerin birim maliyetleri (Ünal 2012)

Kompozit	Maliyet
E Camı/Epoksi	1
S Camı/Epoksi	4-8
Kevlar/Epoksi	15-40
Karbon(HT)/Epoksi	30-60
Karbon(HM)/Epoksi	80-120

2.5.6. Kompozit malzemelerin kullanımı

Günlük ve Ticari Hayatta Kullanım:

Bu amaçla, yaygın şekilde cam elyafı, cam, keçe ve cam dokuma ile polyester reçineden yapılan çeşitli ürünler kullanılmaktadır. Cam elyaf oranı %30–40 arasındır. Çay tepsisi, masa–sandalye, depo, küvet, tekne, bot ve otomotiv sanayi bu kompozitlerin uygulama örnekleridir. Ayrıca formika, baskılı devre plakası, elektrikçi fiberleri, spor malzemeleri, araç şarjı, atlama sırtıkları, kaynak takımı, tenis raketi ve yarış kanoları değişik kompozit malzemelerden yapılan ürünlerdir.

Askeri Alanda Kullanım:

Uzay Ve Havacılık Sanayisinde: Kompozit malzemelerin uzay ve havacılık sanayinde kullanımı başta hafiflik ve sağlamlık nitelikleri sayesinde. Amaç daha az yakıt harcamak, daha yüksek hıza ulaşmak ve verimliliği sağlamaktır. Bu kullanımda sadece maddi kazanç düşünülmeyp stratejik performanslarda dikkate alınmıştır. Özellikle titreşim, yorulma ve ısı dayanımı gibi nitelikler uzay ve havacılık sanayinde birleşik malzemelerin önde gelen avantajlarıdır.

Kompozit malzemeler, değerli niteliklerden dolayı uzay ve havacılık araçlarında gittikçe daha fazla kullanılmaktadır. Bugün bir av bombardıman uçağında kompozit malzeme kullanımı toplam uçak ağırlığının yarısına ulaşmış bulunmaktadır. Bu sayede bor karbür, silisyum karbür, alümina karbon, cam ve kevlar elyafı değişik reçinelerle değişik kompozit malzemeler yapımında kullanılmaktadır.

Silah, Roket Ve Diğer Mühimmat Sanayisinde: Kompozit malzemelerin silah üretiminde kullanımı pek yaygın olmamakla beraber 3000 bara kadar dayanabilen 60 ve 81 mm gibi küçük çaplı havanlar için bazı çalışmalar olmuştur. Bu silahlar hafifliği nedeniyle piyadenin savaş performansını artırıcı niteliktedir.

Roket üretiminde birleşik malzemelerin rolü oldukça büyüktür. Örnek olarak M72 de motor lançeri cam elyafı ve epoksiden, Apilasta ve diğer tanksavar roketlerde gövde kısmen kevlar ve epoksiden, M77 MLRS de lüle (nozzle) karbon birleşik malzemesinden yapılmaktadır.

Mühimmat üretiminde de birleşik malzemeler kısmen kullanılmaktadır. M19 A/T mayınında gövde ABS reçine ve cam elyaf parçacıklarından, bu mayına ait küçük ve büyük belleville yayları cam doku ve fenolik reçineden yapılmışlardır. 155mm lik ICM mühimmatı gövdelerinde cam elyafı epoksi sargı vardır. Miğfer konusunda kevlar ve değişik reçineler kullanılmaktadır (Ünal 2012).

2.6. Elasto-plastik Gerilme Analizi

Malzemelerin elasto - plastik durumu, elastik bölge aşılıarak belirli bir gerilme değerine ulaştıktan sonra malzemenin gösterdiği davranışlar olarak incelenebilir. Plastik deformasyonlar yük kalktıktan sonra geri dönmez. Plastik deformasyonun başlangıcı bir akma kriteri yardımı ile belirlenmekte olup, akma sonrası deformasyon malzeme direncinin büyük ölçüde düşüşü sonucu çıkmaktadır. Malzemenin elasto - plastik davranışını hesaplamak için çeşitli metotlar vardır. Genelde aşağıdaki üç temel prensibe dayanır (Anonim 2014):

- a) Direngenlik matrisi değişimi metodu,
- b) Başlangıç şekil değişimi metodu,
- c) Başlangıç gerilme metodu.

Direngenlik matrisi değişimi metodu, plastik deformasyon bölgesinde her iterasyon sonunda direngenlik matrisinin yeniden hesaplanmasını gerektirir. Bu da problem çözme süresini uzattığı için pek tercih edilmez. Başlangıç şekil değişimi metodunda elastik olarak hesaplanmış gerilme için malzemenin gerçek davranışına uygun bir elasto-plastik başlangıç şekil değiştirmesi aranır. Metot, akma başladıktan sonra da mukavemet artışı devam eden malzemeler için geliştirildiğinden ϵ_0 ' ın tanımlanamadığı

durumlarda bu metot kullanılamaz. İdeal elasto-plastik malzeme gibi. Başlangıç gerilmesi metodu Zienkiewicz'in çalışmalarına dayanır ve elasto-plastik problemlerin çözümü için en çok kullanılan metottur. Teori, tek boyutlu bir problemin zorlanmasına dayanılarak anlatılmış, çok eksenli gerilme durumu için genelleştirilmiştir.

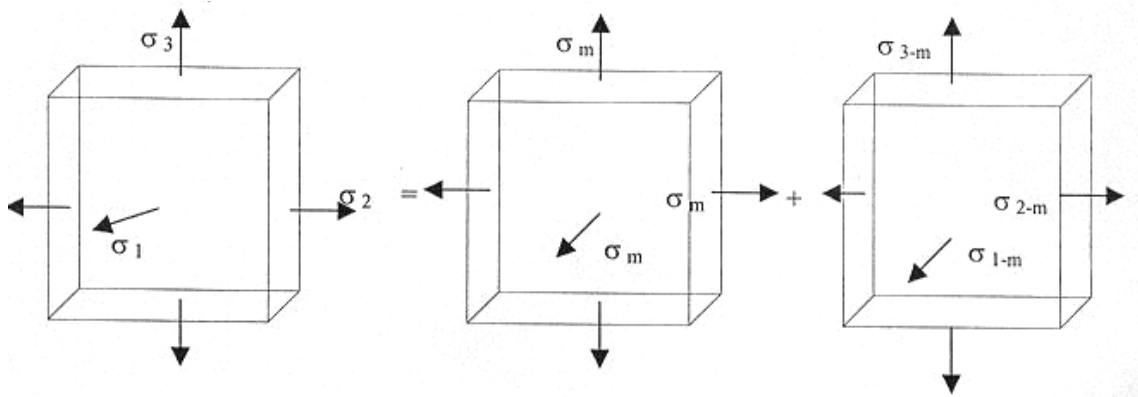
2.6.1. Plastisite teorisi

Plastisite teorisi elasto-plastik özellik gösteren malzemelerin gerilme şekil değiştirme ilişkilerini izah etmekten ibarettir. Plastik davranışlar zamana bağlı olmayan kalıcı şekil değiştirmelerle karakterize edilir. Bu şekil değiştirmeler malzemenin özelliğine göre belli bir gerilme değerine ulaşıldıktan sonra meydana gelir. Elasto-plastik incelemenin yapılabilmesi için şu üç şartın gerçekleşmesi gerekir;

- A. Elastik şartlarda malzeme davranışını tanımlamak için gerilme ve şekil değiştirmeler arasında lineer bir ilişki olmalıdır.
- B. Akmanın meydana geldiği noktada bir akma kriterinin dikkate alınması gerekir.
- C. Akma başladıktan sonra gerilme ve şekil değiştirmeler arasında bir formülasyona ihtiyaç vardır (Anonim 2014).

2.6.2. Biçim değiştirme enerjisi bileşenleri

Üç eksenli ve yalnızca asal gerilmelerin bulunduğu bir elemanı göz önüne alalım.



Şekil 2.9. Asal gerilmeler

Burada gerilmeler öyle olsun ki birinci elemanda yalnızca hacim değişikliği olsun ve herhangi bir çarpılma meydana gelmesin. İkinci elemanda ise yalnızca çarpılma meydana gelsin ve hacim değişikliği olmasın. Bu durumda ikinci şekil için birim hacimde şekil değiştirme,

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad (2.4)$$

olmalıdır.

$$\begin{aligned} \varepsilon_v = (1/E) [\sigma_1 - \sigma_m - \nu (\sigma_2 - \sigma_m + \sigma_3 - \sigma_m)] + (1/E) [\sigma_2 - \sigma_m - \nu (\sigma_1 - \sigma_m + \sigma_3 - \sigma_m)] \\ + (1/E) [\sigma_3 - \sigma_m - \nu (\sigma_1 - \sigma_m + \sigma_2 - \sigma_m)] = 0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Buradan,

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.6)$$

bulunur. σ_m ortalama veya hidrostatik gerilmedir. İkinci durum için çarpılma veya biçim değiştirme enerjisi,

$$U_g = \frac{1}{12G} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.7)$$

Deneyssel gözlemler plastik deformasyonun hidrostatik gerilmeden bağımsız olduğunu göstermiştir. Malzemenin plastik deformasyona uğramasına deviatorik gerilmeler sebep olur (Anonim 2014).

2.6.3. Akma kriterleri

Plastik deformasyonun başlangıcı akma kriterine göre belirlenir. Bu nedenle, malzemede oluşacak gerilmeler akma kriterleri ile değerlendirilmektedir. Malzemenin akma gerilmesi ile ilgili birçok kriter olup sünek malzemeler için en çok kullanılanları Tresca ve von-Mises teorileridir (Anonim 2014).

Von – Mises Kriteri

Bu teoriyi von – Mises, Huber ve Hencky geliştirmiştir. Birim hacim için genel halde çarpılma enerjisi;

$$U_g = \frac{1}{12G} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)] \quad (2.8)$$

Asal gerilmeler cinsinden

$$U_g = \frac{1}{12G} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.9)$$

Şeklinde yazılır. Bu kriter gere göre bir malzemenin akması, çarpılma enerjisi tek eksenli haldeki çarpılma enerjisine ulaştığı zaman olur. Tek eksenli halde;

$$U_g = \frac{1}{6G} \sigma_0^2 \quad (2.10)$$

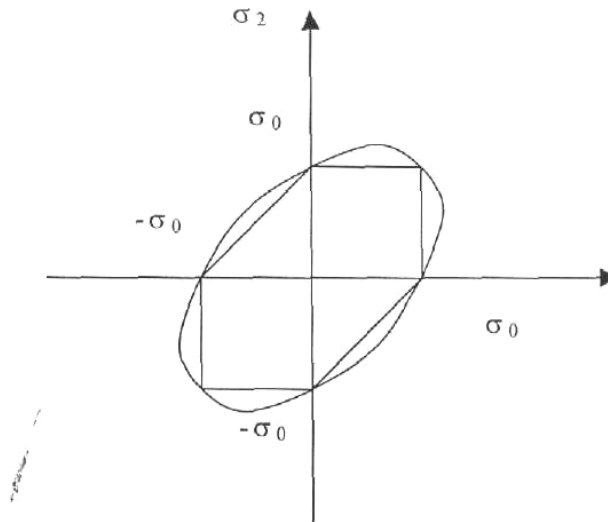
Bunu genel haldekine eşitlersek;

$$U_g = \frac{1}{6G} \sigma_0^2 = U_g = \frac{1}{12G} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (2.11)$$

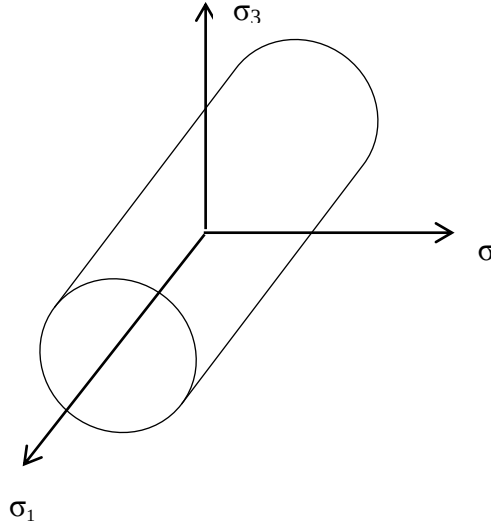
bulunur. İki eksenli halde;

$$\begin{aligned} \sigma_3 &= 0 \\ \sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 &= \sigma_0^2 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Bulunur ve diyagramı bir elipstir (Anonim 2014).



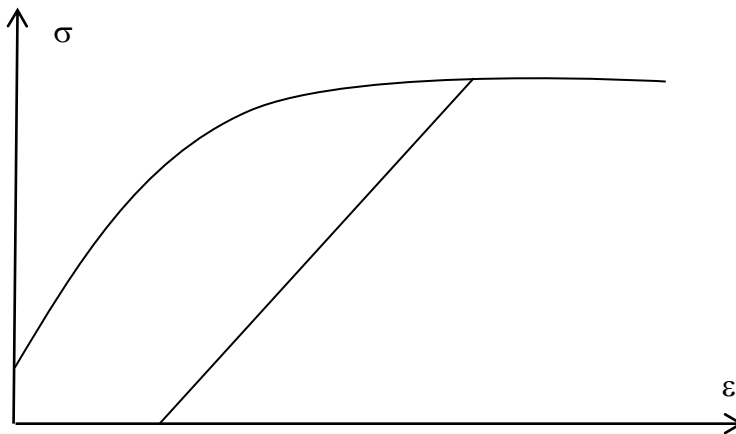
Bu elips maksimum kayma gerilmesi ile belirtilen köşe noktalardan geçmektedir. Üç boyutlu halde bu kriter bir silindirik yüzey gösterir ve dik kesit bir dairedir.



Şekil 2.10. Von-Mises Kriteri (Anonim 2014)

2.7. Plastik Deformasyon Sonucu Oluşan Artık Gerilmeler

Elastik sınır içinde kalmak şartı ile izotrop bir çubuğa bir eğilme momenti uygulanır ve yükleme sona erdirilirse çubuk ilk şeklini alır. Uygulanan moment arttırıldığında çubuğun herhangi bir yerinde elastik sınır üzerinde gerilmeler oluşursa, o noktada akma meydana gelir. Eğmeye çalışan moment kaldırıldığında akma görülen kısımların dışındaki bölgeler ilk durumuna gelmeye çalışır. Çubuğun her noktasında gerilmelerin sıfır olması gerekirken, plastik deformasyona uğrayan bölgelerde gerilme olduğu görülür. Bunlar geriye kalan artık gerilmelerdir (Anonim 2014).



Şekil 2.11. Yüken kaldırılması halinde σ - ϵ diyagramı

Artık Gerilmelerin Malzeme Mukavemetine Etkileri

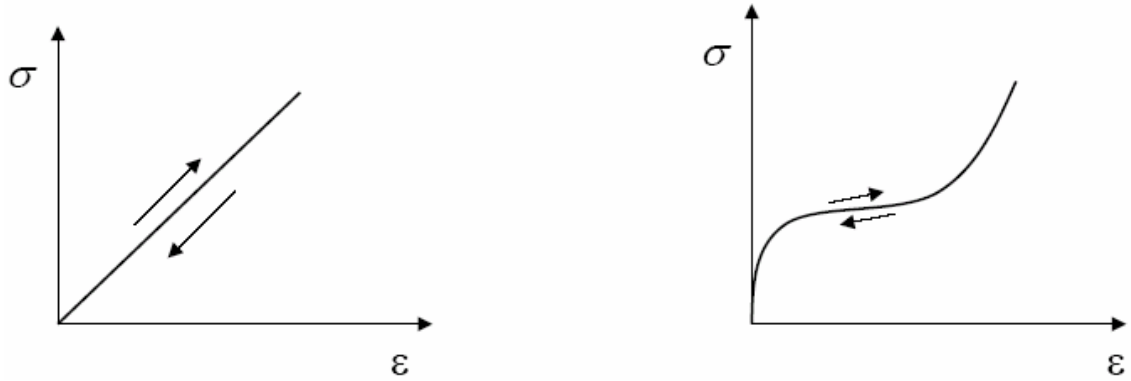
Malzeme yüzeyinde oluşturulan gerilmelerin yorulma ömrünü artırma veya azaltma yönündeki etkileri iki esasa dayanır:

1. Yorulma hasarları sadece çekme gerilmelerinden meydana gelir.
2. Malzeme yüzeyi, yüzey altına göre daha zayıftır.

Artık gerilmeler malzemede ya ısıtılma sebebiyle ya da mekanik yollarla oluşur. Bu gerilmeler malzemenin mukavemeti açısından bazen olumlu bazen de olumsuz etki yapar. Artık gerilmeler dış kuvvetle aynı yönde etki ediyorsa malzemede hasar oluşur.

2.8. Tanjant (Tangential) Modülü

Tanjant modülü tam olarak gerilme tensorunun şekil değiştirme tensoruna göre türevlenmesi ile ortaya çıkan bir malzeme özelliğidir ve ANSYS ile non-liner, yani elastoplastik bölgede çalışıldığı zaman bilinmesi gereken bir özelliktir.



Şekil 2.12. Tang Modülü (Anonim 2014)

Burada;

$$E = d\sigma / d\varepsilon \quad (2.13)$$

Değeri, tangential modulus olarak tanımlanır (Anonim 2014).

2.9. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu 1920’li yıllardan itibaren kullanılmaya başlanmış olmakla beraber, bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerle ancak 1960’lı yıllardan itibaren geniş bir kullanım alanı bulabilmiştir. Sonlu elemanlar metodu; karmaşık olan problemlerin daha basit alt yapılara ayrılarak her birinin kendi içinde çözümlenmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Metodun üç temel niteliği vardır: İlk olarak, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi, sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayrılır. İkincisi, her elemandaki sürekli fonksiyonların, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncüsü ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktalardaki (düğüm noktaları) değerleri alarak elde edilmesinin problem çözümünde yeterli olmasıdır (Tın 2006).

Sonlu elemanlar metodunda yapı, davranışı daha önce belirlenmiş olan bir çok elemana bölünür. Elemanlar düğüm noktası adı verilen noktalarda tekrar birleştirilirler. Bu şekilde cebrik bir denklem takımı elde edilir. Gerilme analizinde bu denklemler, düğümlerdeki denge denklemleridir. İncelenen probleme bağlı olarak bu şekilde yüzlerce, hatta binlerce denklem elde edilir. Bu denklem takımının çözümü ise bilgisayar kullanımını zorunlu kılmaktadır.

Sonlu elemanlar metodunda temel fikir, sürekli fonksiyonları bölgesel sürekli fonksiyonlar (genellikle polinomlar) ile temsil etmektir. Bunun anlamı, bir eleman içerisinde hesaplanması istenen büyüklüğün (örneğin yer değiştirmenin) değeri, o elemanın düğümlerindeki değerler kullanılarak interpolasyon ile bulunur. Bu nedenle sonlu elemanlar metodunda bilinmeyen ve hesaplanması istenen değerler düğümlerdeki değerlerdir. Bir varyasyonel prensip (örneğin; enerjinin minimum olması prensibi) kullanılarak büyüklük alanının nodlardaki değerleri için bir denklem takımı elde edilir. Bu denklem takımının matris formundaki gösterimi aşağıdaki gibidir.

$$[K] \cdot [D] = [R] \quad (2.14)$$

Burada [D] büyüklük alanının nodlardaki bilinmeyen değerlerini temsil eden vektör, [R] bilinen yük vektörü ve [K] ise bilinen sabitler matrisidir. Gerilme analizinde [K], rijitlik matrisi olarak bilinmektedir.

2.9.1. Sonlu elemanlar metodunun avantajları

Sonlu elemanlar metodunu diğer metodlardan üstün kılan başlıca özellikler şunlardır.

- . Sonlu elemanlar, boyutlarının esnekliği nedeniyle, karmaşık şekilli bir cismi temsil edebilir.
- . Çok bağıntılı bölgeler (bir veya çok delikli cisimler) veya köşeleri olan bölgeler kolayca incelenebilir.
- . Değişik malzeme veya geometrik özellikleri bulunan problemler kolayca incelenebilir.
- . Sınır şartları kolayca uygulanabilir (Özdemir 2006).

2.10. ANSYS Yazılım Programı

ANSYS genel amaçlı sonlu elemanlar paket programıdır ve fiziksel problemlerin çözümünde kullanılır. Bu problemler; statik/dinamik yapısal analizler (lineer veya lineer olmayan), ısı transferi ve akış problemleri ile akustik ve elektromanyetik problemleri içerir. Genel olarak, ANSYS kullanarak sonlu elemanlar analizleri üç kademede gerçekleştirilir (Anonim 2013).

2.10.1. Modelleme (Preprocessing)

Modelleme kademesi aşağıdakileri içerir:

- . **Başlığın belirlenmesi:** Problemin sonraki dönemde rahat erişilebilir olması amacıyla yaptığımız işe bir isim verilmesi diye düşünülebilir. Bu seçenek özellikle aynı temel

model üzerinde farklı yükleme seçenekli çözümler gerçekleştirilmesi durumunda çok faydalıdır.

. Modelin oluşturulması: Model genellikle iki veya üç boyutlu uzayda uygun birimler (m., mm., in., vb.) kullanılarak çizilir. Sonlu elemanlar modeli iki boyutlu veya üç boyutlu modeller olarak sınıflanabilir. Analizini yapacağımız fiziksel modelin bunlardan hangisine girdiğinin önceden belirlenmiş olması gerekir. Sistemin üç boyutlu olduğu durumlarda mümkün ise, düzlem gerilme, düzlem şekil değiştirme veya eksenel simetri özellikleri kullanılarak model iki boyutlu olarak tasarlanabilir. Sistemde simetri olması durumunda bunun tanımlanması, sonlu elemanlar modelimizin basitleştirilmesine yarar. Modelin oluşturulması esnasında dikkat edilmesi gereken konulardan biri, çizimde kullanılan birim ile malzeme özellikleri ve uygulanan yük birimlerinin uyumlu olmasıdır.

. Eleman tipinin belirlenmesi: Eleman seçimi, analizde kullanılacak olan matematiksel modelin belirlenmesi açısından son derece önemlidir. Elemanlar yapılacak analizin çeşidine göre seçilir. Yani statik, termal, akışkan veya elektromanyetik analizler için farklı elemanlar kullanılır.

Benzer şekilde analiz edilecek olan modelin boyutu da (iki veya üç boyutlu) eleman seçimindeki etkenlerden biridir. İki boyutlu modellerin X-Y düzleminde tanımlanması gereklidir. Eksenel simetrik modeller de iki boyutlu model olarak kabul edilirler.

ANSYS geniş bir eleman kütüphanesine sahiptir. Bir eleman, maksimum sekiz karakterden oluşan ve grup tanımlamasını içeren bir isim ile belirlenir. Ayrıca her bir elemene ait özel bir numara bulunur. Kütüphaneden bir eleman seçimi **ET** komutu ile gerçekleştirilir.

. **Malzeme özelliklerinin girilmesi:** Pek çok eleman tipi, analiz gerçekleştirebilmek için malzeme özelliklerinin belirlenmesini gerektirir. Uygulamaya bağlı olarak, malzeme özellikleri;

- Lineer veya lineer olmayan
- İzotropik veya anizotropik
- Sıcaklıktan bağımsız veya sıcaklığa bağımlı olabilir.

Herbir malzeme özelliği grubu için bir malzeme referans numarası verilir. Malzeme referans numarası ile malzeme özelliklerini gösteren tabloya “malzeme tablosu” denir. Bir analiz süresince birden fazla malzeme ile çalışılabilir.

Model elemanlara bölünürken ilgili malzeme numarasının da belirtilmesi gerekir. Bu işlem **MAT** komutunun MAT, Malzeme Numarası şeklinde kullanımı ile gerçekleştirilebilir.

. **Modelin elemanlara bölünmesi:** Sonlu elemanlar çözümünün gerçekleştirilebilmesi için eleman ve düğüm noktalarına ihtiyaç duyarız. Elemanlara bölme işlemi de katı modelin eleman ve düğüm noktaları ile doldurulması işlemidir.

Bir sonlu elemanlar analizinde elemanlara bölme işlemindeki eleman yoğunluğu arttıkça çözüm gerçek çözüme o kadar yaklaşır. Ancak, eleman yoğunluğu arttıkça, çözüm süresi ve bilgisayar kaynağı gereksinimi de o ölçüde artar. Dolayısıyla gerekli olan eleman yoğunluğuna karar vermek gerekir. Bunu analiz öncesinde tahmin etmek oldukça güçtür.

Bir katı modeli elemanlara bölme işlemine, eleman şeklini seçerek başlamak iyi bir başlangıç noktası olacaktır. Bunun için kullanılan komut **MSHAPE**'dir (Anonim 2013).

2.10.2. Çözümleme (Solution)

Çözümleme kademesi aşağıdakileri içerir:

. **Analiz tipinin belirlenmesi:** Aslında bir modelin oluşturulmaya başlanması ile analiz tipi önceden belirlenmiş olsa da, ANSYS içinde analiz tipinin belirlenmesi işlemi genellikle çözüm (solution) işlemcisi içerisinde gerçekleştirilir.

Genel olarak analizler;

- Yapısal
- Termal
- Elektromanyetizma
- Akışkan
- Bağlı Alan (coupled field)

alanlarından birine dahildir. Analizin adı geçen bilim dallarından birine ait olması durumu, seçilen elemanın tipi ile yani elemanın sahip olduğu serbestlik derecesi ile belirlenir.

Analiz tipinin belirlenmesi için kullanılan komut **ANTYPE**'dir. Bu komut ANTYPE, Analiz Tipi, Analiz Durumu şeklinde kullanılır.

. **Sınır şartlarının tanımlanması:** Eğer modele bir yük uygulanırsa, model bilgisayarın sanal dünyasında sonsuza kadar ivmelenir. Bu ivmelenme bir sınırlılık veya bir sınır şartı uygulanana kadar devam eder. Yapısal sınır şartları genellikle sıfır yerdeğiştirme, termal sınır şartları belirlenmiş bir sıcaklık veya akışkan sınır şartları için bir basınç olarak tanımlanır. Bir sınır şartı bütün yönlerde (x,y,z) uygulanabileceği gibi, yalnızca belirli bir yönde de tanımlanabilir. Sınır şartları anahtar noktalarda, (key point) düğüm

noktalarında, (line) çizgi veya (area) alanlarda tanımlanabilir. Sınır şartı, simetri tipinde olabilir veya olmayabilir.

. Yüklerin uygulanması: ANSYS içinde yük tanımlama işlemi belirli şartlar altında sistem davranışının belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilir. Bir analiz için yük tanımlama işlemi, anahtar öneme sahip bir kademedir.

Pek çok yük, katı model veya sonlu elemanlar modeli üzerine uygulanabilir. Örneğin kuvvetler, bir düğüm noktasına veya bir anahtar noktaya uygulanabilir. Yüklerin nasıl uygulandığına bakmadan ANSYS çözücüsü bunları sonlu elemanlar yükleri olarak algılar. Yani eğer yükler katı model üzerine uygulanmış yükler ise, bunlar otomatik olarak çözüm başlangıcında düğüm noktası ve elemanlara transfer edilirler.

Genel olarak yükleri altı kategoriye bölmek uygun olacaktır. Bunlar;

- serbestlik derecesi sınırlılıkları,
- kuvvetler(bir noktaya yoğunlaşan yükler),
- yüzey yükleri,
- cisim yükleri,
- atalet yükleri,
- eş alan yükleridir.

. Çözüm: Genel olarak bir sonlu elemanlar çözücüsü üçe ayrılır. Bunlar ön-çözücü, matematik motoru ve son-çözücüdür. Ön-çözücü modeli okur ve modeli matematiksel şekilde formülize eder. Preprocessing kademesinde tanımlanan bütün parametreler ön-çözücü tarafından kontrol edilir ve herhangi bir şeyin eksik bırakıldığını bulursa, matematik motorunun devreye girmesini engeller. Model doğruysa, çözücü devreye girerek eleman direngenlik matrisini oluşturur ve yer değiştirme, basınç gibi sonuçları üreten matematik motorunu çalıştırır. Matematik motoru tarafından üretilen sonuçlar,

son-çözücü kullanılarak düğüm noktaları için deformasyon miktarı, gerilme, hız gibi değerler üretilir (Anonim 2013).

2.10.3. Sonuçları görüntüleme (Postprocessing)

Bu bölüm; sonuçların okunduğı ve yorumlandığı bölümdür. Sonuçlar; tablo şeklinde, kontur grafikler şeklinde veya deforme olmuş cisim şeklinde sunulabilir. Ayrıca animasyon yardımı ile modelin yük altındaki davranışı gözler önüne sunabilir. Yapısal tipteki problemlerin sunulmasında, kontur grafikler genellikle en etkin yöntem olarak kullanılır. Postprocessor, x, y, z koordinatlarında hatta koordinat ekseninde belli bir açıdaki gerilme ve birim şekil değıştirmelerin hesaplanmasında kullanılabilir. Etkin gerilme ve birim şekil değıştirme sonuçları ile akma gerilmesi ve şekil değıştirme sonuçlarını da görmek mümkündür. Bunun dışında birim şekil değıştirme enerjisi ve plastik şekil değıştirme miktarı da kolaylıkla görsel olarak elde edilebilir.

Sonuçlar görsel olarak çok etkileyici bir biçimde kontur grafikler olarak rahatlıkla elde edilebilse de; sonuçların kalitesi, modelin fiziksel problemi gerçekte ne kadar yansıttığına ve dolayısıyla analizi yapılan modelin kalitesine bağlıdır. Başarılı bir analiz için dikkatli bir planlamanın yapılması zorunluluğı göz ardı edilmemelidir (Anonim 2013).

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada, alüminyum veya farklı istifleme açılara sahip kompozit malzemelerin yapısal yapıştırıcıyla birleştirilerek elde edilen tek tesirli bağlantı geometrisinin tek eksenli çeki yükü altında mekanik özellikleri araştırıldı. Yapıştırılan malzeme olarak AA2024-T3 alüminyum veya 16 tabakalı karbon epoksi kompozit, yapıştırıcı olarak ise çift bileşenli yapısal yapıştırıcı DP460 kullanıldı. Deneysel çalışmada, AA2024-T3 alüminyum, $[0]_{16}$, $[0/90]_8$, $[45/-45]_8$ ve $[0/45/-45/90]_4$ istifleme açısına sahip kompozit malzemeler kullanılarak beş farklı bağlantı tipi üretildi ve tek eksenli çeki yükü uygulandı.

3.1. Yapıştırılan Malzemeler

Bu çalışmada, yapıştırılan malzeme olarak Çizelge 3.1’de ve mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilen 2000 serisi alüminyum alaşımlarından AISI AA2024-T3 (DIN AlCuMg2) malzemesi kullanılmıştır. Bu alaşım iyi işlenebilme özelliklerine, yüzey kalitesine ve yeterince şekillenebilme için yüksek mukavemete sahip bir alaşım olup, yapısal uygulamalar için geliştirilmiştir.

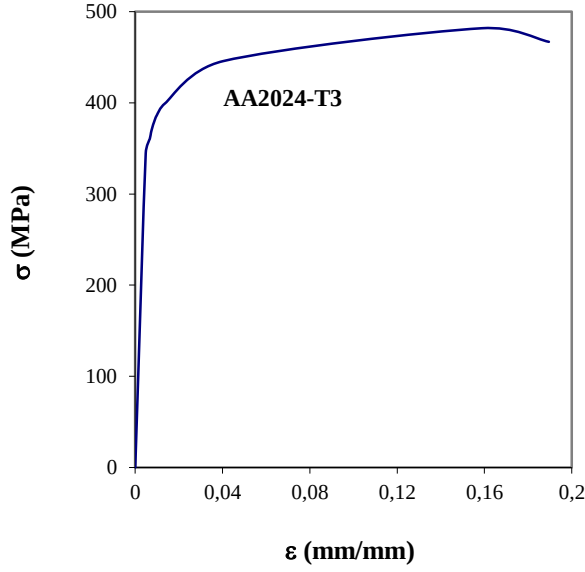
Bu alaşım, uçak ve füze parçalarında, dişli ve millerde, cıvata ve somunlarda, saat ve bilgisayar parçalarında, hidrolik valflarda, mermi ve diğer askeri mühimmatlarda, pistonlarda, veterinerlik ve ortopedik ekipmanlarda ve yapılarda yaygın olarak kullanılan bir malzemedir.

Çizelge 3.1. AA 2024-T3’ün kimyasal bileşimi (% ağırlık) (Çitil 2010)

Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
93.5	0.1	3.8-4.9	0.5	1.2-1.8	0.3-0.9	0.5	0.15	0.25

Çizelge 3.2. AA 2024-T3'ün fiziksel ve mekanik özellikleri (Çitil 2010)

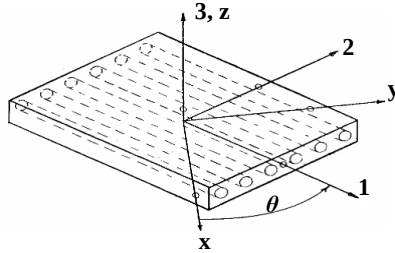
Mekanik Özellik	Değer	Açıklama
Yoğunluk	2780 kg/m ³	
Sertlik, Brinell	120	
Sertlik, Knoop	150	
Sertlik, Rockwell A	46.8	
Sertlik, Rockwell B	75	
Sertlik, Vickers	137	
Akma Mukavemeti	345 MPa	
Kopma Mukavemeti	485 MPa	
% Kopma Uzaması	% 18	5 cm uzunluk ve 1.62 mm kalınlık
Elastisite Modülü, E	72.4 GPa	Bası modülü % 2 daha fazla
Poisson Oranı, ν	0.33	
Yorulma Mukavemeti	140 MPa	500.000.000 çevrim
İşlenebilirlik	% 70	
Kayma Mukavemeti	280 MPa	
Kayma Modülü, G	28 GPa	



Şekil 3.1. Gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrisi (AA2024-T3) (Akpınar 2013)

Ayrıca çalışmada kullanılan T300/934 karbon/epoksi kompozitin mekanik özellikleri Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. T300/934 karbon/epoksi kompozitin mekanik özellikleri (Goetschel and Radford 1997).



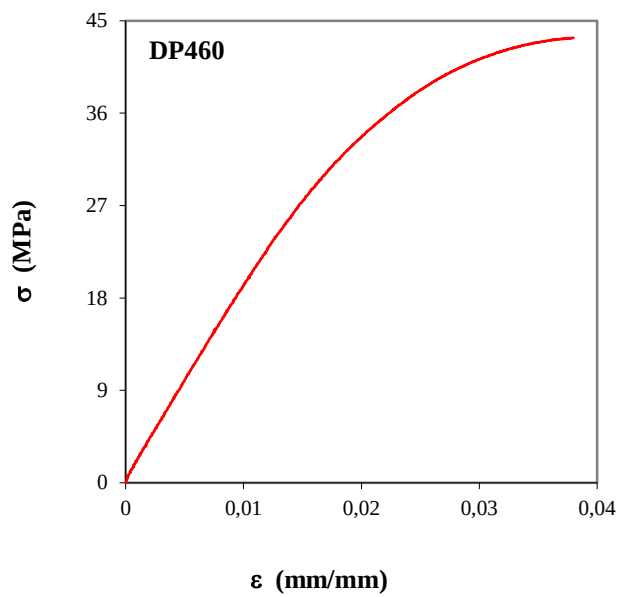
E_1 ; 1 yönündeki elastisite modülü	141.6 GPa
E_2, E_3 ; 2 ve 3 yönündeki elastisite modülü	10.7 GPa
G_{12}, G_{13} ; 1-2 ve 1-3 yönündeki kayma modülü	3.88GPa
G_{23} ; 2-3 yönündeki kayma modülü	2.68 GPa
$\nu_{12}; \nu_{13}$; 1-2 ve 1-3 yönündeki poisson oranı	0.268
ν_{23} ; 2-3 yönündeki poisson oranı	0.495
Tabaka kalınlığı	0.268mm

3.2. Yapıştırıcı

Yapıştırma işleminde; sıvı veya film yapıştırıcılar kullanılabilir. Sıvı yapıştırıcılar, yapısal yapıştırma bağlantılarında oldukça sık kullanılırlar ve yüksek bağlantı dayanımı, düzgün gerilme dağılımı ve iyi boşluk doldurma gibi avantajlar sağlarlar. Ancak, uygulanma esnasında bazı zorlukları da beraberlerinde getirirler. Yapılan çalışmada yapıştırıcı olarak çift bileşenli sıvı epoksi (DP460) kullanılmıştır. 3M™ DP460; epoksi (B) ve hızlandırıcı (A) nın hacimce B:A=2:1 oranında karışımıyla oluşan sıvı yapıştırıcıdır. Metal, seramik, cam ve birçok kompozit malzemenin birleştirilmesinde kullanılır. DP460 farklı şartlarda kürleşebilmektedir. Bu yüzden yapıştırıcının 120°C sıcaklıkta 60 dakika bekletilerek elde edilen kürleşme şartı kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Yapıştırıcının mekanik özellikleri (Akpınar 2013)

Özellik	DP460
E (MPa)	2077
ν	0.33
ν : Poisson oranı, E: Elastisite modülü	

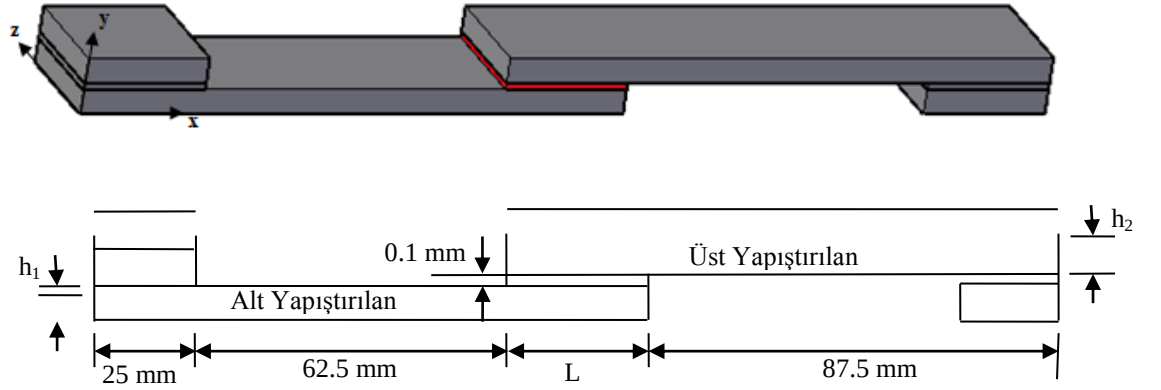


Şekil 3.2. Gerçek gerilme-gerçek şekil değiştirme eğrisi (DP 460) (Akpınar 2013)

3.3. Numuneler

3.3.1. Deneyde kullanılan bağlantı numunesi

Çekme yükü altında yapılacak deneyler için geometrik parametreleri Şekil 3.3 ve Çizelge 3.5’de verilen her bir bağlantı tipi için ayrı ayrı numune olmak üzere toplam 20 adet tek tesirli bindirme bağlantısı (TTBB) numunesi aşağıda verilen işlem basamakları uygulanarak hazırlanmıştır.



Şekil 3.3. Tek tesirli bindirme bağlantı (TTBB) geometrisi

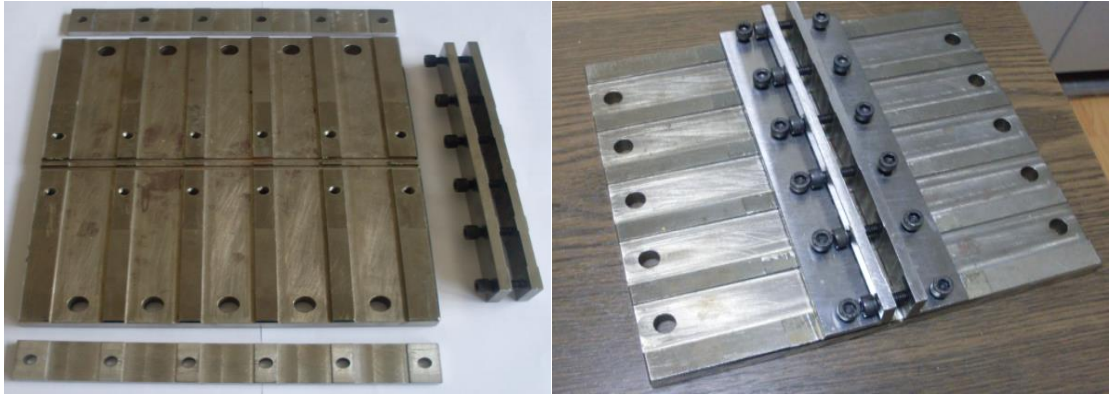
Numune parçalarının yüzeyleri, aşağıdaki adımlar takip edilerek hazırlanmıştır:

1. Hazırlanan alüminyum numuneler 600 mikron zımpara ile numune parçaları, üzerinden yağ, gres, kir ve toz gibi atıkların temizlenmesi için zımparalandı,
2. Bütün numuneler musluk suyu ve toz deterjan kullanılarak temizleme işlemine tabi tutuldu,
3. Numuneler tekrar saf suya daldırıldı,
4. Tüm numune numuneler 50°C sıcaklıktaki bir fırın içerisinde 20 dakika kurutularak yapıştırma öncesi yüzey hazırlama işlemleri tamamlandı.

Çizelge 3.5. Deneyde kullanılan geometrik parametreler

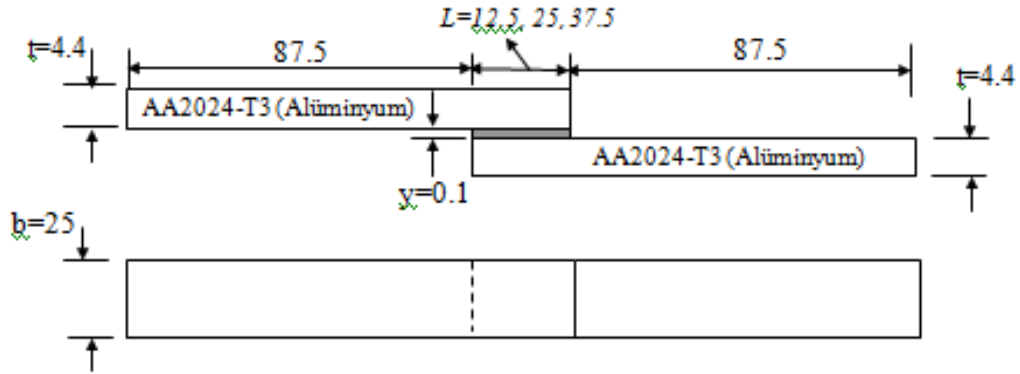
Tip		Alt Yapıştırılan	Üst Yapıştırılan	h_1-h_2	L(Bindirme Uzunluğu)
Tip -I	Tip -I a	[0] ₁₆	[0] ₁₆	4.4 4.4	- 25
	Tip -I b	[0/90] ₈	[0/90] ₈	4.4 4.4	- 25
	Tip -I c	[45/-45] ₈	[45/-45] ₈	4.4 4.4	- 25
	Tip -I d	[0/45/-45/90] ₄	[0/45/-45/90] ₄	4.4 4.4	- 25
Tip -II	Tip -II a	[0] ₁₆	AA2024-T3	4.4 4.4	- 25
	Tip -II b	[0/90] ₈	AA2024-T3	4.4 4.4	- 25
	Tip -II c	[45/-45] ₈	AA2024-T3	4.4 4.4	- 25
	Tip -II d	[0/45/-45/90] ₄	AA2024-T3	4.4 4.4	- 25
Tip -III	Tip -III a	[0] ₁₆	AA2024-T3	4.4 4.4	- 25
	Tip -III b	[0] ₁₆	AA2024-T3	4.4 3.2	- 25
	Tip -III c	[0] ₁₆	AA2024-T3	4.4 1.6	- 25
Tip -IV	Tip -IV a	AA2024-T3	AA2024-T3	4.4 4.4	- 25
	Tip -IV b	AA2024-T3	AA2024-T3	4.4 3.2	- 25
	Tip -IV c	AA2024-T3	AA2024-T3	4.4 1.6	- 25
Tip -V	Tip -V a	[0] ₁₆	[0] ₁₆	4.4 4.4	- 12.5
	Tip -V b	[0] ₁₆	[0] ₁₆	4.4 4.4	- 25
	Tip -V c	[0] ₁₆	[0] ₁₆	4.4 4.4	- 37.5
Tip -VI	Tip -VI a	AA2024-T3	AA2024-T3	4.4 4.4	- 12.5
	Tip -VI b	AA2024-T3	AA2024-T3	4.4 4.4	- 25
	Tip -VI c	AA2024-T3	AA2024-T3	4.4 4.4	- 37.5

Yapıştırılan malzemelerin konumunun korunabilmesi, yapıştırıcı tabaka kalınlığının ayarlanabilmesi ve aynı zamanda düzgün basınç uygulanabilmesi iyi tasarlanmış bir kalıbın kullanımını gerektirmektedir. Bu yüzden Şekil 3.4'te gösterilen kalıp kullanılarak çekme deneylerinde kullanılacak numuneler aşağıda anlatıldığı gibi hazırlanmıştır.



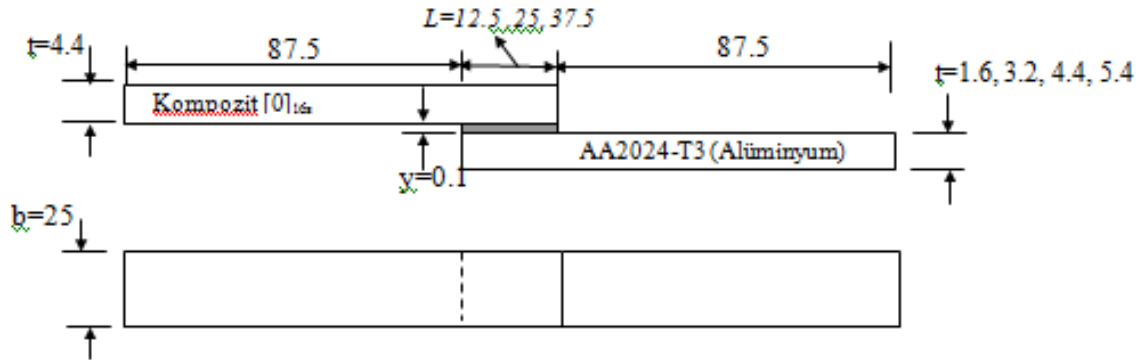
Şekil 3.4. Deney numunelerinin üretilmesinde kullanılan kalıp

- Silikon yağlayıcı, kalıp üzerine püskürtülerek çok ince bir film tabaka oluşturulmuştur. Böylece, hem numunelerin kalıba yapışması engellenmiş hem de kurluşme sonrası kolayca ayrılması sağlanmıştır.
 - Bağlantı numunelerin bindirme bölgelerine sıvı yapıştırıcı uygulandı ve bir master yardımıyla yapıştırılacak yüzeylere yayılmıştır.
 - Yapıştırıcıların kurluşmesi ve yapıştırıcı kalınlığının 0.10 mm olması için gereken basınç kalıbın üzerindeki cıvataların belirli oranda sıkıştırılmasıyla sağlanmıştır.
 - Daha sonra numunelerin bulunduğu kalıp ısıtım fırınına yerleştirilmiştir
- Yapıştırıcılar için verilen kurluşme şartları, ısıtım fırınının kontrol paneli kullanılarak programlandı ve numunelerin 60°C 120 dakika kurluşmesi sağlanmıştır.



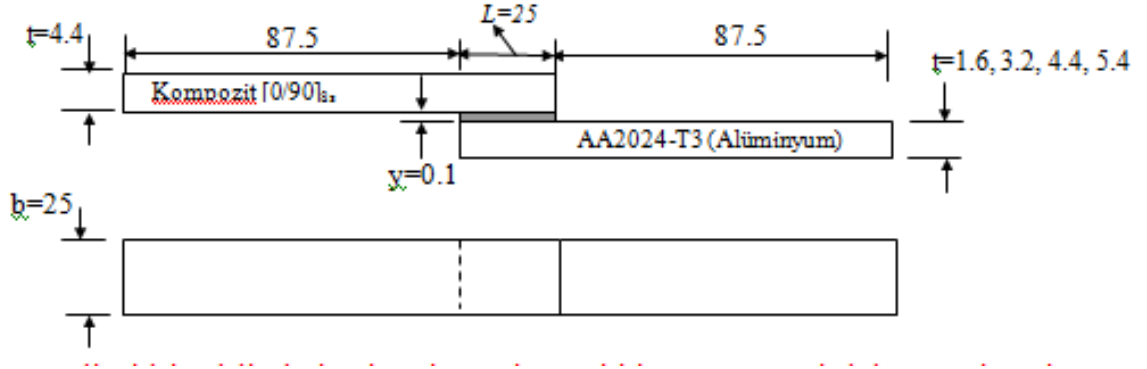
Şekil 3.5. AA2024-T3 metalik malzemelerin yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı numunesi

. Farklı bindirme uzunluğuna sahip metalik (AA2024-T3) malzemeler tek tesirli bağlantı yöntemiyle (single lap) birleştirilerek, çeki yükü altındaki deneysel davranışları belirlendi.



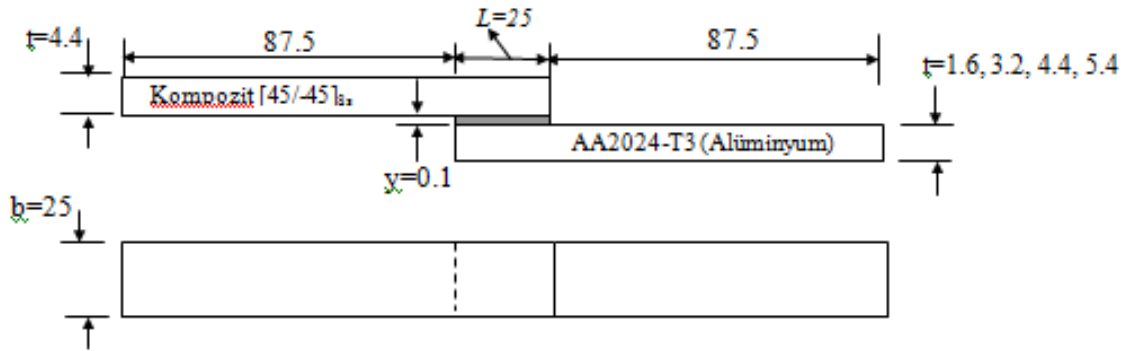
Şekil 3.6. AA2024-T3 metalik malzeme ile kompozitin yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı numunesi

. Farklı bindirme uzunluğuna ve kalınlığa sahip metalik (AA2024-T3) malzeme ile 0^0 takviye açısına sahip kompozitin tek tesirli bağlantı yöntemiyle (single lap) birleştirilerek, çeki yükü altındaki deneysel davranışları belirlendi.



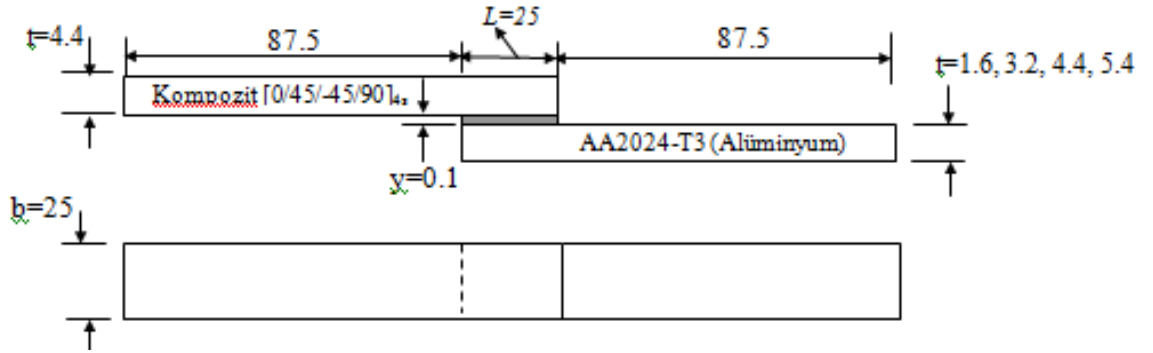
Şekil 3.7. AA2024-T3 metalik malzeme ile kompozitin yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı numunesi

. Farklı bindirme uzunluğa ve kalınlığa sahip metalik (AA2024-T3) malzeme ile 0/90° takviye açısına sahip kompozitin tek tesirli bağlantı yöntemiyle (single lap) birleştirilerek, çeki yükü altındaki deneysel davranışları belirlendi.



Şekil 3.8. AA2024-T3 metalik malzeme ile kompozitin yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı numunesi

. Farklı bindirme uzunluğa ve kalınlığa sahip metalik (AA2024-T3) malzeme ile 45/-45° takviye açısına sahip kompozitin tek tesirli bağlantı yöntemiyle (single lap) birleştirilerek, çeki yükü altındaki deneysel davranışları belirlendi.



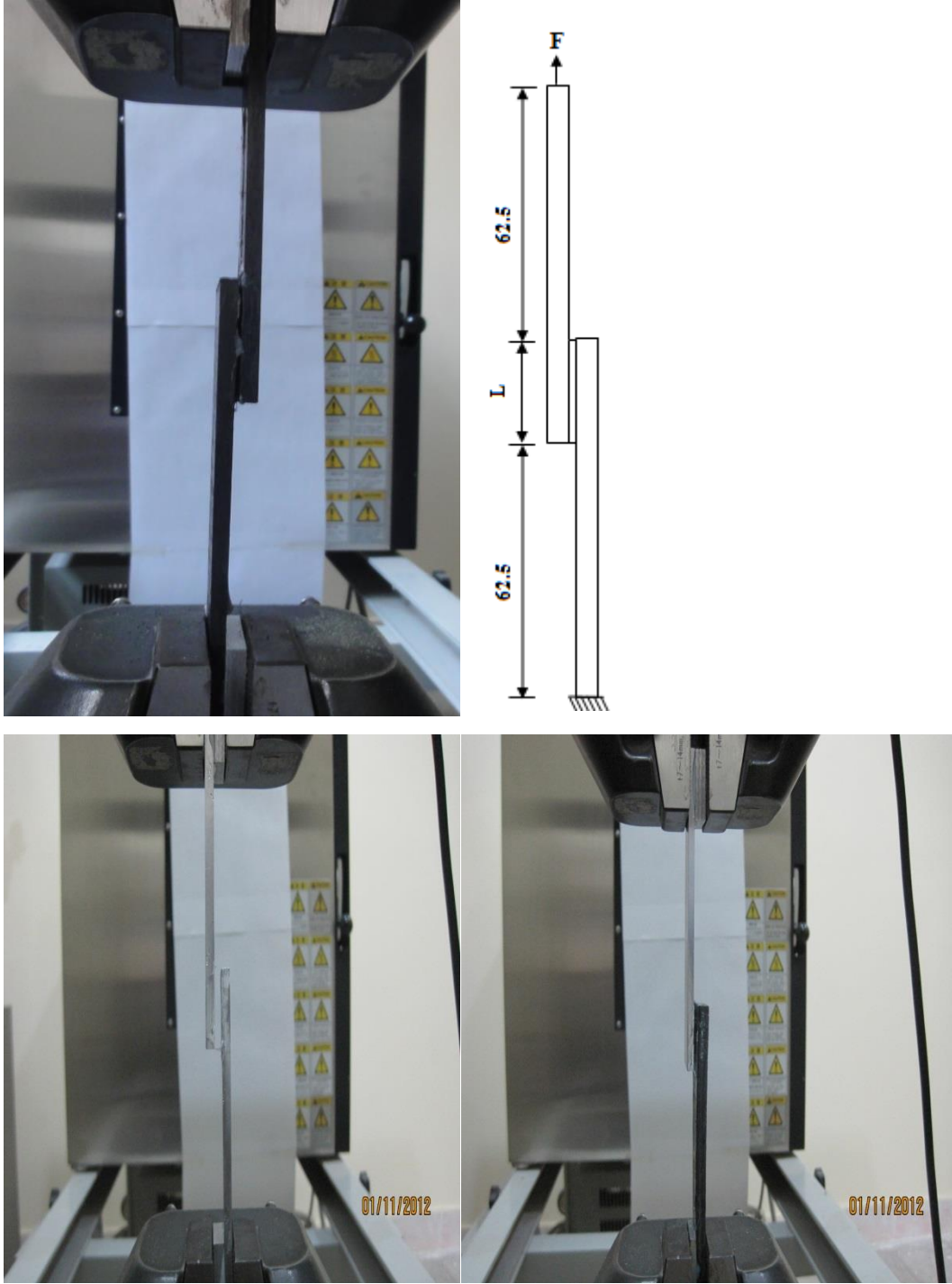
Şekil 3.9. AA2024-T3 metalik malzeme ile kompozitin yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantı numunesi

. Farklı bindirme uzunluğa ve kalınlığa sahip metalik (AA2024-T3) malzeme ile 0/45/-45/90° takviye açısına sahip kompozitin tek tesirli bağlantı yöntemiyle (single lap) birleştirilerek, çeki yükü altındaki deneysel davranışları belirlendi.



Şekil 3.10. Üretilmiş numuneler

Deneylerin tümü bilgisayar kontrollü Shimadzu AG-I 100 (Tokyo, Japan) üniversal çekme cihazında 18°C ve %30 nem oranında 1 mm/dak.'lık çekme hızında yapılmıştır. Sınır şartları ve numunelere uygulanan kuvvetler gösterildiği gibidir.

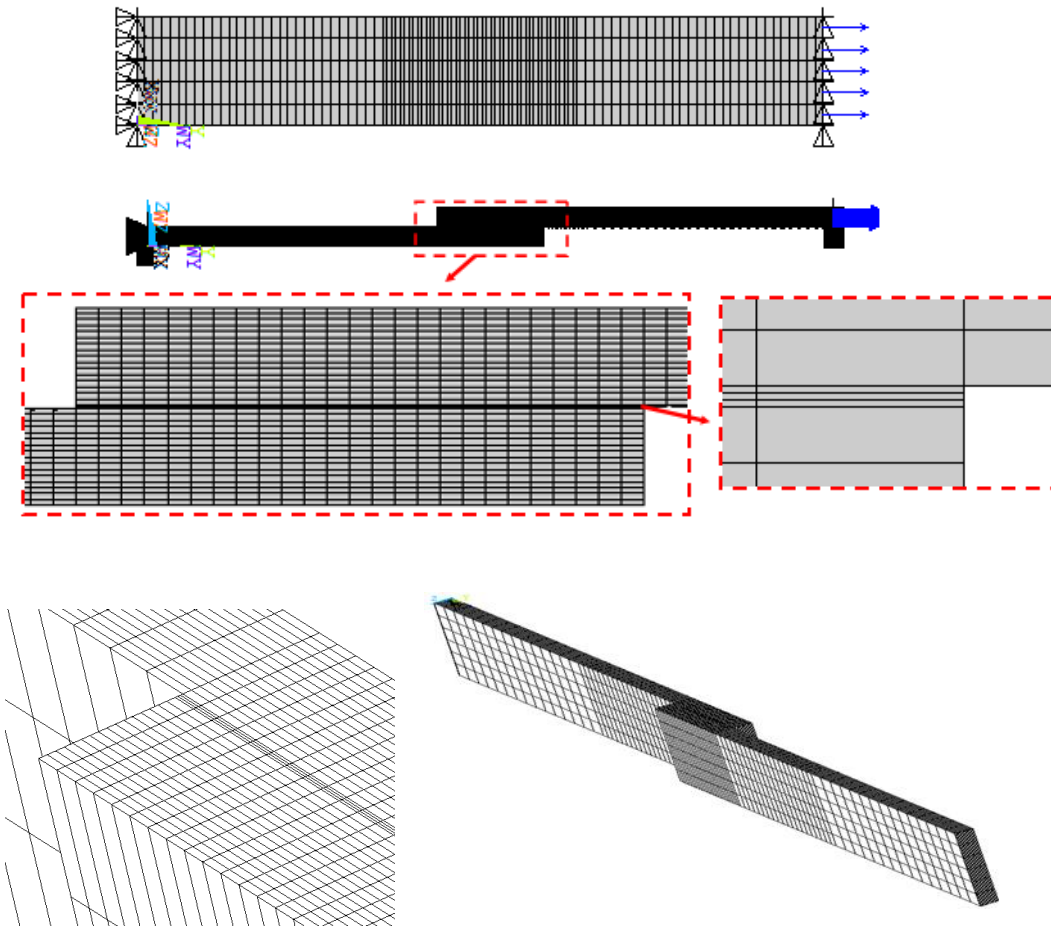


Şekil 3.11. Çekme deneylerinde kullanılan sınır şartları ve yükleme

Elasto-plastik sonlu eleman analizlerinde, deneysel çalışmalarda kullanılan yapıştırıcıyla (DP 460) birleştirilmiş TTBB numuneleri çeki yükü altında ANSYS 14 paket programı kullanılarak üç boyutlu modellenmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde

kullanılan numune boyutları, yükleme ve sınır şartları, deneysel çalışmalarda kullanılanlarla aynıdır.

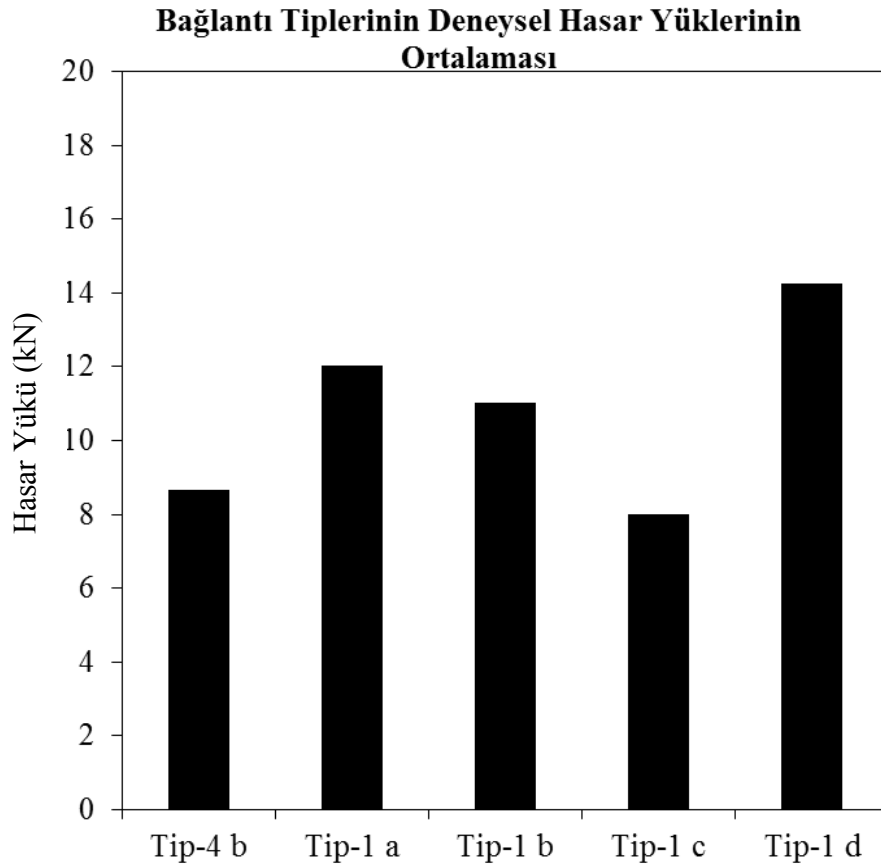
3 boyutlu analizlerde dört farklı istifleme açısına sahip kompozit malzemeler lineer elastik malzeme kabul edilerek Solid 65 ile 16 tabaka olarak modellenmiş olup, alüminyum ve yapıştırıcı tabakası non-lineer malzeme olarak Solid 185 ile modellenmiştir. Gerilme dağılımları açısından kritik olan yapıştırma işleminin gerçekleştirildiği bölge daha küçük elemanlara bölünmüştür.



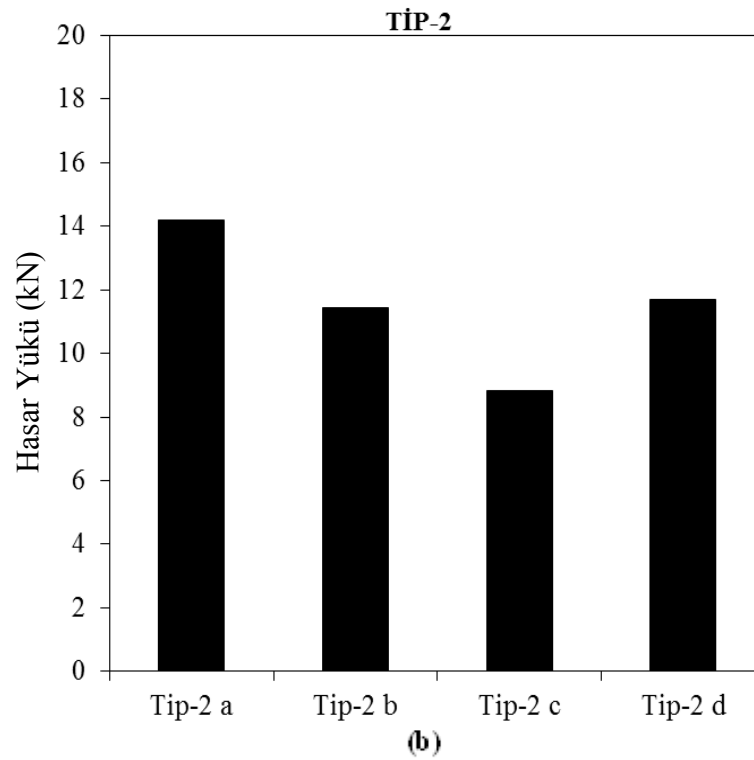
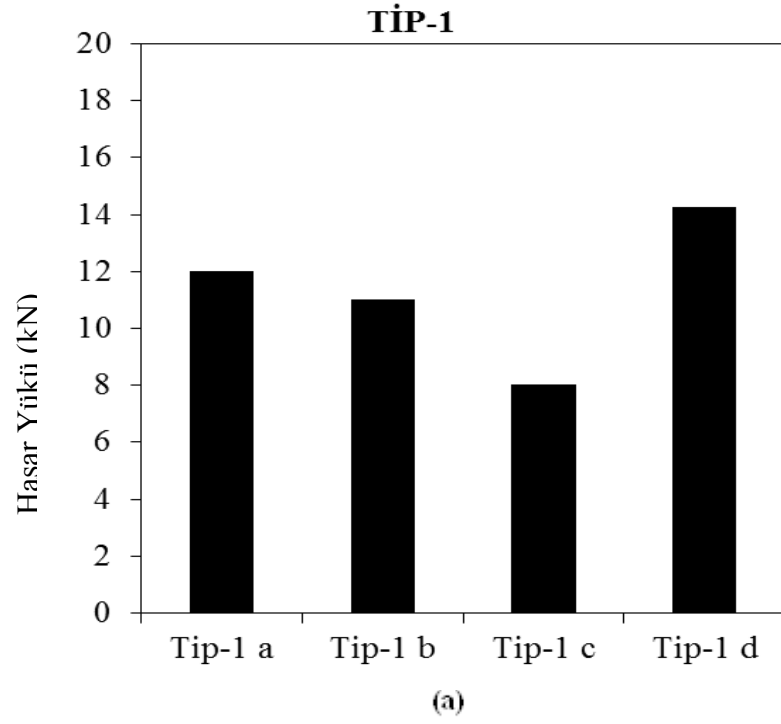
Şekil 3.12. Çekme yüküne maruz TTBB tipine ait üç boyutlu yükleme ve sınır koşullarının sonlu eleman modeli

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

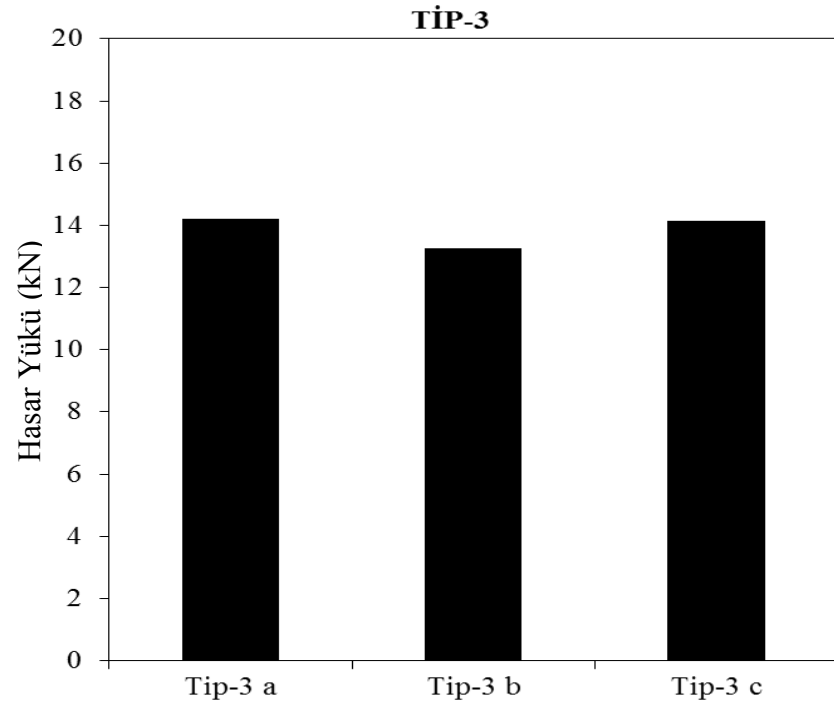
Yapıştırılan malzeme olarak alüminyum-alüminyum ve dört farklı istifleme açısına sahip kompozit-kompozit kullanılarak elde edilen beş farklı tek tesirli bindirme bağlantısının (TTBB) herbir bağlantı tipinden üçer numune test edildi. Test edilen üçer numunenin ortalama maksimum hasar yükü alınarak her bir bağlantı tipi maksimum hasar yükleri Şekil 4.1’de verilmiştir.



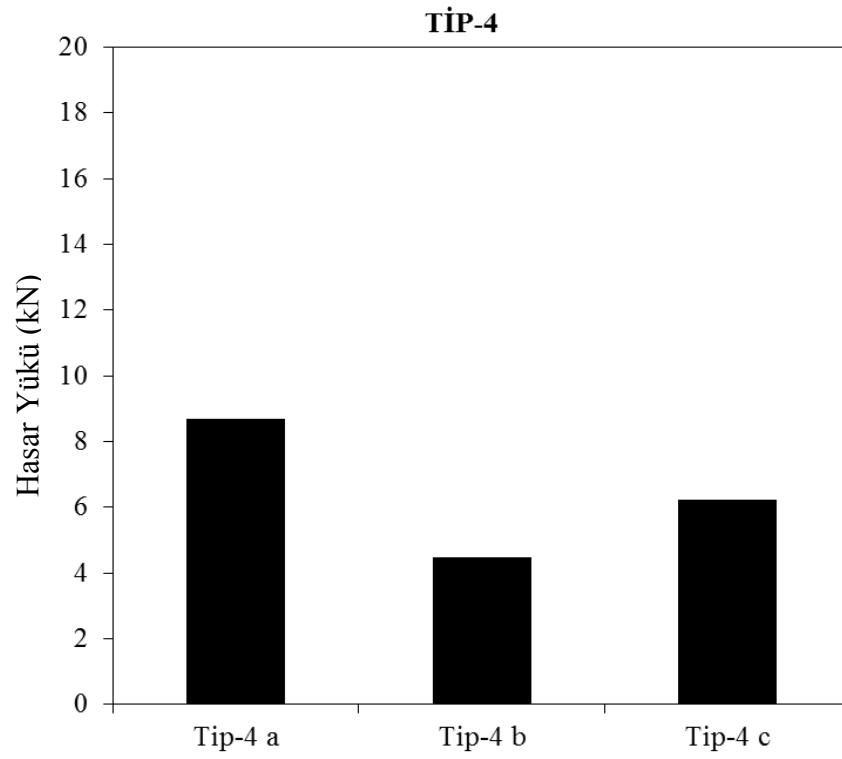
Şekil 4.1. Beş farklı TTBB tipinden elde edilen maksimum hasar yüklerinin ortalaması (Tip-4b, Tip-1a, Tip-1b, Tip-1c ve Tip-1d)



Şekil 4.2. Kompozitin dört farklı istifleme açısına göre elde edilen maksimum hasar yükleri
a) Tip-1 b) Tip-2.



(a)

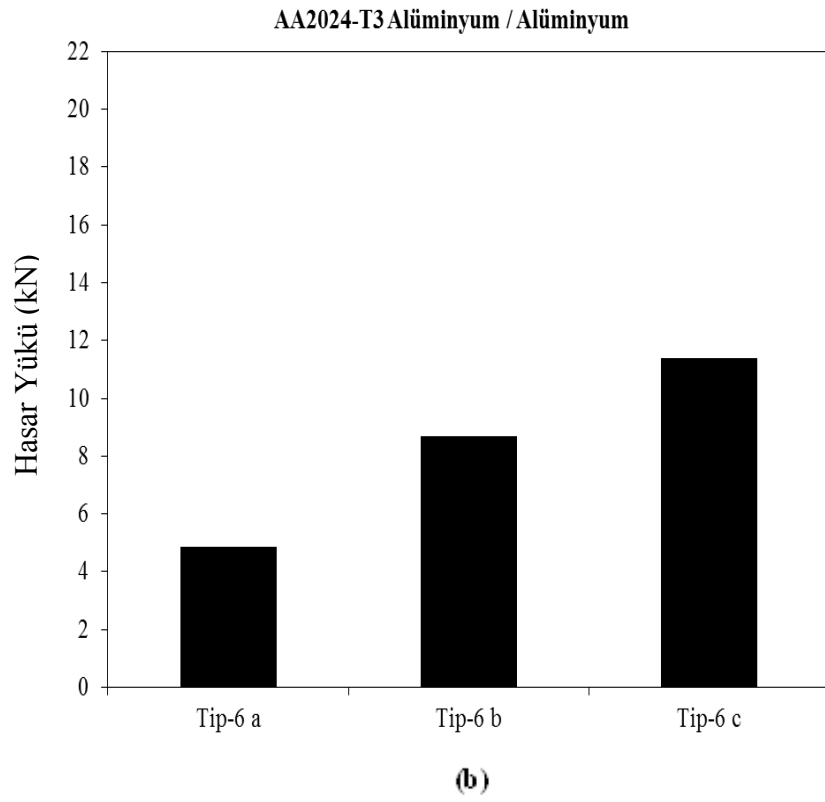
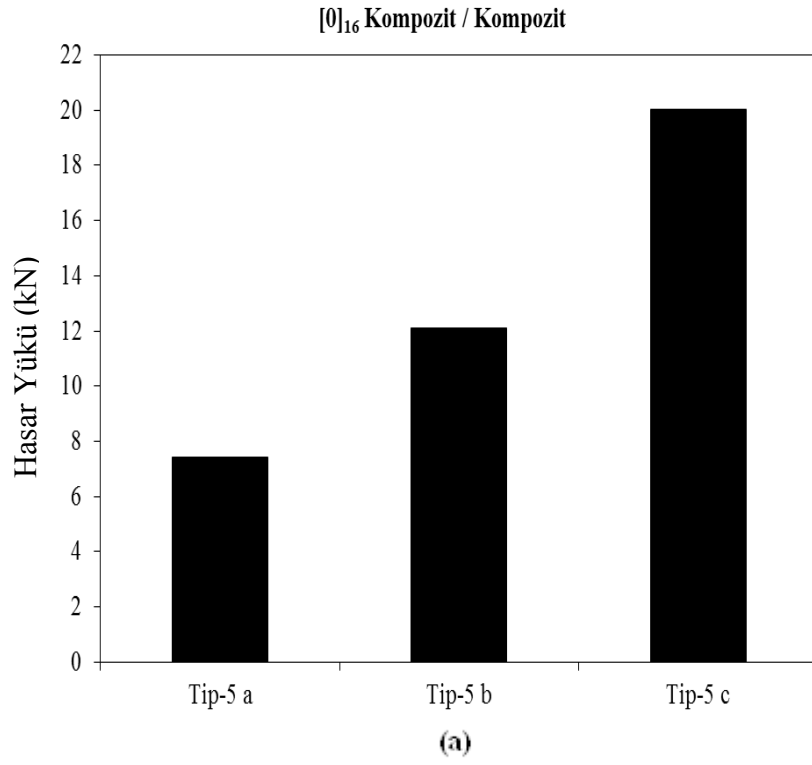


(b)

Şekil 4.3. Alüminyumun üç farklı kalınlığına göre elde edilen maksimum hasar yükleri
a) Tip-3 b) Tip-4.

Şekil 4.3'te verilen grafik incelendiğinde burada ki önemli olan nokta Tip-1 ile Tip-2 karşılaştırıldığında, Tip-1 d nin Tip-1 d' ye göre daha fazla yük taşıırken Tip-1 a nın Tip-2 a' ya göre daha az yük taşımış olmasıdır. Diğer taraftan Tip-1 b ile Tip-2 b ve Tip-1 c ile Tip-2 c karşılaştırıldığında bağlantının yük taşıma kapasitesinde önemli bir değişiklik olmamıştır. Bu durumlar TTBB eksantirik yüklemekten dolayı oluşan momentin bağlantıda dönme etkisi oluşturduğu ve bu etkiyi mekanik özellikleri farklı olan malzemelerin rijitliğiyle artırıp azaltmasıyla açıklanabilir.

Şekil 4.3a'da verilen grafik incelendiğinde, alt malzeme $[0]_{16}$ istifleme açısına sahip kompozit ile üst malzeme alüminyum ile birleştirilmiş bağlantıda (Tip-3), alüminyum kalınlığının 4.4'ten 3.2'ye düşmesi bağlantının hasar yükünü %6 azaltarak önemli derecede etkilemediği görülmüştür. Ancak alt ve üst malzemenin alüminyum olup üst malzemenin kalınlığının azalması bağlantının hasar yükünü önemli derecede etkilemektedir. Üst malzeme kalınlığının 4.4 den 3.2 ye düşmesi bağlantının hasar yükünü %48 azaltırken, kalınlığının 4.4 den 1.6 ya düşmesi bağlantının hasar yükünü %28 azaltmıştır. (Şekil 4.3b'de) Bu bağlantıda oluşan moment etkisi ve malzemenin kalınlığa bağlı olarak eğilme rijitliğinden kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 4.4. İki farklı malzemeden elde edilen maksimum hasar yükleri **a)** [0]₁₆ Kompozit-kompozit
b) AA2024-T3 Alüminyum – alüminyum

Şekil 4.4'te verilen ve üç farklı bindirme uzunluğuna (12,5 mm/25 mm/37,5 mm) sahip olan kompozit-kompozit ve alüminyum-alüminyum bağlantı tipleri için elde edilen maksimum hasar yüklerinin değerleri incelendiğinde bindirme uzunluğunda ki artış tek tesirli bindirme bağlantı (TTBB) tarafından taşınan yüklerin artışına neden olduğu görülmüştür.

TTBB numuneleri karşılaştırıldığında 12,5 mm 'lik (Tip-5 a) bindirme uzunluğuna sahip olan kompozit-kompozit tipinde ki bağlantının hasar yükü, 25 mm 'lik (Tip-5 b) bindirme uzunluğuna sahip numune tipinden %63 ve 37,5 mm 'lik (Tip-5 c) bindirme uzunluğuna sahip numune tipinden % 170 daha yüksektir (Şekil 4.4 b).

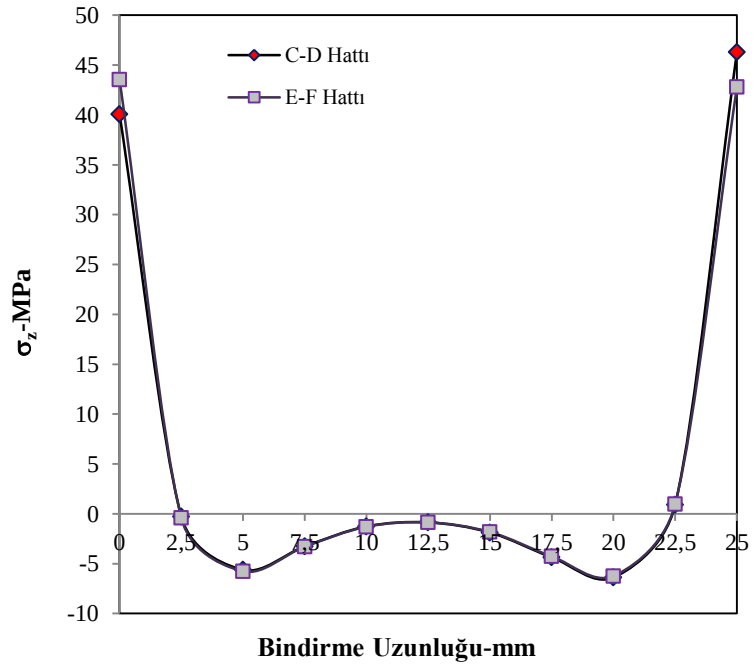
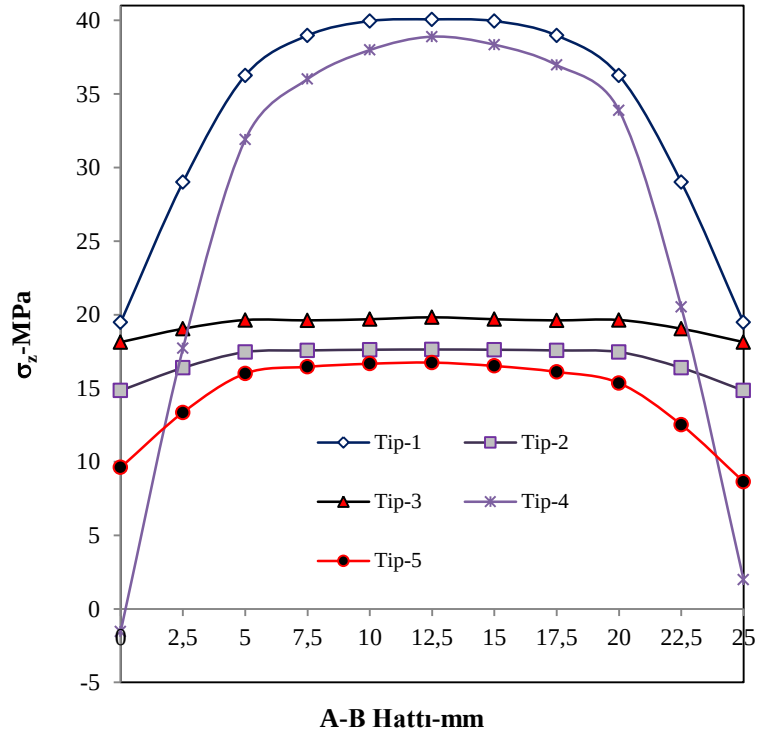
TTBB numuneleri karşılaştırıldığında 12,5 mm 'lik (Tip-6 a) bindirme uzunluğuna sahip olan AA2024-T3 alüminyum – alüminyum tipinde ki bağlantının hasar yükü, 25 mm 'lik (Tip-6 b) bindirme uzunluğuna sahip numune tipinden % 78 ve 37,5 mm 'lik (Tip-6 c) bindirme uzunluğuna sahip numune tipinden % 134 daha yüksektir (Şekil 4.4 a).

Burada şunu söylemek gerekir ki, alüminyum malzeme kullanılarak üretilen yapıştırma bağlantılarına göre kompozit malzeme kullanılarak üretilen yapıştırma bağlantılarında bindirme uzunluğunun etkisi bağlantının yük taşıma kapasitesini daha fazla artırmaktadır.

Deneylerden elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, yapıştırılan malzemenin alüminyum veya kompozit oluşu ve kompozitin istifleme açısı bağlantının hasar yükünü önemli ölçüde etkilemektedir. Yapıştırılan malzeme alüminyum olarak elde edilen bağlantı tipi (Tip-1), farklı istifleme açısına sahip kompozit kullanılarak elde edilen bağlantı tiplerine göre karşılaştırıldığında, $[0]_{16}$ istifleme açısına sahip kompozitin (Tip-2) %39, $[0/90]_8$ istifleme açısına sahip kompozitin (Tip-3) %27 ve $[0/45/-45/90]_4$ istifleme açısına sahip kompozitin (Tip-5) ise %64 daha fazla yük taşımasına karşın sadece $[45/-45]_8$ istifleme açısına sahip kompozitin (Tip-4) %7 daha az yük taşımıştır.

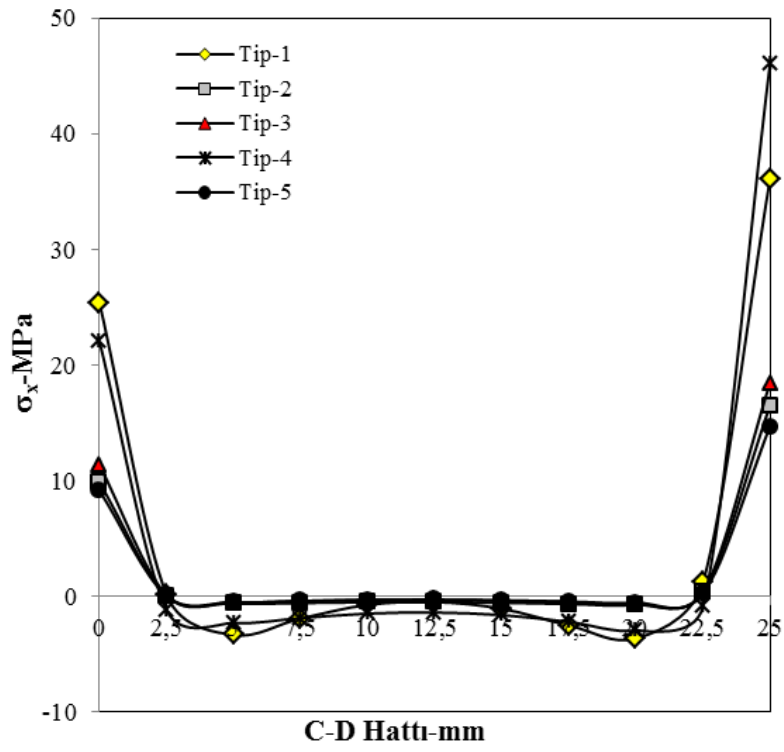
Pratikte ve mühendislik uygulamalarında karşılaşılan problemler belirli kabullerle iki boyutlu ya da tek boyutlu hale indirgenerek çözülebilmektedir. Bununla birlikte, yapıştırma bağlantılarındaki yapıştırıcı tabakasında iki boyutlu modelleme için yapılan kabuller (düzlem gerilme ve düzlem şekil değiştirme) uygun olmayan ya da eksik çözümlere neden olabilmektedir. Bu yüzden DP460 kullanılarak hazırlanmış bağlantı tipleri üç boyutlu modellenerek çözüm yapılmıştır.

Yapıştırma bağlantılarında yapıştırıcı tabakasında meydana gelen kritik hattın bulunup bu hatta göre analizlerin yapılması son derece önemlidir. Bu nedenle Şekil 4.6a'da beş bağlantı tipi için verilen üst malzeme-yapıştırıcı tabakası ara yüzeyinin A-B hattından alınan soyulma gerilmeleri incelendiğinde, genişlik boyunca gerilme dağılımları merkezden uçlara doğru (C noktasından A ve B noktalarına doğru) azaldığı görülmektedir.

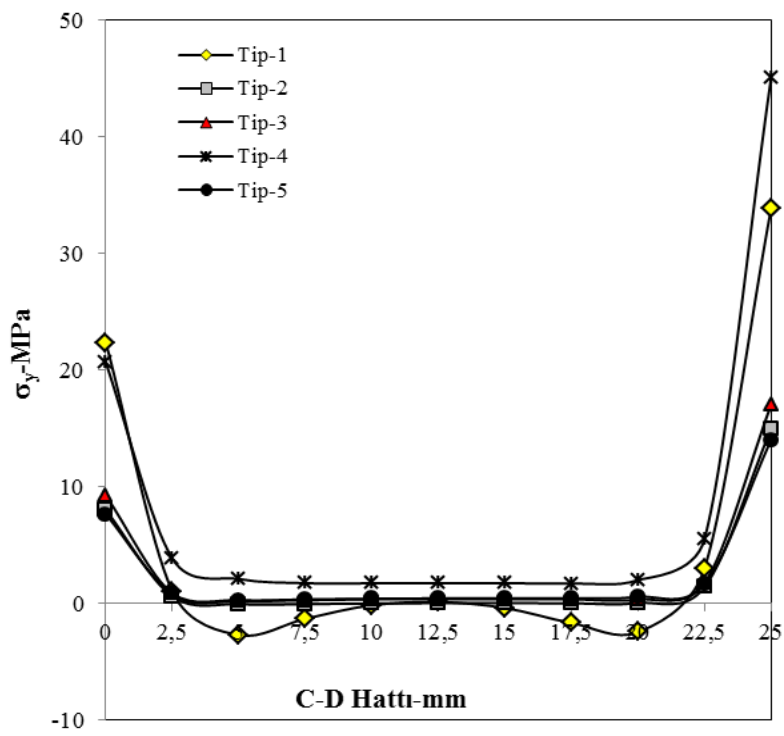


Şekil 4.6. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş TTBB kritik hatlar
a) A-B hattı b) C-D ve E-F hattı

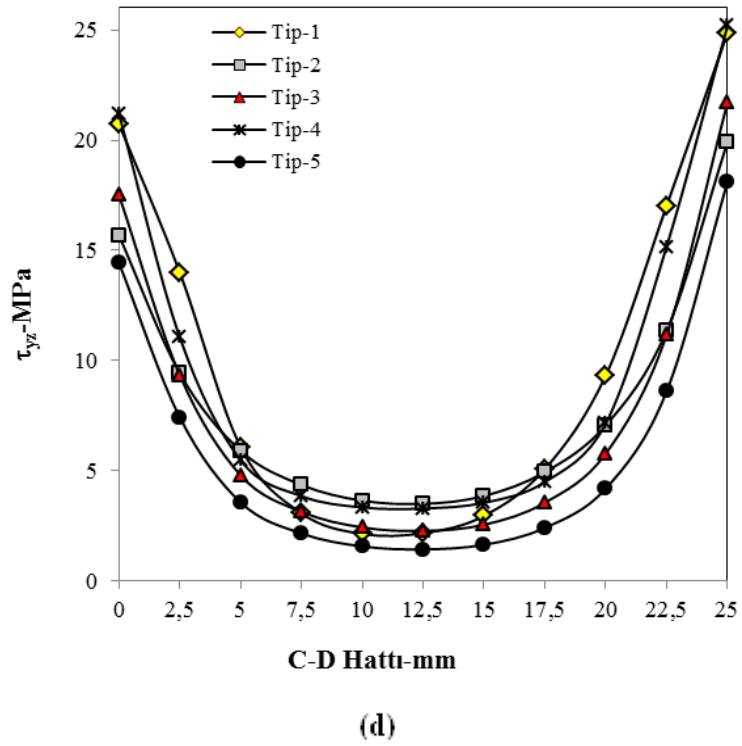
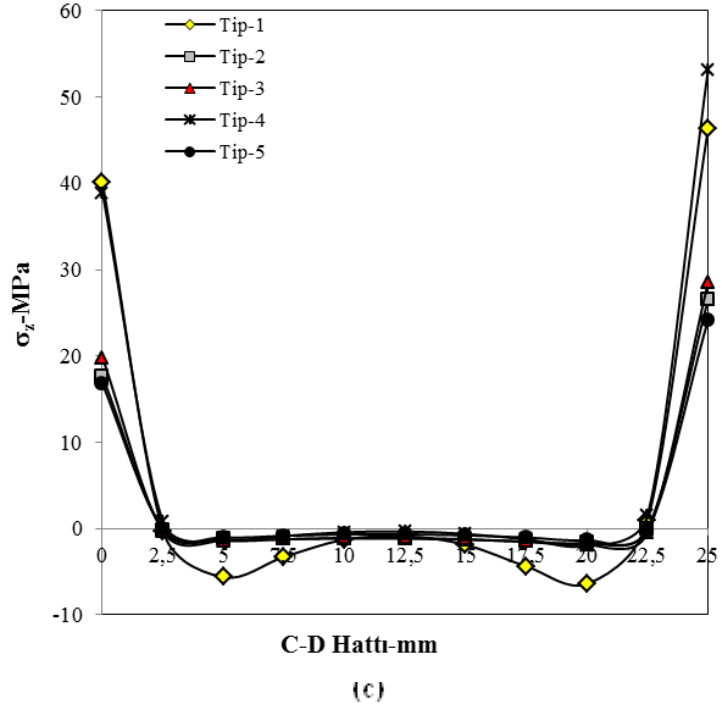
Ayrıca, Şekil 4.6b’de verilen bindirme uzunluğu boyunca üst malzeme-yapıştırıcı tabakası ara yüzeyinin orta hattı olan C-D hattı ile alt malzeme-yapıştırıcı tabakası ara yüzeyinin orta hattı olan E-F hattı karşılaştırıldığında, C-D hattında gerilmelerin daha fazla olduğu görülmektedir. Bundan dolayı Şekil 4.7’de verilen gerilme dağılımları bu hat üzerinden çizilmiştir.



(a)



(b)



Şekil 4.7. Yapıştırıcıyla birleştirilmiş TTBB kritik hatlar
a) A-B hattı b) C-D ve E-F hattı

Bu grafikler incelenirse, normal (σ_x ve σ_y) ve soyulma (σ_z) gerilme dağılımları genel olarak bindirme uçlarında maksimum değerler alırken uçlardan merkeze doğru gidildikçe normal ve soyulma gerilmeleri sıfıra yakın değerler almaktadır (Şekil 4.7a,b,c). Şekil 4.7d'de verilen bağlantıda en etkili kayma gerilmesi olan y düzleminde z yönündeki kayma gerilmesi (τ_{yz}) grafiği incelenirse, genel olarak bindirme uçlarında gerilmeler maksimum değerler ulaşırken uçlardan merkeze doğru gidildikçe gerilmelerde düşüş olduğu görülmektedir.

Ayrıca, yapıştırılan malzeme alüminyum olan bağlantı tipine (Tip-4b) göre beş bağlantı tipi karşılaştırıldığı da, yapıştırılan malzemenin $[0]_{16}$, $[0/90]_8$ ve $[0/45/-45/90]_4$ istifleme açısına sahip kompozit olması (Tip-1a, b ve c) hasarın nedeni olarak bilinen uçlarda meydana gelen gerilmeleri azalttığı görülmekte olup en fazla azalmanın Tip 1d'de olduğu görülmektedir. Bu azalmanın bağlantının yük taşıma kapasitesini artırmaktadır. Ancak, Tip-4b bağlantı tipine göre Tip-1c bağlantı tipinde uçlarda meydana gelen gerilmelerde artış olduğu görülmekte olup ve bu artışın bağlantının yük taşıma kapasitesinde düşüşe neden olduğu söylenebilir. Sonlu eleman analizinden elde edilen bu sonuçlar, deneylerden elde edilen sonuçları son derece desteklediği görülmektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, çekme yüküne maruz altı farklı tek tesirli bindirme bağlantısının (TTBB) mekanik özellikleri sayısal ve deneysel olarak incelenmiş ve aşağıda ki sonuçlar elde edilmiştir.

. Kompozitte ki farklı istifleme açıları hasar yükünü etkiler. $[0/45/-45/90]_4$ istifleme açısına sahip karbon/epoksi kompozit bağlantının (Tip-1 d) yük taşıma kapasitesi, $[0]_{16}$ karbon/epoksi kompozit bağlantıya (Tip-1 a) göre %48, $[0/90]_8$ karbon/epoksi kompozit bağlantıya (Tip-1 b) göre %62 ve $[45/-45]_8$ karbon/epoksi kompozit bağlantıya (Tip-1 c) göre ise %123 daha fazladır.

. Aynı kalınlığa sahip olan kompozit-alüminyum bağlantı tipinde (Tip-2), $[0]_{16}$ istifleme açısına sahip kompozit-alüminyum malzemelerin kullanılmasıyla elde edilen bağlantı tipi (Tip-2 a), diğer istifleme açısına sahip bağlantı tiplerine göre daha fazla yük taşımıştır.

. Aynı kalınlıkta alt yapıştırıcı olan kompozit ile üç farklı kalınlıkta ki üst yapıştırıcı olan alüminyum, kompozit-alüminyum bağlantı tipinde (Tip-3), üst malzeme 4.4 ve 1.6 mm kalınlığa sahip bağlantı tiplerinin (Tip-3 ve c), yük taşıma kapasitelerinin hemen hemen aynı olup, 3.2 mm kalınlığa sahip bağlantı tipinin ise (Tip-3 b) yük taşıma kapasitesi %6 azalmıştır.

. Alt ve üst malzemenin alüminyum olup üst malzemenin kalınlığının azalması bağlantının (Tip-4 a,b ve c) hasar yükünü önemli derecede etkilemektedir. Üst malzeme kalınlığının 4.4 den 3.2 ye düşmesi bağlantının hasar yükünü %48 azaltırken, kalınlığının 4.4 den 1.6 ya düşmesi bağlantının hasar yükünü %28 azaltmıştır. Bu durum bağlantıda oluşan moment etkisi ve malzemenin kalınlığa bağlı olarak eğilme rijitliğinden kaynaklandığıyla açıklanabilir.

. Bindirme uzunluğunda ki artış bağlantının her iki bağlantı (Tip-5 ve Tip-6). tipinde de yük taşıma kapasitesini artırdı. Ancak her iki bağlantı tipi karşılaştırıldığında yapıştırılan malzemenin kompozit olması bağlantının yük taşıma kapasitesinde bindirme uzunluğunun daha fazla etkisi olmaktadır.

. Sonlu Elemanlar analizinden elde edilen sonuçlara göre, soyulma ve kayma gerilmeleri bindirme uzunluğunun uç kısımlarında maksimum değerler alırken, bindirme uzunluğunun orta kısımlarına gidildikçe gerilmelerin düştüğü ve sıfıra yakın değerler aldığı görülmektedir. Ayrıca bağlantı tipleri karşılaştırıldığında, bindirme uzunluğunun uç kısmında meydana gelen gerilmelerdeki artma ve azalma oranları aynı olmayıp, deneylerden elde edilen hasar yükleri ile paralel olduğu görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Adams, R.D. and Wake, W.C., 1984. Structural adhesive joints. Elsevier Applied Science Publishers, London.
- Akpınar, S. 2012, Yapıştırıcıyla birleştirilmiş T-Bağlantılarda üç boyutlu gerilme analizi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Akpınar S., 2013, Effects of laminate carbon/epoxy composite patches on the strength of double-strap adhesive joints: experimental and numerical analysis, Material Design, 51:501-512.
- Anonim 2013, Sonlu Elemanlar Yöntemi ve ANSYS. 28. 05. 2008. www.biymed.com, (www.biymed.com/femmuhanaliz/fem/seynedir.htm).
- Anonim, 2014. <http://web.deu.edu.tr/ansys/tezler/lisans/12.pdf>
- Apalak, M.K., Davies, R.,1993. Analysis and Design of Adhesively Bonded Corner Joints, International Journal of Adhesion and Adhesives, 13(4), 219-235.
- Apalak, M.K., Davies, R.,1994. Analysis and Design of Adhesively Bonded Corner Joints : Fillet Effect, International Journal of Adhesion and Adhesives, 14(3), 163- 174.
- Apalak, M.K., Davies, R., Apalak Z.G., 1995. Analysis and Design of Adhesively Bonded Double Containment Corner Joints, International Journal of Adhesion Science and Technology, 9(2), 267-293.
- 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.
- Apalak, Z.G., Apalak, M.K. and Genç, M., 2006. “Progressive damage modeling of an adhesively bonded unidirectional composite single-lap joint in tension at the mesoscale level” Journal of Thermoplastic Composite Materials. (19) 671-702.
- Aydın, M.D., 2003. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Aydın, M.D., Temiz, Ş., Özel, A., 2007. “Effect of curing pressure on the strength of adhesively bonded joints,” J. Adhesion, 83 (6), 553-573.
- Aydın, M.D., Temiz, Ş., Özel, A., Yapısal Yapıştırıcıların Mekanik Özelliklerinin Belirlendiği Deneysel Yöntemler. Mühendis ve Makine Cilt 45, Sayı 536.
- Aydın, M.D., Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi.
- Benson, N.K., 1969. Influence of stress Distribution on Joint Strength, Adhesion Fundamentals and Practise, UK Ministry Technology, McLaren, London, 191.
- Bowditch, M.R., Clarke, J.D., and Stannard, K.J., 1986. Adhesion, 11, pp.1.
- Çitil, Ş., 2010. Kapakları parça içine gömülü çift takviyeli yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Davies R., Khalil A.A.,1990. Design and Analysis of Bonded Double Containment Corner Joints, International Journal of Adhesion and Adhesives, 10(1), 25-30.

- Dean, G.D., 1996. Determination of Basic Mechanical Properties of Adhesives for Desing,UK
- Duncan, B., Dean, G., 2003, Measurement and models for design with modern adhesives, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23(2): 141-149.
- Edwards, K.L., 1998. A brief insight into the selection and use of engineering adhesives for preliminary joint design. *Materials and Design*, 19, 121-123.
- Fawzia S, Al-Mahaidi R, Zhao XL, Experimental and finite element analysis of a double strap joint between steel plates and normal modulus CFRP, *Composite Structures*, 75, 156–162, 2006.
- Gali, S., Ishai O., 1978. Interlaminar Stress Distribution within an Adhesive Layer in the Non- linear Range, *Journal of Adhesion*, 9, 253-266, 1978.
- Goetschel DB, Radford DW., 1997, Analytical development of through-thickness properties of composite laminates, *Journal of Advanced Material*, 28(4):37-46.
- Goland, M. and Reissner, E., 1944. The stresses in cemented joints. *Journal of Applied Mechanics*, 11, A17-A27.
- Harris, J.A., Adams, R.D., 1984. Strength Prediction of Bonded Single Lap Joints by Non-linear Finite Element Methods. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 4, 65-79.
- Harris, J.A. and Adams, R.D., 1984. Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element method. *Int. J. of Adhesion and Adhesives*, 4(2), 65-78.
- Hart-Smith, 1973. Adhesive bonded single lap joint. NASA Langley Contractor Report, NASA CR-1122236, Virginia.
- Hart-Smith, L.J., 1973. Adhesive Bonded Single Lap Joints, NASA, CR122236.
- Hart-Smith, L.J., 1973. NASA CR-112236, Langley Research Centre, Virginia.
- Hart-Smith, L.J., 1973. NASA CR-112237, Langley Research Centre, Virginia.
- Hart-Smith, L.J., 1973. NASA CR-112238, Langley Research Centre, Virginia.
- Jeandrau, J.P., 1991. Analysis and Design Data for Adhesively Bonded Joints. *Int.J.Adhesion and Adhesives* , 11(2), 71-79.
- Kayacan, R., 1988. Yapıştırma ve metal bağlantılar için yapıştırıcı kullanımı. Yüksek Lisan Tezi, İTÜ, İstanbul
- Khalili, S.M.R., Shokuhfar, A., Hoseini, S.D., Bidkhor, M., Khalili, S., Mittal, R.K., Experimental study of the influence of adhesive reinforcement in lap joints for composite structures subjected to mechanical loads. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 28 (2008) 436– 444
- Kinloch, A.J., 1987. *Adhesion and Adhesive Science and Technology*. First Edition Chapman and Hall.
- Khalil A.A., Davies R., 1988. Analysis of Double Containment Cantilever Joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 8(4), 211-218.
- Loctite Worldwide Design Handbook, 1998.
- Orak, E., 2007. 7075 Alaşımının Film Yapıştırıcı ile Birleştirilmesi Ve Alternatifi Olabilecek Diğer Birleştirme Teknikleri ile Karşılaştırılması.
- Özdemir, A., 2006. Seramik Malzemelerin Kırılma Tokluğu Değerlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Teorik Olarak Belirlenmesi. Yüksek Lisan Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Parvatareddy, H., 1997. Durability of Polyimide Adhesives and Their Bonded Joints for High Temperature Applications. Ph.D. These, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

- Pahaja, H.M., Stress analysis of an adhesive lap joint subjected to tension, shear force and bending moments, University of Illinois at Urbana- Champaign, T. & A. M. Report 361, 1972.
- Petrie, E.M, 1975. Handbook of Plastics and Elastomers. McGraw-Hill, New York.
- Renton W.J., Vinson J.R.,1975. On the Behavior of Bonded Joints in the Composite Material Structures, Engineering Fracture Mechanics, 7, 41-60.
- Temiz, Ş., 2003. Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özellikleri Üzerine Çevresel Faktörlerin Etkisinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Tsai, M. Y. and Morton, J., 1944a. An evaluation of analytical and numerical solutions to the single lap joint. Int. J. of Solids and Structures, 31(18), 2537-2563.
- Tsai, M. Y. and Morton, J., 1944b. a note on peel stresses in single lap adhesive joint. J. Applied Mechanics, 61(3), 712-715.
- Tsai M. Y., Morton J., Experimental and numerical studies of a laminated composite single-lap adhesive joint, J. Compos. Mater., 29, 527-538, 1995.
- Temiz, Ş., 2003. Yapıştırma Bağlantılarının Mekanik Özellikleri Üzerine Çevresel Faktörlerin Etkisinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Tın,S., 2006. Tek Bindirmeli Yapıştırma Bağlantılarının Tasarım ve Analizi.
- Ünal O., 2012. Yapı Malzemesi Ders Notları
- Volkersen, O., 1938. Die niekraftverteilung in zugbeanspruchten mit konstanten laschenquerschnitten. Luftfahrtforschung, 15, 41-47.
- Zienkiewicz, O.C.,Taylor R.L., 1991. The Finite Element Method, vols 1 and 2, McGraw- Hill, New York.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Erzurum’da doğdu. İlk, Orta ve Lise Öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 2000-2002 yılları arası Atatürk Üniversitesi Erzurum Meslek Yüksek Okulu İnşaat Bölümü’nden mezun oldu. 2004 yılında dikey geçiş sınavı ile Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesine geçti ve 2007 yılında bu fakülteden mezun oldu. 2008-2009 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalında Yüksek Lisans eğitim gördü. 2009 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans eğitimine başladı.