

167979

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİLGİSAYAR DESTEKLİ MODELLEME
YARDIMIYLA AL 2024-T3 ALAŞIMLI PLAKANIN
KOMPOZİT YAMA İLE YAPIŞTIRMALI TAMİRİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uğur SOY

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Fehim FİNDİK

HAZİRAN 2005

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİLGİSAYAR DESTEKLİ MODELLEME
YARDIMIYLA AL 2024-T3 ALAŞIMLI PLAKANIN
KOMPOZİT YAMA İLE YAPIŞTIRMALI TAMİRİ**

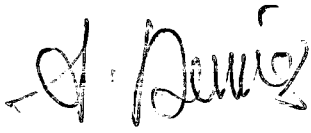
YÜKSEK LİSANS TEZİ


Uğur SOY

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Bu tez 24 / 06 /2005 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof.Dr. Fehim FİNDİK
Jüri Başkanı


Yrd.Doç.Dr. Adem DEMİR
Üye


Yrd.Doç.Dr. Mehmet ÇALIŞKAN
Üye

TEŞEKKÜR

Danışmanım Sayın Prof. Dr. Fehim FINDIK'a,
Yardımları ve desteği için Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÇALIŞKAN'a,
Metal Eğitimi Bölümü öğretim üyeleri'ne,

Maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen Aileme,

Teşekkür ederim.

Biricik yeğenim Betül TÜRK'e...

Uğur SOY

Haziran 2005

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Genel.....	1
BÖLÜM 2.	
KOMPOZİTLERİN YAPIŞTIRMALI TAMİRİ.....	9
2.1. Giriş.....	9
2.2. Birleştirme Teknikleri.....	10
2.2.1. Mekanik Birleştirme.....	11
2.2.2. Termal Birleştirme	11
2.2.3. Yapıştırıcı ile Birleştirme	11
2.3. Yapıştırırmalı Birleştirme Teknolojisi.....	12
2.3.1. Yapıştırma Ek Yeri	14
2.3.1.1. Adhezyon	14
2.3.1.2. Kohezyon	15
2.3.1.3. Yapıştırma ek yerindeki kopmanın değerlendirilmesi.	15
2.3.1.4. İyileştirme değerlendirmesi ve yöntemleri	16
2.3.1.5. Yapıştırıcı ek yeri kopmalarının sebep/çözümleri.....	16
2.3.2. Yapıştırmada Bağlantı Tasarımı.....	17
2.3.2.1. Tasarım Esasları.....	18

2.3.2.2. Bağlantı Tasarım.....	19
2.3.2.3. Bağlantı Geometrisi.....	25
2.3.3. Yapıştırma Yüzey Ön-İşlemleri.....	32
2.3.3.1 Yüzeylerin Yağdan Arındırılması	34
2.3.3.2 Mekanik Ön-İşlem	36
2.3.3.3 Aşındırma.....	36
2.3.3.4 Yüzey İyonizasyon Ön-İşlemi	37
2.3.3.5 Primerler	37
2.3.3.6 İslatılabilirlik Testi	37
2.3.4 Yapıştırma Davranışlar.....	38
2.3.4.1 Yükler ve Neden Oldukları Gerilimler	38
2.3.4.2 Isıl Gerilmeler.....	40
2.3.4.3 Yapıştırma Nüfuziyet Davranışı.....	41
2.3.4.4 Bağlantının Yorulma Davranışı.....	42
2.3.4.5 Bağlantıların Yaşlanması	48
2.3.5 Yapıştırıcı Tipi.....	49
2.3.5.1 Termoset Yapıştırıcılar.....	49
2.3.5.2 Isı ile Kürleşen Yapıştırıcılar	50
2.3.6 Tamir.....	51
2.3.7 Bağlantının Durumu.....	52
2.3.7.1 Yapıştırmaya Uygunluk.....	52
2.3.7.2 Hata Tespiti	53
2.3.7.4 Ortam Etkileri.....	53
2.3.7.5 Yapıştırma Bağlantılarının Sökülmesi	53
2.3.7.6 Bağlantının Kontrolü.....	54

BÖLÜM 3.

SONLU ELEMANLAR METOTU.....	55
3.1. Giriş.....	55
3.2. Genel Teorik Bilgi.....	55
3.3. Metot.....	57
3.3.1. Denge Problemlerinin Çözümü.....	58
3.3.2. Yöntemde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar.....	58
3.3.3. Metodun Avantajları.....	59
3.4. ANSYS.....	59

BÖLÜM 4.	
MODELLEME, ANALİZ VE İRDELEME.....	60
4.1. Giriş.....	60
4.2. Modelleme.....	60
4.2.1. Geometrik Model.....	60
4.2.2. Sonlu Elemanlar Modeli ve Sınır Şartları.....	62
4.2.3. Model Simülasyonu.....	63
4.3. Analiz ve Sonuçlar.....	64
4.3.1. Çekme Analizi.....	64
4.3.1.1. Sonuçlar.....	68
4.3.2. Eğme Analizi.....	72
4.3.2.1. Sonuçlar.....	74
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR.....	84
5.1. Genel Sonuçlar.....	84
5.2. Öneriler.....	84
KAYNAKLAR.....	86
ÖZGEÇMİŞ.....	88

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

σ	: Gerilme
N	: Yük
ν	: Poisson oranı
E	: Elastisite modülü
ANSYS	: Sonlu elemanlar analiz yazılımı
AS4/3501-6	: Grafit /epoksi kompozit yama
CPU	: Computer power user; bilgisayar güç kullanımı
FEM	: Finite element method;sonlu elemanlar metodu
FM300U	: Yapıştırıcı
SEM	: Sonlu elemanlar metodu
SOLID45	: 8 düğümlü 3D element tipi
2024-T3	: Alüminyum alaşımı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Sivil bir uçak yapısının çatlama riskinin yüksek olduğu bölgeler.....	2
Şekil 1.2.	Boeing 747 sivil uçağı genel görüntüleri.....	4
Şekil 1.3.	A27/23 savaş uçağı.....	6
Şekil 1.4.	F/A18 savaş uçağı.....	7
Şekil 2.1.	Yukarıdan aşağıya sırasıyla kaynaklı, perçinli ve yapıştırma bağlantıların gerilim dağılımı.....	10
Şekil 2.2.	Galvanik korozyon	12
Şekil 2.3.	Yapıştırma ek yerindeki kuvvetler.....	14
Şekil 2.4.	En yaygın yük tipleri ve yapışma çizgisindeki gerilim dağılımları.....	20
Şekil 2.5.	Soyulma yükleri ve tasarım önlemleriyle dönüştürülmeleri.....	21
Şekil 2.6.	Yapıştırılmış bağlantılarda tercih edilen ve edilmeyen yükler ve yapışma yüzeyi ne kadar genişse o kadar iyi olduğunun gösterimi....	22
Şekil 2.7.	Eksantrik kuvvetlerden kaynaklanan problemlerin muhtelif çözümleri.....	23
Şekil 2.8.	Kopma yükü, ek yeri genişliği ile aynı oranda artışı.....	24
Şekil 2.9.	Üst üste binme uzunluğunun artması ile, kopma yükünde meydana gelen artışın orantılı olmayışı	25
Şekil 2.10.	Çeşitli yapıştırılmalı bağlantı geometrileri.. ..	26
Şekil 2.11.	Yapıştırılmalı uçak panelinin ayrılma davranışı.....	27
Şekil 2.12.	Yük altında aynı çizgide düz bağlantıların davranışları.....	28
Şekil 2.13.	Yük altında ofset bindirme bağlantıların davranışları	29
Şekil 2.14.	Yük altında borulu bağlantıların davranışları.....	30
Şekil 2.15.	Yük altında kıvrım ve “t” bağlantıların davranışları.....	31
Şekil 2.16.	Yapıştırılmalı bindirmeli bağlantılarda kopma-gerilme modeli.....	31
Şekil 2.17.	Basit bindirme bağlantılarında yapıştırma uzunluklarının etkisi.....	32
Şekil 2.18.	Yapıştırılacak yüzeylerdeki kirlerin adhezyonu düşürmesi.....	33

Şekil 2.19.	Yıkama çözeltisi: Konsantrasyonun yapıştırıcının son kuvvetine etkisi.....	35
Şekil 2.20.	Yıkama çözeltisi: Kurutma pozisyonunun (dikey veya yatay) yapıştırıcının son kuvvetine etkisi.....	35
Şekil 2.21.	Yüzey hazırlığı, “su kopma” testi veya belirli yüzey gerilim sınırları ile test edilmesi.....	38
Şekil 2.22.	Eksantrik kuvvetler nedeniyle tek bindirmeli bağlantının deformasyonu	39
Şekil 2.23.	Elemanların fark gösteren genişleme için gerilmeler.....	40
Şekil 2.24.	Tipik nüfuziyet-kopma zaman eğrileri	41
Şekil 2.25.	Yapıştırılmalı bağlantıların (örneğin metal ile) tipik yorulma mukavemeti.....	44
Şekil 2.26.	Yorulma özelliklerinde yapıştırma bindirme derinliğinin tipik etkisi	45
Şekil 2.27.	2024 ve 7075 alaşımlarının perçinli ve yapıştırılmalı bindirme bağlantıları için yorulma eğrileri.....	46
Şekil 2.28.	Yorulma incelemesi için örneklerin kullanımı.....	47
Şekil 2.29.	Tipik ard kenar yapılarının sonik yorulma ömrü.....	48
Şekil 4.1.	Yamalı yapının geometrik modeli (tüm ölçüler cm’dir)	61
Şekil 4.2.	Yapının montaj resmi.....	62
Şekil 4.3.	(a) Sonlu elemanlar modelinin sınır şartları, (b) yamanın modeli, (c) yapışmanın modeli.	63
Şekil 4.4.	SOLID 45 elementinin model üzerinde ağ oluşturması (mesh).....	64
Şekil 4.5.	Sınır şartları ve yamalı yapının ağ modeli.	65
Şekil 4.6.	6000 N yük altındaki modelin düğümlerinde oluşan yer değiştirme eğilimi (yer değiştirme ölçeği 5 kez artırılmıştır)	65
Şekil 4.7.	6000 N yük altındaki modelin düğümlerinde oluşan genleme davranışı (yer değiştirme ölçeği 5 kez artırılmıştır)	66
Şekil 4.8.	6000 N yük altındaki modelin düğümlerinde oluşan gerilmeler (yer değiştirme ölçeği 5 kez artırılmıştır)	67
Şekil 4.9.	6000 N yük altındaki modelin düğümlerinde oluşan gerilmelerin farklı bir açıdan görünümü (yer değiştirme ölçeği 5 kez artırılmıştır)	68
Şekil 4.10.	Sonlu eleman ve deneysel analizin karşılaştırmalı gerilme-yük ilişkisi.....	69

Şekil 4.11.	Düğüm 1 için deneysel ve nümerik çalışma arasında gerilim- genleme ilişkisi.....	70
Şekil 4.12.	Düğüm 2 için deneysel ve nümerik çalışma arasında gerilim- genleme ilişkisi.....	70
Şekil 4.13.	Düğüm 3 için deneysel ve nümerik çalışma arasında gerilim- genleme ilişkisi.....	71
Şekil 4.14.	Düğüm 4 için deneysel ve nümerik çalışma arasında gerilim- genleme ilişkisi.....	71
Şekil 4.15.	Nümerik çalışma için maksimum gerilmeye gerilim-genleme ilişkisi.	72
Şekil 4.16.	Eğme modelinin sınır şartları ve yükleri (yan görünüş).	73
Şekil 4.17.	Eğme modelinin sonlu elemanlar modeli (perpektif)	73
Şekil 4.18.	100 N yayılı eğme yükü altında gerilme analizi.	74
Şekil 4.19.	250 N yayılı eğme yükü altında gerilme analizi.....	75
Şekil 4.20.	500 N yayılı eğme yükü altında gerilme analizi.....	75
Şekil 4.21.	100 N yayılı eğme yükü altında genleme (zorlanma) analizi.....	76
Şekil 4.22.	250 N yayılı eğme yükü altında genleme (zorlanma) analizi.	77
Şekil 4.23.	500 N kg yayılı eğme yükü altında genleme (zorlanma) analizi.....	77
Şekil 4.24.	100 N yayılı eğme yükü altında deformasyon analizi.....	78
Şekil 4.25.	250 N yayılı eğme yükü altında deformasyon analizi (perspektif)	79
Şekil 4.26.	250 N yayılı eğme yükü altında deformasyon analizi (yandan görünüş)	79
Şekil 4.27.	500 N yayılı eğme yükü altında deformasyon analizi.....	80
Şekil 4.28.	Modelleme analizleri için gerilme-genleme ilişkisi.	81
Şekil 4.29.	Modelleme analizleri için gerilme-deformasyon ilişkisi.	82
Şekil 4.30.	Modelleme analizleri için yük-deformasyon ilişkisi.	82
Şekil 4.31.	Modelleme analizleri için gerilme-yük ilişkisi.	83

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Kopma türleri ve kuvveti artırma yöntemleri.....	16
Tablo 2.2.	Ek yeri kopma sebep ve çözümleri.....	17
Tablo 2.3.	Solventler ve özellikleri.....	34
Tablo 2.4.	Malzemelerin uygulanabilir ön-işlem yöntemleri.....	37
Tablo 4.1.	Alüminyum 2024-T3 alaşımı, yapıştırıcı FM 300U ve grafit/epoksi kompozit yama Hercules AS4/3501-6'nın mekanik özellikleri.....	61



ÖZET

Anahtar kelimeler: Kompozitler, yapıştırırmalı kompozit tamiri, grafit/epoksi yama, yapıştırıcı, FM300, zorlama, gerilme, sonlu elemanlar metodu.

Bu çalışmada tek taraflı yamalı yapının zorlama davranışı incelenmiştir. Grafit/epoksi yama ile yapıştırma tekniği kullanılarak tamir edilmiş Alüminyum (Al-2024 T3) tabaka çekme ve eğme altında davranışları incelenmiştir. Bunun için üç boyutlu ANSYS sonlu elemanlar model analizi yapılmış ve daha önce yapılan deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Zorlama değerleriyle ilgili yapılan tahmin ve ölçümlerde, çekme yükleriyle tahminlerin doğruluğunun ortaya çıktığı ve uyum içinde olduğu görülmektedir.



THE FINITE ELEMENT ANALYSIS OF BONDED REPAIR WITH COMPOSITE PATCH

SUMMARY

Keywords: Airfact; composites; bonded composite repairs; graphite patch; adhesive; FM 300; strain; stress; analytical modeling; finite element method.

In this thesis, strain monitoring was studied in a single sided patched structure. An aluminium (Al-2024 T3) substrate, repaired with a graphite/epoxy patch, is considered under tension and curving. The predictions of the present analysis are verified against those obtained by a three- dimensional ANSYS FE model and compared previous the experimental measurements. The measured and predicted strain values are in agreement, verifying the accuracy of the predicted tensile loads.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

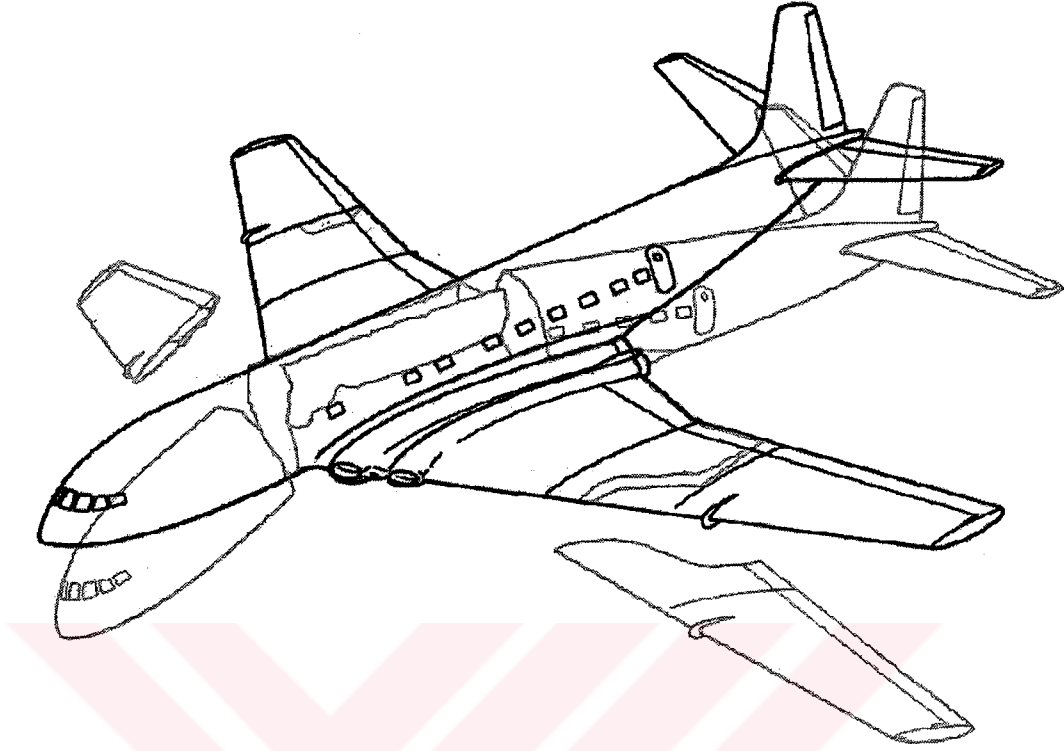
1.1. Genel

Kompozit malzemelerin ve özellikle fiber takviyeli kompozit malzemelerin, yüksek mukavemet/ağırlık oranları nedeniyle başta uçak yapılarında olmak üzere kullanımı giderek artmaktadır. Bu yapıların birleştirilmesinde yapıştırma metodu neredeyse vazgeçilmezdir. Kompozitlerin yapıştırmalı bağlantılarının tasarımı ve analizi için etkili metotların geliştirilmesi son yıllarda sayısız araştırmaların ilgi odağı olmuştur.

Kompozit malzemeler sadece havacılıkta değil tüm alan ve sektörlerde her geçen gün artarak kullanılmaktadır. Diğer malzemelerle kıyaslandığında yüksek mukavemet, hafiflik ve bir daha bir çok avantajı barındıran bu malzemeler, diğer malzemelerle çeşitli teknikler ile birleştirilebilmektedirler. Bu metotlar genelde civatalı, perçinli ve yapıştırmalı birleştirmelerdir.

Kompozit malzemelerin, kompozit yada metalik elemanlarla birleştirilmesinde yapıştırma teknolojisi önemli bir yere sahiptir. Fakat bu teknolojinin ilerlemesi ve daha mükemmel bağlantılar elde etmek adına araştırma ve incelemeler devam etmektedir.

Kompozit yapıların sık kullanıldığı uçak yapılarında yorulma ömrü, mekanik ve dinamik titreşimler ve sıcaklık değişimleri gibi birçok nedenlerden dolayı çeşitli hasarlar görülebilmektedir. Bu hasarların tamiri için genelde mekanik ve yapıştırmalı tamir teknikleri kullanılmaktadır. Hasarlı bir yapıyı değiştirmek aşırı maliyetli ve çoğu zaman mümkün değildir. Özellikle havacılık sektöründe maliyeti çok yüksek yapılar bulunmaktadır. Bu yapılarda yukarıda bahsedildiği gibi çeşitli nedenlerden dolayı oluşabilecek süreksizlikleri ortadan kaldırmak için tamir yapılmaktadır. Şekil 1.1'de sivil bir uçağın çatlama riskinin yüksek olduğu bölgeler görülmektedir.



Şekil 1.1 Sivil bir uçak yapısının çatlama riskinin yüksek olduğu bölgeleri.

Bu çalışmada kompozit bir yama ile çatlak farzedilmiş bir Alüminyum plaka yapıştırma tekniğiyle analitik bir ortamda tamir edilmiştir. Çalışmanın analizleri sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS mühendislik programında gerçekleştirilmiş ve sonuçlar daha önce yapılmış bir deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın amacı, tek bindirmeli tip yapıştırırmalı bağlantının farklı yükler karşısındaki gerilme ve zorlanma davranışını bilgisayar ortamında incelemektir. Deneysel ve analitik çalışmalarını kademeli olarak karşılaştırmak ve her iki çalışma arasında bir uyum sağlandığı takdirde sonraki çalışmalarını bilgisayar ortamında yaparak deneysel masraf ve maliyetlerden kaçınmak çalışmanın vizyonudur. Örneğin hasarlı bir uçak kanadının tamirinde ne çeşit kompozit yamanın kullanılacağı ve yamanın hangi yapıştırıcı tipi ile yapıştırılacağını, tamiratın nasıl bir konfigürasyonla tasarlanacağını, tamamlanmış yapının hangi yüklere dayanabileceğini deneme yanılma yöntemi ile yapmak hem çok masraflı hemde zaman kaybettiricidir. Bilgisayar destekli modelleme ve simülasyonla tüm bu sorulara yanıt almak, deney sayısını önemli ölçüde azaltmak suretiyle daha hızlı ve az maliyetli olacaktır. Yada yeni geliştirilmiş bir yamanın hasarlı yapıya bağlantı

davranışı modelleme ve simülasyon birikimi sayesinde kolaylıkla incelenebilecektir. Bu çalışma deneysel bir yapıştırırmalı bağlantının verilerini esas alacak ve deneysel şartları modelleyerek analitik sonuçlar elde edilecektir. Aşağıda tez çalışmamızla ilgili dünya literatüründe yayınlanmış uluslararası başlıca makaleler incelenmiştir;

Yapıştırırmalı bağlantı tekniğinin kullanımı son otuz yıl içinde askeri ve ticari uçak yapılarında artan bir grafik göstermektedir. 1973 yılında araştırmacılar [1] ilk kez kompozit malzemelerden imal edilmiş yama kullanarak çatlaklı metal esaslı hasarlı bir uçak yapısının yapıştırırmalı tamirini incelemişlerdir. Bu yıldan sonra bu malzemelerle ilgili yapılan analitik, nümerik ve deneysel çalışmaların çoğu metal esaslı hasarlı uçak yapılarına yoğunlaşmıştır. Metal esaslı yapıların kompozit malzemeler ile tamiri için tasarım ve konfigürasyon sistemlerini geliştirmeye yönelik uygulamalı çalışmalar da olmuştur.

Kompozitlerin tamiri daha çok askeri ve sivil uçak yapılarında uygulandığı görülmüştür [2]. Son yıllarda Textron [3], Federal Express Boeing 747 sivil uçakları için kompozit yamalı yapıştırırmalı tamir uygulamalarını araştırmaktadır. Boeing 747 uçağına ait görüntüler Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Yapıştırırmalı tamirlerde kesin ve olumlu sonuçlar elde etmek amacıyla yapılmakta olan incelemeler, ayrıca AMRL tarafından ön modeller geliştirilerek tahmin edilmektedir [4,5]. AMRL yapıştırırmalı tamirlerde geniş metodoloji uygulamaktadır çünkü bu yaklaşım tamir proseslerinin geniş çeşitliliğinden ileri gelmektedir ve özellikle bu yaklaşım ticari uygulamalar için önem arz eder. Bu uygulamalarda meydana gelen artık ısı gerilmelerin tam olarak deneysel tespiti için, tamirin fizibilitesini belirleyen kritik yük konumlarını ve gerçek yük uygulamalarını belirlemek gerekir.



Şekil 1.2 Boeing 747 sivil uçağı genel görüntüleri.

1978’de X-ışını kırınım metodu yoluyla karbon fiber takviyeli çatlamış bir kompozit yapının termal artık gerilmeleriyle ilgili bir makale yayınlandı [1,6]. Bu makalede kullanımı daha yaygın olan boron/epoksi yama yerine, metal yüzeyine X-ışınının girmesine izin veren karbon/epoksi yamalar kullanıldı. Bu çalışmanın ölçümlerinde yapıştırılmalı tamir numuneleri üzerinde yüksek ısıl gerilmeler görüldü. Artık ısıl gerilmelerin yoğunlaştığı bölgelerin çatlak etrafında olduğu görüldü. Çatlak ucu civarındaki artık ısıl gerilmelerin eğimi ve yoğunluğu, ısıl artık gerilmelerin az olduğu uzak mesafeler ile kıyaslandığında dikkate değer bir yayılma göstermektedir. Isıl artık gerilmelerinin korozyon çatlaklarının genişlemesine yol açtığını inceleyen AMRL araştırmacıları, önceden yapılan gerilme tahminlerinin bazen deneysel çalışmalar ile uyumsuz olduğunu görmüştür [6]. Kompozitlerin tamirinde karşılaşılan artık ısıl gerilmeleri indirmek için Baker [7] tarafından bazı öneriler ortaya atılmıştır. Baker çalışmaları sonucunda yapıştırıcının mümkün olan en düşük sıcaklıkta uygulanması gerektiğini bulmuştur. Eğer mümkünse soğutucu yardımıyla artık çekme gerilmelerin kısmen yada tamamen azaltılacağı ve sabit bir seviyede yama

uygulamasının gerçekleştirilebileceğini yada yamanın kompresyonda ön gerilmeye tabi tutulmasının gerekliliğini belirtmiştir.

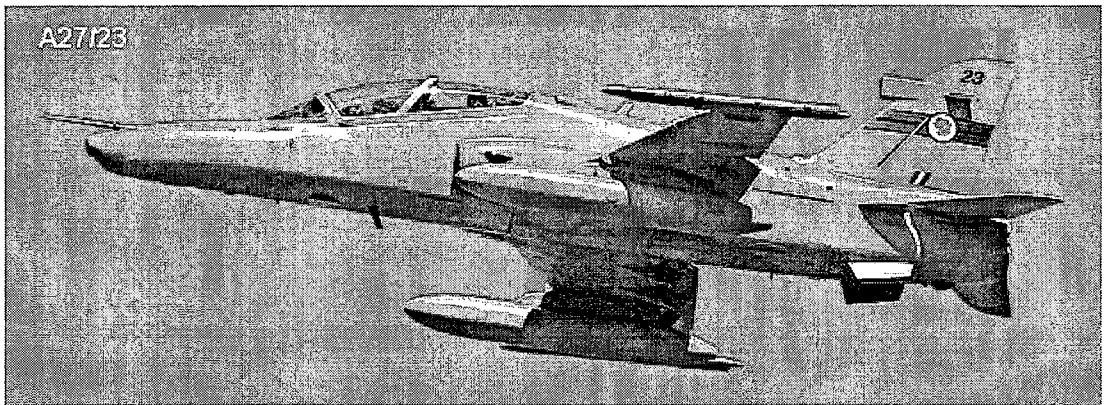
Ong ve Shen [8]'de kompozit yamalı tamir konusunda bir makale yayınlamıştır. Bu makalede yazarlar hasarlı bir uçak yapısının kompozit yama ile yapıştırılmalı tamirini incelemiştir. Bu çalışmayı yaparken basit bindirme tipi (single-lap joint) kullanılmış, kopma ve yorulma testleriyle yapıştırıcılar için farklı üç oda sıcaklığı ile deneyler yapılmıştır. Sonuçta karbon yada boron/fiber kompozit yamalar ile yapıştırılmalı tamirden sonra, alüminyum tabakadaki çatlakın yorulma ömrü 60-100 kat uzadığını bulmuşlardır.

Raizenne [9] ve arkadaşları üç katmanlı grafit kompozit yamaların deneysel yapıştırılmalı tamiri konusunda bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada 7075-T651 ile alüminyum tabakasına $(0)_{10}$, $(90)_{10}$ ve $(\pm 45)_5$ yığın dizisine sahip yapıştırılmalı altı farklı yama tatbik edilmiştir. Alüminyum tabakaya grafit/epoksi kompozit yama yapıştırılmasında yapıştırıcı katmanı olarak FM73 kullanıldı ve yamaların mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla statik, yorulma ve çekme testleri uygulandı. Yamalar -30 °C, 20 °C ve 60 °C olmak üzere 3 farklı sıcaklıkta incelendi. Alüminyum tabaka ve yamanın farklı bölgelerindeki yapışmalar 7 zorlanma ölçümü kullanılarak statik ve yorulma yükleri incelendi, yamada performans düşüklüğü yada hasarla karşılaşılmadı. Albat [10]'da hasarlı yapıların yapıştırılmalı kompozit tamirinde oluşan artık ısıl gerilmeleri inceledi. Bu çalışmada $(0)_7$, $(90)_7$ ve $(\pm 45)_7$ yığın dizisine sahip 7 farklı yama üretti. 2024-T Alüminyum tabakasına boron/epoksi kompozit yama yapıştırmak için FM73 yapıştırıcı katmanından yararlandı. Artık ve artık ısıl zorlamaları tespit etmek için alüminyum tabaka ve kompozit yama arasında ve üzerindeki çeşitli bölgelere olmak üzere 44 strain-gage kullanıldı. Esasen burada 21 ve $56,5$ °C deki tamir performansı incelenmiştir. Bu çalışmada ayrıca bilgisayar destekli analiz için önce model hazırlandı, sonra çift katmanlı yama tatbik edildi ve sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırıldı. Son zamanlarda bilgisayar destekli sonlu elemanlar modelleri kullanılarak analizler elde etmek sıkça görülmekte ve deneysel veriler ile karşılaştırılmaktadır. Albat [10] çalışmasının sonucunda numunelerdeki artık ısıl gerilmeler için teorik ve deneysel çalışmalar arasında iyi bir uyuşma olduğunu saptadı.

Diğer bir çalışmada ise bir yama ile tamir edilen kompozit bir katman dairesel kesilerek çekme altında incelendi. Analizin tahminleri 3 boyutlu ANSYS FE model ve deneysel ölçümler tarafından elde edilen veriler ile mukayese edildi [11].

Farklı bir çalışmada yamalı tamir sırasında artık gerilmelerin azalması için sıcaklık derecesi düşürüldü ve bu sıcaklıkta pişirme yani yapışma sağlandı. Çalışmada ayrıca yamanın yapışmasında maksimum pişirme seviyesi, devir hızı ve minimum artık gerilmelerinin bir kombinasyonunu sağlamak amacıyla ve pişirme devirin en iyi şekilde geliştirilmesi için pişirmesi prosesi sırasında yapıştırıcı özelliklerinin gelişmesi ve davranışı incelenmiştir [12].

Diğer bir çalışmada [13] çatlak ucundaki gerilmelerin şiddet faktörü hesaba katılarak kompozit yamaların yapıştırılmasıyla tamir edilmiş yapının çatlaklardaki davranışlar sonlu elemanlar metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca gerilme şiddet faktörü varyasyonunda yapıştırıcı özellikleri ve yama ölçülerinin etkileri incelenmiştir. Çatlak uzunluğuna göre gerilim şiddet faktörlerinin davranışı, çatlak uzunluğu arttıkça gibi gerilim şiddet faktörü de benzer bir davranış sergiler. Yapıştırılmalı kompozit yamaların yüzeyleri uçak yapılarının hasar yada çatlak tamirinde etkili yöntem olduğu kanıtlanmıştır. Uçak yapılarında yapıştırılmalı kompozit tamir teknolojisinin geliştirilmesi için hatırı sayılır araştırmalar yapılmaktadır. Avustralya Hava Kuvvetleri Havacılık ve Denizcilik Araştırma laboratuvarı'ndan Alan Baker bu araştırmaların öncülerindendir, şekil 1.3'de Avustralya Hava Kuvvetlerine ait A27/23 savaş uçağı görülmektedir [13].



Şekil 1.3 A27/23 savaş uçağı.

Diğer bir çalışmada yapıştırırmalı kompozit yamalı Alüminyum 7075-T6 tabakasındaki çatlağın FCG davranışı hem deneysel hem de analitik olarak incelenmiştir [14].

Hasarlı metalik bir tabakanın kompozit yama ile yapıştırırmalı tamirinde termal gerilmelerin ve bu gerilmelerin tahmini etkilerini belirlemek için analitik bir metot geliştirilerek bir çalışma yapıldı [15]. Yapışma formasyonu boyunca yapıştırıcı, ısı geçişleri ve mekanik deformasyonlar incelendi.

Diğer bir çalışmada tamir edilmiş yapıların ve bağlantıların performansı hakkında bilgi sağlamak amacıyla “akıllı” sistemler yada “kuvvetli tamirler” elde etmek için bir çalışma yapıldı. Bu çalışma ile ilgili yayında metalik ana yapılar ve yama elemanları arasında yapıştırıcı katmanındaki yapışmazlık etkilerinin ortaya çıkma sebeplerine odaklanıldı. Çünkü bu yeni bir alandı, bir seri nümerik çalışmalar yapıldı ve deneysel çalışmalar ile başarılı bir şekilde doğrulandı [16].

Uçak yapılarında et kalınlığı fazla olan bölgelerin yapıştırırmalı yama tamiri ile ilgili bir çalışma yayınlandı. Çalışmada MSC/Patran ve MSN/Nastran ticari yazılım programları kullanılarak, yapıştırırmalı tamirde gerekli kalınlıklar için üç boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılarak uygun prosedürler araştırıldı ve orijinal yapı elemanlarında görülen gerilimi azaltmak amacıyla çeşitli yama konfigürasyonlarının etkileri incelendi. Komozit yamalı yada yamasız elemanın bağlantı analizleri için global-yerel hiyerarşik bir model yaklaşımı geliştirildi. Bu çalışma için esas olarak şekil 1.4’de gösterilen F/A-18 uçağı ana yapısının potansiyel tamiri incelendi [17].



Şekil 1.4 F/A18 savaş uçağı.

Farklı bir makalede iki kompozit yamanın, metal malzemeye çift bindirmeli (double-lap joint) yapıştırılmalı tamirinin deneysel incelemesi ve sonlu elemanlar modellemesi yapıldı. Modellemede, çatlak izleri boyunca yapının zorlama enerjisi salma oranlarının nümerik tespiti rapor edildi. Yorulma test sonuçları için enerji salınım oranlarının hesabı ve görülen yorulma hasar davranışları arasında sadece nitel bir ortak bağ kuruldu [18].

Fındık [19] ve çalışma arkadaşları tarafından tek bindirme yamalı yapının zorlanma izlenimi ile ilgili deneysel bir inceleme yapıldı. Grafit/epoksi kampozit yamalı Alüminyum 2024-T3 tabakanın ısı artışı zorlamaları belirlendi. 5 adet numune üretildi ve tamamlanmış yapı üzerinde 7 farklı bölgede strain-gage ile zorlanma ölçümleri yapıldı. Farklı sıcaklıklarda pişirmeden yani yapışmadan sonra ısı ve ısı artışı zorlama değerleri tespit edildi ve sonuçlar önceki çalışmalar ile mukayese edildi. Bu tez çalışmasında, Fındık'ın yaptığı deneysel verilerden yararlandı.

Çalışkan [20,21] ve çalışma arkadaşları son olarak basit bindirme tekniği kullanarak kompozit bir yama ile Alüminyum plakanın çekme altında nümerik davranışlarını iki çalışmada inceledi. Bu çalışmalarda yapıştırılmış yapının farklı bölgelerinde gerilme, genleşme ve deformasyon değerleri tespit edildi ve Fındık'ın yaptığı deneysel veriler ile karşılaştırılarak her iki zorlanma tespitlerinde olumlu eğilimler bulundu.

Bu tez çalışmasında grafit/epoksi kampozit yama ile tamir edilmiş Alüminyum 2024-T3 tabakası; 1000, 2000, 3000, 4000, 5000 ve 6000 N çekme ve 100, 250 ve 500 N eğme yükleri altında gerilme, genleşme ve deformasyon değerleri bilgisayar destekli ANSYS sonlu elemanlar analiz programı kullanarak tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Fındık'ın yaptığı deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın vizyonu, iyi bir modelleme yapılarak analitik değerlerin deneysel verilere yaklaştırmak ve belirli bir yaklaşım sistemi kurmaktır. Böylece kurulacak yaklaşım sistemi ile farklı yükler altında, farklı konfigürasyonla ve farklı yapıştırıcılar kullanılarak az maliyetli analizler yapmak mümkün olacaktır.

BÖLÜM 2. KOMPOZİTLERİN YAPIŞTIRMALI TAMİRİ

2.1. Giriş

Malzemelerin yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmesi, mekanik bağlantı elemanları kullanılmasına kıyasla önemli avantajlar sağlar. Yapıştırıcı, yük ve gerilimi tüm birleşim yüzeyine yayarak statik ve dinamik yüklerin düzgün dağılmasını sağlar, ayrıca gerilimin belli noktalarda yoğunlaşmasını engeller. Dolayısıyla yapıştırıcı ile gerçekleştirilmiş bir bağlantı, bükülme ve titreşime, mekanik yöntemle (örneğin perçin) yapılan bir bağlantıdan daha dayanıklıdır.

Yapıştırıcı aynı zamanda birleşim yerinin sızdırmazlığını da sağlar, böylece mekanik yöntemlerle birleştirilmiş parçalarda görülebilen korozyonu engeller. Yapıştırıcı, düzgün olmayan yüzeylerin birleştirilmesini de kolaylaştırır, parça boyutlarında veya şeklinde çok az (veya hiç) değişikliklerle daha hafif birleşimler elde edilir.

Yapıştırıcı kullanımına karar vermeden önce dikkate alınması gereken bazı ilave faktörler vardır. Örneğin, yapıştırıcı yapıştırılacak malzemelere uygun olmalı, imalat yöntemiyle uyumlu, hesaplanan çalışma yüklerine ve çalışma ortamına dayanmalıdır. Ayrıca, yüzey hazırlığı, uygulama yöntemi, kürleşme sistemi ve bunların süre ve maliyetleri de dikkate alınmalıdır [22].

Kompozit malzemeler diğer malzemeler gibi farklı yapı formlarını oluşturmak için birleştirilebilir ve işlenebilirler. Bu malzemeler için yapıştırma tekniği vazgeçilmez bir yöntemdir. Bu tekniğin uygulanmasındaki prosedürler birleştirilecek elemanların kullanılacak tekniğe uygunluğu ve verimi önemli bir faktördür.

Kompozit malzemelerin yapıştırımlı birleştirme tasarımında aşırı ağırlık, maliyet ve oluşabilecek problemlerden kaçınılması gerekir. Endüstri kuruluşlarında ve araştırma

merkezlerinde kompozit malzemelerin birleştirme ve işleme proseslerinde çeşitli problemlerin çözümü için araştırmalar yapılmaktadır [23].

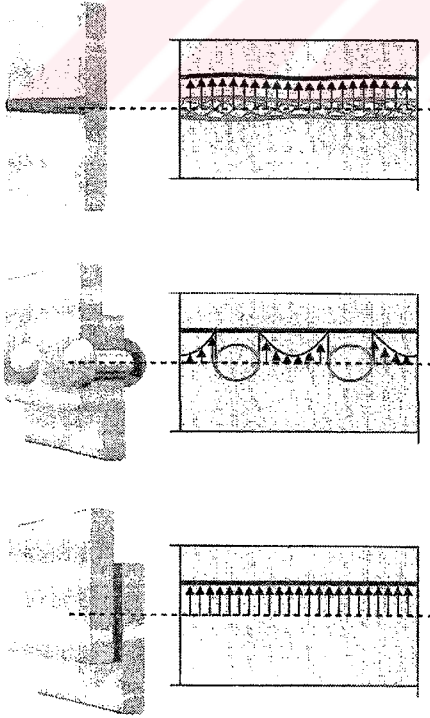
Yapıştırma; kaynak, lehim, perçin vs. yanında endüstriyel bir birleştirme yöntemi olarak kullanılmaya ilk başladığından beri, başarılı bir yapıştırma için en önemli parametreleri bulmak amacıyla da birçok araştırma, geliştirme ve mühendislik çalışması yapılmıştır.

2.2. Birleştirme Teknikleri

Üç temel birleştirme yöntemi vardır, bunlar;

- Mekanik; civata, vida veya perçin ile
- Termal; kaynak, pirinç lehim veya lehim ile
- Kimyasal; yapıştırıcı ile.

Şekil 2.1’de kaynaklı, perçinli ve yapıştırma bağlantılarının gerilim dağılımı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Yukarıdan aşağıya sırasıyla kaynaklı, perçinli ve yapıştırma bağlantılarının gerilim dağılımı [22].

2.2.1. Mekanik Birleştirme

Sık ve kolay sökülme gerekiyorsa, civata kullanımı ideal ve genellikle de çok güvenilir bir birleştirme yöntemidir. Fakat bazı durumlarda civatalar gevşeyebilir ve “vida gevşemezlik” sistemleri ile emniyete alınmaları gerekir.

Civata veya perçin kullanmak için delik açılması gerekir, bu da parçaları zayıflatır. Yapı yük altına girdiğinde, açılan deliklerin etrafında gerilim yoğunlaşması meydana gelir. Bu durum erken malzeme yorgunluğuna neden olabilir. Dolayısıyla, bu tür bağlantı elemanları kullanıldığında sağlamlığın elde edilmesi için malzeme kalınlığının artırılması gerekir. Ayrıca, civata veya perçin delikleri korozyon tehlikesini artırır. Bu sebepten çoğunlukla karmaşık ve pahalı olan yalıtım veya yüzey koruma işlemlerine gerek duyulur. Eğer farklı metaller birleştiriliyorsa galvanik korozyon ve farklı genleşme süreksizlikleri görülebilir [22].

2.2.2. Termal Birleştirme

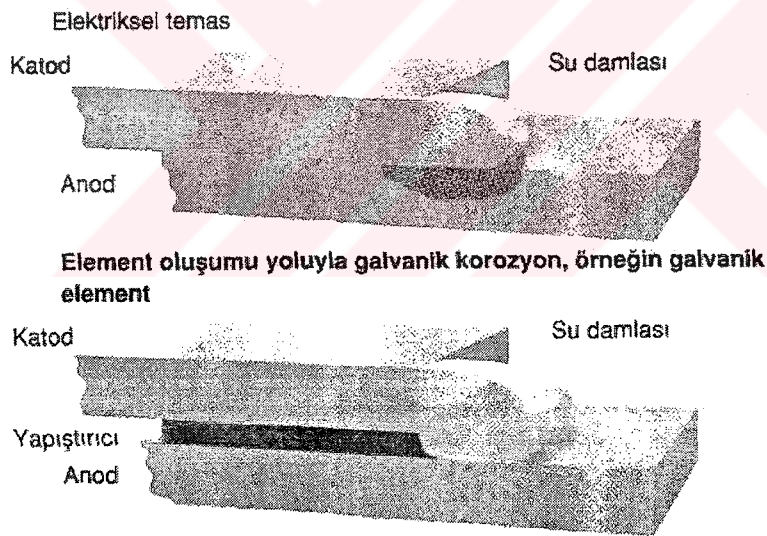
Kaynak ve lehim normalde yalnızca benzer malzemelerde mümkündür. Termal birleştirmede sökme mümkün değildir veya çok zordur. Kaynak ve lehim işlemi sırasında oluşan yüksek sıcaklık istenmeyen gerilmelere neden olur, bunun sonucunda parça yorgunluğu ve parçaların yapısında bozulma meydana gelebilir.

2.2.3. Yapıştırıcı ile Birleştirme

Yapıştırma, sağladığı birçok avantajla imalat alanlarını genişletir. Bu avantajlardan bazıları;

- Düzgün gerilim dağılımı: Açılan delikler nedeniyle meydana gelen gerilim yoğunlaşmaları engellenir.
- Yapısal değişim olmaması: Kaynak yönteminde olduğu gibi malzemelerin özellikleri bozulmaz.
- Şekil bozukluğu olmaması: Kaynak yönteminde olduğu gibi parçalar ısıtılmadığı için farklı kütle ve boyuttaki parçalar kolaylıkla birleştirilebilir.

- Farklı malzemelerin birleştirilmesi: Farklı malzemelerin üstünlüklerinden en iyi şekilde faydalanacak şekilde malzeme seçimi ve birleştirilmesine imkan verir.
- Sızdırmazlık: Yapıştırıcılar aynı zamanda conta vazifesi görür. Civata ve perçinli bağlantılar ise genellikle sızdırmazlık sağlamak için ilave işçilik ve maliyet gerektirir.
- Elektriksel yalıtım: Farklı elektro-kimyasal özellikteki metaller birleştirilebilir. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi korozyon ve sürtünme nedeniyle aşınma ortadan kalkar.
- Parça adetinde azalma: Pim, civata, perçin, kelepçe vs. gereksiz hale gelir.
- Ürün görünümünde iyileşme: Yapıştırılmış bağlantılar daha düzgündür. Birleştirme sonrasında, kaynakta olduğu gibi ek yeri görünmez. Bu avantaj, tasarımcılara ürün görünümünün iyileştirilmesi için birçok olanak sağlar.



Şekil 2.2 Galvanik korozyon [22].

2.3. Yapıştırırmalı Birleştirme Teknolojisi

Kompozit malzemelerin metalik malzemelerle veya kompozit malzemelerin kompozitlerle yapıştırılmasıyla oluşan yapılar şu anda havacılıkta ve özellikle askeri uçaklarda sıkça kullanılmakta ve bu yapılar hızlı bir şekilde geliştirilmektedir. 1945 yılında uçaklar için yapıştırırmalı bağlantı tekniği önemli bir birleştirme metodu

olmuştur ve o zamandan beri bu yöntemin kullanımının arttığı görülmüştür. Yapıştırıcı üreticileri mevcut malzemelerin sıcaklık oranı $-423/-500$ °F ($-253/-260$ °C) çıkarmak için üretimlerini sürekli geliştirmektedirler. Mekanik birleştirmeler ile yapıştırma bağlantıları arasındaki karşılaştırmalı genellemeler aşağıda belirtilmiştir;

- i. İlk yükten sonra, yapıştırırmalı bağlantılar mekanik bağlantılardan daha az daimi şekil bozulması göstermektedir.
- ii. Yapıştırıcı bağlantılar, birleştirilmiş elemanların temas bölgelerinde mekanik bağlantılardan daha düşük gerilme davranışı sergiler.
- iii. Yapıştırırmalı bağlantılar mekanik bağlantılar ile karşılaştırıldığında çoğu temel yapılar için % 5 ve 10 arasında ve ikincil yapılar için % 25 ağırlığında tasarruf potansiyeline sahiptir.
- iv. Yapıştırırmalı bağlantılar düz yüzeylere sahip yapıların birleştirilmesine imkan verir ve birleştirilmiş tabakalı yapıların çatlak yayılmasına minimum duyarlı olması sağlanır.
- v. Büyük yüzey alanlara sahip malzemelerin birleştirilmesinde yapıştırırmalı bağlantı, mekanik bağlantıdan genellikle daha az maliyet gerektirir.
- vi. Yapıştırırmalı bağlantılar farklı malzemelerin montajına ve birleştirilmesine izin verir, fakat yapışmalarda ısı farklılıklar ve gerilmeler hesaba katılmalıdır.

Yapıştırırmalı bağlantıların dezavantajlarını da şu şekilde sıralayabiliriz;

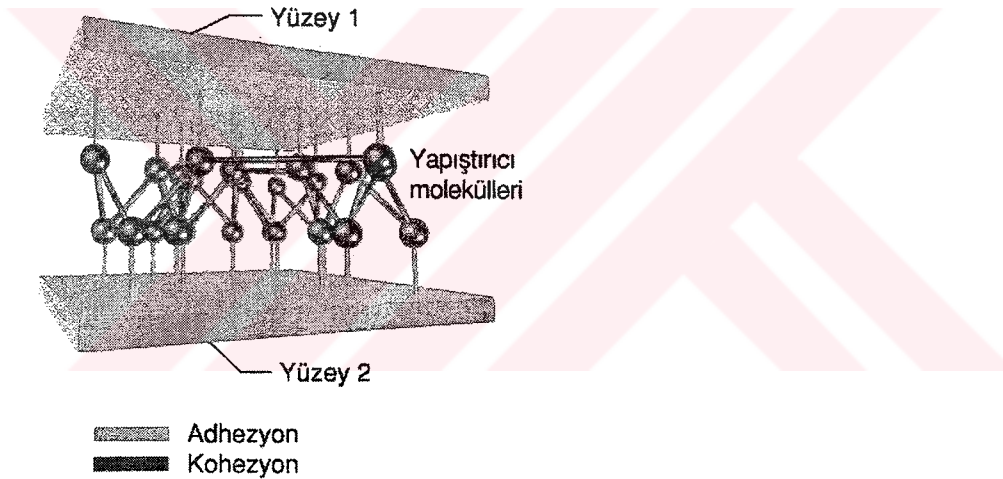
- i. Yapıştırıcıların bazı tipleri için yüksek sıcaklık derecelerine direnç zayıftır.
- ii. Yapıştırırmalı bağlantı dizaynı, yükleri minimize edecek şekilde tasarlanması gerekmektedir.
- iii. Yapıştırırmalı birleştirmelerde bağlantılara zarar vermeden, birleşmenin kontrolü tamamen zorur.
- iv. Yapıştırma ile birleştirilmiş bir yapı kalıcıdır ve bağlantının herhangi bir nedenle sökülmesi düşünülemez çünkü yapı deforma olur.
- v. Yapıştırma yöntemi ile birleştirilmiş yapıların mükemmelliği, elemanların kaynak gibi tam birleşmesine bağlıdır.

- vi. Yapıştırıcı bağlantıların dayanıklılık ve ömür testleri, maliyeti yüksek laboratuarlarda hızlandırılmış deneyler ile yapılır [23].

2.3.1. Yapıştırma Ek Yeri

Yapıştırıcılar, aynı veya farklı malzemeden yapılmış yüzeyler arasında bir çeşit köprüdür. Yapışma mekanizması Şekil 2.3'de görüldüğü gibi iki farklı kuvvete bağlıdır, bunlar;

- Yapıştırıcının yüzeye yapışma kuvveti (adhezyon) ve
- Yapıştırıcının iç kuvveti (kohezyon)



Şekil 2.3 Yapıştırma ek yerindeki kuvvetler [22]

2.3.1.1. Adhezyon

"Adhezyon" iki 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), 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 [22].

2.3.1.2. Kohezyon

"Kohezyon", yapıştırıcı molekülleri arasında bulunan ve yapıştırıcıyı birarada 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.

2.3.1.3. Yapıştırma Ek Yerindeki Kopmanın Değerlendirilmesi

Yapıştırılmış bir ek yerindeki kopmanın bazı önemli nedenleri parçaların gözle kontrolü ile tespit edilebilir. Böylece kopmanın adhezyon veya kohezyon kopmasından mı kaynaklandığı, yoksa parçaların mı zarar gördüğü tespit edilebilir. Kopma türleri iki çeşittir, bunlar;

- Adhezyon kopması; yapıştırıcı parça yüzeylerinin birinden komple ayrılır.
- Kohezyon kopması; yapıştırıcının kendisi kopar, yapıştırıcı kalıntıları her iki parça yüzeyinde görülebilir.

Kopma türleri ve kuvveti artırma yöntemleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Kopma türleri ve kuvveti artırma yöntemleri [22].

Kopma türü	Kuvveti artırma yöntemleri
Adhezyon kopması	Yapışmanın zayıf noktası, yapıştırılan parça ile yapıştırıcı arasındaki temas yüzeydir. Ya malzeme yapıştırmaya uygun değil, ya da yapıştırma yüzeyi kirlidir. Her iki durumda da kuvvet, yüzeye uygun ön- işlem yapılmasıyla artırılabilir.
Kohezyon kopması	Yapıştırıcı dış etkiler nedeniyle aşırı gerilime maruz kalmıştır (ör. gerilim tepesi, sıcaklık, yaşlanma vs.). Çözüm: Parçaların seklinde değişiklik yapmak ve/veya daha uygun yapıştırıcı seçmek.

2.3.1.4. İyileştirme Değerlendirmesi ve Yöntemleri

Kopmuş bir ek yerinin görünümünü yalnızca zayıf noktanın nerede olduğunu gösterir, fakat kopma nedenini söylemez. Problemi ortadan kaldırmak için, kopma nedenlerini bulmak esastır.

2.3.1.5. Yapıştırıcı Ek Yeri Kopmalarının Sebep ve Çözümleri

Yapıştırıcı ek yeri kopmalarının sebepleri hatalı parçalar, hatalı yapıştırma, hatalı yapışma vs. dir. Bu sebeplerin sebep ve çözümleri Tablo 2.2'de gösterilmiştir.

Tablo 2.2 Ek yeri kopma sebep ve çözümleri [22].

Muhtemel Sebepler	Çözümler
Hatalı parçalar	Toleranslar, boşluk ve malzemeleri kontrol ve daha dikkatli takip edin
Kirli parçalar	Ön-işlemin uygunluğunu kontrol edin ve gerekli şekilde değiştirin (ör: temizleme maddeleri, temizleme işlemi, ara depolama vs.).
Hatalı yapıştırma	Tüm proses parametrelerini, yapıştırma işlemini kontrol edin ve birleştirme şekli ve süresini iyileştirin, birleştirme süresince tüm kurlleşme şartlarının sağlandığını kontrol edin.
Yapıştırıcının yetersiz kurlleşmesi	Kurlleşme ön şartlarını (ör: boşluk, havasızlık, sıcaklık, nem vs.) kontrol edin. Kurlleşme süresinin teknik data'ya uygunluğunu kontrol edin. Yapıştırıcının raf ömrünü doldurmadığından emin olun.
Mekanik aşırı gerilme veya istenmeyen gerilmeler (soyulma)	Yapışma yüzeyini genişletin ve/veya kuvvet tatbik edilen ek yeri geometrisini değiştirin. Yapıştırıcının gerilim türüne uygunluğunu (çekme, kesme vs.) kontrol edin.
Termal aşırı gerilim	Yüksek sıcaklığa daha dayanıklı yapıştırıcı seçin.
Sıvı veya gaz halindeki ortamdan korozyon oluşması veya yapıştırıcının tahrip olması	Parçalar arasındaki boşluğun ortam ile temasını uygun bir kaplama ile, veya yapıştırılan parçaların şeklini değiştirerek engelleyin.

2.3.2. Yapıştırmada Bağlantı Tasarımı

Uçak yapılarında yüzeysel yükler ile nadiren de olsa uniform alanlarda gerilmeler meydana getirir. Hatta bu gerilmeler homojen metalik yapılar içinde geçerlidir. Kompozit yapılarda, alan gerilmeler genellikle anizotropiktir ve böylece yapıştırmalı bağlantılar asimetrik gerilim alanları içerir.

Yapıştırma tekniği ile birleştirilecek elemanlar, yapıştırıcı için kurulan proseslerin yüksek sıcaklık derecelerinden dolayı çeşitli gerilmelere maruz kalır. Yapıştırmalı bağlantının geometri tasarımı ve yapıştırıcı seçimi, farklı gerilmelerin büyüklüğü, kopma-gerilme süresi ve bağlantının uygun boyutu ile belirlenir.

Gerilme ve zorlanma arasında lineer olmayan davranışa sahip elastik olmayan yapıştırıcılar, birleşmeden sonra gerilim konsantrasyonunun ani bir şekilde azalmasına neden olur. Diğer yandan, kompozit yapılarda bu tip bir davranış bağlantı gerilme konsantrasyonunun büyüklüğünün artmasına sebep olur.

Elemanlarının elastik olarak varsayıldığı kompozit yapıştırırmalı birleştirilmelerin mevcut gerilme analizlerinin hesaplanması gerekir. Bu nedenle güvenlik faktörleri açısından anizotropi faktörü, zamana bağlı malzeme davranışları ve esnemezlik göz önünde tutulmalıdır [23].

2.3.2.1. Tasarım Esasları

Yapıştırılmış bir bağlantının kuvveti ve dayanıklılığı başlıca şu parametrelerce belirlenir:

- Yapıştırıcı
- Yapıştırılacak malzeme
- Çalışma ortamı
- Ek yeri tasarımı
- Yük

Bir yapıştırıcının fiziksel ve kimyasal özellikleri, onun kohezyon (iç-yapışma) ve adhezyon (yüzeyle tutunma) kuvvetini belirler. Yapıştırma bağlantının dayanıklılığı da yapıştırıcının özelliklerine bağlıdır. Yapıştırıcılar; kuvvet, yüzeye tutunma özellikleri ve elastisite modülü yönünden değişik özelliklerde olabilir.

Yapıştırılacak malzemeler ve yüzey son-kat işlemleri çoğunlukla optimum yapıştırıcı ve ek yeri tasarımında birinci seçim kriteridir, fakat en uygun yapıştırıcının belirlenmesinde malzemelerin mekanik özellikleri ve parçaların sertliği de çok önemlidir.

Bağlantının çalışma ortamı (sıcaklık, kimyasallar/solventler, nem, vs.) yapıştırıcı seçimini doğrudan etkiler. Çalışma ortamı ve tatbik edilen kuvvetler dayanıklılığı belirleyen en önemli parametrelerdir.

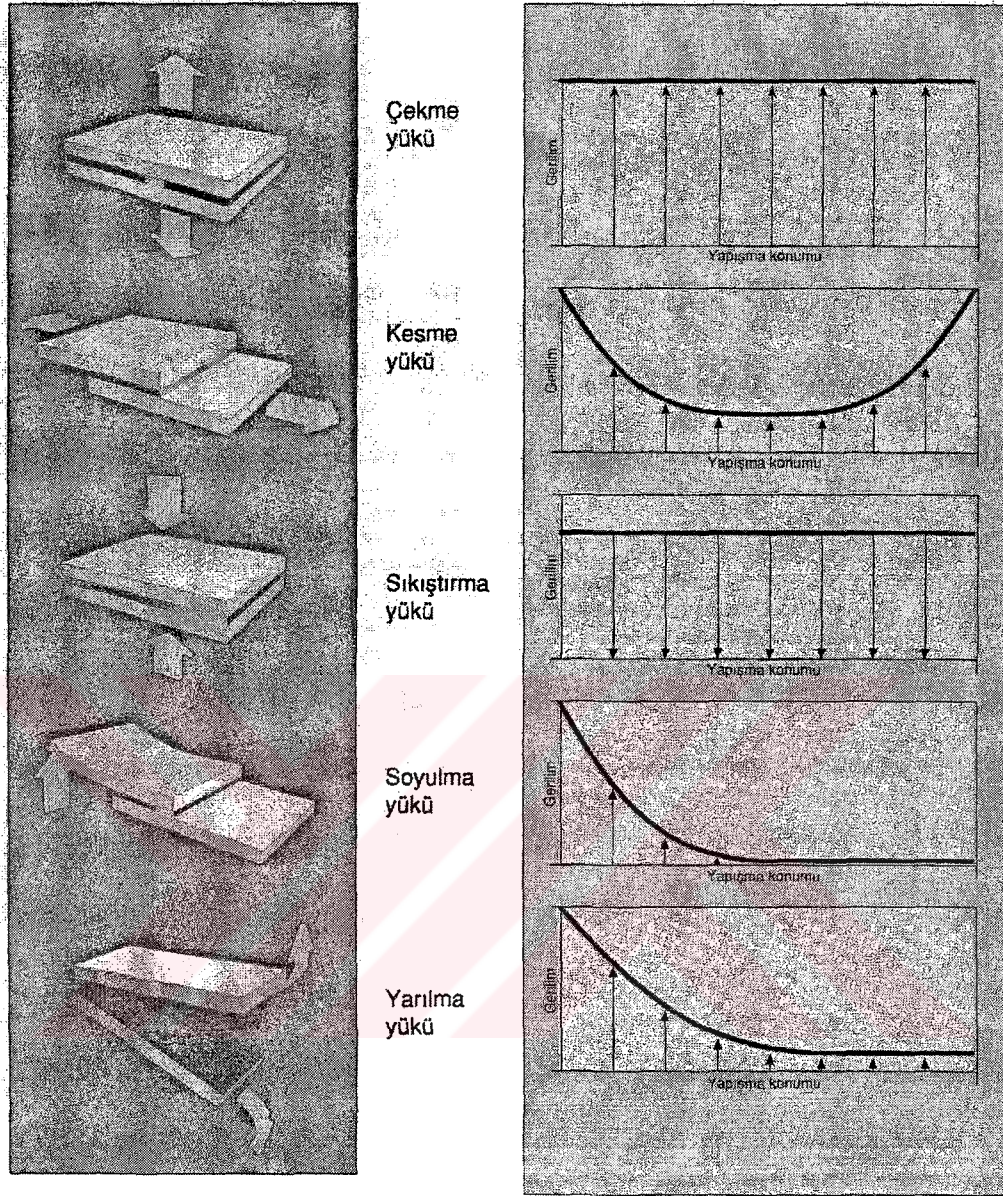
Ek yeri tasarımı, seçilen yapıştırıcıdan en yüksek verimi almakta en önemli parametredir. Tasarım yapıştırıcının özelliklerine göre ayarlanmalı (örneğin hacimsel kürleşme, boşluk doldurma, vs.), ve en zor yük şartları (soyulma, yarıma) engellenecek şekilde optimize edilmelidir [22].

2.3.2.2. Bağlantı Tasarımı

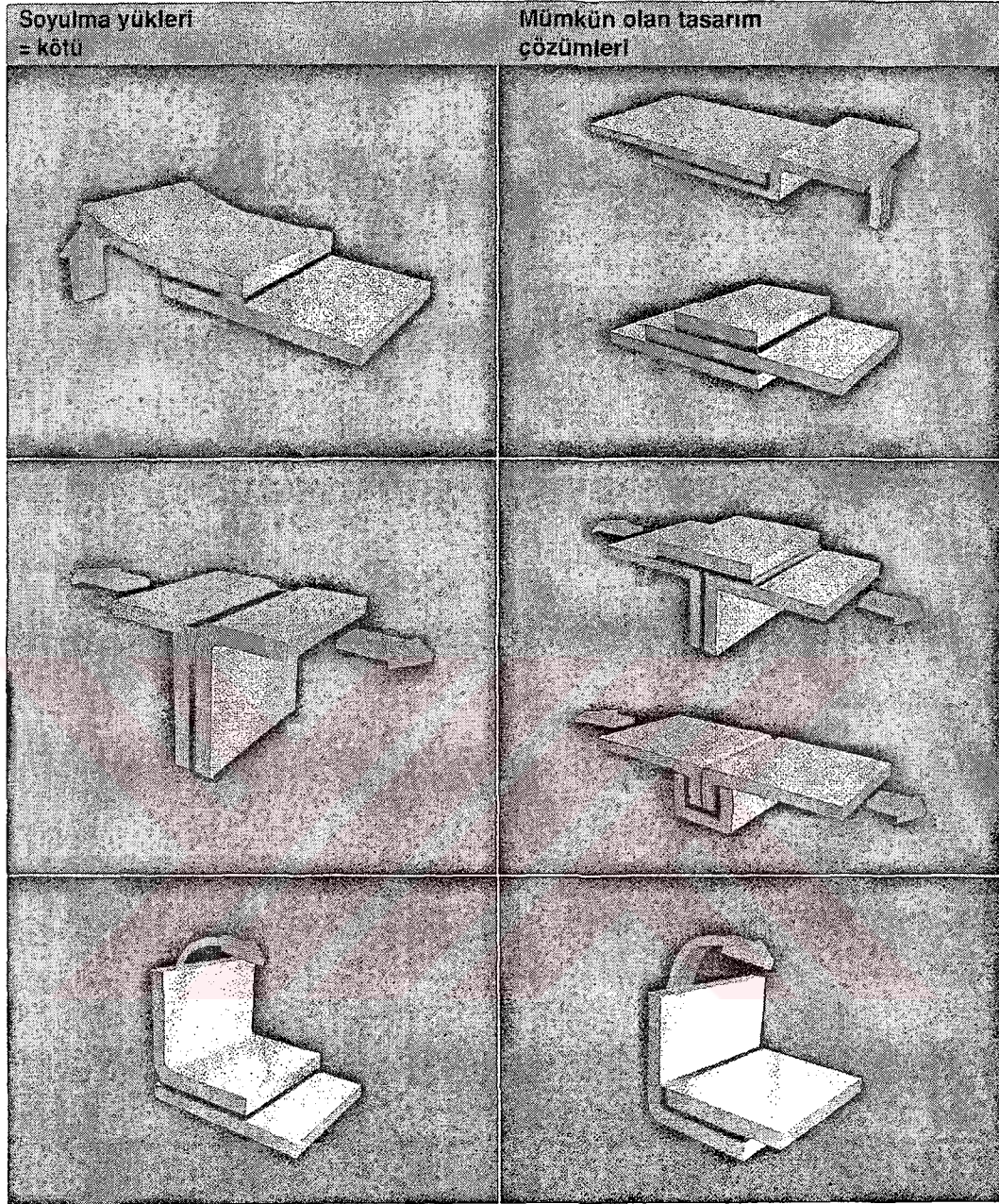
Yapıştırıcıyla birleştirmede, optimum tasarımın hedefi en düzgün gerilim dağılımını elde etmektir. Dolayısıyla mühendisler, kuvvet uygulanan bir ek yerinde gerilimin nasıl dağıldığını iyi bilmelidir. Yapıştırılacak bir ek yerinin tasarımında dikkate alınması gereken birçok kural vardır. Bunları şu şekilde açıklayabiliriz;

Soyulma ve yarıma yüklerini en aza indir: Şekil 2.4'deki gerilim dağılım eğrilerine bakarsak, soyulma ve yarıma yüklerinden mümkün olduğunca kaçınılması gerektiğini görürüz. Şekil 2.5'de, soyulma ve yarıma kuvvetlerinin daha çok tercih edilen yüklere nasıl dönüştürülebileceğine dair bazı tavsiyeler görülmektedir. Şekil 2.6'da yapıştırılmış bağlantılarda tercih edilen ve edilmeyen yükler ve yapışma yüzeyi ne kadar genişse o kadar iyi olduğu gösterilmektedir.

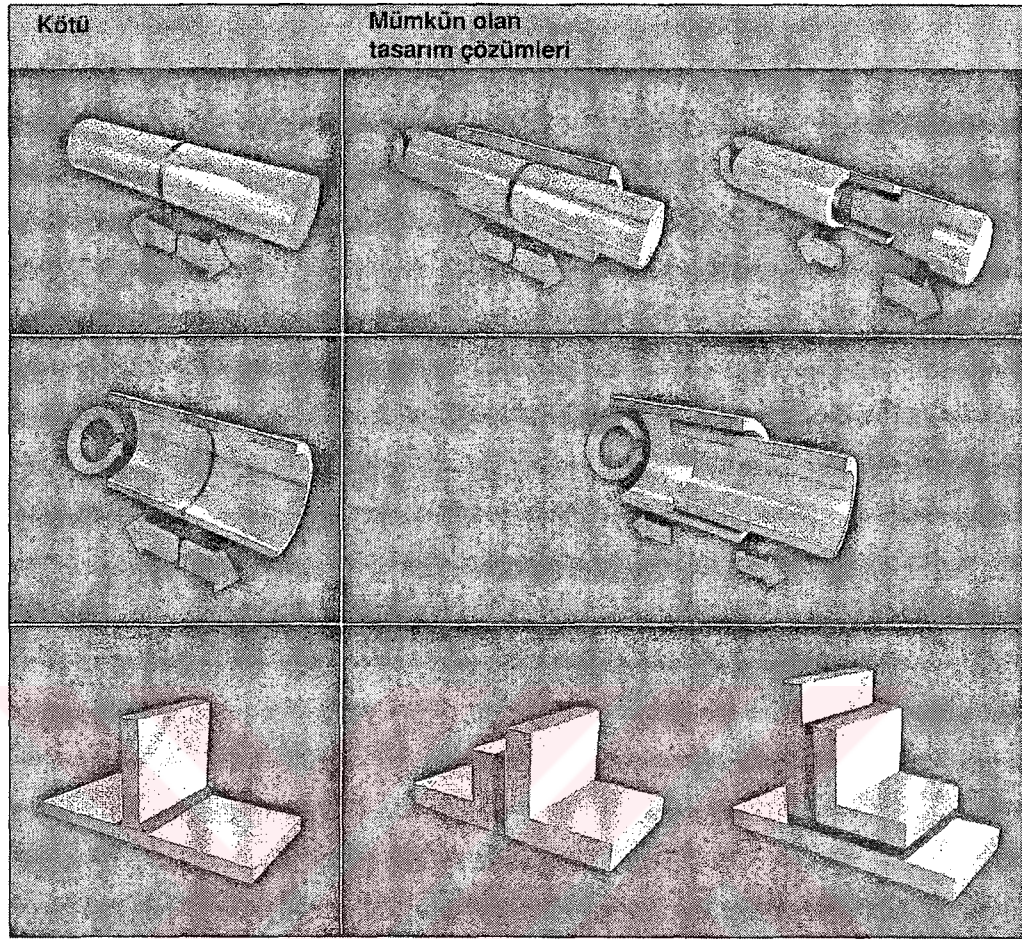
Yapışma alanını artır: Bir ek yerini iyileştirmenin, veya bir tasarımı yapıştırmaya uygun hale getirmenin diğer bir basit fakat çok önemli yolu da yapışma alanını artırmaktır. Eğer yapışma alanı çok küçükse, genellikle çok yüksek soyulma veya yarıma gerilimleri doğar. Yapıştırıcı ve parçaların sertliği ek yerinin kopma yükünü etkiler. Genellikle, parçalar ne kadar sert ise, ek yerinin kuvveti parçaların şeklinden o kadar az etkilenir [22].



Şekil 2.4 En yaygın yük tipleri ve yapışma çizgisindeki gerilim dağılımları [22].



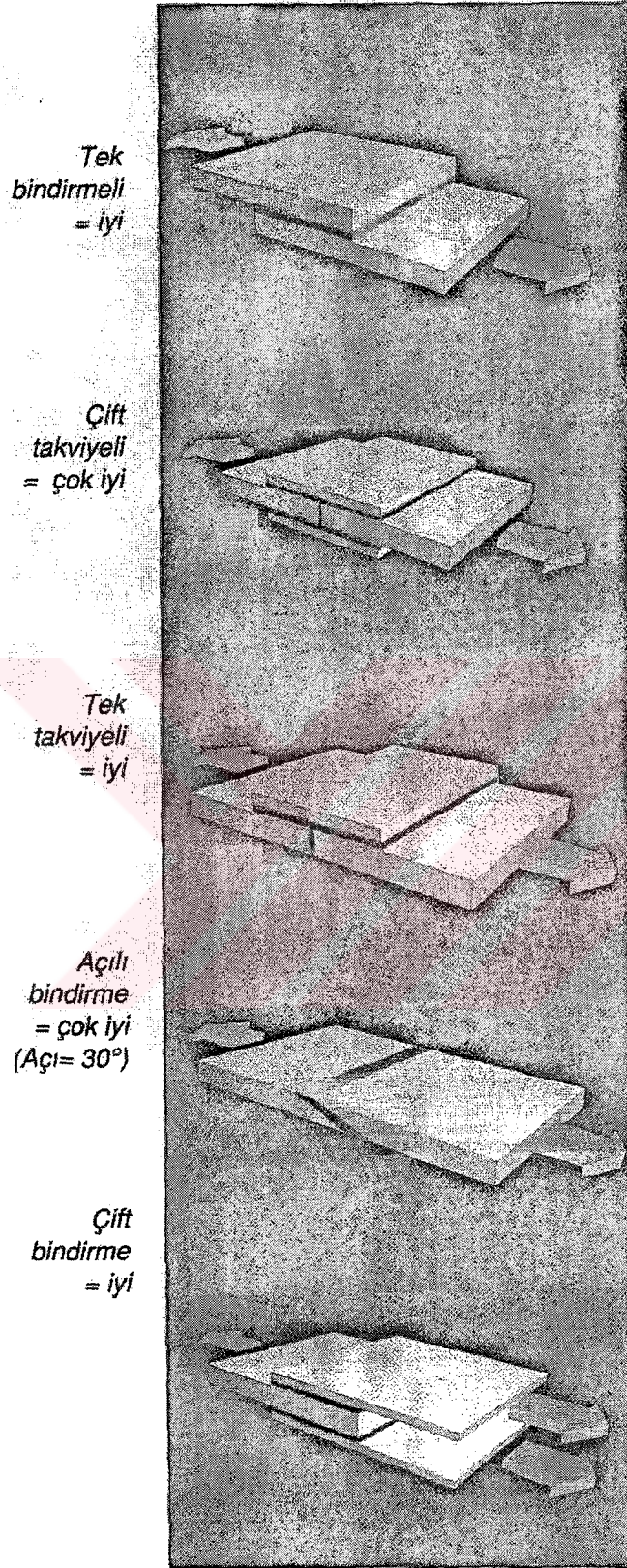
Şekil 2.5 Soyulma yükleri ve tasarım önlemleriyle dönüştürülmeleri [22].



Şekil 2.6 Yapıştırılmış bağlantılarda tercih edilen ve edilmeyen yükler ve yapışma yüzeyi ne kadar genişse o kadar iyi olduğunun gösterimi [22].

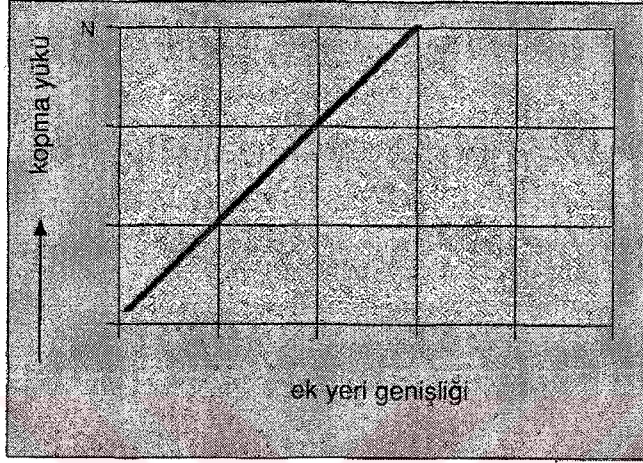
Üst üste binen ek yerlerinin optimize edilmesinde şunlardan yararlanılabilir;

- Eksantrik kuvvetlerden kaçının: Üst üste binen bir ek yerinin düzgün kesme gerilim dağılımı göstermemesi için birçok neden vardır. Sebeplerden biri, böyle bir ek yerine etki eden eksantrik kuvvetlerin eğilme momentine yol açmasıdır. Bu eğilme momenti, özellikle yapışma alanının kenarlarında ilave çekme gerilimleri doğurur. Şekil 2.7'de görüldüğü gibi, yapışma çizgisine etki eden eksantrik kuvvetlerin yol açtığı eğilme momentinin olumsuz etkilerini en aza indirmenin çeşitli yolları vardır.



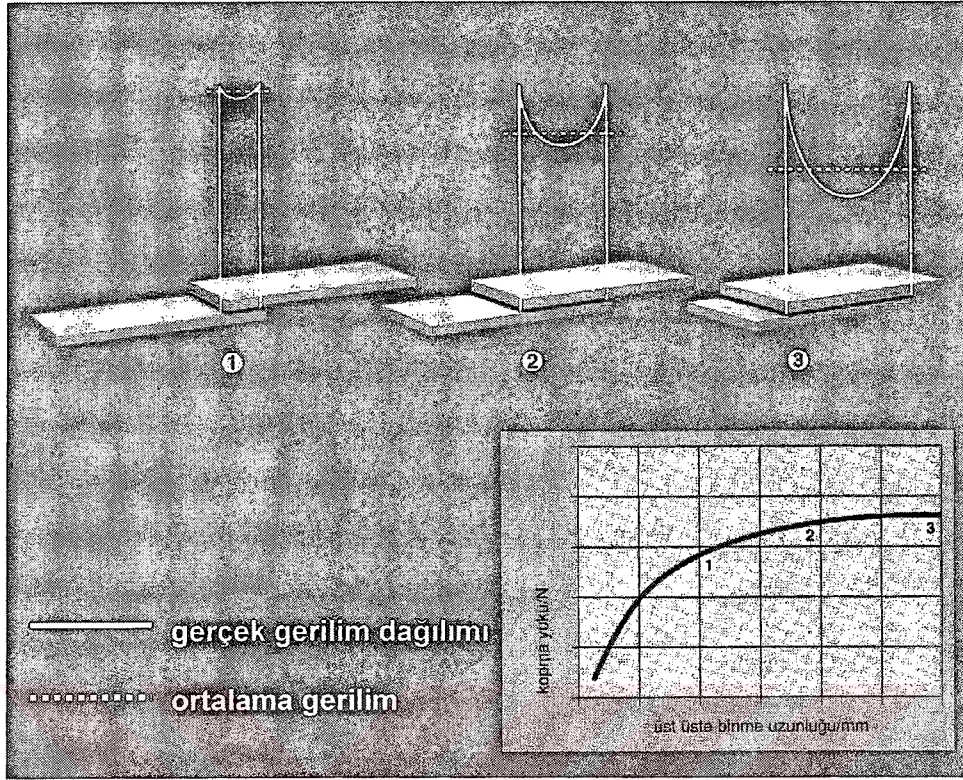
Şekil 2.7 Eksantrik kuvvetlerden kaynaklanan problemlerin muhtelif çözümleri [22].

- Ek yeri enini artırın: Ek yeri enini artırmakla kesme gerilim dağılımı değişmez. Yani bindirmeli ek yerlerinin kopma yükü, ek yeri eniyle aynı oranda artar. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi, ek yeri eni iki katına çıktığında kopma yükü de iki kat artmaktadır.



Şekil 2.8 Kopma yükü, ek yeri genişliği ile aynı oranda artışı [22].

- Ek yeri bindirmesini optimize edin: Ek yeri bindirmesinin optimize edilmesi yalnızca ek yeri uzunluğunun olabildiğince uzatılması anlamına gelmez, çünkü kopma yükü ek yeri uzunluğu veya yapışma alanıyla orantılı olarak artmaz. Kesme gerilim dağılımı eğrisinden, yapışma bölgesi kenarlarının ortaya oranla daha yüksek gerilime dayanması gerektiğini görüyoruz. Üst üste binme uzunluğu çok artırılsa, kopma yükünde az veya ihmal edilebilir miktarda değişiklik olabilir. Bunun nedeni ek yerinin, yapıştırıcının kohezyon (iç yapışma) ve adhezyon (yüzeyle tutunma) kuvvetlerinin aşıldığı, bindirmenin kenarındaki gerilim tepelerinde kopmaya başlamasıdır. Şekil 2.9'da, kesme gerilimi ortalama değerinin, üst üste binme uzunluğu arttıkça düştüğü, bunun neticesinde kopma yükünde orantısız bir artış meydana geldiği görülüyor. Eğer yükü taşımak için yapışma yüzeyini artırmak gerekiyorsa, üst üste binmedense ek yeri enini artırmak daha iyidir.

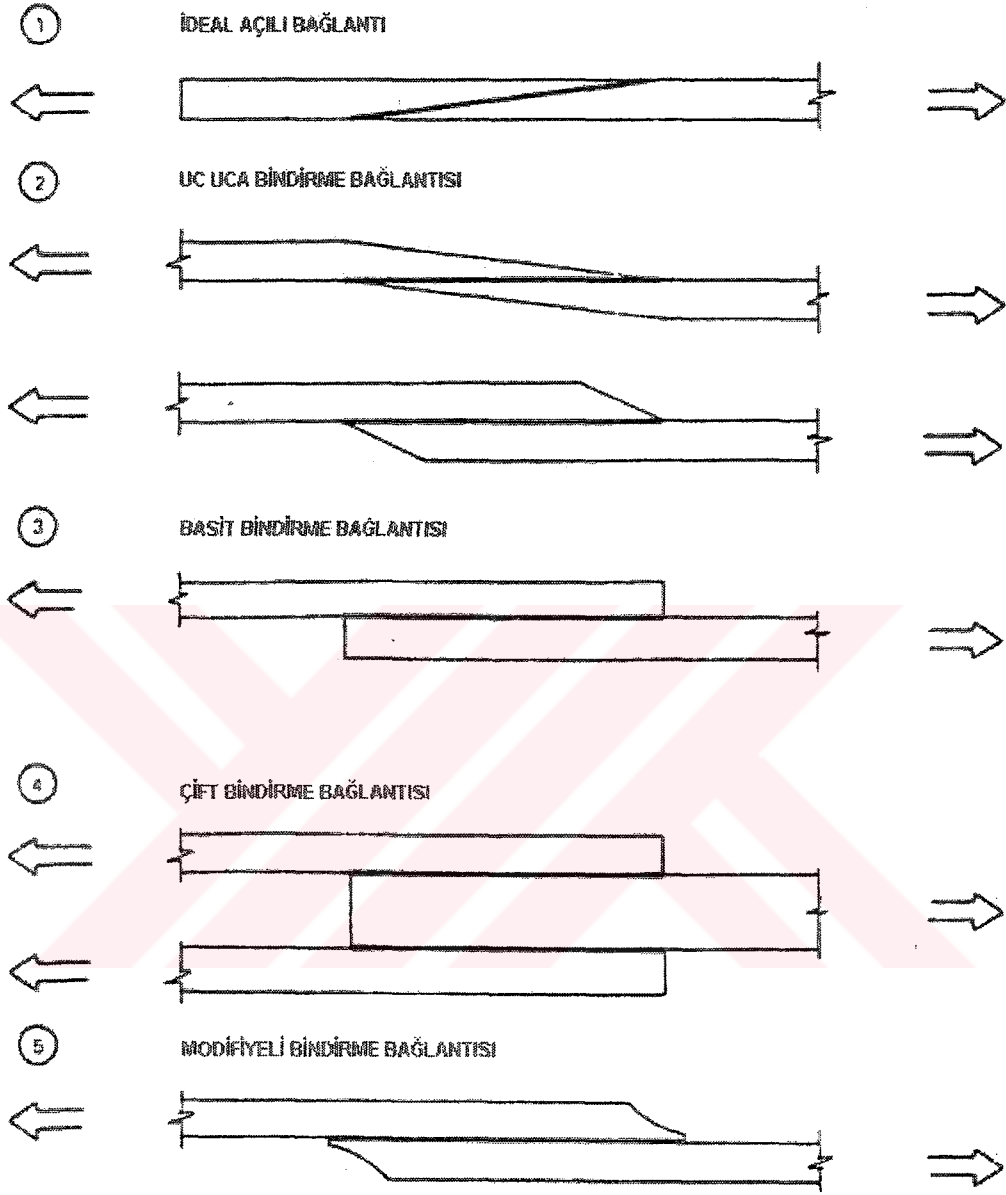


Şekil 2.9 Üst üste binme uzunluğunun artması ile, kopma yükünde meydana gelen artışın orantılı olmayışı [22].

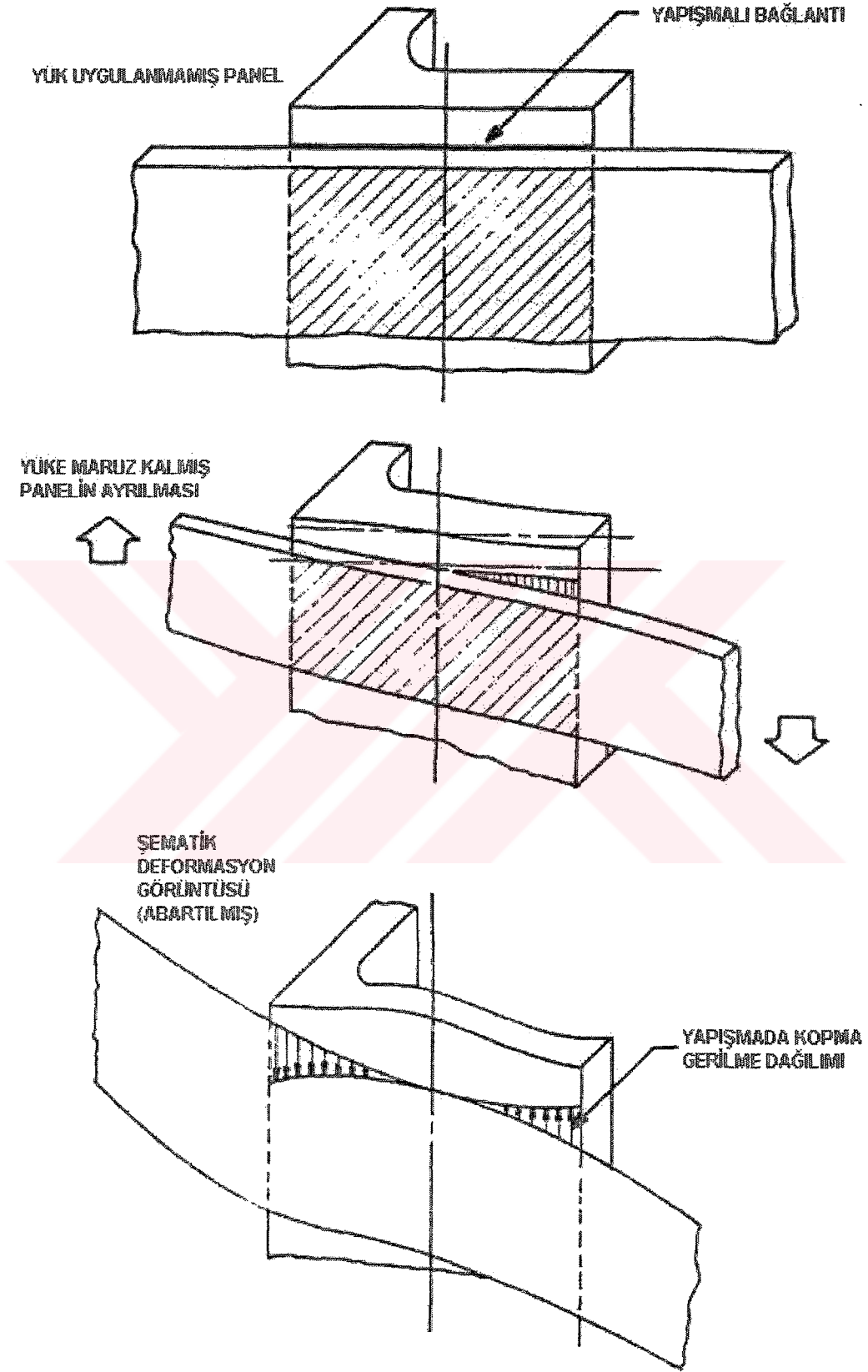
- Yapışma çizgisi kalınlığı: Daha kalın bir yapışma çizgisi ek yerini kesme gerilimine daha dayanıklı hale getirir. İlave kalınlık, kesme uzamasını daha geniş bir boyuta yayar ve yapıştırıcı üzerindeki birim deformasyonu azaltır, ve dolayısıyla gerilim yoğunlaşmaları azalır. Bu, daha düşük esneklik modülüne sahip bir yapıştırıcı kullanmaya benzer; her iki durumda da daha dayanıklı bir ek yeri elde edilir [22].

2.3.2.3. Bağlantı Geometrisi

Yapıların yapıştırmalı birleştirilmesinde sık kullanılan temel geometriler; açılı bindirme, uç uca bindirme, basit bindirme, çift bindirme ve modifiyeli bindirmelerdir. Şekil 2.10'da bu bindirme geometrilerin şematik formu gösterilmektedir. Bu çeşitli bağlantı formları, geometrilerinden dolayı ve yüklemelerin yönlerine göre farklı davranışlar gösterebilir. Şekil 2.11'de yüklemelere maruz kalmış tipik bir uçak panelinin ayrılma davranışı gösterilmektedir.

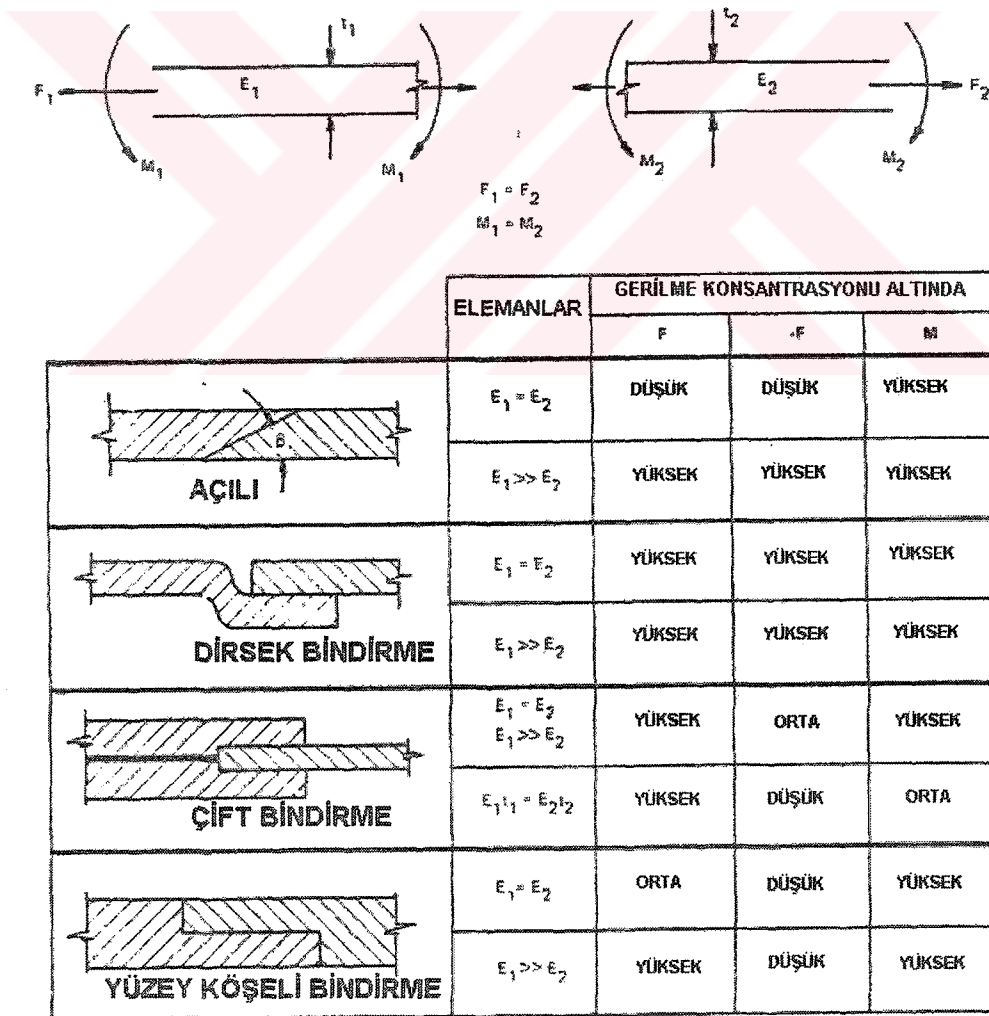


Şekil 2.10 Çeşitli yapıştırırmalı bağlantı geometrileri [23].

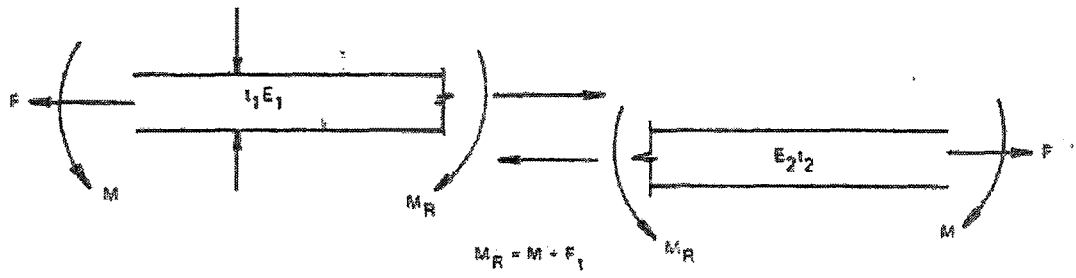


Şekil 2.11 Yapıştırma uçak panelinin ayrılma davranışı [23].

Baskı yüklerine karşı dayanıklı olan bir bağlantı, çekme veya bükme karşı zayıf olabilir. Şekil 2.12, 2.13 ve 2.14’de yapıştırma ile birleştirmiş iki elemanın belirli bir yük altında gerilme dağılımları gösterilmiştir. Bu gerilim dağılımı bize sadece şematik olarak bir fikir verir. Spesifik her bir bağlantı için mekanik testler uygulanması gerekir. Farklı tasarıma sahip yapıların gerilim dağılımı farklı olabilir. Şekil 2.15’de yük altında kıvrım ve “t” bağlantılarının davranışları gösterilmektedir. Şekil 2.16’da tipik bir yapıştırırmalı kompozit yapının kopma-gerilme dağılımı gösterilmektedir. Şekil 2.17’de basit bindirme için bindirme uzunluğu (L) arttıkça genişliğin yük taşıma kabiliyeti oldukça artar, fakat yapıştırıcı kopma gerilmesi psi (Kn/mm^2) düşer yada sabit kalır. Bindirme uzunluğu artmasıyla kopmaya karşı büyük direnç sürdürebilme yeteneğine sahip ve rijitlik ölçüsü düşük (elastiki) yapıştırıcılar, çeşitli yöntemlerle elde edilebilmektedirler.

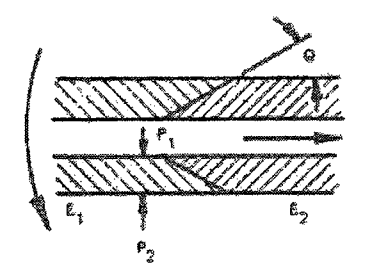
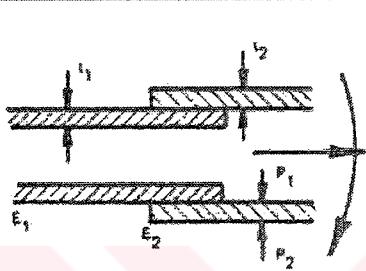
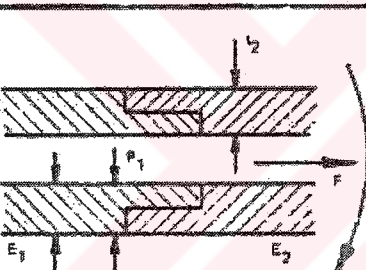
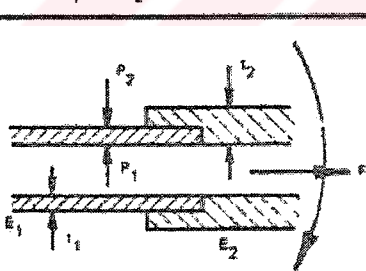


Şekil 2.12 Yük altında aynı çizgide düz bağlantıların davranışları [23].


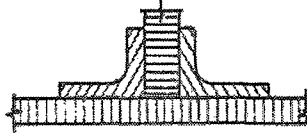

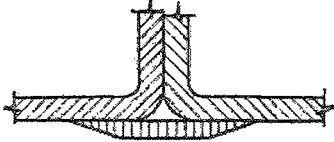

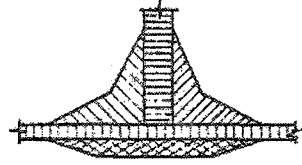
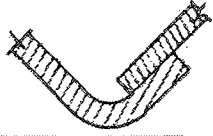
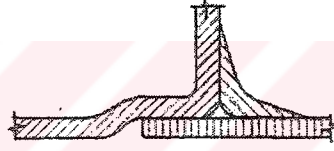



	ELEMENLER	GERİLME KONSANTRASYONU ALTINDA		
		F	-F	M
 BASİT BİNDİRME	$E_1 = E_2$	YÜKSEK	YÜKSEK	YÜKSEK
	$E_1 > E_2$	YÜKSEK	YÜKSEK	YÜKSEK
 KONİK BİNDİRME	$E_1 = E_2$	YÜKSEK	YÜKSEK	YÜKSEK
	$E_1 > E_2$	ORTA	ORTA	YÜKSEK
 ÇİFT KONİK BİNDİRME	$E_1 = E_2$	DÜŞÜK	DÜŞÜK	ORTA
	$E_1 > E_2$	ORTA	ORTA	YÜKSEK
 GÖMMELİ BİNDİRME	$E_1 = E_2$	YÜKSEK	DÜŞÜK	YÜKSEK
	$E_1 > E_2$	YÜKSEK	DÜŞÜK	YÜKSEK
 KONİK GÖMMELİ BİNDİRME	$E_1 = E_2$	ORTA	DÜŞÜK	YÜKSEK
	$E_1 > E_2$	ORTA	DÜŞÜK	YÜKSEK

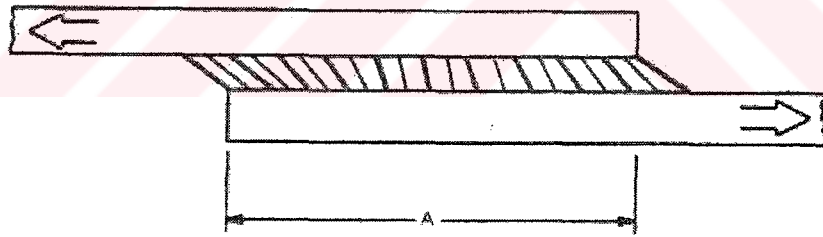
Şekil 2.13 Yük altında ofset bindirme bağlantıların davranışları [23].

	ELEMANLARIN RÜJİTLİĞİ	GERİLİM KONSANTRASYONU				
		F	-F	$P_1 > P_2$	$P_2 < P_1$	M
	$E_1 = E_2$	DÜŞÜK	DÜŞÜK	DÜŞÜK	DÜŞÜK	DÜŞÜK
	$E_1 > E_2$	YÜKSEK	YÜKSEK	DÜŞÜK	YÜKSEK	YÜKSEK
	$E_1 < E_2$	YÜKSEK	YÜKSEK	YÜKSEK	DÜŞÜK	YÜKSEK
	$\frac{E_1 l_1}{d_1} = \frac{E_2 l_2}{d_2}$	YÜKSEK	YÜKSEK	DÜŞÜK	DÜŞÜK	YÜKSEK
	$\frac{E_1 l_1}{d_1} > \frac{E_2 l_2}{d_2}$	YÜKSEK	YÜKSEK	YÜKSEK	DÜŞÜK	YÜKSEK
	$\frac{E_1 l_1}{d_1} < \frac{E_2 l_2}{d_2}$	YÜKSEK	YÜKSEK	DÜŞÜK	YÜKSEK	YÜKSEK
	$\frac{E_1 l_1}{d_1} = \frac{E_2 l_2}{d_2}$	YÜKSEK	YÜKSEK	DÜŞÜK	DÜŞÜK	DÜŞÜK
	$\frac{E_1 l_1}{d_1} > \frac{E_2 l_2}{d_2}$	YÜKSEK	DÜŞÜK	YÜKSEK	DÜŞÜK	YÜKSEK
	$\frac{E_1 l_1}{d_1} < \frac{E_2 l_2}{d_2}$	YÜKSEK	DÜŞÜK	DÜŞÜK	YÜKSEK	YÜKSEK
	$\frac{E_1 l_1}{d_1} = \frac{E_2 l_2}{d_2}$	YÜKSEK	DÜŞÜK	DÜŞÜK	DÜŞÜK	YÜKSEK
	$\frac{E_1 l_1}{d_1} > \frac{E_2 l_2}{d_2}$	YÜKSEK	DÜŞÜK	YÜKSEK	DÜŞÜK	YÜKSEK
	$\frac{E_1 l_1}{d_1} < \frac{E_2 l_2}{d_2}$	YÜKSEK	DÜŞÜK	DÜŞÜK	DÜŞÜK	YÜKSEK

Şekil 2.14 Yük altında borulu bağlantıların davranışları [23].

KÖŞE VE KIVRIMLAR		"T" ŞEKİLLERİ	
GEMOETRİLER	YETENEK	GEMOETRİLER	YETENEK
	KÖTÜ		PAHSIZ İYİ PAHLI ÇOK İYİ
	İYİ		BANDASIZ KÖTÜ BANDAJLI ÇOK İYİ
	ÇOK İYİ		BANDASIZ KÖTÜ BANDAJLI ÇOK İYİ
	KÖTÜ		BANDASIZ İYİ BANDAJLI ÇOK İYİ
	ÇOK İYİ		

Şekil 2.15 Yük altında kıvrım ve "t" bağlantıların davranışları [23].

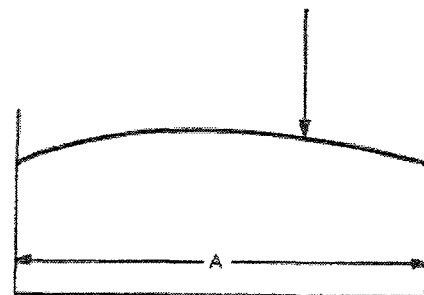
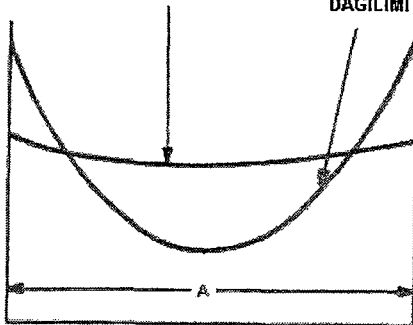


ESNEK YAPIŞTIRICI

(ELASTİK OLMAYAN YÜKSEK KOPMA DÜŞÜK MODÜLLÜ YAPIŞTIRICI)

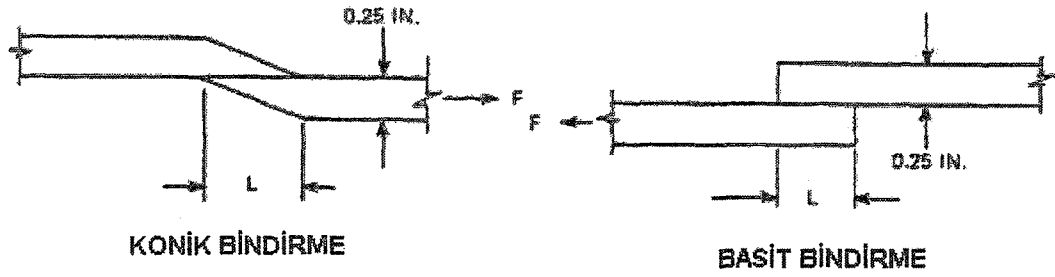
NORMAL YAPIŞTIRICININ STANDART KOPMA-GERİLME DAĞILIMI

OPTİMUM KOPMA-GERİLME DAĞILIMI



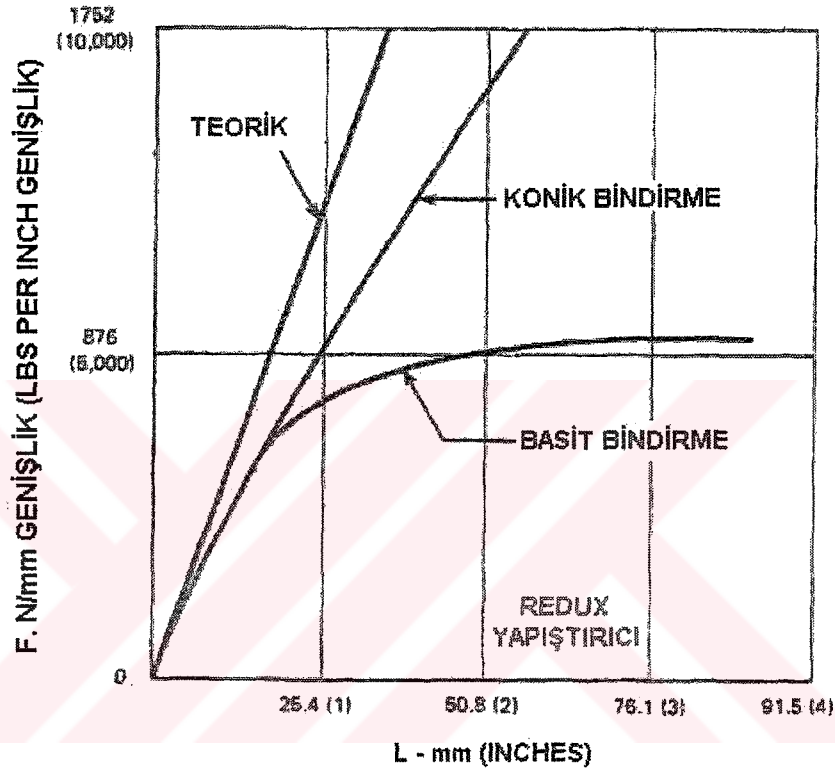
EĞRİ ALTINDAKİ ALAN:
YAPIŞTIRICININ YÜK TAŞIMA KAPASİTESİ

Şekil 2.16 Yapıştırılmalı bindirmeli bağlantılarda kopma-gerilme modeli



KONİK BİNDİRME

BASİT BİNDİRME



Şekil 2.17 Basit bindirme bağlantılarında yapıştırma uzunluklarının etkisi [23].

2.3.3. Yapıştırmada Yüzey Ön-İşlemleri

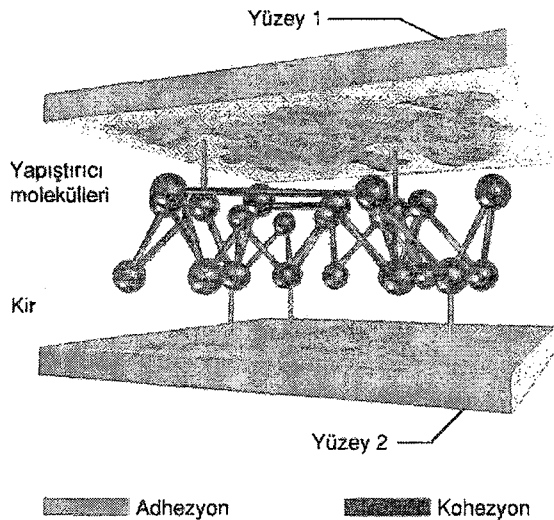
Yapıştırma bağlantılar, yapıştırıcı ve yüzeyler arasında tam temas olmamasından olumsuz etkilenirler. Başarılı bir yapıştırma için tasarımda, uygun bir ön-işlem ve uygun yapıştırıcı belirlenmelidir. Basit mekanik temizleme ve kimyasal yağ almadan, karmaşık fiziksel yüzey hazırlamaya kadar birçok ön- işlem yöntemi mevcuttur.

Yüzey hazırlama, yapıştırıcı ile birleştirme işleminde en kritik aşamadır. Tatmin edici bir yüzey hazırlığı yapılmadığı takdirde, bağlantı yapıştırıcı-yüzey temas seviyesinde ve önceden tahmin edilemez biçimde 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 bağlantının ilk kuvveti için değil, daha da önemlisi, uzun vadedeki dayanımı için de çok önemlidir. Yüzey hazırlama yöntemleri en azından, yağı, gresi ve yüzeye tutunma kuvveti yapıştırıcınınkinden az olabilecek kaplamaları temizlemelidir. Birçok plastik ve metal malzemede basit zımparalama veya solventle temizleme kullanılır. Ancak bazı metallerde, iyi bir yapışma veya uzun vadeli ortam şartlarına dayanım elde etmek için bu basit yüzey hazırlama yöntemleri yeterli olmayabilir [22].

En iyi yapışma için iyi bir ön-işlem gereklidir. Yapışma kuvveti büyük ölçüde yapıştırılacak yüzeyler ile yapıştırıcı arasındaki adhezyon kuvveti tarafından belirlenir. Yüzeyler iyi temizlendiği ve ön-işlem yapıldığı oranda yapışma kuvvetinin artacağı iyi anlaşılmalıdır. Şekil 2.18'de yapıştırılacak yüzeylerdeki kirlerin adhezyonu düşürdüğü görülmektedir. Adhezyon kuvveti şu şekilde artırılabilir:

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



Şekil 2.18 Yapıştırılacak yüzeylerdeki kirlerin adhezyonu düşürmesi [22].

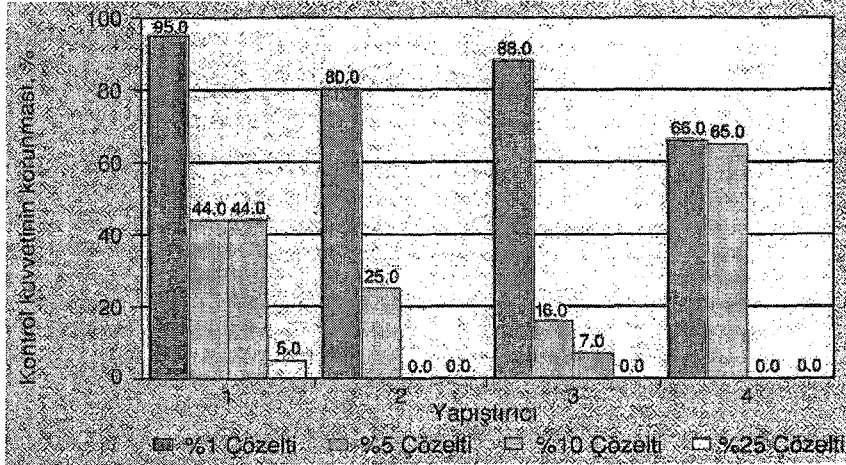
2.3.3.1. Yüzeylerin Yağdan Arındırılması

Mümkün olan en iyi yapışmayı elde etmek için yapıştırılacak yüzeylerden yağ, gres, toz ve diğer kalıntıların tamamen temizlenmesi gerekir. Kalıntı bırakmadan buharlaşan solventler buna uygundur. En önemli solventler ve temizleme kapasiteleri Tablo 2.3’de görülebilir.

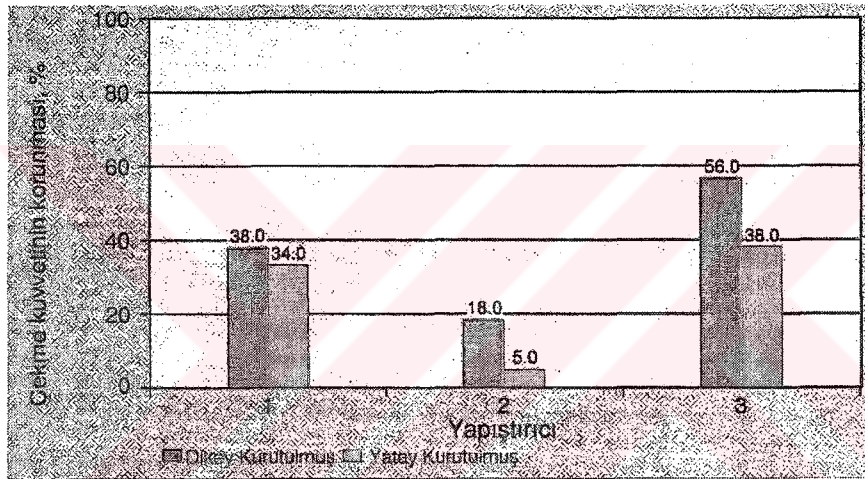
Tablo 2.3 Solventler ve özellikleri [22].

Solvent	Temizleme Kapasitesi	Yanıcı veya parlayıcı
Hidrokarbonlar (ör: izoparafinler)	İyi	Evet
Ketonlar (ör: aseton)	İyi	Evet
Alkoller (ör: izopropanol)	Orta	Evet
Su bazlı	İyi	Hayır

Alkalin veya asit bazlı sulu temizleyiciler her zaman korozyon önleyici içerirler. Bunlar eğer temizleme sonrası yüzeyde kalırsa, yapışma kuvvetini azaltabilir veya yapıştırıcının kürlenmesini engelleyebilir. Eğer bu tür temizlik sistemleri kullanılacaksa, mutlaka önceden testler yapılmalıdır. Her durumda tüm yüzeyler iyice durulanmalı veya silinmelidir. Şekil 2.19’da yıkama çözeltisinde konsantrasyonun yapıştırıcının son kuvvetine etkisi ve Şekil 2.20’de yıkama çözeltisinde kurutma pozisyonunun (dikey veya yatay) yapıştırıcının son kuvvetine etkisi görülmektedir.



Şekil 2.19 Yıkama çözeltisi: Konsantrasyonun yapıştırıcının son kuvvetine etkisi [22].



Şekil 2.20 Yıkama çözeltisi: Kurutma pozisyonunun (dikey veya yatay) yapıştırıcının son kuvvetine etkisi [22].

Eğer yüksek miktarlı imalatlar için özel yağ alma banyoları kullanılıyorsa, temizlik banyosunun kirlenmemesi için çok kirli yüzeylere ön-temizlik yapılması tavsiye edilir. Buharlı yağ alma sistemleri çok sık kullanılır. Bu yöntemde solvent kaynama noktasına kadar ısıtılır ve buharlaştırılır. Soğuk parçalar buharlaşmış temizleyici ile temas ettiğinde, temizleyici yüzeyler üzerinde yoğunlaşır. Oluşan sıvı yüzeylerde kalmış kir ve gres parçacıklarını temizler. Yağ alma, çoğunlukla tamamen kapalı makinalarda, yağ alma solventleri ile yapılır. Birçok uygulamada yüzeylere hızlı etkili bir temizleyici ile ön-işlem yapılması yeterlidir. Bu şekilde yüzeyler yağ, gres, kir ve diğer kalıntılardan temizlenir ve yapıştırma için hazır olur. Solventler ile temizlik yapılırken daha iyi netice almak için , yüzeylerden keri ayıran kimyasal

işlem mekanik olarak ta desteklenebilir (bir temizlik bezi ile ovalamak, fırçalamak) [22].

2.3.3.2. Mekanik Ön-İşlem

Kirli metal yüzeyler çoğunlukla bir oksit tabakasıyla kaplıdır ve bu tabaka yağ alma ile temizlenemez. Böyle durumlarda, zımparalama, taşlama veya tel fırça ile fırçalama gibi mekanik ön-işlem gereklidir.

Zımparalama geniş yüzeyleri temizlemek için iyi bir yöntemdir. Çok kalın zımpara kullanmamak kaydıyla, bu yöntemle elde edilen yüzey pürüzlüğü çok iyi yapıştırma sağlar. Taşlama ile de aynı şekilde iyi bir yüzey pürüzlüğü elde edilir. Bu yöntemde yüzey pürüzlüğünü iyi seçmek önemlidir (ör: alüminyum için 300 ila 600, çelik için 100). Taşlama, zımparalama veya fırçalama sonrası, tüm kalıntıların temizlenmesi için parçalara yağ alma işlemi uygulanmalıdır. Çok kirli parçalar mekanik işlem öncesi de yağdan arındırılmalıdır ki, kullanılan zımpara veya taş yüzeydeki kirleri bulaştırmasın. Pratikte mekanik ön-işlem metodlarının kullanılması çok kolaydır ve genellikle yeterli yapışma kuvveti sağlarlar.

Eğer plastik veya lastik parçalar yapıştırılacak ise, yüzey tabakası, kalıp ayırıcı ve vulkanizasyon tabakası gibi yabancı maddeler öncelikle temizlenmelidir. Plastikler için alışımlı döküm veya alüminyum oksit aşındırıcılar iyi sonuç vermektedir. Lastik yüzeyler solventlerle veya taşlanarak temizlenebilir.

2.3.3.3. Aşındırma

Yüzeyleri aşındırmakta nispeten aşındırıcı olan kimyasallar kullanılır. Yüzeğe bağlı olarak çok asidik veya kuvvetli alkalin ürünler tercih edilir. Aşındırma sonucunda, malzeme yüzeyine reaktif gruplar eklenmesi ve yapıştırıcının mekanik olarak kenetlenebileceği gözenekler açılması nedeniyle yüzeyde değişim meydana gelir. Bu işlemin neticesi malzemedeki malzemeye değişebilir. Aşındırıcı çözeltilerin uygulama ve atık yönünden giderek pahalı olması nedeniyle bu yöntemin sanayide kullanımını sınırlıdır [22].

2.3.3.4. Yüzey İyonizasyon Ön-İşlemi

Yüzey iyonizasyon ön-ışlemi, ıslak kimyasal ön-ışleme benzer biçimde yüzeylerin polaritesini ve enerjisini değiştirir. Malzemeye, parçanın şekline, imalat akışına ve parça adedine bağlı olarak Tablo 2.4’de yer alan işlemler uygulanır.

Tablo 2.4 Malzemelerin uygulanabilir ön-ışlem yöntemleri [22].

Malzeme	Ön-İşlem Yöntemi					
	Yağ alma	Mekanik aşındırma	Aşındırma	Primer (yapıştırıcıya göre)	Korona	Düşük basınç plazma
Metaller	xxx	xxx	x	x		x
Cam	xxx	x	x	x	x	x
Seramikler	xxx		x	x	x	x
Plastikler	xxx	xxx	x	x	xxx	xxx
Lastik	xxx	x		x	x	x
Anşap	x	xxx		x		x

xxx = tercih edilen yöntem

x = alternatif veya ilave yöntem

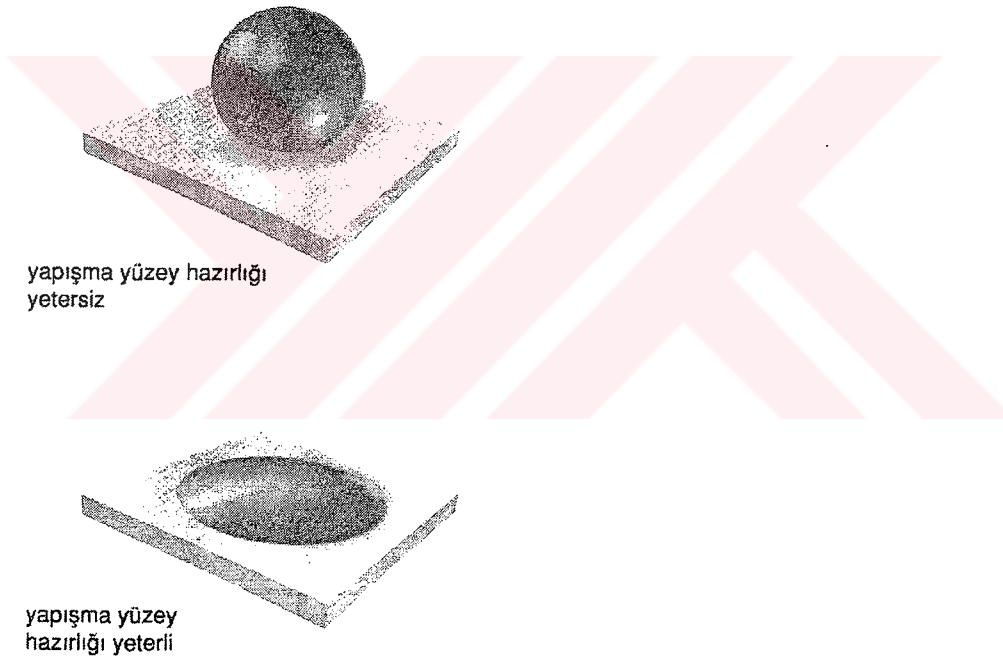
2.3.3.5. Primerler

Primerler genellikle solvent içerisinde seyreltilmiş reaktif kimyasallardan oluşur. Primer, malzeme yüzeyine fırça ile sürülerek veya spreyci halinde sıkılarak kullanılır. Taşıyıcı solventin uçması beklenir, geride aktif kimyasallar kalır. Primer çeşidine bağlı olarak siyanoakrilatlar için poliolefin primerleri gibi yüzey anında yapıştırma işleminde hazır hale gelebilir. Yüzey primerleri genellikle, yüzey ile yapıştırıcı arasında kimyasal köprü oluşturarak yapışabilme özelliğini artırır. Genel olarak bir primerdeki reaktif maddeler çok fonksiyonludur, bir dizi reaktif grup yüzey ile reaksiyona girerken ilave gruplar yapıştırıcı ile uyumu sağlar.

2.3.3.6. Islatılabilirlik Testi

Yüzey hazırlıkları "su kopma testi" ile değerlendirilebilir. Şekil 2.21’de yüzey hazırlığı, "su kopma" testi veya belirli yüzey gerilim sınırları ile test edilmesi

gösterilmektedir. Temizlenmiş yüzeylere saf su damlaları bırakılır. Yetersiz temizlenmiş yüzeyde damlanın küresel şekli büyük ölçüde korunur, ve yüzeyin tekrar temizlenmesi gerektiğini gösterir. Eğer su yüzeyde akıyorsa ıslatma başarılıdır; yüzey yeterli temizlenmiştir. Bu yöntem alüminyum ve magnezyum üzerindeki anodik kaplamalar için uygun değildir. Su kopma testinin avantajı, "test sıvısı" olan suyun kolay bulunabilmesidir. Fakat avantajı bununla sınırlı kalır, çünkü suyun sertliği yüzey gerilimini etkiler. Bazı durumlarda, damıtılmış su bile su kopma testinde güvenilir sonuç vermez. Bu nedenle kritik uygulamalarda, belirli yüzey gerilimlerine sahip yüzey gerilim sıvıları kullanılmalıdır. Dikkat edilmesi gereken nokta, bu testin yalnızca ıslatılabilirliği gösterdiği, yapıştırılma kabiliyetini ölçmediğidir [22].



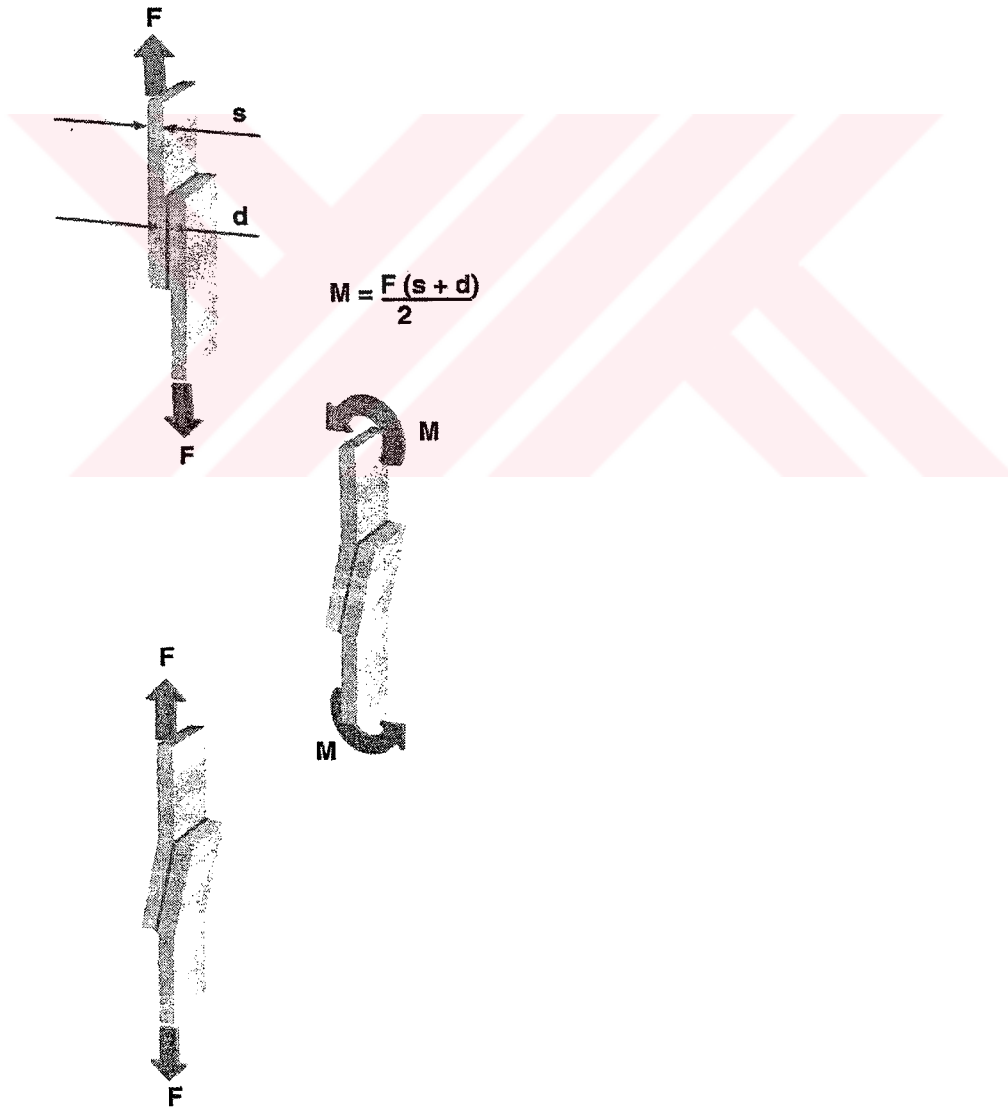
Şekil 2.21 Yüzey hazırlığı, "su kopma" testi veya belirli yüzey gerilim sıvıları ile test edilmesi [22].

2.3.4. Yapıştırıcı Davranışlar

2.3.4.1. Yükler ve Neden Oldukları Gerilimler

Bir yapıştırıcı birleştirmede, bağlantıya etki eden yükler farklı türde gerilimlere neden olur. Gerilimler genel olarak N/mm^2 cinsinden ifade edilir. Yalnızca çekme veya sıkıştırma yüklerinde, yapışma çizgisinde gerilim dağılımı düzgündür.

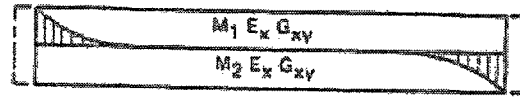
Dolayısıyla yapışma çizgisinin her noktası aynı yükü taşır ve gerilimi hesaplamak için etki eden kuvvet yapışma alanına bölünür. Gerçek hayatta, yalnızca çekme ve sıkıştırma yükleri çok enderdir ve daha çok kesme, yarıлма ve soyulma yükleriyle karşılaşılır. Ek yeri gerilim dağılımı, yani gerilimlerin yapışma çizgisindeki konumu değişkendir ve hesaplaması daha zordur. Kesme gerilimleri, bazı noktalarda yoğunlaşmalar olacak şekilde yapışma yüzeyine dağılır. Yapışma alanının kenarları, orta bölgelere göre daha yüksek gerilime dayanmak zorundadır. Bir ek yerine yarıлма veya soyulma kuvveti uygulandığında, gerilimin çoğu bir kenarda yoğunlaşır. Şekil 2.22’de tek bindirme bağlantıda eksantrik kuvvetler ve bağlantının deformasyonu görülmektedir.



Şekil 2.22 Eksantrik kuvvetler nedeniyle tek bindirmeli bağlantının deformasyonu [22].

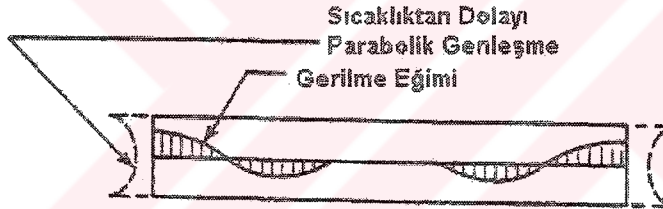
2.3.4.2. Isıl Gerilmeler

Kompozitlerin metalik malzemelerle birleştirilmesi yüksek sıcaklık derecesine sahip ortamlarda yapılır ve ısıl gerilmelerden dolayı elemanların lineer ısıl gerilmelerinin farklı katsayılarla ortaya çıktığı görülür. Çoğu kompozit elemanların geniş sıcaklık aralıklarında çalıştıkları için oluşabilecek ısıl gerilmeler dikkate alınmalıdır. Tipik gerilim eğimleri Şekil 2.23'de gösterilmektedir. Isıl gerilmeler genellikle matematiksel hesaplarla tahmin edilmektedirler [23].



DURUM

BİR ELEMAN DIĞER BİR ELEMANLA GENLEŞMİŞ



DURUM

HER İKİ ELEMAN GENLEŞMİŞ

$$\sigma \approx \frac{\Delta T_1 a_1 - \Delta T_2 a_2}{1/E_1 + 1/E_2}$$

BURADA:

τ° = ELEMANLARIN FARKLI SICAKLIK GENLEŞME ORANLARINDA ORTALAMA KOPMA GERİLMESİ

E_1, E_2 = ELEMANLARIN ELASTİSİTE MODÜLÜ

a_1, a_2 = ELEMANLARIN ISIL GENLEŞME KATSAYILARI

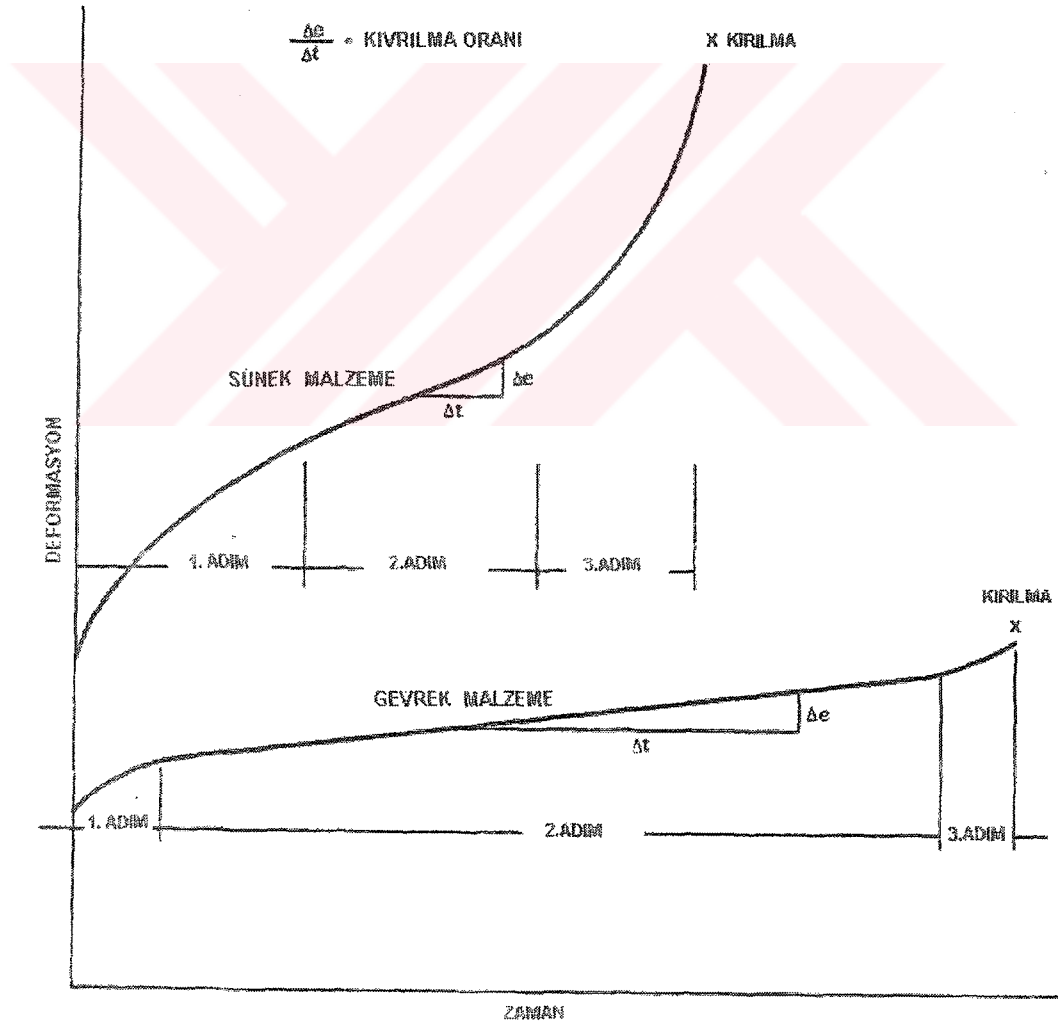
$\Delta T_1, \Delta T_2$ = PİŞİRME SICAKLIĞINDA ELEMANLARIN SICAKLIK FARKLARI

Şekil 2.23 Elemanların fark gösteren genişleme için gerilmeler [23].

2.3.4.3. Yapıştırırmada Nüfuziyet Davranışı

Yapıların birleştirilmesinden sonra farklı nedenlerden dolayı elemanlar arasındaki bağlantının zarar görebileceği veya kopabileceği hesaba katılmalıdır. Yapıştırırmalı birleştirmede nüfuziyet; yapı elemanlarının birleşmeye uygunluğu, yapıştırıcı tipi, gerilme seviyeleri, bağlantı konfigürasyonu, sıcaklık ve zaman faktörlerine bağlıdır.

Bağlantıda mevcut hareketler aşırıya gittiğinde üç adımda bağlantının elastik niteliği teması zorlar yada deformasyona (kopmaya) maruz bırakır. Bu üç adımda gerçekleşen kopma Şekil 2.24'de gösterilmiştir. Kopma eğimindeki birinci ve ikinci adımlar ilk ve sürekli deforma oranlarının uygun bağlantı tasarımını açıklamaktadır.



Şekil 2.24 Tipik nüfuziyet-kopma zaman eğrileri [23].

Yapıştırırmalı birleştirmelerdeki nüfuziyetin genelize edilmiş özellikleri şunlardır;

- i. Gevrek yapıştırıcılar (yüksek kayma modülüne sahip) sünek yapıştırıcılardan daha az nüfuziyet sağlar.
- ii. Çalışma sıcaklığı seviyesindeki %30 azalma nüfuziyet ve temas dayanıklılığını 500 kez daha artırır.
- iii. Yapıştırıcıların nüfuziyet oranı gerilme-kopma analizlerinin benzer üs kaidelerini takip eder (genellikle, çatlak oranı $Ae^{-Q/RT}$ e eşittir; A ve Q gerilim seviyesine ve matematiksel özelliklere bağlı sabitlerdir, R gaz sabiti ve T bağlatının sıcaklığıdır).

2.3.4.4. Bağlantının Yorulma Davranışı

Kompozitlerin yapıştırırmalı bağlantıda yorulmaya dayanma sınırları, genellikle yapıştırıcının dayanıklılığına ve etkisine bağlıdır. Simetrik yapıştırırmalı bağlantılar, simetrik olmayan bağlantılardan daha yüksek yorulma direnci oranına sahiptir (basit bindirme tipi gibi). Yapıştırırmalı bağlantılarda yorulma direncinin genel özellikleri şunlardır;

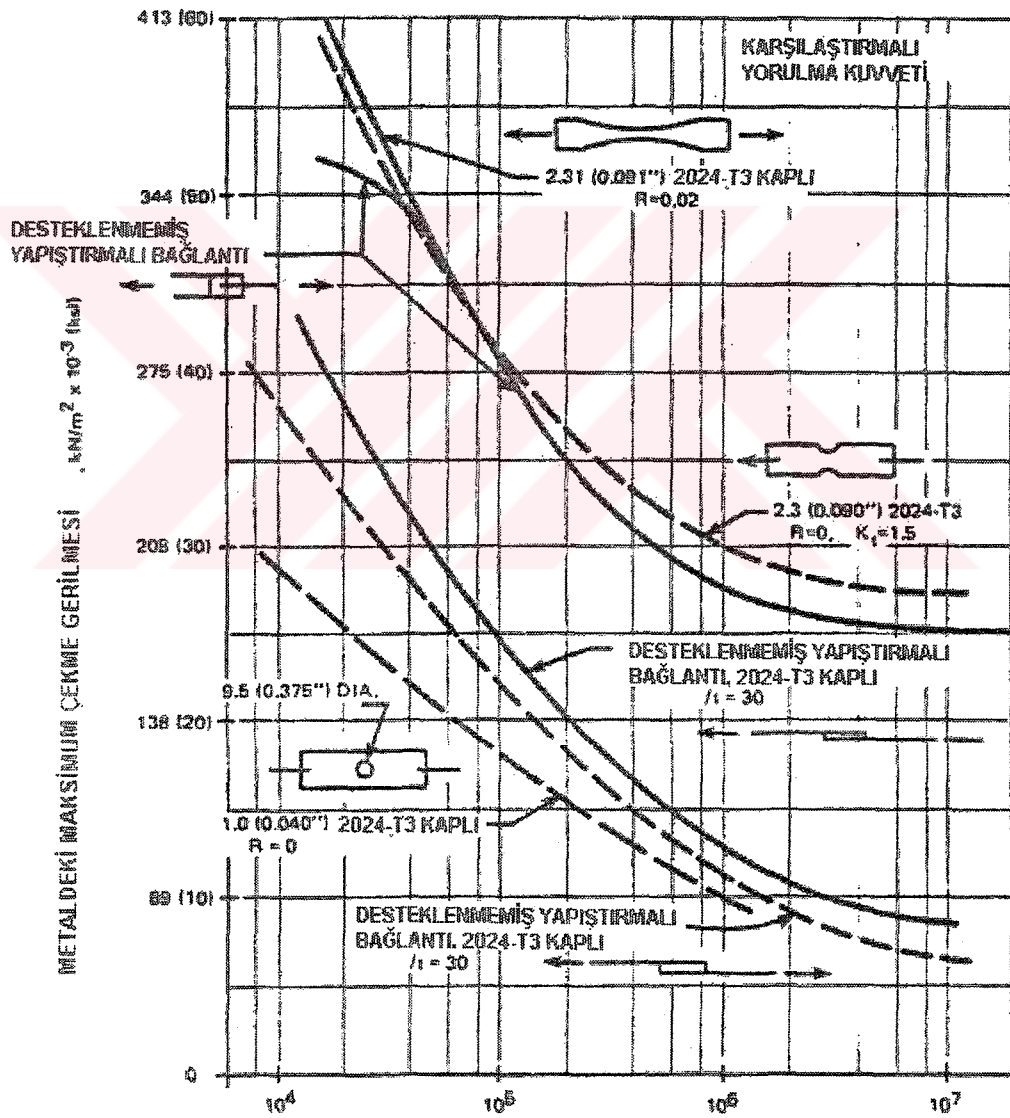
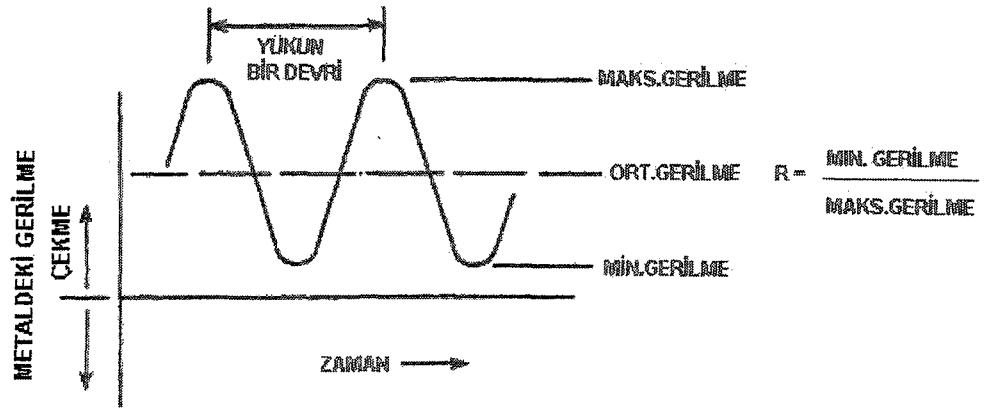
- i. Bindime derinliğindeki artış yorulma ömrünün artmasına neden olur.
- ii. Yapıştırıcının yorulma ömrü, birleştirilecek elemanların kalınlıklarının artması ile azda olsa azalır.
- iii. Yapıştırırmalı bağlantıların yorulmaya dayanma sınırı çeşitli sıcaklık testleri ile tespit edilir. Bu sıcaklık testleriyle bazı yapıştırıcılar bağlantı sıcaklığı arttığında büyük bir direnç gösterirken, bazı yapıştırıcılar ise sıcaklık arttığında daha düşük dayanma gücü gösterdikleri görülür [22].

Özel bir uygulama için yapıştırıcı seçimi yapılırken en önemli kriterlerden biri ortam şartlarıdır. Doğal olarak, ek yerine etki edecek kuvvet birinci derecede önemlidir ve yapıştırıcı tahmin edilen maksimum kuvvete (aşırı uzama olmaksızın), yorulma veya periyodik gerilimlere dayanmalıdır. Periyodik gerilmeler, özellikle yavaş olanlar, bir yapıştırıcı için sürekli gerilimlerden çok daha zararlıdır.

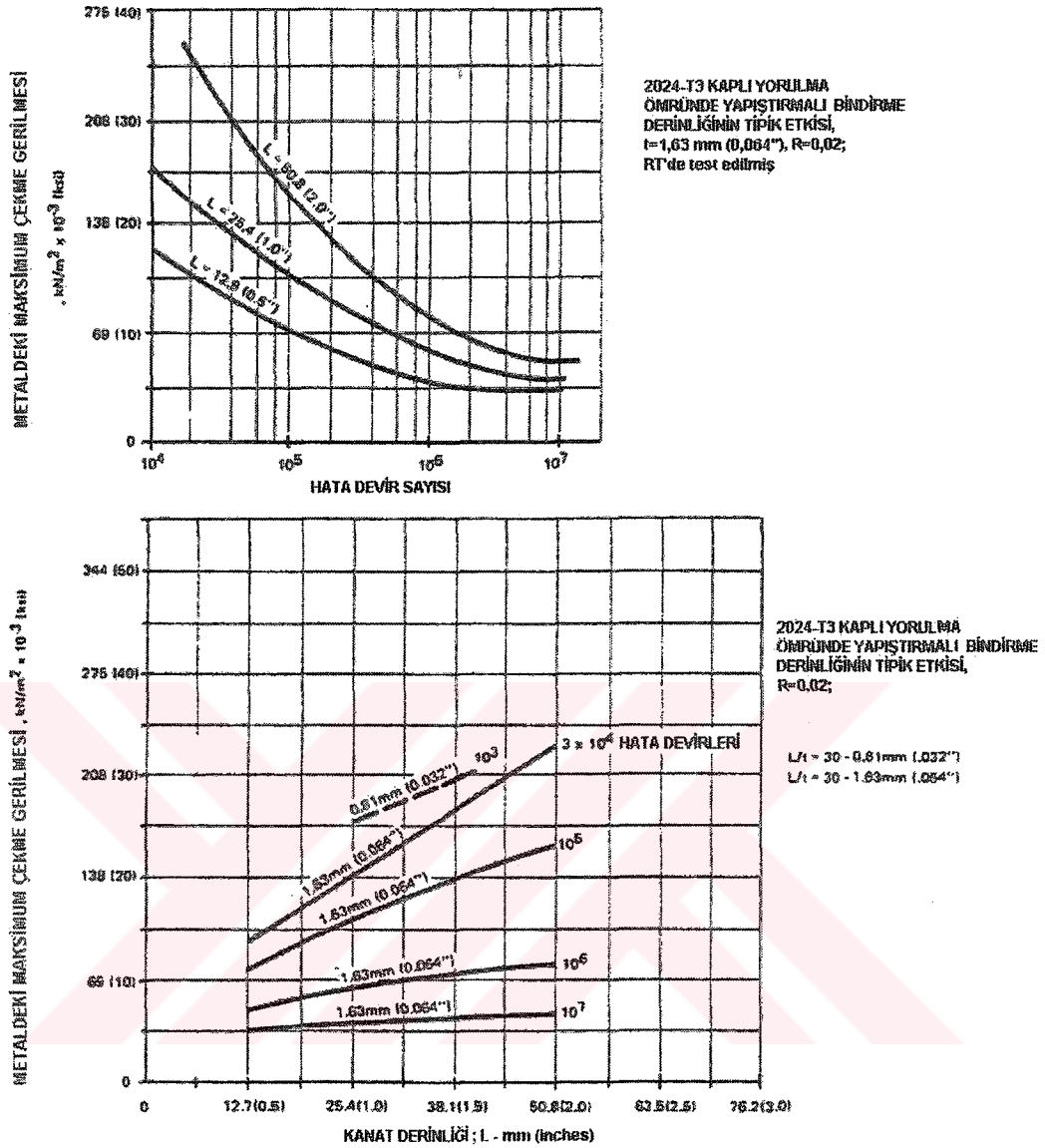
Özel bir uygulama için seçilen yapıştırıcı, yüklere ve gerilimlere yalnızca başlangıçta değil, yapıştırılan ek yerinin ömrü boyunca karşılaşacağı en güç ortam şartlarına da dayanmalıdır. Yapıştırılmış bağlantıların çoğu için ısı ve nem en zararlı çevre faktörleridir.

Çok farklı termal genleşme katsayılarına sahip farklı malzemeler arasında oluşan termal gerilmeler, örneğin yapıştırılmış bir plastik-metal bağlantısı, düşük modüllü (kırılgan olmayan) yapıştırıcılar gerektirir. Yapışmanın dayanıklılığını etkileyen diğer faktörler solventler ve ultraviyole ışığıdır. Her zaman bu faktörlere dayanıklı bir yapıştırıcı seçmek gerekir [23].

Yapıştırılmış kompozit yapının yorulmaya dayanım gücünün güvenli eğrilerinin belirlenmesi Şekil 2.25 ve 2.26'daki gibi açıklanabilir. Bu şekillerde 2024-T3 alüminyum alaşımlarının yorulma davranışı gösterilmiştir.

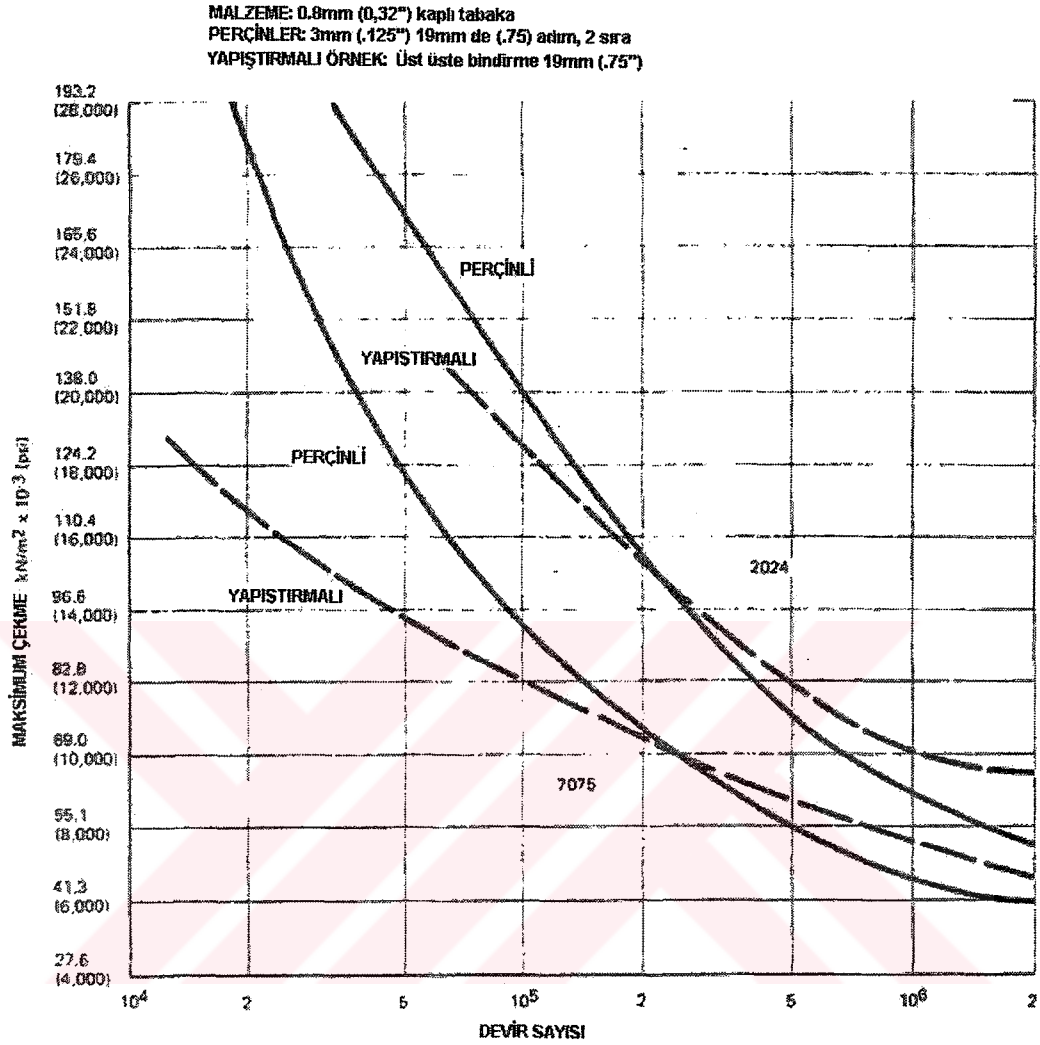


Şekil 2.25 Yapıştırma bağlantıların (örneğin metal ile) tipik yorulma mukavemeti [23].



Şekil 2.26 Yorulma özelliklerinde yapıştırma bindirme derinliğinin tipik etkisi (FM47 yapıştırıcı) [23].

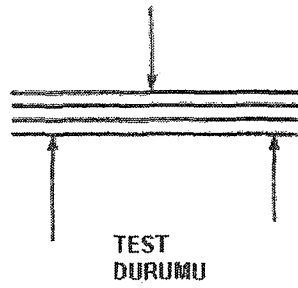
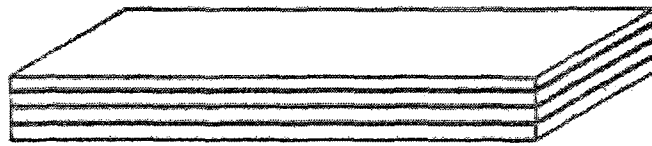
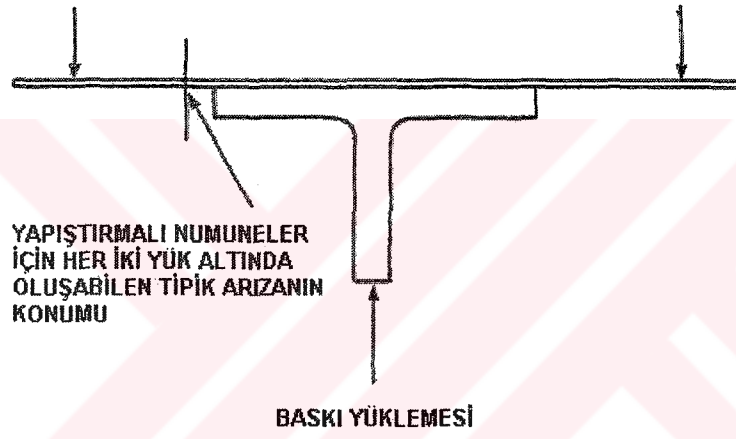
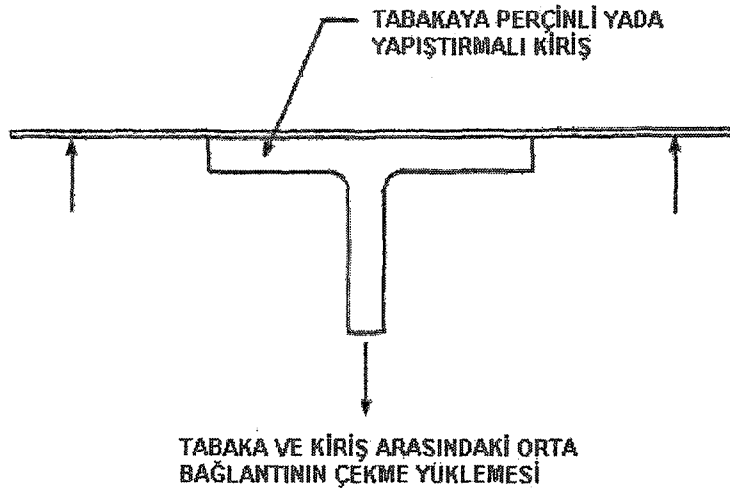
Perçinli metalik bir yapı ile cam elyafli epoksi kompozit yapının arasındaki basit bindirme tekniğinde yorulma eğilimlerinin pozisyonlarını şekiller ile karşılaştırmak mümkündür. Aynı zamanda yapıştırımlı bağlantıların boron/epoksi veya grafit/epoksi yapıları ile desteklenmesiyle metalik yapıların birleştirilmesinde yorulmaya karşı kayda değer bir direnç görülmektedir. Şekil 2.27'de hem 2024 hem de 7075 alüminyum alaşımlarının perçinli yapılara karşı yapıştırımlı yapıların yorulma eğilimleri özetlenmiştir.



Şekil 2.27 2024 ve 7075 alaşımlarının perçinli ve yapıştırırmalı bindirme bağlantıları için yorulma eğrileri [23].

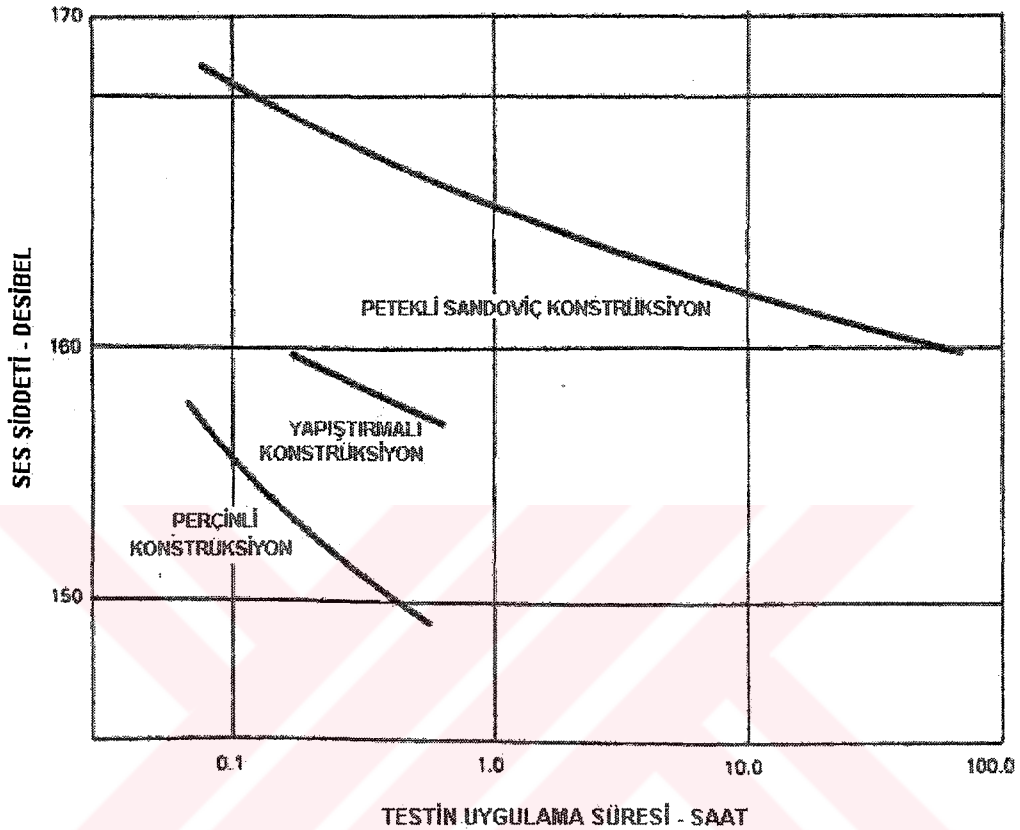
Perçinli yapılara karşı yapıştırırmalı tabakalı yapıların (düşük gerilme seviyelerinde) yükleme ve test durumları şekil 2.28'de gösterilmiştir.

- Gerilim yüklemesi eşit yorulma direnci için gösterilmiştir, fakat oluşan hataların hiçbiri yapıştırıcıda görülmemektedir.
- Baskılı yüklemelerde yapıştırırmalı yapıların %75 daha fazla ömrü olduğu bilinmektedir.



Şekil 2.28 Yorulma incelemesi için örneklerin kullanımı [23].

Yapıştırırmalı kompozit yapıların ayrı bir avantajı da sonik yorulmaya karşı dayanma gücünü arttırmasıdır. Sonik yorulma ömrü için zamana karşı beklenen tipik gelişme Şekil 2.29'da gösterilmiştir.



Şekil 2.29 Tipik ard kenar yapılarının sonik yorulma ömrü [23].

2.3.4.5. Bağlantıların Yaşlanması

Uzun vadeli yaşlanmanın etkileri yalnızca tasarım parametreleri değil birbirini etkileyen birçok parametrenin dikkatli incelenmesiyle tahmin edilebilir. Tüm yapıştırıcılar sürekli ısı ve zaman etkisi altında test edilebilir. Özel uygulamalarda yapıştırıcıların yaşlanma davranışı ile ilgili daha detaylı tespitler yapmak için orijinal malzemeler ile gerçek uygulama şartları simüle edilerek deneyler yapılabilir.

2.3.5. Yapıştırıcı Tipi

Kompozit yapıların yapıştırırmalı birleştirilmesinde kullanılan yapıştırıcı malzemeleri genellikle termoset reçinelerdir. Bağlantıların gerçekleşmesinin ardından bu reçineler yapıları üç boyutlu moleküler çapraz bağları ile tutar. Bu bağlantı çözülemez ve erimez. Termoset reçineler; polyesterler, epoksiler, poliamidler, fenollar ve silikonlar olmak üzere beş temel kimyasal sınıfa ayrılırlar. Ayrıca; çeşitli reçine karışımlarının her birinin önemli özelliklerini biraraya getirmek suretiyle sık sık bileşikler oluşturulmasına rağmen, havacılık kompozitlerinin birleşmesinde esasen epoksi tipi yapıştırıcılar kullanılır. Aynı zamanda termoset yapıştırıcıların kayma modülünü ayarlamak için, termoplastik reçine ilaveleri etkili olabilmektedirler. Hali hazırda yapıların yapıştırılmasında kullanılan termoplastikler arasında nitriller, poliamidler ve çeşitli vinil reçineler gösterilebilir. Bu yapıştırıcı malzemeleri ve karışımları sabit katı formlara uygulanabilir. Endüstride kullanılan yapıştırıcı malzemeleri genellikle FM300, F97, FM1000, FM123, FM73, AF110, AF111, AF40, HT424, Epon 934, Metlbolnd 329, BR92/A, EC1933 ve EC286 gibi ticari isimler ile kullanılır [23].

2.3.5.1. Termoset Yapıştırıcılar

Uçak endüstrisinde kullanılan yapıştırıcılar, yapıştırıcıların temel iki sınıfından birini teşkil eder. Genelde büyük yük taşıma kabiliyeti taşıyan yapıştırıcılar yarı katı ("B" formu) formdadır. Bu formda yapıştırıcı önce çözündürülür ve sonra dökülür yada yapı taşıyıcı veya film ayrıcıda çekilir daha sonra suni bir katı üretimi için yaşlandırılır. "B" formu olarak adlandırılan yarı katı formu düşük sıcaklıklarda tutulur (40 °F yada 4.4 C°) ve kullanıma hazır olduğunda sıcaklık ve basınca maruz bırakılarak aktifleştirilir. Daha sonra yapıştırıcı kısa süre içinde eritilir ve sertleştirilir.

İkinci form pelte macunudur. Bu yapışkan sıvılar (viskoslar) hem bir hem de iki eleman sistemlidir. Yapıştırmanın bu tipi dikey bağlantı elemanları için kabiliyetlidir, çünkü yapıştırıcı süzülmesi çok azdır. Yaygın kullanım ağı alanı bulan böyle yapıştırıcılar bazı yapışmalarda, bağlantı kısımlarının birleşme bölgesi kontrol edilemez. Tek elemanlı sistemlerde proses başarısı için yüksek sıcaklık derecesi gerekirken, ikili elemanlı sistemlerde oda sıcaklığı yeterlidir.

2.3.5.2. Isı ile Kürleşen Yapıştırıcılar

Isı ile kürleşen yapıştırıcılar genellikle tek bileşenli yapıştırıcılardır. Tipik örnek ısı ile kürleşen epoksilerdir. Kürleşme sıcaklığı yapıştırıcıya göre değişir. Tipik olarak minimum kürleşme sıcaklığı 100 °C'dir.

Kürleşme süresi kürleşme sıcaklığına bağlıdır ve kürleşme sıcaklığı yükseldikçe süre kısalmır. Normalde sertleştiriciyi harekete geçirmek ve polimerizasyonu başlatmak için gerekli bir minimum sıcaklık vardır.

Yalnızca ısı ile kürleşen yapıştırıcıların yanında, ısıyı ilave kürleşme yöntemi olarak kullanan başka yapıştırıcılar da vardır. Anaerobik yapıştırıcılar da tipik olarak 120 °C'de ısı ile kürleştirilebilir.

Isı ile kürleşen yapıştırıcıların özellikleri kimyasal temel ile yakın alakalıdır ve çok farklı olabilir (epoksi, metakrilat gibi).

Isı ile kürleşen epoksilerin genel özellikleri şunlardır :

- Orta ile yüksek kuvvet,
- Birçok yüzeye iyi yapışma,
- İyi boşluk doldurma,
- İyi ile çok iyi çevresel direnç [22].

Epoksi yapıştırıcılar yada modifiye edilmiş epoksi yapıştırıcılar kompozitlerin yapıştırılmalı birleştirilmesinde çok sıklıkla kullanılır. Bu yapıştırıcılar kompozitin kompozitle yada metaliklerle birleşmesi için gerekli en iyi ayar özelliklerine ve en iyi çok yönlü yetenek özelliklerine sahiptir. Epoksilerin uygulanması prosesi kolaydır. Prosesde çekme payı ve firesi düşüktür. Bir çok eleman tiplerini mükemmel ıslatabilirliği ve yüksek yük taşıma kabiliyeti önemli özellikleri arasındadır.

Epoksiler ile yapıştırmada genellikle tavsiye edilen yapıştırıcı kalınlığı 0.004-0.008 inç'dir. Yapıştırıcı 1/8 in kalınlığı (3.17 mm) ideal bir şekilde olmasına rağmen,

maksimum bağlantı oranı 0.1-0.2 mm dir. Epoksi yapıştırıcılar düşük sıcaklıklarda iyi bir şekilde uygulanabilir.

Epoksinin düşük kavrama direncinin yada sıcaklık kararlılığının üstesinden gelmek için modifiye edilmiş yapıştırıcılar kullanılır. Bu yapıştırıcılar hem sıvı hem de macun şeklinde formları mevcuttur.

2.3.6. Tamir

Tamir, yapıştırırmalı tekniklerin açık bir uygulamasıdır. Bu kısımda anlatılacak olan kompozitlerin tamire yaklaşım tarzı havacılık sektöründe (askeri,havayolları ve imalat alanlarında) elde edilen deneyimlerden yararlanılmıştır. Buradaki veriler tamamen geneldir ve diğer alanlarada uygulanabilirliği açıktır.

Üretim aşamasındaki hatalardan dolayı arızaların bir çok çeşidini kompozit yapılarda görmek mümkündür. Bazen anormal çevre etkilerinden dolayı kompozitlerin mevcut kullanımlarında küçük hataların birikip güçlenmesi ve çevre etkilerinin de yardımıyla elemanların kullanımında da hasarlar başlayabilir. Bazen de bu hasarlar suistimaller sebebiyle lokal mekanik aşırı yüklerden dolayı ortaya çıkabilir. Hasar iki temel yol ile elemanları etkileyebilir. Birincisi, elemanların optimum tasarım sınırları aşığındaki bir seviyede mukavemet ve rijitliğin göz ardı edilmesidir. Bu çeşit bir eksiklik saptanmalı ve yapılar tamir edilmeli yada değiştirilmelidir. Daha kaygı verici olan daha küçük hatalardır ki bu hatalar mekanik performansı ani bir şekilde etkilemez fakat mukavemet yada rijidliğin kullanım şartlarının altında olması sonucu bu hatalar ilerleyip tehlikeli boyutlara ulaşabilir buda kabul edilmez.

Kompozit yapılarda karşılaşılan hasarların çoğu yanlış tasarım ve kullanma yada dış etkenlerden dolayı ortaya çıkar. Bir etkinin doğurabileceği hasar, yüzeyindeki küçük çatlaklardan başlar, yapının içine doğru devam eder. Yapıların bu tür eğilimleri olduğu için hasar bölgelerindeki böyle vakaları kontrol etmek, incelemek ve durumun erken teşhisinin yapılması gerekmektedir. Tamirde çok önemli adımlardan biride hasarlı bölgenin saptanmasıdır.

Tamir işlemindeki gaye hasarlı bir yapının eski performansına ulaşmasını sağlamaktır. Kompozit yamaların kullanıldığı durumlarda özellikle melez formlu yamalarla (cam ve karbon gibi) metal yapıları tamir etmek güç bir tekniktir (Rogers, Kingston-Lee,Phillips 1980). Bunun için özel teknikler geliştirilmelidir. Bu özel teknikler elemanların tipine, bağlantının yeterlilik miktarına ve yüzey pürüzlülüğü göz önünde tutulması ile sağlanır.

Tamir ortamı, tamir işleminde kullanılan tekniği ayrıca etkilemektedir. Hazırlanan özel ortamlarda önemli tamirler yapmak mümkündür, fakat tamir edilebilirliğin sınırlı olduğu ortamlarda bu durum çok daha kısıtlıdır. Malzemeler için soğuk hava hazneli ortamlar proses için, otoklav (pişirme kazanı) kabiliyeti ve gerekli araçlar tamir uygulamaları için hazırlanır. Ayrıca ortamı hazırlamak için uzmanlık çok önemlidir. Böylece örneğin uçaktan kolaylıkla ayrılabilen parçalar ideal otoklav şartları altında tamir edilebilir. Yapıların tamirinde hem macun hem de sıvı şeklinde yapıştırıcılar kullanılabilir. En genel manasıyla ortam tüm gerekli tamirlerin performansındaki kritik bir şarttır.

Tamirin ortam alanı daha zordur. Soğuk havalı hazneler değilse, malzemelerin tamiri çevresel sıcaklık ortamına göre ayarlanması gerekir. Otoklav prosesi mevcut değilse, tamirler ısınma perdeleri ile kullanılarak yapılması zorunludur. Pres ve biçim verme basıncı genellikle 1 bar (14.50/bf/in²) vakum basıncı ile sınırlıdır.

2.3.7. Bağlantının Durumu

2.3.7.1. Yapıştırırmaya Uygunluk

Kompozitin kompozite yada metalik elemanlara yapıştırırmalı birleştirilmesinde mekanik özelliklerinin uygunluğunun tam hesabının belirlenmesi zordur, çünkü çalışma şartları, birleşme kabiliyeti ve/veya proses sonucu oluşabilecek problemler ve kompozit tipi değişken olabilir. Özellikle ana yapının tasarımında kesin mukavemet değerleri, gerçek şartların program simülatörlerine girilmesiyle elde edilen test verilerinin değerlendirilmesi ile tespit edilir [23].

2.3.7.2. Hata Tespiti

Yapıştırıcı uygulamalarında başarıyı garantilemek için dikkat edilecek birçok nokta vardır. Basit şekilde, yapıştırıcı problemlerinin çoğu aşağıdaki guruplara göre sınıflandırılabilir.

- Kürleşme/katlaşma yok

SIVI yapıştırıcı beklendiği şekilde katılaştı mı, yoksa bazı faktörler prosesi geciktirdi veya durdurdu mu ?

- Yapıştırıcı yok

Bu çok basit gözükse de, en iyi uzmanlar her zaman istenen yerde yapıştırıcı varlığını kontrol ederler.

- Adhezyon yok

Yüze yapışmayı engelleyen kirler veya bozukluklar mı var ?

- Performans yok

Diğer faktörleri ve prosesin doğruluğunu kontrol ettikten sonra, uygun yapıştırıcı seçilmiş mi ? [22]

2.3.7.4. Ortam Etkileri

Ortamdaki nemim derecesini kontrol altında tutmak kalıcı tamirlere karşı düşünölmelidir. Hem ana yapı hem de yapıştırıcılar için mukavemetin yaklaşık %20 oranında azalması olasıdır. Tamirin ortam derecesi ana tabakalarınkinden daha büyük olmaması sağlanmalıdır. Sıcaklık, termal gerilmeler, nem oranı ve çalışma ortamı bağlantıyı etkileyen ortam parametreleridir [23].

2.3.7.5. Yapıştırma Bağlantıların Sökülmesi

Birçok ek yeri, alışılmış "çekme" veya "itme" yöntemleriyle sökülebilir. Yüksek kuvvette yapıştırılmış bağlantılarda, sökme öncesi 300 °C - 400 °C'ye kadar ısıtmak

faydalıdır. Yapıştırıcı kalıntıları mekanik olarak temizlenebilir. Yeniden yapıştırmadan önce yüzeyler temizlenmelidir [22].

2.3.7.6. Bağlantının Kontrolü

Tamir katmalarının ve yapıştırmanın kalitesi yapıştırılacak elemanlarınkinden daha aşağı olabilir. Bu nedenle, yapıştırma bölgesi ve yamanın kalite kontrolünün iyi bir şekilde yapılması çok önemlidir. Ne yazık ki tamirli yapıların bozulmadan test kontrolünün yapılması yapı elemanlarının üretiminden sonra çok sınırlıdır. Bu nedenle ultrasonik ve x-ışınları teknikleri gibi tahribatsız muayene yöntemleri kullanılır [23].



BÖLÜM 3. SONLU ELEMANLAR METOTU

3.1. Giriş

Sonlu elemanlar yöntemi mekanik problemlerin çözümünde kullanılabildiği gibi mühendisliğin diğer dallarında çözümleme ve tasarım amaçlı olarak kullanılmaktadır. Statik, mekanik, akışkanlar mekaniği ve ısı transferi bu alanlardan bazılarıdır. Statik analizin yanında dinamik analizde de kullanılmaktadır .

3.2. Genel Teorik Bilgi

Sonlu elemanlar yönteminde, sınır şartları belirlenerek problem geometrisi sonlu sayıda elemana bölünür. Elemanlar, sınır üzerinde bulunan belirli sayıda düğüm noktasında temas halindedir. Elemanlar üzerinde ve bu birleşim noktalarında olmak üzere iki tür çözüm gerçekleştirilebilir. Eleman ağ noktalarındaki yer değiştirmelerin süperpoze edilmesiyle sistemin genel yer değiştirmesi bulunur. Sonlu elemanlar yöntemi yaklaşık çözüm veren sayısal bir yöntemdir. Gerçek çözüme, seçilen eleman sayısı arttıkça yaklaşılr. Değişik sınır koşullarının katı cisim üzerinden belirtilmesi ve değişik geometrilili karmaşık şekillerin ağ sistemiyle tanımlanabilmesi nedeniyle birçok araştırmacı tarafından uygulanmaktadır. Günümüzde, analitik çalışmaların sonuçları ya deneysel yada sayısal sonuçlarla karşılaştırıldığı için sonlu elemanlar yönteminin kullanılrlığı çok fazladır. Aşağıda eleman ve genel katılık matrislerine ait genel tanımlamalar verilmektedir. Lokal ve global matris tanımlamaları $F=Kx$ denkleminde oluşturulmaktadır. Burada, F kuvvet vektörü, K katılık matrisi, x yer değişimi vektörleridir. Hem her eleman için hem de genel yapı için bu matrisler oluşturularak sayısal metotlarla (Gauss Eliminasyonu) bilinmeyenler x veya F içerisinden belirlenerek çözülür. Daha sonra gerilme ve genleme matris tanımlamaları ile sistem üzerinde oluşan bu dağılımlar bulunur [24].

$$K^e u^e = f^e$$

Burada K , u , f , Q katılık matrisi, yer değiştirme vektörü, uygulanan yük vektörü ve cisme ait yük vektörüne karşılık gelmektedir. f , Q problemin sınır şartlarını içermekte olup, yalnızca yükleri temsil ederler. u vektörü de yer değiştirme sınır şartlarını gösterir.

Katılar mekaniğinde aşağıdaki denklem, eleman katılık matrisine karşılık gelmektedir.

$$K^e = A t B^e D B^{eT}$$

Bu denklemde, K^e , A , t , B^e , D eleman katılık matrisi, eleman alanı, kalınlığı, Şekil fonksiyonlarının türevlerini içeren matris, elastik. sabitler matrisini tanımlamaktadır.

$$\epsilon = B u$$

birim deformasyon vektörünü tanımlamaktadır.

$$\sigma = D B u$$

denklem deplasmanlar cinsinden gerilme vektörünü verir. Üç boyutta gerilme vektörü de aşağıdaki gibidir:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{yy} & \sigma_{zz} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{yz} \end{bmatrix}$$

3.3. Metot

Makina, inşaat, nükleer, biomedikal vb. birçok mühendislik alanında uygulanan sonlu elemanlar metodu, makina mühendisliğinin çeşitli problemlerinin çözümü için son derece elverişlidir. Özellikle mekanik tasarımda şu problemler için sıkça kullanılır:

- a. Denge problemleri : Gerilme yığılması, gerilme analizi,
- b. Yayılma problemleri : Dinamik yükler altında çatlak ve kırılmalar,
- c. Özdeğer problemleri: Dişli yükler altında tabi frekans.

Mühendisliğin birçok dalında elastik sürekli ortamda, gerilme ve deformasyon dağılımlarının çözümü aranır. Bir elastik ortamda temas noktalarının gerçek sayısı sonsuzdur. Dolayısıyla sayısal çözümde en büyük zorluk buradadır. Sonlu elemanlar metodunda bu zorluklar aşağıda gösterildiği gibi yenilenebilir ve yaklaşıklık sağlanabilir [25].

- a. Sürekli ortam, hayali çizgiler veya yüzeylerle belirli sayıda sonlu elemanlara ayrılır.
- b. Elemanlar, sınırları üzerinde bulunan belirli sayıda düğüm noktasında temas halinde kabul edilir.
- c. Her sonlu eleman içindeki yer değiştirmeyi tanımlamak için, düğüm noktalarının yer değiştirmeleri cinsinden fonksiyon veya fonksiyonlar seçilir.
- d. Yer değiştirme fonksiyonları, bir eleman içinde, düğüm noktaları yer değiştirmeleri cinsinden yer değiştirme durumunu genel olarak tarif eder. Bu yer değiştirmeler, eleman içindeki gerilme durumunu tarif eder.
- e. Düğüm noktalarında toplanmış ve sınır gerilmelerini dengeleyen şu matrisel direngenlik bağıntısı kurulur;

$$F = K \cdot d$$

Bu ifadede $\{F\}$; dış yükler sütun vektörü, (K) ; elastik cismin tümleşik katılık matrisi, $\{d\}$; yer değiştirmeler sütun vektörüdür.

3.3.1. Denge Problemlerinin Çözümü

Denge problemleri denklemi ile ifade edilebilirler. Çözüm için önce elemanın tipi, boyutu ve sayısı belirlenir. Ortama özgü katılık matrisi uygun Varyasyon metodlarından biriyle belirlenir. Bu katılık matrisinin tersi alınır. Bu ters matris ile dış yüklerden oluşan sütun matrisinin çarpımı yer değiştirme sütun matrisine eşitlenir. Böylece her bir elemana ait köşe noktalarının gerilme fonksiyonları bulunarak problem çözülmeye başlanır. Bu şu eşitlikle gösterilebilir.

$$K \cdot \delta = P$$

Bu ifadede $[K]$; katılık matrisi, $\{\delta\}$; bilinmeyen gerilme fonksiyonu değerleri, $\{p\}$; sabit değerler sütun vektörü (genel olarak dış yükler veya verilen düğüm noktalarının koordinatlarını belirleyen fonksiyon). Yukarıdaki formülün çözümü için direkt veya yaklaşık çözüm metodlarından biri kullanılabilir [25].

3.3.2. Yöntemde Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar

- Sonlu elemanlar metodunda yapının tipine göre çeşitli eleman tipleri kullanılabilir (üçgen, dörtgen, yamuk v.s.). Problemin çözümünde eleman tipi önemlidir. Çünkü eleman tipi yapılacak hatanın büyüklüğüne etkilidir. Şöyle ki, üçgen elemanlardan oluşmuş bir yapıda meydana gelecek hata üçgen elemanın boyutunun karesi ile doğru orantılı iken dörtgen elemanda küpüyle orantılı olmaktadır. Yani dörtgen elemanda yapılacak hata üçgen elemanda yapılacak hatadan daha azdır.
- Seçilen elemanlar tipinde düğüm sayısı da önemlidir. Örneğin lineer bir üçgen elemanda yapılacak hata, kübik üçgen elemanda yapılacak hatadan çok daha fazladır.
- Eleman sayısı arttıkça tam çözüme yaklaşım daha da artmaktadır. Bu sebeple ortamın eleman sayısı mümkün mertebe yüksek olmalıdır.
- Elemanların sıklığı da önemlidir. Örneğin ortamın bir kısmının incelenmesi daha önemli olabilir. Böyle bir durumda o bölgede elemanlar sık tutulup, diğer kısımlarda geniş tutulabilir.

3.3.3 Metodun Avantajları

- a. Katı cisim, değişik geometrili şekillere ayrılabilirdi için karmaşık şekilli cisimlere kolayca uygulanabilir.
- b. Sınır koşulları kolaylıkla uygulanabilir.
- c. Gelişmiş bilgisayarların kullanımı sebebiyle çözüm hızı yüksektir.
- d. Mühendisliğin birçok problemine cevap verebilecek esnekliktedir.
- e. Tam çözüme, eleman sayısı arttıkça oldukça yaklaşmaktadır.

Bu ve benzeri avantajları sayesinde sonlu elemanlar metodu, özellikle son yıllarda birçok araştırmacı tarafından kullanılan, vazgeçilemez bir sayısal çözüm yöntemi olmuştur [25].

3.4. ANSYS

ANSYS, bir çok mühendislik alanında karşılaşılan fiziksel olayları simülasyonunu mümkün kılan, kullanıcıya pre-proses / çözüm / post-proses işlemlerini kolaylıkla gerçekleştirebilmeyi sağlayan çok amaçlı bir tasarım / analiz programıdır.

ANSYS programı sonlu elemanlar metodunu temel alır ve analizlerini bu metod tabanlı yapar. Program sonlu elemanlar formülasyonunu bilgisayar tabanlı analitik uygular [26].

Bu programda önce çalışma ortamı seçilir. Daha sonra element tipi, malzeme özellikleri, model geometrisi oluşturma ve konfigürasyon, modeli sonlu sayıda elemana bölme (mesh), sınır şartları ve yüklerin girilmesiyle modelleme tamamlanır. Daha sonra program sonlu elemanlar formülasyonunu kullanarak modelimizin çözümleme işlemini yapar. Çözümlemeden sonra modelin istenilen bölgeleri incelenebilir ve grafiksel değerler tespit edilebilir [26].

BÖLÜM 4. MODELLEME, ANALİZ VE İRDELEME

4.1. Giriş

Çalışmanın modellenmesinde sonlu elemanlar modelinden yararlanılmıştır. Alüminyum plaka, kompozit yama ve yapıştırıcıdan oluşan üç katman bilgisayar destekli ortamda modellenmiş ve farklı yüklere karşı gerilme-genleme değerlerinin tayini için ANSYS sonlu elemanlar yazılım programında analiz sonuçlarından yararlanılmıştır.

4.2. Modelleme

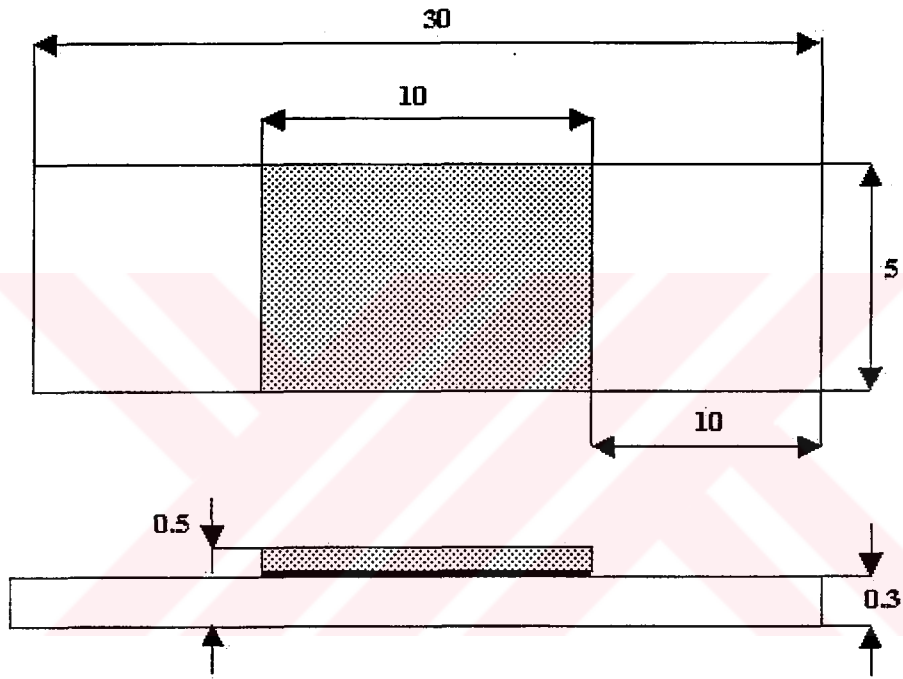
Modellemede, öncelikle elemanların ölçüleri belirlenmiş ve geometrik model oluşturulmuştur. Geometrik model ölçüleri ışığında sonlu elemanlar modeli bilgisayar ortamında gerçekleştirilmiştir.

4.2.1. Geometrik Model

Ana katman olarak 300x50x3 mm boyutlarında alüminyum bir tabaka seçilmiştir. Bu malzemenin elastisite modülü $E=72\ 400$ MPa ve poisson oranı $\nu=0.33$ dür. 1000-6000 N arasında farklı çekme ve 100-500 N arasında farklı eğme yüklerine maruz bırakılmıştır. Alüminyum tabaka 100x50x1,8 mm ölçülerine sahip Hercules AS4/3501-6 ticari adlı grafit/epoksi yama ile yapıştırılmıştır. Bu yama malzemesinin elastisite modülü $E=81\ 800$ MPa ve poisson oranı $\nu=0.3$ dür. Çalışmada kullanılan üç farklı malzemenin mekanik özellikleri Tablo 4.1.'de ve geometrik model ölçüleri Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Yapıştırıcı olarak, FM300 ticari isimli havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılan epoksi bazlı bir kimyasal kullanılmıştır.

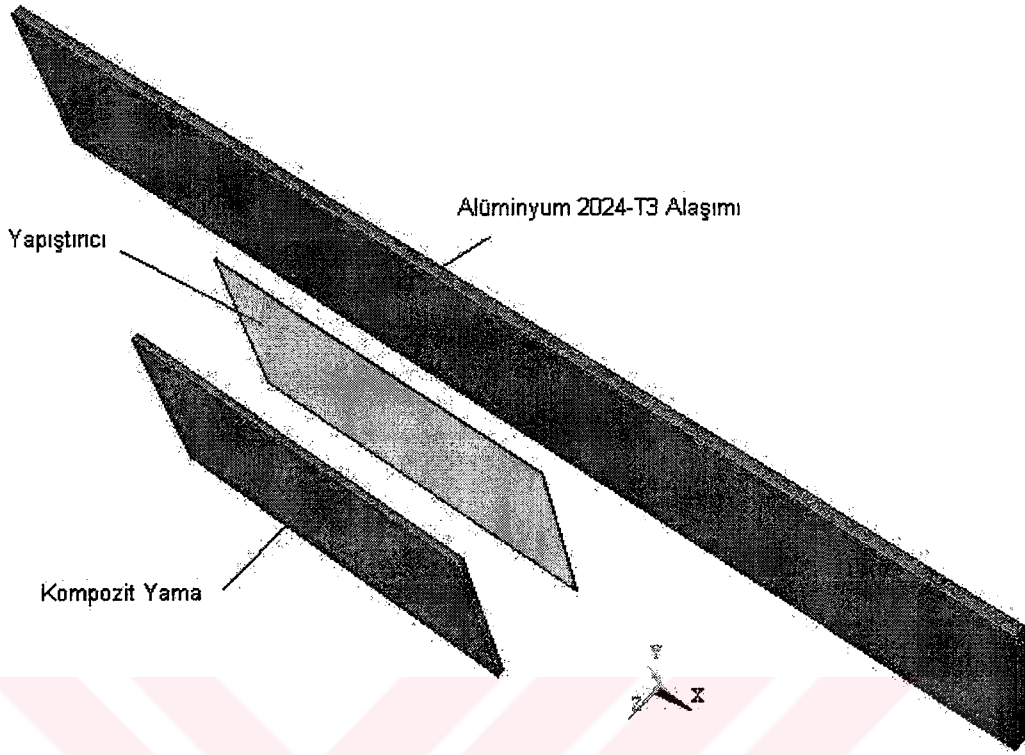
Tablo 4.1 Alüminyum 2024-T3 alaşımı, yapıştırıcı FM 300U ve grafit/epoksi kompozit yama Hercules AS4/3501-6'nın mekanik özellikleri

Malzeme	Alüminyum 2024-T3 Alaşımı	Yapıştırıcı FM 300 U	Grafit /epoksi kompozit yama Hercules AS4/3501-6
Elastisite modülü, E (N/mm ²)	72400	2756	81800
Poisson oranı, ν	0.33	0.3	0.31



Şekil 4.1 Yamalı yapının geometrik modeli (tüm ölçüler cm'dir)

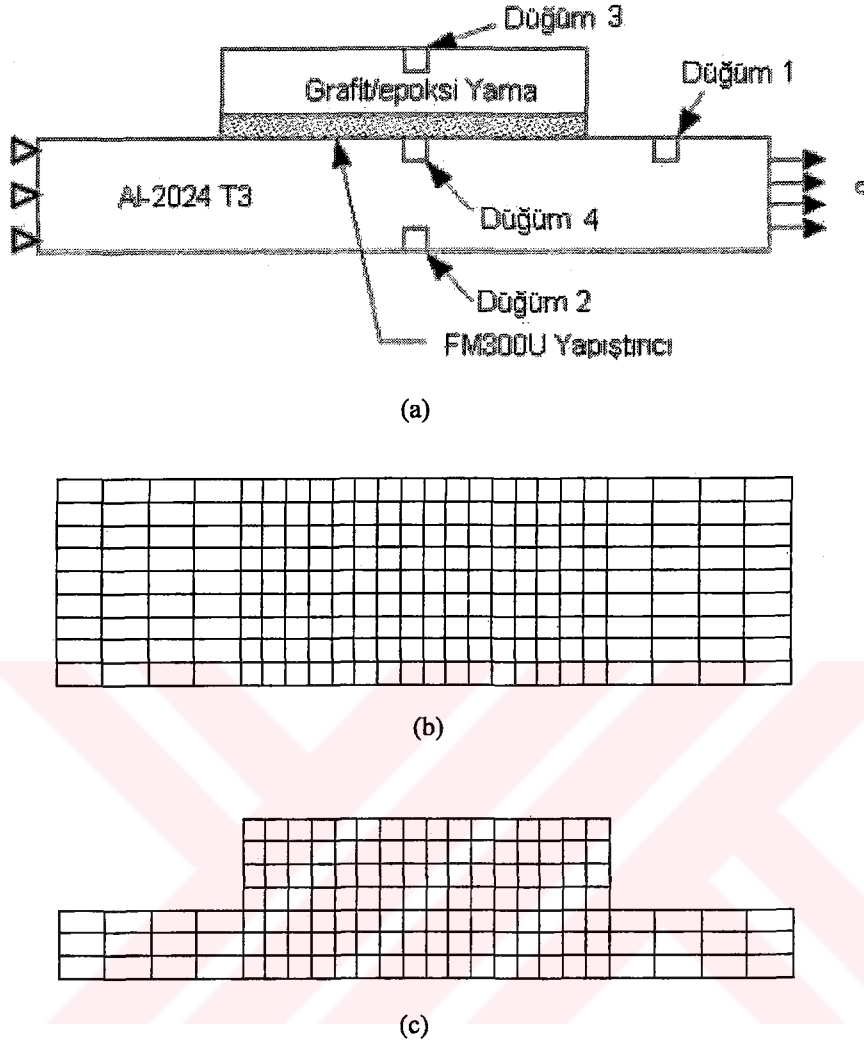
Şekil 4.1'deki geometrik ölçülere sahip yapının montaj resmi ise Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Ana katman Alüminyum 2024 T3 alaşımı, yama malzemesi olarak kompozit yama ve orta katmanda bu iki malzemeyi birleştirmek için kullanılan yapıştırıcı katmanı bulunmaktadır.



Şekil 4.2 Yapının montaj resmi

4.2.2. Sonlu Elemanlar Modeli ve Sınır Şartları

Deney numunesini baz alan ve geometrik yapısı belirtilen model, deneysel şartları sağlayacak biçimde sınır şartlarına ve yüklere maruz bırakılmıştır. Model 50 mm'lik kısa kenarından tüm serbestlik dereceleri sınırlandırılarak ve karşı kısa kenardan 6 farklı çekme yüküne ve 3 farklı eğme yüküne maruz bırakılmıştır. Yapıları sonlu elemanlara bölüm için 8 düğüm sayılı ve ikinci derecen (quadratic) şekilli 3 boyutlu Solid 45 brick eleman tipi seçilmiştir. Malzeme modelleri olarak doğrusal (lineer) elastik (izotropik) modeller tayin edilmiştir. Şekil 4.3'de tabaka, yama ve yapıştırıcının tipik sonlu elemanlar modeli gösterilmektedir.

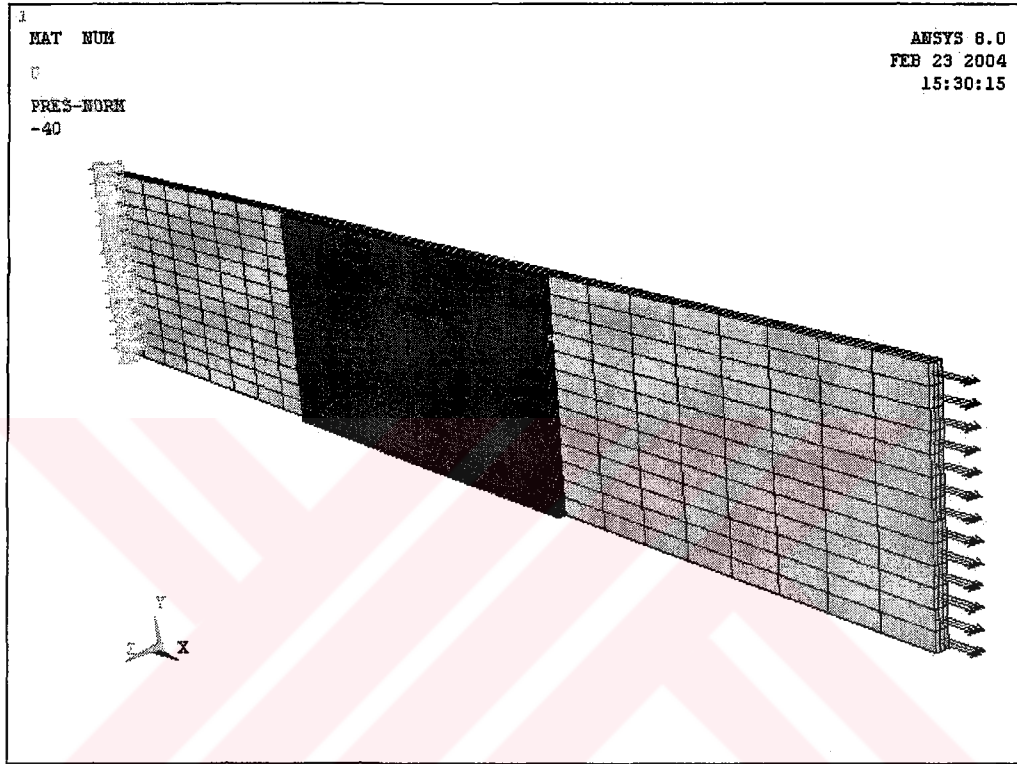


Şekil 4.3 (a) Sonlu elemanlar modelinin sınır şartları, (b) yamanın modeli, (c) yapışmanın modeli.

4.2.3. Model Simülasyonu

Tamir edilmiş yapının modelini simüle etmek için ANSYS ticari sonlu elemanlar yazılım programı kullanılmış ve programda çalışma şartları tanımlanmıştır. Programda alüminyum plaka ve kompozit yamayı yapıştırmak için “Glue” özelliğinden faydalanılmıştır. Yapıların modellenmesinde lineer 3 boyutlu katı elementler (SOLID 45) seçilmiş ve modelde 2282 düğüm ve 1664 eleman kullanılmıştır. Şekil 4.4’de SOLID 45 elementinin model üzerinde ağ oluşturması gösterilmektedir. Üretilen model gerilme, genleme ve deformasyon sonuçlarını almak amacıyla ANSYS paket programı tarafından analiz edilmiştir. Modellemede öncelikle ANSYS Sonuç olarak bazı mevcut nümerik yaklaşımları daha

belirginleştirmek ve model davranışını simüle edebilmek için bir hata faktörü belirlenmiştir. Modelde kullanılan elaman; plastisite, kıvrılma, kabarma, gerilimle sertleşebilen, büyük ölçüde bel veren ve büyük zorlama davranışını temsil edebilmektedir.



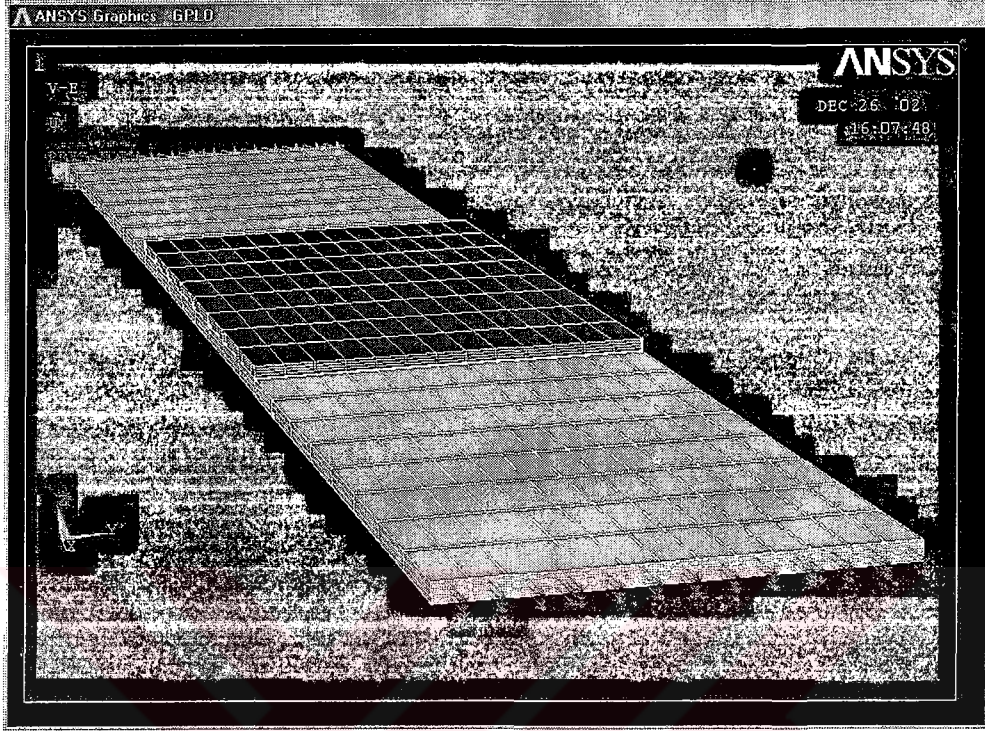
Şekil 4.4 SOLID 45 elementinin model üzerinde ağ oluşturması (mesh).

4.3. Analiz ve Sonuçlar

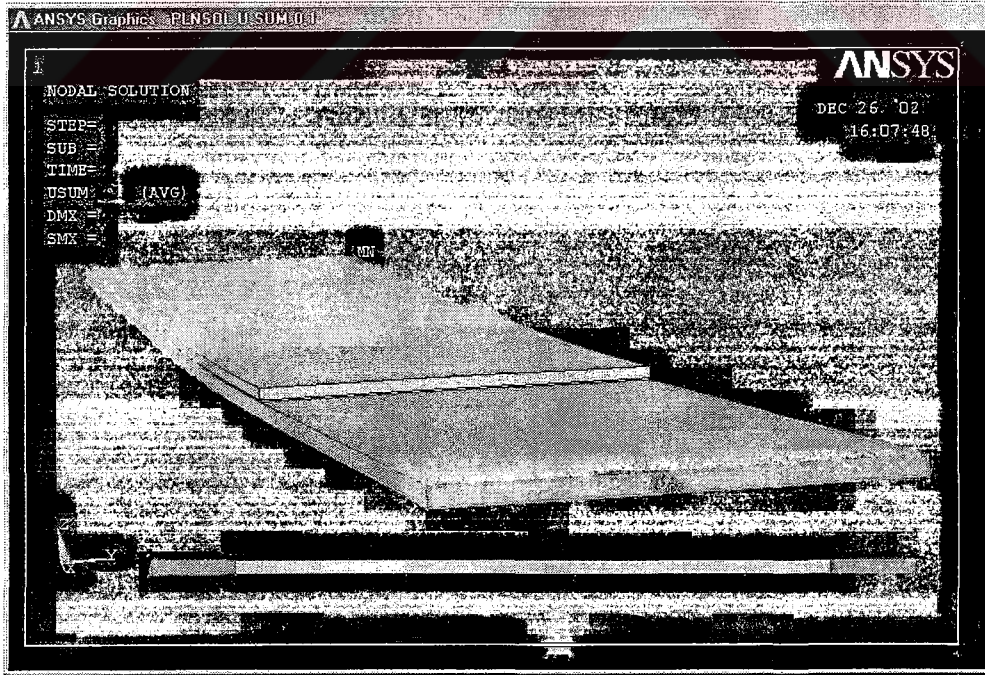
4.3.1. Çekme Analizi

Analizde sınır şartlarına gelindiğinde örnek modelin bir kenarına çekme suretiyle sıra ile 1000,2000,3000,4000,5000 ve 6000 N olmak üzere 6 farklı yük uygulanmıştır. Bu arada modelin diğer kenarında x, y ve z yönlerinde tüm serbestlik dereceleri tutulmuştur. Şekil 4.5’de sonlu elemanlar modelinin sınır şartları gösterilmektedir. Şekil 4.5’de ok işaretleri çekme yüklerinin yönünü göstermektedir. Yapıştırıcı modeli, Al 2024-T3 ve yama katmanı arasında bulunmaktadır. Şekil 4.6’da 6000 N

analiz için modelin düğümlerinde oluşan yer değiştirme eğilimi görülmektedir. Bu eğilim gerçek deney davranışıyla benzerlik göstermektedir.

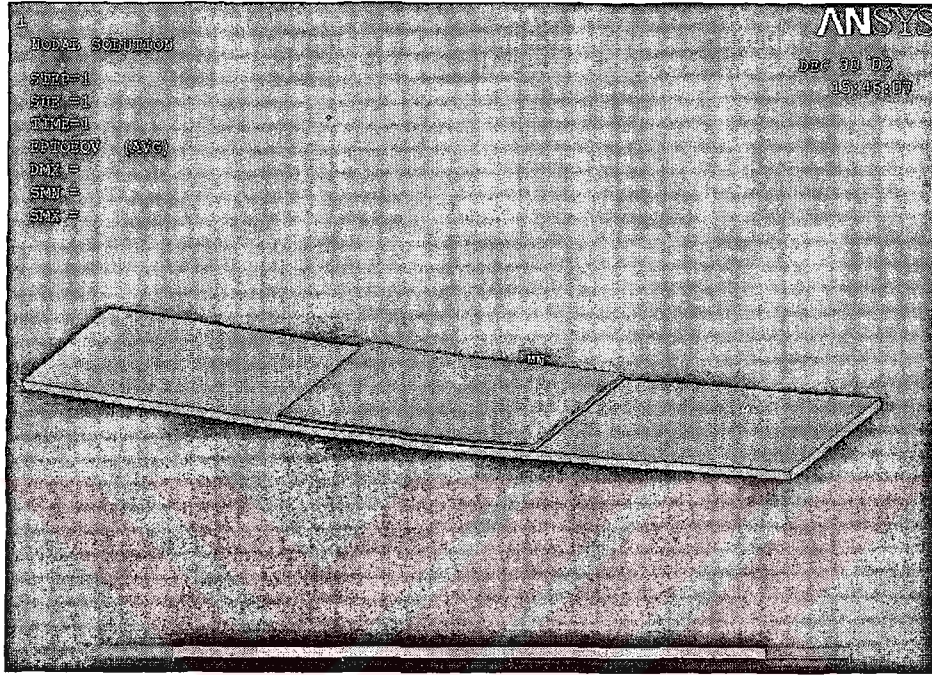


Şekil 4.5 Sınır şartları ve yamalı yapının ağ modeli.

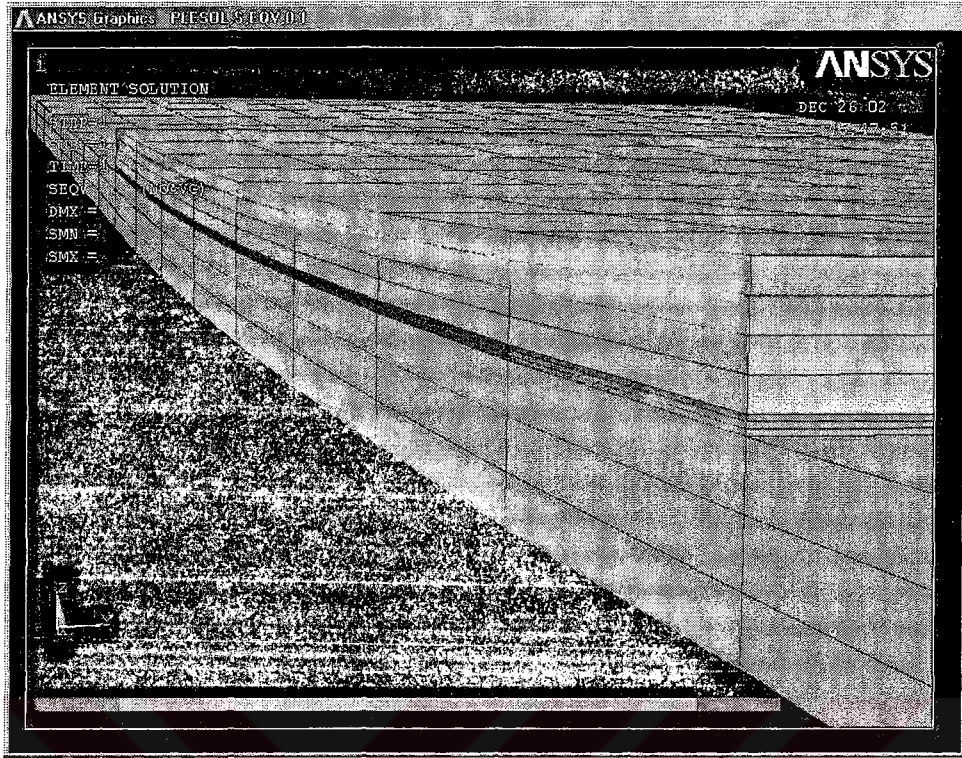


Şekil 4.6 6000 N yük altındaki modelin düğümlerinde oluşan yer değiştirme eğilimi (yer değiştirme ölçeği 5 kez arttırılmıştır)

Şekil 4.7'de 6000 N analiz için genleme sonuçları resimize edilmiştir. Şekil 4.8'de 6000 analiz için gerilmeler gösterilmiştir. Sonuçlara göre gerilim konsantrasyon alanı ve maksimum değer gösterilmiştir.

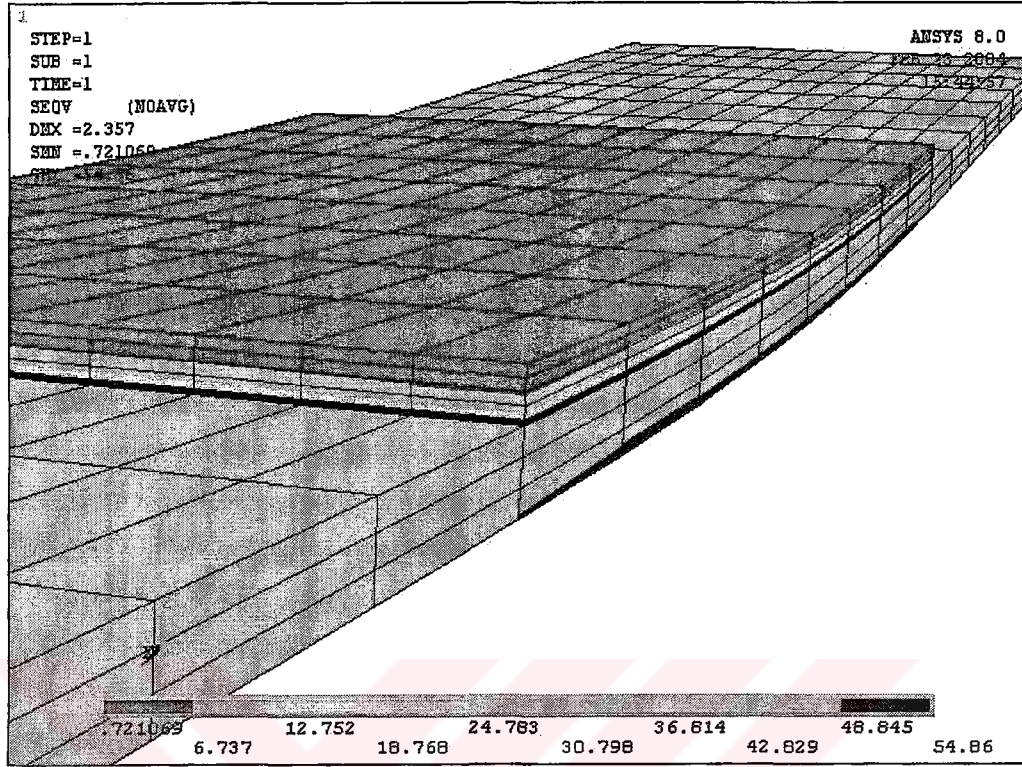


Şekil 4.7 6000 N yük altındaki modelin düğümlerinde oluşan genleme davranışı (yer değiştirme ölçeği 5 kez artırılmıştır)



Şekil 4.8 6000 N yük altındaki modelin düğümlerinde oluşan gerilmeler (yer değiştirme ölçeği 5 kez arttırılmıştır)

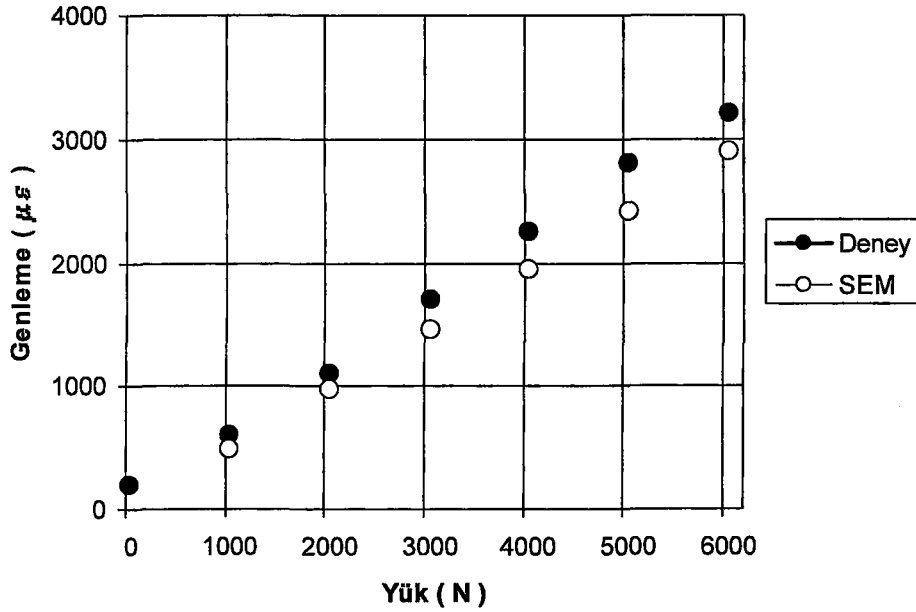
Şekil 4.8’de modelin altındaki gerilim alanı yani Al 2004-T3 alaşım elemanın serbest yüzeyi görülmektedir. Bu alan turuncu-kırmızı renk tonlarındadır. En az gerilme değeri ise yamanın üst yüzeyinde tespit edilmiştir. Şekil 4.8 ‘de yapıştırılmış katmanlar arasındaki direnç hareketi kolaylıkla görülebilmektedir. Malzeme modelinin performansı simülasyonla ilgili ön fikir vermesi açısından yeterlidir. Şekil 4.9’da ise 6000 N yük altındaki modelin düğümlerinde oluşan gerilmelerin farklı bir açıdan görünümü görülmektedir.



Şekil 4.9 6000 N yük altındaki modelin düğümlerinde oluşan gerilmelerin farklı bir açıdan görüntüsü (yer değiştirme ölçeği 5 kez arttırılmıştır)

4.3.1.1. Sonuçlar

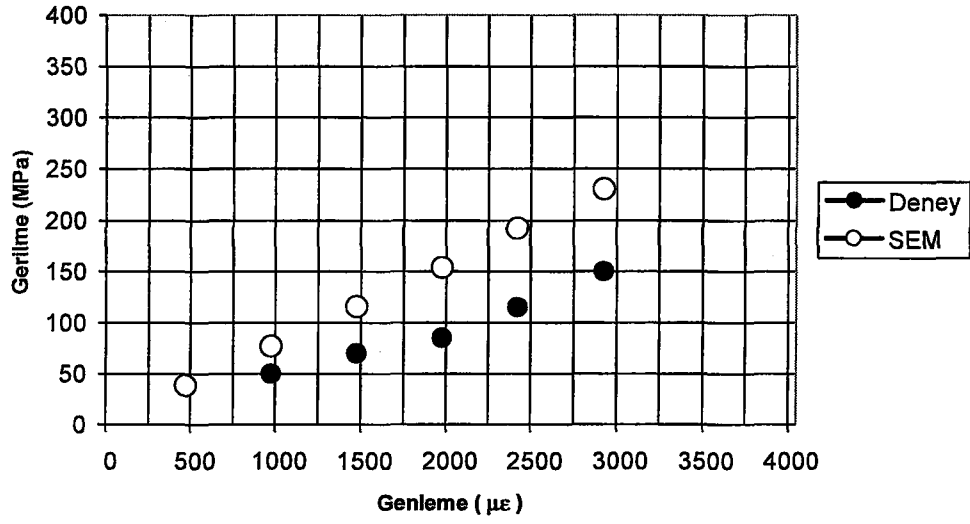
Şekil 4.10'da bu çalışmanın sonuçları ve deneysel sonuçlar arasında bir mukayese gösterilmektedir. Maksimum sapma 5000 N analizde gerçekleşmiştir, fakat bu sınır %10 limitinin altındadır. En fazla yükün uygulandığı 6000 N analizde maksimum genleme nümerik simülasyon için yaklaşık 2900 $\mu\epsilon$ ve deneysel çalışma için 3150 $\mu\epsilon$ dur.



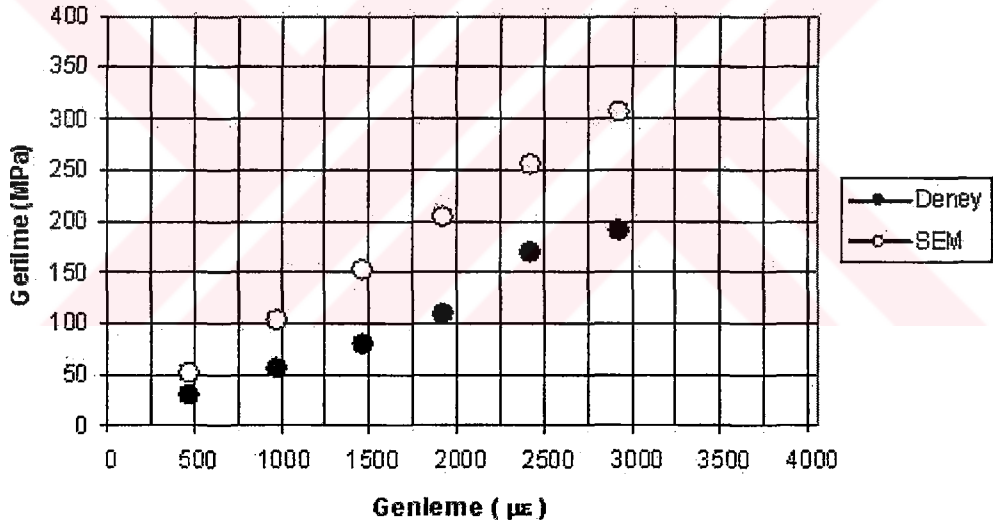
Şekil 4.10 Sonlu eleman ve deneysel analiz karşılaştırmalı genleme-yük ilişkisi.

Grafiksel sonuç değerleri tespiti için, daha önce deneysel genleme ölçümlerinin yapıldığı model üzerinde 4 adet strain-gage noktalarına karşılık gelen 4 adet kritik düğüm noktası belirlenmiştir. 4 nokta seçilmiştir.

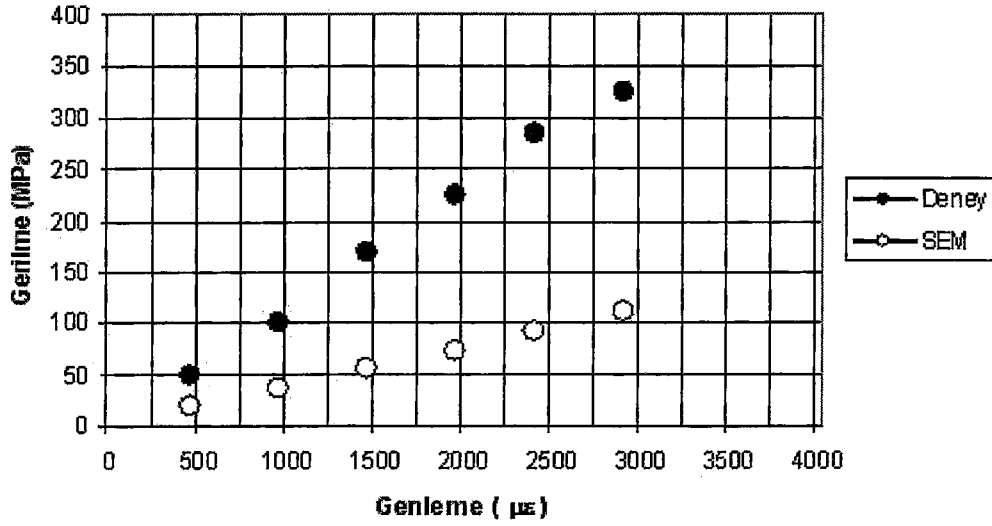
Şekil 4.11’de kritik düğüm 1 için deneysel ve nümerik çalışma arasında karşılaştırmalı bir gerilim-genleme ilişkisi gösterilmektedir. Gerilme ile genleme artışı eğilimi benzerdirler fakat sınırlar düğüm 1’de farklılık göstermektedir. Yüklerin artmasıyla aradaki fark kademeli olarak artmaktadır. Şekil 4.12 ’de düğüm 2 için benzer bir durum görülmektedir. Şekil 4.13 ve 4.14 ’de gerilim-genleme ilişkilerine göre benzer kıyaslamalar sırasıyla düğüm 3 ve 4’de gösterilmiştir. Bu grafiklerde deneysel ve nümerik sonuçların eğiliminin benzer olduğu kolaylıkla görülmektedir. Farklı olarak Şekil 4.13’da deneysel sonuç artış oranı nümerik çalışmadan daha yüksektir. Şekillerde gösterilen “SEM” değerleri, sonlu elemanlar modeli analiz sonuçlarını belirtmektedir.



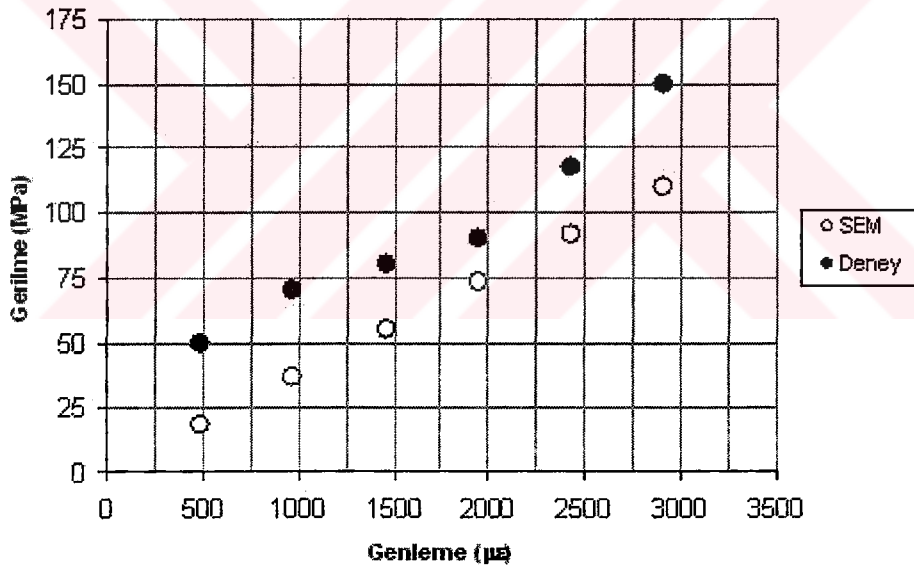
Şekil 4.11 Düğüm 1 için deneysel ve nümerik çalışma arasında gerilim-genleme ilişkisi.



Şekil 4.12 Düğüm 2 için deneysel ve nümerik çalışma arasında gerilim-genleme ilişkisi.

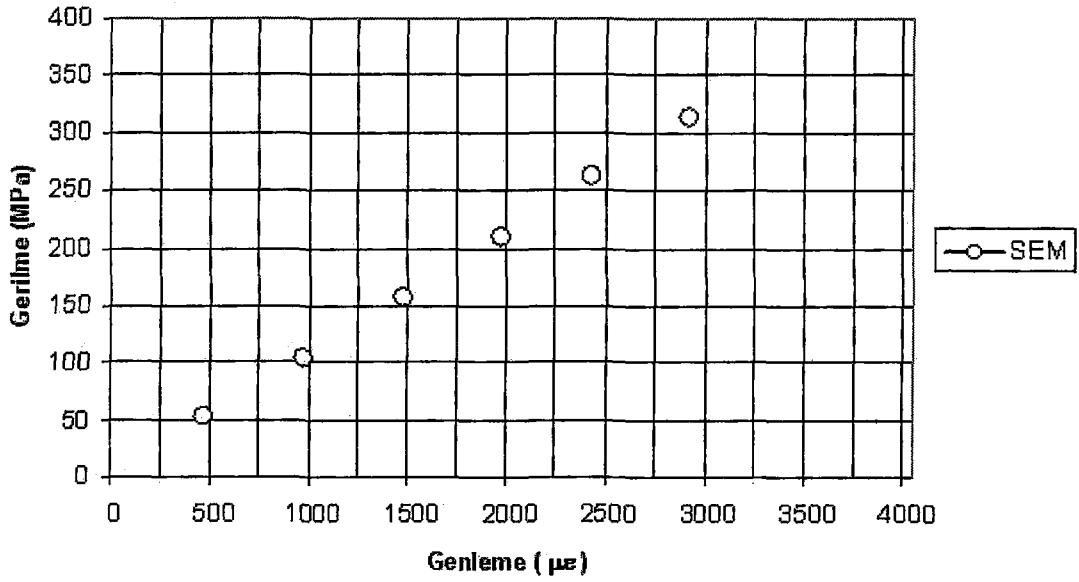


Şekil 4.13 Düğüm 3 için deneysel ve nümerik çalışma arasında gerilim-genleme ilişkisi.



Şekil 4.14 Düğüm 4 için deneysel ve nümerik çalışma arasında gerilim-genleme ilişkisi.

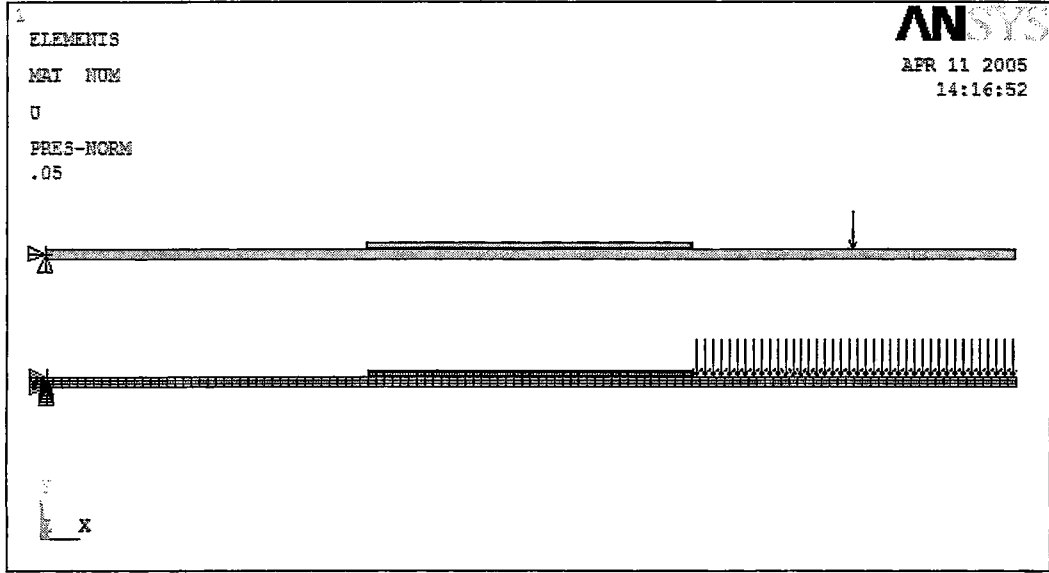
Sonuç olarak, grafiklere genel olarak bakıldığında 3000 µε gerilim değerinde toplam gerilim sonuçları yaklaşık olarak nümerik çalışma için 320 MPa ve deneysel çalışma için 330 MPa olduğu görülmektedir. Düşük yüklemeler için eğilimlerde iyi bir uyum görülmekte ve yükler arttıkça bu uyum giderek bozulmaktadır. Şekil 4.15'de nümerik çalışma için maksimum gerilmede gerilim-genleme ilişkisi sunulmuştur. Bu sonuçlara göre çekme yüklerine karşı model davranışının lineere yakın olduğu söylenebilir.



Şekil 4.15 Nümerik çalışma için maksimum gerilmeye gerilim-genleme ilişkisi.

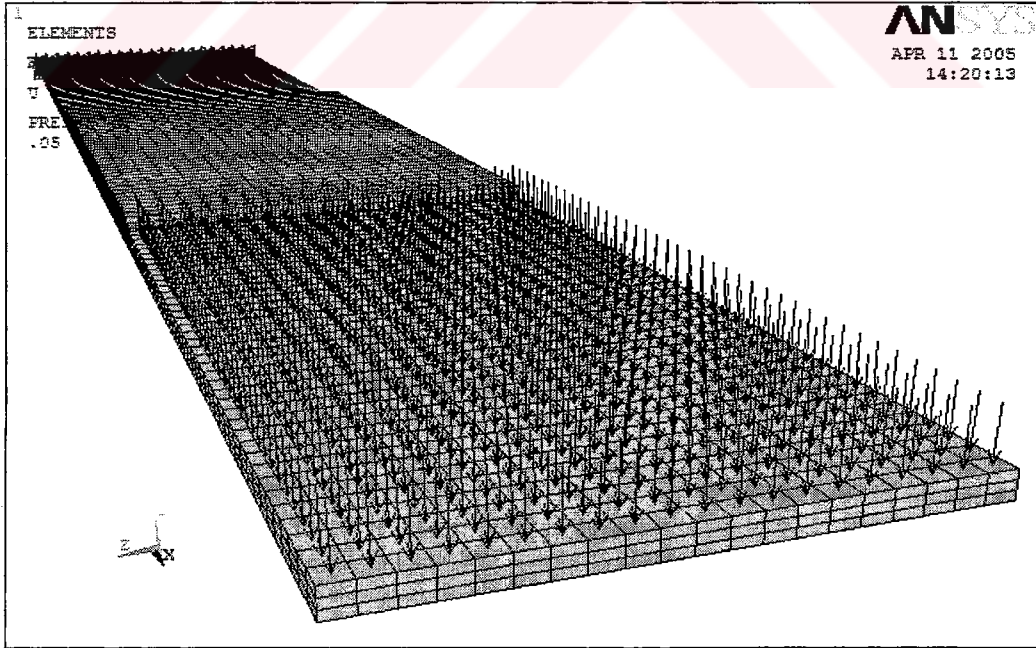
4.3.2. Eğme Analizi

Eğme modeli ile 100 N, 250 N ve 500 N'luk yayılı yük analizleri için eğme analizi yapılmıştır. Model çekme analizinde olduğu gibi sol kenarından x, y ve z yönlerinde tüm serbestlik dereceleri sabitlenmiştir. Eğme modeline uygulanan toplam analiz sayısı 3 dür. Eğme modelinin çekme modelinden farklı yönü uygulanan kuvvet alanı ve yönüdür. Bu modelde Şekil 4.16'da görüldüğü gibi yamanın sağ tarafında kalan bölgeye dikey ve yayılı olarak yük uygulanmıştır. 100 N, 250 N ve 500 N'luk yayılı yükler için 3 farklı analiz yapılmış, oluşan maksimum ve minimum gerilme, genleme (zorlanma) ve deformasyon değerleri tespit edilmiştir. Böylece buradaki yamanın, alüminyum alaşımlı plakaya bağlantı performansı incelenmiştir. Eğme modelinin serbestlik dereceleri, sonlu elemanlar modeli ve yükleri farklı açılardan şekil 4.16 ve 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4.16 Eğme modelinin sınır şartları ve yükleri (yan görünüş).

Eğme modelini simüle etmek için çekme modelinde de kullanılan ANSYS ticari sonlu elemanlar yazılım programı kullanılmıştır. Yapıların modellenmesinde lineer 3 boyutlu katı elementler (SOLID 45) seçilmiş ve modelde 12747 düğüm ve 9600 element kullanılmıştır.

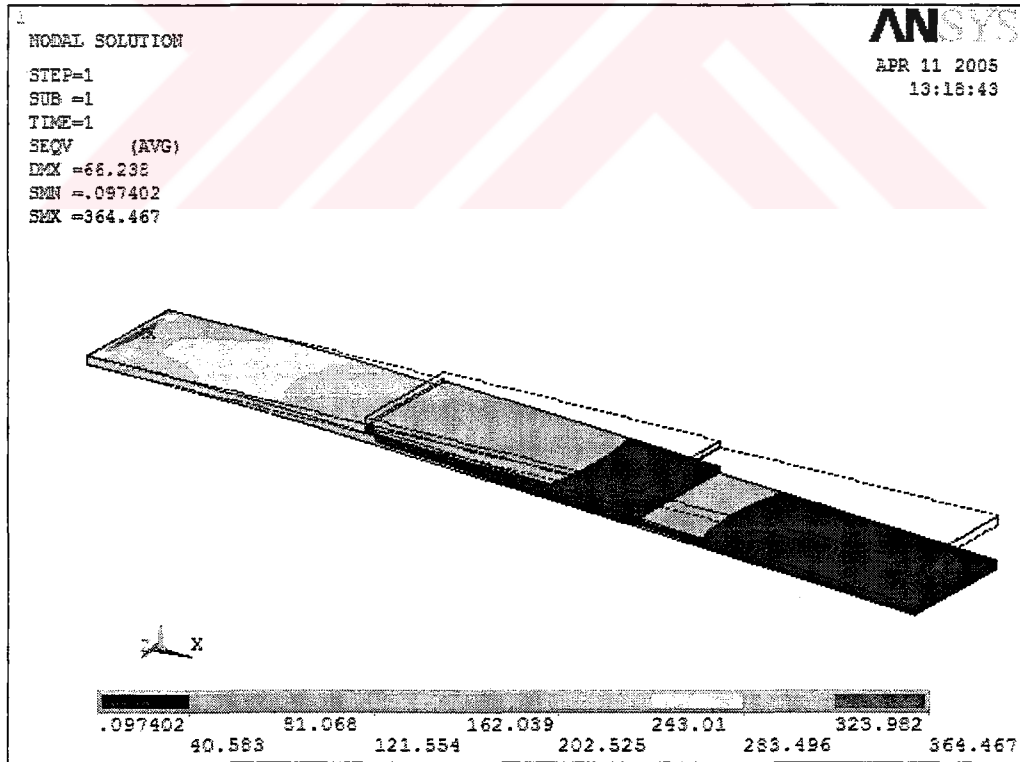


Şekil 4.17 Eğme modelinin sonlu elemanlar modeli (perpektif)

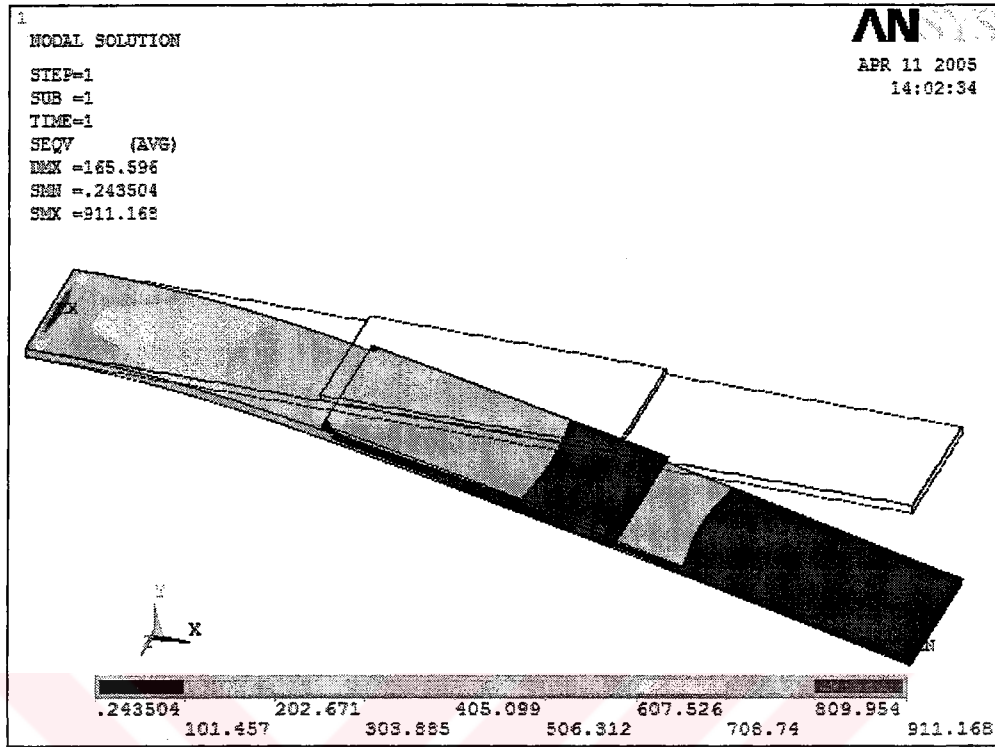
4.3.2.1. Sonuçlar

Modellemeler; geometrik modelin oluşturulması, yer değiştirme faktörlerinin belirlenmesi, sınır şartları ve yüklerin oluşturulmasından sonra tamamlanmıştır. 100 , 250 ve 500 N yayılı eğme yük durumları için birer analiz yapılmıştır. Bu analizler sonucunda maksimum/minimum gerilme, genleme ve deformasyon miktarları belirlenmiştir.

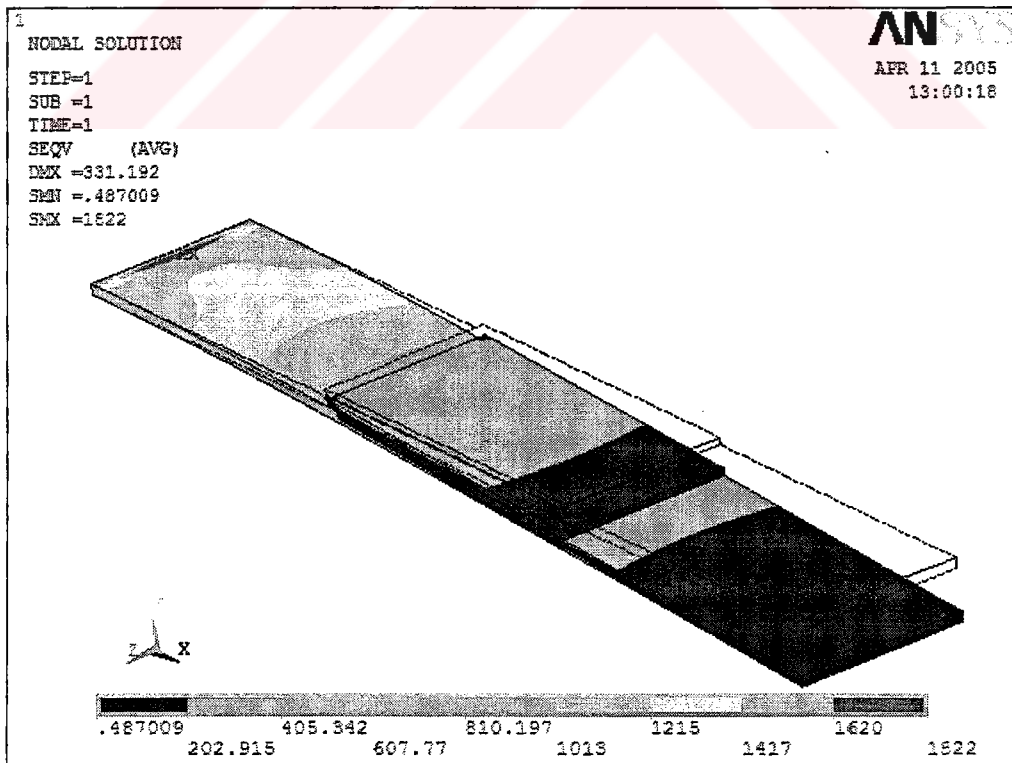
Şekil 4.18'da modelin uç kısmına yapılan 100 N yayılı yük analizi için gerilme dağılımı görülmektedir. Burada görüldüğü gibi eğme sonrası oluşan maksimum gerilme yapının tüm yönlerde tutulduğu sol kenarının orta bölgesinde olduğu görülmektedir ve değeri 364 MPa'dır. Minimum gerilme ise eğme yüklerinin uygulandığı bölgede olduğu görülmektedir. Şekil 4.19 ve şekil 4.20'de, şekil 4.18'e benzer şekilde maksimum ve minimum gerilme bölgeleri aynı yerlerde görülmüştür.



Şekil 4.18 100 N yayılı eğme yükü altında gerilme analizi.

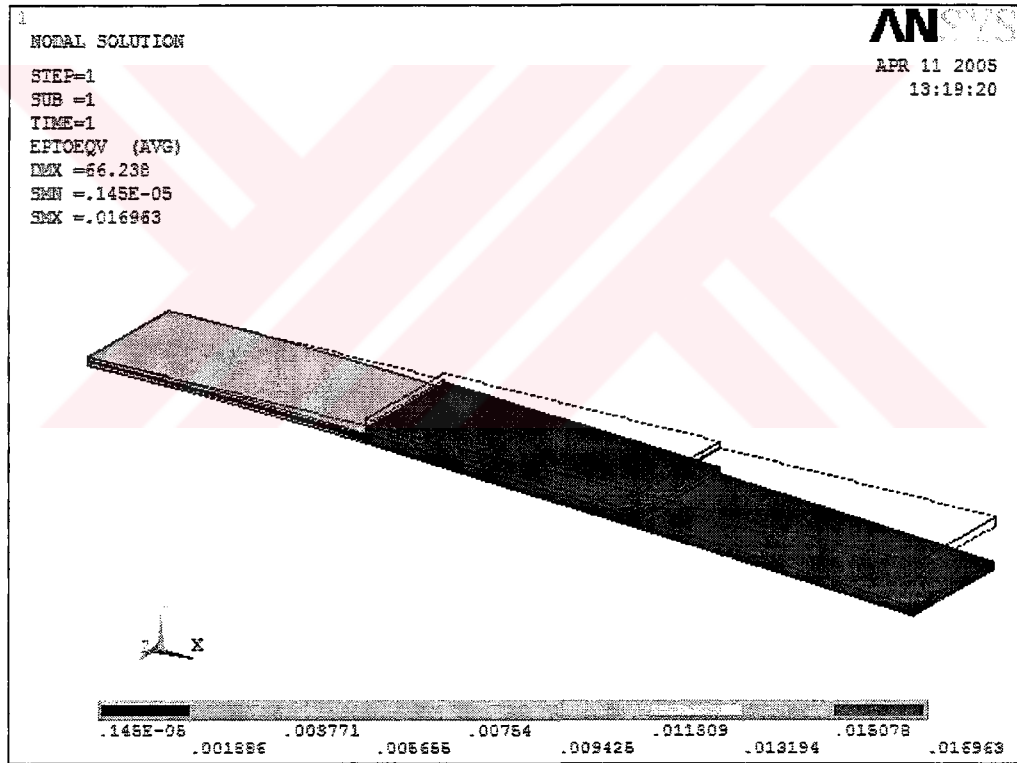


Şekil 4.19 250 N yaylı eğme yükü altında gerilme analizi

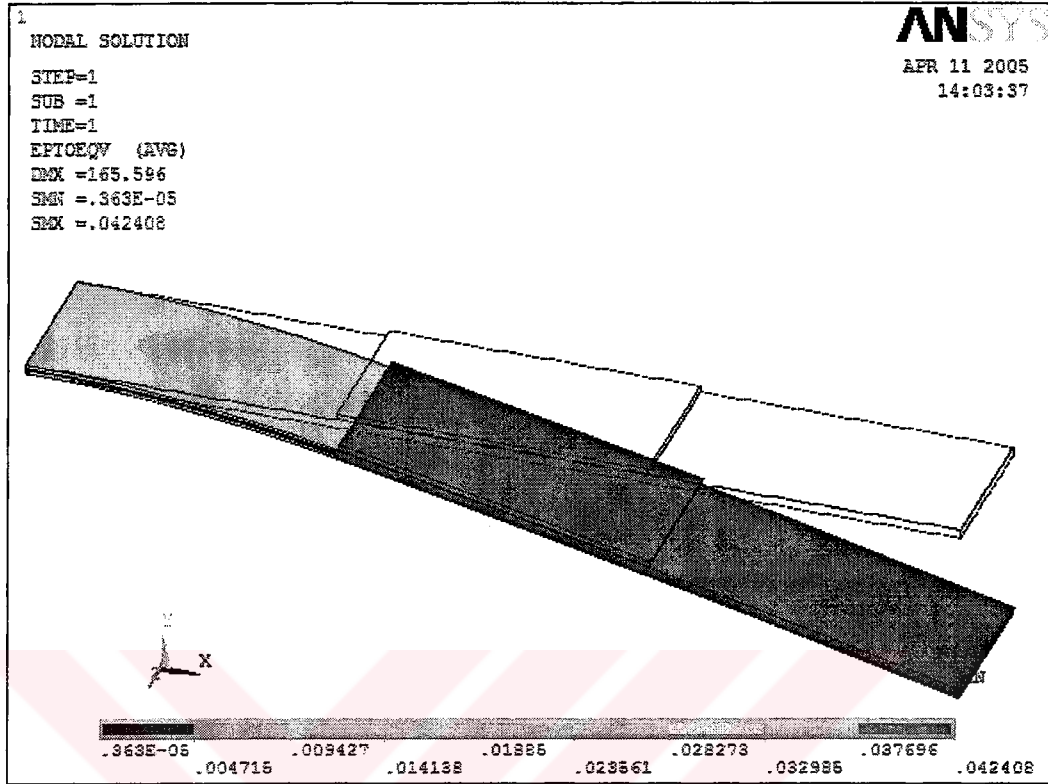


Şekil 4.20 500 N yaylı eğme yükü altında gerilme analizi

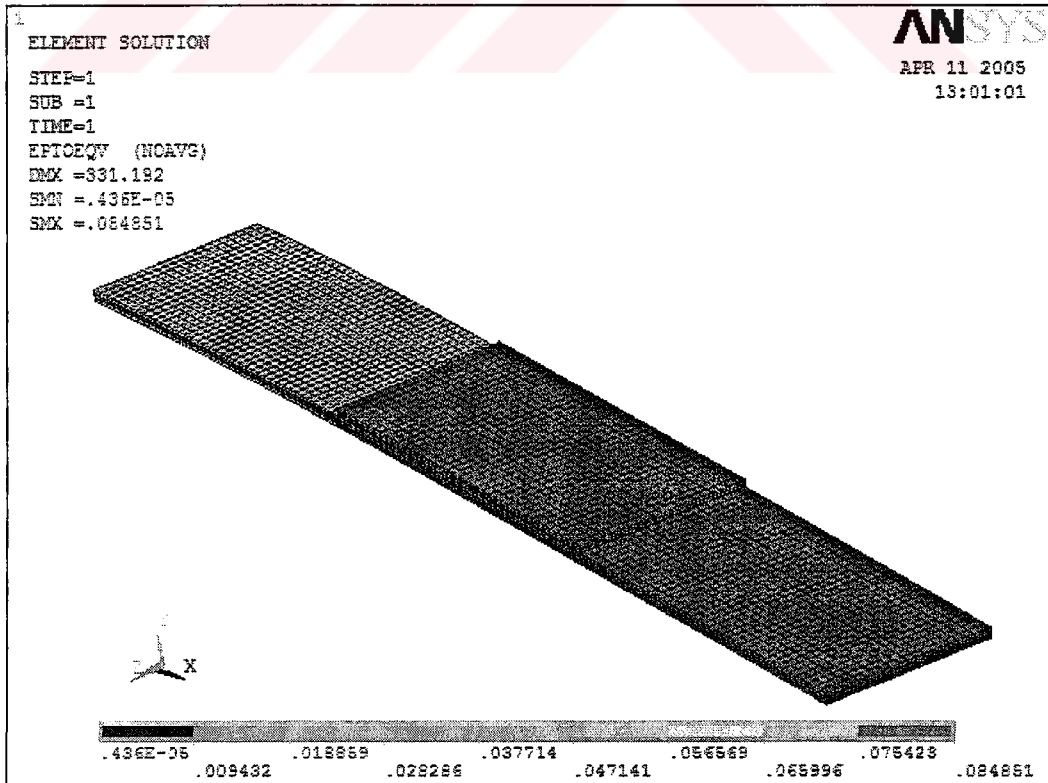
Şekil 4.21'de 100 N yayılı yük analizi için genleme (zorlanma) dağılımı görülmektedir. Burada görüldüğü gibi eğme sonrası oluşan maksimum genlemenin yamanın sol tarafına yakın bölgede olduğu görülmektedir ve değeri 0.016969ϵ 'dur. Minimum genlemenin ise eğme yüklerinin uygulandığı bölge kısmında olduğu görülmektedir. Şekil 4.22 ve şekil 4.23'de, şekil 4.21'a benzer şekilde maksimum ve minimum genleme bölgeleri aynı yerlerde görülmüştür. Bunun sebebinin, çalışmanın doğrusal elastik bölgede yapılması olduğu düşünülebilir. Dolayısıyla şekiller arasında lineer bir artış gözlenmektedir. Genleme değerlerinin yüksek olduğu bölgeler modelin sol kenarına yakın kısımlardır. Sol kenardan yamanın sol ucuna yaklaştıkça gerilme değeri artmaktadır.



Şekil 4.21 100 N yayılı eğme yükü altında genleme (zorlanma) analizi

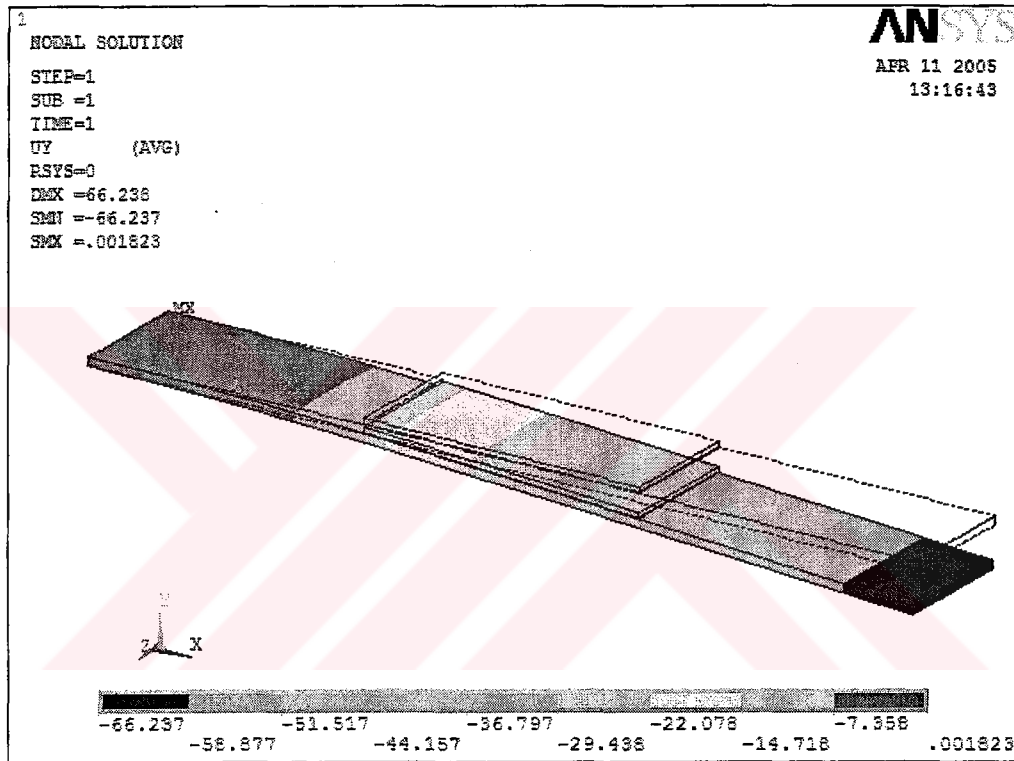


Şekil 4.22 250 N yayılı eğme yükü altında genleme (zorlanma) analizi.



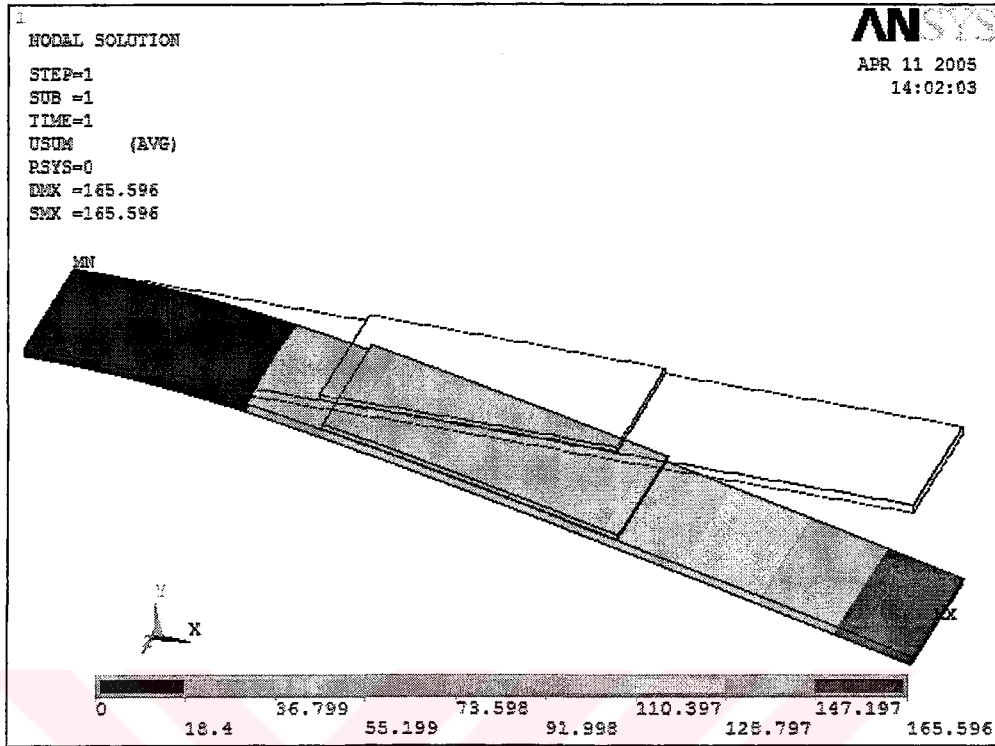
Şekil 4.23 500 N kg yayılı eğme yükü altında genleme (zorlanma) analizi

Şekil 4.24’de modelin uç kısmına yapılan 100 N yayılı yük analizi için deformasyon dağılımı görülmektedir. Burada görüldüğü gibi eğme sonrası oluşan maksimum deformasyon yapının sağ uç kısmında olduğu görülmektedir ve değeri 66 mm’dir. Burada yapının Y eksenine boyunca eğildiği görülmektedir. Şekil 4.24’de yapının ilk halini ve eğme sonrasındaki deformasyon davranışını görmek mümkündür. En az deformasyonun ise yapının sabitlendiği kenarında açıkça görülmektedir.

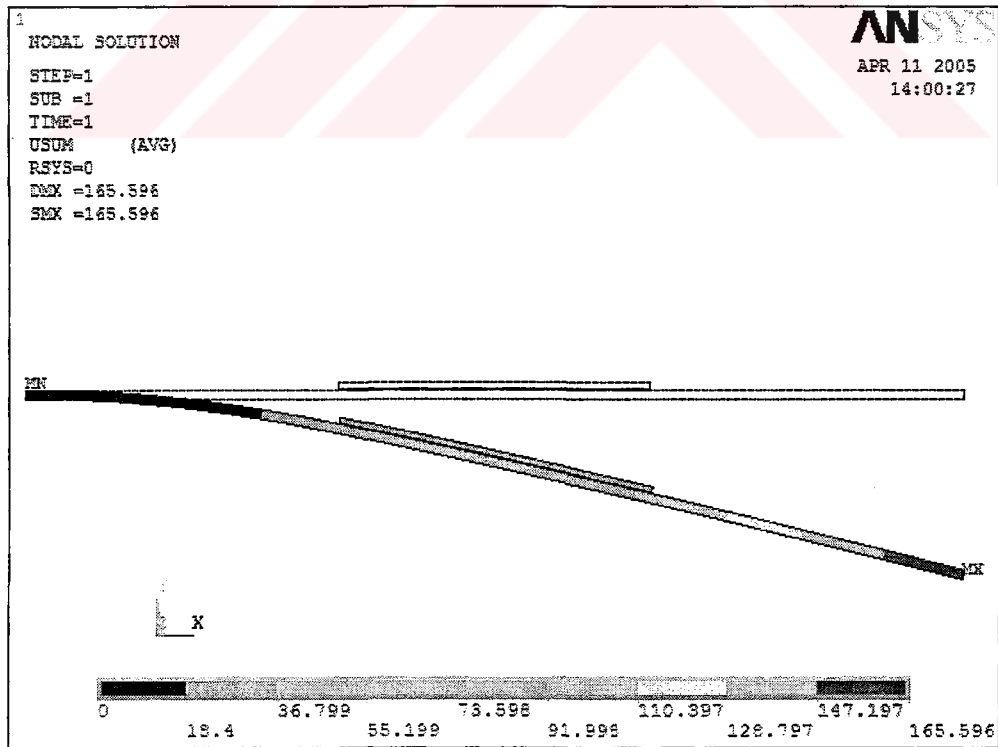


Şekil 4.24 100 N yayılı eğme yükü altında deformasyon analizi

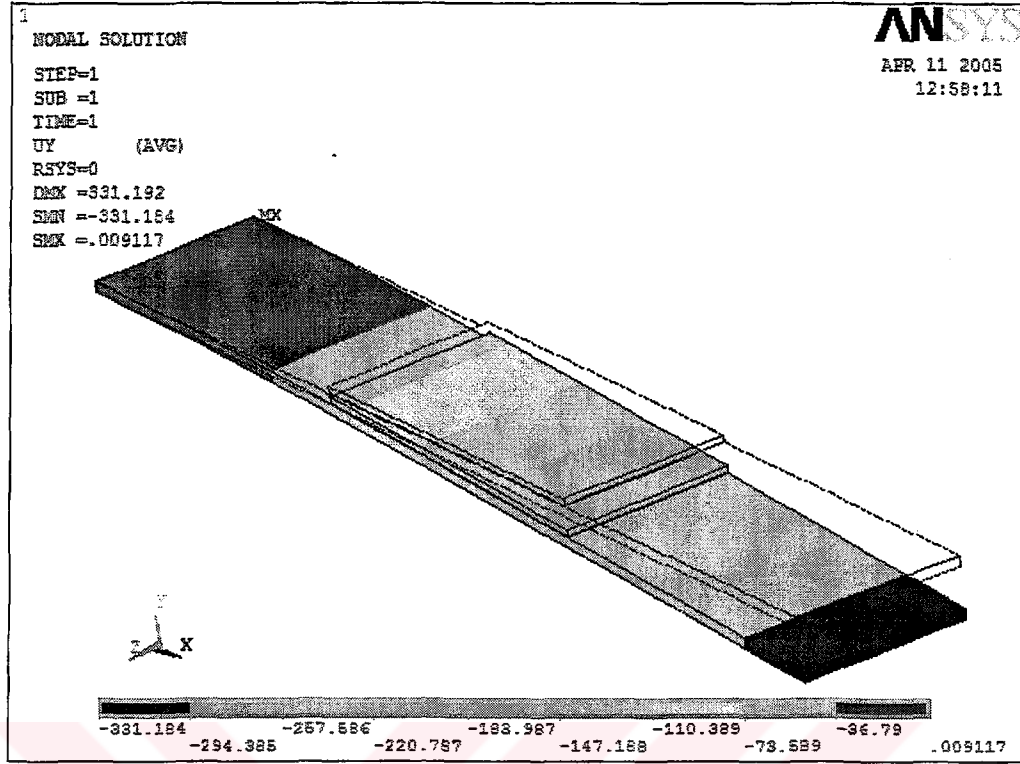
Şekil 4.25 perspektif açıdan ve şekil 4.26 yan görünüşten, 250 N yük karşısında oluşan deformasyon davranışını göstermektedir. Burada görüldüğü gibi “MX” şeklinde belirtilen bölge deformasyonun maksimum olduğu bölgedir. Bu bölgede oluşan maksimum eğilme miktarı 165 mm olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.26’daki yan görünüşten bu deformasyon davranışı gözlemlemek açıkça mümkündür. Şekil 4.27’de 500 N analiz için elde edilen deformasyon dağılımı ise diğer yük analizlerinde görülen deformasyon davranışlarına benzer şekildedir.



Şekil 4.25 250 N yayılı eğme yükü altında deformasyon analizi (perspektif)

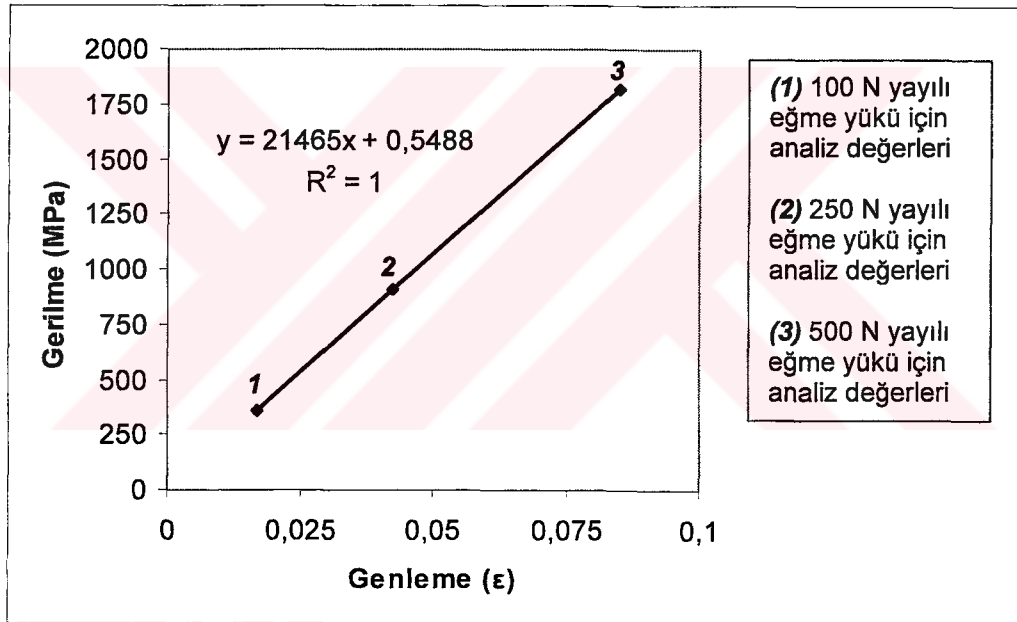


Şekil 4.26 250 N yayılı eğme yükü altında deformasyon analizi (yandan görüntü)



Şekil 4.27 500 N yaylı eğme yükü altında deformasyon analizi

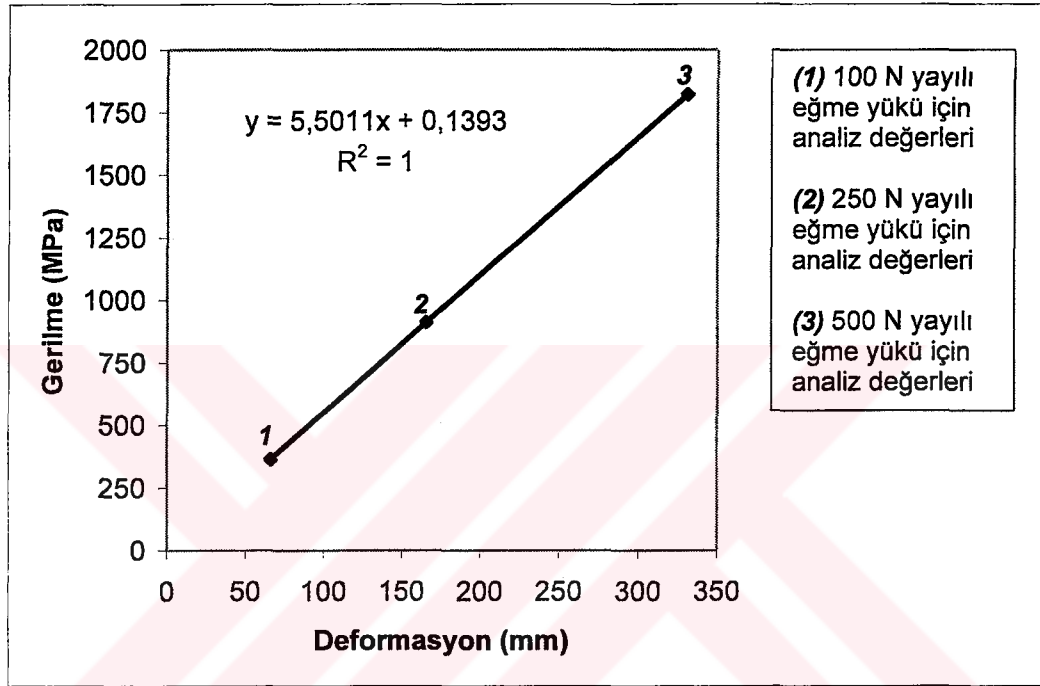
Şekil 4.28’de 100 N, 250 N ve 500 N yayılı eğme yükü analizleri için gerilme-genleme grafiği gösterilmiştir. Grafikte görülen 1. nokta 100 N yayılı eğme yükü analiz için, 2.nokta 250 N yayılı eğme yükü analiz için ve 3.nokta 500 N yayılı eğme yükü analiz için gerilme-genleme (zorlanma) miktarlarını göstermektedir. 100 N eğme yüküne karşı 365 MPa gerilme ve 0.016963 ϵ genleme oluşmuştur. 250 N eğme yükünde 911 MPa gerilme ve 0,0424 ϵ genleme ve 500 N eğme yükünde ise 1822 MPa gerilme ve 0,084851 ϵ genlemenin meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil 4.28’de görüldüğü gibi lineer bir artış gözlenmektedir. Bu artışın sebebi yük miktarları dışında model ölçüleri, yer değiştirme faktörleri, yükün yönü ve sınır şartları aynıdır. Dolayısıyla lineer bir eğim gözlemlenmek normaldir.



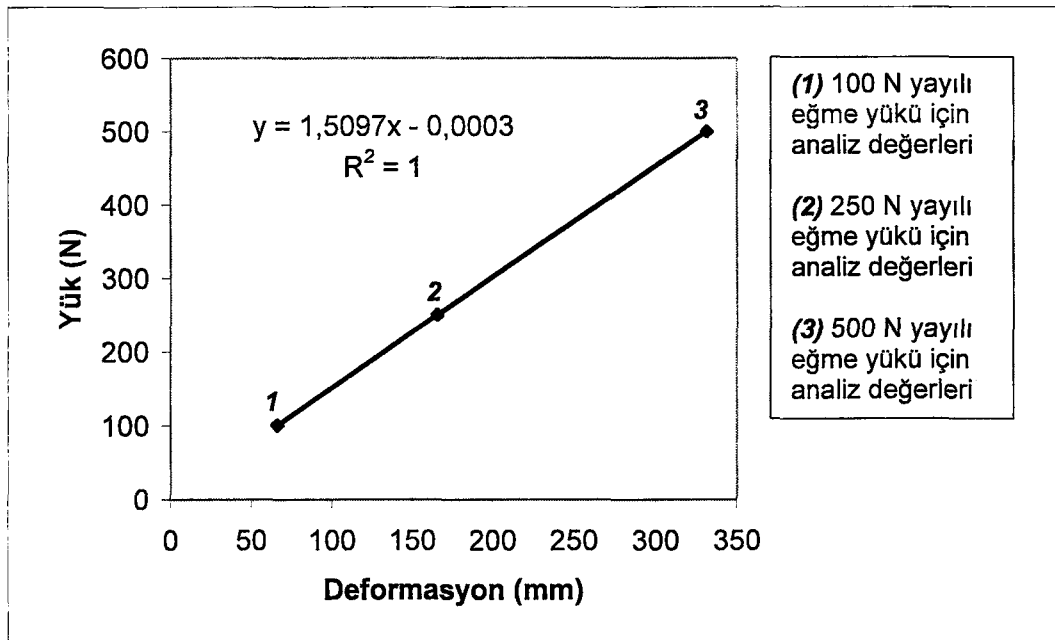
Şekil 4.28 Modelleme analizleri için gerilme-genleme ilişkisi.

Şekil 4.29’da 100 N, 250 N ve 500 N yayılı eğme yükü analizleri için gerilme-deformasyon dağılımı grafiksel olarak gösterilmiştir. 100 N eğme yüküne karşı 365 MPa gerilme karşı Y ekseninde 66,237 mm deformasyon oluşmuştur. 250 N eğme yükünde 911 MPa gerilmeye karşı 165,592 mm deformasyon ve 500 N eğme yükünde ise 1822 MPa gerilmeye karşı 331,184 mm deformasyon meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil 4.29’da görüldüğü gibi lineer bir artış gözlenmektedir.

Şekil 4.30'da 100 N, 250 N ve 500 N yayılı eğme yükü analizleri için yük-deformasyon ilişkisi grafiksel olarak gösterilmiştir. 100 N eğme yüküne karşı Y ekseninde 66,237 mm deformasyon oluşmuştur. 250 N eğme yüküne karşı Y ekseninde 165,592 mm deformasyon ve 500 N eğme yüküne karşı ise Y ekseninde 331,184 mm deformasyon meydana geldiği tespit edilmiştir.

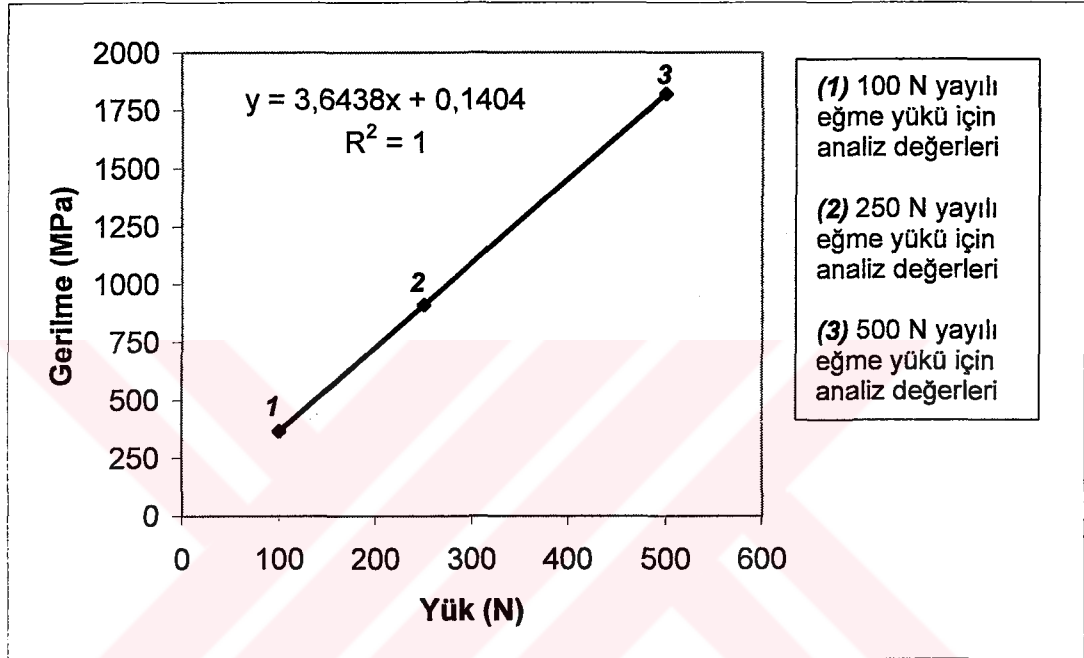


Şekil 4.29 Modelleme analizleri için gerilme-deformasyon ilişkisi.



Şekil 4.30 Modelleme analizleri için yük-deformasyon ilişkisi.

Şekil 4.31’de 100 N, 250 N ve 500 N yayılı eğme yükü analizleri için gerilme-yük ilişkisi grafiksel olarak gösterilmiştir. 100 N eğme yüküne karşı 365 MPa gerilme, 250 N eğme yüküne karşı 911 MPa gerilme, 500 N eğme yüküne karşı ise 1822 MPa gerilme meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil 4.31’de de lineer bir artış gözlenmektedir.



Şekil 4.31 Modelleme analizleri için gerilme-yük ilişkisi.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Genel Sonuçlar

Referans alınan deneysel çalışmanın verileri ışığında yapılan analizlerde yer yer %10'luk hata sınırı altına inildiği, bazı durumlarda ise bu sınırın aşıldığı gözlenmektedir. Oluşan bu farklılıkların, malzeme modeli seçiminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Esasen katmanlı kompozit bir malzeme olan yama, homojen bir yapı olmaktan öte, farklı yönlerde farklı davranış sergileyen bir yapıya sahiptir. Fakat çekme deneyleri tek yönlü yapıldığı için analizlerde kullanılan malzeme modeli de zorunlu olarak homojen seçilmiştir. Zira söz konusu çekme yönündeki gerilme, genleme ve deformasyonlar tespit edilmek istenmiştir. Malzeme modelinin homojen seçilmesi, bazı zaafı da beraberinde getirdiği düşünülmektedir. Bununla birlikte, genel olarak deney sonuçlarıyla belli bir uyum gözlenmektedir. Elastik bölgede çalışmanın beklentileri çoğunlukla karşılanmıştır. Yapılan analizlerin tutarlılığının bir göstergesi de bu olmaktadır. Sonuç itibarıyla yapılan analizler deneylerle karşılaştırıldığında tatminkar bir yaklaşım vermektedir ve benzer çalışmalara nümerik yaklaşımın metotları açısından önemli fikirler verebilir. Çalışmanın amacına uygun olarak deneysel verilerle karşılaştırmak suretiyle modelleme sağlanması gerçekleştirilmiş olmaktadır.

5.2. Öneriler

Nümerik analizler günümüzde deneysel analizlerin kısmen alternatifi olarak kullanılabilmekte ve kullanımını her geçen gün artmaktadır. Bu tür çalışmalar hem zaman hem de maliyet açısından önemli avantajları olduğu için yaygınlaştırılarak geliştirilmelidir. Modelleme sağlanması yaklaşımları elde edildikten sonra nümerik analiz sonuçları kullanılabilir. Bu tezde kullanılan modelleme çalışmaları daha da gerçeğe yakın sonuçlar elde etmek için aşağıdaki şekilde geliştirilebilir.

- Bu konu ile ilgili malzemelere çalışma dönemi boyunca ulaşamadığı için sonraki bir dönemde temin edilerek daha kapsamlı deneyler yapılabilir.
- Elde edilen verilerin kullanıldığı kompozit malzemeyi tam olarak temsil edebilen malzeme modelleri kullanılabilir.
- Hasarlanma eşiğini tayin etmek amacıyla plastik modelleme yapılabilir.
- Katmanlar arasındaki teması modellemek için kontakt opsiyonları kullanılabilir.
- Kabul (shell) model anlayışı alternatif olarak incelenebilir.
- Farklı paket programlar ile analizler yapılarak sonuçlar incelenebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Baker, A.A. and . Jones R.; Bonded repair of aircraft structures Martinus Nijhoff, Dordrecht, Boston Martinus Nijhoff, 1988.
- [2] Helitech Industries Ply Limited. Bonded composite repair technology for metallic aircraft components. Technical report. Australia: Aeronautical Research Laboratory, Defence Science & Technology Organisation.
- [3] Belason B. Boron/epoxy doublers: summary of commercial aircraft applications and activities. In: Don Raizenne, editor Symposium Proceedings: Composite Repair of Aircraft Structures. 1995:2.1–2.33.
- [4] Baker AA., Certification issues: bonded and composite repair. In: Max Davis, editor. Practical adhesive bonding for performance and durability: standards and standardization. 1997:1–20.
- [5] Baker, A.A., Repair efficiency in fatigue-cracked aluminum components reinforced with boron/epoxy patches. *Fatigue & Frac Eng Mater & Struct* 16 7 (1993), pp. 753–765. Abstract-INSPEC
- [6] Baker AA, Hawkes GA, Lumley EJ. Thermal-stress and thermal-fatigue studies. In: Proceedings of the 1978 International Conference on Composite Materials (ICCM2). 1978:649–68.
- [7] Baker AA, Davis MJ, Hawkes GA. Repair of fatigue – cracked aircraft structures with advanced fiber composites: residual stress and thermal fatigue studies. In: Proceedings of the 10th Symposium for Structural Fatigue as a Design Factor. 1979:4.3/1–4.3/30.
- [8] Ong CL and Shen S., The reinforced effect composite patch repairs on metallic aircraft structures, *Int J Adhes Adhes*, 1992; 12: 19-26
- [9] Raizenne MD, Roohi N, Sova M, Brothers MR. Experimental verification of graphite composite patches. Report LTR-ST-2127, National Research Council, Canada, Institute for Aerospace Research, 1998.
- [10] Albat AM. Thermal residual stresses in bonded composite repairs on cracked metal structures. Ph.D. Thesis. University of British Columbia, 1998.
- [11] Barut A., Hanauska J., Madenci E., Ambur D.R.; *Composite Structures*, 55, 3, 2002, 277-294 9

- [12] Djokic D., Johnston A., Rogers A., Lee-Sullivan P., Mrad N.; *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33, 2, 2002, 277-288
- [13] Bouiadjra Bachir B., Belhouari M., Serier B.; *Composite Structures*, 56, 4, 2002, 401-406
- [14] Wang Q.Y., Pidaparti R.M.; *Composite Structures* 56, 2, 2002, 151-155
- [15] Duong A.N., Yu J.; *International Journal of Solids and Structures*, 39, 4, 2002, 1003-1014
- [16] Chiu W.K., Koh Y.L., Galea S.C., Rajic N.; *Composite Structures*, 50, 4, 2000, 433-444
- [17] Xiong Y., Raizenne M.D.; *Canadian Aeronautics and Space Journal Abstracts*, 43, 4 1997, 236-243
- [18] Cheuk P.T., Tong L., Wang C.H., Baker A., Chalkley P.; *Composite Structures*, 57, 1-4, 2002, 109-115
- [19] Findik F., Mrad M., Johnston A.; *Strain monitoring in composite patched structures*, *Composite Structures*, 49, 3, 2000, 331-338.
- [20] Soy U., Caliskan M., Findik F., "A Comparative Study of Adhesively Bonded Composite Patch", *Science and Engineering of Composite Materials*, Vol.11, No:1, Page 69-77, ISSN: 0334-181X, 2004
- [21] Soy U., Caliskan M., Findik F., "A Composite Single-Lap Joint With Fm 300 Adhesive: An Experimental And Analytical Investigation", *Com'03, 5th International Symposium on Advanced Composites*, Corfu Imperial Hotel, Corfu, Greece , 5-7 May, 2003
- [22] Cowdrey S., Ferguson C., Lennox A.F., Mauro P., Neumayer R., Orme B., Müller M., *Loctite Worldwide Design Handbook*, Germany, 1998.
- [23] Dastin, S.J., *Joining and Machining Techniques*, *Handbook of Composites*, Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, 1982.
- [24] Ece, Z., *Fiber Kompozit Malzemelerde Fiber-Matris Etkileşimlerinin Analitik ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi*, Gazi Üniversitesi FBE, Mak Müh. Programı, MSc Thesis, Ankara, 2003.
- [25] Şengül, M.S., *İzotropik Yapıya Sahip Kademeli Millerde Burulma Momenti Etkisinde Oluşan Gerilme Dağılımının Sonlu Elemanlar Metoduyla Analizi*, Gazi Üniversitesi FBE, Mak Müh. Programı, MSc Thesis, Ankara, 1992.
- [26] Çalışkan M., *Modern K/M Obüs Kulesinde Zırh Kalınlığının Bilgisayar Destekli Optimizasyonu*, Doktora Tezi, SAÜ FBE, Konstrüksiyon ABD, Sakarya, 2002

ÖZGEÇMİŞ

Uğur SOY 22.06.1979 tarihinde Sakarya'da doğdu. İlkokul eğitimini Adapazarı Sabihahanım İlkokulu, ortaokulu Sakarya Ali Dilmen Lisesi orta bölümü ve lise eğitimini Sakarya Fatih Endüstri Meslek Lisesinde tamamladı.. Lisans eğitimine 1997 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü'nde başladı ve 2001 yılında iyi bir derece ile mezun oldu. Daha sonra Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı programında yüksek lisansa başladı. 2001 yılından itibaren Sakarya Üniversitesi'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.