



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YAPIŞTIRICILI VE ÇOK PİMLİ KOMPOZİT PLAKALARIN
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakan KÖKSAL

DANIŞMAN

Doç. Dr. Faruk ŞEN

AKSARAY, 2013



**T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YAPIŞTIRICILI VE ÇOK PİMLİ KOMPOZİT PLAKALARIN
ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakan KÖKSAL

DANIŞMAN

Doç. Dr. Faruk ŞEN

AKSARAY, 2013

T.C.
AKSARAY ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ KABUL ve ONAY BELGESİ

Hakan KÖKSAL'ın "Yapıştırıcılı ve Çok Pimli Kompozit Plakaların Analizi" başlıklı lisansüstü tez çalışması, aşağıdaki jüri tarafından Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Doç. Dr. Faruk ŞEN (Muğla Sıtkı Koçman Üniv.)



Üye : Doç. Dr. Mustafa KAYA (Aksaray Üniv.)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Semih BENLİ (Aksaray Üniv.)



Tezin Savunulduğu Tarih : 23.08.2013

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu' nun tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Selçuk REİS
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Kompozit ürünler günümüzde mühendisler ve tasarımcılar tarafından, sunduğu çeşitli avantajlar sebebiyle kabul görmektedir. Kompozitlerin sağladığı avantajların daha iyi anlaşılması mühendisler ve tasarımcıların işlerinin kolaylaştırmaktadır. Mühendislik malzemeleri arasında yüksek mukavemet değerlerine sahip kompozit malzemeler, darbe, basınç, çekme, eğilme ve sıcaklık dayanımı gibi değerlerin sağlanmasına yönelik üretilebilirler. Geleneksel malzemelerin aksine, kompozit malzemeler yapının tasarım beklentilerine uygun özelliklerde üretilebilir. Kompozit malzemeler günümüzde, hava araçları, denizaltılar, otomobiller, kimyasal işlem ekipmanları, spor araçları, tıbbi protezler, alt yapı sistemleri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum ve çelik gibi yaygın olarak kullanılan geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında, hafiflik, uzun yorulma ömrü, iyi korozyon dayanımı gibi avantajlı özellikleriyle öne çıkmaktadır. Kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve uygulanması emniyet, ekonomiklik ve ergonomi olarak bir artı sağlayacağı için önemlidir.

Mekanik birleştirmeler ve yapıştırma bağlantıları, malzemelerin birleştirilmelerinde eskiden beri sıklıkla kullanılan yöntemlerdendir. Bağlantılarda karma bağlantının tercih edilmesinin nedeni pim bağlantısı ve yapıştırıcı bağlantısının avantajlarından birlikte yararlanılması ve tek baslarına kullanıldıklarında meydana gelen dezavantajlarının önlenmek istenmesidir. Örneğin yapıştırıcı bağlantısı ile gerilmenin tüm yüzeye yayılması, pim bağlantısında delik civarında meydana gelen gerilme yığılmalarının azaltılmak istenmesidir. Ayrıca, iki metal matrisli kompozit plaka arasını dolduran yapıştırıcının, iki kompozit plaka arasındaki aşınma ve korozyonu önleyici etkisi de çok önemlidir.

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'na Yüksek Lisans Tezi olarak sunulan “Yapıştırıcılı ve Çok Pimli Kompozit Plakalardaki Gerilmelerin Analizi” konulu çalışma ile kompozit malzemeler alanında yapılan çalışmalara bir katkı sağlanması hedeflenmektedir. Çalışma Kompozit Malzemeler, Yapıştırıcılı ve Pimli Bağlantılar, Sonlu Elemanlar Metodu, Kaynak Özetleri, Malzeme ve Yöntem, Bulgular ve Sonuçlar olmak üzere yedi bölümden oluşmaktadır.

TEŞEKKÜR

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı'na yüksek lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada başta danışmanım Doç. Dr. Faruk ŞEN (Muğla Sıtkı Kocaman Üniversitesi) olmak üzere emeği geçen herkese sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca, her zaman yanımda olan anneme, babama ve eşime teşekkürü bir borç bilirim, bu tez sizin eserinizdir.

Sevgili Oğluma....

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa No
ÖNSÖZ.....	i
TEŞEKKÜR.....	ii
ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER DİZİNİ.....	xii
1. KOMPOZİT MALZEMELER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Kompozit Malzemeler.....	1
1.3. Kompozit Malzeme Türleri ve Sınıflandırılması.....	3
1.3.1. Yapılarını Oluşturan Malzemelere Göre Sınıflandırma.....	3
1.3.1.1. Plastik – Plastik Kompozitler.....	3
1.3.1.2. Plastik – Cam Elyaf Kompozitler.....	3
1.3.1.3. Plastik – Metal Fiber Kompozitler.....	4
1.3.1.4. Plastik – Köpük Kompozitler.....	4
1.3.1.5. Metal Matrisli Kompozitler.....	4
1.3.1.5.1. MMK’ler için matris malzemeler.....	5
1.3.1.5.2. MMK’ler için takviye elemanları.....	5
1.3.1.6. Seramik Kompozitler.....	6
1.3.1.7. Kağıt.....	7
1.3.2. Yapı Bileşenlerinin Şekline Göre	7
1.3.2.1. Partikül Esaslı Kompozitler.....	7
1.3.2.2. Lamel Esaslı Kompozitler.....	8
1.3.2.3. Fiber Esaslı Kompozitler.....	8
1.3.2.4. Dolgu Kompozitler.....	9
1.3.2.5. Tabaka Yapılı Kompozitler.....	10
1.4. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları.....	11
1.5. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları.....	14
1.5.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları.....	14
1.5.2. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları.....	15
1.6. Kompozit Malzemeler İçin Hasar Analizi.....	16
2. YAPIŞTIRICILI VE PİMLİ BAĞLANTILAR.....	19
2.1. Giriş.....	19
2.2. Yapıştırma Bağlantıları.....	19
2.2.1. Yapıştırma Bağlantılarının Avantajları.....	22

2.2.2. Yapıştırma Bağlantılarının Dezavantajları.....	22
2.2.3. Yapıştırıcı Çeşitleri.....	23
2.2.3.1. Kimyasal Durumlarına Göre Yapıştırıcılar.....	24
2.2.3.1.1. Epoksiler.....	24
2.2.3.1.2. Poliüretan.....	25
2.2.3.1.3. Akrilikler.....	25
2.2.3.1.4. Siyanoakrilikler.....	26
2.2.3.1.5. Anerobikler.....	26
2.2.3.1.6. Silikonlar.....	27
2.2.3.1.7. Fenolikler.....	27
2.2.3.2. Fiziksel Durumuna Göre Yapıştırıcılar.....	27
2.2.3.2.1. Sıcak Eriyikler.....	28
2.2.3.2.2. Kauçuk Yapıştırıcılar.....	28
2.2.3.2.3. PVA 'lar.....	28
2.2.4. Yapıştırıcı Bağlantılarının Endüstride Kullanım Alanları.....	28
2.2.5. Yapıştırıcı Bağlantılarda Oluşan Hasar Tipleri.....	31
2.3. Pim Bağlantıları.....	33
2.3.1. Pim Bağlantılarının Avantajları ve Dezavantajları.....	33
2.4. Karma Bağlantılar.....	34
3. SONLU ELEMENLAR METODU.....	37
3.1. Giriş.....	37
3.2. Temel Bilgiler.....	37
3.3. Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulanışı.....	38
3.4. Sonlu Eleman Tipleri.....	38
3.5. Sonlu Elemanların Formulasyonu.....	40
3.6. Sonlu Elemanlar Metodunun Avantajları.....	46
3.7. Sonlu Elemanlar Metodunun Dezavantajları.....	47
4. KAYNAK ÖZETLERİ.....	48
5. MALZEME VE YÖNTEM.....	64
5.1. Giriş.....	64
5.2. Karma Bağlantının Tanımlanması.....	64
5.3. Tasarımda Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	65
5.4. Sonlu Elemanlar Modeli.....	66
6. BULGULAR.....	77
6.1. Giriş.....	77
6.2. Sadece Çekme Yüğü Etkisiyle Elde Edilen Bulgular.....	77
6.3. Sadece Sıcaklık Yüğü Etkisiyle Elde Edilen Bulgular.....	98
6.4. Çekme Yüğü ve Sıcaklık Yüğünün Birlikte Uygulanmasıyla Elde	

Edilen Bulgular.....	118
7. SONUÇLAR.....	146
KAYNAKLAR.....	152
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YAPIŞTIRICILI VE ÇOK PİMLİ KOMPOZİT PLAKALARDAKİ GERİLMELERİN ANALİZİ

Hakan KÖKSAL

T.C.

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Faruk ŞEN

Bu çalışmanın amacı, karma bağlantı yapılarak birleştirilmiş iki kompozit plakada uygulanan farklı çekme yükleri ve farklı uniform sıcaklıklar etkisiyle meydana gelen gerilmeler analiz edilmesidir. Karma bağlantı, dört adet pim ve yapıştırıcının birlikte kullanılması ile meydana getirilmiştir. Analizde sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılmıştır. Modelleme üç boyutlu olarak yapılmıştır. Modelleme ve çözümde, sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS programından yararlanılmıştır. Bu karma bağlantı üç farklı test koşulları ile analiz edilmiştir. İlk olarak oluşturulan modele sadece çekme yükü uygulanmıştır, daha sonra sadece sıcaklık etkisindeki gerilmeler analiz edilmiştir. Son bölümde ise hem çekme yükü hem de uniform sıcaklık yükü aynı anda uygulanmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre, gerilmeler delik çevresinde yoğunlaşmıştır. Dolayısıyla, karma bağlantı üzerinde başlayacak bir hasarın delik çevresinden başlayacağı anlaşılmıştır. Gerilmelerin değeri, üniform sıcaklık artışıdaki miktara bağlı olarak artmaktadır.

2013, 160 Sayfa

Anahtar kelimeler : Yapıştırma bağlantı, Pim bağlantısı, Karma bağlantı, Isıl gerilme, FEM, ANSYS

ABSTRACT

Master of Science Thesis

ANALYSIS OF STRESSES IN ADHESIVELY BONDED AND PINNED METAL MATRIX COMPOSITE SHEETS

Hakan KÖKSAL

T.R.

Aksaray University Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Faruk ŞEN

The aim of this study stresses created with three different methods effect in two composite plates bonded together with hybrid joint were analyzed. The hybrid joint was created using both four pins and adhesive with together. In analysis, the finite element method (FEM) was used. Modeling was done as three dimensional. During both modeling and solution processes, it was utilized from ANSYS software which is a perfect finite element code. First of all only tensile load was applied on created model and than only uniform temperature load was performed on same model. Ultimately both tensile load and uniform temperature load were applied on the model. According to obtained analysis results, thermal stresses were concentrated around pin hole. Therefore, it is understand that any failure may be start from pin hole zone firstly. The magnitudes of stresses were increased by increasing uniform temperature.

2013, 160 Pages

Key Words: Adhesive joints, Pinned joints, Hybrid joints, Thermal stres, FEM, ANSYS.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1.1. Tanecikli kompozitlerin şematik gösterimi	8
Şekil 1.2. Değişik tipte fiber kompozitler	9
Şekil 1.3. İnce tabakanın başlıca iki tipi	10
Şekil 1.4. Tabakalı kompozitlerin yapıştırılmamış görüntüsü	11
Şekil 1.5. Boeing 787 Dreamliner tipi uçakta kullanılan malzeme oranları. ...	17
Şekil 1.6. Cıvata bağlantılarında görülen temel hasar tipleri	17
Şekil 2.1. Yapıştırma bağlantı geometrileri	20
Şekil 2.2. Otomobilde yapıştırıcıların kullanıldığı alanlar	29
Şekil 2.3. Peugeot yarış arabasının tahrik milinde yapıştırıcı kullanımı.....	30
Şekil 2.4. Uçak yapılarındaki sandviç panellerde yapıştırıcı kullanımı	31
Şekil 2.5. Uçaklarda yapıştırıcının kullanıldığı bölgeler	31
Şekil 2.6. Temel hasar tipleri	32
Şekil 3.1. Üç boyutlu gerilme durumu	40
Şekil 5.1. Modellenen karma bağlantı	65
Şekil 5.2. Modellenen karma bağlantı ölçüleri	65
Şekil 5.3. Çok delikli karma bağlantının üç boyutlu yarım modeli	67
Şekil 5.4. Üç boyutlu çok delikli karma bağlantıya sınır şartlarının uygulanması.....	68
Şekil 5.5. SOLID 185 eleman tipi	70
Şekil 5.6. Karma bağlantının tamamının sonlu elemanlar ağ yapısı.....	72
Şekil 5.7. Karma bağlantıdaki her bir kompozit plakanın sonlu elemanlar ağ yapısı.....	74
Şekil 5.8. Karma bağlantıdaki yapıştırıcı tabakasının sonlu elemanlar ağ yapısı.....	75
Şekil 5.9. Karma bağlantıdaki üst kompozit plakanın üstten görünüşünün ağ yapısı.....	76
Şekil 6.1. Farklı değerlerde çekme yükü altında meydana gelen gerilmeler ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$)	79
Şekil 6.2. Farklı çekme yükleri altında x- yönünde hesaplanan normal gerilmeler (σ_x)	82
Şekil 6.3. Farklı çekme yükleri altında y- yönünde hesaplanan normal	

	gerilmeler (σ_y)	85
Şekil 6.4.	Farklı çekme yükleri altında z- yönünde hesaplanan normal gerilmeler (σ_z)	87
Şekil 6.5.	Farklı değerlerde çekme yükü altında meydana gelen kayma gerilmeleri.....	89
Şekil 6.6.	Farklı çekme yükleri altında hesaplanan kayma gerilmeleri (τ_{xy}) ...	92
Şekil 6.7.	Farklı çekme yükleri hesaplanan kayma gerilmeleri (τ_{yz})	95
Şekil 6.8.	Farklı çekme yükleri altında hesaplanan kayma gerilmeleri (τ_{xz}) ...	97
Şekil 6.9.	Uniform sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan normal gerilmeler (σ_x , σ_y , σ_z)	100
Şekil 6.10.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile x- yönünde hesaplanan normal gerilmeler.....	103
Şekil 6.11.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile y- yönünde hesaplanan normal gerilmeler.....	105
Şekil 6.12.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile z- yönünde hesaplanan normal gerilmeler.....	108
Şekil 6.13.	Uniform sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan kayma gerilmeleri...	110
Şekil 6.14.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile xy- yönünde hesaplanan kayma gerilmeleri (τ_{xy})	113
Şekil 6.15.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile yz- yönünde hesaplanan kayma gerilmeleri (τ_{yz})	115
Şekil 6.16.	Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile xz- yönünde hesaplanan kayma gerilmeleri (τ_{xz})	118
Şekil 6.17.	Farklı çekme yükleri ve sıcaklıklar altında x-yönündeki normal gerilme değerleri.....	122
Şekil 6.18.	Farklı çekme yükleri ve sıcaklıklar altında y-yönünde normal gerilme değerleri.....	123
Şekil 6.19.	Farklı çekme yükleri ve sıcaklıklar altında z-yönünde normal gerilme değerleri.....	124
Şekil 6.20.	80 N çekme yükü altında 55C° ve 95C° sıcaklıklarda x- yönünde hesaplanan normal gerilmeler.....	127
Şekil 6.21.	240 N çekme yükü altında 55C° ve 95C° sıcaklıklarda x- yönünde hesaplanan normal gerilmeler.....	128
Şekil 6.22.	80 N çekme yükü altında 55C° ve 95C° sıcaklıklarda y- yönünde	

	hesaplanan normal gerilmeler.....	129
Şekil 6.23.	240 N çekme yükü altında 55C° ve 95C° sıcaklıklarda y-yönünde hesaplanan normal gerilmeler.....	130
Şekil 6.24.	80 N çekme yükü altında 55C° ve 95C° sıcaklıklarda z- yönünde hesaplanan normal gerilmeler.....	131
Şekil 6.25.	240 N çekme yükü altında 55C° ve 95C° sıcaklıklarda z-yönünde hesaplanan normal gerilmeler.....	132
Şekil 6.26.	Farklı çekme yükleri ve sıcaklıklar altında xy-yönündeki kayma gerilme değerleri.....	136
Şekil 6.27.	Farklı çekme yükleri ve sıcaklıklar altında yz-yönünde kayma gerilme değerleri.....	137
Şekil 6.28.	Farklı çekme yükleri ve sıcaklıklar altında xz-yönünde kayma gerilme değerleri.....	138
Şekil 6.29.	80 N çekme yükü altında 55C° ve 95C° sıcaklıklarda xy-yönünde hesaplanan kayma gerilmeleri.....	140
Şekil 6.30.	240 N çekme yükü altında 55C° ve 95C° sıcaklıklarda xy-yönünde hesaplanan kayma gerilmeleri.....	141
Şekil 6.31.	80 N çekme yükü altında 55C° ve 95C° sıcaklıklarda yz- yönünde hesaplanan kayma gerilmeleri.....	142
Şekil 6.32.	240 N çekme yükü altında 55C° ve 95C° sıcaklıklarda yz-yönünde hesaplanan kayma gerilmeleri.....	143
Şekil 6.33.	80 N çekme yükü altında 55C° ve 95C° sıcaklıklarda xz- yönünde hesaplanan kayma gerilmeleri.....	144
Şekil 6.34.	240 N çekme yükü altında 55C° ve 95C° sıcaklıklarda xz-yönünde hesaplanan kayma gerilmeleri.....	145
Şekil 7.1.	Farklı yönlerdeki bulunan maksimum çekme formundaki gerilimler	150
Şekil 7.2.	Farklı yönlerdeki bulunan maksimum basma formundaki gerilimler	150

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 2.1. Siyanoakrilat yapıştırıcılar için ticari örnekler	26
Çizelge 2.2. Anaerobik yapıştırıcılar için ticari örnekler.....	27
Çizelge 5.1. Metal matris kompozit malzemenin mekanik özellikleri.....	66
Çizelge 5.2. Epoksi yapıştırıcının mekanik özellikleri.....	66
Çizelge 6.1. Farklı değerlerde çekme yükü uygulanmış ve bu çekme yüklerinin tesiriyle meydana gelen gerilmeler (σ_x , σ_y , σ_z)	78
Çizelge 6.2. Farklı çekme yükleri için elde edilen kayma gerilmeleri.....	88
Çizelge 6.3. Uniform sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan normal gerilmeler (σ_x , σ_y , σ_z)	98
Çizelge 6.4. Uniform sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan kayma gerilmeleri	109
Çizelge 6.5. Farklı çekme yükü ve sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan normal gerilmeler (σ_x , σ_y , σ_z)	119
Çizelge 6.6. Farklı çekme yükü ve sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan kayma gerilmeleri.....	134
Çizelge 7.1. Sadece çekme yükü, sadece sıcaklık ve her iki yükleme koşulundaki maksimum gerilmelerin tespit edildiği çekme ve sıcaklık değerleri.....	149

SİMGELER DİZİNİ

E	Elastisite Modülü (GPa)
ν	Poisson oranı
α	Isıl genleşme katsayısı (1/°C)
σ_x	x doğrultusundaki normal gerilme
σ_y	y doğrultusundaki normal gerilme
σ_z	z doğrultusundaki normal gerilme
τ_{xy}	xy düzlemindeki kayma gerilmesi
τ_{yz}	yz düzlemindeki kayma gerilmesi
τ_{xz}	xz düzlemindeki kayma gerilmesi
ΔT	Sıcaklık farkı
Q	Yapının yer değiştirme vektörü
K	Eleman katılık matrisi
f_i	Eleman sıcaklık kuvvet vektörü
f_b	Eleman cisim kuvvet vektörü
f_z	Eleman yüzey kuvvet vektörü
P	Yoğunluk (kg/m ³)
G_{12}	Kayma modülü (MPa)
N	Eleman katılık matrisi
K	Eleman katılık matrisi

BÖLÜM I

KOMPOZİT MALZEMELER

1.1. Giriş

Bu bölümde kompozit malzemeler, kompozit malzemelerin tanımı, kompozit malzemelere duyulan gereksinim, kompozit malzemelerin sınıflandırılması, günümüzde kompozit malzemelerin kullanım alanları ve son olarak kompozit malzemelerin hasarları ile ilgili bilgiler verilmiştir.

1.2. Kompozit Malzemeler

İki ya da daha fazla malzemenin, en iyi özelliklerini bir araya getirmek ya da ortaya yeni bir özellik çıkarmak için mikro veya makro seviyede heterojen karışımıyla oluşan malzemeye bileşik ya da kompozit malzeme denir. Kompozit malzeme, doğrudan talep edilen maksatla kullanılmayan en az iki ayrı malzemeden spesifik bir özelliği elde edebilmek için bu malzemelerin belli şartlar altında ve belli bir oranda fiziksel olarak kombine edilmesi ile elde edilir (Deniz, 2005).

İstenen amaç için tek başlarına uygun olmayan farklı iki veya daha fazla malzemeyi istenen özellikleri sağlayacak şekilde belirli şartlar ve oranlarda fiziksel olarak, makro yapıda bir araya getirilerek elde edilen malzemeye kompozit malzeme denir. İçyapıları çıplak gözle incelendiğinde (makroskobik muayene) yapı bileşenlerinin seçilip ayırt edilmesi mümkündür. Yapılarında birden fazla sayıda fazın yer aldığı klasik alaşımlar ise makro ölçüde homojen olmalarına rağmen mikro ölçüde (mikroskobik muayene ile seçilebilen) heterojen malzemelerdir. Kompozit malzemelerde yapıyı oluşturan bileşenler birbiri içinde çözünmezler, kimyasal olarak inert davranırlar. Ancak özellikle metalik sistemlerde düşük oranlarda bile olsa, bir miktar çözünme bileşenler arasında kompozit özelliklerini etkileyebilen ara yüzey reaksiyonları görülebilir. Kompozit malzemelerde çekirdek olarak kullanılan bir fiber malzeme bulunmakta, bu malzemenin çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris malzeme bulunmaktadır. Bu iki malzeme grubundan, fiber malzeme kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak

ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin bir amacı da fiber malzemeleri yük altında bir arada tutabilmek ve yükü lifler arasında homojen olarak dağıtmaktır. Böylece fiber malzemelerde plastik deformasyon gerçekleştiğinde ortaya çıkacak çatlak ilerlemesi olayının önüne geçilmiş olur (URL-1).

Kullanımda alışılağelmış malzemelerden kompozit malzemelere geçişin başlıca nedenlerinden biri, kompozitlerin standart hafif/yüksek mukavemet özellikli malzemelere göre daha hafif/daha yüksek mukavemet alternatifi getirmesidir. Buna ilave olarak üretimlerindeki esneklik, iyi korozyon ve aşınma dirençleri, uzun yorulma ömürleri ve düşük ısı iletkenlikleri ile birçok uygulama alanlarında konvensiyonel malzemelere göre üstünlük sağlamaktadırlar (Durman, 1991).

Uygulamada, kompozit malzeme üretiminde genellikle aşağıdaki özelliklerden birinin veya bir kaçının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu özelliklerin başlıcaları (URL-2);

- Mekanik dayanım, basınç, çekme, eğilme, çarpma dayanımı,
- Yorulma dayanımı, aşınma direnci,
- Korozyon direnci,
- Kırılma tokluğu,
- Yüksek sıcaklığa dayanıklılık,
- Isı iletkenliği veya ısı direnç,
- Elektrik iletkenliği veya elektriksel direnç,
- Akustik iletkenlik, ses tutuculuğu veya ses yutuculuğu,
- Rijitlik,
- Ağırlık,
- Görünüm ve benzeri özellikler şeklinde sıralanabilir.

Ayrıca özellikle dolaylı olarak malzemenin birim maliyeti de düşürülmektedir. Bu amaca yönelik olarak kompozit malzeme üretiminde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Hepsinde değişmeyen temel ilke, bileşenlerin zayıf yönlerinin amaç doğrultusunda iyileştirilerek daha nitelikli bir yapının elde edilmesidir. Bir kompozitin yapısında genelde “matris” olarak kabul edilen sürekli bir faz ile onun içinde dağılı değişik özelliklere sahip donatı fazından meydana gelmektedir (URL-2).

1.3. Kompozit Malzeme Türleri ve Sınıflandırılması

Kompozit Malzemeleri, yapılarını oluşturan malzemeler ve yapı bileşiklerinin şekillerine göre iki şekilde sınıflandırmak mümkündür. Matris malzemesinin türüne göre bir gruplandırma yapılabildiği gibi yapı bileşiklerinin şekillerine göre de sınıflandırılabilir (Çubukçuoğlu, 2005).

1.3.1. Yapılarını Oluşturan Malzemelere Göre Sınıflandırma

1.3.1.1. Plastik-plastik kompozitler

Fiber olarak kullanılan plastik yük taşıyıcı bir özelliğe sahip iken, matris olarak kullanılan plastik esneklik verici, darbe emici ya da istenen amaca göre kullanılan plastiğin özelliğine sahip olmaktadır. Kullanılabilecek plastik türleri de iki ayrı grupta incelenebilir:

Termoplastikler : Bu tür plastikler ısıtıldığında yumuşar ve şekillendirildikten sonra soğutulduğunda sertleşir. Bu işlem sırasında plastiğin mikro yapısında bir değişiklik olmaz. Genellikle 5-50 °C arasında kullanılabilirler. Bu gruba giren plastikler naylon, polietilen, polistren, karbonflorür akrilikler, selülozikler, viniller sayılabilir.

Termoset Plastikler : Bu tür plastikler ise ısıtılıp şekillendirildikten sonra soğutulduklarında artık mikro yapıda oluşan değişim nedeniyle eski yapıya dönüşüm mümkün olmamaktadır. Bu grubun belli başlı plastikleri ise polyesterler, epoksiler, alkitler, aminler olarak verilebilir (URL-1).

1.3.1.2. Plastik–cam elyaf kompozitler

İsteğe göre termoplastikler veya termoset plastikten oluşan matris ve cam liflerin uygun kompozisyonundan üretilmektedir. Mekanik ve fiziksel özellikleri nedeniyle cam lifler birçok durumda metal, asbest, sentetik elyaf ve pamuk ipliği gibi liflere tercih edilebilirler. Ancak cam elyafı kompozitler, büyük kuvvetleri iletmelerine rağmen camın kırılma olmasından dolayı çok düşük dirençlidirler. Bu tür malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri, kullanılan plastik reçineler uygun seçilerek arzu edilen şekle sokulabilir. Plastik reçineler de termoplastik ve termoset türünde olmaktadır. Termoset

plastikler, fiberlerinde düzgün oryantasyonu ile yüksek mukavemete ulaşabilirler. Cam elyaf takviyeleri ile en çok kullanılan plastik reçineler, polyesterlerdir. Polyesterlerinde bu amaçla kullanılan bir çok türü mevcuttur (URL-1).

1.3.1.3. Plastik–metal fiber kompozitler

Endüstride çok kullanılan metal fiber takviyeli plastikten oluşan kompozitler oldukça hafif ve mukavim bir ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu kompozitler, metal fiberlerin (Bakır, Bronz, Alüminyum, Çelik v.s.) polietilen ve polipropilen plastiklerini takviyelendirmesi amacı ile elde edilmekte ve kullanılmaktadır. Özellikle deformasyon yönünden takviyelendirme yaygın olarak kullanılmakta ve iyi bir verim alınmaktadır (URL-1).

1.3.1.4. Plastik–köpük kompozitler

Bu tür kompozitlerde plastik, fiber olarak görev yapmakta; Köpük ise matris, reçine konumunda olmaktadır. Köpükler, hücreli yapıya sahip, düşük yoğunlukta, gözenekli ve doğal halde bulunduğu gibi, büyük kısmı sentetik olarak elde edilmiş hafif maddelerdir. Köpük, hücre yapısına göre sert, kırılğan, yumuşak ya da elastik olabilmektedir. Matris olarak kullanılan bu köpük türleri, kullanılan plastiğin çeşitlenebilmesiyle değişik özellikte kompozitlerin oluşumunu sağlar (URL-1).

1.3.1.5. Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitler (MMK), ana yapıyı metalin oluşturduğu ve takviye elemanı olarak da seramik ya da refrakter bir takviye elemanın kullanıldığı kompozitlerdir. Bu malzemelerin seçiminde hemen hemen hiçbir sınırlama yoktur. Deneysel çalışmalara bakıldığında çok farklı türlerin kullanıldığı göze çarpar. Son 45-50 yıldır MMK'ler ile ilgili pek çok araştırma yapılmış ve literatürde olumlu şekilde yer almıştır. Ancak bunların optimum kullanım şartlarının belirlenmesinde ve pratikte kullanılmasında temel bazı şartlar aranır. Bunları şöyle sıralamak mümkündür (Çalın, 2006);

1. Yüksek elastikiyet modülü.
2. Yüksek mukavemet.
3. Yüksek tokluk ve darbe özellikleri.

4. Yüksek elektrik ve termal iletkenlik.
5. Isılşoklar ve sıcaklık değışikliklerine karşı düşük hassasiyet ve iyi sürünme direnci.
6. Sürekli mükemmel özellik.
7. İyi yüzey dayanımı ve yüzey çatlaklarına karşı düşük hassasiyet.
8. Tasarım, üretim, biçimlendirme, birleştirme ve son işleme bakımından mükemmel teknolojik birikim.

1.3.1.5.1. MMK'ler için matris malzemeler

Matris malzemeleri takviye elemanlarını bir arada tutarak birkaç kritik fonksiyonu da yerine getirirler. Matris malzemeleri takviye elemanlarına yük aktarımı yaparlarken takviye elemanlarını aşınmaya ve korozyona karşı korurlar. Takviye elemanlarından kırılma çatlakların yayılmasını engeller. Matris malzemeleri kayma, basma, akma, sürünme, dielektrik ve termo mekanik özelliklerini de belirler. Kompozit malzemelerde matristen beklenen özellikler başta hafiflik olmak üzere korozyon direnci, kırılma tokluğu ve takviye eleman ile uyumluluğudur. Metal matrisli kompozitlerde matris malzemesi olarak genel olarak Al, Ti, Mg, Cu, Fe, Co, Mo ve Ni gibi metaller kullanılır. Alüminyumun hafifliği, işleme kolaylığı, korozyon direnci ve takviye elemanı ile uyumluluğu, en yaygın kullanılan matris malzemesi olmasında etkili olmuştur. Ancak Alüminyumun ergime sıcaklığının düşük olmasından dolayı yüksek sıcaklıklar da kullanımını sınırlandırmaktadır. Bu durumlarda yüksek sıcaklıklara dayanıklı titanyum ve alaşımları matris malzemesi olarak kullanılır. Ayrıca Mg ve alaşımları da düşük yoğunluklarından dolayı otomotiv ve uzay sanayinde kullanılmaktadır. Mekanik ve fiziksel özellikleri kullanılmasına sınırlama getirmekle birlikte, seramik parçacıklarla kullanılarak bu sınırlamalara rağmen aşınma direnci ve genleşme özellikleri geliştirilerek mühendislik malzemesi olarak kullanılmaktadır (Çalın, 2006).

1.3.1.5.2. MMK'ler için takviye elemanları

Kompozit malzemelerde takviye elemanının görevi yükü taşıyarak matrisin dayanımını arttırmaktır. Kompozitlerde takviye elemanlar tek filament, kısa fiberler (vişkerler), uzun fiberler veya parçacıklar şeklinde bulunabilirler. Yüksek elastikiyet modülü, düşük yoğunluk, yüksek çekme mukavemeti, termal kararlılık, matris malzemesi ile uyumluluk takviye elemanlarından beklenen özelliklerdir. Metal matrisli

kompozitlerde kullanılan başlıca takviye elemanları Al_2O_3 , SiC, B_4C , TiB_2 , TiC, WC, W ve C dir (Çalın, 2006).

1.3.1.6. Seramik kompozitler

Seramik malzemeler, yüksek sıcaklığa ve zor çevre koşullarına karşı dayanıklı olduklarından birçok alanda tercih edilirler. Fakat bu malzemelerin yük taşıma kapasitesi, üretim sırasında oluşan çatlak türünde kusurlarla veya kullanımı gereği içerdiği süreksizliklerle önemli ölçüde azalır. Normal çalışma koşulları altında bu çatlaklar büyüyerek önemli hasarlara yol açarlar. Örneğin alümina seramik malzemesi $1550\text{ }^{\circ}C$ 'ye kadar servis verebildiği halde, bünyesinde bulunan bir çatlağın ilerlemesi için gerekli en büyük gerilme şiddeti çarpanı değeri $K_{Ic}=1-3\text{ MPa}\sqrt{m}$ 'dir. Metallere göre kusurlara çok hassas olan seramiklerin kırılma tokluğunu iyileştirmek üzere çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. Bunun için seramik matris, tek doğrultulu sürekli lifler, kısa lifler veya parçacıklar ile kuvvetlendirilerek tokluk davranışı incelenmiştir. Bu amaçla yapısal ve fonksiyonel nitelikli yüksek teknoloji seramikleri kullanılmaktadır. Başlıcaları Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 , B_4C , CbN, TiC, TiB, TiN, AlN'dür. Bor karbür, silikon karbür, alüminyum nitrat ve alümina en yaygın kullanılan seramik zırh malzemeleridir. Bu bileşikler değişik yapılarda olup amaca göre bir ya da birkaçı beraber kullanılarak CMC'ler elde edilir. Sandviç zırhlar, çeşitli askeri amaçlı parçalar imali ile uzay araçları bu ürünlerin başlıca kullanım yerleridir (Öztürk, 2007).

Seramik kompozitleri iki grupta düşünülebilir (Öztürk, 2007);

1. İkinci faz takviyeli seramik matriks; Bilhassa sitabilize zirkonyanın ilavesi mekanik özelliklere artırmaktadır.
2. Fiber yada whiskers takviyeli seramik matriks.

Çağdaş teknolojinin eriştiği bu aşamada, malzemedeki katman katman, bölge bölge tasarlanarak kullanımda istenen özelliklere uygun malzemeler geliştirilmektedir. Yapısal uygulamalarda seramik malzemelerin monolitik ve kompozit formları kullanılmaktadır. Bu malzemeler kimyasal etkilere ve aşınmaya karşı yüksek dayanım gösterirler. Seramik proseslerde başlıca amaç yüksek kırılma tokluğu elde etmek, mikro çatlakları azaltmak, mekanik özellik değerlerinin dağılımını azaltmaktır. Birçok özellik yüksek mekanik özellik yüksek mekanik özelliklerin gerektiği uygulamalarda malzemelerin güvenilirliklerini direkt etkilemektedir. Seramikler plastik deformasyon

esnasında düşük kırılma tokluklarından dolayı çabuk kırılırlar. Özellikle SiC matriksli kompozitlerden daha yüksek termal genleşme katsayısına sahip olması dikkat çekmiştir. Düşük termal genleşme katsayısı yorulma ömrünü azaltmaktadır. Üstün özellikleri seramik matriksli kompozitlere pek çok araştırmaya konu yapmıştır (Öztürk, 2007).

1.3.1.7. Kağıt

Kompozit malzemelerin günümüzde en çok kullanılan örneklerinden biri olan kağıt, selüloz liflerinin reçine ve yapıştırıcılarla bir arada tutulması ile oluşturulmaktadır. Dolgu maddesi içindeki selüloz lifleri şişerek keçeleşmekte ve ezilip sıcak preslendikten sonra kağıt haline gelmektedir (URL-1).

1.3.2. Yapı Bileşenlerinin Şekline Göre

1.3.2.1. Partikül esaslı kompozitler

Rijitlik ve mukavemette artış sağlayan küçük granül dolgu maddesi ilavesi ile şekillendirilir. Partikül kompozitler, bir veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu makroskobik partiküllerin oluşturdukları malzemelerdir. Makroskobik veya mikroskobik boyutlu partiküller kompozit malzeme özelliklerini farklı şekilde etkilerler. Partikül takviyeli kompozitler fiber ve pul kompozitlerden ayırt eden karakteristik özellikleri, partiküllerin matris içinde tamamen rastgele dağılması ve bu nedenle malzemenin izotropik özellik göstermemesidir. Partikül esaslı kompozitlerin maliyeti düşük ve rijitliği de oldukça iyidir (Çınar ve Elmas, 2007).

Tanecikler, gerçekte herhangi bir şekil, ebat ya da konfigürasyona sahip olabilir. En bilinen tanecik kompozitlerin örnekleri beton ve elyaf levhasıdır. Tanecikli kompozitin tepkisi eşyönsüz veya ortotropikten birisi olabilir. Bazı kompozitler, mukavemetin tasarımında önemli bir üyesi olmadığı birçok uygulamada kullanılmaktadır. Tanecikli kompozitlerin birkaç tipinin şematik gösterimi Şekil 1.1’de gösterilmiştir (Staab, 1999).



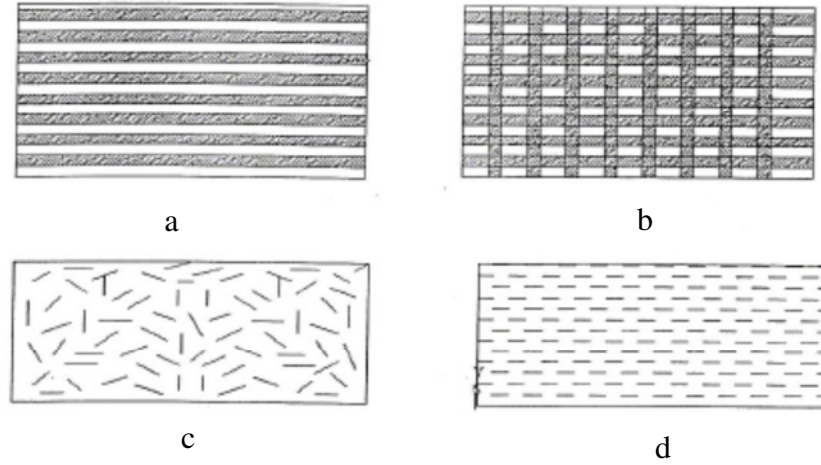
Şekil 1.1. Tanecikli kompozitlerin şematik gösterimi (Staab, 1999)

1.3.2.2. Lamel esaslı kompozitler

Yüksek yük taşıma kabiliyeti olan büyük uzunluk/çap oranında dolgu maddesi ilave edilerek üretilir. Matris içinde yer alan pulların konsantrasyonu düşük olabileceği gibi birbiri ile temas etmelerini sağlayacak derecede yüksek değerlerde olabilirler. Pul esaslı sistemin maliyeti biraz daha fazla, ancak mukavemet özellikleri iyidir (URL-1).

1.3.2.3. Fiber esaslı kompozitler

Birçok özelliklerde artış sağlayan, yüksek etkinliği olan liflerin ilavesiyle elde edilir. Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu fiber şeklinde üretildiklerinde mukavemet ve rijitlikleri kütle hallerindeki değerlerinden çok üstünde olabilmektedirler. Örneğin karbon fiberlerin çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten elli kat rijitliği üç kat daha yüksektir. Fiberlerin bu özelliklerinin fark edilmesi ile fiber kompozitlerin üretilmesi süreci başlamıştır. Günümüzdeki düşük performanslı ev eşyalarından roket motorlarına değin kullanım alanı bulan malzemeler olmuşlardır. Fiberler, yapı içerisinde kesintisiz uzayan sürekli fiberler veya uzun fiberlerin kesilmesiyle elde edilen süreksiz fiberler veya elyaflar şeklinde olabilirler (Saygılı,2006).



Şekil 1.2. Değişik tipte fiber kompozitler (Saygılı, 2006).

- a) Tek yönlü pekiştirilmiş sürekli fiber kompozit
- b) Örgü formunda fiberlerle pekiştirilmiş kompozitler
- c) Rasgele yönlenmiş süreksiz fiber kompozit
- d) Yönlendirilmiş süreksiz fiber kompozit

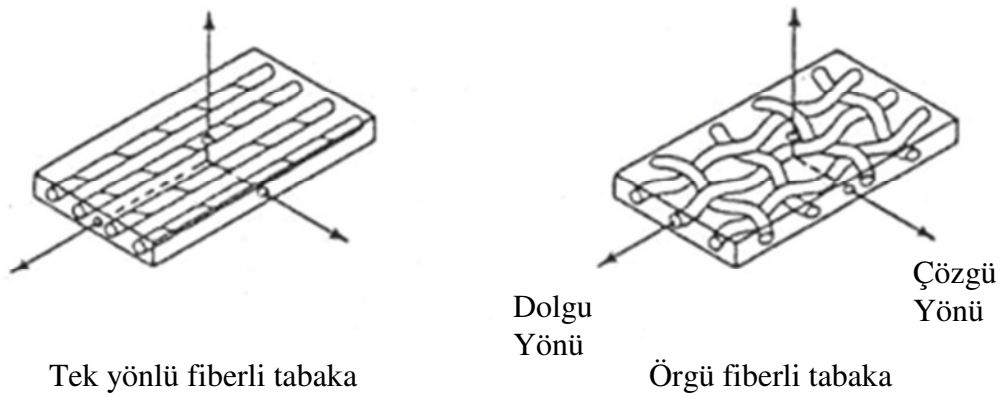
Fiber matris kompozitlerinin mühendislik performansını etkileyen en önemli faktörler; Fiberlerin şekli, uzunluğu, yönlenmesi, matrisin mekanik özellikleri ve fiber – matris ara yüzey özellikleridir. Fiberler dairesel olduğu gibi nadiren dikdörtgen, hekzağonal, poligonal ve içi boş dairesel kesitli olabilir. Bu kesitleri bazı artı özellikleri olmakla birlikte (paketleme, yüksek mukavemet v.s) dairesel kesitler maliyeti ve kullanım kolaylığı ile üstünlüğü sağlar. Sürekli fiberlerle çalışmak genelde daha kolay olmakla beraber tasarım serbestliği süreksizlere göre çok daha sınırlıdır. Sürekli fiberler süreksizlerden daha iyi yönlenme göstermelerine karşılık, süreksiz fiberlerin kullanılması daha pratik sonuçlar vermektedir (Saygılı, 2006).

1.3.2.4. Dolgu kompozitler

Üç boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine üç boyutlu dolgu maddesi ile doldurulması ile oluşan malzemelerdir. Matris çeşitli geometrik şekilleri sahip bir iskelet veya şebeke yapısındadır. Düzgün petekler, hücreler veya süngere benzeyen gözenekli yapılar arasında metalik, organik veya seramik esaslı dolgu maddeleri yer alabilir. Optimum özelliklere sahip kompozitlerin üretimi için birbiri içinde çözünmeyen, kimyasal reaksiyon vermeyen bileşenlerin seçilmesi gerekir (URL-1).

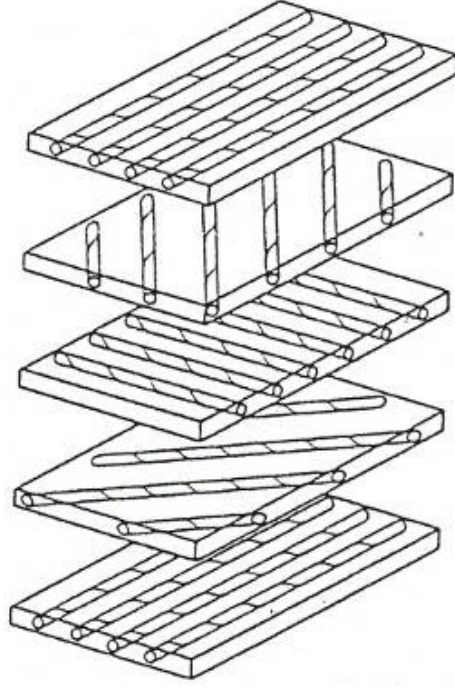
1.3.2.5. Tabaka yapılı kompozitler

Tabaka yapısında olan kompozit malzemeler, birbirine yapışmış en az iki farklı malzemenin katmanından oluşmaktadır. Katmanlaşma, bileşen katmanlarının en iyi yönü ve daha yararlı malzeme elde etmek için yapışmış malzeme kombine etmekte kullanılır. Katmanın temel yapı bloğu, tek yönlü fiberler veya matriks içinde örülmüş fiberlerin düzeninde olan ince tabakadır (kabukta bazen kavislidir). Malzeme eksenleri, fiber yönüne paralel ve dik olan esas malzeme eksenleri ile iki tipik düz ince tabakalar Şekil 1.3'te gösterilmiştir. Matriks organik, metalik, seramik ya da karbon olabilir (Jones, 1999).



Şekil 1.3. İnce tabakanın başlıca iki tipi (Jones, 1999)

Tabakalı kompozit, Şekil 1.4'te gösterildiği gibi değişken olarak yönlendirilmiş malzeme yönleri ile ince katmanların bir dizisidir (Jones, 1999). Unutulmamalıdır ki, Şekil 1.4'teki katmanların fiber yönlendirilmesi, katmanın orta yüzeyi çevresinde simetrik değildir. Levhanın katmanları genellikle her bir katmanda kullanılan aynı matriks malzemesi ile yapıştırılır. Levhanın mekanik tepkimesi, bunu oluşturan her bir katmandan farklıdır. Tabakanın tepkimesi her bir katmanın özelliğine bağlı olduğu kadar katmanların diziliş sırasına da bağlıdır.



Şekil 1.4. Tabakalı kompozitlerin yapıştırılmamış görüntüsü (Jones, 1999)

1.4. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler artık gittikçe artan oranlarda ve yeni sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır. Uzun zaman uçak sanayisindeki ihtiyaçların yönlendirdiği kompozit malzeme gelişimleri son dönemde yeni birçok sektörde birçok farklı amaç için kullanılmaktadır (Arıcasoy, 2006).

Günlük ve ticari hayatta kullanım: Bu amaçla, yaygın şekilde cam elyafı, cam, keçe ve cam dokuma ile polyester reçineden yapılan çeşitli ürünler kullanılmaktadır. Cam elyaf oranı % 30-40 arasındır. Çay tepsisi, masa-sandalye, depo, küvet, tekne, bot ve otomotiv sanayi bu kompozitlerin uygulama örnekleridir. Ayrıca formika, baskılı devre plakası, elektrikçi fiberleri, spor malzemeleri ve araç şarjı atlama sıırıkları, kaynak takımı, tenis raketi, yarış kanoları değişik birleşik malzemelerden yapılan ürünlerdir (Ünal, 2006).

Tıp: Suni kemik, biyo-aktif camlar, dolgu malzemesi diş kemik protezleri ve bağlantı aksamlarıdır (Baykara, vd., 1992).

Ev aletleri: Masa, sandalye, televizyon kabinleri, dikiş makinesi parçaları, saç kurutma makinesi gibi çok kullanılan ev aletlerinde kullanılmaktadır. Bu şekilde, komple ve

karmaşık parça üretimi, montaj kolaylığı, elektriksel etkilerden korunum ve hafiflik gibi avantajlar sağlamaktadır (Yılmaz ve Sayman, 2005).

Elektrik ve elektronik sanayi: Kompozitler, elektronik, elektroteknik ve elektrik sanayinde amaca uygun özellikleri ve taşıdığı üstün nitelikler nedeniyle (izolasyon gibi) her türlü malzemelerin yapımında, üretim malzemesi olarak kullanılmaktadır (Yılmaz ve Sayman, 2005).

Otomotiv sanayi: Otomobilin ağırlığını azaltmak; yakıt tüketiminde hatırı sayılır tasarruflara yol açtığından, otomobil üreticileri ağırlığı azaltacak yeni malzeme arayışlarına girmiş bulunuyorlar. Buna ilaveten petrol yakıtlarına alternatif olarak geliştirilmeye çalışılan elektrikli arabaların motorları nispeten daha az güç ürettiğinden, arabanın ağırlığı fevkalade ehemmiyet kazanır. Kompozit malzemeler, katılığın özgül ağırlığa oranı bakımından çelik ve alüminyum ile karşılaştırıldığında, bu değer birkaç kat daha fazla olabilmektedir. Bu sebeple kompozit malzemeler ağırlık azaltmada en önemli adaylardandır (Kazanç, 2002). Bu alanda kullanılan başlıca ürünler, otomobil kaportası parçaları, iç donanımı, bazı motor parçaları, tamponlar ve lastiklerdir (Şenel, vd., 2004). Otomotiv sanayiinde şu ana kadar termosetler, termoplastiklere nazaran daha fazla kullanım alanı bulmuştur. Otomobil gövdelerinde termoset kullanımı yaygın olmakla birlikte, termo plastiklere rağbet görülmeye başlandı (Kazanç, 2002).

İş makinaları: İş makinalarının koruma kapakları ve çalışma kabinlerinde kullanılmaktadır. Bu şekilde üretimde kullanılan parça sayısı malzemelerinden de tasarruf sağlanmaktadır (Yılmaz ve Sayman, 2005).

İnşaat sektörü: Burada da kompozitler önemli kullanım alanına sahiptirler. Cephe korumaları, soğuk hava depoları, inşaat kalıpları birer kompozit malzeme uygulamalarıdır. İzolasyon problemleri çözülmekte ve bakım giderleri azalmaktadır (Yılmaz ve Sayman, 2005).

Uzay ve havacılık sanayisinde: Havacılıkta son yıllarda yapılan temel bir atılım metal malzeme yerine kompozit malzeme kullanımı konusudur. Uçak yapılarında kullanılan ileri kompozitler, elyaf takviyeli kompozitlerdir (Kazanç, 2002). Planör gövdesi, uçak modelleri, uçak gövde ve iç dekorasyonu, helikopter parçaları ve uzay araçlarında başarıyla kullanılmaktadır. Bu kompozit malzemelerde, yüksek özgül mukavemete

sahip malzeme üretimi sayesinde olmaktadır. Havacılıkta da böyle malzemelere büyük ihtiyaç duyulmaktadır. Daha hafif malzemeyle atmosfer şartlarına dayanım ve yüksek mukavemet sağlanmaktadır (Yılmaz ve Sayman, 2005). Amaç daha az yakıt harcamak, daha yüksek hıza ulaşmak ve verimliliği sağlamaktır. Bu kullanımda sadece maddi kazanç düşünülmeyp stratejik performanslarda dikkate alınmıştır. Özellikle titreşim, yorulma ve ısı dayanımı gibi nitelikler uzay ve havacılık sanayinde birleşik malzemelerin önde gelen avantajlarıdır (Ünal, 2006).

Silah, roket ve diğer mühimmat sanayisinde: Birleşik malzemelerin silah üretimi de kullanımı pek yaygın olmamakla beraber 3000 bara kadar dayanabilen 60 ve 81 mm gibi küçük çaplı havanlar için bazı çalışmalar olmuştur. Bu silahlar hafifliği nedeniyle piyadenin savaş performansını artırıcı niteliktedir (Ünal, 2006). Birleşik malzemeler, değerli niteliklerden dolayı uzay ve havacılık araçlarında gittikçe daha fazla kullanılmaktadır. Bugün bir av bombardıman uçağında birleşik malzeme kullanımı toplam uçak ağırlığının yarısına ulaşmış bulunmaktadır. Bu sayede bor karbür, silisyum karbür, alümina karbon, cam ve kevlar elyafı değişik reçinelerle değişik birleşik malzemeler yapımında kullanılmaktadır (Ünal, 2006). Roket üretiminde birleşik malzemelerin rolü oldukça büyüktür. Örnek olarak M72 de motor lançeri cam elyafı ve epoksiden, Apilasta ve diğer tanksavar roketlerde gövde kısmen kevlar ve epoksiden , M77 MLRS de lüle (nozzle) karbon birleşik malzemesinden yapılmaktadır (Ünal, 2006). Mühimmat üretiminde de birleşik malzemeler kısmen kullanılmaktadır. M19 A/T mayınında gövde ABS reçine ve cam elyaf parçacıklarından, bu mayına ait küçük ve büyük belleville yayları cam doku ve fenolik reçineden yapılmışlardır. 155 mm'lik ICM mühimmatı gövdelerinde cam elyafı epoksi sargı vardır. Miğfer konusunda kevlar ve değişik reçineler kullanılmaktadır (Ünal, 2006). Kurşun geçirmez yeleklerde günümüzde bitişli kevlardan, balistik testler için zırh levhaları cam ve fenolik reçineler imal edilmektedir ve tasarım alternatiflerinin bulunmasıyla git gide artacak ve birçok avantajlarıyla insanlığın hizmetine verilmiş olacaktır (Ünal, 2006).

1.5. Kompozit Malzemelerin Avantaj ve Dezavantajları

1.5.1. Kompozit Malzemelerin Avantajları

Kompozit malzemelerin önem kazanmaları bunların diğer malzemelere göre değişik özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır (Yılmaz ve Sayman, 2005). Kompozit yapıları malzemelerin sağladığı avantajlar aşağıda sıralandığı gibidir (URL-3; Ünal, 2006; Deniz, 2005; Yılmaz ve Sayman, 2005).

1. Yüksek mukavemet: Kompozitler yüksek mukavemet değerleri sağlayan malzemeler arasında en etkin olanlardan birisidir.
2. Hafiflik: Kompozitler birim alan ağırlığında hem takviyesiz plastiklere, hem de metallere göre daha yüksek mukavemet değerleri sunmaktadır.
3. Tasarım esnekliği: Kompozitler bir tasarımcının aklına gelebilecek her türlü karmaşık, basit, geniş, küçük, yapısal, estetik, dekoratif yada fonksiyonel amaçlı olarak tasarlanabilir.
4. Rijitlik ve boyut kararsızlığı: Genleşme katsayıları nispeten düşük olup sert, sağlam bir yapı ve büyük bir boyut kararlılığı gösterir. Çeşitli mekanik, çevresel baskılar altında termoset kompozit ürünler şekillerini ve işlevselliklerini korumaktadırlar.
5. Yüksek dielektrik direnimi: Kompozitlerin göze çarpan elektrik yalıtım özellikleri, birçok komponent'in üretimi konusunda açık bir tercih nedenidir.
6. Korozyon dayanımı: Kompozitlerin antikorozyif özelliği, diğer üretim malzemelerinden üstün olan niteliklerinden biridir.
7. Kalıplama kolaylığı: Kompozit ürünler, çelik türündeki geleneksel malzemelerde karşılaşılan birçok parçanın birleştirilmesi ve sonradan monte edilmesi işlemini tek parçada kalıplama olanağı ile ortadan kaldırmaktadır.
8. Yüzey uygulamaları: Kompozit ürünlerde kullanılan polyester reçine, özel pigment katkıları ile renklendirilmek suretiyle, amaca uygun kendinden renkli olarakta üretilebilir.
9. Şeffaflık özelliği: Kompozitler, cam kadar ışık geçirgen olabilir. Tam şeffaf olması nedeni ile ışığı yayması sayesinde, diffüze ışığın önem kazandığı seralarda ve güneş kolektörü yapımında önemli avantaj sağlar.
10. Kalıcı renklendirme: Kalıplama esnasında reçineye ilave edilen pigmentler sayesinde istenen renk verilebilir. Bu işlem ek bir masraf ve işçilik gerektirmez.

11. Beton yüzeylere uygulama imkanı: Beton yüzeylere, kompozitler mükemmel yapışır. Özellikle, betonun gözenekli olması nedeniyle, kompoziti oluşturan ana malzemelerden polyester reçinenin beton gözeneklerinden sızması ve beton kütle içinde sertleşmesinden dolayı mükemmel bir yapışma sağlanır.
12. Ahşap yüzeylere uygulama imkanı: Kompozitler ahşap yüzeylere yapışma özelliğine sahiptir. Ancak ahşabın kuru olması ve stiren ihtiva eden polyester reçine ile iyi bir şekilde emdirilmesi gerekir.
13. Demir yüzeylere uygulama imkanı: Demir yüzeydeki pas ve yağ kalıntıları temizlendikten sonra kompozitlerle kaplanabilir. Bu sayede demir ve çelik yüzeyler, kompozitlerle kaplanarak korozyon etkilerinden korunmaktadır.
14. Yanmazlık özelliği: Kompozitlerin alev dayanımı, kullanılan polyesterin özelliğine bağlıdır. Alev dayanım özelliğinin arandığı yerlerde “Alev dayanımlı” polyester kullanılmalıdır.
15. Kompozitler sıcaklıktan etkilenmez: Kompozit ürünler, termoset plastikler grubundan polyester reçineler ile yapıldığı için yumuşamaz ve şekil değiştirmez. Isı dayanıklılığı kullanılan polyester reçinenin cinsine bağlıdır.
16. Kompozitler içine farklı malzemeler gömülebilir: Kompozitler içine demir, ahşap, halat, tel, mukavva, poliüretan sert köpük gibi malzemeler gömülerek mekanik özellikleri farklılaştırılabilir.
17. Tamir edilebilirlik özelliği: Tamir izlerinin görünmemesi için, onarım işleminin bir kalıp üzerinde yapılması, yada onarımdan sonra zımpara veya boya yapılması gerekir.
18. Kompozitler kesilip delinebilir: Kompozitler, tahta gibi kolayca kesilir, delinir, zımparalanır. Bu amaçla kullanılan aletlerin sert çelik veya elmas uçlu olması halinde daha iyi sonuç alınmaktadır.

1.5.2. Kompozit Malzemelerin Dezavantajları

Kompozit malzemelerin sahip olduğu ve yukarıda bahsedilen çeşitli avantajları yanında aşağıda belirtildiği gibi çeşitli dezavantajları da bulunmaktadır ve bunlar (Aricasoy, 2006).

1. Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkilemektedir.

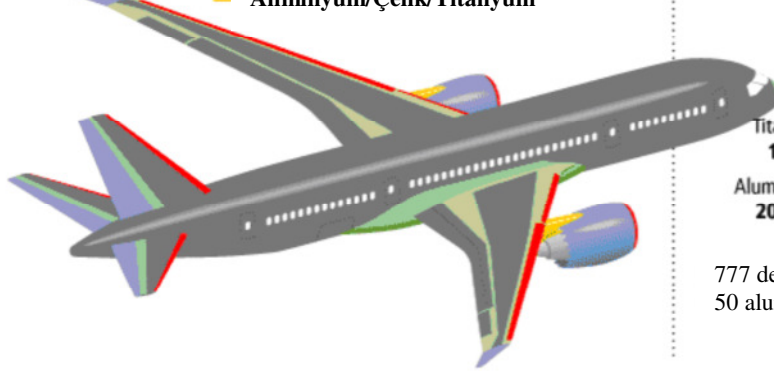
2. Kompozit malzemeler değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler gösterirler.
3. Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir.
4. Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.
5. Hammaddenin pahalı olması; Uçaklarda kullanılabilecek kalitede karbon elyafının bir metre karelik kumaşının maliyeti yaklaşık 50 \$'dır.
6. Lamine edilmiş kompozitlerin özellikleri her zaman ideal değildir, kalınlık yönünde düşük dayanıklılık ve katlar arası düşük kesime dayanıklılık özelliği bulunmaktadır.
7. Malzemenin kalitesi üretim yöntemlerinin kalitesine bağlıdır, standartlaşmış bir kalite yoktur.
8. Kompozitler kırılğan (gevrek) malzeme olmalarından dolayı kolaylıkla zarar görürler, onarılmaları yeni problemler yaratabilir.
9. Malzemelerin sınırlı raf ömürleri vardır. Bazı tür kompozitlerin soğutulularak saklanmaları gerekmektedir.
10. Sıcak kurutma gerekmektedir.
11. Kompozitler onarılmadan önce çok iyi olarak temizlenmeli ve kurutulmalıdır. Bazı durumlarda bu zor olabilir.
12. Bazı kurutma teknikleri uzun zaman alabilmektedir.

1.6. Kompozit Malzemeler için Hasar Analizi

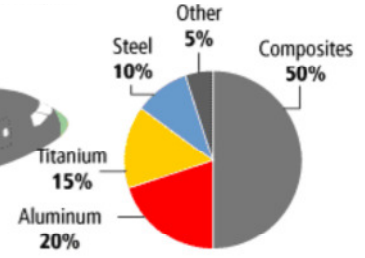
İleri teknoloji ürünü olan kompozit malzemelerin kullanımı, güncel bir örnek olan Boeing 787 Dreamliner tipi uçaklarda görüldüğü gibi, özellikle havacılık alanında sürekli artmaktadır (Şekil 1.5) (URL-4). Bu uçakların gövdesi komple kompozit malzemedan üretilmiş olup, uçağın ilk uçuşu değişik sebeplerle birkaç kez ertelenmiştir. Bu ertelemelerden bir tanesinin sebebi de uçağın yapısal olarak büyük önem taşıyan mekanik bağlantılarında meydana gelen problemlerdir (URL-5). Bu güncel olay kompozit yapılardaki mekanik (pim/civata) bağlantıların hayati önemini vurgulamaktadır.

787 gövdesinde kullanılan kompozit malzemeler

- Fiberglas
- Alüminyum
- Lamine Karbon Kompozit
- Sandviç Karbon Kompozit
- Alüminyum/Çelik/Titanyum



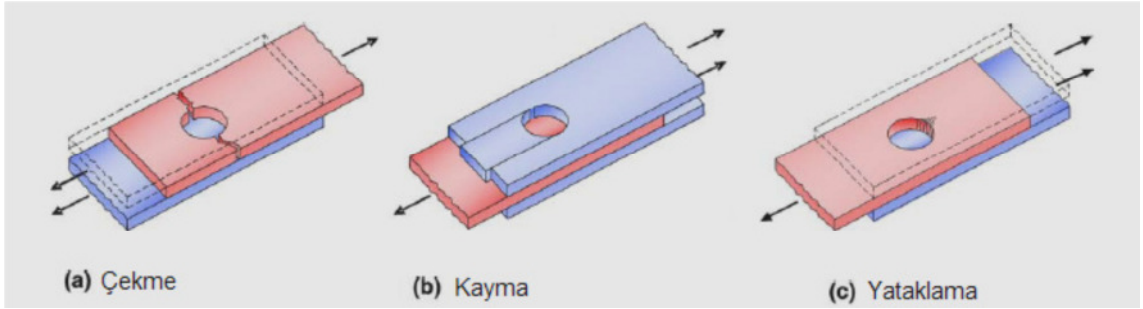
Toplam kullanılan malzemeler Ağırlıkça



777 de yüzde 12 kompozit ve yüzde 50 alüminyum kullanılmıştır.

Şekil 1.5. Boeing 787 Dreamliner tipi uçakta kullanılan malzeme oranları (URL-4)

Özellikle geometrik parametrelere bağlı olmak üzere, civata ve pim bağlantılarında genellikle çekme, kayma ve yataklama tipi olarak üç farklı hasar tipi görülür (Şekil 1.6) (Lim, Kim, Lee, 2006).



Şekil 1.6. Civata bağlantılarında görülen temel hasar tipleri (Lim, Kim, Lee, 2006).

Tabakaların hasar gerilimleri için birçok akma teorisi ortaya konmuştur. Bu teorilerin hemen hepsi tabakaların homojen ve gerilme-şekil değiştirmenin lineer olduğu varsayımı üzerine kurulmuştur. Bütün teoriler ana malzeme yönündeki mukavemet parametreleri ile açıklanabilir. Aşağıda yaygın olarak kullanılan altı teori açıklanmıştır (Yavuzylmaz, 2007).

- I. Maksimum Gerilme Teorisi
- II. Maksimum şekil değiştirme teorisi
- III. Tsai-Hill Hasar Teorisi
- IV. Hoffman Hasar Teorisi

- V. Tsai-Wu Hasar Teorisi
- VI. Hashin Hasar Teorisi

BÖLÜM 2

YAPIŞTIRICILI VE PİMLİ BAĞLANTILAR

2.1. Giriş

Tasarımlarda, istenen özelliklere ve duyulan ihtiyaçlara göre çeşitli bağlantılar yapılmaktadır. Bağlantılar genel olarak çözülebilir ve çözülemez bağlantılar olarak sınıflandırılmaktadır. Her iki bağlantı şeklinin kendilerine has avantaj ve dezavantajları vardır. Bu bölümde ilk olarak çözülemez bağlantılardan yapıştırıcı bağlantıları, yapıştırıcı bağlantılarının çeşitleri ve yapıştırıcı bağlantılarının kullanıldığı yerler açıklanmaktadır. Daha sonra önemli bir çözülebilir bağlantı tipi olan pim bağlantılarından bahsedilmiştir. Bu bölümde son olarak, her iki bağlantının birbirine göre dezavantajlarının bertaraf edilmeye çalışıldığı, fakat aynı zamanda her iki bağlantı tipinin avantajlarından birlikte faydalanılmak istenildiği, yapıştırıcılı ve pimli karma bağlantılardan bahsedilmiştir.

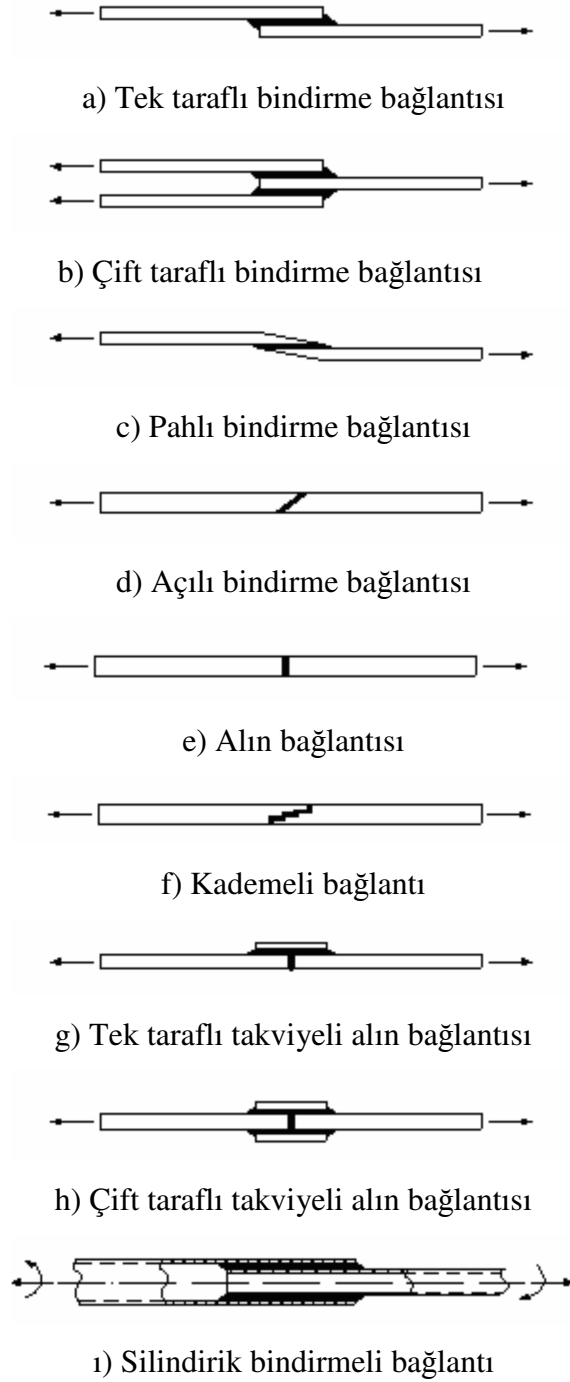
2.2. Yapıştırıcı Bağlantıları

Geleneksel birleştirme yöntemlerine göre uygulamadaki kolaylığı, düşük maliyeti ve hafifliğinden dolayı kompozit malzemelerin birleştirilmesinde yapıştırma bağlantılarının kullanımı yaygınlaşmıştır. Hafifliğin, rijitliğin ve güvenilirliğin önemli olduğu hava taşıtlarında yapıştırma bağlantısı önemli oranda kullanılmaktadır (Yarrington vd., 2005).

Yapıştırıcı malzemeleri yüzey tutma yoluyla bir arada tutabilen madde olarak tanımlanır. Yapıştırılan terimi genelde yapıştırıcı tarafından bir başka cisme bağlanan cisim anlamında kullanılır. Bir yapıştırılanı bir başka yapıştırılana tutturma işlemi bağlama olarak adlandırılır. İki yapıştırılan ve yapıştırıcıdan oluşan birleşime bağlantı adı verilir (Yazıcı, 2007).

Bir yapıştırma bağlantısı çekme, basma, kayma, soyulma veya tüm bu yükleme durumlarının kombinasyonu olarak yüklenebilir. Bu yüzden bir yapıştırma bağlantısı tasarımında bağlantının maruz kalacağı yük durumu mutlaka göz önünde bulundurulmalı ve yapıştırıcı hangi yükleme durumu için maksimum performans

sergiliyorsa o yükleme durumuna uygun baēlantı tipi seēilmelidir. Mühendislikte kullanılan yapıştırma baēlantı tiplerinden en yaygın olanları Şekil 2.1’de verilmiştir (zenē, 2007).



Şekil 2.1. Yapıştırma baēlantı geometrileri (zenē,2007)

Her türlü yapıştırma iēin kullanılabilecek evrensel bir yapıştırıcı yoktur. Alüminyum gibi bazı metaller, bir alkalın yapıştırıcı kullanıldığında korozyona uērayabilir. Yapıştırma baēlantı suya karşı ēok iyi direnē gösterebilir, fakat; bazı yapıştırıcıların ısı ve organik ēzclere karşı direnci zayıftır. Bu yüzden malzemeye göre yapıştırıcı

seçilmelidir (Yazıcı, 2007). Yapıştırıcılar sürerek, püskürterek, tozlanarak v.s. şeklinde uygulanabilir. Yapıştırıcı kalınlığı belli sınırlar içinde bulunmalıdır. Aşırı derecede kalın yapıştırıcı tabakası tutma kuvvetini azaltırken; ince tabakalar, boşluklu birleştirmelere sebep olabilir. Yapıştırma bağlantılarının mukavemeti iki şekilde ölçülür; kayma mukavemeti ve ayırma mukavemeti. Yapıştırma bağlantısının mukavemeti, yapıştırıcı bölgesinde kayma gerilmesi ve ayırma gerilmesi (kayma gerilmesine dik doğrultudaki normal gerilme) ile belirlenir. Yapıştırıcının tipik uygulamaları; kontrplak, döşeme kaplamaları, plastikler, deri, kauçuk, seramik, beton, cam, metal ve ağaç birleştirilmeleridir (Yazıcı, 2007).

Yapıştırıcılar uçak ve uzay araçları için vazgeçilmez bir bağlama aracıdır. Bütün helikopter pervane kanatları yapıştırıcı bağlıdır. Otomobil, kamyon, otobüs üretiminde, gemi inşasında ve katmanlı tahtadan yapılmış kiriş ve perde duvar üretiminde büyük miktarlarda yapıştırıcı kullanılmaktadır (Yazıcı, 2007). Yapıştırma bağlantılar, yapıştırıcı birleştirme özelliklerinin artırılmasıyla birlikte mekanik sistemlerde de kullanılmaktadır. Fakat, bu bağlantıları içeren sistemlerin tasarımı belirlenmediğinden yapıştırma bağlantılar; sistemlerin asal yüklerini taşıyan parçalarında kullanılmamaktadır. Yapıştırma bağlantılarının incelenmesine yoğun bir ilgi vardır. Bu ilginin amacı; bağlantının taşıyacağı yükün büyüklüğünü belirlemektir. Yapıştırıcılar mühendislik malzemeleridir ve yapıştırma işlemi, mühendislik üretiminin önemli parçasıdır. Ancak diğer bütün bağlama yöntemlerinin olduğu gibi yapıştırma bağlantısının diğer yöntemlere kıyasla avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır (Yazıcı, 2007).

Yapıştırma bağlama, civata, perçin, kaynak, lehim bağlantılara göre potansiyel avantajlara sahiptir. Yapıştırıcı bağlantı birleştirilen parçaların mukavemetini azaltmaz ve düşük ağırlık ve direngenliği artırma gibi üstünlükleri vardır. Bu, özellikle ince kompozit parçaların birleştirilmesinde önem kazanır (Yazıcı, 2007).

Yapıştırıcıların en büyük fonksiyonu parçaları bir araya getirerek birleştirmektir. Geleneksel mekanik birleştirme yöntemlerinden daha düzgün bir gerilme dağılımı sağlar. Ayrıca yapıştırıcılar daha düşük maliyet ve ağırlıkta bağlantının oluşturulmasına ek olarak mekanik birleştirme yöntemlerine eşdeğer veya daha fazla bağlantı dayanımı sağlayabilmektedir. Yapıştırma bağlantılarının avantaj ve dezavantajları aşağıda açıklanmıştır (İşcan, vd., 2009).

2.2.1. Yapıştırma Bağlantılarının Avantajları

- Düzgün gerilme dağılımı ve daha büyük yük taşıma alanı temin edilmesi,
- İnce ve kalın malzemelerin birleştirilmesi,
- Benzer veya farklı malzemelerin birleştirilmesi,
- Yorulma ve tekrarlı yük dayanımı,
- Düzgün yüzeyli birleştirme olanağı,
- Dış ortamlara karşı yalıtım olanağı sağlaması,
- Birçok teknolojiye kolaylıkla uygulanabilir olması,
- Isı ve elektrik iletkenliğine karşı dayanıklı olması,
- Yüksek darbe ve titreşim sönümleme kabiliyeti,
- Dikkat çekici dayanım/ağırlık oranı,
- Mekanik birleştirme yöntemlerinden daha kolay ve ucuz olması,
- Sıkı geçme bağlantılarında dayanımı yükseltebilmesi,
- Sert ve yumuşak olan iki ayrı parçanın hasar görmeden birleşmesini sağlaması,
- Sızdırmazlık sağlaması,
- Klasik bağlantı şekillerine göre daha hafif olması,
- Civata, perçin gibi elemanlarca oluşturulan yüzey bozukluklarının yapıştırıcı bağlantılarında görülmemesi
- Yapışma alanı boyunca gerilme dağılımı düzgündür,
- Talaslı imalat maliyetlerinin azalması ve daha kaliteli üretim gerçekleştirilmesidir.

2.2.2. Yapıştırma Bağlantılarının Dezavantajları

- Parçaların birleştirilmesinin zor olması, yüzey hazırlığı ve temizliği gerektirmesi,
- Yapıştırıcının mekanik özelliklerinin zaman ve sıcaklığa bağımlılık göstermesi
- Düşük soyulma dayanımı ve darbe dayanımı,
- Bağlantı ya da yapıştırıcının performansı ile ilgili verilerdeki eksiklikler,
- Yapıştırma bağlantısının ömrünün çevresel etkilere bağlı olması,
- Metal yapıştırıcılar belirli bir geçiş sıcaklığına sahiptirler. Bu sıcaklık değerleri üzerinde mukavemet değerlerinin oldukça düşmesi,

- Ortam şartlarını uygun hale getirmek ve uygulama ekipmanlarının yemini sonucu maliyetin yükselmesi,
- Metal yapıştırıcı uygulanan yüzeye tam olarak yayılmaması sonucu mukavemetin düşmesi,
- Nemli ve kimyasal ortamlar bazı yapıştırıcıların özelliklerini kötü yönde etkiler ve mukavemetleri düşer,
- Metal yapıştırıcılarının bazı çeşitleri devamlı yükleme durumunda sürünme gösterebilirler.

2.2.3. Yapıştırıcı Çeşitleri

Yapıştırıcı formülasyonlarında kullanılan maddelerin çokluğu ve çeşitliliği değişik özelliklere sahip yapıştırıcıların formüle edilmesini sağlamakta ve ayrıca yapıştırıcıların sınıflandırılmasını zorlaştırmaktadır. Buna rağmen, yapıştırıcının seçimini ve kullanımını kolaylaştırmak maksadıyla çeşitli sınıflandırmalar yapılmaktadır. En basit sınıflandırma hali aşağıda gösterildiği gibidir;

- a. Kimyasal durumlarına göre
- b. Fiziksel durumlarına göre
- c. Kullanıldıkları yere göre

Ancak kullanıldıkları yere göre yapıştırıcıları sınıflandırmak yanıltıcı olabilir. Çünkü bazı yapıştırıcılar birden fazla yerde kullanılmaktadır. Örneğin bazı tekstil yapıştırıcıları ağaç islerinde de kullanılmaktadır. Yine metal yapıştırıcılar seramik ve kâğıtların birleştirilmesinde de kullanılabilir. Bu nedenle bu şekilde sınıflandırma yanlış olmamakla beraber, yapıştırıcıları sınıflandırmak yerine yapıştırıcıların kullanım yeri olarak tarif etmek doğru olur (Kaya, 2004). Yapıştırıcı ile ilgili kaynaklarda içerdikleri ana elemanın kimyasal türüne göre yapılan sınıflandırmalardır (Kayacan, 1988). Burada özellikle en çok kullanılan yapısal yapıştırıcılar, ana elemanın kimyasal durumuna ve fiziksel durumuna göre şöyle sınıflandırılabilir;

2.2.3.1 Kimyasal durumlarına göre yapıştırıcılar

2.2.3.1.1. Epoksiler

Epoksi reçineler, büyük çoğunlukta bütün uygulamalar için kullanılabilecek oldukça yüksek mukavemetli bir yapıştırıcıdır. Reçine ve katılaştırıcı şeklinde iki bileşen halinde satılır ve bağlantıda kullanılmadan önce karıştırılması gerekir. Oda sıcaklığında kürleşme süresi, birkaç saatlik periyottan birkaç günlük periyoda kadar olan çok geniş türleri bulunmaktadır. Daha mukavemetli ticari epoksilerin kürleşme sıcaklıkları 200 °C'ye kadar çıkmaktadır. Kürleşen yapıştırıcı gevrek olup nemli ortamlara karşı hassastır ve uzun çevresel etkiler altında mukavemet kaybına uğramaktadır. Kürleşme esnasında yapıştırıcıda bir miktar daralma oluşur ve bu da istenmeyen artık gerilmelerin oluşmasına neden olur. Epoksi bağlantılar 140°C'yi aşan sıcaklıklarda bozulur. Epoksinin metal ve plastik yüzeylere yapışması zayıftır ve bundan dolayı bağlantıda oluşan hasar, koheziv olmaktan ziyade adheziftir, yani yapıştırıcı ile esas malzeme arayüzeyinde oluşmaktadır. Bununla beraber, epoksi ile yapıştırılmış ahşap yapılarda hasar, bağlantı yerinden çok ahşabın kendi içerisinde meydana gelmektedir (Temiz, 2003).

Epoksi yapıştırıcıların avantajları şunlardır;

- Kopma mukavemetleri yüksektir.
- Elyaf yapılarda yüksek bağ mukavemeti sağlarlar.
- Yüksek aşınma direncine sahiptirler.
- Uçucu değildirler ve kimyasal dirençleri yüksektir.
- Düşük ve yüksek sıcaklarda sertleşebilme özelliğine sahiptirler.

Epoksi yapıştırıcıların dezavantajları ise şunlardır;

- Polyesterle karıştırıldığında pahalıdırlar.
- Polyestere oranla yüksek viskoziteye daha az uygundur.

Epoksiler avantajlarının çokluğu ve tüm elyaf malzemelerde kullanılabilmeleri nedeniyle, havacılık sanayide yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Genellikle karbon elyaflarla birlikte kullanılırlar (Loctite, 2005).

2.2.3.1.2. Poliüretan

Poliüretan mastikler uygulama alanına göre farklı formüle edilirler. Akmaya karşı dirençli, tiksotropik ve değişik malzemelere çok iyi yapışan mastiklerdir. Poliüretan mastikler mükemmel uzama ve uzadıktan sonra eski haline dönme özelliğine sahiptirler. Düşük sıcaklıklardaki performansları polisülfitlerden daha üstündür. Uzun süre 82 °C (180 ° F) üzerindeki sıcaklıklara maruz kalacak şekilde kullanılmaları önerilmez.

Genel olarak inşaat, otomotiv, çift cam ve tekne sektöründe kullanırlar. Poliüretan mastikler kürleştiklerinde çekme (hacim kaybı) ihmal edilebilir derecede az olmasından ve UV dayanımları mükemmel olduğundan mastikler arasında önemli bir konuma sahiptir. Tek komponentli olanları mastik tabancası ile uygulanacak tipte formüle edilirler. Bu tiplerin esneme kapasiteleri $\pm$ %25 ile $\pm$ %50 arasındadır. İnşaat sektöründe metal ve plastik kapı/pencerelerin montajında, prefabrik elemanların bileşimlerinde, cephe kaplamalarında ve genleşen derzlerin oluşturulmasında sıkça kullanılırlar (URL-6).

2.2.3.1.3. Akrilikler

Akrilik yapıştırıcılar oda sıcaklığında oksijensiz ortamda aktivatör ile kürleşir. Yapıştırıcı yalnızca aktivatörle temas ettiğinde kürleştiği için, montaj esnasında açıkta bekleme süresi veya karıştırılan malzemelerin hemen kullanılması gibi problemler yoktur. Oksijenle temasın kesilmesi için yapışma yüzeyinin en az 5 mm genişliğinde olması gerekir. Yapıştırıcının türüne göre, yapıştırıcı ve aktivatör yapıştırılacak yüzeylere ayrı ayrı uygulanabilir veya hemen uygulama öncesinde bir statik mikserde karıştırılabilir. Bazı yapıştırıcılar düşük viskoziteli bir aktivatör ile kullanılır. Bu yapıştırıcılar hiçbir zaman aktivatörle karıştırılmamalıdır. Yapıştırıcı ve aktivatör her zaman ayrı ayrı tatbik edilmelidir. İki parça birbirine temas ettiğinde yapıştırıcı kürleşmeye başlar. Sıvı aktivatörü ortadan kaldıran, yapıştırıcı ile aktivatörün aynı kıvamda olduğu akrilik yapıştırıcılar da vardır. Bunlar iki bileşenli sistemlerdir ve yapıştırıcı ile aktivatör yan yana veya üst üste şeritler halinde uygulanır. Yapıştırılacak parçalar birleştirilirken yapıştırıcı da karışmış olur. Eğer karışmış haldeki yapıştırıcı 5 dakika veya daha uzun bekleyebiliyor ise bir statik mikser de kullanılabilir. Statik

mikser tarafından önceden karıştırılmış yapıştırıcı kullanmanın avantajı, karışmanın parçaları birleştirme esnasındaki harekete bağımlı olmamasıdır (Aydın, vd., 2011).

Akrilikler, hem metaller hem de plastikler için iyi soyulma mukavemetine sahiptirler. -110°C ile 120°C arasında elastik özelliklerini değiştirmeden korurlar. Bu yapıştırıcılar rutubetli ortamlara karşı dirençlidir ve nemden dolayı mukavemetlerinde bozulma söz konusu değildir. Bununla beraber bu yapıştırıcılar yanıcı olup yüksek sıcaklıklarda zamanla bozulurlar (Aydın, vd., 2011).

2.2.3.1.4. Siyanoakrilikler

Kolayca uygulanan ve çabuk yapışma işleminin gerçekleştiği yapıştırıcı çeşididir. Yapıştırılacak olan yüzeyler üzerinde bulunan nem ile reaksiyona girerek sertleşirler. Bazıları birkaç saniye içerisinde bağlantı dayanımı oluştururlar. Siyanoakrilatların en büyük avantajı plastiklerin kendileriyle veya diğer malzemeler ile birleştirilebilmesidir. Bu yapıştırıcılar düşük darbe dayanımına sahip olup neme ve kimyasal çözeltilere karşı oldukça hassastırlar. Küçük alanların birleştirilmesi için uygundur. Boşluk doldurma özellikleri iyi olmadığı gibi diğer yapıştırıcılara göre pahalıdırlar. Bazı firmalara ait siyanoakrilat yapıştırıcılar Çizelge 1.1’de verilmiştir (Özenç, 2007).

Çizelge 2.1. Siyanoakrilat yapıştırıcılar için ticari örnekler (Özenç, 2007).

Üretici Firma	Ticari Adı
Loctite	401, 406, 411, 454, 468, 480, 4210
Loxeal	ISTANT14, ISTANT17, ISTANT43
Weicon	VAI406, VAI120, VM2000, VA300
Devcon	ZipGrip4404, ZipGripHV2200
Permabond	910, 2010, 792, 268

2.2.3.1.5. Anerobikler

En kolay uygulanabilen yapısal yapıştırıcılardan biridir. Yapışma işlemini oksijensizlik ya da havasızlık tetiklediğinden, vaktinden evvel işlem gerçekleşmez. Bu yapıştırıcılar

akrilik polyester reçine esaslıdır. Yüksek kohesiv dayanım oluşturmalarına rağmen düşük yapıştırıcı dayanımına sahiptirler. Çapta 0,25 mm boşluklara kadar kullanılmaktadır. Bazı firmalara ait anaerobik yapıştırıcılar Çizelge 2.2’de verilmiştir (Özenç, 2007).

Çizelge 2.2. Anaerobik yapıştırıcılar için ticari örnekler (Özenç, 2007).

Üretici Firma	Ticari Adı
Loctite	638, 641, 648, 660, 222, 243, 366, 545
Loxal	83-21, 12-36, 70-14, 70-90, 85-55, 26-18
Weicon	AN 302-21, AN 302-62, AN 305-86
Devcon	Retaining Compound 2609, 2680
Permabond	Perma-Lok A1042, A1044, A1046

2.2.3.1.6. Silikonlar

Silikon yapıştırıcılar sınırlı koheziv dayanıma sahiptirler. Fakat -60 °C’den 370 °C’ye kadar olağanüstü bir sıcaklık aralığında çalışma şartlarına sahiptir. Zincir yapısı çok esnek olup iyi soyulma mukavemeti gösterir. Metal, cam, lastik ve plastiklerin yapıştırılmasında ve mikro elektronik endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla beraber kısmen pahalıdır (Palancıoğlu, 2011).

2.2.3.1.7. Fenolikler

Fenolikler, doğal bileşiklerden elde edilmeyen ilk yapıştırıcıdır. Molekül iskeleti, benzen halkalarının birleştirilmesi ile elde edilmiştir. -60°C gibi düşük sıcaklıklarda oldukça gevrek ve yüksek sıcaklıklarda ısıtılarak kürleşir. Pahalı olup çevresel faktörlere dirençlidir. Ahşap ve tabakalı yapılarda ilk tercih edilen yapıştırıcıdır (Brandon ve Kaplan, 1997).

2.2.3.2. Fiziksel durumuna göre yapıştırıcılar

Kimyasal reaksiyon ile sertleşen yapıştırıcılara nazaran, fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcılar, daha düşük yapışma mukavemetine sahiptirler. Bu yapıştırıcılara, yapısal

olmayan yapıştırıcılar da denilir. Endüstride oldukça yaygın kullanım alanına sahip fiziksel değişim ile sertleşen yapıştırıcı tipleri şöyledir (İşcan, vd., 2009);

2.2.3.2.1. Sıcak eriyikler

Sıcak eriyikler polimer esastır. Hafif yüklere maruz kalacak şekilde tasarlanmış yapıları, hızlıca birleştirmek için kullanılırlar (İşcan, vd., 2009).

2.2.3.2.2. Kauçuk yapıştırıcılar

Eriyik esaslı kauçuk yapıştırıcılar, su ortamının ya da çözülmenin kaybolması ile sertleşirler. Yüke maruz kalan yapışmalar için uygun değildir (İşcan, vd., 2009).

2.2.3.2.3. PVA'lar (Polyvinyl Acetates)

Ağaç ve karton gibi gözenekli malzemelerin yapışması için uygundur. Endüstride oldukça geniş kullanım alanına sahiptirler (Solmaz, 2008).

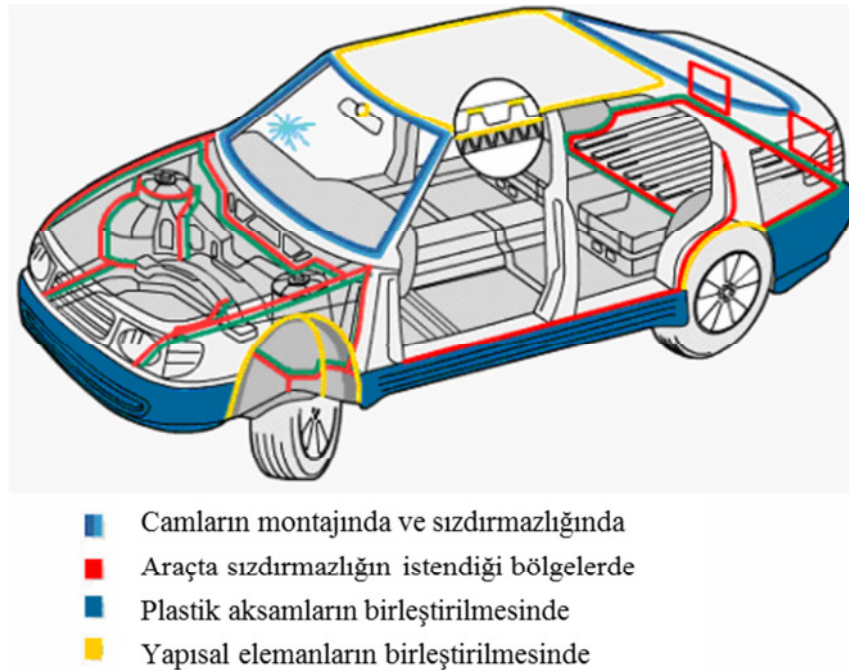
2.2.4. Yapıştırıcı Bağlantılarının Endüstride Kullanım Alanları

Yapıştırıcıların özelliklerindeki gelişmelerden dolayı, metallerin yapıştırılmasında da büyük ilerlemeler sağlanmıştır. Kaynak veya diğer metotlarla birleştirilmeleri mümkün olmayan iki farklı metalin yapıştırılması, metal-kompozit birleştirmeleri, otomotiv endüstrisinde şasi üretiminde punta kaynağı ile birlikte kullanılmaları, uzay ve uçak sanayisinde hafiflik için tasarlanan petek yapı ile dış cidarın birleştirilmesi, dişli kutuları ve motor gövde bloklarında sızdırmazlık elemanı olarak kullanılmaları gün geçtikçe artmaktadır. Civataların çözülmeye karşı emniyete alınmaları için yapıştırıcı kullanımı, diğer emniyete alma metotlarına (taçlı somun, tırtıklı somun vs.) nazaran daha ekonomik ve pratik imkânlar sunmaktadır (Özenç, 2007).

Otomotiv sanayi, endüstriyel yapıştırma uygulamalarının en geniş kullanım alanlarından birini oluşturur. Gövde altı koruyucu sızdırmazlık uygulaması, kapı-kaput iç-dış sac birleştirmeleri, far birleştirmeleri, cam montaj uygulamaları, fren balataları, yakıt filtreleri, bataryalar, metal/plastik/lastik birleştirmeleri, klima kontrol sistemleri, koltuk rayları, elektrik/elektronik devre montajları, elektrikli kapı mandalları, şasi montajları,

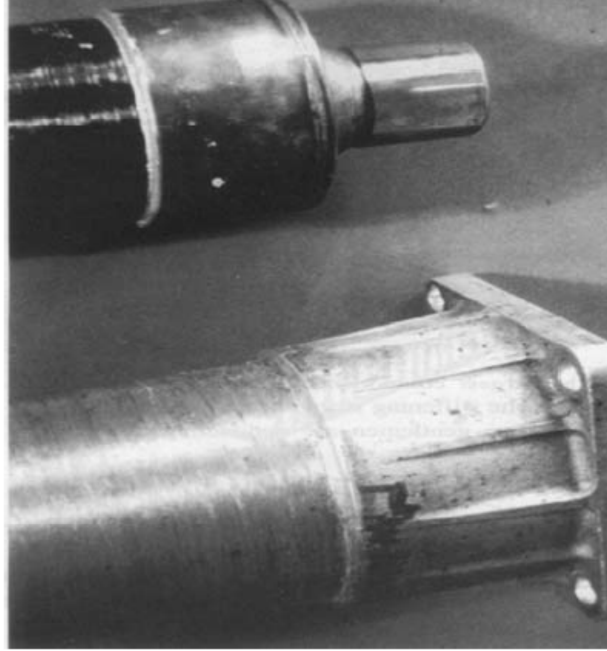
konfor kaplamaları, hoparlör ızgarası, kapsüllü elektronik elemanlar, kapı panelleri, yakıt göstergeleri, dolap/torpido kilitleri, ABS modülleri, hava yastığı modülleri, su pompaları, kalibrasyon ve ekleri, motor hız sensörleri, yakıt enjeksiyon sistemleri gibi sayısız kısımlarda kullanılmaktadır (Adin, vd., 2011).

Otomotiv endüstrisinde de yapıştırıcıların oldukça geniş kullanım alanları bulunmaktadır. Mil göbek bağlantılarının emniyete alınmasında, rulmanlı yatakların montaj işlemlerinde, motor bloğu-kapak sızdırmazlıklarının sağlanmasında sıvı conta olarak, kapı panellerinin oluşturulmasında ve birçok cam, plastik parçaların birleştirilmesinde yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Şekil 2.2’de bir otomobilde yapıştırıcıların kullanım alanları gösterilmektedir (Özenç, 2007). Yapıştırıcılar, otomotiv ürünlerinin konstrüksiyon rijitliğine katkıda bulunur. Ayrıca kaza anındaki davranışları iyileştirme ve geliştirme, üretim zamanında ve maliyetinde tasarruf sağlanır. Çevrenin sıcaklık, nem, buhar gibi olumsuz etkisini azaltmak için kullanılmaktadır. -40°C ile +150 °C arasında çalışan motor aksamlarında kullanılabilir. Bunların en önde gelenleri alüminyum, plastik, çelik, cam ve seramik gibi malzemeleri birleştirebilmesidir (Adin, vd., 2011).



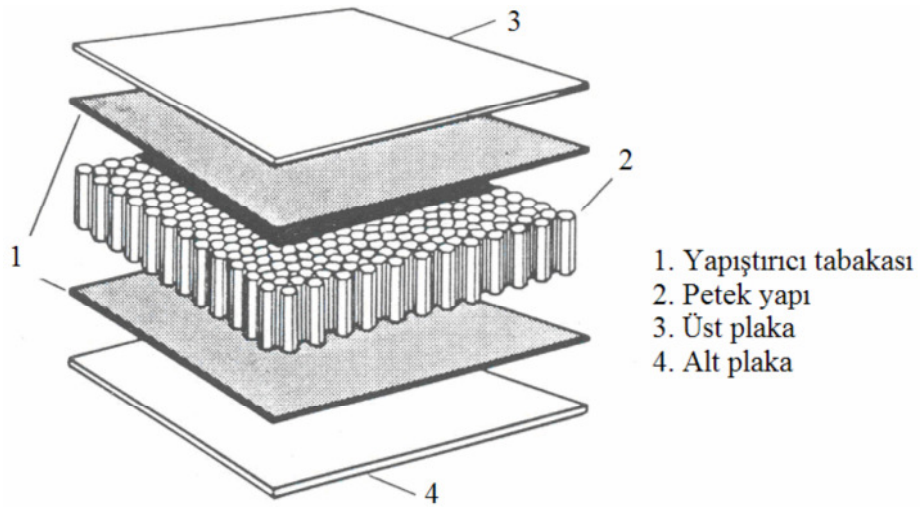
Şekil 2.2. Otomobilde yapıştırıcıların kullanıldığı alanlar (Özenç, 2007)

Şekil 2.3'te Peugeot yarış arabalarında kullanılan tahrik mili ve bir yatak görülmektedir. Yarış arabalarının hafif olması istendiğinden milin bir kısmı kompozit malzemeden, uç kısmı ise metalik malzemeden yapılmış, bunlar daha sonra yapıştırıcı ile birleştirilmiştir (Kinloch 1997).



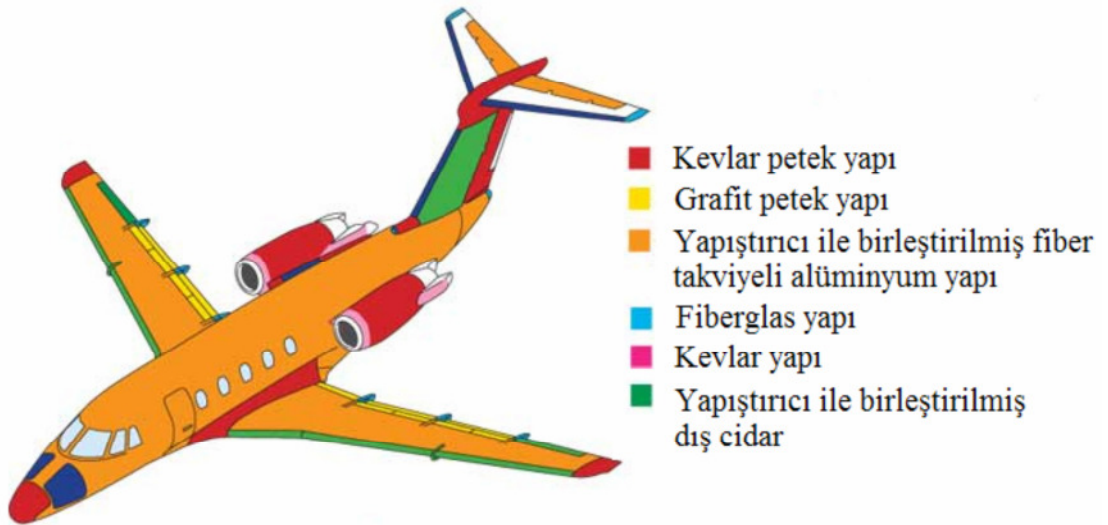
Şekil 2.3. Peugeot yarış arabasının tahrik milinde yapıştırıcı kullanımı (Kinloch 1997)

Günümüzde yapıştırıcıların yaygın olarak kullanıldığı alanlardan birisi de uzay ve uçak sanayisidir. Uçak gövdelerinde ve kanatlarında büyük miktarlarda yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Şekil 2.4'te uçak konstrüksiyonlarında kullanılan ve yapıştırıcı kullanılarak imal edilen sandviç yapı görülmektedir. Bu yapıda alt ve üst kısımdaki plakalar (genellikle alüminyum alaşımı), aradaki petek tipi yapılara, yapıştırıcı aracılığıyla birleştirilmektedir (Özenç, 2007).



Şekil 2.4. Uçak yapılarındaki sandviç panellerde yapıştırıcı kullanımı (Özenç, 2007)

Şekil 2.5'ten de görüleceği üzere uçakların büyük bir kısmı kompozit yapılardan oluşmaktadır. Bu yapılarda kullanılan petek dokulu sandviç yapılarda yapıştırıcılar ile birleştirme tekniği kullanılmaktadır (Özenç, 2007).



Şekil 2.5. Uçaklarda yapıştırıcının kullanıldığı bölgeler (Özenç, 2007)

2.2.5. Yapıştırıcı Bağlantılarda Oluşan Hasar Tipleri

Farklı yükleme şartlarında yapıştırma bağlantılarının veya yapıştırıcının mekanik özelliklerinin tamamıyla anlaşılabilmesi için, hasar tiplerinin karakterize edilmesi gerekir. Bir grup malzeme veya parçanın yapıştırıcı ile bir araya getirildiği yapıştırma bağlantılarında genel olarak iki tip hasar modeli ile (adhezyon ve kohezyon hasarları)

karşılaştırılır (TS EN ISO 10365). Temel hasar modelinin tayini bir yapıştırma bağlantısına uygulanan herhangi bir mekanik testin sonuçlarının daha iyi anlaşılmasını ve hasar çeşitlerinin sınıflandırılmasını sağlar. Temel hasar tipleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir (DIN EN ISO 10365).

	Hasar Modelleri	Gösterim
Alt Katman	 Tek veya her iki yapışkanda hasar (Alt katman hasarı)	SF
	 Yapıştırıcıda hasarlanma (Kohesif alt katman hasarı)	CSF
	 Katman boyunca ayrılma hasarı (Katman ayrılma hasarı)	DF
Yapıştırıcı Adhesive	Birleşme hata türleri  Birleşme hatası  Özel Birleşme Hataları 	SCF
	  Yapışma Hatası	AF
	 Soyulma ile yapışma ve birleşme hatası	ACFP

Şekil 2.6. Temel hasar tipleri (DIN EN ISO 10365)

Adhezyon Hasarı: Yapıştırıcı ile yapıştırılan malzeme ara yüzeyinde gözle görülen bir ayrılmanın olduğu kopma olayıdır (DIN EN ISO 10365).

Kohezyon Hasarı: Bir yapıştırma bağlantısında yapıştırıcı veya yapıştırılan malzemede gözle görülebilir hasarın olduğu kopma şeklidir (DIN EN ISO 10365).

2.3. Pim Bağlantıları

Yapı veya makina konstruksiyonlarında montaj için değişik cozülebilir birleştirme elemanları kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerden imal edilen yapı ya da makine elemanlarının birleştirilmesinde pim, percin ve civata gibi bağlama elemanları ile yapılan cozülebilir bağlantılar; ekonomikliği, kolay uygulanabilirliği ve geniş uygulama alanına sahip olması nedeni ile tercih edilmektedirler (Turan, vd., 2010)

Pimler, çok eskiden beri bilinen ve kullanılan makine elemanlarıdır. Elemanların temas yüzeyi silindir yüzeyi olup genelde yük bu silindirin eksenine dik yönde etki eder (Babalık, 2009). Pimler, makine parçalarının birbirleri ile çözülebilen bağlantılar yapmasını sağlamaktadır. Pimler, hafif zorlamalı bağlantılarda bağlama elemanı, merkezleme elemanı veya emniyet elemanı olarak kullanılırlar (Can, 2006).

Pimlerle çakıldıkları delik arasında toleransta çok az bir boşluk vardır. Hatta bazı hallerde geçiş toleransı uygulanır, küçük bir çekiçle çakılırlar ve yuvalarına ön gerilmeli olarak yerleştirilirler (Babalık, 2009).

Fiber takviyeli kompozit yapıların birbiri ile veya metallerle bileşimleri genellikle pim bağlantılarıyla yapılmaktadır. Bağlantı yüke maruz kaldığında pim bağlantı noktaları gerilme yığılmaları nedeniyle büyük problemler oluştururlar. Bütün pim bağlantı bölgeleri kritik unsurlar içerdiğinden, konstrüksiyonun mukavemeti pim bağlantısının mukavemetine bağlıdır. Bu nedenle pim bağlantılarının tasarımında daha fazla özen gösterilmeli ve ilgili hesaplamalar iyi bir şekilde yapılmalıdır (Aktaş, 2002)

2.3.1. Pim Bağlantılarının Avantajları ve Dezavantajları

Pim bağlantılar, özel yüzey işlemlerine gerek kalmadan hasarsız olarak kolayca çözülebilir. Fakat deliklerde gerilme yığılmaları oldukça fazladır. Hasar muayenesi

kolaydır. Buna karşın yapıştırıcı birleştirmeler düşük gerilme konsantrasyonuna maruz kalır. Muayenesi kolay değildir. Bağlantı yapılırken yüzeyi hazırlamak oldukça güçtür (Polat, 2008).

Avantajları (Polat, 2008);

1. Çevre etkilerine ve yorulma yüküne toleranslı
2. Muayene kolaylığı
3. Üretim kolaylığı
4. Yüksek güvenilirlik
5. Kalınlık sınırlaması yok
6. Artık gerilme problemi yok

Dezavantajları (Polat, 2008);

1. Yapıştırma bağlantılarına göre daha ağır bağlantı olmaları
2. Korozyon problemi
3. Yüzeyin düzgün olmaması

2.4. Karma Bağlantılar

Bağlama elemanları, malzeme, şekil ve kuvvet bağı olmak üzere başlıca üç gruba ayrılabilir. Diğer taraftan da çözülme bakımından; çözülemeyen ve çözülebilen bağlama elemanları olarak iki gruba ayrılırlar. Malzeme bağı grubuna, yapıştırma bağlantıları lehim bağlantıları ve kaynak bağlantıları girmektedir (Rende, 1996). Kompozit levhaları çeşitli bağlama teknikleri olmasına rağmen, pimler düşük maliyetleri, kolay uygulanabilirliği, tamir ve bakım için kolay sökölme özelliklerinden dolayı yaygın olarak tercih edilmektedirler (Scalea, vd., 1999). Sağladığı çeşitli avantajlar nedeniyle uygulamada yaygın olarak tercih edilen bir birleştirme tekniği de yapıştırma yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinin gelişmesi İkinci Dünya Savaşı boyunca olmuştur (Apalak, 1995). Yapıştırma bağlantılarda, büyük bir termik ve mekanik zorlama olmadan bağlantının yapılabilmesi, diğer bağlantı yöntemlerine göre oldukça önemli bir avantajdır. Böylece; birleştirilecek parçaların özellikleri değişmez. Sıcak perçinleme ve kaynak bağlantılarında olduğu gibi iç gerilmeler yoktur (Gediktaş, 1972).

Yapıştırma-nokta kaynağında iki teknolojinin mevcut olduğu bilinmektedir. Bunlardan birincisinde saclara önce nokta kaynağı yapılır. Daha sonra düşük viskoziteli yapıştırıcı enjektör iğnesine benzeyen özel bir alet ile aralığa püskürtölür ve yapıştırıcı kapiler

kuvvet tesiriyle aralığa yayılır. İkinci usulde ise birleştirilecek saclara önce yapıştırıcı sürülerek yapıştırılır ve sonra da nokta kaynağı uygulanır (Anık, 1986).

Her iki usulde de, yüksek mukavemetli kaynak noktaları ve yapıştırma bağlantısının sağlanması için uygun bir yüzey hazırlamaya, yüzeydeki pisliklerin arındırılmasına ihtiyaç vardır. Örneğin, çelik saçların nokta kaynağı işleminden önce paslanmayı önleyici yağlarla yağlanması, nokta kaynağına olumsuz bir etki yapmaz. Soğuk haddelenmiş saçlarda, belirli bölgelerin kaba bir şekilde pastan arındırılması yeterlidir. Eğer imalatı normal dışı bir tozlanma ya da rutubet söz konusu değilse, bir dereceye kadar yüzeyi hazırlamadan da kaynağına geçilebilir. Ancak alüminyum ve alaşımlarında yüzeyde meydana gelen oksit tabakasının giderilmesi için meydana gelen oksit tabakasının kimyasal ve mekanik usullerle temizlenmesi gerekir (Şen, 2001).

Yapıştırıcının iyi bir yapışma mukavemeti sağlayabilmesi için, parça yüzeylerinin temiz olması gerekir. Yüzeyde bulunan çok az miktardaki bir yağ, toz ve gres tabakası ile rutubet adhezyonu imkânsız hale sokar. Bu bakımdan, yapıştırma-nokta kaynağı, yapıştırma işleminden sonra, hazırlanan kısımlar iyice korunmalı ve mümkün mertebe kısa süre zarfında kaynak işlemine geçilmelidir. Bu açıdan bakılırsa, işletmelerde parçaların yüzey hazırlanmasına tabi tutulmasına ihtiyaç göstermeyen yapıştırıcıların geliştirilmesi gerekmektedir. Böyle yapıştırıcılar geliştirilmiştir ve bunlarla iyi bir yapışma dayanımına da erişilmektedir. Poliviniklorür kökenli yapıştırıcılar bu bakımdan iyi sonuçlar vermektedir (Şen, 2001).

Kombine edilmiş yapıştırma ve nokta kaynağı usulü, üretim tekniği ve konstrüksiyon bakımından önemli avantajlara sahiptir. Nokta kaynağına nazaran dayanım bakımından daha iyidir. Bu özellikle dinamik yüklerde daha belirgindir. Korozyon davranışı ve sağlamlığı daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu usulün verimli olduğu yerler, bilhassa hafif konstrüksiyonlar (uçak ve roket imali), demiryolu ve karayolu taşıtlarının imalidir. Bunların dışında iyi bir mukavemet, korozyona karşı dayanıklılık ve sessiz çalışma istenen özel alanlarda da bu yöntem uygulanabilir (Şen, 2001).

Bağlantılarda karma bağlantının tercih edilmesinin nedeni pim bağlantısı ve yapıştırıcı bağlantısının avantajlarından birlikte yararlanılması ve tek baslarına kullanıldıklarında

meydana gelen dezavantajlarının önlenmek istenmesidir. Örneğin yapıştırıcı bağlantısı ile gerilmenin tüm yüzeye yayılması, pim bağlantısında delik civarında meydana gelen gerilme yığılmalarının azaltılmak istenmesidir. Ayrıca, iki metal plaka arasını dolduran yapıştırıcının, iki metal plaka arasındaki aşınma ve korozyonu önleyici etkisi de çok önemlidir. Özellikle mekanik birleştiriciler ile birleştirilmiş metal plakalarda korozyon pili oluşumu sıkça karşılaşılan bir sorundur (Aldaş, Şen, 2011).

BÖLÜM 3

SONLU ELEMANLAR METODU

3.1. Giriş

Bu bölümde mühendislik uygulamalarında son zamanlarda oldukça yoğun bir şekilde tercih edilen, sonlu elemanlar metodu incelenmiştir. Sonlu elemanlar metodu ile ilgili genel bilgiler, sonlu elemanlar metodunun mühendislik problemlerine uygulanışı, diğer nümerik yöntemlere göre sağladığı avantajlar, eleman tipleri ve genel sonlu elemanlar formülasyonu bu bölümde verilmiştir.

3.2. Temel Bilgiler

Mühendislik uygulamalarında karşılaşılan problemler çoğu zaman doğrudan çözülemez. Problem, çözümü daha kolay olan alt problemlere ayrılarak daha anlaşılır hale getirilmeye çalışılır. Oluşturulan alt problemler çözülüp birleştirilerek esas problemin çözümü yapılabilir. Problemin tam çözümü yerine kabul edilebilir seviyede bir yaklaşık çözümü tercih edilir. Öyle problemler vardır ki, bunlarda yaklaşık çözüm tek yol olarak benimsenir. Örneğin, gerilme analizi üzerine çalışan mühendisler gerilme problemini basit kiriş, plak, silindir gibi geometrisi bilinen benzer şekillerle sınırlarlar. Bu çözümler çoğu kez gerçek problemin yaklaşık çözümüdür (URL-1).

Sonlu elemanlar metodunda genellikle karşılaşılan problemler kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen fiziksel problemlerdir. Örneğin elastik cisim mekaniğinde aranan sonuç cismin yaptığı yerdeğiştirmedir. Bu da gerilme ve yer değiştirmeler arasında kurulan ikinci dereceden bir kısmi diferansiyel denklemin çözümü ile elde edilir. Bu denklemler basit geometriler ve yükleme durumları için kesin sonuçlar elde edilecek şekilde çözülebilse de karmaşık problemlerde yaklaşık çözümlerin elde edilmesi kaçınılmaz hale gelir. Yaklaşık çözümleme yöntemleri de genellikle potansiyel enerji ve varyasyonel yöntemleri kullanır (URL-7).

Sonlu elemanlar yöntemi, sürekli ortamların küçük birim bölgelere ayrılarak temsil edilmesi düşüncesine dayanır. Yöntemin temel yaklaşımı; sıcaklık, basınç, gerilme veya deplasman vs. gibi herhangi bir sürekli büyüklüğün küçük ve sürekli parçaların birleşmesi ile oluşan bir modele dönüştürülmesidir (Zienkiewicz ve Morgan, 1983).

Sonlu elemanlar yöntemi, birbirinden farklı davranışlar gösteren değişkenleri barındıran karmaşık sistemlerin veya kompleks bir yapı üzerindeki herhangi bir değişkenin karakterize edilebilmesine olanak sağlar (Çepni ve Deniz, 2005).

3.3. Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulanışı

Sonlu elemanlar metodunun temel prensibi öncelikle bir elemana ait sistemin özelliklerini içeren denklemlerin çıkartılıp daha sonra tüm sistemi temsil edecek şekilde eleman denklemlerini birleştirerek sisteme ait lineer denklem takımının elde edilmesidir (URL -1).

Sonlu elemanlar yöntemi ile bir büyüklüğün ifade edilmesinde, problemin doğru biçimde tanımlayıp değişkenlerin seçilmesinin ardından yapılacak ilk iş, büyüklüğü elemanlara ayırmaktır. Elemanlara ayırma işleminin doğru biçimde yapılması, çözümün doğruluğu açısından oldukça önemlidir. Elemanlar uygun şekilde seçilmeli ve problemin yapısına uygun olarak yerleştirilmelidir. Eleman seçiminde, elemanların boyutları ve sayıları sistemi en iyi temsil edecek, hesaplarıda en aza indirgeyecek biçimde olmalıdır. Genel olarak değişkenin ani değişim gösterdiği yerlerde eleman küçük seçilir. Uygun elemanlar seçmek kadar bu elemanları ve onların düğüm noktalarını, yani elemanların köşe noktalarını uygun numaralandırmak da, yöntemin doğru çalışması için önemlidir. Elemanların köşe noktaları sistem içerisinde elemanların birleşme noktalarını oluşturur ve düğüm noktaları olarak adlandırılır.

Sonlu elemanlara ayırma işleminden sonra, ifade edilmek istenen büyüklüğün bölge içerisinde değişimini gösteren bir enterpolasyon fonksiyonu belirlenir. Fonksiyon, değişkenin yaklaşık değişimini verir ve gerçeğe ne kadar yakın seçilirse çözümün yaklaşıklık da o kadar fazla olur. Bu fonksiyon “şekil”, “deneme” veya “bazı fonksiyonu” olarak adlandırılmaktadır (Çepni ve Deniz, 2005).

3.4. Sonlu Eleman Tipleri

Sonlu elemanlar metodunda kullanılan elemanlar boyutlarına göre dört kısma ayrılabilir. Tek boyutlu elemanlar: Bu elemanlar tek boyutlu olarak ifade edilebilen problemlerin çözümünde kullanılır (URL-1).

İki boyutlu elemanlar: İki boyutlu problemlerin çözümünde kullanılırlar. Bu grubun temel elemanı üç düğümlü üçgen elemandır. Üçgen elemanın altı, dokuz ve daha fazla düğüm ihtiva eden çeşitleri de vardır. Düğüm sayısı seçilecek interpolasyon fonksiyonunun derecesine göre belirlenir. İki üçgen elemanın birleşmesiyle meydana gelen dörtgen eleman problemin geometrisine uyum sağladığı ölçüde kullanışlılığı olan bir elemandır. Dört veya daha fazla düğümlü olabilir (URL-1).

Dönel elemanlar: Eksenel simetrik özellik gösteren problemlerin çözümünde dönel elemanlar kullanılır. Bu elemanlar bir veya iki boyutlu elemanların simetri eksenini etrafında bir tam dönme yapmasıyla oluşurlar. Gerçekte üç boyutlu olan bu elemanlar, eksenel simetrik problemleri iki boyutlu problem gibi çözme imkanı sağladığı için çok kullanışlıdır.

Üç boyutlu elemanlar: Bu grupta en temel eleman üçgen piramittir. Bunun dışında dikdörtgenler prizması ve daha genel olarak altı yüzlü elemanlar üç boyutlu problemlerin çözümünde kullanılan eleman tipleridir (URL-1).

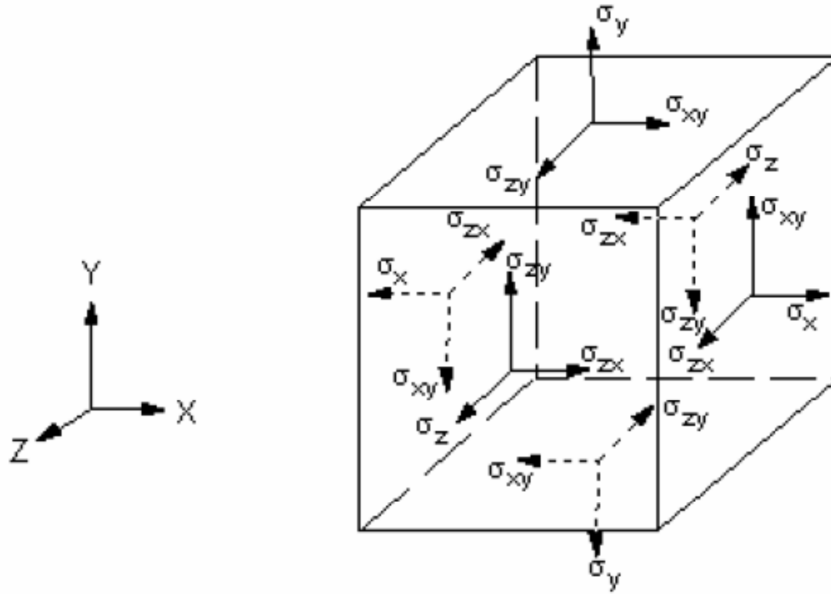
İzoparametrik sonlu elemanlar: Çözüm bölgesinin sınırları eğri denklemleri ile tanımlanmışsa kenarları doğru olan elemanların bu bölgeyi tam olarak tanımlaması mümkün değildir. Böyle durumlarda bölgeyi gereken hassasiyetle tanımlamak için elemanların boyutlarını küçültmek, dolayısıyla adetlerini arttırmak gerekmektedir. Bu durum çözülmesi gereken denklem sayısını artırır ve dolayısıyla gereken bilgisayar kapasitesi ve zamanın büyümesine sebep olur. Bu olumsuzluklardan kurtulmak için çözüm bölgesinin eğri denklemleri ile tanımlanan sınırlarına uyum sağlayacak eğri kenarlı elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır (URL-1).

Böylece hem çözüm bölgesi daha iyi tanımlanmakta hem de daha az sayıda eleman kullanılarak çözüm yapılabilir. Bu elemanlar üzerindeki düğüm noktaları bir fonksiyon ile tanımlanır. İzoparametrik sonlu elemanın özelliği, her noktasının konumunun ve yer değiştirmesinin aynı mertebeden aynı şekil (interpolasyon) fonksiyonu ile tanımlanabiliyor olmasıdır. İzoparametrik elemanlara eş parametrelili elemanlar da denir (URL-1).

3.5. Sonlu Elemanların Formülasyonu

Sonlu elemanlar metodunda analiz edilen yapı belirli sayıda elemanlara bölünerek ağ oluşturulur. Her bir eleman birbirine düğüm noktaları ile bağlanır. Analiz şekline ve incelenen yapının geometrisine göre farklı eleman tipleri seçilebilir. Analiz sonucunda elde edilen gerilme, deplasman, sıcaklık, vb. bilgiler düğüm noktalarına aittir. Düğüm noktalarındaki bu bilgilerin ortalamaları alınarak elemana ait bilgiler elde edilir (Dursun, 2006; Cook, 1995; Fagan, 1992).

Cisimlerdeki üç boyutlu gerilme durumu kübik bir eleman için Şekil 3.1.'deki gibi gösterilebilir.



Şekil 3.1. Üç boyutlu gerilme durumu (Dursun, 2006; Cook, 1995; Fagan, 1992)

Elastisite teorisine göre bir cisimdeki gerilme durumu aşağıda belirtilen denge denklemlerini sağlamak zorundadır (Dursun, 2006; Cook, 1995; Fagan, 1992):

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + b_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + b_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + b_z &= 0\end{aligned}\tag{3.1}$$

Burada b_x , b_y ve b_z birim hacimdeki cisim kuvvetlerini (yerçekimi kuvveti gibi) ifade etmektedir.

Doğrusal (lineer) elastik ve izotropik malzemeler için üç boyutlu gerilme-şekil değiştirme bağıntısı şu şekilde belirtilmektedir (Dursun, 2006; Cook, 1995; Fagan, 1992):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

Yukarıdaki ifade kısaca şu şekilde gösterilebilir:

$$\{\sigma\} = [E]\{\epsilon\} \quad (3.3)$$

Şekil değiştirme-deplasman bağıntısı aşağıdaki gibi belirtilmektedir:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (3.4)$$

Yukarıdaki ifade kısaca şu şekilde gösterilebilir:

$$\{\epsilon\} = [D]\{\delta\} \quad (3.5)$$

İki boyutlu, düzlemsel gerilme durumunda; $\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{yz} = 0$ (3.6). Bu durumda, gerilme şekil değiştirme bağıntısı:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1-\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.7)$$

Şekil değiştirme-deplasman bağıntısı ise:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (3.8)$$

şeklinde ifade edilir. Minimum potansiyel enerji teorisine göre, elastik bir cismin potansiyel enerjisi, Π , şu şekilde belirtilmektedir:

$$\Pi = U - W \quad (3.9)$$

U ; şekil değiştirme enerjisini, W ise dış kuvvetlerin cisim üzerinde yapmış olduğu işi tanımlamaktadır.

Minimum potansiyel enerji teorisine göre bir cismin dengede olabilmesi için potansiyel enerjisinin minimum olması gerekir. O halde,

$$\delta\Pi = \delta U - \delta W = 0 \quad (3.10)$$

olmalıdır.

Doğrusal ve elastik bir cisim için şekil değiştirme enerjisi şu şekilde ifade edilir:

$$U = \frac{1}{2} \int_V \{\epsilon\}^T \{\sigma\} dV = \frac{1}{2} \int_V \{\epsilon\}^T [E] \{\epsilon\} dV \quad (3.11)$$

Bir cisme dışarıdan etkiyen yükler üç ana grupta toplanabilir. Bunlar; yayılı yükler (basınç vb.), cisim kuvvetleri ve noktasal yüklerdir. Dış yüklemelerin cisim üzerinde yapmış oldukları iş şu şekilde ifade edilebilir:

$$W = 1/2 \int_V \{\delta\}^T \{b\} dV - 1/2 \int_V \{\delta\}^T \{T\} dS_1 + \sum_{i=1}^I \{\delta_i\}^T \{P_i\} \quad (3.12)$$

Deplasman vektörü, şekil fonksiyonu cinsinden şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\{\delta\} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} = [N] \{q\} \quad (3.13)$$

Şekil değiştirme vektörü, düğüm noktalarının yer değiştirmesine $\{q\}$ bağlı olarak şu şekilde gösterilebilir:

$$\{\varepsilon\} = [d][N]\{q\} = [B]\{q\} \quad (3.14)$$

Gerilme vektörünün düğüm noktalarının fonksiyonu olarak gösterimi ise;

$$\{\sigma\} = [D]\{\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}\} = [D][B]\{q\} - [D]\{\varepsilon_0\} \quad (3.15)$$

Burada, $\varepsilon_0 = \{\alpha \Delta T, \alpha \Delta T, 0\}^T$ (3.16), α ; ısı genleşme katsayısı, ΔT ; sıcaklık farkıdır.

Bu durumda bir elemana ait şekil değiştirme enerjisi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\Pi^e = 1/2 \int_{V^e} \{q\}^T [B]^T [D][B]\{q\} dV - \int_{V^e} \{q\}^T [B]^T [D]\{\varepsilon_0\} dV - \int_{V^e} \{q\}^T [N]^T \{b\} dV - \int_{S_1^e} \{q\}^T [N]^T \{T\} dS_1 \quad (3.17)$$

Yapıya ait toplam potansiyel enerji, her bir elemanın enerjisinin toplamıdır.

$$\Pi = \sum_{e=1}^E \Pi^e - \{Q\}^T \{F_c\} \quad (3.18)$$

Burada, $\{Q\}$, yapının yer değiştirme vektörü tanımlamaktadır.

$$\Pi^e = 1/2 \{Q\}^T \sum_{e=1}^E \left[\int_V [B]^T [D] [B] dV \right] \{Q\} - \{Q\}^T \sum_{e=1}^E \left\{ \int_V [B]^T [D] \{\epsilon_0\} dV + \int_V [N]^T \{b\} dV + \int_S [N]^T \{T\} dS \right\} - \{Q\}^T \{F_C\} \quad (3.19)$$

Yukarıdaki ifadede;

$$\begin{aligned} [k] &= \int_V [B]^T [D] [B] dV : && \text{eleman katılık matrisi} \\ \{f_i\} &= \int_V [B]^T [D] \{\epsilon_0\} dV : && \text{eleman sıcaklık kuvvet vektörü} \\ \{f_b\} &= \int_V [N]^T \{b\} dV : && \text{eleman cisim kuvvet vektörü} \\ \{f_s\} &= \int_S [N]^T \{T\} dS : && \text{eleman yüzey kuvvet vektörü} \end{aligned}$$

Minimum potansiyel enerji teorisi yukarıda ifade edilen eşitliklerden sonra kısaca şu şekilde de ifade edilebilir:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{Q\}} = \{0\} \quad (3.20)$$

Yukarıdaki eşitlik kullanılarak,

$$[K] \{Q\} = \{F\} \quad (3.21)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik kullanılarak elemanların düğüm noktalarındaki deplasman değerleri ve reaksiyon kuvvetler elde edilir. iki boyutlu, üç düğüm noktasına sahip üçgen eleman için şekil fonksiyonu aşağıda belirtildiği gibidir. u, v deplasmanlarının eleman içerisinde lineer fonksiyon oldukları varsayımı ile şöyle ifade edilebilir (Dursun, 2006; Cook, 1995; Fagan, 1992):

$$u = b_1 + b_2 x + b_3 y, \quad v = b_4 + b_5 x + b_6 y \quad (3.22)$$

b_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) sabittir.

Her bir düğüm noktasına ait deplasman şu şekilde gösterilir:

$$u_1 = b_1 + b_2 x_1 + b_3 y_1 \quad (3.23)$$

$$u_2 = b_1 + b_2 x_2 + b_3 y_2 \quad (3.24)$$

$$u_3 = b_1 + b_2 x_3 + b_3 y_3 \quad (3.25)$$

$$v_1 = b_4 + b_5 x_1 + b_6 y_1 \quad (3.26)$$

$$v_2 = b_4 + b_5 x_2 + b_6 y_2 \quad (3.27)$$

$$v_3 = b_4 + b_5 x_3 + b_6 y_3 \quad (3.28)$$

Yukarıda tanımlanan eşitlikler yeniden düzenlenerek, aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} \quad (3.29)$$

Şekil fonksiyonları, N_i , x ve y 'nin fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

$$N_1 = (1/2A)\{(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y\} \quad (3.30)$$

$$N_2 = (1/2A)\{(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y\} \quad (3.31)$$

$$N_3 = (1/2A)\{(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y\} \quad (3.32)$$

A ; üçgenin alanını ifade etmektedir. Şekil değiştirme-deplasman bağıntısı;

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [B]\{q\} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_{23} & 0 & y_{31} & 0 & y_{12} & 0 \\ 0 & x_{32} & 0 & x_{13} & 0 & x_{21} \\ x_{32} & y_{23} & x_{13} & y_{31} & x_{21} & y_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} \quad (3.33)$$

Yukarıda belirtilen şekil fonksiyonları başka bir biçimde de tanımlanabilir. Üçgen eleman üzerinde doğal koordinatlar tanımlanabilir ve şekil fonksiyonları bu koordinat sistemine göre yeniden ifade edilebilir (Dursun, 2006; Cook, 1995; Fagan, 1992).

$$N_1 = \xi, N_2 = \eta, N_3 = 1 - \xi - \eta \quad (3.34)$$

Yukarıdaki ifadenin tanımlanmasında $N_1 + N_2 + N_3 = 1$ özelliğinden faydalanılmıştır.

$$x = x_{13}\xi + x_{23}\eta + x_3 \quad (3.35)$$

$$y = y_{13}\xi + y_{23}\eta + y_3 \quad (3.36)$$

Burada; $x_{ij}=x_i-x_j$ ve $y_{ij}=y_i-y_j$ ($i,j = 1,2,3$)

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} = J \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (3.37)$$

Yukarıdaki ifadede J, Jacobian matrisidir (Dursun, 2006; Cook, 1995; Fagan, 1992).

3.6. Sonlu Elemanlar Metodunun Avantajları

Sonlu elemanlar yöntemini diğer yöntemlere üstün kılan başlıca özellikler şunlardır;

1. Sonlu elemanlar, boyutlarının esnekliği nedeniyle, karmaşık şekilli bir cismi temsil edebilir (Özdemir, 2006).
2. Çok bağıntılı bölgeler (bir veya çok delikli cisimler) veya köşeleri olan bölgeler kolayca incelenebilir (Özdemir, 2006).
3. Değişik malzeme veya geometrik özellikleri bulunan problemler ek bir zorluk göstermez. Geometri ve malzeme nonlineariteleri, kalıtsal olsa bile (örneğin zamana bağlı) malzeme özellikleri, kolaylıkla göz önüne alınabilir (Özdemir, 2006).
4. Sınır şartları kolayca uygulanır (Özdemir, 2006).
5. Seramik malzemeler gibi çok sert malzemelere başlangıç çatlağı açılması çok zor

olmaktadır. Ayrıca böylesine zor koşullarda açılan çatlaklar istenen boyutlarda da oluşturulamamaktadır. Sonlu elemanlar yönteminde, başlangıç çatlakları, bilgisayar ortamında, arzu edilen boyutta rahatlıkla oluşturulabilir (Özdemir, 2006).

6. Sonlu elemanlar yöntemi birçok ürünü kısa sürede bilgisayar ortamında modelleme, test etme ve optimum boyutlarda en ucuz üretim imkanı sağlar (Canbak, 2007).
7. Sonlu elemanlar yöntemi, farklı malzemelerin birleşiminden meydana gelen yapıların analizinde kullanılabildiği için kompozit malzemelere başarı ile uygulanabilmektedir (Canbak, 2007).
8. Zamanla, sıcaklıkla ve noktadan noktaya değişen malzeme özellikleri hesaplamalarda dikkate alınabilir. Zamana bağlı olarak değişen yük ve geometriye sahip sistemlere ait problemler kolayca çözülebilir (Canbak, 2007).
9. Sonlu elemanlar yönteminde önemli değişikliklerin beklendiği bölgelerde küçük elemanlar kullanılarak hassas işlemler yapılabilirken, aynı parçanın diğer bölümleri daha büyük elemanlara bölünerek işlem hızı artırılabilir. Simetrik modellerde simetri koşullarından yararlanılarak, yapılan işlemlerde zamandan önemli ölçüde tasarruf sağlanabilir (Canbak, 2007).

3.7. Sonlu Elemanlar Metodunun Dezavantajları

1. Eleman seçiminin ve giriş bilgilerinin doğru olarak belirlenmesi ve hatasız olarak programa girilmesi sonuçların güvenilirliği açısından önemlidir. Ayrıca analiz sonuçlarının da doğru olarak yorumlanabilmesi gerekir. Bu nedenlerden dolayı sonlu elemanlar yöntemi ile analiz belirli bir deneyim ve birikimini gerekli kılmaktadır (Canbak, 2007).
2. Sonlu elemanlar metodunda hesaplamalar, çok küçük bir problem için dahi çok fazladır. Bu nedenle yöntem el ile çözüm için uygun değildir (Canbak, 2007).
3. Büyük ve karmaşık sistemlerin analizi için genellikle büyük bilgisayar belleğine ve çözüm zamanına ihtiyaç vardır (Canbak, 2007).
4. Analiz sonuçlarının yüzde yüz doğru olduğu zannedilmemektedir. En iyi şartlarda elde edilen sonuçlarda dahi belirli bir hata payının bulunduğu daima göz önünde tutulmalıdır (Canbak, 2007).

BÖLÜM IV

4. KAYNAK ÖZETLERİ

Havacılık, uzay, savunma ve otomotiv gibi endüstrilerdeki hızlı teknolojik gelişim ve artan rekabet, yüksek performansa sahip ürünlerin tasarlanmasına bu durum da, hafif ve mukavemeti yüksek malzemelere ihtiyacı gerekli kılmıştır. Bu ihtiyaca cevap vermek üzere, 1960'lı yılların ortalarından itibaren kompozit malzemeler üretilmeye başlanmış ve günümüzde kullanım alanları giderek yaygınlaşmıştır.

Kompozit malzemelerin birleştirilmesinde matriks ve elyaf tipi gibi malzeme özellikleri, yükleme koşulları ve ortam şartları gibi pek çok bileşen göz önünde alınarak kullanılacak bağlama yöntemi seçilir. Matriks fazının termoplastik olduğu durumlarda ısı etkisiyle birleştirme (plastik kaynağı) tercih edilmesinin yanında civata ve perçin bağlantılarının da kullanılması mümkündür (Messler, 2004).

Bağlama elemanları, malzeme, şekil ve kuvvet bağı olmak üzere başlıca üç gruba ayrılabilir. Diğer taraftan da çözülme bakımından; çözülemeyen ve çözülebilen bağlama elemanları olarak iki gruba ayrılırlar. Malzeme bağı grubuna, yapıştırma bağlantıları lehim bağlantıları ve kaynak bağlantıları girmektedir (Rende, 1996). Kompozit levhaları çeşitli bağlama teknikleri olmasına rağmen, pimler düşük maliyetleri, kolay uygulanabilirliği, tamir ve bakım için kolay sökölme özelliklerinden dolayı yaygın olarak tercih edilmektedirler (Scalea, vd., 1999). Sağladığı çeşitli avantajlar nedeniyle uygulamada yaygın olarak tercih edilen bir birleştirme tekniği de yapıştırma dır. Yapıştırıcı ile birleştirme tekniğinin gelişmesi İkinci Dünya Savaşı boyunca olmuştur (Apalak, 1995). Yapıştırma bağlantılarda, büyük bir termik ve mekanik zorlama olmadan bağlantının yapılabilmesi, diğer bağlantı yöntemlerine göre oldukça önemli bir avantajdır. Böylece; birleştirilecek parçaların özellikleri değişmez. Sıcak perçinleme ve kaynak bağlantılarında olduğu gibi iç gerilmeler yoktur (Gediktaş, 1972).

Bağlantılarda karma bağlantının tercih edilmesinin nedeni pim bağlantısı ve yapıştırıcı bağlantısının avantajlarından birlikte yararlanılması ve tek başlarına kullanıldıklarında meydana gelen dezavantajlarının önlenmek istenmesidir. Örneğin yapıştırıcı bağlantısı ile gerilmenin tüm yüzeye yayılması, pim bağlantısında delik civarında meydana gelen gerilme yığılmalarının azaltılmak istenmesidir. Ayrıca, iki metal plaka arasını dolduran

yapıştırıcının, iki metal plaka arasındaki aşınma ve korozyonu önleyici etkisi de çok önemlidir. Özellikle mekanik birleştiriciler ile birleştirilmiş metal plakalarda korozyon pili oluşumu sıkça karşılaşılan bir sorundur (Aldaş ve Şen, 2011).

Yapıştırıcı ASTM tarafından yüzey teması ile malzemeleri bir arada tutabilen malzeme olarak tanımlanmıştır (ASTM D907-74, 1974). Yapıştırıcı ile birleştirme son yıllarda birçok uygulamada perçin, kaynak ve mekanik bağlama gibi alışılmış metotlara tamamlayıcı olabileceğini veya yerine kullanılabileceğini göstermiş olan malzemeleri birleştirme tekniğidir. Uçak konstrüksiyonlarında ve ahşap yapılarda yapıştırılmış elemanların dayanımı ve gerilme değişimlerine olan etkileri yıllardır araştırılmaktadır. Yapıştırıcı kullanımı makine imalat sanayinde de artmaktadır. Yapıştırıcılar, civata bağlantılarının ve mil göbek bağlantılarının emniyete alınması, rulmanlı yatakların montaj işlemlerinde, akış borularının sızdırmazlık işlemlerinde, motor bloğu-kapak sızdırmazlıklarının sağlanmasında sıvı conta olarak döküm parçalarının yapıştırılmasında, boşlukların doldurulmasında ve değişik tamirat işlemlerinde büyük ölçüde kullanılmaktadır. Buna rağmen, civata, kaynak ve perçin kullanımı hala otomotiv sanayinde, deniz araçlarında ve metallerin birleştirilmesini gerektiren birçok kitle üretim ürünlerinde önde gelmektedir (Shields, vd., 1975).

Matthews vd., (1982), civata bağlantılı kompozit levhalarda, delik etrafındaki gerilme dağılımını sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Civata bağlantılı kompozit levhanın üç boyutlu modellenerek incelenmesinin gerekli olduğu belirtilmiştir çünkü levhanın kalınlığı boyunca gerilme dağılımı, yapının mukavemetini etkilemektedir. Çalışmalarında civata modellenmemiş, civata ön gerilmesi, deplasman sınır konusu uygulanarak modellenmiştir. Bu çalışmada gerilme analizi hasar teorileri ile birleştirilmemiştir.

Chang vd., (1984), pimden yüklenmiş kompozit levhaların hasar analizleri üzerine çalışmışlardır. Bir ve birden fazla pimden yüklenmiş kompozit levhalarda gerilme durumu incelenmiştir. Kompozit levhadaki gerilme dağılımı sonlu eleman metodu kullanılarak hesaplanmış, maksimum yük ve hasar şekli önerilen hasar hipotezi ve Yamada-Sun hasar kriteri ile tanımlanmıştır. Çalışmalarında T300/1034- C grafit/epoksi kompozit malzeme kullanılmış, iki boyutlu gerilme analizi yapılmış ve sonuçlar deneylerle karşılaştırılmıştır.

Chang ve Chang (1987), ortası delikli kompozit levhalar için gerilme ve hasar analizleri yapmışlardır. İki boyutlu, düzlemsel gerilme ve ortotropik grafit/epoksi kompozit malzeme modeli incelenmiştir. Kompozit malzemeler için sonlu eleman analizlerinde uygulanmak üzere hasar ilerleme modeli geliştirilmiş ve Yamada-Sun hasar kriteri kullanılmıştır. Üç ana hasar şekli ele alınmıştır. Bunlar matris çatlaması, matris-elyaf kayması ve elyaf kopmasıdır. Sonlu eleman analiz sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve sonuçlar uygun bulunmuştur.

Chang and Chang (1987), çalışmalarında civata bağlantılı kompozit levhalar için hasar ilerleme modeli geliştirmiştir. Civata bağlantılı kompozit levhalar için üç ana hasar şekli olduğu belirtilmiştir. Bunlar; net kopma, yırtılma ve civata baskısı sonucunda meydana gelen delik iç yüzeylerindeki ezilmedir. Deneysel incelemeler sonucunda levhanın kopmasının ve yırtılmasının iki boyutlu (düzlemsel) olduğu, ezilme şeklinin ise üç boyutlu olduğu belirtilmiştir. Çalışmalarında sadece ilk iki hasar şekli olan levha kopması ve yırtılması incelenmiştir. İki boyutlu düzlemsel gerilme durumu alınmış, yukarıda bahsedilen algoritma ve hasar kriterleri çalışmalarında da uygulanmıştır.

Hyer vd., (1987), pim bağlantılı karbon/epoksi levhalarda pim elastisitesinin, sürtünme katsayısının ve pim-delik arasındaki toleransın yapının mukavemetine etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında (0), (90), (0/±45/90)s ve (02/±45) konfigürasyonları ele alınmıştır. Pim-delik temasından kaynaklanan gerilme dağılımının kosinüs dağılımı ile benzetilerek modellenmesinin genellikle doğru sonuç vermediği belirtilmiştir. Ayrıca pim elastisitesinin mukavemete etkisinin olmadığı belirtilmiştir.

Yogeswaren ve Reddy (1988), pim bağlantılı ortotropik levhalarda pim-delik temasından kaynaklanan gerilme dağılımını incelemişlerdir. İki boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş, pim-delik temas bölgesinde statik ve dinamik sürtünme katsayıları tanımlanmıştır. Ortotropik malzeme üzerine analizler yapılmış ve sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Adams (1989) tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada bindirme bağlantıları için klasik lineer çözümler tartışılmış ve sonlu elemanlar yönteminin kullanımıyla yapıştırma bağlantılarının analizinin yapılabileceği ileri sürülmüştür. Bu çalışma neticesinde yeni bir model geliştirilerek kompozit malzemeler için yeni tasarım şekilleri önerilmiştir.

Jurf ve Vinson (1990), civata bağlantılı kevlar/epoksi ve grafit/epoksi malzemelerin hasar analizleri üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında, hem klasik lamina teorisi kullanarak analitik analizlere hem de sonlu eleman analizlerine yer verilmiştir. Geliştirdikleri algoritmada, katmanlarda meydana gelen hasardan dolayı mekanik özelliklerde zayıflatma uygulanmıştır. İki boyutlu doğrusal olmayan elasto-plastik sonlu eleman modellemesi yapılmış ve deneylerle model karşılaştırılmıştır. Sonlu eleman analizlerinde öncelikle sadece delikli kompozit levha için analizler yapılmış ve sonuçlar deneylerle karşılaştırılmış, çalışmanın ikinci kısmında ise hem kompozit levha hem de pim modellenmiştir. Cisimler arasındaki teması benzetebilmek için düğüm noktaları kafes elemanlarla birleştirilmiştir. Analiz sonuçları deneysel sonuçlarla kısmen uyumlu bulunmuştur. Ezilme (yatak) gerilmesi, radyal ve teğetsel gerilmeler normalize edilerek hesaplanmıştır.

Eriksson (1990), civata bağlantılı tabakalı grafit/epoksi malzemelerde yatak gerilmesini incelemiştir. T300/914C ve HTA7/6376 malzemeleri ele alınmıştır. Ön gerilmenin, tabaka konfigürasyonunun, delik çapının, plaka kalınlığının ve yükleme yönünün yatak gerilmesine etkisi incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre ön gerilme uygulanmış levhalarda elde edilen mukavemetin, pimdene yüklenmiş aynı levhalara oranla 2.4 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışmada delik çapının, yükleme yönünün ve levha kalınlığının yatak gerilmesine etkisinin az olduğu sonucuna varılmıştır.

Chang vd., (1991), ortasında delik bulunan ve çekme kuvvetine maruz kalan tabakalı kompozit levhalarda hasar şekillerini incelemişlerdir. Deneysel ve nümerik çalışma yapılmıştır. İki boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş olup geliştirdikleri hasar ilerleme algoritması kullanılmıştır. Farklı konfigürasyona sahip grafit/epoksi malzeme üzerinde çalışmışlardır.

Tan (1991), ortasında delik bulunan kompozit levhalar için hasar ilerleme modeli ile hasar şekillerini benzetmek için malzeme zayıflatma kuralı geliştirmiş ve sonlu eleman analizlerinde kullanmıştır. Çalışmada Tsai-Wu hasar kriteri kullanılmıştır. Farklı konfigürasyonlar için analizler yapılmış sonuçlar deneyler ile karşılaştırılmıştır.

Kaya (1991), sonlu elemanlar yöntemi kullanarak çekme kuvveti altında tek ve çift yapıştırıcı ile birleştirilmiş bindirmelerde gerilme dağılımlarını araştırmıştır. Çalışmasında, gerilme dağılımı üzerine farklı parametrelerin etkilerini bulmak için ilk

olarak yapıştırıcı kalınlığı dikkate alınmış, ikinci olarak ise benzer ve farklı yapışan malzemeler için yapıştırıcı kalınlığı dikkate alınmamıştır. Model statik olarak ele alınmış ve daha sonra çalıştığı dinamik çalışmaların temelini biçimlendirmiştir.

Fan ve Qiu (1993), seri olarak bağlanmış dört pimli ve tabakalı kompozit levhaların gerilme analizleri üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında, pim deliklerinin toleransının ve sürtünme katsayısının, pim deliklerindeki reaksiyon kuvvetlerin dağılımını nasıl etkilediği analitik olarak incelenmiştir. Birinci ve dördüncü pimlerin deliklere sıkı geçtiği, ikinci ve üçüncü pimlerin deliklere boşluklu geçtiği varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır. Çalışmada T300/648 kompozit malzeme kullanılmıştır.

Lessard ve Shokrieh (1995), pim bağlantılı karbon/epoksi malzeme için iki boyutlu hasar ilerleme modeli geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, pim rijit olarak kabul edilmiş ve radyal sınır koşulları uygulanarak pim modellenmemiştir. Pim deliği/plaka genişliği ve pim deliği/kenar uzaklığı oranlarının kompozit levhanın mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca doğrusal olmayan malzeme davranışının da etkisi incelenmiştir. Geliştirilen hasar ilerleme modeli sonlu eleman analizlerinde uygulanmış, elde edilen sonuçlar deneyler ile karşılaştırılmıştır.

Chen vd., (1995), civata bağlantılı kompozit levhalarda delik-civata arasındaki teması modellemek için üç boyutlu sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Çalışmalarında [45/0–45/90]s konfigürasyona sahip grafit/epoksi ve cam elyaf takviyeli polyester malzemeler kullanılmıştır. Sürtünme katsayısının, delik-civata arasındaki toleransın ve ön gerilmenin mukavemete olan etkileri üzerine çalışmışlardır. Sonlu eleman analiz sonuçları deneylerle karşılaştırılmıştır. Apalak (1995) tarafından yapılan bir çalışmada, düz bindirme bağlantılarından farklı bir bağlantı şekli olan T-tipi bağlantıların, sonlu eleman metodu kullanılarak analiz ve tasarımları gerçekleştirilmiştir.

Wang vd., (1996), civata/pim bağlantılı kompozit levhalarda ezilme hasar şekli üzerine kapsamlı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmaları iki kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda deneysel çalışmalar yapılmış, ikinci kısımda ise sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Bağlantı şeklinin, civata/pim rijitliğinin, pul boyutunun ve civata ön gerilmesinin yatak mukavemetini nasıl etkilediği incelenmiştir. Deneylerde çeşitli tabaka konfigürasyonları, pim delik çapları, (W/D) ve (E/D) oranları kullanılmıştır. Parametrelerin sonuçları nasıl etkilediği de araştırılmıştır. Çalışmada hem pim

bağlantısı hem de civata bağlantısı ayrı ayrı incelenmiştir. Farklı civata ön gerilmelerinin bağlantının mukavemetini nasıl etkilediği ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Çalışma sonucunda civata bağlantılı yapılarda kırılmanın adım adım ilerlediği pim bağlantılı yapılarda ise kırılmanın birdenbire gerçekleştiği belirtilmiştir. İkinci olarak ön gerilme arttıkça bağlantının mukavemetinin de arttığı gözlenmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında deneysel sonuçlar doğrultusunda pim/civata bağlantılı kompozit yapıda ezilme gerilmesinin benzetimi için sonlu eleman modellemesi oluşturulmuştur. İki boyutlu modelleme yapılmış, pul ve civata rijit olarak kabul edilmiştir. Deney sonuçları ile sonlu eleman analiz sonuçları karşılaştırılmıştır ve üç boyutlu sonlu eleman modellemesi ile gerçeğe yakın ve doğru sonuçlar elde edilebileceği kanısına varılmıştır.

Hung ve Chang (1996), çalışmalarında civata bağlantılı kompozit levhaların mukavemet analizlerini yapabilen bir sonlu elemanlar kodu geliştirmişlerdir. Çalışmada çift kesme durumu incelenmiş, üç farklı karbon/epoksi malzeme için analizler yapılmıştır. İki boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş, pim yerine radyal sınır koşulları uygulanmıştır. Hasar ilerleme algoritması kullanılmış, net kopma, yırtılma ve ezilme hasar şekilleri, farklı W/D (plaka genişliği/delik çapı) ve E/D (deligin serbest kenara olan uzaklığı/delik çapı) değerleri için incelenmiştir.

Camanho ve Matthews (1997), pim ve civata bağlantılı kompozit levhalar üzerine yapılmış çalışmaları incelemiş ve bu çalışmaların derlendiği bir makale hazırlamışlardır. Elde ettikleri sonuçlara göre pim bağlantılı levhalar üzerine yapılan analizlerde sürtünme, pim-delik arasındaki boşluk ve temas yüzeyi dikkate alınmalıdır. Yatak gerilmesinin üç boyutlu analizler ile hesaplanmasının gerekli olduğu da belirtilmiştir çünkü kalınlık boyunca tabaka takviye açısının etkisi dikkate alınmalıdır.

Kim vd., (1998), pim bağlantılı, elyaf takviyeli kompozit levhaların mukavemeti üzerine çalışmışlardır. Sonlu elemanlar metodu kullanarak mukavemet analizleri yapmışlardır. Pim/delik arasındaki temas modellemesi ve delik iç yüzeyindeki yük dağılımının hesaplanması incelenmiştir. Hashin hasar kriteri, hasar ilerleme algoritmasıyla birlikte kullanılmıştır. Pim rijit kabul edilmiş, kompozit tabakalar simetrik olarak yerleştirilmiş, pim/delik arasındaki sürtünme katsayısı sabit alınmıştır. Modellemede, net kopma, yırtılma ve ezilme hasar şekilleri ele alınmıştır.

Pfeiffer ve Shakal (1998), bağlantı mukavemeti üzerine yapıştırıcı alanının etkisini araştırmak için yapılan deneysel bir çalışmada yapıştırma alanının artmasıyla bağlantının kesme mukavemetinin önemli oranda azaldığı belirlenmiş bu ise küçük alanlarda meydana gelen deformasyon direncinin büyük alanlarda meydana gelen deformasyon dirençlerinden fazla olmasına bağlanmıştır.

Ireman (1999), civata bağlantılı kompozit levhada gerilme dağılımını incelemek üzere üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturmuştur. Model IDEAS yazılımında oluşturulmuş, ABAQUS sonlu eleman yazılımının çözücüsü kullanılmıştır. Çalışmada, HTA7/6376 grafit/epoksi levha, AA7475-T76 alüminyum levha ve Ti6Al4VSTA titanyum civata kullanılmıştır. Tek kesme bağlantısı incelenmiştir. Temas yüzeyini azaltmak için civata, pul ve somun tek bir yapı olarak modellenmiştir. Temas çözümünde Langrangian multiplier metodu kullanılmıştır. Sürtünme katsayısı tüm yüzeylerde aynı ve sabit alınmıştır. Bunun sebebi, kullanılan yazılımın farklı sürtünme katsayılarının kullanımını desteklememesidir. Civata ön gerilmesini uygulamak için, civataya ortotropik termal genleşme katsayısı tayin edilmiştir. Daha sonra sıcaklık düşürülerek ön gerilme yaratılmıştır. Farklı civata tipi, ön gerilme, kompozit konfigürasyonu, civata/delik arasındaki boşluk değişkenler olarak ele alınmış ve bu değişkenlerin bağlantının mukavemetine olan etkisi incelenmiştir. Sonlu eleman analiz sonuçları yapılan deneylerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada hasar analizleri yapılmamıştır. Hasar kriterleri ve hasar ilerleme algoritması kullanılmamış olup sadece gerilme analizleri yapılmıştır.

Camanho ve Matthews (1999), civata bağlantılı T300/914 karbon elyaf/epoksi levhaların mukavemetinin belirlenmesi ve hasar ilerleme analizi için üç boyutlu sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen sonlu eleman modeli deneylerle karşılaştırılmıştır. Analizlerde, Hashin'in üç boyutlu hasar kriterleri kullanılmıştır. Hasar ilerleme modellemesinde, kompozit malzemenin elastiklik ve kayma modülü, kompozit malzemede oluşan hasarın ilerleme durumuna göre sonlu eleman analizlerinde azaltılarak uygulanmıştır. Sonlu eleman modeli ABAQUS yazılımı ile oluşturulmuştur. Çift kesme durumu incelenmiş, civata ve pul rijit olarak modellenmiştir. Civata ön gerilmesi uygulanmamıştır. Pul ile kompozit levha arasında sürtünme tanımlanmamış, temas analizi bu doğrultuda yapılmıştır.

Zhang vd., (2000), pim bağlantılı kompozit levhalarda, pim/delik yüzeyindeki sürtünmenin, üç boyutlu temas gerilmesine etkisini incelemişlerdir. Analitik ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda sürtünme katsayısının, delik civarında üç boyutlu gerilme durumunu önemli bir şekilde etkilediği belirtilmiştir. Düzlemsel gerilme şeklinde yapılan iki boyutlu modellemeler ile üç boyutlu gerilme durumu arasında önemli farklılıkların olduğu tespit edilmiş, bu durumun özellikle kayma gerilmesinde daha belirgin olduğu ifade edilmiştir.

Perugini vd., (2001), civata bağlantılı kompozit yapıların mukavemetini sonlu elemanlar yöntemi ile incelemişlerdir. Çalışmalarında plastik 5769 malzeme kullanılmış ve tek kesme durumu incelenmiştir. Üç boyutlu sonlu eleman modeli ANSYS yazılımı kullanılarak hazırlanmış, civata, somun ve pul elastik olarak modellenmiştir. Bu çalışmada Hashin hasar kriterleri, geliştirilen hasar ilerleme algoritması ile birlikte kullanılmıştır. Civata-pul, pul-kompozit, kompozit-kompozit, civata-kompozit arasındaki temas durumu incelenmiş fakat civata öngerilmesi uygulanmamıştır. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar deneylerle karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları ile deneyler arasında ortaya çıkan farkta, sürtünmenin etken olduğu ve bu etkenin ayrıntılı olarak araştırılmasının gerekli olduğu belirtilmiştir.

Okutan vd., (2001), örgü şeklindeki cam/epoksi malzemeden imal edilmiş pim bağlantılı kompozit levhaların mukavemetini araştırmışlardır. Bu çalışmada delik merkezinin levha kenarına uzaklığı/delik çapı oranı 1'den 5'e ve levha genişliği/delik çapı oranı 2'den 5'e kadar değiştirilerek farklı numuneler üretilmiş ve çekme testleri yapılmıştır. Test numunelerinde meydana gelen hasar şekilleri karşılaştırılmıştır.

Okutan (2001) çalışmasında, farklı takviye açıları ve farklı boyutlara sahip fiber-glass tabakalı kompozitlerin, pim yükü etkisi altındaki davranışları, nümerik ve deneysel olarak incelenmiştir. Amaç, pim bağlantılı tabakalı kompozitlerin, lineer ve nonlineer elastik davranış göstermesi durumları için, pim deliği etrafındaki gerilme dağılımlarını incelemek, hasar tipleri ve hasar mukavemetlerini tespit etmektir.

Chan ve Vedhagiri (2001) tamirat için yapıştırıcı, civata ve yapıştırıcı ile civata bağlantısının her ikisini bir arada kullandıkları bir çalışmalarında başlangıç olarak tabakalardaki yük dağılımını göz önüne aldıkları karbon fiber takviyeli kompozit bir

malzemeyi basit şerit olarak birleştirmişlerdir. Çalışma neticesinde karışık bağlantılarda tüm yükün yapıştırıcı tarafından transfer edildiğini bulmuşlardır.

Şen (2001), lazer kaynak ve yapıştırıcının birlikte kullanıldığı karma bağlantılar üzerine yaptığı çalışma, ısı analizi ve elasto-plastik gerilme analizi olmak üzere iki aşamadan oluşmuştur. İlk aşamada, epoksi türü bir yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmış çok ince metal plakaların, lazer nokta kaynağı esnasında meydana gelen sıcaklık dağılımı ve delik şeklinin oluşumu incelenmiştir. İkinci aşamada, lazer nokta kaynağı yapılmış olan bu bindirme bağlantısının elasto-plastik gerilme analizi yapılmıştır.

Tserpes vd., (2002), çalışmalarında HTA/6376 grafit/epoksi malzemesinden imal edilmiş $[(\pm 45/0/90)_4]_s$ ve $[(\pm 45/0/90)_8]_s$ konfigürasyonlarına sahip kompozit levhalarda civata bağlantılarının mukavemetini incelemişlerdir. Tek kesme konfigürasyonu ele alınmış, kompozit levha ile alüminyum levha birbirlerine bir civata ile bağlanmıştır. Hasar ilerleme modeli, Hashin ve maksimum gerilme hasar kriterleri ile birlikte kullanılmıştır.

Sun vd., (2002), civata bağlantılı kompozit levhaların mukavemetini incelemek üzere iki kısımdan oluşan bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarının birinci kısmında, üç boyutlu sonlu eleman modeli geliştirmişlerdir. Civata ön gerilmesinin, pul boyutunun ve civata özelliklerinin yapının mukavemetine etkisini araştırmışlardır. Analizlerde hasar ilerleme algoritması, malzeme özelliklerinde zayıflatma kuralı ile birlikte kullanılmıştır. Sonlu eleman yazılımı olarak ABAQUS kullanılmıştır. Çift kesme konfigürasyonu incelenmiş ve sonlu eleman analizlerinde civata ön gerilmesi uygulayabilmek için sıcaklık yükü verilmiş ve civata eksenine doğrultusunda gerilme oluşturulmuştur. $[(0/90)_6]_s$ ve $[(0/\pm 45/90)_3]_s$ konfigürasyonları ele alınmıştır.

McCarthy vd., (2002), civata bağlantılı kompozit yapılarda, civata ile delik arasındaki boşluğun yapının mukavemetine olan etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında, bir civatalı ve tek kesme konfigürasyonu ele alınmıştır. Dört farklı tolerans değeri için testler uygulanmıştır. Civata ile delik arasındaki toleransın artmasıyla birlikte yapının mukavemetinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Lawlor vd., (2002), tek civata bağlantılı, tek kesmeli kompozit levhalarda civata ile delik arasındaki toleransın, yapının mukavemetine olan etkisini incelemişlerdir. Farklı

tolerans değerlerine (0, 80 μm , 160 μm ve 240 μm) göre çekme testleri yapmışlardır. 80 μm 'lik toleransın havacılık sanayinde uygulandığı ve bu toleransın yapının mukavemetine olumsuz etkisinin olmadığı belirtilmiştir. Bu toleransın dışındaki tolerans değerlerinde bağlantının dayanımının olumsuz etkilendiği belirtilmiştir.

McCarthy ve McCarthy (2002), civata bağlantılı kompozit levhalarda civata ile delik arasındaki boşluğun etkisini incelemek için sonlu elemanlar analizleri yapmışlardır. Bir ve üç civatalı bağlantı şekli için analizler yapılmıştır. Dört farklı tolerans değeri (10, 80 μm , 160 μm ve 240 μm) için analizler uygulanmıştır. Çalışmalarında sadece gerilme analizi yapılmış olup hasar analizi uygulanmamıştır.

Riccio ve Scaramuzzino (2002), civata bağlantılı $[(90/\pm 45/0)_4]_s$ HTA 6376 kompozit malzeme üzerinde çalışmışlardır. Kompozit malzemelerde hasar analizi yapabilmek için hasar ilerleme algoritması geliştirmişlerdir. Üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuş, kompozit-aluminyum ve kompozit-kompozit yapıların tek civata ile bağlantı şekli incelenmiştir. Hasar kriteri olarak Hashin kriteri seçilmiştir. Çalışmalarında hasar ilerleme algoritmasının etkisini incelemişlerdir. Ayrıca temas modellemesinde kullanılan penalty rijitlik parametrelerinin etkisini araştırmışlardır.

İçten ve Karakuzu (2002), pim bağlantılı karbon/epoksi levhaların hasar şekillerini incelemek üzere deneysel ve sayısal çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında örgü şeklindeki (woven) kompozit levhalar kullanılmıştır. Delik merkezinin plaka kenarına uzaklığı/delik çapı, (E/D) ve plaka genişliği/delik çapı, (W/D), oranlarının yapının mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Çekme testleri yapılarak kuvvet-pim yer değiştirmesi grafikleri elde edilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında iki boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Pim-delik yüzeyi arasında meydana gelen kuvvet, kosinüs dağılımı şeklinde delik yüzeyine uygulanmış ve düzlemsel gerilme analizleri yapılmıştır. Analizlerde Hoffman ve Hashin hasar kriterleri hasar ilerleme algoritması ile birlikte kullanılmıştır. Ayrıca hasar durumuna göre malzeme özelliklerinde zayıflatma kuralları uygulanmıştır. Analiz sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Okutan (2002), pim bağlantılı, çok yönlü cam elyaf takviyeli epoksi levhalarda (E/D) ve (W/D) oranları ile takviye açılarının mukavemete etkisini araştırmış ve hasar şekillerini belirlemiştir. Çalışma deneysel ve sayısal kısımlardan oluşmuştur. Çekme testleri

yapılarak farklı (E/D) ve (W/D) oranları için kuvvet-pim yer değiştirmesi grafikleri çıkarılmıştır. Çalışmanın ikinci bölümünde iki boyutlu sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Pimi benzetmek için delik yüzeyine radyal sınır koşulları uygulanmıştır. Hashin hasar kriteri ve malzeme özelliklerinde zayıflatma kuralları uygulanmıştır. Analiz sonuçları deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Apalak ve Güneş (2002), büyük yer değiştirmelerin etkisini dikkate alarak yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısında yapıştırıcı ve yapıştırılan malzemelerin ısııl özelliklerindeki uyumsuzluktan dolayı oluşan ısııl gerilmeleri, sonlu eleman yöntemiyle incelemişlerdir. Yaptıkları detaylı analizlerin sonucunda, bağlantıdaki en kritik bölgenin yapıştırıcı-yapıştırılan malzeme ara yüzeylerinin serbest uçları olduğunu, alt ve st yapıştırılan malzeme yüzeylerinde büyük ısııl gerilmelerin oluştuğunu ifade etmişlerdir.

Whitworth vd., (2003), pim bağlantılı kompozit levhalar için hasar analizi yapmışlardır. alışmalarında Yamada-Sun hasar kriteri kullanılmıştır. Delik çevresinde olusan hasarın tayini için karakteristik uzaklık hesaplamaları analitik olarak yapılmış ve sonuçlar literatürde yer alan deneyler ile karşılaştırılmıştır. Yang vd., (2003) ise değişken kayma yüküne maruz kalan yapıştırıcılı yüzeylerin kapalı formda gerilme analizini sonlu eleman metodu kullanılarak yapmıştır.

McCarthy vd., (2005), birden fazla civata ile bağlanmış kompozit levhalarda civata ile delik arasındaki toleransın yapının mukavemetine olan etkisini incelemek amacıyla üç boyutlu hasar ilerleme programı geliştirmişler ve sonlu eleman analizleri uygulamışlardır. Analiz sonuçları deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan alışma sonucunda, delik ile civata arasındaki toleransın civatalar arasındaki yük dağılımına ve hasar şekline önemli etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Kelly (2004), karma (yapıştırıcı ve civata) bağlantılı kompozit basit bindirme bağlantılarında yük transferi konusunda bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada, karma kompozit basit bindirme bağlantılarındaki yük dağılımı, civata deliği teması ve non-linear malzeme davranışını içeren 3-boyutlu bir sonlu elemanlar modeli kullanımı sayesinde tespit edilmiş ve civata ile transfer edilen yük üzerine konuyla ilgili bağlantı tasarım parametrelerinin etkileri sonlu elamanlar çalışmasıyla araştırılmıştır.

Ceylan (2005) yaptığı çalışmada, değişik yüklemelere maruz, fiber takviyeli kompozit malzemelerin çeşitli (civata bağlantılı, yapıştırma bağlantılı ve hem civatalı hem de yapıştırılmalı) bindirme bağlantılarındaki gerilme durumlarının, yapıştırıcı cinsi ve kalınlığı değiştirilerek ayrı ayrı sonlu elemanlar metodu kullanarak nümerik çözümler oluşturmuştur.

Dursun (2006) civata bağlantılı tabakalı kompozit levhaların çekme kuvveti altındaki davranışlarını incelemek, meydana gelen hasar biçimlerini belirleyebilmek ve maksimum yük taşıma kapasitelerini doğru şekilde hesaplayabilmek amacıyla üç boyutlu hasar ilerleme modellemesi yapabilen bir program geliştirilmiştir. Geliştirilen bu program, genel amaçlı sonlu eleman analiz programı olan ANSYS ile birlikte çalıştırılmış, gerilme ve hasar analizleri yapılmıştır. Civata bağlantılı kompozit malzemelerde civata ile delik arasında ve metal levhalar ile kompozit levha arasında tanımlanan sürtünme katsayısının mukavemete etkisini araştırmak üzere çeşitli analizler yapılmıştır. Analizlerde sürtünme katsayısı 0'dan 0,3'e kadar değiştirilmiş ve gerilme analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre kompozit levhada delik kenarında meydana gelen maksimum basma gerilmesinde %18'e varan değişim tespit edilmiştir.

Colombi ve Poggi (2006), yapıştırıcı ile takviye edilmiş civata bağlantılarında oluşan zararın ortadan kalkması hedeflenmiş ve bunu kesinleştirmek amacı ile sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Etkili olan kuvvetlerin hangi bölgeleri etkilediği sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelenmiştir. Karşılaştırılan iki tür yapıştırıcıdan, birinin gevrek diğerinin ise daha kararlı bir yapı sergilediği görülmüştür. Bu durumlar göz önüne alındığında, yapıştırıcılarda hataların en aza inebileceği sonucuna varılmıştır.

Çalık (2008) tarafından yapılan çalışmada, birleşmede yapıştırıcı kullanımının avantajları, yapışma ile birleşmenin dezavantajları incelenmiştir. Tek tesirli bindirme yapıştırma bağlantısının analitik gerilme analizi ve köşeleri yuvarlatılmış yapıştırıcı bindirme bağlantısında sonlu elemanlar gerilme analizi yapılmıştır. Bu çalışmada yapıştırmada oluşan gerilmeye; yapıştırılan levha kalınlıklarının, yapıştırıcı kalınlığının, yapıştırıcı ve yapıştırılan levhaların elastik modüllerinin etkidiği görülmüştür.

Solmaz (2008) yaptığı çalışmada, farklı bindirme uzunluklarında ve farklı uç açılarında biri yüksek diğeri düşük dayanımlı iki yapıştırıcı kullanarak birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarının eksenel çekme yükü altındaki mekanik davranışları

incelemiştir. Çalışma, deneysel ve sayısal olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantılarında, yapıştırıcılar ve yapıştırılan malzemelerin gerilme-şekil değiştirme davranışları dikkate alınarak lineer sonlu elemanlar yöntemiyle gerilme analizi yapılmıştır. Deneysel ve sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve sonuçlar arasında oldukça iyi bir uyumun olduğu görülmüştür.

Şen vd., (2008a), yaptıkları çalışmada çift örtü kullanılarak yapıştırılmış metal levhalarda ısı gerilme analizlerini sonlu elemanlar metodu kullanarak araştırmışlardır. Yapılan çalışmada ısı gerilmelerin dağılımlarının ve değerlerinin yapıştırıcı kalınlığının değişimi ile önemli ölçüde değiştiği sonucuna ulaşmışlardır.

Şen vd., (2008b), yaptıkları çalışmada tek bindirmeli yapıştırıcı bağlantısında üniform ısı yükler altında yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcı bölgesinde ısı gerilmelerin dağılımı sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda ısı gerilmelerin yapıştırılan malzeme özelliklerinden, sınır şartlarından ve artan üniform sıcaklık yüklerinden önemli ölçüde etkilendiğini ortaya koymuşlardır.

Turan vd., (2010) yaptıkları çalışmada, pim bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda fiber takviye açısının değişiminin hasar yükleri ve hasar tipleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tabakalı kompozit levhadaki dört tabaka aynı doğrultuda takviye edildiği için takviye açısı θ değerinin değişmesiyle hasar tipi takviye açısıyla aynı doğrultuda deneysel ve sayısal olarak elde edilmiştir. İlk hasar oluşumu tüm takviye açılarında sayısal olarak matriks çekme hasarı şeklindedir. Ancak eksenel yüklemeye dik doğrultuda takviye dışında bu hasar yıkıcı hasar olmadığından dolayı daha sonra yük artışına bağlı olarak son hasarlar fiber çekme ve fiber matriks kayma hasarı şeklinde elde edilmiştir. $\theta=90^\circ$ olduğunda ise hasar tipi matriks hasarı şeklinde bulunmuştur.

Aldaş vd., (2009) yaptıkları çalışmada, çift bindirmeli yapıştırıcı bağlantısında üniform ısı yükler altında yapıştırılan malzeme ve yapıştırıcı bölgesinde ısı gerilmelerin dağılımı sonlu elemanlar yönteminden faydalanılmak suretiyle değişik üniform ısı yükler altında incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda ısı gerilmelerin yapıştırılan malzeme özelliklerinden, sınır şartlarından ve artan üniform sıcaklık yüklerinden önemli ölçüde etkilendiğini ortaya koymuşlardır.

Ekici ve Işık (2009) çalışmalarında delme işlemi esnasında delik yüzeyinde oluşan yüksek gerilme kuvvetleri sebebi ile delik çıkış kenarlarında oluşan yüzey hasarları incelemişlerdir. İnceleme esnasında cam elyaf takviyeli polimer kompozit malzeme, değişik kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme ve takım uç geometrisi) altında delinerek delik çıkış yüzey hasar faktörü ölçümleri yapılmıştır. Yapılan bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme hasar faktörünü azaltmıştır.
- Kesici takım uç açısının ve ağız sayısının artması ile hasar faktörü de artmıştır.
- En düşük hasar faktöre 90 m/dk kesme hızında, 0,06 mm/dev ilerleme hızında 60° uç açısına sahip iki ağızlı kesici takımla ulaşılmıştır.

Aldaş ve Şen (2010) yaptıkları çalışmada, farklı üniform sıcaklıklar altındaki yapıştırılmış ve pim bağlantısı yapılmış karma bağlantılarda sıcaklığın gerilmelere etkisi incelenmiştir. Karma bağlantıya, çekme yükü ve sırasıyla 40, 50, 60 ve 70° C üniform sıcaklık yükleri birlikte uygulanmıştır. Uygulanan üniform sıcaklıktaki artış miktarına bağlı olarak, gerilmelerin ve şekil değiştirmelerin önemli oranda arttığı görülmüştür. Ayrıca bazı önemli sonuçlar elde edilmiştir. İlk olarak, hem üniform sıcaklık hem de çekme yükü etkisindeki bağlantıda oluşan en yüksek gerilmeler çekme yönünde meydana gelmiştir. Uygulanan üniform sıcaklık miktarındaki artışa bağlı olarak, her yöndeki gerilmelerde ve von Mises gerilmelerinde önemli artışlar gözlenmiştir. Karma bağlantı yapılan alüminyum plakaların ve kullanılan epoksi türü yapıştırıcının, farklı ısı ve mekanik özellikleri nedeniyle bağlantı üzerinde farklı formlarda ve yüksek değerlerde gerilmeler meydana gelmiştir. Bir diğer önemli husus, gerilemelerin pim deliği civarında yoğunlaştığı ve gerilme yığılmalarının meydana geldiğidir. Dolayısıyla bağlantıda oluşabilecek muhtemel bir hasar öncelikle delik çevresinde meydana gelecektir.

Turan ve Kaman (2010) çalışmalarında iki kompozit levhayı birleştirmek için yapıştırıcı kullanılarak elde edilmiş olan tek tesirli yapıştırma bağlantısının hasar analizi deneysel ve sayısal metotlar kullanılarak araştırılmıştır. Bağlantı yapılırken yapıştırıcı olarak epoksi reçine ve yapışan olarakta karbon fiber takviyeli epoksi reçine matriksli dört tabakadan oluşan kompozit levhalar kullanılmıştır. Sayısal çalışma sonlu elemanlar metodunu kullanarak çözüm yapan ANSYS programında yapılmıştır. Bağlantı mukavemeti üzerine yapıştırıcı kalınlığı, bindirme uzunluğu ve plaka genişliğinin etkisi sayısal olarak araştırılmıştır. Sonuç olarak yapışma yüzey alanının değişiminin hasar

yükleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Örneğin yapıştırıcı kalınlığındaki artışın hasar yüklerini arttırdığı, ayrıca çekme hasar yükünün en düşük olduğu $[90^\circ]_4$ tabaka dizilimi için; en yüksek hasar yüküne sahip yapıştırma bağlantısında sadece matriks çekme hasarı meydana gelmektedir. Yapıştırma bağlantısı üzerine geometrik parametrelerin etkileri incelendiği zaman yapılmış olan sayısal çalışmanın sonuçlarına göre hasar yükleri üzerine en etkili parametrenin kompozit levha genişliği olduğu görülmüştür.

Aldaş ve Şen (2011) çalışmalarında karma bağlantı uygulanmış farklı metal plakalarda meydana gelen gerilmeler incelemişlerdir. Karma bağlantı, pim bağlantısı ve yapıştırıcı bağlantısından meydana getirilmiştir. Bağlantısı yapılan alt levha alüminyum olarak sabit tutulurken, üst levha sırasıyla çelik, bakır, titanyum ve alüminyum olarak modellenmiştir. Yapıştırıcı olarak epoksi kullanılmıştır. Çözümde, üç boyutlu modeller oluşturularak, sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Karma bağlantıya, çekme yükü ve 40°C uniform sıcaklık yükleri birlikte uygulanmıştır. Alüminyum-alüminyum karma bağlantılarda meydana gelen gerilmeler en düşük değerlerde meydana gelirken, en yüksek gerilmelerin alüminyum-çelik karma bağlantılarda meydana geldiği görülmüştür. Bir başka ifadeyle, aynı malzemeden yapılan benzer plakalardan meydana gelen karma bağlantılar, daha düşük gerilmelere neden olmuştur.

Şen ve Aldaş (2011) bu çalışmalarında metal-kompozit bağlantılarda farklı malzemelerden yapılmış metal plaka kullanımının gerilmeler üzerine etkisini incelemişlerdir. Kompozit bir plakanın farklı metal plakalara yapıştırıldığı ve pim bağlantısı yapıldığı varsayılmıştır. Metal plakalar alüminyum, çelik, bakır ve titanyumdur. Karma bağlantı üzerine hem çekme yükü hem de uniform sıcaklık yükü birlikte uygulanmıştır. Gerilme probleminin çözümü sonucunda, gerilmelerin özellikle pim deliği çevresinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. En büyük gerilmeler çelik-kompozit bağlantılarda olduğu gözlemlenirken, en düşük gerilmeler titanyum-kompozit bağlantılar için elde edilmiştir.

Şen ve Aldaş (2012a) bu çalışmalarında, pim bağlantısı ve yapıştırıcı bağlantısının kombinasyonundan meydana gelen karma bağlantı uygulanmış kompozit ve alüminyum plakalarda meydana gelen gerilmeler analiz edilmiştir. Yapıştırıcı olarak, epoksi türü bir yapıştırıcı kullanılmıştır. Analiz, sonlu elemanlar metodu (FEM) kullanılarak ve ANSYS yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Çekme yükü sabit tutularak; modele

artan değerlerde uniform sıcaklıklar uygulanarak artan sıcaklık değişiminin, gerilmeler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre, hesaplanan gerilme değerlerinin, üniform sıcaklık artışına bağlı olarak arttığı gözlenmiştir. Delik çevresinde gerilme yığılmaları olduğu görülmüştür. Çekme gerilmeleri, basma gerilmelerinden daha büyük olarak hesaplanmıştır.

Şen ve Aldaş (2012b), karma bağlantılı kompozit plaklarda farklı sıcaklıklar etkisiyle oluşan gerilmelerin analizini yaptıkları çalışmada gerilmeleri analiz etmişlerdir. Karma bağlantı, pim ve yapıştırıcının birlikte kullanılması ile meydana getirilmiştir. Analizde sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılmıştır. Oluşturulan modele hem çekme yükü hem de uniform sıcaklık yükü aynı anda uygulanmıştır. Sıcaklığın gerilmeler üzerine etkisini gözlemlemek için çekme yükü sabit tutulmuş fakat 50, 70, 90 ve 110 °C'lik üniform sıcaklıklar uygulanmıştır. Elde edilen analiz sonuçlarına göre uniform sıcaklık etki ettirildiğinde, yapıştırıcı tabakasının üzerinde genel olarak basma gerilmeleri meydana gelirken delik çevresinde yüksek değerlerde basma ve çekme gerilmeleri oluşmaktadır.

BÖLÜM V

5. MALZEME ve YÖNTEM

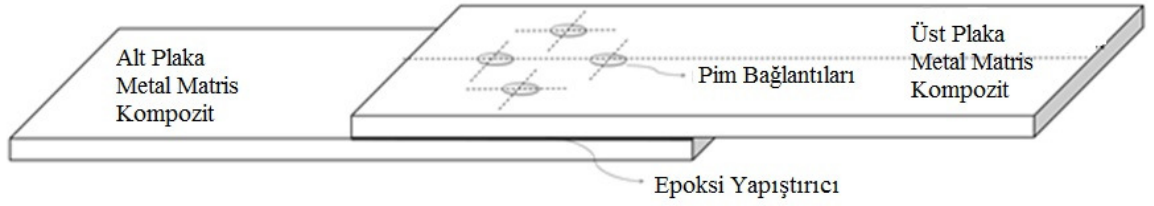
5.1. Giriş

Kompozit malzemelerdeki hızlı gelişmelere bağlı olarak, kompozit plakaların birbirine veya diğer malzemelerden yapılmış plakalara bağlantıları için yeni ve çeşitli bağlantı şekilleri ve geometrileri üzerinde de yoğun olarak çalışılmaktadır. Çünkü bu bağlantıların en az hasar meydana getirecek şekilde tasarımı oldukça önemlidir. Sağladığı çeşitli avantajlar nedeniyle, kompozit plakaların özellikle pim bağlantıları ile birleştirilmesi oldukça tercih edilen bir yöntemdir. Bunun yanında, yapıştırma tekniği de sağladığı çeşitli avantajlarından dolayı uygulamada yaygın olarak tercih edilen bir birleştirme yöntemidir (Şen, Aldaş, 2012).

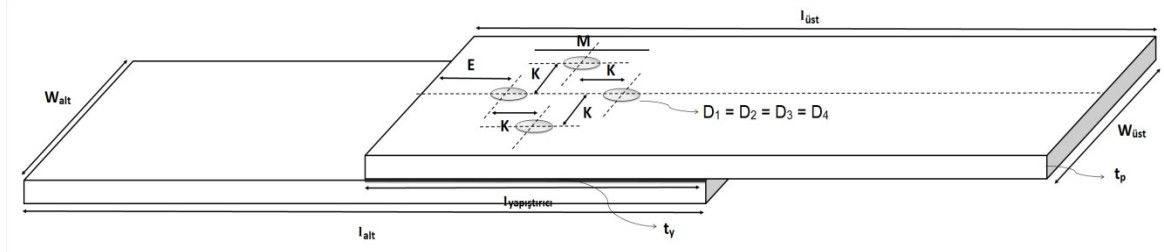
Bu çalışmada, iki adet 4 mm kalınlığındaki metal matris kompozit levhanın öncelikle epoksi türü bir yapıştırıcı ile yapıştırıldığı ve yapıştırılan bu parçalara ayrıca birden fazla pim bağlantısı yapıldığı varsayılmıştır (Şekil 5.1). Buradaki amaç, daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak, bir karma bağlantı oluşturulması ve modellenmesidir. Çünkü, daha önceki çalışmalarda, genel olarak ya yapıştırıcı bağlantıları ya da pimli bağlantılar ayrı ayrı çalışılmış veya tek bölgeden pimli ve yapıştırıcılı karma bağlantılar kullanılmıştır.

5.2. Karma Bağlantının Tanımlanması

Bağlantısı yapılan metal matris kompozit levhaların her birinin ölçüleri 40x120x4mm ve pim deliklerinin çapları 5 mm olarak modelleme yapılmıştır (Şekil 5.1). Ayrıca alt ve üst plakalar arasında 0,2 mm kalınlığında epoksi yapıştırıcı mevcuttur. Karma bağlantı modeli Şekil 5.1’de ve bağlantı ölçüleri Şekil 5.2’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Modellenen karma bağlantı



Şekil 5.2. Modellenen karma bağlantı ölçüleri

Şekil 5.2’de şematik olarak gösterilen karma bağlantının boyutları şu şekilde tanımlanmıştır;

Alt ve üst kompozit plakaların uzunlukları;	$l_{alt} = l_{üst} = 120 \text{ mm}$
Alt ve üst kompozit plakaların genişlikleri;	$w_{alt} = w_{üst} = 40 \text{ mm}$
Alt ve üst kompozit plakaların kalınlıkları;	$t_p = 4 \text{ mm}$
Epoksi yapıştırıcı tabakasının kalınlığı;	$t_y = 0.2 \text{ mm}$
Epoksi yapıştırıcı tabakasının uzunluğu;	$l_y = 60 \text{ mm}$
Pim çapları;	$D_1 = D_2 = D_3 = D_4 = 5 \text{ mm}$
Üst plaka serbest kenarının pim merkezine uzaklığı;	$E = 20 \text{ mm}$
Delikler arası mesafe;	$K = 10 \text{ mm}$
Orta merkezde bulunan iki delik arasındaki mesafe;	$M = 20 \text{ mm}$

5.3. Tasarımda Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Yukarıda belirtildiği üzere bu çalışmada alt ve üst plaka olarak alüminyum matris içerisine çelik tellerin ısı ve basınç altında birleştirilmesiyle üretilen metal matriks kompozit plakalar kullanılmıştır (Sayman, 2003). Metal matriks kompozit plakaların malzeme özellikleri ve yapıştırıcı olarak kullanılan epoksinin mekanik özellikleri sırasıyla Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2 de sırasıyla verilmiştir (Sayman, 2003; Apalak vd., 2003).

Çizelge 5.1. Metal matris kompozit malzemenin mekanik özellikleri (Sayman, 2003)

E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}	α_1 (1/°C)	α_2 (1/°C)
85000	74000	30000	0,29	18.5×10^{-6}	21×10^{-6}

Çizelge 5.2. Epoksi yapıştırıcının mekanik özellikleri (Apalak vd., 2003)

E (MPa)	N	α (1/°C)	ρ (kg/m ³)
3300	0.30	43.3	1264

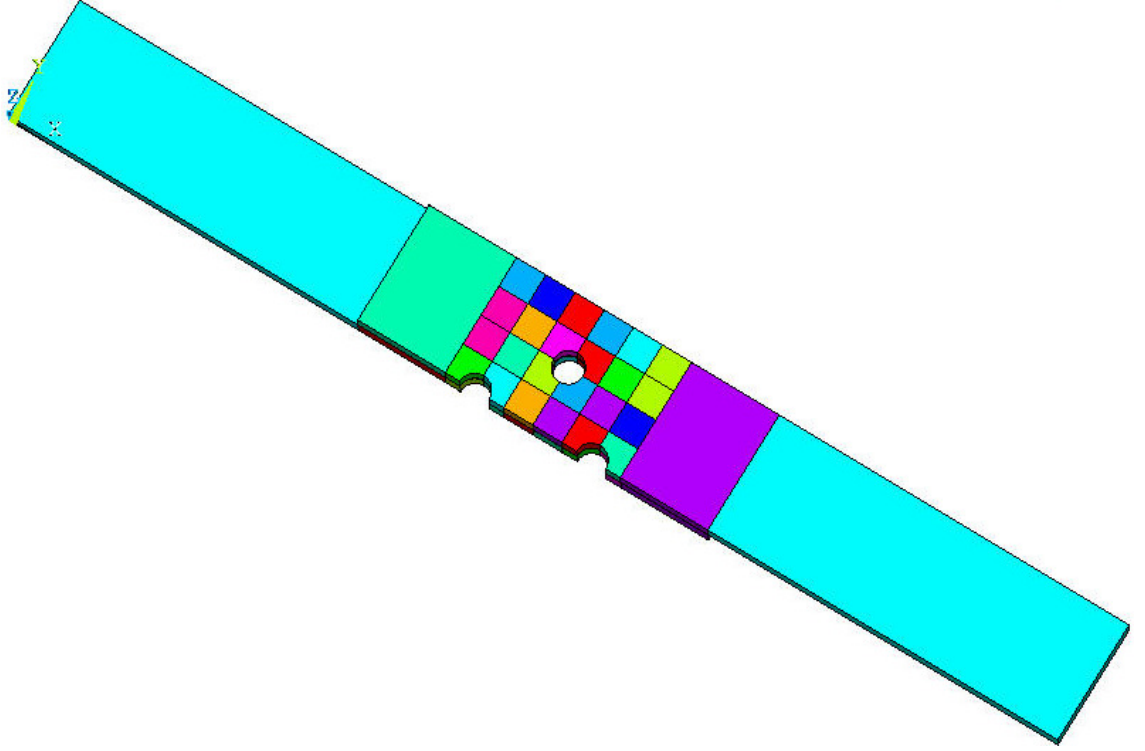
5.4. Sonlu Elemanlar Modeli

Karma bağlantının modellenmesi ve analizinde son yıllarda birçok farklı alanda ve çok değişik problemlerin çözümünde yaygın bir şekilde tercih edilen ANSYS sonlu elemanlar yazılımından yararlanılmıştır (ANSYS 14.0). Bilindiği üzere, ANSYS yazılımı sonlu elemanlar metodunu kullanarak çözüm gerçekleştirmektedir. ANSYS yazılımı, sahip olduğu ara yüzler ile modelleme sürecinde ve çözüm aşamasında ve ayrıca elde edilen bulguların farklı şekillerde sunulmasına imkân vermesiyle tasarımcılar için oldukça iyi bir çalışma olanağı sunmaktadır.

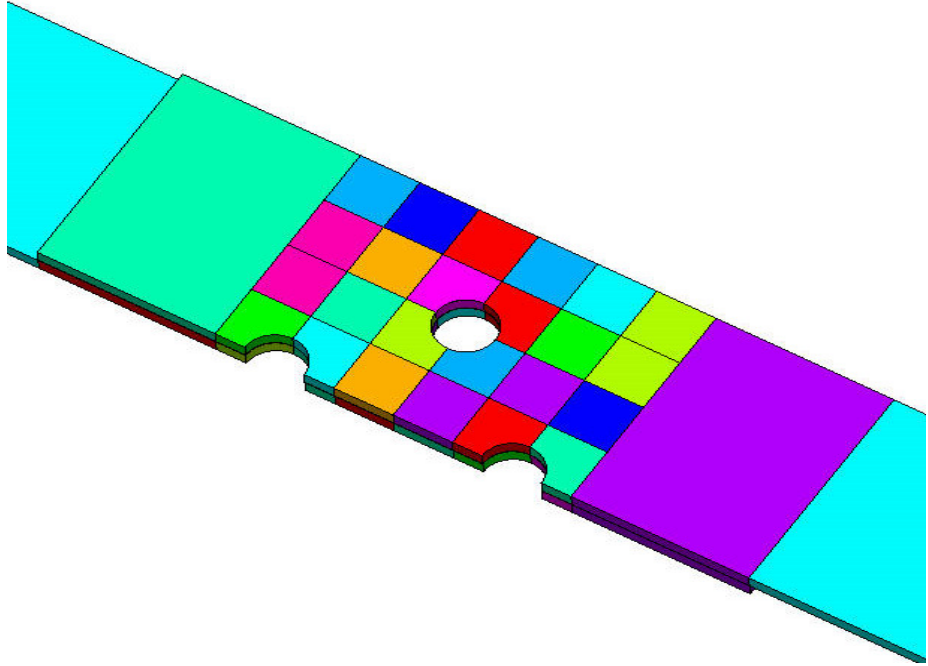
Çalışmada ilk adım olarak, yapıştırılmış ve paralel çift pim uygulanmış karma bağlantının üç boyutlu katı modeli oluşturulmuştur. Karma bağlantının y-eksenine göre simetrik olmasından dolayı Şekil 5.3'te görüldüğü şekilde simetri ekseninden ayrılmış olarak yarım model elde edilmiştir. Bu nedenle simetri sınır artı olarak $u_y=0$ sınır şartı bağlantının ilgili yüzey alanına uygulanmıştır. Bundaki temel amaç, model üzerindeki eleman ve düğüm noktası sayısının önemli oranda azaltılması ve bunun neticesinde de çözüm süresinin kısılması ve daha küçük boyutlu olarak çözüm dosyalarının oluşturulmasıdır.

Üç boyutlu katı modelin oluşturulmasından sonra, oluşturulan katı model üzerine uygun sınır şartları uygulanmıştır. Sınır şartlarının uygulanmış olduğu modelin resmi Şekil 5.4'te gösterilmiştir.

Şekil 5.4'ten görüldüğü üzere alt kompozit plakanın serbest ucu ankastre hale getirilmiştir. Çoklu pim bağlantısı nedeniyle ve $\frac{1}{2}$ model oluşturulmuş olmasından dolayı, simetri sınır şartı simetri eksenini boyunca tüm yüzeylere uygulanmaktadır ($U_y=0$). Çekme işlemi uygulandığında pim deliklerine, pimlerin temas ettiği yüzeylerinde pim sınır şartı uygulanmaktadır ($U_x=0$).

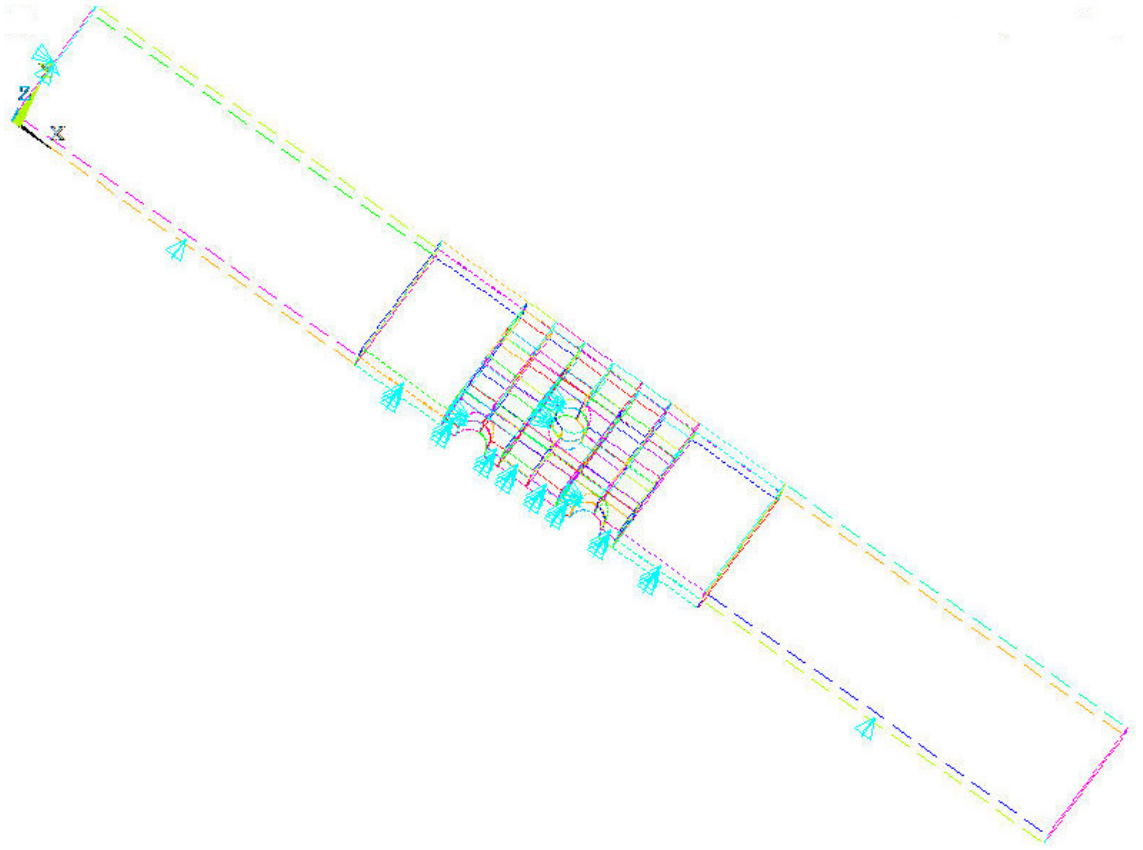


a) Üç boyutlu katı model

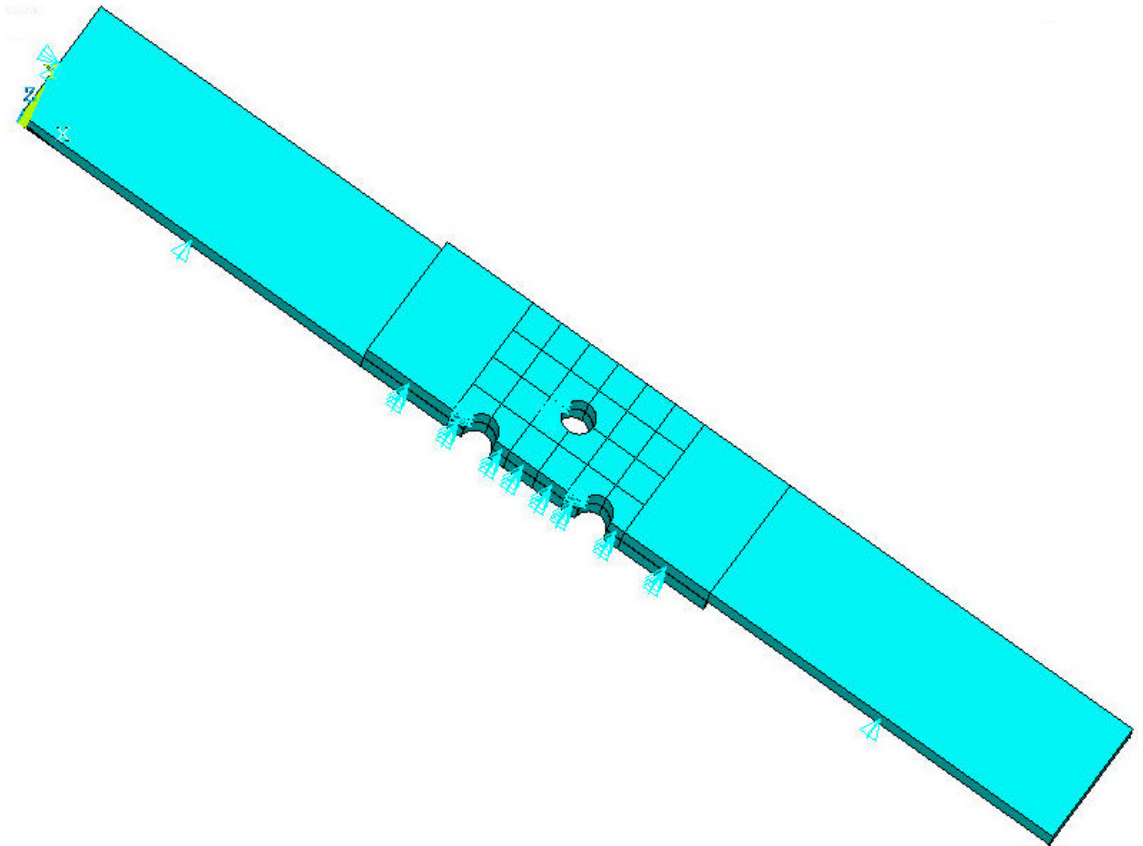


b) Pim deliklerinin çevresinin yakınlaştırılmış görüntüsü

Şekil 5.3. Çok delikli karma bağlantının üç boyutlu yarım modeli



a) Çizgisel gösterim



b) Katı model olarak gösterim

Şekil 5.4. Üç boyutlu çok delikli karma bağlantıya sınır şartlarının uygulanması

Bir sonraki bulgular bölümünde daha fazla açıklamalı olarak anlatılacak olan ve çok pim bağlantılı karma bağlantı üzerinde gerilmelerin meydana gelmesine neden olan üç farklı yükleme durumu ise şu şekilde özetlenebilir. İlk olarak karma bağlantıya sadece farklı değerlerde çekme yükü uygulanmış ve bu çekme yüklerinin tesiriyle meydana gelen gerilmelerin değerleri ile dağılımları elde edilmiştir.

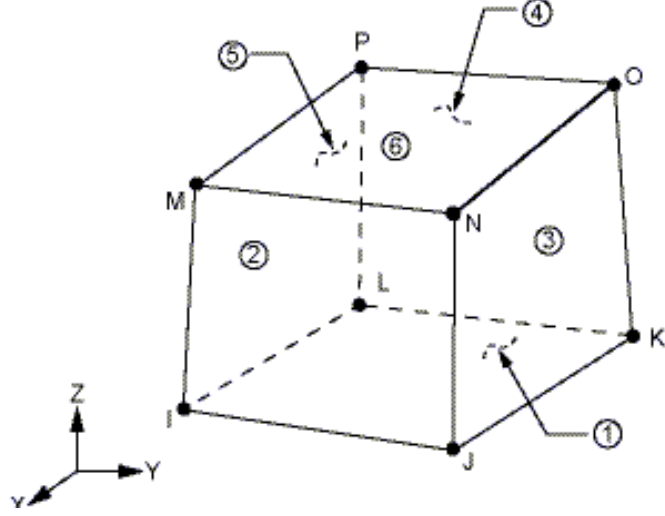
İkinci olarak karma bağlantıya herhangi bir çekme yükü uygulanmadan, sadece farklı değerlerde uniform sıcaklıklar uygulanmış ve uygulanan bu uniform sıcaklıkların etkisiyle oluşan ısı gerilmelerin değerleri ve dağılımları elde edilmiştir.

Üçüncü ve son olarak karma bağlantıya hem uniform sıcaklık hem de çekme yükü birlikte uygulanmış ve bu çift yükleme altında meydana gelen gerilmeler ile dağılımları elde edilmiştir. Üçüncü aşamada, ilk iki aşamada uygulanan çekme ve ısı yüklerinin hepsi ikili gruplar halinde birlikte uygulanmıştır. Üçüncü aşamanın diğer bir önemli önceki birçok çalışmadan farkı da sadece çekme veya sadece ısı yükü gibi tek yükleme ile sonuçların elde edildiği bir çalışma yerine iki farklı yüklemenin birlikte uygulandığı bir çözüm yapılmış olmasıdır. Çünkü gerçek birçok problemde bağlantılar tek yük etkisi yerine genellikle aynı anda hem çekme hem de ısı olmak üzere farklı yüklerin etkisinde kalmaktadır. Üçüncü aşamada birlikte tatbik edilen çiftli yükleme şartlarının gerçek problemlere daha uygun olduğu söylenebilir.

Bilindiği üzere, sonlu elemanlarla analiz işleminde en önemli safhalardan birisi kesinlikle sonlu elemanlar ağ yapısının meydana getirilmesidir. Çözüm ve amaca uygun bir sonlu elemanlar ağ yapısının oluşturulabilmesinin ilk şartı da uygun eleman tipinin seçilmesidir. Yani çalışma üç boyutlu ise üç boyutlu ağ yapısının oluşturulmasına imkân veren bir eleman tipinin seçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada eleman tipi olarak Şekil 5.5'te görülen SOLID 185 eleman tipi tercih edilmiştir (ANSYS 14.0). Kullanılan bu eleman tipi üç boyutlu modellerde sonlu elemanlar ağ yapısının oluşturulabilmesine imkân sağlamaktadır.

Programda uygun eleman tipinin seçiminden sonra üç boyutlu çok delikli karma bağlantı modeli üzerinde sonlu elemanlar ağ yapısı meydana getirilmiştir. Modelin sonlu elemanlara bölünmüş durumu Şekil 5.6-a'da gösterilmiştir. Model üzerindeki ağ yapısının daha iyi anlaşılabilmesi için çoklu pim bölgesi Detay A olarak Şekil 5.6-b'de

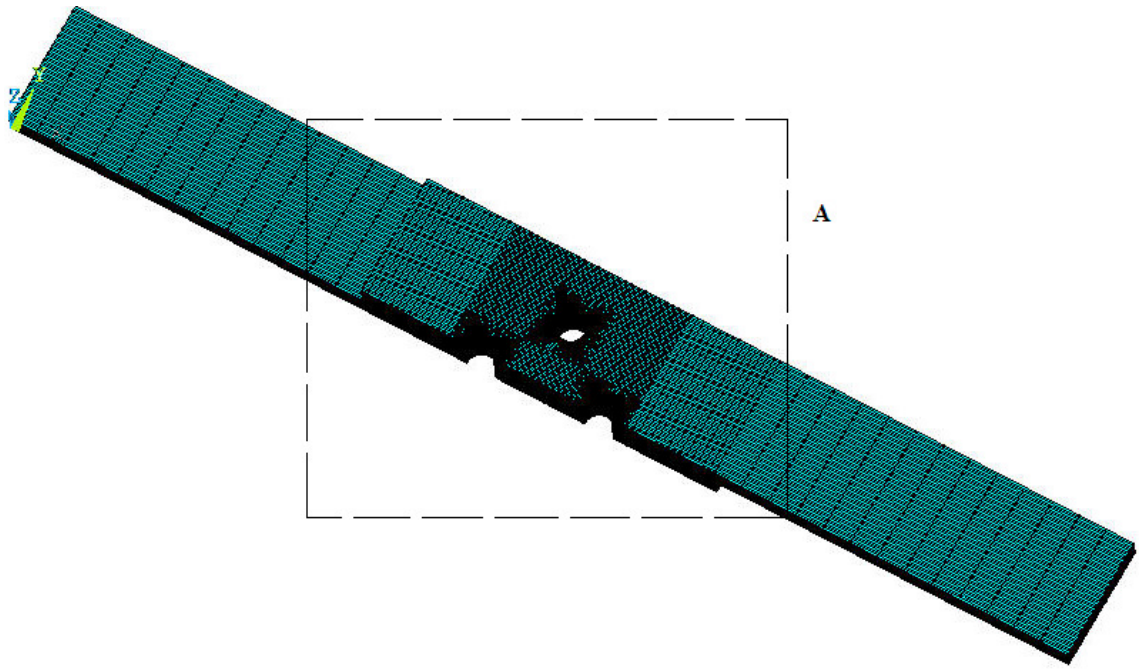
gösterilmiştir. Ayrıca pimlerin olduğu bölgelerde sırasıyla Detay B ve Detay C olarak büyütülmüş olarak verilmiştir.



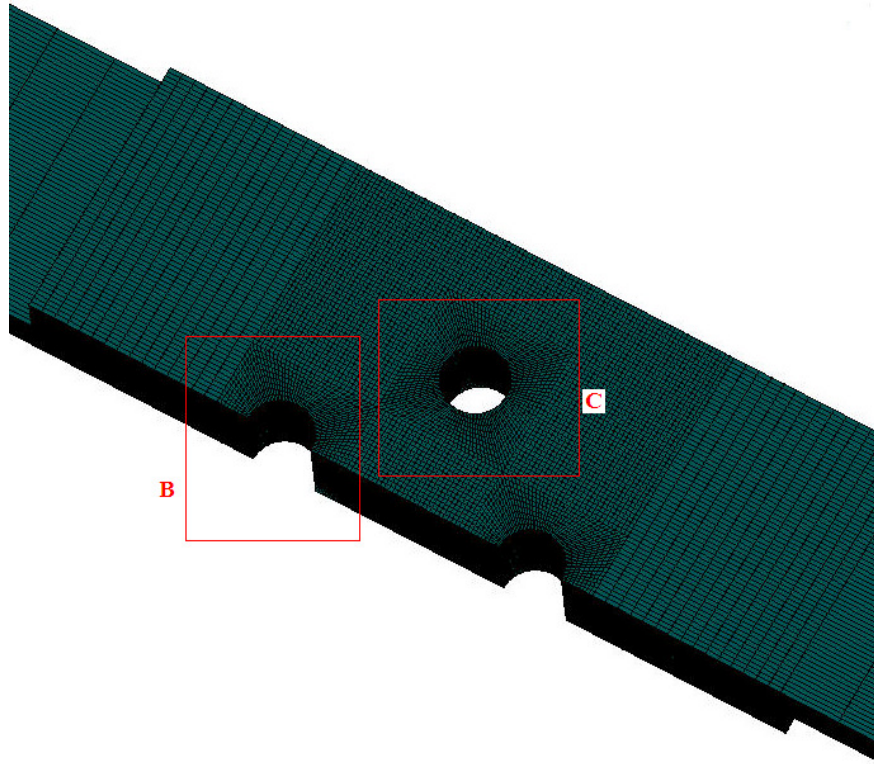
Şekil 5.5. SOLID 185 eleman tipi (ANSYS 14.0)

Çok pimli karma bağlantıdaki her bir kompozit plakanın sonlu elemanlar ağ yapısı detay görüntüleri ile birlikte Şekil 5.7’de gösterilmiştir. İlave olarak karma bağlantıdaki yapıştırıcı tabakasının sonlu elemanlar ağ yapısı ve detay görüntüleri ise Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Son olarak, karma bağlantıdaki üst kompozit plakanın üstten görünüşünün ağ yapısı Şekil 5.9’da verilmiştir. Bu şekil diğerlerinden farklı olarak iki boyutlu olarak gösterilmiştir.

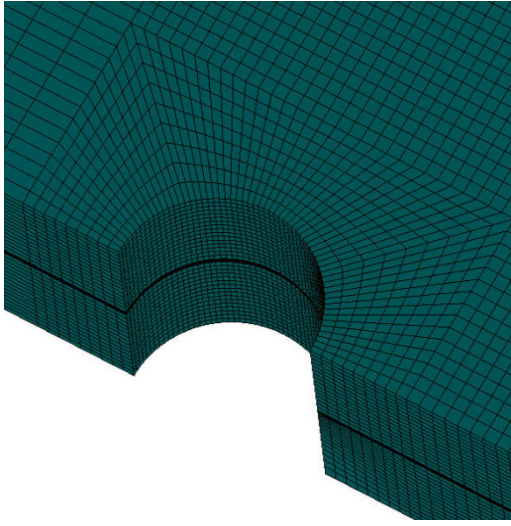
Üç boyutlu çok delikli karma bağlantı için ağ yapılarını gösteren şekiller (Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9) incelendiğinde çok muntazam bir sonlu eleman ağ yapısının elde edildiği açıkça görülmektedir. Simetri şartları dikkate alınarak yapılan $\frac{1}{2}$ (yarım) model üzerinde (Şekil 5.3) bir tanesi ve iki tanesi de yarım olmak üzere üç tane dairesel pim deliğinin mevcut olduğu anlaşılmaktadır. Model üzerindeki bu üç deliğin varlığına rağmen alt ve üst kompozit plakalar ve yapıştırıcı tabakasının her biri üzerinde düzgün dörtgen elemanlardan meydana gelen bir sonlu eleman ağ yapısı oluşturulmuştur. Dikkat edilmesi gereken husus ise bu oluşumun üç boyutlu olarak yapılmış olmasıdır.



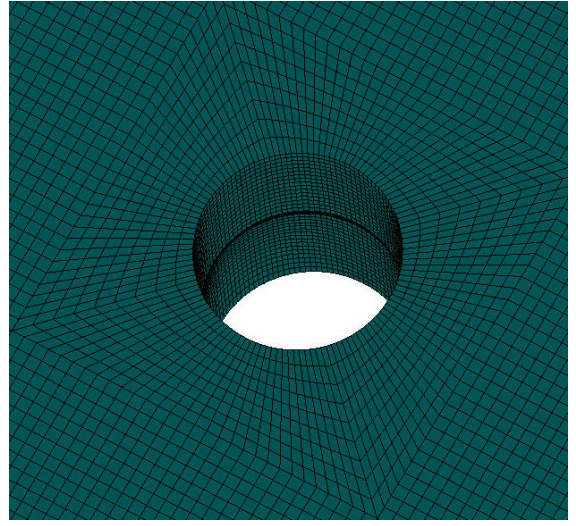
a) Tüm model



b) Detay A



c) Detay B



d) Detay C

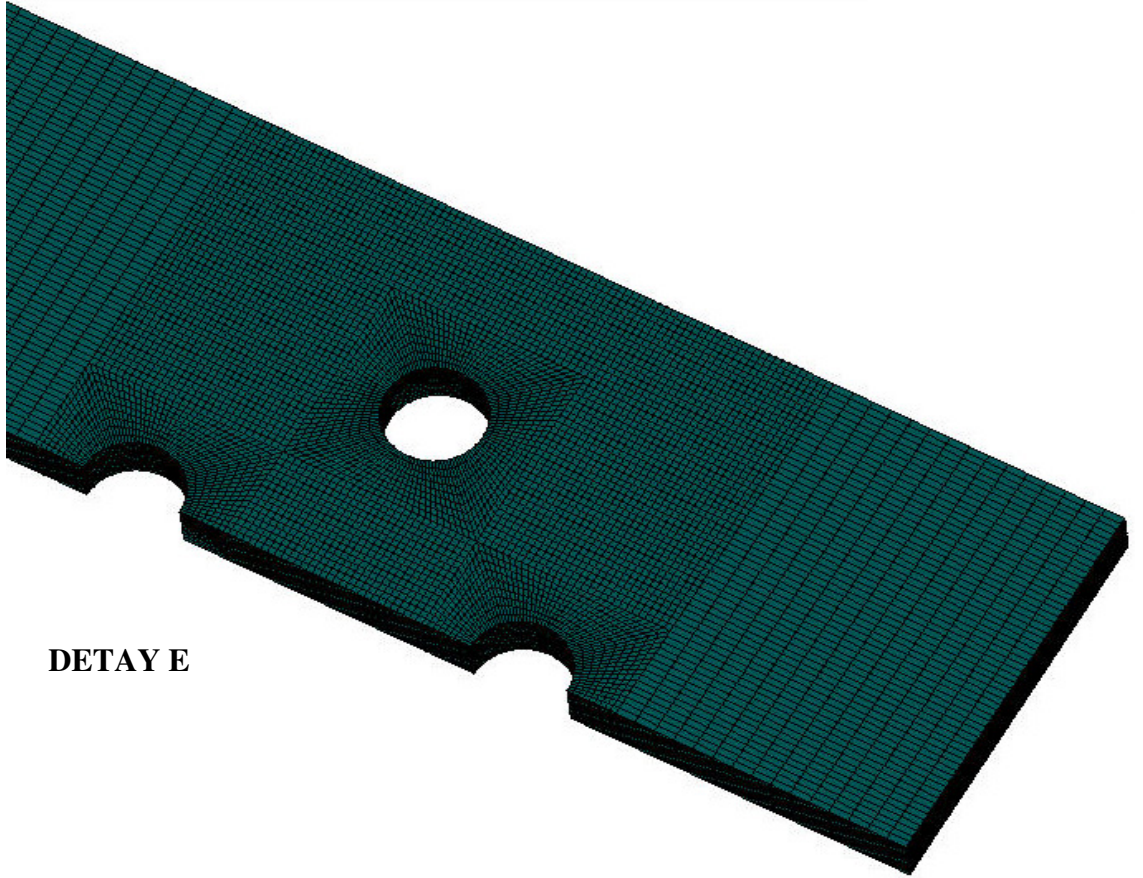
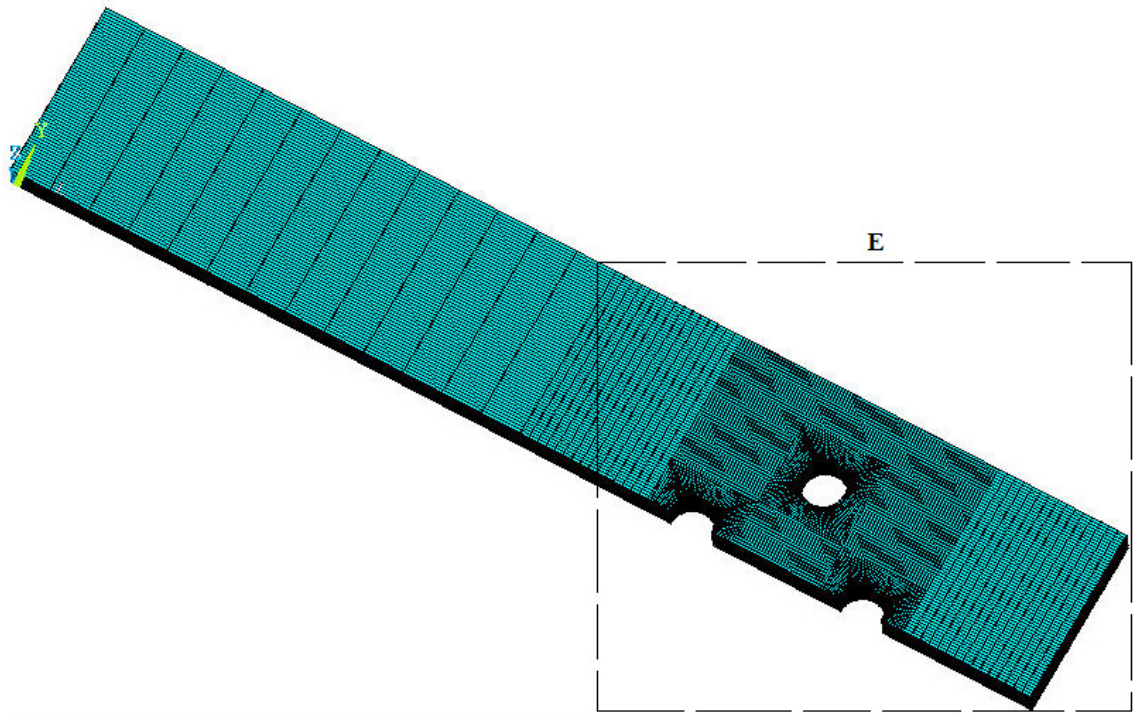
Şekil 5.6. Karma bağlantının tamamının sonlu elemanlar ağ yapısı

Bu oldukça önemlidir, çünkü sonlu elemanlarla çözüm yönteminde düzgün bir sonlu eleman ağ yapısı elde edilmesi, elde edilecek sonuçların da daha doğru bir şekilde elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Diğer taraftan, eğer model üzerinde herhangi bir amaçla bir delik oluşturulmak zorunda kalınıyorsa ki bu çalışmada oluşturulan modelde üç adet pim deliği mevcuttur, düzgün bir dağılım sağlayan sonlu eleman ağ yapısı oluşturulması oldukça zor bir çabadır.

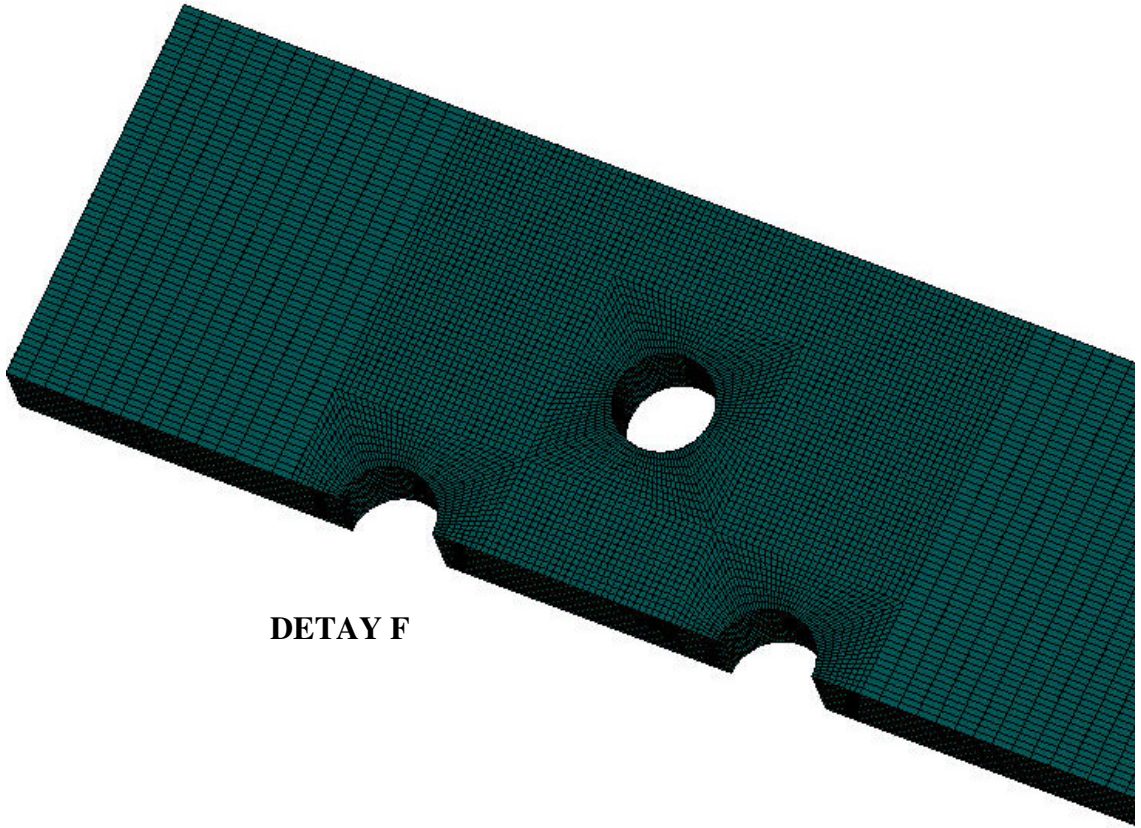
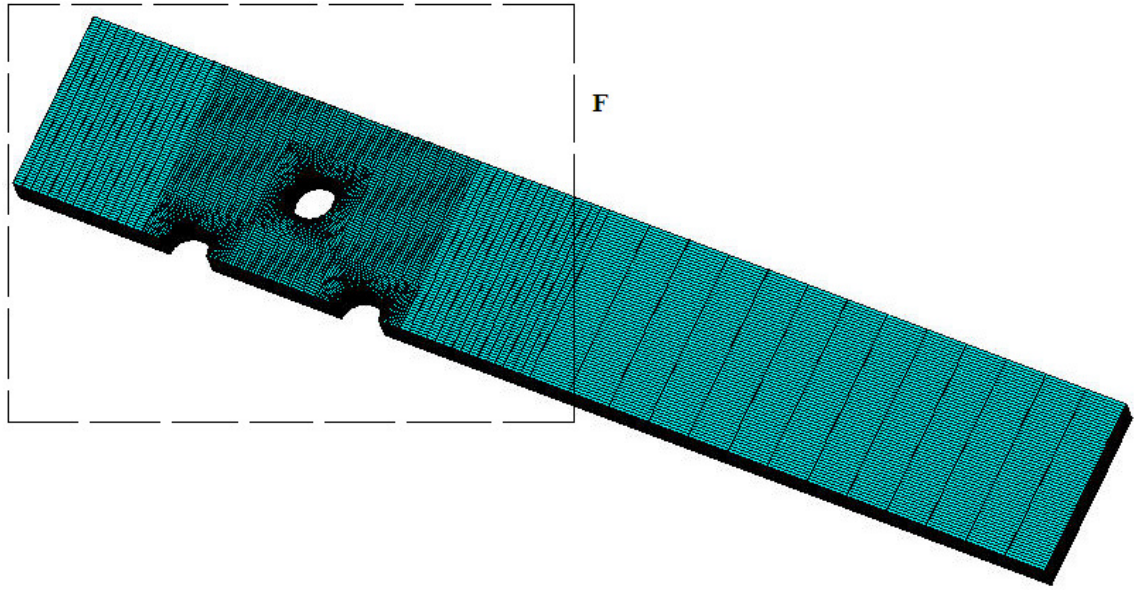
Bilinen bu zorluğa rağmen üç boyutlu olarak oluşturulan bu karma bağlantı modelinde, istenen ve dörtgen elemanlardan meydana getirilmiş ve oldukça düzgün sonlu eleman ağ yapısı, delik çevreleri de dahil olmak üzere, çok delikli karma bağlantının tamamında başarılı bir şekilde meydana getirilmiştir.

Sonlu elemanlara bölme prosesi sonucunda, üç boyutlu çok delikli ½ karma bağlantı modeli üzerinde 297120 eleman ve 317338 düğüm noktası oluşturulmuştur.



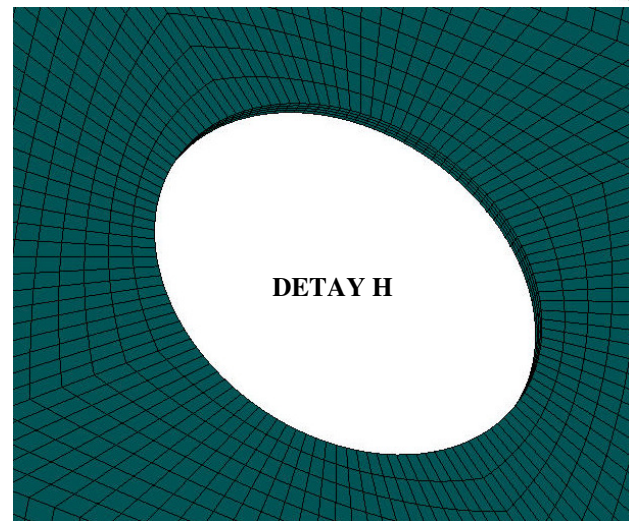
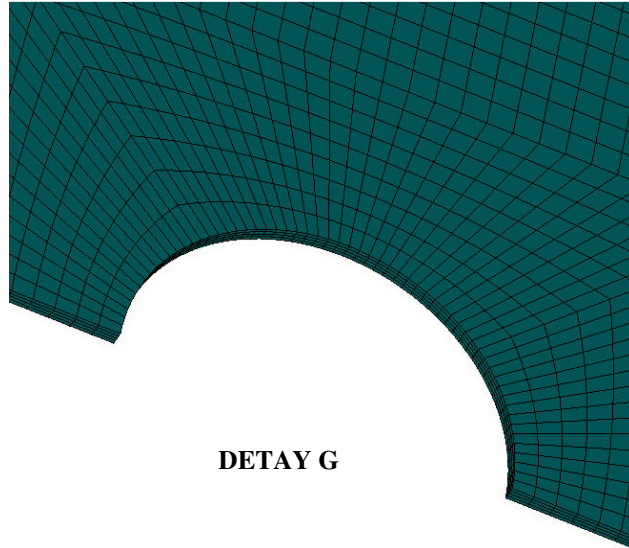
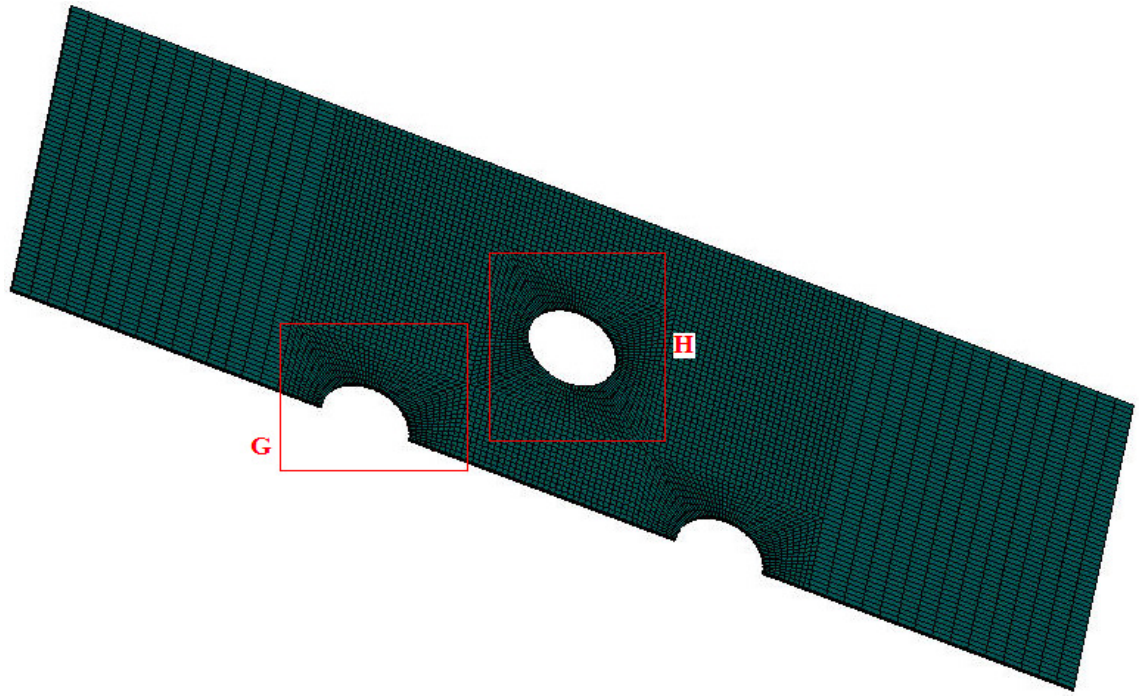
DETAY E

a) Alt kompozit plaka

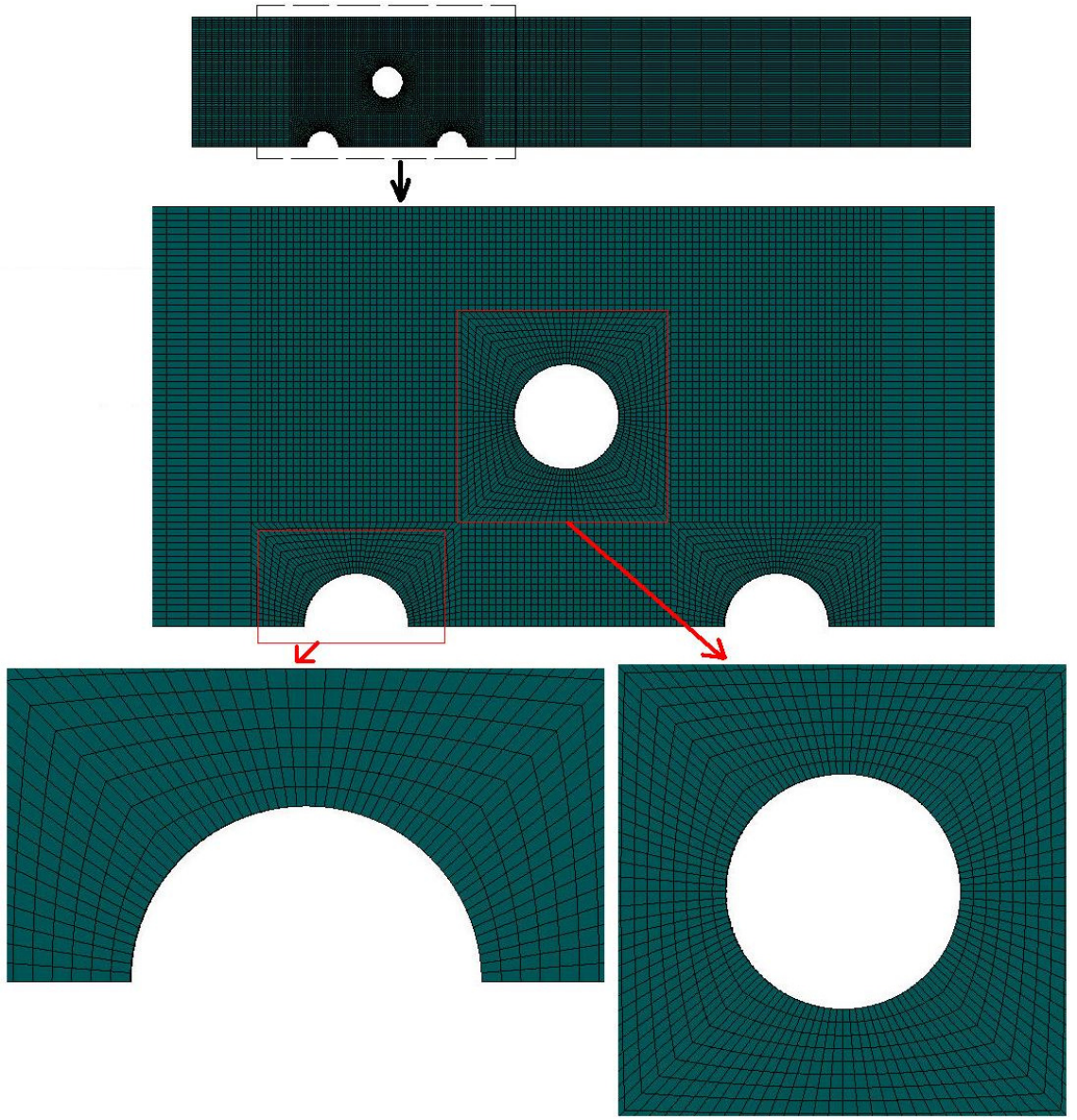


b) Üst kompozit plaka

Şekil 5.7. Karma bağlantıdaki her bir kompozit plakanın sonlu elemanlar ağ yapısı



Şekil 5.8. Karma bağlantıdaki yapıştırıcı tabakasının sonlu elemanlar ağ yapısı



Şekil 5.9. Karma bağlantıdaki üst kompozit plakanın üstten görünüşünün ağ yapısı

BÖLÜM VI

6. BULGULAR

6.1 Giriş

Bir önceki bölümde (Bölüm 5) anlatıldığı üzere, bu çalışmada tüm modelleme ve analizler ANSYS sonlu elemanlar programını kullanmak suretiyle yapılmıştır. Bu nedenle, çok delikli karma bağlantının elastik gerilme analizi sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilmiştir.

Modelleme ve sonlu elemanlara bölme işleminden sonra bu çalışmada çözümler, karma bağlantıya uygulanan yükleme şartlarına üç aşamada tamamlanmıştır.

İlk aşamada, yapıştırılmış ve çok pim bağlantısı uygulanmış karma bağlantıya, sadece çekme yükü etki ettirilmiş ve bağlantıda bu çekme yükünün etkisi nedeniyle oluşan gerilmeler ve dağılımları elde edilmiştir. Çekme yükü farklı değerlerde uygulanmıştır.

İkinci aşamada, çok delikli karma bağlantıya sadece uniform sıcaklık yükü etki ettirilmiş ve uygulanan uniform sıcaklık yükü etkisi ile meydana gelen ısı gerilmeler ve dağılımları elde edilmiştir. Bu aşamada da farklı değerlerde uniform sıcaklıklar bağlantıya etki ettirilmiştir. Fakat bu aşamada herhangi bir çekme yükü uygulanmamıştır.

Üçüncü ve son aşamada ise çok delikli karma bağlantıya, hem çekme yükü hem sıcaklık yükü aynı anda etki ettirilmiş ve dolayısıyla bu çift yükleme etkisindeki karma bağlantıda meydana gelen gerilmeler ve dağılımları elde edilmiştir.

6.2. Sadece Çekme Yükü Etkisiyle Elde Edilen Bulgular

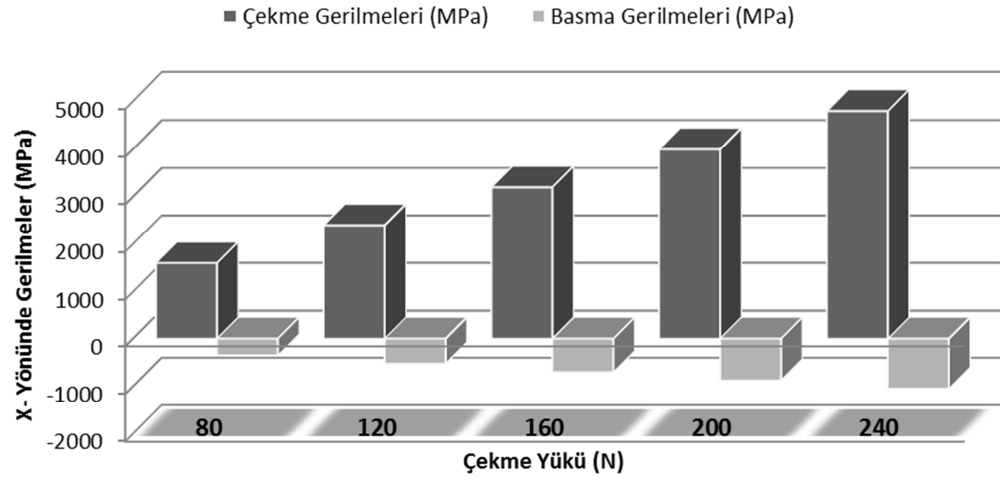
Bu bölümde ilk aşamadan elde edilen bulgular verilmiş ve değerlendirilmiştir. Yukarıda bahsedildiği gibi analizlerin ilk aşamasında yapıştırılmış ve çok pim bağlantısı uygulanmış karma bağlantıya, sadece çekme yükü etki ettirilmiştir. Uygulanan çekme yükü değerleri sırasıyla 80, 120, 160, 200 ve 240 N'dur.

Her bir çekme yükü için yapıştırılmış ve çok pim bağlantısı uygulanmış karma bağlantıda elde edilen normal gerilmeler Çizelge 6.1’de listelenmiştir. Gerilme değerlerinin önündeki eksi işaretleri, gerilmelerin basma formunda olduğu göstermektedir. Bu çizelgeden görüldüğü gibi çekme formundaki gerilmelerin değerlerinin, basma formundaki gerilmelerden daha büyük değerlerde olduğu görülmektedir.

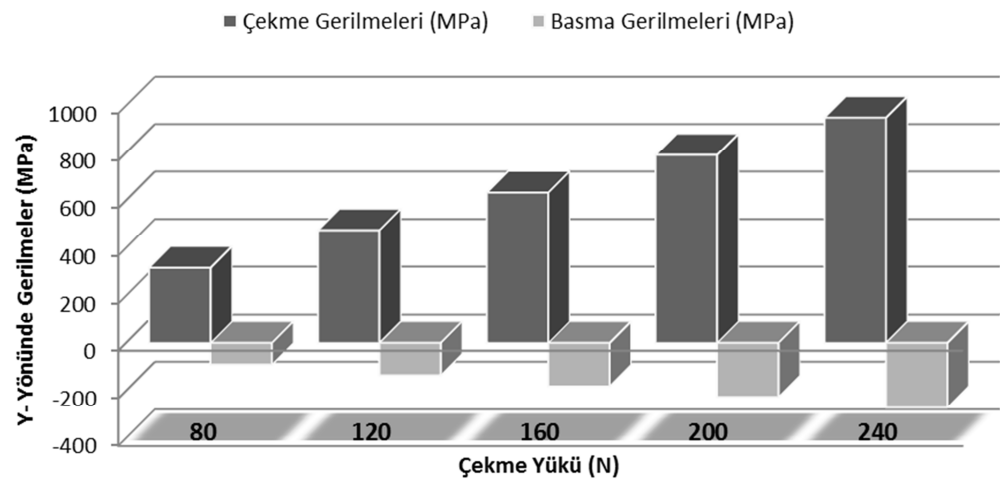
Çizelge 6.1. Farklı değerlerde çekme yükü uygulanmış ve bu çekme yüklerinin tesiriyle meydana gelen gerilmeler (σ_x , σ_y , σ_z)

Çekme Yüğü (N)	Gerilme Formu	Normal gerilmeler (MPa)		
		σ_x	σ_y	σ_z
80	Çekme	1598.21	316.34	104.57
	Basma	-348.99	-90.27	-84.07
120	Çekme	2397,32	474,51	156,86
	Basma	-523,49	-135,42	-126,12
160	Çekme	3196,42	632,68	209,14
	Basma	-697,99	-180,56	-169,16
200	Çekme	3995,53	790,85	261,43
	Basma	-872,49	-225,69	-210,20
240	Çekme	4794,63	949,02	313,71
	Basma	-1046,99	-270,83	-252,24

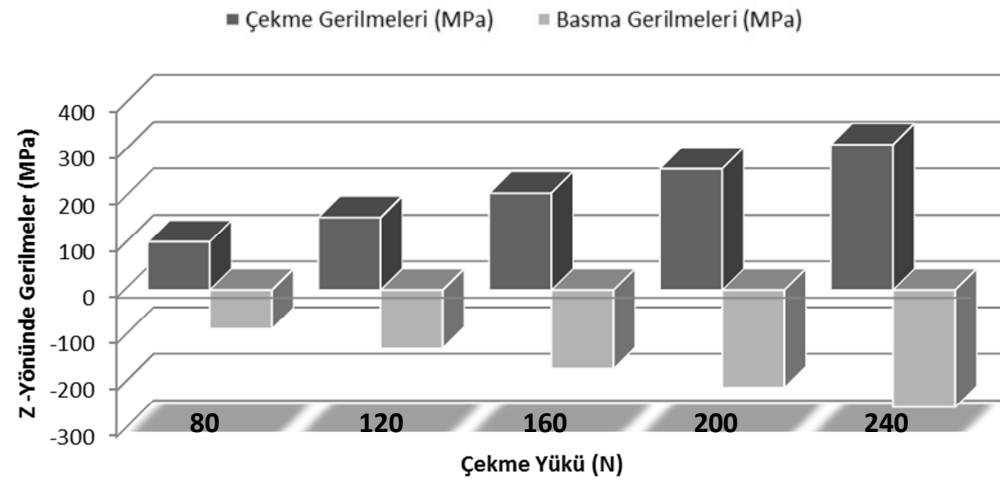
Uygulanan yüklere bağlı hesaplanan normal gerilmeler; x-yönündeki (σ_x), y-yönündeki (σ_y) ve z-yönünde (σ_z) olmak üzere Şekil 6.1’te gösterilmiştir. Çizelge 6.1’de listelenen normal gerilme değerlerinin, bu şekilde grafiksel gösterimi neticesinde, çekme yükü artışına bağlı olarak, normal gerilmelerde meydana gelen artış açıkça görülebilmektedir. Ayrıca, x-yönünde hesaplanan çekme ve basma gerilme değerlerinin y ve z yönlerindeki gerilmelerden çok daha büyük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, bağlantıya uygulanan çekme yükünün x-yönünde etki ediyor olmasıdır. Çizelge 6.1’de görüldüğü üzere en yüksek gerilmeler 240 N çekme yükü uygulandığında elde edilmiştir. En yüksek değerli çekme gerilmesinin değeri 4794,63 MPa ve en yüksek basma gerilmesi değeri ise -1046,99 MPa bulunmuştur. Ayrıca en düşük çekme ve basma gerilmeleri z-yönünde 80 N’luk çekme yükü altında sırası ile 104,57 MPa ve - 84,07 MPa olarak hesaplanmıştır.



a) x-yönündeki normal gerilme (σ_x)



b) y- yöndeki normal gerilme (σ_y)

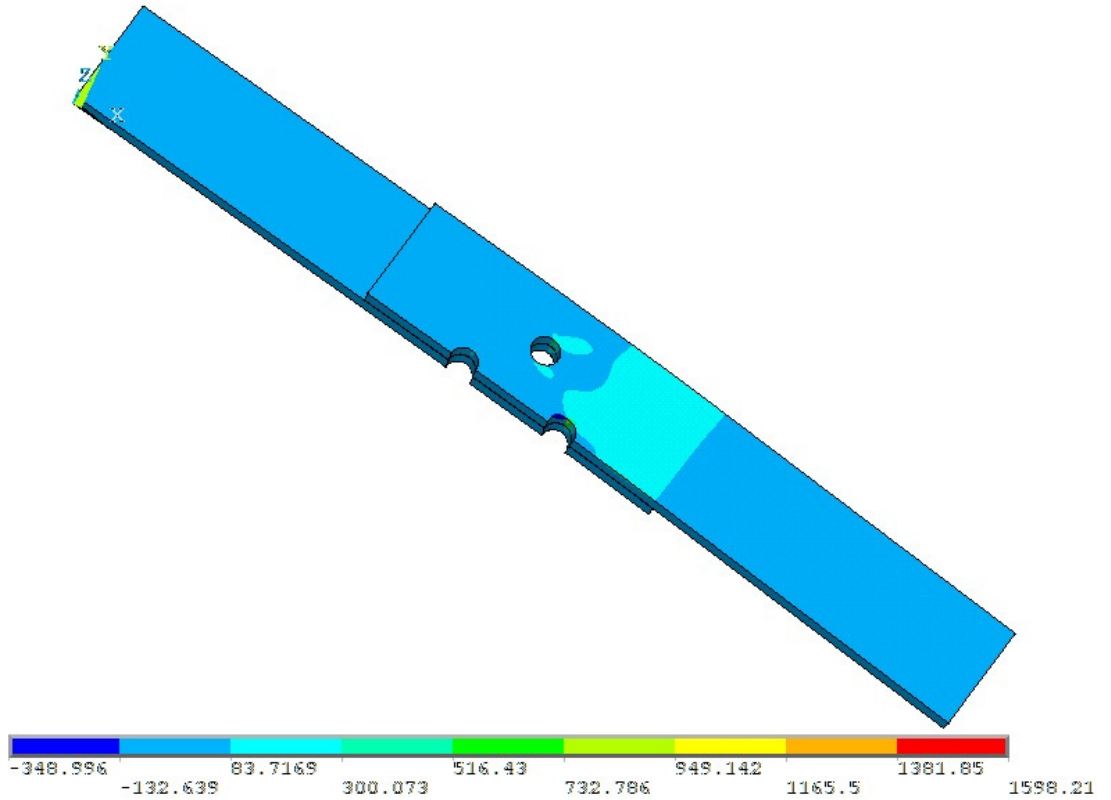


c) z-yönündeki normal gerilme (σ_z)

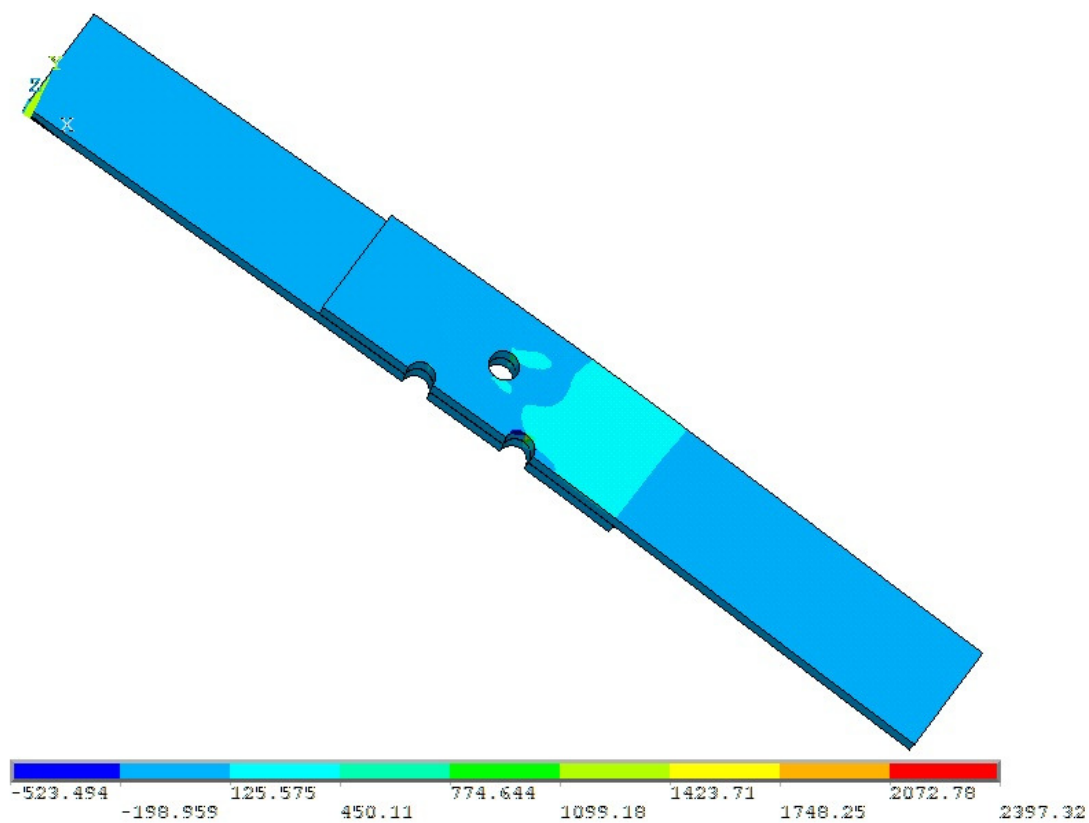
Şekil 6.1. Farklı değerlerde çekme yükü altında meydana gelen gerilmeler (σ_x , σ_y , σ_z)

ANSYS sonlu elemanlar yazılımının önemli avantajlarından biri de analizler neticesinde elde edilen gerilmelerin model üzerinde eş gerilme eğrileri veya konturları ile gösterilebilmesidir. Böylece, model üzerinde gerilme yığılmalarının olduğu bölgeler rahatlıkla belirlenebilmektedir.

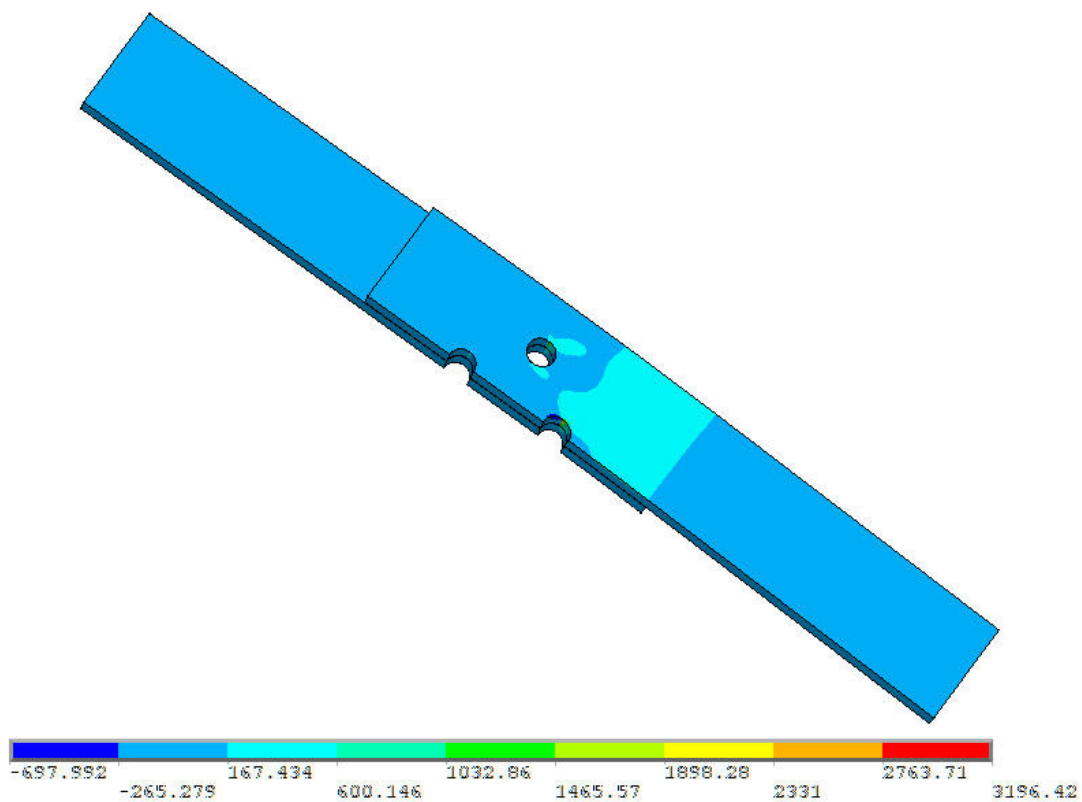
Her bir analiz için renkli kontur ile farklı çekme yükleri uygulandığında elde edilen normal gerilme dağılımları sırasıyla x, y ve z-yönleri için Şekil 6.2, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, her üç yönde, model yüzeyinde genel olarak basma gerilmeleri meydana geldiği gözlenmiştir. Ayrıca x ve y yönlerinde model üzerindeki deliklerin çevrelerinde çekme gerilmelerinin de olduğu görülmektedir. Şekillerde çekme gerilmeleri birim alan olarak minimum düzeyde olmalarına rağmen çekme ve basma gerilmelerinin mutlak değer büyüklükleri karşılaştırıldığında çekme gerilme değerleri Çizelge 6.1'de görüleceği üzere daha yüksektir.



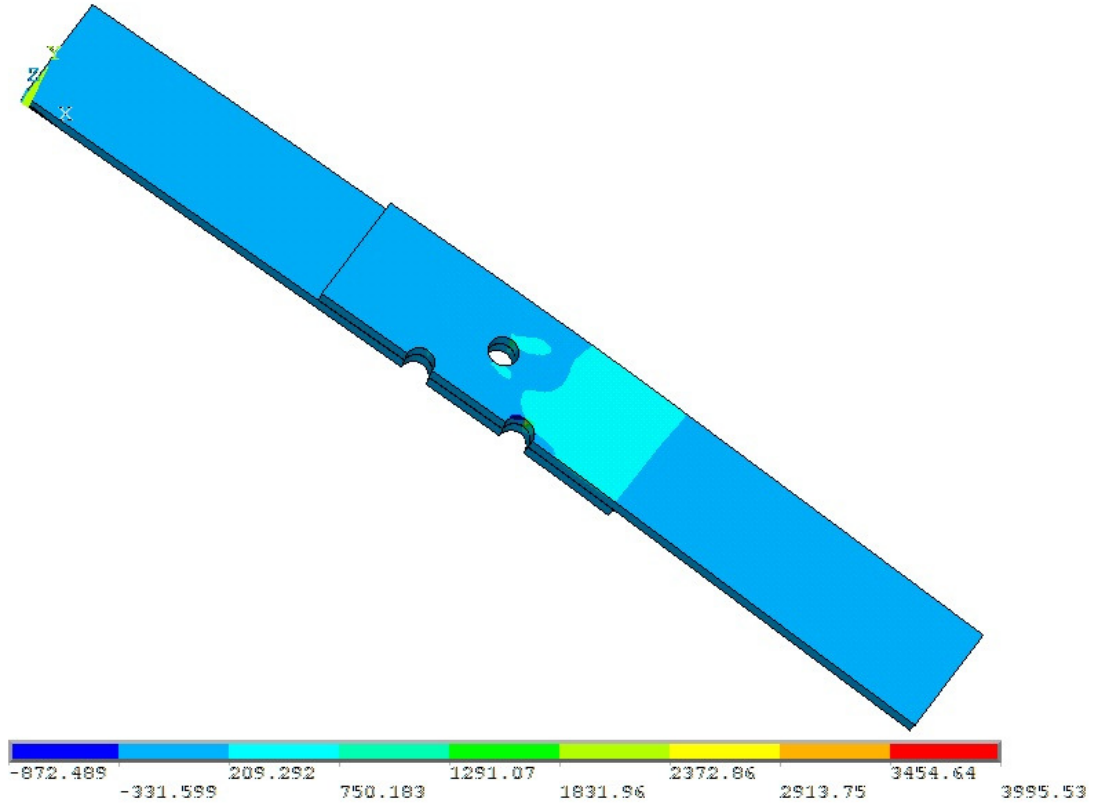
a) 80 N



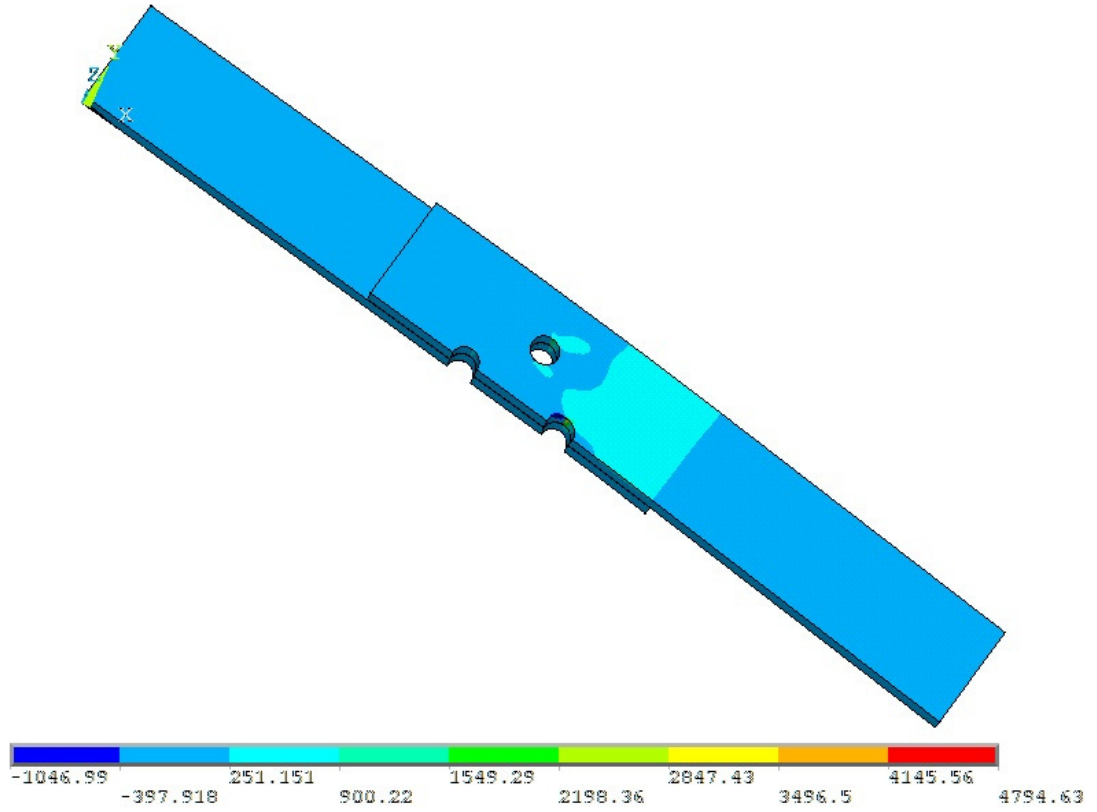
b) 120 N



c) 160 N

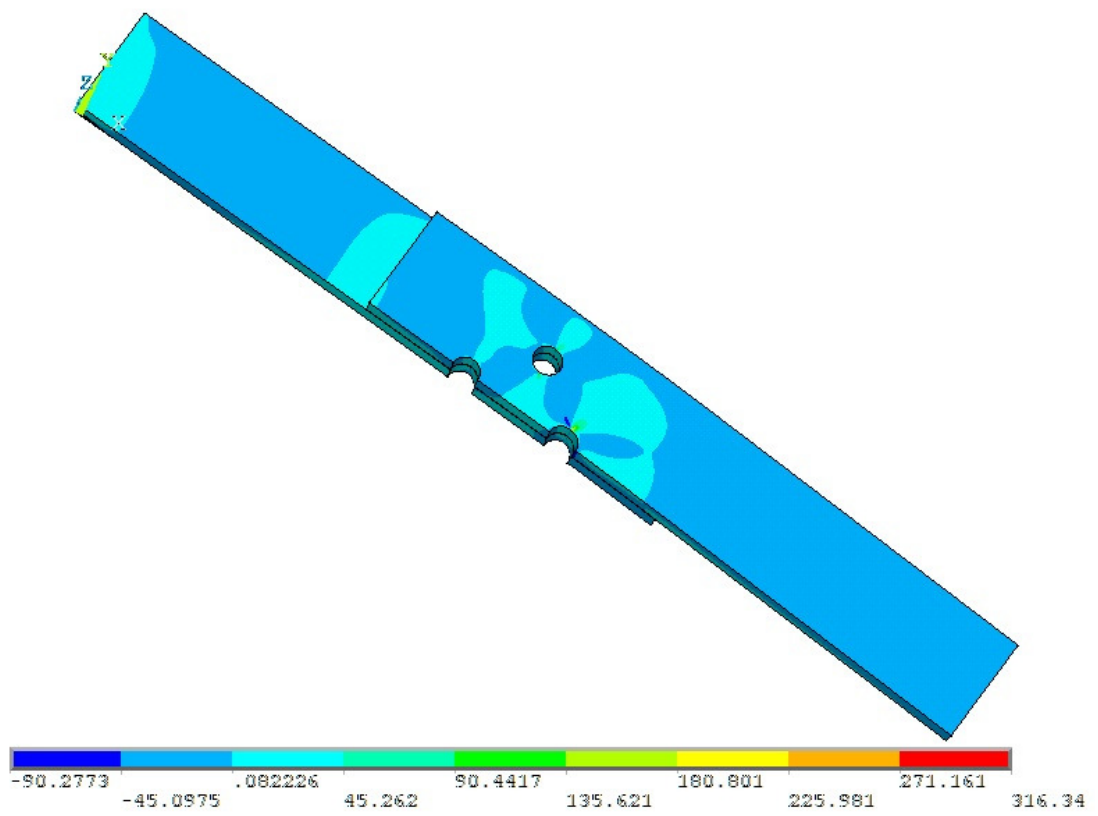


d) 200 N

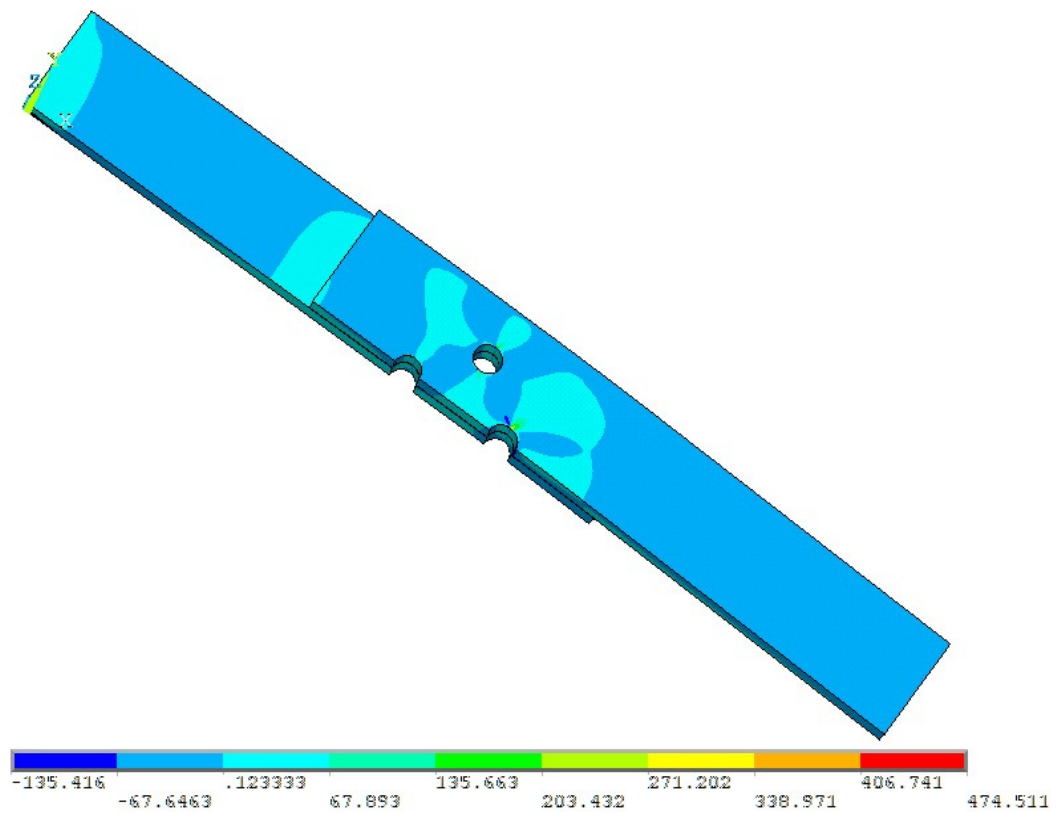


e) 240 N

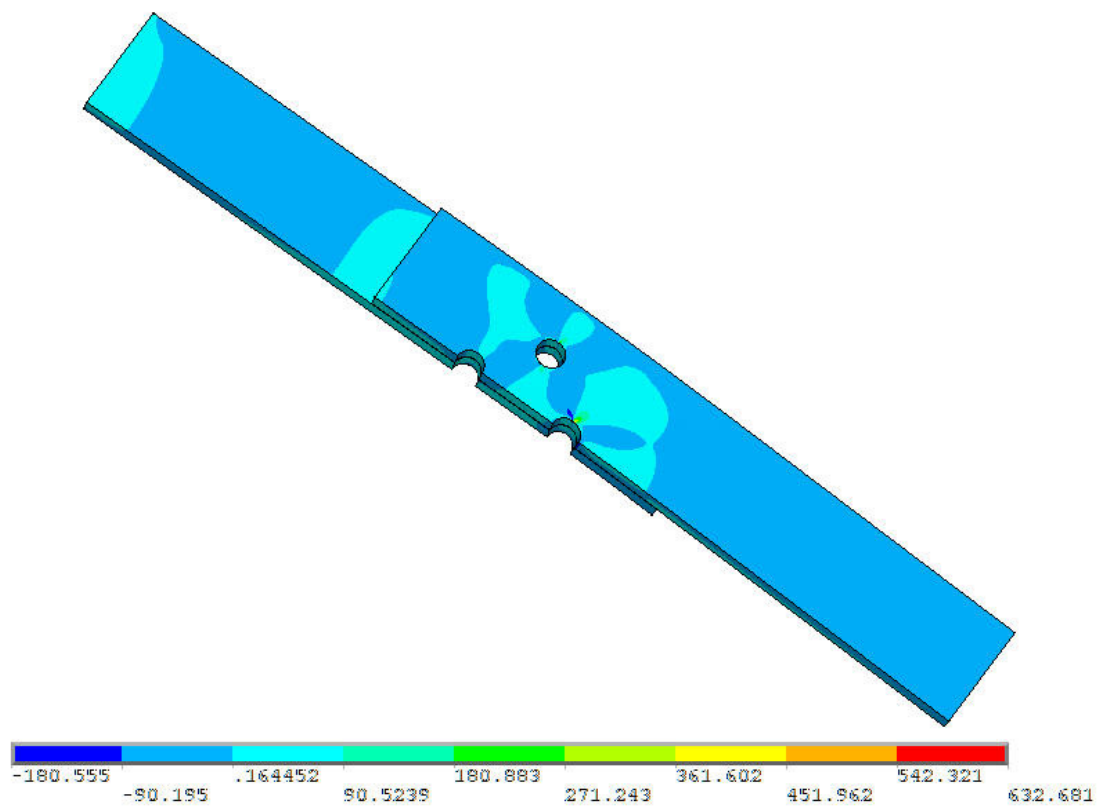
Şekil 6.2. Farklı çekme yükleri altında x- yönünde hesaplanan normal gerilmeler (σ_x)



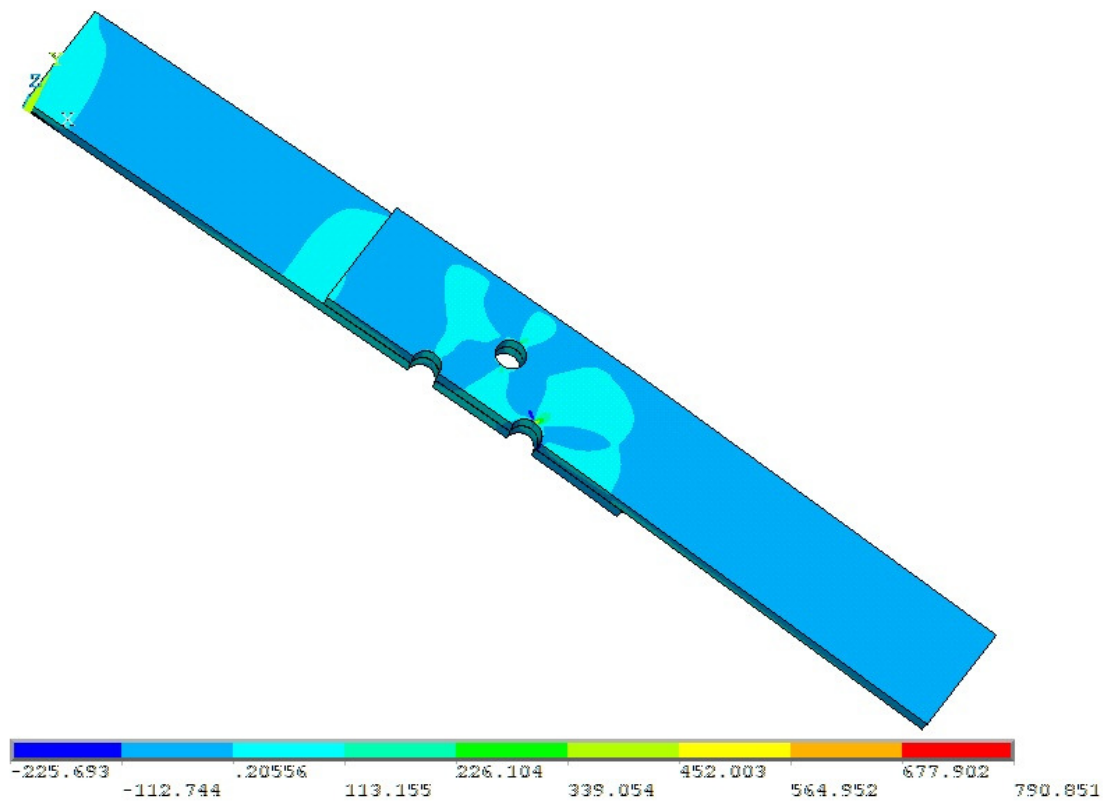
a) 80 N



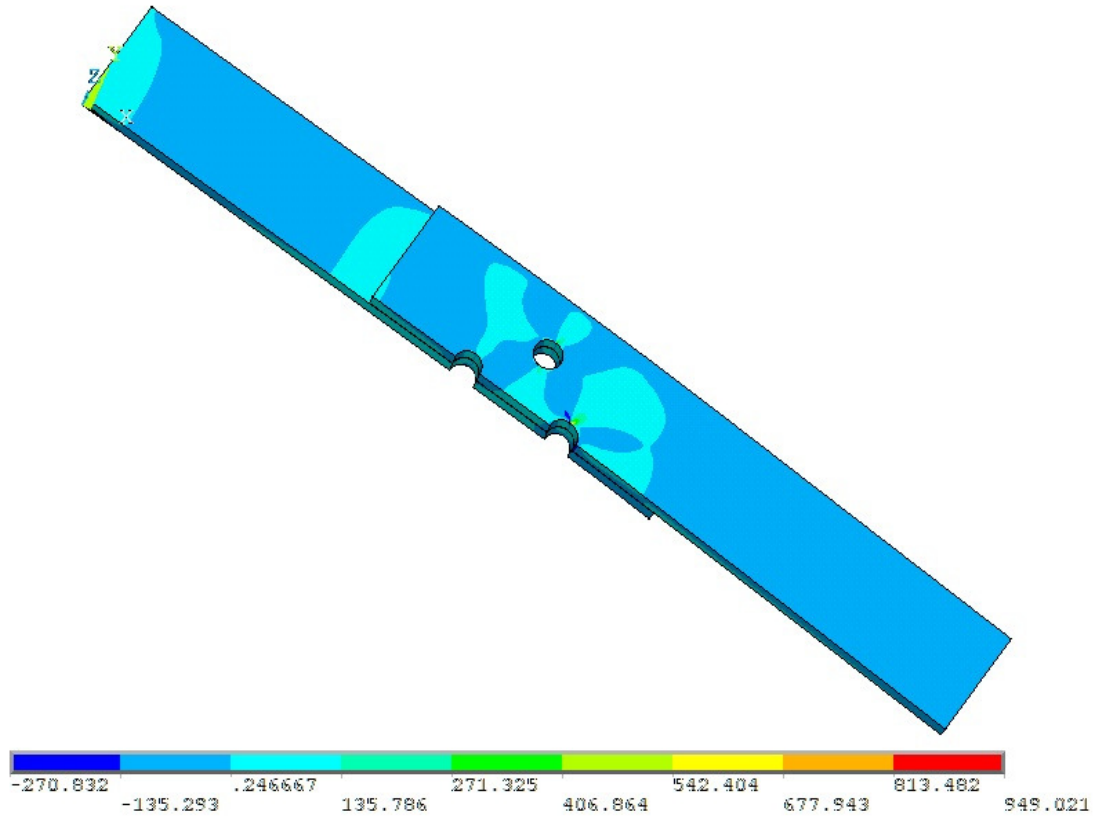
b) 120 N



c) 160 N

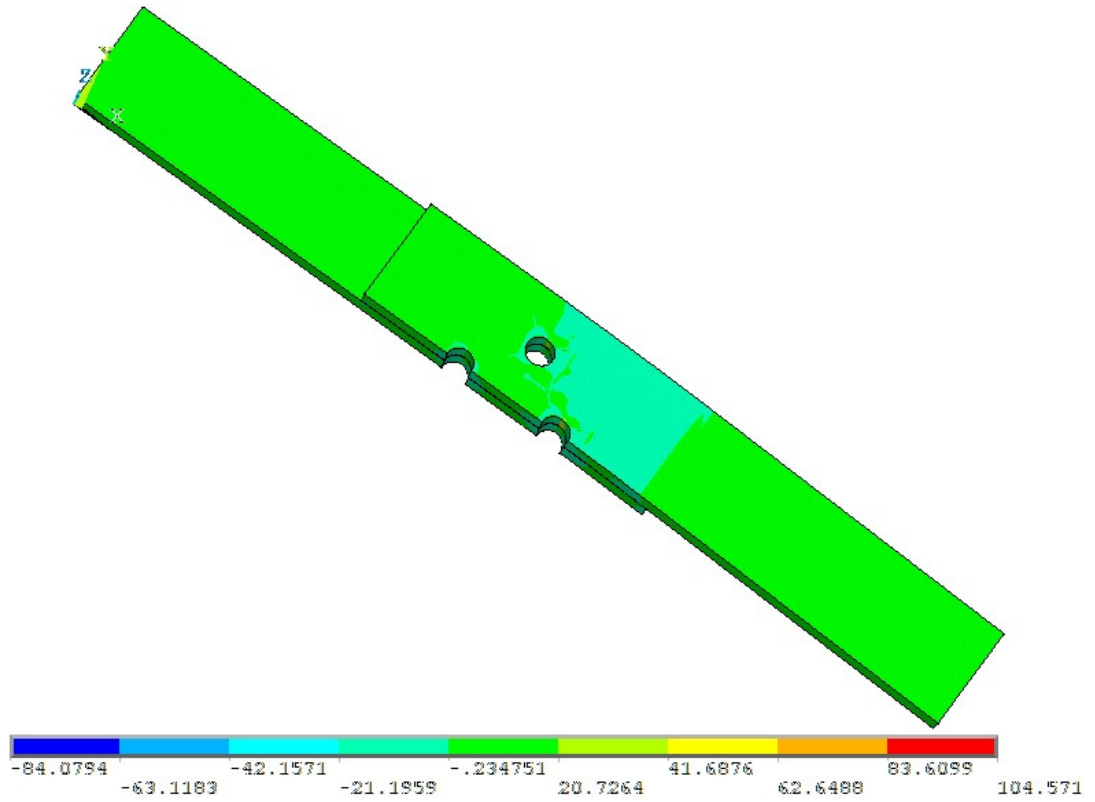


d) 200 N

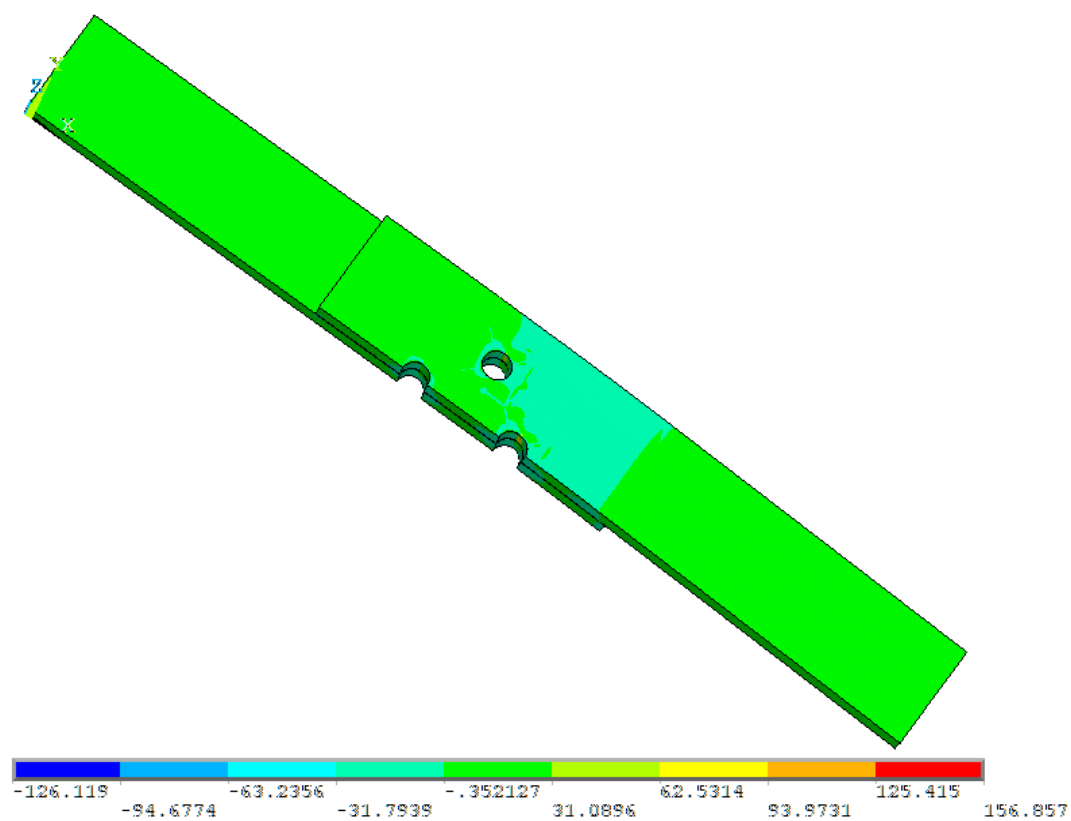


e) 240 N

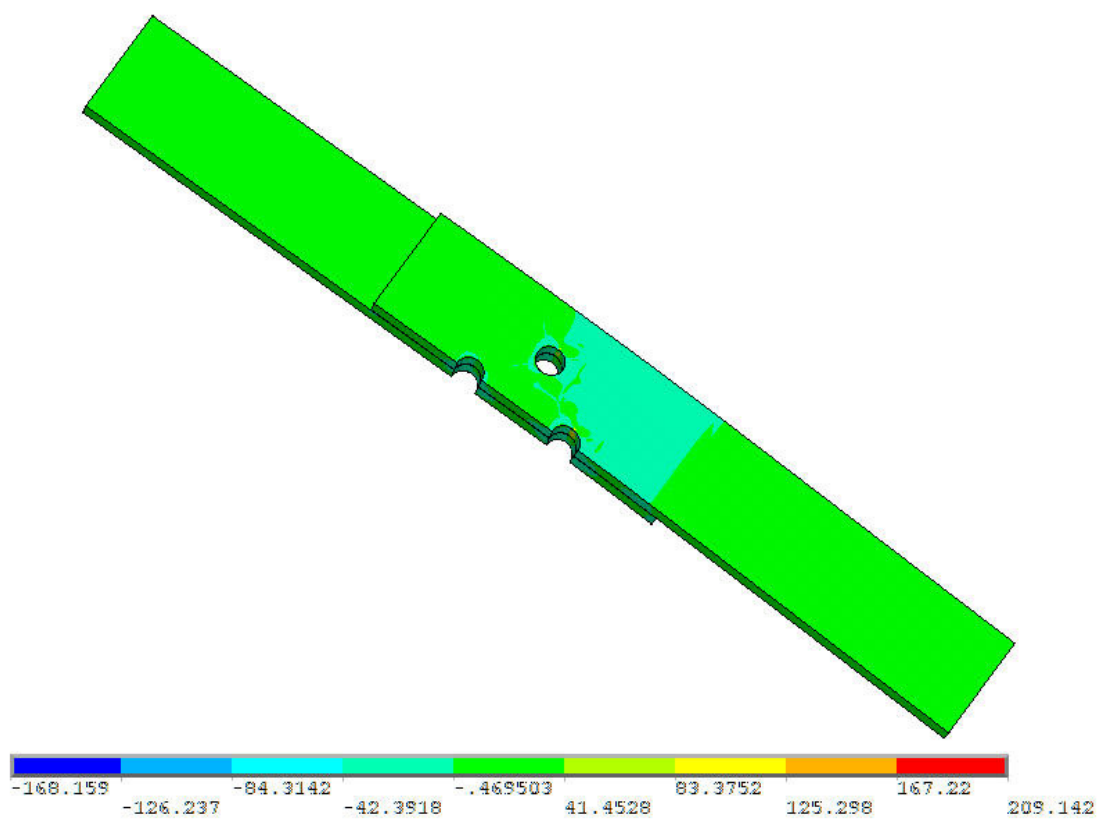
Şekil 6.3. Farklı çekme yükleri altında y-yönünde hesaplanan normal gerilmeler (σ_y)



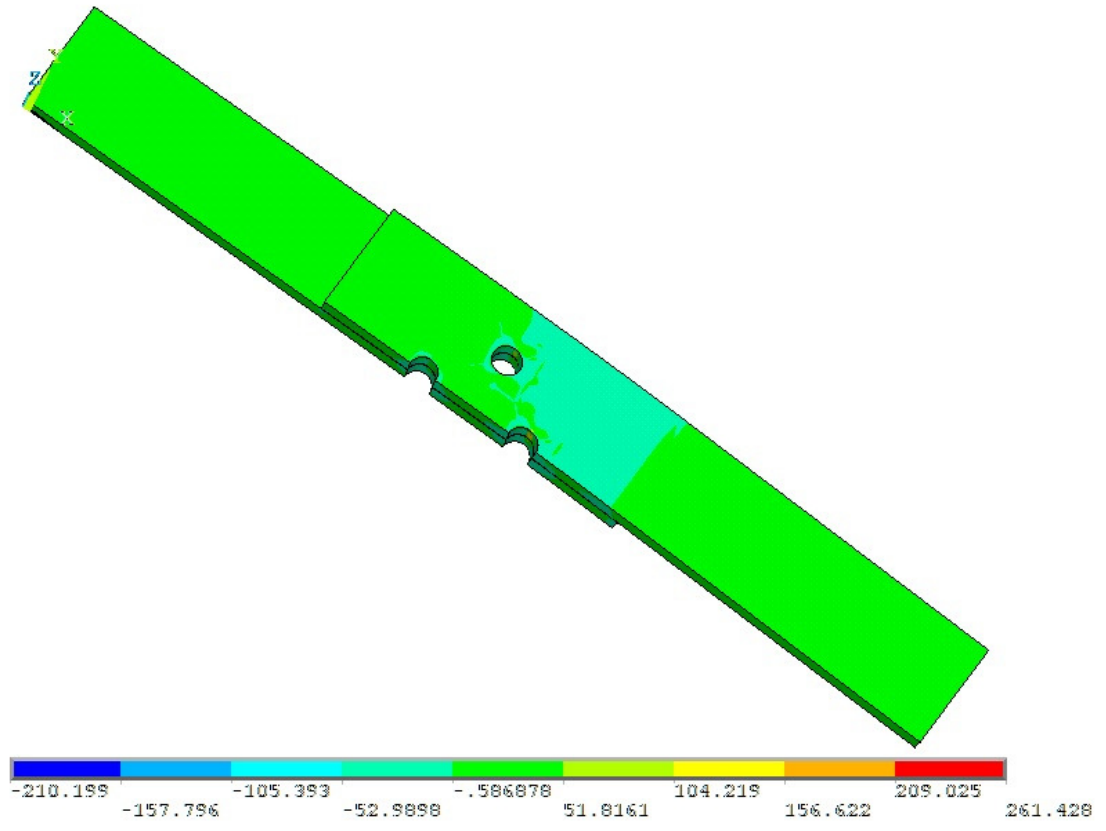
a) 80 N



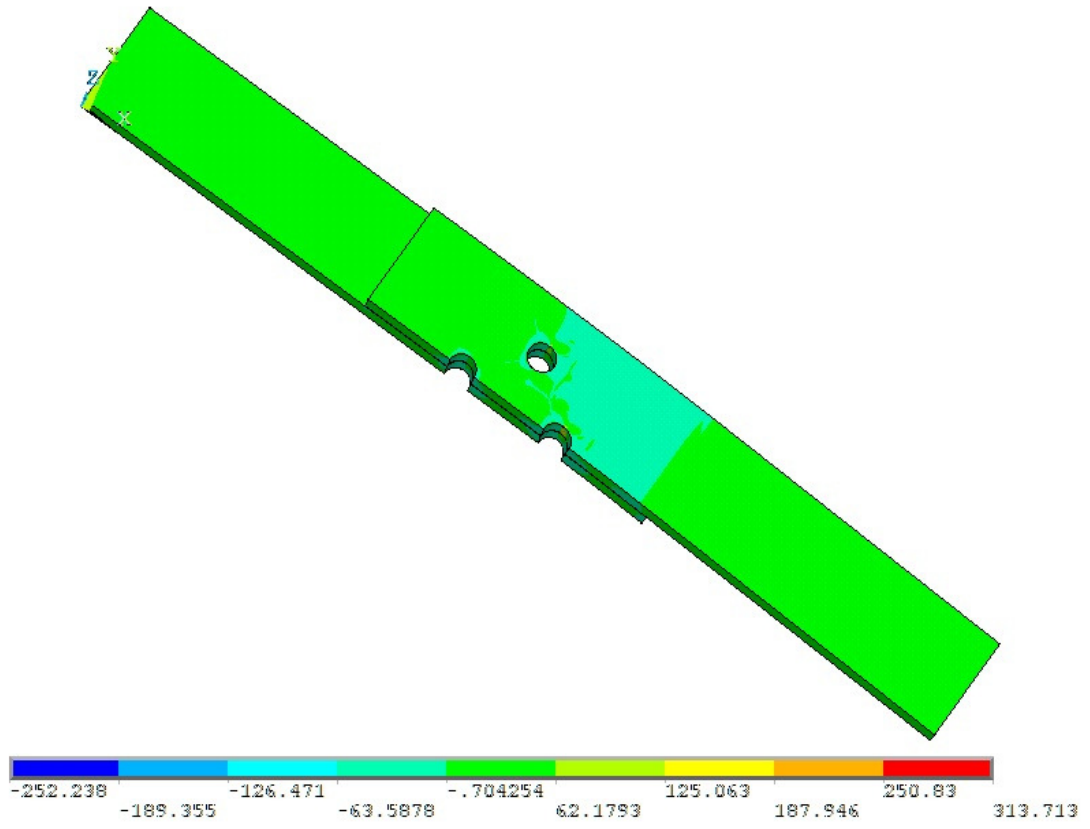
b) 120 N



c) 160 N



d) 200 N



e) 240 N

Şekil 6.4. Farklı çekme yükleri altında z yönünde hesaplanan normal gerilmeler (σ_z)

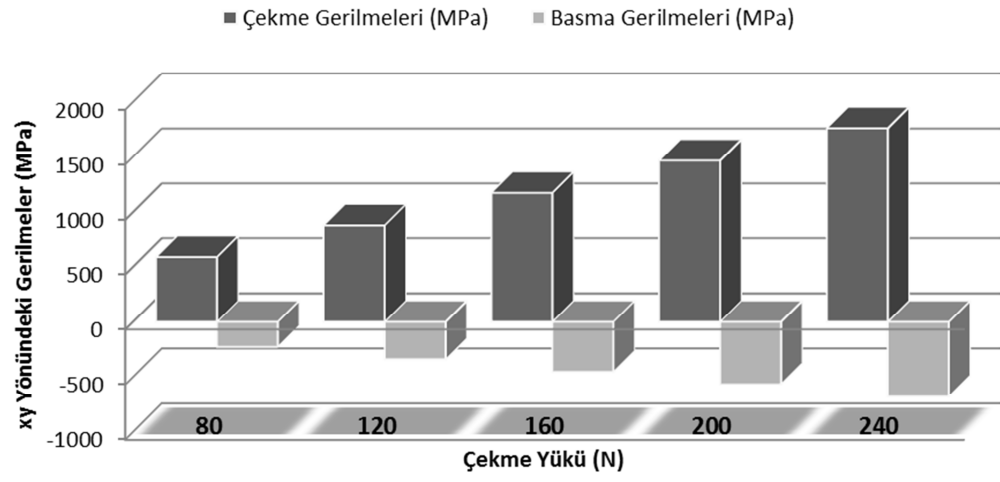
Normal gerilmelerde olduğu gibi, farklı çekme yükleri uygulandığında elde edilen kayma gerilmeleri τ_{xy} , τ_{yz} , ve τ_{xz} 'in değerleri Çizelge 6.2'de listelenmiştir. Ayrıca üç boyutlu model üzerindeki dağılımları sırasıyla, Şekil 6.6, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.2. Farklı çekme yükleri için elde edilen kayma gerilmeleri

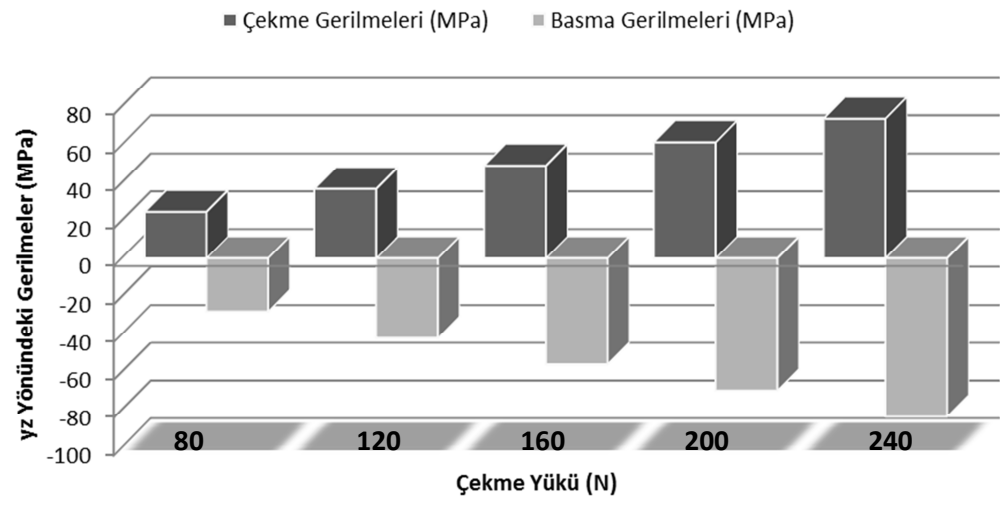
Çekme Yüğü (N)	Gerilme Formu	Kayma gerilmeleri (MPa)		
		τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
80	Çekme	586.64	24.54	20.01
	Basma	-226.43	-27.91	-188.41
120	Çekme	879,97	36,81	30,02
	Basma	-339,65	-41,87	-282,62
160	Çekme	1173,29	49,08	40,03
	Basma	-452,86	-55,83	-376,82
200	Çekme	1466,62	61,35	50,04
	Basma	-566,08	-69,79	-471,03
240	Çekme	1759,94	73,63	60,05
	Basma	-679,29	-83,75	-565,23

Çizelge 6.2'de listelenen kayma gerilme değerlerinin, Şekil 6.5'te ki gibi grafiksel gösterimi neticesinde, çekme yükü artışına bağlı olarak, kayma gerilmelerinde meydana gelen artış açıkça görülebilmektedir. Ayrıca, τ_{xy} çekme ve basma kayma gerilme değerlerinin τ_{yz} ve τ_{xz} kayma gerilmelerinin değerlerinden çok daha büyük değerlerde olduğu görülmektedir. Ayrıca τ_{yz} basma kayma gerilme değerlerinde düşük olduğu tespit edilmiştir.

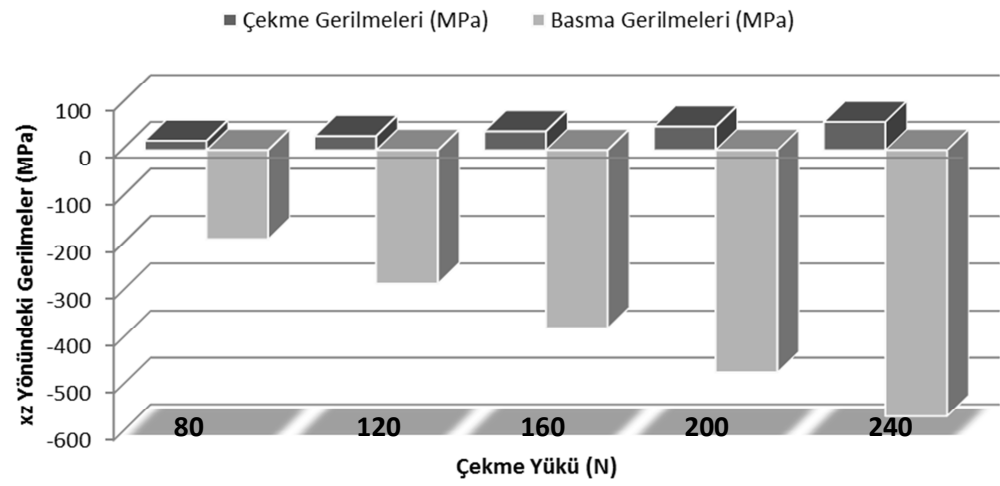
Çizelge 6.2'de görüldüğü üzere en yüksek kayma gerilmeleri 240 N çekme yükü uygulandığında elde edilmiştir. En yüksek değerli kayma çekme gerilmesinin değeri 1759,94 MPa ve en yüksek basma kayma gerilmesi değeri ise -679,29 MPa olarak bulunmuştur. Ayrıca en düşük çekme ve basma kayma gerilmeleri 80 N luk çekme yükünün altında meydana geldiği gözlenmiştir. En düşük kayma çekme gerilmesi $\tau_{xz}=20,01$ MPa ve en düşük basma gerilmesi $\tau_{yz}=-27,91$ MPa olarak hesaplanmıştır.



a) τ_{xy} kayma gerilmesi



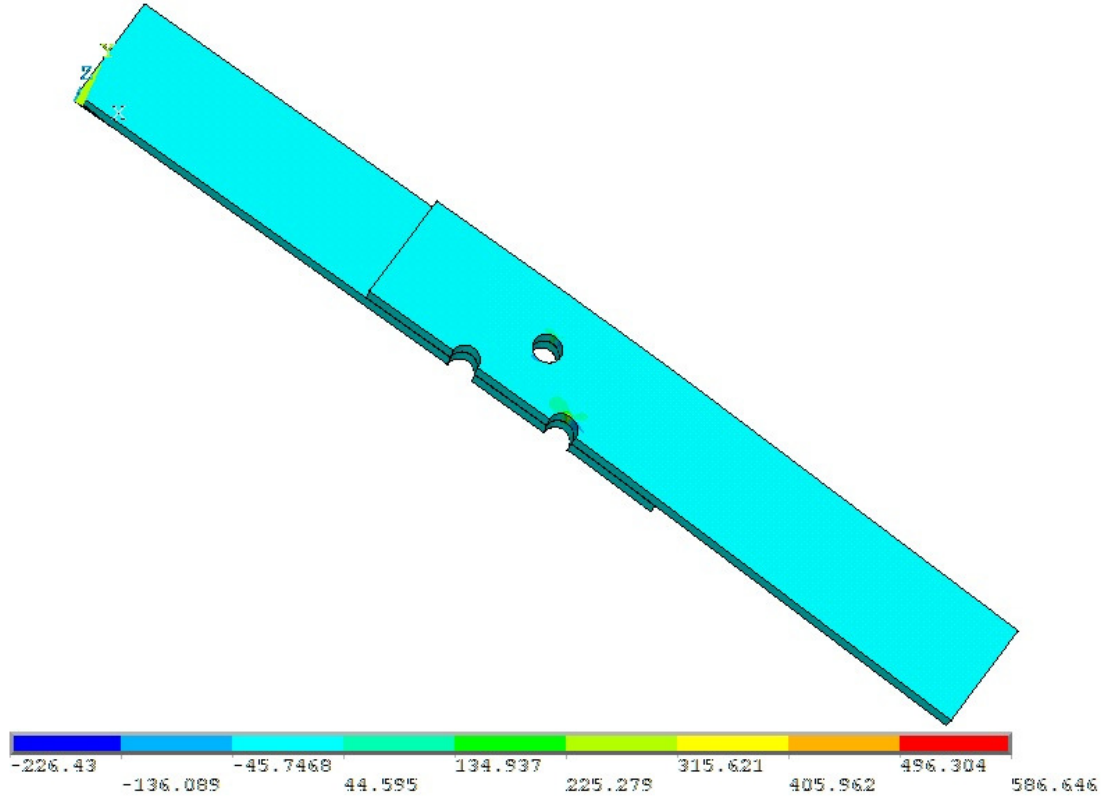
b) τ_{yz} kayma gerilmesi



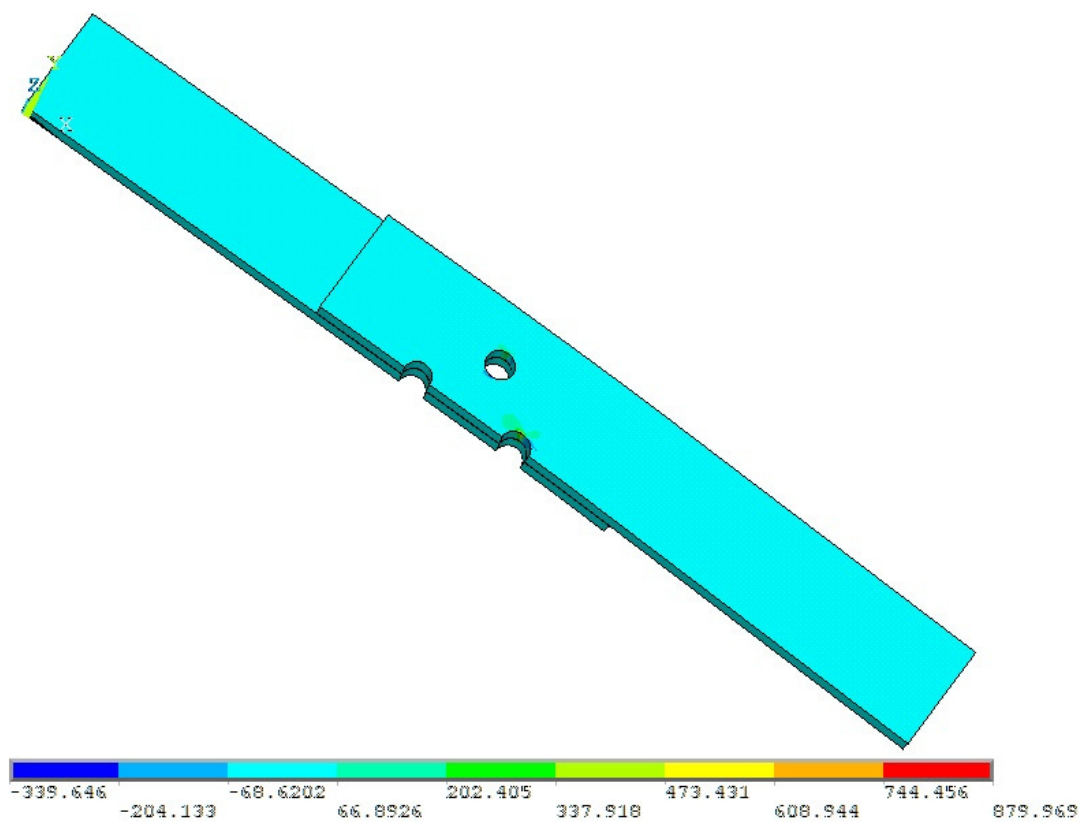
c) τ_{xz} kayma gerilmesi

Şekil 6.5. Farklı değerlerde çekme yükü altında meydana gelen kayma gerilmeleri

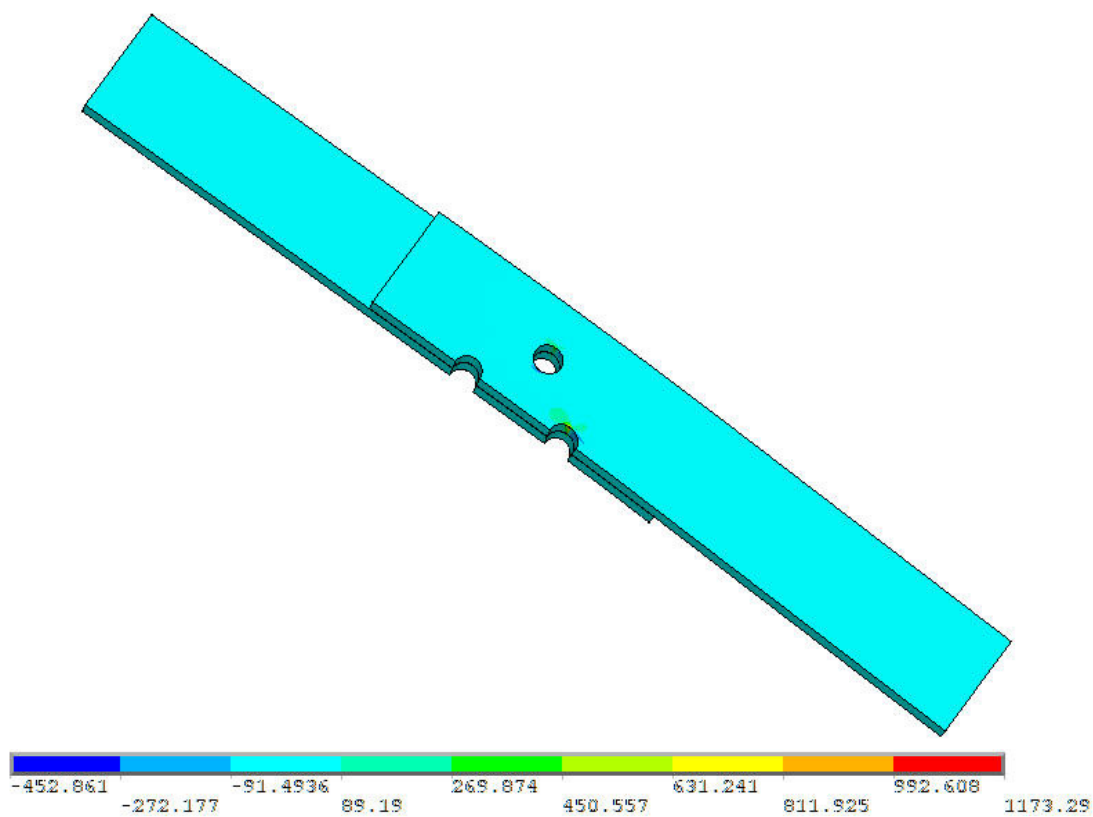
Her bir analiz için renkli kontur ile farklı çekme yükleri uygulandığında elde edilen kayma gerilme dağılımları sırasıyla τ_{xy} , τ_{yz} ve τ_{xz} için şekil 6.6, 6.7 ve 6.8' de gösterilmiştir. Modeller genel olarak incelendiğinde τ_{xy} basma kayma gerilmesi ve delik etraflarında çekme gerilmesi; yz yönünde yüzeyde mutlak değeri düşük basma gerilmesi ve delik çevresinde çekme gerilmesi; ve son olarak τ_{xz} kayma gerilmesi, yüzeyde çekme gerilmesi ve delik çevrelerinde basma gerilmeleri gözlemlenmiştir.



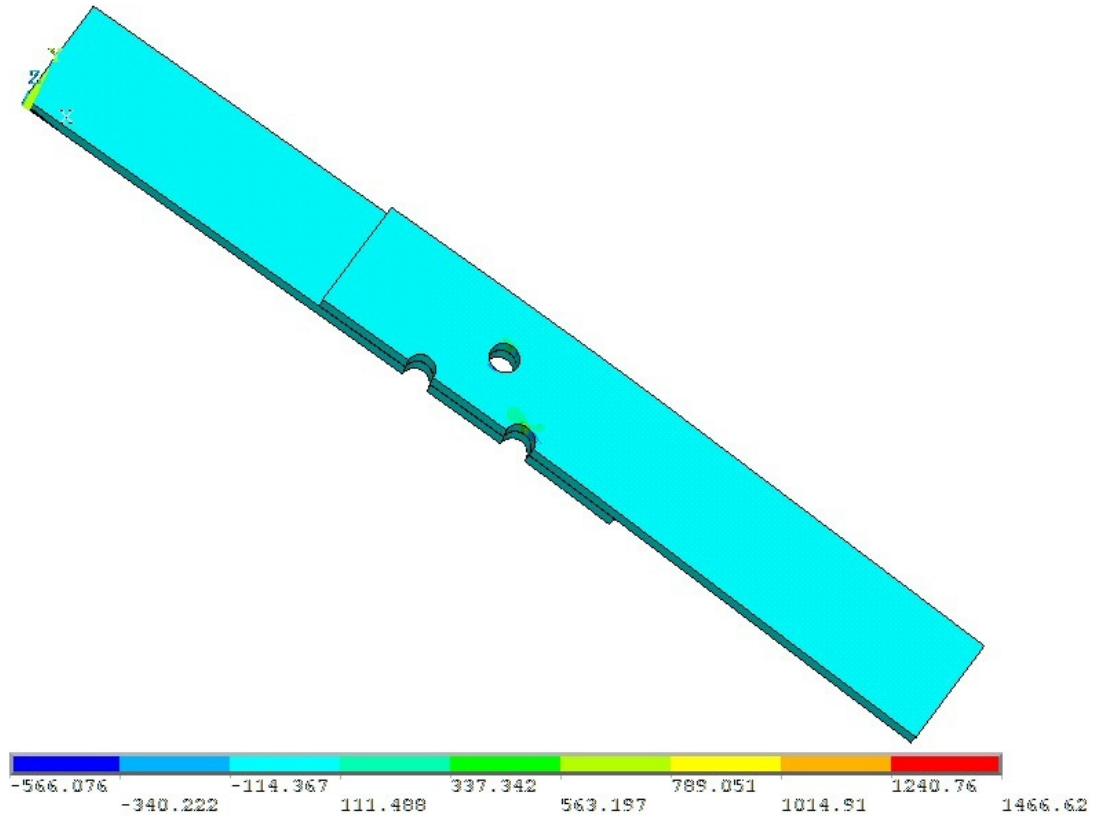
a) 80 N



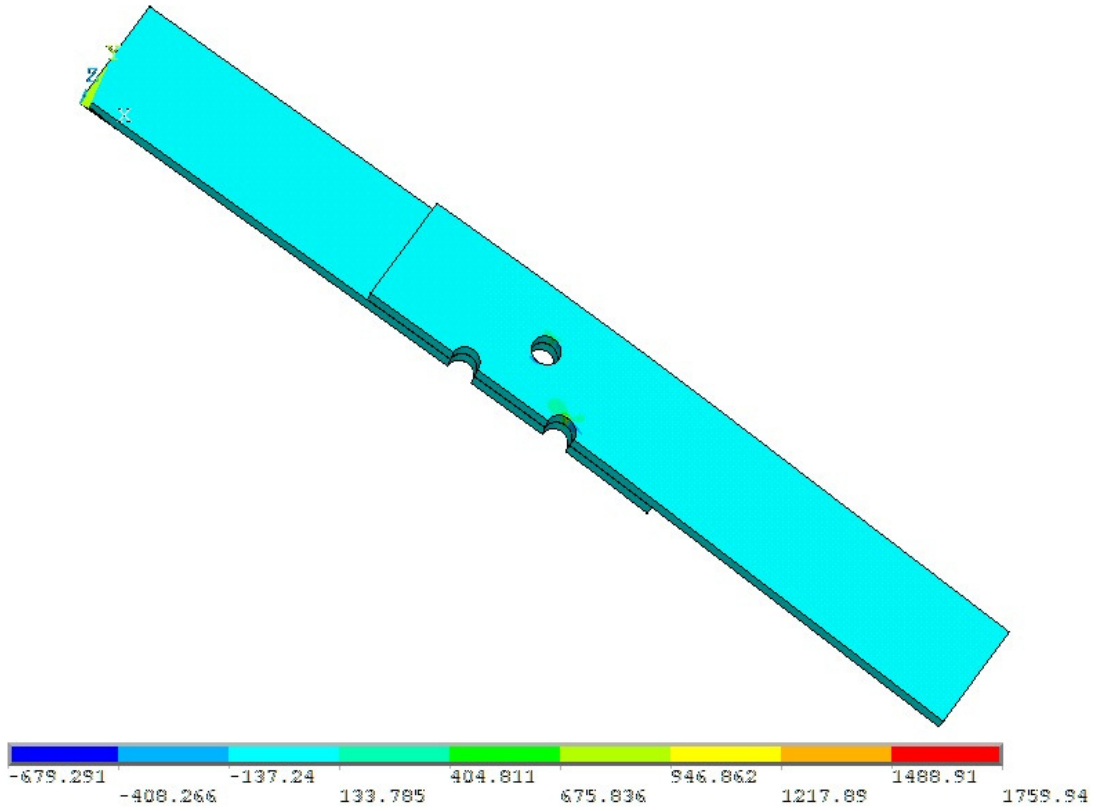
b) 120 N



c) 160 N

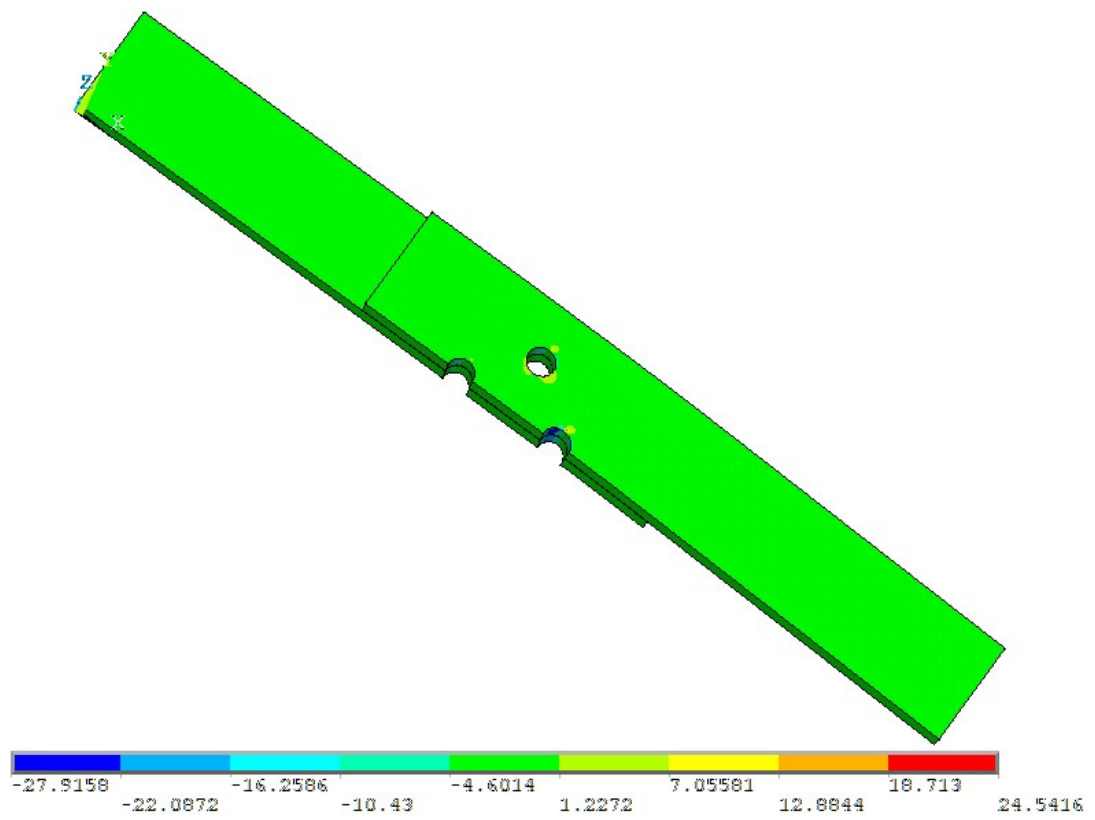


d) 200 N

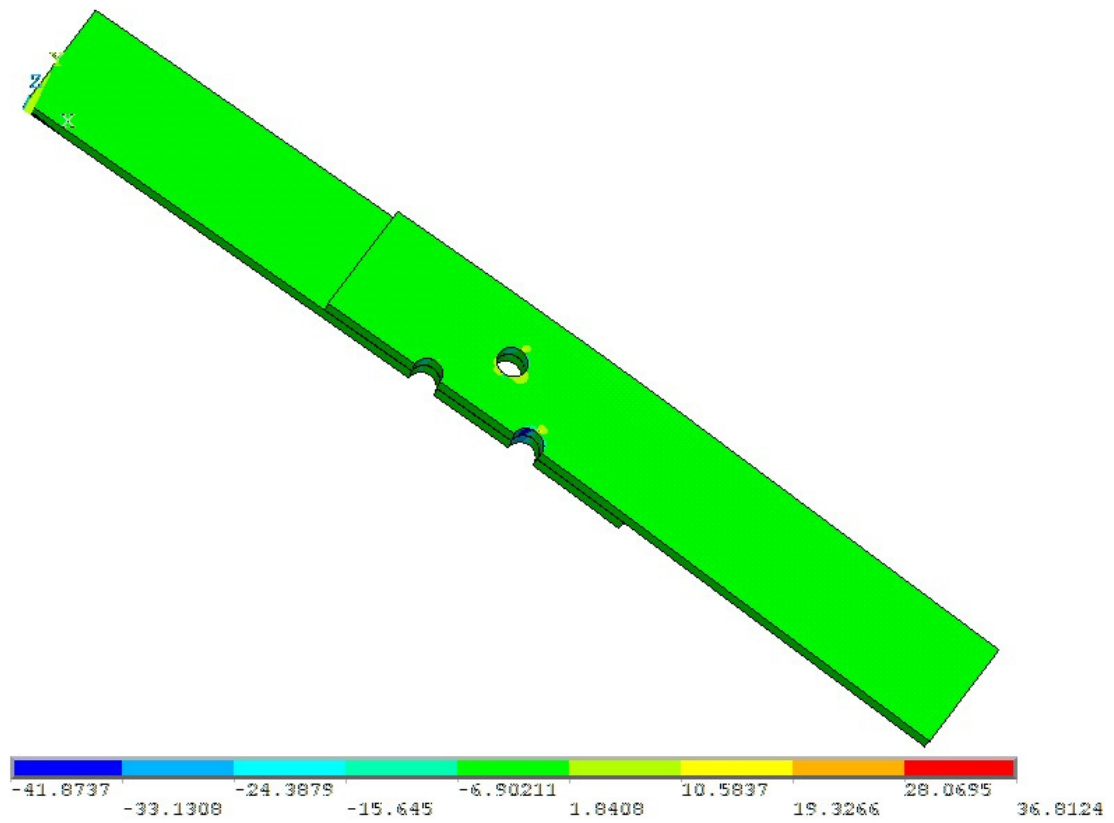


e) 240 N

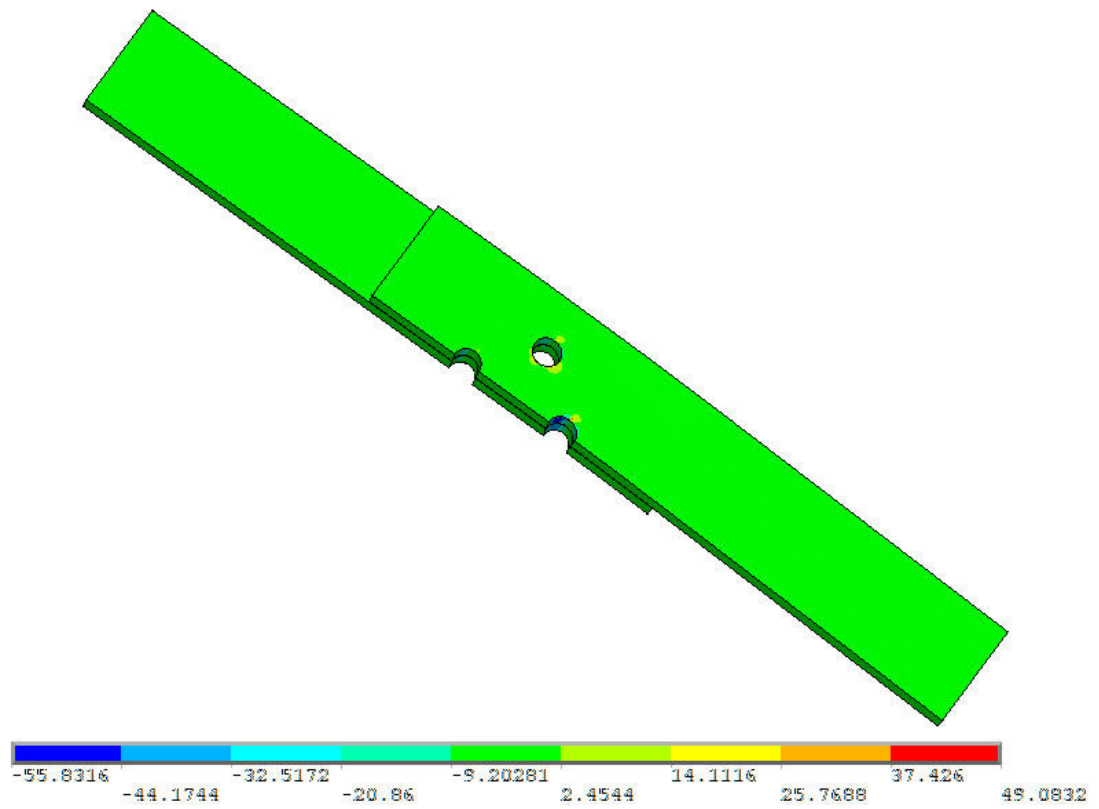
Şekil 6.6. Farklı çekme yükleri altında hesaplanan kayma gerilmeleri (τ_{xy})



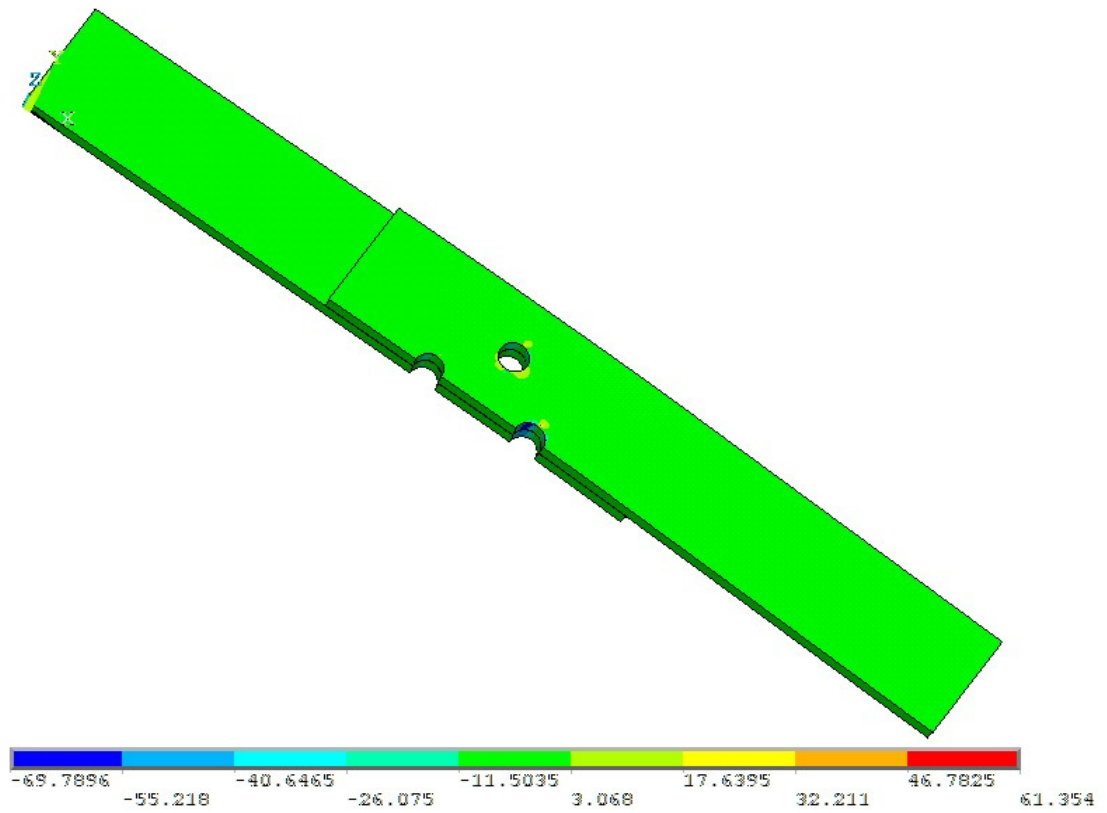
a) 80 N



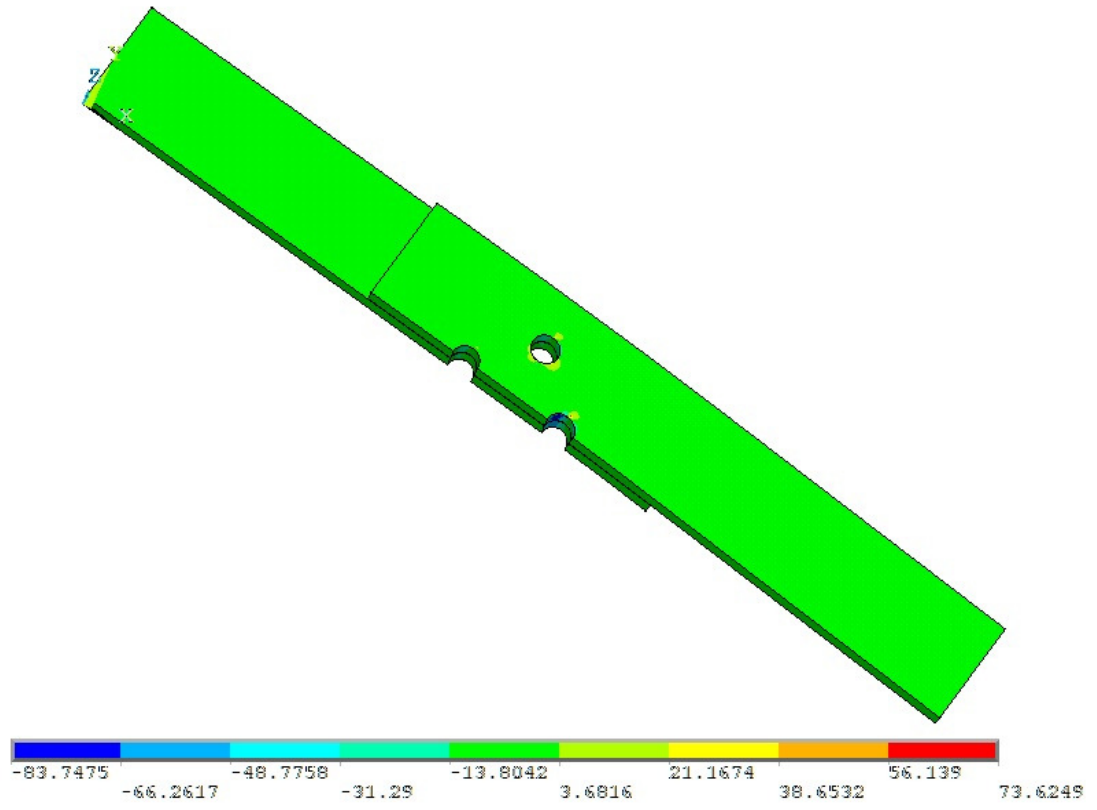
b) 120 N



c) 160 N

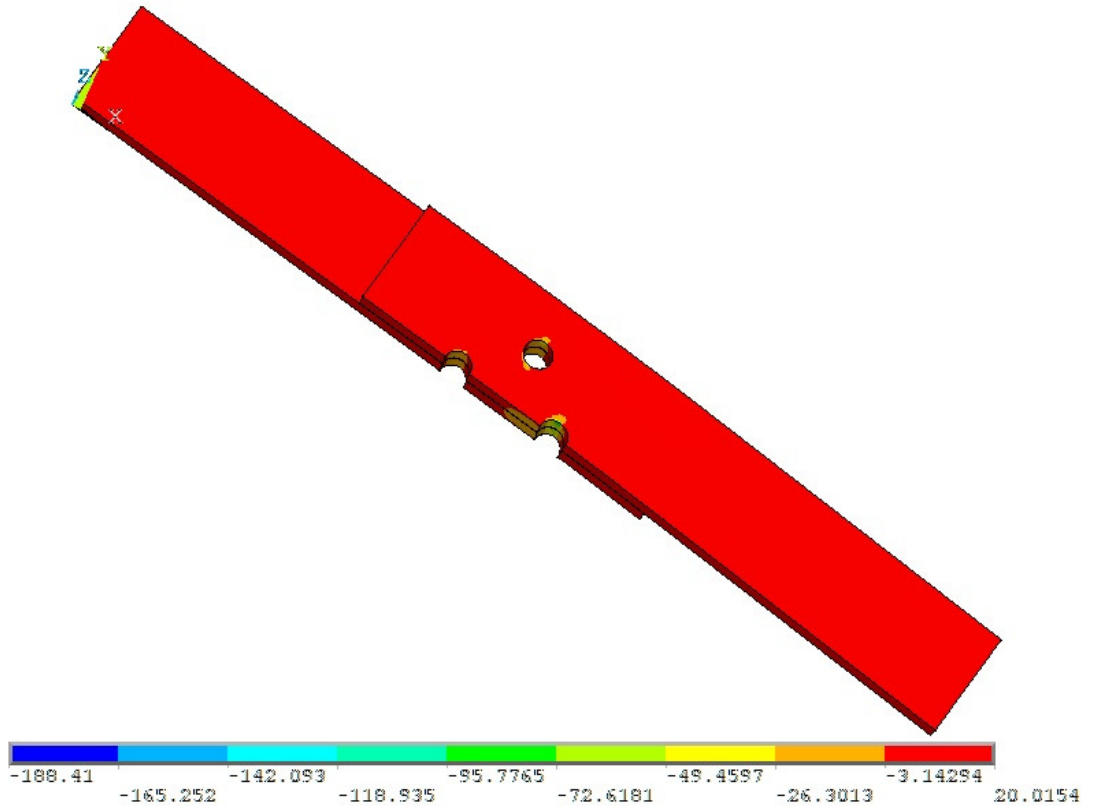


d) 200 N

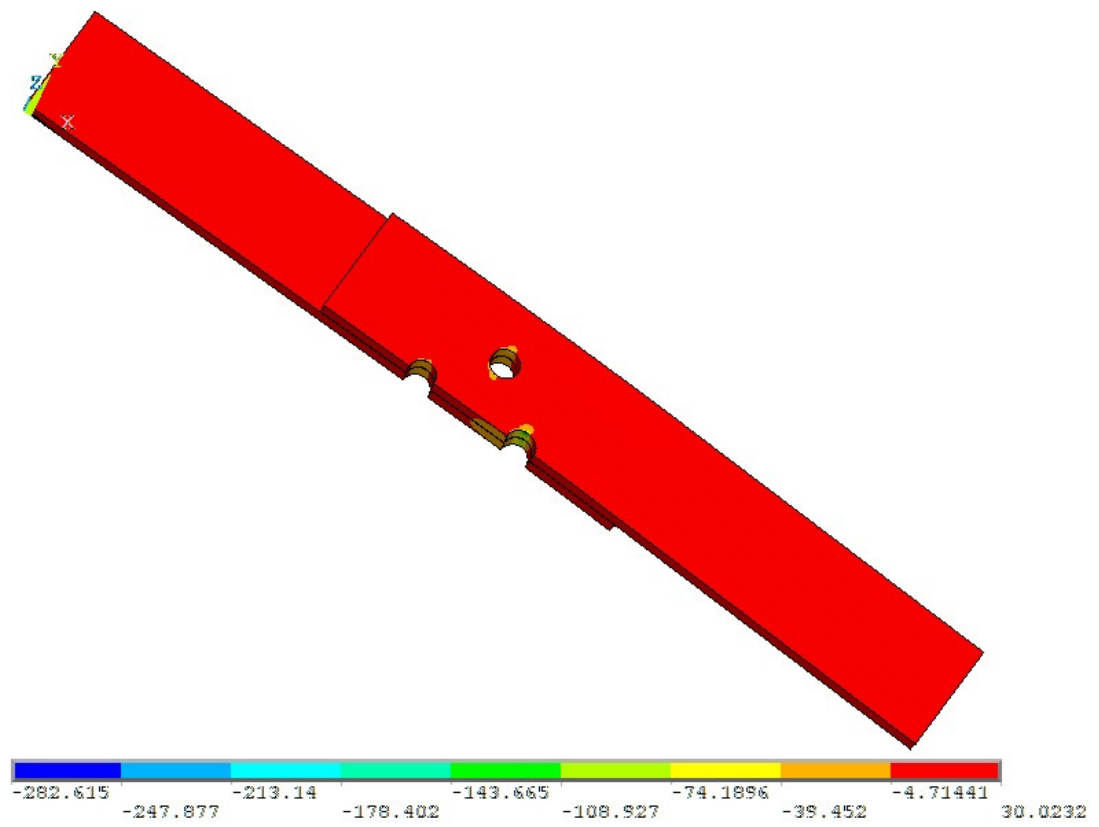


e) 240 N

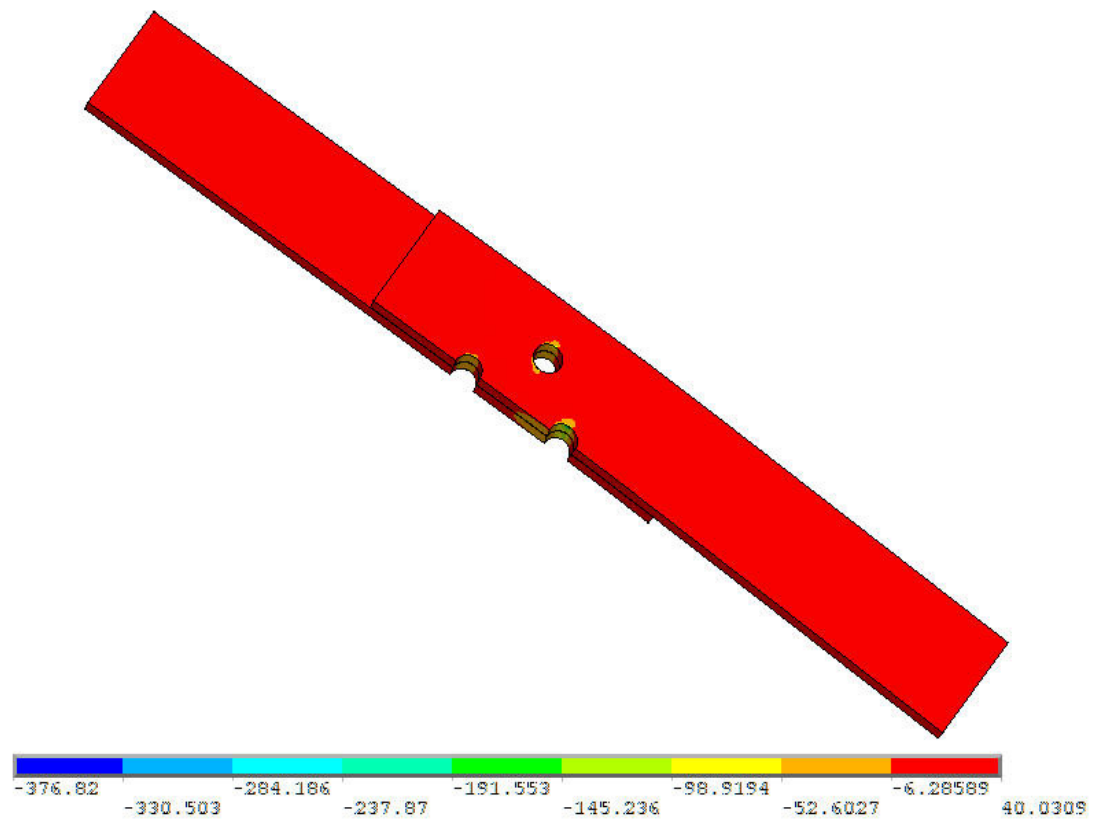
Şekil 6.7. Farklı çekme yükleri hesaplanan kayma gerilmeleri (τ_{yz})



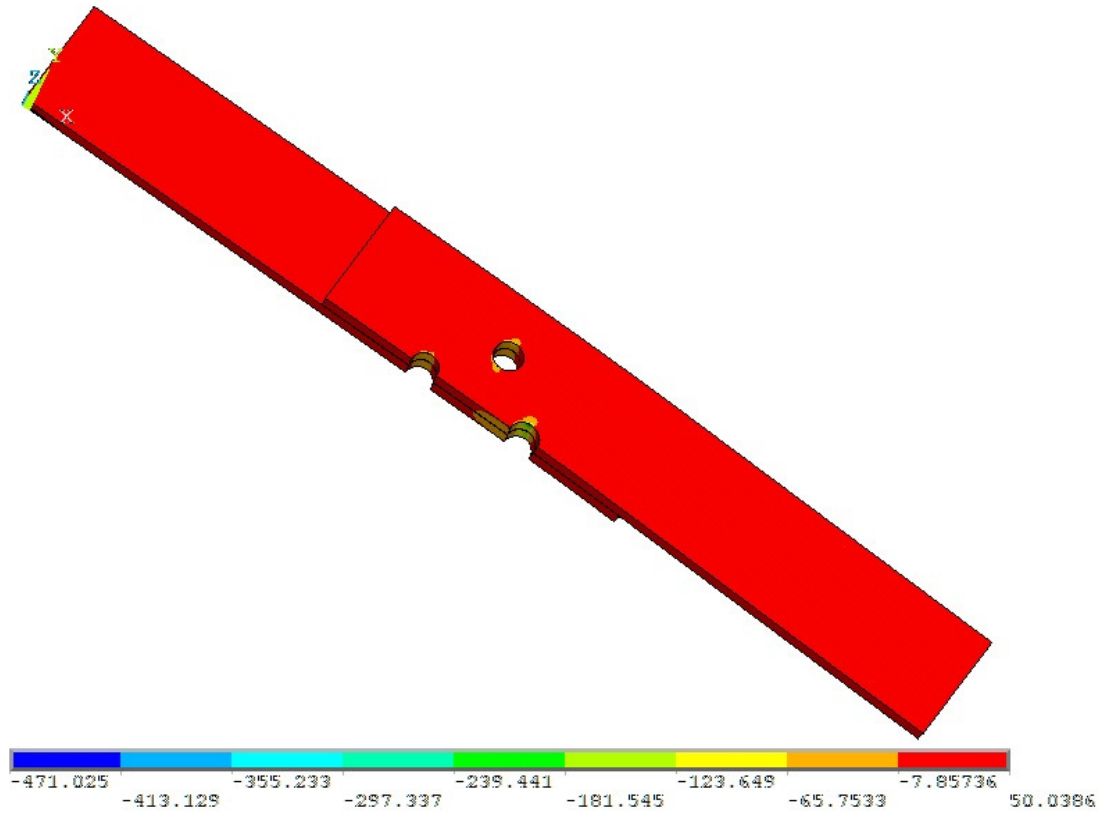
a) 80 N



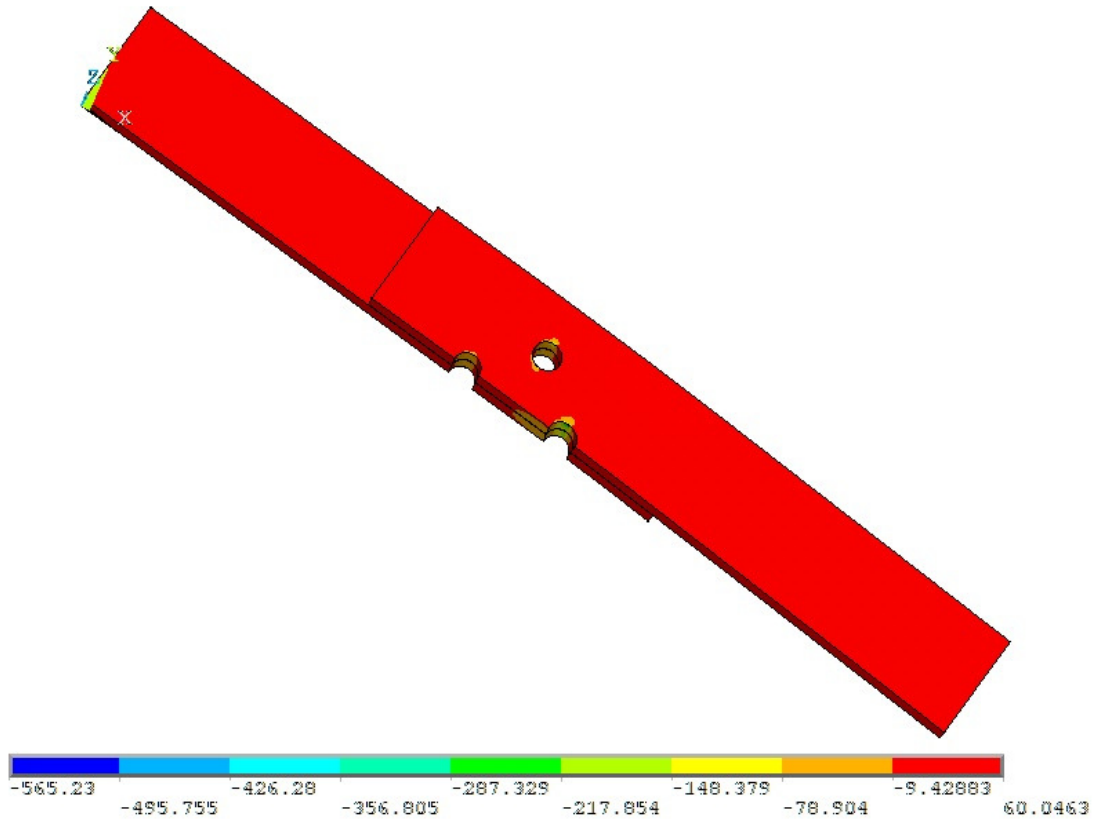
b) 120 N



c) 160 N



d) 200 N



e) 240 N

Şekil 6.8. Farklı çekme yükleri altında hesaplanan kayma gerilmeleri (τ_{xz})

6.3. Sadece Sıcaklık Yüğü Etkisiyle Elde Edilen Bulgular

Çalışmanın ikinci aşamasında yapıştırılmış ve çok pim bağlantısı uygulanmış karma bağlantıya herhangi bir çekme yüğü uygulanmadan, sadece farklı değlerlerde uniform sıcaklıklar uygulanmıştır. Uygulanan bu uniform sıcaklıkların etkisiyle oluşan ısı normal gerilmelerin maksimum değleri Çizelge 6.3'te listelenmiştir. Karma bağlantıya uygulanan uniform sıcaklık değleri sırasıyla 55, 65, 75, 85 ve 95 °C'dir.

Modelin üzerindeki gerilmeler incelendiğinde, basma ve çekme şeklinde değışiklikler gösterdiği gözlenmiştir. Bu nedenle, bu tabloda analizlerden elde edilen değler listelenirken, gerilme bileşenlerinin, çekme ve basma şeklinde verilmesi uygun görülmüştür. Çizelgedeki eksili değler, gerilmenin basma formunda meydana geldiğini ifade etmektedir.

Bu çizelgeden görüldüğü gibi ısı gerilmelerin mutlak değ olarak değleri, uniform sıcaklık artışına bağı olarak artmaktadır. Dolayısıyla, modellenen karma bağlantı için en düşük gerilmeler uygulanan 55 °C uniform sıcaklık yüğü için elde edilirken, en yüksek değli gerilmeler de 95 °C uniform sıcaklık etkisinde iken hesaplanmıştır.

Çizelge 6.3. Uniform sıcaklıklara bağı olarak hesaplanan normal gerilmeler (σ_x , σ_y , σ_z)

Sıcaklık (°C)	Gerilme Formu	Normal gerilmeler (MPa)		
		σ_x	σ_y	σ_z
55	Çekme	745,90	162,43	55,92
	Basma	-800,77	-157,62	-81,22
65	Çekme	881,51	191,96	66,08
	Basma	-946,37	-186,28	-95,99
75	Çekme	1017,12	221,49	76,25
	Basma	-1091,95	-214,94	-110,76
85	Çekme	1152,74	251,03	86,42
	Basma	-1237,55	-243,60	-125,53
95	Çekme	1288,36	280,56	96,59
	Basma	-1383,14	-272,26	-140,29

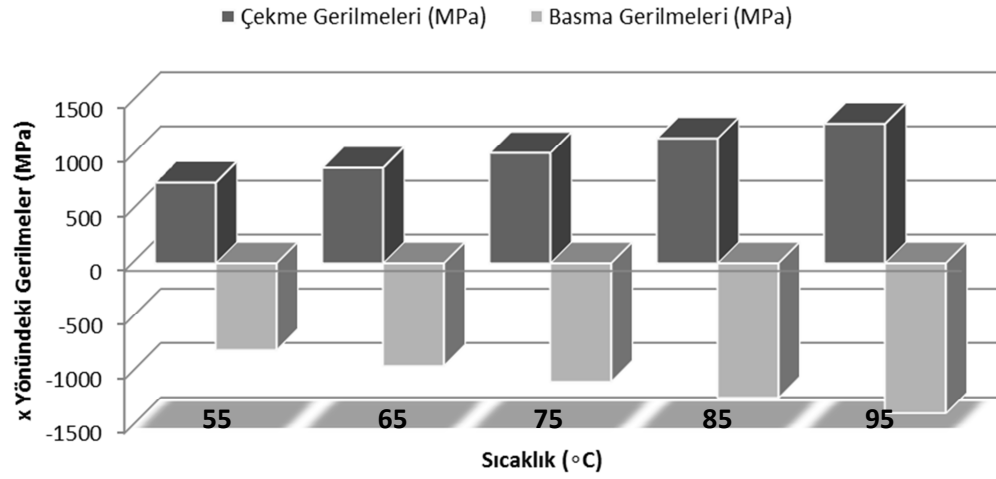
Sonuç olarak, 95 °C üniform sıcaklık yükü için çekme ve basma şeklindeki en yüksek ısı gerilme değerleri sırasıyla 1288,36 MPa ve -1383,14 MPa olarak hesaplanmıştır. Ayrıca en düşük çekme ve basma gerilmeleri 55 °C’de ve z-yönünde 55,92MPa ve - 81,22 MPa olarak bulunmuştur.

Uygulanan üniform sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan normal gerilmeler; x-yönündeki (σ_x), y-yönündeki (σ_y) ve z yönünde (σ_z) olmak üzere Şekil 6.9’da gösterilmiştir.

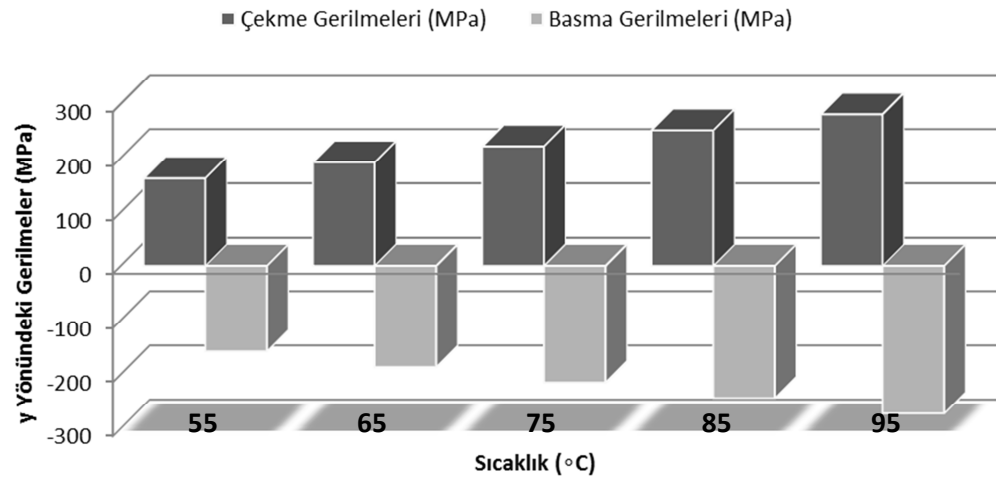
Çizelge 6.3’te listelenen normal gerilme değerlerinin, bu şekilde grafiksel gösterimi neticesinde, üniform sıcaklık yükündeki artışa bağlı olarak, ısı gerilmelerde meydana gelen artış açıkça görülebilmektedir.

Bu şekillerden görüldüğü üzere en büyük gerilmeler x-yönünde meydana gelmiştir. Bunun nedeni çekme yükünün x-yönünde uygulanması ve dolayısıyla bağlantının özellikle bu yönde daha fazla zorlanmış olmasıdır. Ayrıca, z-yönünde hesaplanan gerilmelerin değerlerinin, x ve y yönleri için hesaplanan gerilme değerlerinden küçük olduğu görülmektedir.

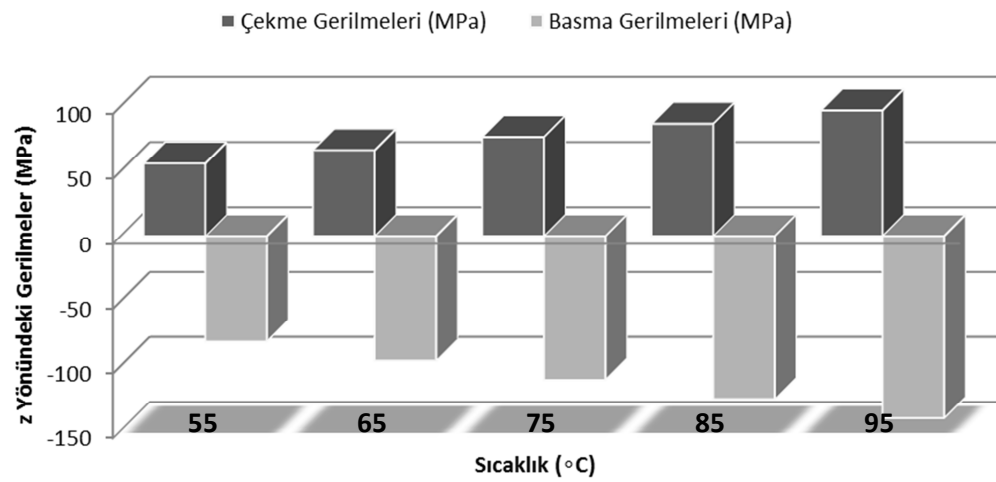
Her bir analiz için renkli kontur ile farklı üniform sıcaklık yükleri uygulandığında elde edilen normal gerilme dağılımları sırasıyla x, y ve z-yönleri için Şekil 6.10, Şekil 6.11 ve Şekil 6.12’de gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, her üç yöndede sıcaklık artışına bağlı olarak delik çevresi ve içinde çekme gerilmeleri, alt ve üst kompozit plaka yüzeyinde basma gerilmelerinde artışlar olduğu gözlenmiştir.



a) x-yönündeki normal gerilme (σ_x)

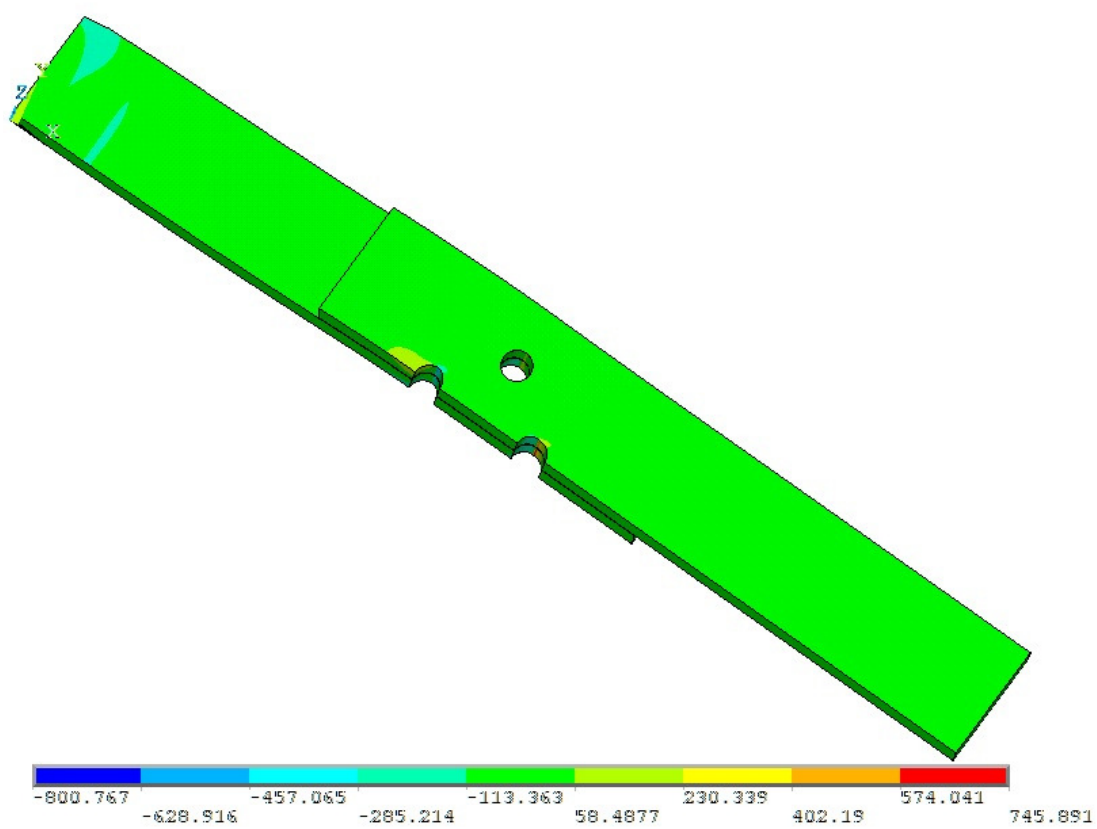


b) y-yönündeki normal gerilme (σ_y)

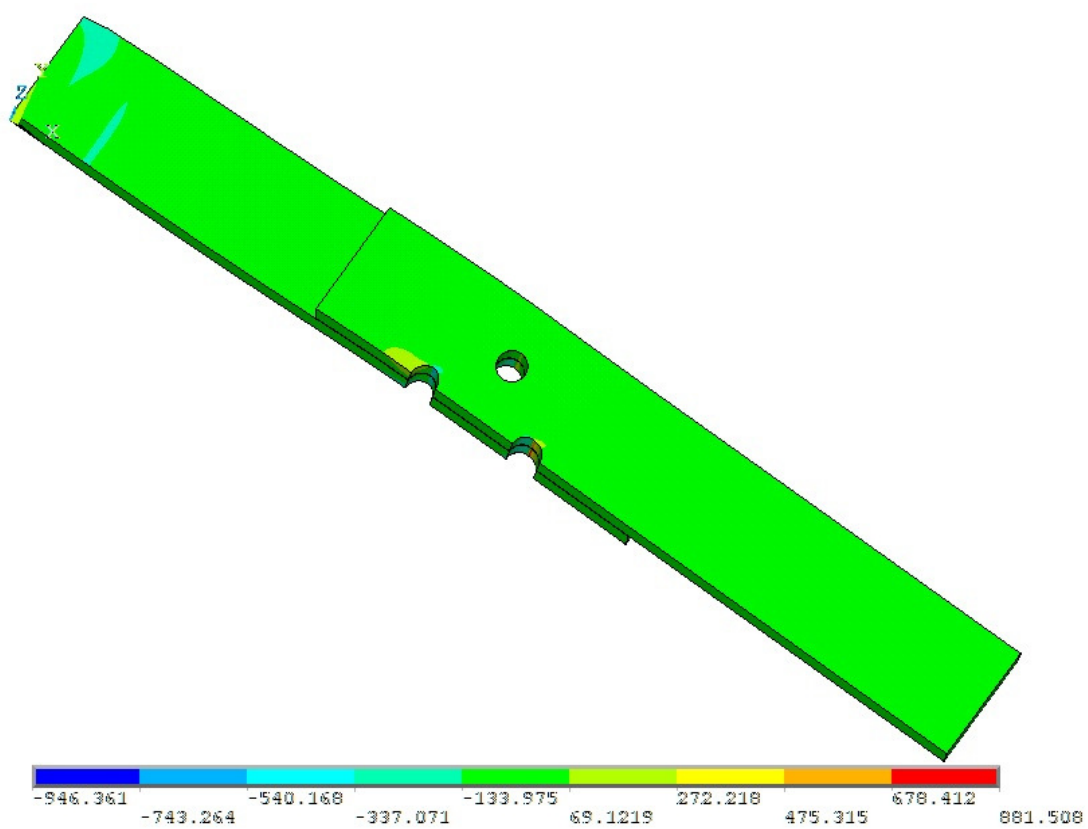


c) z-yönündeki normal gerilme (σ_z)

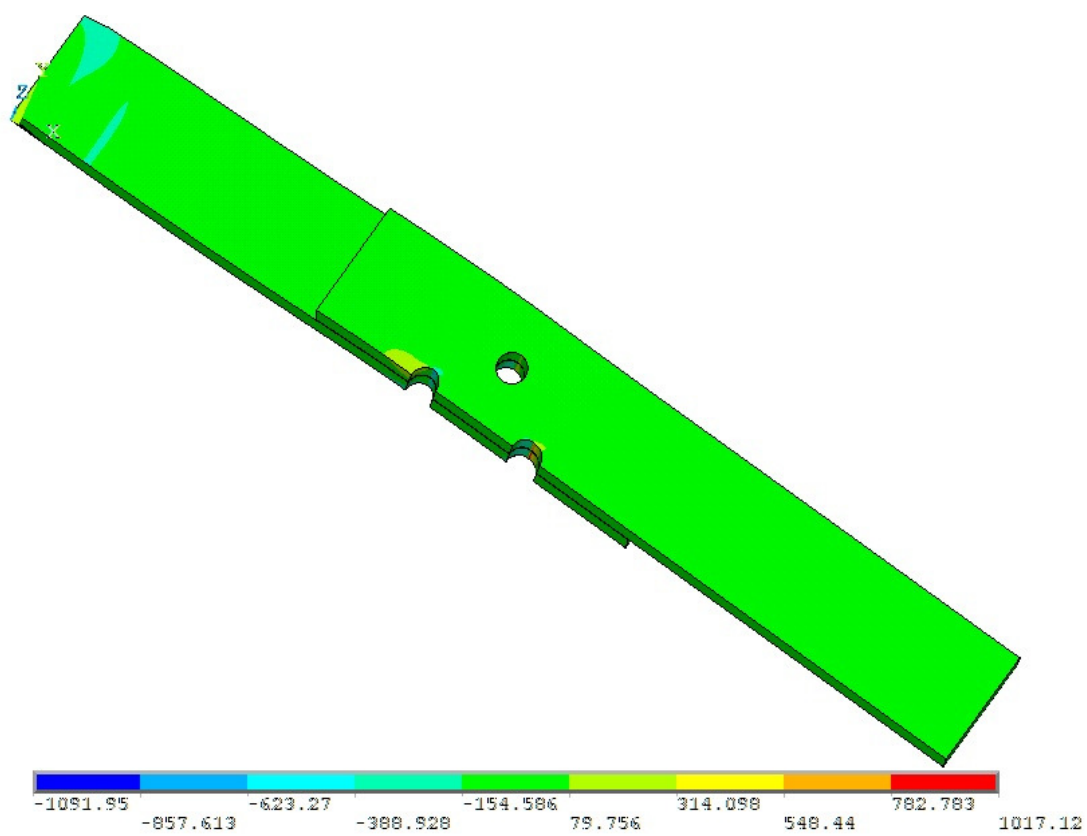
Şekil 6.9. Uniform sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan normal gerilmeler (σ_x , σ_y , σ_z)



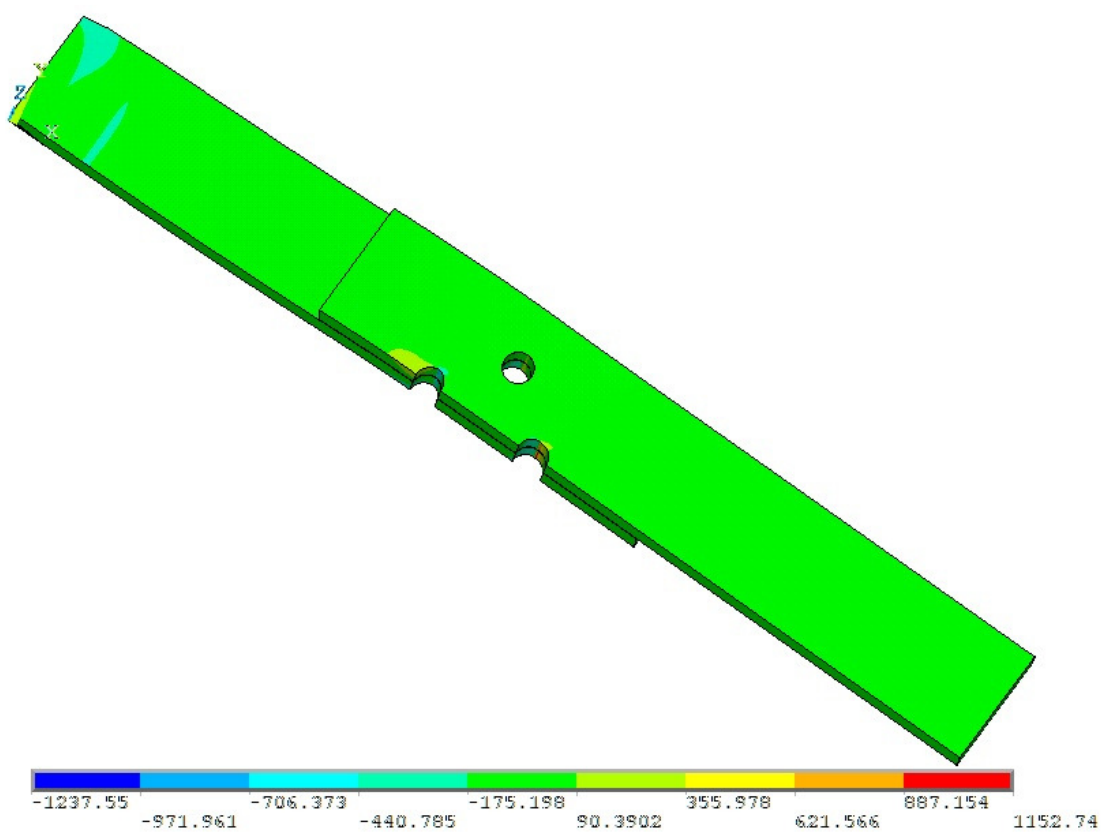
a) 55 °C



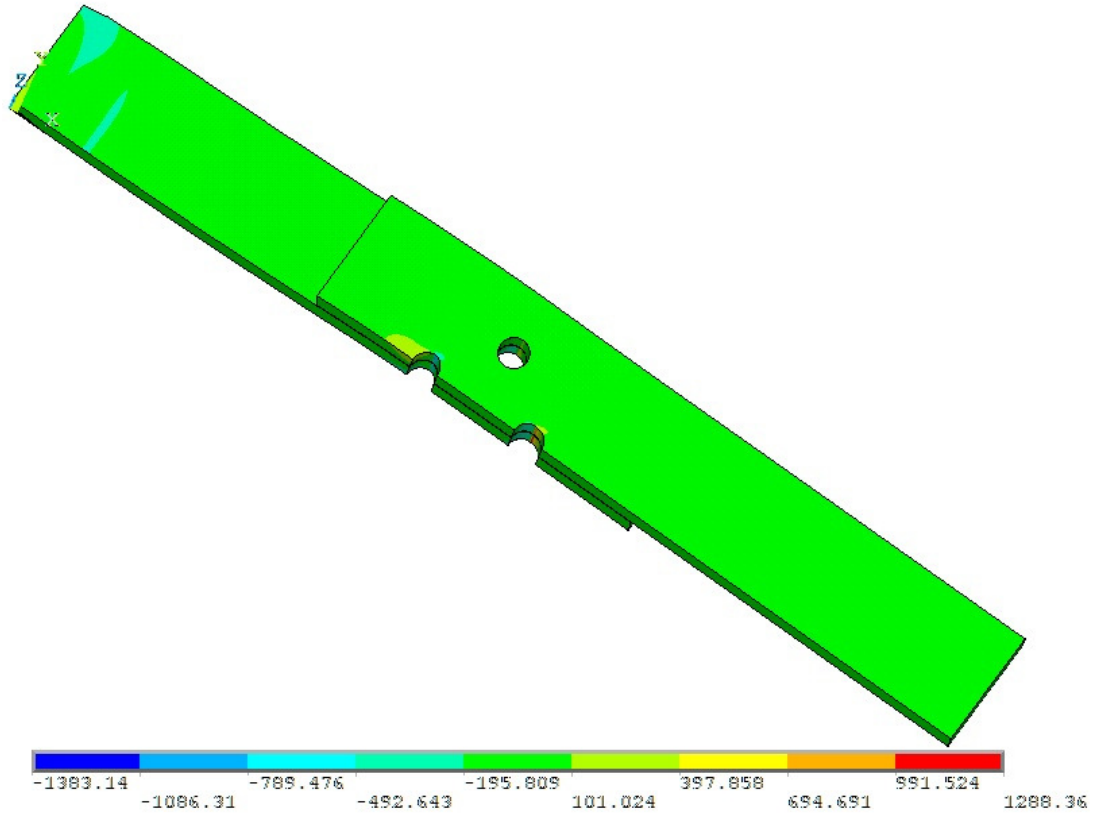
b) 65 °C



c) 75 °C

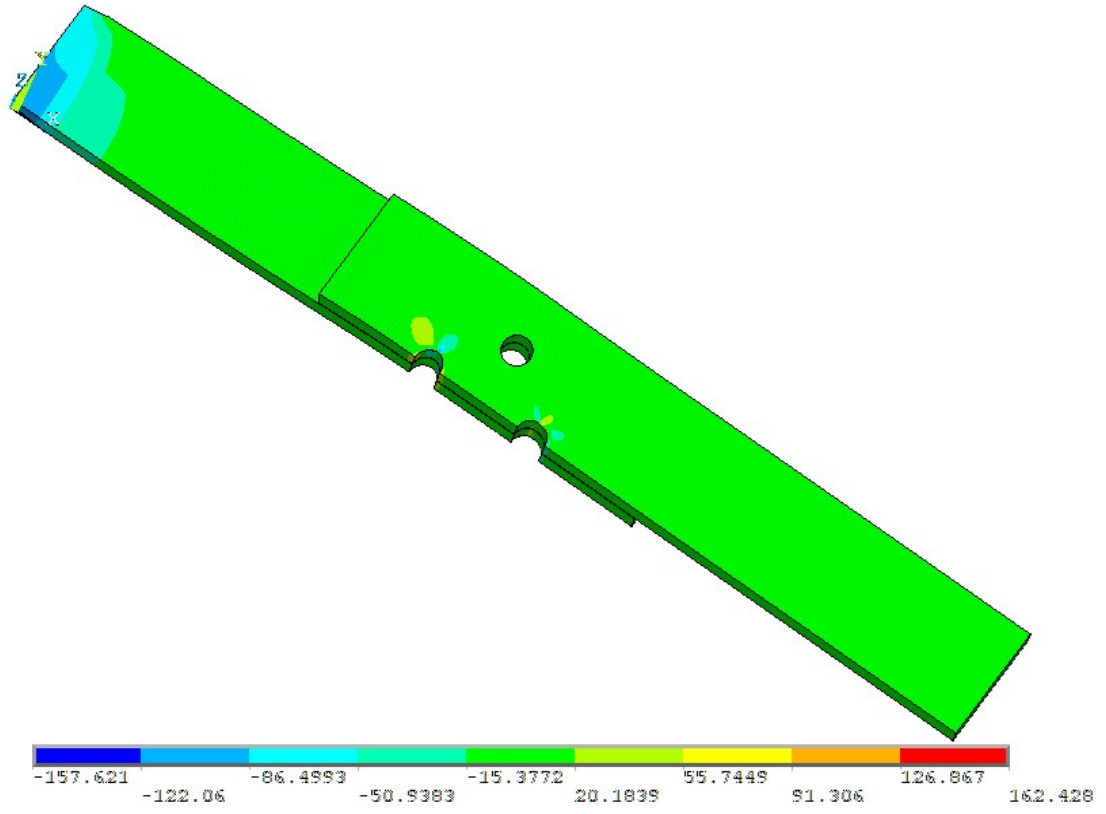


d) 85 °C

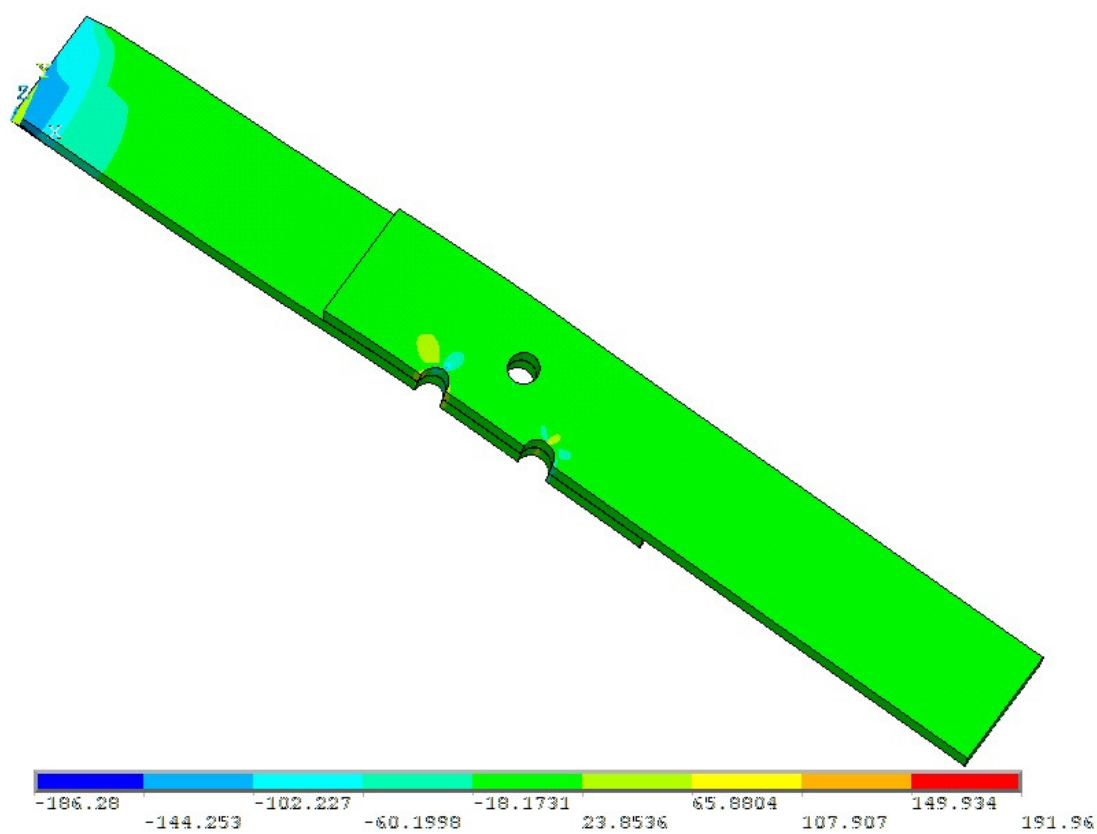


e) 95 °C

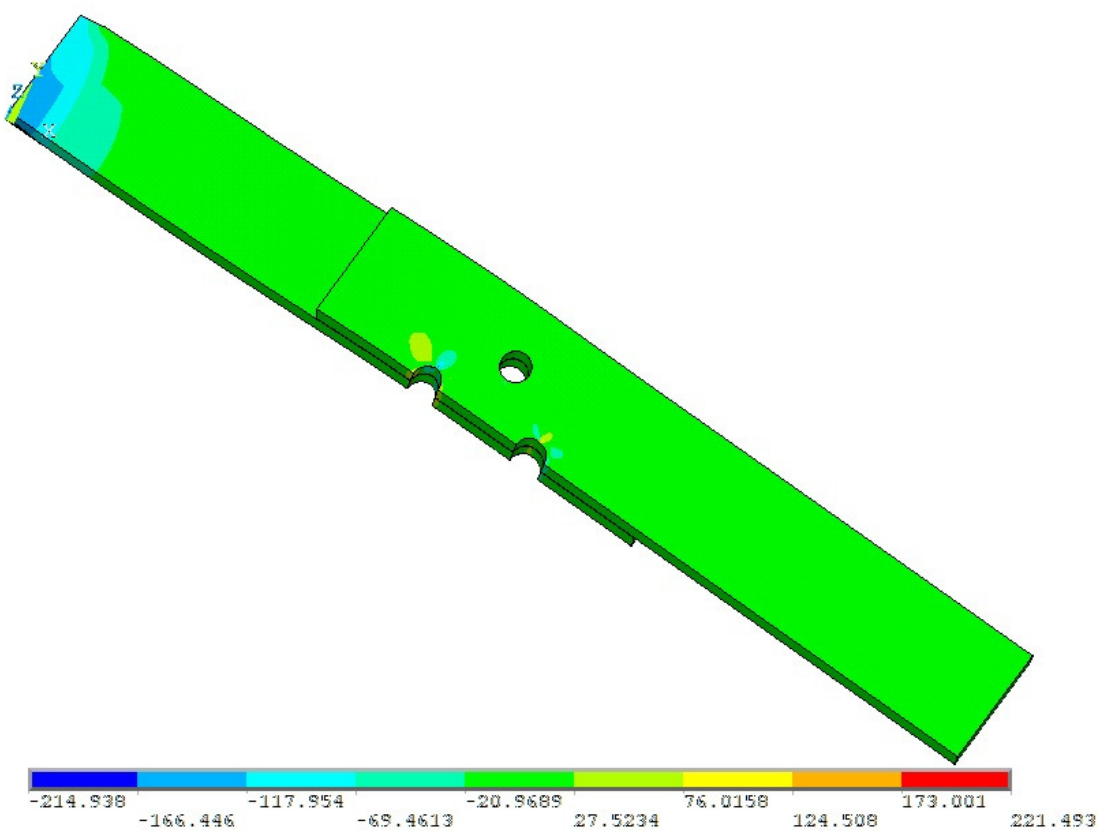
Şekil 6.10. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile x-yönünde hesaplanan normal gerilmeler



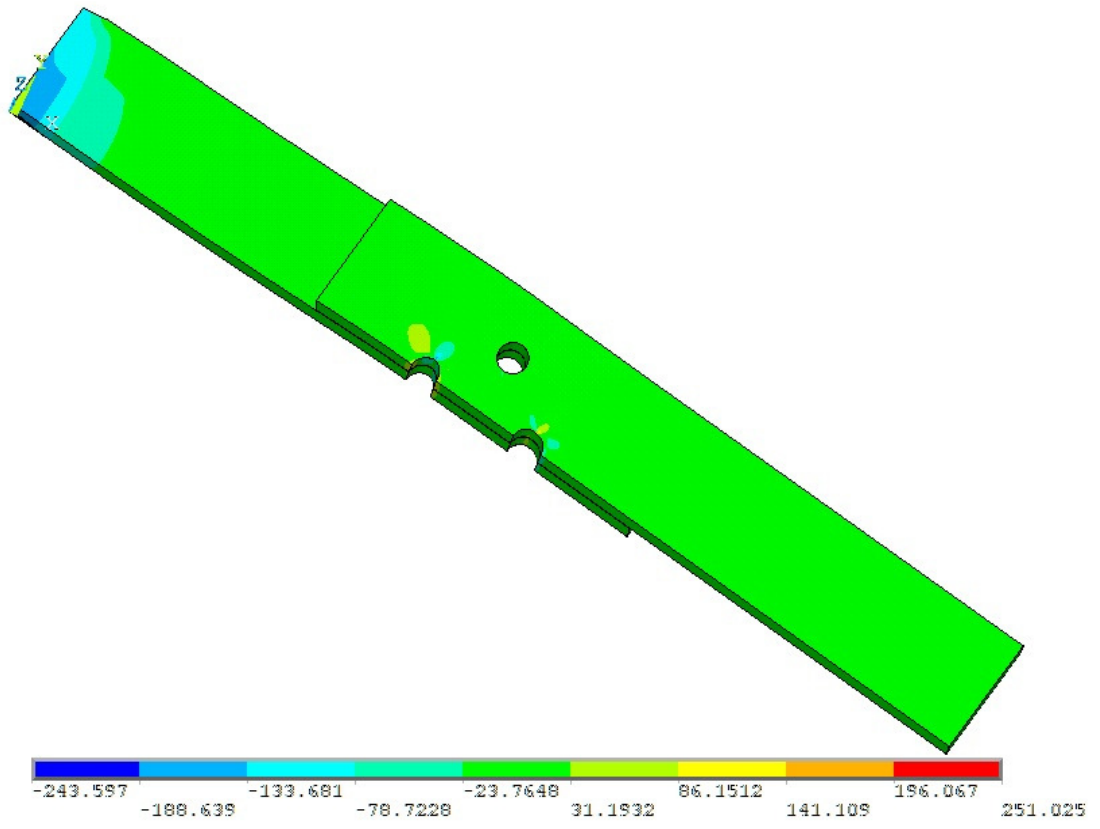
a) 55 °C



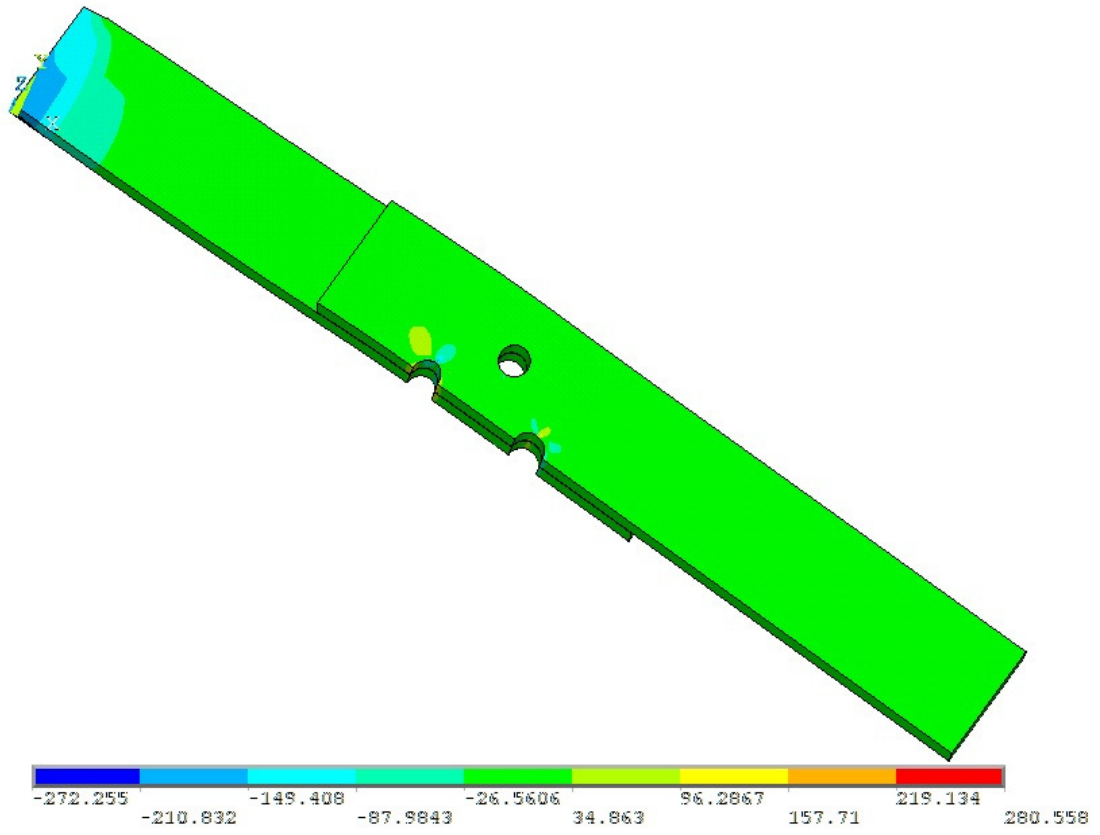
b) 65 °C



c) 75 °C

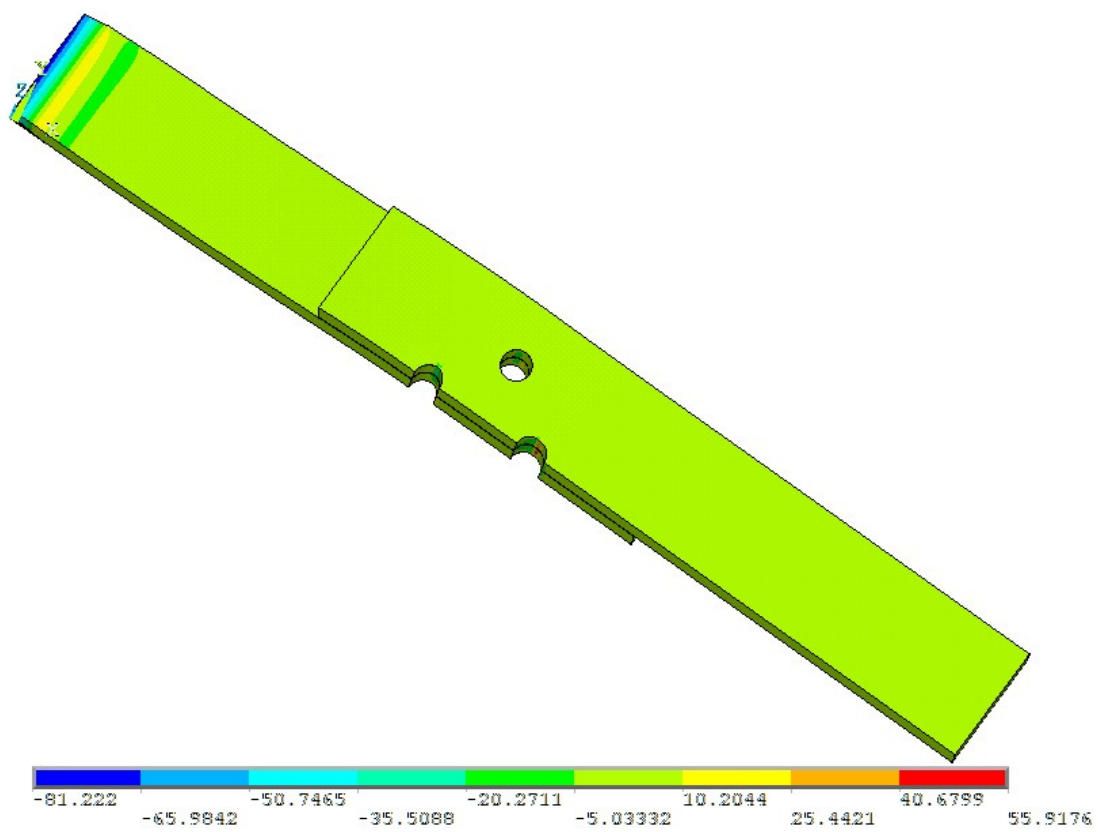


d) 85 °C

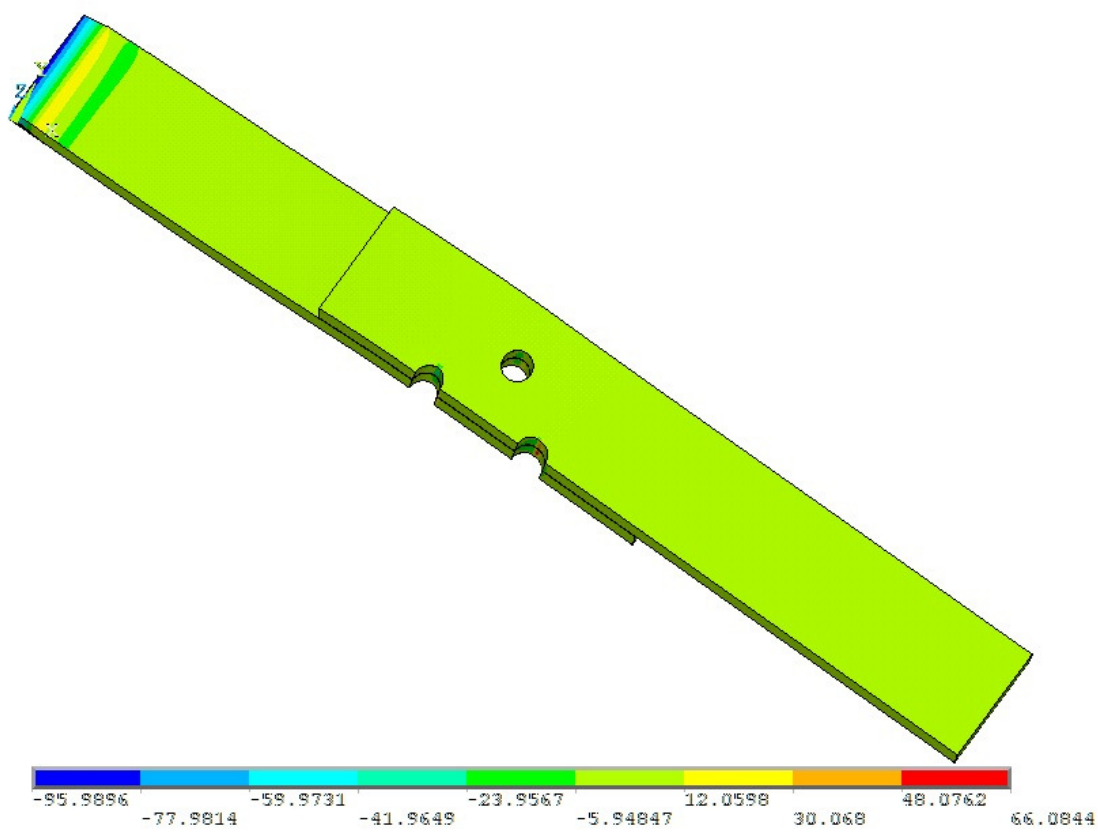


e) 95 °C

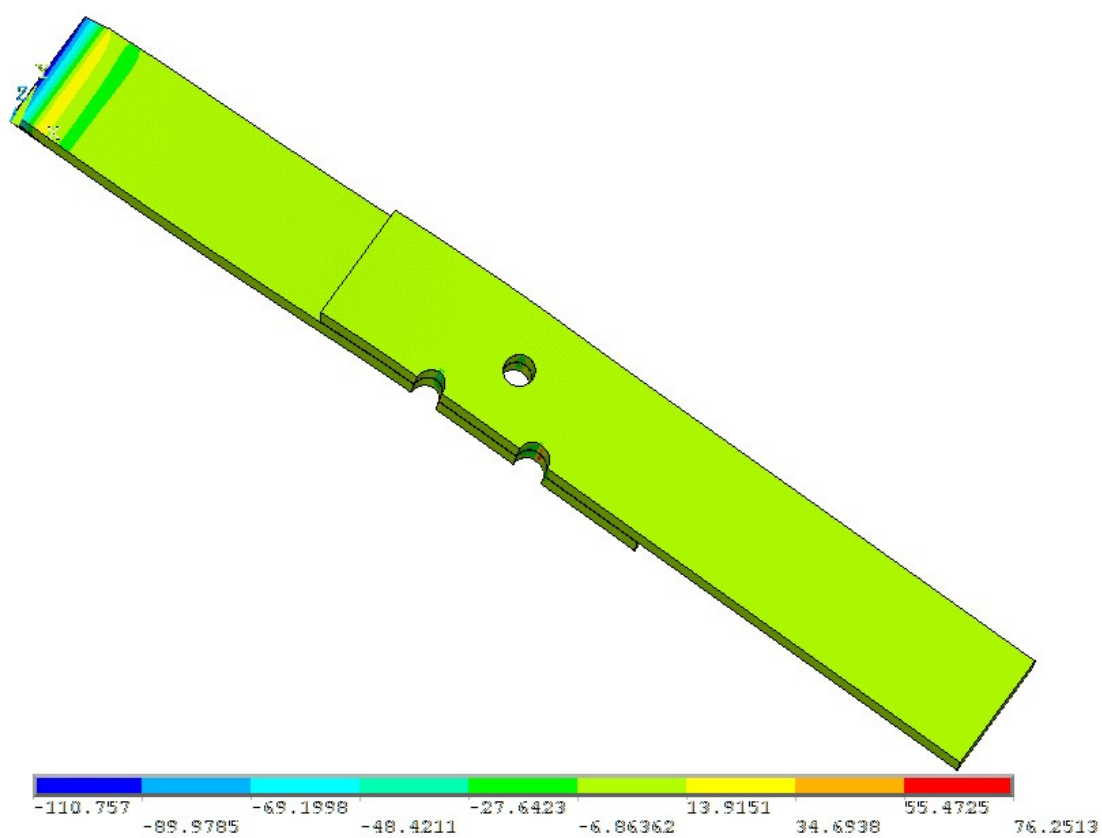
Şekil 6.11. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile y-yönünde hesaplanan normal gerilmeler



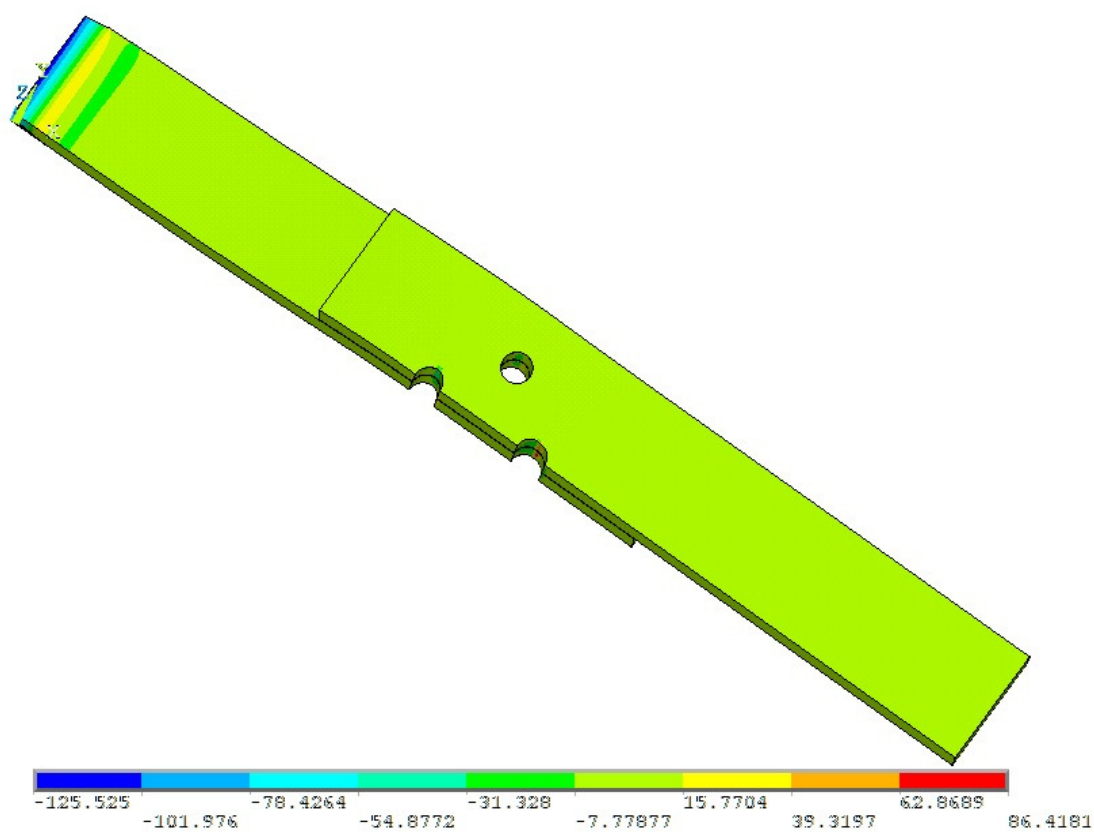
a) 55 °C



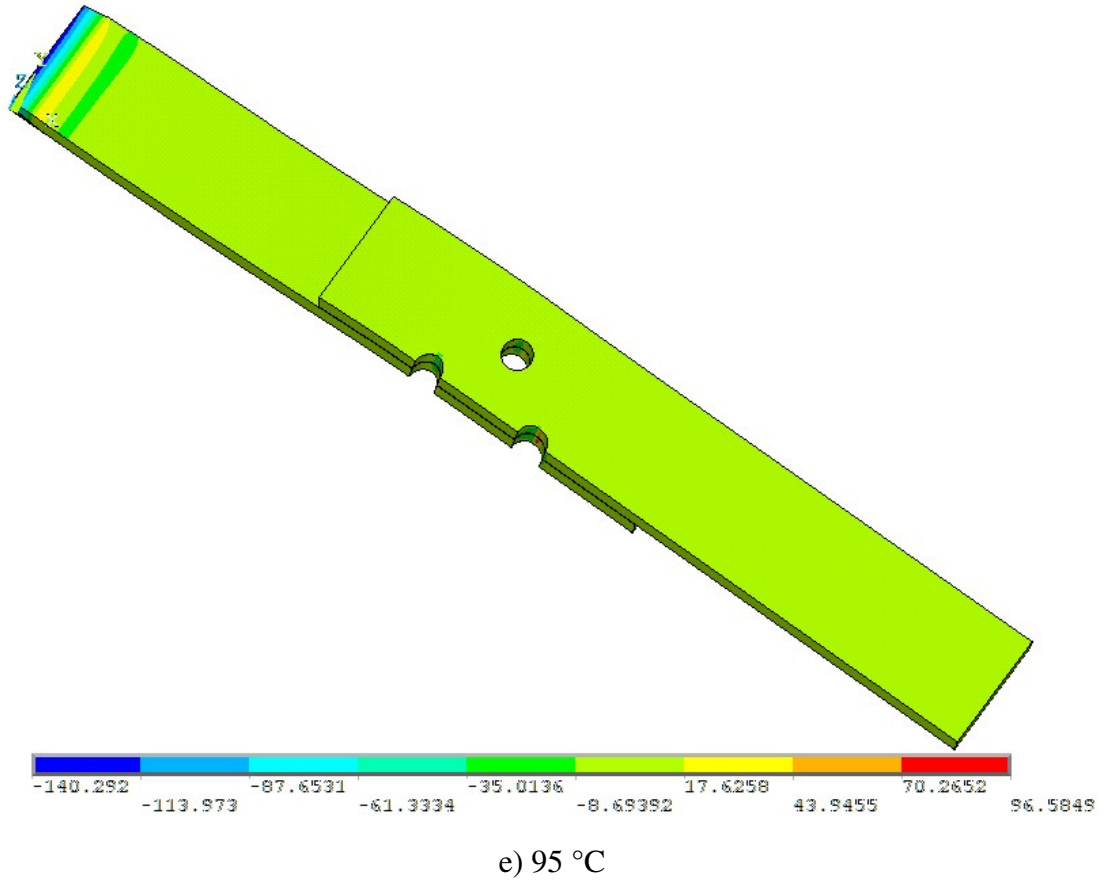
b) 65 °C



c) 75 °C



d) 85 °C



Şekil 6.12. Farklı uniform sıcaklıklar etkisi ile z-yönünde hesaplanan normal gerilmeler

Isıl normal gerilmelerde olduğu gibi, uygulanan farklı sıcaklık miktarlarına bağlı olarak ısıl kayma gerilmeleri τ_{xy} , τ_{yz} , ve τ_{xz} 'in üç boyutlu model üzerindeki maksimum değerleri Çizelge 6.4'te gösterilmiştir.

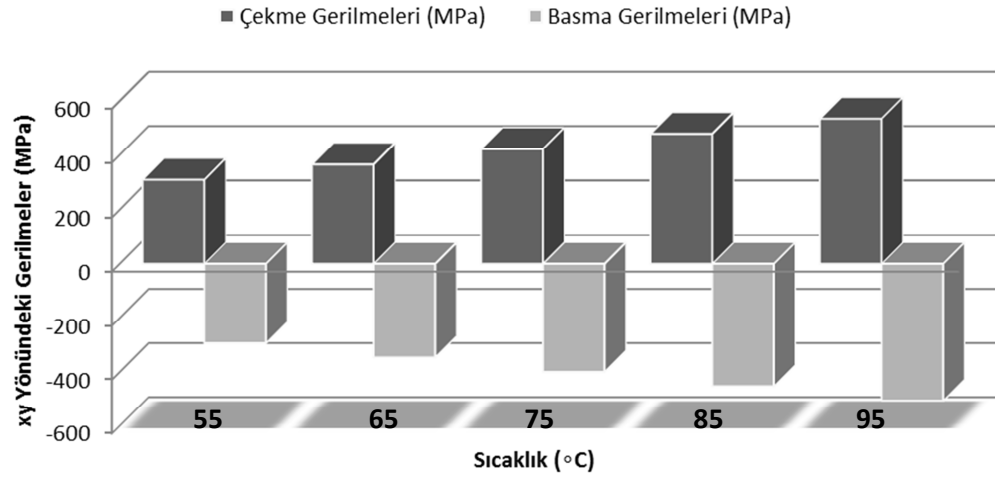
Çizelge 6.4'te listelenen kayma gerilme değerlerinin, Şekil 6.13'te grafiksel gösterimi neticesinde, sıcaklık artışına bağlı olarak, kayma gerilmelerde meydana gelen artış açıkça görülebilmektedir. En yüksek kayma gerilmeleri $\tau_{xy}=534,42$ MPa çekme gerilme değeri ve $-505,87$ MPa basma gerilme değeri olarak hesaplanmıştır. Ayrıca en düşük çekme ve basma gerilme değerleri $\tau_{yz}=26,73$ MPa ve $13,79$ MPa olarak bulunmuştur.

Her bir analiz için renkli kontur ile farklı uniform sıcaklıklar uygulandığında elde edilen kayma gerilme dağılımları sırasıyla τ_{xy} , τ_{yz} , ve τ_{xz} için Şekil 6.14, 6.15 ve 6.16'da gösterilmiştir. Şekiller incelendiğinde, her üç yönde sıcaklık artışına bağlı olarak delik içinde çekme yönünde kayma gerilmeleri, alt ve üst kompozit plaka yüzeyinde,

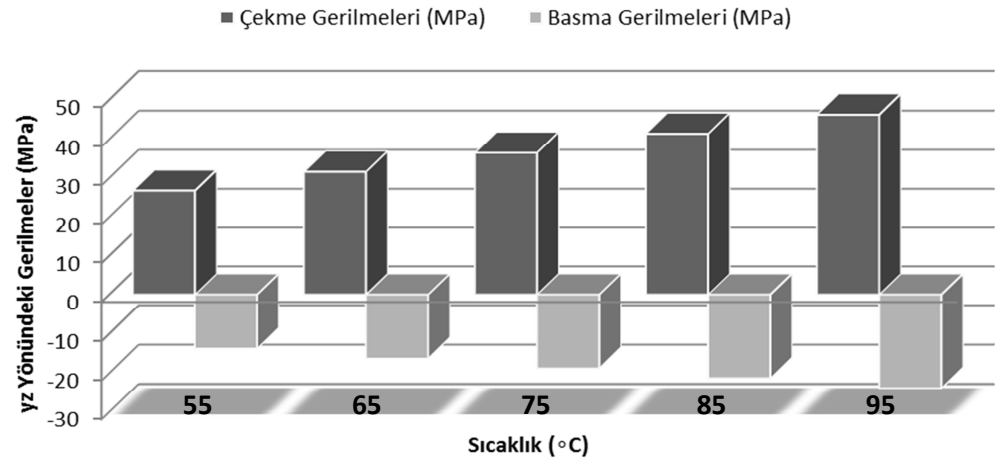
delik çevresinde ve kompozit plakaların birleşim bölgelerinde basma yönünde kayma gerilmelerinde artışlar olduğu gözlenmiştir.

Çizelge 6.4. Uniform sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan kayma gerilmeleri

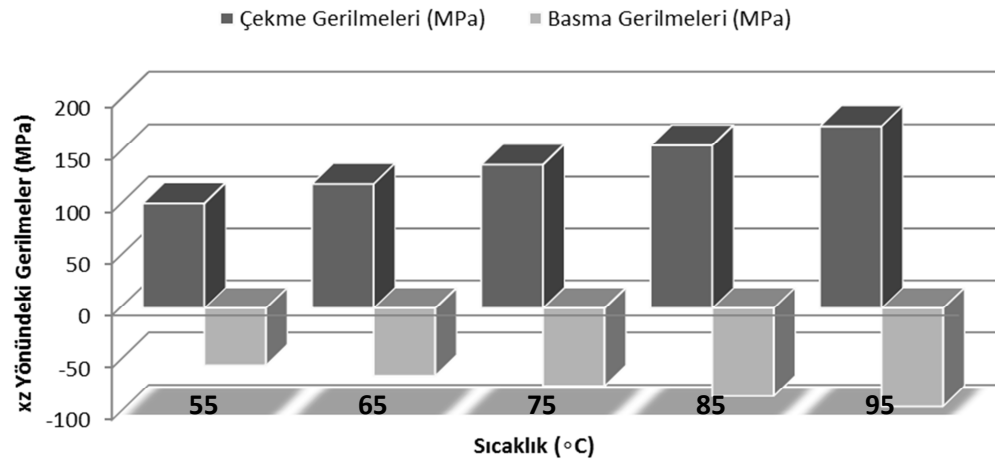
Sıcaklık (°C)	GerilmeFormu	Kayma gerilmeleri (MPa)		
		τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
55	Çekme	309,40	26,73	101,25
	Basma	-292,87	-13,79	-54,54
65	Çekme	365,66	31,58	119,65
	Basma	-346,12	-16,30	-64,46
75	Çekme	421,91	36,44	138,06
	Basma	-399,37	-18,81	-74,37
85	Çekme	478,17	41,30	156,47
	Basma	-452,62	-21,32	-84,29
95	Çekme	534,42	46,16	174,88
	Basma	-505,87	-23,83	-94,21



a) τ_{xy} yönündeki kayma gerilmesi

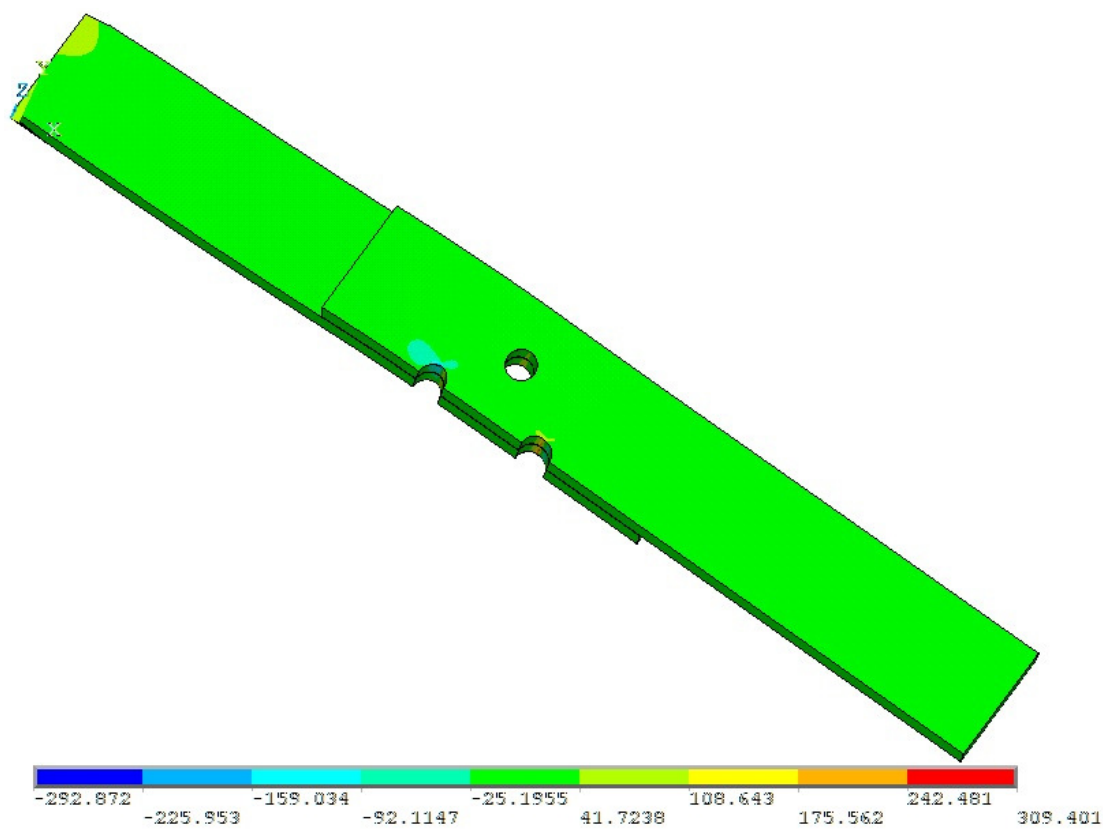


b) τ_{yz} yönündeki kayma gerilmesi

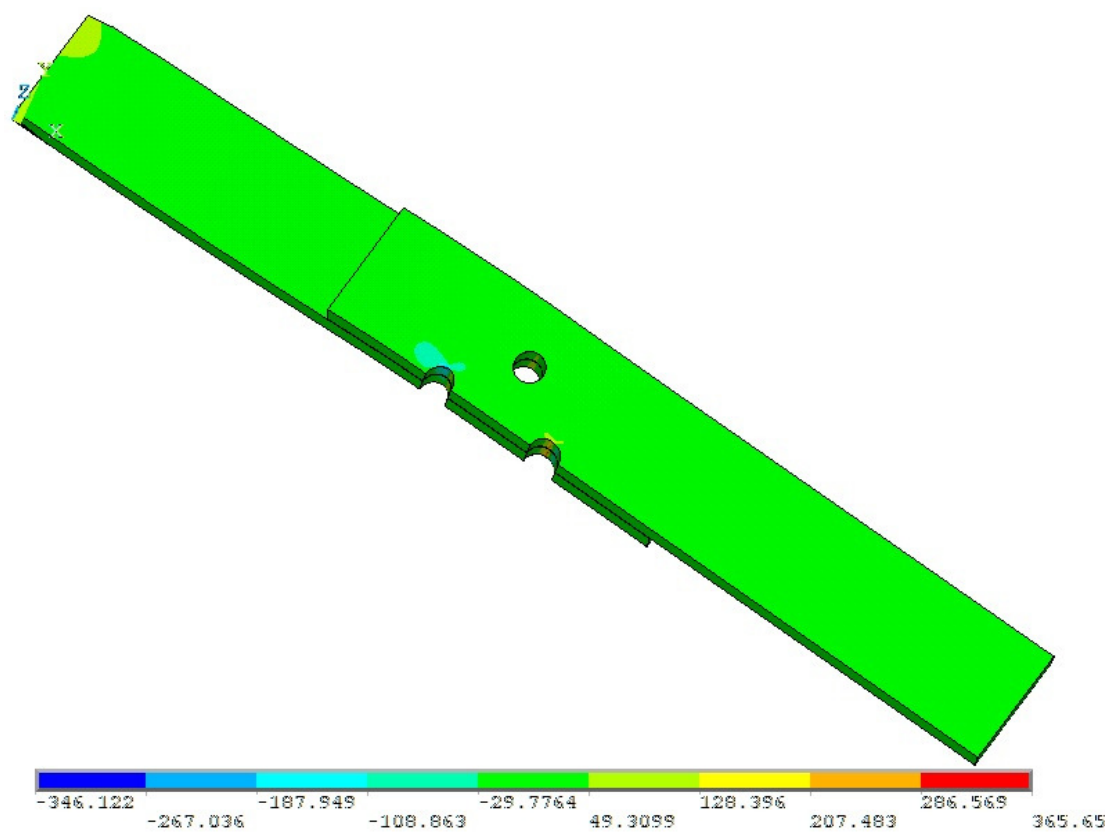


c) τ_{xz} yönündeki kayma gerilmesi

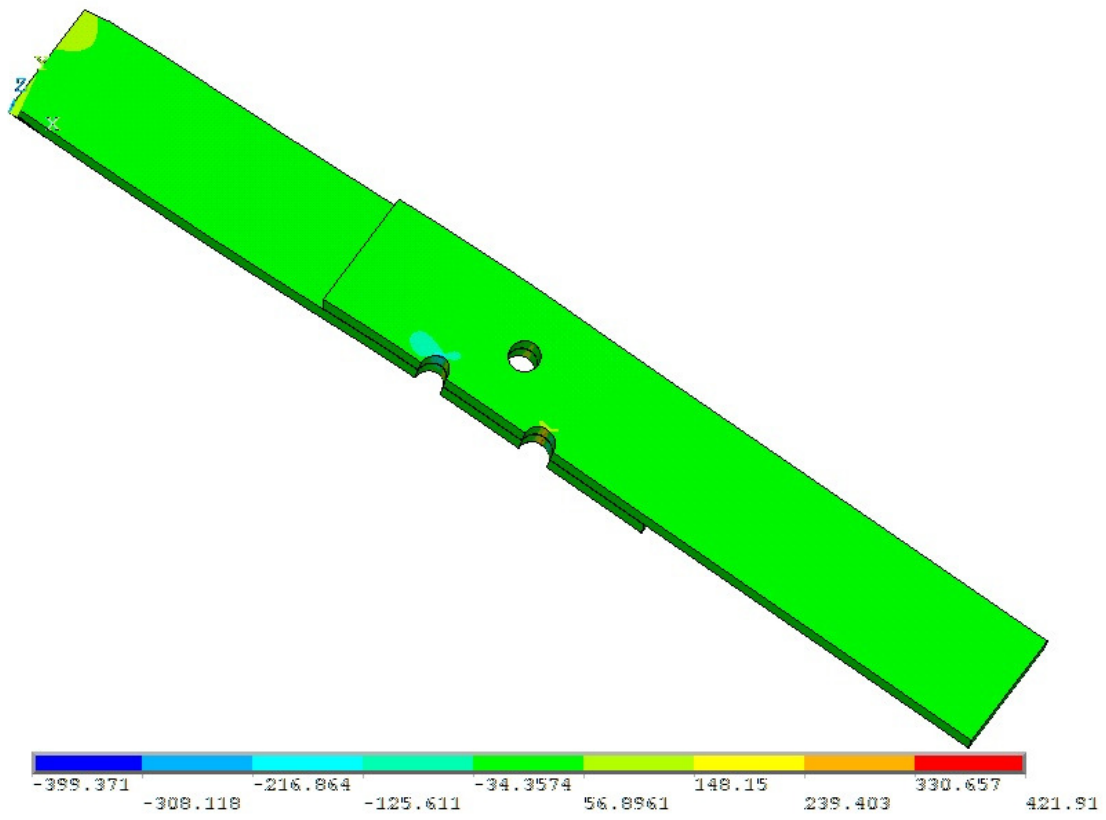
Şekil 6.13. Uniform sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan kayma gerilmeleri



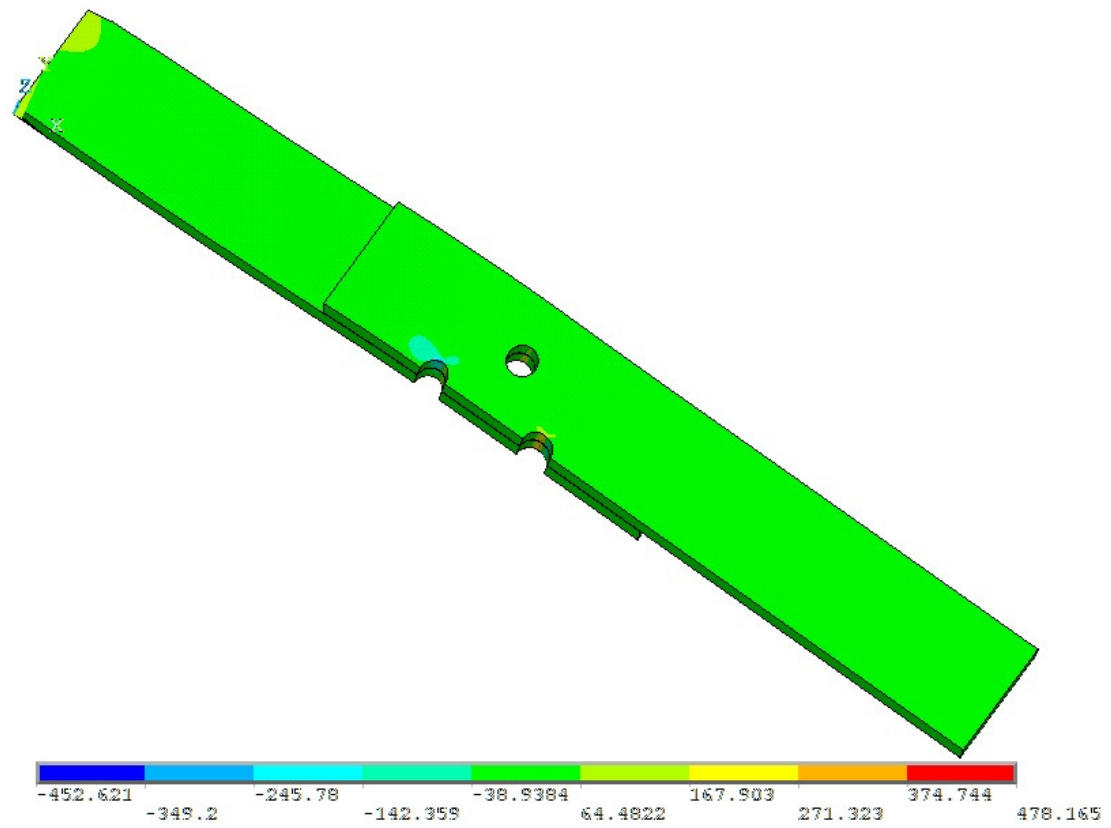
a) 55 °C



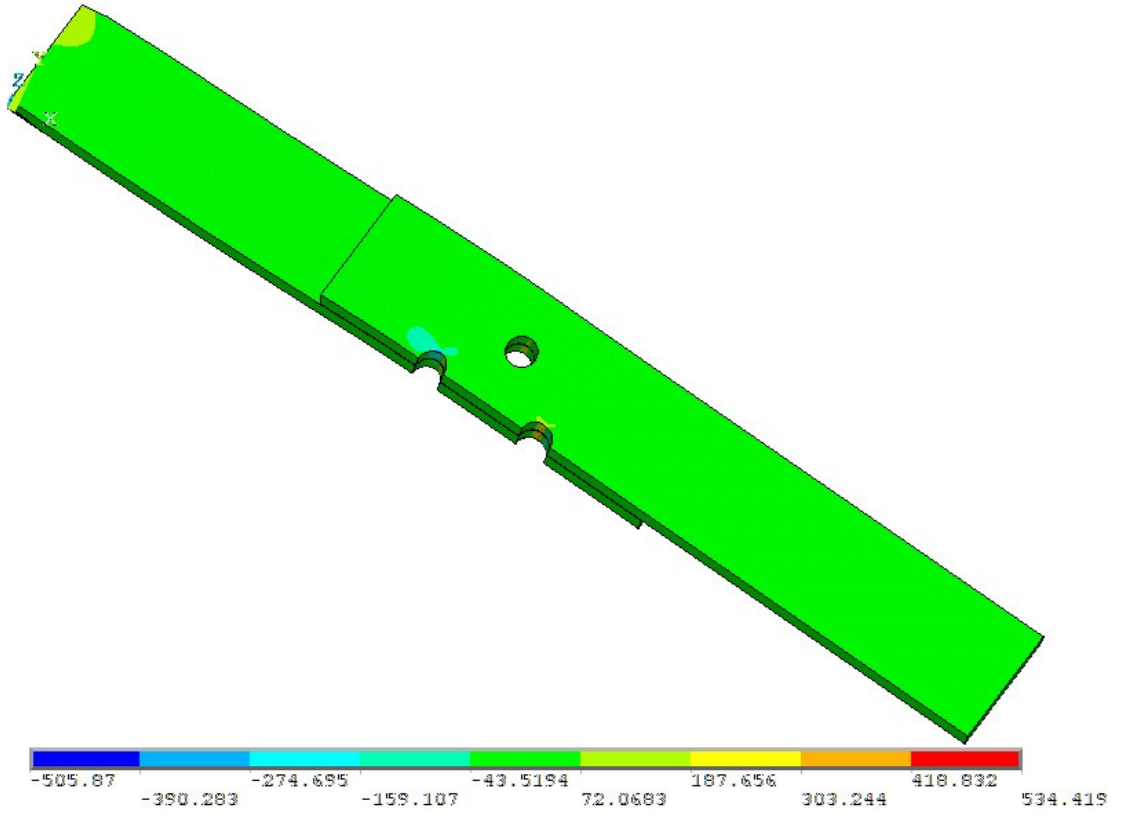
b) 65 °C



c) 75 °C

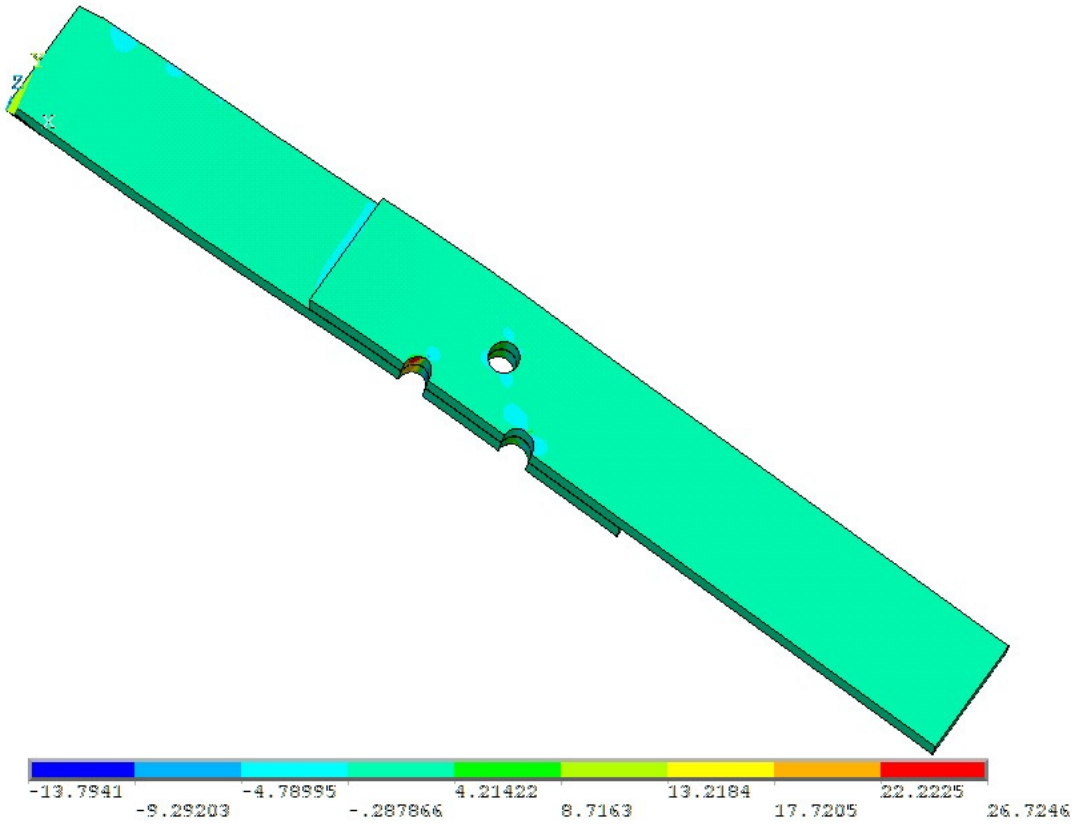


d) 85 °C

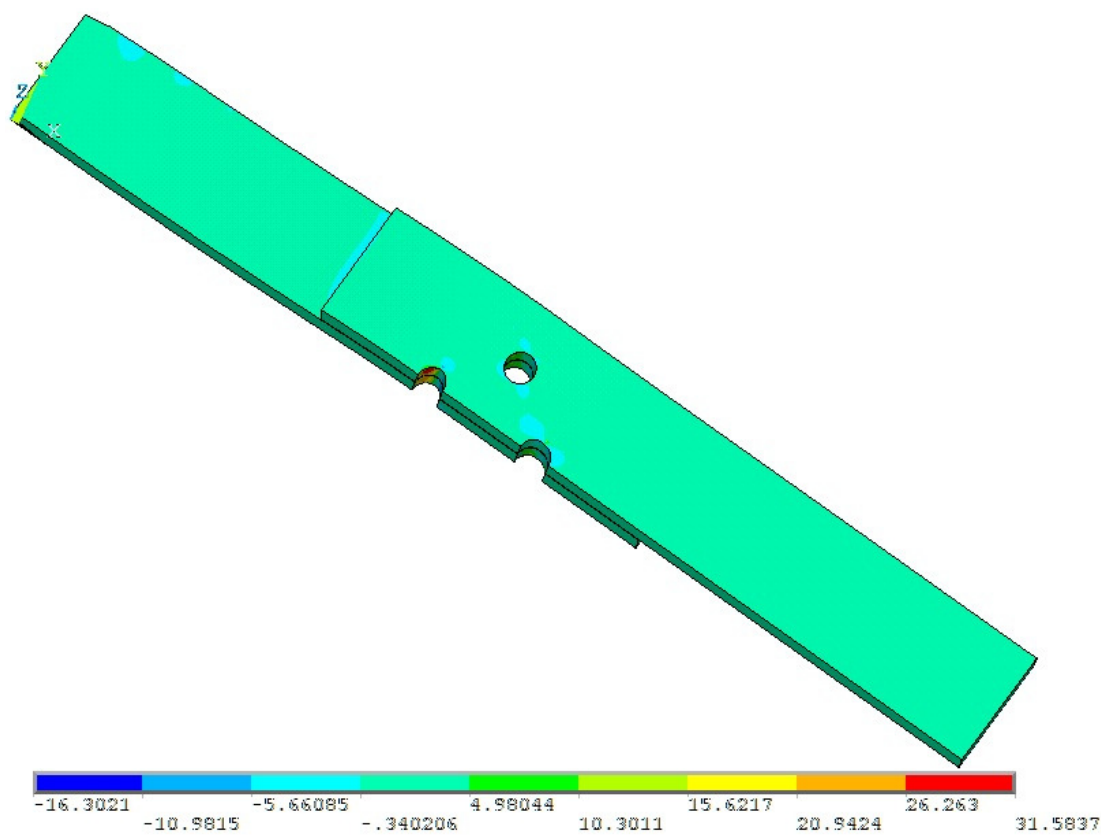


e) 95°C

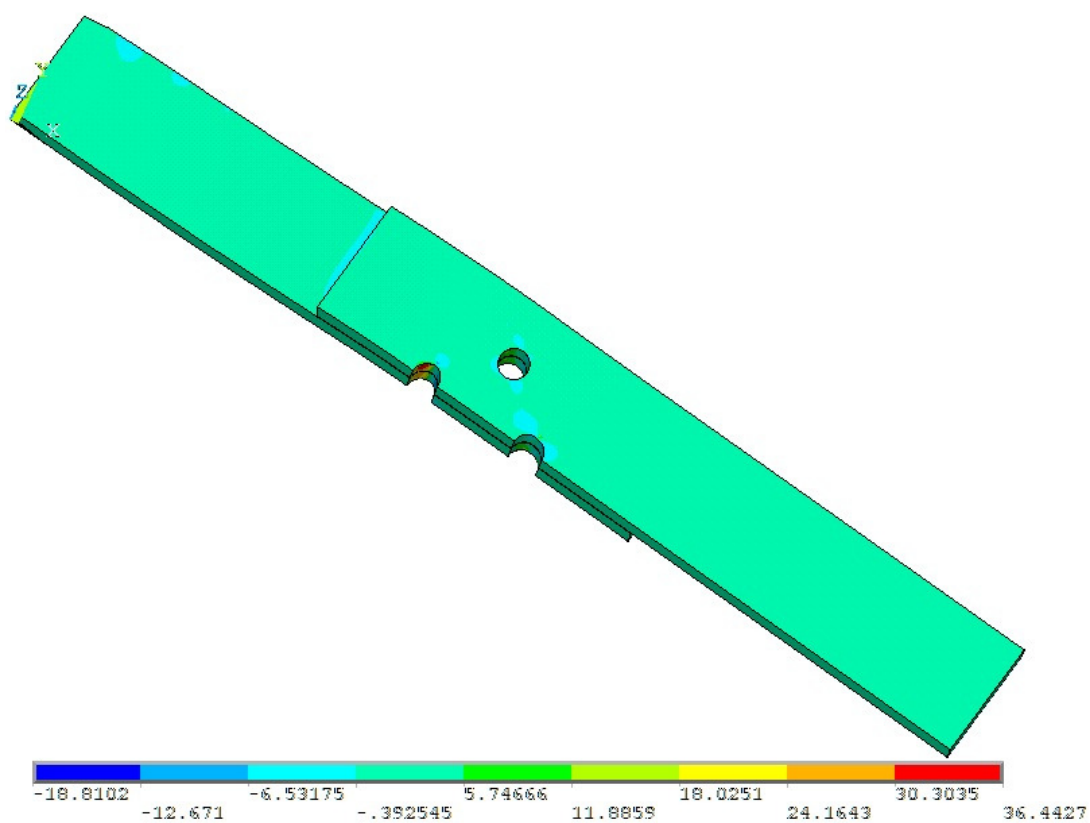
Şekil 6.14. Farklı uniform sıcaklık yükleri için hesaplanan kayma gerilmeleri (τ_{xy})



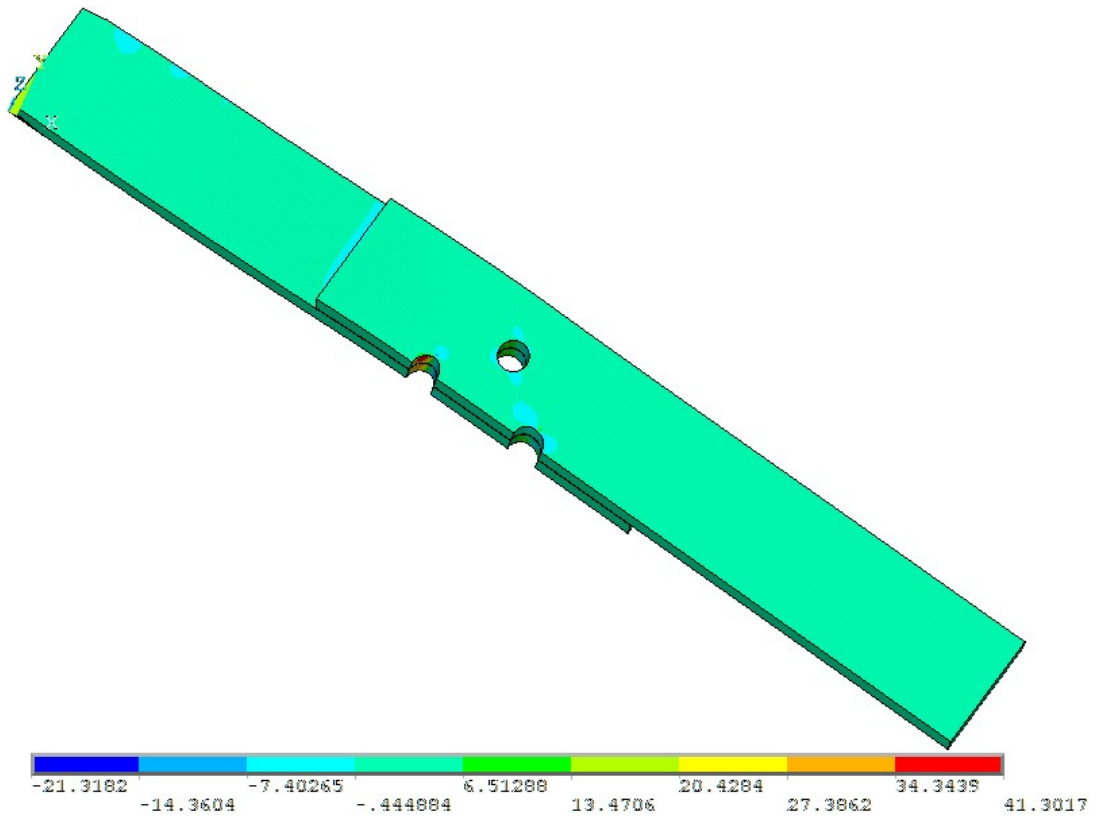
a) 55 °C



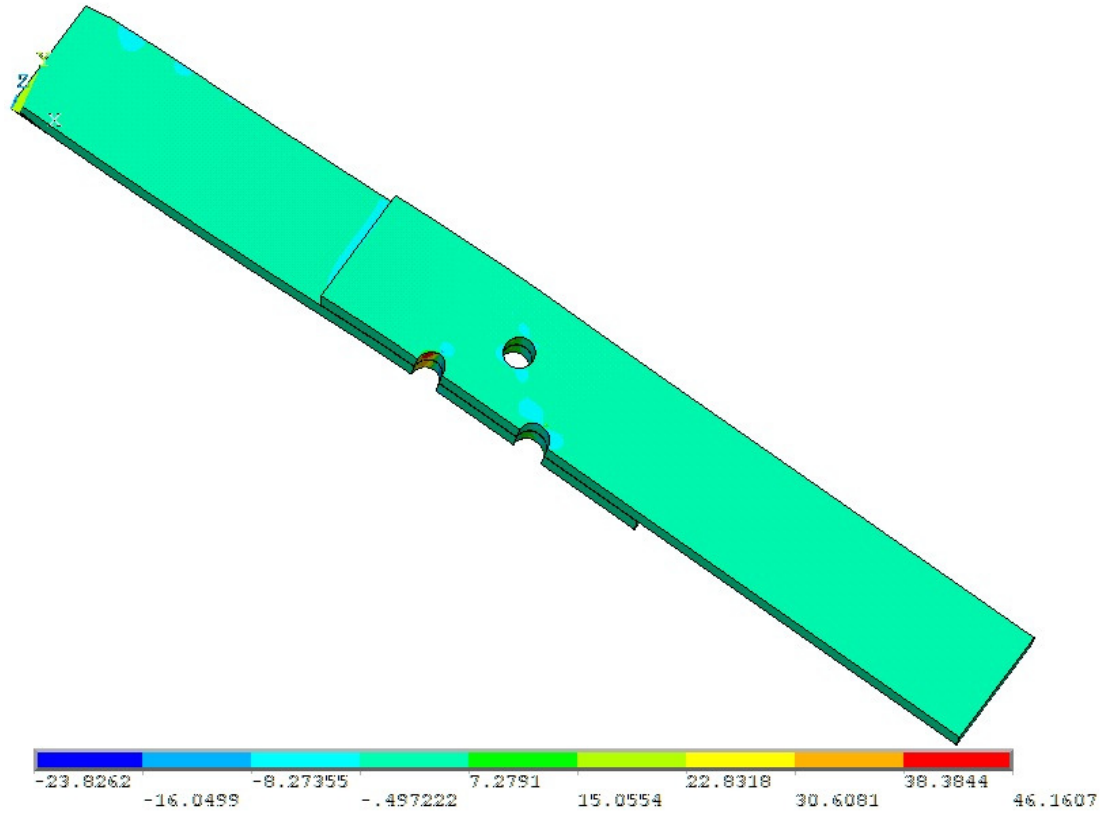
b) 65 °C



c) 75 °C

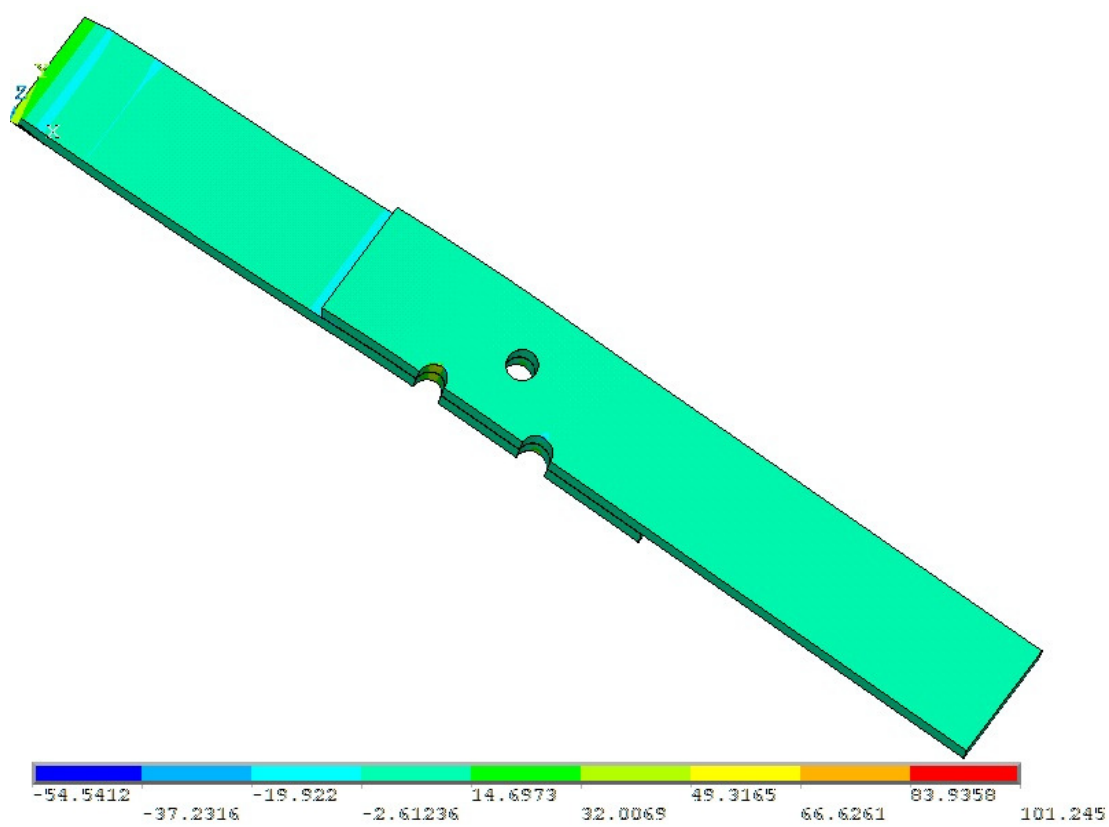


d) 85 °C

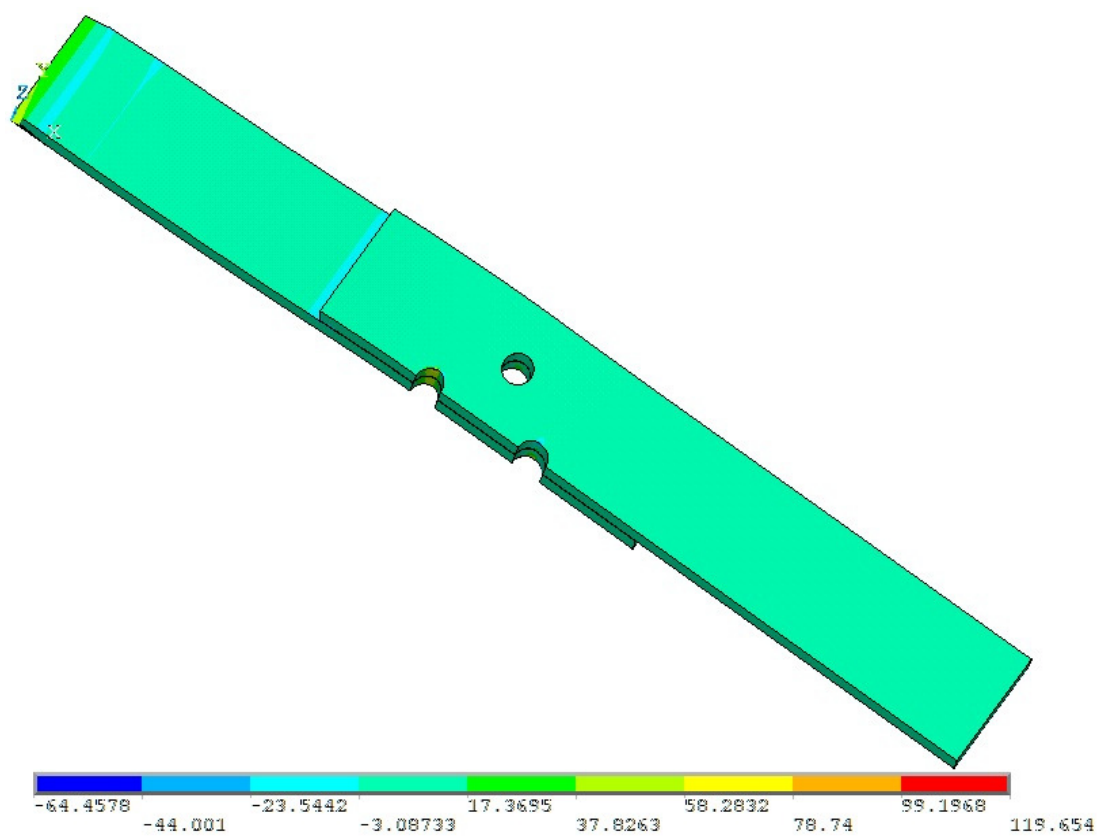


e) 95 °C

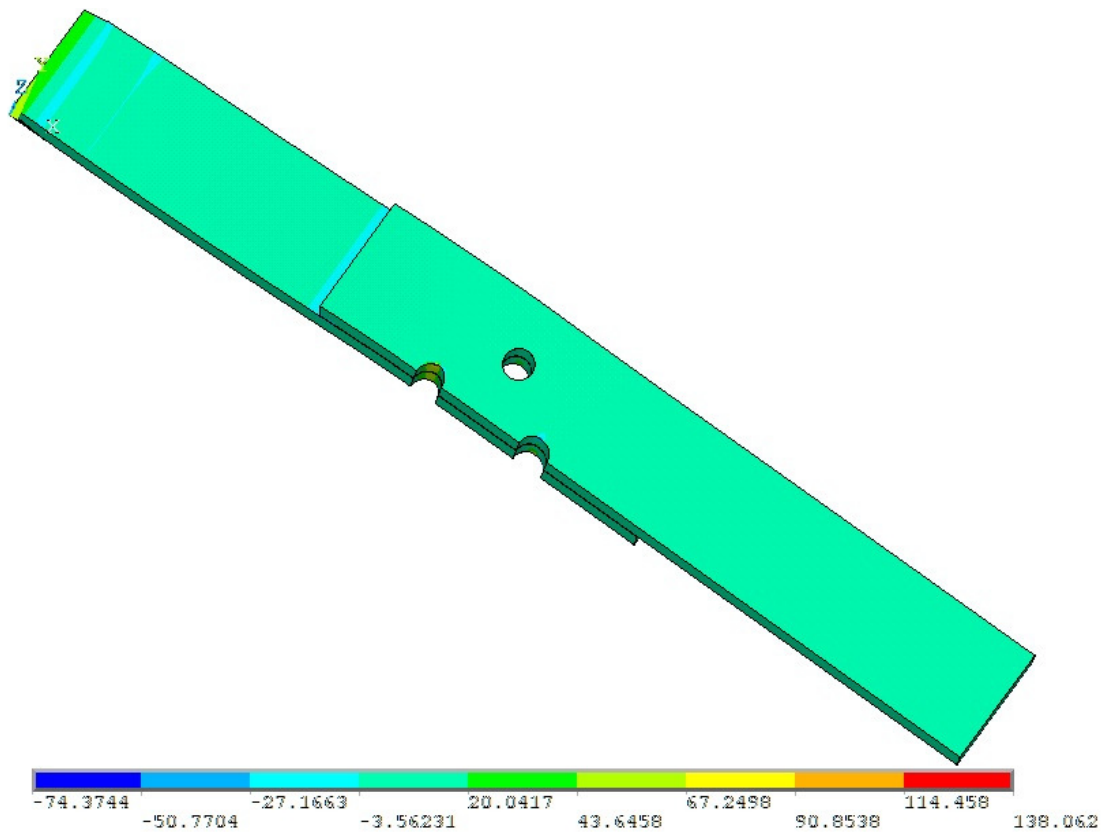
Şekil 6.15. Farklı uniform sıcaklık yükleri için hesaplanan kayma gerilmeleri (τ_{yz})



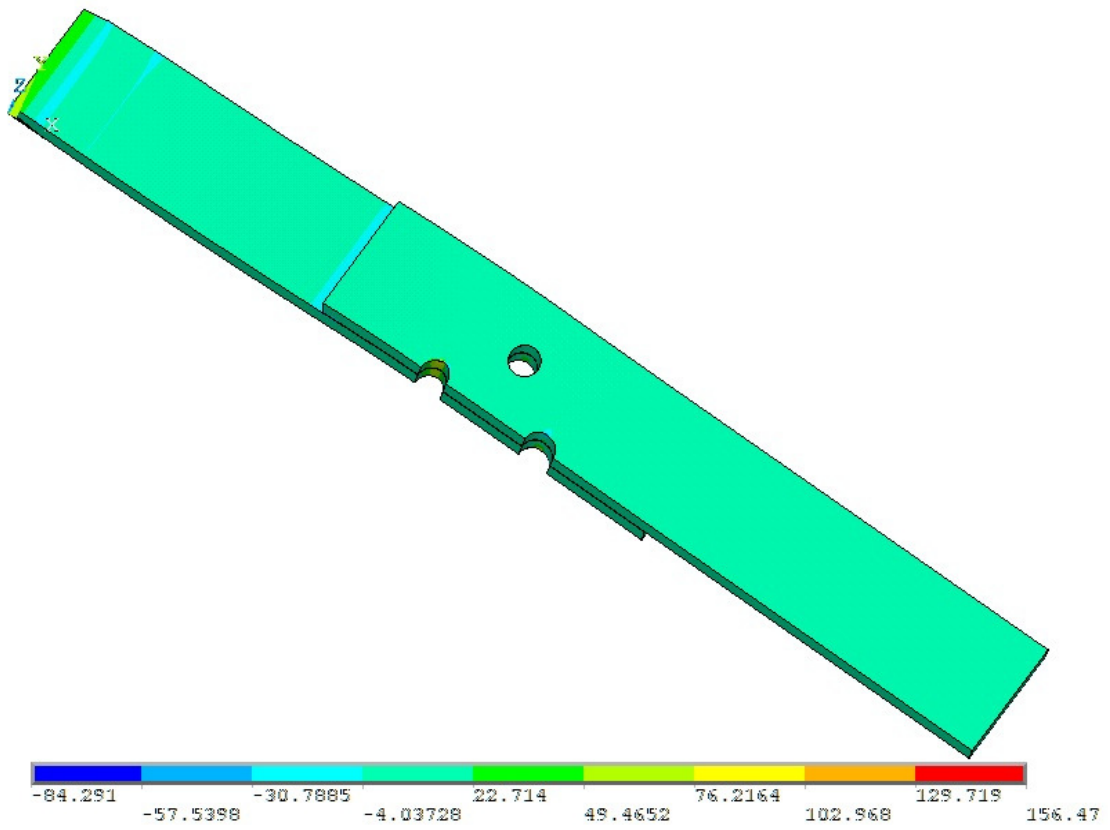
a) 55 °C



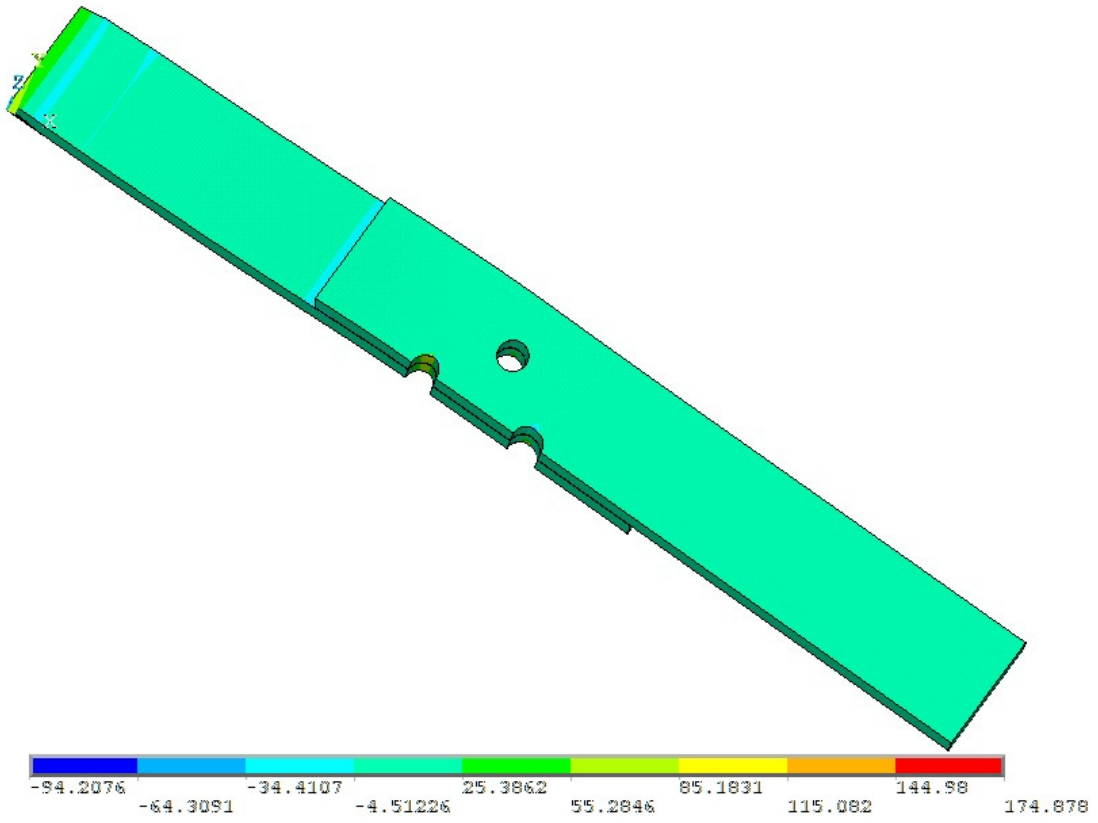
b) 65 °C



c) 75 °C



d) 85 °C



e) 95 °C

Şekil 6.16. Farklı uniform sıcaklık yükleri için hesaplanan kayma gerilmeleri (τ_{xz})

6.4. Çekme Yüğü ve Sıcaklık Yüğünün Birlikte Uygulanmasıyla Elde Edilen Bulgular

Çalışmanın üçüncü ve son aşamasında, yapıştırılmış ve çok delikli (dört delik) karma bağlantıya, hem çekme yüğü hem sıcaklık yüğü aynı anda etki ettirilmiş ve dolayısıyla bu çift yükleme etkisindeki karma bağlantıda meydana gelen gerilmeler ve dağılımları elde edilmiştir.

Çizelge 6.5'te, uniform sıcaklıklara bağlı olarak farklı çekme yüğü uygulanan karma bağlantıda hesaplanan normal gerilmelerin maksimum değerleri listelenmiştir. Kompozit alt ve üst plakalarda oluşan gerilmelerin basma ve çekme olarak değişiklikler olduğu gözlenmiştir. Bu nedenle, çizelgede analizlerden alınan değerler listelenirken, gerilme ve şekil değiştirme bileşenlerinin, çekme ve basma formunda verilmesi uygun görülmüştür.

Çizelge 6.5. Farklı çekme yükü ve sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan normal gerilmeler (σ_x , σ_y , σ_z)

Çekme Yükü (N)	Sıcaklık (C°)	Gerilme Formu	Normal gerilmeler (MPa)		
			σ_x	σ_y	σ_z
80	55	Basma	-575,53	-127,85	-111,2
		Çekme	2145,92	436,91	147,37
	65	Basma	-721,12	-141,08	-116,132
		Çekme	2245,5	458,83	155,15
	75	Basma	-866,72	-169,73	-121,06
		Çekme	2345,09	480,75	162,94
	85	Basma	-1012,31	-198,39	-125,99
		Çekme	2444,67	502,67	170,72
	95	Basma	-1157,9	-227,05	-139,99
		Çekme	2544,25	524,59	178,5
120	55	Basma	-520,73	-172,98	-153,24
		Çekme	2945,03	595,08	199,66
	65	Basma	-608,5	-179,81	-158,17
		Çekme	3044,61	616,996	207,44
	75	Basma	-754,095	-186,65	-163,1
		Çekme	3144,19	638,92	215,22
	85	Basma	-899,69	-193,48	-168,03
		Çekme	3243,78	660,84	223
	95	Basma	-1045,28	-204,45	-172,97
		Çekme	3343,73	682,76	230,79
160	55	Basma	-642,5	-218,12	-195,28
		Çekme	3744,13	753,25	251,94
	65	Basma	-670,76	-224,95	-200,21
		Çekme	3843,72	775,17	259,73
	75	Basma	-699,01	-231,78	-205,14
		Çekme	3943,3	797,09	267,51
	85	Basma	-787,07	-238,61	-210,07
		Çekme	4042,88	819,01	275,29
	95	Basma	-932,66	-245,44	-215
		Çekme	4124,47	840,93	283,07

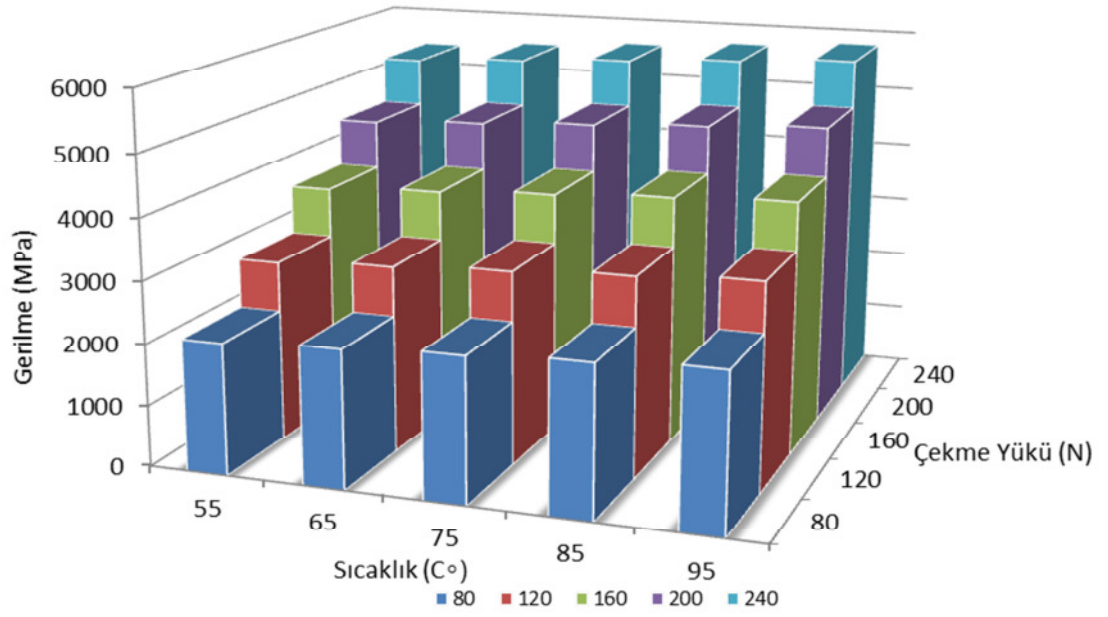
Çizelge 6.5. Farklı çekme yükü ve sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan normal gerilmeler (σ_x , σ_y , σ_z) (devam)

Çekme Yükü (N)	Sıcaklık (C°)	Gerilme Formu	Normal gerilmeler (MPa)		
			σ_x	σ_y	σ_z
200	55	Basma	-764,28	-263,26	-237,32
		Çekme	4543,24	911,42	304,23
	65	Basma	-792,53	-270,09	-242,25
		Çekme	4642,82	933,34	312,01
	75	Basma	-820,79	-276,92	-247,18
		Çekme	4742,4	955,26	319,79
	85	Basma	-849,04	-283,75	-252,11
		Çekme	4841,99	977,18	327,58
	95	Basma	-877,3	-290,58	-252,04
		Çekme	4941,57	999,1	335,36
240	55	Basma	-886,82	-308,4	-279,36
		Çekme	5342,34	1069,59	356,51
	65	Basma	-914,34	-315,23	-284,29
		Çekme	5441,93	1091,51	364,3
	75	Basma	-942,57	-322,06	-289,22
		Çekme	5541,51	1113,43	372,08
	85	Basma	-970,82	-328,89	-294,15
		Çekme	5641,09	1135,35	379,86
	95	Basma	-999,08	-335,72	-299,8
		Çekme	5740,68	1157,27	387,64

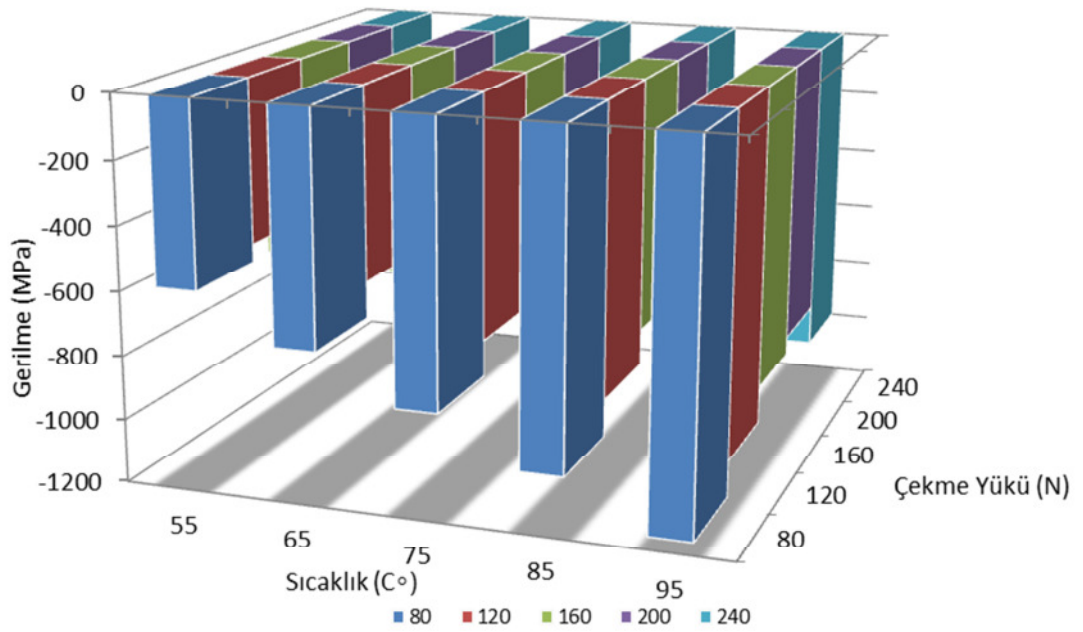
Bu çizelgeden görüldüğü gibi çekme formundaki ısı gerilmelerinin değerleri, uniform sıcaklık artışına bağlı olarak artmaktadır. Dolayısıyla, modellenen bağlantı için en düşük çekme gerilmeleri uygulanan 55 °C uniform sıcaklık yükü için elde edilirken, en yüksek değerlikli çekme gerilmeleri ise 95 °C uniform sıcaklık etkisinde iken hesaplanmıştır.

Çizelgeden de görüleceği üzere, en yüksek çekme gerilmesi 240 N çekme yükü altında 95 °C sıcaklıkta x-yönünde 5740,68 MPa olarak bulunmuştur ve en düşük çekme gerilmesi 80 N çekme yükünde 55 °C sıcaklık altında z-yönünde 147,37 MPa olarak

hesaplanmıştır. Ayrıca, basma formundaki ısıl gerilmelerin mutlak değerleri dikkate alındığında, her bir çekme yükü için sıcaklık artışına bağlı olarak basma gerilmelerinin yükseldiği görölmektedir. Ancak, çekme yükü artışına bağlı olarak x- yönünde 240 N çekme yüküne kadar bir azalış meydana geldiği ve 240 N çekme yükü altında basma gerilme değerlerinin tekrar bir yükseliş gösterdiği tespit edilmiştir. Diğer yönlerde çekme yükü artışına bağlı olarak basma gerilmesi mutlak değerleri yükselmiştir. En yüksek basma gerilmesi 80 N çekme yükü altında 95 °C sıcaklıkta x-yönünde -1157,9MPa ve en düşük basma gerilmesi 80 N çekme yükü altında 55 °C sıcaklıkta z-yönünde -237,32 MPa olarak hesaplanmıştır.

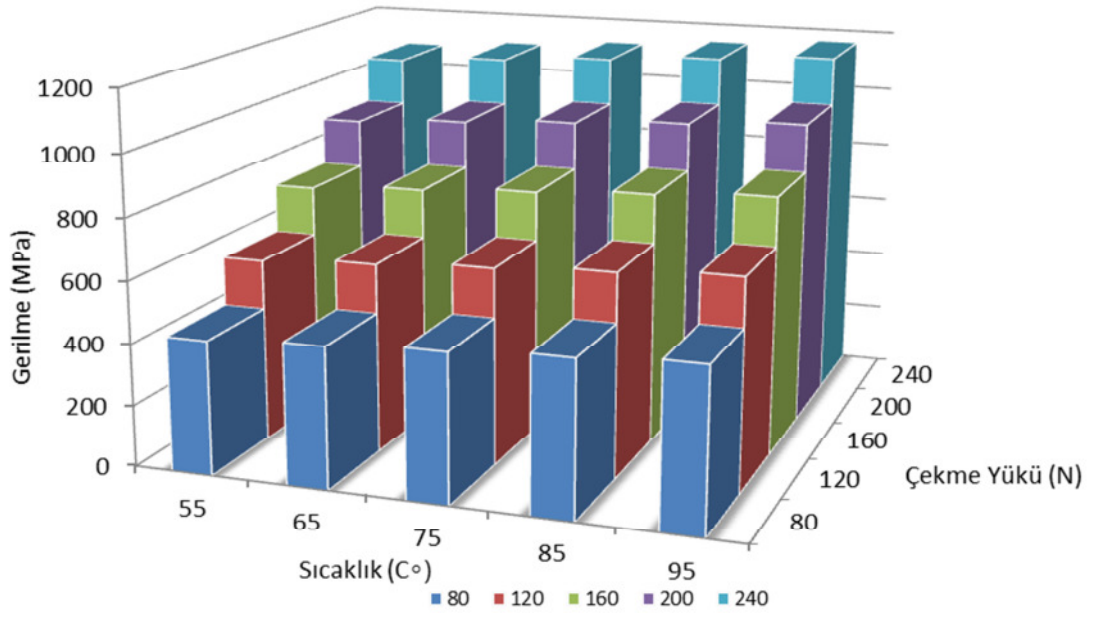


a) x-yönündeki çekme gerilmeleri (σ_x)

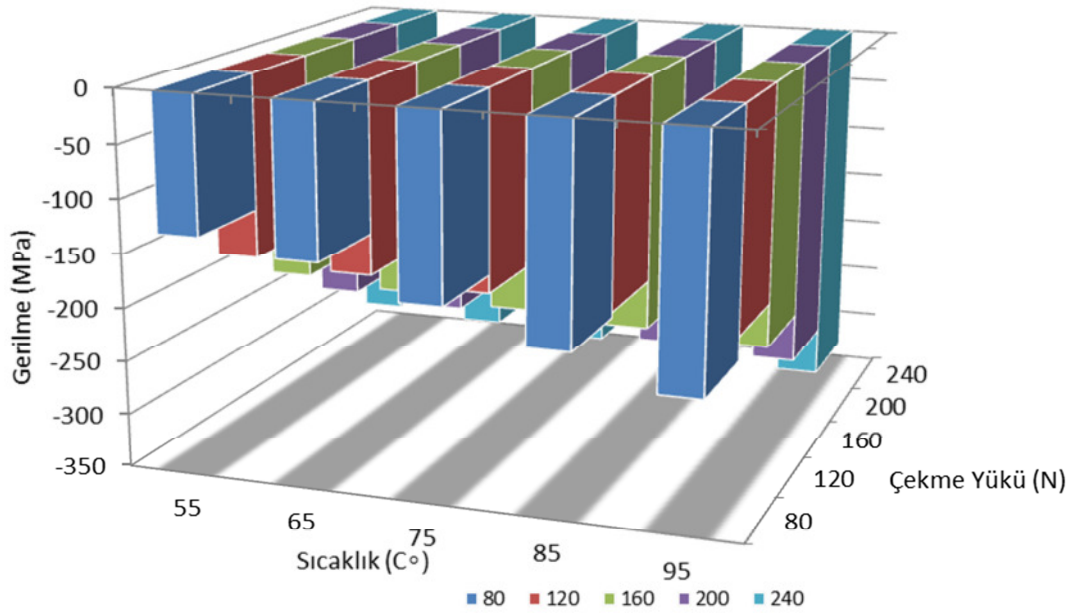


b) x-yönündeki basma gerilmeleri (σ_x)

Şekil 6.17. Farklı çekme yükleri ve sıcaklıklar altında x-yönündeki normal gerilme değerleri

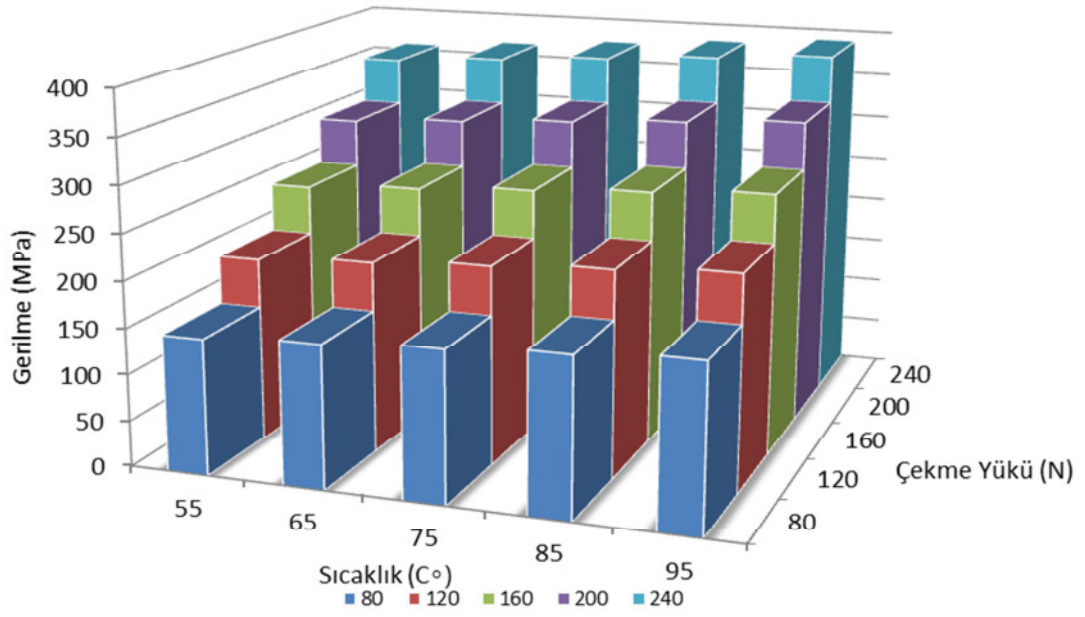


a) y-yönündeki çekme gerilmeleri (σ_y)

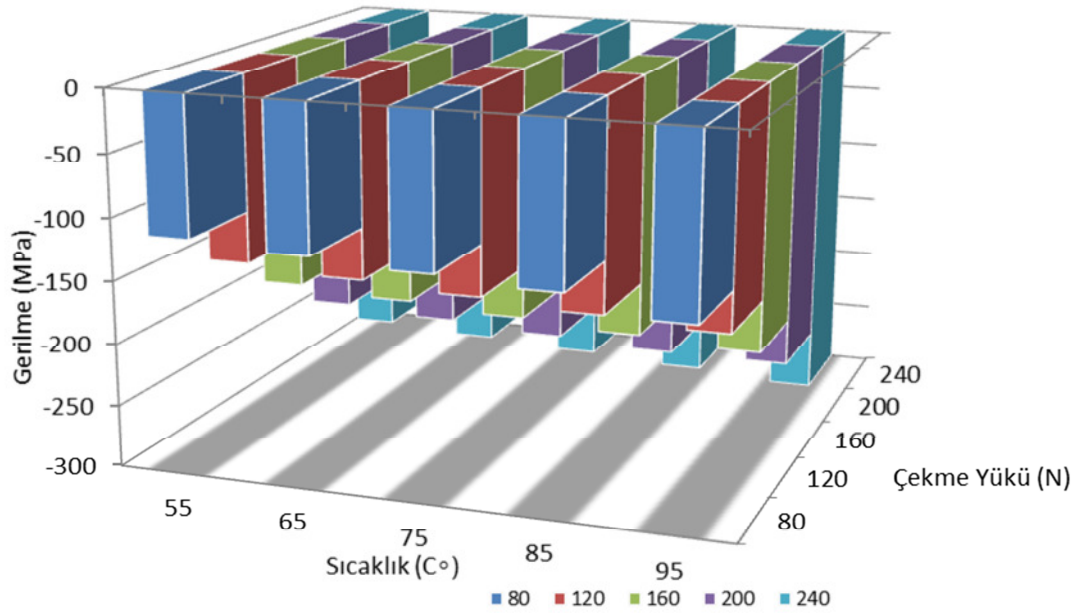


b) y-yönündeki basma gerilmeleri (σ_y)

Şekil 6.18. Farklı çekme yükleri ve sıcaklıklar altında y-yönünde normal gerilme değerleri



a) z-yönündeki çekme gerilmeleri (σ_z)



b) z-yönündeki basma gerilmeleri (σ_z)

Şekil 6.19. Farklı çekme yükleri ve sıcaklıklar altında z-yönünde normal gerilme değerleri

Uygulanan uniform sıcaklıklara ve çekme yüklerine bağlı olarak hesaplanan maksimum normal gerilmeler; x-yönündeki (σ_x), y-yönündeki (σ_y) ve z yönünde (σ_z) olmak üzere Şekil 6.17, Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da sırası ile gösterilmiştir. Çizelge 6.5'te listelenen normal gerilme değerlerinin, bu şekilde grafiksel gösterimi neticesinde, uniform sıcaklık

ve çekme yükündeki artışa bağlı olarak, meydana gelen çekme gerilmelerindeki artış açıkça görülebilmektedir. Bu şekillerden görüldüğü üzere en büyük gerilmeler x-yönünde meydana gelmiştir. Bunun nedeni çekme yükünün x-yönünde uygulanması ve dolayısıyla bağlantının özellikle bu yönde daha fazla zorlanmış olmasıdır. Ayrıca, z-yönünde hesaplanan gerilmelerin değerlerinin, x ve y yönlerinde hesaplanan gerilme değerlerinden küçük olduğu görülmektedir.

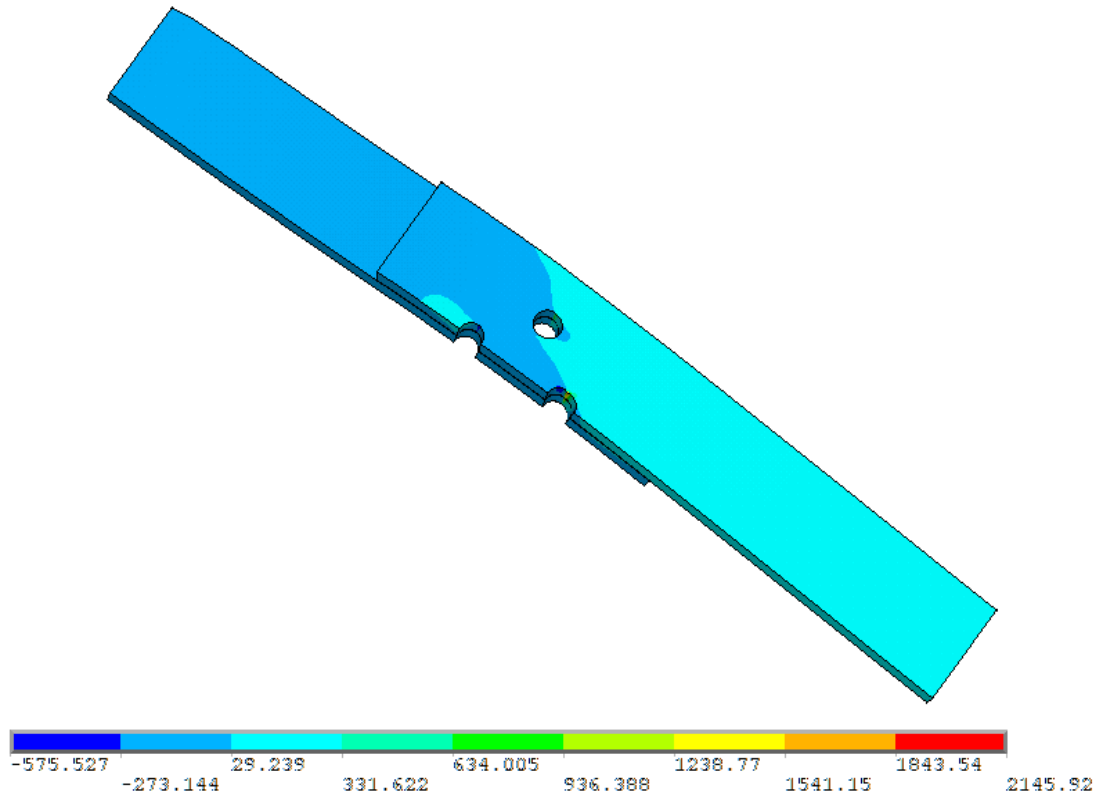
Her bir analiz için renkli kontur ile farklı yük ve sıcaklıklar uygulandığında elde edilen normal gerilme dağılımları sırasıyla x, y ve z yönleri için şekil 6.20, 6.21, 6.22, 6.23, 6.24 ve 6.25’ te gösterilmiştir.

Şekil 6.20’de 80 N çekme yükü altında 55°C ve 95°C sıcaklıklarda x- yönünde hesaplanan normal gerilmeler ve Şekil 6.21’de 240 N çekme yükü altında 55°C ve 95°C sıcaklıklarda x- yönünde hesaplanan normal gerilmeler gösterilmiştir. Şekil 6.20 ve Şekil 6.21’ de görüldüğü üzere deliklerin içlerinde x-yönündeki çekme ve basma gerilmelerinin en yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Ayrıca sıcaklık yükselişine bağlı olarak çekme ve basma gerilmelerinin yüzeyde ve delik içlerinde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Çekme yükünün artışına bağlı olarak ise çekme ve basma gerilmelerinin model yüzeyinde daha yüksek olduğu ancak 95 °C sıcaklıktaki mutlak değerinin bölgesel olarak 240 N çekme yükü altında 80 N’a göre daha düşük olduğu görülmüştür.

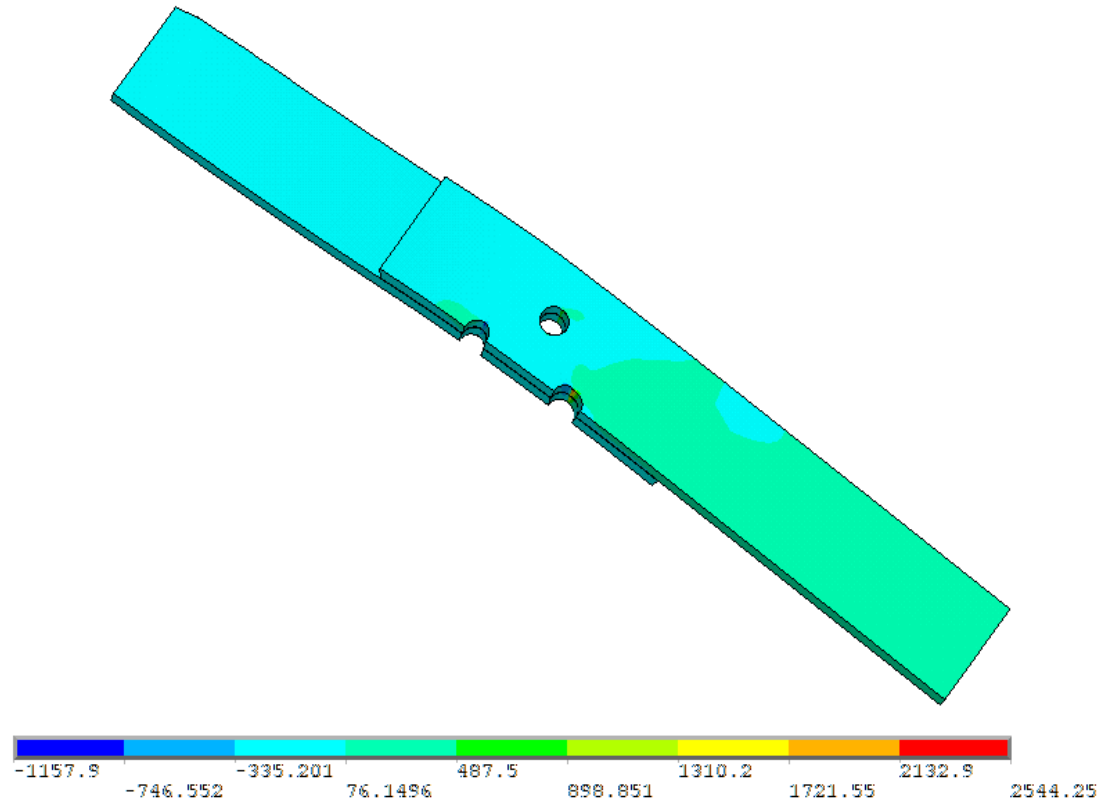
Şekil 6.22’de 80 N çekme yükü altında 55°C ve 95°C sıcaklıklarda y- yönünde hesaplanan normal gerilmeler ve Şekil 6.23’te 240 N çekme yükü altında 55°C ve 95°C sıcaklıklarda y- yönünde hesaplanan normal gerilmeler gösterilmiştir. Şekil 6.22 ve Şekil 6.23 karşılaştırıldığında; y-yönündeki çekme ve basma gerilmelerinin sıcaklık ve çekme yükü artışına bağlı olarak arttığı görülmektedir. Özellikle 80 N çekme yükü altında alt plaka uç kısmında (serbest uç) basma gerilmelerinin diğer yüzeylere göre daha yüksek olduğu ayrıca sıcaklık artışına bağlı olarak çekme ve basma gerilmelerinin her ikisinde yükseldiği tespit edilmiştir. Çekme yükü artışına bağlı olarak ise her iki gerilme form değerlerinin yükseldiği ve yüzeyde genel olarak basma gerilmesi deliklerde ise hem basma hemde çekme gerilmelerinin olduğu görülmektedir.

Şekil 6.24’te 80 N çekme yükü altında 55°C ve 95°C sıcaklıklarda z- yönünde hesaplanan normal gerilmeler ve Şekil 6.25’de 240 N çekme yükü altında 55°C ve

95°C sıcaklıklarda z- yönünde hesaplanan normal gerilmeler gösterilmiştir. Şekil 6.24 ve Şekil 6.25 te ise z-yönündeki çekme ve basma gerilmelerinin sıcaklık ve çekme yükü artışına bağlı olarak yükseldiği görülmektedir. Her iki şekilde görüldüğü üzere genelde çekme gerilmeleri delik çevrelerinde oluşmaktadır.

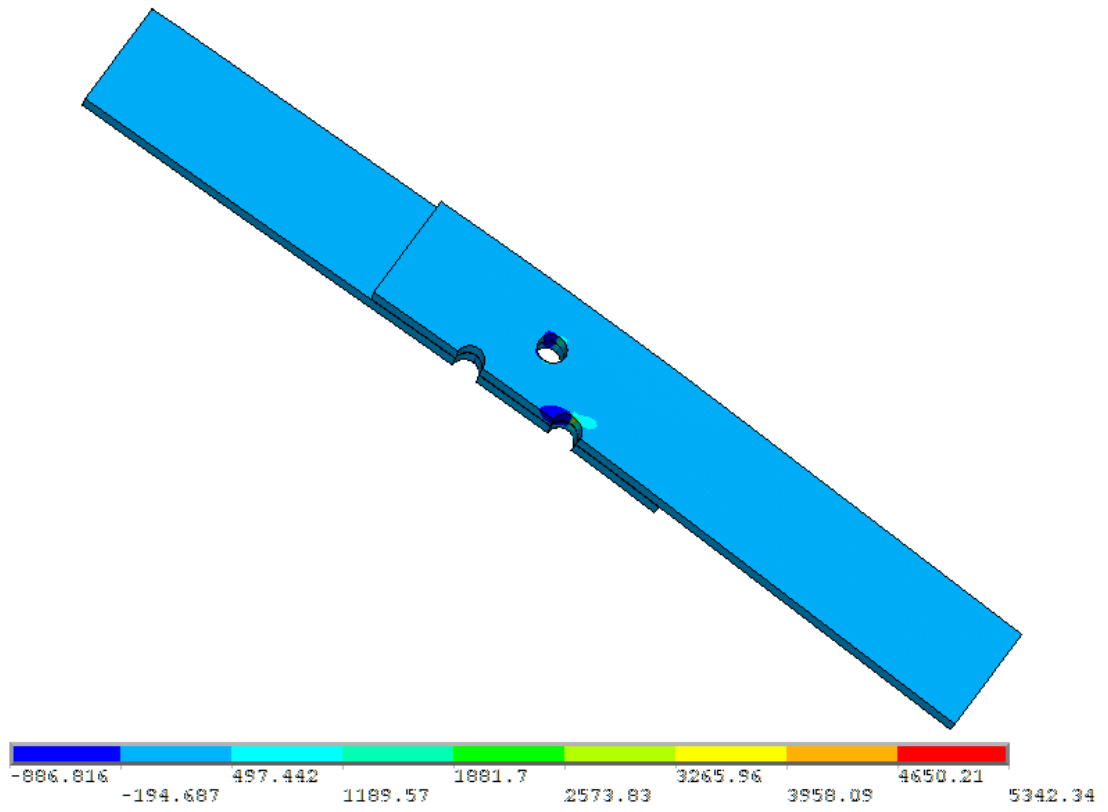


a) 55 °C

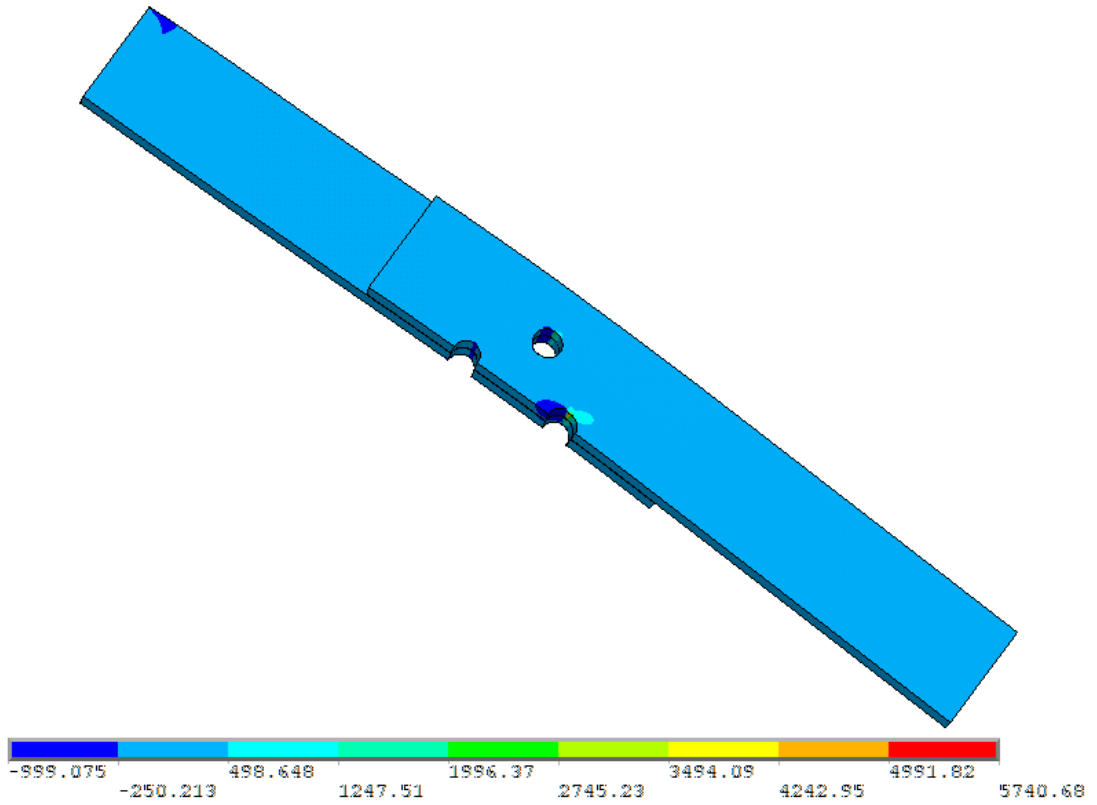


b) 95 °C

Şekil 6.20. 80 N çekme yükü altında 55 °C ve 95 °C sıcaklıklarda x-yönünde hesaplanan normal gerilmeler

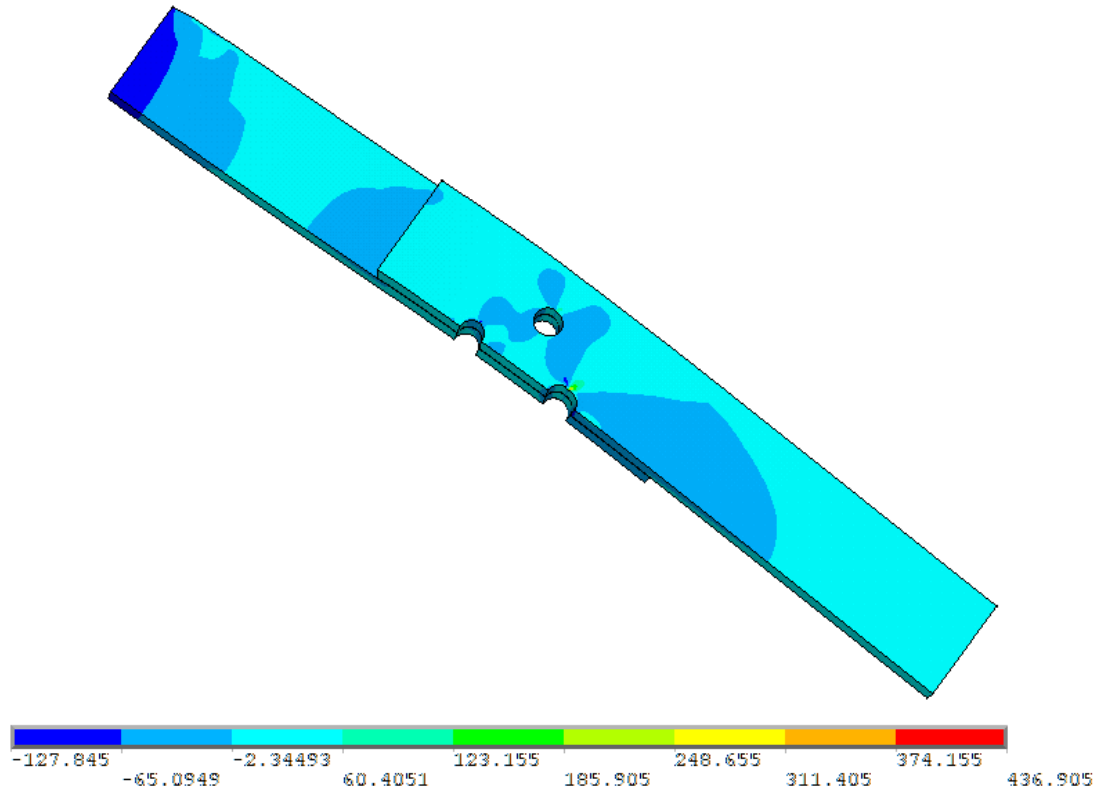


a) 55 °C

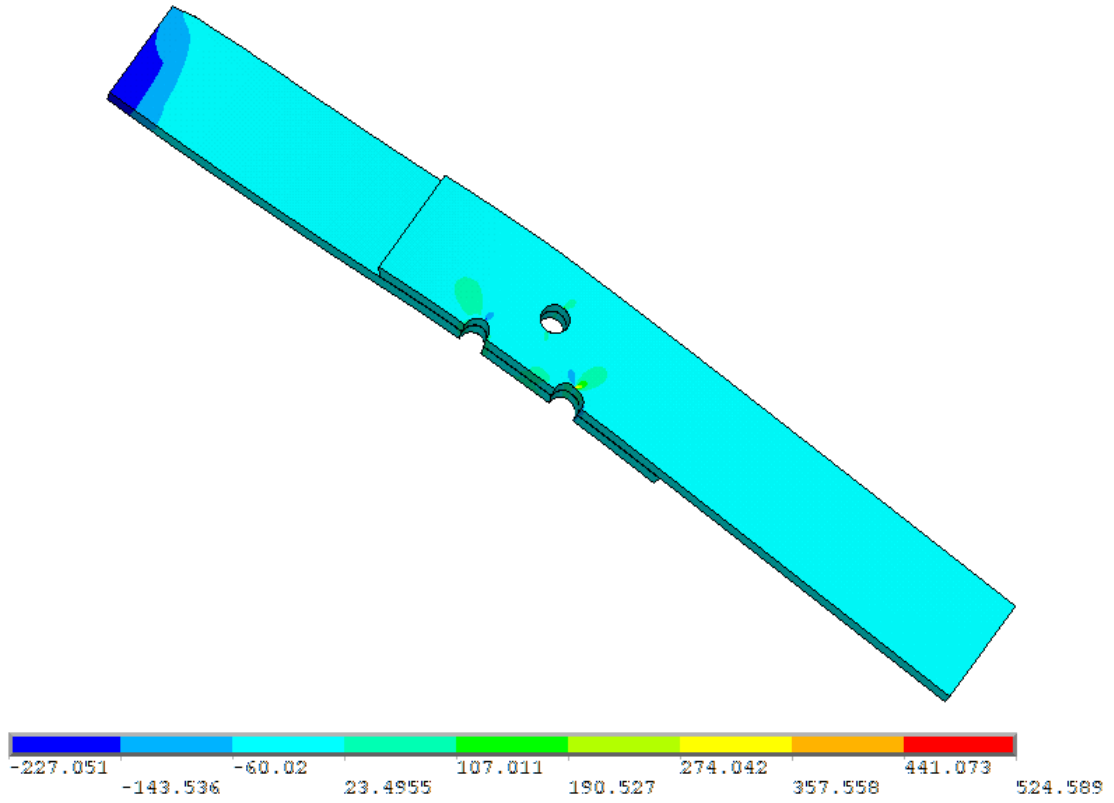


b) 95 °C

Şekil 6.21. 240 N çekme yükü altında 55 °C ve 95 °C sıcaklıklarda x-yönünde hesaplanan normal gerilmeler

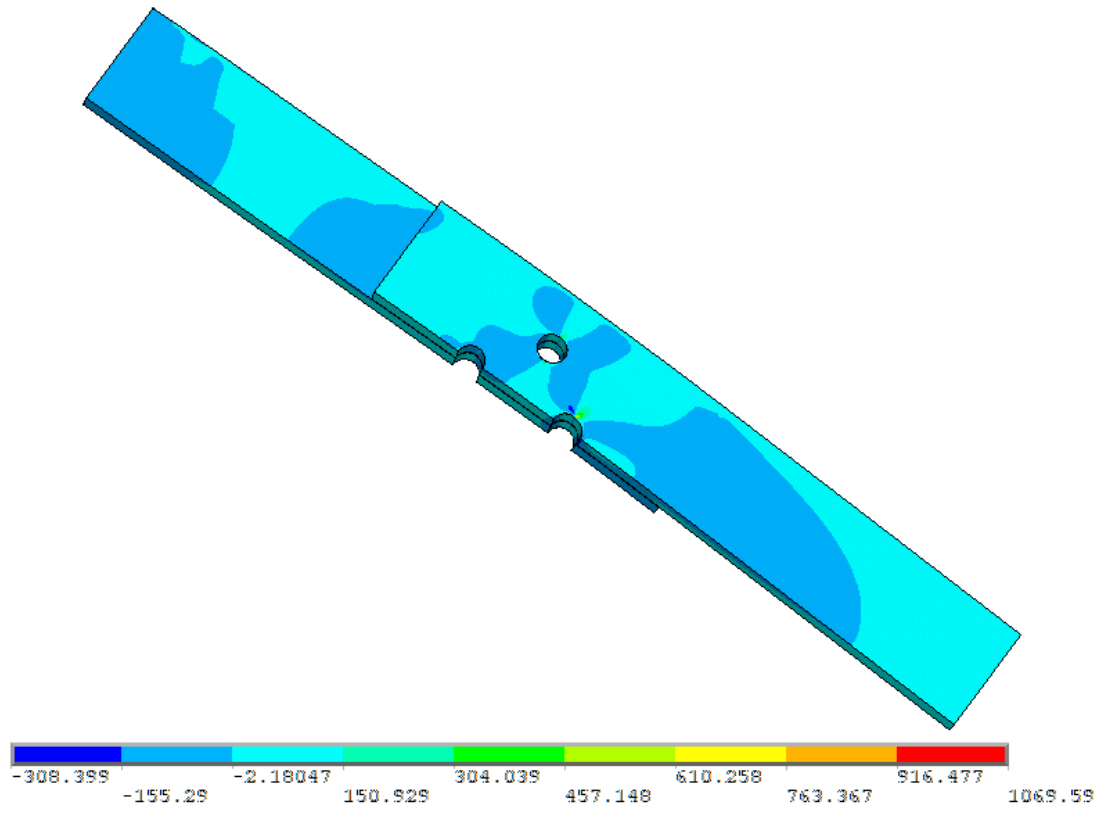


a) 55 °C

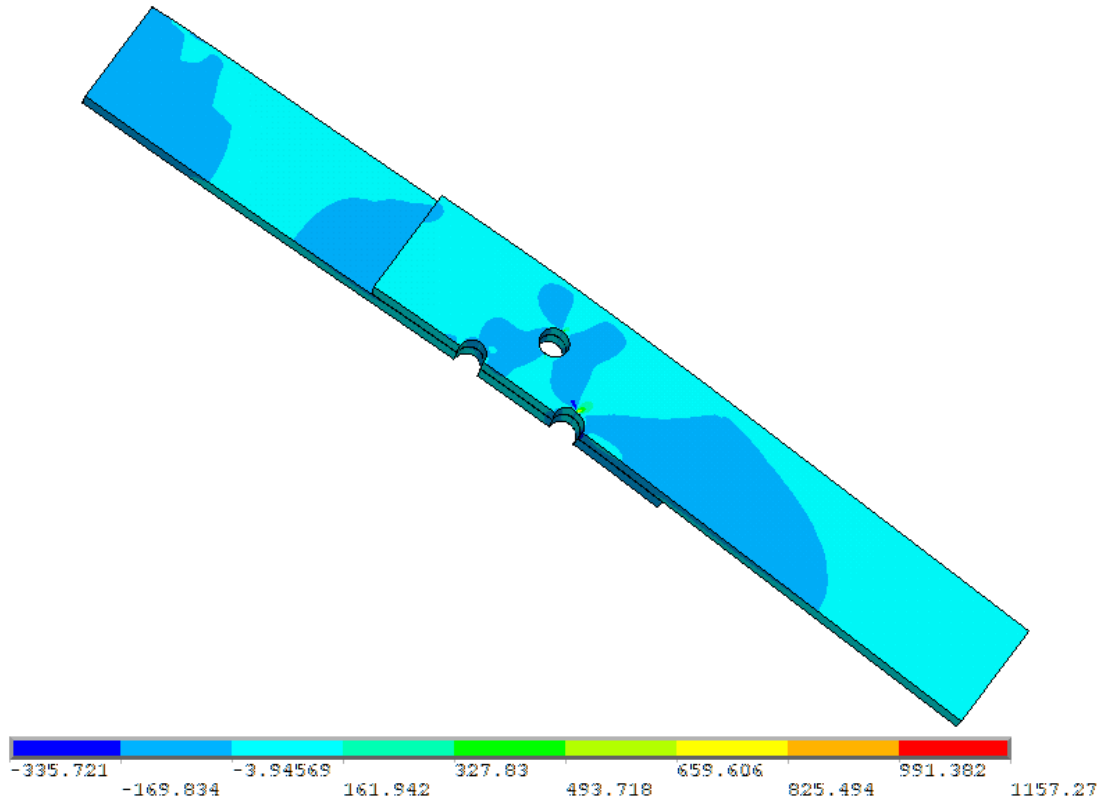


b) 95 °C

Şekil 6.22. 80 N çekme yükü altında 55 °C ve 95 °C sıcaklıklarda y- yönünde hesaplanan normal gerilmeler

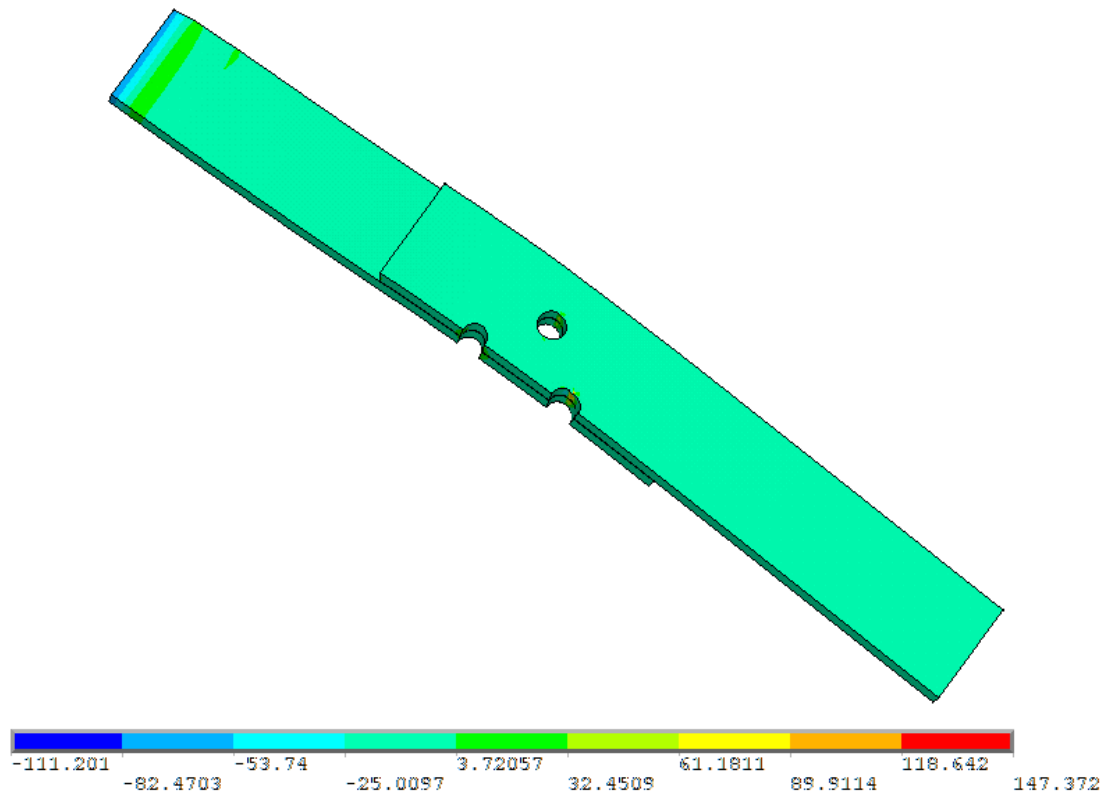


a) 55 °C

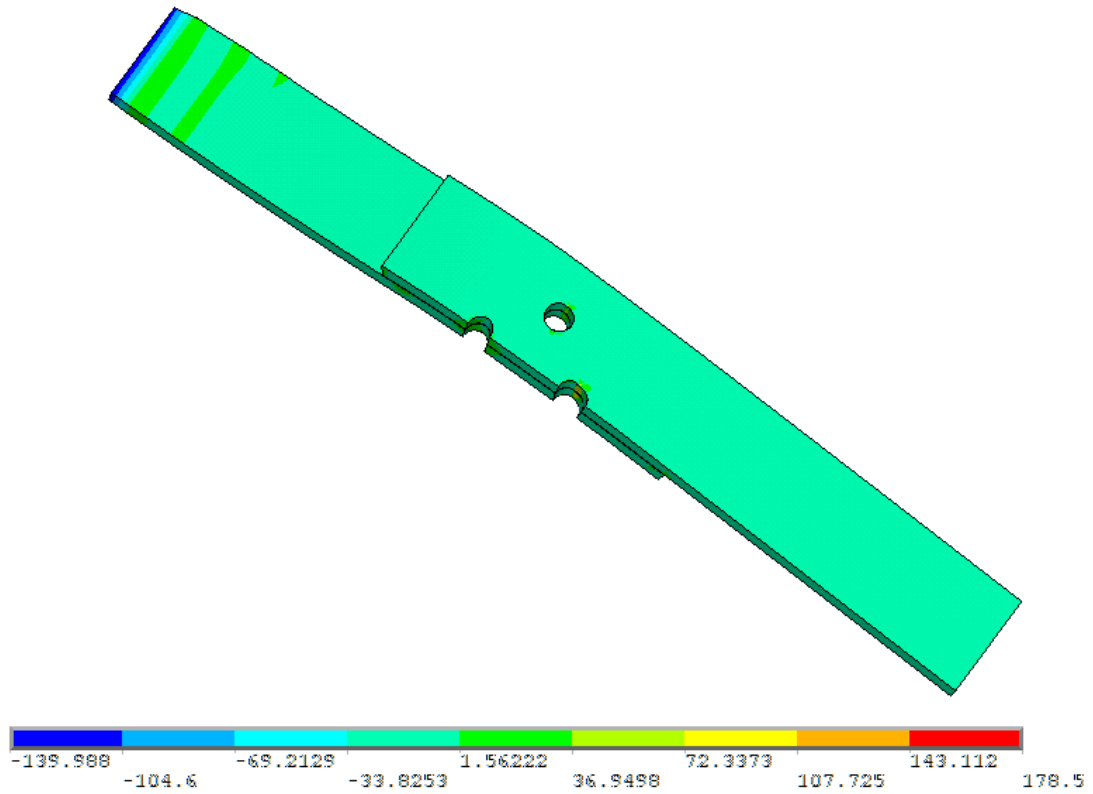


b) 95 °C

Şekil 6.23. 240 N çekme yükü altında 55 °C ve 95 °C sıcaklıklarda y-yönünde hesaplanan normal gerilmeler

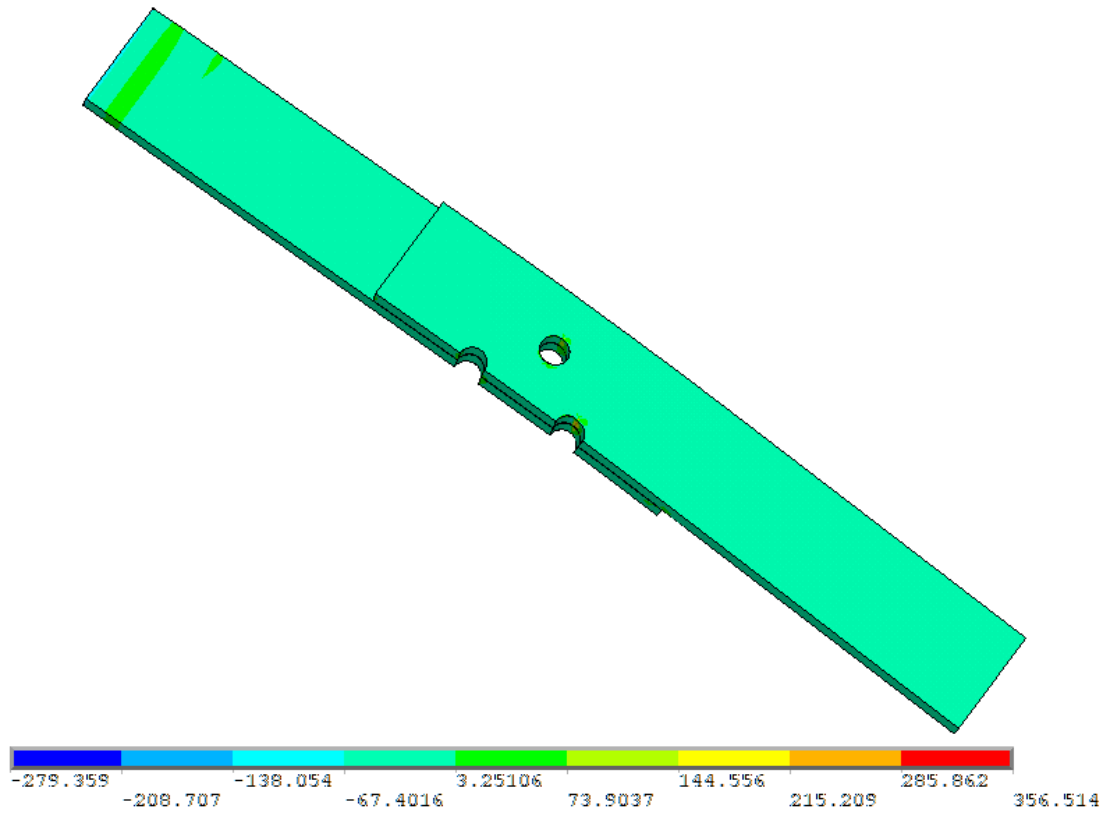


a) 55 °C

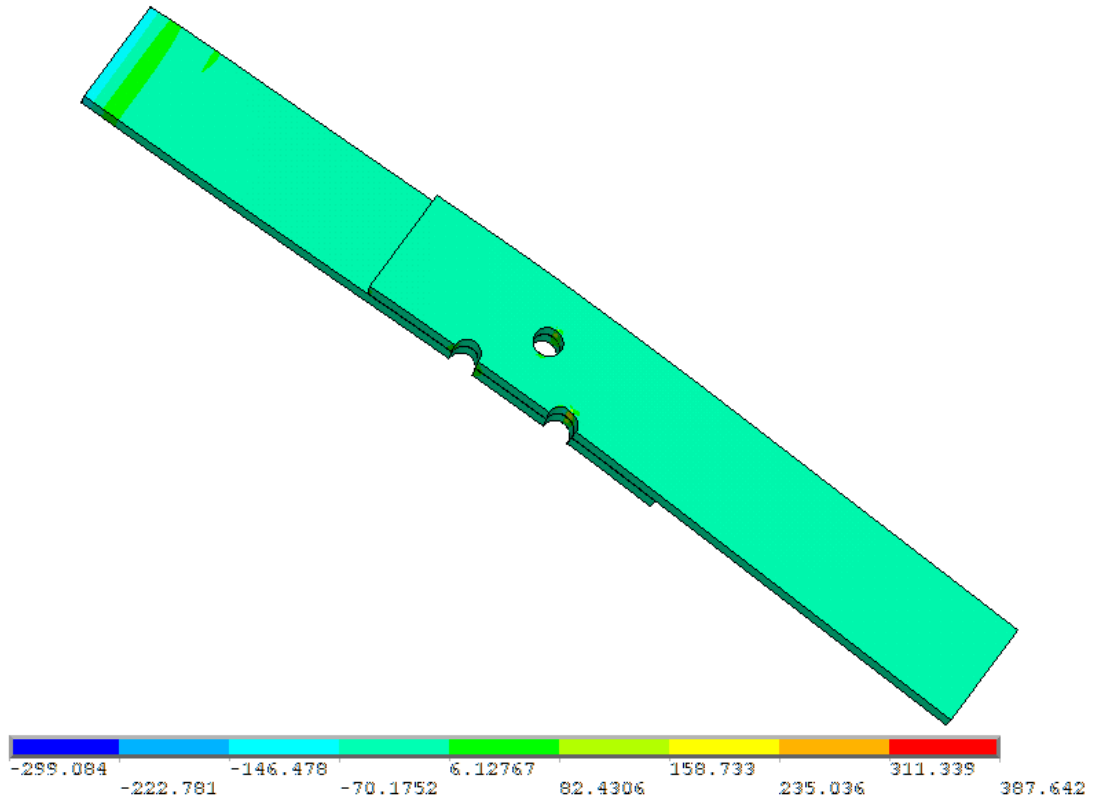


b) 95 °C

Şekil 6.24. 80 N çekme yükü altında 55 °C ve 95 °C sıcaklıklarda z-yönünde hesaplanan normal gerilmeler



a) 55 °C



b) 95 °C

Şekil 6.25. 240 N çekme yükü altında 55 °C ve 95 °C sıcaklıklarda z-yönünde hesaplanan normal gerilmeler

Normal gerilmelerde olduğu gibi, uygulanan farklı çekme yükleri ve uniform sıcaklık miktarlarına bağlı olarak kayma gerilmeleri τ_{xy} , τ_{yz} , ve τ_{xz} 'in üç boyutlu model üzerindeki değerleri Çizelge 6.6'da gösterilmiştir.

Bu çizelgeden görüldüğü gibi çekme formunda ısı kayma gerilmelerinin değerleri, uniform sıcaklık artışına bağlı olarak artmaktadır. Dolayısıyla, modellenen kompozit için en düşük çekme formunda kayma gerilmeleri uygulanan 55 °C uniform sıcaklık yükü için elde edilirken, en yüksek değerlikli çekme şeklinde kayma gerilmeleri ise 95 °C uniform sıcaklık etkisinde iken hesaplanmıştır. Ancak çekme yükü artışına bağlı olarak xz- yönünde çekme formunda kayma gerilmeleri azalmaktadır. Bu azalış 55 °C sıcaklık altında 200 N çekme yüküne kadar devam etmiş olup, 95 °C sıcaklık altında yük artışına bağlı olarak sürekli azalmıştır.

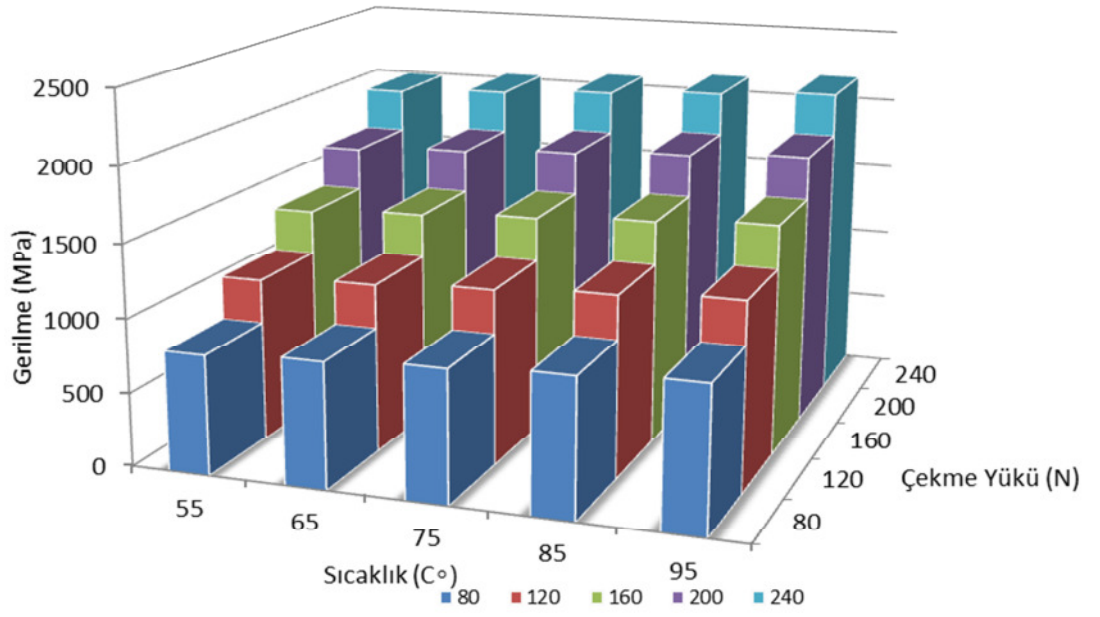
Çizelgeden de görüleceği üzere en yüksek çekme formunda kayma gerilmesi 240 N çekme yükü altında 95 °C sıcaklıkta xy- yönünde 2151,7 MPa olarak bulunmuştur ve en düşük çekme formunda kayma gerilmesi ise 80 N çekme yükünde 55 °C sıcaklık altında yz-yönünde 35,65 MPa olarak hesaplanmıştır. Ayrıca basma formundaki ısı gerilmelerin mutlak değerleri incelendiğinde yz ve xz yönleri için her bir çekme yükü için sıcaklık artışına bağlı olarak basma gerilmelerinin yükseldiği ancak xy yönünde 80 N çekme yükü altında sıcaklık artışına bağlı basma formunda kayma gerilmesi yükselmesine rağmen 120 N dan sonra sıcaklık artışıyla basma formundaki kayma gerilmelerinin mutlak değerleri düşmektedir. Basma şeklindeki kayma gerilmelerinin en yüksek mutlak değeri 240 N çekme yükü altında 95 °C sıcaklıkta xz-yönünde -659,44 MPa ve en düşük kayma gerilmesi ise 80 N çekme yükü altında 55 °C sıcaklıkta yz-yönünde -35,21 MPa olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 6.6. Farklı çekme yükü ve sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan kayma gerilmeleri

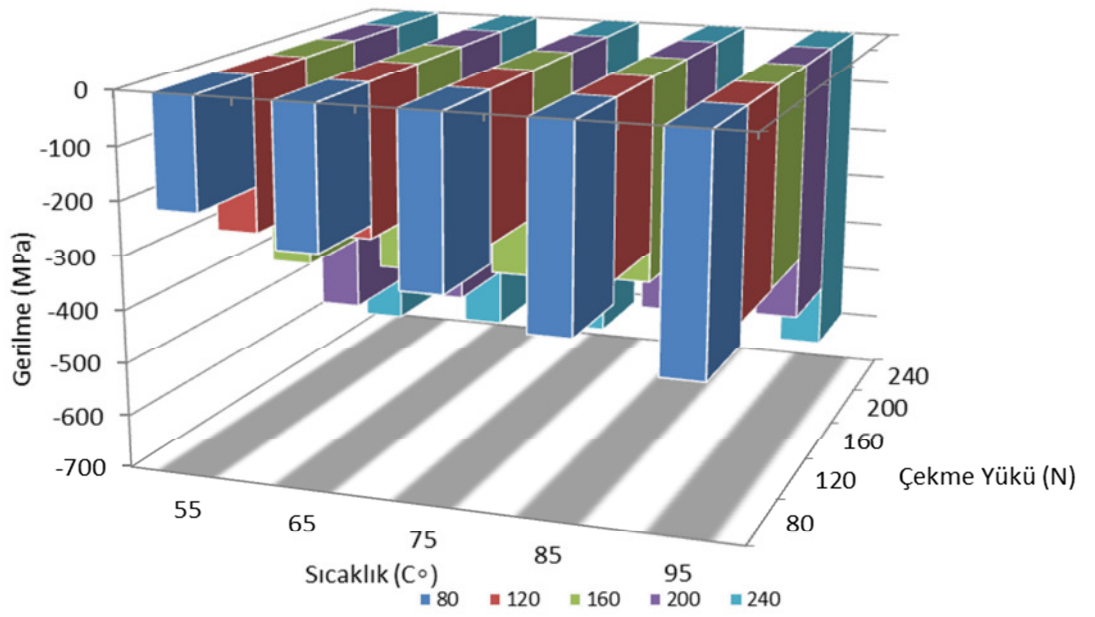
Çekme Yükü (N)	Sıcaklık (°C)	Gerilme Formu	Kayma gerilmeleri (MPa)		
			τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
80	55	Basma	-208,78	-35,21	-242,95
		Çekme	813,45	35,65	71,85
	65	Basma	-262,03	-36,6	-252,87
		Çekme	854,69	37,67	90,26
	75	Basma	-315,28	-37,98	-262,78
		Çekme	895,93	39,7	108,67
	85	Basma	-368,53	-39,36	-272,7
		Çekme	937,17	41,73	127,08
	95	Basma	-421,78	-40,75	-282,62
		Çekme	978,4	43,74	145,49
120	55	Basma	-295,44	-49,01	-337,16
		Çekme	1106,78	47,93	57,16
	65	Basma	-287,4	-50,4	-347,07
		Çekme	1148,01	49,95	75,56
	75	Basma	-279,36	-51,78	-356,99
		Çekme	1189,25	51,97	93,97
	85	Basma	-326,48	-53,16	-366,91
		Çekme	1230,49	53,99	112,38
	95	Basma	-379,73	-54,55	-376,82
		Çekme	1271,73	56,01	130,79
160	55	Basma	-408,65	-62,81	-431,36
		Çekme	1400,1	60,2	49,33
	65	Basma	-400,61	-64,2	-441,28
		Çekme	1441,34	62,22	60,87
	75	Basma	-392,57	-65,58	-451,19
		Çekme	1482,57	64,24	79,28
	85	Basma	-384,54	-66,96	-461,11
		Çekme	1523,81	66,26	97,68
	95	Basma	-376,5	-68,35	-471,03
		Çekme	1565,05	68,28	116,09

Çizelge 6.6. Farklı çekme yükü ve sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan kayma gerilmeleri (devam)

Çekme Yükü (N)	Sıcaklık (°C)	Gerilme Formu	Kayma gerilmeleri (MPa)		
			τ_{xy}	τ_{yz}	τ_{xz}
200	55	Basma	-551,87	-76,61	-525,57
		Çekme	1693,42	72,47	59,33
	65	Basma	-513,83	-77,9952	-535,48
		Çekme	1734,66	74,49	61,03
	75	Basma	-505,79	-79,38	-545,4
		Çekme	1775,9	76,51	64,58
	85	Basma	-497,75	-80,76	-555,32
		Çekme	1817,14	78,53	82,99
	95	Basma	-489,71	-82,15	-565,23
		Çekme	1858,37	80,55	101,4
240	55	Basma	-635,08	-90,41	-619,77
		Çekme	1986,75	84,74	69,33
	65	Basma	-627,04	-91,8	-629,69
		Çekme	2027,98	86,76	71,02
	75	Basma	-619,01	-93,18	-639,6
		Çekme	2069,22	88,78	72,72
	85	Basma	-610,97	-94,56	-649,52
		Çekme	2110,46	90,8	74,42
	95	Basma	-602,93	-95,95	-659,44
		Çekme	2151,7	92,82	86,7

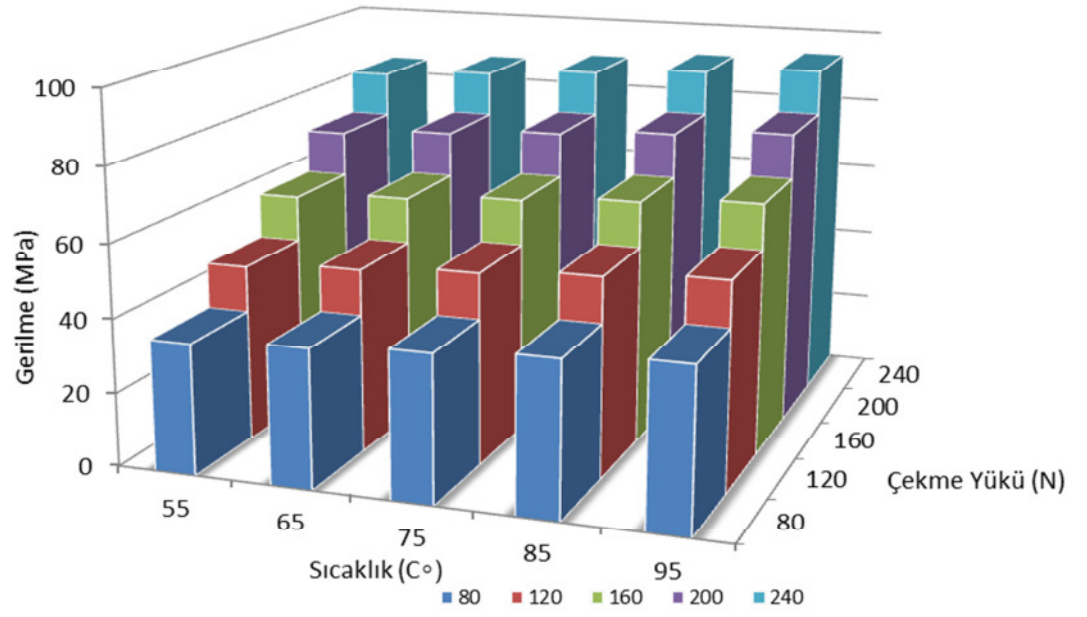


a) xy-yönündeki çekme formundaki kayma gerilmeleri

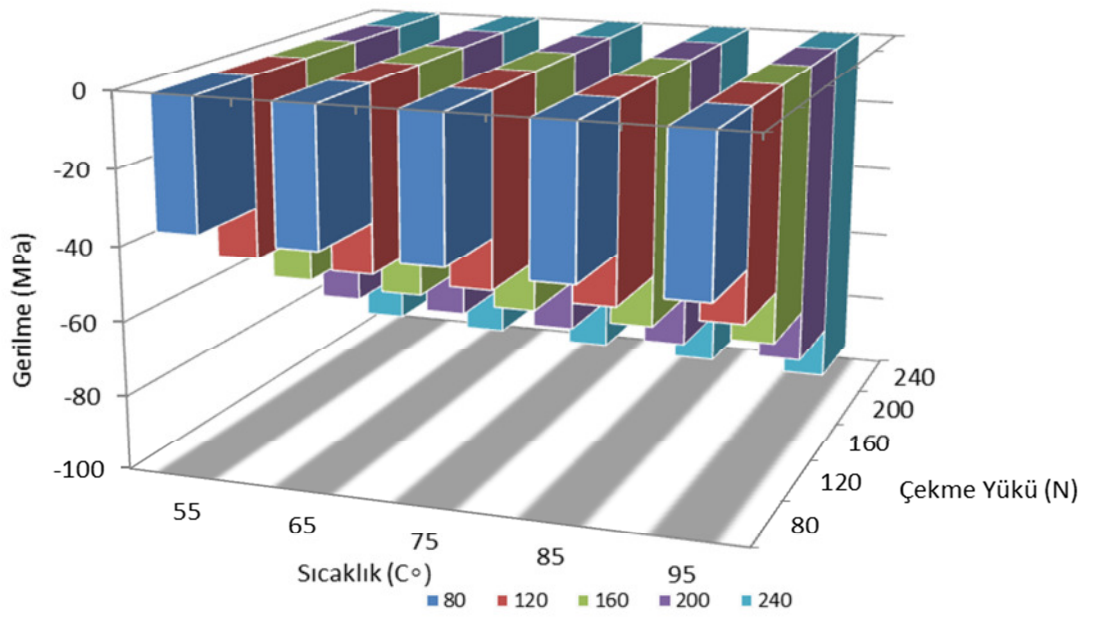


b) xy-yönündeki basma formundaki kayma gerilmeleri

Şekil 6.26. Farklı çekme yükleri ve sıcaklıklar altında xy-yönündeki kayma gerilme değerleri

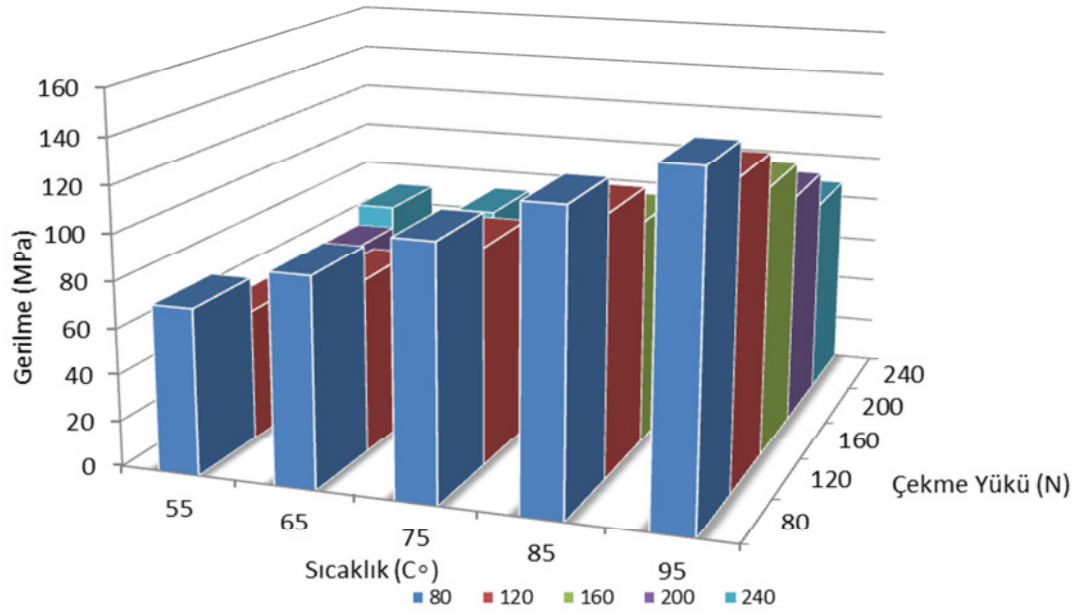


a) yz – yönündeki çekme formunda kayma gerilmeleri

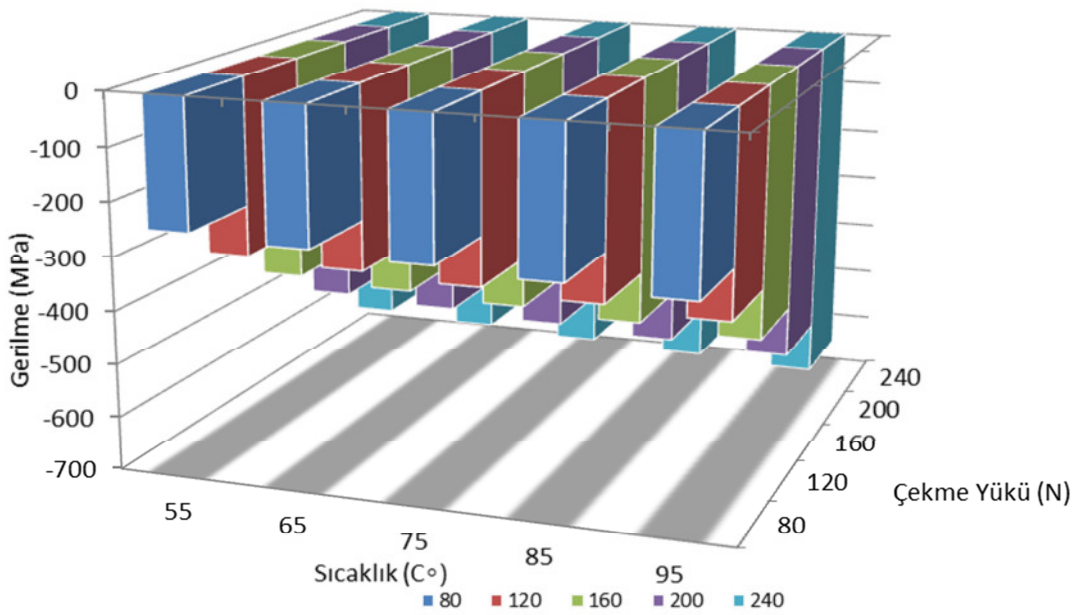


b) yz-yönündeki basma formunda kayma gerilmeleri

Şekil 6.27. Farklı çekme yükleri ve sıcaklıklar altında yz-yönünde kayma gerilme değerleri



a) xz – yönündeki çekme formunda kayma gerilmeleri



b) xz - yönündeki basma formunda kayma gerilmeleri

Şekil 6.28. Farklı çekme yükleri ve sıcaklıklar altında xz-yönünde kayma gerilme değerleri

Uygulanan uniform sıcaklıklara bağlı olarak hesaplanan kayma gerilmeleri; xy-yönündeki (τ_{xy}), yz-yönündeki (τ_{yz}) ve xz yönünde (τ_{xz}) olmak üzere Şekil 6.26, Şekil 6.27 ve Şekil 6.28’de sırası ile gösterilmiştir. Çizelge 6.6’da listelenen kayma gerilme

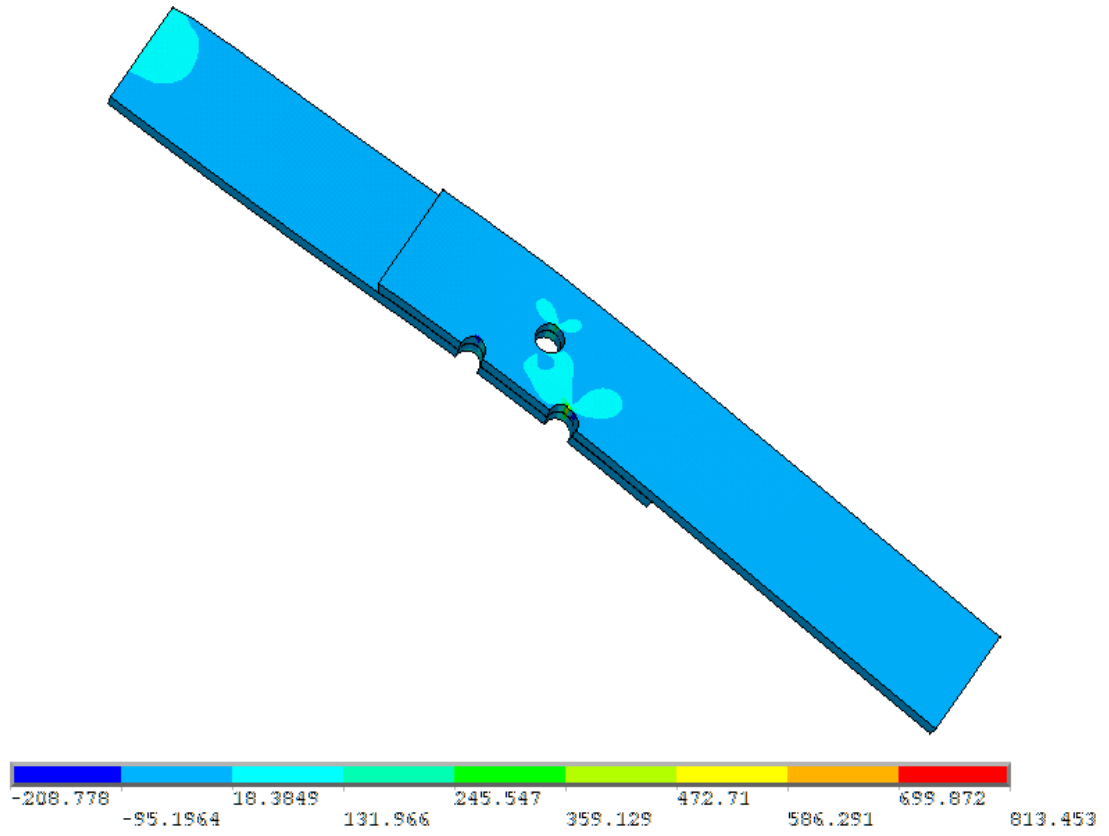
değerlerinin, bu şekilde grafiksel gösterimi neticesinde, uniform sıcaklık ve çekme yükündeki artışa bağlı olarak, meydana gelen çekme gerilmelerindeki değişim açıkça görülebilmektedir. Bu şekillerden görüldüğü üzere en büyük çekme formundaki kayma gerilmeleri xy-yönünde meydana gelmiştir. Bunun nedeni çekme yükünün x-yönünde uygulanması ve dolayısıyla bağlantının özellikle bu yönde daha fazla zorlanmış olmasıdır. Ayrıca, yz-yönünde hesaplanan kayma gerilme değerlerinin, xy ve xz yönlerinde hesaplanan gerilme değerlerinden küçük olduğu görülmektedir. Ayrıca basma formundaki en büyük gerilme değerlerinin xz ve xy yönlerinde olduğuda açıkma gözlenmektedir.

Her bir analiz için renkli kontur ile farklı yük ve sıcaklıklar uygulandığında elde edilen kayma gerilme dağılımları sırasıyla xy, yz ve xz yönleri için şekil 6.29, 6.30, 6.31, 6.32, 6.33 ve 6.34' te gösterilmiştir.

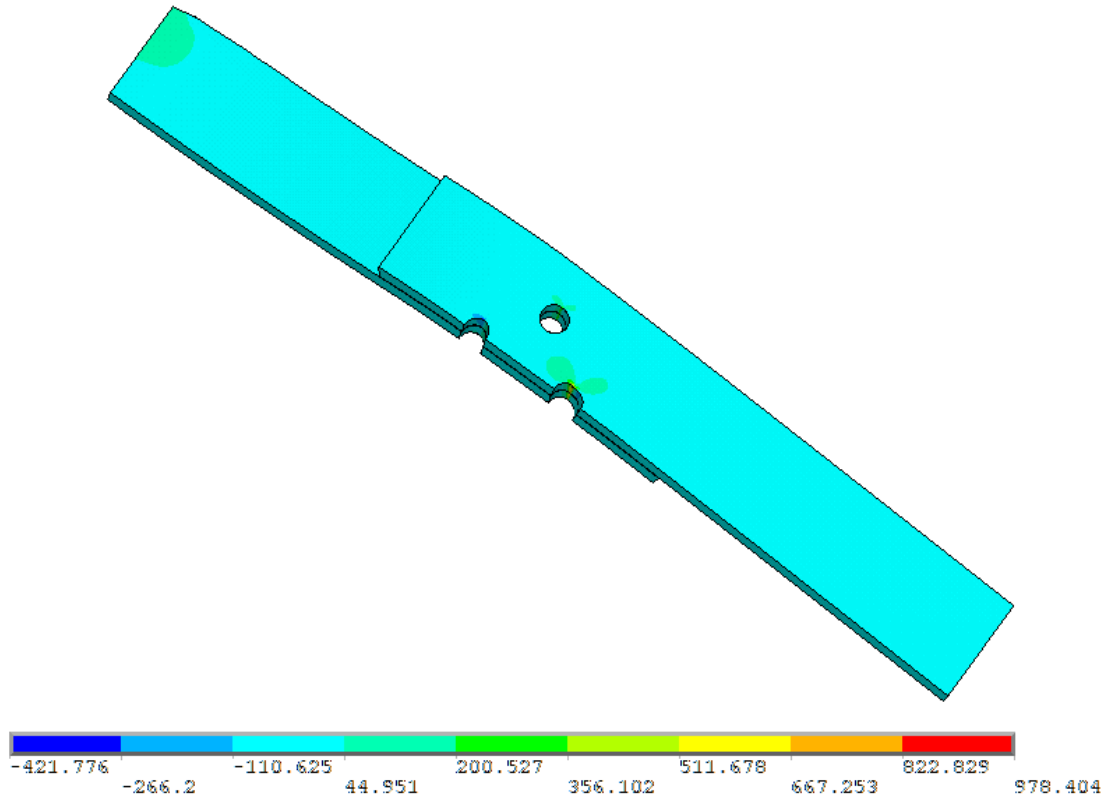
Şekil 6.29 ve Şekil 6.30' de görüldüğü üzere deliklerin içlerinde xy- yönündeki çekme ve basma formundaki kayma gerilmelerinin en yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Ayrıca kompozit model yüzeyinde genel olarak basma yönündeki kayma gerilmesinin daha yoğun olduğu tespit edilmiştir. 240 N çekme yükü altında sıcaklık artışına bağlı olarak yüzeydeki basma formundaki kayma gerilmesi azalmaktadır.

Şekil 6.31 ve Şekil 6.32 karşılaştırıldığında; yz-yönündeki kayma gerilmelerinin sıcaklık ve çekme yükü artışına bağlı olarak azda olsa arttığı görülmektedir. İki şekil kontrol edildiğinde renkler arasında çok farklılık olmadığı min. Seviyede çekme ve basma formlarında kayma gerilmeleri olduğu görülecektir.

Şekil 6.33 ve Şekil 6.34 te ise xz-yönündeki basma formundaki kayma gerilmelerinin sıcaklık ve çekme yükü artışına bağlı olarak yükseldiği görülmektedir. Ancak çekme formundaki kayma gerilmelerinin çekme yükü artışı ile azaldığı tespit edilmiştir. Her iki şekilde 95 C° deki sıcaklık altındaki renklere göre değerlendirirsek 240 N çekme yükü altında kompozit yüzeydeki basma formundaki kayma gerilmesinin daha yüksek olduğu ancak 240 N çekme yükü altında ne kadarda kırmızı olan bölge fazla görülsede 80 N da delik içlerindeki çekme formunda ki kayma gerilme değeri daha yüksektir.

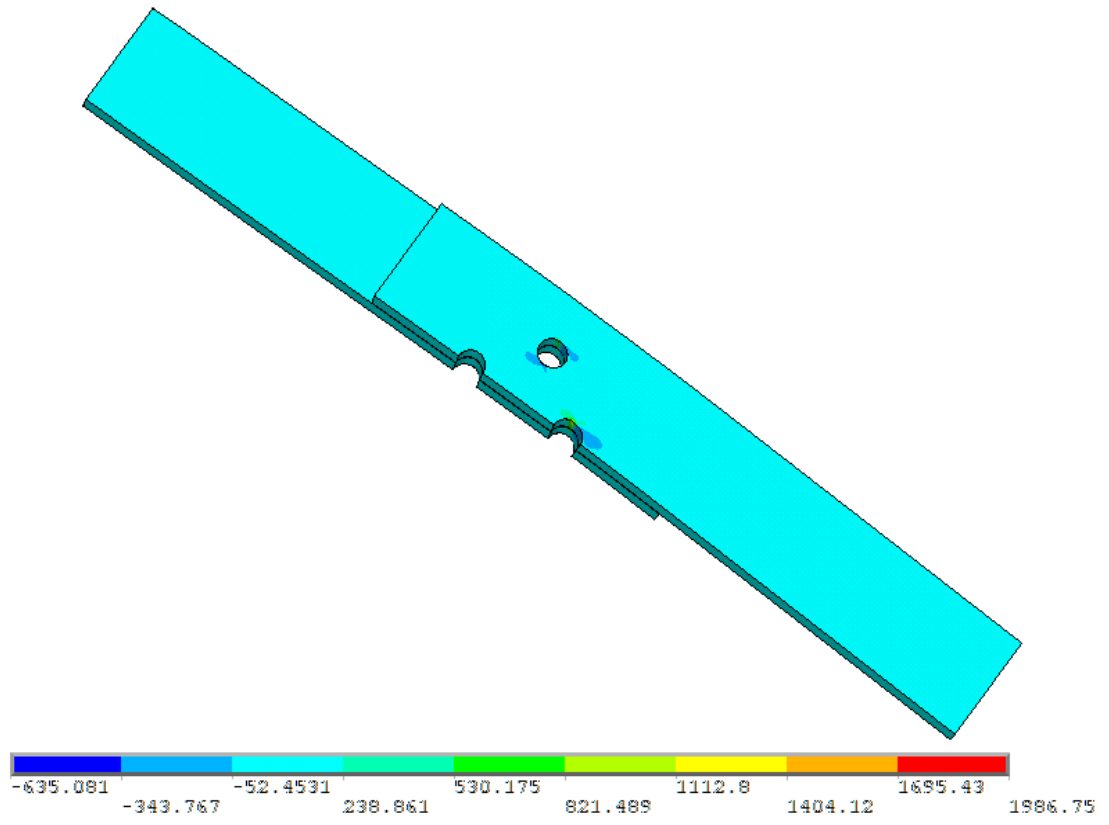


a) 55 °C

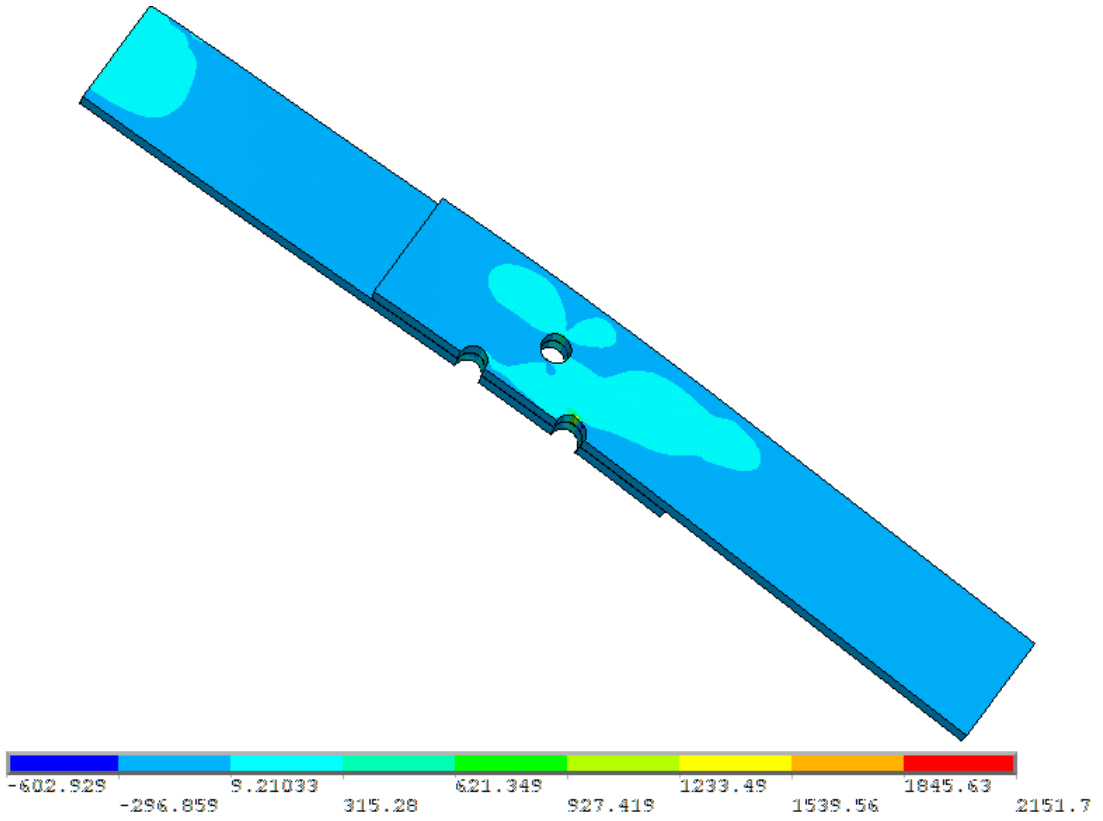


b) 95 °C

Şekil 6.29. 80 N çekme yükü altında 55 °C ve 95 °C sıcaklıklarda xy-yönünde hesaplanan kayma gerilmeleri

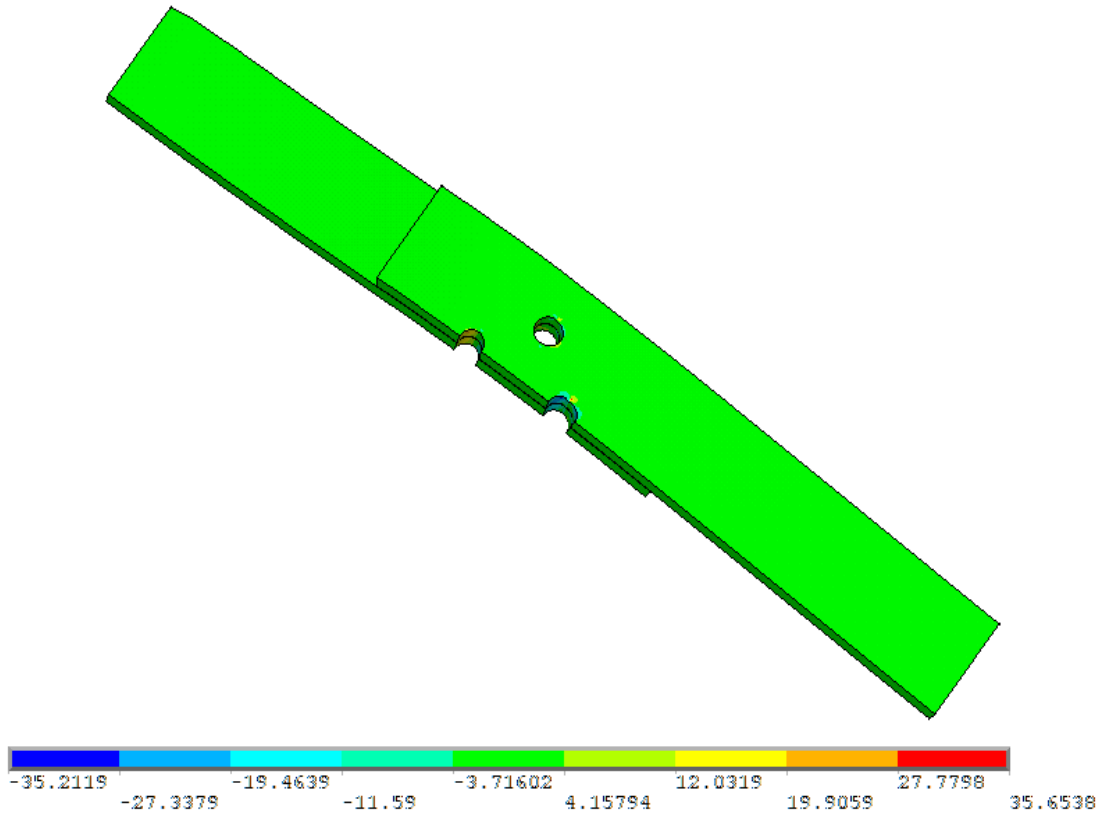


a) 55 °C

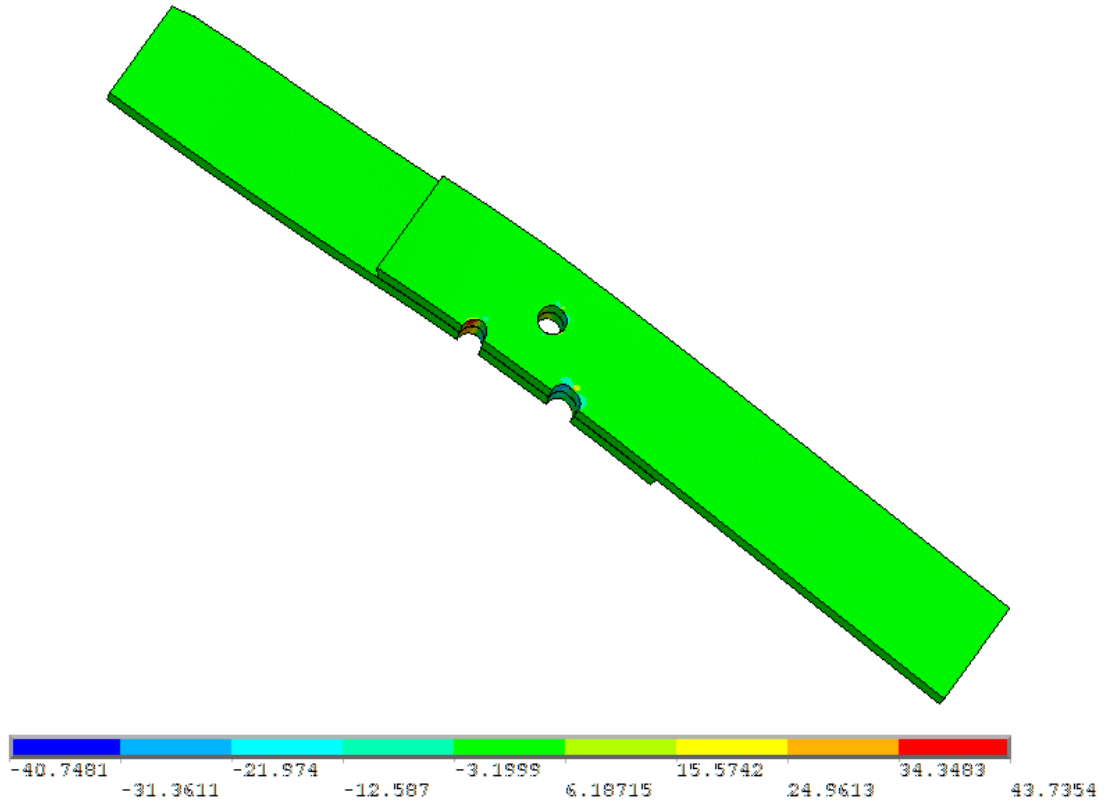


b) 95 °C

Şekil 6.30. 240 N çekme yükü altında 55 °C ve 95 °C sıcaklıklarda xy-yönünde hesaplanan kayma gerilmeleri

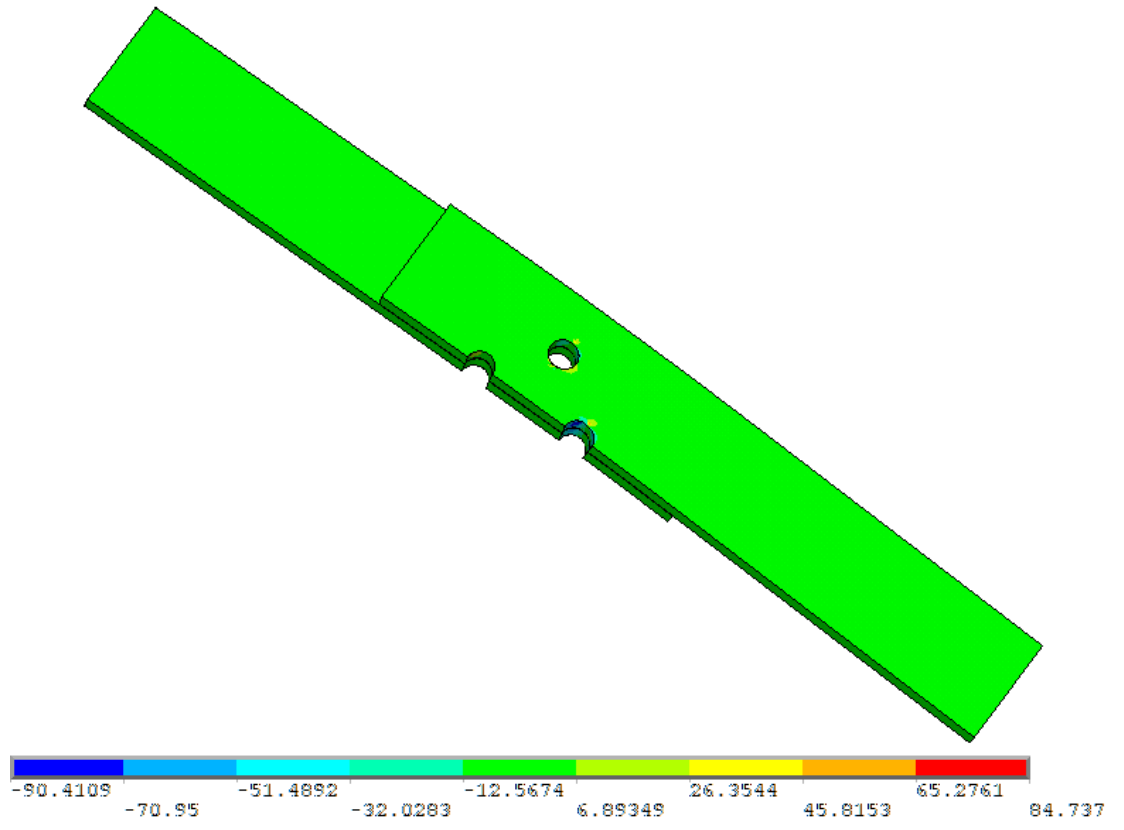


a) 55 °C

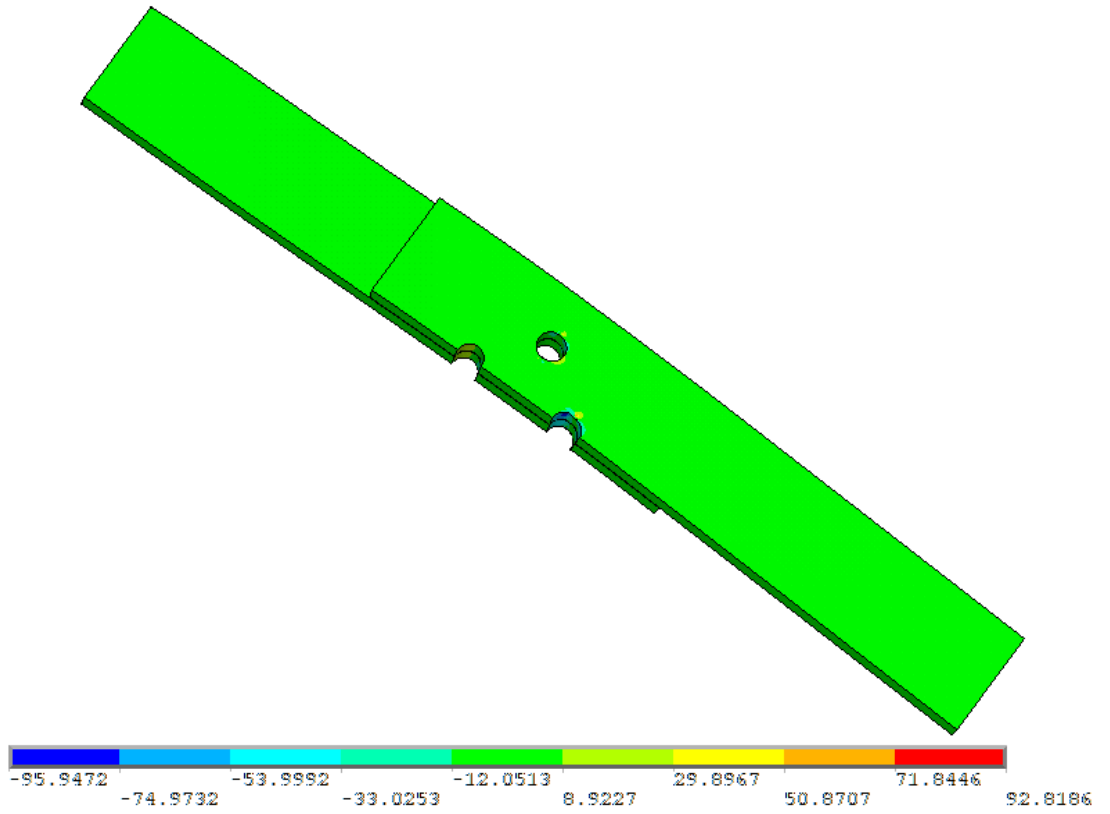


b) 95 °C

Şekil 6.31. 80 N çekme yükü altında 55 °C ve 95 °C sıcaklıklarda yz-yönünde hesaplanan kayma gerilmeleri

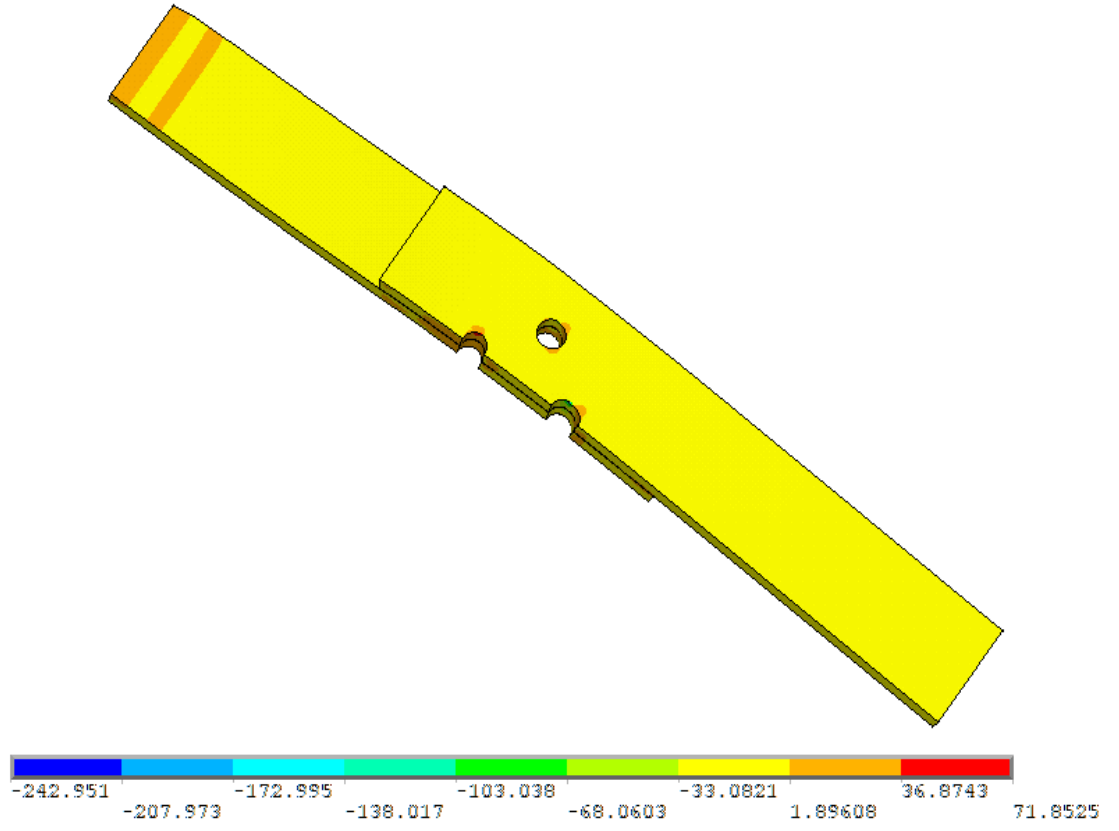


a) 55 °C

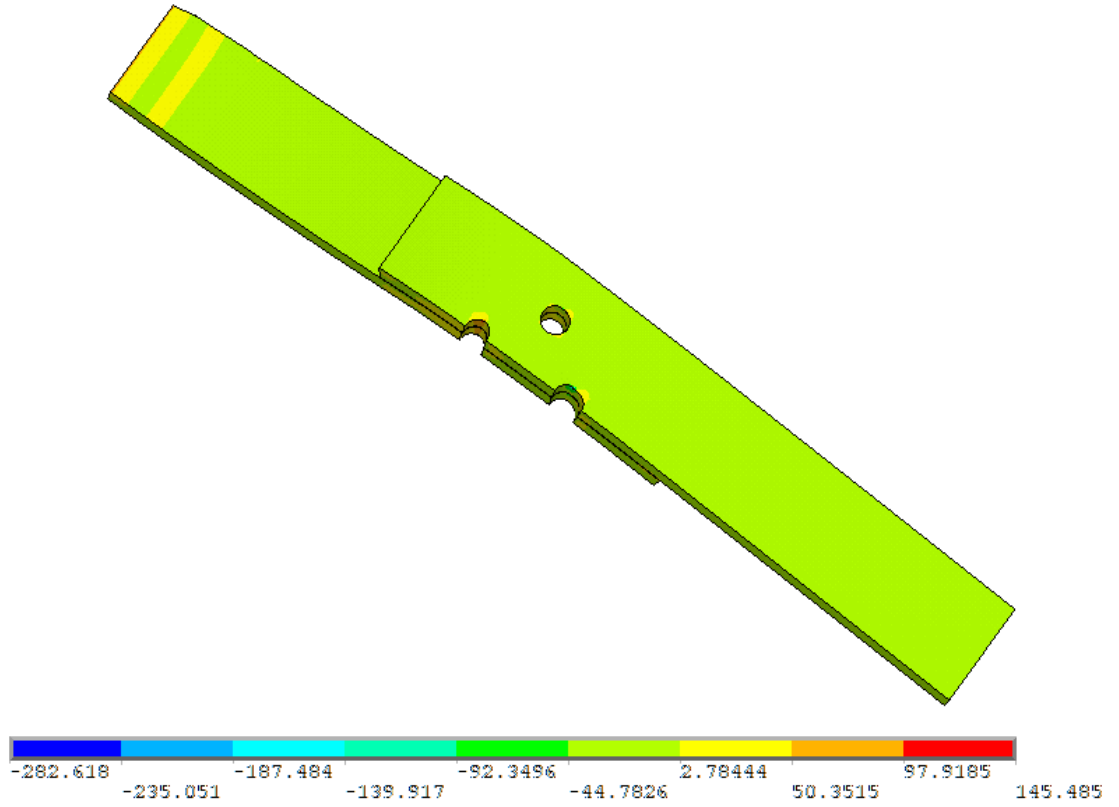


b) 95 °C

Şekil 6.32. 240 N çekme yükü altında 55 °C ve 95 °C sıcaklıklarda yz-yönünde hesaplanan kayma gerilmeleri

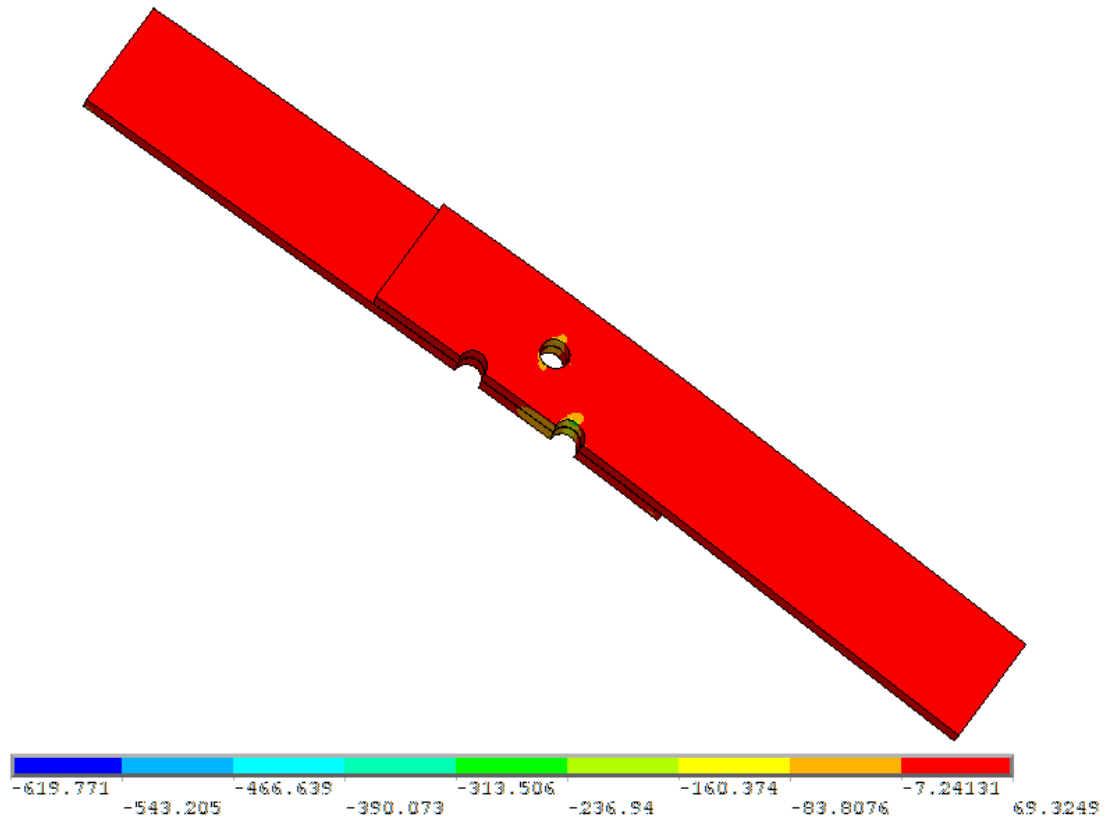


a) 55 °C

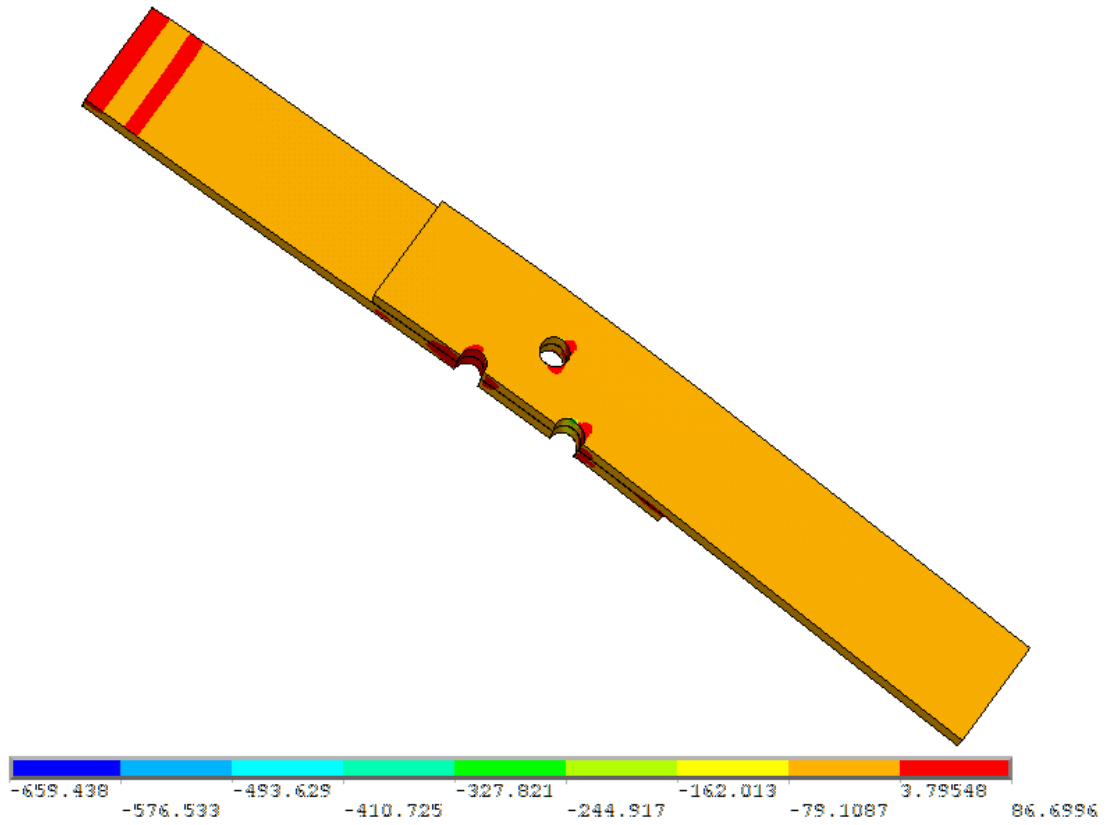


b) 95 °C

Şekil 6.33. 80 N çekme yükü altında 55 °C ve 95 °C sıcaklıklarda xz-yönünde hesaplanan kayma gerilmeleri



a) 55 °C



b) 95 °C

Şekil 6.34. 240 N çekme yükü altında 55 °C ve 95 °C sıcaklıklarda xz-yönünde hesaplanan kayma gerilmeleri

BÖLÜM VII

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, iki adet metal matris kompozit levhanın öncelikle epoksi türü bir yapıştırıcı ile yapıştırıldığı ve yapıştırılan bu levhalara ayrıca birden fazla pim bağlantısı yapıldığı (dört pim) varsayılarak bir karma bağlantılı model oluşturulmuştur. Buradaki asıl amaç, daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak, üç boyutlu bir karma bağlantı oluşturulması ve modellenmesidir. Çünkü, daha önceki çalışmalarda, genel olarak ya yapıştırıcı bağlantıları ya da pimli bağlantılar ayrı ayrı çalışılmış veya tek bölgeden pimli ve yapıştırıcı karma bağlantılar kullanılmıştır. Oluşturulan bu üç boyutlu modele, farklı değerlerde çekme yükleri ve/veya uniform sıcaklıklar uygulanarak, model üzerinde meydana gelen normal gerilmeler ve kayma gerilmelerinin değerleri ve dağılımları elde edilerek incelenmiştir. Üç boyutlu karma bağlantının modelleme ve sonlu elemanlara bölme işleminden sonra, çözümler karma bağlantıya uygulanan yükleme şartlarına göre üç aşamada tamamlanmıştır.

İlk aşamada, yapıştırılmış ve çok pim bağlantısı uygulanmış karma bağlantıya, sadece çekme yükü etki ettirilmiş ve bağlantıda bu çekme yükünün etkisi nedeniyle oluşan gerilmeler ve dağılımları elde edilmiştir. Çekme yükü olarak, x-yönünde 80 N, 120 N, 160 N, 200 N ve 240 N değerlerinde yükler uygulanmıştır. Uygulanan bu çekme yükü artışına bağlı olarak, normal gerilmelerde meydana gelen artış açıkça görülebilmektedir. Ayrıca, x-yönünde hesaplanan çekme ve basma gerilme değerlerinin y ve z yönlerindeki gerilmelerden çok daha büyük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, bağlantıya uygulanan çekme yükünün x-yönünde etki ediyor olmasıdır. Model üzerinde eş gerilme eğrileri veya konturları incelendiğinde gerilme yığılmalarının olduğu bölgeler rahatlıkla belirlenebilmektedir. Şekiller incelendiğinde ise her üç yönde model yüzeyinde genel olarak basma gerilmeleri meydana geldiği gözlenmiştir. Ayrıca x ve y yönlerinde model üzerindeki deliklerin çevrelerinde çekme gerilmelerinin de olduğu görülmektedir. Normal gerilmelerde olduğu gibi, farklı çekme yükleri uygulandığında elde edilen kayma gerilmeleride model üzerinde farklı çekme yükleri uygulanarak bulunmuştur. Kayma gerilmeleri ile ilgili elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, çekme ve basma formundaki τ_{xy} kayma gerilme değerlerinin, τ_{yz} ve τ_{xz} kayma gerilmelerden çok daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca τ_{yz} kayma basma gerilme değerlerindeki düşük

olduğu tespit edilmiştir. İlk aşamada ki en önemli tespitler ise x-yönünde elde edilen normal ve τ_{xy} kayma gerilmelerinin diğer yönlerle göre daha büyük olması, normal gerilmelerin kayma gerilmelerine göre daha yüksek bulunması ve son olarak çekme yükü artışına bağlı olarak çekme gerilmelerinin delik iç ve çevresinde yoğunlaşmasıdır.

Çalışmanın ikinci aşamasında, yapıştırılmış ve çok pim uygulanmış üç boyutlu karma bağlantıya, herhangi bir çekme yükü uygulanmadan, sadece farklı değerlerde uniform sıcaklıklar uygulanmış ve uygulanan bu uniform sıcaklıkların etkisiyle oluşan ısı normal ve kayma gerilmeleri elde edilmiş ve incelenmiştir. Uygulanan uniform sıcaklık değerleri sırasıyla 55, 65, 75, 85 ve 95 °C'dir. Model üzerinde yapılan değerlendirmede ısı gerilmelerin mutlak değer olarak değerleri, uniform sıcaklık artışına bağlı olarak artmaktadır. Dolayısıyla, modellenen bağlantı için en düşük gerilmeler uygulanan 55 °C uniform sıcaklık yükü için elde edilirken, en yüksek değerlikli gerilmeler 95 °C uniform sıcaklık etkisinde iken hesaplanmıştır. Ayrıca, en büyük gerilmeler x-yönünde meydana gelmiştir. Buna ek olarak, z-yönünde hesaplanan gerilmelerin değerlerinin, x ve y yönlerinde hesaplanan gerilme değerlerinden küçük olduğu görülmektedir. Aynı şekilde kayma gerilmelerinde de sıcaklık artışına bağlı olarak çekme ve basma formundaki gerilmeler artış göstermiştir. En yüksek kayma gerilmeleri τ_{xy} olarak meydana gelmiştir. Sadece sıcaklık etkisindeki modelde ise; x-yönünde elde edilen normal gerilmelerin değerleri diğer yönlerdekinden ve τ_{xy} kayma gerilmeleri diğer kayma gerilmelerinden daha yüksektir, normal gerilmeler kayma gerilmelerine göre min. 2 kat daha yüksektir, x-yönünde hesaplanan basma formundaki normal gerilme mutlak değerleri çekme formunda bulunan normal gerilmelere göre daha yüksektir ve son olarak elde edilen sonuç sıcaklık artışına bağlı olarak çekme gerilmelerinin delik iç ve çevresinde yoğunlaşmasıdır.

Çalışmanın üçüncü ve son aşamasında, dört pim delikli ve yapıştırılmış karma bağlantıya, hem çekme yükü hem sıcaklık yükü aynı anda etki ettirilmiş ve dolayısıyla bu çift yükleme etkisindeki karma bağlantıda meydana gelen gerilmeler ve dağılımları elde edilmiştir. Normal gerilmeler incelendiğinde çekme formunda gerilmelerin değerleri, uniform sıcaklık ve çekme yükü artışına bağlı olarak artmaktadır. Dolayısıyla, modellenen kompozit için en düşük çekme gerilmeleri uygulanan 80 N çekme yükü ve 55 °C uniform sıcaklık için z-yönünde elde edilirken, en yüksek değerlikli çekme gerilmeleri ise 240 N çekme yükü ve 95 °C uniform sıcaklık etkisinde iken x-yönünde

hesaplanmıştır. Ayrıca, basma formundaki ısı gerilmelerin mutlak değerleri incelendiğinde her bir çekme yükü için sıcaklık artışına bağlı olarak basma gerilmelerinin yükseldiği anlaşılmıştır. Fakat, çekme yükü artışına bağlı olarak x-yönünde 240 N çekme yüküne kadar bir azalış meydana geldiği ve 240 N çekme yükü altında basma gerilme değerlerinin tekrar bir yükseliş gösterdiği tespit edilmiştir. Diğer yönlerde çekme yükü artışına bağlı olarak basma gerilmesi mutlak değerleri yükselmiştir. En yüksek basma gerilmesi 80 N çekme yükü altında 95 °C sıcaklıkta x-yönünde meydana gelirken ve en düşük basma gerilmesi 80 N çekme yükü altında 55 °C sıcaklıkta z-yönünde hesaplanmıştır. Üç boyutlu model üzerinde uniform sıcaklık ve çekme yükü etkisinde oluşan kayma gerilmeleri incelendiğinde ise yine ısı gerilmelerin değerleri uniform sıcaklık artışına bağlı olarak artmaktadır. Dolayısıyla, modellenen kompozit için en düşük çekme formunda kayma gerilmeleri uygulanan 55 °C uniform sıcaklık yükü için elde edilirken, en yüksek değerlikli çekme şeklinde kayma gerilmeleri ise 95 °C uniform sıcaklık etkisinde iken hesaplanmıştır. Ancak çekme yükü artışına bağlı olarak xz- yönünde çekme formunda kayma gerilmeleri azalmaktadır. Bu azalış 55 °C sıcaklık altında 200 N çekme yüküne kadar devam etmiş olup, 95 °C sıcaklık altında yük artışına bağlı olarak sürekli azalmıştır. En yüksek çekme formunda kayma gerilmesi 240 N çekme yükü altında 95 °C sıcaklıkta xy-yönünde bulunmuş olup ve en düşük çekme formunda kayma gerilmesi ise 80 N çekme yükünde 55 °C sıcaklık altında yz-yönündedir. Ayrıca basma formundaki ısı gerilmelerin mutlak değerleri incelendiğinde yz ve xz yönleri için her bir çekme yükü için sıcaklık artışına bağlı olarak basma gerilmelerinin yükseldiği ancak xy yönünde 80 N çekme yükü altında sıcaklık artışına bağlı basma formunda kayma gerilmesi yükselmesine rağmen 120 N dan sonra sıcaklık artışıyla basma formundaki kayma gerilmelerinin mutlak değerleri düşmektedir. Basma şeklindeki kayma gerilmelerinin en yüksek mutlak değeri 240 N çekme yükü altında 95 °C sıcaklıkta xz-yönünde ve en düşük kayma gerilmesi ise 80 N çekme yükü altında 55 °C sıcaklıkta yz-yönünde hesaplanmıştır.

Üçüncü aşamayı kısaca özetlersek; x-yönünde hesaplanan normal gerilmeler ve τ_{xy} kayma gerilmeleri diğerlerine göre daha yüksektir, diğer durumların tersine normal gerilmeler incelendiğinde maksimum basma gerilmesi 80 N çekme yükü altında hesaplanmıştır. Ayrıca, çekme yükü ve sıcaklık artışına bağlı olarak çekme gerilmeleri delik iç ve çevresinde yoğunlaşmıştır.

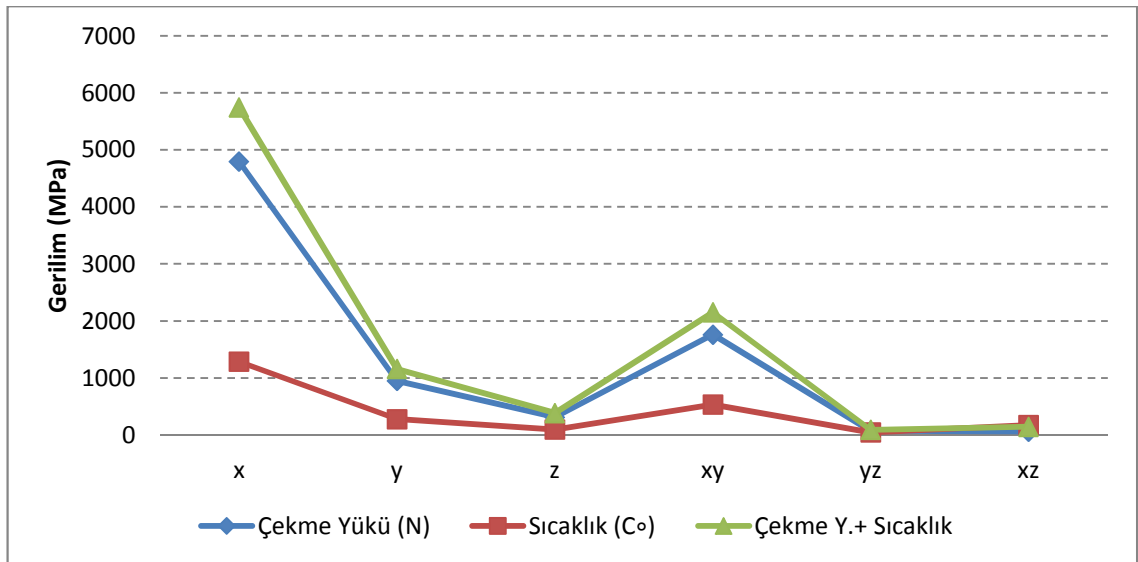
Her üç durumda hesaplanan maksimum gerilmelerin hangi çekme yükü ve sıcaklık altında tespit edildiği Çizelge 7.1’de gösterilmektedir. Bu çizelgeden de görüleceği üzere genelde maksimum çekme yükü altında (240 N) ve maksimum sıcaklık altında (95 °C) en yüksek çekme formunda ve basma formunda gerilmeler oluşmuştur.

Çizelge 7.1. Sadece çekme yükü, sadece sıcaklık ve her iki yükleme koşulundaki maksimum gerilmelerin tespit edildiği çekme ve sıcaklık değerleri

Gerilme	Uygulama	Çekme (N)		Sıcaklık (°C)		Çekme + Sıcaklık	
		Çekme	Basma	Çekme	Basma	Çekme	Basma
σ_x	Çekme Yüğü (N)	240	240			240	80
	Sıcaklık (C°)			95	95	95	95
σ_y	Çekme Yüğü (N)	240	240			240	240
	Sıcaklık (C°)			95	95	95	95
σ_z	Çekme Yüğü (N)	240	240			240	240
	Sıcaklık (C°)			95	95	95	95
τ_{xy}	Çekme Yüğü (N)	240	240			240	240
	Sıcaklık (C°)			95	95	95	95
τ_{yz}	Çekme Yüğü (N)	240	240			240	240
	Sıcaklık (C°)			95	95	95	95
τ_{xz}	Çekme Yüğü (N)	240	240			80	240
	Sıcaklık (C°)			95	95	95	95

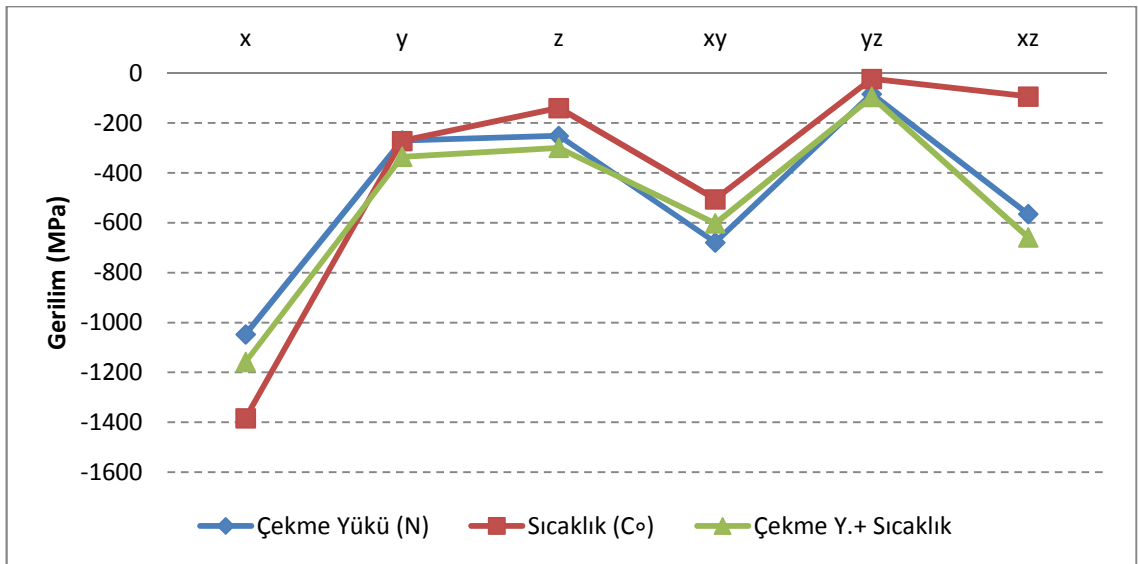
Ayrıca grafik şeklinde her üç durumdaki gerilmeler incelendiğinde;

1. Şekil 7.1’de görüleceği üzere çekme formunda ki max. gerilim x-yönünde çekme yükü ve sıcaklığın her ikisi beraber uygulandığında oluşmuştur. Ayrıca her üç durum karşılaştırıldığında ise tüm yönlerde en yüksek gerilmelerin üçüncü durumda gözlendiği ve en düşük gerilmelerin sadece sıcaklık etkisi altındaki kompozit model üzerinde olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 7.1. Farklı yönlerdeki bulunan maksimum çekme formundaki gerilimler

2. Şekil 7.2’de ise basma formunda ki maksimum gerilimlerin yine x-yönünde ancak sadece sıcaklık etkisi altında olduğu gösterilmektedir. Ayrıca her üç durum karşılaştırıldığında ise çekme gerilimlerinin tersine yönler göre maksimum gerilmelerin değiştiği görülmektedir.



Şekil 7.2. Farklı yönlerdeki bulunan maksimum basma formundaki gerilimler

Sonuç olarak; karma bağlantı yapılan kompozit plakaların ve kullanılan epoksi türü yapıştırıcının, farklı ısı ve mekanik özellikleri nedeniyle bağlantı üzerinde farklı formlarda ve yüksek değerlerde gerilmeler meydana gelmiştir. Özellikle, bağlantıya

uygulanan çekme yükünün x-yönünde etki ediyor olması, çekme ve basma formundaki x-yönünde oluşan gerilmelerin daha yüksek olmasına ve malzemelerin farklı ısı genleşme katsayıları nedeniyle, uniform sıcaklık artışlarında daha büyük gerilmeler oluşmasına neden olmuştur. Bir diğer önemli husus, gerilmelerin pim delikleri civarında yoğunlaştığı ve gerilme yığılmalarının meydana geldiğidir. Dolayısıyla, bağlantıda oluşabilecek muhtemel bir hasar öncelikle delikler çevresinde meydana gelecektir.

KAYNAKLAR

- Adams, R.D., 1989. Strength predictions for lap-joints, especially with composite adherents, *Journal of Adhesion*, 30, 219-242.
- Adin, H., Altun, Ş. ve Yaşar, F., 2011. Onarımda kullanılan darbe dayanımlı iki bileşenli yapıştırıcılar, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May, Elazığ, Turkey
- Aktaş, A., 2002. Pim bağlantılı plakaların statik ve dinamik davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale
- Aldaş, K., Palancıoğlu H. ve Şen F., 2009. Thermal stress in adhesively bonded double lap joints by FEM, *Electronic Journal of Machine Technologies*, 6, 55-64
- Aldaş, K. ve Şen, F., 2011. Karma bağlantı uygulanmış farklı metal plakalarda meydana gelen gerilmelerin incelenmesi, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8, 2, 1-12
- Aldaş, K. ve Şen F., 2010. Sıcaklık değişiminin yapıştırılmalı ve pimli alüminyum plakalardaki gerilmeler üzerine etkisi, *Tubav Bilim Dergisi*, 3, 4, 323-329
- Anık, S., 1986. Yapıştırma ve nokta kaynağının kombinasyonu, *Mühendis ve Makine*, 27, 316, 24-30.
- ANSYS, Release 10.0 Documentation, Swanson Analysis System Inc., Houston, PA, USA.
- ANSYS, Release 14.0 Documentation, Swanson Analysis System Inc., Houston, PA, USA.
- Apalak, M.K. ve Günes, R., 2002. On non-linear thermal stresses in an adhesively bonded single lap joint, *Computers and Structures*, 80, 85-98.
- Apalak, M.K., Aldas, K., ve Şen, F., 2003, Thermal non-linear stresses in an adhesively bonded and laser-spot welded single-lap joint during laser-metal interaction, *Journal of Materials Processing Technology*, 142, 1-19.
- Apalak, Z.G., 1995. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş T-tipi bağlantıların sonlu eleman metodu kullanılarak analiz ve tasarımı, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri.
- Arıcasoy, O., 2006. Kompozit sektör raporu, İstanbul Ticaret Odası.
- Aydın, S., Solmaz, M.Y. ve Turgut, A., 2011. Epoksi ve akrilik bazlı yapıştırıcıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), 16-18 May, Elazığ, Turkey,
- Babalık, F.C., 2009. Makine elemanları ve konstrüksiyon örnekleri, Dora Yayıncılık, İstanbul.

- Baykara, T., Toy, Ç. ve Tekin, A., 1992. Yüksek teknolojik seramikleri ve kompozitleri, TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi
- Brandon, D. ve Kaplan, W.D., 1997. Joining processes. John Wiley and Sons, Chichester, England.
- Camanho, P.P. ve Matthews, F.L., 1999. A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates, Journal of Composite Materials, 33, 2248-80
- Camanho, P.P. ve Matthews, F.L., 1997. Stress Analysis and strength prediction of mechanically fastened joints in FRP, Composites Part A, 28, 529- 547
- Can, A.Ç., 2006. Makine elemanları tasarımı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Canbak, O., 2007. Gemi güverte krenlerinin tasarımı ve dinamik davranışlarının irdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ceylan, D., 2005. Civatalı ve yapıştırıcılı kompozit bağlantılarda gerilme analizi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Çalık, A., 2008. Yapıştırıcılar ve köşeleri yuvarlatılmış basamaklı bindirme yapıştırıcı bağlantılarda gerilme analizi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Chan, W.S. ve Vedhagiri, S., 2001. Analysis of composites bolted-bonded joints used in repairing, Journal of Composite Materials, 35, 1045-1061.
- Chang, F.K. ve Chang, K.Y., 1987. A progressive damage model for laminated composites containing stress concentrations, Journal of Composite Materials, 21, 834-855
- Chang, F.K., Scott, R.A. ve Springer, G.S., 1984, Failure of composite laminates containing pin loaded holes-method of solution, Journal of Composite Materials, 18, 255-278
- Chang, K.Y., Liu, S. ve Chang, F.K., 1991. Damage tolerance of laminated composites containing an open hole and subjected to tensile loadings, Journal of Composite Materials, 25, 274-301
- Chen, W.H, Lee, S.S, Yeh, J.T., 1995. Three dimensional contact stress analysis of a composite laminate with bolted joint, Composite Structures, 30: 287-97
- Colombi, P. and Poggi, C., 2006. Strengthening of tensile steel members and bolted joints using adhesively bonded CFRP plates , Construction and Building Materials, 20, 1-2, 22-33.
- Cook, R.D., 1995. Finite element modeling for stress analysis, John Wiley & Sons Ltd., New York.

- Çalık, A., 2008. Yapıştırıcılar ve köşeleri yuvarlatılmış basamaklı bindirme yapıştırıcı bağlantılarda gerilme analizi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak.
- Çalın, R., 2006. Magnezya parçacık takviyeli Al matrisli kompozitin vakum infiltrasyon yöntemi ile üretilmesi ve özelliklerinin incelenmesi, Doktora Metal Eğitimi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Çelik E.Ç., 2007. Pim bağlantılı kompozit malzemelerin dizaynı, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İzmir.
- Çepni, M.S. ve Deniz R., 2005. Sonlu elemanlar yönteminin dönüşümlerde kullanılması, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi, 2, 93.
- Çınar, M. ve Elmas, E., 2007. Kompozit boruların patlatma cihazının ve panelinin tasarımı, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Makina Mühendisliği, İzmir.
- Çubukcuoğlu, Ö., 2005. Civatalı kompozit bağlantılarda hasar analizi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Deniz, M.E., 2005. Kompozit malzemelerin üretim yöntemleri ve ısıl işlemle presleme tekniğini kullanarak kompozit malzeme üretecek bir düzeneğin tasarımı ve imalatı, Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa
- DIN EN ISO 10365, 1995. Adhesives, DIN- Normen, Berlin.
- Durman, M., 1991. Kompozit malzemeler ders notları, İstanbul Teknik Üniversitesi, Sakarya Mühendislik Fakültesi, Metalurji Bölümü, Sakarya.
- Dursun, T., 2006. Civata bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda hasar analizi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ekici, E. ve Işık, B., 2009, Cam elyaf polimer kompozit malzemenin delinmesi esnasında oluşan yüzey hasarının deneysel olarak incelenmesi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Türkiye.
- Eriksson, I., 1990. On the bearing strength of bolted graphite/epoxy laminates, Journal Of Composite Materials, 24, 1246-1269.
- Fagan, M.J., 1992. Finite element analysis theory and practice, Longman, New York, 61, 201.
- Fan, W.X. ve Qiu, C.T., 1993. Load distribution of multi-fastener laminated composite joints, International Journal of Solids and Structures, 30, 21, 3013-23.
- Gediktaş, M., 1972. Yapıştırma bağlantıları, Mühendis ve Makine, 16, 178, 27-33.
- Hung, C.L. ve Chang, F.K., 1996. Strength envelope of bolted composite joints under bypass loads, Journal of Composite Materials, 30, 1402-1435.

- Hyer, M.W., Klang, E.C. ve Cooper, D.E., 1987. The effects of pin elasticity, clearance and friction on the stresses in a pin-loaded orthotropic plate, *Journal of Composite Materials*, 21.
- Ireman, T., 1999. Design of composite structures containing bolt holes and open holes, Phd. Thesis., Department of Aeronautics, Kunliga Tekniska Högskolan, Sweden.
- İçten, B.M. ve Karakuzu, R., 2002. Progressive failure analysis of pin-loaded carbonepoxy woven composite plates, *Composites Science and Technology*, 62, 1259-1271
- İşcan B., Adin, H. ve Turgut, A., 2009. Yapıştırıcı malzeme ile birleştirilmiş Z tipi bağlantılarda bindirme mesafesinin etkisi, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs, Karabük, Türkiye
- Jones, R. M., 1999. *Mechanics of composite materials*, Taylor & Francis Inc., PA
- Jurf, R.A. ve Vinson, J.R., 1990. Failure analysis of bolted joints in composite laminates, *Composite Materials: Testing and Design*, 9, 165-190
- Kaya, A., 1991. Investigation of stres distributions in adhesive-bonded lap joint, MS. Degree Thesis, Dokuz Eylul University, Institute of Science and Technology, İzmir
- Kazanç, V., 2002. Kompozit malzemeler ve mekanik özellikleri, Süleyman Demirel Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bitirme Ödevi, Isparta
- Kelly, G., 2004. Load transfer in hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints, *Composite Structures*, 69, 35-43
- Kim, S.J. and Hwang, J.S., 1998. Progressive failure analysis of pin-loaded laminated composites using penalty finite element method, *AIAA Journal*, 36, 75-80.
- Kinloch, A.J., 1997. Adhesives in engineering, *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 307-335.
- Lawlor, V.P., McCarthy, M.A. ve Stanley, W.F., 2002. Experimental study on the effects of clearance on single-bolt, single-shear, Composite Bolted Joints, *Journal of Plastics, Rubber and Composites*, 31, 9, 405-411
- Lessard, L.B. ve Shokrieh, M.M., 1995. Two-dimensional modeling of composite pinned-joint failure, *Journal Of Composite Materials*, 29, 5, 671-697
- Lim, T.S., Kim, B.C. ve Lee, D.G., 2006. Fatigue characteristics of the bolted joints for unidirectional composite laminates, *Composite Structures*, 72, 1, 58-68
- Loctite Global Tasarım Elkitabı, 2005. Erasmusdruck GmbH, Mainz, Germany.
- Matthews, F.L., Wong, C.M. ve Chryssafitis, S., 1982. Stress distribution around a single bolt in fibre-reinforced plastics, *Composites*, 316-322
- McCarthy, C.T., McCarthy, M.A. ve Lawlor, V.P., 2005. Progressive damage analysis of multi-bolt composite joints with variable bolt-hole clearances, *Composites Part B*, 36, 290-305

- McCarthy, M.A. and McCarthy, C.T., 2002. Finite element analysis of the effects of clearance on single-shear, Composite Bolted Joints, *Journal of Plastics, Rubber and Composites*, 32, 2, 65-70
- McCarthy, M.A., Lawlor, V.P., Stanley, W.F. ve McCarthy, C.T., 2002. Bolt-hole clearance effects and strength criteria in single-bolt, single-lap, composite bolted joints, *Composites Science and Technology*, 62, 1415-1431
- Messler, R. W., 2004. *Joining of materials and structures*, Elsevier Butterworth-Heinemann
- Okutan B., 2001. Stress and failure analysis of laminated composite pinned joints, *Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Makine Mühendisliği, İzmir*
- Okutan, B., Aslan, Z. ve Karakuzu, R., 2001. A study of the effects of various geometric parameters on the failure strength of pin-loaded woven-glass-elyaf reinforced epoxy laminate, *Composites Science and Technology*, 61, 1491-1497
- Okutan B., 2002. The effects of geometrical parameters on the failure strength for pin-loaded multi-directional elyaf-glass reinforced epoxy laminate, *Composites Part B*, 33, 567-578
- Özenç, M., 2007. Yapıştırma bağlantılarının darbe yükleri altındaki davranışlarının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli*
- Özdemir, A., 2006. Seramik malzemelerin kırılma tokluğu değerinin üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile teorik olarak belirlenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir*
- Öztürk, M., 2007, SiC ilaveli alumina seramik kompozitler, *Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya*
- Palancıoğlu, H., 2011. Yapıştırılmış ve pim bağlantısı uygulanmış metal levhalardaki gerilmelerin analizi, *Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aksaray*
- Perugini, P., Riccio, A. ve Scaramuzzino, F., 2001. Three-dimensional progressive damage analysis of composite joints, *Proceedings of the Eighth Int. Conf. On Civil and Structural Eng. Computing*, 62, 20-30
- Pfeiffer, P. ve Shakal, M., 1998. Effect of bonded metal substrate area and its thickness on the strenght and durability of adhesively bonded joints, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 12, 339-348.
- Polat, Z., 2008. Hasarlı kompozit plakaların tamir yoluyla mukavemetinin artırılması, *Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon*.
- Rende, H., 1996. *Makine elemanları*, Seç Yayın Dağıtım, 1, İstanbul.

- Riccio, A. ve Scaramuzzino, F., 2002. Influence of damage onset and propagation on the tensile structural behaviour of protruding composite joints, 4th GRACM Congress on Computational Mechanics, 10, 50-64.
- Saygılı, E., 2006. Pim bağlantılı kompozit malzemelerde gerilim analizi, Bitirme Projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Makina Mühendisliği, İzmir.
- Sayman, O., 2003. Elastic-plastic and residual stresses in symmetric aluminum metal-matrix laminated plates under a linear thermal loading, Journal of Thermal Stresses, 26, 391-406.
- Scalea, F.L.D., Cappello, F. ve Cloud, G.L., 1999. On the elastic behavior of a cross-ply composite pin-joint with clearance fits, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 12, 13-22.
- Seng, C.T., 1991. A progressive failure model for composite laminates containing openings, Journal Of Composite Materials, 25, 556-577
- Shields, J., 1975. Adhesive bonding, the design council, The British Standards Institution and The Council of Engineering Institutions, Oxford University Press.
- Solmaz M.Y., 2008. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mekanik analiz ve tasarımları, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Staab, G. H., 1999. Laminar composites, US: Butterworth-Heinemann.
- Sun, H.T., Chang, F.K. ve Qing, X., 2002. The response of composite joints with Boltclamping loads, part I: Model Development, Journal of Composite Materials, 36, 1, 47-67
- Şen, F., 2001. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bindirme bağlantısının laser nokta kaynağı esnasında meydana gelen sıcaklık dağılımı ve ısı gerilmelerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- Şen, F., Aldaş, K. ve Palancıoğlu, H., 2008a. Çift örtü kullanılarak yapıştırılmış metal levhaların ısı gerilme analizi, Fırat Üniversitesi, Fen ve Müh. Bil. Dergisi, 20, 4, 649-659.
- Şen, F., Aldaş, K. ve Palancıoğlu, H., 2008b. Thermal stress analysis of adhesively bonded single lap joints using FEM, Electronic Journal of Machine Technologies, 2, 31-40.
- Şen, F. ve Aldaş, K., 2011. Effects of using different metal materials on stresses in metal-composite hybrid joints, Çankaya University Journal of Science and Engineering, 8, 1, 1-13.
- Şen, F. ve Aldaş, K., 2012a. Farklı uniform sıcaklıklar altındaki karma bağlantı yapılmış kompozit ve alüminyum plakalardaki gerilme analizi, International Journal of Engineering Research and Development, 4, 1.

- Şen, F. ve Aldaş, K., 2012b. Karma bağlantılı kompozit plaklarda farklı sıcaklıklar etkisiyle oluşan gerilmelerin analizi, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, 3, 1, 21-30.
- Şenel, F., Balya, B. ve Parnas, L., 2004. İleri kompozit zırh malzemelerin balistik analizi, Savunma Teknolojileri Kongresi, ODTÜ, Ankara
- Temiz, S., 2003. Study of the effect of environmental factors on mechanical properties of adhesively bonded joints, Ph. D. Thesis, Ataturk University, Erzurum.
- Tserpes, K.I., Labeas, G., Papanikos, P. ve Th. Kermanidis, 2002. Strength prediction of bolted joints in graphite/epoxy composite laminates, Composites Part B: engineering, 33, 521-529
- Turan K. ve Kaman M.O., 2010, Tek tesirli yapıştırma bağlantılarında ilerlemeli hasar analizi, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16, 3, 315-323
- Turan, K., Kaman, M.O. ve Gür M., 2010. Pim bağlantılı tabakalı kompozit levhalarda fiber takviye açısının hasar tipine etkisi, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16, 2, 213-220
- URL-1, www.obitet.gazi.edu.tr/obitet/malzeme_bilgisi/kompozit%20malzemeler.pdf, Kasım 2011.
- URL-2, www.bilgiustam.com/kompozit-malzemeler-hakkinda-hersey, Kompozit Malzemeler Hakkında Herşey, Kasım 2011
- URL-3, http://tr.wikipedia.org/wiki/Kompozit_malzemeler, Kompozit Malzemeler, Aralık 2012
- URL-4, <http://www.seattlepi.com/dayart/20070629/787materials.gif>, Composite Materials, Aralık 2012
- URL-5, <http://www.reinforcedplastics.com/view/9669/boeings-787-trials-tribulations-and-restoring-the-dream>, Aralık 2012
- URL-6, http://www.temelkimya.com.tr/makale/Poliuretan_mastikler.pdf, Poliüretan, Kasım 2012
- URL-7, <http://www.pau.edu.tr/mtopcu>, Sonlu Elemanlar Ders Notları, 24 Şubat.2012
- Ünal, O., 2006. Kompozit malzemeler, Yapı Malzemeleri Ders Notları, A.K.Ü. Teknik Eğitim Fak.
- Vatangül, E., 2008. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve ANSYS 10 programı ile ısı gerilme analizi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Bitirme Projesi, İzmir
- Wang, HS., Hung, C.L. ve Chang, F.K., 1996. Bearing failure of bolted composite joints part I: experimental characterization, Journal of Composite Materials, 30, 1284-313

- Whitworth, H.A., Othieno, M. ve Barton, O., 2003. Failure analysis of composite pin loaded joints, *Composite Structures*, 59, 261-266
- Yang, C., Haung, H., Tomblinn, J. S. ve Sun, W., 2003. Elastic-plastic model of adhesive bonded single-lap composite joints, *Wichita State University, Kansas*.
- Yarrington, P., Zhang, J., Collier, C. ve Bednarczyk, B.A., 2005. Failure analysis of adhesively bonded composite joints, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1-23.
- Yavuzylmaz, Ö., 2007. Eksenel yük altındaki ortasında delik bulunan kompozit levhada değişik sıcaklıklarda oluşan gerilmelerin deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Makina Mühendisliği, Ankara
- Yazıcı, Y.T., 2007. Tübüler yapıştırıcı bağlantılarında gerilme analizi, Yüksek Lisans Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Zonguldak
- Yılmaz, İ. M. ve Sayman, O., 2005. Kompozit basınçlı tüpte gerilme analizi, D. E.Ü., Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, İzmir
- Yogeswaren, E.K. ve J.N.Reddy, 1988. A study of contact stresses in pin-loaded orthotropic plates, *Computers & Structures*, 30, 5, 1067-1077
- Zhang, C., Ganesan, R. ve Suong, V.H., 2000. Effects of friction on three-dimensional contact stresses in pin-loaded laminated composites, *Journal of Composite Materials*, 34, 16, 1382-1415
- Zienkiewicz, O.C. ve Morgan, K., 1983. Finite elements and approximation, A Wiley-Interscience Publication, New York

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hakan Köksal

Doğum Yılı : 1979

Eğitim Bilgileri (Kurum ve Yıl)

Lisans : Orta Doğu Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 1998 – 2003

Yüksek Lisans : Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makina Mühendisliği Bölümü, 2011 - 2013

İletişim Bilgileri

Adres : Mercedes-Benz TÜRK A.Ş. Kamyon Fabrikası
Kalite Bölümü Metal Laboratuvarı 68100 Aksaray

Telefon : 0 533 696 0863

E-posta : hakan.koeksal@daimler.com / koksalhakan@yahoo.com