

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KOMPOZİT PANEL BAĞLANTILARINDA
HASAR ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Hüseyin ÖZDELEN**

Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Programı : KATI CİSİMLERİN MEKANİĞİ

EKİM 2007

**KOMPOZİT PANEL BAĞLANTILARINDA
HASAR ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Hüseyin ÖZDELEN
503041506**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 14 Eylül 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 3 Ekim 2007**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ekrem TÜFEKÇİ
Diğer Jüri Üyeleri Doç. Dr. Ata MUĞAN (İ.T.Ü.)
Yrd. Doç. Dr. Vedat DOĞAN (İ.T.Ü.)**

EKİM 2007

ÖNSÖZ

Hiç bir zaman desteklerini esirgemeyen aileme,

Sürekli yanımda olan hocalarım Doç. Dr. Ekrem TÜFEKÇİ ve Doç. Dr. Ata MUĞAN'a,

Yardımlarını esirgemeyen Cemal GÖZEN, Ömer DÖLEK ve Müslüm ÇAKIR'a,

Ve daha sayamadığım nice dostlarıma

Herşey için teşekkürler...

Ekim 2007

Hüseyin ÖZDELEN

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Proje Tanımı	1
1.2 Kompozit Malzemeler Hakkında Genel Bilgi	3
1.2.1 Kompozit Malzeme Türleri	4
1.2.2 Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışları	6
1.2.3 Kompozit Malzemelerin Özellikleri	7
1.2.4 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	8
1.2.5 Kompozit Malzeme Yapımında Temel Maddeler	9
1.2.5.1 Reçineler ve Özellikleri	10
1.2.5.2 Elyaf Çeşitleri ve Özellikleri	11
1.2.6 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	16
2. MODEL	17
2.1 Model Hakkında Genel Bilgi	17
2.2 Modelin İmalatı	19
2.2.1 Prepreg Malzeme	19
2.2.2 Plakanın Katmanlarının Döşenmesi	20
2.2.3 Panellerin Bağlantılarının Yapılması	21
3. ABAQUS PROGRAMI KULLANILARAK MODELİN TASARLANMASI	22
4. YAPILAN DENEYLER VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR	33
4.1 Deney Düzeneğinin Oluşturulması	33
4.1.1 Deneyde Kullanılan Cihazlar	34
4.2 Deneyin Gerçekleştirilmesi	35
4.3 Deney Sonuçları	36

5. ABAQUS’TE YAPILAN ANALİZLER	40
6. FARKLI KALINLIKLARDA TASARLANAN KOMPOZİT VE ALUMİNYUM PLAKALARIN ANALİZLERİ	44
6.1 Modelleme	44
6.2 Analizlerin Çözümleri	44
6.3 Analizlerden Elde Edilen Sonuçlar	48
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	53
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	57

KISALTMALAR

E_m : Matrisin elastisite modülü

E_f : Liflerin elastisite modülü

V_f : Liflerin hacimsel oranı

E_k : Kompozitin paralel doğrultudaki bileşke elastisite modülü

T_f : Liflerin çekme mukavemeti

T_m : Liflerin koptuğu andaki şekil değiştirme için matristeki gerilme

T_k : Kompozitin çekme mukavemeti

SG #1: Bir numaralı strain gage

SG #2: İki numaralı strain gage

SG #3: Üç numaralı strain gage

SG #4: Dört numaralı strain gage

SG #5: Beş numaralı strain gage

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1: Pekiştirici liflerin özellikleri.....	4
Tablo 1.2: Lifli kompozitlerin özellikleri.....	5
Tablo 1.3: Cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri.....	12
Tablo 1.4: Karbon ve grafit elyafların karşılaştırılması.....	14
Tablo 1.5: Farklı elyaflardan oluşan kompozitlerin birim maliyetleri.....	15
Tablo 2.1: Perçinin fiziksel özellikleri.....	18
Tablo 2.2: Prepreg malzemelerin teknik özellikleri.....	20
Tablo 4.1: Kuvvetler altında strain gagelerden okunan gerinimlerin microstrain cinsinden değerleri.....	37
Tablo 5.1: Kuvvetler altında analiz sonucunda nodlardaki gerinimlerin mikrostrain cinsinden değerleri.....	43
Tablo 6.1: 2,8 mm kalınlıkta alüminyum ve kompozit plakalarda perçin yuvasında alınan mikrostrain cinsinden gerinim değerleri.....	48
Tablo 6.2: 5,6 mm kalınlıkta alüminyum ve kompozit plakalarda perçin yuvasında alınan mikrostrain cinsinden gerinim değerleri.....	50
Tablo 6.3: 8,4 mm kalınlıkta alüminyum ve kompozit plakalarda perçin yuvasında alınan mikrostrain cinsinden gerinim değerleri.....	51
Tablo 7.1: Elde edilen gerinim değerlerinin karşılaştırması.....	54

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Kompozit malzemelerin donatılı veya pekiştirilmiş türüne göre üç grubu....	3
Şekil 1.2: Ek şekil değiştirme hali (paralel lifler) ve eş gerilme hali (dik lifler).....	6
Şekil 1.3: Elastisite modülünün kompozitin bileşim oranı ile değişimi (rastgele lifler)...	6
Şekil 1.4: Kompozit malzemelerin sınıfları.....	7
Şekil 1.5: Elyaf ve matris malzemelerin gerilme uzama diyagramı.....	15
Şekil 2.1: Tasarlanan model.....	17
Şekil 2.2: Tasarlanan panel.....	18
Şekil 2.3: Tek yönlü ve çok yönlü takviye malzemeli prepreg malzeme.....	19
Şekil 2.4: Plaka üzerinde X, Y, Z oryantasyonunun gösterimi.....	21
Şekil 3.1: Part modülünde plakanın oluşturulması.....	22
Şekil 3.2: Part modülünde perçinlerin oluşturulması.....	23
Şekil 3.3: Property modülünde plakaların malzeme özelliklerinin oluşturulması.....	24
Şekil 3.4: Property modülünde perçinlerin malzeme özelliklerinin oluşturulması.....	25
Şekil 3.5: Property modülünde perçinlerin section özelliklerinin oluşturulması.....	26
Şekil 3.6: Property modülünde plakaların section özelliklerinin oluşturulması.....	26
Şekil 3.7: Mesh modülünde plakaların mesh özelliklerinin oluşturulması.....	27
Şekil 3.8: Mesh modülünde plakaların parçalarında meshlerin oluşturulması.....	27
Şekil 3.9: Mesh modülünde perçinin parçalarında meshlerin oluşturulması.....	28
Şekil 3.10: Assembly modülünde modelin montajlı hali.....	28
Şekil 3.11: Step modülünde koşul adımları oluşturma.....	29
Şekil 3.12: Interaction modülünde temasların oluşturulması.....	30
Şekil 3.13: Load modülünde kuvvetlerin oluşturulması.....	31
Şekil 3.14: Load modülünde sınır şartlarının oluşturulması.....	31
Şekil 3.15: Job modülünde analizin yapılması.....	32
Şekil 4.1: Model ve üzerindeki strain gagelerin yerleşimi.....	33
Şekil 4.2: Switch box CSW-5A ve strain metre TC-31K.....	34
Şekil 4.3: Oluşturulan deney düzeneği.....	35
Şekil 4.4: Perçinlerin kesilmesiyle kopan panel bağlantısı.....	36
Şekil 4.5: SG #0'da çeşitli yükler altında kuvvet - gerinim grafiği.....	37
Şekil 4.6: SG #1'de çeşitli yükler altında kuvvet - gerinim grafiği.....	38
Şekil 4.7: SG #2'de çeşitli yükler altında kuvvet - gerinim grafiği.....	38
Şekil 4.8: SG #3'te çeşitli yükler altında kuvvet - gerinim grafiği.....	39
Şekil 4.9: SG #4'te çeşitli yükler altında kuvvet - gerinim grafiği.....	39
Şekil 5.1: 2500 N çekme kuvveti altında plakalar.....	40
Şekil 5.2: 5000 N çekme kuvveti altında plakalar.....	41
Şekil 5.3: 7500 N çekme kuvveti altında plakalar.....	41

Şekil 5.4: 10000 N çekme kuvveti altında plakalar.....	42
Şekil 5.5: 12500 N çekme kuvveti altında plakalar.....	42
Şekil 6.1: 2,8 mm kalınlığındaki kompozit plakalar.....	45
Şekil 6.2: 2,8 mm kalınlığındaki alümiyum plakalar.....	45
Şekil 6.3: 5,4 mm kalınlığındaki kompozit plakalar.....	46
Şekil 6.4: 5,4 mm kalınlığındaki alümiyum plakalar.....	46
Şekil 6.5: 8,2 mm kalınlığındaki kompozit plakalar.....	47
Şekil 6.6: 8,2 mm kalınlığındaki alümiyum plakalar.....	47
Şekil 6.7: 2,8 mm kalınlığındaki kompozit plakanın perçin yuvasındaki mikrostrain cinsinden gerinim dağılımı.....	49
Şekil 6.8: 2,8 mm kalınlığındaki alümiyum plakanın perçin yuvasındaki mikrostrain cinsinden gerinim dağılımı.....	49
Şekil 6.9: 5,6 mm kalınlığındaki kompozit plakanın perçin yuvasındaki mikrostrain cinsinden gerinim dağılımı.....	50
Şekil 6.10: 5,6 mm kalınlığındaki alümiyum plakanın perçin yuvasındaki mikrostrain cinsinden gerinim dağılımı.....	51
Şekil 6.11: 8,4 mm kalınlığındaki kompozit plakanın perçin yuvasındaki mikrostrain cinsinden gerinim dağılımı.....	52
Şekil 6.12: 8,4 mm kalınlığındaki alümiyum plakanın perçin yuvasındaki mikrostrain cinsinden gerinim dağılımı.....	52

KOMPOZİT PANEL BAĞLANTILARINDA HASAR ANALİZİ

ÖZET

Yapılan bu çalışmada amaç günümüzde kullanımı her alanda artmış olan kompozit malzemedan yapılmış olan panel bağlantılarında hasar analizi uygulamasını gerçekleştirmek ve bu analiz sonucunda kompozit panellerin bağlantı noktalarının davranışlarını gözlemek ve metallerle davranışını karşılaştırmaktır. Analizin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle elimizde bir model olması gerekmektedir. Bu model bilgisayar ortamında ABAQUS programı ile hazırlanmış olup elde edilmiştir. Ayrıca modelin bire bir üretimi de gerçekleştirilmiştir. Epoksi ve cam elyaftan oluşan e-glass prepreg malzemedan üretilen iki adet kompozit eşit büyüklükteki kompozit plaka dokuz adet alüminyum perçin ile bağlanmıştır. Model çeşitli yüklerde çekme testlerine tabi tutularak malzemenin davranışı gözlenmiştir. Kompozit malzemeler lineer olmayan davranışlar gösteren malzemeler olduklarından çözüm, lineer olmayan çözümleri kolaylıkla gerçekleştirebilen ABAQUS programında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar deneylerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda deneyden ve ABAQUS'te yapılan analizden elde edilen sonuçların yakınlığı gösterilmiştir. Plakaların perçin yuvalarının derinlik boyunca perçinlerin eğilmesi etkisiyle nasıl davranış gösterdiğini görmek ve bu davranışı metallerle karşılaştırmak için farklı kalınlıklardaki kompozit panellere ABAQUS ortamında çekme kuvvetleri uygulanarak analizler yapılmıştır. Aynı kalınlıklardaki alüminyum panellere de aynı kuvvetler etkilerek belli aralıklarla gerinim değerleri ölçülmüş ve gerinim gradyan grafikleri çıkarılmıştır. Kompozit ve alüminyum plakaların aralarındaki davranış farklılıkları izlenmiştir. Perçinlerin eğilmesi ile oluşan ezilme sonucu en üst tabakadaki gerinim yığılmasının kompozitlerde metallere oranla daha fazla olduğu gösterilmiştir.

DAMAGE ANALYSIS OF CONNECTED COMPOSITE PANELS

SUMMARY

In this research, damage analysis of connections of panels made of composite materials is made, behaviour of the connections are observed and they are compared with metals. The number of sectors that composite materials are used increases everyday due to the better material characteristics. The sample mechanism needed to realize the analysis is modeled on ABAQUS. Composite materials have non-linear properties. According to this, ABAQUS which is capable of solving the non-linear problems is the suitable program for this analysis. The model which is made of epoxy – glass prepreg material is also manufactured. The model consists of two similar composite panels connected with nine aluminium rivets. The model is tested under different loads and the behaviour of the material is observed under these loads. The solutions obtained from the experiment are compared with the solutions obtained from the analysis made with ABAQUS. It is observed that the solutions obtained from the experiment and the solutions obtained from the analysis made with ABAQUS are close to each other. Also the behaviour of the composite and aluminium panels through the rivet holes loaded same forces and in same thicknesses are compared with each other. The analysis is made in three different thicknesses. The strain concentration on top layers caused by the bendings of the rivets is shown with graphics.

1.GİRİŞ

1.1 Proje Tanımı

Kompozit malzemeler uçak ve uzay sanayisinde, su altı araçları ve otomotiv gibi sektörlerde artan bir şekilde kullanılmaktadır. Mühendislik ürünlerindeki bu artan kullanım yapısal analiz zorluğunu da beraberinde getirmiştir. Kompozit malzemelerden yapılmış olan parçalar metallere oranla birçok avantaj getirmekle beraber tasarım ve analiz açısından kompleks ve zorlu problemler ortaya çıkarmaktadırlar. Kompozit malzemelerin potansiyel avantajlarının tümünü kullanabilmek için doğru bir matematik model tasarım metoduna ihtiyaç vardır.

Kompozit malzemelerden yapılacak parça tasarımı ve analizi için anizotropik elastisite bilgisine ihtiyaç vardır. İzotrop malzemelerin aksine anizotropik malzemeler karmaşık mekanik davranışlar göstermektedir. Anizotropik ve izotropik malzemelerden yapılmış iki ayrı dikdörtgen bloğa kesme kuvvetleri etkideğinde izotropik blokta sadece kesme gerinimi oluşmakta, normal gerinim oluşmamaktadır ancak aynı kesme kuvvetinin uygulandığı anizotropik blokta kesme geriniminin yanı sıra normal gerinim de oluşmaktadır.

Kompozit malzemedan yapılmış parçaların analizinden kesin sonuç alma ihtimali çok düşüktür. Çeşitli yöntemlerle yapılan analizlerle yaklaşık sonuçlar ortaya çıkarılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi en yaklaşık ve doğru sonuçların alındığı yöntem olarak öne çıkmaktadır. Fiziksel bir olaya karşılık hazırlanan matematik modelinin en doğru sonuçları verebilmesi için başlangıç koşulları, kuvvetler, temas yükleri gibi tüm detaylar mümkün olan en doğru şekilde modele işlenmelidir. Malzeme özelliklerinden kaynaklanacak kaçınılmaz farklılık bu şekilde en aza indirilerek elde edilen sonuçların en yaklaşık sonuçlar olmasına çalışılmaktadır.

Bu çalışmada amaç kompozit malzemelerde hasar analizini en doğru şekilde gerçekleştirmek ve bunun doğruluğunu göstermektir.

Analizin yapılabilmesi için öncelikle bir modele ihtiyacımız vardır. Model olarak kompozit malzemedan yapılmış iki adet plakanın perçinlerle bağlandığı bir sistem

düşünülmüştür. Bu model üretilerek bire bir özelliklerini taşıyan matematiksel modelinin de ABAQUS programında oluşturulması düşünülmektedir.

Üretilen plakalar çeşitli yükler altında çekme kuvvetlerine tabi tutulacak ve malzemenin nasıl davranış gösterdiği izlenecektir.

ABAQUS'te oluşturulan model de deneyde gerçekleştirilen kuvvet yüklemelerine mağruz bırakılarak analizi yapılacak ve çözümü alınacaktır. Testlerden elde edilen ve bilgisayarda yapılan analizden elde edilen sonuçlar karşılaştırılacaktır.

Perçin yuvalarındaki gerinim dağılımları çıkarılacak ve en üst tabakadaki gerinim yığılması alüminyum plakalarla karşılaştırılacak, farklılıklar ve nedeni gösterilecektir.

1.2 Kompozit Malzemeler Hakkında Genel Bilgi

Temel olarak iki veya daha fazla malzemenin bir arada kullanılmasıyla oluşturulan ve meydana geldiği malzemelerden farklı özelliklere sahip yeni tür malzemelere kompozit malzemeler denmektedir. Cam elyafı poliyester levhalar, çelik donatılı beton elemanlar, otomobil lastikleri ve seramik metal karışımı olan sermentler bunlara örnektir.

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

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

Bu faz iki tür bileşimle sağlanabilir:

1- Mikroskobik

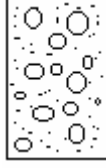
2- Makroskobik

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

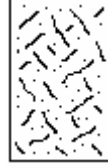
Makroskobik bileşim: Boyutları 0,1 mm'nin üzerinde gözle görülebilirler. Sonradan bir araya getirilerek üstün özelliklerdeki kütleleri oluştururlar.

Kompozit malzemeler donatılı veya pekiştirilmiş türüne göre üç gruba ayrılır:

Taneli kompozitler



Lifli kompozitler



Tabakalı kompozitler



Şekil 1.1: Kompozit malzemelerin donatılı veya pekiştirilmiş türüne göre üç grubu

Lifli ve tabakalı kompozitlerin sağladığı özelliklerdeki artış, taneli kompozitlere göre daha yüksektir. Taneli kompozitler için en önemli örnek betondur. Sert tanelilerin sünek bir malzemeyle birleştirilip aglomera haline getirilen kompozitlere diğer bir örnek de asfalt betonudur.

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

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

Cam lifli polyesterlerin mukavemeti ve elastisite modülü düşüktür. Ancak diğerlerine göre daha ucuz ve kolay uygulandığından deniz tekneleri, oto, spor malzemeleri ve yapı elemanları üretiminde çok yaygın olarak kullanılır.

1.2.1 Kompozit Malzeme Türleri

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

Pekiştirici liflerin özellikleri tabloda verilmiştir

Tablo 1.1: Pekiştirici liflerin özellikleri

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

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

Tablo 1.2 : Lifli kompozitlerin özellikleri

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

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

Bir metalik fazın bazı takviye malzemeleri ile eritme vakum emdirme, sıcak presleme ve difzyon kaynağı gibi ileri teknikler uygulanarak MMC ler elde edilirler. MMC ler daha çok uzay ve havacılık alanlarında, mesela uzay teleskobu, platform taşıyıcı parçalar, uzay haberleşme cihazlarının reflektör ve destek parçaları vs. yerlerde kullanılır.

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

Bu amaçla yapısal ve fonksiyonel nitelikli yüksek teknoloji seramikleri kullanılmaktadır. Başlıcaları Al₂O₃, SiC, Si₃N₄, B₄C, CbN, TiC, TiB, TiN, AlN' dir. Bu bileşikler değişik yapılarda olup amaca göre bir yada bir kaçını beraber kullanılarak CMC ler elde edilir. Sandviç zırhlar, çeşitli askeri amaçlı parçalar imali ile uzay araçları bu ürünlerin başlıca kullanım yerleridir.

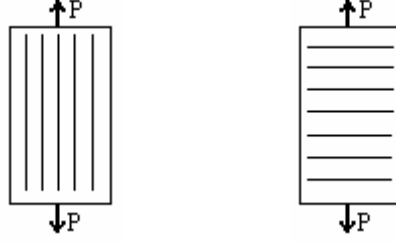
1.2.2 Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışları

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

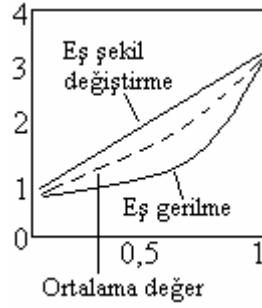
Liflerle kuvvet birbirine paralel ise liflerle matris aynı miktarda şekil değiştirir. Buna eş şekil değiştirme hali denir. Matrisin elastisite modülü E_m, liflerini elastisite modülü E_f ve liflerin hacimsel oranı V_f ise kompozitin paralel doğrultudaki bileşke elastisite modülü

$$E_k = E_f * V_f + V_f (1 - E_m) \quad [1.1]$$

olur.



Şekil 1.2: Ek şekil değiştirme hali (paralel lifler) ve eş gerilme hali (dik lifler)



Şekil 1.3: Elastisite modülünün kompozitin bileşim oranı ile değişimi (rastgele lifler)

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

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

$$E_k = \frac{E_m E_f}{E_m V_f + (1 - V_f) E_f} \quad [1.2]$$

E_f , T_f liflerin çekme mukavemeti, T_m liflerin koptuğu andaki şekil değiştirme için matristeki gerilme ve V_f liflerin hacimsel oranı ile kompozitin çekme mukavemeti.

$$T_k = T_f V_f + (1 - V_f) T_m \quad [1.3]$$

olur.

1.2.3 Kompozit Malzemelerin Özellikleri

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

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

3-Yüksek Mekanik Özellikler: Çekme, basma, darbe, yorulma dayanımları çok yüksektir.

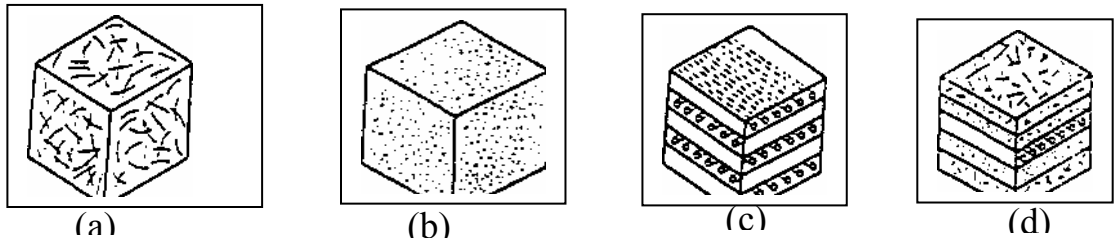
4-Yüksek Kimyasal Direnç: Kompozitler birçok kimyasal maddelere, bu arada asitler, alkaliler, çözücüler ve açık hava şartlarına karşı son derece direnç gösterirler. Kimya tesisleri için çok kullanılan malzemelerdir.

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

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

1.2.4 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

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



Şekil 1.4: Kompozit malzemelerin sınıfları

- Elyafli kompozitler
- Parçacıklı kompozitler
- Tabakalı kompozitler
- Karma kompozitler

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

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

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

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

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

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

1.2.5 Kompozit Malzeme Yapımında Temel Maddeler

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

Kompozit yapılarda yükü taşıyan elyafların fonksiyonlarını yerine getirmeleri açısından matrisin mekanik özelliklerinin rolü çok büyüktür. Örneğin matris malzemesi olmaksızın bir elyaf demeti düşünüldüğünde yük bir yada birkaç elyaf tarafından taşınacaktır. Matrisin varlığı ise yükün tüm elyaflara eşit olarak dağılımını sağlayacaktır. Kesme yükü altındaki bir gerilmeye dayanım, elyaflarla matris arasında iyi bir yapışma ve matrisin yüksek kesme mukavemeti özelliklerini gerektirir. Elyaf yönlenmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris elyafa göre daha zayıf ve daha esnektir. Bu özellik kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur.

Matrisin kesme mukavemeti ve matris ile elyaf arası bağ kuvvetleri çok yüksek ise elyaf yada matriste oluşacak bir çatlakın yön değiştirmeksizin ilerlemesi mümkündür. Bu durumda kompozit gevrek bir malzeme gibi davrandığından kopma yüzeyi temiz ve parlak bir yapı gösterir. Eğer bağ mukavemeti çok düşükse elyaflar boşluktaki bir elyaf demeti gibi davranır ve kompozit zayıflar. Orta seviyede bir bağ mukavemetinde ise elyaf veya matristen başlayan enlemesine doğrultuda bir çatlak elyaf matris ara yüzeyine

dönüp elyaf doğrultusunda ilerleyebilir. Bu durumda kompozit sünek malzemelerin kopması gibi lifli bir yüzey sergiler.

1.2.5.1 Reçineler ve Özellikleri

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

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

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

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

1.2.5.2 Elyaf Çeşitleri ve Özellikleri

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

elyafların yüksek performanslı mühendislik malzemeleri olmalarının nedenleri aşağıda verilen özelliklere de bağlıdır.

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

Cam elyaflar: Cam elyaflar, sıradan bir şişe camından yüksek saflıktaki kuartz camına kadar pek çok tipte imal edilirler. Cam amorf bir malzemedir ve polimerik yapıdadır. Üç boyutlu moleküler yapıda, bir silisyum atomu dört oksijen atomu ile çevrilmiştir. Silisyum metalik olmayan hafif bir malzemedir, doğada genellikle oksijenle birlikte silis (SiO_2) şeklinde bulunur. Cam eldesi için silis kumu, katkı malzemeleri ile birlikte kuru halde iken $1260\text{ }^\circ\text{C}$ civarına ısıtılır ve soğumaya bırakıldığında sert bir yapı elde edilir. Cam elyafların bazı özellikleri şu şekilde özetlenebilir.

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

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

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

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

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

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

Tablo 1.3 : Cam elyafların mekanik özellikleri ve bileşimleri

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

Bor elyaflar: Bor elyaflar aslında kendi içlerinde kompozit yapıdadırlar. Çekirdek olarak adlandırılan ince bir flamanın üzerine bor kaplanarak imal edilirler. Çekirdek genellikle Tungstendir. Karbon çekirdek de kullanılabilir ancak bu yeni bir uygulamadır. Bor-Tungsten elyaflar, sıcak tungsten flamanın hidrojen ve bortriklorür (BCl₃) gazından geçirilmesi ile üretilirler. Böylece Tungsten flamanın dışında bor plaka oluşur. Bor elyaflar değişik çaplarda üretilirler (0.05mm ila 0.2mm). Tungsten çekirdek ise daima 0.01 mm çapında üretilir. Bor elyaflar yüksek çekme mukavemetine ve elastik modüle sahiptirler. Çekme mukavemetleri 2758 Mpa ila 3447 Mpa'dır. Elastite modülü ise 400 Gpa'dır. Bu değer S camının elastite modülünden beş kat fazladır. Üstün mekanik özelliklere sahip olan bor elyaflar, uçak yapılarında kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir. Ancak, maliyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle, son yıllarda yerlerini karbon elyaflara bırakmışlardır. Bor elyafların Silisyum Karbür (SiC) veya Bor Karbür (B₄C) kaplanmasıyla yüksek sıcaklıklara dayanımı artar. Özellikle bor karbür kaplanması ile çekme mukavemeti önemli ölçüde artırılabilir. Bor elyafların erime sıcaklıkları 2040°C civarındadır.

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

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

Grafit (Karbon) elyaflar: Karbon, yoğunluğu 2.268 gr/cm³ olan kristal yapıda bir malzemedir. Karbon elyaflar cam elyaflardan daha sonra gelişen ve çok yaygın olarak kullanılan bir elyaf grubudur. Hem karbon hemde grafit elyaflar aynı esaslı malzemenin üretilirler. Bu malzemeler hammadde olarak bilinirler. Karbon elyafların üretiminde üç adet hammadde mevcuttur. Bunlardan ilki rayondur (suni ipek). Bu hammadde inert bir atmosferde 1000 – 3000 °C civarına ısıtılır ve aynı zamanda çekme kuvveti uygulanır. Bu işlem mukavemet ve tokluk sağlar. Ancak yüksek maliyet nedeniyle rayon elyaflar uygun değildirler.

Elyaf imalatında genellikle rayonun yerine poliakrilonitril (PAN) kullanılır. PAN bazlı elyaflar 2413 ila 3102 Mpa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler ve maliyetleri düşüktür. Petrolün rafinesi ile elde edilen zift bazlı elyaflar ise 2069 Mpa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler. Mekanik özellikleri PAN bazlı elyaflar kadar iyi değildir ancak maliyetleri düşüktür.

Tablo 1.4 : Karbon ve grafit elyafların karşılaştırılması

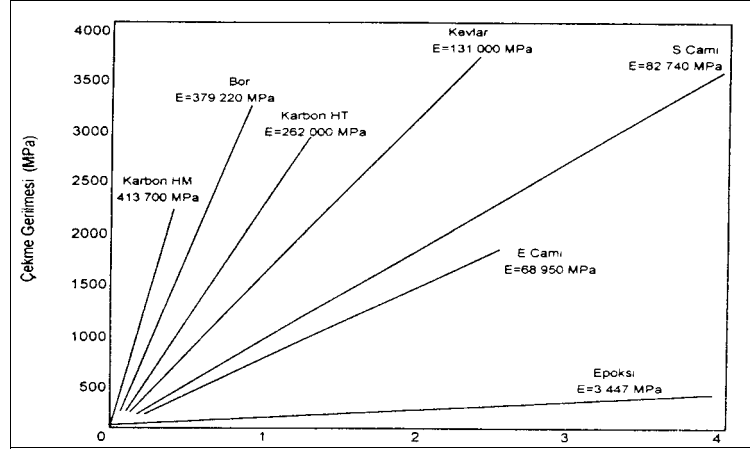
Özellik	Grafit	Karbon
Saflık (%)	99	93-95
İşlem Sıcaklığı (°C)	> 1700	< 1700
Elastite Modülü (GPa)	>345	<345

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

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

Her iki kevlar da 2344 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptir ve kopma uzaması %1.8'dir. Kevlar 49'un elastik modülü kevlar 29'unkinden iki kat fazladır. Kevlar elyafların yoğunluğu cam ve grafit elyafların yoğunluklarından daha düşüktür. Kevlar49/Epoksi kompozitlerinin darbe mukavemeti grafit epoksi kompozitlere oranla yedi kat, bor/epoksi kompozitlere oranla dört kat daha iyidir. Uçak yapılarında, düşük basma mukavemetleri nedeniyle, karbon elyaflarla birlikte hibrid kompozit olarak, kumanda

yüzeylerinde kullanılmaktadırlar. Aramid elyaflar elektriksel iletkenliğe sahip değildirler. Basma mukavemetlerinin iyi olmamasının yanısıra kevlar epoksi kompozitlerinin nem absorbe etme özellikleri kötüdür. Şekilde farklı elyaf malzemelerin ve epoksi matrisin gerilme-uzama diyagramı verilmiştir. Tabloda ise farklı elyaf malzemelerin epoksi matris ile oluşturduğu yarı mamul tabaka maliyetleri, E camının maliyeti baz alınarak verilmektedir.



Şekil 1.5: Elyaf ve matris malzemelerin gerilme uzama diyagramı

Tablo 1.5 : Farklı elyaflardan oluşan kompozitlerin birim maliyetleri

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

1.2.6 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

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 kompozit malzemelerden yapılan ürünlerdir.

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

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

Silah, Roket Ve Diğer Mühimmat Sanayisinde: Kompozit 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.

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

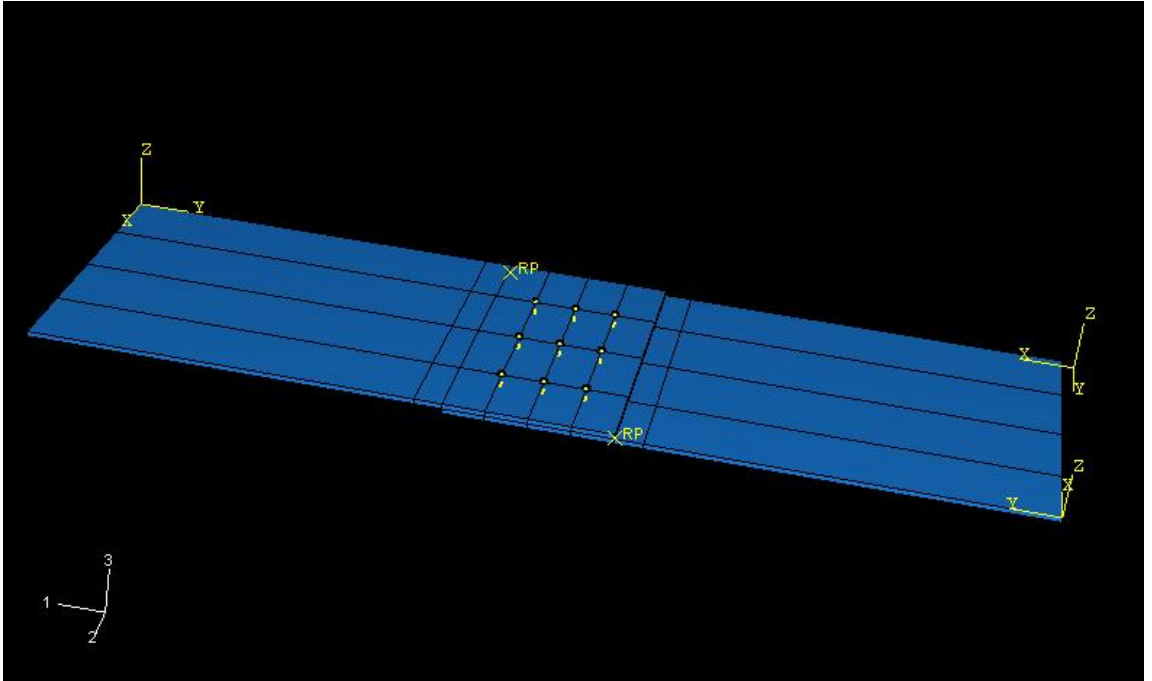
Mühimmat üretiminde de kompozit malzemeler kısmen kullanılmaktadır. M19 A/T mayınında gövde ABS reçine ve cam elyaf parçacıklarından, bu mayına ait küçük ve büyük belleville yayları cam doku ve fenolik reçineden yapılmışlardır. 155mm lik ICM mühimmatı gövdelerinde cam elyafi epoksi sargı vardır. Miğfer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

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.

2. MODEL

2.1 Model Hakkında Genel Bilgi

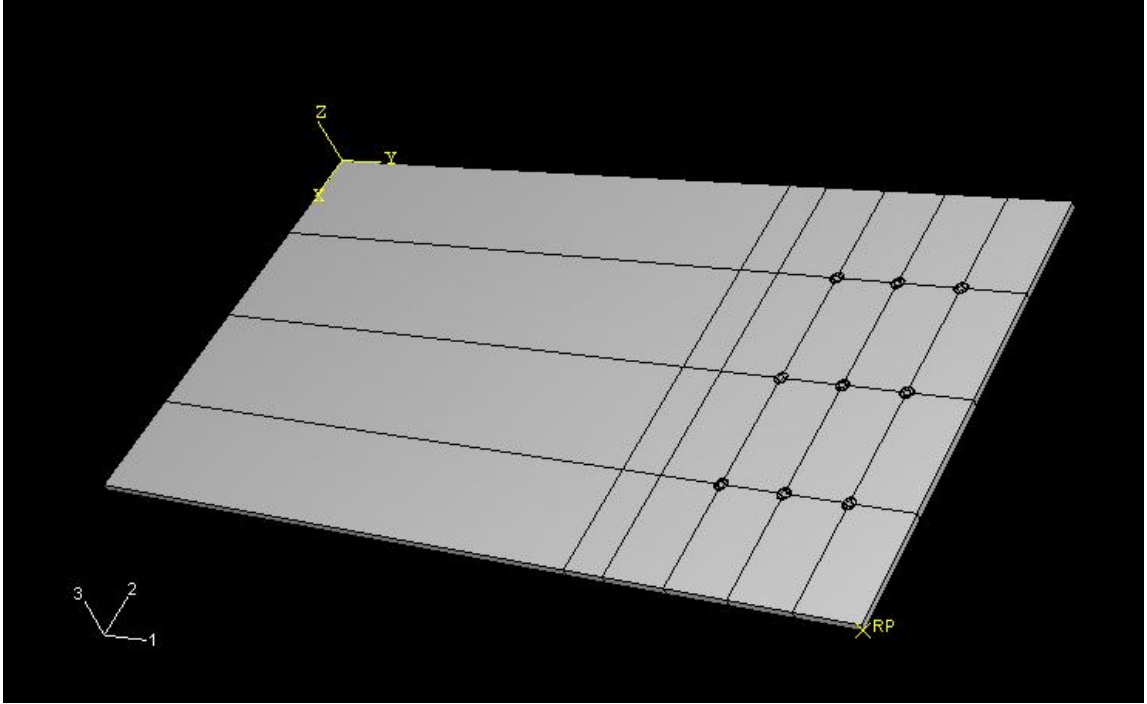
Analizin yapılacağı model aynı boyutta iki kompozit panelin üç sıra halinde üçerli toplam dokuz perçinle bağlanmış şeklindedir.



Şekil 2.1: Tasarlanan model

Bağlanan paneller bir birinin aynı ölçülerinde olup boyu 320 mm, genişliği 173 mm ve kalınlığı 2,8 mm'dir. Plakaların üst üste çakıştığı mesafe 92 mm'dir. Perçinler panellerin uzun boyunca panellerin kenarlarından 41,5 mm mesafeye monte edilmiştir. Yine panellerin uzun boyunca orta perçinlerle kenar perçinlerinin arasındaki mesafe 45 mm'dir. Panellerin üst üste çakıştığı 92 mm'lik mesafe dört eşit parçaya bölünerek üç perçin sırasının kendi aralarındaki mesafe ve panel kenarlarından uzaklıkları 23 mm'dir.

Panellerin malzemesi epoksi cam e-glass prepreg tabakalardan meydana gelen kompozit malzemedir. Bu malzemenin kodu BMS 8-79 style 1581 olarak geçmektedir. Plakalar toplam 10 tabakadan oluşmaktadır.



Şekil 2.2: Tasarlanan panel

Perçinlerin malzemesi alüminyumdur. Kullanılan perçinlerin kodu BACR15BB3D6'dır.

Tablo 2.1: Perçinin fiziksel özellikleri

Uzunluk	Minimum 0.365 inç ve maksimum 0.385 inç
Perçin Başı Yüksekliği	Minimum 0.040 inç ve maksimum 0.050 inç
Bağlantı Çapı	Minimum 0.0938 inç ve maksimum 0.0963 inç
Perçin Başı Çapı	Minimum 0.186 inç ve maksimum 0.196 inç
Malzeme	Alüminyum alaşım 2017

Modelin tasarım aşamasında panellerin bağlantısı yapıştırıcı olarak değil de perçin bağlantı olarak düşünülmüştür. Projedeki amaç çeşitli kuvvetlerde çekme kuvvetlerinde kompozit malzemenin gerinimlerini ve nasıl davrandığını görmek olduğundan

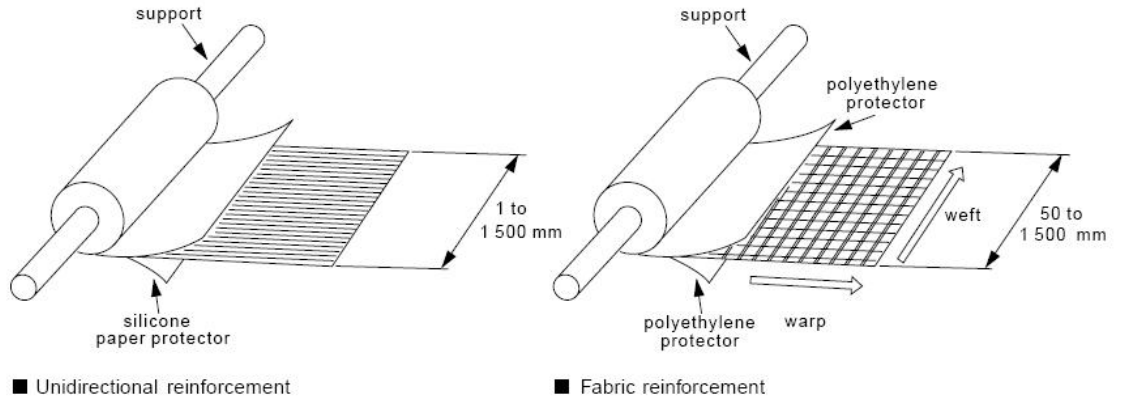
bağlantının hemen kopmayacağı bir düzenek yaratmaktır. Bu sayede panel bağlantısı kopmadan daha çeşitli ve yüksek kuvvetlerde deney yapılarak değişimler izlenebilecektir. Perçinler panelleri bağlamak üzere çakma kuvveti verilerek bir ön gerilme yaratılmaktadır.

2.2 Modelin İmalatı

Plakalar epoksi cam e-glass prepreg on adet tabakanın yapıştırılmasıyla imal edilmiştir.

2.2.1 Prepreg Malzeme

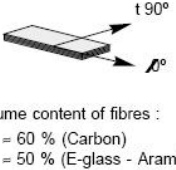


Matris ve takviye elyaf malzemenin bir arada bulunduğu ve kullanıma hazır olduğu tabaka halinde malzemelerdir. Takviye malzemesinin tek yönlü döşendiği veya kumaş şeklinde çok yönlü döşendiği tipleri mevcuttur.



Şekil 2.3: Tek yönlü ve çok yönlü takviye malzemeli prepreg malzeme

Prepreg malzemelerin özellikleri takviye malzemeleri olan elyafların yönlerine göre değişmektedir.

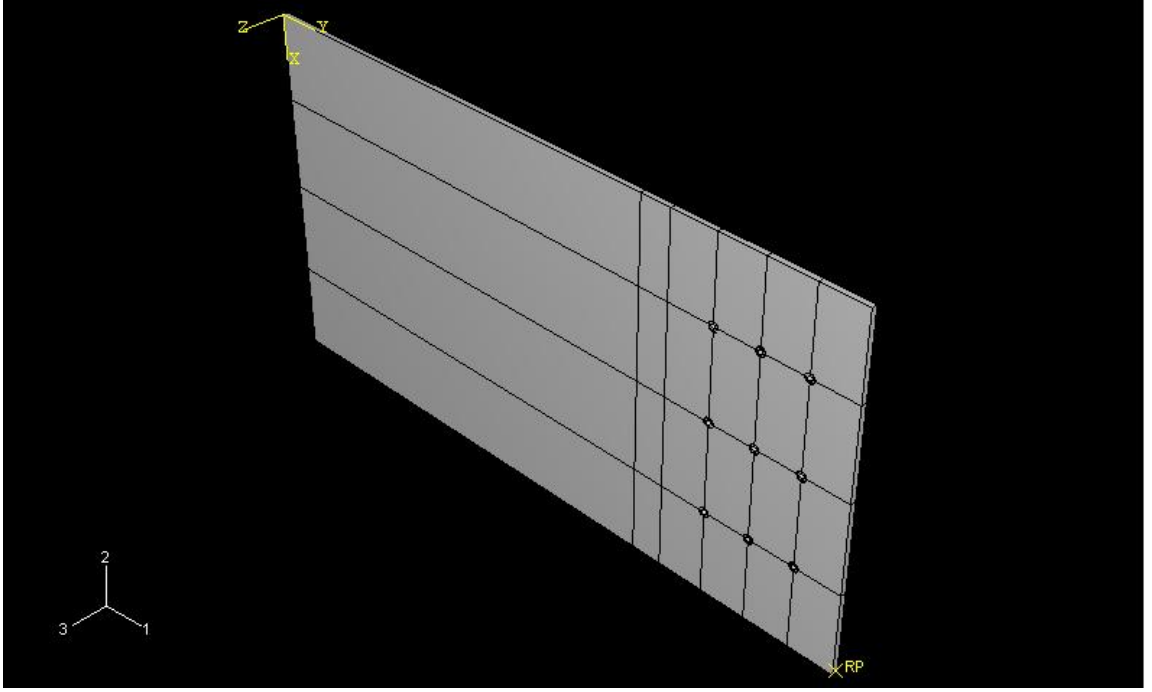
Tablo 2.2: Prepreg malzemelerin teknik özellikleri

		FIBRES									
		UNITS	E-GLASS		ARAMID		HIGH STRENGTH CARBON		INTERMEDIATE MODULUS CARBON		
			UD	Fabric	UD	Fabric	UD	Fabric	UD	Fabric	
 <p>Volume content of fibres : = 60 % (Carbon) = 50 % (E-glass - Aramid)</p>	Tensile	σ / III	MPa	1100	600	1100	500	2000	800	2400	900
		$\sigma_t \text{ III}$	MPa	35	550	35	450	80	750	80	850
		E / III	GPa	43	20	60	30	130	70	170	90
		$E_t \text{ III}$	GPa	8	19	8	30	9	65	9	90
		Poisson's ratio ν		0.28	0.13	0.34	0.2	0.25	0.05	0.27	0.05
 <p>Compression</p>		σ / III	MPa	900	550	250	150	1300	700	1600	800
		$\sigma_t \text{ III}$	MPa	150	500	150	150	250	650	250	750
		E / III	GPa	42	17	75	31	115	60	150	80
		$E_t \text{ III}$	GPa	10	16	5.5	30	10	55	11	75
 <p>Flexure</p>		σ / III	MPa	1200	700	550	400	1800	1000	1400	1200
		E / III	GPa	42	20	40	25	120	65	140	75

2.2.2 Plakanın Katmanlarının Döşenmesi

Tek yönlü takviye malzemeli 10 adet e-glass epoksi cam prepreg tabaka şekilde görülen X doğrultusu 0° alındığı düşünülerek birinci tabaka en üste gelecek şekilde şu açılarla döşenmiştir.

1. tabaka $\Rightarrow 90^\circ$
2. tabaka $\Rightarrow -45^\circ$
3. tabaka $\Rightarrow 0^\circ$
4. tabaka $\Rightarrow +45^\circ$
5. tabaka $\Rightarrow 90^\circ$
6. tabaka $\Rightarrow -45^\circ$
7. tabaka $\Rightarrow 0^\circ$
8. tabaka $\Rightarrow +45^\circ$
9. tabaka $\Rightarrow 90^\circ$
10. tabaka $\Rightarrow -45^\circ$



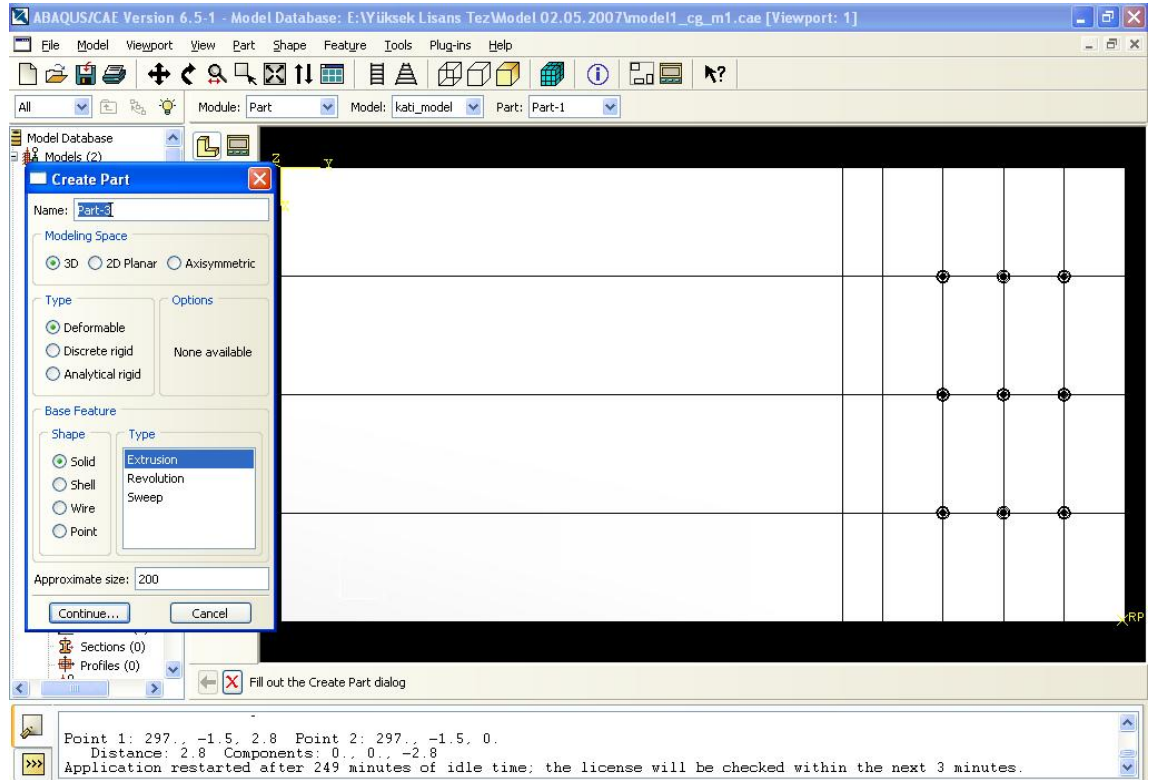
Şekil 2.4: Plaka üzerinde X, Y, Z orientasyonunun gösterimi

2.2.3 Panellerin Bağlantılarının Yapılması

Bir bütün olarak üretilen panel daha sonra iki eşit parçaya kesilmiştir. Panel bağlantısı yapılırken üst kısma gelecek olan plaka verilen açılardaki 1. tabaka en üstte kalacak şekilde, altta kalacak plakada ise 1. tabaka en altta kalacak şekilde tutulmuştur. Plakalara perçinlerin geçeceği yerlerine delikler açılmıştır. Perçinler bu deliklere yaklaşık 100 Mpa'lık kuvvetlerle çakılmıştır.

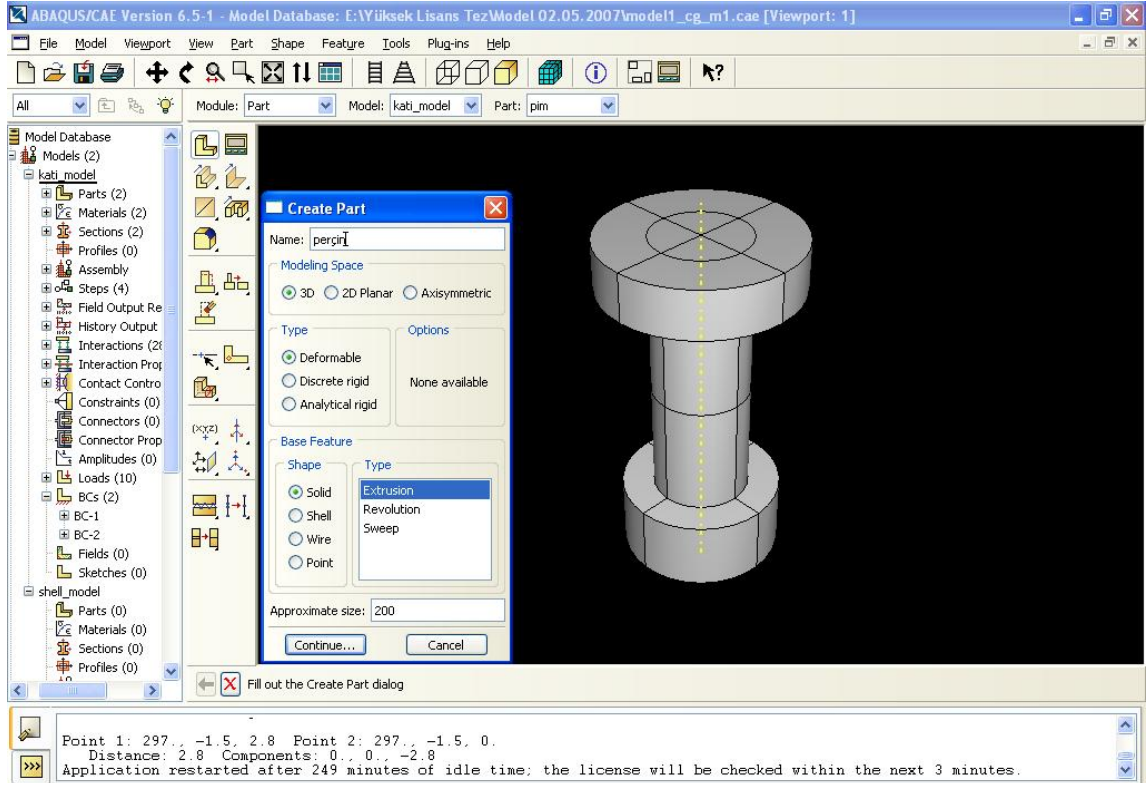
3. ABAQUS PROGRAMI KULLANILARAK MODELİN TASARLANMASI

Öncelikle part modülünden yeni parça oluşturmakla başlanır. “Create part” komutundan 3D deformable seçilerek parçanın tüm büyüklükleri girilerek plaka çizilir ve oluşturulur.



Şekil 3.1: Part modülünde plakanın oluşturulması

Yine “create part” komutundan girilerek 3D deformable seçilerek tüm büyüklükleri girilen ve şekli çizilen perçin oluşturulur.

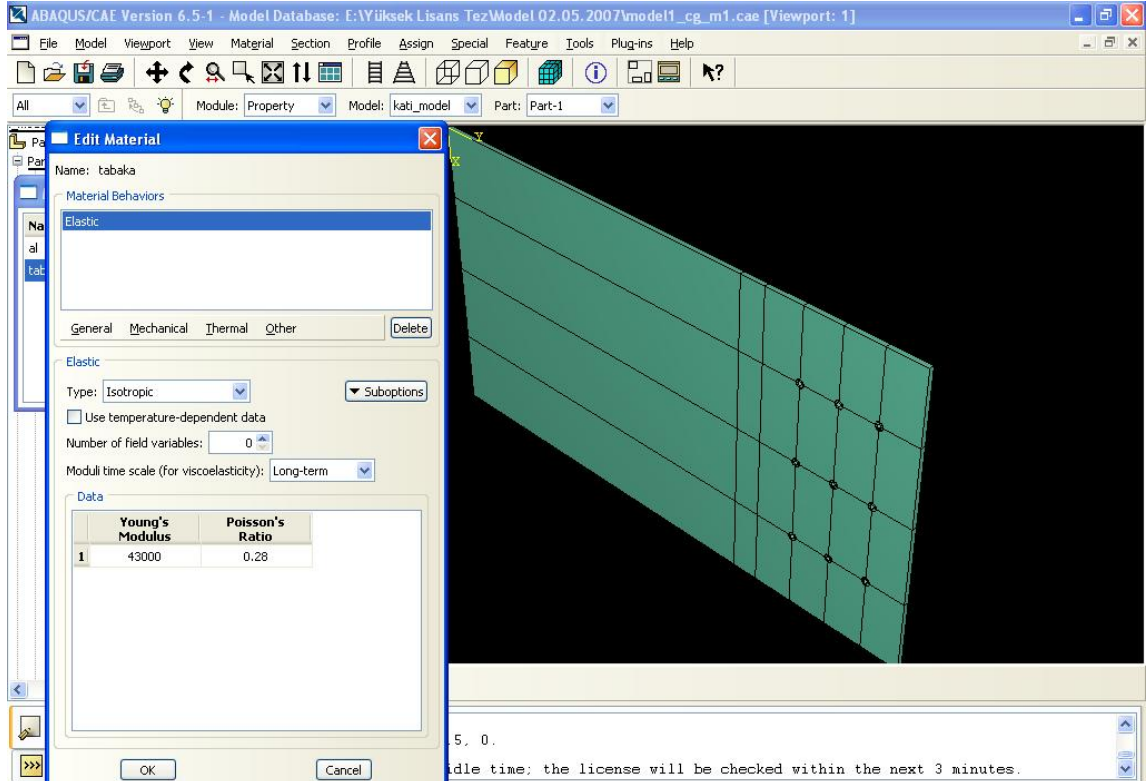


Şekil 3.2: Part modülünde perçinlerin oluşturulması

ABAQUS'un daha kolay çözümler yapabilmesi için parçaların mantıklı bir şekilde bölünmesi gerekmektedir. Bu işlem "partition cell" komutundan gerçekleştirilmektedir. Modelimizde plakalar perçin yuvaları boylarınca, perçinlerin alt ve üst başlarının temas genişlikleri boyunca ve iki plakanın temas ettiği bölümden itibaren 15 mm'lik bir bölümde parçalara ayrılmıştır. Bu 15 mm'lik bölüm çözümün daha doğru çıkması için bir geçiş bölümü olarak düşünülmüştür.

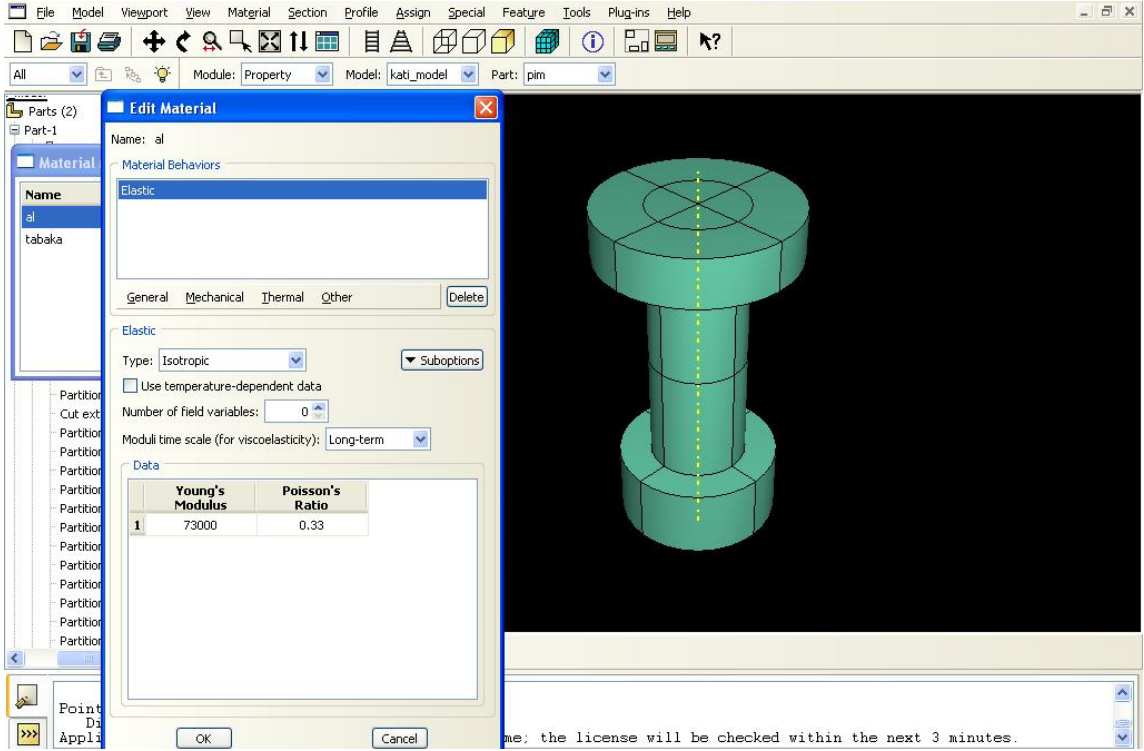
Perçinler ise perçin başlarının diplerinden, orta kısmın dairesel alanının başlara düşümünden ve dikeyde 4 eşit parçaya bölünerek parçalara ayrılmıştır.

Property modülüne girilerek "create material" komutundan plakanın malzeme özellikleri oluşturulur. E_1 young modülü 43000 MPa, E_2 young modülü 8000 MPa, poisson oranı da 0,28'dir. Verilen tabaka açıları sayesinde gerekli poisson oranları ve young modülü Abaqus tarafından hesaplanmaktadır.



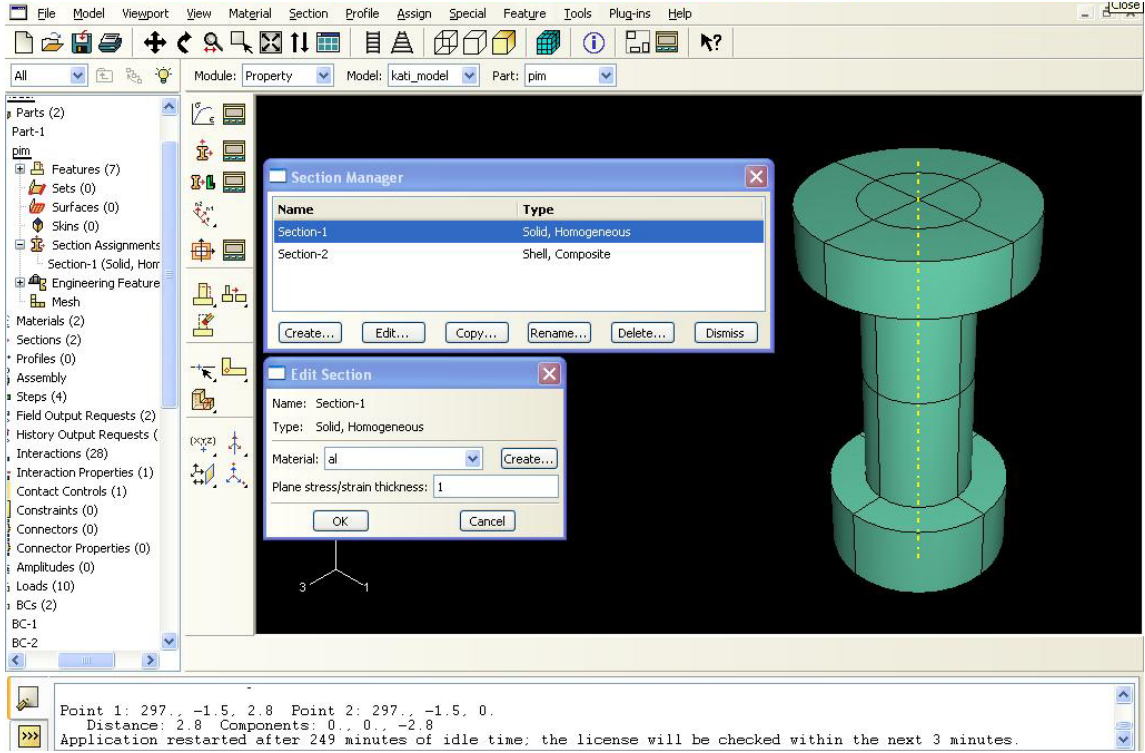
Şekil 3.3: Property modülünde plakaların malzeme özelliklerinin oluşturulması

Property modülünde yine “create material” komutundan perçinlerin malzeme özellikleri oluşturulur. Young modülü 73000 MPa, poisson oranı da 0,33’dir.

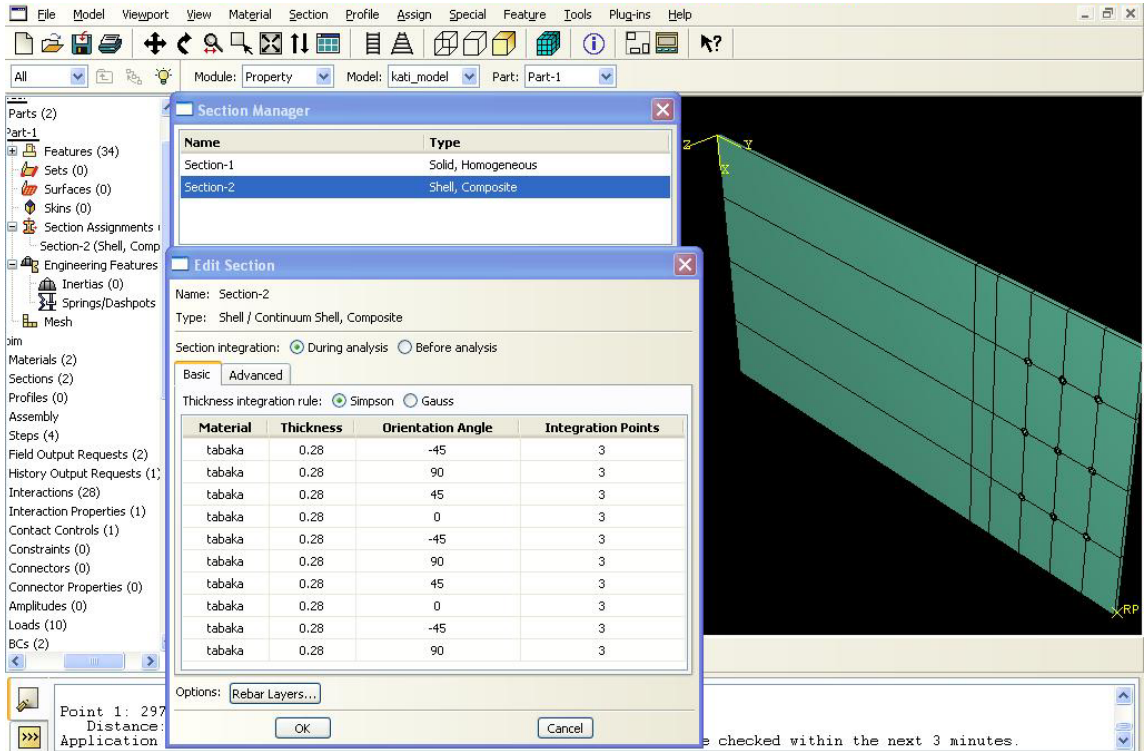


Şekil 3.4: Property modülünde perçinlerin malzeme özelliklerinin oluşturulması

Property modülünde “create section” komutundan section-1 yaratılarak perçin için katı homojen seçenekleri girilir. Yaratılan section-2’de ise plakalar için continuum shell ve kompozit malzeme özellikleri girilir. Thickness integration rule olarak Simpson kuralı seçilir. Plakayı meydana getiren 10 tabaka da teker teker kalınlıkları 0,28mm ve oryantasyon açıları sırasıyla $-45, 90, 45, 0, -45, 90, 45, 0, -45, 90$ girilerek tanıtlır. Bu açılar X koordinatına göre verilmektedir.

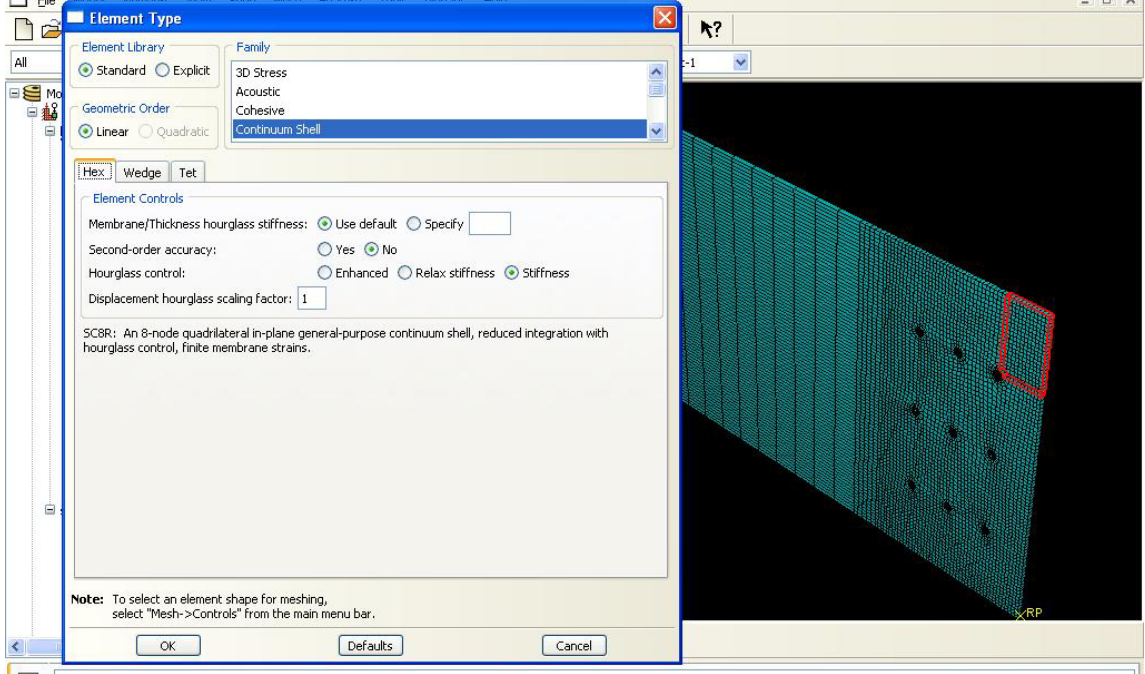


Şekil 3.5: Property modülünde perçinlerin section özelliklerinin oluşturulması

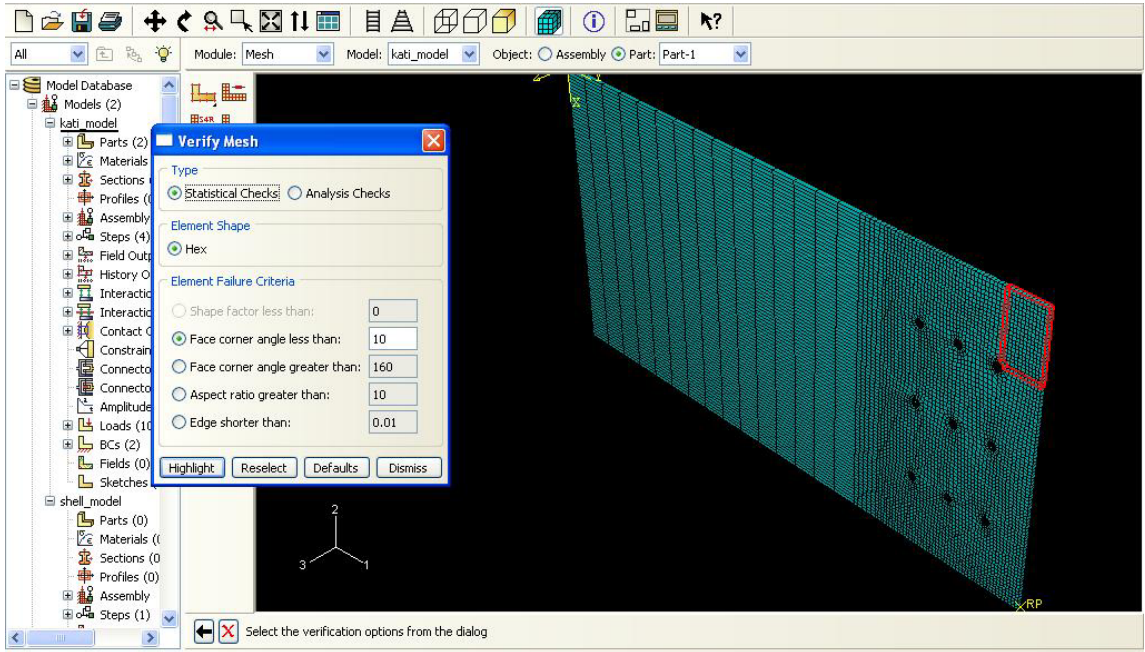


Şekil 3.6: Property modülünde plakaların section özelliklerinin oluşturulması

Daha sonra mesh modülünde meshin özellikleri belirtilerek “mesh part” komutu altındaki “mesh region” komutuyla plakanın bölümleri hex mesh parçalarına ayrılır.

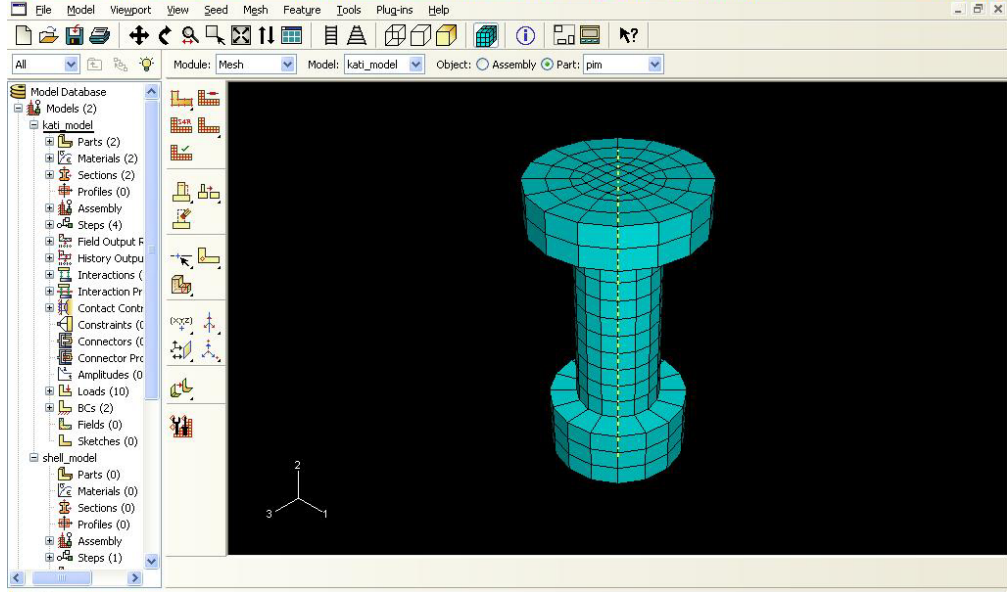


Şekil 3.7: Mesh modülünde plakaların mesh özelliklerinin oluşturulması



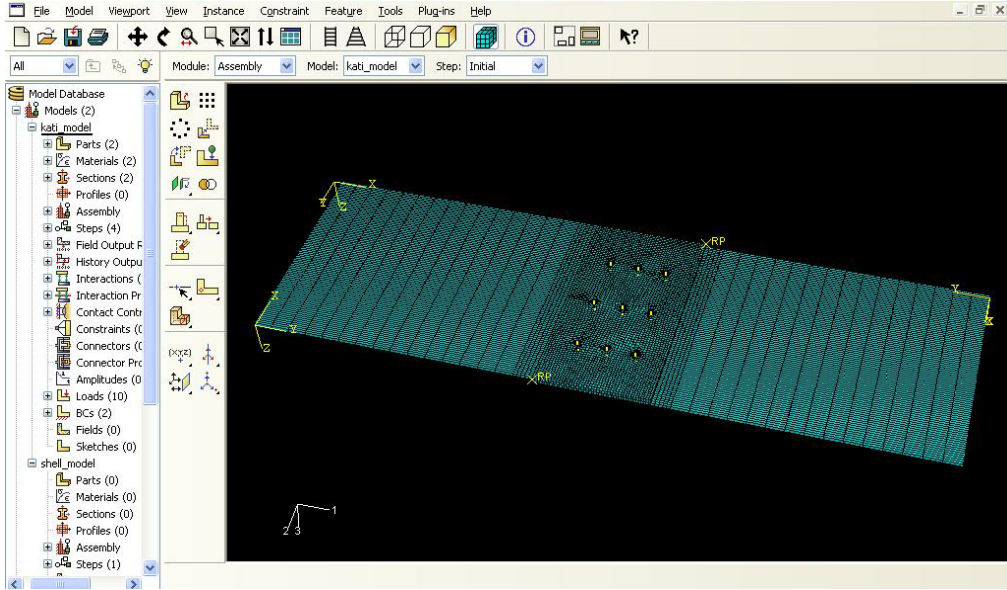
Şekil 3.8: Mesh modülünde plakaların parçalarında meshlerin oluşturulması

Aynı özelliklerle perçin de bir bütün olarak mesh parçalarına ayrılır.



Şekil 3.9: Mesh modülünde perçinin parçalarında meshlerin oluşturulması

Parçaların montajı için assembly modülüne geçilir. Burada “linear pattern” komutuyla face-to-face özelliği kullanılarak parçalar gereken sayı kadar çoğaltılır ve montaj işlemleri gerçekleştirilir.

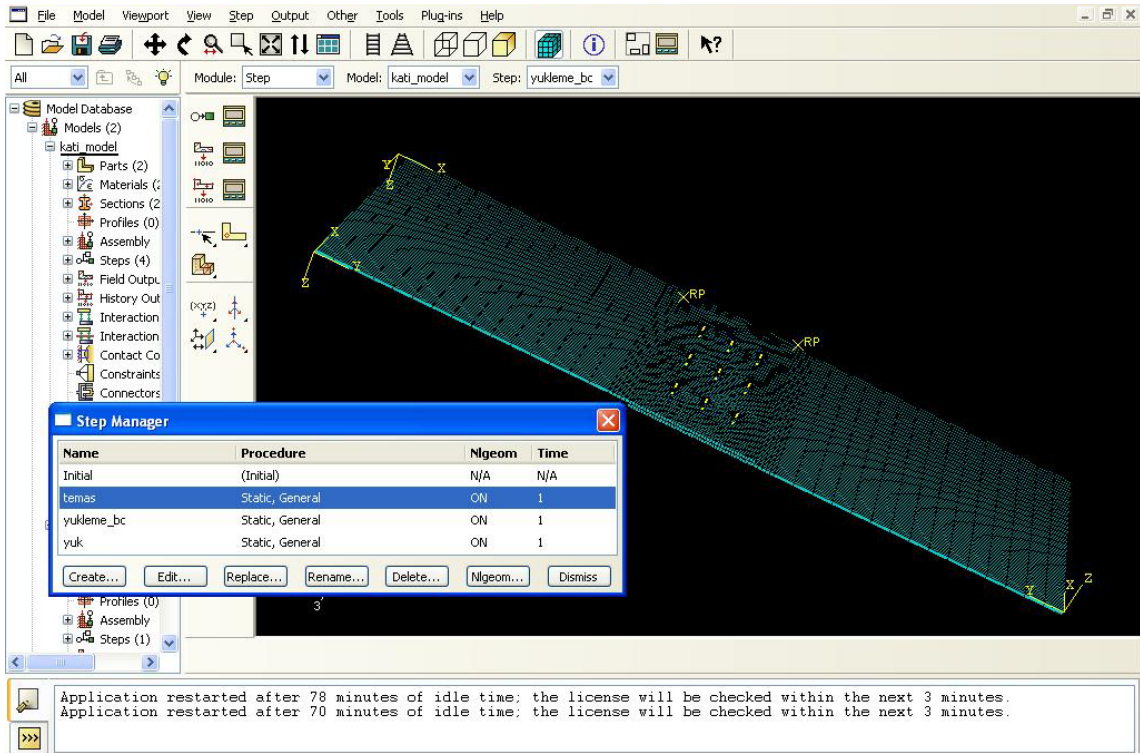


Şekil 3.10: Assembly modülünde modelin montajlı hali

Montaj sonrasında analiz sırasında gerekli olan adımları oluşturmak için step modülü kullanılmıştır. “Create step” komutuyla ihtiyacımız olan üç adım temas, yükleme_bc ve yük adımları oluşturulur. Tüm adımlar statik genel tipinde tasarlanmıştır.

Temas adımında modelde sadece temaslar tanımlanmıştır. Perçinlerin plakaları tuttuğu 100 MPa’lık bir kuvvet mevcuttur. Alt plakanın ucu mesnetlenmiştir. Üst plakanın ucu sabittir.

Yükleme_bc adımında temas adımındaki koşullar geçerli olmakla beraber parça kuvvetin etkimesinden hemen önceki halindedir.

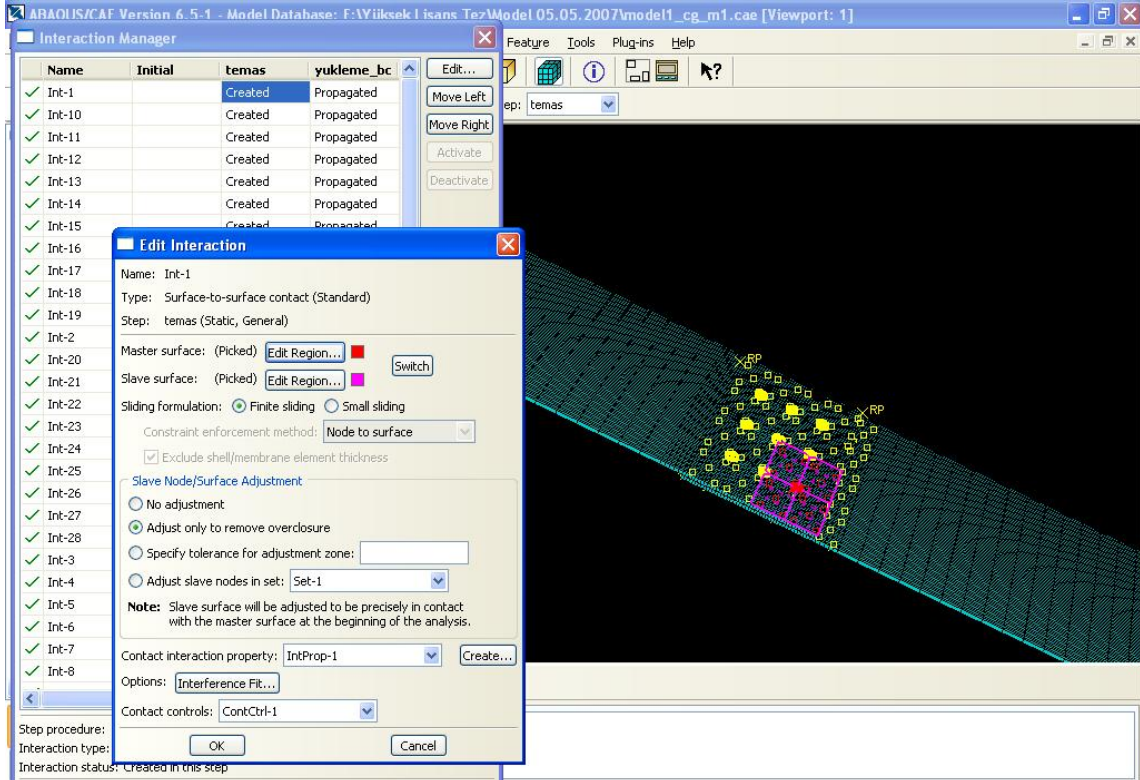


Şekil 3.11: Step modülünde koşul adımları oluşturma

Yük adımında üst plakanın ucundan bir kuvvet yani o yüzey boyunca bir basınç uygulanmaktadır.

Analizde gerçekleştirilecek step tanımlamalarından sonra interaction modülünde “create interaction” komutuyla ilk step yani temas adımı için parça temasları oluşturulur. Perçinlerin üst ve alt kafalarının plakalara, yine perçinlerin orta kısımlarının delik yüzeylerine, iki plakanın bir birine temas ettiği yüzeyler tanımlanır. Toplamda 28 temas

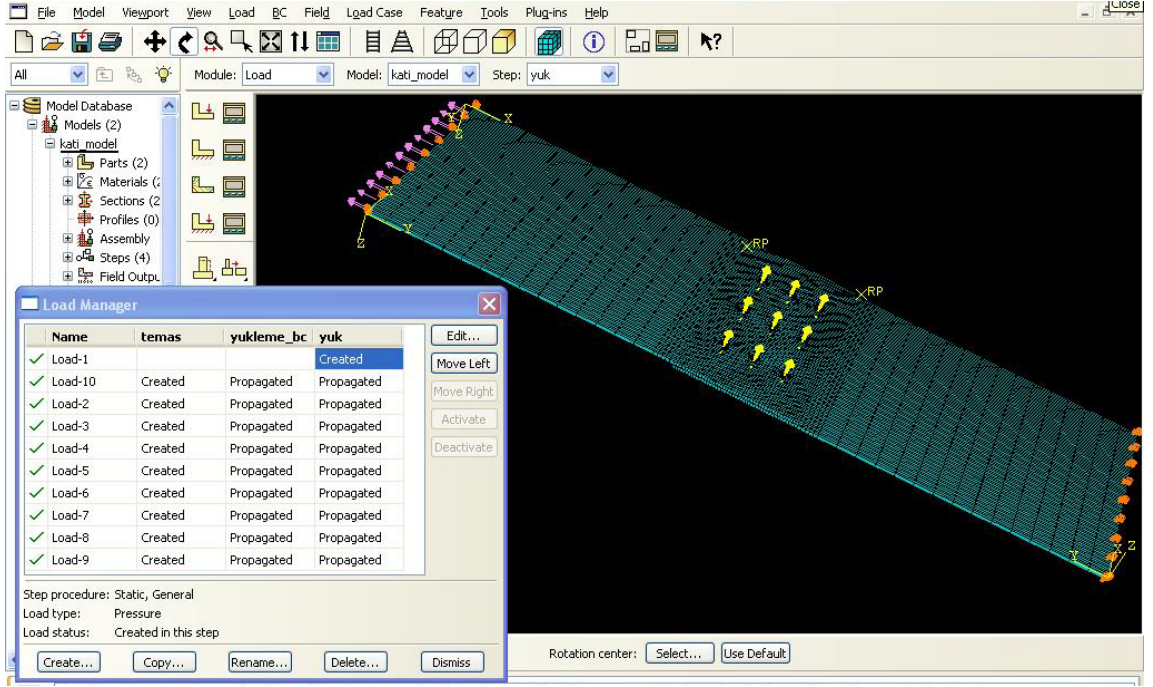
tanımlanmıştır. Perçinlerin yüzeyleri master yüzey, plakaların yüzeyleri slave yüzey olarak tanımlanmıştır. İki plakanın bir birine temas ettiği yüzeyde master yüzey üstteki plakanın alt yüzeyi olarak tanımlanmıştır. Diğer iki step olan yükleme_bc ve yük adımlarındaki temaslar analiz sırasında program tarafından üretilmektedir.



Şekil 3.12: Interaction modülünde temasların oluşturulması

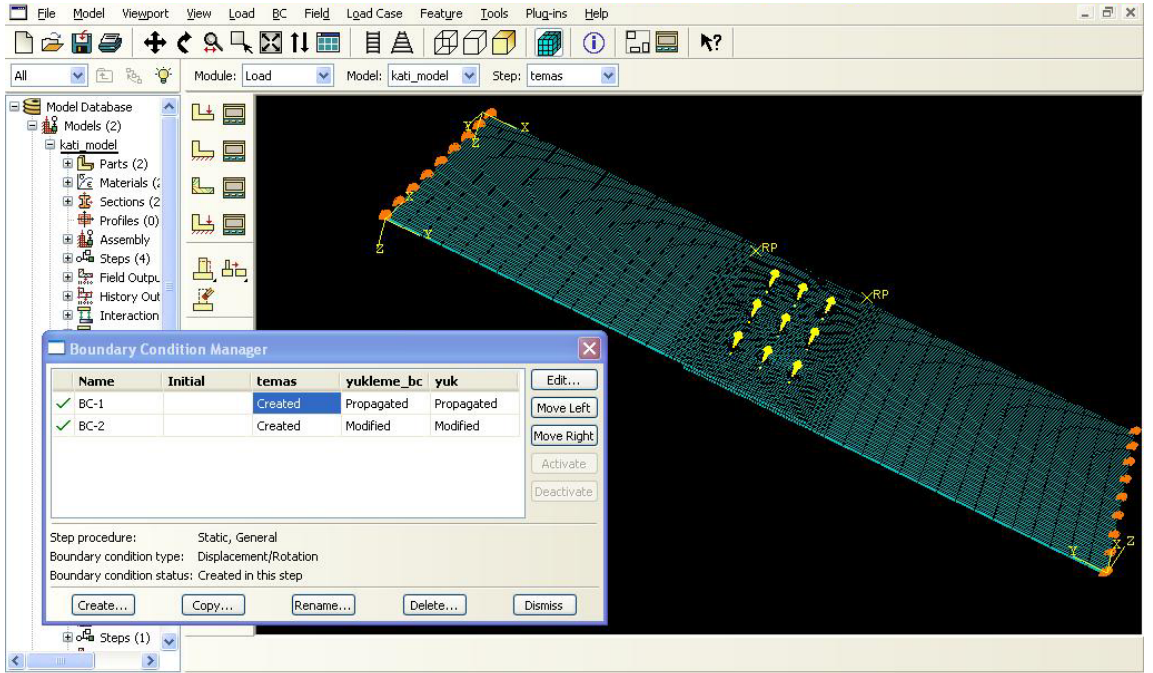
Load modülünde perçinlerin ön gerilme kuvvetleri 100 MPa olarak perçinlerin ortasından etkiyecek şekilde girilmiştir. Bu kuvvetler birinci step olan temas durumunda yaratılmıştır. Diğer steplerdeki değişiklik çözüm sırasında hesaplanmaktadır.

Son step olan yük adımı çekme kuvvetimiz basınç olarak üstteki plakanın ucundan etkimektedir. Bu kuvvetin değeri yapılan testlerdeki değerler olan 2500 N, 5000 N, 7500 N, 10000 N ve 12500 N olarak girilmiş ve her biri için analiz yapılmıştır.



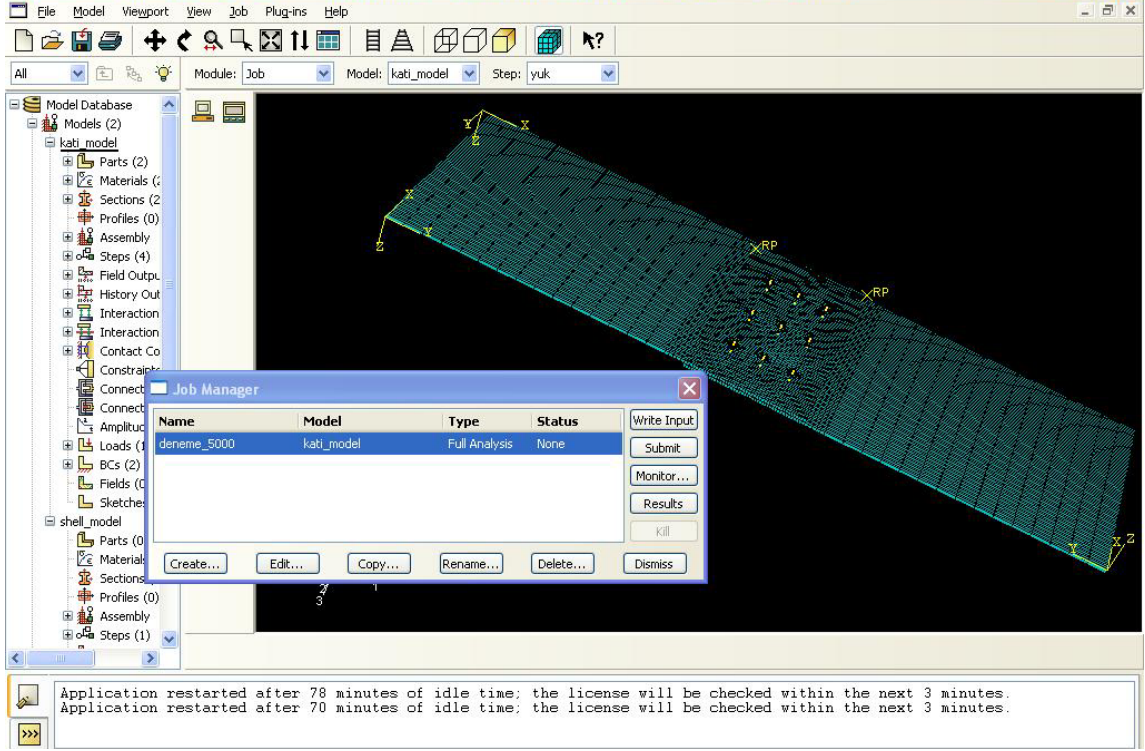
Şekil 3.13: Load modülünde kuvvetlerin oluşturulması

Load modülünden “create boundary condition” komutuyla tüm adımlardaki başlangıç koşulları oluşturulur.



Şekil 3.14: Load modülünde sınır şartlarının oluşturulması

Bu işlemlerin tamamı gerçekleştirildiğinde model analiz için hazır hale gelmiştir. Job modülünde analiz koşturulduğunda çözümler elde edilir.

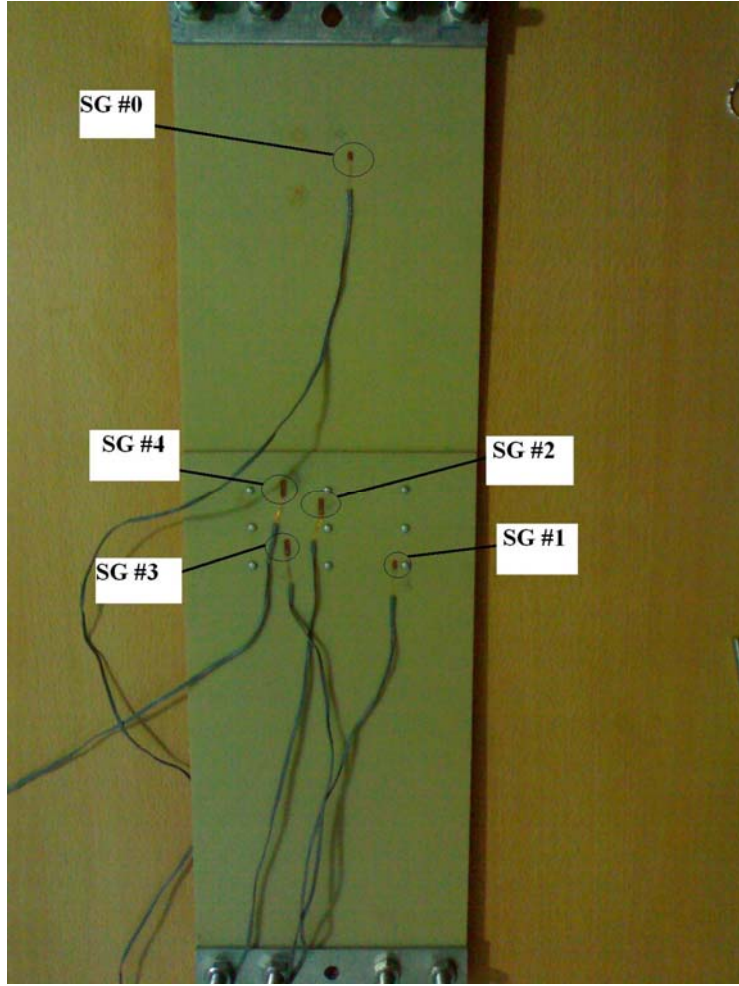


Şekil 3.15: Job modülünde analizin yapılması

4. YAPILAN DENEYLER VE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

4.1 DeneY Düzeneyinin Oluşturulması

Model yatay çekme makinasında bir ucu sabitken diğery ucundan çeşitli çekme kuvvetlerine tabi tutulacaktır. Bu nedenle modelin mesnetleneceğı ve kuvvetin etkiyeceğı yere alüminyum tabakalar civata ve somunlarla sıkılarak homojen bir dağılım sağlanmıştır. Model çekme kuvveti altında iken belli noktalardaki gerinimler strain gageler aracılığıyla ölçülecektir.



Şekil 4.1: Model ve üzerindeki strain gagelerin yerleşimi

4.1.1 Deneyde Kullanılan Cihazlar

Dijital Strain Metre TC-31K: Switch box'a bağlanan strain gageler aracılığıyla ölçülen gerinim değerlerini gösterir.

CSW-5A Switch Box: 5 strain gage'in bağlandığı ve hepsinin bir yük altında aynı anda değerlerinin okunabilmesine olanak sağlayan cihazdır.



Şekil 4.2: Switch box CSW-5A ve strain metre TC-31K

MTS 661.19F-04 Yatay Çekme Makinası: 25 kN kapasiteli hidrolik çekme makinasıdır.

MTS Station Manager: Çekme makinasının kontrolünün yapıldığı dataların depolandığı bilgisayardır.

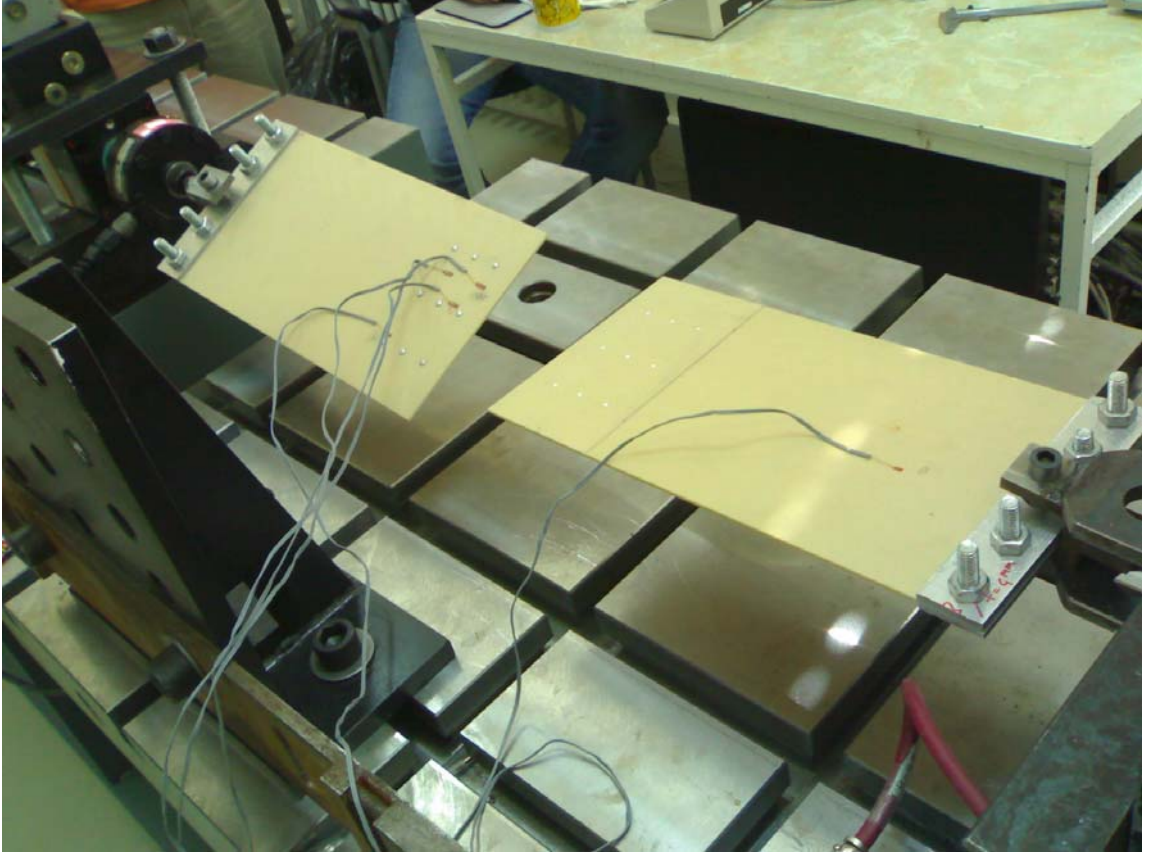
Strain Gage: SG #0 ve SG #1 strain gagelerinin gage faktörü 2,12'dir. SG #2, SG #3 ve SG #4 strain gagelerinin gage faktörü 2,11'dir. Tüm strain gagelerin direnci 120 ohm'dur.



Şekil 4.3: Oluşturulan deney düzeneği

4.2 Deneyin Gerçekleştirilmesi

Deney düzeneği kurulduktan sonra deneye geçilmiştir. Çekme işlemine başlamadan önce strain metrede okunan strain gagelerden gelen gerinim değerleri ilk hal için sıfırlanmıştır. İlk olarak 2500 N'luk bir çekme kuvveti panele etkilmiştir. 2500 N'luk çekme kuvveti sırasında tüm strain gagelerdeki gerinim değerleri ölçülüp not edilmiştir. Daha sonra parça her seferinde gerininin sıfıra getirileceği ve çekme kuvveti verilmeden önceki anlarda ölçülen ufak gerinim değerleri sıfırlanacağı 5000 N, 7500 N, 10000 N ve 12500 N değerlerinde deney gerçekleştirilmiştir. 15000 N için çekme kuvveti verilirken 13765 N değerinde perçinler kesilmiş ve panel bağlantısı kopmuştur.



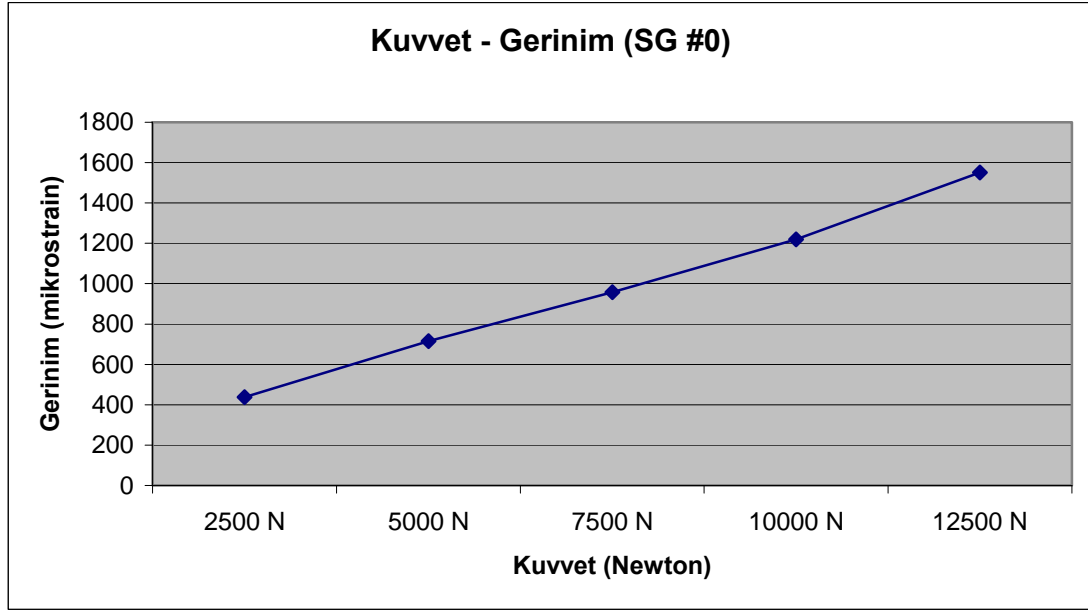
Şekil 4.4: Perçinleri kesilmesiyle kopan panel bağlantısı

4.3 Deney Sonuçları

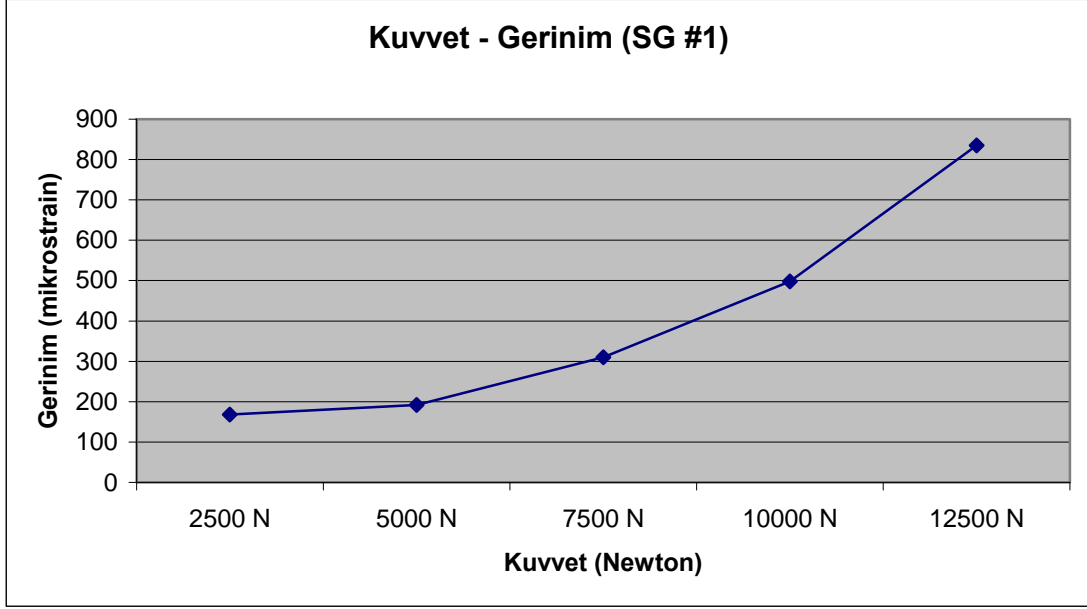
Tüm bu adımlarda strain gagelerin yapıştırıldığı bölümlerdeki gerinim değerleri ölçülmüştür ve şu şekildedir. Ölçülen değerler mikrostrain cinsindedir.

Tablo 4.1: Kuvvetler altında strain gagelerden okunan gerinimlerin microstrain cinsinden değerleri

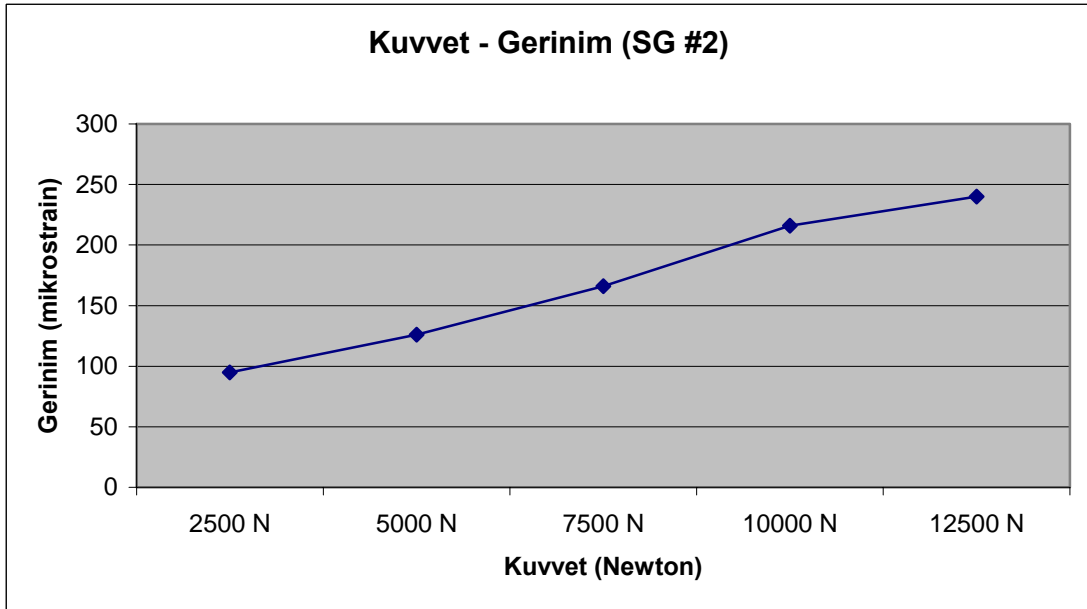
	2500 N	5000 N	7500 N	10000 N	12500 N
SG #0	437	715	958	1220	1551
SG #1	168	192	310	498	835
SG #2	95	126	166	216	240
SG #3	31	43	70	121	192
SG #4	21	24	30	33	36



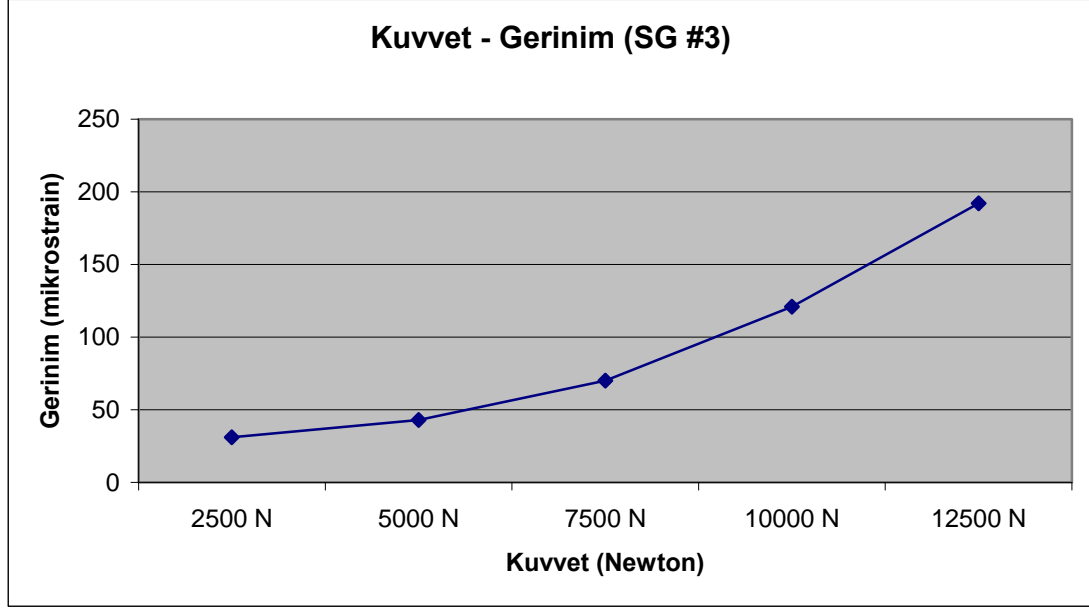
Şekil 4.5: SG #0'da çeşitli yükler altında kuvvet - gerinim grafiği



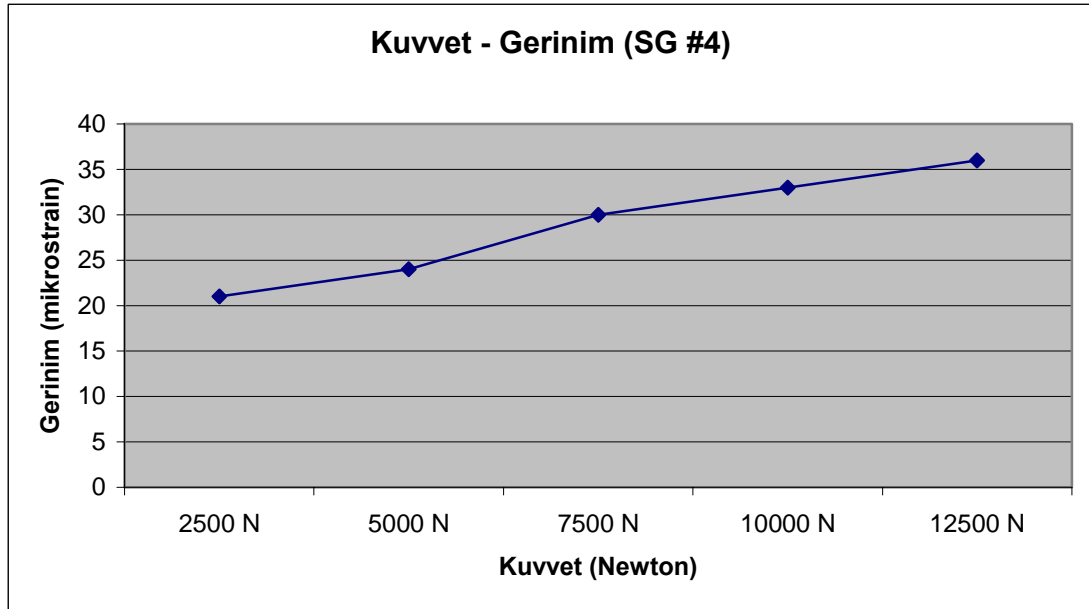
Şekil 4.6: SG #1’de çeşitli yükler altında kuvvet - gerinim grafiği



Şekil 4.7: SG #2’de çeşitli yükler altında kuvvet - gerinim grafiği



Şekil 4.8: SG #3'te çeşitli yükler altında kuvvet - gerinim grafiği

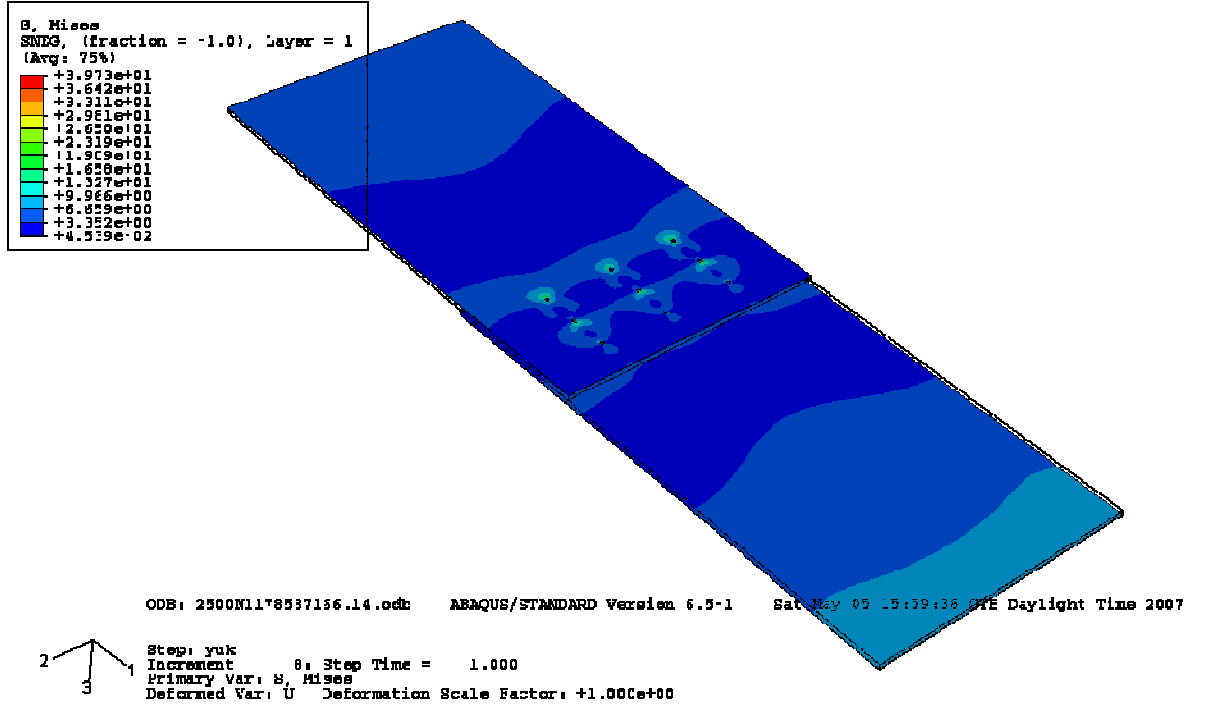


Şekil 4.9: SG #4'te çeşitli yükler altında kuvvet - gerinim grafiği

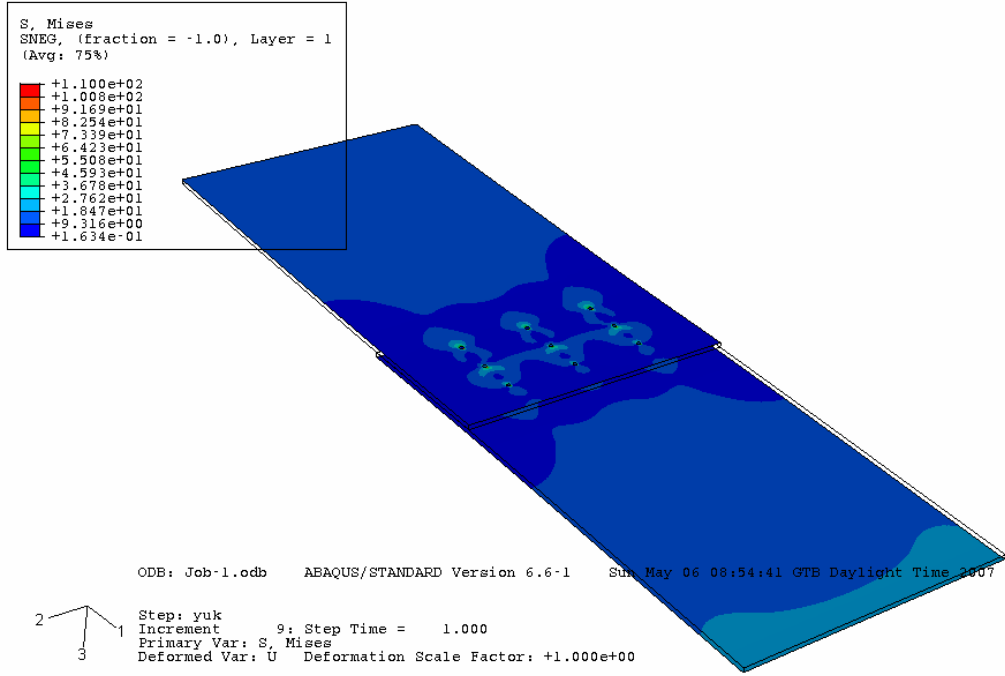
Bu şekilde deneyimiz tamamlanmış olmaktadır.

5. ABAQUS'TE YAPILAN ANALİZLER

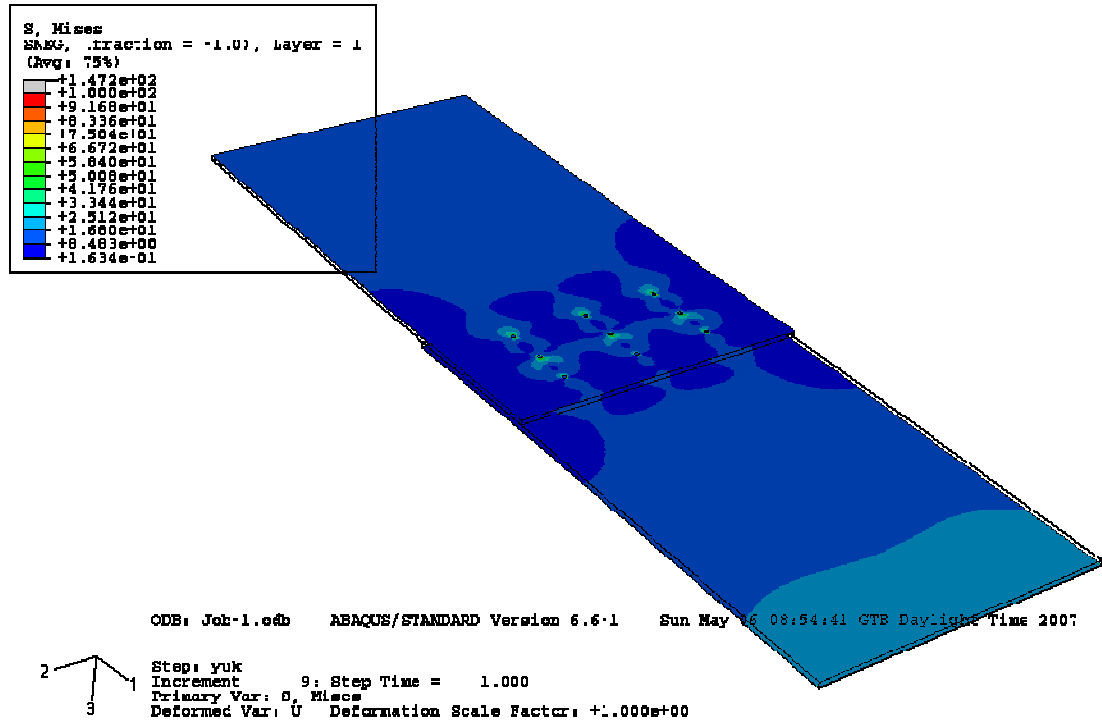
Hazırlanan model 2500 N, 5000 N, 7500 N, 10000 N ve 12500 N çekme kuvvetleri için çözdürülmüştür.



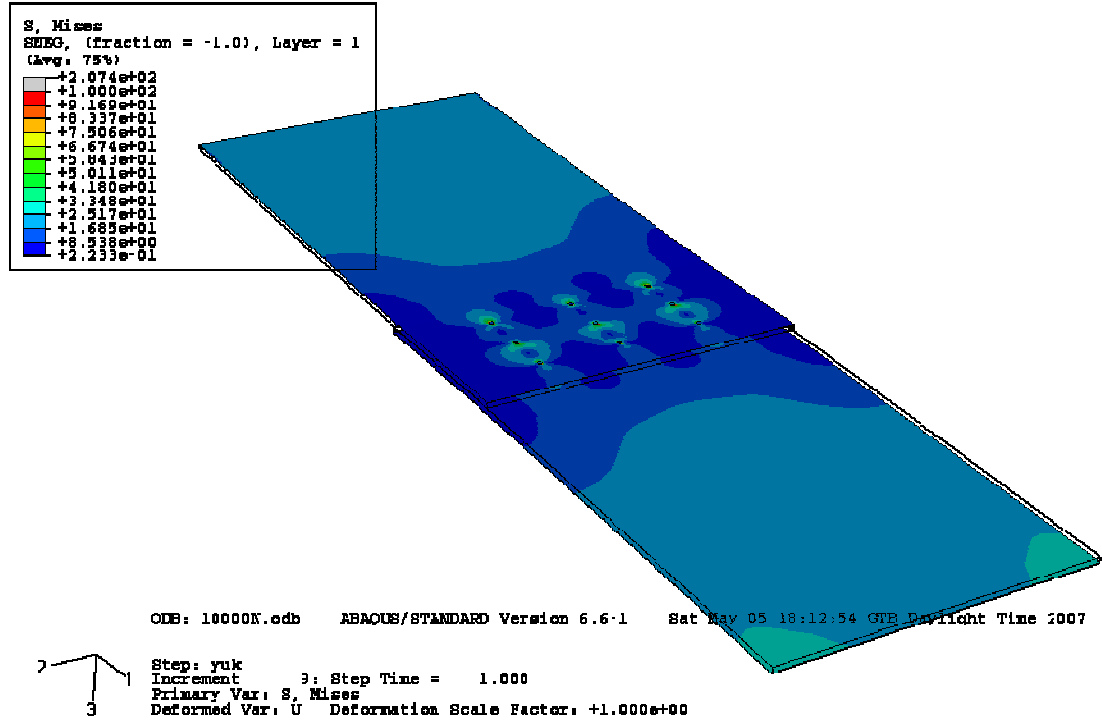
Şekil 5.1: 2500 N çekme kuvveti altında plakalar



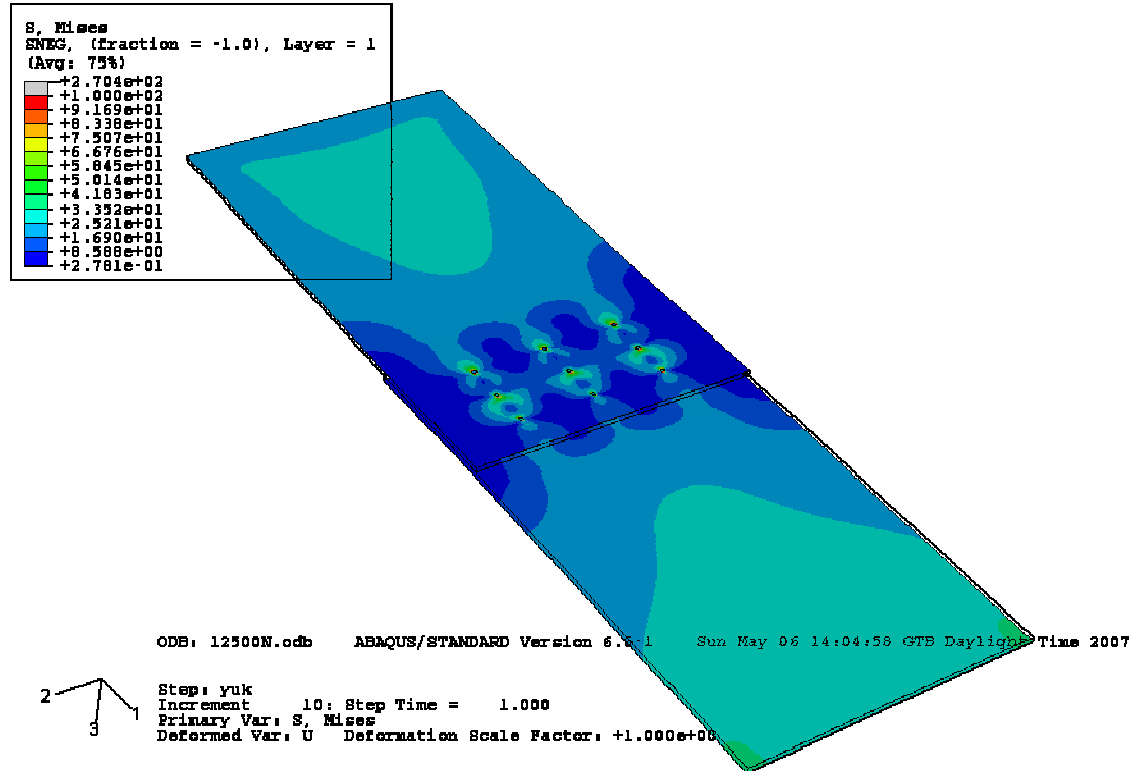
Şekil 5.2: 5000 N çekme kuvveti altında plakalar



Şekil 5.3: 7500 N çekme kuvveti altında plakalar



Şekil 5.4: 10000 N çekme kuvveti altında plakalar



Şekil 5.5: 12500 N çekme kuvveti altında plakalar

Deney sırasında plakaların üzerine yapıştırdığımız strain gagelerin yerleri ölçülerek Abaqus modelinde bunlara karşılık gelen en yakın nodlar şu şekilde saptanmıştır.

SG #0 ⇒ Node #9538

SG #1 ⇒ Node #6890

SG #2 ⇒ Node #6398

SG #3 ⇒ Node #4220

SG #4 ⇒ Node #8199

Tablo 5.1: Kuvvetler altında analiz sonucunda nodlardaki gerinimlerin mikrostrain cinsinden değerleri

	2500 N	5000 N	7500 N	10000 N	12500 N
Node #9538	560	603.83	640.3	872.2	1120.8
Node #6890	166	274.6	400.18	424.6	750.3
Node #6398	99	162.4	218.44	259.31	318.12
Node #4220	35.4	59.3	88.36	177.9	163.241
Node #8199	20	34.86	62.4	82.3	101.7

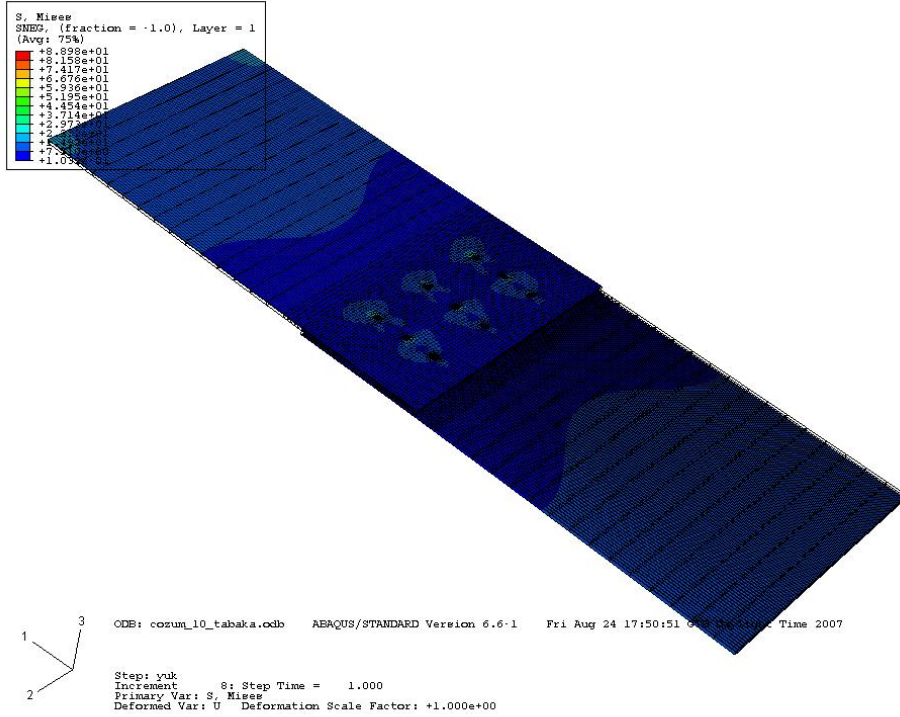
6.FARKLI KALINLIKLARDAKİ KOMPOZİT VE ALÜMİNYUM PLAKALARIN ANALİZLERİ

6.1 Modelleme

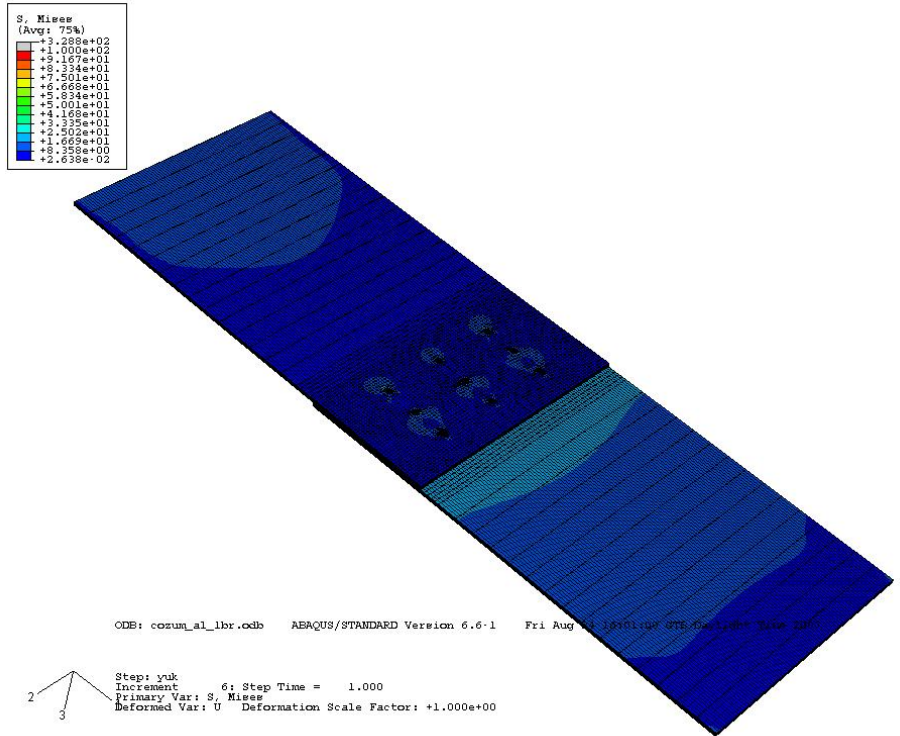
Kompozit plakaların aynı kalınlıklardaki alüminyum plakalara göre davranışları aynı basınçlar etkilerek incelenmiştir. 2,8 mm, 5,6 mm ve 8,4 mm kalınlıklarında plakalar hem prepreg kompozit malzeme hem de alüminyum olarak modellenmiştir. Kompozit plakalar 10, 20 ve 30 tabakalı olacağından 20 ve 30 tabakalı kompozit plakalar için lif açıları ilk 10 tabakadaki lif açılarının aynıları şeklinde girilmiştir. Plakalara etkiyen basınç 10,322 MPa olarak girilmiştir.

6.2 Analizlerin Çözümleri

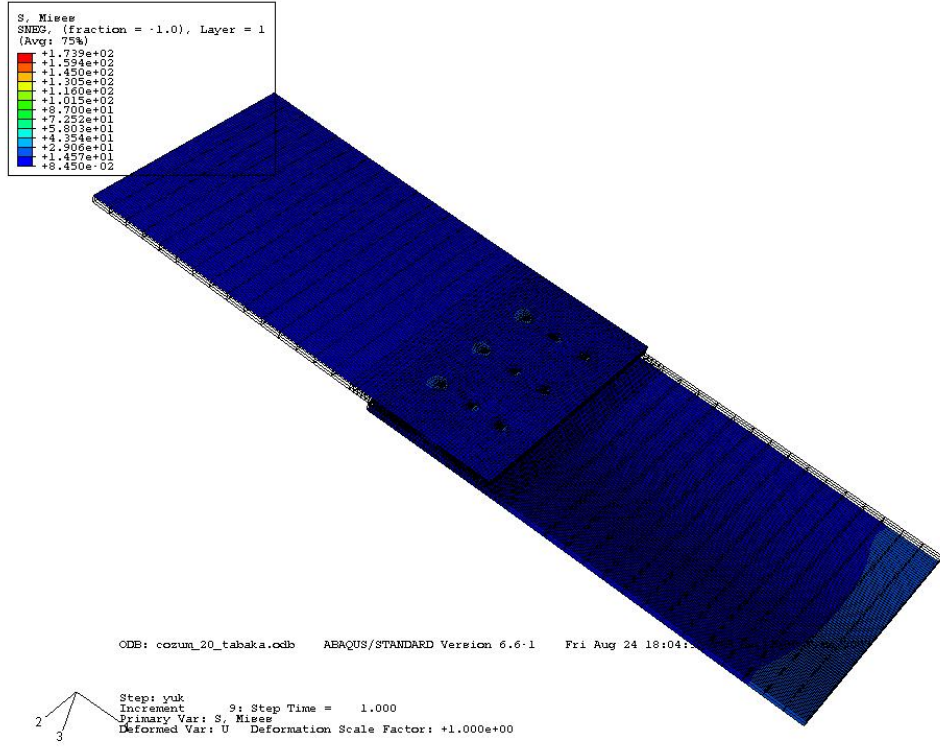
Modeller 10,322 MPa değerinde basınca denk gelen çekme kuvveti altında çözdürülmüştür. Elde edilen çözümler şu şekildedir.



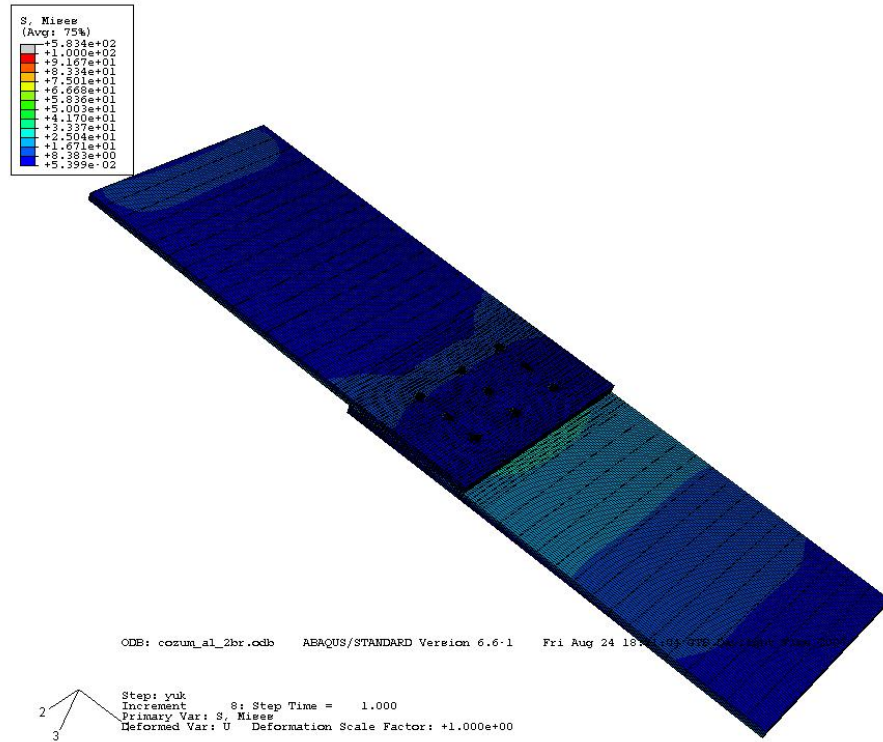
Şekil 6.1: 2,8 mm kalınlığındaki kompozit plakalar



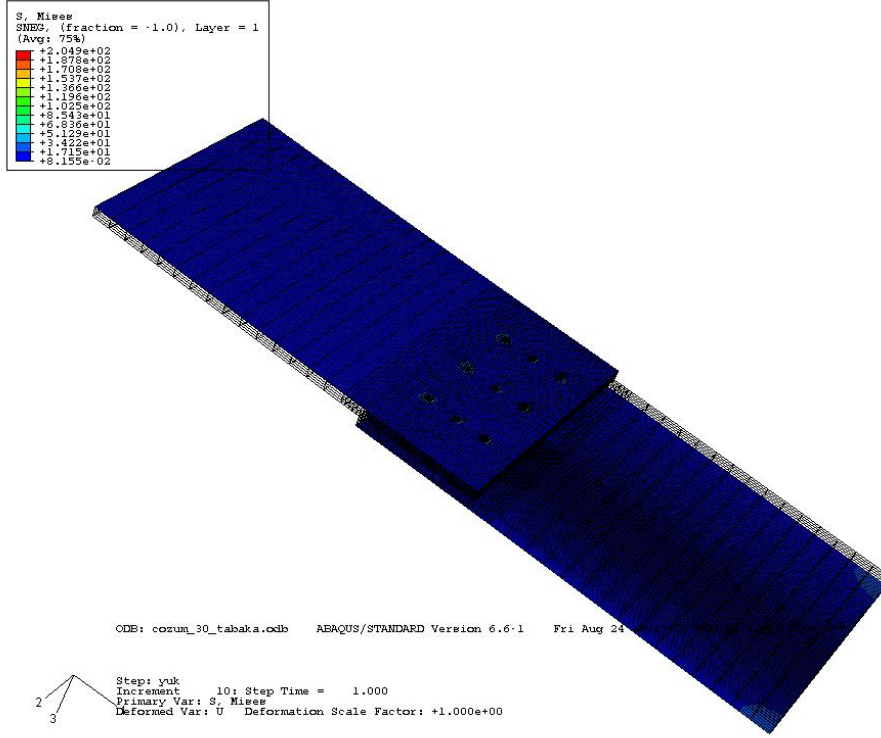
Şekil 6.2: 2,8 mm kalınlığındaki alüminyum plakalar



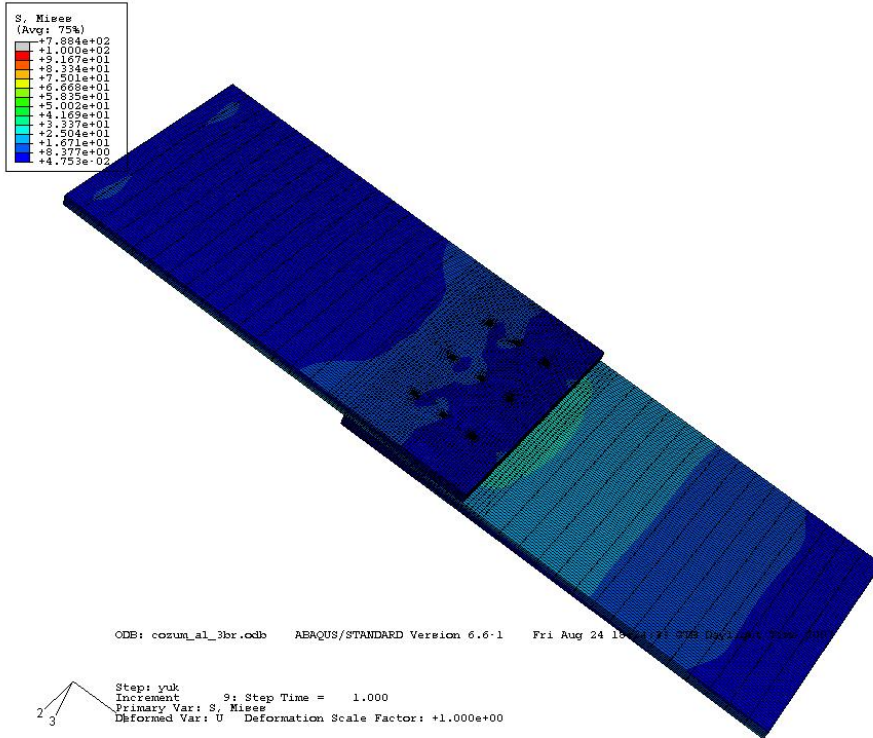
Şekil 6.3: 5,6 mm kalınlığındaki kompozit plakalar



Şekil 6.4: 5,6 mm kalınlığındaki alümiyum plakalar



Şekil 6.5: 8,4 mm kalınlığındaki kompozit plakalar



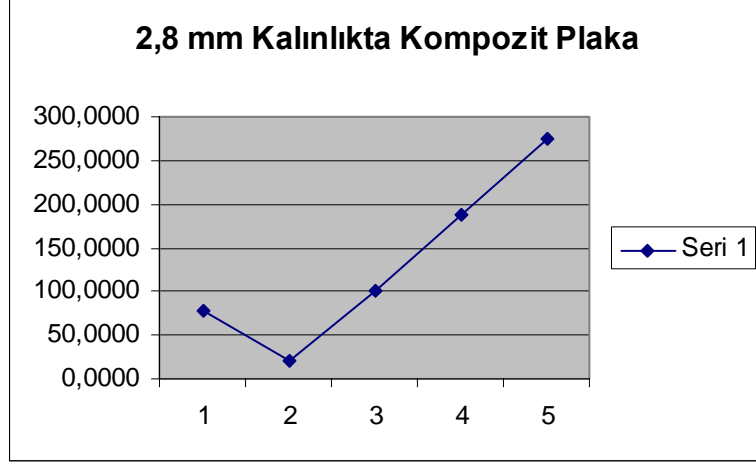
Şekil 6.6: 8,4 mm kalınlığındaki alüminyum plakalar

6.3 Analizlerden Elde Edilen Sonuçlar

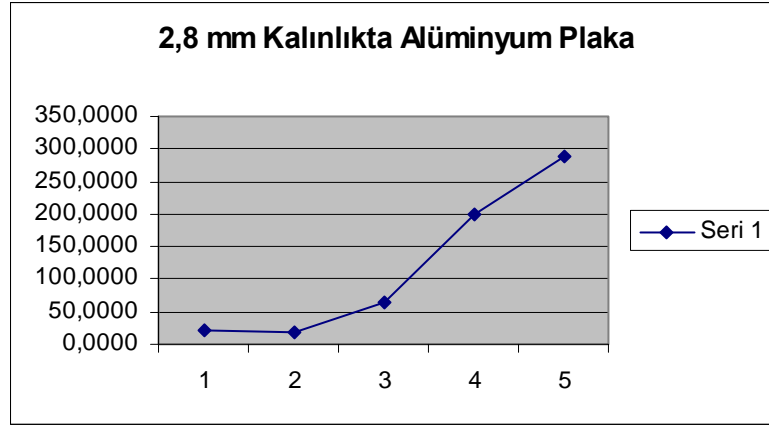
Kompozit plakalar ve alüminyum plakaların aynı basınç altında gösterdikleri davranışların en iyi gözlenebilecekleri ve somut olarak karşılaştırılabilecekleri yer perçin yuvalarında perçinlerle plakaların temas noktalarıdır. Üst plakanın kuvvetin etkidiği taraftaki orta kısımdaki perçin için değerler alınmıştır. Perçin yuvasının üst kısmından alt kısmına doğru 0,7 mm aralıklarla en yakın nodlardaki değerler alınarak ölçölmüştür. Elde edilen sonuç řu şekildedir.

Tablo 6.1: 2,8 mm kalınlıkta alüminyum ve kompozit plakalarda perçin yuvasında alınan mikrostrain cinsinden gerinim değerleri

	Kompozit	Alüminyum
0 mm'de gerinim değer	78,0881	20,7790
0.7 mm'de gerinim değer	20,3505	17,3914
1.4 mm'de gerinim değer	100,0310	63,2605
2.1 mm'de gerinim değer	186,7460	200,0710
2.8 mm'de gerinim değer	273,8940	287,6250



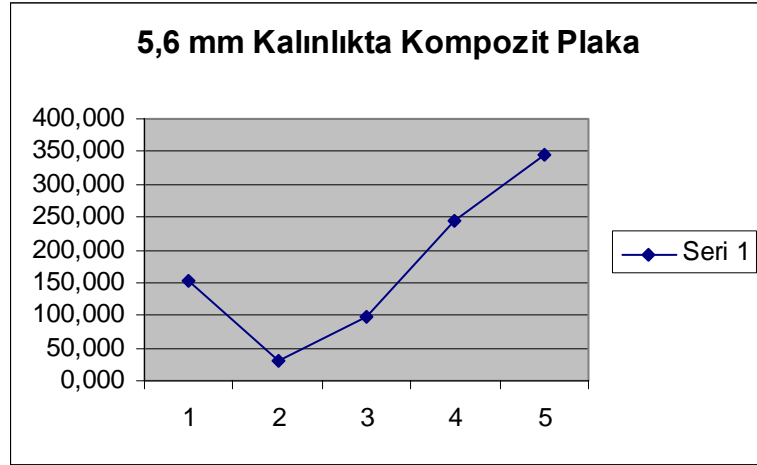
Şekil 6.7: 2,8 mm kalınlığındaki kompozit plakanın perçin yuvasındaki mikrostrain cinsinden gerinim dağılımı



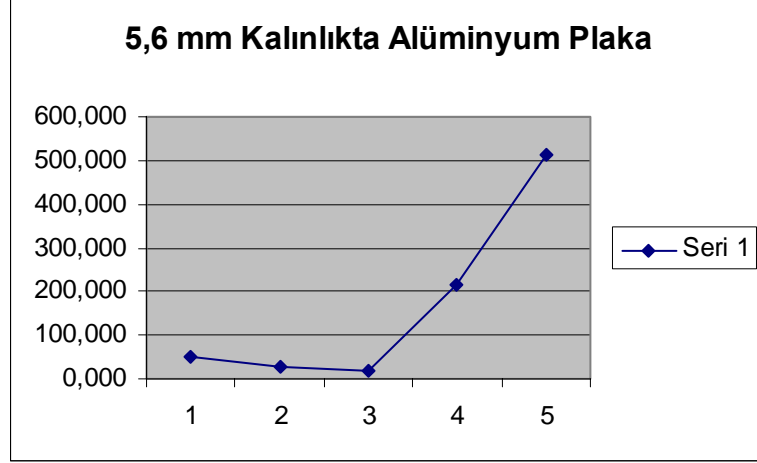
Şekil 6.8: 2,8 mm kalınlığındaki alüminyum plakanın perçin yuvasındaki mikrostrain cinsinden gerinim dağılımı

Tablo 6.2: 5,6 mm kalınlıkta alüminyum ve kompozit plakalarda perçin yuvasında alınan mikrostrain cinsinden gerinim değerleri

	Kompozit	Alüminyum
0 mm'de gerinim değeri	152,909	48,155
1.4 mm'de gerinim değeri	30,296	25,430
2.8 mm'de gerinim değeri	97,590	16,773
4.2 mm'de gerinim değeri	245,530	215,340
5.6 mm'de gerinim değeri	346,329	513,153



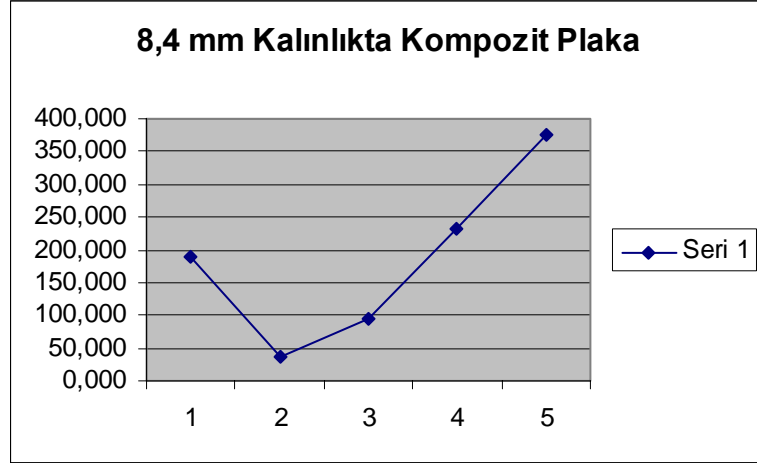
Şekil 6.9: 5,6 mm kalınlığındaki kompozit plakanın perçin yuvasındaki mikrostrain cinsinden gerinim dağılımı



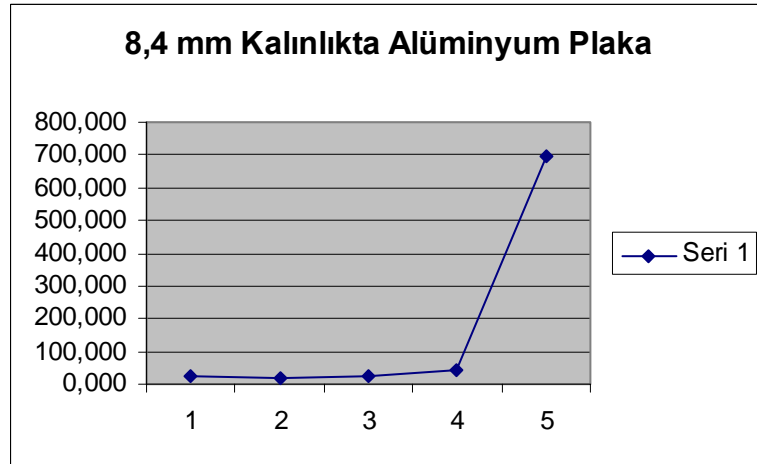
Şekil 6.10: 5,6 mm kalınlığındaki alüminyum plakanın perçin yuvasındaki mikrostrain cinsinden gerinim dağılımı

Tablo 6.3: 8,4 mm kalınlıkta alüminyum ve kompozit plakalarda perçin yuvasında alınan mikrostrain cinsinden gerinim değerleri

0 mm'de gerinim değeri	189,129	23,495
2.1 mm'de gerinim değeri	35,750	16,543
4.2 mm'de gerinim değeri	93,300	21,527
6.3 mm'de gerinim değeri	233,550	42,356
8.4 mm'de gerinim değeri	375,261	693,556



Şekil 6.11: 8,4 mm kalınlığındaki kompozit plakanın perçin yuvasındaki mikrostrain cinsinden gerinim dağılımı



Şekil 6.12: 8,4 mm kalınlığındaki alüminyum plakanın perçin yuvasındaki mikrostrain cinsinden gerinim dağılımı

Aynı kalınlıklardaki kompozit ve alüminyum plakalardaki perçin yuvalarında gerinimler incelendiğinde yukarıdan aşağı doğru gerinim gradyanında öncelikle bir azalma sonra tekrar yükselme görülmektedir. Alüminyum plakalardaki gerinim gradyanındaki yükselme daha yüksek bir eğimle gerçekleşmektedir. Kalınlıklar arttığında hem kompozit hem de alüminyum plakalardaki en büyük gerinim değerleri artmaktadır. Bununla beraber gerinim değişim davranışı aynı şekilde devam etmektedir.

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada iki adet epoksi cam prepreg kompozit malzemeden plaka bir birlerine perçinlerle bağlı olarak tasarlanıp imalatı ve Abaqus'te modellemesi yapıldı.

Modelimizdeki lineer olmayan davranışlar anizotropik malzeme olan kompozit malzemeden ve temaslardan kaynaklanmaktadır. Malzememiz kompozit malzeme değil de izotropik bir malzeme olsaydı dahi temas etkisi başlı başına lineer olmayan davranışlar göstereceğinden analiz lineer olmayan çözümleri başarılı bir şekilde çözen Abaqus'te yapıldı.

Bu model çeşitli çekme kuvvetlerine tabi tutularak kompozit plakalardaki strain gage yapıştırılmış noktaların gerinimleri incelendi. Daha sonra Abaqus'te modele aynı kuvvetler etkilerek analiz yapıldı. Strain gagelerin yapıştırıldığı yerlere karşılık gelen en yakın nodların gerinim değerleri elde edildi.

Tablo 7.1: Elde edilen gerinim değerlerinin karşılaştırması

	2500 N	5000 N	7500 N	10000 N	12500 N
SG #0	437	715	958	1220	1551
Node #9538	560	603.83	640.3	872.2	1120.8
SG #1	168	192	310	498	835
Node #6890	166	274.6	400.18	424.6	750.3
SG #2	95	126	166	216	240
Node #6398	99	162.4	218.44	259.31	318.12
SG #3	31	43	70	121	192
Node #4220	35.4	59.3	88.36	177.9	163.241
SG #4	21	24	30	33	36
Node #8199	20	34.86	62.4	82.3	101.7

Elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında sonuçların bir birine yakın olduğu görüldü.

Aynı kalınlıklardaki kompozit ve alüminyum plakalardaki perçin yuvalarında gerinimler incelendiğinde yukarıdan aşağı doğru gerinim gradyanında öncelikle bir azalma sonra daha sonra tekrar yükselme görülmektedir. Alüminyum plakalardaki gerinim gradyanındaki yükselme daha yüksek bir eğimle gerçekleşmektedir. Kalınlıklar arttığında hem kompozit hem de alüminyum plakalardaki en büyük gerinim değerleri artmaktadır. Bununla beraber gerinim değişim davranışı aynı şekilde devam etmektedir. En üst tabakalarda gerinim yığılması olmasının sebebi perçinlerin eğilmesi ve plakalarda bir

ezilme meydana getirmesidir. Bu ezilme kompozit plakalarda alüminyum plakalara oranla çok daha belirgindir. Kompozit plakadaki perçin yuvasının en üst tabakasındaki fazlalık bundan oluşmaktadır.

Sonuç olarak yapılan kompozit panel bağlantılarında paneller için yapılacak hasar analiz çalışmaları için sonlu elemanlar yönteminin doğru sonuçlar verdiği ve uygun olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] **Autar K. Kaw**, 1997. Mechanics of Composite Materials , *CRC Press LLC*
- [2] **Ochoa O. O. ve Reddy J. N.**, 1992. Finite Element Analysis of Composite Laminates, Kluwer Academic Publishers
- [3] **ABAQUS Manuals**, 2006. ABAQUS Software Corporation.
- [4] **Chawla K. K.**, 1998. Composite Materials: Science and Engineering, Springer
- [5] **Choo Vincent K. S.**, 1990. Fundamentals of Composite Materials, Dover Knowen Academic Press
- [6] **Peters Stanley T.**, 1998. Handbook of Composites, London Chapman & Hall
- [7] **Website:** <http://www.hexcel.com/>, Mart 2007
- [8] **Anthony K.**, 1989. Concise Encyclopedia of Composite Materials, Oxford Pergamon Press
- [9] **Savcı M., Arpacı A.**, 1999. Mukavemet Teorik Esaslar Çözümlü Problemler, Birsen Yayınevi
- [10] **Staab George H.**, 1999. Laminar Composites, Boston Butterworth – Heinemann
- [11] **Tsai Stephen W. ve Hahn H. Thomas**, 1980. Introduction to Composite Materials, Lancaster Technomic
- [12] **Schwartz Mel**, 1997. Composite Materials
- [13] **Bertholet J. M.**, 1999. Composite Material: Mecahnical Behaviour and Structural Analysis, New York Springer
- [14] **Hoskin B. C.**, 1989. Composite Materials in Aircraft Structures, AIAA Education

ÖZGEÇMİŞ

Hüseyin ÖZDELEN 1982 yılında Sakarya`da doğdu. İlkokulu Rami İlkokulu`nda tamamladı. Orta öğrenimini Beşiktaş Atatürk Anadolu Lisesi`nde tamamladıktan sonra 2000 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi (İ.T.Ü) Makina Fakültesi`nde yüksek öğrenim hayatına başladı. 2004 yılında makina mühendisi ünvanı ile üniversiteden mezun oldu. 2004 senesinde İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, Katı Cisimlerin Mekaniği programında yüksek lisans öğrenimine kabul edildi.