İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STATİK YAYILI YÜK ALTINDAKİ KATMANLI KOMPOZİT PLAKLARIN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Müh. Oktay ORHAN

Anabilim Dalı: DİSİPLİNLERARASI PROGRAMLAR

Programı: UÇAK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STATİK YAYILI YÜK ALTINDAKİ KATMANLI KOMPOZİT PLAKLARIN DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Makine Müh. Oktay ORHAN
(511031039)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2007

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Zahit MECİTOĞLU
Diğer Jüri Üyeleri Doç. Dr. Halit S. TÜRKMEN
Yrd. Doç. Dr. Ahmet Sinan ÖKTEM (Y.T.Ü.)

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Yüksek lisans hayatımda tanımış olduğum, birikimlerinden hem derslerde hem de tezimde faydalandığım değerli hocam Prof. Dr. Zahit Mecitoğlu başta olmak üzere, bu tezi hazırlayabilmem için gerekli altyapıyı oluşturmamda bana yardımcı olan değerli Uçak ve Uzay Mühendisliği Fakültesi hocalarıma şükranlarımı sunarım. Ayrıca tez aşamasında hem tezinden hem de akademik birikiminden faydalandığım, fikirleri ve yardımlarıyla bana destek olan Yıldız Teknik Üniversitesi Gemi İnşaat Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Ahmet Sinan Öktem'e şükranlarımı sunarım. Deneyleri yapabilmem için kompozit plakları üreten THY Teknik Yapısal Tamir ve NDT Atölyesine teşekkürü bir borç bilirim. Deneyleri gerçekleştirdiğim İTÜ Uçak-Uzay Bilimleri Fakültesi laboratuar sorumlusu Müslüm Çakır'a yardımlarından dolayı teşekkür ederim. İTÜ Metalürji ve Kimya laboratuarı çalışanlarına ve Hüseyin Çimenoğlu'na çekme deneylerini gerçekleştirmemde yardımcı oldukları için şükranlarımı sunarım. Yüksek lisans eğitimim boyunca esnek çalışma saatlerimi sorun etmeyen değerli şefim Mehmet Güngör'e anlayışından dolayı çok teşekkür ederim. Deneyler sırasında bana vaktini ayıran ve benden maddi manevi yardımlarını esirgemeyen değerli kardeşim Yasin Orhan'a, tez süresi boyunca yoğun çalışma saatlerimi anlayışla karşılayan sevgili eşim Pervin Orhan'a ve bugünlere gelmemi sağlayan ve maddi manevi desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen aileme sonsuz sevgilerimi sunarım. Son olarak benim bugünlere gelmemde hakkı ödenemeyecek kadar çok olan rahmetli dedem Süleyman Orhan'a bu tezimi ithaf ederim.

Haziran 2007 Oktay Orhan

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR **v**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
SEMBOL LİSTESİ **viii**
ÖZET **ix**
SUMMARY **x**

1. GİRİŞ **1**

2. SONLU ELEMAN MODELİ VE ANALİZLER **7**
2.1 Eleman Tipleri 7
2.2 Sonlu Eleman Modelleri ve Sınır Şartları 9
2.3 Yüklerin Modellenmesi ve Analizler 11
2.4 Analiz Sonuçları 12

3. DENEY DONANIMI **19**
3.1 Deney Ekipmanları 21
3.1.1 Birim Uzama Ölçme Cihazı 21
3.1.2 Terminal Kutusu 22
3.1.3 “Strain gage” 24
3.2 Mesnet Sistemi 26
3.2.1 Ankastre Mesnet Sistemi 26
3.2.2 Basit Mesnet Sistemi 27
3.3 Yükleme Aparatları 28
3.4 Deney Numuneleri 30
3.4.1 Cam Elyaf Kompozit Plak Deney Numunesi Üretim Aşaması 30
3.4.2 Karbon Elyaf Kompozit Plak Deney Numunesi Üretim Aşaması 32
3.4.3 Deney Numuneleri Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi 32

4. SAYISAL VE DENEYSEL SONUÇLAR **36**
4.1 Deney 36
4.2 Deney Sonuçları İle Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması 36

5. DEĞERLENDİRME **44**

KAYNAKLAR **46**

EK-A **49**

ÖZGEÇMİŞ **51**

KISALTMALAR

DC : Doğru Akım (Direct Current)
LCD : Likit Kristal Ekran (Liquid Crystal Display)
CNC : Bilgisayarlı Sayısal Kontrol Tezgahı
THY : Türk Hava Yolları
NDT : Tahribatsız Muayene (Non Destructive Testing)

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1 : Plaklara uygulanan basınç değerleri…….....…….…….…. 12
Tablo 3.1 : "Strain gage" özellikleri tablosu.....……....……..... 25
Tablo 3.2 : Cam elyaf kompozit plak katman sayısı ve kalınlıkları…….... 31
Tablo 3.3 : Karbon elyaf kompozit plak katman sayısı ve kalınlıkları…....….. 32
Tablo 3.4 : Kompozit plakların malzeme özellikleri tablosu …...…….....….... 35
Tablo 4.1 : Ankastre mesnet cam elyaf kompozit plaklar için alt yüzey ε_x / ε_y. birim uzama değerleri (με)…….…….. 37
Tablo 4.2 : Ankastre mesnet cam elyaf kompozit plaklar için alt yüzey $\varepsilon_{x'}$ / $\varepsilon_{y'}$ birim uzama değerleri(με)...…….....…….….... 37
Tablo 4.3 : Ankastre mesnet cam elyaf kompozit plaklar deplasman değerleri (mm) (ANSYS)…...……. 37
Tablo 4.4 : Basit mesnet cam elyaf kompozit plaklar için alt yüzey ε_x / ε_y birim uzama değerleri (με)….....……...……..... 38
Tablo 4.5 : Basit mesnet cam elyaf kompozit plaklar deplasman değerleri (mm) (ANSYS)..…….…… 38
Tablo 4.6 : Ankastre mesnet karbon elyaf kompozit plaklar için alt yüzey ε_x / ε_y birim uzama değerleri (με)…..…... 38
Tablo 4.7 : Ankastre mesnet karbon elyaf kompozit plaklar için alt yüzey $\varepsilon_{x'}$ / $\varepsilon_{y'}$ birim uzama değerleri (με)..... 39
Tablo 4.8 : Ankastre mesnet karbon elyaf kompozit plaklar deplasman değerleri (mm) (ANSYS)……..... 39
Tablo 4.9 : Basit mesnet karbon elyaf kompozit plaklar için alt yüzey ε_x / ε_y birim uzama değerleri (με)…..... 40
Tablo 4.10 : Basit mesnet karbon elyaf kompozit plaklar için alt yüzey $\varepsilon_{x'}$ / $\varepsilon_{y'}$ birim uzama değerleri (με)…….....……...……... 40
Tablo 4.11 : Basit mesnet karbon elyaf kompozit plaklar deplasman değerleri (mm) (ANSYS)……...…….....……. 40
Tablo 4.12 : Ankastre mesnet cam elyaf kompozit plaklar için üst yüzey ε_x / ε_y birim uzama değerleri (με)…….....……... 41
Tablo 4.13 : Ankastre mesnet cam elyaf kompozit plaklar için üst yüzey $\varepsilon_{x'}$ / $\varepsilon_{y'}$ birim uzama değerleri (με)..... 41
Tablo 4.14 : Basit mesnet cam elyaf kompozit plaklar için üst yüzey ε_x / ε_y birim uzama değerleri (με)…….....……. 41
Tablo 4.15 : Ankastre mesnet karbon elyaf kompozit plaklar için üst yüzey ε_x / ε_y birim uzama değerleri (με).....…….……..…… 42
Tablo 4.16 : Ankastre mesnet karbon elyaf kompozit plaklar için üst yüzey $\varepsilon_{x'}$ / $\varepsilon_{y'}$ birim uzama değerleri (με)……...……...…….. 42
Tablo 4.17 : Basit mesnet karbon elyaf kompozit plaklar için üst yüzey ε_x / ε_y birim uzama değerleri (με)….....…… 43
Tablo 4.18 : Basit mesnet karbon elyaf kompozit plaklar için üst yüzey $\varepsilon_{x'}$ / $\varepsilon_{y'}$ birim uzama değerleri (με)…….....……...…… 43

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : SHELL91 katmanlı kabuk eleman…..... 7
Şekil 2.2 : SHELL99 katmanlı kabuk eleman…..... 8
Şekil 2.3 : Ankastre plağa uygulanan düzgün yayılı basınç yükü…….. 10
Şekil 2.4 : Basit mesnetli plağa uygulanan düzgün yayılı basınç yükü..... 10
Şekil 2.5 : Kompozit plak elyaf-katman modeli……..... 11
Şekil 2.6 : Kompozit plak alt yüzeye ait x eksenindeki normal birim uzama değişimi…….. 13
Şekil 2.7 : Kompozit plak üst yüzeye ait x eksenindeki normal birim uzama değişimi……..……..... 13
Şekil 2.8 : Kompozit plak alt yüzeye ait düzlem içi kayma birim uzama değişimi……..……. 14
Şekil 2.9 : Kompozit plak üst yüzeye ait düzlem içi kayma birim uzama değişimi…… ……. 15
Şekil 2.10 : Kompozit plak alt yüzeye ait Asal 1 gerilme değişimi……. 16
Şekil 2.11 : Kompozit plak üst yüzeye ait Asal 1 gerilme değişimi……. 16
Şekil 2.12 : Kompozit plak alt yüzeye ait Asal 3 gerilme değişimi…….. 17
Şekil 2.13 : Kompozit plak alt yüzeye ait Asal 3 gerilme değişimi…….. 17
Şekil 2.14 : 6 katmanlı cam elyaf kompozit plak birim uzama değişimi…….. 18
Şekil 2.15 : 5 katmanlı karbon elyaf kompozit plak birim uzama değişimi…. 18
Şekil 3.1 : Plak orta noktası x yönündeki birim uzama……..... 19
Şekil 3.2 : Plak çapraz eksen x' ve y' yönündeki birim uzamalar…… 20
Şekil 3.3 : "Strain gage"lerin plaklar üzerindeki yerleşim noktaları..... 20
Şekil 3.4 : Birim uzama ölçme cihazı..... 22
Şekil 3.5 : Terminal kutusu..... 23
Şekil 3.6 : Terminal kutusu ile birim uzama ölçme cihazının bağlanması..... 24
Şekil 3.7 : 0°/90° "Strain gage" rozeti..... 25
Şekil 3.8 : Ankastre mesnet..... 26
Şekil 3.9 : Basit mesnet ölçüleri……..... 27
Şekil 3.10 : Basit mesnet 28
Şekil 3.11 : Küçük kum torbası……..……... 29
Şekil 3.12 : Büyük kum torbası……..……... 29
Şekil 3.13 : Parça ağırlıklar…….. 29
Şekil 3.14 : Vakumlama yöntemi……. 31
Şekil 3.15 : Cam elyaf çekme deneyi numunesi…..…… 33
Şekil 3.16 : Karbon elyaf çekme deneyi numunesi…..…… 33
Şekil 3.17 : SHIMADZU UH-F-100KNI test makinesi……..... 33
Şekil 3.18 : Çekme numunelerine yapıştırılan "strain gage"rozeti.....……. 34
Şekil 3.19 : Cam elyaf çekme numunesi gerilme birim uzama diyagramı…… 34
Şekil 3.20 : Karbon elyaf çekme numunesi gerilme birim uzama diyagramı... 35

SEMBOL LİSTESİ

F : Kuvvet
m : Kütle
a : İvme
P : Basınç
A_s : Plağın yüzey alanı
Ω : Ohm
E_x : X Ekseni yönündeki elastisite modülü
E_y : Y Ekseni yönündeki elastisite modülü
E_z : Z Ekseni yönündeki elastisite modülü
G_{xy} : XY düzlemindeki kayma modülü
G_{yz} : YZ düzlemindeki kayma modülü
G_{xz} : XZ düzlemindeki kayma modülü
υ_{xy} : XY düzlemindeki Poisson Oranı
υ_{yz} : YZ düzlemindeki Poisson Oranı
υ_{xz} : XZ düzlemindeki Poisson Oranı
ε_x : X yönündeki birim uzama miktarı
ε_y : Y yönündeki birim uzama miktarı

ÖZET

Bu tez çalışmasında kompozit malzemeden üretilmiş katmanlı kompozit cam ve karbon elyaf plakların statik yayılı yük altındaki gerilme davranışı, dört kenarı ankastre ve basit mesnet olmak üzere iki farklı sınır şartı için deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deney numunelerinin üretiminde iki farklı metod kullanılmıştır. Cam elyaf kompozit plaklar ıslak reçine sürme yöntemi ile üretilmişlerdir. Karbon elyaf kompozit plaklar ise, önceden reçine emdirilmiş hazır kompozit kumaşlardan üretilmişlerdir. Deneysel çalışmada, kum torbaları ve ağırlıklar yayılı yük olarak mesnetlenmiş plak üzerine etki ettirilmiştir. Ankastre mesnetin sınır şartlarını sağlayabilmek için iki adet delikli metal çerçeve kullanılmıştır. Bu iki çerçevenin arasına kompozit plaklar civata-somun bağlantısıyla sabitlenmiştir. Basit mesnet de ise, kare bir çerçevenin içine yarım daire kanal açılmıştır. Bu kanala dayanıklı bilyeler doldurulmuştur. Plaklar bilyelerin üzerine yerleştirilerek deneyler yapılmıştır. Plak alt yüzeyine iki farklı bölgeye yerleştirilen "strain gage"ler ile yük altında meydana gelen birim uzamalar ölçülmüştür. Deney ölçümleri TC-31K model birim uzama ölçme cihazı ve CSW-5A model terminal kutusu ile elde edilmiştir. Sayısal analizde ANSYS 10 sonlu eleman yazılımı kullanılmıştır. Katmanlı kompozit plaklar, bu yazılımın kütüphanesinde bulunan SHELL91 ve SHELL99 katmanlı kabuk elemanlar ile modellenmiştir. Öncelikle plaklar için lineer statik analizler yapılmıştır ve birim uzamaların kritik olduğu bölgeler belirlenmiştir. Daha sonra uygulanan yayılı yük değeri arttırılarak lineer olmayan durumlarda plakların alt ve üst yüzeylerinin davranışları incelenmiştir. Hesaplanan birim uzama değerleri deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak cam elyaf kompozit plakların deney sonuçları sonlu elemanlar analizinden bulunan sonuçlara daha yakın olduğu görülmüştür.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF STATIC BEHAVIOUR OF MONOLITHIC COMPOSITE PLATES UNDER UNIFORMLY DISTRIBUTED LOADING

SUMMARY

Static behavior of monolithic composite plates is studied under uniformly distributed loading experimentally and also numerically for two different boundary conditions; four edges clamped and simple supported. Two different manufacture methods are used for the specimens. Fiberglass composite plates are manufactured with wet lay up method. Carbon fiber composite plates are manufactured from prepreg fabric. In experimental study, sandbags and weights are affected on supported monolithic composite plates as a uniformly distributed load. Two metallic frames with holes are used to achieve clamped boundary conditions. Composite plates are fastened between those frames with bolt-nut mechanical coupling. Semi circle slot is cut out from square frame to achieve simply supported boundary conditions. That slot is filled up with high strength ball bearing. Composite plates are put on the ball bearing to make experiments. Under uniformly distributed loading, strain values are measured from two strain gage rosettes which are placed a surface of the composite plates. TC-31K model strain meter and CSW-5A model switch box are used for strain measurement during experiments. For numerical analysis, ANSYS 10.0 finite element software is used. Monolithic composite plates are modeled with SHELL91 and SHELL99 layered shell elements which are present in the library of the software. First of all, linear static analysis is carried out and critical regions are determined where strains are maximums. Furthermore, behavior of top surface and bottom surface of the monolithic composite plates are studied for nonlinear conditions due to the large deformations caused by the excessive loads. Computed strain values are compared with the experimental results. In summary, it can be seen that experimental results of the fiberglass composite plates are closer to the results of the finite element analysis than those of carbon fiber composite plates.

1. GİRİŞ

Bu çalışmada çeşitli sınır şartlarına sahip katmanlı kompozit plakların yayılı yükler altındaki statik davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Kompozit malzemelerin dayanım/ağırlık oranlarının yüksek olması sayesinde hava-uzay ve deniz araçlarındaki kullanım oranı gün geçtikçe artmaktadır. Buna örnek olarak Boeing 777 uçağı verilebilir. Bu uçağın kuyruk yapısında sertleştirilmiş grafit kompozitler, motor kaportalarında grafit kompozitler, kontrol yüzeylerinde ve gövdesinin çeşitli bölgelerinde ise hibrid kompozitler son olarak radom bölgesinde ise cam elyaf kompozit malzemeler kullanılmıştır [1]. Yolcu uçağının gövdesinin hafif olması sayesinde uçuş başına yakıttan elde ettiği tasarrufu düşünürsek bu malzemelerin havacılık açısından ne kadar önemli olduklarını daha iyi anlamış oluruz. Sayısal bir örnek vermek gerekirse, aynı dayanıma ve geometriye sahip bir kompozit yapı, çelikten imal edilenden %80, alüminyumdan imal edilen yapıdan %60 daha hafiftir [2]. Kompozit malzemeler hafif olma özelliklerinin yanı sıra tasarımcıya dizayn esnekliği sunması sayesinde karmaşık yapıların üretiminde kolaylıklar sağlamaktadırlar. Metal malzemelere karmaşık bir form verebilmek için birçok prosese gereksinim duyulmakta iken, kompozit malzemeler kür edilmeden önce kolay şekil alabildikleri için çok daha ucuz ve basit yöntemler yeterli olmaktadır. Buna en iyi örnek Grumman X29 uçağının kanatları verilebilir [1, 3].

Yüksek mukavemet/ağırlık, dayanım/ağırlık gibi üstün özelliklerinden dolayı elyaf takviyeli kompozitlerin (grafit/epoksi, boron/epoksi, kevlar/epoksi vb) özellikle uzay/uçak, denizcilik, otomotiv ve yapısal uygulamaların olduğu her alanda klasik malzemelerin yerini aldığı görülmektedir. Fakat bu üstün özelliklere sahip yeni malzemelerin kullanımı beraberinde henüz çözümlenmemiş birtakım yeni problemleri de getirmiştir. Üretim aşamasında, istenilen özellikteki malzemeyi elde etmek amacıyla elyaf ve matris malzemelerinin uygun bir şekilde birleştirmek oldukça problemlidir.

Elyaf takviyeli kompozit tabaka/kabukların analizi, katmanların malzeme özelliklerinin yöne bağlı olarak değişmesi (anisotropy), katmanlar arası özelliklerin uyuşmamasından doğan karmaşık birleşik etkiler (uzama/eğilme etkilerinin birlikte olması) ve kalınlık boyunca kesme gerilmelerinin mevcut olması nedeniyle karmaşık ve oldukça zordur.

Bütün bu zorluklara ilaveten, değişik yükleme ve sınır koşullarının bu yapıların davranışlarına olan etkisi durumu daha da zorlaştırmaktadır. Bu farklılıkların tasarım aşamasında hesaplara dahil edilmesi ve kabuller yapılması gerekmektedir. Çok katmanlı tabakaların 3 boyutlu analitik modelinin oluşturulması çoğunlukla oldukça zordur. Bu nedenle tabakalı kompozit elastik özelliklerin tek bir katman ve tabakalama sırasının fonksiyonu olduğu tek bir katman olarak modellenmektedir. Bu, yer değiştirme dağılımının tabakanın kalınlığı boyunca olduğu kabul edilen eşdeğer tek kat teorileri ismi verilen teoriler yardımıyla yapılır. Bu dağılımlar vasıtasıyla kalınlık boyunca oluşan birim uzamalar ve tabakanın deformasyonu hesaplanır. Bunların en basiti klasik katmanlama teorisiyken, daha kalın tabakaların davranışını tanımlamak amacıyla yüksek dereceden çeşitli eşdeğer tek kat teorileri literatürde mevcuttur.

Tabakalı kompozit yapıların davranışlarını incelemek üzere çok çeşitli analitik/sayısal modeller geliştirilmiştir. Analitik modellerin büyük çoğunluğu, klasik katmanlama teorisi [4-7] ya da birinci dereceden deformasyon teorisini [8-10] kullanırlar. Fakat klasik katmanlama teorisi tabakalar arası kayma deformasyonunu ihmal ettiğinden dolayı ve birinci dereceden deformasyon teorisi de tabakalar arası kayma deformasyonunu tabaka kalınlığı boyunca sabit olduğu varsayımını kabul ettiği için bu yapıların davranışını tam olarak modelleyememesi daha yüksek dereceden teorilerin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Tabakalı plaka ve kabuklarla ilgili sayısal ve analitik çalışmaların detaylı bir araştırması Noor ve Burton tarafından verilmiştir [11]. Çapraz örgülü (0/90) tabakalı kompozit tabakalarla ilgili az sayıdaki üç boyutlu elastisite çözümleri, özel tipte basit mesnet sınır koşullarını içeren durumlar için Pagano [12] ve Srinivas ve Rao [13] tarafından yapılmıştır. İkinci ve daha yüksek derecelerden teorilere örnek Nelson ve Lorch [14], Levinson [15], Murthy [16], Librescu ve Khdeir [17] verilebilir.

Sınır koşullarının tabakalı kompozit yapıların davranışına olan etkileriyle ilgili yapılmış analitik/sayısal çalışmalarla ilgili detaylı bilgi Öktem'in doktora tez çalışmasında bulunabilir [18]. Latheswary ve arkadaşları yayılı yüke maruz kalan katmanlı kompozit plakların davranışlarını Reddy'nin [19] yüksek dereceli teorilerini kullanarak genişlik-kalınlık oranı, elyaf dizilişi, katman sayısı, kalınlık oranı ve farklı sınır şartları altında incelemişlerdir [20]. Eşdeğer tek tabaka teorisinin bir parçası olan üçüncü dereceden kayma deformasyonu teorisi üzerine yapılan çalışmalara örnek olarak Bose ve Reddy [21], Liberescu ve Hause [22], Lo ve arkadaşları [23] verilebilir. Bu teorinin klasik katmanlama teorisinden ve birinci dereceden deformasyon teorisinden farkı deformasyon öncesi tarafsız yüzeye dik olan kesitlerin deformasyon sonrasında tarafsız yüzeye dik kalmadığının kabulüdür. Bir başka deyişle diğer iki teoride hesaba katılmayan kesme kuvvetlerinden kaynaklanan kayma gerilmesinin hesaba katılmasıdır. Rastgaar ve arkadaşları, mekanik yüklerden dolayı oluşan deformasyonları üçüncü dereceden kayma deformasyonu teorisi ile incelemişlerdir [24]. Son zamanlarda yapılan çalışmalarla ilgili ve yüksek dereceden bir deformasyon teorisini baz alan ve Levy tipi kalın tabakalı kompozit tabakaların analitik çözümüne yönelik çalışmalar Chaudhuri ve Kabir [25] tarafından yapılmıştır. Yapılmış olan bu çalışmalara ilaveten, sınır koşullarının etkisini incelemeye yönelik analitik, deneysel ya da sayısal olarak yapılan çalışmaların birçoğunda görüleceği üzere [26, 27], tabakalı yapıların dinamik analizlerini (titreşim), ısıl yükler, eğilme ya da yalnızca tek bir yükleme durumunu ve kısıtlı sayıda sınır koşulunun incelendiği Mostafa ve arkadaşları [28] tarafından yapılan çalışmalardan ibarettir. Deneysel nitelikte olan tek çalışma 2006 yılında yayınlanmış olan Mostafa ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadır [28]. Bu çalışmada iki farklı sınır şartı incelenmiş, deplasmanlar elektronik nokta yöntemi ile ölçülmüştür. Son olarak sonuçlar sonlu eleman modeli ile kıyaslanmış ve yorumlanmıştır.

Çeşitli dereceden karmaşıklık içeren birçok model teoride mevcut olduğu halde, yapılan literatür araştırmasında, kompozit tabakaların farklı sınır koşulları ve yükleme durumları altındaki davranışlarının gerek deneysel gerekse sayısal olarak incelenmesi son derece sınırlıdır. Oysaki sınırlı sayıda yapılan çalışmalar, sınır koşullarının yapının gerilme ve deformasyon davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir.

Özellikle ön tasarım aşamalarında zaman ve para kaybını minimuma indirmek ve en etkili tasarımı yapabilmek için, hazır olarak bir veri tabanının bulunması çok önemlidir. Bu çalışmada sınır koşullarının kompozit plakların deformasyon ve gerilme davranışına olan etkisinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışma hava-uzay, deniz araçları, kara nakil vasıtaları ve birçok askeri-sivil yapılarda kullanımı giderek yaygınlaşan katmanlı kompozit plakların güvenli ve hafif olarak tasarlanabilmeleri için farklı sınır şartlarında ve farklı yüklemeler altında gerilme ve deformasyon davranışlarının anlaşılmasına yönelik bir çalışmadır. Kompozit yapılar özellikle cam elyafı başta olmak üzere ülkemizde yoğun olarak hafif yapıdaki sürat motorlarının imalatında kullanılmaktadır. Fakat dünyada son zamanlarda uçak gövdesinin imalatında, otomotiv sektöründe bile kullanılan kompozit yapılar ülkemizde gerekli önemi şimdilik kazanamamıştır. Hava-uzay araçlarında hafif ve dayanıklı yapının ihtiyacından dolayı ilk olarak üretilen kompozit yapılar dizayn ve üretim esnekliği sağlamasından dolayı kısa zamanda önemi anlaşılmış ve araştırmalar hızlandırılmıştır.

Bu çalışmadan elde edilen veritabanı sayesinde kompozit yapıların belirli sınır şartlarında kullanılması durumunda optimum yapının elde edilmesi sağlanabilecektir. Bu sayede dayanıklı ve güvenli bir yapının kalınlık ve katman sayısı bakımından optimizasyonu sağlanabilecektir. Kullanıldığı alanlardan da anlaşıldığı gibi stratejik öneme sahip olan bu yapıların ülkemizde de gerek savunma sanayisinde gerek özel sektörde olmak üzere kullanımının yaygınlaştırılması ve dizayn kriterlerinin oluşturulmasında gerilme ve deformasyon davranışlarının iyice anlaşılması için deneysel nitelikte olan bu çalışma büyük öneme sahiptir.

Yukarıda bahsedilen literatür araştırmasından, kompozit tabakaların, özellikle gerek uzay/havacılık sanayinde gerekse otomotiv/gemi sektöründe kullanımı hızla artan, çift yönlü tabakalı kompozit plakların, çeşitli yükleme durumlarında, yapının deformasyon ve gerilme davranışında çok önemli etkiye sahip (bakınız Öktem [18]) sınır koşullarının yeterli analizi yapılmamıştır.

Bu çalışmada cam ve karbon elyaflardan üretilen monolitik yapıya sahip iki yönlü kompozit plakların farklı sınır şartlarında statik yayılı yük altında gerilme davranışlarının deneysel olarak incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

Aynı koşulların geçerli olduğu problem bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yöntemi ile simüle edilerek sayısal analizi yapılmıştır.

Deney numuneleri cam elyaf kumaşlar için ıslak reçine sürme yöntemi (wet lay-up method) ve karbon elyaf kumaşlar için önceden reçine emdirilmiş kumaşların kür edilmesi yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Deneylere başlamadan önce problem ANSYS bilgisayar yazılımında analiz edilerek birim uzamaların kritik olduğu bölgeler belirlenmiştir. Bu bölgelere "strain gage" rozetleri yapıştırılmıştır. Bu "strain gage"ler birim uzama ölçer cihazına bağlanarak yükleme sırasında elde edilen değerler kaydedilmiştir. Deney ve analiz sonuçları değerlendirilerek uyumları incelenmiştir. Uyumsuzluklar ve sebepleri araştırılmıştır. Deney ve analizlerde farklı kalınlık oranlarındaki kompozit plaklar kullanılmıştır.

Bu tez çalışmasının amacı sınır şartlarının, katman sayısının ve plak kalınlığının plağın gerilme davranışlarına etkisinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesidir. Daha önce yapılan çalışmadan [28] farklı olarak deplasman ölçümünden ziyade plakların alt yüzeyine yerleştirilmiş olan "strain gage"lerden elde edilen birim uzama değerleri yorumlanmıştır. Ayrıca plak kalınlığı ve katman sayısı artırılarak deneyler tekrarlanmıştır. Lineer olmayan bölgeye geçen plak deformasyonları için ANSYS yazılımında nonlineer çözümler yapılıp sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sınır şartları olarak ankastre ve basit mesnet uygulanmıştır. Ankastre durumunda kare plaklar dört kenardan sabitlendiğinden üç yönde de dönme ve ötelenme engellenmiştir. Bu durumda dört kenarda birden üç eksende deplasmanlar ve bu yöndeki dönme açıları sıfır olmaktadır. Basit mesnet de ise iki yönde ötelenme ve üç yönde dönme serbest bırakılmış bir yönde ötelenme engellenmiştir. Bu durumda plak kenarlarında üç eksende dönmeler ve düzlem içi eksenlerdeki deplasmanlar oluşmaktadır. Yalnızca plak kenarlarında plak düzlemine dik olan eksende herhangi bir öteleme söz konusu olmamaktadır.

Çalışmamın ikinci bölümünde deney koşullarının sonlu elemanlar modeline yer verilmiştir. Modellemede kullanılan elemanlar tanıtılmıştır. Ayrıca uygulanan sınır şartları ve yükleme koşullarının nasıl modellendiği detaylı olarak anlatılmıştır. Deney düzeneği için gerekli olan birim uzama ölçme cihazı ve aparatları, yükleme şartlarının oluşturulması için tasarlanan yayılı yük teçhizatları ve deneyde kullanılan kompozit plak numunelerinin üretim aşaması üçüncü bölümde yer almaktadır.

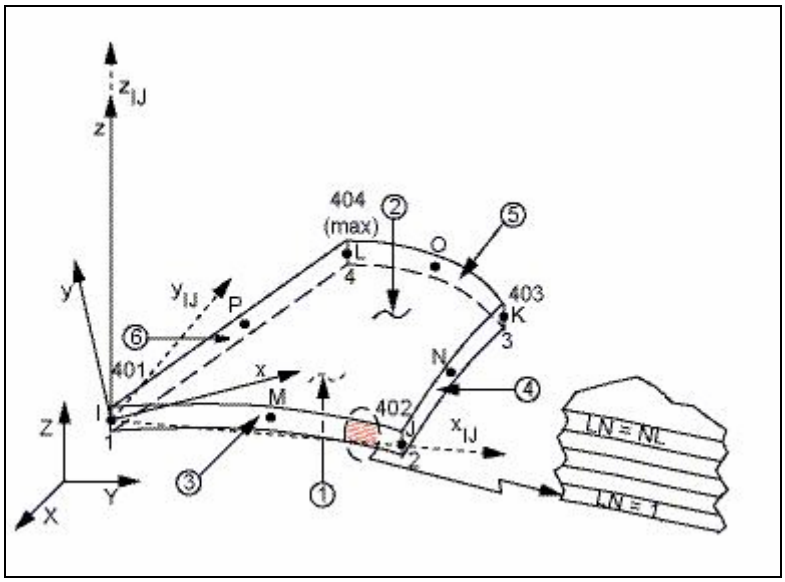
Sonlu eleman modelinden alınan sayısal sonuçlar ve deney ortamından elde edilen sonuçlar dördüncü bölümde konu edilmiştir. Bu sonuçların karşılaştırılması ve yorumlanması da aynı bölümdedir. Çalışmamın son bölümünde ise yapılan çalışmanın kısa özeti, sonuçların uyumu ve gelecekte bu konu ile ilgili yapılabilecek çalışmalara değinilmiştir.

2. SONLU ELEMAN MODELİ VE ANALİZLER

Sonlu eleman analizleri için ANSYS 10 yazılımı kullanılmıştır. Bu bölümde eleman tipleri, plakların sonlu eleman modelleri, sınır şartları ve yüklerin modellenmesi hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca analiz sonuçlarından bir tanesi örnek olarak bu bölümde sunulmuştur. Ankastre ve basit mesnet olmak üzere iki farklı sınır şartı için farklı ağırlıktaki yüklerle statik analizler gerçekleştirilmiştir.

2.1 Eleman Tipleri

Sonlu eleman analizinde ANSYS yazılım kütüphanesinde bulunan lineer olmayan SHELL91 ve SHELL99 tipi yapısal eleman kullanılmıştır. (Şekil 2.1 ve Şekil 2.2)

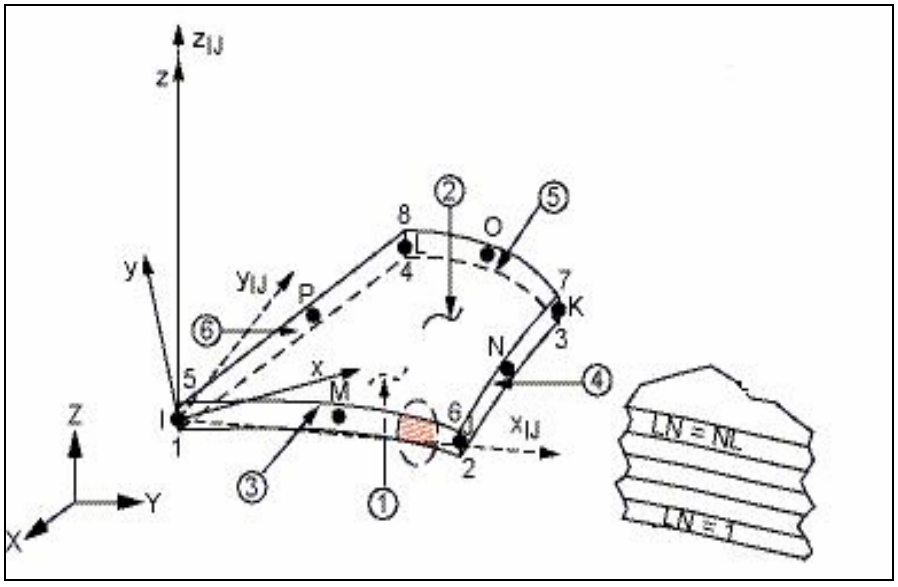


Şekil 2.1: SHELL91 katmanlı kabuk eleman

Lineer olmayan SHELL91 elemanı, köşelerde ve kenar orta noktalarında olmak üzere 8 düğüm noktasına sahiptir. Ayrıca x,y ve z eksenleri boyunca öteleme ve yine x,y ve z eksenleri etrafında dönme olmak üzere 6 serbestlik derecesine sahiptir. 16 tabakaya kadar modellenebilir ve her tabakaya farklı malzeme özellikleri tanımlanabilir [29].

10 katmana kadar olan tüm cam ve karbon elyafdan üretilen plaklar lineer olmayan SHELL91 tipi eleman ile modellenmiştir. Fakat lineer olmayan SHELL91 tipi eleman 16 katmandan fazlasını modelleyemediği için 20 katmanlı cam ve karbon elyaf plaklar için SHELL99 tipi eleman kullanılmıştır. Analiz sonuçlarından da anlaşılacağı üzere uygulanan yükün miktarı ve plağın kalınlığından ötürü deneylerde 20 katmanlı plaklarda lineer olmayan davranış ortaya çıkmamıştır. Bu nedenle 20 katmanlı plakları lineer bir eleman ile modellemek mümkün olmuştur. Sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS programı, SHELL91 eleman ile hesap yaparken bazı kabuller yapmaktadır. Bunlar aşağıdaki gibidir;

- Tabakalı kompozit yapılarda, tabakalar arasında kayma meydana gelmediği kabul edilir,
- SHELL91 eleman kayma deformasyonunu hesaplara katmaktadır. Bununla birlikte tarafsız düzlemin normali deformasyondan sonra da düz kalmaktadır,
- Oluşan kayma gerilmesi her bir tabakanın kalınlığı boyunca lineer olarak değişir,
- Bir elemanın alt ve üst yüzeylerinin kayma yüklerini taşımadığı kabulü yapılarak tabakalar arası enine kayma gerilmesi hesaplanır. Üstelik bu tabakalar arası kayma gerilmeleri sadece elemanın merkezinde hesaplanır ve elamanın sınırları boyunca geçerli değildir. Eğer elemanın kenarlarında oluşan kayma gerilmelerinin tam olarak hesaplanması gerekiyorsa, "SHELL-SOLID" alt modelleri kullanılmalıdır.



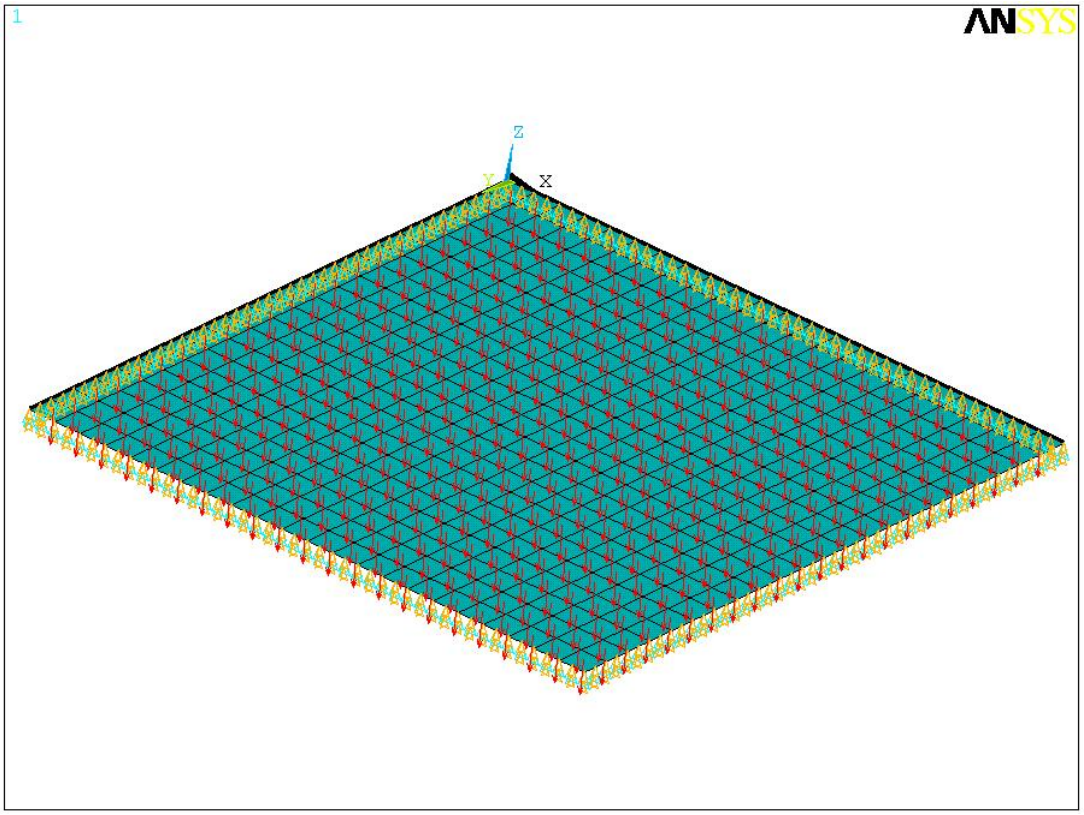
Şekil 2.2: SHELL99 katmanlı kabuk eleman [31]

SHELL99 elemanı, köşelerde ve kenar orta noktalarında olmak üzere 8 düğüm noktasına sahiptir. Ayrıca x,y ve z eksenleri boyunca öteleme ve yine x,y ve z eksenleri etrafında dönme olmak üzere 6 serbestlik derecesine sahiptir. 250 tabakaya kadar modellenebilir ve her tabakaya farklı malzeme özellikleri tanımlanabilir [29]. SHELL99 yalnızca lineer analizlerde doğru sonuçlar vermektedir. Sonlu elemanlar yöntemini kullanan ANSYS programı, SHELL99 eleman ile hesap yaparken de aynı SHELL91'deki kabulleri kullanmaktadır. Tek farkı, büyük deformasyonlar için SHELL99 elemanın özellikleri yetersiz kalmaktadır. Eğer büyük deformasyonlar mevcut ise yapıyı lineer olmayan SHELL91 elemandan oluşturmak gerekir.

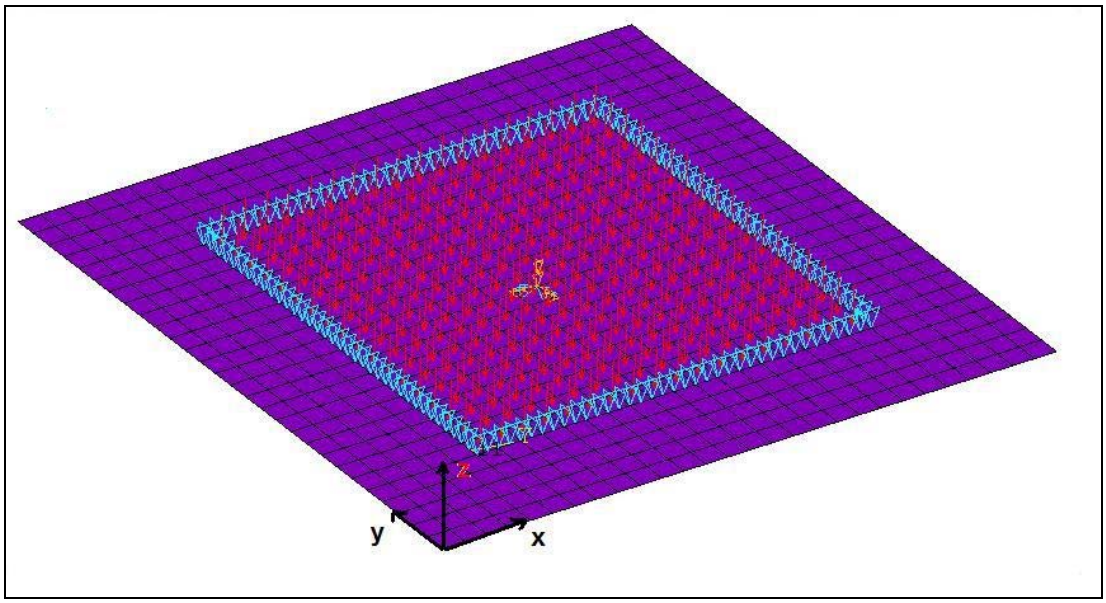
2.2 Sonlu Eleman Modelleri ve Sınır Şartları

Deneylerde kullanılan monolitik yapıya sahip katmanlı cam ve karbon elyaf plaklar, dört kenarı ankastre ve dört kenarı basit mesnet olmak üzere iki farklı sınır şartı altında farklı miktarda yüklere maruz bırakılarak statik davranışı incelenmiştir. Ankastre ve basit mesnet sınır şartlarında plağa etki eden yük alanı 225 mm x 225 mm'dir.

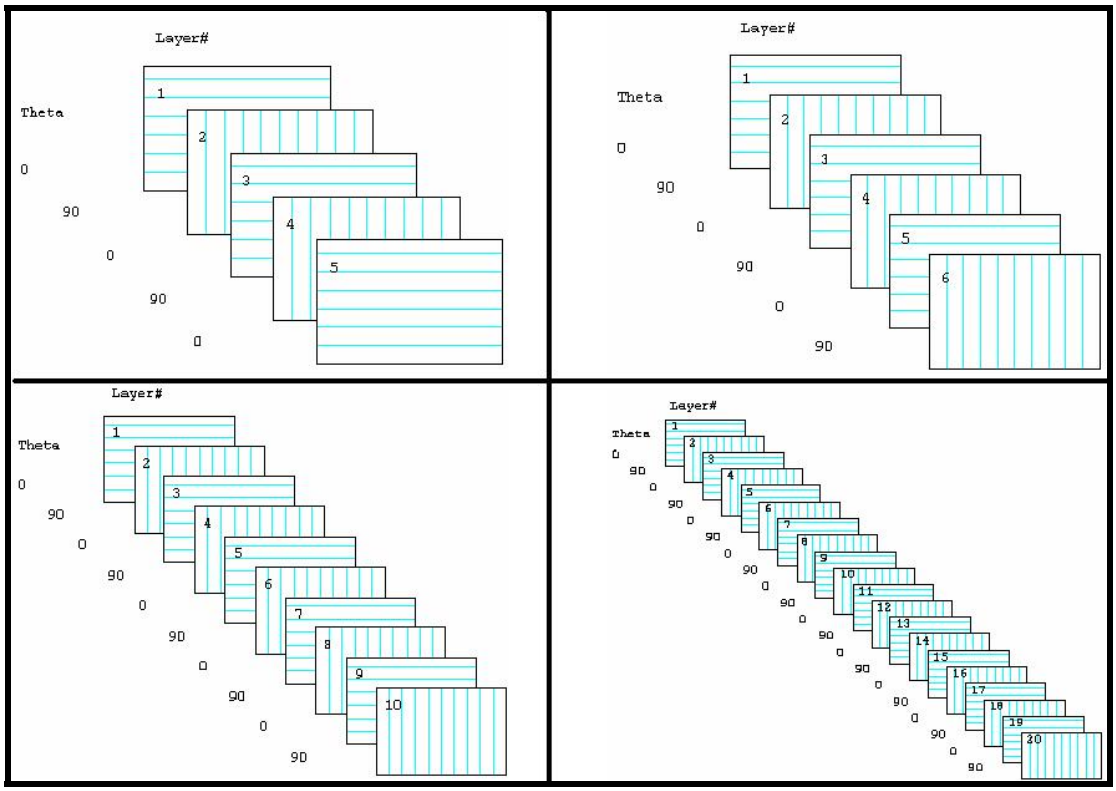
ANSYS yazılımı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulan katmanlı cam ve karbon elyaf plakların her bir kenarı 22'ye bölünerek toplam 484 adet 10 katmana kadar olan plaklar için lineer olmayan SHELL91 eleman ile modellenmiştir. 20 katmanlı plaklar için ise SHELL99 eleman ile sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Plakların her bir kenarı ankastre ve basit mesnet olarak iki farklı sınır şartı oluşturacak şekilde modellenmiştir (Şekil 2.3 ve 2.4). Ankastre plak modelinde plağın dört kenarı da üç yönde öteleme ve dönmeye karşı sabitlenmiştir. Basit mesnette ise düzlem içi ötelemeler serbest bırakılmış sadede plak kalınlığı boyunca olan dikey eksen yönünde öteleme sabitlenmiştir. Her üç yönde de dönme serbest bırakılmıştır. Plakların katman modelleri ise Şekil 2.5'de görülebilir. Fiberlerin birbirleri ile yaptıkları açı 0/90 olacak şekilde plaklar modellenmiştir.



Şekil 2.3: Ankastre plağa uygulanan düzgün yayılı basınç yükü



Şekil 2.4: Basit mesnetli plağa uygulanan düzgün yayılı basınç yükü



Şekil 2.5: Kompozit plak elyaf-katman modeli

2.3 Yüklerin Modellenmesi ve Analizler

"Strain gage"lerin katmanlı cam ve karbon elyaf plakların üzerinde en etkin biçimde yerleştirilebilmesi için plağın gerilme ve birim uzama değerlerinin kritik olduğu noktalar belirlenmiştir. Bunun için ANSYS programı kullanılarak her iki sınır şartı için plak üzerine Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'de gösterildiği gibi her bir plak için Tablo 1'de verilen değerlerde düzgün yayılı basınç yükü uygulanmış ve meydana gelen deplasmanlar plağın kalınlığına göre kimi büyük mertebede olduğunda lineer olmayan statik analizler yapılmıştır. Lineer olmayan statik analizler için plağın üst yüzeyinin birim uzama değerleri de kayıt edilmiştir. Analiz sonuçları değerlendirilerek yüklerin plaklarda aşırı veya çok düşük deformasyon ve gerilme oluşturduğu durumlar belirlenmiş ve bu yüklemeler deneylerde göz ardı edilmiştir.

Tablo 2.1: Plaklara uygulanan basınç değerleri

PLAK ÇEŞİTİ	BASINÇ (Pa)								
	194	**387**	**775**	**1937**	**3874**	**5813**	**7751**	**9688**	**13564**
6Katman Cam	✓	✓	✓	✓	✓				
10Katman Cam				✓	✓	✓	✓		
20Katman Cam				✓	✓	✓	✓		
5Katman Karbon			✓	✓	✓	✓	✓		
10Katman Karbon				✓	✓	✓	✓		
20Katman Karbon						✓	✓	✓	✓

Analizlerde kullanılan basınç değerleri, deneylerde kullanılan kütlelerin kuvvete çevrilerek plak alanına bölünmesiyle elde edilmiştir. Örnek olarak deney düzeneğinde kullanılan plak üzerindeki kum torbasının kütlesi 4 kg ise, analizlerde kullanılan basınç değeri denklem 2.1'deki gibi hesaplanır..

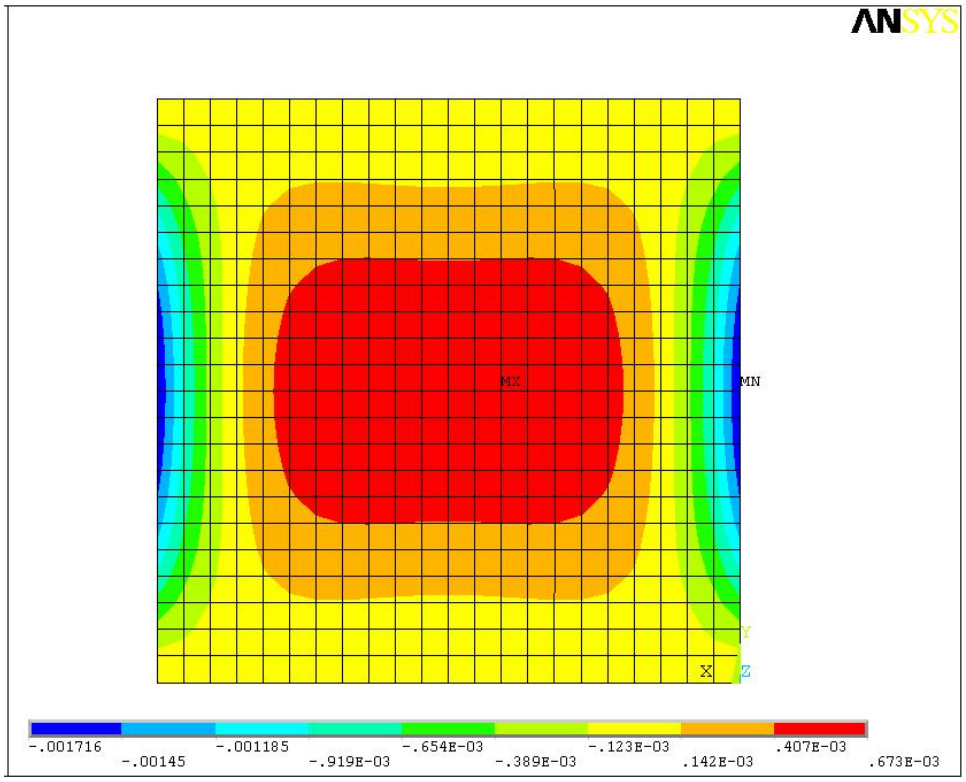
$$F = mg \quad \Rightarrow \quad F = 4x9{,}81 \qquad F = 39{,}24\ N$$
$$P = \frac{F}{A_s} \Rightarrow P = \frac{39{,}24\,(N)}{(0{,}225x0{,}225)\ \ (m^2)} = 775\ \ Pa \qquad \textbf{(2.1)}$$

Bu şekilde 1, 2, 4, 10, 20, 30, 40, 50 ve 70 kg'lık kütleler basınç değerlerine dönüştürülerek ANSYS programında analizler için kullanılmışlardır.

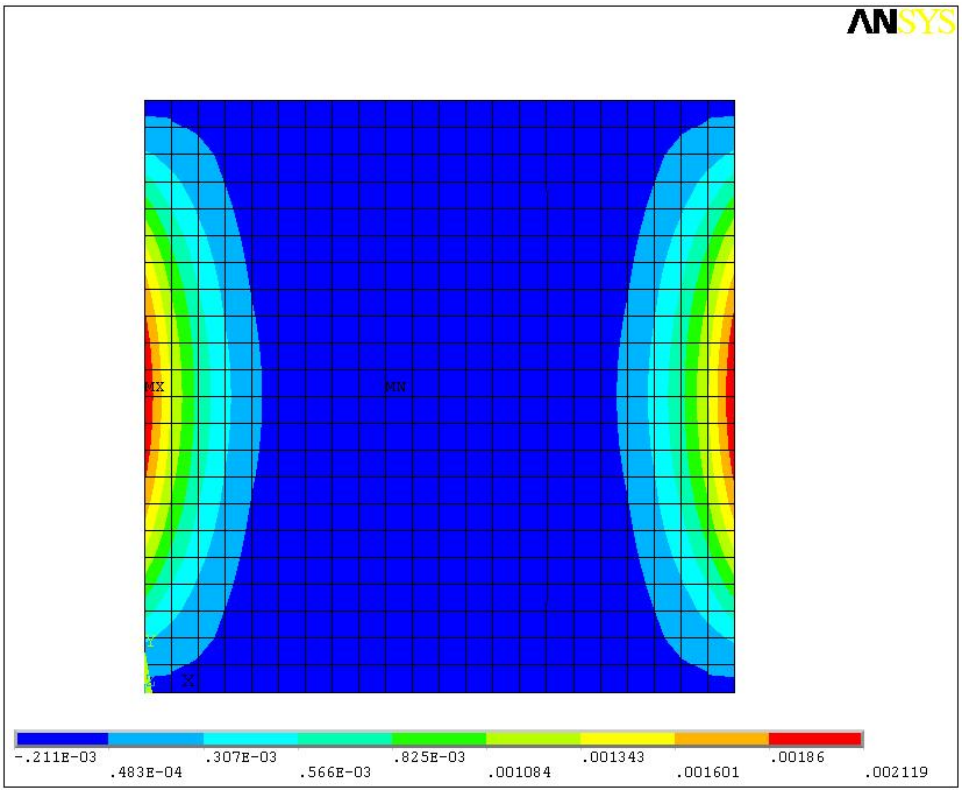
2.4 Analiz Sonuçları

Bu bölümde lineer olmayan bir statik analizin sonuçları sunulmaktadır. 6 katmanlı cam elyaf kompozit plağın 20 kg'lık kütle ile statik analizine yer verilmiştir. Sınır şartı olarak ankastre sınır şartı modellenmiştir. Sonuç olarak alt ve üst yüzeylerin birim uzamalarına ve asal gerilmeleri incelenmiştir. Analiz sonuçları değerlendirilmiştir. Alt ve üst yüzeylerin aynı yükleme ve sınır koşullarındaki davranışları da ele alınmıştır. Tüm grafikler ANSYS yazılımından elde edilmiştir.

İlk olarak alt ve üst yüzeyde meydana gelen x yönündeki birim uzama değişimlerine yer verilmiştir (Şekil 2.6 ve 2.7). Şekil 2.6'dan anlaşılacağı üzere plağın ortasında yoğunlaşan çekme birim uzaması mevcuttur. Fakat plağın kenarlarında oluşan mavi renkle gösterilen basma birim uzaması değer bakımından ortada oluşan birim uzamalardan çok daha büyüktür.

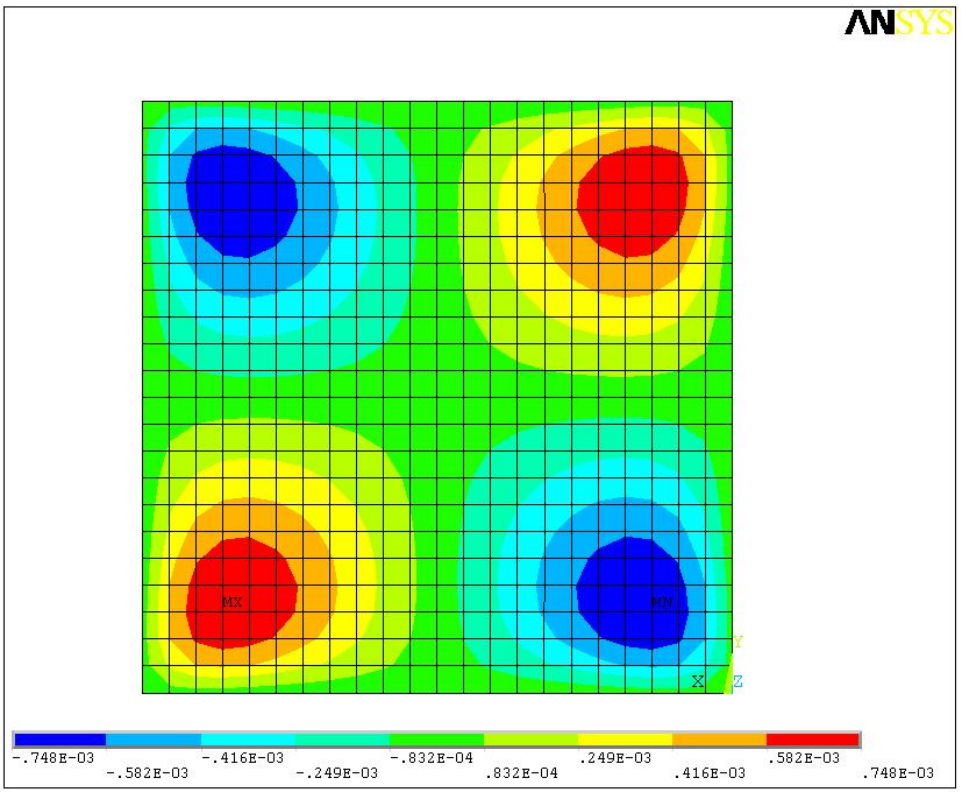


Şekil 2.6: Kompozit plak alt yüzeye ait x eksenindeki normal birim uzama değişimi



Şekil 2.7: Kompozit plak üst yüzeye ait x eksenindeki normal birim uzama değişimi

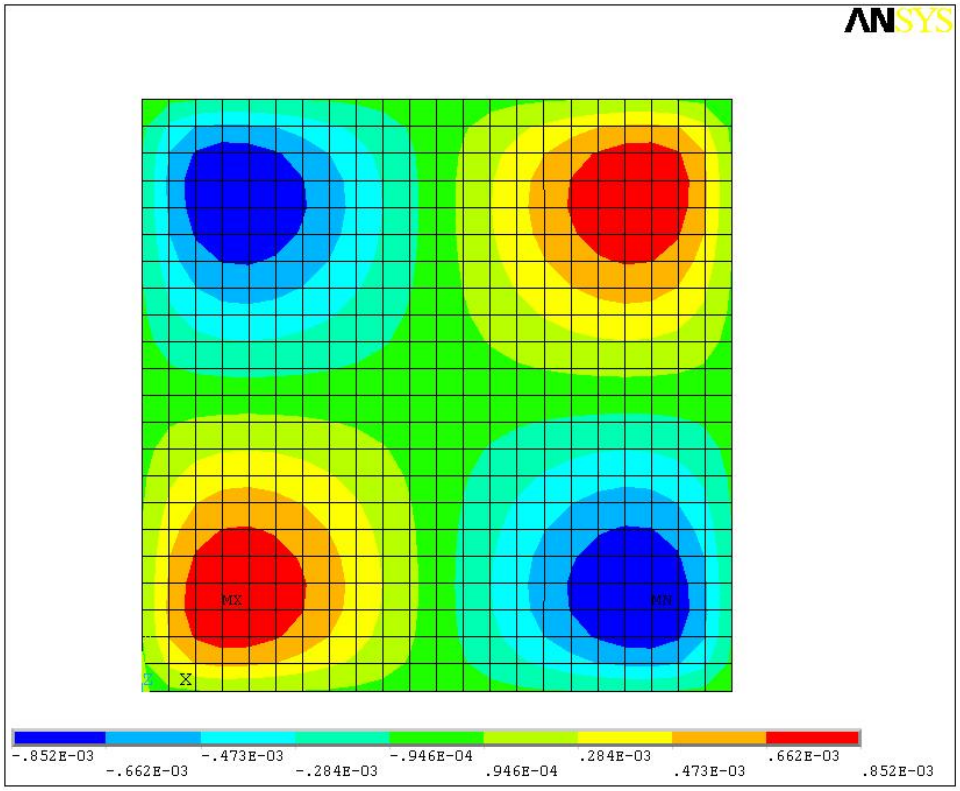
Şekil 2.7'de ise plak üst yüzeyinin kenarlarında ankastre mesnet bağlantısının olduğu bölgede yüksek değerlerde çekme birim uzaması görülmektedir. Bunun nedeni ise yayılı yükün plağı aşağı yönde zorlaması ve ankastre mesnet bağlantısının bu harekete izin vermemesinden dolayı meydana gelen çekme durumudur. Bu etki plağın orta noktasına doğru ilerledikçe şiddetini yitirmektedir. Ve belli bir bölümden sonra yerini basma birim uzamalarına bırakmaktadır. Eğer yükleme büyük deformasyonlara yol açmayacak bir şiddette olsaydı alt ve üst yüzey normal birim uzama dağılımları birbirine çok benzer olacaktı. Tek fark çekme normal birim uzamaları yerine basma; basma birim uzamaları yerine çekme birim uzamalarının görülmesi olacaktı. y eksenindeki birim uzamaları x eksenindeki birim uzamaların 90° açı yapmış hali ile aynı olduğundan ayrıca gösterilmemiştir.



Şekil 2.8: Kompozit plak alt yüzeye ait düzlem içi kayma birim uzama değişimi

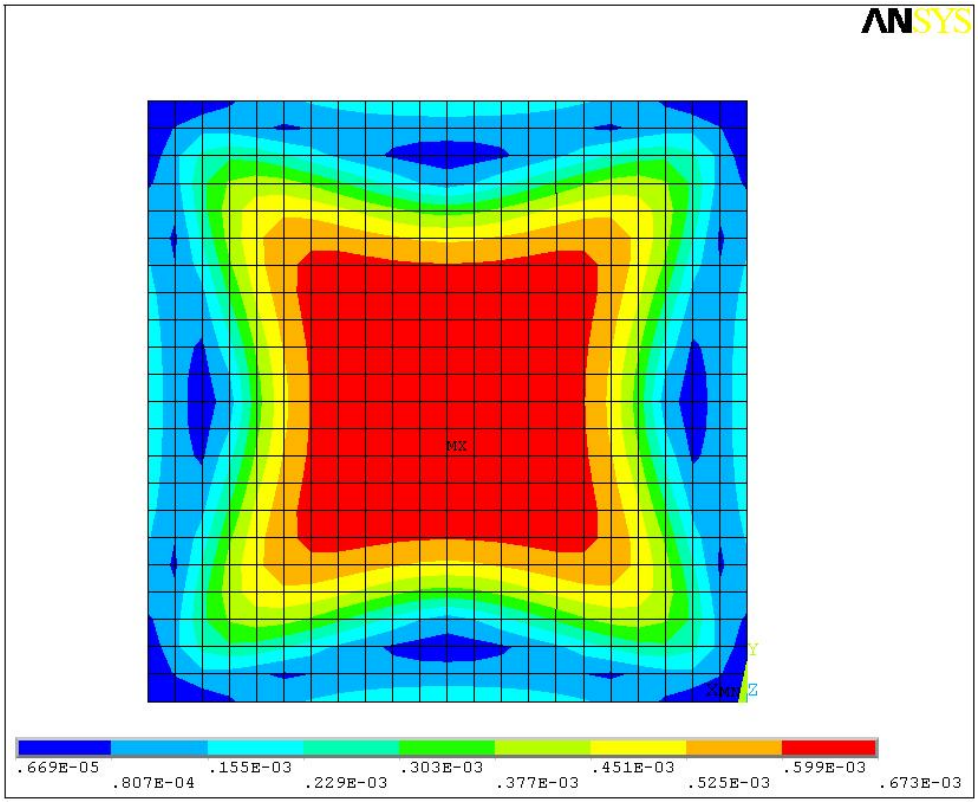
Şekil 2.8 ve 2.9'da ise alt ve üst yüzeylerde oluşan düzlem içi kayma birim uzamaları gösterilmektedir. Şekil 2.8 ve 2.9 incelendiğinde alt ve üst yüzey kayma birim uzamalarının plak üzerinde simetrik bir şekilde meydana geldikleri görülmektedir. Alt ve üst yüzey arasındaki tek fark ise sayısal değer bazındadır. Üst yüzey alt yüzeye nazaran beklendiği üzere daha yüksek kayma birim uzamalarına maruz kalmaktadır.

Şekil 2.10 ve 2.11 ise sırasıyla plak alt yüzey ve üst yüzey asal 1 gerilme değişim grafiğini göstermektedir. Plak alt yüzeyinde maksimum asal gerilmeler plağın orta kısmında oluşmakta iken, kenarlara doğru ilerledikçe çekme gerilmesinin etkisinin azaldığı görülmektedir. Üst yüzeyde ise durum tam tersine dönmüştür. Bir başka deyişle, ankastre mesnet etkisinden dolayı kenarlarda maksimum çekme gerilmesinin etkisi hakim iken, orta noktaya doğru etkisini yitirmektedir.

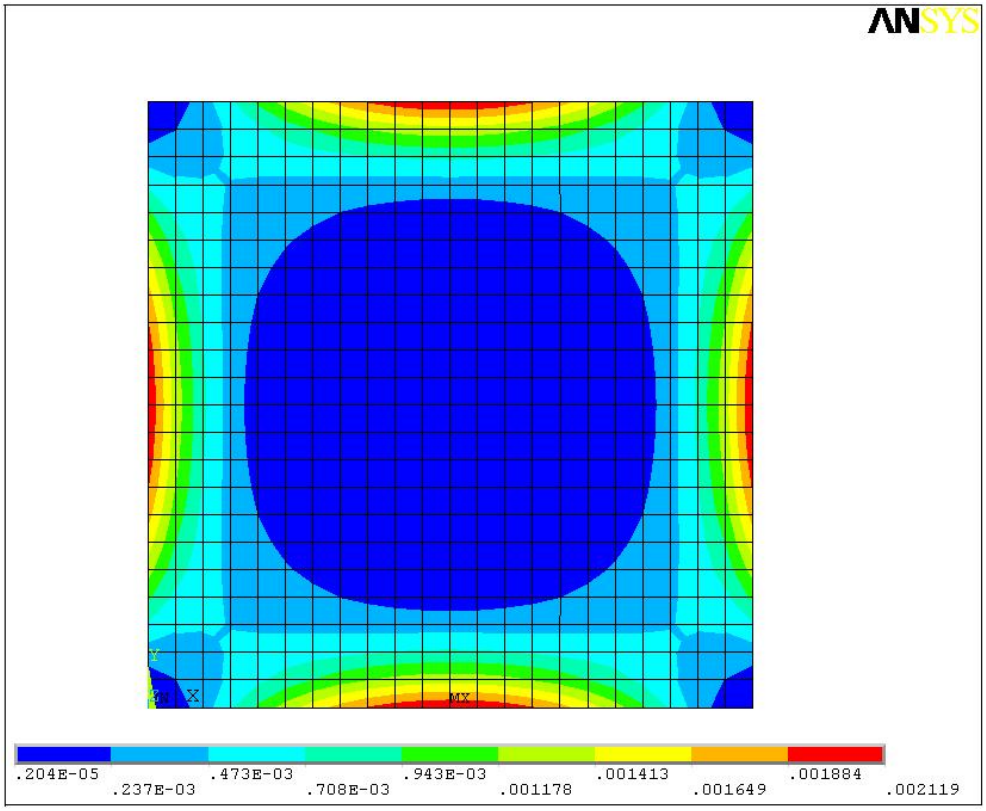


Şekil 2.9: Kompozit plak üst yüzeye ait düzlem içi kayma birim uzama değişimi

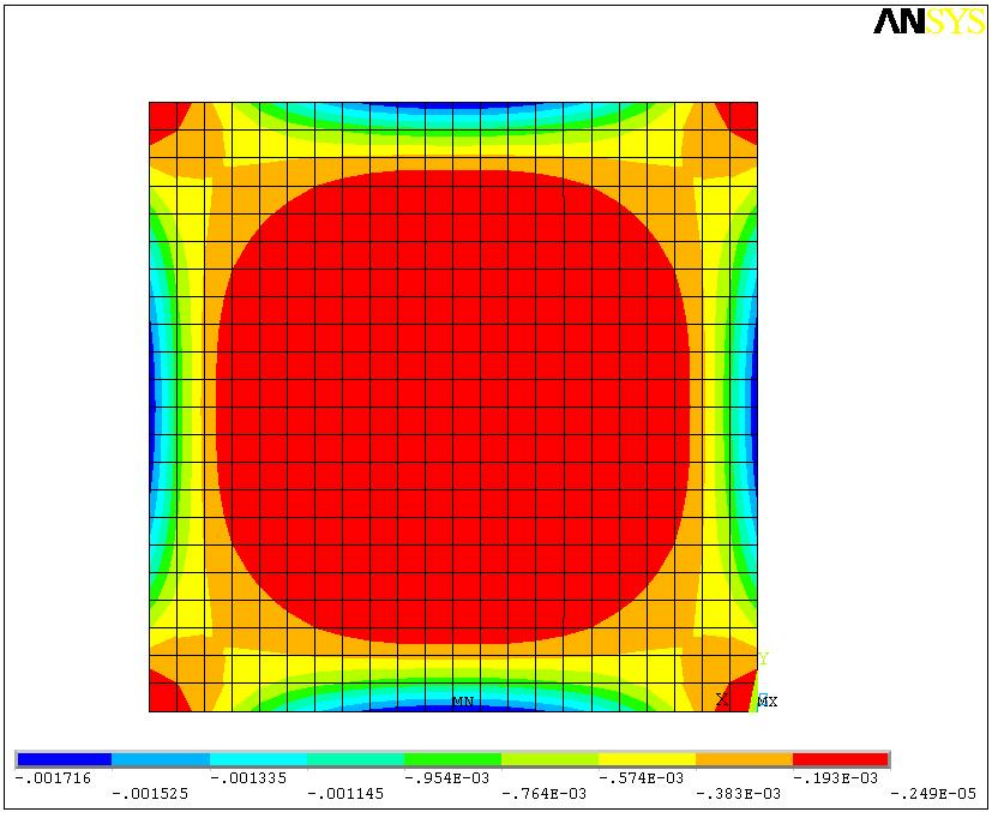
Şekil 2.12 ve 2.13 sırasıyla plak alt yüzey ve üst yüzey asal 3 gerilme değişim grafiğini göstermektedir. Plak alt yüzeyinde maksimum asal gerilmeler ankastre mesnet etkisinden dolayı kenar orta bölgelerde maksimum basma gerilmesinin etkisi hakim iken, kenardan ortaya ve köşelere doğru biraz uzaklaşınca etkisini yitirmektedir. Üst yüzeyde ise durum daha farklıdır. Plağın köşe ve kenar bölgeleri alt yüzey ile aynı gerilme davranışı gösterse de maksimum asal gerilmelerin oluştuğu bölgeler hiç benzememektedir. Simetrik olarak plağı dört bölgeye bölerek 45° açı ile maksimum asal gerilmeler oluşmuştur.



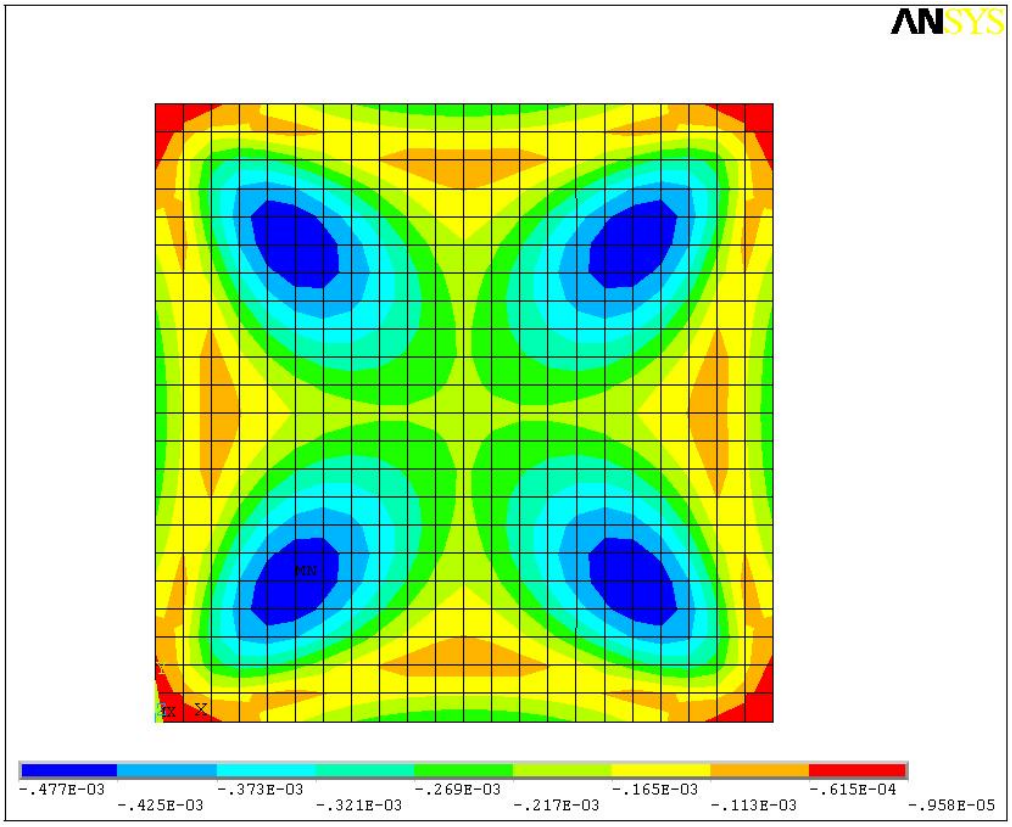
Şekil 2.10: Kompozit plak alt yüzeye ait Asal 1 gerilme değişimi



Şekil 2.11: Kompozit plak üst yüzeye ait Asal 1 gerilme değişimi

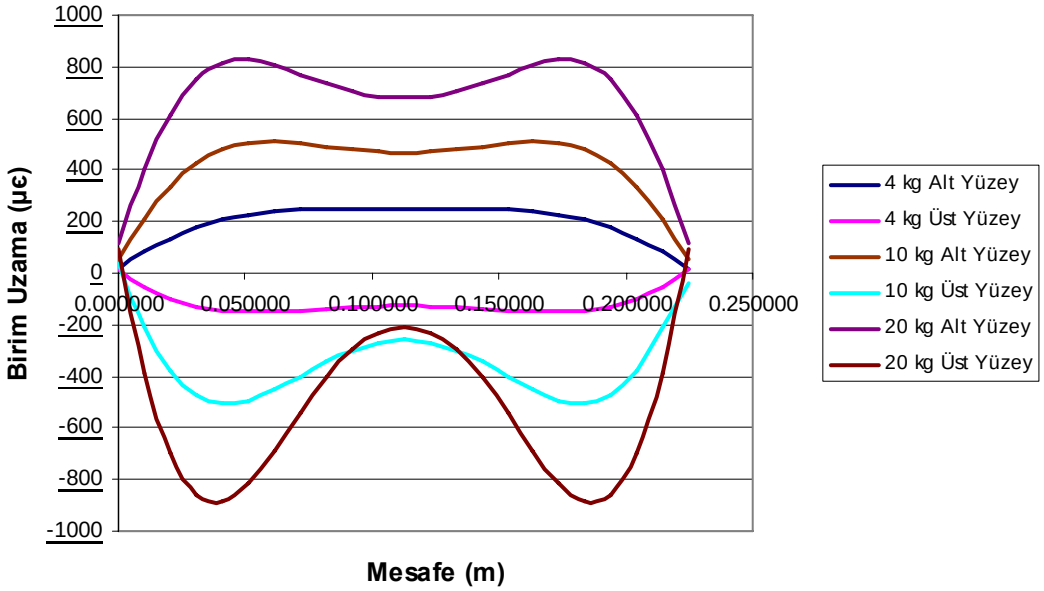


Şekil 2.12: Kompozit plak alt yüzeye ait Asal 3 gerilme değişimi

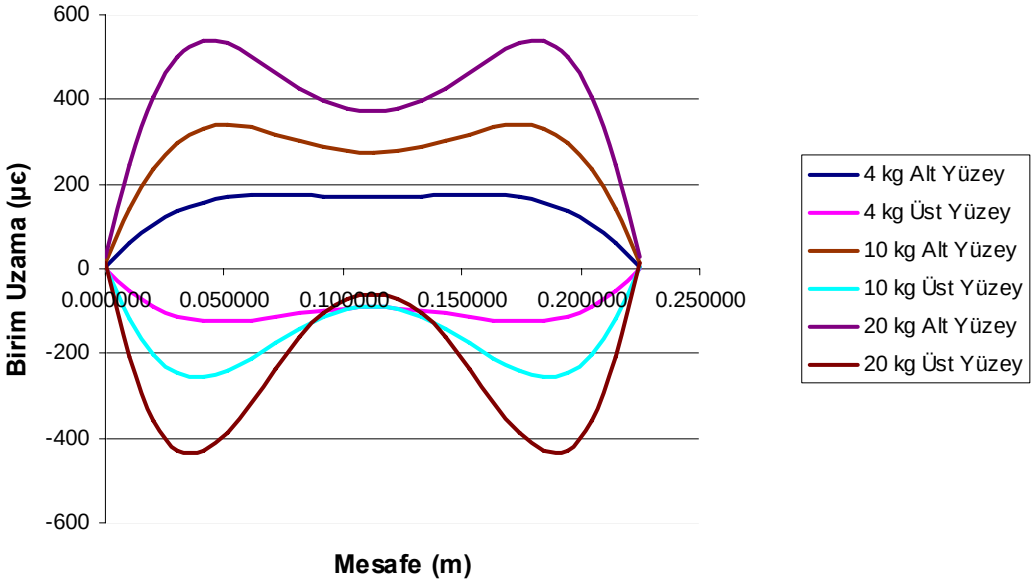


Şekil 2.13: Kompozit plak üst yüzeye ait Asal 3 gerilme değişimi

Lineer olmayan bölgelerde basit mesnet sınır şartları altında kompozit plakların birim uzama davranışlarını görebilmek için cam elyaf kompozit plaklarda Şekil 2.14, karbon elyaf kompozit plaklarda Şekil 2.15 incelenebilir. Bu iki şekilde analiz sonuçlarına göre plakların orta eksen üzerindeki birim uzama davranışlarını göstermektedir.



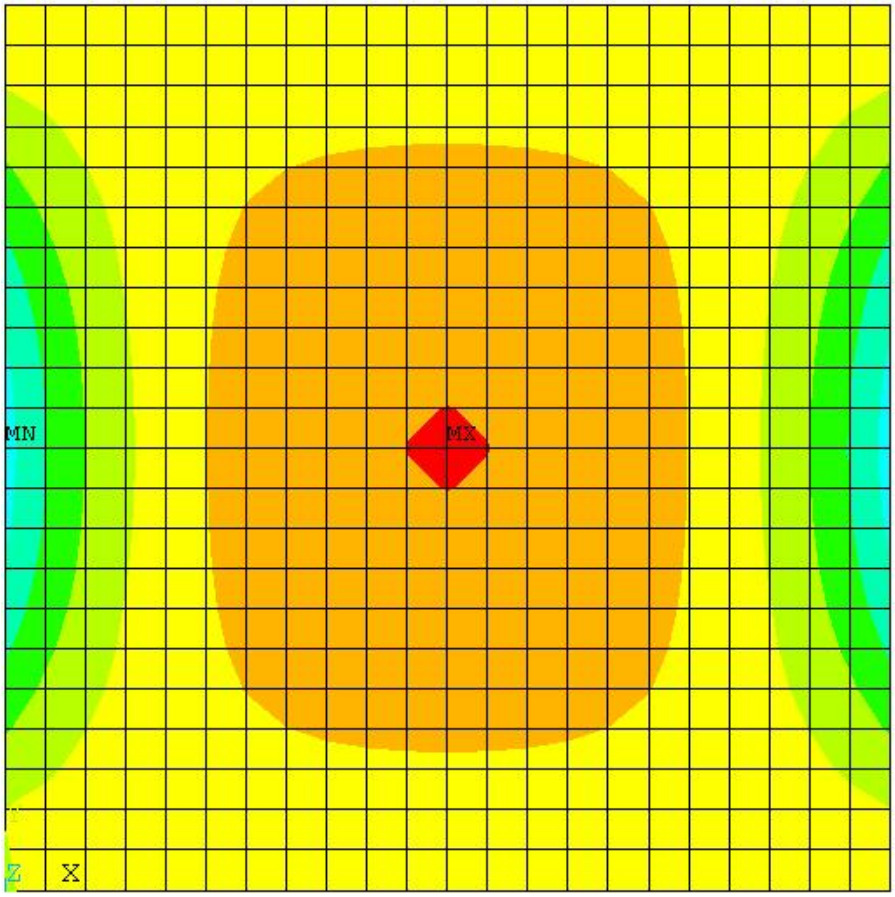
Şekil 2.14: 6 katmanlı cam elyaf kompozit plak birim uzama değişimi



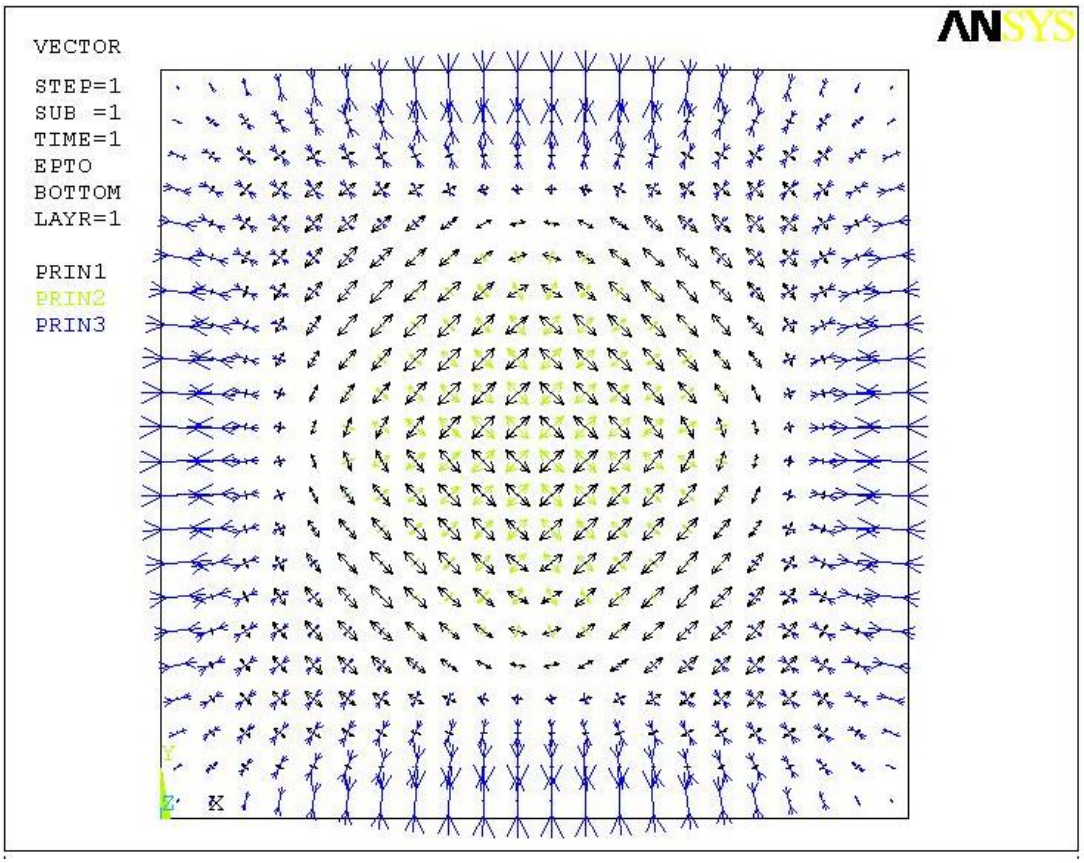
Şekil 2.15: 5 katmanlı karbon elyaf kompozit plak birim uzama değişimi

3. DENEY DONANIMI

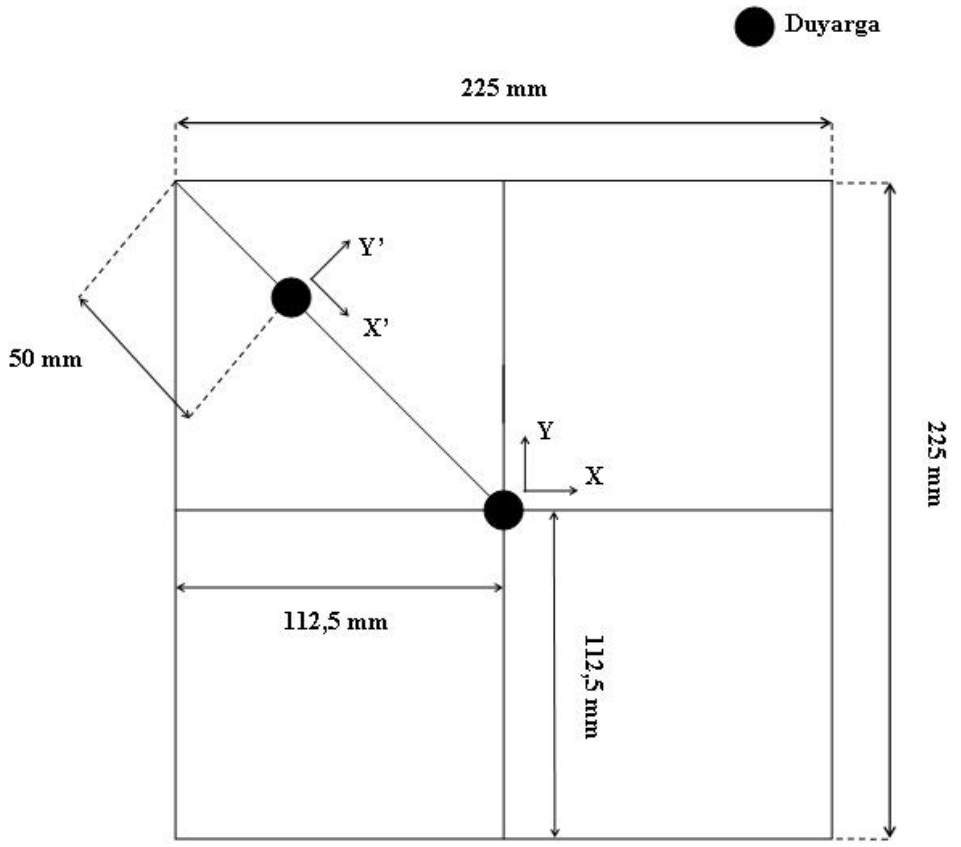
Bu çalışmada kullanılan deney sistemleri yük uygulanan kompozit plaklara yapıştırılan "strain gage"lerden birim uzama değerlerinin okunmasını amaçlamaktadır. Bu amaca yönelik olarak, önceden ANSYS programında statik analiz yapılmıştır (Şekil 3.1 ve Şekil 3.2). Şekillerden de anlaşılacağı üzere plaklar incelendiğinde birim uzamaların nisbeten yüksek olduğu bölgeler Şekil 3.3'deki gibidir. Daha sonra bu bölgelere iki yönlü "strain gage"ler "Cyanoacrylate" esaslı özel yapıştırıcı ile yapıştırılmıştır. Bu "strain gage"lerin kabloları terminal kutusu diye adlandırılan toplu veri gösterme işine yarayan cihaza bağlanmaktadır. Terminal kutusu da asıl ölçümü yapan birim uzama ölçme cihazına bağlanarak deney esnasında ölçülen birim uzamaların okunması sağlanmaktadır.



Şekil 3.1: Plak orta noktası x yönündeki birim uzama



Şekil 3.2: Plak çapraz eksen x' ve y' yönündeki birim uzamalar



Şekil 3.3: "Strain gage"lerin plaklar üzerindeki yerleşim noktaları

3.1 Deney Ekipmanları

Deney ekipmanları başlıca birim uzama ölçme cihazı, terminal kutusu ve "strain gage" rozetlerinden oluşmaktadır. Aşağıda her bir ekipman için ayrıntılı bilgi verilmiştir.

3.1.1 Birim Uzama Ölçme Cihazı

TC-31K model birim uzama ölçme cihazı portatif, elde çalışması kolay bir ölçüm cihazı olmakla birlikte, sadece birim uzama ölçümünün dışında, duyarga (transducer), ısıl çift (thermocouple) ve platin temelli ısı duyargası (Pt-RTD) bağlanarak ivme, sıcaklık ve direnç ölçümleri yapabilmektedir (Şekil 3.4). TC-31K model birim uzama ölçme cihazı tek başına kullanıldığında tek bir değer ölçebilse de CSW-5A model terminal kutusu ile birlikte 5 kanallı ölçüm yapabilmektedir [30]. Cihaz elektriği iki adet AA pilden, Ni-Cd bataryalardan, kuru alkalin bataryadan ve kendi DC adaptöründen elde etmektedir. LCD ekranında aynı anda 5 ölçüm değerini gösterebilmektedir. "Flash" hafıza kartı kullanılarak hafızasına aldığı ölçümleri, katsayıları vb. bilgileri kişisel bilgisayara aktarabilmektedir. Cihazın başlıca özellikleri aşağıda sıralanmaktadır:

- Birim uzama, DC Voltaj, thermocouple ve Pt-RTD ölçümü yapabilmektedir
- Yeni telafi metodları ile birim uzama ölçümü yapabilmektedir.

  (Dengesiz başlangıç değerinden etkilenmeyen çeyrek köprü metodu)
- CSW-5A terminal kutusu ile 5 kanallı ölçüm olanağı mevcuttur.
- Zaman ayarlı otomatik ölçüm yapabilme yeteneğine sahiptir.
- Bilgi hafızası vardır.
- Hafızadaki ölçüm değerlerini ekranda grafiğe dönüştürebilme yeteneği vardır.
- "Flash" hafıza kartı ile bilgileri aktarabilmektedir.
- "Strain gage" kontrolu için direnç ve yalıtım direnci ölçümü yapabilmektedir.



Şekil 3.4: Birim uzama ölçme cihazı

3.1.2 Terminal Kutusu

CSW-5A model terminal kutusu Tokyo Sokki Kenkyujo CO. LTD firması tarafından özellikle TC-31K model dijital birim uzama ölçer ile kullanılmak üzere dizayn edilmiştir (Şekil 3.5). CSW-5A terminal kutusu, TC-31K dijital birim uzama ölçer ile kullanıldığında 5 farklı kanalı otomatik olarak tarayarak ölçüm yapılabilmesine olanak vermektedir [31]. Bu sayede her bir kanaldaki değer ölçülerek TC-31K model birim uzama ölçerin ekranından gösterilebilmektedir. Her bir kanal için "strain gage"lerin katsayıları, algılayıcı (sensor) modu, ondalık noktaları, birimi ayrı ayrı tanıtılabilmektedir. Her bir kanaldan 10 adet ölçüm yapılarak toplam 5 kanaldan 50 adet ölçümün aynı anda yapılmasına olanak vermektedir.

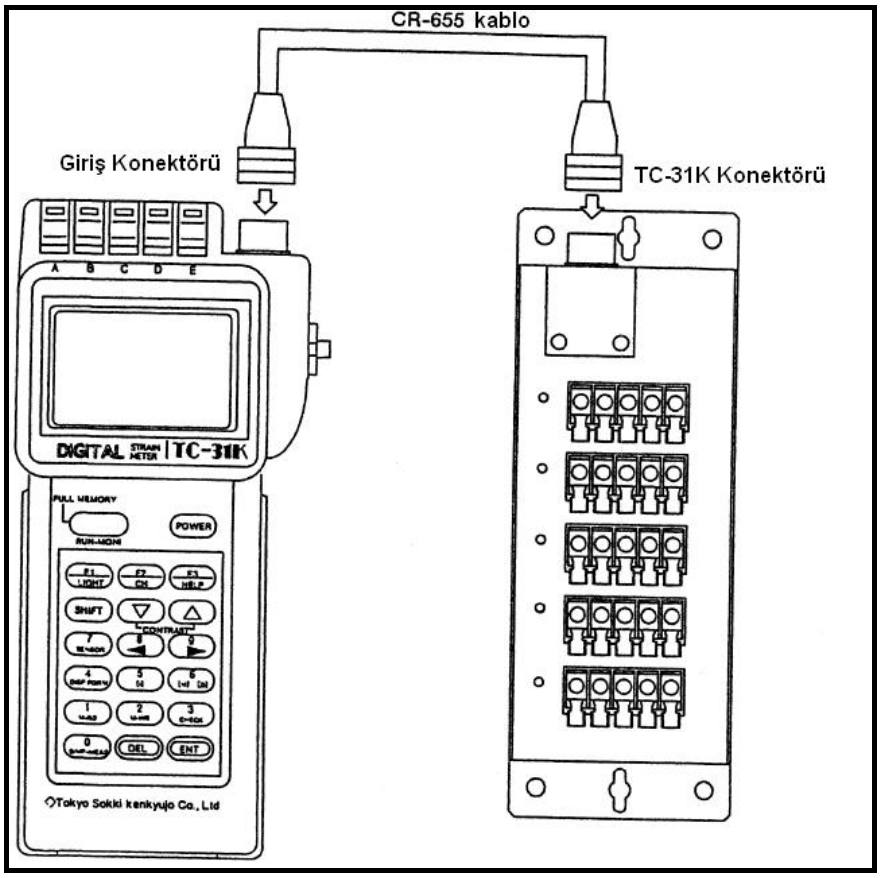


Şekil 3.5: Terminal kutusu

CSW-5A terminal kutusunun başlıca özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir; [31]

- Her bir kanal için ayrı ayrı "strain gage" katsayıları, algılayıcı modu, vs. girilebilmesine olanak vermektedir.
- Elektrik enerjisini TC-31K model dijital birim uzama ölçerden aldığından başka bir enerji kaynağına gerek yoktur.
- Her bir kanal için aynı anda 10 adet ölçüm yapılabilmektedir.
- Küçük, taşınabilir ve hafif olması nedeniyle kullanımı rahattır.

CSW-5A model terminal kutusu TC-31K model dijital birim uzama ölçere CR-655 no'lu kablo ile Şekil 3.6'da görüldüğü gibi bağlanmaktadır. CSW-5A terminal kutusuna bağlanabilen algılayıcılar ve bağlama yöntemleri Ek A'da görülebilir. CSW-5A terminal kutusu birim uzama ölçümünün yanısıra, sıcaklık, voltaj, direnç ve ivme ölçmek için de kullanılabilmektedir. [31]



Şekil 3.6: Terminal kutusu ile birim uzama ölçme cihazının bağlanması

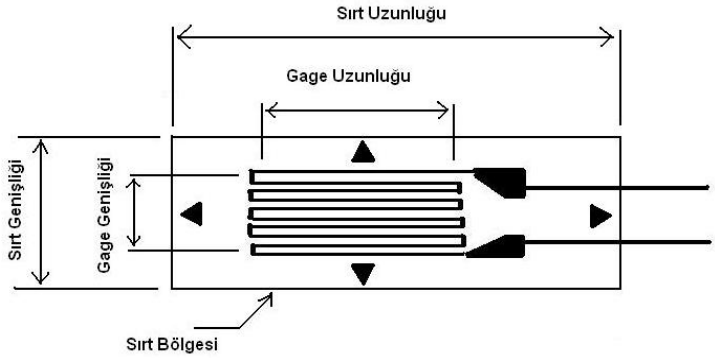
3.1.3 "Strain gage"

"Strain gage"ler mekanik test ve ölçüm işlemlerinde yaygın biçimde kullanılan cihazlardır. En çok bilinen türleri direnç bağlı olanlarıdır. Aygıta birim uzama verildiğinde grid elektrik direnci doğrusal orantılı biçimde değişir. "Strain gage" deney numunesine yapıştırılarak kulanılır. Test aşamasında kuvvet uygulanır ve elektrik direncindeki değişimler ölçülerek birim uzama hesaplanır. "Strain gage"ler, kuvvet, ivme, basınç veya titreşim ölçen algılayıcılarda da kullanılmaktadır.

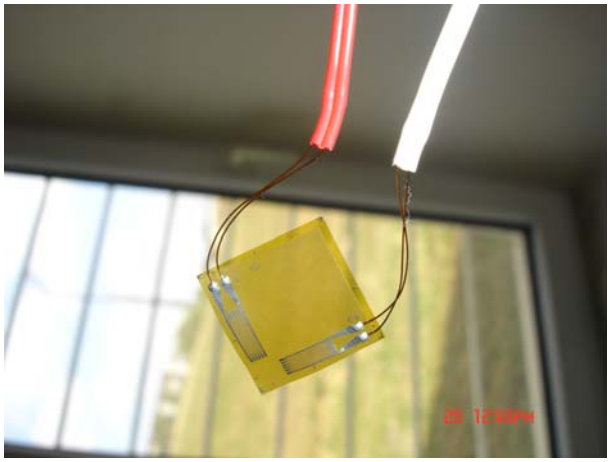
Birim uzama ölçmek için çok düşük mertebede direnç değişimini yakalamak gerekir. Bu yüzden genellikle Wheatstone köprü devresi kullanılır. Wheatstone köprü devresi, iki paralel kola bağlanan bir elektriksel akım ölçen cihaz (galvanometre, pil) ve biri bilinmeyen olmak üzere 4 dirençten oluşur. Bilinmeyen direnci ölçebilmek için ayarlı direnç değişirilerek galvanometrenin gösterdiği akımın 0 olması sağlanır.

"Strain gage"ler, köprü devresinin bir, iki veya dört koluna yerleştirilirler. Geriye kalan boş yerlere ayarlı dirençler yerleştirilir. Şekil 3.7'de deney düzeneğinde kullanılan bir "strain gage" görülmektedir. Deneyde 45°/ - 45° iki tip "strain gage" rozeti kullanılmıştır. Bunların özellikleri Tablo 3.1'deki gibidir ;

Tablo 3.1: "Strain gage" özellikleri tablosu



Model	FCA-5-11-1L	YEFCA-2-1L
Gage Faktörü	2.10	2.15
Gage Uzunluğu	5 mm	5 mm
Gage Genişliği	3 mm	3 mm
Sırt Uzunluğu	14 mm	12 mm
Sırt Genişliği	14 mm	12 mm
Kablo	1 m	1 m
Direnç	120 ±0.5 Ω	120 ±0.5 Ω
Yönlenme	-45°/45°	-45°/45°
Çalışma Sıcaklığı	0 – 80 °C	0 – 80 °C



Şekil 3.7: 0°/90° "Strain gage" rozeti

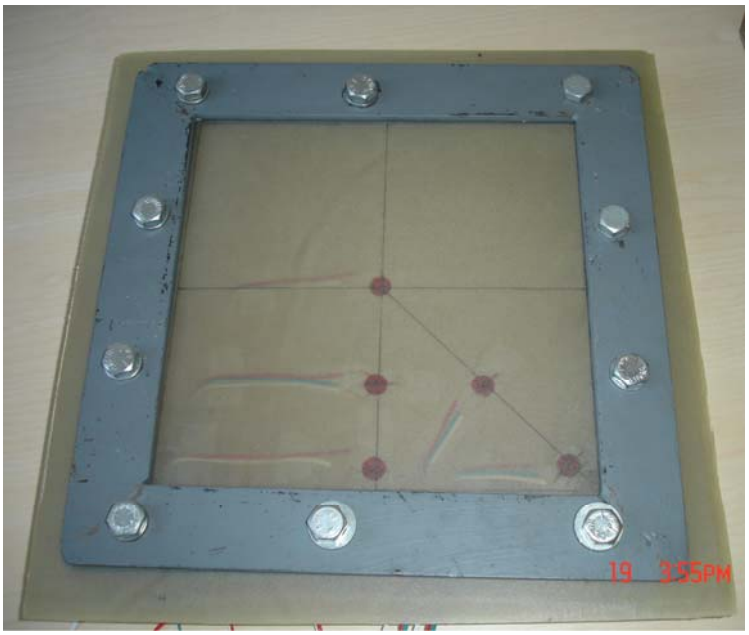
3.2 Mesnet Sistemi

Bu çalışmada iki farklı sınır şartı altında deneyler yapılmıştır. Bunlar ankastre mesnet ve basit mesnettir. Bu iki mesnet türü aşağıda detaylı olarak anlatılmaktadır.

3.2.1 Ankastre Mesnet Sistemi

Şekil 3.8'de gösterilen mesnet sistemi, deneylerde kullanılan cam ve karbon elyaf kompozit plakların dört kenarının da ankastre olarak sabitlenmesini sağlamak için iki parçadan imal edilmiştir.

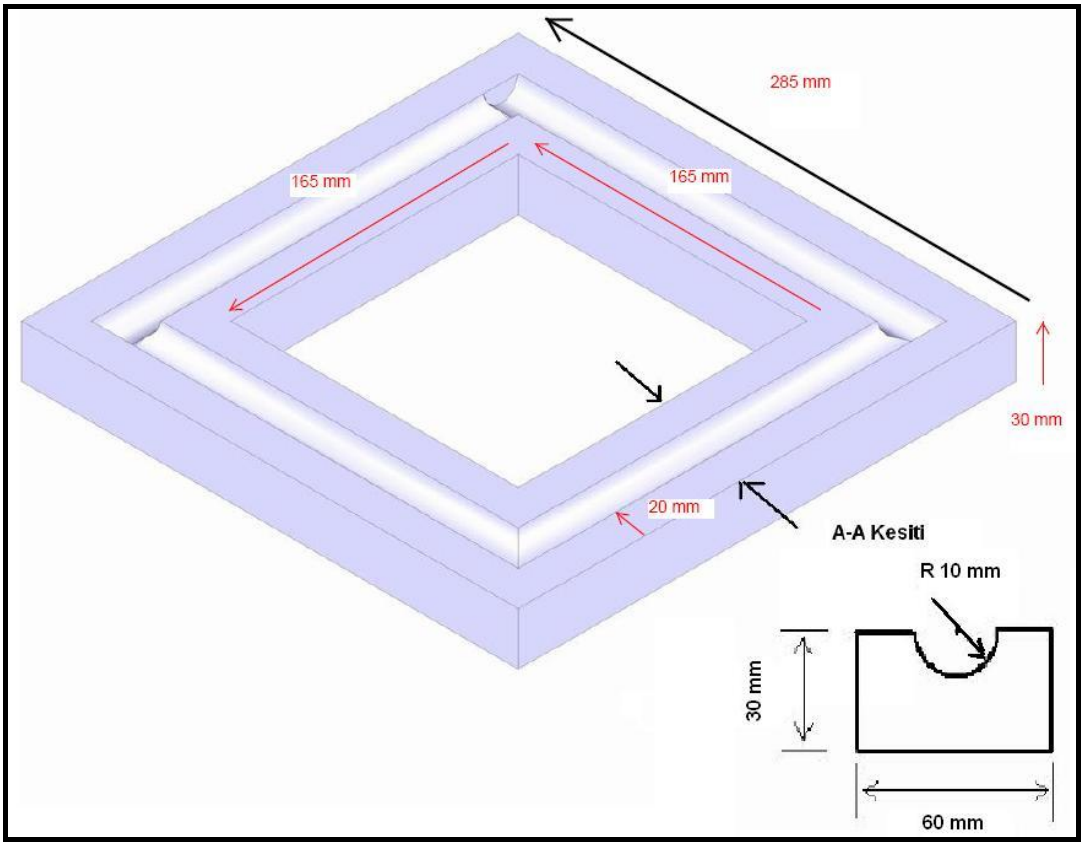
Mesnet, 40 mm genişliğinde, 5 mm et kalınlığında ve 305 mm boyundaki lamaların birbirlerine kaynatılması ile imal edilmiştir. Böylece orta kısında kompozit plakların takılabilmesi için 225x225 mm^2'lik bir alan oluşması sağlanmıştır. Kompozit plaklar, bu iki parçanın arasına yerleştirildikten sonra dikey kenarlarında üçer, yatay kenarlarda da ikişer olmak üzere toplam 10 adet civata ile sıkılarak ankastre mesnet elde edilmiştir. Böylece plaklar x, y ve z yönlerinde dönme ve ötelemeye karşı sabitlenmişlerdir.



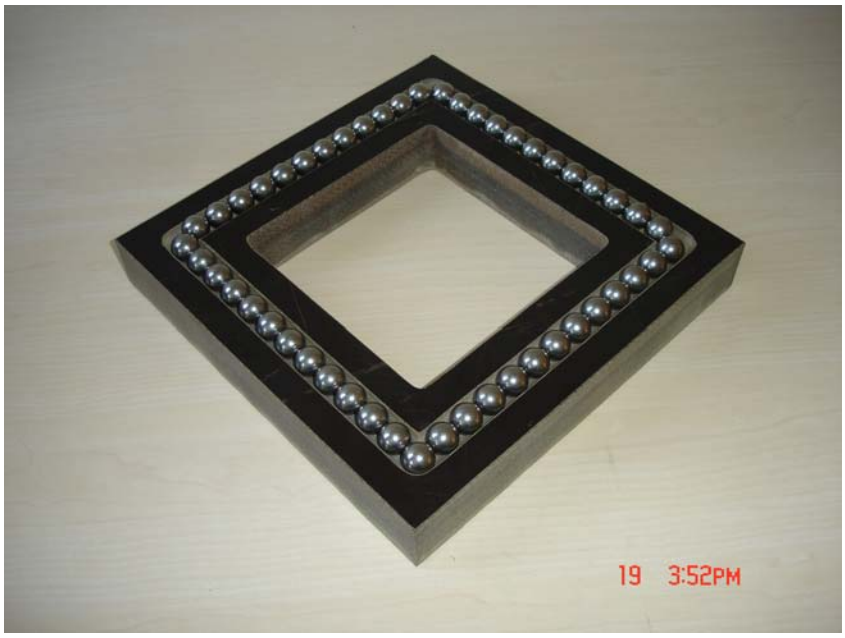
Şekil 3.8: Ankastre mesnet

3.2.2 Basit Mesnet Sistemi

Şekil 3.9'da gösterilen mesnet sistemi, deneylerde kullanılan cam ve karbon elyaf kompozit plakların dört kenarının da yalnızca z yönündeki düşey hareketini engellemesini sağlamak için toz cam elyaf-reçine karışımı olan kompozit dikdörtgen prizmadan üretilmiştir. Üretim aşamasında toz halindeki cam elyafları reçine ile karıştırılmıştır. Daha sonra bu karışım şeklini alması gereken kalıba dökülmüş ve fırına verilmiştir. Yüksek sıcaklıkta (180 °C) kür edilmiştir. Fırından çıkan dikdörtgen prizma şeklindeki malzeme Şekil 3.10'da gösterilen ölçülerdeki halini alması için CNC tezgahına bağlanmış ve 10 mm yarıçapında yarım daire profili olan kare şeklindeki kanal malzemenin bir yüzeyine açılmıştır. Orta kısım ise yine CNC tezgahında işlenerek ana parçadan çıkartılmıştır. Bu işlemden sonra basit mesnetin taban kısmı ortaya çıkmıştır. Daha sonra plakları sadece z yönündeki düşey ötelemesini sabitlemek için 17,95 mm çapındaki metal bilyeler açılan kanallara yerleştirilmişlerdir. Bu sayede düşey z yönü dışındaki iki eksende öteleme serbest, tüm eksenlerdeki dönme serbest bırakılmıştır. Bu da özel bir basit mesnet durumunu modellemektedir.



Şekil 3.9: Basit mesnet ölçüleri



Şekil 3.10: Basit mesnet

3.3 Yükleme Aparatları

Deneyde kullanılan kompozit plakların üst yüzeylerine yayılı yük etkisi oluşturması için kum torbaları kullanılmıştır (Şekil 3.11 ve Şekil 3.12). Kum torbasının alt kısmı kumaş olduğundan ağırlık tüm yüzeye eşit derecede etkimektedir. Üretilen kum torbası deneyde kullanılan tüm ağırlıkları tek başına sağlayamadığından Şekil 3.13'de görülen ağırlıklar da gerektiğinde kum torbasının üzerine mümkün olduğu kadar üniform bir şekilde yerleştirilmiştir. Tabii ki bu yüklerin tam üniform yayıldığını söylemek mümkün değildir. Ancak kum tanelerinin bu yükleri birbirine transfer ederek plak yüzeyine iletinceye kadar düzgünleştirdikleri kabul edilmiştir. Plağın yüzeyi ile temas eden küçük kum torbasıdır. Daha sonra büyük kum torbası koyulmaktadır. Bu ikisinin ağırlığı yalnızca 20 kg ağırlığa ve dolayısıyla plak yüzeyinde 3874 Pa düzgün yayılı basınca tekabül etmektedir. Daha ağır yüklemeler için Şekil 3.13'de görülen ağırlıklar kullanılmıştır. Resimde toplu görülen ağırlıkların her biri 1 kg'dır.



Şekil 3.11: Küçük kum torbası



Şekil 3.12: Büyük kum torbası



Şekil 3.13: Parça ağırlıklar

3.4 Deney Numuneleri

Bu çalışmada kullanılmak üzere iki farklı tip katmalı kompozit plak imal edilmiştir. Bunlardan biri BMS 9-3 Stil 181 model cam elyaf kumaştan üretilmiştir, diğeri önceden reçine emdirilmiş hazır M20 40-G904 model karbon elyaf kumaştan üretilmiştir.

Kompozit malzeme, fiziksel ve kimyasal özellikleri farklı iki veya daha fazla malzemenin bir araya gelerek oluşturduğu üstün özellikli malzemelere denir. Kompozit malzemeler genellikle elyaf ve matris diyebileceğimiz iki farklı oluşumun uygun usullerle bir araya getirilmesiyle teşkil edilirler. Elyaf, kompozit yapının mekanik mukavemetinin sağlamakla yükümlüdür. Kompozitlerde elyafı oluşturan uygun malzemelerin iplikçik halindeki formlarıdır. Matris ise elyafları bir arada tutan ve elyaflar arasında gerilim aktarımını sağlayarak kompozit yapının mekanik özelliklerinin oluşumunu dolaylı olarak etkileyen ve elyafları fiziksel ve kimyasal dış etkenlerden koruyarak kompozit yapının bir sistem olarak çalışmasını sağlayan kısımdır. Matris malzemesi olarak uygun metal alaşımları kullanılabileceği gibi daha yaygın olarak reçineler kullanılmaktadır. Katmanlı kompozit malzemeler iki şekilde imal edilebilirler.

1) Kuru kumaşlara reçine sürme (ıslak yatırma) metodu (Wet-lay up method)
2) Önceden reçine sürülmüş hazır kumaşların kür edilmesi metodu

Bölüm 3.4.2 ve 3.4.3'de iki yöntemde detaylı olarak açıklanmaktadır.

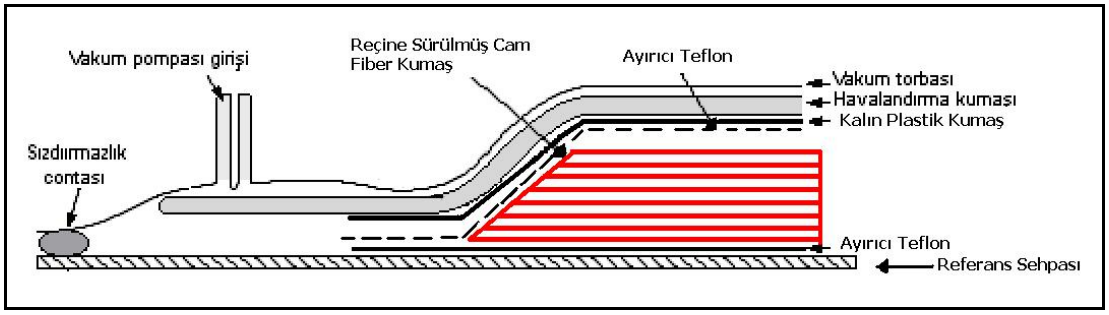
3.4.1 Cam Elyaf Kompozit Plak Deney Numunesi Üretim Aşaması

Deneylerde kullanılan katmanlı cam elyaf kompozit plak THY Teknik Yapısal Tamir ve NDT Atölyesi'nde deneyimli teknisyenler tarafından üretilmiştir. BMS 9-3 Stil 181 model cam elyaf kumaş rulo halinde muhafaza edilmektedir. Rulodan 320 x 320 mm ebatlarında kare şeklinde kumaşlar kesilmiştir. Kesim işlemi bittikten sonra Hysol EA9396 Epoksi marka reçine hazırlanmıştır. Oda sıcaklığında muhafaza edilen yapıştırıcı (adhesive) ve sertleştirici (hardener) kumaş ağırlığının %30 fazlası olacak şekilde bir kaba aktarılmıştır. Yapıştırıcı ve sertleştiricinin karışım oranları üretici firma tarafından verilen bir tablo aracılığı ile belirlenmektedir. Reçine uygun ölçülerde karıştırılmıştır. Daha sonra bu karışım, 0/90 derece yerleştirilen kumaşların aralarına yedirilerek sürülmüştür.

Reçine kimyasal tepkimeden dolayı yapıştırıcı etkisini zamanla kaybettiğinden, reçine sürme işleminin 45 dakika içerisinde bitirilmesi gerekmektedir. Reçine sürme işleminin ardından etkili bir yapışma sağlanması için vakumlama işlemi yapılmıştır. Vakumlama işleminde yüzeyi çok temiz ve düzgün bir referans sehpasının üzerine reçine sürülmüş kumaşlar serilmiştir. Sehpa ile kumaş arasına teflon malzemesi koyulmuştur. Böylece reçine sürülmüş olan kumaş referans sehpasına yapışarak yüzeyi kirletmesi engellenmiştir. Kumaşın üzerine tekrar ayırıcı teflon malzemesi koyulmuştur. Teflonun üzerine pürüzsüz bir yüzey oluşturmak için kalın plastik kumaş serilmiştir. En üstte vakum battaniyesi (breather) serilmiştir. Bu battaniyenin görevi vakum işlemi sırasında hava dolaşımını düzgün bir şekilde sağlamaktır. Tüm bu katmanlar plastik bir naylon ile kaplanmıştır ve havası alınarak kumaş sıkıştırılmıştır. Şekil 3.14'de bu prosesi açılayıcı bir şekil bulunmaktadır. Vakumlama işlemi sayesinde kumaşlar ve reçine arasında hava tabakasının olmadığına emin olunur. Vakum ortamında kalma süresi reçine tablosundan bakılır. Bu süre dolduktan sonra ısı lambalarında 80 °C'de 2 saat kür edilerek cam elyaf kompozit plaklar imal edilmiştir. Tablo 3.2'de deney için üretilen cam elyaf kompozit plakların katman sayıları ve kalınlıkları verilmiştir.

Tablo 3.2: Cam elyaf kompozit plak katman sayısı ve kalınlıkları

Deney Numunesi No	Katman Sayısı	Kalınlık (mm)
1	20 Katman	4,572
2	10 Katman	2,286
3	6 Katman	1,8



Şekil 3.14: Vakumlama yöntemi

3.4.2 Karbon Elyaf Kompozit Plak Deney Numunesi Üretim Aşaması

Deneylerde kullanılan katmanlı karbon elyaf kompozit plak THY Teknik Yapısal Tamir ve NDT Atölyesi'nde deneyimli teknisyenler tarafından üretilmiştir. Önceden reçine sürülmüş olan M20 40-G904 model karbon elyaf kumaş rulo halinde -18 °C'de soğutma odasında muhafaza edilmektedir. Yaklaşık 15 – 20 dakika hava kabarcıklarının buharlaşması için rulo halindeki kumaş oda sıcaklığında bekletilmiştir. Rulodan 320 x 320 mm ebatlarında kare şeklinde kumaşlar kesilmiştir. Kesilen kumaşlar 0/90 derece olacak şekilde üst üste önceden belirlenen katmanlarda düz bir referans sehpası üzerine serilmiştir. Sehpa ile kumaşlar arasına delikli ayırıcı teflon serilmiştir. Bu malzeme hava sirkülasyonunu sağlamaktadır. Kumaşların üst tarafına da yine ayırıcı teflon malzeme koyulmuştur. En üste ağırlığı olan orta kalınlıkta bir plaka koyulmuştur. Plaka üzerine ısılçiftler yerleştirilmiştir. Bu sistemin tamamı Caltherm adındaki fırına koyulmuştur. Bu fırın 2,5 m genişliğe, 2 m yüksekliğe ve 5,2 metre uzunluğa sahiptir. Fırın 250 °C'ye kadar ısıtabilmektedir. Fırın kendi içerisinde vakumlama sistemine sahip olduğundan karbon elyaf kompozit plaklar kür edilmeden önce ayrıca vakum işlemi yapmaya gerek yoktur. Plaka üzerine yerleştirilen ısıl çiftler fırının sıcaklık kanallarına bağlanır ve kumaşların sıcaklığı dışarıdan ayarlanabilmektedir. Karbon elyaf kompozit plaklar 140 °C'de 2 saat boyunca kür edilerek imal edilmiştir. Tablo 3.3'de deney için üretilen karbon elyaf kompozit plakların katman sayıları ve kalınlıkları verilmiştir.

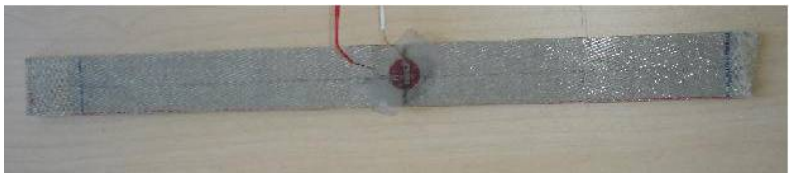
Tablo 3.3: Karbon elyaf kompozit plak katman sayısı ve kalınlıkları

Deney Numunesi No	Katman Sayısı	Kalınlık (mm)
1	20 Katman	4,01
2	10 Katman	2,108
3	5 Katman	1,06

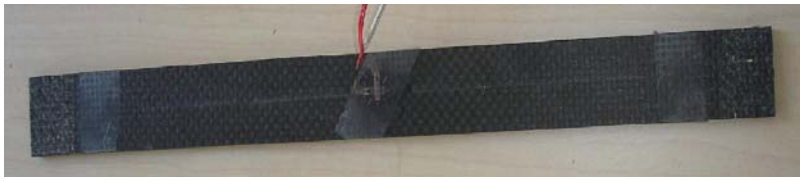
3.4.3 Deney Numuneleri Malzeme Özelliklerinin Belirlenmesi

Deney koşullarının geçerli olduğu sayısal analizlerin yapılabilmesi için üretilen katmanlı kompozit plakların mekanik özellikleri gerekmektedir. ANSYS yazılımına tanımlanması gereken mekanik özellikler çekme deneyinden alınan verilerden sağlanmıştır.

Bu nedenle çekme deneyinin yapılabilmesi için 3.4.2 ve 3.4.3 bölümünde anlatılan yöntemler ile aynı şekilde üçer adet çekme numuneleri üretilmiştir (Şekil 3.15 ve Şekil 3.16).



Şekil 3.15: Cam elyaf çekme deneyi numunesi



Şekil 3.16: Karbon elyaf çekme deneyi numunesi

Bu numunelerin boyutları 300 mm uzunluk 25 mm genişlik ve 5 mm kalınlıktır. Bu ölçülerde üretilen numuneler İTÜ Kimya ve Metalürji Laboratuarlarında bulunan SHIMADZU UH-F-100KNI model test makinesinde çekme testinde tabi tutulmuştur (Şekil 3.17).



Şekil 3.17: SHIMADZU UH-F-100KNI test makinesi

Bu makine 100 kN'a kadar yük uygulayabilmektedir. Ayrıca bir LCD ekrandan uygulanan yük ve uzama miktarı test esnasında görülebilmektedir. Bu bilgiler tercihe göre hem sayısal olarak hem grafik olarak görülebilmektedir [32].

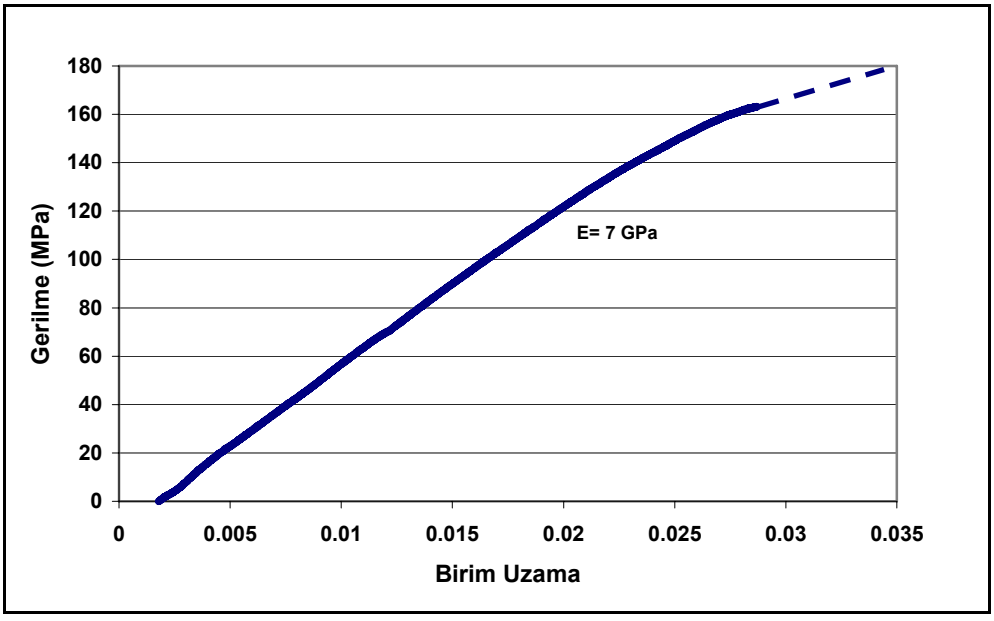
ANSYS yazılımında Poisson oranı'nın da girilebilmesi için çekme deneyi numunelerinin orta noktasına iki yönlü birim uzama rozetleri yapıştırılmıştır (Şekil 3.18). Bu sayede deney sırasında x ve y yönündeki birim uzama miktarları elde edilmiştir.



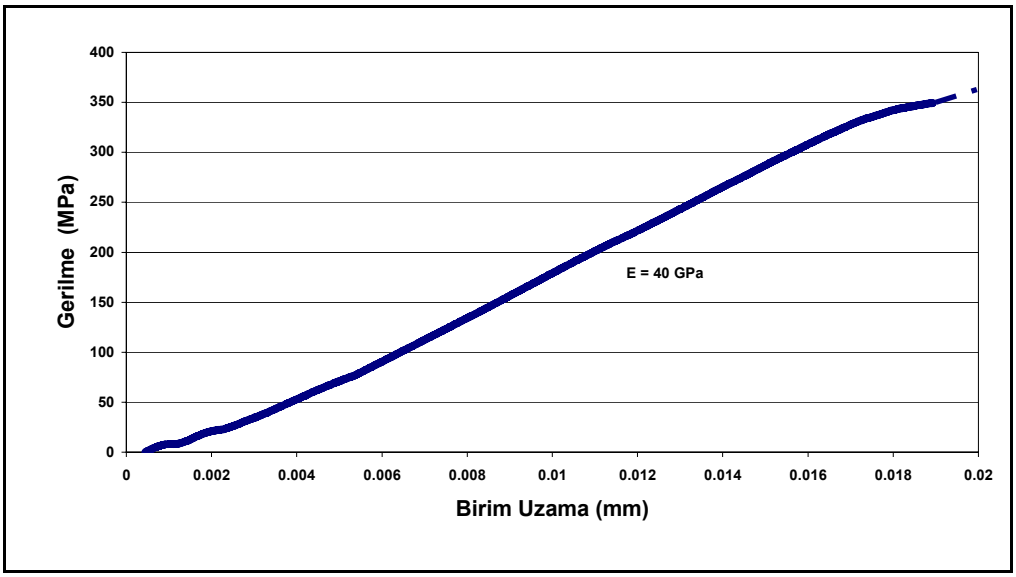
Şekil 3.18: Çekme numunelerine yapıştırılan "strain gage" rozeti

Bu değerlerden de Poisson oranı bulunmuştur. Şekil 3.19'da çekme deneyinden elde edilen cam elyaf çekme numunesine, Şekil 3.20'de karbon elyaf çekme numunesine ait Gerilme - birim uzama diyagramları verilmiştir.

Bu deneylerden elde edilen değerler Tablo 3.4 kompozit plaklar için malzeme özellikleri tablosunda verilmiştir.



Şekil 3.19: Cam elyaf çekme numunesi gerilme birim uzama diyagramı



Şekil 3.20: Karbon elyaf çekme numunesi gerilme birim uzama diyagramı

Tablo 3.4: Kompozit plakların malzeme özellikleri tablosu

	Cam Elyaf Plak	**Karbon Elyaf Plak**
E_x (GPa)	7	40
E_y (GPa)	7	40
E_z (GPa)	2,49	3,06
G_{xy} (GPa)	3,15	19,2
G_{yz} (GPa)	1	1
G_{xz} (GPa)	1	1
υ_{xy}	0,11	0,04
υ_{yz}	0,11	0,04
υ_{xz}	0,11	0,04

Tablo 3.4'de verilen kayma modülleri denklem 3.1'deki gibi hesaplanmıştır. Tablo 3.4'de verilen değerler ANSYS programına girilerek sonlu elemanlar yöntemi ile analizler yapılmıştır. Analiz ve deney sonuçları bir sonraki bölümde verilerek karşılaştırılmıştır.

$$G = \frac{E}{2(1+\upsilon)} \qquad \textbf{(3.1)}$$

4. SAYISAL VE DENEYSEL SONUÇLAR

Bu çalışmada sayısal analizler için ANSYS programından elde edilen değerler kullanılmıştır. Deneyler ankastre ve basit mesnet olmak üzere iki sınır şartı için ve farklı ağırlıklar için tekrar edilmiştir.

4.1 Deney

Deney için imal edilen plaklara yapıştırılan "strain gage"lerin kabloları terminal kutusuna bağlanır. Terminal kutusu ile birim uzama ölçme cihazı birbirine bağlanır. Ankastre veya basit mesnete yerleştirilen plaklar sabitlenir. "Strain gage"lerin katsayıları, birimi ve ondalık oranı birim uzama ölçme cihazına tanıtılır. İlk olarak yükleme yapılmadan önce boş olarak "strain gage"lerin birim uzama değerleri ölçülür ve değerler sıfırlanarak başlangıç durumuna getirilmiş olur. Yükleme için üretilen kum torbaları ile yükleme yapılarak 10 sn kadar beklenir ve "strain gage"lerden elde edilen değerler birim uzama ölçme cihazının ekranından okunur. Bu değerler her bir sınır şartı, plak cinsi, plak kalınlığı ve farklı yükler olarak kaydedilir. Kaydedilen değerler ile ANSYS programından elde edilen değerler karşılaştırılmış olarak bir sonraki bölümde tablolar halinde gösterilmektedir.

4.2 Deney Sonuçları İle Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Deneylerde, plakların orta noktasına yapıştırılan "strain gage"lerden x ve y yönündeki birim uzamalar, çapraz eksen üzerinde bir noktaya yapıştırılan "strain gage"lerden ise x' ve y' yönündeki birim uzamalar ölçülmektedir. Çapraz eksendeki x' ve y' eksenleri x ve y eksenleri ile -45° açı yapmaktadırlar. Deneylerde ölçülen değerler ile ANSYS programından da elde edilen değerler Tablo 4.1 ile Tablo 4.18 arasında gösterilmektedir. Deplasman değerlerinin plak kalınlığını geçtiği durumlar için aynı koşullar plağın üst tarafı için de ölçülmüştür. Böylece statik yükleme koşullarında, lineer olmayan plak davranışları alt yüzey ve üst yüzey olarak incelenmiştir.

Tablo 4.1: Ankastre mesnet cam elyaf kompozit plaklar için alt yüzey ε_x / ε_y birim uzama değerleri ($\mu\varepsilon$)

Katman Sayısı		Kütle (kg)						
		1	**2**	**4**	**10**	**20**	**30**	**40**
6	**Deney**	38/36	89/87	210/206	416/423	643/652		
	Analiz	45/45	90/90	181/181	419/419	668/668		
	%Fark	%15	%3	%12	%0,9	%2		
10	**Deney**				263/263	380/372	457/439	718/707
	Analiz				225/225	450/450	675/675	787/787
	%Fark				%14	%15	%32	%8
20	**Deney**				59/58	99/97	143/152	168/177
	Analiz				63/63	126/126	190/190	253/253
	%Fark				%6	%21	%20	%30

Tablo 4.2: Ankastre mesnet cam elyaf kompozit plaklar için alt yüzey $\varepsilon_{x'}$ / $\varepsilon_{y'}$ birim uzama değerleri ($\mu\varepsilon$)

Katman Sayısı		Kütle (kg)						
		1	**2**	**4**	**10**	**20**	**30**	**40**
6	**Deney**	19/-28	53/-53	122/-97	233/-146	323/-210		
	Analiz	24/-33	48/-67	97/-134	217/-242	387/-360		
	%Fark	%20/15	%9/20	%20/27	%6/39	%16/41		
10	**Deney**				117/-109	207/-291	313/-363	387/-332
	Analiz				175/-199	350/-399	525/-598	575/-425
	%Fark				%33/45	%40/27	%40/39	%32/21
20	**Deney**				18/-25	38/-45	59/-56	73/-78
	Analiz				43/-49	86/-99	130/-148	172/-198
	%Fark				%58/48	%55/54	%54/62	%57/60

Tablo 4.3: Ankastre mesnet cam elyaf kompozit plaklar deplasman değerleri (mm) (ANSYS)

Kütle (kg) →	**1**	**2**	**4**	**10**	**20**	**30**	**40**
6 Katman	0,2	0,3	0,7	1,8	2,1		
10 Katman				0,9	1,8	1,9	2,3
20 Katman				0,1	0,2	0,3	0,4

Ankastre mesnet sınır şartlarında cam elyaf kompozit plakların statik yayılı yükler altındaki birim uzama deneylerini Tablo 4.1 ile Tablo 4.3 arasında incelediğimizde, x ve y yönündeki birim uzamalarda sayısal ve deneysel sonuçlar olarak en kötü durumda 6 katmanlı plak için %15, 10 katmanlı plak için %32 ve 20 katmanlı plak için %30 civarlarında fark mevcuttur. Yine aynı sınır şartları için cam elyaf kompozit plakların x' ve y' yönündeki birim uzamalarında ise, en kötü durumda 6 katmanlı plak için %41, 10 katmanlı plak için %45 ve 20 katmanlı plak için %60 fark mevcuttur. Buradan da anlaşılacağı üzere plak orta noktasındaki x ve y yönündeki birim uzama ölçümleri sayısal analizlere daha yakındır.

Analizlerden anlaşılacağı üzere, 6 katmanlı plak 10 ve 20 kg yüklerde, 10 katmanlı plak 40 kg yükte lineer olmayan bölgededirler.

Tablo 4.4: Basit mesnet cam elyaf kompozit plaklar için alt yüzey ε_x / ε_y birim uzama değerleri ($\mu\varepsilon$)

Katman Sayısı		Kütle						
		1 kg	2 kg	4 kg	10 kg	20 kg	30 kg	40 kg
6	Deney	77/76	135/138	240/237	460/467	576/583		
	Analiz	74/74	147/147	273/273	520/520	756/756		
	%Fark	%3	%6	%12	%10	%22		
20	Deney				115/119	216/208	283/291	336/343
	Analiz				113/113	228/228	345/345	463/463
	%Fark				%2	%5	%15	%26

Tablo 4.5: Basit mesnet cam elyaf kompozit plaklar deplasman değerleri (mm) (ANSYS)

Kütle (kg) →	1	2	4	10	20	30	40
6 Katman	0,4	0,7	1,3	2,4	3,5		
10 Katman				1,6	2,7	3,4	4
20 Katman				0,2	0,5	0,7	1

Basit mesnet sınır şartlarında cam elyaf kompozit plakların statik yayılı yükler altındaki birim uzama deneylerini Tablo 4.4 ve Tablo 4.5 arasında incelediğimizde, x ve y yönündeki birim uzamalarda sayısal ve deneysel sonuçlar olarak en kötü durumda 6 katmanlı plak için %22 ve 20 katmanlı plak için %26 fark görülmüştür. Yine aynı sınır şartları için cam elyaf kompozit plakların x' ve y' yönündeki birim uzamalarında ise, sonuçlar çok farklı çıktığından yayınlanmamıştır. Analizlerden anlaşılacağı üzere, 6 katmanlı plak 4, 10 ve 20 kg yüklerde, 10 katmanlı plak 20, 30 ve 40 kg yükte lineer olmayan bölgededirler.

Tablo 4.6: Ankastre mesnet karbon elyaf kompozit plaklar için alt yüzey ε_x / ε_y birim uzama değerleri ($\mu\varepsilon$)

Katman Sayısı		Kütle (kg)						
		4	10	20	30	40	50	70
5	Deney	103/109	221/213	367/334	401/397	417/430		
	Analiz	99/99	201/201	304/304	379/379	442/442		
	%Fark	%9	%9	%17	%4	%2		
10	Deney		69/71	252/257	340/344	419/411		
	Analiz		63/63	127/127	190/190	254/254		
	%Fark		%8	%49	%44	%38		
20	Deney				63/65	83/89	105/109	157/143
	Analiz				47/47	63/63	79/79	110/110
	%Fark				%25	%24	%24	%23

Tablo 4.7: Ankastre mesnet karbon elyaf kompozit plaklar için alt yüzey $\varepsilon_{x'}$ / $\varepsilon_{y'}$ birim uzama değerleri ($\mu\varepsilon$)

Katman Sayısı		Kütle (kg)						
		4	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**70**
5	**Deney**	73/-93	119/-127	148/-124	219/-79	300/-62		
	Analiz	59/-69	119/-94	205/-120	276/-128	338/-128		
	%Fark	%19/25	%0/25	%27/3	%20/38	%11/51		
10	**Deney**		66/-59	137/-148	199/-201	220/-243		
	Analiz		38/-44	75/-87	112/-132	150/-175		
	%Fark		%42/25	%45/41	%43/34	%31/28		
20	**Deney**				45/-46	66/-62	83/-82	102/-106
	Analiz				29/-36	39/-47	49/-59	69/-83
	%Fark				%35/21	%40/24	%40/28	%32/21

Tablo 4.8: Ankastre mesnet karbon elyaf kompozit plaklar deplasman değerleri (mm) (ANSYS)

Kütle (kg) →	**4**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**70**
5 Katman	0,6	1,1	1,5	1,8	2,1		
10 Katman		0,2	0,4	0,6	0,8		
20 Katman				0,1	0,1	0,1	0,2

Ankastre mesnet sınır şartlarında karbon elyaf kompozit plakların statik yayılı yükler altındaki birim uzama deneylerini Tablo 4.6 ile Tablo 4.8 arasında incelediğimizde, x ve y yönündeki birim uzamalarda sayısal ve deneysel sonuçlar olarak en kötü durumda 5 katmanlı plak için %17, 10 katmanlı plak için %49 ve 20 katmanlı plak için %25 civarlarında fark mevcuttur. Yine aynı sınır şartları için karbon elyaf kompozit plakların x' ve y' yönündeki birim uzamalarında ise, en kötü durumda 5 katmanlı plak için %51, 10 katmanlı plak için %43 ve 20 katmanlı plak için %40 fark mevcuttur. Buradan da anlaşılacağı üzere plak orta noktasındaki x ve y yönündeki birim uzama ölçümleri sayısal analizlere daha yakındır. Analizlerden anlaşılacağı üzere, 5 katmanlı plak 10, 20, 30 ve 40 kg yüklerde lineer olmayan bölgededir.

Tablo 4.9: Basit mesnet karbon elyaf kompozit plaklar için alt yüzey ε_x / ε_y birim uzama değerleri ($\mu\varepsilon$)

Katman Sayısı		Kütle (kg)						
		4	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**70**
5	**Deney**	163/140	231/269	437/398	440/420	465/437		
	Analiz	138/138	238/238	334/334	405/405	465/465		
	%Fark	%1	%3	%19	%4	%0		
10	**Deney**		203/173	338/322	433/450	527/517		
	Analiz		106/106	212/212	318/318	398/398		
	%Fark		%63	%52	%36	%30		
20	**Deney**				115/106	160/150	183/203	267/252
	Analiz				90/90	120/120	149/149	209/209
	%Fark				%18	%25	%23	%20

Tablo 4.10: Basit mesnet karbon elyaf kompozit plaklar için alt yüzey $\varepsilon_{x'}$ / $\varepsilon_{y'}$ birim uzama değerleri ($\mu\varepsilon$)

Katman Sayısı		Kütle (kg)						
		4	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**70**
20	**Deney**				120/-31	172/-57	217/-66	277/-96
	Analiz				100/-44	134/-60	168/-74	235/-104
	%Fark				%20/29	%28/5	%29/11	%18/7

Tablo 4.11: Basit mesnet karbon elyaf kompozit plaklar deplasman değerleri (mm) (ANSYS)

Kütle (kg) →	**4**	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**70**
5 Katman	1,1	1,9	2,6	3,1	3,5		
10 Katman		0,5	1	1,5	1,7		
20 Katman				0,2	0,3	0,4	0,5

Basit mesnet sınır şartlarında karbon elyaf kompozit plakların statik yayılı yükler altındaki birim uzama deneylerini Tablo 4.9 ile Tablo 4.11 arasında incelediğimizde, x ve y yönündeki birim uzamalarda sayısal ve deneysel sonuçlar olarak en kötü durumda 5 katmanlı plak için %19, 10 katmanlı plak için %63 ve 20 katmanlı plak için %25 civarlarında fark görülmüştür. Yine aynı sınır şartları için karbon elyaf kompozit plakların x' ve y' yönündeki birim uzamalarında ise, 5 ve 10 katmanlı plaklarda deney sonuçları ile analiz sonuçları arasında büyük farklar olduğundan yayınlanmamıştır. 20 katmanlı plak için ise en kötü durumda %29'luk fark söz konusudur. Buradan da anlaşılan basit mesnette de x' ve y' yönlerindeki birim uzamaların deneysel ölçümlerinde sorunlar yaşanmaktadır. Analizlerden anlaşılacağı üzere, 5 katmanlı plak 4, 10, 20, 30 ve 40 kg yüklerde lineer olmayan bölgededirler.

Lineer olmayan bölgeler için yapılan üst yüzey deney ve analiz sonuçları Tablo 4.12 ile Tablo 4.18 arasında listelenmiştir.

Tablo 4.12: Ankastre mesnet cam elyaf kompozit plaklar için üst yüzey ε_x / ε_y birim uzama değerleri ($\mu\varepsilon$)

Katman Sayısı		**Kütle (kg)**		
		10	**20**	**40**
6	**Deney**	-178/-184	-151/-159	
	Analiz	-216/-216	-207/-207	
	%Fark	%14	%23	
10	**Deney**			-427/-436
	Analiz			-355/-355
	%Fark			%16

Tablo 4.13: Ankastre mesnet cam elyaf kompozit plaklar için üst yüzey $\varepsilon_{x'}$ / $\varepsilon_{y'}$ birim uzama değerleri ($\mu\varepsilon$)

Katman Sayısı		**Kütle (kg)**	
		10	**20**
6	**Deney**	184/-149	283/-335
	Analiz	274/-245	429/-420
	%Fark	%32/39	%34/20

Lineer olmayan bölgelerde yapılan üst yüzey birim uzama deneyleri için, ankastre mesnet sınır şartlarında cam elyaf kompozit plakların statik yayılı yükler altındaki birim uzama deneylerini Tablo 4.12 ve Tablo 4.13'den incelediğimizde, x ve y yönündeki birim uzamalarda sayısal ve deneysel sonuçlar olarak en kötü durumda 6 katmanlı plak için %23, 10 katmanlı plak için %16'lık fark mevcuttur. Yine aynı sınır şartları için cam elyaf kompozit plakların x' ve y' yönündeki birim uzamalarında ise, en kötü durumda 6 katmanlı plak için %39'luk fark mevcuttur. Buradan da anlaşılacağı üzere plak orta noktasındaki x ve y yönündeki birim uzama ölçümleri sayısal analizlere daha yakındır.

Tablo 4.14: Basit mesnet cam elyaf kompozit plaklar için üst yüzey ε_x / ε_y birim uzama değerleri ($\mu\varepsilon$)

Katman Sayısı		**Kütle (kg)**	
		10	**20**
6	**Deney**	-167/-173	-197/-204
	Analiz	-103/-103	-190/-190
	%Fark	%62	%3

Lineer olmayan bölgelerde yapılan üst yüzey birim uzama deneyleri için, basit mesnet sınır şartlarında cam elyaf kompozit plakların statik yayılı yükler altındaki birim uzama deneyini Tablo 4.14'den incelediğimizde, x ve y yönündeki birim uzamalarda sayısal ve deneysel sonuçlar olarak en kötü durumda 6 katmanlı plak için %62'lik fark mevcuttur.

Tablo 4.15: Ankastre mesnet karbon elyaf kompozit plaklar için üst yüzey ε_x / ε_y birim uzama değerleri ($\mu\varepsilon$)

Katman Sayısı		**Kütle (kg)**			
		10	**20**	**30**	**40**
5	**Deney**	-37/-40	-22/-20	-21/-18	29/26
	Analiz	-22/-22	-33/-33	-20/-20	14/14
	%Fark	%40	%33	%4	%46

Tablo 4.16: Ankastre mesnet karbon elyaf kompozit plaklar için üst yüzey $\varepsilon_{x'}$ / $\varepsilon_{y'}$ birim uzama değerleri ($\mu\varepsilon$)

Katman Sayısı		**Kütle (kg)**			
		10	**20**	**30**	**40**
5	**Deney**	144/-120	229/-207	239/-233	205/-329
	Analiz	127/-117	185/-193	221/-250	245/-297
	%Fark	%11/2,5	%19/6	%7/7	%16/10

Lineer olmayan bölgelerde yapılan üst yüzey birim uzama deneyleri için, ankastre mesnet sınır şartlarında karbon elyaf kompozit plakların statik yayılı yükler altındaki birim uzama deneylerini Tablo 4.15 ve Tablo 4.16'dan incelediğimizde, x ve y yönündeki birim uzamalarda sayısal ve deneysel sonuçlar olarak en kötü durumda 5 katmanlı plak için %46'lık fark mevcuttur. Yine aynı sınır şartları için karbon elyaf kompozit plakların x' ve y' yönündeki birim uzamalarında ise, en kötü durumda 5 katmanlı plak için %19'luk fark mevcuttur. Burada her zaman sayısal analizlere yakın sonuç veren orta noktadaki x ve y yönündeki birim uzamalara nazaran x' ve y' yönündeki ölçümlerin sayısal analizlere daha yakın olduğu gözlemlenmektedir.

Tablo 4.17: Basit mesnet karbon elyaf kompozit plaklar için üst yüzey ε_x / ε_y birim uzama değerleri ($\mu\varepsilon$)

Katman Sayısı		Kütle (kg)				
		4	**10**	**20**	**30**	**40**
5	**Deney**	-93/-87	-107/-99	-121/-133	-57/-53	-93/-74
	Analiz	-91/-91	-89/-89	-60/-60	-32/-32	99/99
	%Fark	%2	%10	%50	%39	%6
10	**Deney**					-387/-370
	Analiz					-318/-318
	%Fark					%14

Tablo 4.18: Basit mesnet karbon elyaf kompozit plaklar için üst yüzey $\varepsilon_{x'}$ / $\varepsilon_{y'}$ birim uzama değerleri ($\mu\varepsilon$)

Katman Sayısı		Kütle (kg)				
		4	**10**	**20**	**30**	**40**
5	**Deney**	119/-246	224/-527	468/-1019	496/-1393	546/-1686
	Analiz	76/-256	93/-554	82/-960	75/-1295	72/-1590
	%Fark	%36/4	%58/5	%82/5	%85/7	%87/5
10	**Deney**					309/-743
	Analiz					235/-696
	%Fark					%24/6

Lineer olmayan bölgelerde yapılan üst yüzey birim uzama deneyleri için, basit mesnet sınır şartlarında karbon elyaf kompozit plakların statik yayılı yükler altındaki birim uzama deneylerini yukarıdaki tablolardan incelediğimizde, x ve y yönündeki birim uzamalarda sayısal ve deneysel sonuçlar olarak 5 katmanlı plağın özellikle 20 kg ve üzerindeki ağırlıklarda analizlerden çok farklı sonuçlara rastlanmaktadır.

10 katmanlı plak için ise %14'lük fark söz konusudur. Plak orta noktasının çaprazında bulunan "strain gage"lerden alınan x' ve y' yönündeki değerlerde ise, 5 katmanlı plak için x' yönündeki birim uzamalar çok farklı olmasına rağmen y' yönündekiler çok yakın çıkmıştır. 10 katmanlı plak için %24 civarında fark mevcuttur.

5. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında katmanlı cam ve karbon elyaf kompozit plakların yayılı yük altındaki gerilme davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada dört kenarından ankastre ve basit mesnet sınır şartları altında plak üzerine kum torbaları ile yayılı yük etki ettirilerek plak üzerinde iki noktadan birim uzama değerleri farklı kalınlıklardaki plaklar için farklı ağırlıktaki yüklerde ölçülmüştür. Aynı zamanda katmanlı kompozit plakların ANSYS yazılımı ile sonlu elemanlar modeli oluşturularak deneyde etki ettirilen statik yayılı yük altında sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar genel olarak uyumlu olmaklar birlikte, bazı plaklarda sayısal sonuçlar bakımından uyumsuzlukların olduğu belirlenmiştir.

Sağlıklı deney sonuçları elde edebilmek için her iki sınır şartında farklı ağırlıkta yükler ile çok sayıda deney yapılmıştır. Yayılı yüklerin düzgün olarak yayıldığına emin olunması için deneyler sayısal analizlerin sonuçlarına yaklaştırılacak şekilde tekrarlanmıştır. Yapılan deneylerin ardından elde edilen sonuçlar kayıt edilmiş ve sayısal analizlerde her bir sınır şartı için en uygun deney sonuçlarından faydalanmıştır.

Bazı deneyler kolaylıkla gerçekleştirildiği gibi bazı deneyler esnasında birtakım zorluklarla karşılaşılmıştır. Birim uzama ölçme cihazının her bir deney sonrasında başlangıç şartlarına dönmesi gerektiğinden, ağırlıklar plak üzerinden indirilip, değerler sıfırlanmıştır. Yüklerin indirilmesi durumunda biri uzama ölçerde artık bir birim uzama miktarı kalmaktadır. Bu değerin sıfıra inmesi zaman almaktadır. Sıfıra gitmesini beklemeden ilave yükün üzerine eklenmesi gerekmektedir. Bizim deneylerimizde bu durum gözden kaçmıştır. Dolayısıyla ilk yüklemeden sonra yapılan ölçümlerde birim uzamalar sıfırlandığından hatalar oluşmaktadır. Bu nedenle deneyin en başında plak mesnetlendikten sonra sıfırlanmalı, daha sonra yükler plak üzerine koyulmalıdır. Yük artırımı yapılacaksa eğer, mevcut yükün üzerine ilave edilerek ölçümlere devam edilmelidir. Ayrıca her seferinde kum torbalarını plak üzerinden kaldırıp tekrar yüklemek yükün ağırlık merkezine değiştirmektedir.

Deneylerde kullanılan kare şeklindeki kum torbaları 20 kg'lık ağırlığa sahiptir. Fakat kalın plaklar için 70 kg'a kadar yük uygulanmıştır. O nedenle geriye kalan 50 kg'lık ağırlık parça ağırlıklar ile tamamlanmıştır. Fakat parça ağırlıklar yüzey alanı olarak tam bir kare olmadığından tam bir yayılı yük etkisi yaratmadığı düşünülmektedir. Bir yandan da kum taneciklerinin bu ağırlığı tüm yüzey alanına yaydığı düşünülmektedir. O nedenle bir sonraki aşama için deney düzeneğinde mutlaka plaka yüzey alanı ile aynı ölçülere sahip 10, 20, 30 ve 40 ar kg'lık beton kare ağırlıklar yapılmalıdır. Yapılan bu ağırlıklar kum torbalarının üzerine yerleştirilmelidir. Böylece bilgisayar programında modellenen düzgün yayılı yüke daha çok yaklaşılmış olacaktır.

10 katmanlı cam elyaf kompozit plağın deney sonuçlarının analiz sonuçları ile çok farklı olmasının "strain gage"lerin yapıştırılmasındaki bir hatadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü sayısal değerlerden ziyade karakter bakımından bir benzerlik dahi yakalanamamıştır. Bir başka deyişle örnek olarak basma etkisinin görülmesi gereken yerde çekme etkisi görülmüştür.

Deneylerin tutarlılığından kısaca bahsedilecek olursa cam elyaf katmanlı kompozit plaklar hem ankastre hem basit mesnet sınır şartları altında orta noktadaki x ve y yönündeki birim uzama ölçümlerinde yüksek başarı sağlanmıştır. Fakat çapraz eksen üzerindeki x' ve y' yönündeki birim uzamalar analiz sonuçlarından farklıdır. Karbon elyaf katmanlı kompozit plakların basit mesnet sınır şartlarında yapılan deneyleri ankastre mesnet sınır şartlarında yapılan deneylere nazaran daha başarılıdır. Cam ve karbon elyaf kompozit plakları kendi aralarında değerlendirecek olursak eğer, karbon elyafların deney sonuçlarının analiz sonuçlarına cam elyaf plaklara kıyasla daha yakın olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise karbon elyaf katmanlı kompozit plakların önceden fabrikasyon olarak reçine emdirildiğinden üretim esnasında oluşabilecek malzeme hatalarının asgariye indirilmiş olmasıdır.

Bundan sonraki çalışmalarda, aynı deney düzeneği kullanılarak farklı sınır şartlarının etkisi, farklı yükleme koşulları, farklı elyaf açısına sahip katmanlı kompozit plakların davranışları incelenebilir. Buna ilaveten çalışma koşulları değiştirilerek nem, sıcaklık veya basınç ortamı sağlanarak deneyler gerçekleştirilip sonuçları incelenebilir.

KAYNAKLAR

[1] **Swanson, S. R.,** 1997. Introduction to Design and Analysis with Advanced Composite Materials, Prantice Hall Inc.

[2] **Goodrich Aerospace Cooperation.,** 2007. What are composites, http://www.epp.goodrich.com/why.shtml

[3] **Jones, R. M.,** 1999. Mechanics of Composite Materials, Taylor & Francis, Inc., Second Edition.

[4] **Dong, S. B., Pister, K. S. and Taylor, R. L.,** 1962. On the Theory of Laminated Anisotropic Shells and Plates, J. Aero. Science, **29**, 969-975.

[5] **Whitney, JM.,** 1971. Fourier analysis of clamped anisotropic plates, ASME J. Appl Mechanics, **38,** 530-532.

[6] **Whitney, J. M.,** 1970. The Effect of Boundary Conditions on the Response of Laminated Composites, Journal of Composite Materials, **4,** 192-203.

[7] **Ashton, J. E.,** 1970. Anisotropic Plate Analysis-Boundary Conditions, Journal of Composite Materials, **4,** 182-191.

[8] **Chaudhuri, RA., Kabir, HRH.,** 1992. Influence of Laminations and Boundary Conditions on the Response of Moderately Thick Cross-Ply Rectangular Plates, Journal of Composite Materials, **26,** 51-77.

[9] **Reissner, E.,** 1975. On Transverse Bending of Plates, Including the Effect of Transverse Shear Deformation, Int. Journal of Solid Structures, **11,** 569-573.

[10] **Reddy, J. N., Khdeir, A. A. and Librescu, L.,** 1987. Levy Type Solutions for Symmetrically Laminated Rectangular Plates Using First Order Shear Deformation Theories, Journal of Applied Mechanics, **54,** 740-742.

[11] **Noor, AK., Burton, WS.,** 1989. Assessment of shear deformation theories for multilayered composite plates, Journal of Applied Mechanics, **42,** 1-12.

[12] **Pagano, NJ.,** 1970. Exact solution for rectangular bidirectional composites and sandwich plates, Journal of Composite Materials, **4,** 931-933.

[13] **Srinivas, S., Rao, AK.,** 1970. Bending, vibration and buckling of simpoly supported thick orthotropic rectangular plates and laminates, Int. Journal of Solid Structures, **6,** 1463-1481.

[14] **Nelson, RB., Lorch, DR.,** 1974. A refined theory for laminated orthotropic plates, ASME Journal of Applied Mechanics, **41,** 177-183.

[15] **Levinson, M.,** 1980. An accurate simple theory of the statics and dynamics of elastic plates, Mech. Res. Community, **7,** 343-350.

[16] **Murthy, MVV.,** 1981. An improved transverse shear deformation theory for laminated anisotropic plates, NASA Technical Paper, USA.

[17] **Librescu, L., Khedeir, AA.,** 1989. Analysis of symmetric cross-ply laminated elastic plates using a higher order theory: Part I-Stress and displacement, Composite Structures, **9,** 189-213.

[18] **Oktem, AS.,** 2005. The effect of boundary conditions on the response of thick laminated composite plates and shells, *PhD Thesis,* University of Utah.

[19] **Reddy, J. N.,** 1984. A Simple Higher Order Theory for Laminated Composite Plates, Journal of Applied Mechanics, **51,** 745.

[20] **Latheswary, S., Valsarajan, K. V., Rao, Y. V. K. S.,** 2004. Behaviour of Laminated Composite Plates using Higher Order Shear Deformation Theory, Journal of Applied Science, **85,** 10-17.

[21] **Bose, P., Reddy, J. N.,** 1998. Analysis of Composite Plates Using Various Plate Theories. Part I: Formulation and Analytical Solutions, Structural Engineering Mechanics, **6,** 583-612.

[22] **Liberescu, L., Hause, T.,** 2000. Recent Developments in the Modeling and Behavior of Advanced Sandwich Constructions, Composite Structures, **48,** 1-17.

[23] **Lo, K. H., Christiensen, R. M., Wu, E. M.,** 1994. A Higher Order Theory of Isotropic Elastic Plates, Journal of Applied Mechanics, **47,** 147-170.

[24] **Rastgaar, Aagah, M., Mahinfalah, M., Nakhaie, Jazar, G.,** 2003. Linear Static Analysis and Finite Element Modeling for Laminated Composite Plates Using Third Order Shear Deformation Theory, Composite Structures, **62,** 27-39.

[25] **Chaudhuri, RA., Kabir, HRH.,** 1995. Fourier solution to higher order theory based laminated shell boundary-value problem, AIAA Journal, **33,** 1681-1688.

[26] **Amabili, M.,** 2004. Nonlinear vibrations of rectangular plates with different boundary conditions: theory and experiments, **82,** 2587-2605.

[27] **Cunningham, PR., White, RG., Aglietti, GS.,** 2000. The effects of various design parameters on the free vibration of doubly curved composite sandwich panels, Journal of Sound and Vibrations, **230,** 617-648.

[28] **Mostafa, MA., Gmur, T., Botsis, C.,** 2006. Experimental study on the effects of the boundary conditions on the deformations of composite plates, Composite Science and Technology, **66,** 1756-1765.

[29] **Release 10.0 Documentation for ANSYS**.

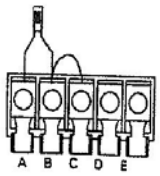
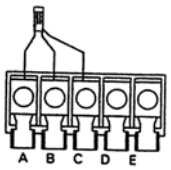
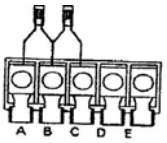
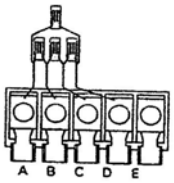
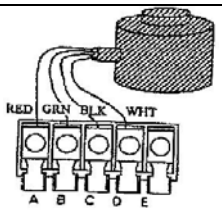
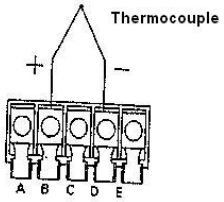
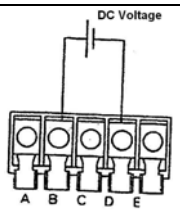
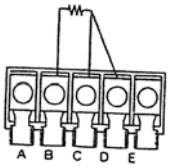
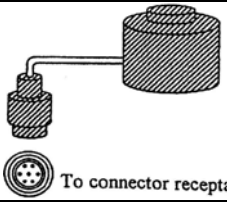
[30] TML Strain Meter TC-31K Operation Manual

[31] TML Switching Box CSW-5A For TC-31K Operation Manual

[32] **Shimadzu Cooperation.,** 2007. Shimadzu UH-F-100KNI Specifications http://www1.shimadzu.com/products/test/univ/uh.html

EK-A

CSW-5A TERMİNAL KUTUSU'NA TAKILABİLEN "STRAİN GAGE"LER VE BAĞLAMA YÖNTEMLERİ

Ölçme Yöntemi	Algılayıcı Modu	Bağlama Şekli
1 Gage 2-wire (1/4 bridge 2-wire)	11: 1 GAGE 120 Ω 12: 1 GAGE 240 Ω 13: 1 GAGE 350 Ω	
1 Gage 3-wire (1/4 bridge 3-wire)	11: 1 GAGE 120 Ω 12: 1 GAGE 240 Ω 13: 1 GAGE 350 Ω	
2 Gage (1/2 bridge)	15: 2 GAGE (120 – 1000 Ω)	
4 Gage (Full bridge)	16: 4 GAGE (Sabit Voltaj 120-1000 Ω) 17: C350 (Sabit Akım 350 Ω)	
Transducers	16: 4 GAGE 17: C350	
Thermocouples	20: T 24: S 21: K 25: R 22: J 26: E 23: B 27: N	
DC Voltage	30: V 240mV 32 V 24V 34: V auto (~24V)	
Pt Resistance Thermometer	40: Pt 3W (Pt100 in 3-wire system)	
ransducers	16: 4 GAGE 17: C350	

ÖZGEÇMİŞ

Oktay Orhan, 1982 yılında İstanbul'da doğdu. 1999 yılında Yahya Kemal Beyatlı Lisesi'ni bitirdi. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü kazandı. 2003 yılında bölüm birincisi olarak mezun oldu. 2004 yılı bahar döneminde İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Uçak ve Uzay Mühendisliği disiplinler arası programında yüksek lisans eğitimine başladı. Eylül 2004 tarihinden itibaren Türk Hava Yolları Teknik A.Ş.'de Güç Sistemleri Mühendislik Müdürlülüğünde mühendis olarak çalışmaktadır.