

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİBRİT KATMANLI KOMPOZİT PLAKLARIN
ANLIK BASINÇ YÜKÜ ALTINDAKİ DİNAMİK DAVRANIŞININ
DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ali BAŞ**

Anabilim Dalı : Uçak ve Uzay Mühendisliği

Programı : Uçak ve Uzay Mühendisliği

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİBRİT KATMANLI KOMPOZİT PLAKLARIN
ANLIK BASINÇ YÜKÜ ALTINDAKİ DİNAMİK DAVRANIŞININ
DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ali BAŞ
(511061001)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 03 Haziran 2009

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Zahit MECİTOĞLU (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Mehmet H. OMURTAG (İTÜ)
Doç. Dr. Halit S. TÜRKMEN(İTÜ)**

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezinde sunulan çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak ve Uzay Mühendisliği Disiplinler Arası Programında yapılmıştır. Deneysel çalışmalar Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Kompozit Yapı Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Tezde incelenen konular 106M450 numaralı “Anlık Basınç Yüğü Etkisindeki Homojen olmayan Plakların, Doğrusal Olmayan Dinamik Davranışının Sonlu Elemanlarla Çözümü” isimli TÜBİTAK projesinin birer parçasıdır. Sağladığı destekten dolayı TÜBİTAK’a teşekkür ederim.

Bu tezi hazırlamamda bana yol gösteren ve yardımını esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Zahit Mecitoğlu’na teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca deneyler sırasında bana yardımcı olan Akın Ömercikoğlu’na ve İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Kompozit ve Yapı Laboratuvarı çalışanlarından Müslim Çakır ve Aytekin Güven’e de yardımlarından dolayı teşekkür ederim. Deneysel çalışmalardaki katkılarından dolayı BİS Mühendisliğe, A. İhsan Arslan ve Ahmet Kılıç’a teşekkür ederim.

Mayıs 2009

Ali BAŞ
Uzay Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
KISALTMALAR.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
SEMBOL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. ÇEKME DENEYİ	7
2.1 Giriş	7
2.2 Deney Numunelerinin İmalatı	7
2.3 Deney Araç Ve Gereçleri	9
2.3.1 Gerinim ölçerler	9
2.3.2 VXI veri toplama cihazı	10
2.3.3 DAC Express programı	11
2.3.4 MTS test sistemi	11
2.4 Çekme Deneyi Yapılışı.....	12
2.5 Sonuçlar Ve Değerlendirme	13
2.5.1 $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip cam elyaf-epoksi numunelerinin çekme deneyi sonuçları.....	15
2.5.2 $0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip cam elyaf-epoksi numunelerinin çekme deneyi sonuçları.....	16
2.5.3 $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerinin çekme deneyi sonuçları	18
2.5.4 $0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerinin çekme deneyi sonuçları	20
2.5.5 $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf-epoksi numunelerinin çekme deneyi sonuçları.....	21
2.5.6 $0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf-epoksi numunelerinin çekme deneyi sonuçları	23
3. ANLIK BASINÇ YÜKÜ DENEYLERİ	25
3.1 Giriş	25
3.2 Deney Düzenegi	26
3.2.1 Deney Platformu.....	26
3.2.1.1 Dikmeler	28
3.2.1.2 Döner tabla	28
3.2.1.3 Tabla	29
3.2.1.4 Kızaklar	30
3.2.1.5 Yüksek basınç tüpleri ve ayakları	31

3.2.1.6 Membranlar	32
3.2.1.7 Mesnet çerçeveleri	33
3.2.2 Basınç duyargası.....	34
3.2.3 Gerinim ölçer	35
3.2.4 Kompresör ve basınç tankı	35
3.2.5 Kompozit plak üretimi.....	36
3.3 Anlık Basınç Yüğü Deneyinin Yapılması	39
4. SONLU ELEMAN ANALİZİ VE DENEY SONUÇLARIYLA	
KARŞILAŞTIRILMASI.....	43
4.1 Giriş	43
4.2 Geometri ve Malzeme.....	43
4.3 Sonlu Eleman Modeli	44
4.4 Serbest Titreşim Analizi	46
4.5 Geçici Analiz	47
4.5.1 30x30 cm hibrit kompozit plağın geçici analiz sonuçları.....	48
4.5.2 40x30 cm hibrit kompozit plağın geçici analiz sonuçları.....	53
4.5.3 40x20 cm hibrit kompozit plağın geçici analiz sonuçları.....	57
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR.....	65
EKLER	69

KISALTMALAR

KYL : Kompozit Yapı Laboratuvarı
RC : Resin Content (Ağırlığa göre reçine içeriği sabiti)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Elle üretimde kompozit malzemeler için tipik RC sabitleri [31].	8
Çizelge 2.2 : Epoksi-Reçine özellikleri [32].	9
Çizelge 2.3 : $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesinde cam elyaf-epoksi numunelerinin geometrik özellikleri.	15
Çizelge 2.4 : $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesinde cam elyaf-epoksi numunelerinin mekanik özellikleri.	15
Çizelge 2.5 : $0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip cam elyaf-epoksi numunelerinin geometrik özellikleri.	17
Çizelge 2.6 : $0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip cam elyaf-epoksi numunelerinin gerinim değerleri.	17
Çizelge 2.7 : $0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip cam elyaf-epoksi numunelerin mekanik özellikleri.	17
Çizelge 2.8 : $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerinin geometrik özellikleri.	19
Çizelge 2.9 : $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerinin mekanik özellikleri.	19
Çizelge 2.10 : $0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerinin geometrik özellikleri.	20
Çizelge 2.11 : $0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerinin gerinme değerleri.	20
Çizelge 2.12 : $0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerinin mekanik özellikleri.	20
Çizelge 2.13 : $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf-epoksi numunelerinin geometrik özellikleri.	22
Çizelge 2.14 : $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf -epoksi numunelerinin mekanik özellikleri.	22
Çizelge 2.15 : $0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf-epoksi numunelerinin geometrik özellikleri.	23
Çizelge 2.16 : $0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf-epoksi numunelerinin gerinim değerleri.	23
Çizelge 2.17 : $0^\circ/90^\circ$ Kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf-epoksi numunelerinin mekanik özellikleri.	23
Çizelge 3.1 : 50x50 cm kompozit plağın bileşen bilgileri.	37
Çizelge 4.1 : Sayısal analizlerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.	43
Çizelge 4.2 : Kompozit kumaşların kalınlıkları.	44
Çizelge 4.3 : ANSYS ile elde edilen doğal frekans değerleri.	46
Çizelge A.1 : Önerilen bazı deney numune boyutları [30].	73
Çizelge A.2 : MTS test sisteminin genel bilgileri [36].	79

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Gerinim ölçer çalışma prensibi.....	9
Şekil 2.2 : Gerinim ölçerin yapıştırılması.....	10
Şekil 2.3 : VXI EX1629 dinamik gerinim ölçer cihazı.....	11
Şekil 2.4 : Çekme deneyi akış diyagramı.....	13
Şekil 2.5 : $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip cam elyaf-epoksi numunelerinin gerilme-gerinim grafiği.....	16
Şekil 2.6 : $0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesindeki cam elyaf-epoksi numunelerin gerilme-gerinim grafiği.....	18
Şekil 2.7 : $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerin gerilme-gerinim grafiği.....	19
Şekil 2.8 : $0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerin gerilme-gerinim grafiği.....	21
Şekil 2.9 : $\pm 45^\circ$ Kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf-epoksi numunelerinin gerilme-gerinim grafiği.....	22
Şekil 2.10 : $0^\circ/90^\circ$ Kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf-epoksi numunelerinin gerilme-gerinim grafiği.....	24
Şekil 3.1 : Deney düzeneğinin genel görünüşü.....	27
Şekil 3.2 : Deney düzeneğinin imal edilmiş görünüşü.....	27
Şekil 3.3 : Dikmeler.....	28
Şekil 3.4 : Döner tabla.....	29
Şekil 3.5 : Tabla.....	30
Şekil 3.6 : Kızaklar.....	30
Şekil 3.7 : Yüksek basınç tüpü ve ayakları.....	31
Şekil 3.8 : İmalatı yapılmış yüksek basınç tüpleri.....	32
Şekil 3.9 : Pirinç membran.....	33
Şekil 3.10 : Kompozit plak mesnet çerçeveleri.....	34
Şekil 3.11 : Çerçevelerin aynaya bağlantı lamaları.....	34
Şekil 3.12 : Kulite LE-125 basınç duyargası.....	35
Şekil 3.13 : Gerimin ölçer.....	35
Şekil 3.14 : Kompresör ve yüksek basınç tankı.....	36
Şekil 3.15 : Hibrit kompozit plağın katmanlaması.....	37
Şekil 3.16 : Kompozit plağın CNC tezgâhında işlenmesi.....	38
Şekil 3.17 : Plak üzerindeki gerinim ölçerlerin konumu.....	40
Şekil 3.18 : Plak üzerindeki basınç duyargalarının konumu.....	40
Şekil 3.19 : Anlık basınç yükü deneyi akış diyagramı.....	42
Şekil 4.1 : SHELL91 Elemanı [40].....	45
Şekil 4.2 : Hibrit kompozit plakların sonlu elemanlar modeli.....	45
Şekil 4.3 : 30x30 cm boyutlarındaki hibrit kompozit plağın ilk üç mod şekilleri.....	46
Şekil 4.4 : 40x30 cm boyutlarındaki hibrit kompozit plağın ilk üç mod şekilleri.....	47
Şekil 4.5 : 40x20 cm boyutlarındaki hibrit kompozit plağın ilk üç mod şekilleri.....	47
Şekil 4.6 : Sonlu eleman modelinin eksenleri.....	48

Şekil 4.7 : 30x30 cm plak için deneylerde elde edilen basınç eğrileriyle yaklaşım eğrilerinin uyumu.	49
Şekil 4.8 : 30x30 cm plak için zamana göre yer değiştirmesi.	50
Şekil 4.9 : Plagın A noktasının x yönündeki gerinim karşılaştırılması.	50
Şekil 4.10 : Plagın A noktasının y yönündeki gerinim karşılaştırılması.	51
Şekil 4.11 : Plagın B noktasının x yönündeki gerinim karşılaştırılması.	52
Şekil 4.12 : Plagın B noktasının y yönündeki gerinim karşılaştırılması.	52
Şekil 4.13 : 40x30 cm plak için deneylerde elde edilen basınç eğrileriyle yaklaşım eğrilerinin uyumu.	54
Şekil 4.14 : 40x30 cm plak için zamana göre yer değiştirmesi.	54
Şekil 4.15 : Plagın A noktasının x yönündeki gerim karşılaştırılması.	55
Şekil 4.16 : Plagın A noktasının y yönündeki gerinim karşılaştırılması.	55
Şekil 4.17 : Plagın B noktasının x yönündeki gerinim karşılaştırılması.	56
Şekil 4.18 : Plagın B noktasının y yönündeki gerinim karşılaştırılması.	56
Şekil 4.19 : 40x20 cm plak için deneylerde elde edilen basınç eğrileriyle yaklaşım eğrilerinin uyumu.	57
Şekil 4.20 : 40x20 cm plak için zamana göre yer değiştirmesi.	58
Şekil 4.21 : Plagın A noktasının x yönündeki gerinim karşılaştırılması.	58
Şekil 4.22 : Plagın A noktasının y yönündeki gerinim karşılaştırılması.	59
Şekil 4.23 : Plagın B noktasının x yönündeki gerinim karşılaştırılması.	59
Şekil 4.24 : Plak B noktasının y yönündeki gerinim karşılaştırılması.	60
Şekil A.1 : Gerinim ölçerlerin yapıştırma yerleri [30].	72
Şekil A.2 : Standartta belirtilen tablı deney numunesi [30].	73
Şekil A.3 : DAC Express'e EX-1629 cihazının tanıtılması.	75
Şekil A.4 : Gerinim ölçerlerin parametrelerinin programa girilmesi.	76
Şekil A.5 : "Unstrained Voltage" kalibrasyon ara yüzü.	77
Şekil A.6 : "Auto Calibration" ara yüzü.	78
Şekil A.7 : MTS test sisteminin ölçülerinin görünüşü ve boyutları [36].	79
Şekil A.8 : MTS test cihazının "Wedge Gripsleri."	80
Şekil A.9 : MPT süreç editörü penceresi.	80
Şekil A.10 : Örnekleme hızı penceresi.	81
Şekil A.11 : Çekme kuvveti limiti penceresi.	82
Şekil A.12 : Frekans belirleme penceresi.	82
Şekil A.13 : "Manual Commands" penceresi.	83
Şekil A.14 : Deney numunesinin MTS cihazına bağlantısı ve numuneye yapıştırılmış gerinim ölçer görünüşü.	83

SEMBOL LİSTESİ

A	: Kompozit plağın yüzey alanı
E	: Elastisite modülü
F	: Kuvvet
n	: Katman sayısı
RC	: Ağırlığa göre reçine içeriği sabiti
w_f	: Kompozit kumaş ağırlığı
$\Delta\varepsilon_t$	: Yanal gerinim farkı
$\Delta\varepsilon_l$	: Uzunlamasına gerinim farkı
ε	: Gerinim
σ	: Gerilim
ν	: Poisson oranı

HİBRİT KATMANLI KOMPOZİT PLAKARIN ANLIK BASINÇ YÜKÜ ALTINDAKİ DİNAMİK DAVRANIŞININ DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, anlık basınç yüküne maruz katmanlı hibrit kompozit plakların dinamik davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi için bir deney donanımı tasarlanmış ve imal edilmiştir. Deney düzeneğinin tasarlanması için CATIA V5R16 programı kullanılmıştır. Donanım bir yüksek basınç tankından beslenen bir ucu kapalı, diğer ucu bir membran ile kapatılmış bir yüksek basınç tüpü ile test plaklarının bağlanacağı mesnetler ve bunların monte edildiği bir çerçeve sistemden oluşmaktadır. Deneysel çalışmalarda, basınç tüpü içerisinde elde edilen basınçlandırılmış hava, tüpün açık ucuna yerleştirilmiş membranın artan iç basıncın etkisiyle patlaması sonucu anlık basınç yükü tüpün karşısında ankastre olarak mesnetlenmiş kompozit plağa etki ettirilmiştir. Plagın ön yüzeyinde farklı konumlara yerleştirilen üç adet basınç duyargasıyla basıncın plak üzerinde zamanla nasıl değiştiği belirlenmeye çalışılmıştır. Aynı anda plagın ön ve arka orta noktalarındaki gerinim ölçerler vasıtasıyla da gerinimlerin zamanla değişimleri ölçülmüştür. Ölçümler İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Kompozit Yapı Laboratuvarında (KYL) mevcut olan VXI 1629 veri toplama cihazı ile yapılmıştır. Veri toplama yazılımı olarak DAC Express kullanılmıştır. Sayısal analizlerde ANSYS 11.0 sonlu eleman analiz programı kullanılmıştır. Analizler için hibrit plagi oluşturan her bir kompozit malzemenin mekanik özellikleri gereklidir. Bu özellikler KYL’da mevcut olan MTS universal test makinesinde gerçekleştirilen çekme deneylerinden elde edilmiştir. Kompozit plaklar ANSYS yazılımının kütüphanesinde bulunan SHELL91 kabuk elemanı ile modellenmiştir. Deneylerde ölçülen basınç değerleri kullanılarak geçici (transient) analiz yapılmıştır. Elde edilen gerinim değerleri deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF HYBRID LAMINATED COMPOSITE PLATE'S DYNAMIC BEHAVIOUR SUBJECTED TO BLAST LOAD

SUMMARY

This thesis deals with experimental and numerical investigation of hybrid laminated composite plate's dynamic behavior subjected to blast load. The experiments and numerical analysis are performed for the three plates with different aspect ratios. In the experiments, the blast loads are generated using a shock tube. In this purpose, a test platform is designed by using CATIA software, and then it is manufactured. The test platform consists of a shock tube, a pressurized air tank, supports for composite plates and a frame structure. All the experiments are carried out at Composite Structure Laboratory (CYL) at Faculty of Aeronautics and Astronautics, Istanbul Technical University. The one end of tube is closed and the other end is open. The open end is closed by a thin membrane during the experiments. The membrane ruptures at a certain internal pressure level and generate air blast load. During the experiment pressures on the plate are measured by using three miniature pressure transducers placed specific locations on the front surface of the plates. In addition, strains on the plate are measured by using strain gauges located at the centroids of the bottom and top surfaces of plate. VXI 1629 instrument is used for pressure and strain measurements and DAC Express software is used for the data acquisition. ANSYS 11.0 software is used in the numerical analysis. Mechanical properties of composite laminated plates are needed to carry out the numerical analysis. Therefore, tensile tests were performed at MTS universal test machine in the CYL to determine mechanical properties of the each composite ply. Then, finite element models of hybrid composite plates are created by using SHELL91 element of ANSYS 11.0 library. Transient analysis of the plates under blast load obtained experimentally is done to obtain strain-time histories. Finally, the experimental and numerical results are compared and it is found a good agreement.

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında, anlık basınç yükü etkisi altındaki hibrit katmanlı kompozit plakların dinamik davranışları deneysel olarak incelenmiş ve ANSYS sonlu eleman yazılımı ile elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Kompozit malzemeler birbirinden ayrı iki ya da daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle elde edilen malzemelerdir. Kompozit malzeme teknolojisi bugün hızla gelişmekte ve hemen her gün yeni ürünler keşfedilmektedir. Kompozit malzemeler, düşük maliyetli klasik endüstriyel malzemelere nazaran birçok fiziksel ve kimyasal avantajlara sahip olmasıyla pek çok branşta bilhassa hafif yapıların ve konstrüksiyonların temel malzemesi olma yolundadır. Bu tür malzemeler mühendislikte çok geniş uygulama alanına sahiptir. Ayrıca kompozit malzemeler için farklı alanlara uygun değişik uygulamalara yönelik çeşitli kompozit malzeme çalışmaları mevcuttur. Bunlara örnek olarak hibrit kompozit malzemeler gösterilebilir. Kompozit malzemeler hassas olup düşük hızlardaki çarpışmalara bile duyarlıdır. Bu yüzden kompozit malzemelerin dayanımını arttırmak için kompozitlerde hibritleşme yöntemi önem kazanmıştır. Kompozitler içinde hibrit kompozit malzemeler çok önemli yer tutmaktadır. Sadece metal malzeme kullanmak yerine hibrit kompozit malzeme kullanılarak ağırlık, dayanım ve maliyet gibi tasarım ve üretim için önemli başlıklar optimize edilebilir. Hibrit kompozit malzemeler sayesinde farklı kompozit kumaşların avantajlarının kombine edilmesiyle istenilen duruma çok daha uygun dayanımda ve çok daha hafif bir malzeme elde edilebilir. Ayrıca bu tür hibrit malzemelerin kullanımıyla kırılma ve çentiğe duyarlılığın artırılması, daha uzun yorulma ömrü elde edilmesi ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi gibi birçok avantajları bulunmaktadır. Bu avantajlar göz önünde bulundurulduğunda hibrit malzemeler özellikle hafifliğin ve yorulmanın çok önemli olduğu hava uzay sanayinde, dayanımın hayati öneme sahip olduğu askeri alanlarda hibrit kompozit malzeme uygulamaları kullanılabilir. Aynı zamanda hava uzay sanayi ve askeri alanlarda kullanılabilecek bu tür malzemelerin çoğunlukla maruz kalacağı yüklerin başında çarpma, patlama gibi durumlarda meydana gelen anlık basınç etkisidir. Anlık basınç yükü etkisi nükleer patlamalar, TNT gibi bomba tesirli

patlamalarda, uçaklarda oluşan şok dalgaları sonucunda ve terörist saldırıları gibi birçok durumda meydana gelebilmektedir. Bu gibi durumlarda yapılara çok kısa süre içerisinde çok büyük miktarlarda yükler etki etmektedir. Sadece maruz kalan yapıyı değil ona bağlı teçhizat ve donanımı da dorğudan etkileyebilecek zararlara neden olabilir. Askeri amaçlı yapılar için çok önemli olan bu etki özellikle hava-uzay araçlarının tasarımında önemini korumaktadır. Dolayısıyla zamana bağlı dış uyarımlar, etkisi altındaki yapılara ve bu uyarımların şiddetine göre yakın veya uzak çevredeki yapılara değişik boyutlarda zarar verebilmektedir. Sonuç olarak anlık yük etkisi altındaki yapılarda meydana gelen zararların azaltılması için yapıların bu tür yüklere karşı verdikleri dinamik cevapların bilinmesi gerekmektedir.

Literatürde hibrit kompozit malzemeler hakkında çeşitli birçok çalışma yapılmıştır. Bir kısım çalışmalarda hibrit kompozit plakların eğilme gerilmesi altındaki yorulma davranışı incelenmiştir. Belingardi ve arkadaşları [1], cam-karbon elyaf/epoksi hibrit kompozitlerin değişik yükleme koşullarında ve değişik büyüklüklerdeki yükler altındaki eğilme yorulmasını incelemişlerdir. Chen ve arkadaşları [2], katmanlanmış hibrit kompozit plakların periyodik tek eksenli gerilme ve eğilme gerilmesi altındaki dinamik davranışı üzerine analitik çalışmalar yapmışlardır. Bazı araştırmacılar, hibrit kompozit plakların burkulma davranışlarını incelemişlerdir. Hwang ve Mao [3], hibrit kompozit plakların yapraklanmasına (delamination) neden olan yükleri ve katmanlar arası oluşan bu yapraklanmaların basma yükü altındaki karakteri üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmalar için hibrit kompozit plakların nonlineer burkulma analizi gerçekleştirilmiş ve burkulma altındaki yapraklanmasını hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Chen ve arkadaşları [4], hibrit kompozit plağın genel olarak üniform olmayan ön gerilmeli durumdayken doğal frekansını ve burkulma analizini teorik olarak yapmışlardır. Doğal frekansa ve burkulmaya etkiyen çeşitli parametrelerin etkileri incelenmiş ve sonuçların mevcut teori ile kabul edilebilir tahminler verdiğini göstermişlerdir. Avcı ve arkadaşları [5], simetrik ve simetrik olmayan çatlaklı çapraz katmanlanmış hibrit kompozit plakların ısı burkulma analizini farklı sınır koşulları altında sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapmışlardır. Şahin [6] benzer çalışmayı simetrik ve simetrik olmayan açılı katmanlanmış ve bir deliği olan hibrit kompozit plakların ısı burkulma analizini farklı sınır koşulları altında sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yapmıştır. Literatürde hibrit kompozit plakların dinamik davranışını inceleyen çalışmalar da mevcuttur. Örneğin, Lee ve arkadaşları [7], katmanlı hibrit kompozit plakların düşük

hızlarda çarpmalara karşı davranışı üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında öncelikle çeşitli katmanlı hibrit kompozit plakların sayısal modelleri oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. Naik ve arkadaşları [8], çeşitli hibrit kompozit plakların çarpma karşısındaki dinamik davranışlarını test etmiş ve hasar toleranslarını incelemişlerdir. Chen ve Fung [9] ön gerilmeli hibrit kompozit plakların nonlinear titreşim analizini değişik açıklık oranlarına ve farklı katman sayısına göre yapmışlardır. Harras ve arkadaşları [10], Glare 3 hibrit kompozit plakların lineer ve nonlinear dinamik davranışını deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir.

Literatürde yapılan deneysel çalışmalarda anlık basınç yükü elde edilmesi için çeşitli yöntem ve malzemeler kullanılmıştır. Gee ve arkadaşları [11] deneysel, analitik ve sayısal olarak anlık yük etkisiyle çarpan bir cismin yüzey üzerindeki etki alanında meydana gelen basıncın ölçümünü gerçekleştirmişlerdir. Son yıllarda uçaklarda oluşabilecek hasar tehlikesinin azaltılması için önemli miktarda çalışma yapılmaktadır. Özellikle fark edilmesi zor olan küçük miktarlardaki patlamaların uçak yapılarında sebep olabileceği hasarlara karşı koruma üzerine yoğunlaşmıştır. Metal plakların anlık basınç yükü altındaki davranışları için literatürde çeşitli çalışmalar mevcuttur. Veldman ve arkadaşları [12], uçak yapılarında oluşan hasarları farklı durumlarda incelemek için önceden basınç etkisi altında kalmış alüminyum plakların anlık yük etkisi altındaki davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Mamalis ve arkadaşları [13], metallerin ve polimerik malzemelerin avantajlarından yararlanıp aynı zamanda dezavantajlarından da kaçınarak yeni bir sandviç yapı geliştirmişlerdir. Bu amaçla yüzey tabakasında metal kullanarak rijitliği arttırılırken çekirdekten daha hafif bir malzeme seçmişlerdir. Bununla birlikte yüzey tabakasıyla çekirdek arasında da bir levha konularak katmanlar arası bağın istenilene yakın olmasını sağlamışlardır. Farklı malzeme seçimleri yapılarak deneyler yapılmıştır. Ve ara yüzeyin darbe yüküne karşı dayanıklı plak olmasını aynı zamanda yüzeyle çekirdek arasındaki bağında da iyi olmasını sağlamışlardır. Yuen ve Nurick [14], farklı kuvvetlendirme yöntemleriyle dört köşeli yumuşak çelik plağın anlık basınç yükünün üniform etkisini ve Langdon ve arkadaşları [15] da yerel olarak etkimesi sonucundaki davranışını hem deneysel hem de sayısal olarak incelemişlerdir. Jacinto ve arkadaşları [16], metal plakların patlama yüklerine karşı davranışlarını hem deneysel hem de sayısal olarak incelemiş ve mevcut çözüm yöntemleriyle karşılaştırmalarını yapmışlardır. Stoffel ve arkadaşları [17], şok dalgası etkisindeki çelik plakların davranışlarını hem deneysel hem de sayısal olarak incelemiş ve

karşılaştırmalarını yapmışlardır. Gantes ve Pnevmatikos [18], yapıların patlamalardan kaynaklanan anlık basınç yükü altındaki davranışını sayısal olarak çok daha iyi modelleyen bir hareket denklemi türeterek incelemişlerdir.

Katmanlanmış kompozit plaklar için de çeşitli anlık basınç yükü etkisi çalışmaları farklı yaklaşımlarla yapılmıştır. Lan ve arkadaşları [19], farklı katmanlanmış kompozit malzemelerin patlama sonucu oluşan anlık yük etkisi altındaki davranışlarını incelemiş ve plakların patlama yüküne karşı direncinin artırılması yönünde çalışmalar yapmışlardır. Coğuz [20], anlık basınç yükü altında katmanlı kompozit malzemeden imal edilmiş plakların, ankastre ve konsol mesnet şartlarındaki dinamik davranışları deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Uyanık [21], anlık basınç yükü etkisindeki katmanlı kompozit bir plağın titreşimlerinin aktif kontrolü konusunda çalışmalar yürütmüştür. Kazancı [22], anlık basınç yükü etkisi altındaki katmanlı kompozit bir plağın yapısal sönüm etkilerini içeren lineer olmayan dinamik denklemlerin türetilmesi ve çözümü hakkında çalışmalar yapmıştır. Türkmen ve Mecitoğlu [23], takviyeli kompozit plağın şok tüp içerisinde LPG ve O₂ karışımının reaksiyonu sonucu meydana gelen anlık yük etkisi altındaki dinamik davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Anlık yük, bir tüp içerisinde LPG ve O₂ karışımının detonasyonu sonucu elde edilmiştir. Batra ve Hassan [24], çeşitli tek yönlü elyaflarla takviyelenmiş kompozitlerin üç boyutlu geçici yer değiştirmelerini anlık basınç yükü etkisindeki davranışlarını sonlu eleman yöntemiyle incelemişlerdir. Wei ve Dharani [25], anlık basınç yükü etkisi altındaki lamine cam panelin enerji denge yaklaşımına göre hata kriteri tanımlamışlardır. Bu hata kriteri yaklaşımına göre zarar faktörü birin altındaysa güvenli değilse güvensiz olduğu sonucunu çıkarmışlardır.

Anlık basınç yükü etkisi çalışmaları sandviç plaklar için de yapılmıştır. Bahei-El-Din ve Dvorak [26] sandviç plakların anlık yük etkisine karşı dirençlerini arttırmak amacıyla farklı katmanlamalar üzerinde çalışmışlardır. Çekirdek ve yüzey tabaka arasına bir ara tabaka konularak anlık yük ile oluşan enerji daha fazla yutularak çekirdeğe daha az iletilmesi sağlanmıştır. Böylece yüzeyler arasında oluşan yapraklanma ve çekirdekte meydana gelen çatlamaların önüne geçilmiştir. Özdemirli [27], anlık basınç yükü etkisindeki kompozit sandviç plağın dinamik davranışını deneysel ve sayısal incelemiştir. Librescu ve arkadaşları [28], sandviç plakların anlık yük etkisi altındaki lineer ve nonlineer dinamik cevabını farklı durumlar için incelemiş ve karşılaştırmalar yapmışlardır. Açık havada ve su altında yapılan bu

Çalışmalarda anlık yük etkisi altındaki sandviç plakların davranışlarının lineer ve nonlinear dinamik cevapları karşılaştırılmıştır. Baş ve arkadaşları [29], sandviç plakların anlık yük etkisi altındaki davranışını teorik olarak modellemiş ve sayısal sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

Literatürde anlık basınç yükü ve hibrit kompozitler hakkında birçok çalışma ayrı ayrı olarak mevcuttur. Fakat hibrit kompozit mazlemeler için anlık basınç yükü etkisi çalışmalarının birlikte yürütülmediği görülmüştür. Bu çalışmayla birlikte literatürdeki bu eksikliğin giderildiği düşünülmektedir.

Bu çalışmada, anlık basınç yükü etkisi altındaki elastisite modülü büyüklüklerine göre sıralanmış katmanlı hibrit kompozit malzemelerin ankastre sınır şartlarındaki dinamik davranışları deneysel olarak incelenmiş ve ANSYS sonlu eleman yazılımı ile elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Deneylein yürütülebilmesi için deney platformu tasarlanmış ve imal edilmiştir. Tasarım yapılırken farklı boyutlardaki plakların farklı sınır şartlarında anlık yk etkisini sağlayabilmesi düşünülerek çalışmalar yürütülmüştür. Deney platformunun kolay taşınabilir olması ve maruz kalacağı anlık basınç yükü etkisi altında deney sonuçlarını etkileyecek mertebede bir deformasyona uğramayacak kadar rijit olması gerekmektedir. Bu amaçla platform yapısının, n tasarımıda öncelikle olası basınç yüküne karşı deformasyonun ve dayanıklılığının belirlenmesi için ANSYS yazılımı kullanılarak analizler gerekleştirilmıştir. Aynı şekilde yüksek basınç tüplerinin içinde depolanacak basına direnmesini sağlayacak et kalınlıklarının ve mesnet çerçevelerinin kalınlıklarının tespiti için sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Deney platformunun tasarlanması için CATIA V5R16 programı kullanılmıştır.

Katmanlı kompozit malzemeler için kullanılan kompozit kumaşların mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme deneyleri yapılmıştır. Çekme deneyleri için İT Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Kompozit Yapı Laboratuvarındaki MTS niversal test makinesi kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalarda anlık basınç yükünün elde edilebilmesi için yüksek basınç tüpü kullanılmıştır. Bir ucu açık silindirik tüpün açık ucuna membran takılabilmesi için mevcut olan değişik tüpler için uygun flanşlar imal edilmiştir. Flanşlar arasına da sızdırmazlığı sağlamak için aynı ölçülerde kauçuk contalar kullanılmıştır. Tp içerisinde değişik büyüklüklerde basınç depolayabilmek için farklı malzemelerden çeşitli katmanlamalarda zarlar kullanılmıştır. Silindirik şekildeki tüpün karşısına farklı açıklık oranlarına sahip katmanlı hibrit kompozit plaklar yerleştirilerek anlık

basınç yüküne maruz bırakılmıştır. Bunun sonucunda plak üzerinde meydana gelen basınç dağılımını basınç duygaları vasıtasıyla ölçülmüştür. Aynı şekilde plağın ön ve arka orta yüzeyine yapıştırılmış gerinim ölçerler ile gerinim değerleri ölçülmüştür. Ölçümler için VXI 1629 veri toplama cihazı ve bu cihazların programlanması için de DAC Express yazılımı kullanılmıştır.

Sayısal çalışmada ise öncelikle deneylerde elde edilen basınç değerlerine bir polinom uydurulmuştur. Daha sonra ANSYS 11.0 yazılımı ile deneyleri yapılmış plakların sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Kompozit plakların sonlu eleman modellerinde ANSYS programındaki SHELL91 kabuk elemanı kullanılmıştır. Son olarak, deney sırasında elde edilen basınç değerlerinin zamanla değişimi kullanılarak transient (geçici) analizler yapılmıştır.

Sonuç olarak, elde edilen deney sonuçları ile sonlu eleman analizinde bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. ÇEKME DENEYİ

2.1 Giriş

Bu tezde kullanılacak hibrit kompozit plakların imal edileceği kompozit kumaş-epoksi malzemelerden hazırlanan numunelerin mekanik özelliklerinin çekme deneyleriyle belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla kullanılacak tüm kompozit kumaşlardan numuneler üretilip çekme deneyleri yapılmıştır. Her bir kompozit malzeme için üç adet aynı boyutta ve aynı katman sayısında numune üretilip çekme deneylerine tabi tutulması öngörülmüştür. Kompozit plaklar için literatürde belirli standartlar mevcut olup bunlardan deney numunelerine uygun olan standartlar kullanılmıştır. $0^\circ/90^\circ$ yönlerinde katmanlanmış kompozit numuneler için ASTM standartlarında D 3039/D 3039M-08 kodlu standart, $-45^\circ/+45^\circ$ yönlerinde katmanlanmış kompozit numuneler için ise D 3518/D 3518M-94 kodlu standartlar mevcuttur [30]. Çekme deneyleri için D 3039/D 3039M-08 standardından faydalanılmıştır. Çekme deneyi standardının açıklamaları Ek A.1’de verilmiştir.

Bu bölümde öncelikle çekme deneylerinde kullanılmış olan standartlardan bahsedilecek daha sonra numune imalatı, deney araç ve gereçlerinin genel özellikleri ve kullanılması, numunelerden veri alınacak cihazların monte edilmeleri, deneylerin yapılması, deney sonuçları anlatılacak ve son olarak da deneylerin sonuçlarının yorumları yapılacaktır.

2.2 Deney Numunelerinin İmalatı

Çekme deneyleri için gerekli olan numuneler İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Kompozit Yapı Laboratuvarında üretilmiştir. Üretim için öncelikli olarak mekanik özellikleri gerekli olan kompozit malzemelerin her birinden toplam üç adet 30x300 mm boyutlarında numuneler elde etmek için hepsi tek bir plak üretilip kesilerek elde edilecektir. Bu bağlamda hesaplanan boyutlarda toplam dört katman kullanmak suretiyle cam, karbon ve kevlar kumaşlar kesilerek hazırlanmıştır. Üretilecek her numune plağı için gerekli olan epoksi ve reçine karışımının ağırlığına ihtiyaç vardır.

Her bir kompozit malzemenin kendine özgü elle üretim sabiti olan RC (Ağırlığa göre reçine içeriği sabiti) kullanılarak üretilcek numune plakları için gerekli toplam epoksi-reçine ağırlığı hesaplanır [31]. Tipik RC değerleri Çizelge 2.1’de verilmiştir. Karışım ağırlığının formülü Denklem (2.1)’de verilmiştir. Hesaplanan toplam karışım ağırlığından reçine/epoksi ağırlığı 5/2 oranına göre reçine ve epoksi ağırlığı tespit edilerek karışım hazırlanır. Bunun için imal edilecek plakların kuru ağırlıkları tartılır. Hesaplanan reçine-sertleştirici karışımı iyice karıştırıldıktan sonra kuru kompozit malzemeler epoksi-reçine/sertleştirici ile ıslatılır. Bu karışım hazırlandıktan sonra sertleşmeden belirli bir sürede kullanılması gerekmektedir. Epoksi ve reçinenin özellikleri Çizelge 2.2’de verilmiştir [32].

$$Epoksi - reçine / Serleştirici _ Karışımı(gr) = \left[\frac{A \times n \times w_f \times RC}{(1 - RC)} \times 1.5 \right] \quad (2.1)$$

A :Kompozit malzemenin yüzey alanı

n : Katman sayısı

w_f :Kumaş ağırlığı

RC :Sabit (Ağırlığa göre reçine içeriği sabiti)

Çizelge 2.1 : Elle üretimde kompozit malzemeler için tipik RC sabitleri [31].

Kompozit Malzeme	Tipik RC Sabiti
Cam	0.46
Karbon	0.55
Kevlar	0.61

Islatma esnasında katmanların yönüne çok dikkat edilmesi gerekmektedir. Çekme deneylerinde kullanılacak kompozit kumaşlar 0°/90° yönlenmesinde tek tek dikkatlice ıslatılır. Üst üste konularak reçinelenmiş kompozit kumaş tabakaları kalıba yerleştirilir. Reçinelenmiş kompozit kumaşlar daha sonra sabit vakum altında ısı vererek kürlleme yapabilen tezgâha yerleştirilir. Bu tezgâh 50°C’ ye kadar ısıtıldıktan sonra sıcaklık verilmesini keser ve kendi sıcaklığında yaklaşık 750 milibar basınçta yaklaşık 12 saat kurumaya bırakılır. Kuruma işleminden sonra kalıptan alınan plak maket bıçağı ile istenilen numune boyutlarında kesilir. Numunelerin yapraklanmaya uğramaması için kesim işlemi yavaş hareketlerle yapılmalıdır.

Çizelge 2.2 : Epoksi-Reçine özellikleri [32].

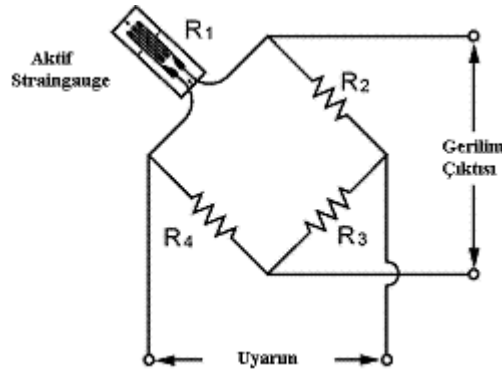
	İşlem Sıcaklığı
Reçine- Epoksi (MGS-L285)	Isıl işlem olmaksızın (-60°) ile (+60°) arasında Isıl işlemden sonra (-60°) ile (+80°) arasında
Sertleştirici (MGS 287)	20°C - 25°C 'de yaklaşık 2-3saat işlem süresi 40°C - 45°C 'de yaklaşık 45-90dak işlem süresi

2.3 Deney Araç Ve Gereçleri

Bu bölümde çekme deneylerinde kullanılan veri toplama cihazları ve kullanılan programlar hakkında genel bilgi verilecektir

2.3.1 Gerinim ölçerler

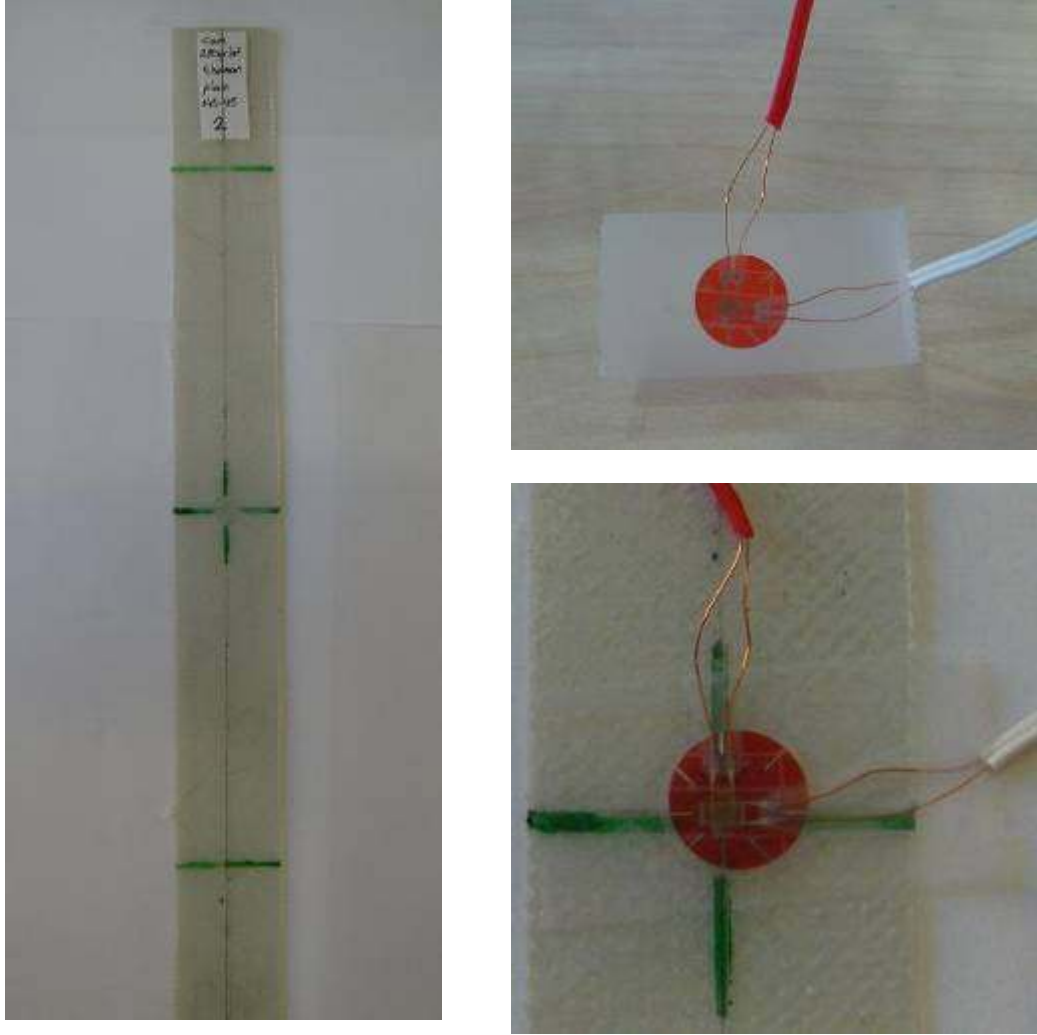
Bir malzemede oluşan gerinmeyi ölçmede genellikle gerinim ölçer kullanılır. Gerinim ölçer uygulanan kuvvetin etkisiyle elektriksel direncinin gerinmeyle orantılı olarak değişmesi prensibine göre ölçüm yapmaktadır. Genellikle görülen bu küçük elektriksel direnç değişiminin gerilim (voltage) çıktısına dönüştürülmesi için Wheatstone köprüsü kullanılmaktadır [33]. Şekil 2.1’de gerinim ölçerin çalışma prensibi gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Gerinim ölçer çalışma prensibi.

Çekme deneylerinde bir adet çift eksenli gerinim ölçer kullanılmıştır. Kullanılan gerinim ölçer çekme deneyi numunesinin tam ortasına yapıştırılmıştır. Gerinim ölçer yapıştırılmadan önce numune yüzeyi iyice temizlenmelidir. Ölçümlerin sağlıklı olması için yüzeyde herhangi bir pürüzlülükten kaçınılmalıdır. Deney numunesinin yüzeyi temizlendikten sonra gerinim ölçerin eksenlerinin doğru yönde yapıştırılabilmesi için öncelikle eksen çizgileri çizilmesi önerilir. Eksen çizgileri

çizildikten sonra gerinim ölçerin ters yüzü bantlanarak yapıştırıcı sürülmüş yapıştırılacak yüzeye konulabilir. Gerinim ölçer yapıştırma esnasında oluşabilecek herhangi bir eksen kaçıklığı olması durumunda bant yardımıyla düzeltilebilir. Yapıştırılan gerinim ölçer yapışma süresinde iyice bastırılması gerekmektedir. Yapıştırma sırasında gerinim ölçerin kablolarının birbirine temasından kaçınılmalıdır. Aksi takdirde ölçüm yapılması sırasında elde edilen veriler sağlıklı olmayabilir. Gerinim ölçerin yapıştırılması Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Gerinim ölçerin yapıştırılması.

2.3.2 VXI veri toplama cihazı

48 kanallı VXI EX1629 yüksek performanslı veri ölçme cihazıdır. Veri alış verişini ethernet bağlantısıyla yapmaktadır. Her bir kanal ayırık sinyal koşullandırma devresi ve besleme (excitation) kaynağına sahip olduğundan birbirinden bağımsız ölçüm yapabilme özelliğine sahiptir. Ayrıca her kanal kısa devreye karşı topraklama ve aşırı

gerilime karşı korumaya sahiptir. Her kanala ayrı olarak gerilim beslemesi yapılabilir. Besleme aralığı 0 V ‘tan +8 V’a kadar veya 0 V ‘tan -8 V’a kadardır. Her kanaldan aynı anda veri alma, saniyede 1 örneklemeden 10000 örneklemeye kadar ayarlanabilme özelliğine sahiptir. Ayrıca az sayıda kanaldan ölçüm yapılırken EX1629’un performansı saniye 25000 örneklemeye kadar çıkabilmektedir. Kendi kendini kalibre etme özelliğine sahiptir. Çok kısa sürede kalibre olabilmektedir. En iyi performans için EX1629 cihazı kullanılmadan en az 60 dakika öncesinden ısınması için çalıştırılması gerekmektedir. Eğer ortamdaki sıcaklık değişiklikleri yüksekse sıcaklığın dengelenmesi için fazladan zamana ihtiyaç duyulur. Şekil 2.3’de VXI EX 1629 cihazı görülmektedir [34].



Şekil 2.3 : VXI EX1629 dinamik gerilim ölçer cihazı.

2.3.3 DAC Express programı

DAC Express programıyla VXI-EX1629 veri toplama cihazından alınan verilerin, gerilim ve basınç değerlerine çevirilmesi için kullanılmıştır. Yüksek hızlarda farklı ölçümleri aynı anda kısa sürede yapabilir [29].

Programın kullanımında kullanıcı için programlama kabiliyetine gerek yoktur. Donanımın ayarlanması, algılayıcının (transducer) şartlandırılması, ölçüm ayarlarının yapılması ve verilerin oluşturulması programın ara yüzü sayesinde kolaylıkla yapılabilmektedir. Programın kullanımı hakkında bilgi Ek A.2’de verilmiştir.

2.3.4 MTS test sistemi

Genel Yorulma Test sisteminde ana eksen: ± 100 kN, çekme, basma, çekme-basma, eğilme, burkulma testleri yapılabilir. Yanal eksen: ± 25 kN kapasiteli olup yanal eğme, burma veya eğilmeli burulma testleri yapılabilir. Ayrıca sistem -110°C ila $+ 315^{\circ}\text{C}$ aralığında çalıştırılabilen bir iklimlendirme odasına sahiptir. MTS test sisteminin boyut bilgileri ve kullanıcı programı Ek A.3’de

verilmiştir [36]. MTS sisteminin kullanımı esnasında dikkat edilmesi gereken konular ayrıntılı olarak ifade edilmiştir.

2.4 Çekme Deneyi Yapılışı

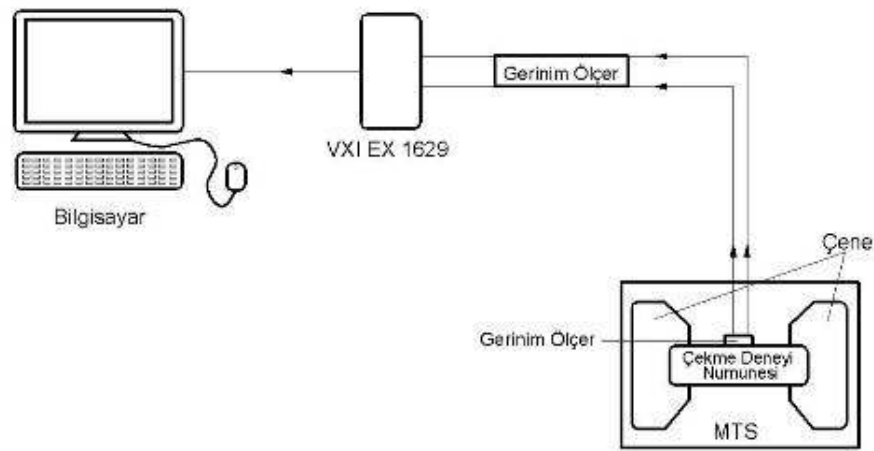
Deney düzeneği ve programlamalar hazırlandıktan sonra çekme deneyi numunesi gerinim ölçer kablo bağlantılarıyla veri toplama cihazına montajı yapılır. Çekme numunesi VXI-EX1629 veri toplama cihazına kablo ile bağlantısında veri alışı veriışinin sağlıklı olması için özenle monte edilmelidir. İlk olarak Çekme numunesi VXI-EX1629 veri toplama cihazına bağlandığında DAC Express programıyla “Unstrain Voltage” kalibrasyonu yapılmalıdır. Çekme numunesi önce VXI veri toplama cihazındaki veri akışına bakılarak bağlantılarda herhangi bir problem olup olmadığı veya kalibrasyona gerek olup olmadığı kontrol edilir. Bu kontrol de DAC Express programı vasıtasıyla yapılır. Gerinim değerleri beklenenin üstündeyse gerinim ölçerin kablo bağlantıları veya VXI veri toplama cihazının kablo bağlantıları kontrol edilebilir. DAC Express programına girilmiş “gage faktör”, kablo direnci gibi bazı veriler yanlış veya eksik girilmiş olabilir. Aksi halde gerinim verilerinde dengeli ve küçük salınımlar mevcut ise DAC Express programıyla “Auto Calib” komutuyla otomatik kalibrasyon yapılır. Fakat yapılan bu kalibrasyonlar esnasında kalibrasyonun doğru olabilmesi için çekme numunesine herhangi bir kuvvet uygulanmamalıdır. Aynı zamanda deney ortamının gürültüsü de kalibrasyonu doğrudan etkileyecek faktörlerdir. DAC Express’de yapılacak tüm kalibrasyonlar sonrasında çekme numunesi MTS cihazına bağlanabilir. Bu bağlantı esnasında deneylerin doğru olabilmesi elde edilen verilerin anlamlı olması için şunlara dikkat edilmelidir:

- Çekme numunesi, çekme eksenine tam paralel olması sağlanmalıdır.
- Çekme numunesinin çenelerle tutulan bölümün ne çok büyük ne de çok küçük olmamasına dikkat edilmelidir. Gerilmenin yoğunlaşacağı bölgenin büyüklüğü malzeme özelliğine göre değişiklik gösterebilir.
- Çekme numunesinin çenelere bağlantısında çekme yönüne göre numuneye önceden bir burulma verilmemesine dikkat edilmesi gerekmektedir.
- Çenelerle sıkılan bölgenin malzeme özelliğine göre çene basıncı test edilerek bulunması gerekmektedir. Gereğinden fazla sıkma basıncı uygulanması

halinde yapılan deneylerde deney numunesi sıkma yerlerine çok yakın bölgelerden beklenenden daha kısa bir sürede kopma görülmesine sebep olabilir.

- Çene bağlantısı sırasında gözle yapılan eksen ayarlamalarında deney numunesine çekme veya basma yönünde çok fazla kuvvet uygulanmadığına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu işlemler yapılırken bu ilk kuvvetten kaçınmak için MTS cihazının programında “Manual Command” penceresinde kontrol sekmesinde “Displacement” seçilmesi önerilir.

Çekme deneyinin akış diyagramı Şekil 2.4’de gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Çekme deneyi akış diyagramı.

Çekme numunesinin bağlantısı yapıldıktan ve tüm doğrulamalar sonunda MTS cihazının programında tüm veriler “0”’a sabitlenir. Bu işlem sonunda deneye başlanabilir. MTS cihazının çekmeye başlamasıyla DAC Express’in veri toplamaya başlaması aynı anda yapılması verilerin işlenmesi için rahatlık sağlayacağından ikisi de aynı anda başlatılması önerilir.

2.5 Sonuçlar Ve Değerlendirme

Çekme deneylerinde üçer adet $\pm 45^\circ$ ve $0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip cam, kevlar ve karbon malzemelerden toplam on sekiz adet numunenin mekanik özelliklerinin çıkarılması için çekme deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda elde edilen verilerden cam, kevlar ve karbon malzemelerin yaklaşık mekanik özellikleri elde edilmiştir. Bu bölümde tüm numunelerden elde edilen gerinim verileri belirtilecektir. Deneylerden elde edilen gerinim verilerinin değerlendirilmesi

için gerilme, elastisite modülü ve Poisson oranı bulunması gerekmektedir. Bu amaçla gerinim değerlerinden bu bilgileri elde etmek için kullanılan denklemler aşağıda verilmiştir. Poisson oranı çekme deneyi standartlarında verilen denklemden elde edilmiştir. Denklem (2.2), (2.3) ve (2.4) standartta verilmiştir [30].

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

$$\nu = \left| \frac{\Delta \varepsilon_t}{\Delta \varepsilon_l} \right| \quad (2.4)$$

ν = Poisson Oranı

$\Delta \varepsilon_t$ = İlk ve son yanal gerinim farkı

$\Delta \varepsilon_l$ = İlk ve son uzunlamasına gerinim farkı

σ = Gerilme (N/ m²)

F = Kuvvet (N)

A = Alan (m²)

E = Elastisite Modülü (GPa)

ε = Gerinim

Elde edilen gerinim değerlerinin değerlendirilmesi için 3039/D 3039M-08 standardında belirtilen kıstaslar göz önünde bulundurulmuştur. Buna göre maksimum ve minimum değerlerin seçilmesi için boylamasına gerinim verilerinden yararlanılacaktır. Boylamasına gerinim değerlerinden minimum seçilmesi için 1000 mikrogerinim civarındaki deney verisi alınır. Maksimum gerinim için ise 3000 mikrogerinim civarındaki deney verisi seçilir. Bu seçilen gerinimlere karşılık gelen maksimum ve minimum gerilme değerleri elde edilir. Seçilen bu değerler ile elastisite modülü ve Poisson oranı hesaplanır.

Üretilen her numunenin öncelikle geometrik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Numune üzerine yapıştırılacak gerinim ölçerlerin yapıştırılacağı orta noktasındaki bölgeden üç adet kalınlık ve en boyutları alınmıştır. Ölçülen bu

değerlerin aritmetik ortalamaları kalınlık ve en değeri olarak kullanılmıştır Ayrıca ağırlık bilgileri de ölçülmüştür.

2.5.1 $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip cam elyaf-epoksi numunelerinin çekme deneyi sonuçları

$\pm 45^\circ$ Kumaş yönlenmesinde cam elyaf-epoksi numunelerinin geometrik özellikleri Çizelge 2.3’de gösterilmiştir. Ayrıca $\pm 45^\circ$ yönlenmesine sahip cam elyaf-epoksi numunesinin çekme deneyleri sonucunda elde edilen mekanik özellikler Çizelge 2.4’da verilmiştir.

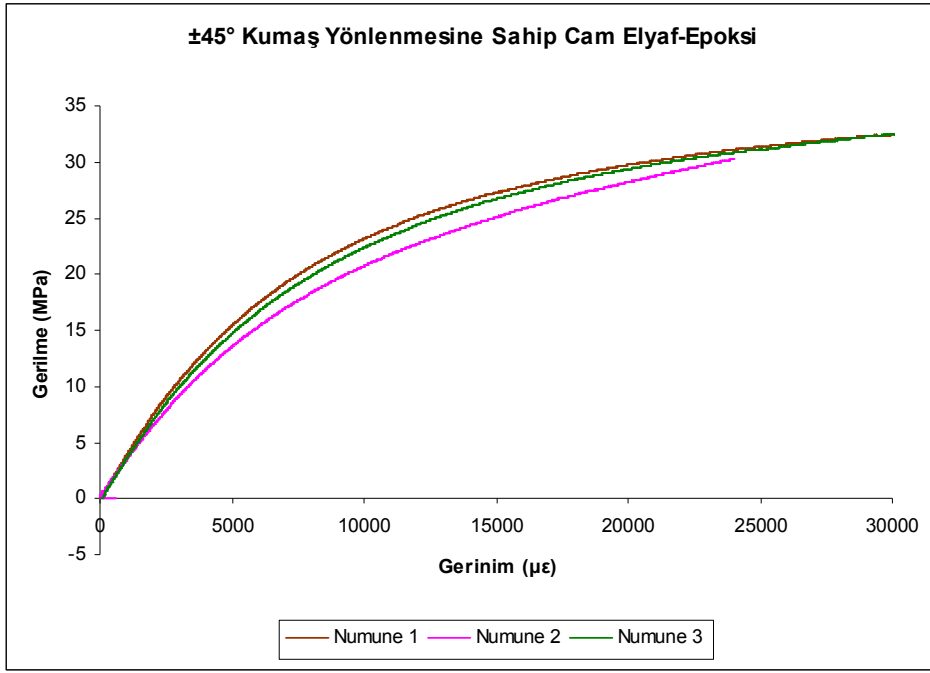
Çekme deneylerinde kullanılan üç adet $\pm 45^\circ$ yönlenmesine sahip cam elyaf-epoksi numuneleri için elde edilen gerilme-gerinim grafikleri Şekil 2.5’da verilmiştir. Elde edilen grafiklerde üç numunenin gerilme-gerinim eğrileri birbiriyle uyumlu karakter göstermiştir.

Çizelge 2.3 : $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesinde cam elyaf-epoksi numunelerinin geometrik özellikleri.

$\pm 45^\circ$ Cam Elyafı	Kalınlık Sağ (mm)	Kalınlık Sol (mm)	Kalınlık Orta (mm)	En (mm)	Ağırlık (gr)	Alan (mm ²)
Numune 1	0,954	0,947	0,946	30,010	14,70	28,449
Numune 2	0,956	0,968	0,963	30,450	14,87	29,303
Numune 3	0,958	0,970	0,967	30,020	14,50	28,969

Çizelge 2.4 : $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesinde cam elyaf-epoksi numunelerinin mekanik özellikleri.

$\pm 45^\circ$ Cam Elyafı	Minimum Gerinim ($\mu\epsilon$)	Maksimum Gerinim ($\mu\epsilon$)	Minimum Gerilme (MPa)	Maksimum Gerilme (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Numune 1	998,885	2003,868	3,811	7,474	3,645
Numune 2	1004,7	2000,753	3,468	6,476	3,020
Numune 3	1001,286	2008,551	3,533	6,974	3,416



Şekil 2.5 : $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip cam elyaf-epoksi numunelerinin gerilme-gerinim grafiği.

2.5.2 $0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip cam elyaf-epoksi numunelerinin çekme deneyi sonuçları

Deney numunelerin geometrik özelliklerinin ölçülmüş ve Çizelge 2.5’de verilmiştir. Numune üzerine yapıştırılacak gerinim ölçerlerin yapıştırılacağı orta noktasındaki bölgeden üç adet kalınlık ve en boyutları alınmıştır. Bu üç farklı yerden alınan kalınlık ölçü değerlerinin ortalaması kalınlık değeri olarak kullanılmıştır. Gerilmenin etkisi altındaki bölgenin alanı bulunmasında bu değer kullanılmıştır.

Deneylerde numuneler için elde edilen enlemesine ve boylamasına maksimum ve minimum gerinim verileri Çizelge 2.6’de verilmiştir.

Deneylerden elde edilen bu veriler kullanılarak Denklem (2.2) ve (2.3) ile hesaplanan gerilme ve elastisite modülü değerleri bulunmuştur.

Çizelge 2.5 : 0°/90° kumaş yönlenmesine sahip cam elyaf-epoksi numunelerinin geometrik özellikleri.

90° Cam Elyafı	Kalınlık Sağ (mm)	Kalınlık Sol (mm)	Kalınlık Orta (mm)	En (mm)	Ağırlık (gr)	Alan (mm ²)
Numune 1	1,004	0,986	0,999	30,230	14,940	30,119
Numune 2	0,998	0,950	0,985	30,200	14,68	29,526
Numune 3	0,983	0,972	0,971	30,100	14,850	29,358

Çizelge 2.6 : 0°/90° kumaş yönlenmesine sahip cam elyaf-epoksi numunelerinin gerinim değerleri.

	Boylamasına		Enlemesine	
90°Cam Elyafı	Minimum Gerinim (µε)	Maksimum Gerinim (µε)	Minimum Gerinim (µε)	Maksimum Gerinim (µε)
Numune 1	999,3839	2997,895	-135,510	21,265
Numune 2	1001,274	2998,728	-165,429	-460,328
Numune 3	1001,485	2999,568	-137,383	-433,474

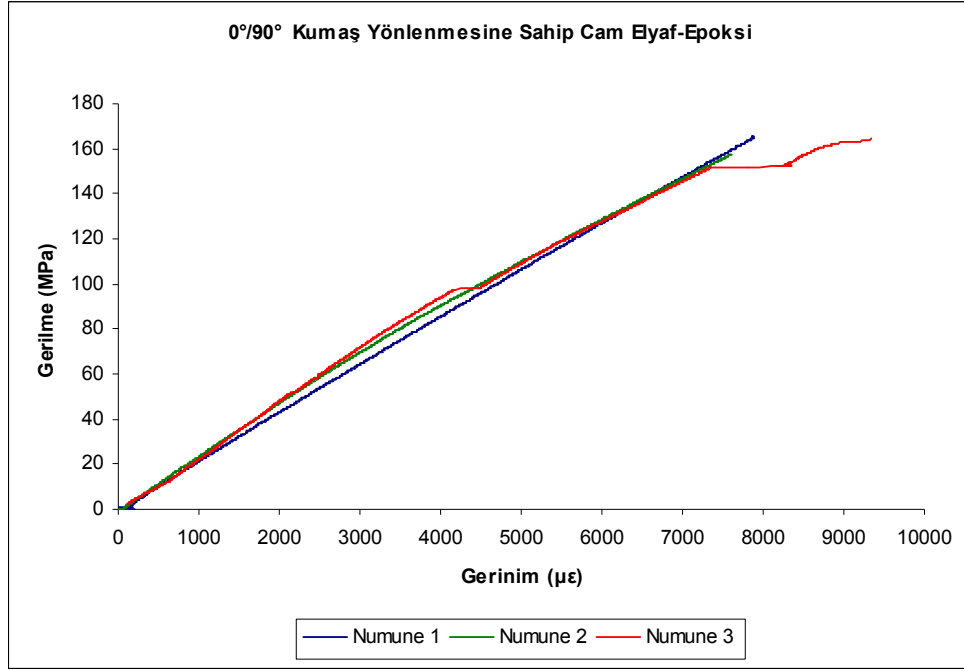
Çizelge 2.7 : 0°/90° kumaş yönlenmesine sahip cam elyaf-epoksi numunelerin mekanik özellikleri.

90°Cam Elyafı	Minimum Gerilme (MPa)	Maksimum Gerilme (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson oranı
Numune 1	21,255	64,255	21,510	0,1155
Numune 2	23,235	69,532	23,177	0,1476
Numune 3	22,131	71,848	24,882	0,1482

0°/90° yönlenmelerindeki cam elyaf-epoksi numuneleri için toplanan veriler işlenmiştir. Deneyde kullanılan üç numuneye ait verilerin Denklem (2.4) kullanılarak her bir numuneye ait Poisson oranı elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen değerlerin ortalaması alınarak cam elyafı-epoksi için Poisson oranı elde edilmiştir. Buna göre kumaş yönlenmesinin 0°/90° olduğu cam elyaf-epoksi için elde edilen Poisson oranı değerlerinin aritmetik ortalaması olan 0,14 değeri cam elyaf-epoksi için Poisson oranı olarak kabul edilmiştir. Aynı şekilde elde edilen elastisite modüllerinin

aritmetik ortalaması kullanılmıştır. Sonuç olarak cam elyaf-epoksi için elastisite modülü 23,2 GPa olarak kabul edilmiştir. Çekme deneyleri sonucunda 0°/90° kumaş yönlenmesine sahip cam elyaf-epoksi için elde edilen mekanik özellikler Çizelge 2.7’de verilmiştir.

0°/90° kumaş yönlenmelerindeki 3 adet cam elyaf-epoksi numunesinin gerilme-gerinim grafiği Şekil 2.6’de verilmiştir.



Şekil 2.6 : 0°/90° kumaş yönlenmesindeki cam elyaf-epoksi numunelerin gerilme-gerinim grafiği.

2.5.3 ±45° kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerinin çekme deneyi sonuçları

Deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak Denklem (2.2) ve (2.3) ile hesaplanan gerilme ve elastisite modülü değerleri bulunmuştur.

Numunelerin geometrik özellikleri Çizelge 2.8’de verilmiştir.

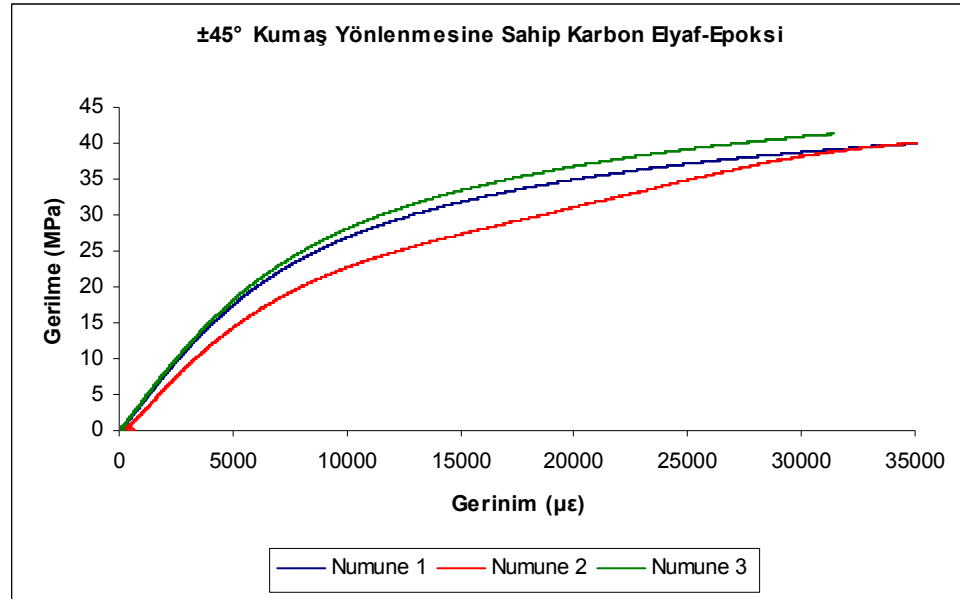
Deneylerde numuneler için elde edilen enlemesine ve boylamasına maksimum ve minimum gerinme verileri ile hesaplanan mekanik özellikler Çizelge 2.9’de verilmiştir.

Çizelge 2.8 : $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerinin geometrik özellikleri.

$\pm 45^\circ$ Karbon Elyafı	Kalınlık Sağ (mm)	Kalınlık Sol (mm)	Kalınlık Orta (mm)	En (mm)	Ağırlık (gr)	Alan (mm ²)
Numune 1	1,348	1,356	1,335	30,060	16,310	40,471
Numune 2	1,345	1,313	1,316	30,280	17,080	40,111
Numune 3	1,323	1,304	1,315	30,060	16,660	39,498

Çizelge 2.9 : $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerinin mekanik özellikleri.

$\pm 45^\circ$ Karbon Elyafı	Minimum Gerinim ($\mu\epsilon$)	Maksimum Gerinim ($\mu\epsilon$)	Minimum Gerilme (MPa)	Maksimum Gerilme (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Numune 1	1007,783	3999,922	3,799	14,590	3,606
Numune 2	1011,221	4000,654	2,374	11,797	3,152
Numune 3	1006,546	4005,038	4,061	15,156	3,700



Şekil 2.7 : $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerin gerilme-gerinim grafiği

$\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmelerindeki 3 adet karbon elyaf-epoksi numunesinin gerilme-gerinim grafiği Şekil 2.7’de verilmiştir. Grafikte görülen üç adet numunenin gerilme-gerinim eğrileri birbirine benzer karakterde olduğu görülmektedir.

2.5.4 0°/90° kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerinin çekme deneyi sonuçları

Numunelerin geometrik özellikleri Çizelge 2.10’da verilmiştir. Ayrıca deneylerde numuneler için elde edilen enlemesine ve boylamasına maksimum ve minimum gerinim verileri Çizelge 2.11’de verilmiştir.

Çekme deneylerinden elde edilen bu veriler kullanılarak Denklem (2.2) ve (2.3)’ten gerilme ve elastisite modülü değerleri bulunmuş ve Çizelge 2.12’de verilmiştir.

Çizelge 2.10 : 0°/90° kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerinin geometrik özellikleri.

90°Karbon Elyafı	Kalınlık Sağ (mm)	Kalınlık Sol (mm)	Kalınlık Orta (mm)	En (mm)	Ağırlık (gr)	Alan (mm ²)
Numune 1	1,248	1,354	1,314	30,060	15,940	39,238
Numune 2	1,323	1,333	1,325	30,060	16,470	39,890
Numune 3	1,350	1,368	1,357	30,050	16,520	40,818

Çizelge 2.11 : 0°/90° kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerinin gerinim değerleri.

90°Karbon Elyafı	Boylamasına		Enlemesine	
	Minimum Gerinim (με)	Maksimum Gerinim (με)	Minimum Gerinim (με)	Maksimum Gerinim (με)
Numune 1	499,552	2002,151	-33,461	-129,556
Numune 2	503,912	2005,026	27,447	140,634
Numune 3	502,636	1993,513	-97,748	-388,239

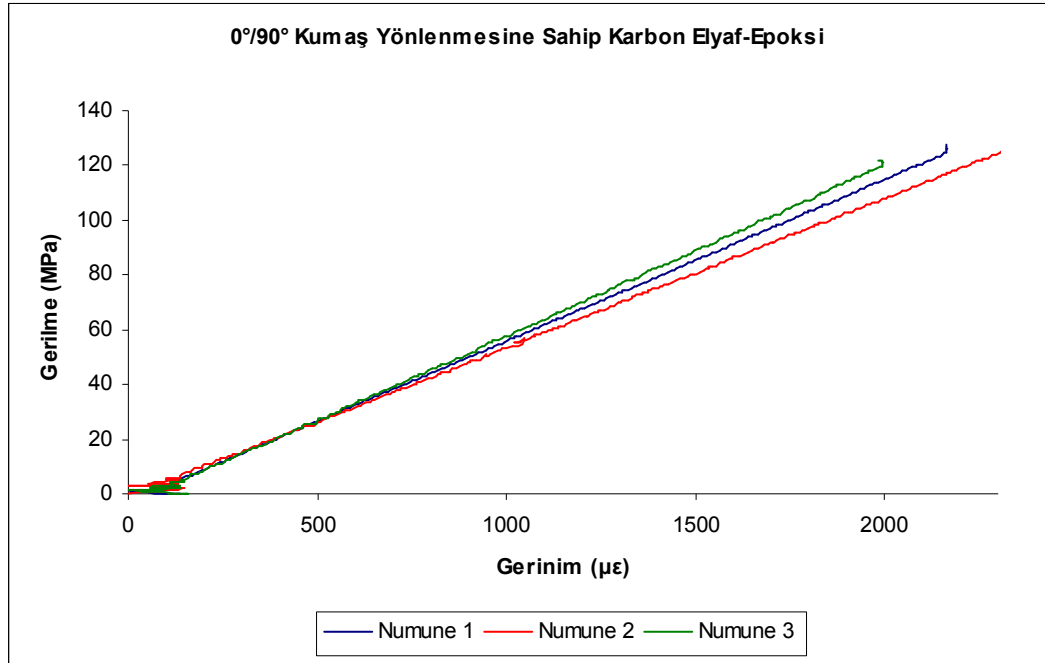
Çizelge 2.12 : 0°/90° kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerinin mekanik özellikleri.

90°Karbon Elyafı	Minimum Gerilme (MPa)	Maksimum Gerilme (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson oranı
Numune 1	26,481	115,021	58,924	0,0639
Numune 2	26,475	106,764	53,486	-0,0754
Numune 3	27,089	120,376	62,572	0,1948

Kumaş yönlenmesinin $0^\circ/90^\circ$ olduğu karbon elyaf-epoksi numuneleri için toplanan verilerin işlenmesi sonucunda Poisson oranı Denklem (2.4) kullanılarak elde edilmiştir. Hesaplanan bu değerlerden Poisson oranı $0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi için 0,195 olarak seçilmiştir.

Elastisite modülü için ise deneylerden elde edilen verilerin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir. Sonuç olarak elastisite modülü 58,3 GPa kabul edilmiştir.

$0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesine 3 adet karbon elyaf-epoksi numunesinin gerilme-gerinim grafiği Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8 : $0^\circ/90^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip karbon elyaf-epoksi numunelerin gerilme-gerinim grafiği.

2.5.5 $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf-epoksi numunelerinin çekme deneyi sonuçları

Çekme Deneyi numunelerinin geometrik özellikleri Çizelge 2.13’de verilmiştir. Gerilme ve elastisite modülü diğer numunelerde olduğu gibi deney sonuçları kullanılarak Denklem (2.2) ve (2.3) ile elde edilmiştir.

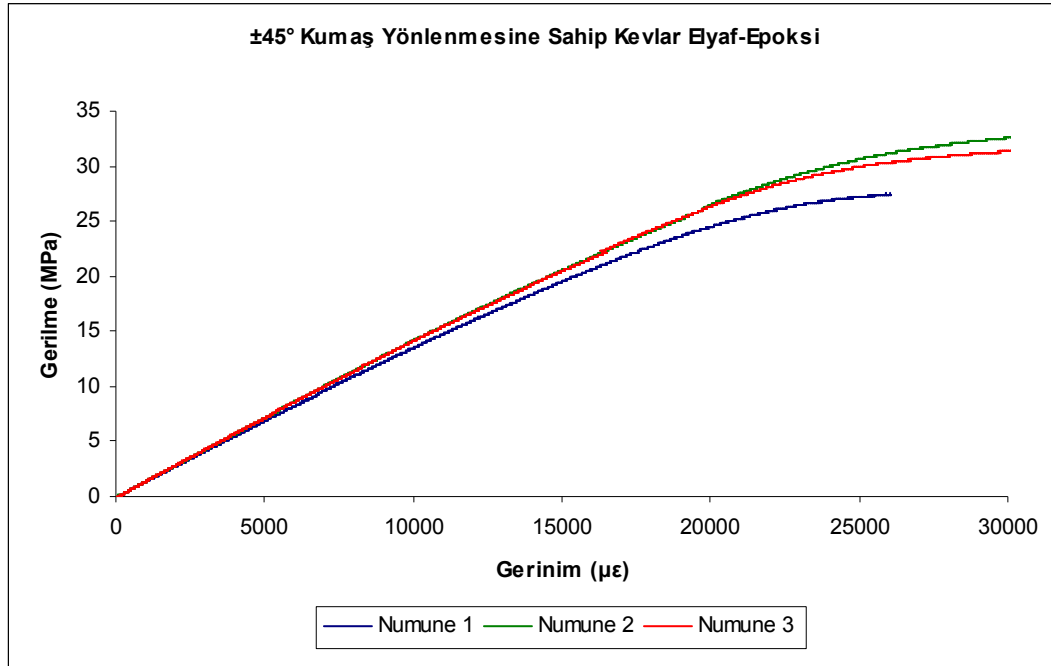
Deneylerde numuneler için elde edilen enlemesine ve boylamasına maksimum ve minimum gerinim verileri ile hesaplanan mekanik özellikler Çizelge 2.14’de verilmiştir.

Çizelge 2.13 : $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf-epoksi numunelerinin geometrik özellikleri.

$\pm 45^\circ$ Karbon Elyafı	Kalınlık Sağ (mm)	Kalınlık Sol (mm)	Kalınlık Orta (mm)	En (mm)	Ağırlık (gr)	Alan (mm ²)
Numune 1	0,850	0,874	0,859	30,59	9,080	26,338
Numune 2	0,832	0,867	0,835	31,480	9,540	26,590
Numune 3	0,871	0,854	0,847	31,350	9,560	26,877

Çizelge 2.14 : $\pm 45^\circ$ kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf -epoksi numunelerinin mekanik özellikleri.

$\pm 45^\circ$ Karbon Elyafı	Minimum Gerinim ($\mu\epsilon$)	Maksimum Gerinim ($\mu\epsilon$)	Minimum Gerilme (MPa)	Maksimum Gerilme (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)
Numune 1	2015,266	6022,371	2,719	8,233	1,376
Numune 2	2007,486	6003,240	2,812	8,602	1,449
Numune 3	1999,619	6006,959	2,850	8,587	1,432



Şekil 2.9 : $\pm 45^\circ$ Kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf-epoksi numunelerinin gerilme-gerinim grafiği.

$\pm 45^\circ$ yönlenmelerindeki 3 adet Kevlar elyaf-epoksi numunesinin gerilme-gerinme grafiği Şekil 2.9’da verilmiştir. Numunelerin gerilme-gerinme eğrilerinin benzer karakterde olduğu görülmüştür.

2.5.6 0°/90° kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf-epoksi numunelerinin çekme deneyi sonuçları

0°/90° yönlenmesine sahip kevlar elyaf-epoksi numunelerinin geometrik özellikleri Çizelge 2.17’de verilmiştir. Deneylerde numuneler için elde edilen enlemesine ve boylamasına maksimum ve minimum gerinme verileri Çizelge 2.16’da verilmiştir.

Deneylerden elde edilen bu veriler ışığında Denklem (2.2) ve (2.3)’leri ile hesaplanan gerilme ve elastisite modülü değerleri bulunmuştur. Hesaplanan bu veriler Çizelge 2.17’de verilmiştir.

Çizelge 2.15 : 0°/90° kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf-epoksi numunelerinin geometrik özellikleri.

90°Kevlar Elyafı	Kalınlık Sağ (mm)	Kalınlık Sol (mm)	Kalınlık Orta (mm)	En (mm)	Ağırlık (gr)	Alan (mm ²)
Numune 1	0,785	0,833	0,810	31,030	9,080	25,144
Numune 2	0,862	0,865	0,873	30,820	9,480	26,711
Numune 3	0,698	0,757	0,733	31,840	9,470	23,222

Çizelge 2.16 : 0°/90° kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf-epoksi numunelerinin gerinim değerleri.

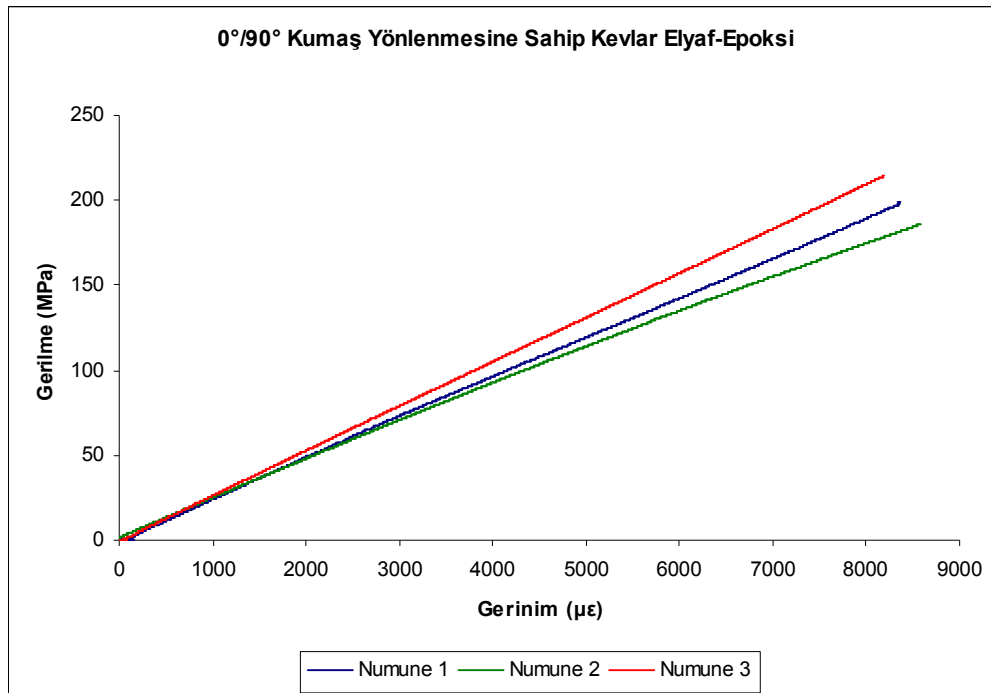
90° Kevlar Elyafı	Boylamasına		Enlemesine	
	Minimum Gerinim (με)	Maksimum Gerinim (με)	Minimum Gerinim (με)	Maksimum Gerinim (με)
Numune 1	997,588	3002,558	-67,751	-191,544
Numune 2	999,321	3006,163	-95,374	-278,336
Numune 3	1002,097	3005,646	-145,645	-392,798

Çizelge 2.17 : 0°/90° Kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf-epoksi numunelerinin mekanik özellikleri.

90° Kevlar Elyafı	Minimum Gerilme (MPa)	Maksimum Gerilme (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson oranı
Numune 1	24,035	73,098	24,471	0,0617
Numune 2	25,087	70,901	22,828	0,0912
Numune 3	26,349	79,178	26,368	0,1233

Kumaş yönlenmesinin $0^\circ/90^\circ$ olduğu kevlar elyaf-epoksi numuneleri için toplanan verilerin işlenmesi sonucunda Poisson oranları üç numuneye ait verilerin Denklem (2.4) kullanılarak bulunmuştur. Daha sonra elde edilen bu değerlerin aritmetik ortalaması alınarak nihai Poisson oranı kabul edilir. Buna göre Poisson oranı kumaş yönü $0^\circ/90^\circ$ olan kevlar elyaf-epoksi için 0,092 olarak kabul edilmiştir.

Aynı şekilde elastisite modülü için kumaş yönlenmesinin $0^\circ/90^\circ$ olduğu kevlar elyaf-epoksi numunelerinde elde edilen deney verilerinin aritmetik ortalaması alınmıştır. Kevlar elyaf-epoksi için elastisite modülü 24,5 GPa olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 2.10 : $0^\circ/90^\circ$ Kumaş yönlenmesine sahip kevlar elyaf-epoksi numunelerinin gerilme-gerinim grafiği.

$0^\circ/90^\circ$ yönlenmelerindeki 3 adet kevlar elyaf-epoksi numunesinin gerilme-gerinme grafiği Şekil 2.10’da verilmiştir.

3. ANLIK BASINÇ YÜKÜ DENEYLERİ

3.1 Giriş

Bu çalışma ile farklı kompozit malzemelerden katmanlanmış farklı açıklık oranlarına sahip plakların anlık basınç yüküne cevabı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Literatürde bu konuda bulunan az sayıdaki çalışmada analitik ya da sayısal olarak elde edilen sonuçlarının gerçekte ne kadar tutarlı olduğu çok fazla irdelenmemiştir. Böylece bu çalışma ile çoğu mühendislik uygulamalarında ve özellikle havacılıkta pek çok kullanım alanı olan hibrit kompozit plakların anlık basınç yükü altındaki davranışı deneysel olarak incelenmesi ve sayısal yöntemlerle elde edilecek sonuçların deneysel verilerle karşılaştırmalarının ne kadar uyumlu olduğunu göstermesi hedeflenmektedir.

Deneysel çalışma, elastisite modülü büyüklüğüne göre katmanlama sıralamasına sahip kompozit plakların imalatı ve anlık basınç yükünü elde etmek için tasarlanan deney platformunu içeren deney donanımı olarak iki aşamada ele alınabilir. Deney platformu için farklı anlık basınç yükü etkilerinin - örneğin çeşitli uzaklıklarda veya farklı açılarda meydana gelen anlık basınç yükü- plak üzerindeki dinamik cevabının ölçümlerinin yapılabilmesi için çok amaçlı bir deney platformu tasarlanmış ve üretilmiştir. Sayısal çözüm için ise ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmıştır. Basınç yükünün plak üzerinde düzgün yayılı olduğu kabul edilerek zamana bağlı basınç yükü dağılımı programda simule edilmiştir. Anlık basınç yükü kaynağının plaktan yeterince uzak olduğu düşünülerek plak üzerindeki basınç yükü düzgün yayılı olduğu kabul edilmiştir. Deneysel çalışmada anlık basınç yükü olayını modellemek için bir ucu kapalı, diğer ucu membran ile kapatılmış şok tüpte basınçlı havanın depolanmasını sağlayan bir mekanizma kullanılmıştır. Membranın mukavemetine bağlı olarak tüp içerisinde artan hava basıncıyla membran anlık olarak yırtılır ve plak üzerine yüksek hava basıncının uygulanmasıyla da anlık basınç yükü etkisi modellenmiş olur. Kompozit plakların her iki yüzeyinin de orta noktalarına yapıştırılmış 3 eksenli gerinimölçer ve bir yüzeyin üç farklı yerine de basınç duyargası yapıştırılarak deneysel veriler toplanmıştır. Basınç duyargalarından

elde edilen verilerden, plak üzerine gelen basınç yükünün grafiği elde edilmiştir. Elde edilen bu grafiği sonlu elemanlar programına tanımlayabilmek için bir fonksiyon uydurulmuştur. Elde edilen bu basınç fonksiyonları daha sonra sayısal analizlerde kullanılacaktır.

3.2 Deney Düzeneği

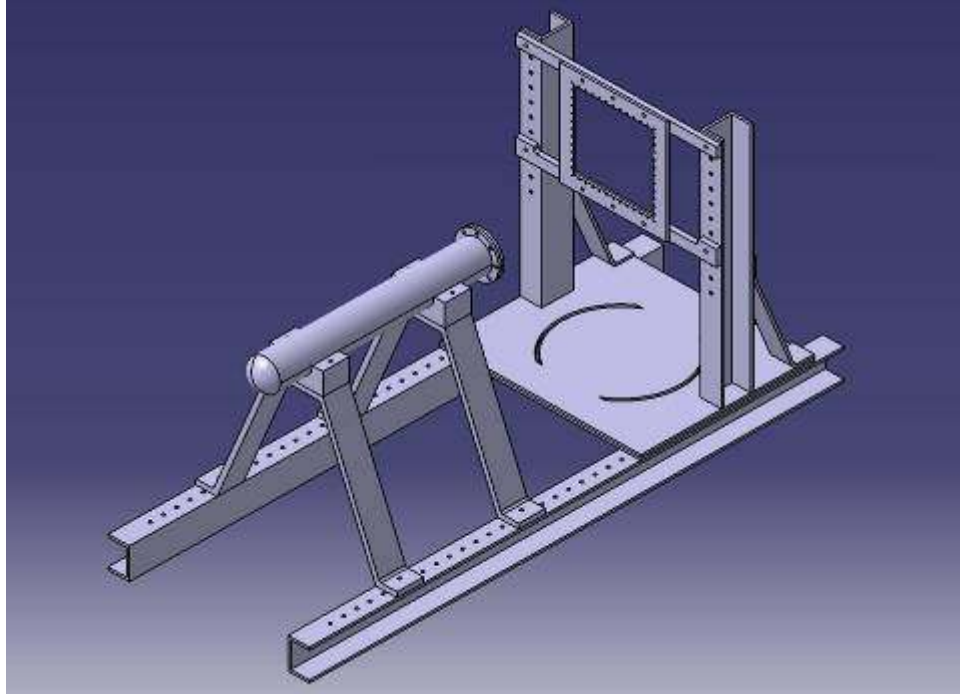
Anlık basınç yükünün deneylerinin yapılabilmesi için deney düzeneğine ihtiyaç vardır. Bu bölümde anlık basınç yükü deneyinin yapılabilmesi için tasarlanan deney platformu, basınç duyargası, gerinim ölçer ve veri toplama cihazı tanıtılacaktır. Deney verilerinin toplanması için kullanılan VXI EX-1629 veri toplama cihazı 2.3.2 kısmında tanıtılmıştı.

3.2.1 Deney Platformu

Bu tez çalışması kapsamında çeşitli dikdörtgen plakların anlık basınç yükü altındaki dinamik davranışlarının inceleneceği bir deney platformunun tasarımı gerçekleştirilmiştir. Platformun tasarımı için CAD yazılımı olan CATIA programından yararlanılmıştır. Platform çeşitli parametrelerin etkisiyle incelemeye imkân sağlayan bir yapıda olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu amaçla aşağıdaki tasarım kısıtları belirlenmiştir:

1. Farklı boyutlara ve farklı açıklık oranlarına sahip kompozit plak deneylerinin aynı düzenekte gerçekleştirilebilmesi,
2. Anlık basınç yükün farklı katmanlanmış kompozit plağın tam ortasına etki etmesinin haricinde istenildiğinde farklı noktalarına da etki edebilmeli,
3. Anlık basınç yükünün farklı açılarla plak üzerine etki ettirilebilmesi,
4. Deney plağının, düzeneğe farklı sınır şartlarıyla monte edilebilmesi,
5. Farklı anlık yüklerinin elde edilebilmesi için farklı yüksek basınç tüplerinin de kullanılabilir olması,
6. Anlık basınç yük için gerekli olan havanın depolandığı yüksek basınç tüplerinin deney plağına olan uzaklığının etkisinin incelenebilmesi için ayarlanabilir olması,
7. Deney düzeneğine plağın mümkün olduğunca kolay monte edilebilir olmalı,
8. Kolay taşınabilmeli.

Çok amaçlı kullanılacak olan deney platformu için üç farklı çaptaki yüksek basınç tüpünün tasarımı ve imalatı ve farklı boyutlardaki plakların deneylerinin yapılabilmesi için dört farklı çerçevenin tasarımı ve imalatına karar verilmiştir. Sonuç olarak deney platformunun tasarımının son hali aşağıdaki Şekil 3.1 verilmiştir. Deney düzeneğinin imal edilmiş genel görünüşü Şekil 3.2’de verilmiştir.



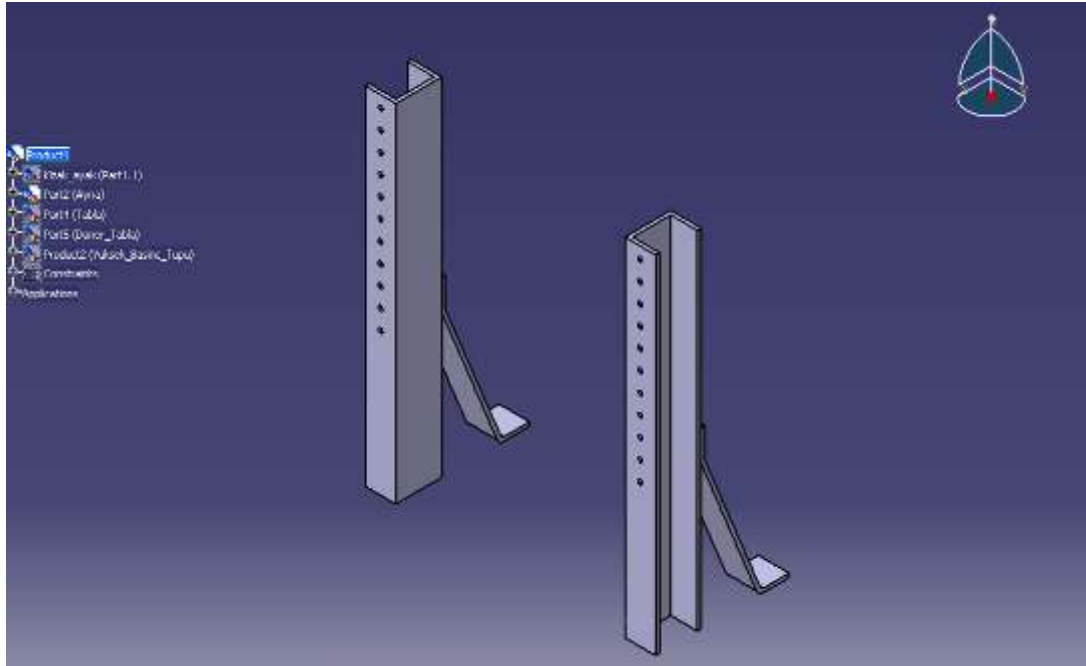
Şekil 3.1 : Deney düzeneğinin genel görünüşü.



Şekil 3.2 : Deney düzeneğinin imal edilmiş görünüşü.

3.2.1.1 Dikmeler

Kompozit plak çerçevelerinin monte edildiği aparat, dikme olarak isimlendirilmiştir. Dikmeler, farklı katmanlanmış kompozit plak çerçevelerinin sabitlenebilmesi için kullanılmıştır. Anlık basınç yükünün kompozit plağa tesir ederken mesnetlerde sonuçları etkileyecek herhangi bir şekil bozukluğunun oluşmaması gerektiğinden ANSYS’de yapılan ön analizden sonra dikme için kullanılacak kiriş kalınlıklarına karar verilmiş ve tasarlanarak imal edilmiştir. Oluşabilecek büyük yer değişikliği veya şekil bozukluğu, elde edilen deney verilerinin doğruluğu açısından sakıncalıdır. Ayrıca farklı boyutlarda, farklı açıklık oranlarındaki kompozit plakların monte edilmesine olanak sağlaması gerekliliği de düşünülmüştür. Şekil 3.3’de görülen çerçeve dikmelerinden sadece bir tanesi sabit olup diğeri istenildiği zaman monte edilme özelliğine sahiptir. Bu sayede istenildiği takdirde kompozit plağın anlık basınç yükünün tesiri altındaki etkisi farklı sınır koşullarında da incelenebilme olanağı sağlanmıştır. Dikmenin CATIA V5R16’da modellenmiş görüntüsü Şekil 3.3’de gösterilmiştir.

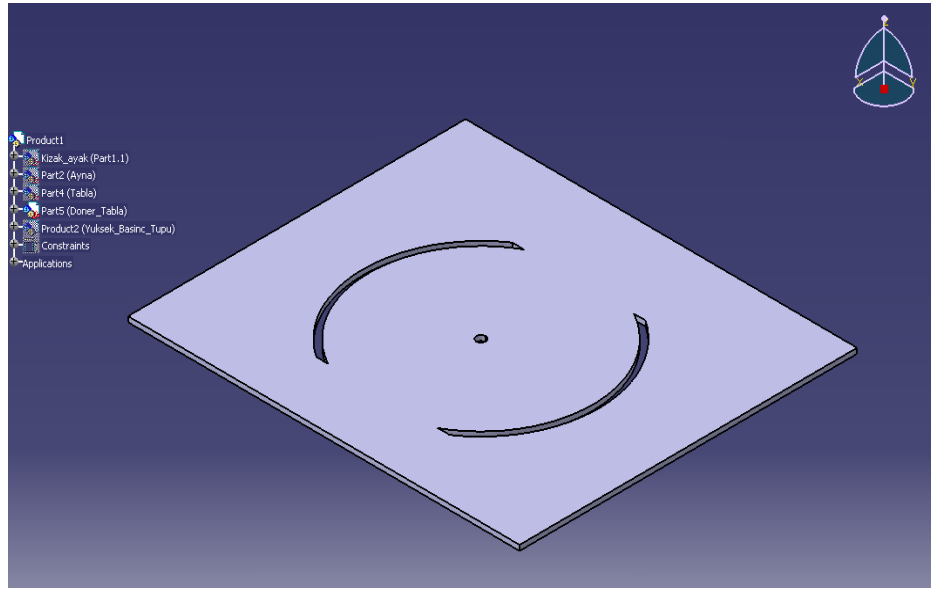


Şekil 3.3 : Dikmeler.

3.2.1.2 Döner tabla

Tasarım kıstaslarında belirtilen farklı sınır şartlarında deney yapılabilirliği sağlamak gerekmektedir. Anlık basınç yükünün kompozit plağa farklı açılarda da etki etmesi istenmektedir. Bu amaçla ayna ile kızaklar arasında bir aparat konulması

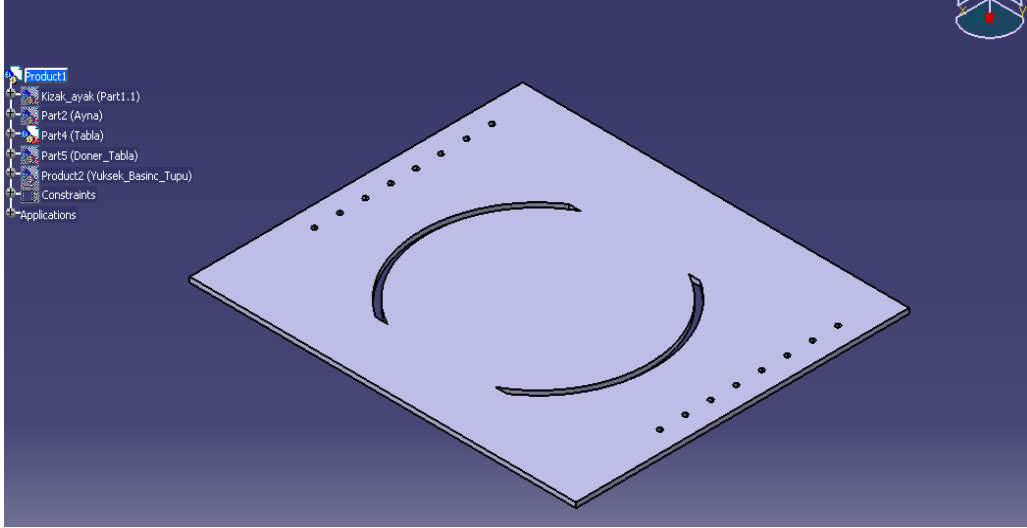
düşünülmüştür. Böylece monte edilecek bu aparat ile dikme direk olarak kızaklara monte edilmeyecektir. Kızak ve döner tabla arasına yerleştirilecek bir sabit tabla yardımıyla anlık basınç yükünün kompozit plâğa farklı açılardan tesir etmesi sağlayacak bir tasarım yapılmıştır. Dikmenin döner tablaya monte edilmesi ve döner tablanın da tablaya monte edilmesiyle dönme kabiliyeti elde edilmiş olunur. Bu sayede kullanılacak olan kompozit plaklara tesir eden anlık basınç yükün istenilen açılara ayarlanabilmesi sağlanmıştır. Döner tablanın CATIA modeli Şekil 3.4’de verilmiştir.



Şekil 3.4 : Döner tabla.

3.2.1.3 Tabla

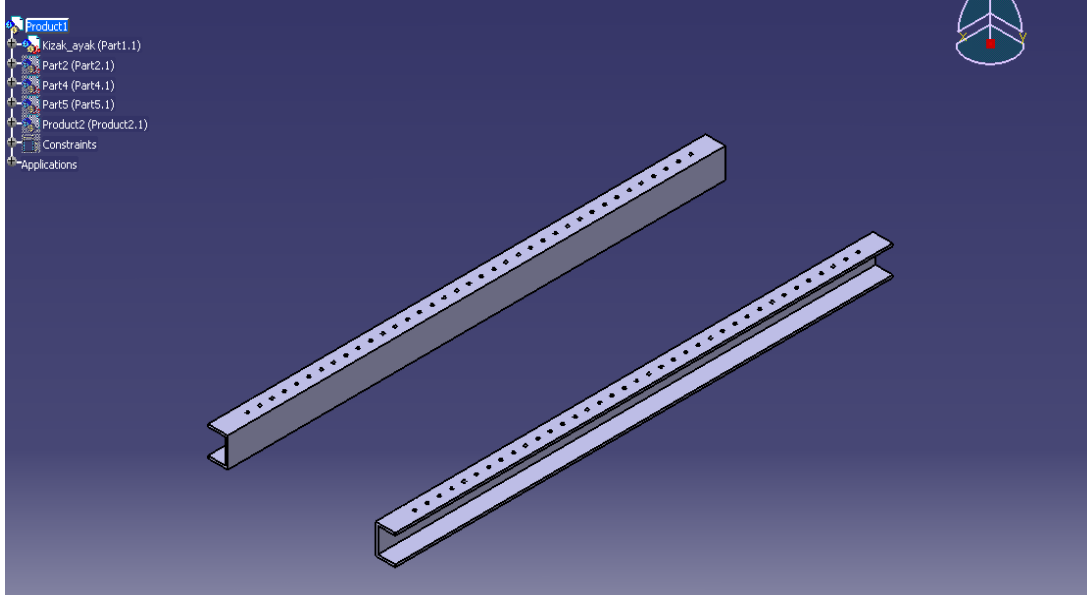
Döner tablanın kızaklara monte edilirken aynı zamanda dönebilme kabiliyetini de kaybetmemesi için döner tabla ve kızaklar arasına sabit bir tabla konulmuştur. Tablanın kızaklara monte edilebilmesi ve aynı zamanda istenildiği takdirde yüksek basınç tüplerinden uzaklaştırılıp yaklaştırılmasını da sağlaması için tabla üzerine uygun aralıklarla montaj delikleri açılmıştır. Tablanın CATIA modeli Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5 : Tabla.

3.2.1.4 Kızaklar

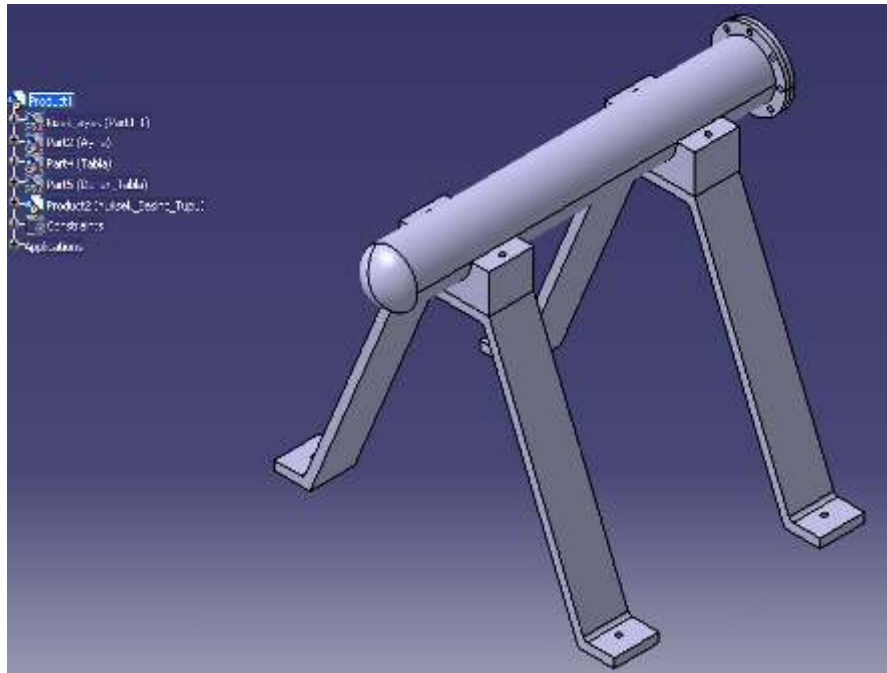
Yüksek basınç tüpünün test plağına olan uzaklığının etkisinin incelenebilmesini sağlamak amacıyla kızaklar üzerine 5 cm aralıklarla bağlantı delikleri açılmıştır. Ayrıca tüm deney düzeneğinin kızaklar üzerine monte edileceği düşünülürse tüm ağırlığı taşıyabilecek kadar sağlam olması da gerekmektedir. Diğer taraftan anlık basınç yükü etkisinde deney platformunun hareket etmemesi için de yere sabitlenebilmesi gerekmektedir. Şekil 3.6’da kızakların tasarımı gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : Kızaklar.

3.2.1.5 Yüksek basınç tüpleri ve ayakları

Yüksek basınç tüplerinin cidar kalınlıkları 40 bara kadar dayanıklı olacak şekilde belirlenmiştir. İmal edildikten sonra tüpler emniyet katsayısı 1,5 alınarak basınca karşı dayanıklılık testi yaptırılmıştır. Ayrıca tüp içerisine yüksek basınç depolanabilmesi için sızdırmaz olmalıdır. Bu nedenle emniyet testleri sırasında sızdırmazlıkları da kontrol edilmiştir. Farklı denemeler için çeşitli yüksek basınç tüpleri düşünülmüştür. Bu bağlamda uzunlukları 800 mm; çapları 60 mm, 90 mm ve 120 mm olan üç farklı yüksek basınç tüpü tasarlanmış ve imal edilmiştir. Ayrıca yüksek basıncın tüp içeride depolanabilmesi için membran bağlantısı yapılması gerekmektedir. Bu nedenle yüksek basınç tüplerinin açık uç taraflarına membranın montajını yapabilmek için flanş bağlantısı tasarlanmış ve imal edilmiştir. Farklı çaplardaki yüksek basınç tüpleri kolayca çerçeveye monte edilebilecek şekilde bir tasarım yapılmıştır. Yüksek basınç tüpünün ve bağlandığı ayakların CATIA modeli Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7 : Yüksek basınç tüpü ve ayakları.



Şekil 3.8 : İmalatı yapılmış yüksek basınç tüpleri.

Anlık basınç yükünün kompozit plağın ortasına merkezlenebilmesi ve kızaklar üzerinde istenilen konumlara monte edilebilmesi için tüp ayaklarının yüksekliği ve iki ayağın aralığı ayarlanarak tasarlanıp imal edilmiştir. İmal edilmiş tüpler Şekil 3.8’de görülmektedir.

3.2.1.6 Membranlar

Yüksek basınç tüplerinin açık uçlarını kapatmak için çeşitli malzemelerden membranlar kullanılmıştır. Membran malzemesi olarak pirinç, alüminyum, kauçuk ve polikarbonat kullanılabilir. Deneyler sırasında bu malzemelerin çeşitli kombinasyonları denenmiştir. Tüp içinde istenen basınç büyüklüğüne göre membran seçimi yapılabilmesi için membran dayanım denemeleri yapılmıştır. Ayrıca tüp içindeki yüksek basınç nedeniyle yırtılan membranın parçalanıp, bir parçasının hibrit kompozit plağa çarpmasından kaçınmak gerekmektedir. Aksi halde plağın davranışında darbe etkisi de görülebilir. Diğer taraftan gerinim ölçerler veya basınç duyargaları da zarar görebilir. Ayrıca plak üzerinde düzgün yayılı anlık basınç yükü tesiri istendiğinden membranın yırtılma davranışı çok önemlidir. Membran yaprak gibi ortadan yırtılarak hava akımının plağın üstüne dik olarak çarpması gerekmektedir. Yapılan denemeler sonucunda en iyi yırtılma membranın orta bölgesinde küçük artı şeklinde bir çentik açılması ve bu çentiğin de güçlü bir bantla artı şeklinde yapıştırılmasıyla elde edilmiştir.

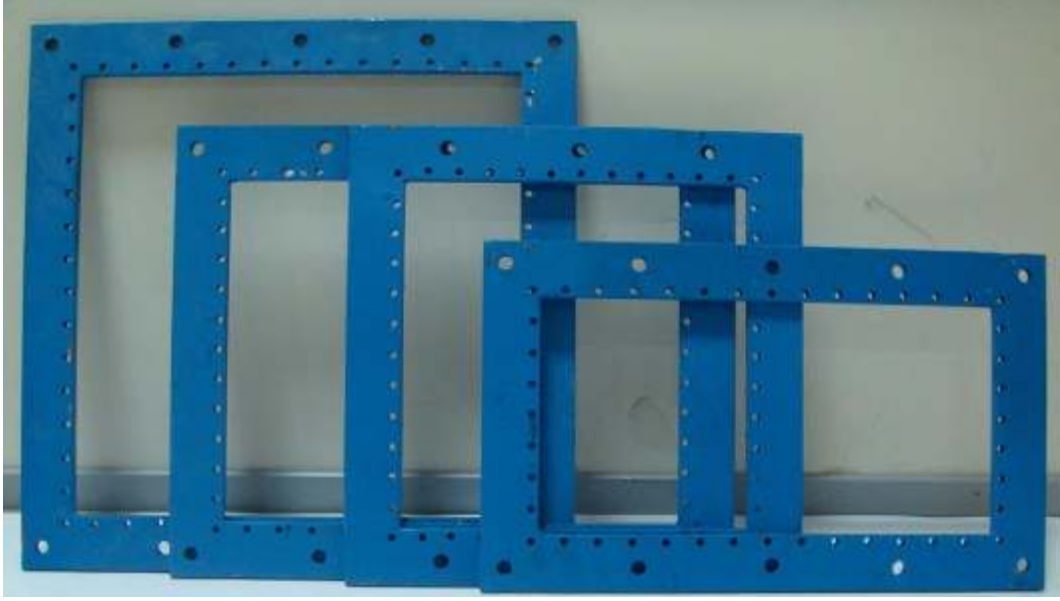


Şekil 3.9 : Pirinç membran.

Şekil 3.9’da pirinç membranların yırtılmadan önce ve sonraki durumları verilmiştir.

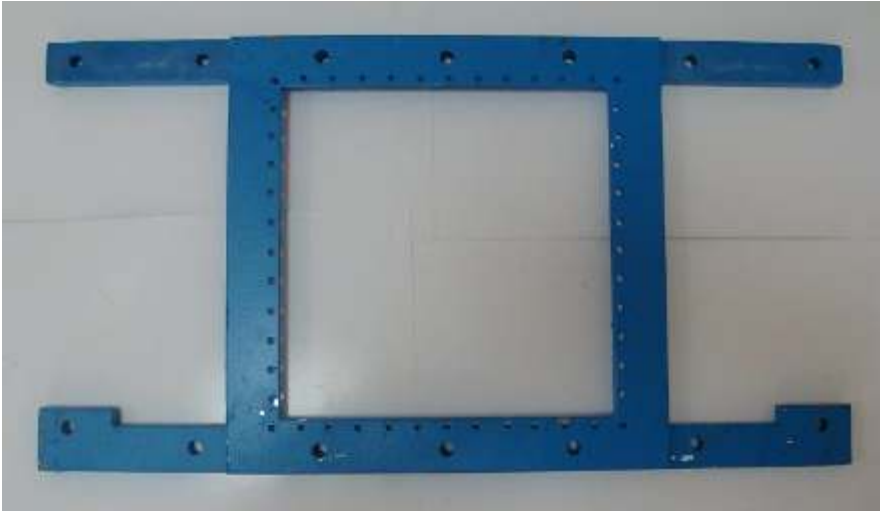
3.2.1.7 Mesnet çerçeveleri

Farklı boyutlara ve farklı açıklık oranlarına sahip kompozit plakların deneyinin aynı düzenekte gerçekleştirilebilmesi için çeşitli plak bağlantı çerçeveleri tasarlanmıştır. Anlık basınç etki alanı 40x30 cm, 30x30 cm ve 40x20 cm olan üç farklı çerçeve tasarlanıp imal edilmiştir. Bu çerçevelerde, farklı bir bağlantı sağlamak amacıyla plağın çerçeveye montajında hem M12 hem de çerçeve kenarları boyunca 3 cm aralıklarla M6 delikleri açılmıştır. Daha önce yapılmış olan anlık basınç yükü deneylerinde kompozit plak iki rijit çerçeve arasına monte edildiği görülmüştür. Bu tür mesnetlemelerde, çerçeve kenarlarında hava akımı bozuntularının olduğu düşünülmektedir. Bu olumsuzluğu önlemek amacıyla plak, tek çerçeveye hem M12 hem de çerçeve kenarı boyunca M6 cıvataları kullanılarak mesnetlenmiştir. İmal edilmiş çerçeveler Şekil 3.10’da görülmektedir.



Şekil 3.10 : Kompozit plak mesnet çerçeveleri.

Kompozit plağın çerçeveye montajı yapıldıktan sonra da deney düzeneğinin dikme bölümüne montajı yapılacaktır. Bu amaçla çerçevelerin dikmeye bağlantısı için iki adet lama tasarlanmış ve imal edilmiştir. Bu lamalar tasarlanırken önemli olan nokta yüksek basınç kaynağının düşünülen dört farklı kompozit plağın da tam orta bölgesine etki etmesidir.



Şekil 3.11 : Çerçevelerin aynaya bağlantı lamaları.

Bu nedenle lamalardaki bağlantı deliklerinin ayna üzerindeki deliklere göre ayarlanarak dört kompozit plağa da uygun olması sağlanmıştır. Çerçevelerin aynaya bağlantısını sağlayan lama bağlantıları Şekil 3.11’de verilmiştir. Şekil 3.11’de görüldüğü gibi düz lama her zaman üst tarafta kalacak şekilde dikmelere monte edilmelidir. Plağın çerçeveye montajında öncelikle M12 daha sonra M6 cıvataları

Yüksek basınç tankı içerisinde 40 bar basınçta hava depolanabilmektedir. Basınç tankında acil durumlar için, aşırı basınçlarda devreye girecek bir adet emniyet valfi bulunmaktadır. Kompresör ve basınç tankı ve Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



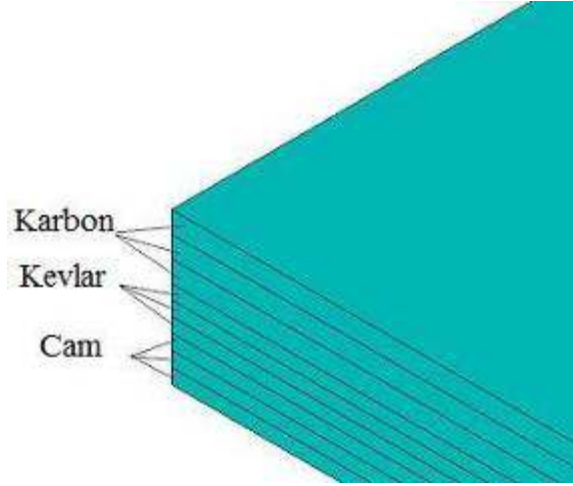
Şekil 3.14 : Kompresör ve yüksek basınç tankı.

3.2.5 Kompozit plak üretimi

Anlık basınç yükü deneyleri için gerekli olan plaklar İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi KYL’de üretilmiştir. Bu plaklar mekanik özellikleri belirlenmiş kompozit kumaşlardan katmanlanmıştır. Aşağıdaki boyutlarda plaklar imal edilmiştir:

- 404 mm x 404 mm (Basınç etki alanı: 30 cm x 30 cm)
- 504 mm x 304 mm (Basınç etki alanı: 40 cm x 20 cm)
- 504 mm x 404 mm (Basınç etki alanı: 40 cm x 30 cm)

Her birinden üçer katman olmak üzere karbon/kevlar/cam sıralamasıyla hibrit kompozit plaklar oluşturulmuştur. Her bir kompozit plak için aynı kompozit malzeme katmanlaması kullanılmıştır. Kompozit plak katmanlaması Şekil 3.15’te görülmektedir.



Şekil 3.15 : Hibrit kompozit plağın katmanlaması.

Üretilecek plak için gerekli olan epoksi-reçine ve sertleştirici karışımının ağırlığının belirlenmesi gerekmektedir. Her bir kompozit kumaşın kendine özgü elle üretim sabiti olan RC kullanılarak, üretilecek hibrit katmanlı kompozit plaklar için gerekli toplam epoksi-reçine/sertleştirici ağırlığı hesaplanmıştır [25]. Bunun için önce imal edilecek hibrit kompozit plakların reçinelenmemiş kuru ağırlıkları tartılır. Epoksi-reçine/sertleştirici karışım ağırlığının formülü daha önce Denklem (2.1)'de verilmişti. Hesaplanan toplam karışım ağırlığından reçine-epoksi/sertleştirici ağırlığı 5/2 oranına göre reçine-epoksi ve sertleştirici ağırlığı tespit edilerek karışım hazırlanır. Hesaplanan epoksi-reçine/sertleştirici karışımı iyice karıştırıldıktan sonra kuru kompozit kumaşlar bu karışımla ıslatılır. Bu karışım hazırlandıktan sonra, sertleşmesine fırsat vermeden, belirli bir sürede kullanılması gerekmektedir. Epoksi-reçine ve sertleştirici özellikleri daha önce Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : 50x50 cm kompozit plağın bileşen bilgileri.

Kumaş Türü	Katman Sayısı	Ağırlık (gr/m ²)	Alan (m ²)
Cam Elyafı	3 kat	280	0,25
Karbon Elyafı	3 kat	300	0,25
Kevlar Elyafı	3 kat	110	0,25

Üretim boyutu 50x50 cm olan kompozit plak için kullanılan kompozit kumaşların reçine ağırlığı hesaplamaları için gerekli olan bilgileri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Çizelge 3.1'de görülen ağırlık bilgileri malzemenin reçinelenmeden önceki kuru ağırlığını belirtmektedir. 50x50 cm plağın kompozit kumaş katmanlanması sırayla 3

kat cam elyafı, 3 kat kevlar elyafı ve 3 kat karbon elyafı şeklindedir. Hibrit kompozit plak 50x50 cm olarak üretilip daha sonra CNC ile kesilerek kullanılacak boyut olan 404x404 mm'ye getirilecektir. Hibrit kompozit plağın öncelikle büyük yapılmasının sebebi üretim esnasında kenar kalınlıklarının farklılıklarından kaçınmak içindir.

Reçinelenmiş hibrit kompozit plak, kürlenmesi için hem vakum sağlayıp hem de ısı üreterek kürlenme yapabilen tezgâha yerleştirilir. Kompozit plak kalıbı için kullanılan çelik levha, tezgâhın uyguladığı vakum etkisiyle kompozit plağın kenarlarına daha fazla basınç uygulayabilir. Bunun sonucu plak kenarları ortalara göre daha ince olabilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi reçineyle ıslatma esnasında katmanların yönüne çok dikkat edilmesi gerekmektedir. Anlık basınç yükü deneylerinde kullanılacak plakların kompozit kumaşları 0°/90° yönlenmesinde yapılacaktır. Ve tüm kompozit kumaşların reçinelenerek katmanlanmasından sonra yüzeylerinin düz olması için iki çelik levha arasına yerleştirilerek vakumlu tezgâha konulur. Kullanılan reçine özellikleri Çizelge 2.2'de verilmiştir. Vakumlu tezgâhta 50°C' ye kadar ısıtıldıktan sonra ısı kaynağı kapatılır ve yaklaşık 750 milibar basınçta yaklaşık 12 saat kürlenmeye bırakılır.



Şekil 3.16 : Kompozit plağın CNC tezgâhında işlenmesi.

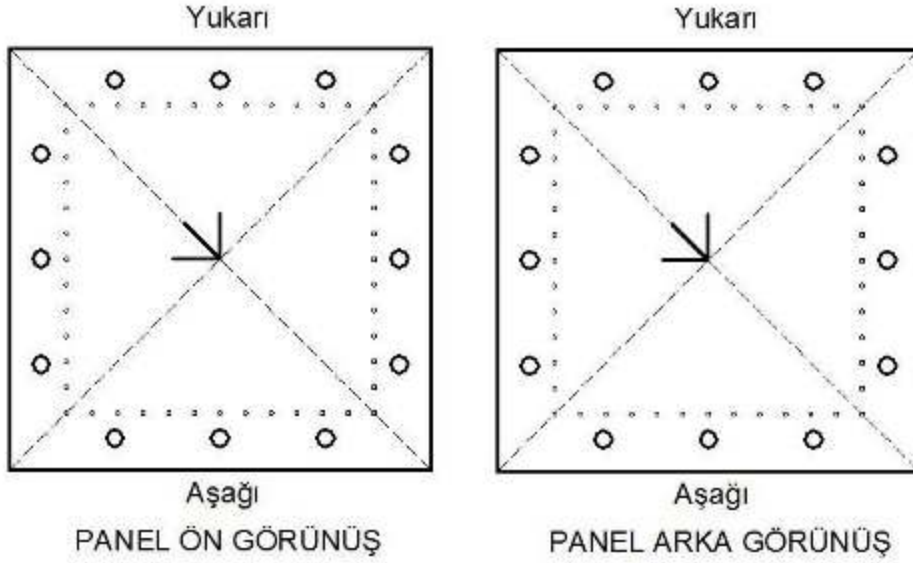
Kürleme işleminden sonra kalıptan alınan plak istenilen boyutlara göre kesilmesi ve mesnet bağlantı deliklerinin açılması için CNC tezgâhında işlenir. CNC tezgâhında yapılan bu işlem Şekil 3.16'de gösterilmiştir. Plakların yapraklanmaya uğramaması için kesim işlemine dikkat edilmelidir.

3.3 Anlık Basınç Yüğü Deneyinin Yapılması

Anlık basınç yüğü deneyi öncesinde basınç tüplerinde kullanılacak membran elemanlarının patlama esnasında parçalanarak kompozit plağa çarpması sonucu darbe etkisi göstermemesi için çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmaların sonuunda kullanılacak membran elemanların orta noktasına çentik açılarak membranların yaprak gibi açılmaları sağlanmış ve parça kopma riski nisbeten azaltılmıştır. Tüp içerisinde depolanacak havanın basıncı tamamıyla membranın dayanımına bağlıdır. Membranın çentik boyutları yaklaşık istenen basınç büyüklüğüne göre açılabilir. Membran için çeşitli malzemelerden yararlanılmıştır. Bu malzemeler arasında genellikle pirinç ve lastik birlikte kullanılmış olmakla beraber farklı kombinasyonlar da denenmiştir. Polikarbonat malzemesi tüp içerisinde yüksek basınç depolamaya çok daha uygundur.

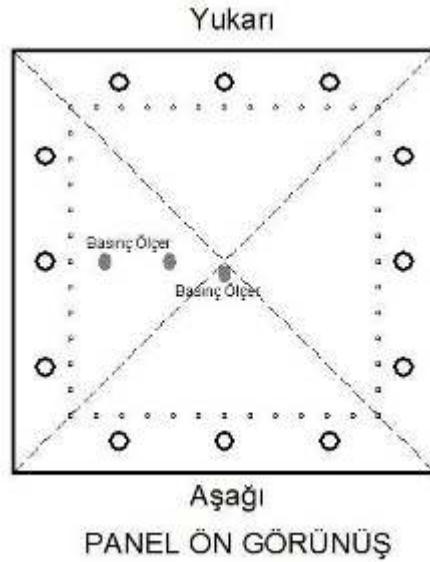
Anlık basınç yüğü deneyine başlanması için şu hazırlıklar yapılmıştır:

- Anlık basıncı elde edeceğimiz yüksek basınçlı havanın depolanması için kompresör çalıştırılarak tank doldurulmaya başlanır. Tank içerisinde istenilen basıncın geçilmesi durumunda tanktaki basıncın artmasını önleyecek bir emniyet valfine (çek valf) sahiptir.
- Kompozit plağa gerinim ölçerlerin yapıştırılması: Hibrit kompozit plağın ön ve arka yüzünün orta noktası olmak üzere iki adet 3 eksenli gerinim ölçer yapıştırılmıştır. Hibrit kompozit plak üzerindeki gerinim ölçerlerin konumu Şekil 3.17’de gösterilmiştir.



Şekil 3.17 : Plak üzerindeki gerinim ölçerlerin konumu.

- Basınç duyargasının kompozit plağa yapıştırılması: Kompozit plak üzerindeki basınç dağılımının doğruya en yakın şekilde belirlenebilmesi için öncelikle basınç duyargalarının konumlarına ve sayısına karar verilmelidir. Bu bağlamda kompozit plak üzerinde tam orta noktadan kenara kadar eşit aralıklarda 3 adet basınç duyargası kullanılması plak üzerindeki basınç dağılımının belirlenmesi gerekli olduğu kararına varılmıştır. Kompozit plak üzerindeki basınç duyargalarının konumu Şekil 3.18’de gösterilmiştir.



Şekil 3.18 : Plak üzerindeki basınç duyargalarının konumu.

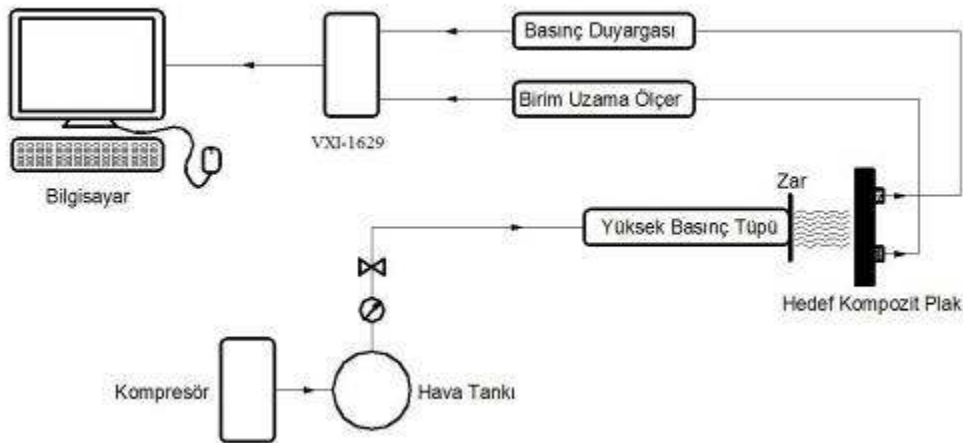
- Gerinim ölçerleri ve basınç duyargaları yapıştırılmış kompozit plak deney düzeneğine monte edilebilir. Bu montaj yapılırken kompozit plağın çerçeveye

olan montajında cıvataların oldukça iyi sıkılması gerekmektedir. Çünkü anlık basınç yükü etkisindeki kompozit plağın çerçeve içinde kayma olasılığı vardır. Bu kayma gerçekleşirse deney esnasında toplanan verilerin sağlıklı olmayacağı kesindir. Yapılan bazı deneylerde kompozit plağın kaydığı hem DAC Express programından elde edilen verilerden hem de gözle çerçeve-kompozit plak bağlantısının kontrol edilmesinden anlaşılmıştır. Aynı zamanda çerçeve-dikme bağlantısının da çok iyi yapılması gerekmektedir.

- Kompozit plağın üzerindeki gerinim ölçer ve basınç duyargası kablolarının soketleri VXI 1629 ölçme cihazına bağlandıktan sonra bu duyargalar DAC Express yazılımına tanıtılır. Bu kablo bağlantıları yapılırken plağın anlık basınç yükü yönüne dikkat edilmelidir. Eğer bağlantı kabloları boşa bırakılır veya akım yönünde etkilenebilecek şekilde bırakılırsa istenmeyen, anlamsız veriler toplanabilir. Bu nedenle gerinim ölçer ve basınç duyargalarının bağlantı kabloları deney düzeneğinin arkasından bantla yapıştırılarak sabitlendikten sonra veri toplama cihazına bağlanmalıdır. Bu bağlantı, veri alış verişinin sağlıklı olması için özenle yapılmalıdır.
- Gerinim ölçer ve basınç duyargalarının veri toplama cihazına bağlantısı yapıldıktan sonra DAC Express programıyla “Unstrain Voltage” kalibrasyonu yapılmalıdır. Hibrit kompozit plağın, DAC Express programında yapılan bu kalibrasyon sonucu veri akışına bakılarak bağlantılarda herhangi bir sorun olup olmadığı veya tekrar kalibrasyona ihtiyaç duyup duymadığı kontrol edilmelidir. Gerinim değerleri beklenenin üstünderse gerinim ölçerin kablo bağlantıları veya veri toplama cihazının kablo bağlantıları kontrol edilmelidir. Ayrıca “Gage” faktör, kablo direnci gibi bazı veriler DAC Express programına yanlış veya eksik girilmiş olabilir. Bu değerler kontrol edildikten sonra kalibrasyon tekrarlanmalıdır. Gerinim değerlerinde küçük salınımlar mevcut ise DAC Express programındaki “Auto Calib” komutuyla otomatik kalibrasyon yapılır. Fakat yapılan bu kalibrasyonlar esnasında kalibrasyonun doğru olabilmesi için kompozit plağa herhangi bir temas olmamalıdır. Aynı zamanda deney ortamının gürültüsü de kalibrasyonu doğrudan etkileyecek faktörlerdendir.

Şekil 3.19’da anlık basınç yükü deney akışının diyagramı gösterilmiştir. Deney akışı şu şekilde gerçekleşir:

- Kompresör vasıtasıyla hava tankında depolanan hava, tank üzerinde bulunan bir vanaya bağlanan hortum vasıtasıyla yüksek basınç tüpüne basınçlı havayı göndermeye başlar.
- Yüksek basınç tüpünün önünde bulunan membranın mukavemetine bağlı olarak tüp içerisinde basınçlı hava birikmeye başlar.
- Yüksek basınç tüpünün içerisindeki havanın basıncının, membran mukavemetini aşması sonucu membran yırtılır ve yüksek basınçlı hava kompozit plak üzerine çarpar.
- Yüksek hava basıncının plak üzerindeki etkisi, plağa yapıştırılmış gerinim ölçer ve basınç duyargaları vasıtasıyla toplanarak veri toplama cihazına (VXI 1629) gönderilir.
- Veri toplama cihazından sonra veriler bilgisayara iletilerek DAC Express programı vasıtasıyla gerekli gerinim ve basınç değerlerine dönüştürülür.



Şekil 3.19 : Anlık basınç yükü deneyi akış diyagramı.

4. SONLU ELEMAN ANALİZİ VE DENEY SONUÇLARIYLA KARŞILAŞTIRILMASI

4.1 Giriş

Aynı katmanlamaya ve farklı açıklık oranına sahip üç kompozit plağın anlık basınç yükü etkisi altındaki davranışının sayısal olarak analiz edilebilmesi için ANSYS 11.0 sonlu eleman yazılımı kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan basınç yükü, deneyler sonucunda elde edilen basınç grafiklerine uydurulan fonksiyonla ifade edilmiştir. Hibrit kompozit plakların analizleri, dört köşesinden ankastre sınır şartında yapılmıştır. Tüm plakların frekanslarının ve mod şekillerinin belirlenmesi için öncelikli olarak serbest titreşim analizleri yapılmıştır. Ardından geçici (transient) analizler koşturulmuştur.

4.2 Geometri ve Malzeme

Plak geometrileri daha önce CATIA programıyla modellenmiştir. Çekme deneylerinde her bir kompozit kumaş için mekanik özellikler elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler Ömercikoğlu'nun yüksek lisans tezindeki statik ve serbest titreşim analizlerine göre yaklaşık %22 azaltılması öngörülmüştür [39].

Çekme deneylerinde elde edilen malzeme mekanik özellikleri %22 azaltılarak ANSYS programında yapılan sayısal analizlerde kullanılmıştır. Sayısal analizlerde kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Sayısal analizlerde kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri.

	Cam Elyafı	Kevlar Elyafı	Karbon Elyafı
E_x, E_y (GPa)	18	19	45
ν	0.115	0.0603	0.195
D (kg/m ³)	1700	1250	1330

Hibrit kompozit plaklar, her kompozit kumaştan 3 katman olmak üzere toplam 9 adet katmandan oluşmaktadır. Sayısal analizlerde kullanılan kompozit kumaşların kalınlıkları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

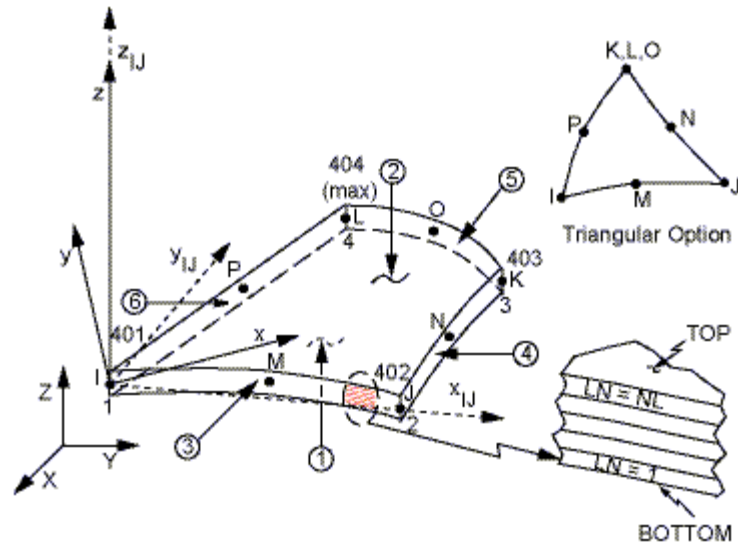
Çizelge 4.2 : Kompozit kumaşların kalınlıkları.

	Kalınlık (mm)
Cam Elyafı	0.2
Kevlar Elyafı	0.18
Karbon Elyafı	0.29

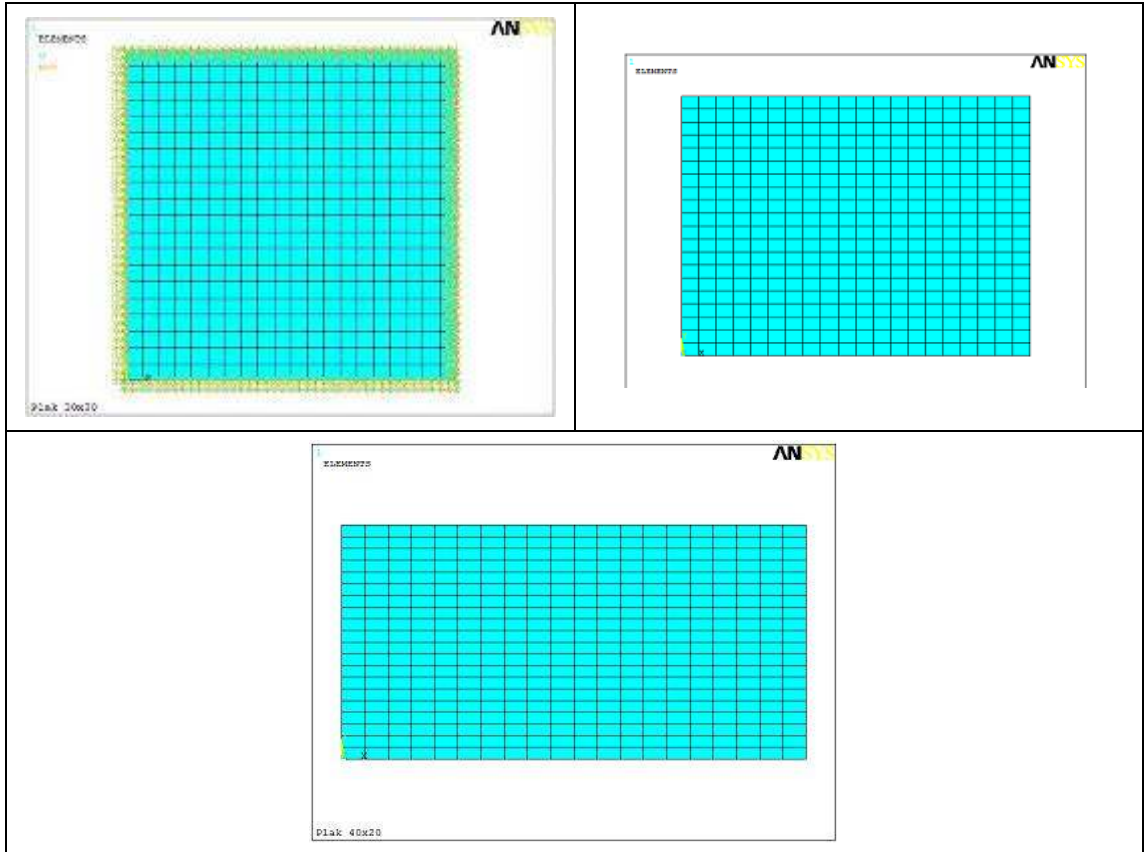
Kullanılan kompozit kumaş kalınlıkları, kompozit malzeme hazırlanırken kullanılan epoksi/reçine miktarına göre farklılık gösterebilir.

4.3 Sonlu Eleman Modeli

Hibrit kompozit plakların sonlu elemanlar modellemesinde ANSYS 11.0 kütüphanesinde bulunan SHELL91 elemanı kullanılmıştır. Bu eleman ile katmanlı yapısal kabukların ve kalın sandviç yapıların modellenmesi yapılabilir. SHELL91 üç boyutlu kabuk elemanı olarak köşelerde 4 adet ve kenar orta noktalarında 4 olmak üzere toplam 8 adet düğüm noktasına sahip dörtgen elemandır. Ve her bir düğüm noktasında x,y ve z doğrultularında öteleme ile x,y ve z eksenleri etrafında dönme serbestlik derecelerine sahiptir. Elemanın toplam 48 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Şekil 4.1’de eleman düğüm noktaları ve koordinat eksenleri görülmektedir [40].



Şekil 4.1 : SHELL91 Elemanı [40]



Şekil 4.2 : Hibrit kompozit plakların sonlu elemanlar modeli.

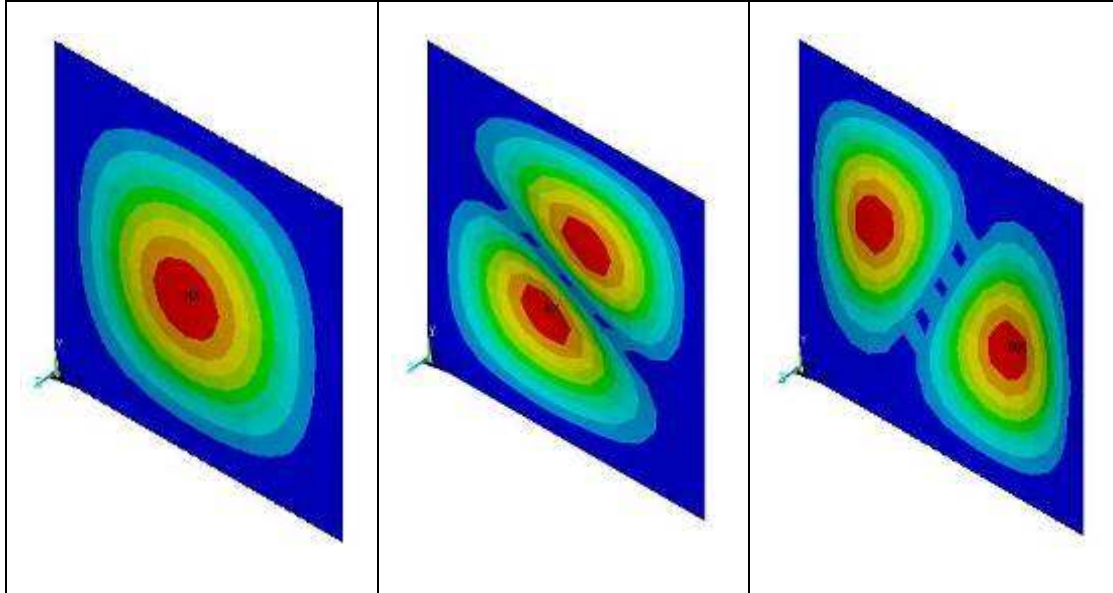
Hibrit kompozit plaklar, tüm kenarları 20 eşit parçaya bölünerek toplam 400 adet eleman ve 1281 düğüm noktasından oluşmaktadır. Plakların sonlu eleman modelleri Şekil 4.2’de verilmiştir.

4.4 Serbest Titreşim Analizi

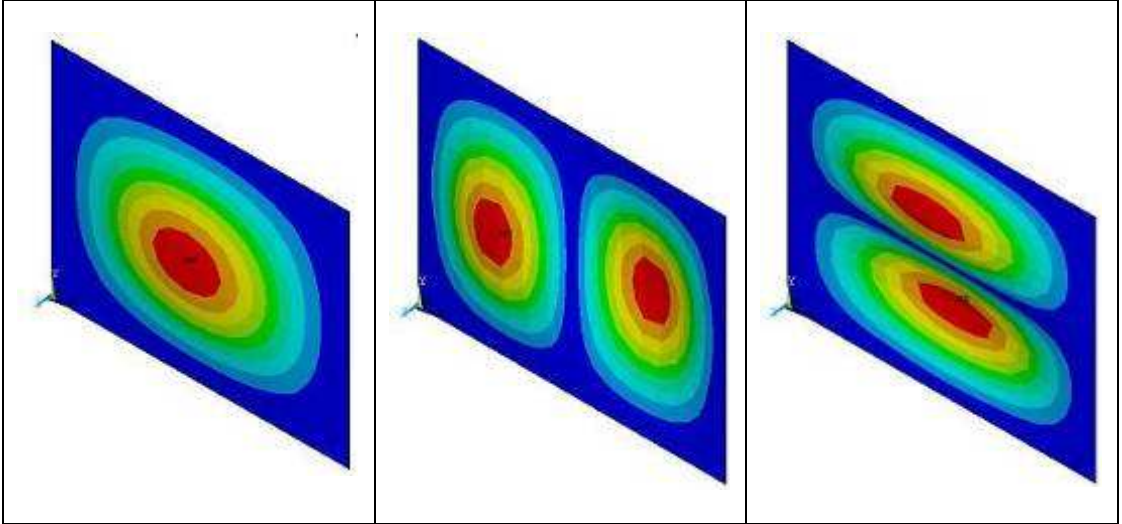
30x30, 40x30 ve 40x20 cm boyutlarındaki hibrit kompozit plakların doğal frekanslarının tespiti için ANSYS’de analizler gerçekleştirilmiştir. Frekans değerleri Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 : ANSYS ile elde edilen doğal frekans değerleri.

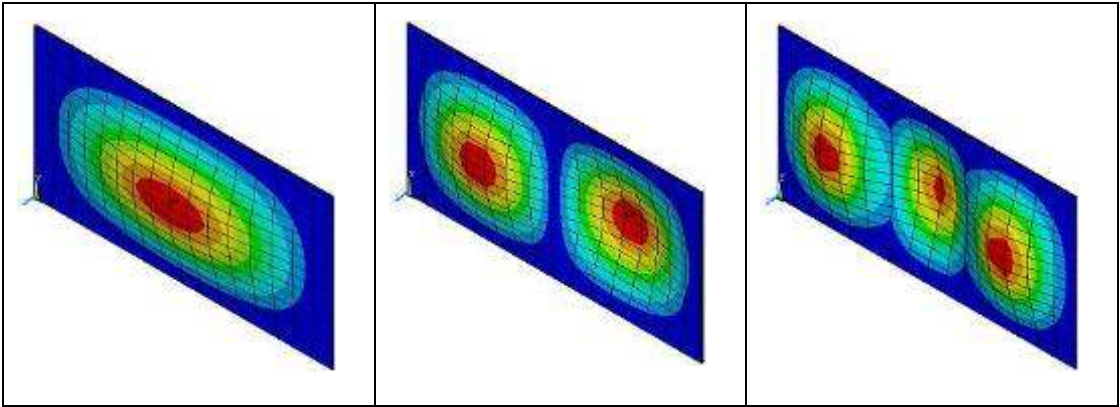
Mod	Titreşim Frekansı (Hz) 30x30 cm	Titreşim Frekansı (Hz) 40x30 cm	Titreşim Frekansı (Hz) 40x20 cm
1	149.75	123.14	242.55
2	307.45	201.08	296.16
3	307.45	295.97	412.09
4	425.46	342.17	591.52
5	563.40	348.39	638.07
6	565.02	459.66	674.03
7	653.39	538.47	751.87
8	653.39	561.94	828.42



Şekil 4.3 : 30x30 cm boyutlarındaki hibrit kompozit plağın ilk üç mod şekilleri.



Şekil 4.4 : 40x30 cm boyutlarındaki hibrit kompozit plağın ilk üç mod şekilleri.



Şekil 4.5 : 40x20 cm boyutlarındaki hibrit kompozit plağın ilk üç mod şekilleri.

Hibrit kompozit plakların mod şekilleri Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5’de gösterilmiştir.

4.5 Geçici Analiz

Anlık basınç yükü deneyleri sonucunda elde edilen basınç değerleri sonlu eleman analizlerinde kullanılmıştır. Hibrit kompozit plak üzerinden üç farklı noktadan alınan basınç değerlerine uygun her plak için tek bir basınç fonksiyonu uydurulmuştur. Uydurulan fonksiyon parametrik olarak Denklem (4.1)’de verilmiştir.

$$P(x, y, t) = \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{t_e}\right) \right]^u \left\{ \frac{P_t + P_e}{2^u \cdot 2^v \cdot 2^w} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \right]^v \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi (y + (a-b)/2)}{a}\right) \right]^w - \frac{P_e}{2^u} \right\} \quad (4.1)$$

Buradaki parametreler aşağıda tanımlanmıştır:

t_e : Etkime süresi

P_t : Tepe basıncı

P_e : Emme basıncı

u : Zaman üssü

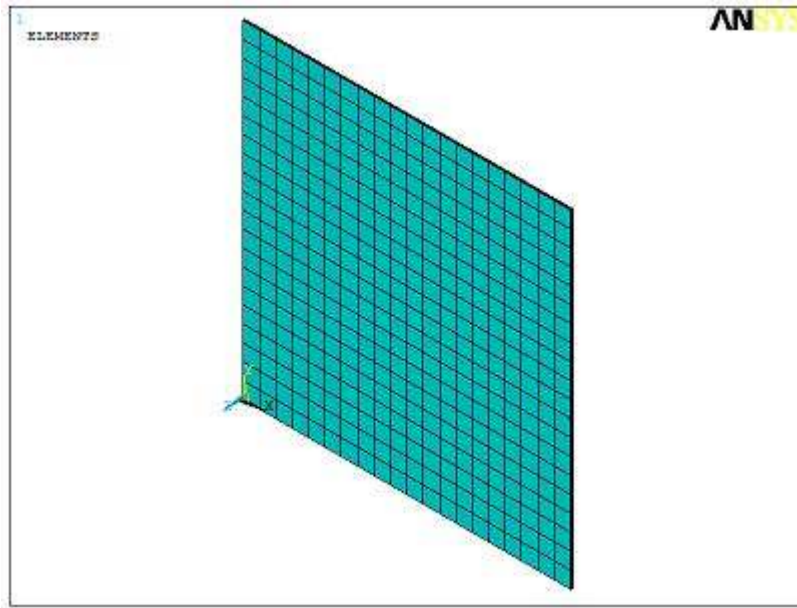
v : X konum üssü

w : Y konum üssü

a : Plak boyu

b : Plak yüksekliği

Uydurulan basınç fonksiyonları ANSYS 11.0 sonlu eleman programına girilerek geçici analizler gerçekleştirilmiştir. Her plağın dört kenarına ankastre sınır şartı uygulanmıştır.



Şekil 4.6 : Sonlu eleman modelinin eksenleri.

Şekil 4.6’da ANSYS 11.0’da modellenmiş hibrit kompozit plağın eksen takımı görülmektedir. Plak düzlemi x ve y eksenlerinde modellenmiştir. Anlık basınç yükü +z yönüne doğru uygulanmıştır.

4.5.1 30x30 cm hibrit kompozit plağın geçici analiz sonuçları

$a = 0.3$ m $b = 0.3$ m boyutlarındaki bu kare plak ile yapılan anlık basınç yükü deneyinde üç noktadaki basınç duyargalarından elde edilen basınç verilerine uygun

yaklaşım fonksiyonları iterasyonla belirlenmiş ve aşağıdaki parametrelere ulaşılmıştır:

$$t_e = 0.004 \text{ sn}$$

$$P_t = 107500 \text{ Pa}$$

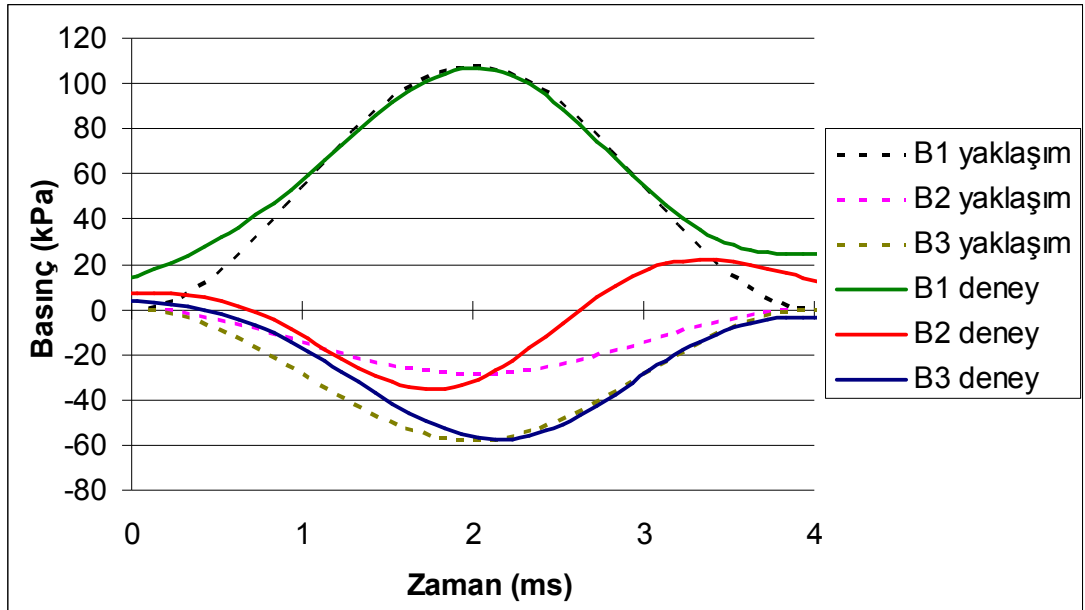
$$P_e = 58000 \text{ Pa}$$

$$u = 1$$

$$v = 2.5$$

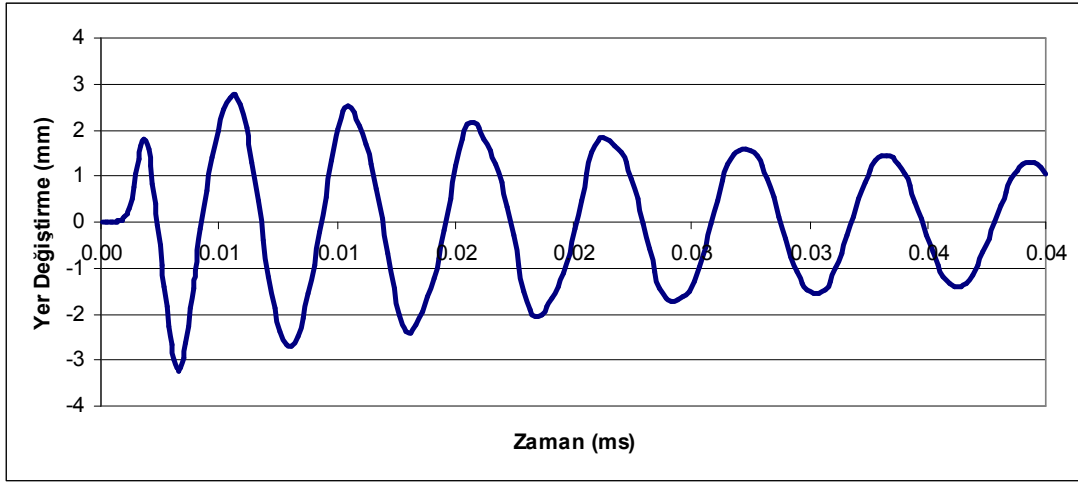
$$w = 2.3$$

Deneyde plağın üç noktasından elde edilen basınç değişimleri ve bunlara yapılan yaklaşımlar Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Plak üzerindeki basınç duyargaları, plak orta noktasından kenara doğru B1, B2 ve B3 olarak sırayla numaralandırılmıştır.



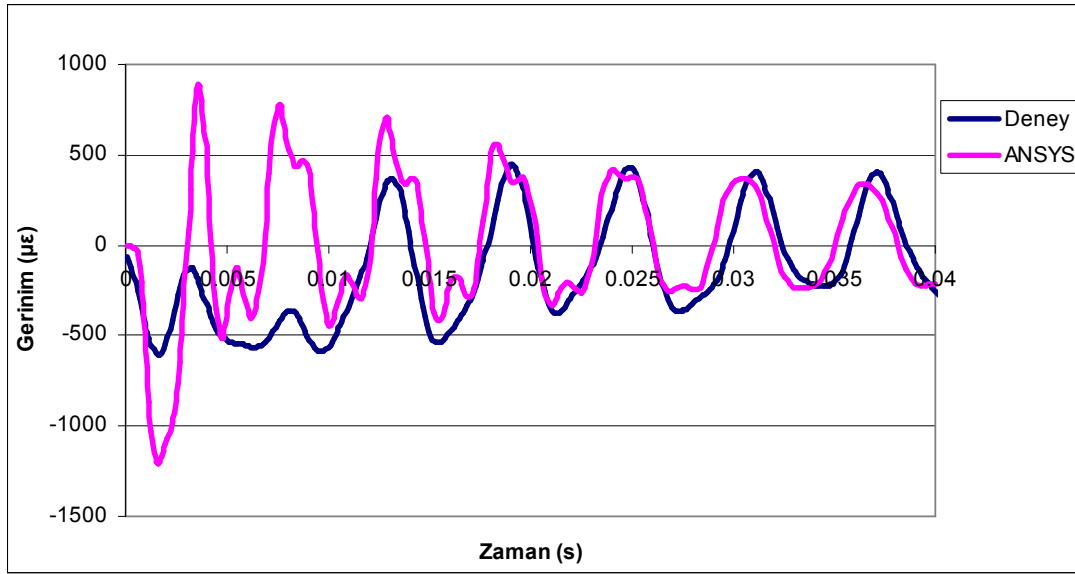
Şekil 4.7 : 30x30 cm plak için deneylerde elde edilen basınç eğrileriyle yaklaşım eğrilerinin uyumu.

30x30 cm hibrit kompozit plağın sayısal analizlerinde elde edilen zamana göre yer değiştirme grafiği şekil 4.8’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi maksimum çökme plak kalınlığının yaklaşık 1.62 katıdır.

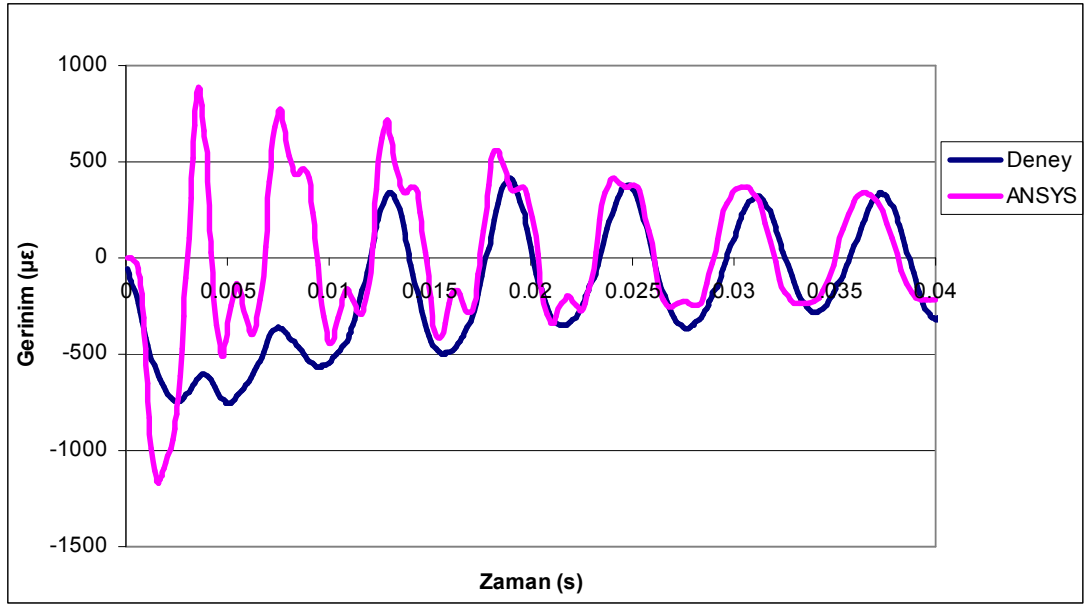


Şekil 4.8 : 30x30 cm plak için zamana göre yer değiştirmesi.

ANSYS’de yapılan geçici analiz sonucunda elde edilen plak ön yüzeyinin x ve y yönündeki gerinim değerleri deneylerde elde edilen gerinim değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar, sırasıyla, Şekil 4.9 ve 4.10’da görülmektedir.

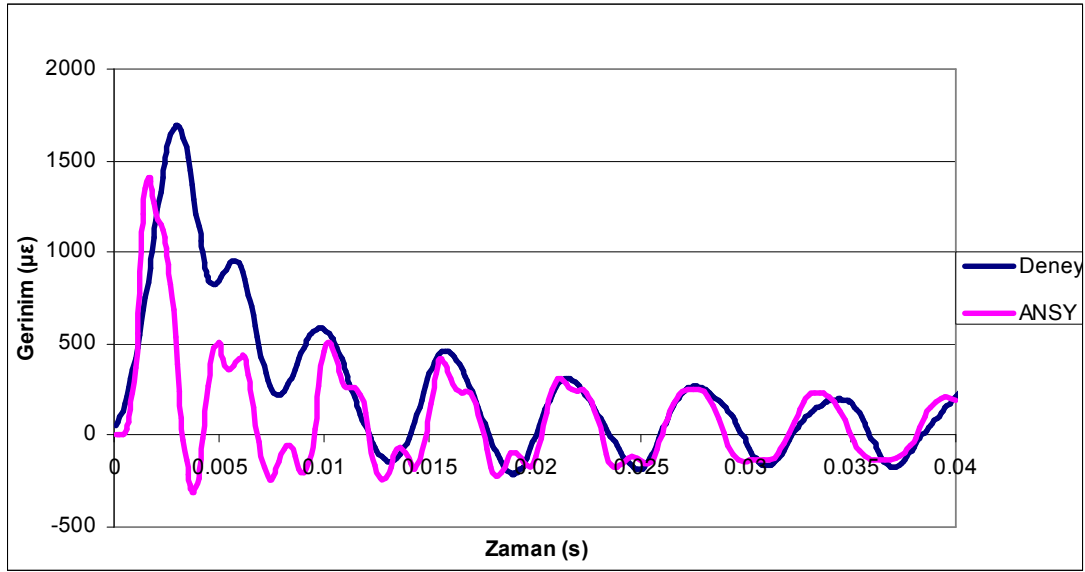


Şekil 4.9 : Plakın A noktasının x yönündeki gerinim karşılaştırılması.

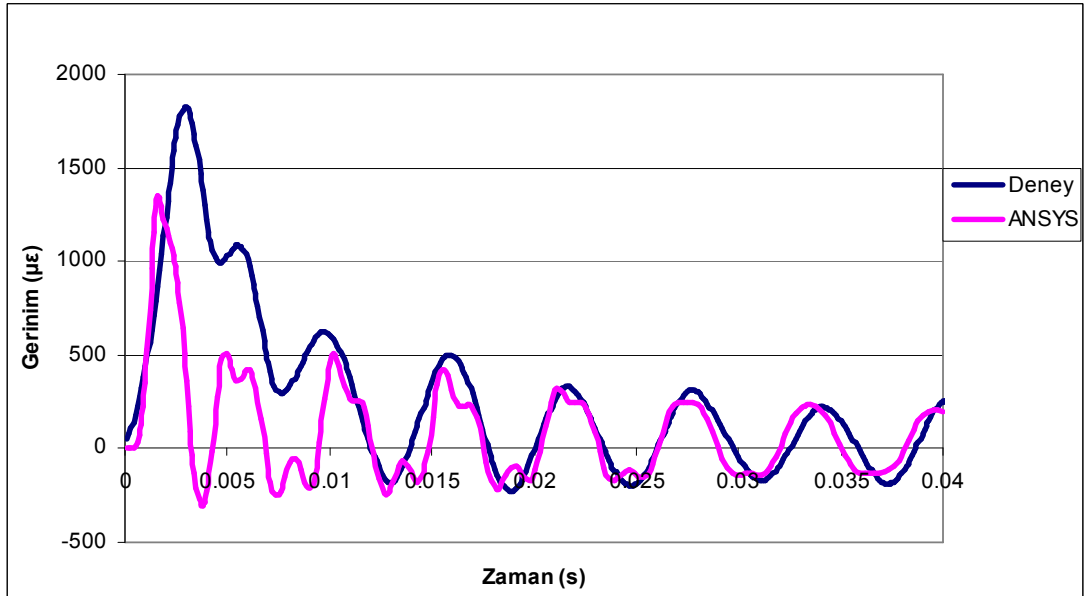


Şekil 4.10 : Plâğın A noktasının y yönündeki gerinim karşılaştırılması.

Plak açıklık oranının 1 olduğu bu plakta, analizlerde elde edilen x ve y yönündeki gerinim değerleri beklendiği gibi birbirinin aynısıdır. Aynı şekilde deney sonuçlarındaki x ve y yönündeki gerinimler de birbirine oldukça yakın olmakla beraber anlık basınç yükünün etki ettiği süredeki tepe değerleri yaklaşık %21 farklılık göstermektedir. Ayrıca analiz ve deneylerde elde edilen gerinim değerleri, ölçümlerin yaklaşık ilk 10 ms'sinde tepe noktalarında uyumluluk göstermemektedir. Plak serbest titreşime geçtiği sürede analiz ve deney sonuçlarının eğrileri hem değer hem de eğri karakteri olarak oldukça uyumludur. İlk 10 ms'lik süredeki tepe değerlerinin uyumsuzluğu, yüksek miktardaki anlık basınç yükünün plak ön yüzeyindeki gerinim ölçeri olumsuz etkilediğinden dolayı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca deneysel sonuçlarda x ve y yönündeki gerinimlerin ilk 10 ms'de uyumluluk göstermemesi, yük kalktıktan sonraki serbest titreşim bölgesinde ise oldukça iyi bir uyum görülmesi de yüksek basıncın gerinim ölçeri olumsuz etkilediği tezini desteklemektedir. Serbest titreşime geçtikten sonraki plâğın analiz ve deney frekansı uyumu oldukça iyidir.



Şekil 4.11 : Plâgın B noktasının x yönündeki gerinim karşılaştırılması.



Şekil 4.12 : Plâgın B noktasının y yönündeki gerinim karşılaştırılması.

30x30 hibrit kompozit plâgın arka yüzeyinin x ve y yönündeki gerinim sonuçları Şekil 4.11 ve 4.12’de verilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi deney ve ANSYS sonuçlarından elde edilen gerinim eğrilerinin karakterleri birbirlerine uyumludur. Fakat ilk pikin oluşum zamanında ve bu pikin tepe noktası değerinde uyumsuzluklar görülmektedir.

Deneyssel ve sayısal olarak elde edilen dinamik davranış serbest titreşim bölgesinde daha uyumlu hale gelmektedir. Plak arka yüzeyinde de ön yüzeyinde olduğu gibi deneyde 10 ms’de elde edilen tepe değerlerinden x yönündeki gerinim değeri y yönündeki gerinim değerine göre %7 kadar daha azdır. Ön yüzeydeki x ve y gerinim

değeri farklılık oranının arka yüzeydekine göre çok daha fazla olması anlık basınç yükünün gerinim ölçere etkisini göstermektedir.

Plak arka yüzeyindeki maksimum pik değerlerinin, x yönündeki deney ve analiz değerlerindeki farklılık oranı %16, y yönündeki farklılık oranı ise %25'dir. İki yöndeki oranların farklı olması deney sonuçlarından kaynaklanmaktadır. Bu farklılığın bir nedeni deney sırasında anlık basınç yükünün tam merkezlenememesi olabilir. Düşey ve/veya yatay doğrultudaki bir miktar kaçıklık bu tür bir farklılığa yol açıyor olabilir.

Ön ve arka yüzeylerin orta noktası için verilen analiz sonuçları birinci modun yanı sıra yüksek frekanslı ikinci bir modun da dinamik davranışa belirgin bir katkı yaptığını göstermekle birlikte deneysel sonuçlarda bu katkının çok önemli olmadığı görülmektedir.

4.5.2 40x30 cm hibrit kompozit plağın geçici analiz sonuçları

Farklı açıklık oranına sahip plakların davranış farklılıklarının araştırıldığı bu plakta boyutlar, $a = 0.4$ m $b = 0.3$ m olarak seçilmiştir. Bu 4/3'lük bir açıklık oranına karşılık gelmektedir. Bu katmanlı hibrit plakla yapılan deneyde üç noktadaki basınç duyargalarından elde edilen basınç verilerine uygun bir basınç fonksiyonu, iterasyonla belirlenen, aşağıdaki katsayılar kullanıldığında elde edilmiştir.

$$t_e = 0.0056 \text{ sn}$$

$$P_t = 60000 \text{ Pa}$$

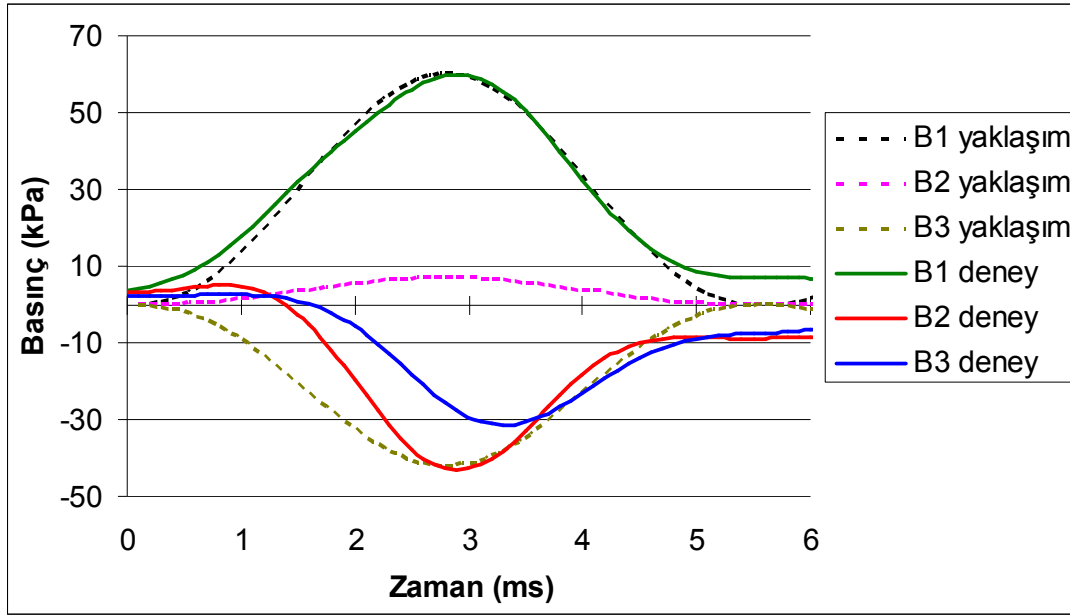
$$P_e = 46000 \text{ Pa}$$

$$u = 1.2$$

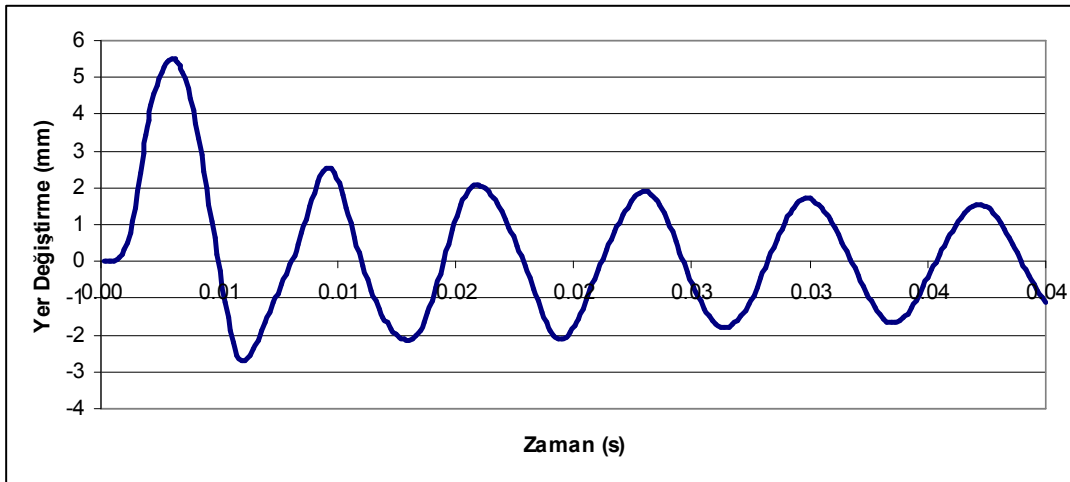
$$v = 1$$

$$w = 0.95$$

Bu parametreler kullanılarak elde edilen yaklaşım fonksiyonları ile plağın üç noktasından elde edilen basınç verilerinin uyumu Şekil 4.13'de gösterilmiştir.



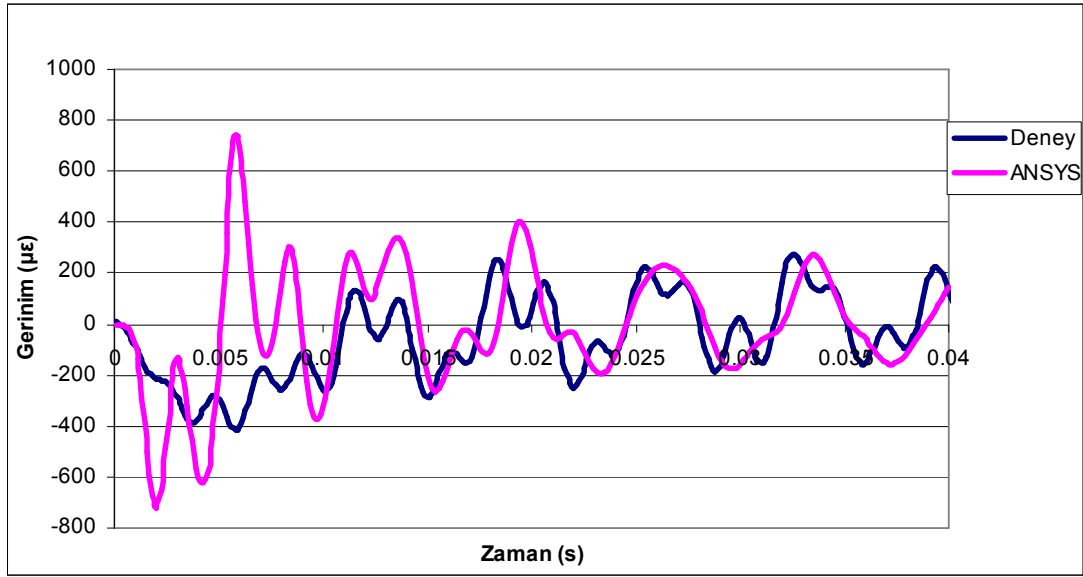
Şekil 4.13 : 40x30 cm plak için deneylerde elde edilen basınç eğrileriyle yaklaşım eğrilerinin uyumu.



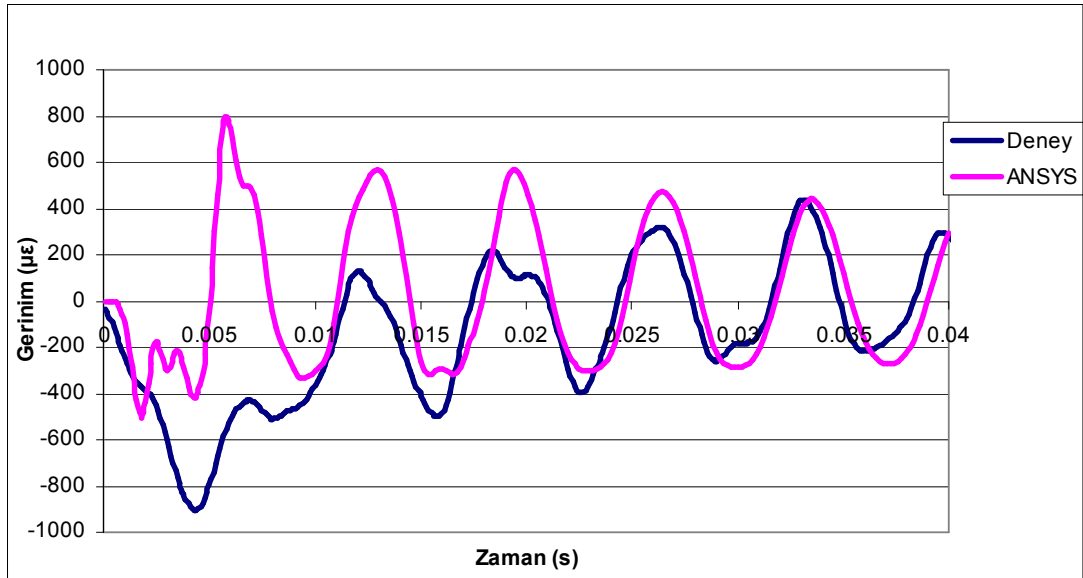
Şekil 4.14 : 40x30 cm plak için zamana göre yer değiştirmesi.

40x30 cm boyutundaki hibrit kompozit plağın sayısal analizlerinde elde edilen zamana göre yer değiştirme grafiği Şekil 4.14’de verilmiştir. Buradan görüldüğü gibi plağın maksimum çökmesi plak kalınlığının yaklaşık 2.74 katıdır.

40x30 cm boyutundaki hibrit kompozit plağın ön yüzündeki x ve y yönündeki gerinim eğrilerinin deney ve analiz karşılaştırmaları Şekil 4.15 ve 4.16’da verilmiştir.



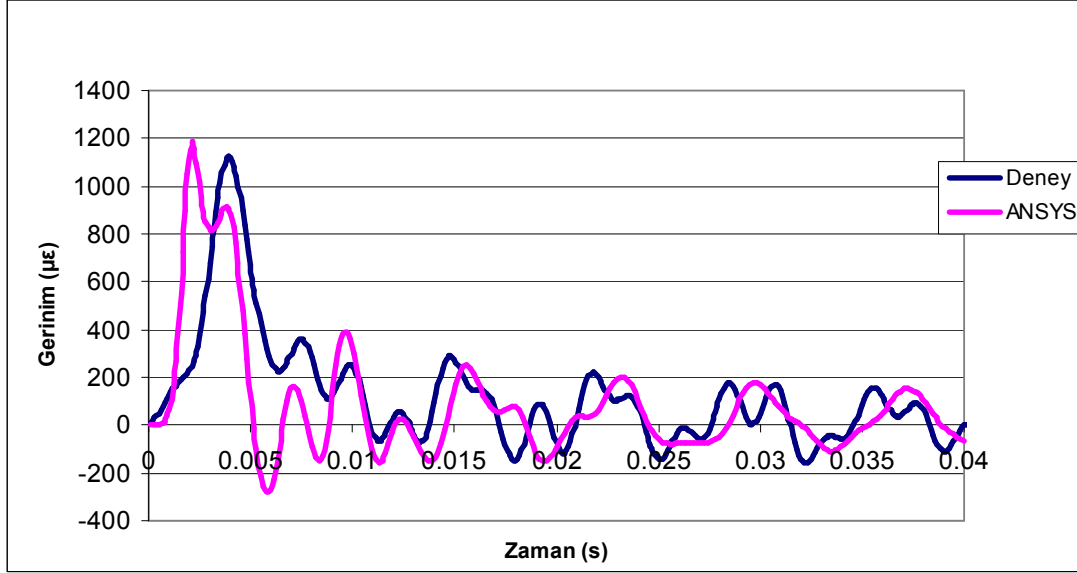
Şekil 4.15 : Plâgın A noktasının x yönündeki gerim karşılaştırılması.



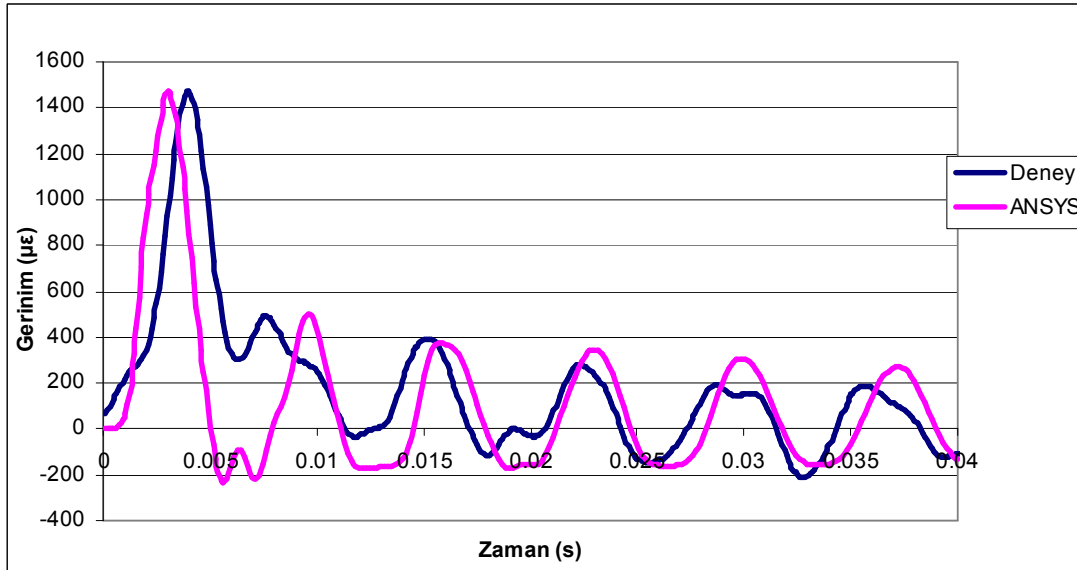
Şekil 4.16 : Plâgın A noktasının y yönündeki gerinim karşılaştırılması.

4/3 açıklık oranındaki bu plâgın ön yüzeyinin deney ve analiz sonuçlarında, anlık basınç yükünün ilk etki anındaki gerinim değerlerinde yine uyumsuzluk görülmektedir. 0-10 ms aralığında oluşan tepe noktalarındaki farkların, daha önce de ifade edildiği gibi, anlık basınç yükünün gerinim ölçeri olumsuz etkilemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Plâgın serbest titreşim yaptığı bölgede ise x ve y yönlerindeki uyumlar artmaktadır. Gerininin zamanla değişimi için elde edilen deneysel ve sayısal sonuçların incelenmesinden görülmektedir ki plâgın x ve y yönündeki gerinimleri büyük genlikli bir salınımın üzerine binmiş küçük genlikli bir salınım şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu durum birinci modun yanı sıra ikinci bir

modun da dinamik davranışa katkıda bulunduğunu göstermektedir. Şekillerden yüksek frekanslı modun x yönündeki gerinim üzerinde daha etkili olduğu anlaşılmaktadır. Plak ön yüzeyindeki deney ve analizdeki frekans uyumu oldukça iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 4.17 : Plakın B noktasının x yönündeki gerinim karşılaştırılması.



Şekil 4.18 : Plakın B noktasının y yönündeki gerinim karşılaştırılması.

Şekil 4.17 ve 4.18'de 40x30 cm boyutundaki hibrit kompozit plakın arka yüzeyinin orta noktasında x ve y yönündeki ANSYS yazılımıyla yapılan analizlerde ve deneylerde elde edilen gerinim değerlerinin karşılaştırmaları verilmiştir. Plak arka yüzeyindeki deney ve analizden elde edilen gerinim sonuçları birbirlerine oldukça uyumludur. Yüksek frekanslı modun etkisinin yine x yönündeki gerinim üzerinde

daha fazla olduğu görülmektedir. Plak arka yüzeyindeki anlık basınç yükünün etkisi sırasında oluşan gerinimin tepe noktalarındaki deney ve analiz değerlerinin x yönündeki farklılık oranı %5'tir. y yönünde ise deneysel ve sayısal sonuç arasında herhangi bir fark yoktur.

4.5.3 40x20 cm hibrit kompozit plağın geçici analiz sonuçları

Açıklık oranının 2 gibi yüksek bir değer aldığı bu dikdörtgen plağın boyutları $a = 0.4$ m ve $b = 0.2$ m şeklindedir. Yine üç basınç duyargasından elde edilen basıncın zamanla değişim verilerine, iterasyonla belirlenen aşağıdaki parametreler kullanılarak, bir anlık basınç yükü fonksiyonu uydurulmuştur.

$$t_e = 0.0041 \text{ sn}$$

$$P_t = 49000 \text{ Pa}$$

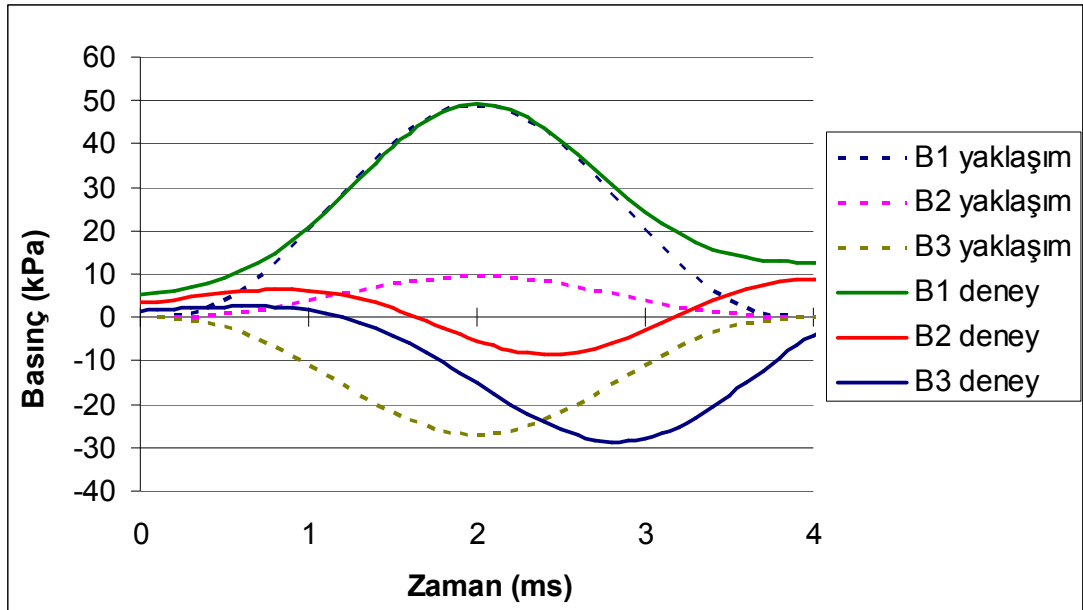
$$P_e = 30000 \text{ Pa}$$

$$u = 1.3$$

$$v = 1$$

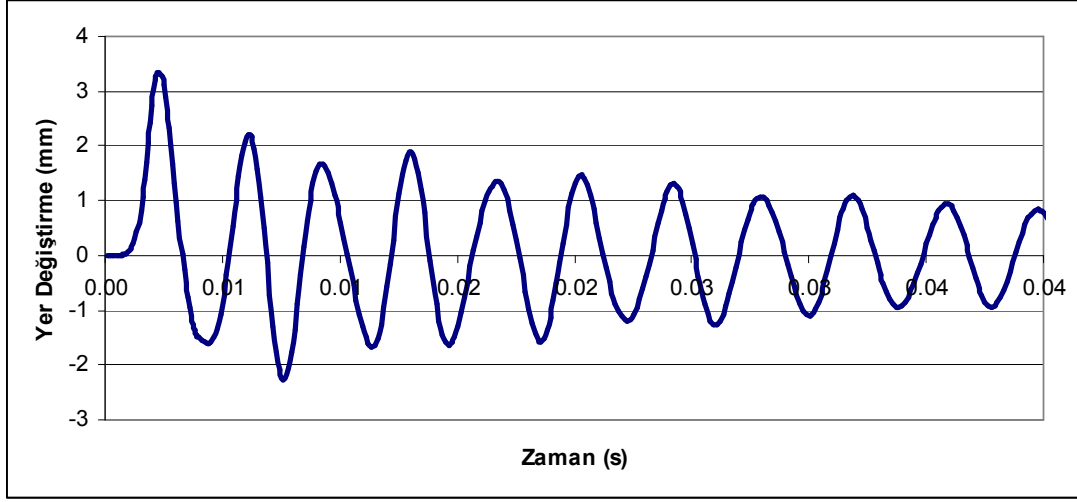
$$w = 1$$

Yaklaşım fonksiyonunun deneylerde plağın üç noktasından toplanan basınç verileriyle uyumu Şekil 4.19'da gösterilmiştir.



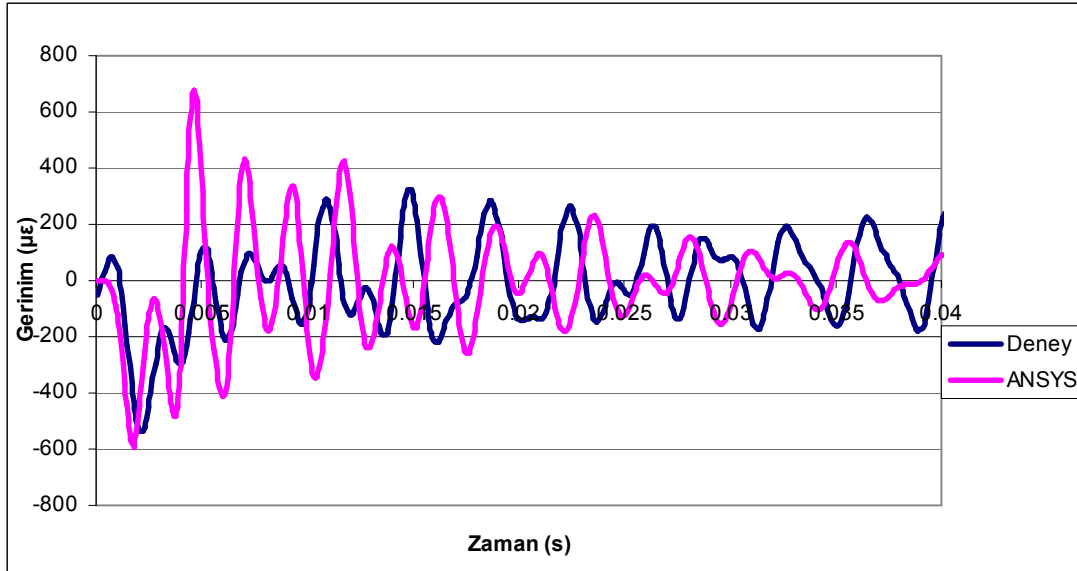
Şekil 4.19 : 40x20 cm plak için deneylerde elde edilen basınç eğrileriyle yaklaşım eğrilerinin uyumu.

40x20 cm boyutlarındaki hibrit kompozit plağın sayısal analizlerinde elde edilen zamana göre yer değiştirme grafiği şekil 4.20’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi maksimum çökme plak kalınlığının yaklaşık 1.66 katıdır.

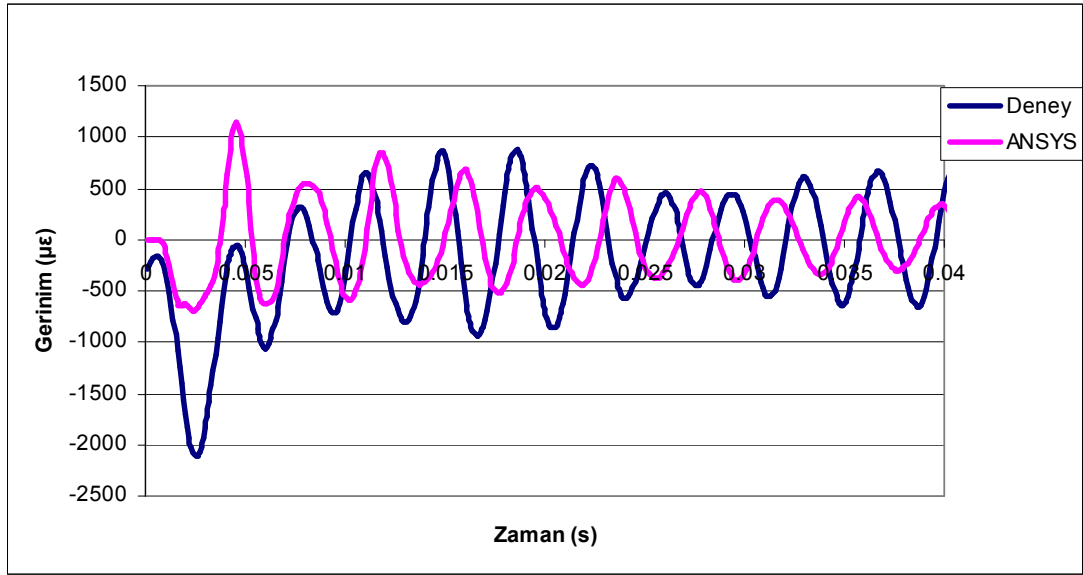


Şekil 4.20 : 40x20 cm plak için zamana göre yer değiştirmesi.

ANSYS yazılımı ile yapılan geçici analizden elde edilen plak ön yüzünün x ve y yönündeki gerinim değerleri deneyde elde edilen gerinim değerleriyle karşılaştırılmış ve, sırasıyla Şekil 4.21 ve Şekil 4.22’de verilmiştir.

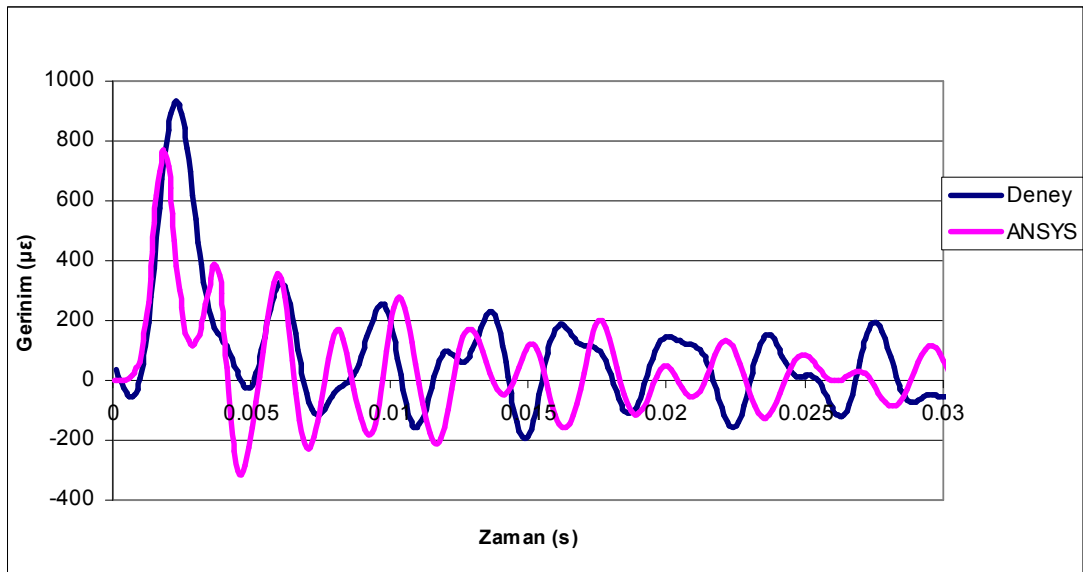


Şekil 4.21 : Plağın A noktasının x yönündeki gerinim karşılaştırılması.

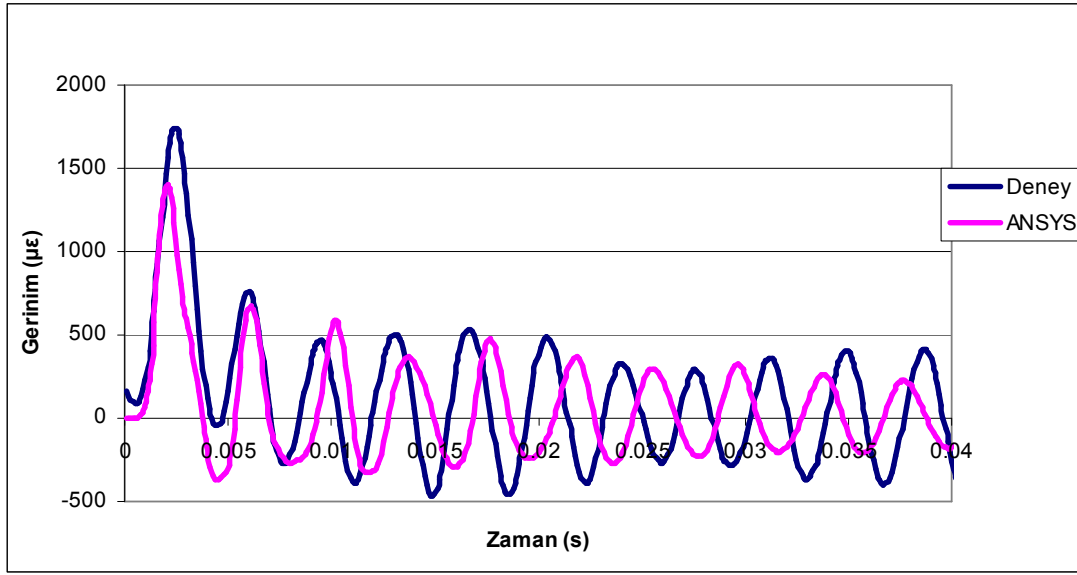


Şekil 4.22 : Plâgın A noktasının y yönündeki gerinim karşılaştırılması.

Diğer hibrit kompozit plaklarda olduğu gibi bu plakta da ön yüzeydeki x ve yönündeki sayısal ve deneysel sonuçlar uyumsuzdur. Yine anlık basınç yükünün etkisinden sonra plak serbest titreşime geçtiğinde deney ve analizdeki gerinim eğrilerinin uyumluluğu artmaktadır. Diğer dikdörtgen plaklarda olduğu gibi ön yüzeyin deney sonuçlarının y yönündeki gerinim grafiği oldukça düzenlidir. Fakat 0 -10 ms aralığında, anlık basınç yükü etkisiyle deney ve analizde oluşan gerinim tepe noktalarının değerlerinde uyumsuzluk görülmektedir ki bunun yüksek anlık basınç yükünün gerinim ölçere yaptığı olumsuz etkiden kaynaklandığı sanılmaktadır.



Şekil 4.23 : Plâgın B noktasının x yönündeki gerinim karşılaştırılması.



Şekil 4.24 : Plak B noktasının y yönündeki gerinim karşılaştırılması.

Şekil 4.23 ve 4.24’de 40x20 cm boyutundaki hibrit kompozit plağın arka yüzeyinin x ve y yönündeki, ANSYS ve deneyde elde edilen gerinim değerlerinin karşılaştırmaları verilmiştir. Plak arka yüzeyindeki deney ve analizden elde edilen gerinim sonuçlarında çok iyi bir uyum görülmektedir. Diğer plaklarda olduğu gibi x yönündeki zamana göre gerinim eğrisi davranışına yüksek frekanslı modun katkısı y yönündeki gerinime olan katkısından çok daha yüksektir. Plak arka yüzeyinde gerinim tepe noktalarındaki, deney ve analiz değerlerinin x yönündeki farklılık oranı %17, y yönündeki farklılık oranı ise %19’dur.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, anlık basınç yükü etkisi altındaki katmanlı hibrit kompozit plakların dinamik davranışları deneysel olarak incelenmiş ve ANSYS sonlu eleman yazılımı ile elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Deneysel çalışma için bir deney platformu tasarlanıp imal edilmiştir. Hibrit kompozit plaklarda kullanılacak kompozit kumaşların her birinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için çekme deneyleri yapılmıştır. 3 adet farklı açıklık oranlarına sahip hibrit kompozit plağın, dört kenarından ankastre sınır şartlarında anlık basınç yükü deneyleri yapılmıştır. Deneylerde plaklar, üzerine anlık basınç yükü etki ettirilerek plak üzerinden üç noktadan basınç değeri ve ön ve arka orta noktadan da gerinim değerleri ölçülmüştür. Deney sırasında plağa etki eden basınç dağılımına uygun basınç fonksiyonu uydurulmuştur. Plak üzerindeki basınç dağılımını en iyi ifade eden fonksiyon ANSYS yazılımında basınç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Fakat deneylerde elde edilen basınç dağılımına tam uyumlu matematiksel bir fonksiyon, deneysel sonuçların karmaşıklığı nedeniyle, uydurulamamıştır. Genellikle kenar noktadan toplanan basınç verileri, diğer noktalardan alınan basınç verileri arasında bir faz farkı oluşmaktadır. Bu nedenle üç noktadan toplanan basınç değerlerine ortak bir fonksiyon uydurmak oldukça güçtür.

ANSYS yazılımı ile yapılan analizlerden elde edilen gerinim değişimleri ile deneylerde elde edilen gerinim değişimleri genel olarak iyi bir uyum göstermektedir. Titreşim frekanslarında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Yüksek basıncın etki ettiği ilk 10 ms’de ön yüzdeki analiz ve deney sonuçlarının uyumsuz çıktığı görülmektedir. Bu sürede deneyden elde edilen gerinim değerlerinin analideki değerlere göre oldukça düşük kaldıkları görülmektedir. Bu safhadaki deneysel verilerin ön yüz itibari ile doğru olmadıkları ve bu duruma etki eden yüksek basıncın gerinim ölçere yaptığı olumsuz etkinin sebep olduğu kanaatine varılmıştır. Plak arka yüzlerinin gerinim değerlerinde ise deney ve analiz sonuçları oldukça iyi bir uyum göstermektedir.

Her bir plak için ANSYS’de kullanılan sönümleme katsayıları sonuçları önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Sönümleme ile ilgili viskoelastik etkilerin incelendiği bir çalışmanın yapılması faydalı olacaktır.

Anlık basınç yükü deneylerinin hazırlık aşamasının çok uzun olması ve birçok cıvatanın sıkılması sebebiyle zahmetli ve zaman alıcıdır. Her anlık basınç yükü denemesinde yüksek basınç tüpünün membranının değiştirilmesi gerekmektedir. Doğru değerlerin elde edilebilmesi için birçok deneme yapılması zorunludur. Deneylerde membran yırtılma karakteri doğrudan deney sonuçlarını etkilemektedir. Bu nedenle her deneme sonunda membran yırtılma karakteri kontrol edilmelidir. Ayrıca yırtılan membranın parçalanıp parçalanmadığı gözle kontrol edilmelidir. Eğer membranda parçalanma gözlemlenmişse plak üzerine çarpıp çarpmadığı deney verileri kontrol edilerek fark edilebilir. Yapılan deneyler sırasında membranın parçalanmaması için yırtılan yüzey önceden kuvvetli bir bantla bantlanarak önlem alınmıştır.

Ölçüm aletlerinin çok hassas olması nedeniyle hemen hemen her deneme sonunda kalibrasyon yapılması gerekmektedir. Herhangi bir hata diğer denemelerin sonuçlarını da hatalı elde edilmesine sebep olacaktır. Plagın çerçeve içinde kayıp kaymadığı her deneme sonunda kontrol edilmelidir.

Ayrıca hibrit kompozit plakların ANSYS sonlu eleman programında modellenebilmesi için birçok özelliğin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla mekanik özelliklerin belirlenebilmesi için çekme deneyleri yapılmıştır. Standartlara göre çekme deneylerinde her bir kompozit kumaş için en az beş farklı numuneden ölçüm yapılması gerekmektedir. Fakat zaman ve maliyet kısıtı nedeniyle her bir kompozit kumaş için üç adet numune üretilmiş ve çekme deneyleri yapılmıştır. Bu nedenle gerçeğe yakın mekanik özelliklerin elde edilememesi muhtemeldir.

Deneyisel çalışmalarda yer değiştirme ölçümü yapılmadığından sonuçlarda sadece ANSYS ve deneylerde elde edilen gerinim değerlerinin karşılaştırılmaları verilmiştir. Hibrit kompozit plaklar elle üretildiği için her bir plagın mekanik özelliği bir diğerine göre farklılık göstermesi muhtemeldir. Bu nedenle kullanılacak sertleştirici ve reçine ağırlığı iyi hesaplanmalı ve kumaşın her tarafına özdeş miktarda kullanılmasına dikkat edilmelidir. Kompozit kumaşların elyaf yönlenmelerine de dikkat edilmelidir. Ayrıca her bir hibrit kompozit plak aynı sıcaklıkta ve vakumda kürlenmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak deney ve ANSYS sayısal analizlerinden oldukça uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte ön yüzeyden toplanan gerinim ve basınç verilerinin daha sağlıklı toplanmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Ayrıca basınç dağılımını ifade eden yaklaşım fonksiyonları üzerinde çalışmalar yapılmalıdır. ANSYS'de kullanılan sönümleme katsayıları hakkında çalışma yapılmalıdır. ANSYS eleman kütüphanesinden farklı nonlinear kabuk elemanla analizler tekrarlanabilir. Diğer taraftan gelecekte yapılacak çalışmalarda mekanik özelliklerin tespiti için en az beş adet test numunesi kullanılabilir. Deneylerde kullanılacak gerinim ölçerler malzemeyle uyumlu temin edinilebilirse gerinim değerlerinde büyük ihtimalle daha uyumlu değerler toplanabilir. Plak üzerinde daha fazla basınç duyargası ve gerinim ölçer yerleştirilerek daha çok veriyle analizler karşılaştırılabilir. Bundan sonraki çalışmalarda aynı düzenek kullanılarak farklı sınır şartlarının etkisi, farklı malzeme kombinasyonları, farklı açıklık oranlarının karşılaştırılması ve nem-sıcaklık etkileri incelenebilir. Aynı zamanda yüksek basınç tüpüne renkli duman depolanması suretiyle plak üzerindeki anlık basınç yükü etkisiyle oluşan hava akımının davranışı incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Belingardi, G., Cavatorta, M.P. and Frasca, C.**, 2005: Bending Fatigue Behavior of Glass-Carbon/Epoxy Hybrid Composites, *Composites Science and Technology*, Vol. **66**, pp. 222–232.
- [2] **Chen, C. S., Chen, W. R. and Chien R. D.**, 2009: Stability of Parametric Vibrations of Hybrid Composite Plates, *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol. **28**, pp. 329–337.
- [3] **Hwang, S. F. and Mao, C. P.**, 2001: Failure of Delaminated Interply Hybrid Composite Plates Under Compression, *Composites Science and Technology*, Vol. **61**, pp. 1513–1527.
- [4] **Chen, C. S., Fung, C. P. and Chien, R. D.**, 2009: Analysis of An Initially Stressed Hybrid Plate Based on a Higher-Order Theory, *Composite Structures*, Vol. **88**, pp. 195–201.
- [5] **Avci, A., Sahin, Ö. S. and Ataberk, N.**, 2006: Thermal Buckling Behavior of Cross-ply Hybrid Composite Laminates With Inclined Crack, *Composites Science and Technology*, Vol. **66**, pp. 2965–2970.
- [6] **Şahin, Ö. S.**, 2005: Thermal Buckling of Hybrid Angle-ply Laminated Composite Plates With a Hole, *Composites Science and Technology*, Vol. **65**, pp. 1780–1790.
- [7] **Lee, Y. S., Kang, K. H. and Park, O.**, 1997: Response of Hybrid Laminated Composite Plates Under Low-Velocity Impact, *Computer & Structures*, Vol. **65**, no.6, pp. 965–914.
- [8] **Naik, N. K., Ramasimha, R., Arya, H., Prabhu, S.V. and ShamaRao, N.**, 2001: Impact Response and Damage Tolerance Characteristics of Glass-Carbon/Epoksi Hybrid Composite Plates, *Composites Part B Engineering*, Vol. **32**, pp. 565–574.
- [9] **Chen, C. S., And Fung, C. P.**, 2004: Non-linear Vibration of Initially Stressed Hybrid Composite Plates, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **274**, pp. 1013–1029.
- [10] **Harras, B., Benamar, R. and White, R. G.**, 2002: Experimental and Theoretical Investigation of the Linear and Non-linear Dynamic Behaviour of a Glare 3 Hybrid Composite Panel, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **252(2)**, pp. 281–315.
- [11] **Gee, J. D., Reinecke, W. G. and Levinson, S. J.**, 2005: Blast phenomena associated with high-speed impact, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **34**, pp. 178–188.
- [12] **Veldman, R. L., Ari-Gur, J. and Clum, C.**, 2008: Response of pre-pressurized reinforced plates under blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **35**, pp. 240–250.

- [13] **Mamalis, A. G., Spentzas, K. N., Pantelelis, N. G., Manolakos, D.E. and Ioannidis, M. B.,** 2008: A new hybrid concept for sandwich structures, *Composite Structures*, Vol. **83**, pp. 335–340.
- [14] **Yuen, S. C. K., Nurick, G. N.,** 2005: Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates.Part I: subjected to uniform blast load, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **31**, pp. 55-83.
- [15] **Langdon, G. S., Yuen, S. C. K., Nurick, G. N.,** 2005: Experimental and numerical studies on the response of quadrangular stiffened plates.Part II: localised blast load, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **31**, pp. 85-111.
- [16] **Jacinto, C. A., Ambrosini, D. R., Danesi, F. R.,** 2001: Experimental and computational analysis of plates under air blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **25**, pp. 927-947.
- [17] **Stoffel, M., Schmidt, R., Weichert, D.,** 2001: Shock wave-load plates, *International Journal of Solid and Structures*, Vol. **38**, pp. 7659-7680.
- [18] **Gantes, C. J., Pnevmatikos, N. G.,** 2004: Elastic-plastic response spectra for exponential blast load, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **30**, pp. 323-343.
- [19] **Lan, S., Lok, T. S. and Heng, L.,** 2005: Composite structural panels subjected to explosive loading, *Construction and Building Materials*, Vol. **19**, pp. 387–395.
- [20] **Çoğuz, B. A.,** 2006. Katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü altında dinamik davranışlarının deneysel incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [21] **Uyanık, H.,** 2006. Anlık basınç yükü etkisindeki katmanlı kompozit bir plağın titreşimlerinin aktif kontrolü, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [22] **Kazancı, Z.,** 2006. Anlık basınç yükü etkisi altındaki katmanlı kompozit bir plağın lineer olmayan dinamik davranışı, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [23] **Türkmen, H. S. and Mecitoğlu, Z.,** 1999: Dynamic response of a stiffened laminated composite plate subjected to blast load, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **221**, pp. 371–389.
- [24] **Batra, R. C., Hassan, N. M.,** 2008: Blast resistance of unidirectional fiber reinforced composites, *Composites: Part B*, Vol. **39**, pp. 513-536.
- [25] **Wei, J., Dharani, L. R.,** 2005: Fracture mechanics of laminated glass subjected to blast load, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. **44**, pp. 157-167.
- [26] **Bahei-El-Din, Y. A. and Dvorak, G. J.,** 2008: Enhancement of blast resistance of sandwich plates, *Composites: Part B*, Vol. **39**, pp. 120–127.

- [27] **Özdemirli, E.**, 2006. Anlık basınç yükü etkisindeki kompozit sandviç plağın dinamik davranışının deneysel ve sayısal incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [28] **Librescu, L., Oh, S. Y. and Hohe, J.**, 2004: Linear and non-linear dynamic response of sandwich panels to blast loading, *Composites: Part B*, Vol. **35**, pp. 673–683.
- [29] **Baş, A., Kazancı, Z., Mecitoğlu, Z.**, 2007. Nonlinear response of a sandwich plate subjected to blast load, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Seattle, Washington, USA, November 11-15.
- [30] **D 3039/D 3039M-08**, 2008. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, *ASTM Standards*, West Conshohocken, USA.
- [31] **Guide to Composites**, *SP Systems*, Newport, Isle of Wight, United Kingdom.
- [32] **Technical Information: Epoxy And Phenolic Resins**, 2006. *Hexion Specialty Chemicals*, Stuttgart, Germany.
- [33] <http://www.rdpe.com/ex/hiw-sglc.htm>, alındığı tarih 12.04.2008.
- [34] VXI Technology Inc. EX1629 48-Channel Strain Gage Instrument User's Manual.
- [35] DAC Express Documentation Release 3.4.
- [36] MTS 322 Load Units Manuel.
- [37] Kulite Thin Line Is Pressure Transducer Manuel.
- [38] http://www.tml.jp/e/pruct/strain_gauge/list/f_list.html, alındığı tarih 12.04.2008.
- [39] **Ömercikoğlu, A.**, 2009. Metal katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü altındaki dinamik cevabının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [40] ANSYS 11.0 Documentation.

EKLER

EK A.1 : D 3039/D 3039M-08 Kodlu ASME Standartı

EK A.2 : DAC Express Programı Tanıtımı

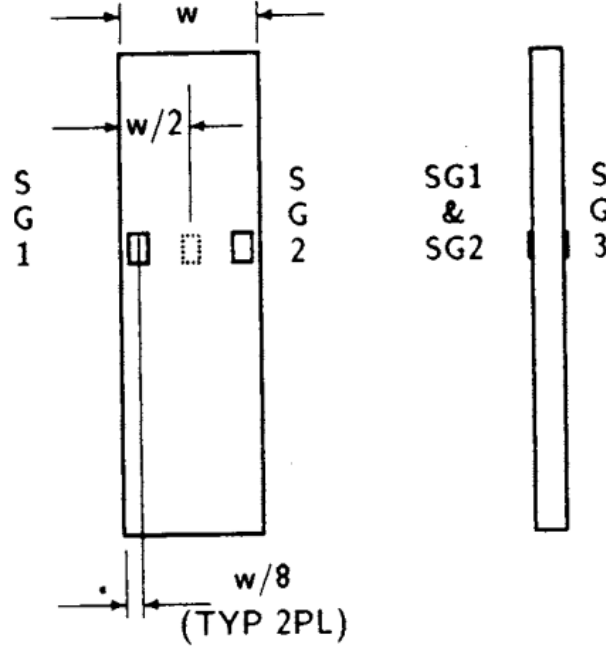
EK A.3 : MTS Cihazı Kullanımı

EK A.1

0°/90° yönlerinde katmanlanmış kompozit numunelerde D 3039/D 3039M-08 kodlu ASME standartı kullanılmıştır. Bu standartta çekme deney hakkında ayrıntılı bilgi verilmektedir [30].

Standartta ilk olarak deneylerde dikkat edilecek konulardan bahsedilmiştir. Bu bağlamda öncelikli olarak deney numuneleri üretilirken tüm numunelerin özdeş üretiminin sağlanması gerekmektedir. Tüm numuneler aynı boyut, tüm bölgelerindeki kalınlıklar, kumaş yönü ve aynı sayıda katmana sahip olmalıdır. Üretim esnasında kompozit kumaş yönleri doğru yapılmalı, kompozit kumaşların reçineye yeteri kadar yatırılmasına dikkat edilmeli ve numunelerin şekil verme işlemleri esnasında yapraklanmaya uğramasından kaçınılmalıdır. Numunelerin çekme makinesine bağlantısının yapılması esnasında çeneleri sıkma basıncı iyi ayarlanmalıdır. Uygun olmayan sıkma basınçlarında numunenin erken kopmasına veya çeneden kaymasına neden olabilir. Numunenin çekme makinesine montajı yapılırken eğilme momenti oluşmaması için iki çeneye de aynı hızda monte edilmesine dikkat edilmesi gerekmektedir. Çekme makinesinin iki adet kafa mekanizması olması gerekmektedir. Bunlardan biri sabit diğeri de hareketli olmalı ve hareketli mekanizma sabit mekanizmaya göre hız ayarı yapılabilmesi gerekmektedir. Çekme makinesinde uygulanan yükü kuvvet göstergelerinde $\pm 1\%$ doğrulukta izlenebilir ve kontrol edilebilir olmalıdır. Numunelerin çenelerden kaymalarını engelleyebilecek kadar güçte sıkma basıncına sahip olması gerekmektedir. Her bir numune iki adet ön yüze bir adet de arka yüze gelecek şekilde toplam üç adet aynı özelliklere sahip gerinim ölçer yapıştırılmalıdır. Kompozit numunelerin özelliklerine uygun ölçüm yapan gerinim ölçerler seçilmelidir. Ön yüze yapıştırılmış gerinim ölçerlerden birinin uzunlamasına diğeri de yanlamasına yapıştırılması gerekmektedir. Arka yüze yapıştırılan gerinim ölçerin ön yüze yapıştırılmış iki gerinim ölçerin ortasına yapıştırılması gerekmektedir. Böylece deney numunesinin çekme makinesine bağlantısında eğrilik açısından herhangi sorun olup olmadığı ve eğilme gerinimlerini kontrol edilebilecektir. Şekil A.1’de gerinim ölçerlerin yapıştırılma yerleri gösterilmiştir. Gerinim ölçerler yapıştırılırken deney numunesinin yüzeyine kesinlikle zarar verilmemelidir. Eğer elastisite modülü hesaplanacaksa uzunlamasına ve enlemesine gerinim ölçerlerden aynı anda ölçüm

alınmalıdır. Bu şekilde aynı anda alınan ön ve arka yüzlerdeki verilerle eğilmeden kaynaklanabilecek problemlerin tespiti ve düzeltilmesi yapılabilir. Isınma problemi yaşanmaması için gerinim ölçer dirençleri ve çalışma ortamına dikkat edilmelidir.



Şekil A.1 : Gerinim ölçerlerin yapıştırma yerleri [30]

Ayrıca gerinim ölçerlerin minimum uygun çalışma voltajları minimum gage çalışma voltajına göre ayarlanmalarına dikkat edilmelidir. Bununla birlikte çalışma laboratuvarının ortam şartlarına dikkat edilmesi gerekmektedir. Eğer deneyler laboratuvar ortamında yapılamıyorsa deney ortamı laboratuvar şartlarına uygun simule edilmeli sıcaklık, nem gibi etmenler göz önünde bulundurulmalıdır.

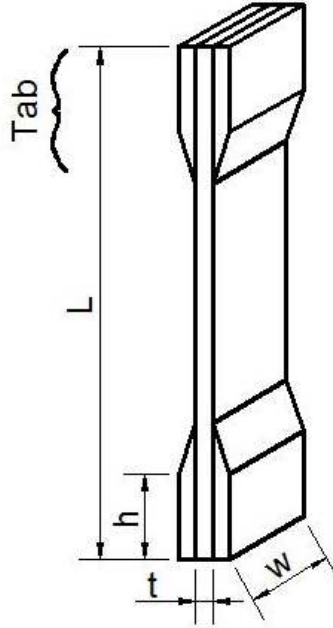
Deneylerden doğru sonuçlara ulaşabilmek için en az beş adet test numunesinin deneye tabi tutulması gerekmektedir. Deney numunelerinin geometrisi konusunda bir kesinlik yoktur. Sonuca etkisi yüksek olan geometrik şekil belli olmamakla birlikte numunenin çekme makinesine bağlantı yerlerinin daha özenli üretilmesi gerekmektedir. Bu bölgelerin şekli konusunda her test merkezinin kendine özel tasarımları mevcuttur. Tab olarak adlandırılan bu kısım Şekil A.2’de gösterilmiştir. Ayrıca her farklı malzemede numune geometrisinin değişmesi de gerekebilir. Amaca en uygun tasarımın elde edilebilmesi için birçok deney yapıp bunların optimize edilmesi gerekmektedir. Deney numunelerinin boyutları konusunda da kesin bir standart bulunmamaktadır. Önemli olan çekilen kısımdaki- iki çene arasında kalan kısım- numune boyutunun tüm numune boyutuna göre uygun olmasıdır. İki çene

arasında kalan kısmın çeneye bağlantısı esnasında eğilme oluşturmayacak uzunluğa sahip olması gerekmektedir. Ayrıca gerilmeye maruz numune bölgesinin yetersiz kalacağı kadar kısa olmasından kaçınılmalıdır. Standartta belirtilen deney numunesi için bazı geometrik öneriler Çizelge A.1’de verilmiştir. Deney numunelerinde tab kullanmak zorunlu değildir.

Çizelge A.1 : Önerilen bazı deney numune boyutları [30].

Kumaş Yönü	Genişlik (mm)	Toplam Uzunluk (mm)	Kalınlık (mm)	Tab Uzunluğu (mm)	Tab Kalınlığı (mm)
0° tek yönlü	15	250	1	56	1.5
90° tek yönlü	25	175	2	25	1.5
Simetrik	25	250	2.5	-	-
Rasgele-Süreksiz	25	250	2.5	-	-

Tablar genellikle erken kopmaların önlenmesi amacıyla kullanılırlar. Fakat deney numunesi boyutları, malzeme özellikleri, çekme kuvveti ve çenelerin baskı basınçları tabın kullanılması konusunda kritik faktörlerdir. Aynı zamanda bazı testler için kompozit deney numunelerinin kumaş yönlerinde çene basıncı nedeniyle oluşabilecek zararlardan kaçınmak için de tab kullanılabilir.



Şekil A.2 : Standartta belirtilen tablı deney numunesi [30].

Tablar numuneden ayrı farklı bir malzeme olabilir. Deney numunesiyle bütün olarak üretilmesi zorunlu değildir. Tab geometrisi için kesin bir standart olmamakla birlikte deney numunesine yapıştırılması da zorunlu değildir. Ayrı bir parça olarak numune ile çene arasına yerleştirilebilir. Tabların yapıştırılmasız kullanılması durumlarında numune ile tab arasındaki yüzeyin kaygan olmaması için bir zımpara veya yüzeyi pürüzlü bir bez numune ile tab arasında kullanılmalıdır. Yapıştırılarak kullanılacak tablarda genellikle $0^{\circ}/90^{\circ}$ yönlenmesinde cam kumaşı kullanılmaktadır. Bu gibi durumlarda tablar kuvvet yönüne 45° açı yapacak şekilde monte edilmelidir. Eğer tab deney numunesine yapıştırılacak ise minimum tab boyutlarının hesaplanması için standartta denklem mevcuttur. Tab uçlarının açıları da 7° veya 90° olarak standartta önerilmiştir.

Çekme deneyinin yapılma aşamaları standart özetle aşağıdaki gibi anlatılmıştır:

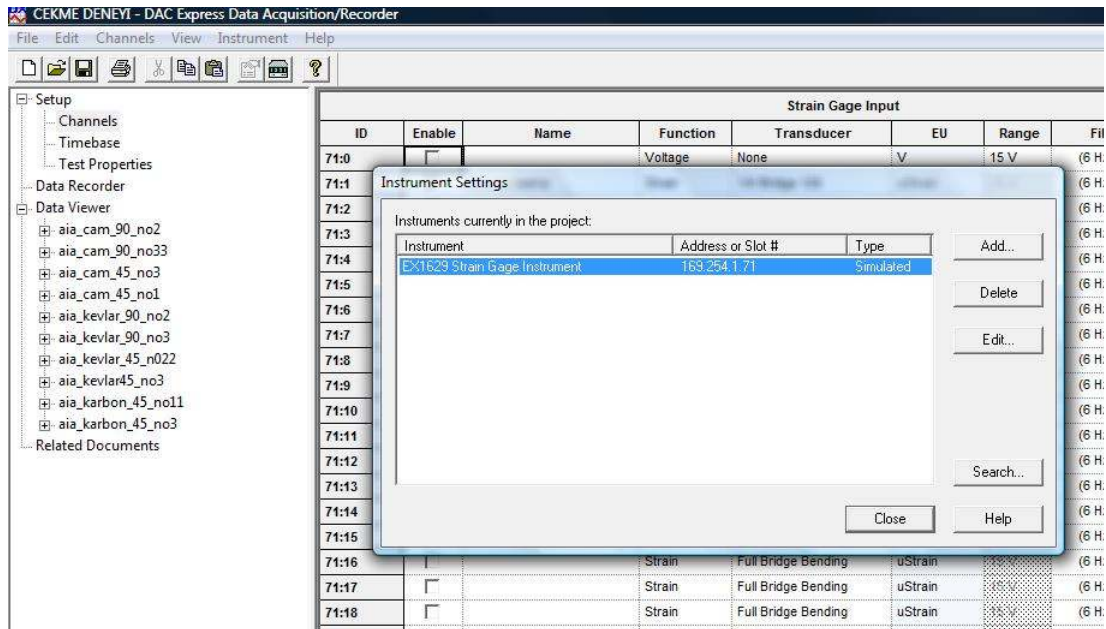
- İlk olarak tüm deney numunelerinin fiziki durumları raporlanması gerekmektedir. Numunelerin gerinim ölçer bölgelerinin kalınlıkları ve yanal alanları hesaplanmalıdır.
- Test hızı numuneye ve uygulanacak çekme kuvvetine göre ayarlanmalıdır. Bu bağlamda test süresince numuneye yaklaşık olarak sabit gerinim uygulayacak çekme kuvveti belirlenmelidir. Numunenin kopmasının 1-10 dakika içinde gerçekleşmesi istenmektedir.
- Standart olarak çekme makinesinin kafasının 2 mm/dakika yer değiştirme hızında olması uygundur.
- Test ortamında nem ve sıcaklığa dikkat edilmeli ve mümkün olduğunca tüm denemeler aynı ortam şartlarında gerçekleştirilmelidir.
- Deney numunesi çenelere bağlantısında eğik bağlantıdan kaçınılmalıdır. Uzun eksen yönünde çekme gerçekleştirilmelidir.
- Elastisite modülü hesaplamasında en az bir deney numunesinin iki yüzünden de aynı anda alınan gerinim verileri kullanılarak yüzde eğilme hesaplanarak doğrulama yapılmalıdır.
- Deney sırasında saniyede minimum 2-3 veri alınması ve tüm deneme esnasında da toplam minimum 100 veri alınması önerilmektedir.

EK A.2

DAC Express programıyla VXI-EX1629 veri toplama cihazından alınan verilerin, gerinme ve basınç değerlerine çevrilmesi için kullanılmıştır. Yüksek hızlarda farklı ölçümleri aynı anda kısa sürede yapabilir [35].

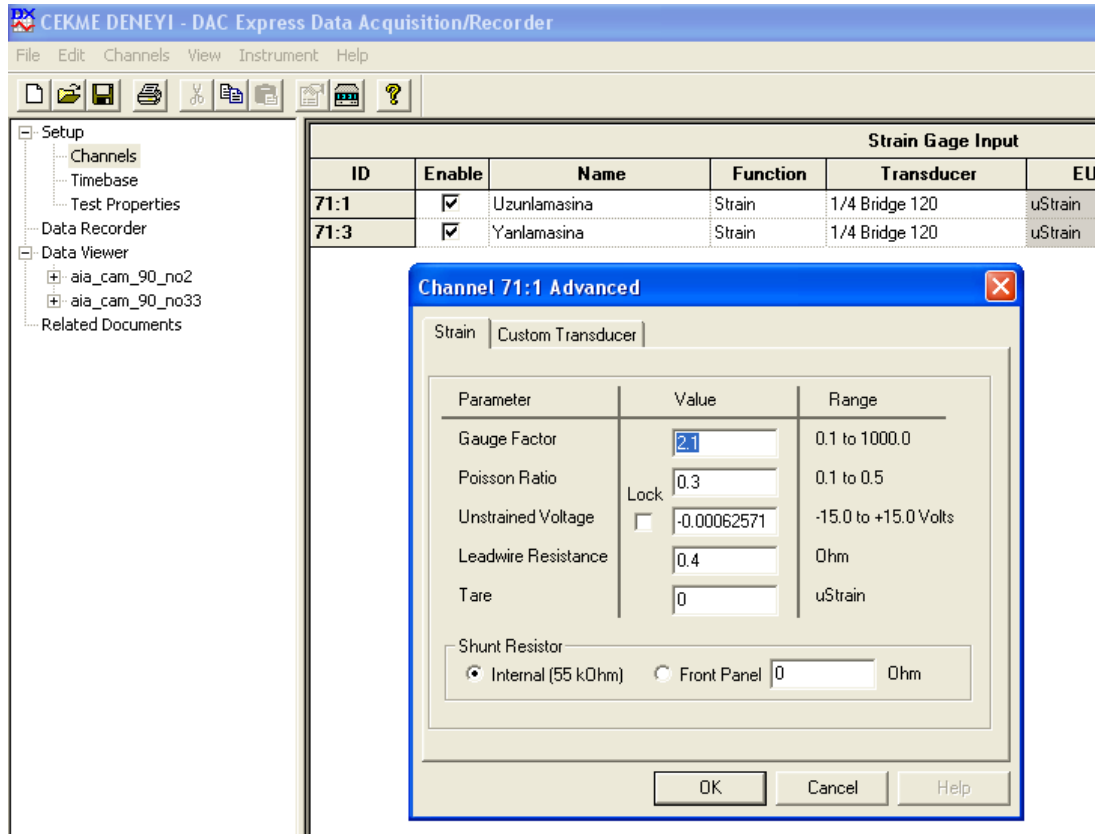
Programın kullanımında kullanıcı için programlama kabiliyetine gerek yoktur. Donanımın ayarlanması, algılayıcının (transducer) şartlandırılması, ölçüm ayarlarının yapılması ve verilerin oluşturulması programın ara yüzü sayesinde kolaylıkla yapılabilmektedir.

Program kurulduktan sonra “Instrument Settings”den çekme deneyinde kullanılacak VXI-EX1629 cihazı tanıtılır. Şekil A.3’de tanıtma ekranı gösterilmiştir.



Şekil A.3 : DAC Express'e EX-1629 cihazının tanıtılması.

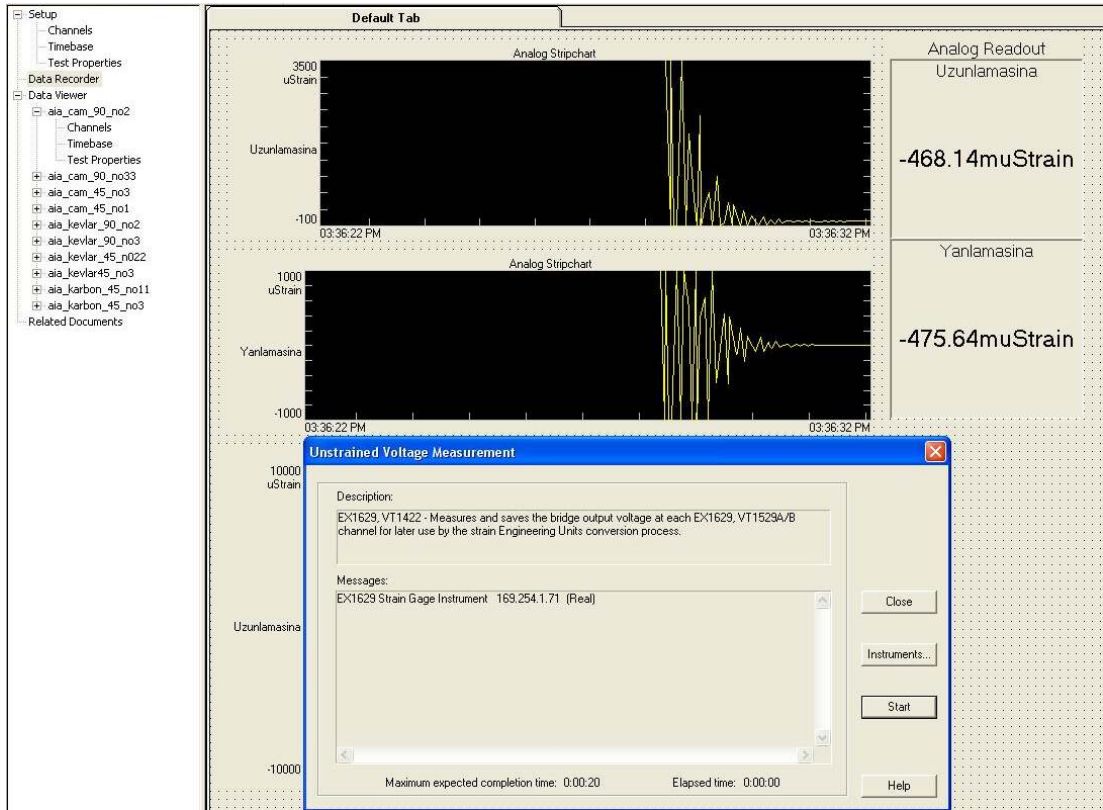
Veri toplama cihazı programa tanıtıldıktan sonra veri toplanacak kanalların ayarlanması gerekmektedir. Bu nedenle kaç tane kanal ve ne tür özellikte gerinim ölçerler kullanılacaksa bunların özellikleri programa girilir. Şekil A.4’de bu bilgilerin girildiği ara yüz gösterilmektedir.



Şekil A.4 : Gerinim ölçerlerin parametrelerinin programa girilmesi.

Gerinim ölçerlerden alınacak verilerin doğru hesaplanabilmeleri için önemli olan şu bilgiler programa girilmelidir: “Gauge Factor”, Poisson oranı, kablo dirençleri. Bu değerler kanal bilgilerinin girildiği satırdaki “Advance” sekmesine tıklanılarak açılan ara yüze kolaylıkla girilebilir.

Daha sonra programın sol panelinde bulunan sekmelerden “Timebase” seçilerek bu sekmede deneyde ölçüm yapılması istenilen zaman aralıkları, tarama periyodu ve tarama sayısı girilir.

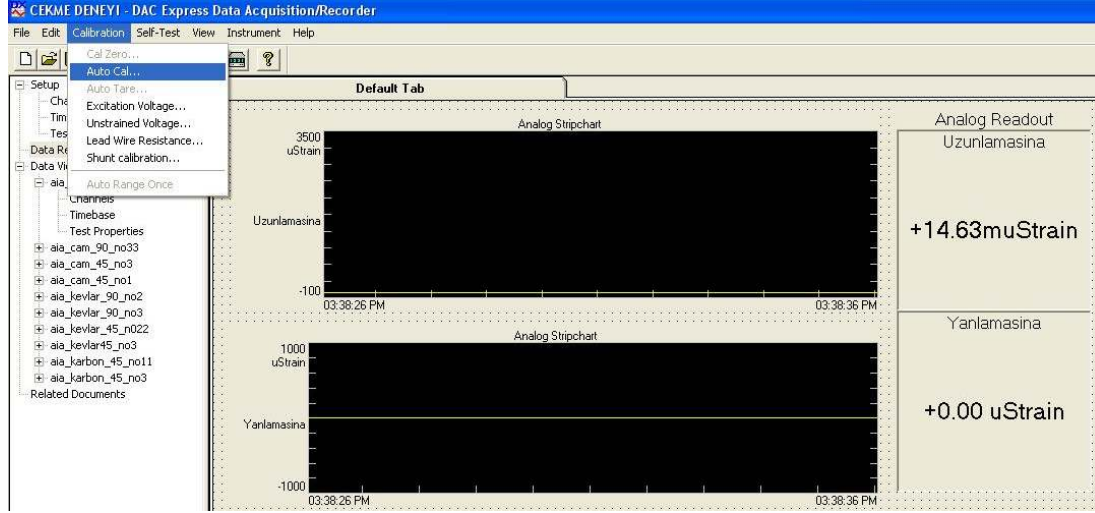


Şekil A.5 : “Unstrained Voltage” kalibrasyon ara yüzü.

Kullanılacak gerinim ölçerler VXI-EX1629 cihazında programlanmış kanallara Ethernet kabloları takıldıktan sonra çeşitli kalibrasyon işlemleri yapılmalıdır. Öncelikli olarak numunelere yapıştırılmış gerinim ölçerlerin kablolarının ve bağlantısının doğruluğu kontrol edilmesi amacıyla numuneler test makinesine bağlanmadan DAC Express programıyla bir kalibrasyona tabi tutulur. “Calibration” sekmesinden “Unstrained Voltage” kalibrasyonu yapılır. Eğer kablo bağlantısında veya gerinim ölçerlerde bir sorun varsa bu aşamada fark edilmesi sağlanır. Kalibrasyon yapılırkenki ara yüz Şekil A.5’de gösterilmektedir. Onun haricinde eğer kalibrasyon sonunda programda sabit küçük boyutlarda gerinim verileri görülüyorsa deney numunesi çekme makinesine bağlanabilir. Deney numunesi çekme makinesine düz şekilde bağlandıktan sonra bu sefer yine “Calibration” sekmesindeki “Auto Cal” ile otomatik kalibrasyon yapılmalıdır. Bu kalibrasyon sonunda da gerinimlerde çok büyük salınımlar yoksa deneye geçilebilir. “Auto Cal” sekmesi Şekil A.6’da görülmektedir.

Her iki kalibrasyon sonunda gerinim verilerinde istenilen küçük sabit salınımlar elde edilemiyorsa, bağlantı kabloları ve numune üzerine yapıştırılmış gerinim ölçerlerin bağlantıları kontrol edilmelidir. Kalibrasyon sırasında çekme makinesinin numuneye

herhangi bir kuvvet uygulamaması gerekmektedir. Aynı zamanda deney odasındaki gürültü ve bağlantı kablolarının uzunluğu ve direnci de verilerin doğruluğu doğrudan etkilemektedir.

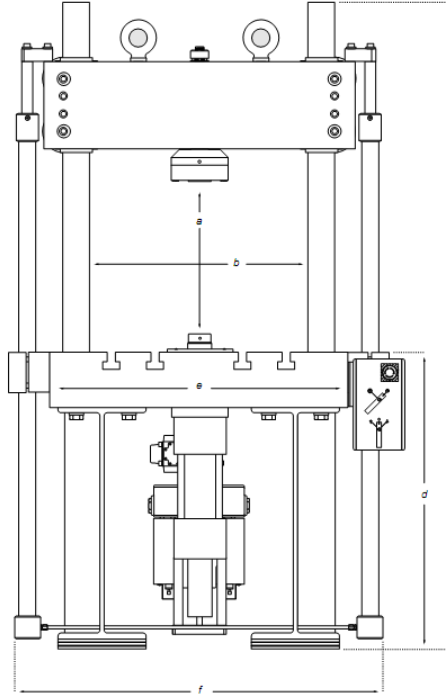


Şekil A.6 : "Auto Calibration" ara yüzü.

Tüm kalibrasyonlar ve doğrulamalar yapıldıktan sonra programın sol panelinde bulunan sekmelerden “Data Recorder” seçilir. Ve çekme makinesiyle aynı anda kayıt alınmaya başlanır. Deney süresi daha önceden programa girilebilir veya kullanıcının kontrolünde de olabilir. Burada yine amaca yönelik olarak mevcut deney numunelerinin tam koparılması süresince veya gerekli verilerin toplanasına kadar süreçte deney devam ettirilebilir. Deney bittikten sonra kayıt ekranına sağ tuş tıklayıp toplanan veriler istenilen uzantıda kaydedilebilir [35].

EK A.3

Genel Yorulma Test sisteminde ana eksen: ± 100 kN, çekme, basma, çekme-basma, eğilme, burkulma testleri yapılabilmektedir. Yanal eksen: ± 25 kN kapasiteli olup yanal eğme, burma veya eğilmeli burulma testleri yapılabilmektedir. Ayrıca sistem -110°C ila $+ 315^{\circ}\text{C}$ aralığında çalıştırılabilen bir iklimlendirme odasına sahiptir. MTS test sisteminin genel boyutları Çizelge A.2’de verilmiş olup Şekil 2A.7’da gösterilmiştir [36].



Şekil A.7 : MTS test sisteminin ölçülerinin görünüşü ve boyutları [36].

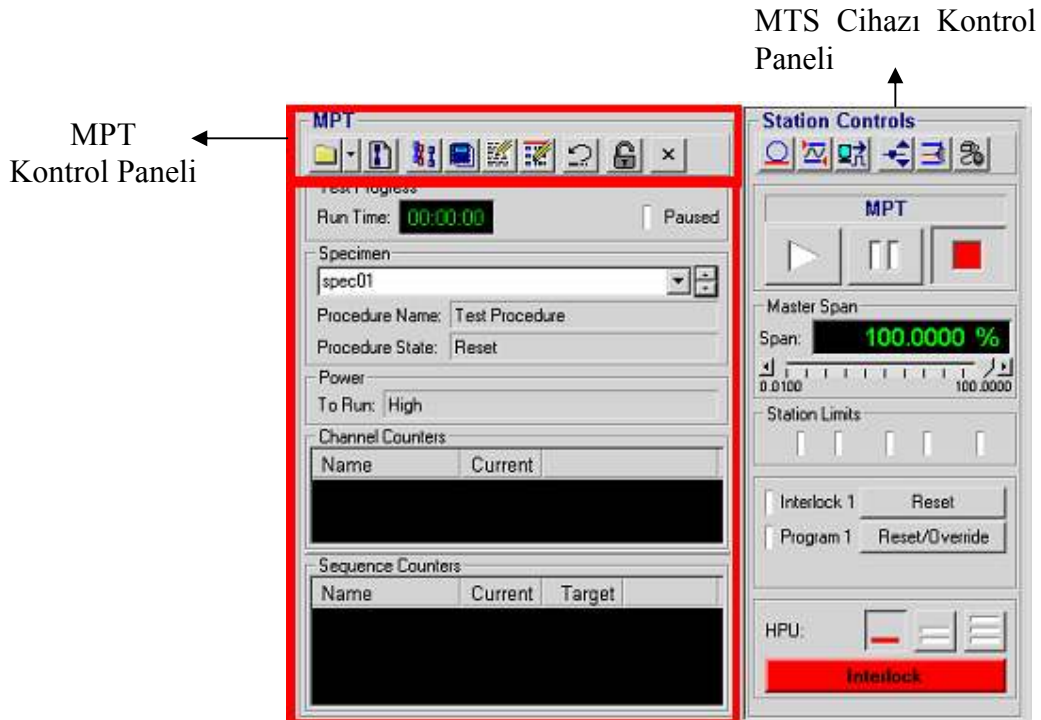
Çizelge A.2 : MTS test sisteminin genel bilgileri [36].

Genel Bilgiler	Model 322
Yükleme kapasitesi	100kN
Maksimum Numune Boyutu (a)	1270mm
Kolonlar Arası Genişlik (b)	533mm
Kolonların Uzunluğu (c)	2489mm
Tabla Yüksekliği (d)	838mm
Tabla Genişliği (e)	711mm

Aynı zamanda çekme deneyleri için kullanılacak olan sistemde çenelerin özellikleri de önem arz etmektedir. Mevcut olan hidrolik kama çeneler (wedge grips) numunenin kolay monte edilip çıkarılabilmesine olanak sağlar ve malzeme özelliğine göre sıkma basıncının ayarlanabilir özellikleri bulunmaktadır. MTS cihazında kullanılan kama çene sistemi Şekil A.8’de gösterilmiştir.



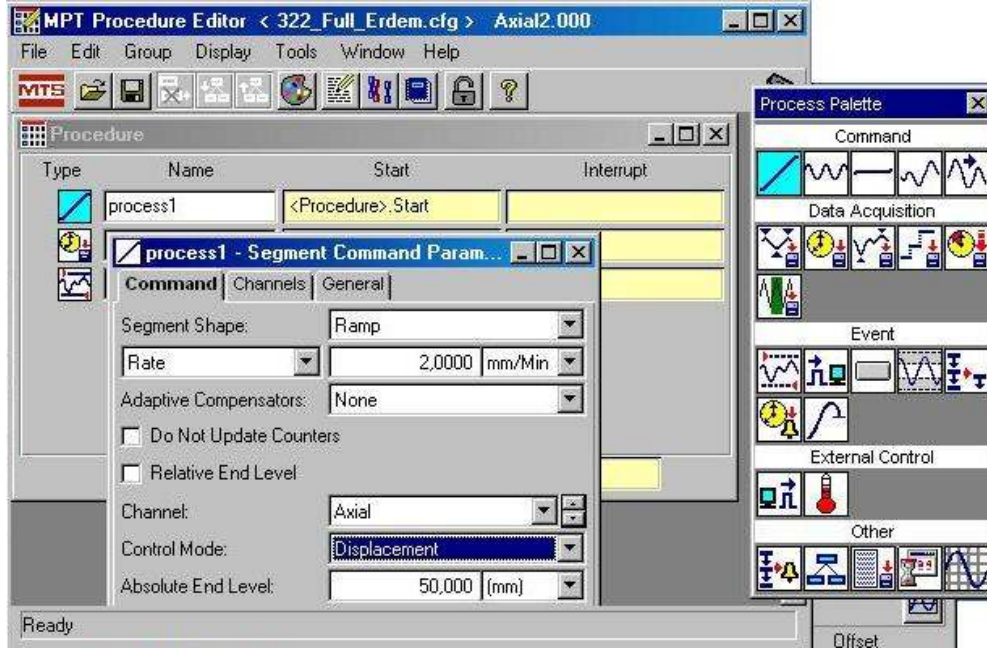
Şekil A.8 : MTS test cihazının "Wedge Gripsleri."



Şekil A.9 : MPT süreç editörü penceresi.

Çekme deneylerinde MTS test sisteminin kontrol edilmesi ve toplanan verilerin işlenmesi için kendi yazılımı kullanılmıştır. “MPT Procedure Editor” penceresinden deney süreçleri tanımlamaları yapılır. Süreç paneli Şekil A.9’da gösterilmiştir.

Programa ilk önce deneyle ilgili her süreç (process) “Procedure Palette” ile girilir. Bu ara yüzde çekme deneyleriyle ilgili olan örnekleme hızı, frekansı ve çekme kuvveti limiti girilecektir.

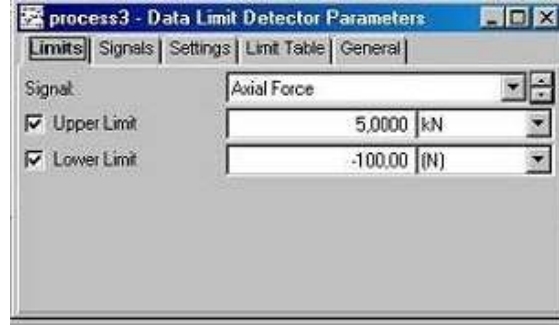


Şekil A.10 : Örnekleme hızı penceresi.

Programlama yapılırken ASTM standartlarından D3039/D 3039/M-08 göz önünde bulundurulmuştur. Bu standarda göre örnekleme hızı programa girilir. Standartta bu oran 2 mm/dakika olarak belirtilmiştir [30]. MTS makinesi böylece dakikada 2 mm çekecek şekilde ayarlanmış olacaktır. Şekil A.10’de örnekleme hızının girildiği pencere gösterilmektedir. Bu pencerede örnekleme hızı, şekli ve örnekleme hızının hangi parametreye göre kontrol edileceği seçilir. Seçilen bu parametreye göre deney numunesi test sırasında oluşacak gereğinden fazla veya uzun süre yüke maruz kalmasından sakınılmış olunur.

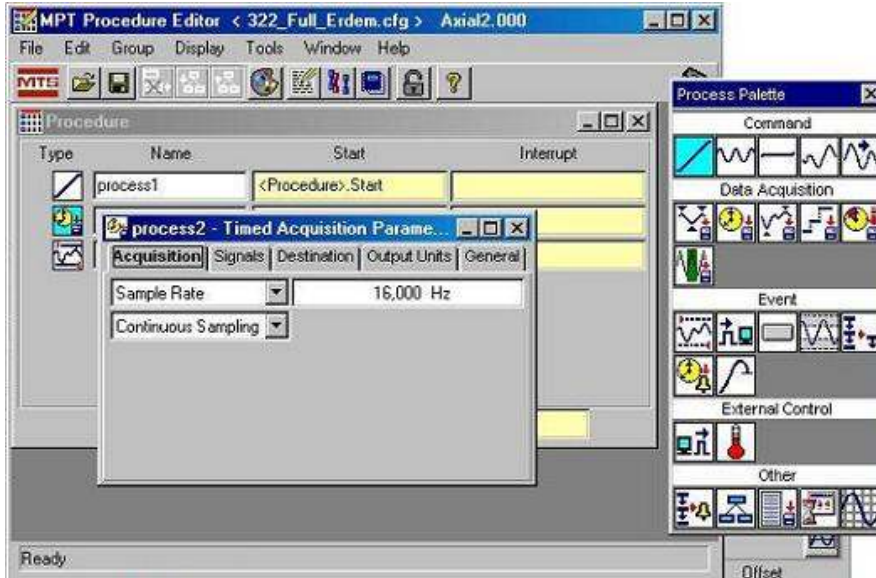
Deney numunesinin mekanik özelliklerine göre de çekme kuvveti limiti programa girilmelidir. Eğer beklenenden erken kopma gerçekleşirse çekme makinesi kendiliğinden işleme son verebilmesi gerekmektedir. Bu yüzden üst ve alt limit programa girilir. Kuvvetin yönü de bu pencerede belirlenebilir. Sonuç olarak yapılan birkaç deneme sonunda üst limit olarak 5 kN, alt limit olarak da -100N girilecektir.

Kuvvet yönü de eksenel yönde tanımlanır. Şekil A.11’de limitlerin girildiği pencere gösterilmektedir.



Şekil A.11 : Çekme kuvveti limiti penceresi.

Deney sırasında toplanacak verilerin yeterli ve anlamlı olması için veri toplama frekansı belirlenmelidir. Deneyin süresi boyunca anlamlı sonuçlar elde edilebilmesi için saniyede toplanacak veri sayısı belirlenir. Yapılan çekme deneyinde programa 16 kHz değeri girilmiştir. Şekil A.12’de frekans belirleme penceresi gösterilmektedir.



Şekil A.12 : Frekans belirleme penceresi.

Program, deneye başlanması için hazır olduktan sonra deney numunesinin çenelere bağlantısı yapılır. Çenelere bağlantı yapılırken standartlarda belirtilen uyarılara dikkat edilmelidir. Bağlantı esnasında deney numunesine eğim vermemeye özen gösterilmelidir. Standartlardaki uyarılar göz önünde bulundurularak iki çene arasında kalacak numune boyu ayarlanmalıdır. Bu bağlamda deney öncesinde asıl deneye geçmeden birkaç deneme yapılmalıdır. Yapılan deneyler sonucunda deney numunesi

çenelere montajı yapılır. MTS test cihazı programda “Manual Command” sekmesiyle kontrol edilerek deney numunesinin montajı gerçekleştirilir.



Şekil A.13 : "Manual Commands" penceresi.

Şekil A.13’de “Manual Command” penceresi gösterilmektedir. Bu pencerede çenelerin kontrol şekli belirlendikten sonra istenilen sayısal değerler girilerek çenelere hareket verilebilir. Burada çeneler yer değiştirme veya kuvvet ile hareket ettirilmektedir. Hareket yönü ise eksenel veya yanal olarak seçilebilir.



Şekil A.14 : Deney numunesinin MTS cihazına bağlantısı ve numuneye yapıştırılmış gerinim ölçer görünüşü.

Çekme deneyinin yapılması için programda yapılması gerekli ayarlamalar tamamlandıktan sonra gerinim ölçerleri yapıştırılmış çekme deneyi numuneleri çenelere bağlanabilir.

Çekme deneyi numunelerinin MTS cihazına bağlantısı Şekil A.14’de gösterilmiştir. Numunenin MTS cihazına montajı yapıldıktan sonra hem MTS cihazının programı hem de DAC Express programı kontrol edilmelidir.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Ali BAŞ
Doğum Yeri ve Tarihi : Zonguldak / 03.02.1983
Lisans Üniversite : İstanbul Teknik Üniversitesi