

766696

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ANLIK BASINÇ YÜKÜ ETKİSİ ALTINDA KOMPOZİT
MALZEMEDEN YAPILMIŞ YARI KÜRESEL BİR KABUK
YAPININ DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uçak Müh. Hüseyin Murat YÜKSEL

(511021008)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 9 Mayıs 2005

Tezin Savunulduğu Tarih: 1 Haziran 2005

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Halit Süleyman TÜRKMEN

Diğer Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Erol ŞENOCAK

Yard. Doç. Dr. Vedat DOĞAN

HAZİRAN 2005

ÖNSÖZ

Çalışmalarım sırasında bana yol gösteren sayın Doç. Dr. Halit Süleyman Türkmen'e, deney düzeneğimin üretimine ve deneysel çalışmalarımı gerçekleştirmeme olanak tanıyan Trisonik Araştırma Merkezi'ne, üretim ve deneylerde benden yardımlarını esirgemeyen tekniker Müslüm Çakır ve teknisyen Aliosman Tabanlı'ya, üretim çalışmalarındaki katkıları için ES-MAK Makina İmalat San.ve Tic. Ltd. Sti.'ne, son olarak her zaman yanımda olup bana destek veren aileme çok teşekkür ederim.

İstanbul, Mayıs 2005

Hüseyin Murat YÜKSEL



İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
SEMBOL LİSTESİ.....	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
2. ANLIK BASINÇ TÜPÜ VE YARI KÜRESEL KABUK DENEY DÜZENİĞİN TASARIMI VE İMALATI	5
2.1 Deney Düzenliği Tasarımı ve İmalatı	5
2.1.1 Kavramsal tasarım	5
2.1.2 Basınç tüpü tasarımı.....	5
2.1.3 Basınç tüpü imalatı	6
2.1.4 Mesnet tasarımı	7
2.1.5 Mesnet imalatı.....	7
2.1.6 Mesnet sehpa tasarımı	8
2.1.7 Mesnet sehpa imalatı	8
2.1.8 İskelet tasarımı	9
2.1.9 İskelet imalatı.....	10
2.2 Yarı küresel kabuk imalatı	11
2.2.1 Kalıp tasarımı ve imalatı	12
2.2.2 Yarı küresel kabuk üretimi.....	13
2.3 Yarı küresel kabuğun testler için hazırlanması ve montajı	15
3. MALZEME KARAKTERİZASYONU VE ANLIK BASINÇ YÜKÜ DENEYLERİ.....	16
3.1. Malzeme Karakterizasyonu İçin Yapılan Statik Deneyler	16
3.2. Anlık Basınç Yüğü Deneyleri.....	18
4. KOMPOZİT MALZEMEDEN ÜRETİLMİŞ YARI KÜRESEL KABUĞUN BÜNYE DENKLEMLERİ.....	21
5. YARI KÜRESEL KABUĞUN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE STATİK VE DİNAMİK ANALİZLERİ	31
5.1. Statik Analiz	31
5.2. Modal Analiz	33
5.3. Anlık Basınç Yüğü Analizi.....	33
KAYNAKLAR	36

EK A.....	38
EK B.....	43
EK C.....	47
EK D.....	51
ÖZGEÇMİŞ.....	55



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa no</u>
Tablo 2.1 Mukavemet özellikleri	14
Tablo 3.1 Statik deney sonuçları	18
Tablo 5.1 Modal analiz sonuçları	33
Tablo B.1 Ani basınç yükü deney tablosu.....	43



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa no</u>
Şekil 2.1 Basınç tüpü	6
Şekil 2.2 Ankastre Mesnet.....	7
Şekil 2.3 Mesnet Sehpaşı.....	8
Şekil 2.4 Deney düzeneği iskeleti.....	9
Şekil 2.5 Deney düzeneği çizimi	10
Şekil 2.6 Deney düzeneği resmi	11
Şekil 2.7 Kompozit kabuk üretim kalıbı çizimi.....	12
Şekil 3.1 Statik deney	16
Şekil 3.2 Birim uzama ölçer	17
Şekil 3.3 Wheatstone köprüsü	17
Şekil 3.4 Basınç tüpü ve membranlar.....	19
Şekil 3.5 Anlık basınç yükü deneyi	20
Şekil 4.1 Tek yönlü eksenleri çakışmayan kompozit katman	23
Şekil 4.2 Katmanlı bir kompozit malzemede kuvvet ve momentler	25
Şekil 5.1 Yarı küresel kabuğun sonlu elemanlar modeli	32
Şekil 5.2 Basınçın zamana göre değişimi.....	34
Şekil A.1 Patlama düzeneğinin genel görünüşü	38
Şekil A.2 Parça 1'in kenar eğimi.....	39
Şekil A.3 Çerçeveyi oluşturacak 8 adet parçanın kesimi	39
Şekil A.4 Destek parçaların yerleştirilmesi	40
Şekil A.5 Şekil Açılar.....	40
Şekil A.6 Kaynak mesafesi.....	41
Şekil A.7 Çerçeve imalat şekli	41
Şekil B.1 1.Patlama deneyi sonuç grafiği.....	43
Şekil B.2 2.Patlama deneyi sonuç grafiği.....	44
Şekil B.3 3.Patlama deneyi sonuç grafiği.....	44
Şekil B.4 4.Patlama deneyi sonuç grafiği.....	44
Şekil B.5 5.Patlama deneyi sonuç grafiği.....	45
Şekil B.6 6.Patlama deneyi sonuç grafiği.....	45

Şekil B.7 7.Patlama deneyi sonuç grafiği.....	45
Şekil B.8 8.Patlama deneyi sonuç grafiği.....	46
Şekil B.9 9.Patlama deneyi sonuç grafiği.....	46
Şekil B.10 10 Patlama deneyi sonuç grafiği.....	46
Şekil C.1 Radyal yöndeki yer değiştirme (w)	47
Şekil C.2 Boylamsal yöndeki birim uzama (ϵ_θ).....	48
Şekil C.3 Enlemsel yöndeki birim uzama (ϵ_ϕ).....	48
Şekil C.4 Von Mises birim uzaması (ϵ_v).....	49
Şekil C.5 Boylamsal yöndeki gerilme (σ_θ)	49
Şekil C.6 Enlemsel yöndeki gerilme (σ_ϕ).....	50
Şekil C.7 Von Mises gerilmesi (σ_v).....	50
Şekil D.1 Radyal yönde yer değiştirme (w)	51
Şekil D.2 Boylamsal gerilme (σ_θ).....	51
Şekil D.3 Enlemsel gerilme (σ_ϕ).....	52
Şekil D.4 Von Mises gerilmesi (σ_v).....	52
Şekil D.5 Boylamsal birim uzama (ϵ_θ).....	53
Şekil D.6 Enlemsel birim uzama (ϵ_ϕ)	53
Şekil D.7 Von Mises birim uzaması (ϵ_v).....	54

SEMBOL LİSTESİ

E_x, E_y, E_z	: Elastisite modülü
G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}	: Kayma modülü
$\nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}$	: Poisson oranları
ρ	: Yoğunluk
θ, φ	: Küresel koordinatlarda açılar
$V_{\text{çıkış}}$	: Çıkış gerilmi
$V_{\text{giriş}}$	: Giriş gerilimi
R_1, R_2, R_3	: Dirençler
$R_{\text{sensör}}$	: Sensör direnci
V_k	: Kalibrasyon gerilimi
$V_{\text{ç}}$	: Beklenen çıkış gerilimi
$V_{\text{giriş}}$	: Besleme gerilimi
ϵ_b	: Beklenen birim uzama
K	: Birim uzama ölçek faktörü
gr	: Gram
V	: Volt
μS	: Mikro Strain
w	: Yer değiştirme
$\epsilon_{\varphi}^0, \epsilon_0^0, \epsilon_{\varphi\theta}^0$	: Katman birim uzamaları
$K_{\varphi}, K_0, K_{\varphi\theta}$	: Eğrilikler
R	: Yarıçap
u_0, u_{φ}, u_z	: Yer değiştirmeler
σ	: Gerilme
[Q]	: Katılık matrisi
$N_0, N_{\varphi}, N_{\theta\varphi}$	: Gerilme bileşkeleri
$M_0, M_{\varphi}, M_{\theta\varphi}$	: Bileşke momentler

**ANLIK BASINÇ YÜKÜ ETKİSİ ALTINDA KOMPOZİT MALZEMEDEN
YAPILMIŞ YARI KÜRESEL BİR KABUK YAPININ DİNAMİK
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

ÖZET

Bu çalışmada, cam elyafı ve epoksi kullanılarak üretilmiş yarı küresel kompozit bir kabuk yapının, anlık basınç yükü etkisi altında dinamik davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında, deneylerde kullanılmak üzere ani basınç deney düzeneği ile yarı küresel kabuk tasarlanarak üretilmiş, malzeme kalibrasyonu amaçlı statik deneyler ile anlık basınç yükü deneyleri çeşitli basınç ve mesafelerde gerçekleştirilmiştir. Kompozit ve kabuk denklemlerinin incelenmesi ve ANSYS sonlu eleman yazılımı kullanılarak sayısal analiz gerçekleştirilmesi ise çalışmanın teorik bölümünü teşkil etmektedir. Kabuğun sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan dinamik analizde elde edilen anlık basınç yüküne cevabının frekansı, deneysel sonuçlar ile uyum göstermiş, aynı zamanda bu cevap karakter bakımından deneysel sonuçlar ile uyumlu bulunmuştur.

ANALYSIS OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF A HEMISPHERICAL COMPOSITE SHELL UNDER AIR BLAST LOAD

SUMMARY

In this study, the dynamic behavior of a hemispherical composite shell manufactured from fiberglass and epoxy under air blast load has been analysed experimentally and numerically. A blast load test structure and a hemispherical composite shell has been designed and built. Static tests has been conducted for material calibration and air blast load tests have been done under different pressure and distances. The equations for composite and shell structures were derived. The theoretical part of the study also contains the finite element analysis of the composite shell structure via ANSYS. The frequency response of the shell, computed by the finite element method, for the air blast load shows good agreement qualitatively with experimental results.



1. GİRİŞ

Bu çalışmanın amacı, deneysel ve sayısal yöntemlerle kompozit bir kabuk üzerine etki eden dinamik yüklerin oluşturduğu birim uzamaların incelenmesidir. Çalışmada ele alınan dinamik yük, aniden oluşup yapıya etki eden bir basınç dalgasıdır. İncelenen yapı yarı küresel bir kabuktur ve cam elyafı ile epoksiden imal edilmiştir. Çalışma kapsamında seçilen sınır şartı kabuk kenarlarında ankastre mesnettir. Amaçlanan diğer bir husus da yarı küresel kabuk ve dairesel plakların anlık basınç yüklerine cevabını deneysel olarak araştırmak için yeterli bir test sisteminin kurulmasıdır.

Yapılan çalışma, yarı küresel bir kabuğun üzerinde anlık bir patlama ile oluşan basınç dalgasının kabuk üzerindeki etkisinin deneysel ve sayısal olarak incelenmesini içerir. Elde hazır bir deney düzeneği bulunmaması nedeniyle ilk olarak bir düzenek tasarlanmış, teknik çizimleri ve üretim dokümanı hazırlanarak üretilmiştir. Daha sonra incelenecek yapı ve üretimde kullanılacak kalıp modellenerek üretilmiştir . Bu çalışmalar devam ederken, sonlu elemanlar yöntemi ile katı cisim mekaniği analizi gerçekleştiren bir program olan ANSYS ile modelleme çalışmaları yapılmıştır. Akabinde deney düzeneğinin mesnet kısmı ve sabit yükler kullanılarak statik yük ölçümü yapılmış sonuçlar sayısal yöntemle elde edilenler ile karşılaştırılmıştır. Buradaki amaç deneysel ve sayısal çalışmaların tutarlılığını sınamaktır. Son olarak anlık basınç yükü deneyleri ve analiz gerçekleştirilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Uçak ve havacılık endüstrisinde kompozit malzeme kullanımı giderek artan bir seyir izlemektedir. Aerodinamikteki gelişmeler, yüksek hız kanat uygulamaları, yüksek ivmelere dayanımlı gövde, düşük ağırlık yüksek kapasite ve benzeri uygulamalar üzerinde yürütülen tasarım ve geliştirme çalışmaları havacılık ve uzay sanayinde kompozit malzeme kullanımını oldukça yaygınlaştırmıştır. Havacılık sanayinde üretilen araçlarda kullanılan malzemenin büyük bir bölümünü karbon, cam ve epoksiden üretilmiş kompozit malzemeler teşkil etmektedir. Bu anlamda kompozit malzemelerin havacılık için oldukça önemli oldukları söylenebilir.

Havacılık yapılarında kompozit çeşitli formlarda kullanılır. Bunlar kiriş, plak, sandviç ve kabuk yapılardır. Sandviç yapıda elyaf lar core denilen orta katmanın iki

tarafına lamine edilirken, kabuk yapılarda sadece elyaf ve reçineden oluşur. Sandviç yapılar genellikle kesme ve eğilme kuvvetlerinin etkidiği yapılarda tercih edilirken, kabuk tipi yapılar yalnız çekme ve düşük basma gerilmelerinin etkidiği bölgelerde kullanılır.

Çalışmada incelenecek yapı havacılıkta sıklıkla karşılaşılan çift eğimli kabuk yapılara bir örnek olan yarı küresel kabuktur. Yolcu uçaklarının “radom” denilen burun kısmı, harici yakıt tankı, füze gibi parçaların hücum kenarları ve sabit iniş takımına sahip uçaklarda sürüklenme kuvvetini azaltmak için kullanılan “wheel pant” de denilen uçak tekerleği kaportası gibi yüzeyler buna örnek gösterilebilir.

Büyüklüğü zamana göre değişen yüklere, dinamik yük ismi verilir ve yapı üzerindeki etkileri statik yüklerinkilerden farklıdır. Dinamik yük bozuk zeminde giden bir arabanın yürüyen aksamına binen yük olabileceği gibi, bu çalışmada incelendiği üzere anlık bir basınç dalgası da olabilir. Havacılık yapılarında karşılaşıla kritik yükler çoğunlukla dinamik yüklerdir. Bunlara örnek olarak aeroelastik kuvvetler, motor titreşimi nedeniyle olan kuvvetler ve türbülans nedeniyle olan yükler gösterilebilir.

Yukarıdan anlatılanların dışında kompozit malzemeler, otomobil ve sürat tekneleri başta olmak üzere çoğu ulaşım aracında günden güne daha da yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda da kompozit yapılar çeşitli dinamik yüklere maruz kalmaktadırlar. Dalgalı bir denizde hızla giden bir sürat teknesinin su üzerinde sekmesi sonucu gövdesine binen yük bunlara örnek olarak gösterilebilir.

Kompozit malzemeler ve kabuk yapılar üzerine yıllardır birçok deneysel ve teorik çalışma yürütülmüştür. Araştırma kapsamında, geçmişte yapılan benzer çalışmalar incelenmiş ve gereken noktalarda faydalanılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıda anlatılmıştır. Bogdanovich ve Feldmane yaptıkları çalışmada, eksenel anlık yük etkisindeki ortotropik silindirik kabuk yapıların deformasyonlarını teorik olarak incelemiştir. Çalışmanın ana amacı ortaya çıkan burkulma etkilerinin yapısının ve etkileşimlerinin belirlenmesidir [1]. Jiang ve Olson sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirdikleri araştırmalarda silindirik kabuk elemanları üzerine etki eden anlık basınç yükünün neden olduğu birim uzamaları dinamik halde incelemiştir. Elde ettikleri sonuçları deneysel verilerle de karşılaştıran ekip, tek eğilme moduna sahip modellerinin kolay yapılara ait zamana bağlı, nonlinear tepkileri yüksek bir

doğrulukla temsil edebildiğini görmüştür [2]. Mukhopadhyay ve Goswami yaptıkları çalışmada geleneksel dokuz nodlu Lagrange elemanları ve geliştirilmiş sertleştirici modellerini kullanarak, silindirik ve çift eğimli kompozit kabuk yapılar üzerinde anlık hava basıncı gibi dinamik yüklerin etkilerini sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir. Bu yeni sertleştirici modelinin piyasada kullanılanların aksine, kaçık merkezli takviye elemanlarının kullanılabilmesine olanak tanınması çalışmayı ilginç kılmaktadır [3]. Zhu, Xue, Zhou ve Schleyer içlerinde patlama meydana gelen silindirik yapılar üzerindeki yüklerin etkilerini araştırmıştır. Deneysel ve teorik olarak yürütülen araştırmada, dinamik birim uzamanın oluşumu ve gelişimine özellikle önem verilmiş, elde edilen sonuçların birbirine uyumlu olduğu gözlemlenmiştir [4]. Türkmen ve Mecitoğlu yaptıkları çalışmada kompozit kabuklar üzerinde anlık basınç yükü etkisini deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Deneysel çalışmalar esnasında çelikten imal edilmiş bir deney düzeneği kullanarak, LPG-O₂ karışımının patlaması ile ortaya çıkan basınç dalgalarının yapıya çarpması sonucu meydana gelen birim uzamalar ve yüzey basınç dağılımı ölçülmüştür. Bu ölçümler gerçekleştirilen sayısal analiz neticeleri ile karşılaştırılmış, lineer ve nonlineer aralıkta sonuçlar arasında uyum gözlemlenmiştir [5-6]. Mukoid Yaptığı çalışmalarda, anlık basınç yükü etkisindeki kabuk yapıların zorlanmış titreşimlerini sayısal olarak incelemiş, maksimum birim uzamalara ait değerleri ve oluştuğu bölgeleri araştırmıştır [7]. Gupta ve Prasad cam ve polyester ile üretilmiş yarı küresel kompozit kabuk yapıların, sanki-statik ve dinamik yükler etkisi altında çökme ve enerji sönmülme etkilerini deneysel araştırmışlardır. Deneylerde çapları 53,5 ile 106,1 mm, et kalınlıkları ise 1,1 ile 2.84 mm arasında değişen yapılar kullanılırken, elde edilen sonuçlar sayısal yöntemle elde edilenler ile karşılaştırılmış, aralarında uyumluluk gözlenmiştir [8]. Muszynski ve Purcell kompozit takviye malzemelerinin geliştirilmesi, uygulanması ve etkileri üzerine çalışmıştır. Çalışmalarında karbon, cam ve epoksi kullanılarak üretilen kompozit malzemelerle güçlendirilmiş binalar üzerinde, 11-15 metre gibi göreceli olarak kısa mesafelerde meydana gelen patlamalar sonucunda oluşan basınç dalgalarının etkisi incelenmiş, deneysel olarak yürütülen çalışmalar sırasında duvarlardaki basınç ve ivmeler ölçülmüş, sonuçta yapıda hasar meydana gelmediği gözlemlenmiştir [9]. Türkmen silindirik kompozit kabuk yapılar üzerinde anlık basınç etkisini, deneysel ve teorik olarak incelemiştir. Teorik çalışmada Love teorisi ve Galerkin, Runge-Kutta-Verner metotları ile sonlu elemanlar modellemelerinden faydalanılırken, deneysel çalışmalarla uyumlu sonuçlar

elde edilmiştir [10]. Kellas pasif yer yüzeyine iniş sönümleyicileri üzerine yaptığı çalışmalarda, küresel kompozit yapıların çarpma etkisi ile deforme olmalarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Deneylerinde üretilen beş ayrı yapı, 30 ila 42 m/s'lik hızlarla yere çarptırılmış sonuçlar teorik hesaplardan gelenlerle karşılaştırılmıştır. Neticede sonuçlar arasında iyi bir bağıntı bulunmuş ve incelenen yapının amaca uygun olduğu sonucuna varılmıştır [11]. Anlık yükleme etkisi altındaki cisimlere ait birim uzamaların ölçeklendirilebilirlik problemlerini çözmüştür. Çalışma alternatif, boyutsuz bir tabanda çözüm üretme ve kuvvet etki hızının düzenlenmesine olanak sağlayan matematiksel bir model kullanımı esasına dayanmaktadır. Elde edilen sonuçlar oluşturulan model ile prototipin son derece benzer davranışlarda bulunduğunu göstermektedir [12]. Sk ve Sinha küresel ve elipsoit gibi çift eğimli, çok katmanlı, kompozit kabuk yapıların analizine uygun bir sonlu elemanlar modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu model kullanılarak yapıları analizler neticesinde, daha az eleman kullanılmasına rağmen diğer açık kodlardan daha hassas sonuçlar elde edildiği görülmüştür [13].

2. ANLIK BASINÇ TÜPÜ VE YARI KÜRESEL KABUK DENEY DÜZENİĞİN TASARIMI VE İMALATI

2.1 Deney Düzenİğı Tasarımı ve İmalatı

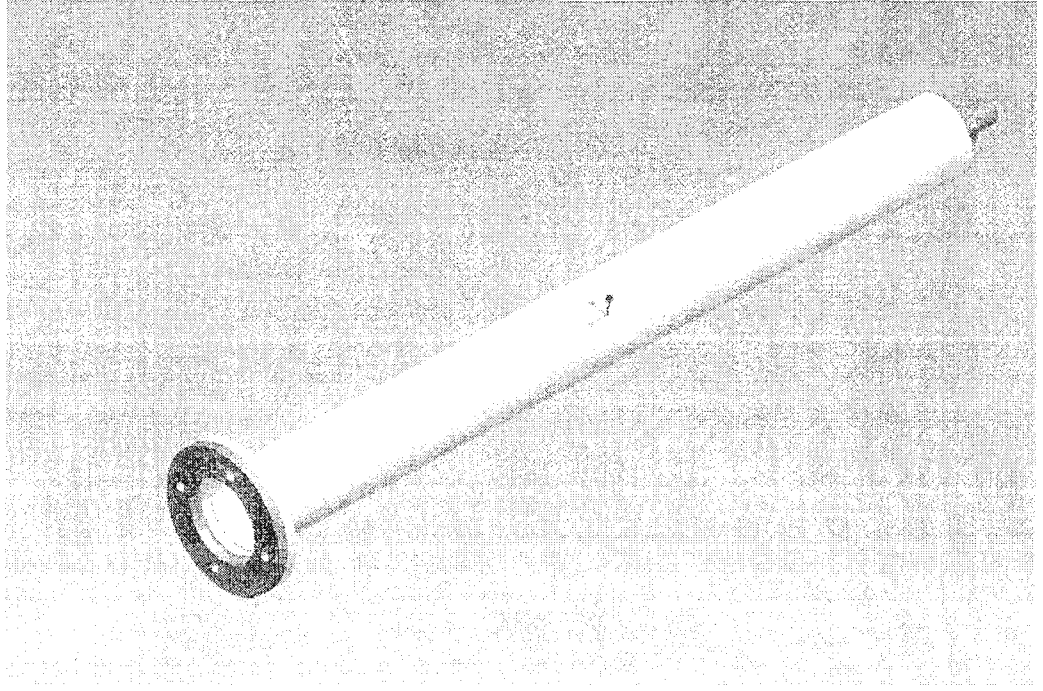
Küresel kompozit kabuk üzerinde anlık basınç yükünün deneysel olarak incelenebilmesi ve benzeri çalışmaların gerçekleştirilebilmesi için amaca uygun bir deney düzenİğıne ihtiyaç vardır. Bu nedenle çalışmanın ilk aşamasında ihtiyacı karşılayacak bir düzenİğın tasarımı, üretim dokümanının hazırlanması ve üretimi yapılmıştır.

2.1.1 Kavramsal tasarım

Belirtilen incelemede, çıkışı ince bir membranla kapatılmış bir hava tankından membranın patlaması ile anlık bir basınç yükü elde edilmesi ve kabuk yapının bu basınç dalgasına maruz bırakılması planlanmıştır. Bu doğrultuda deney düzenİğının basınç tüpü, mesnet parçaları, mesnet sehpası ve tüm bunları bir arada tutacak bir iskeletten oluşacağı belirlenmiştir. Kullanılan membranın kalınlığı ile patlama basıncı belirlenirken, mesnet sehpasının iskelet üzerinde hareket ettirilmesi ile de patlama uzaklığı ayarlanacaktır. Düzenİğe bağılı bir manometre ile de tüpteki basınç ölçülecektir.

2.1.2 Basınç tüpü tasarımı

Basınç tüpünün, geometri uygunluğu, temin ve işleme kolaylığı gibi nedenlerle, metal bir boru kullanılarak üretilmesine karar verilmiştir. Bu borunun bir ucunda hava girişı, diğır ucunda da patlatılacak membran bulunacaktır. Membran, boruya eklenmiş bir flaş ve ona vidalanmış karşılığı arasında yer alacaktır. Ayrıca boru üzerine monte edilecek bir manometre ile içerideki basınç ölçülecektir. Basınç tüpüne ait teknik resim aşağıdadır.



Şekil 2.1 Basınç tüpü.

2.1.3 Basınç tüpü imalatı

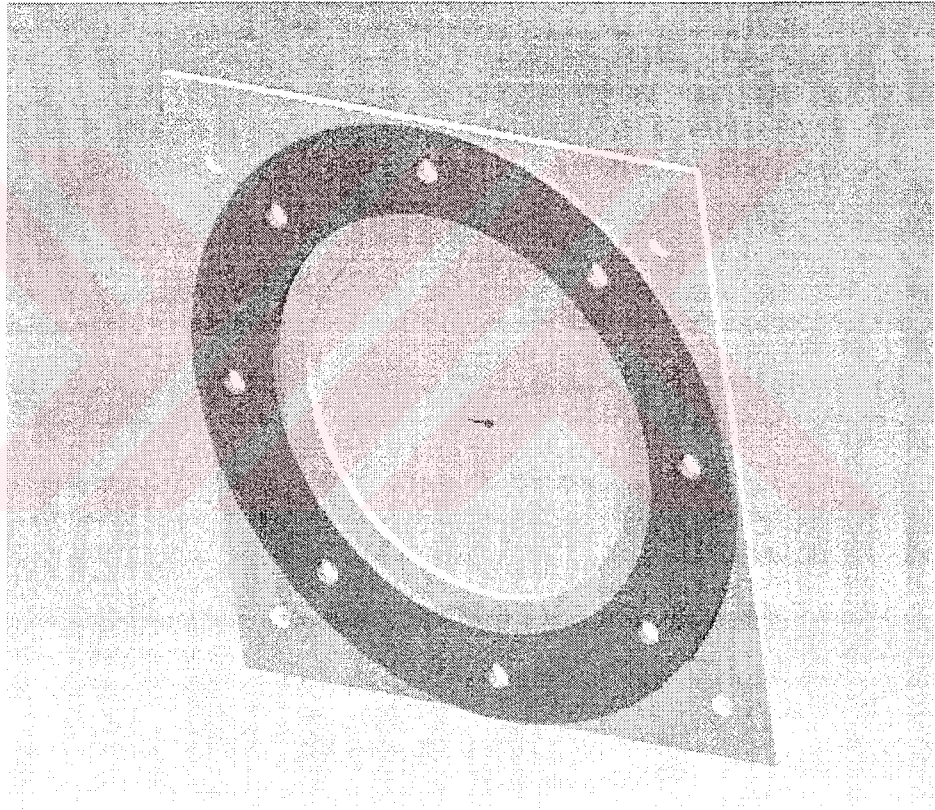
Basınç tüpünün imalatında, 6 mm et kalınlığında, 40 mm yarıçapında ve 800 mm boyunda galvaniz kaplı metal bir boru kullanılmıştır. Borunun bir ucu metal bir plaka kaynatılarak kapatılmış ve daha sonra bu plaka delinip dış açılarak bir hava girişi monte edilmiştir. Hava kaçağının engellenmesi amacı ile bu montaj sırasında teflon bant kullanılmıştır. Borunun açık kalan diğer ucuna ise membranın takılacağı, 5 mm et kalınlığında 50 mm iç yarıçap ve 100 mm dış yarıçapında metalden üretilmiş bir flanş kaynatılmıştır. Kaynatılan flanşla aynı geometri ve ölçülerde bir parça da karşılık olarak üretilmiş, bu iki parça üst üste konularak 4 adet vida deliği açılmıştır. Flanş üzerindeki deliğe vida dişi açılırken, karşılık parçasının delikleri ise vida geçişine izin vermesi için 2 mm genişletilmiştir.

Ayrıca sızdırmazlık amacıyla bu iki parça arsında kullanılmak üzere kauçuk plakadan uygun bir conta kesilmiştir. Son olarak manometrenin monte edilmesi için boru yan duvarına bir delik delinmiş içine dış açılmış ve montaj gerçekleştirilmiştir. Burada da hava kaçağının engellenmesi amacıyla teflon bant kullanılmıştır. Kullanılan manometre, 0-10 bar basınç aralığında 0,1 bar hassasiyetle çalışan gliserinli bir manometredir. Anlık basınç düşüşlerinin meydana geldiği uygulamalarda gliserinli manometre kullanımı şarttır. Bunun nedeni; düz

manometrelerde ani basınç azalmalarında ibrenin çok hızlı hareket etmesi ve ataletsel nedenlerle kalibrasyonun bozulmasıdır.

2.1.4 Mesnet tasarımı

Yapılan çalışma ankastre mesnetle bağlı küresel bir kabuğun incelenmesini içermektedir. Bu doğrultuda deney düzeneğinde kullanılmak üzere tasarlan mesnet dairesel ankastre bir mesnettir. Mesnet aralarında deney parçasının sıkıştırılacağı iki düz plakadan oluşturulacaktır. Ön plakayı merkezinde küresel kabuğun içinden geçebileceği genişlikte dairesel bir boşluk bulunurken, arka parçanın merkezinde ise parçanın içinden geçemeyeceği boyutta bir boşluk bulunacaktır. Bu doğrultuda hazırlanan teknik resim aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.2 Ankastre Mesnet

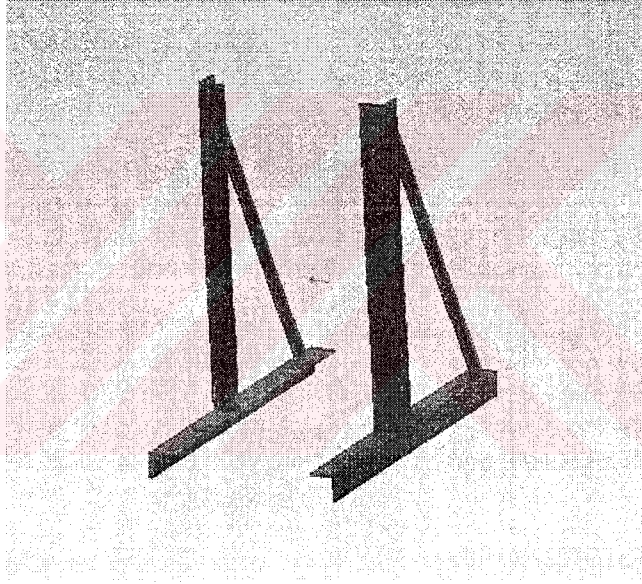
2.1.5 Mesnet imalatı

Bu mesnet 5 mm kalınlığında iki çelik sac kullanılarak imal edilmiştir. İki parça da 300x300 mm ebadındadır ve merkezlerinde dairesel boşluklar oluşturulmuştur. Ön parçadaki boşluk 210 mm, arka parçadaki boşluk ise 180 mm çapındadır. Bu

boşluklar, ilk önce oksijen kaynağı kullanılarak kabaca oluşturulmuş, daha sonra girintili çıkıntılı bir yapıya sahip yüzeyler torna tezgahında düzeltilmiştir. Son olarak mesnet parçalarını birbirine ve mesnet tezgahına bağlayacak 10'luk cıvataların delikleri delinerek imalat tamamlanmıştır. Cıvata deliklerinin çapı, delme işlemi sırasında yapılabilecek ölçüm hataları göz önüne alınarak 12 mm olarak seçilmiştir.

2.1.6 Mesnet sehpaı tasarımı

Yapılacak deneylerde patlama mesafesinin değıştirilebilmesine ve ileride yapılacak farklı çalışmalarda farklı şekil ve boyutlarda mesnetlerin kullanılabilmesine olanak sağlamak amacıyla, mesnet sehpaı iskeletten ayrı bir parça olarak tasarlanmıştır. İskelet üzerinde hareket edebilecek bu sehpa, üzerinde bulunan deliklerden tezgaha vidalanarak sabitlenecektir. Mesnet sehpaısının teknik resmi aşağıdaki gibidir.

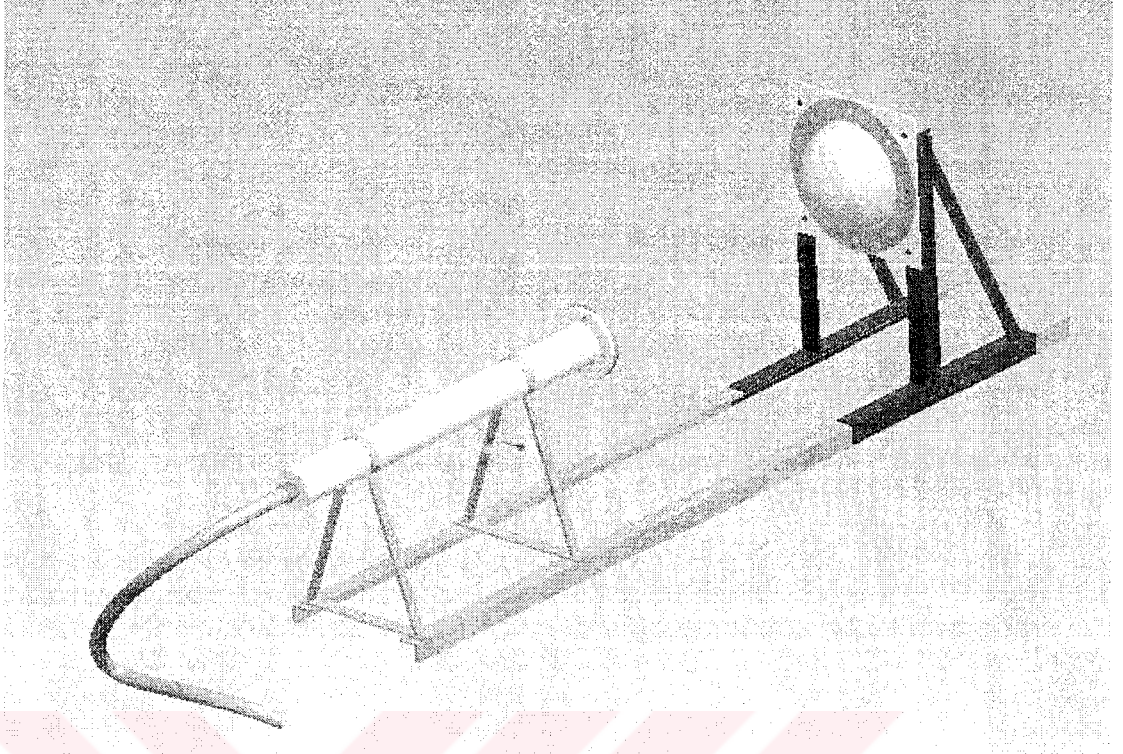


Şekil 2.3 Mesnet Sehpaı

2.1.7 Mesnet sehpaı imalatı

Mesnet sehpaı 40x40x5 mm ölçülerinde L profiller ve 40x3 mm'lik lamalar kullanılarak üretilmiştir. 40x40 mm'lik L profiller 40x40 mm'lik yatay pozisyonda bulunan L profillere dik olarak kaynatılmış ve lamalar ile desteklenmiştir. Kaynak işlemi sırasında parçaların birbirine dik olmaları l mastarları ile sağlanmıştır. Elde edilen iki simetrik parça yine lamalarla birleştirilmiş ve iskelete bağlanacağı vida delikleri açılmıştır. Bundan sonra üretilen mesnede uygun olarak mesnet cıvatası delikleri açılmıştır. Birleştirme işlemlerinde 10'luk cıvatalar kullanılacak olmasına rağmen delik çapları, yapılabilecek hatalara karşı daha önce olduğu gibi 12 mm

Aşağıda deney düzeneğinin monte edilmiş haline ait teknik resim yer almaktadır.



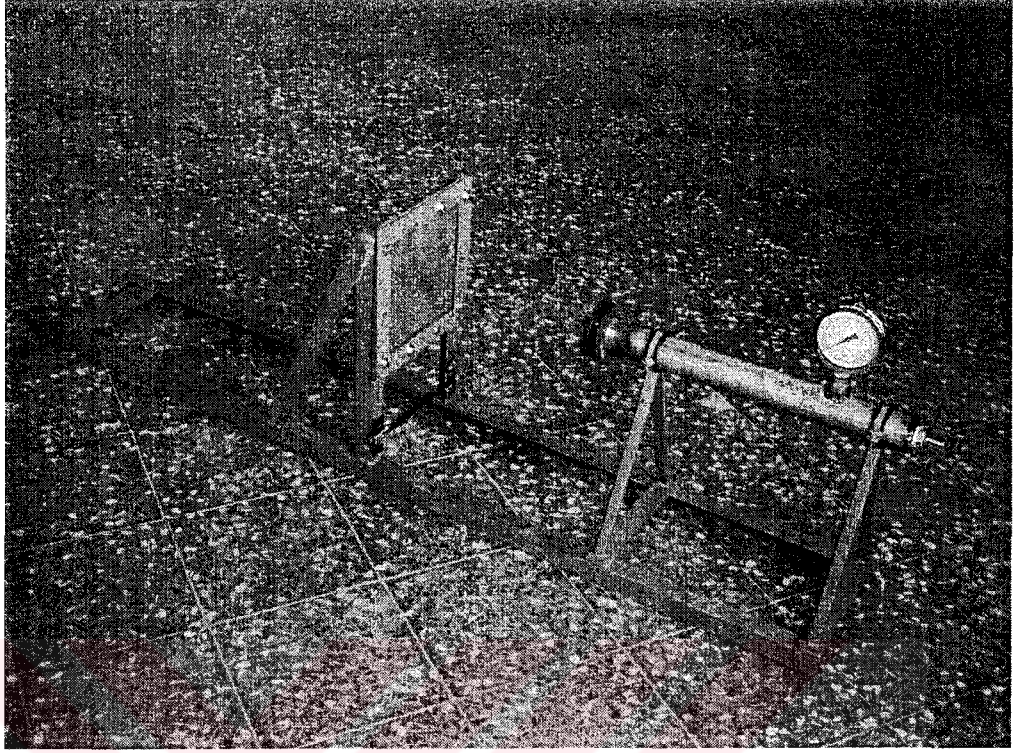
Şekil 2.5 Deney düzeneği çizimi

2.1.9 İskelet imalatı

1800mm uzunluğunda ve 40x40x5 ölçülerinde iki adet L profil birbirine paralel ve dikeyde simetrik bir şekilde 300 mm mesafe ile yerleştirilerek iki adet 3x30 mm'lik lama ile kaynaklanarak birleştirilmiştir. Lamaların biri kişilerin en ucunda yer alırken diğeri ondan 400 mm ileriye yerleştirilmiştir. Daha sonra 600 mm uzunluğunda 20x10mm'lik kare profiller ve 80mm çaplı boru kelepçeleri kullanılarak Şekil 2.4'te görüldüğü gibi ters v şeklinde bacaklar üretilmiştir. Birleştirme işlemleri elektrik kaynağı ile gerçekleştirilmiş olup bu işlem sırasında geometrinin düzgün olmasını sağlamak amacıyla mastarlar kullanılmıştır. Bacakların simetrik ve eşit ölçülerde olması, basınç tüpünün istenilen şekilde monte edilebilmesi için şarttır. Son olarak mesnet sehpasının vidalanacağı delikler delinerek iskelet inşası tamamlanmıştır. Bahsi geçen delikler 12 mm çapında olup 5 mm aralıklarla kirişlere boyu boyunca delinmiştir. Deney düzeneği imalatı sonrasında yapı paslanmaya karşı koruma amacıyla boyanmış ve kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Sistemin ilk testi 0.5 mm kalınlığında bakır bir membran kullanılarak gerçekleştirilmiş ve yaklaşık 4 atmosferlik bir basınç ile patlama sağlanmıştır. Elde

edilen bu ilk sonuç neticesinde düzeneğin kullanıma uygun olduğu tespit edilmiştir. Aşağıda deney düzeneğinin son hali görülmektedir.



Şekil 2.6 Deney düzeneği resmi

Üretim işleminin büyük bir bölümü Trisonik Araştırma Merkezi'nde yapılmış olup, buraya verilen üretim planı Ek'te verilmiştir. Deney düzeneğinin üretiminde kullanılan parçaları ait liste aşağıda yer almaktadır.

1. 4 adet 350 mm uzunluğunda 20x10 mm'lik dikdörtgen profil
2. 2 adet 1850 mm uzunluğunda 40x40 mm'lik köşebent
3. 2 adet 300 mm uzunluğunda 40x5 mm'lik lame profil
4. 2 adet kelepçe
5. 2 adet 550 mm uzunluğunda 40x5 mm'lik lame profil
6. 2 adet 400 mm uzunluğunda 40x40 mm'lik köşebent
7. 2 adet 480 mm uzunluğunda 40x40 mm'lik köşebent

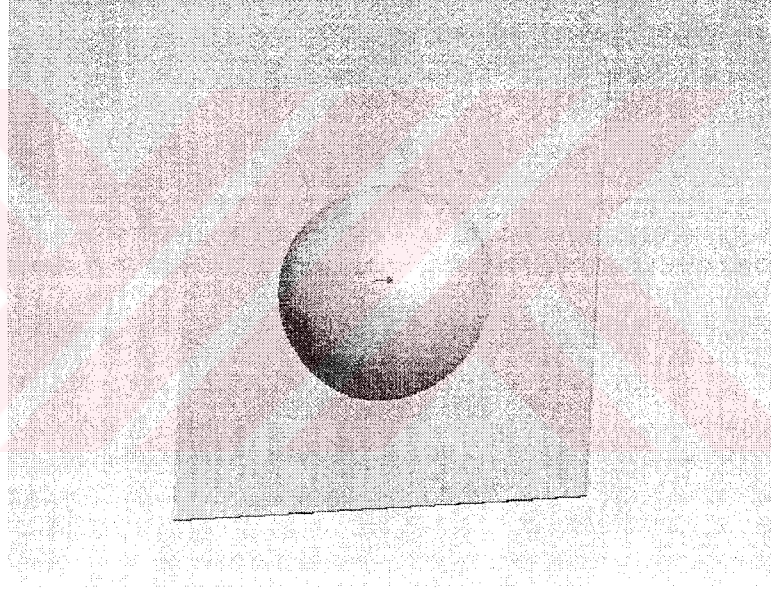
2.2 Yarı küresel kabuk imalatı

Deneysel çalışmada, ankastre mesnetlenmiş, yarı küresel geometride, kompozitten imal edilmiş bir kabuk kullanılacaktır. Bu doğrultuda belirtilen özelliklerde bir

kabuğun çevresel mesnet uzantısı ile birlikte üretilmesi gerekmektedir. Kabuğun üretimi, imalat sürecinin en önemli bölümlerinden birisidir, zira deneylerde sağlıklı sonuçlar alabilmek için, üretilen kabuğun homojen, doğru karışım oranında ve doğru geometride olması şarttır. Bu nedenle üretimin bir erkek kalıp kullanılarak ve vakum torbası tekniği ile gerçekleştirilmesi uygun görülmüştür. Bu çerçevede yarı küresel bir kalıp ve epoksi-cam elyafı karışımı kabuk imal edilmiştir.

2.2.1 Kalıp tasarımı ve imalatı

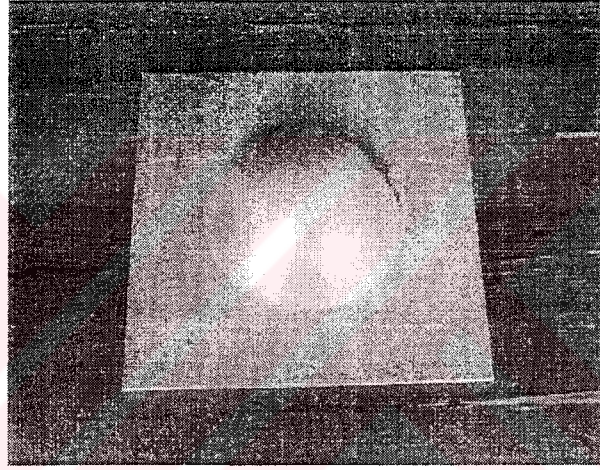
Kabuk üretiminde kullanılacak kalıp temelde, düz bir zemine oturturulmuş yarı küresel bir yüzeyden oluşacaktır. Geometri ile ilgili kalıp açısı problemi olmadığı için basit tek parça bir kalıp üretime elverişlidir [14]. Bu doğrultuda tasarlanan kalıba ait teknik çizim aşağıdadır.



Şekil 2.7 Kompozit kabuk üretim kalıbı çizimi

Yüzey pürüzsüzlüğü ve geometrinin doğruluğu, elde edilecek ürünün kalitesini doğrudan etkileyeceğinden kalıp CNC gibi otomatik tezgahlar ile üretilmeli, elde üretimden kaçınılmalıdır. Geniş üretim yeteneği ve kompozit bilgisi nedeniyle Türk Hava Yolları Bakım Merkezi ile birlikte çalışmak uygun bulunmuş ve yapılan görüşmeler neticesinde üretimin bu tesislerde gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. 210 mm çapa sahip, alüminyum bir mil, CNC tezgahında işlenerek bir ucu yarı küresel forma getirilmiştir. Talaş kaldırma işlemi ilk önce kaba adımlarla ve basamak basamak gerçekleştirilmiş, ikinci aşamada hassas işleme yapılarak pürüzsüz bir

yüzey elde edilmiştir. Bu aşamadan sonra işlenen mil testere tezgahına bağlanarak oluşturulan küresel bölüm kesilmiştir. Kalıbın flanşları oluşturacak kısmı 5 mm kalınlığındaki bir alüminyum plakadan 400x400 mm ebadında kesilmiş ve çapakları alınmıştır. Daha sonra küresel ve düz parçalar merkezlenmiş, delinip vidalanarak birleştirilmiştir. Kalıp kullanarak yapılan üretimlerde, reçinenin sertleşmesinden sonra ürünün kalıptan çıkabilmesi için üretim sırasında kalıp ayıraçları kullanılmalıdır. Bu çalışmada da kalıp ayırıcı olarak teflon bant kullanılmıştır. Eğimli yüzeylerde uygulaması güç de olsa teflon bant, reçine yapısına karışmaması, donma süresini bekleme mecburiyetinin bulunmaması ve birçok kez kullanılabilir olması nedeni ile spreyci ve vaks tipi kalıp ayıraçlarına tercih edilmiştir. Üretilen kalıba ait resim aşağıdadır.



Şekil 2.8 Kompozit kabuk üretim resmi

2.2.2 Yarı küresel kabuk üretimi

Kalıp üretimi tamamlandıktan sonra kompozit kabuk üretimine geçilmiştir. Üretimde cam elyafından çift yönlü dokunulmuş bir kumaş kullanılacaktır. Seçilen reçine ise kumaşa ait mukavemet değerleri ile en iyi uyumu gösteren tipte 6 saatlik bir epoksidir. Kumaştan 400x400 mm'lik ölçülerde 3 adet parça kesilmiş, iki bileşenli epoksi iyice karıştırılarak hazırlandıktan sonra tezgah üzerinde elle ısıtılmıştır. Epoksinin belirtilen oranda ve tam olarak karıştırılması çok önemlidir. Karışım oranı yanlışsa veya bileşenler tam olarak karışmamışlarsa reçine tam olarak donmaz ve üretilen malzemenin mukavemet değeri dramatik bir şekilde düşer [15]. Benzer şekilde kumaşın tam olarak ıslanması da mukavemet değerleri açısından çok önemlidir. Cam elyafından üretilmiş kumaşlarda, kumaşın tam olarak ıslandığı beyaz olan renginin şeffaflaşması ile anlaşılır. Bu hususlara dikkat edilerek tamamlanan

ıslatma işleminden sonra kumaş erkek kalıba yatırılmıştır. Bu kumaşın üzerine ikinci katman olarak “pealply” denilen emici kumaş serilmiştir. Bu kumaş vakumlama esnasında reçinenin fazlasını emer, sertleşme tamamlandıktan sonra kolayca yüzeyden ayrılır ve istenen reçine kumaş oranının sağlanmasına yardımcı olur. Sonraki katman ise oldukça boşluklu bir yapıya sahip sentetik bir kumaştır. Kumaşın boşluklu bu yapısı hava dolaşımına izin vererek vakumlama etkisinin her yerde sağlanmasına yardımcı olur. Tüm bu katmanların üzerine vakum işleminin gerçekleştirileceği naylon kumaş serilip, kenarları sızdırmazlık amacıyla macunlandıktan sonra serme işlemi sona ermiştir. Bundan sonra özel bağlantı aparatları kullanılarak vakum hortumları naylon örtüye bağlanmış, vakum işlemine başlanmıştır. Sertleşme işlemi sonuna kadar vakumlama devam ederken aynı zamanda spot lambalar yardımı ile kabuk 70° dereceye ısıtılmıştır. Buradaki amaç kabuk mekanik özelliklerinin katalog değerlerine ulaşması olduğu gibi aynı zamanda sertleşme süresinin de kısaltılmasıdır. Bilindiği gibi ortam ısısının 10 derece artması sonucunda sertleşme süresi yarı yarıya kısalmıştır[15]. 5-6 saatlik bir süre sonunda reçine sertleşince, sıra ürünü kalıptan ayırmaya gelmiştir. Üretim esnasında spot lambaları ile ısıtma işlemi uygunmuş ve bu nedenle alüminyumdan içi dolu olarak üretilmiş olan kalıp da yaklaşık 70°C sıcaklığı ulaşmıştır. Bu nedenle kalıp ve ürün belli bir süre soğumaya bırakılmış ve daha sonra vakum torbası ve diğer yardımcı malzemeler ürün üzerinden kaldırılmıştır. Bundan sonra kalıp ile ürün arasına kompresör ve hava tabancası kullanılarak basınçlı hava tatbik edilerek ürün kalıptan ayrılmıştır. Elyafa zarar vermeyecek şekilde yüzeydeki pürüzler zımparalanıp, flanş çevresi 300 mm çapında bir çember olacak şekilde düzeltildikten sonra kompozit kabuk üretimi tamamlanmıştır. Üretilen yapıya ait mukavemet özellikleri aşağıdaki tablodadır.

Tablo 2.1 Mukavemet özellikleri

Özellik	Değer
E_x	24,14e9 N/m ²
E_y	24,14e9 N/m ²
E_z	3,79e9 N/m ²
G_{xy}	3,79e9 N/m ²
G_{xz}	1,07e9 N/m ²
G_{yz}	1,07e9 N/m ²
ν_{xy}	0,11
ν_{xz}	0,4
ν_{yz}	0,4
ρ	1800kg/m ³

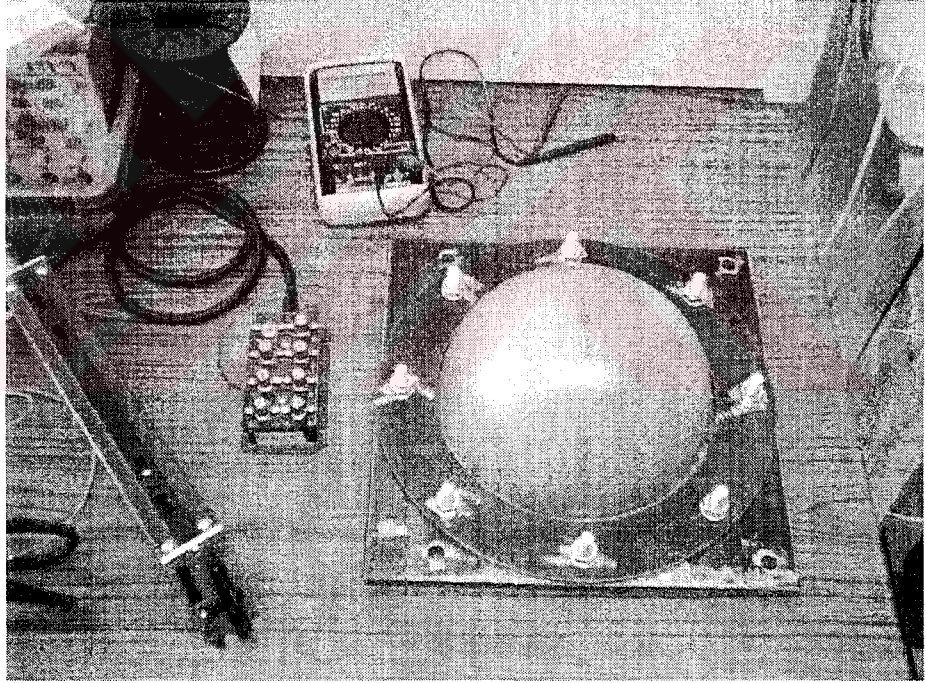
2.3 Yarı küresel kabuğun testler için hazırlanması ve montajı

Yarı küresel kompozit kabuk üretimi tamamlandıktan sonra, parçanın deney düzeneğinde kullanılacak hale getirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda kabuk flanşına mesnet vidalarının geçeceği deliklerin delinmesi ve deneylerde kullanılacak birim uzama ölçerlerin yerlerine yapıştırılması işlemleri gerçekleştirilmiştir. Mesnet delikleri delinirken önceden delinmiş mesnet parçaları kılavuz olarak kullanılmış, delik çapı aha önce delinenler de olduğu gibi 12 mm dır. Delme işlemi sona erdikten sonra birim uzama ölçerler yerlerine yapıştırılmıştır. Kullanılan iki adet çift yönlü birim uzama ölçerden birisi yarı kürenin tam tepesine, diğeri ise bir yönü küresel koordinatlarda θ diğeri ise φ yönü doğrultusuna gelecek şekilde küre yüzeyinde 50 mm ileriye yapıştırılmıştır. Tepe noktasına yapıştırılan ölçüm cihazının yönü önemli değildir çünkü bu noktada ölçülecek iki değer birbirine eşit olacaktır. Birim uzama ölçerlerin yapıştırılması sırasında çizilen kılavuz çizgileri kullanılmış, yapışkan bant yardımı ile yönler ayarlanıp sabitlendikten sonra “cyano acrilate adhesive” türü bir yapıştırıcı ile yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bundan sonra birim uzama ölçerlerin bacaklarına uzatma kabloları lehimlenerek hazırlık aşaması tamamlanmıştır.

3. MALZEME KARAKTERİZASYONU VE ANLIK BASINÇ YÜKÜ DENEYLERİ

3.1. Malzeme Karakterizasyonu İçin Yapılan Statik Deneyler

Deney düzeneği ve deney parçası üretimi tamamlandıktan sonra deneysel çalışmalara başlanmıştır. İlk olarak sabit bir yük kullanılarak statik deney gerçekleştirilmiştir. Bu deneyde 134 gram ağırlığında bir nesne, tabanı yere bakacak şekilde ve ankastre mesnede bağlı olarak yatay duran yarı kürenin tepe noktasına yerleştirilmiş, birim uzama ölçme cihazı, birim uzama ölçer ve elektronik ölçme cihazı kullanılarak birim uzamalar ölçülmüştür.



Şekil 3.1 Statik deney

Ölçme işlemi şu prensibe dayanır. Hook yasası gereği yük altındaki cisimlerde yükle doğru orantılı olarak şekil değiştirmeler meydana gelir. Boy uzamasının serbest haldeki boya olan oranı birim uzamadır ve birim uzama ölçerler vasıtası ile deneysel olarak ölçülebilir. Serbest haldeki yapının ilgilenilen noktasına yapıştırılan birim uzama ölçer, yük altında yapı ile birlikte esner ve üzerinde ölçüm yönünde bulunan direnç yollarının eni ve boyu değişir ve değişim ile orantılı olarak direncin

Ölçülen voltaj değeri kullanılarak birim uzama hesabında kullanılan bağıntı aşağıdadır.

$$V_k = \frac{\varepsilon_{kr} \times V_\varphi \times V_{giriş}}{\varepsilon_b \times K} \quad (3.2)$$

V_k : Kalibrasyon gerilimi 1.126

V_φ : Beklenen çıkış gerilimi 1.2V

$V_{giriş}$: Besleme gerilimi 2V

ε_b : Beklenen birim uzama 600×10^{-6}

K : Birim uzama ölçer faktörü 2.11

120 ohm'luk birim uzama ölçerler kullanılarak gerçekleştirilen statik deneyler sonucunda elde edilen ölçümler ve bulunan birim uzama değerleri aşağıdaki tabloda yer almaktadır.

Tablo 3.1 Statik deney sonuçları

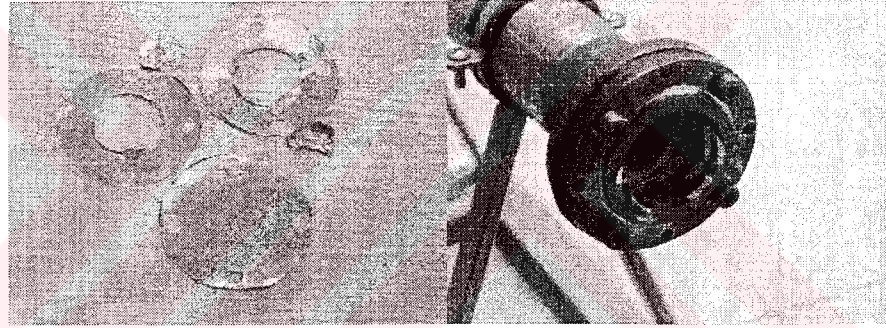
Ağırlık (gr)	Okunan Gerilim (V)	Birim uzama (μS)
56,69	0,146	73
134,08	0,263	131,5
190,77	0,369	184,5
236,39	0,458	229
366,03	0,749	374,5

3.2. Anlık Basınç Yükü Deneyleri

Anlık basınç yükü deneyleri, bu çalışmanın özünü teşkil etmektedir. Deneyler esnasında, düzenek üzerinde sabit mesnetle tutturulmuş halde bulunan, yarı küresel cam ve epoksiden üretilmiş yarı küresel kompozit kabuğa anlık bir basınç dalgası çarptırılarak yapı üzerinde oluşan birim uzamalar ölçülmüştür.

Ayrıntısı deney düzeneği tasarımı bölümünde anlatıldığı üzere, ağzı bakır bir membranla kapatılmış basınç borusunun basınçlandırılması ve membran kalınlığı ile değişen bir basınçta membranın yırtılması neticesinde anlık basınç yükü elde edilmiştir. Ortaya çıkan basınç dalgası, boru ağzının tam karşısında yer alan kabuk

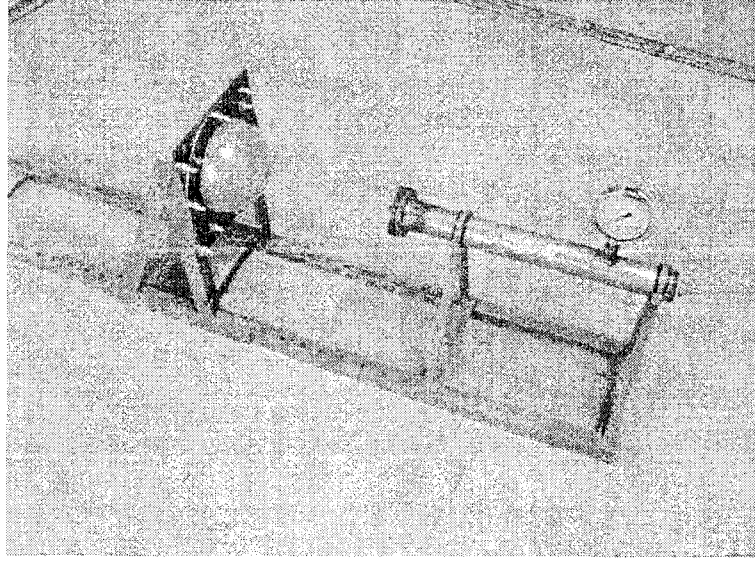
yapıya çarptırılmış ve yapı dinamik yük etkisinde bırakılmıştır. Yükleme neticesinde kabuk lineer sınırdaki şekil değişimine uğramış ve yüzeylerde birim uzamalar meydana gelmiştir. Statik deney bölümünde anlatılan prensiple kabuk iç yüzeyine yapıştırılmış birim uzama ölçerler ve birim uzama ölçme cihazı kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiş, veri kaydı için bir bilgisayardan faydalanılmıştır. Analog birim uzama ölçme cihazı direkt olarak bilgisayara bağlanamadığı için arada 100 mHz'lik bir dijital skop kullanılmış ve bilgisayar bağlantısı RS 232 bağlantı yolu ile gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında 0,02 , 0,05 ve 0,1 mm kalınlığında membranlar kullanılmış , 20 ve 30 cm'lik mesafelerde patlamalar gerçekleştirilmiştir. Basınç tüpüne bağlanmış olan manometre ile yapılan ölçümlerde 0,03 mm'lik membranlarla ortalama 1 bar'lık bir basınca ulaşılırken, 0,05 mm kalınlığındaki membranlar kullanıldığında basıncın büyüklüğü 1,7 bar civarındadır. 0,1 mm'lik membranla yapılan denemede ise kompresör basıncı olan 9 bar'a ulaşılmışsa da patlama gerçekleşmemiştir. Patlatılan membranlara ait fotoğraflar aşağıda dır.



Şekil 3.4 Basınç tüpü ve membranlar

Deney sonucunda anlam taşıyan grafiklere ulaşabilmek için yüksek frekansta verileri temini gerekmektedir. Bunun yanında kullanılan elektronik ekipmanın getirdiği sınırlandırmalar neticesinde patlama başına yalnızca 2000 adet veri kaydedilebilmektedir. Bu nedenle ölçüm süresi mümkün olduğunca kısa tutulmalıdır. Diğer taraftan patlama olayının çok kısa bir süre içinde gerçekleştiği düşünülürse, ölçüm başlangıcı ile patlama anının çok iyi senkronize edilmesi gerektiği ortadadır. Bu durum dikkate alınarak giderek azalan ölçüm süreleri ile deney tekrarlanarak mümkün olan en yüksek frekanslı veri kaydı gerçekleştirilmiştir.

Aşağıda deneysel çalışmalara ait fotoğraf yer almaktadır.



Şekil 3.5 Anlık basınç yükü deneyi

Denemeler sırasında kullanılan en uzun süre 2 saniye iken, veri elde edilebilen en kısa süre ise 0.02 saniyedir. Benzer bir durum da ölçülen voltajın aralığının belirlenmesi için geçerlidir. Çok geniş aralıkta ölçüm yapıldığında düşük çözünürlükte veri elde edilirken çok dar bir aralık seçildiğinde ise maksimum değer grafik dışında kalacaktır. Bu nedenle müteakip denemelerde elde edilen sonuçlar değerlendirilerek voltaj aralığı seçimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan aralık 2 volt ile 10 volt arasında değişmektedir. İlk patlamalar sonucunda, küre tepe noktasındaki birim uzama ölçerden makul sonuçlar alınırken ikinci algılayıcıdan elde edilen voltajın parazit değerini aşmadığı görülmüştür.. Bu nedenle bu algılayıcı sonraki denemelerde kullanılmamıştır. Yukarıdaki şartlar altında gerçekleştirilen anlık basınç yükü deneyde 18 denemenin 10'unda veri elde edilmiştir. Deney tablosu ve elde edilen grafikler ektedir.

4. KOMPOZİT MALZEMEDEN ÜRETİLMİŞ YARI KÜRESEL KABUĞUN BÜNYE DENKLEMLERİ

Kabuklarda kompozit katmanların kalınlığının yanal boyutlara kıyasla çok küçük olması nedeniyle katmanlar arası düzlemde ki zorlanmalar, serbest uçlardan uzakta, ihmal edilebilir. Bunun yanı sıra katmanların birbiriyle mükemmel derecede birleştiği varsayılır . sonuçta katmanlar arasında kayma gerçekleşmediği kabul edilir. Yapılan bir başka önemli ihmal de, katmanın tam ortasından dik olarak geçen hayali bir doğrunun deformasyon sonrası aynı şekilde kaldığıdır. Aslında bu mükemmel yapışma varsayımının bir uzantısıdır [16].

Son olarak katman içi yer değişimlerinin, kalınlığın doğrusal bir fonksiyonu olduğunu söyleyen Kirchhoff varsayımı ile katmanlar arası kesme gerilmeleri, $\varepsilon_{\varphi z}$ ve $\varepsilon_{\theta z}$ ihmal edilir. Bu varsayımlar sonucunda katmanın davranışı, orta katmanın iki boyutlu analizine indirgenmiş olur. Kalınlık doğrultusundaki birim uzama, ε_z ihmal edilirse,

$$w = w(\varphi, \theta) \quad (4.1)$$

Denilebilir. Bu denklem gösterir ki, herhangi bir noktadaki dikey yer değiştirme kalınlık doğrultusunda değişmez. Küresel koordinatlarda birim uzama bağıntısı aşağıdaki gibidir [16].

$$\varepsilon_{\theta} = \varepsilon_{\theta}^0 + zK_{\theta} \quad (4.2)$$

$$\varepsilon_{\varphi} = \varepsilon_{\varphi}^0 + zK_{\varphi} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_{\varphi\theta} = \varepsilon_{\varphi\theta}^0 + zK_{\varphi\theta} \quad (4.4)$$

Burada ε_{φ}^0 , ε_{θ}^0 ve $\varepsilon_{\varphi\theta}^0$ orta katman gerinmeleridir ve K_{φ} , K_{θ} ve $K_{\varphi\theta}$ levhanın eğrilikleridir. Bu değerlere ait bağıntı aşağıdaki gibidir [17],

$$\varepsilon_{\varphi}^0 = \frac{1}{R} \left(\frac{\partial u_{\varphi}}{\partial \varphi} + u_z \right) \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_{\theta}^0 = \frac{1}{R \cdot \sin \varphi} \left(\frac{\partial u_{\theta}}{\partial \theta} + u_{\varphi} \cos \varphi + u_z \sin \varphi \right) \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_{\varphi\theta}^0 = \sin \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{u_{\theta}}{R \cdot \sin \varphi} \right) + \frac{1}{R \cdot \sin \varphi} \frac{\partial u_{\varphi}}{\partial \theta} \quad (4.7)$$

$$K_{\varphi} = \frac{1}{R} \frac{\partial \beta_{\varphi}}{\partial \theta} \quad (4.8a)$$

$$K_{\theta} = \frac{1}{R \cdot \sin \varphi} \left(\frac{\partial \beta_{\theta}}{\partial \theta} + \beta_{\theta} \cdot \cos \varphi \right) \quad (4.8b)$$

$$K_{\varphi\theta} = \sin \varphi \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\beta_{\theta}}{R \cdot \sin \varphi} \right) + \frac{1}{R \cdot \sin \varphi} \frac{\partial \beta_{\varphi}}{\partial \theta} \quad (4.9)$$

Yukarıdaki denklemlerde geçen β_{φ} ve β_{θ} ifadeleri aşağıda açıklanmıştır.

$$\beta_{\varphi} = \frac{1}{R} \left(u_{\varphi} - \frac{\partial u_z}{\partial \varphi} \right) \quad (4.10)$$

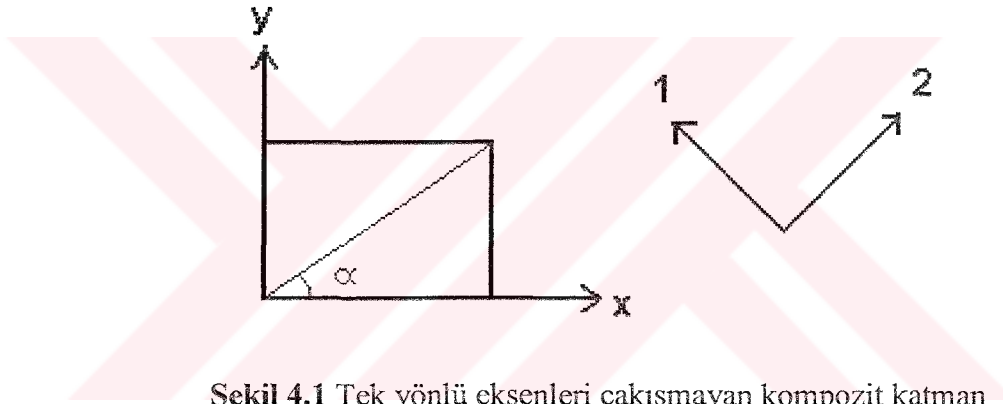
$$\beta_{\theta} = \frac{1}{R \cdot \sin \varphi} \left(u_{\theta} \cdot \sin \varphi - \frac{\partial u_z}{\partial \theta} \right) \quad (4.11)$$

Kompozit yapılar genelde birden çok katmandan oluşurlar. Bahsi geçen yapının n adet katmandan oluştuğu ve et kalınlığının h olduğu düşünülürse, k katmanına ait gerilme birim uzama ilişkileri Hook yasası kullanılarak aşağıdaki temel denklem ile ifade edilebilir [16].

$$[\sigma]_k = [\bar{Q}]_k [\varepsilon]_k \quad (4.12)$$

Burada $[\sigma]$ gerilme tensörünü, $[\bar{Q}]$ genel halde ortotropik bir katman için katılık matrisini, $[\varepsilon]$ ise birim uzama tensörünü temsil eder. İfadenin açık hali ise aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_\varphi \\ \sigma_\theta \\ \sigma_{\varphi\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_\varphi \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_{\varphi\theta} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$



Şekil 4.1 Tek yönlü eksenleri çakışmayan kompozit katman

Şekil 4.1, tek yönlü kompozit bir katmanın eksen takımlarının çakışmadığı bir durumu gösterir. 1-2 sistemindeki özelliklerin bilindiği ve bu özelliklerin $\varphi-\theta$ sisteminde belirlenmeye çalışıldığı durumda, α açısı, $\varphi-\theta$ eksenlerinin 1-2 eksenlerine göre saat yönünün tersinde pozitif alınırsa $m = \cos \alpha$ ve $n = \sin \alpha$ olmak üzere $[\bar{Q}]$ matrisi aşağıda görüldüğü üzere elde edilir.

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{11} &= Q_{11}m^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}n^4 \\ \bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})m^2n^2 + Q_{12}(m^4 + n^4) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11}n^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{22}m^4 \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})m^3n + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})mn^3 \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})mn^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})m^3n \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})m^2n^2 + Q_{66}(m^4 + n^4) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Mühendislikte sıkça, elastik sabitler olarak Young modülü E, Poisson oranı ν , kayma modülü G ve bulk modülü K'yı kullanılmaktadır.

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_1 \nu_2} \quad (4.15)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_1 \nu_2} \quad (4.16)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_1 E_2}{1 - \nu_1 \nu_2} = \frac{\nu_2 E_1}{1 - \nu_1 \nu_2} \quad (4.17)$$

Ayrıca,

$$Q_{66} = G_6 \quad (4.18)$$

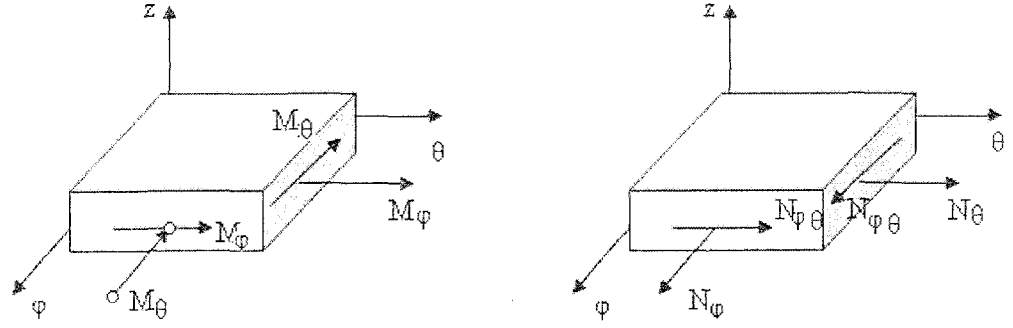
Katmanlı düzlemler teoreminden, gerilme-yer değişim ilişkisi elde edilmişti,. Bu ilişki matris formunda şu şekilde ifade edilebilir.

$$[\varepsilon] = [\varepsilon^0] + z[K] \quad (4.19)$$

(4.18) ile (4.19) birleştirilirse,

$$[\sigma]_k = [\overline{Q}]_k [\varepsilon^0] + z[\overline{Q}]_k [K] \quad (4.20)$$

Katmanlı bir kompozit malzemede gerilmeler katmandan katmana değişeceğinden, katman kuvvetlerinin ve momentlerinin Şekil 4.2'deki gibi tanımlanması daha uygundur.



Şekil 4.2 Katmanlı bir kompozit malzemedeki kuvvet ve momentler

Bu bileşke gerilme ve momentler sayesinde malzemenin orta katmana etkiyen kuvvet ve momentlere denk bir model tasarlanabilir. Çoğu durumda bu yapıda bir kompozit malzeme, gerilme bileşenleri olarak σ_φ , σ_θ , σ_z , $\sigma_{\varphi\theta}$, $\sigma_{\theta z}$ ve $\sigma_{z\varphi}$ 'e sahip olacaktır. Halbuki burada ele alınan modelde sadece σ_φ , σ_θ , $\sigma_{\varphi\theta}$ bileşenleri mevcuttur. Neticede üç gerilme bileşkesi şu şekilde tanımlanabilir.

$$N_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\varphi dz \quad (4.21)$$

$$N_\theta = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\theta dz \quad (4.22)$$

$$N_z = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_z dz \quad (4.23)$$

Bu gerilme bileşikleri birim uzunluk başına düşen kuvvetle aynı boyuta sahip olup, kuvvetler ilgili gerilme bileşeniyle aynı doğrultuda pozitifler. Buna orta katmana uygulanan gerilmelerin oluşturduğu momentlerde eklenecektir. Bileşke momentler aşağıdaki dibi tanımlanabilir [16],

$$M_\varphi = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\varphi z dz \quad (4.24)$$

$$M_\theta = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_\theta z dz \quad (4.25)$$

$$M_{\varphi\theta} = M_{\theta\varphi} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{\varphi\theta} z dz \quad (4.26)$$

Bu üç bileşke gerilmesi (4.25) ve bileşke moment (4.26) sistemlerinin kompozit katmanın kalınlığı boyunca oluşan gerilme dağılımına statik olarak denk olduğu söylenebilir. Sonuçta (4.21) - (4.23) eşitliklerinden, n katman için bileşke gerilme toplamı şu şekilde tanımlanabilir,

$$\begin{bmatrix} N_\varphi \\ N_\theta \\ N_{\varphi\theta} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_\varphi \\ \sigma_\theta \\ \sigma_{\varphi\theta} \end{bmatrix}_k dz \quad (4.27)$$

$$\begin{bmatrix} N_\varphi \\ N_\theta \\ N_{\varphi\theta} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left(\int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_\varphi^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \varepsilon_{\varphi\theta}^0 \end{bmatrix} dz + \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_\varphi \\ K_\theta \\ K_{\varphi\theta} \end{bmatrix} \cdot z dz \right) \quad (4.28)$$

Dikkat edilirse $[\varepsilon^0]$ ve $[K]$ matrislerinin ve verilen herhangi bir katman için N matrisinin z 'nin bir fonksiyonu olmadığı görülür. O halde yukarıda ki ifade kısaca şu şekilde yazılabilir,

$$\begin{bmatrix} N_\varphi \\ N_\theta \\ N_{\varphi\theta} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left(\begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_\varphi^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \varepsilon_{\varphi\theta}^0 \end{bmatrix} \cdot \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz + \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_{\varphi\theta} \\ K_\theta \\ K_{\varphi\theta} \end{bmatrix} \cdot \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right) \quad (4.29)$$

Denklem (4.29) aşağıdaki şekilde tekrar düzenlenebilir.

$$\begin{bmatrix} N_\varphi \\ N_\theta \\ N_{\varphi\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_\varphi^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \varepsilon_{\varphi\theta}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_\varphi \\ K_\theta \\ K_{\varphi\theta} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Denklem (4.30) tensörel formda aşağıdaki gibi ifade edilir [16].

$$[N] = [A] \cdot [\varepsilon^0] + [B] \cdot [K] \quad (4.31)$$

Burada;

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \quad (4.32)$$

ve

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (4.33)$$

dır.

Benzer şekilde (4.24), (4.25) numaralı eşitliklerden bileşke momentler için [16]

$$\begin{bmatrix} M_\varphi \\ M_\theta \\ M_{\varphi\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_\varphi^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \varepsilon_{\varphi\theta}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_\varphi \\ K_\theta \\ K_{\varphi\theta} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

veya

$$[M] = [B] \cdot [\varepsilon^0] + [D] \cdot [K] \quad (4.35)$$

ifadeleri elde edilir. Burada,

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (4.36)$$

ve B_{ij} denklem (4.33) 'de verildiği gibidir.

Katmanlı kompozitler için temel denklem, eşitlik (4.31) ve (4.35) birleştirilerek daha basit bir şekilde aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ K \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

Denklemleri (4.37) 'i $[\varepsilon^0]$ ve $[K]$ terimleri ile ifade etmek için, (4.31) ve (4.35) numaralı eşitlikler kullanılabilir. (4.31) numaralı denklemi çözülürse,

$$[\varepsilon^0] = [A]^{-1}[N] - [A]^{-1}[B] \cdot [K] \quad (4.38)$$

elde edilir. Denklem (4.38) 'yı denklem (4.35) 'de yerine yerleştirilirse,

$$[M] = [B] \cdot [A]^{-1} \cdot [N] - ([B] \cdot [A]^{-1} \cdot [B] - [D]) \cdot [K] \quad (4.39)$$

Denklem (4.38) ve (4.39) ' kullanılarak temel denklem istenen formda elde edilmiş olur.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^* & B^* \\ C^* & D^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ K \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

burada,

$$\begin{aligned} [A^*] &= [A]^{-1} \\ [B^*] &= -[A]^{-1}[B] \\ [C^*] &= [B][A]^{-1} = -[B^*]^T \\ [D^*] &= [D] - [B][A]^{-1}[B] \end{aligned} \quad (4.41)$$

Denklem (4.38) ve (4.41) kullanılarak aşağıdaki iki denklem elde edilir.

$$[\varepsilon^0] = [A^*][N] + [B^*][K] \quad (4.42)$$

$$[M] = [C^*][N] + [D^*][K] \quad (4.43)$$

Denklem (4.43) 'den $[K]$ 'yı çözülürse,

$$[K] = [D^*]^{-1}[M] - [D^*]^{-1}[C^*][N] \quad (4.44)$$

Elde edilen $[K]$ denklem (4.42)'deki yerine konulursa,

$$\begin{aligned} [\varepsilon^0] &= [A^*][N] + [B^*]([D^*]^{-1}[M] - [D^*]^{-1}[C^*][N]) \\ &= ([A^*] - [B^*][D^*]^{-1}[C^*])[N] + [B^*][D^*]^{-1}[M] \end{aligned} \quad (4.45)$$

elde edilir ve denklem (4.42) ve (4.44) birleştirilerek;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ B' & D' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

eşitliğine varılır. Burada

$$\begin{aligned} [A'] &= [A^*] - [B^*][D^*]^{-1}[C^*] \\ &= [A^*] + [B^*][D^*]^{-1}[B^*]^T \quad ([C^*] = -[B^*]^T) \\ [B'] &= [B^*][D^*]^{-1} \\ [C'] &= -[D^*]^{-1}[C^*] = [D^*]^{-1}[B^*]^T = [B']^T = [B'] \\ [D'] &= [D^*]^{-1} \end{aligned} \quad (4.47)$$

dır. Simetriden dolayı $[B'] = 0$, ve yatay yönde kuvvet bulunmamasından dolayı da $[N'] = 0$ olacaktır. O halde denklem (4.46) ;

$$\begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A' & 0 \\ 0 & D' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ M \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

formunu alır ve matris çarpımı sonucu,

$$[K]=[D'] [M] \quad (4.49)$$

olduğu görülür. (4.49) açık halde ifade edilirse [16],

$$\begin{bmatrix} K_{\varphi} \\ K_{\theta} \\ K_{\varphi\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D'_{11} & D'_{12} & D'_{16} \\ D'_{12} & D'_{22} & D'_{26} \\ D'_{16} & D'_{26} & D'_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{\varphi} \\ M_{\theta} \\ M_{\varphi\theta} \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

İlgili yönlerde kuvvet bulunmaması nedeniyle $M_{\theta}=M_{\varphi\theta}=0$ olduğu söylenebilir.

O halde denklem (4.50)

$$\begin{bmatrix} K_{\varphi} \\ K_{\theta} \\ K_{\varphi\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D'_{11} \\ D'_{12} \\ D'_{16} \end{bmatrix} [M_{\varphi}] \quad (4.51)$$

halini alır.

5. YARI KÜRESEL KABUĞUN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE STATİK VE DİNAMİK ANALİZLERİ

Çalışma kapsamında, deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapılabilmesi ve elde edilen verilerin mantık sınamasının gerçekleştirilebilmesi amacı ile sonlu elemanlar yöntemi ile çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Bunlar statik, modal ve dinamik analizlerdir.

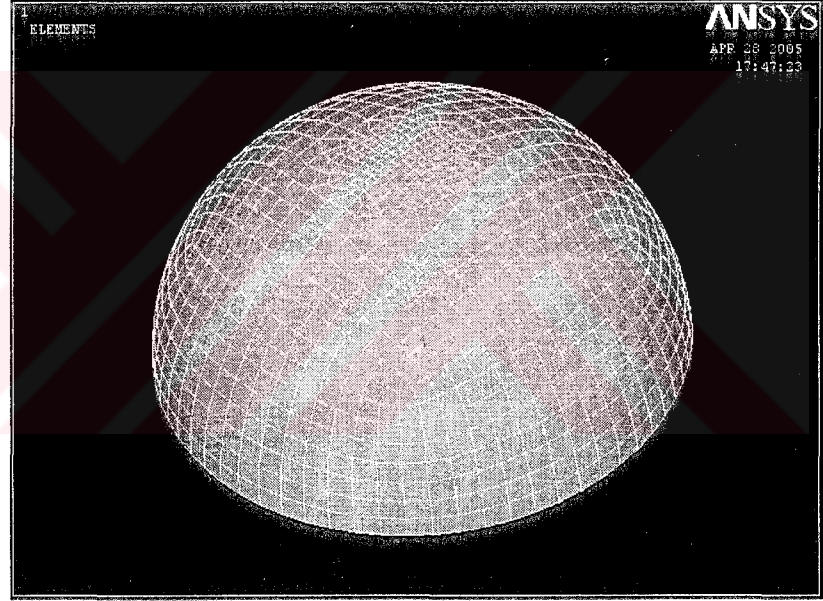
5.1. Statik Analiz

Gerçekleştirilen statik analizde, statik deneyde ki yük ve sınır şartları ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak ANSYS yazılımı ile sayısal sonuçlar üretilmiştir. İlk adım olarak yarı küresel kabuk gerçek ölçülerinde modellenmiş ve tüm yüzey kabaca elemanlara bölünmüş ve birim yük altında birim uzamalar incelenmiştir. Bu ilk inceleme sonucunda elde edilen veriler, beklentilerle örtüşerek, yük uygulanan tepe noktası etrafında göreceli olarak yüksek birim uzamaların meydana geldiğini göstermiştir. Bunun neticesinde belirtilen nokta çevresinde yoğun, geriye kalan bölgelerde ise daha seyrek elemanlar yaratarak analiz yapmanın uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Bu doğrultuda tüm kabuk, bir kenarı 15 mm olan elemanlara bölünmüş, daha sonra tepe noktası etrafında eleman boyutları küçültülerek 756 elemanlık bir mesh yapısı oluşturulmuştur. Kompozit malzemelerin ortotropik özellik göstermeleri ve yapının kabuk olması nedeni ile bu işlemde SHELL91 kabuk elemanları kullanılmış, yapısal lineer ortotropik malzeme seçimi tercih edilmiştir. Girilen malzeme özellikleri Tablo 2.1’de görüldüğü gibidir. SHELL91 elemanına ait ilgili bilgiler aşağıdadır.

Shell 91 elemanı özellikleri:

- Eleman 4’ü köşelerde 4’ü de kenar orta noktalarında olmak üzere 8 noda sahiptir.
- Tüm ataletsel etkilerin eleman düzleminde olduğu varsayılır ve dengelenmemiş katmanlı inşanın kütsel özellikler üzerinde etkisi yoktur.

- Katmanlar arasında kayma olmadığı varsayılır. Kayma deplasmanları elemana dâhildir, yalnız merkez düzleme olan dikliklerin deformasyon öncesindeki yönlerinin korunduğu varsayılır.
- Farklı yükleme adımları ile çalışıldığında, adımların tümünde katman sayısı eşit olmalıdır.
- Gerilme değerleri katman kalınlıkları boyunca lineer olarak değişir.
- Eleman üst ve alt yüzeylerinde kayma gerilmelerinin bulunmadığı varsayımında bulunarak enine kayma gerilmesi hesabı gerçekleştirilir ve bu değerler sadece eleman merkezinde geçerlidir.
- Sadece kümelenmiş kütle matrisi mevcuttur ve matris nod düzleminde etki eder.



Şekil 5.1 Yarı küresel kabuğun sonlu elemanlar modeli

Elemanlar oluşturulduktan sonra tabanda ankastre sınır şartı uygulanmış ve deneyde olduğu üzere 134 grama karşılık 131.5 N'luk yük tepe noktasından tabana dik olacak şekilde yüklenmiştir. Tekil yüklemenin getirdiği dezavantajlar ve deney ortamında da uygulanan yükün yaklaşık 2x2 mm'lik bir alana yayılması göz önüne alınarak, yükleme merkez nod ve çevresindeki 4 noda dağıtılarak gerçekleştirilmiştir. Bu koşullar altında gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen sonuçlar ektedir.

5.2. Modal Analiz

Gerçekleştirilecek dinamik analiz, zamana bağlı sonuçlar verecektir ve bu nedenle eleman yapısının mekanik titreşim analizine de uygun olmaları gerekmektedir. Bu doğrultuda farklı eleman sayıları ile çeşitli modal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde yapının ilk 20 titreşim modu dikkate alınmış ve 300 ile 2352 arası eleman kullanılarak incelemelerde bulunulmuştur. Analiz sonuçlarını gösteren tablo aşağıdadır.

Tablo 5.1 Modal analiz sonuçları

Modal Analiz Sonuçları									
Eleman Sayısı	300	588	798	2352	Eleman Sayısı	300	588	798	2352
Mod	Frekans (Hz)				Mod	Frekans (Hz)			
1	2372.8	2373.2	2373.4	2374.3	11	4078.3	4057.8	4054.3	4048.8
2	2372.8	2373.2	2373.4	2374.3	12	4136.3	4115.7	4112.1	4106.2
3	3579.6	3579.3	3579.1	3578.5	13	4152.2	4127.3	4123.7	4119.6
4	3832.8	3823.9	3821.0	3812.8	14	4152.2	4127.3	4123.7	4119.6
5	3912.5	3908.5	3907.9	3909.1	15	4180.1	4145.2	4140.0	4135.5
6	3912.5	3908.5	3907.9	3909.1	16	4202.0	4173.7	4168.4	4160.7
7	3979.5	3976.9	3976.2	3972.7	17	4220.4	4198.6	4194.8	4191.5
8	3988.6	3983.6	3983.9	3987.2	18	4228.5	4207.9	4203.2	4197.1
9	4046.5	4036.6	4035.4	4035.3	19	4228.5	4207.9	4203.2	4197.1
10	4046.5	4036.6	4035.4	4035.3	20	4264.6	4225.9	4221.0	4212.7

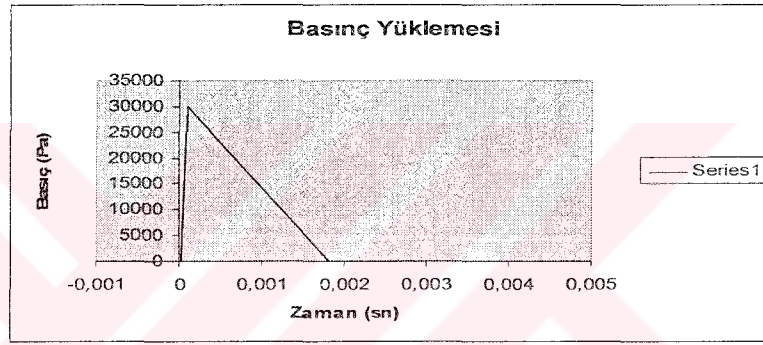
Yukarıdaki tabloda da görüldüğü üzere, 300 ila 2352 adet eleman kullanılarak gerçekleştirilen modal analizlerden elde edilen sonuçlar birbirine aynı denilebilecek kadar yakındır. Neticede statik analizde kullanılan eleman sayı ve geometrisinin dinamik analiz içinde uygun olduğu sonucun varılmıştır.

5.3. Anlık Basınç Yüğü Analizi

Yapılan çalışma ani bir basınç dalgası ile ortaya çıkan dinamik bir yükün, epoksi ve cam kullanılarak üretilmiş yarı küresel kompozit bir kabuk üzerindeki etkilerinin deneysel olarak incelenmesi üzerinedir. Bu kapsamda gerçekleştirilen deneylerler sonucunda elde edilen verilerin desteklenmesi ve karşılaştırmalı olarak incelenmesi amacıyla, aynı zamanda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal incelemeler de yapılmıştır. Statik analizde olduğu gibi bu analizde de ANSYS yazılımından faydalanılmış, yarı küresel kabuk modellenerek ankastre mesnet sınır şartları

uygulanmıştır. Modal analiz sonuçlarına dayanarak, statik analizdeki eleman yapısı ve SHELL91 elemanı tercih edilmiştir.

Patlama sonucunda yüzeye etki eden basıncın büyüklüğü, zamana göre değişmektedir. Geçmişteki benzer çalışmalar dikkate alınarak bu dağılım lineer olarak modellenmiş ve elde deneysel veri bulunmadığından ulaşılan en yüksek değer, basınç tüpündeki basınç ile orantılı olarak tahmin edilmiştir [5]. Ayrıca bu tahmini basınç, kabuk ve basınç tüpü çıkışı arasındaki mesafenin 30 cm olduğu ve basınç alanının bu mesafede pek genişlemediği kabulü altında, yalnızca 4 cm çapında bulunan elemanlara uygulanmıştır. Kabuk yüzeyindeki basınç dağılımının zamana göre değişimin, aşağıdaki grafikte görüldüğü şekilde olduğu kabul edilmiş ve analizde bu değerler kullanılmıştır.



Şekil 5.2 Basıncın zamana göre değişimi

Patlama etkisinin doğası ve kullanılan bilgisayarın kapasitesi göz önüne alınarak, analiz süresi 0.004 saniye ile kısıtlı tutulmuş; bu süre 4 ana bölüme ayrılmıştır. İlk bölüm 0.00001 saniyelik yük öncesi süreçtir. İkinci bölüm 0.00009 saniye sürer ve bu esnada basınç 0 Pa'dan lineer olarak 30.000 Pa değerine ulaşır. Üçüncü bölümde yük yine lineer olarak 0 değerine iner ve bu süreç 0.0018 saniye sürer. Son bölümde yapı üzerinde basınç yükü yoktur ve kabuk serbest titreşim hareketinde bulunur. Bu bölümler, deneysel çalışmalar neticesinde oluşan beklentiler doğrultusunda farklı alt adımlara ayrılmıştır. Adım sayıları sırasıyla 1, 5, 15 ve 30 dur. Küre tepe noktasına ait radyal yönde yer değiştirme (w), boylamsal gerilme (σ_θ), enlemsel gerilme (σ_ϕ), Von Mises gerilmesi (σ_v), boylamsal birim uzama (ϵ_θ), enlemsel birim uzama (ϵ_ϕ) ve Von Mises birim uzaması (ϵ_v) değerinin sayısal inceleme sonucunda elde edilen grafikleri ekte mevcuttur.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Çalışmada kompozit malzemeden yapılmış yarı küresel bir kabuk aniden oluşan bir basınç yükü altında test edilmiş ve kabuğun tepe noktasında birim uzama değerleri ölçülerek dinamik davranışı incelenmiştir. Deneyler söz konusu anlık basınç yükü altında kabuğun ileri titreşim modlarının uyarıldığını göstermektedir. Kabuğun sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan dinamik analizde elde edilen anlık basınç yüküne cevabının frekansı deneysel sonuçlar ile uyum göstermiştir. Aynı zamanda kabuğun sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen anlık basınç yüküne cevabı karakter bakımından da deneysel sonuçlar ile uyumlu bulunmuştur. Bununla birlikte basınç yükünün ölçülmeyp daha önceki çalışmalara dayanan yaklaşık bir yöntem ile elde edilmesi, basıncın tam değerinin belirlenememesine neden olmuştur. Bu da birim uzamanın tepe değerinin sonlu elemanlar yöntemi ile farklı tahmin edilmesine neden olmuştur. Ayrıca kompozit malzemeye ait mukavemet değerlerinin gerçek ile sayısal model arasında farklılık göstermesi, sayısal hesap tekniğinin beraberinde getirdiği hatalar, deneysel hatalar da bu uyumsuzluğun nedenleri arasındadır.

Bu çalışma ile anlık basınç yükü deneylerinin gerçekleştirilerek kabuğun dinamik davranışının deneysel olarak incelenmesi için bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntem ile farklı malzemelerden yapılan aynı geometrideki kabuk yapılar dinamik yükler etkisi altında test edilebilir. Böylece söz konusu yapıların anlık basınç yükleri etkisi altında davranışları karşılaştırılarak yapıların optimizasyonu yapılabilir.

Kurulan deney düzeneği üzerinde gerekli değişiklikler yapıldıktan sonra kompozit yapılar üzerine cisim çarpmasının etkileri incelenebilir. Bunlar ileriki çalışmaların konusu olacaktır.

KAYNAKLAR

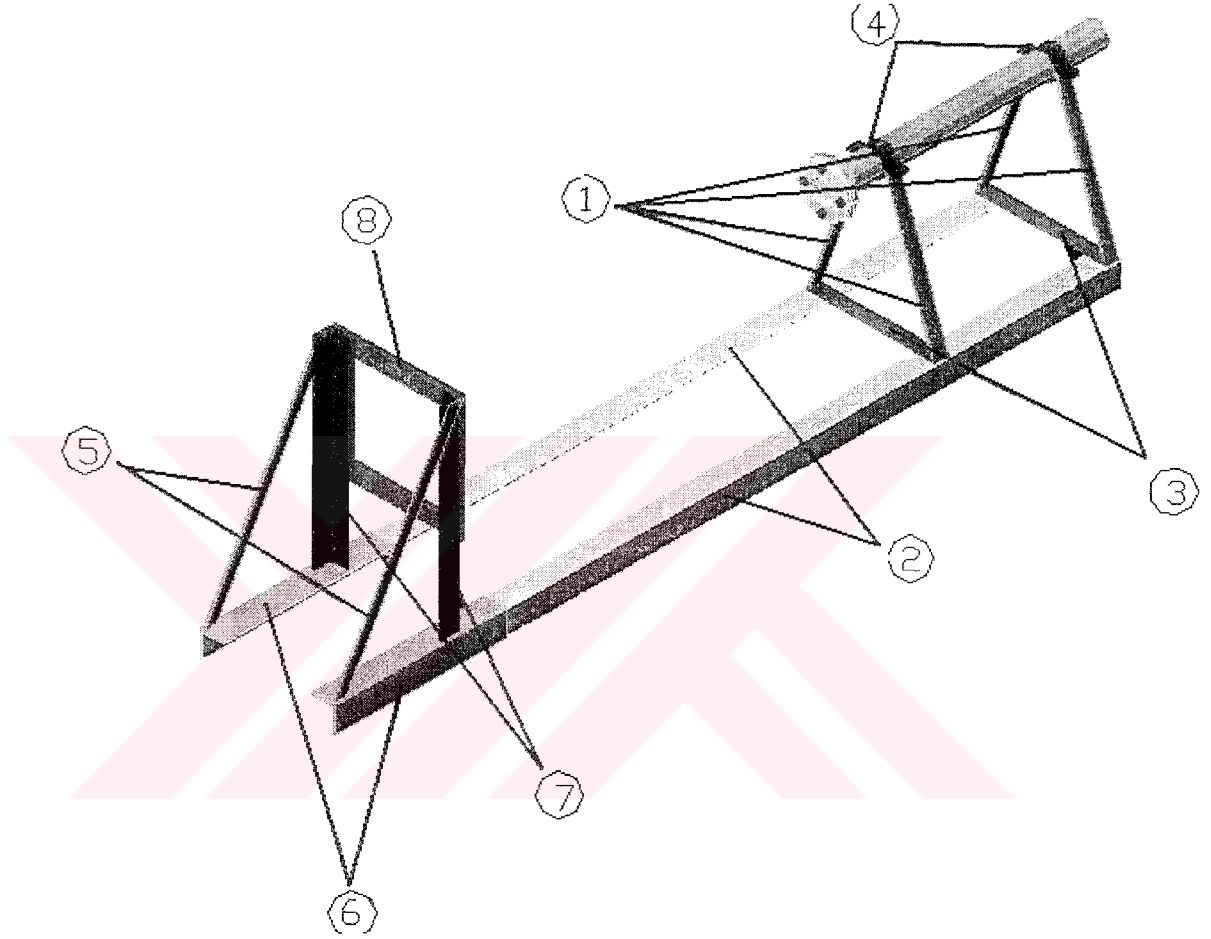
- [1] **Bogdanovich, A. E. ve Feldmane, E. G.**, 1983. Numerical investigation of the bulging process and an analysis of the strength of laminated cylindrical shells under axial impact loads, *Mechanics of Composite Materials (Historical Archive)*, 550 – 558.
- [2] **Jiang, J. ve Olson, M.D.**, 1991. Nonlinear dynamic analysis of blast loaded cylindrical-shell structures, *Computers & Structures*, **41 (1)**, 41-52.
- [3] **Mukhopadhyay, M. ve Goswami S.**, 1996. Transient finite element dynamic response of laminated composite stiffened shell, *Aeronautical Journal*, **100** (1996), 223-233.
- [4] **Zhu, W.H., Xue, H.L., Zhou, G.Q. ve Schleyer, G.K.**, 1997. : Dynamic response of cylindrical explosive chambers to internal blast loading produced by a concentrated charge, *International Journal of Impact Engineering*, **19** (9-10), 831-845.
- [5] **Turkmen, H.S. ve Mecitoğlu, Z.**, 1999. Dynamic response of a stiffened laminated composite plate subjected to blast load, *Journal of Sound and Vibration*, **221(3)**, 371-389.
- [6] **Turkmen, H.S. ve Mecitoğlu, Z.**, 1999. Nonlinear structural response of laminated composite plates subjected to blast loading, *AIAA Journal*, **37 (12)**, 1639-1647.
- [7] **Mukoid, V.**, 1999. Transient dynamic behavior of a closed gas-filled shell subjected to internal blast loading, *International Applied Mechanics*, **35 (3)**, 288-294.
- [8] **Gupta, N.K. ve Prasad, G.L.E.**, 1999. Quasistatic and dynamic axial compression of glass/polyester composite hemispherical shells, *International Journal of Impact Engineering*, **22**, 757-774.
- [9] **Muszynski, L. ve Purcell, M.**, 2002. Composite reinforcement to strengthen existing concrete structures against air blast, *Journal of Composites for Construction*, **7 (2)**, 93-97.
- [10] **Türkmen H.S.**, 2002. Structural response of laminated composite shells subjected to blast loading: Comparison of experimental and theoretical methods, *Journal of Sound and Vibration*, **249 (4)**, 663-678.
- [11] **Kellas, S.**, 2003. Design, Fabrication and testing of a crushable energy absorber for a passive earth entry vehicle, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, **38**, 923 – 934.
- [12] **Oshiro, R. ve Alves, M.**, 2004. Scaling impacted structures, *Archive of Applied Mechanics*, **74 (1-2)**, 130-145.
- [13] **Sk, L. ve Sinha, P.K.**, 2005. Improved finite element analysis of multilayered, doubly curved composite shells, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **24 (4)**, 385-404.

- [14] **Ersümer, A.**, 1969. Döküm Kaynak Plastik Şekil Verme, İstanbul Teknik Üniversitesi Teknik Okulu Yayınları , İstanbul.
- [15] **Piley, P.**, 2005. SP Guide to Composites, SP Systems, Southampton.
- [16] **Chawla, K.K.**, 1987, Composite Materials-Science and Engineering, SpringerVarlag.
- [17] **Soedel, W.**, 1993. Vibration of Shells and Plates, Marsel Dekker Inc., New York, Bessel, Honk Kong.



EK A

Patlama Düzenekinin Üretim Planı



Şekil A.1 Patlama düzenekinin genel görünüşü

Parçalar:

- 4 adet 350 mm uzunluğunda 20x10 mm'lik Dikdörtgen profil
- 2 adet 1850 mm uzunluğunda 40x40 mm'lik Köşebent
- 2 adet 300 mm uzunluğunda 40x5 mm'lik Lame profil
- 2 adet kelepçe
- 2 adet 550 mm uzunluğunda 40x5 mm'lik Lame profil
- 2 adet 400 mm uzunluğunda 40x40 mm'lik Köşebent
- 2 adet 480 mm uzunluğunda 40x40 mm'lik Köşebent

Kesim işlemleri:

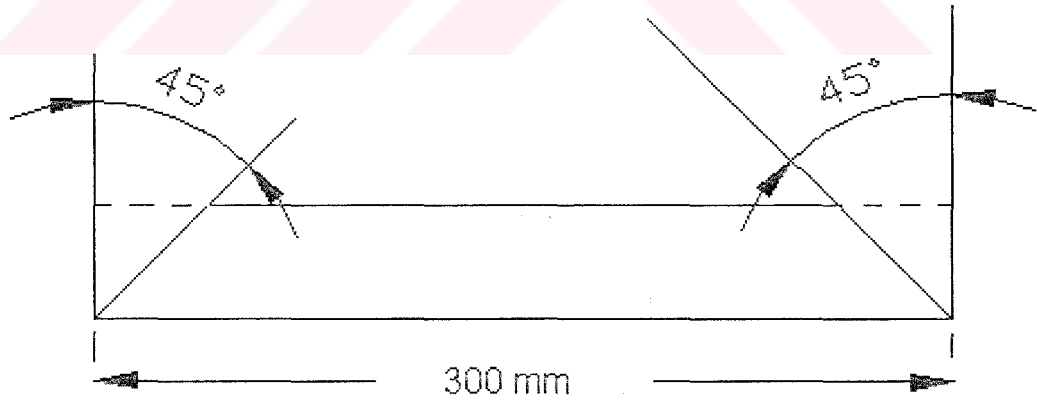
1-7 parçaları satın alınan yerde kaba ölçüler ile kesilmiştir. Bu parçalar yukarıda belirtilen uzunluklara getirilmelidir.

4 adet parça 1'in bir kenarı aşağıda görüldüğü gibi 70 derecelik açı ile kesilmelidir.



Şekil A.2 Parça 1'in kenar eğimi

Parça 8 deki 2 adet çerçevenin oluşturulması için 8 adet 300 mm uzunluğunda lama profilli parçanın aşağıda görüldüğü gibi kenarlarının 45 derecelik eğil ile kesilmesi gereklidir.

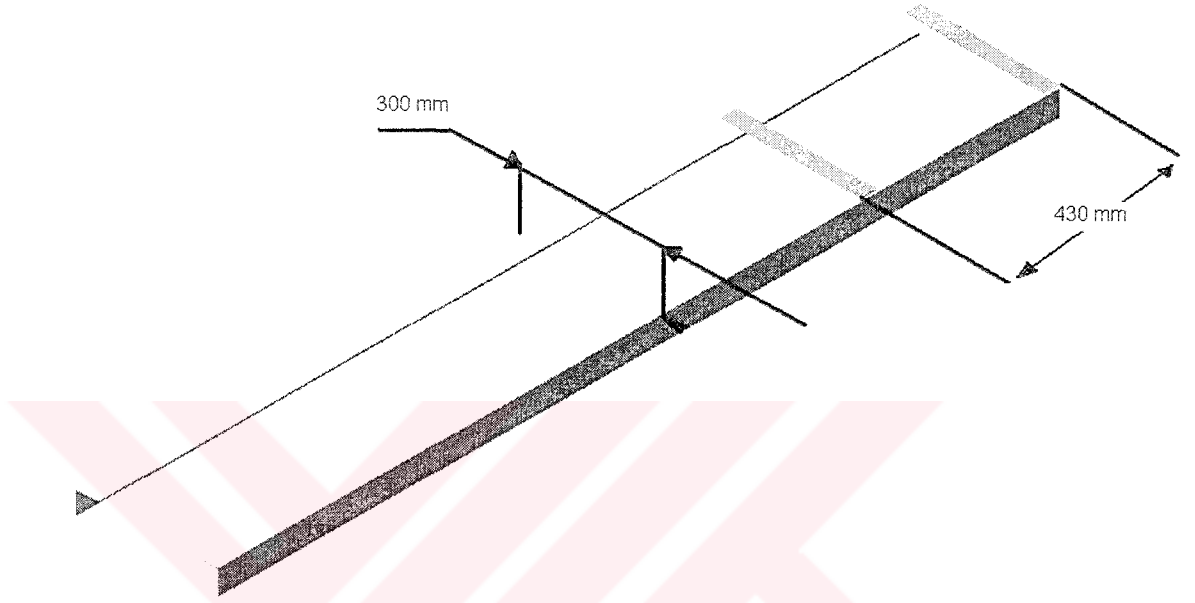


Şekil A.3 Çerçeveyi oluşturacak 8 adet parçanın kesimi

Kaynak işlemleri:

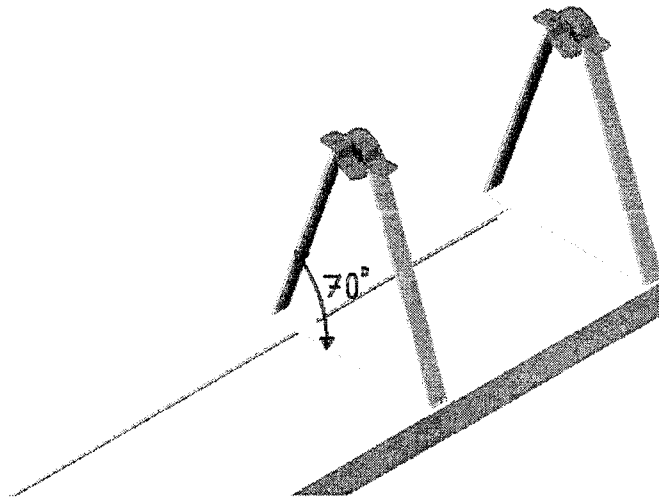
Patlama düzeneğini oluşturulması için kaynak işlemine ihtiyaç duyulmaktadır. Kaynak işlemleri aşağıdaki sıra ve tarif ile yapılmalıdır.

Parça 2'ler (2 adet 1850 mm uzunluğunda 40x40 mm'lik Köşebent) aralarındaki mesafe dıştan dışa 300 mm olacak şekilde aşağıdaki gibi yerleştirilmeli ve Parça 3'ler gösterildiği gibi bunların üzerine kaynaklanmalıdır.



Şekil A.4 Destek parçaların yerleştirilmesi

Sonraki adımda Parça 1'ler (4 adet 350 x 20x10 mm'lik Dikdörtgen profil) ve parça 4'ler (2 adet kelepçe) kullanılarak aşağıdaki şekil oluşturulmalı ve kaynak yapılmalıdır. Bu işlemler esnasında kelepçelerin merkezde olmalarına dikkat edilmelidir.



Şekil A.5 Şekil Açılar

ÖZGEÇMİŞ

Sinan İlkiz, 1980 yılında Bandırma’da doğdu.

Orta okul ve lise öğrenimini İstanbul’da tamamladı.

2002 yılında İ.T.Ü. Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği lisans programından mezun oldu ve aynı yıl Telekomünikasyon Mühendisliği yüksek lisans programına girdi.

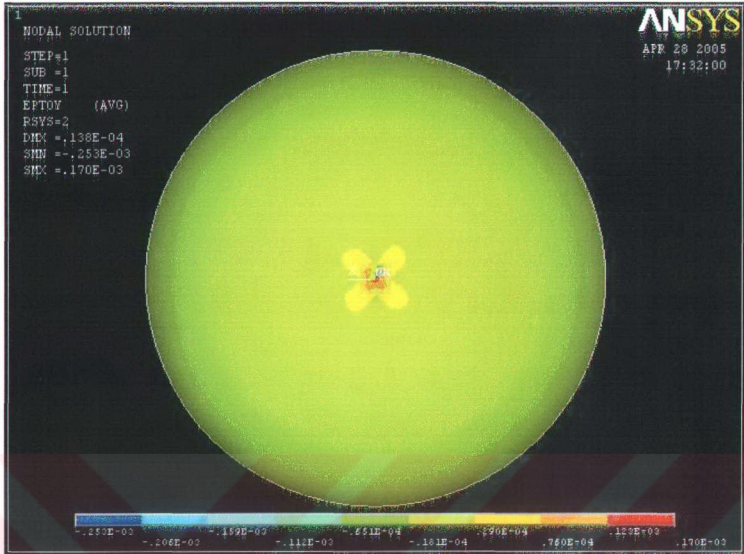
2000 – 2004 yılları arasında Doğuş Yayın Grubu’nda (NTV & CNBC-e televizyon kanalları) Şebeke ve Güvenlik Uzmanı olarak çalıştı.

2004 yılı sonundan itibaren Borusan Telekom ve İletişim Hizmetleri’nde Şebeke Mühendisi olarak çalışıyor.

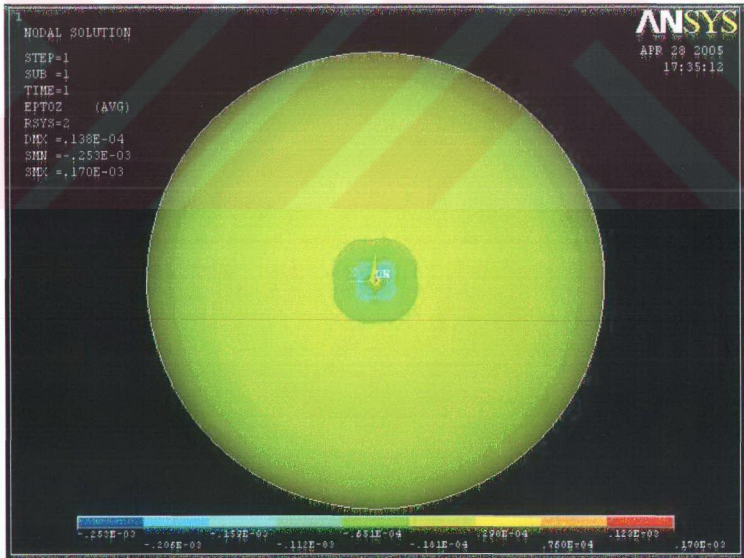
Üretilen çerçeve, merkezi kelepçelere takılan patlama borusunun merkezine karşı gelecek şekilde yerine yerleştirilerek her kenarında 3 delik olacak şekilde 12 yerinde delinecektir.

Çerçeveler yapının hareketli kısmına vidalandıktan sonra, hareketli kısım yapının en uç noktasına getirilerek her iki tarafından 4'er delik delinecektir. Bu işlem, hareketli kısmı 10'ar santimetre ileri hareket ettirilerek sonuna kadar tekrarlanacaktır.

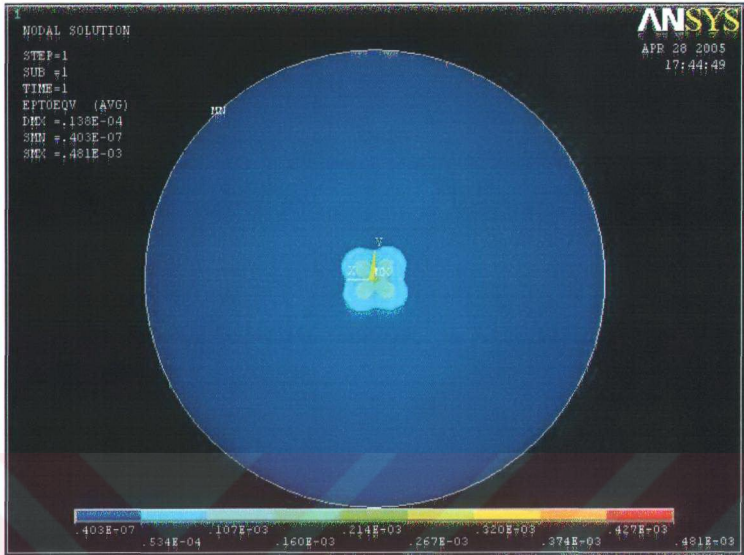




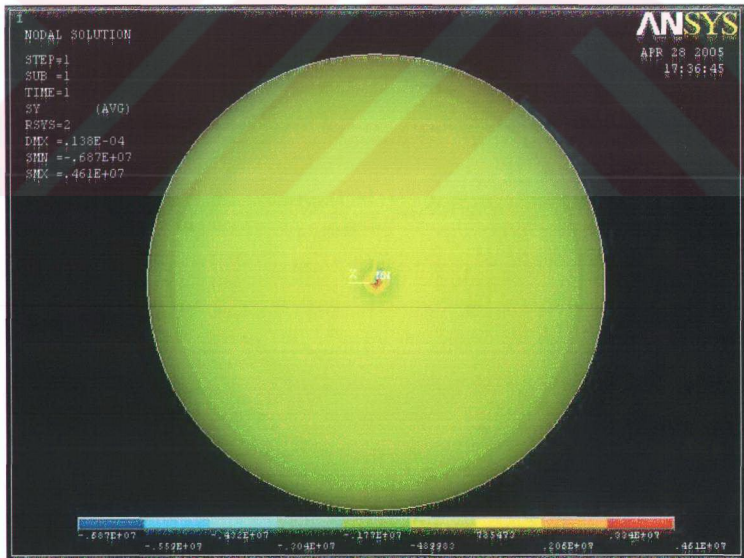
Şekil C.12 Boylamsal yöndeki birim uzama (ε_θ)



Şekil C.13 Enlemsel yöndeki birim uzama (ε_ϕ)



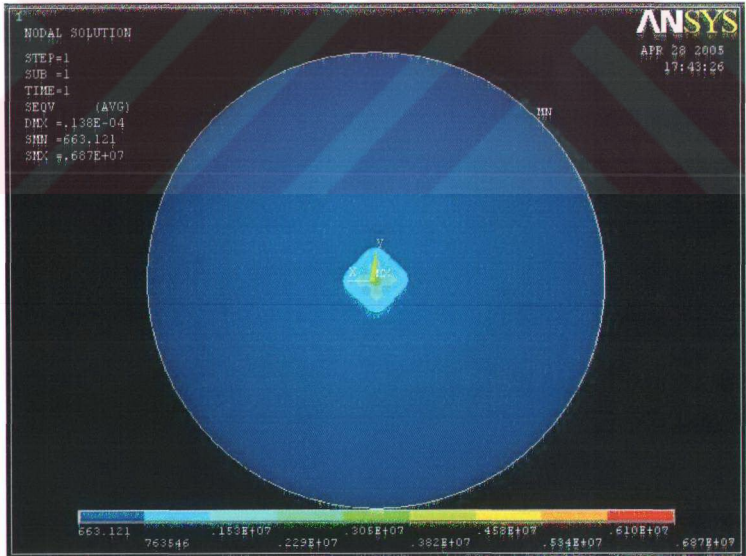
Şekil C.14 Von Mises birim uzaması (εv)



Şekil C.15 Boylamsal yöndeki gerilme ($\sigma\theta$)

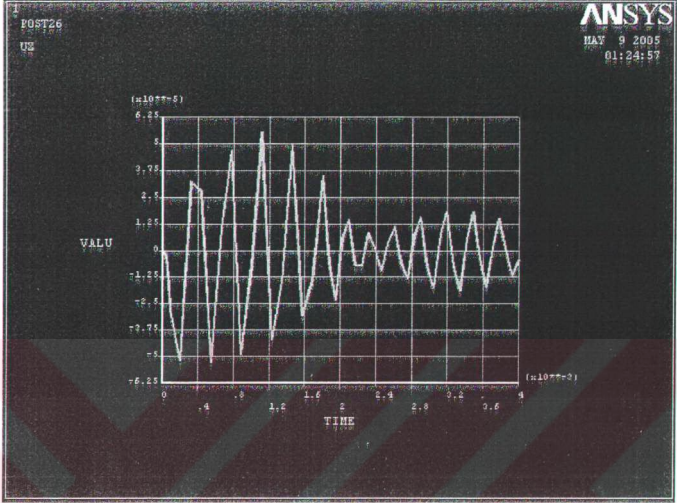


Şekil C.16 Enlemsel yöndeki gerilme (σ_ϕ)

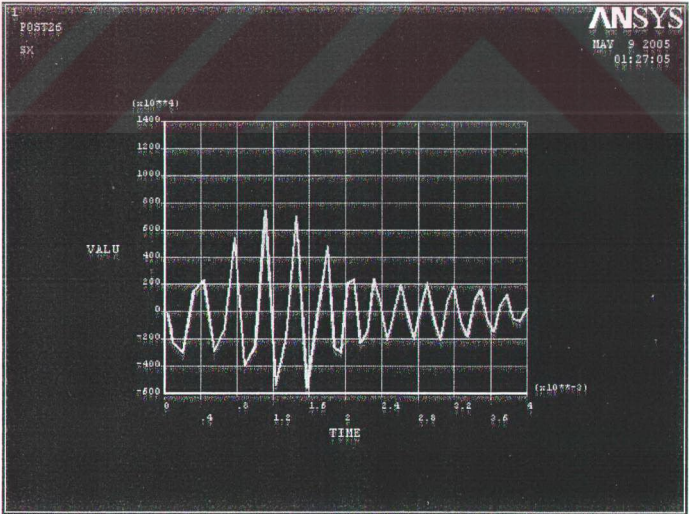


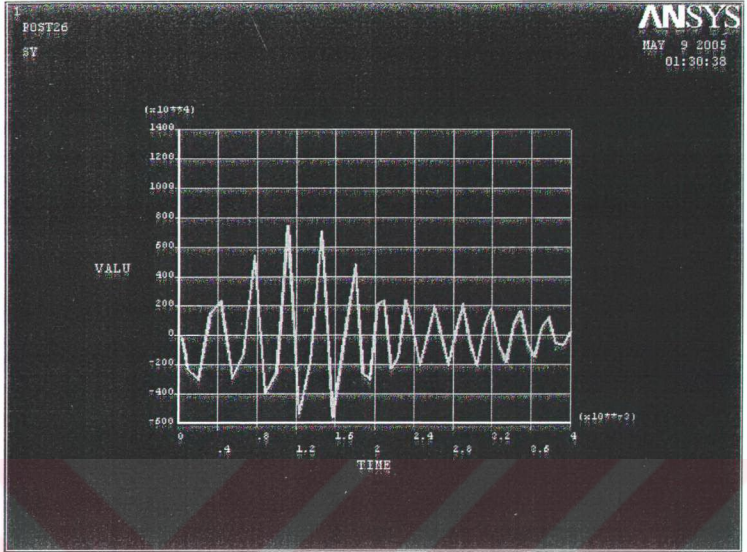
Şekil C.17 Von Mises gerilmesi (σ_v)

Transient Analiz Sonuçları

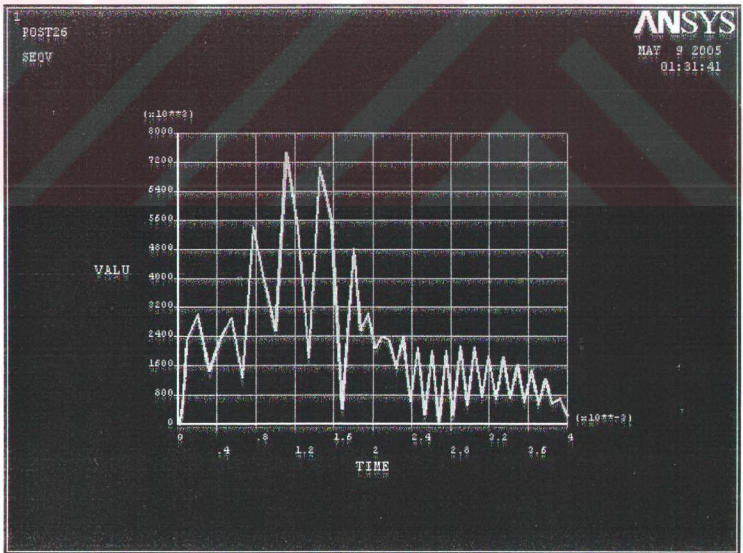


Şekil D.1 Radyal yönde yer değiştirme (w)

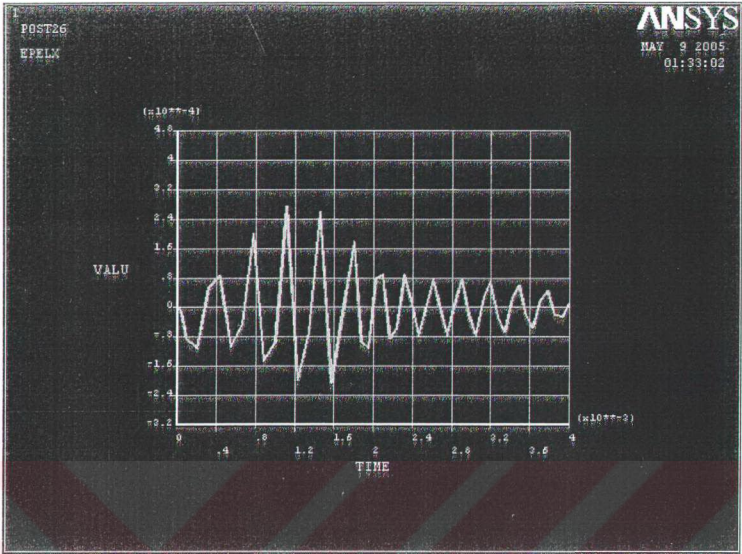
Şekil D.2 Boylamsal gerilme (σ)



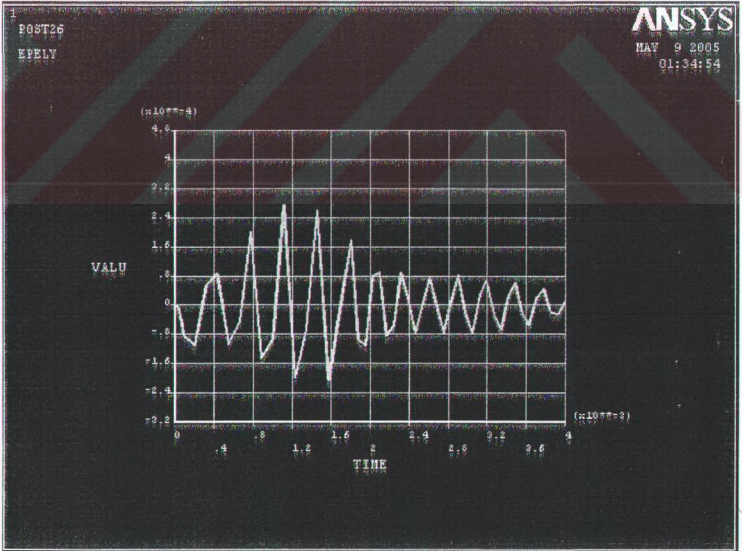
Şekil D.3 Enlemisel gerilme ($\sigma\phi$)



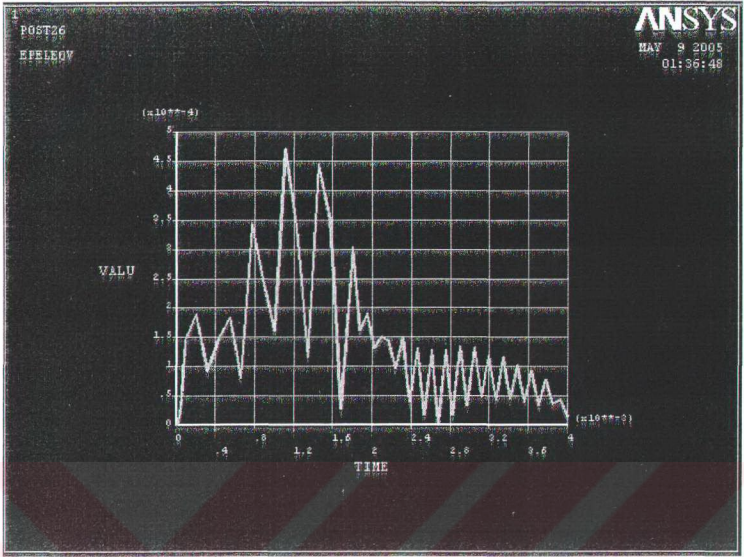
Şekil D.4 Von Mises gerilmesi (σv)



Şekil D.5 Boylamsal birim uzama (ϵ_θ)



Şekil D.6 Enlemsel birim uzama (ϵ_ϕ)



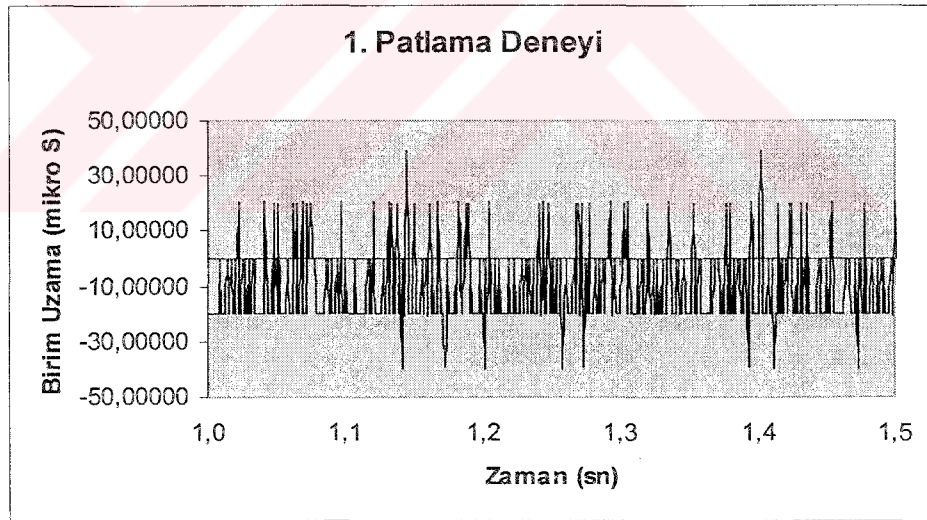
Şekil D.7 Von Mises birim uzaması (ev)

EK B

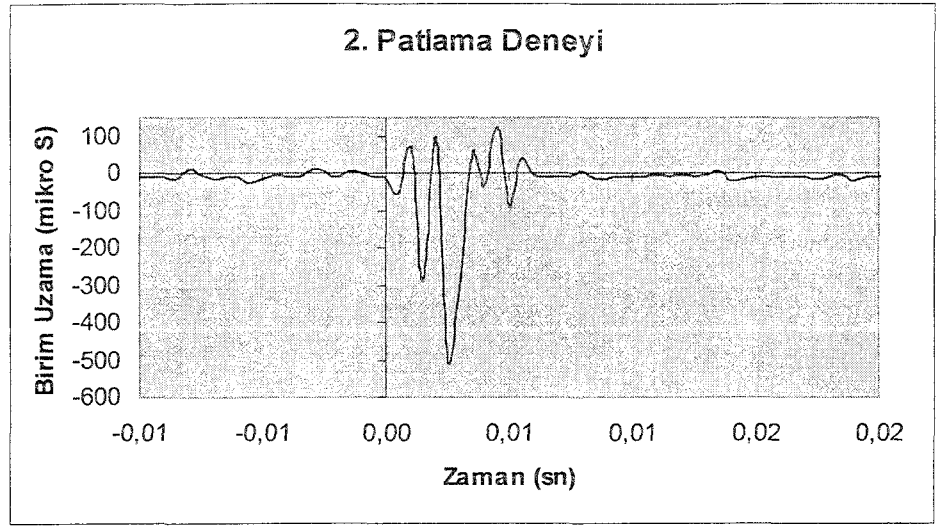
Patlama Deneyi Tablo ve Sonuçları

Tablo B.1 Ani basınç yükü deney tablosu

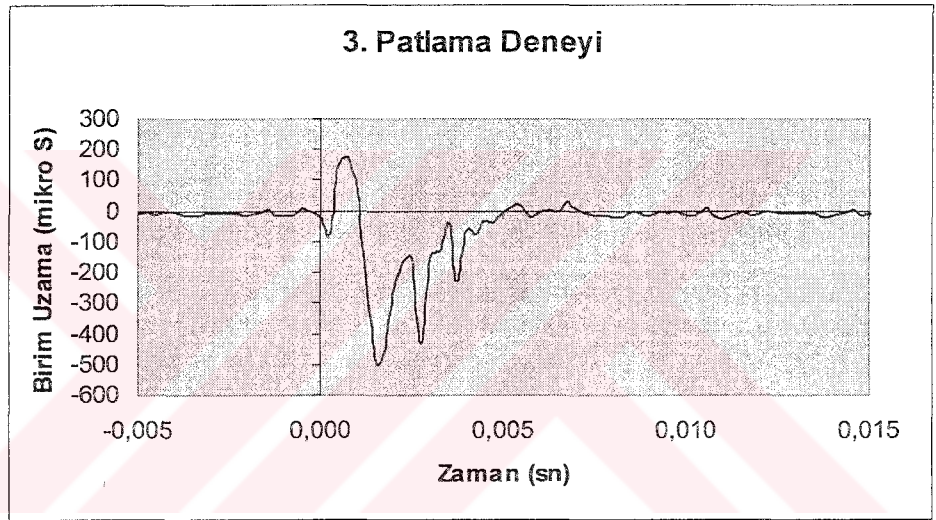
Deney no	Uzaklık (mm)	Basınç(bar)	V aralığı	Ölçüm Süresi (sn)
1	20	1,1	10	2,00
2	20	1,2	2	1,00
3	20	0,9	2	0,50
4	20	1,0	3	0,30
5	30	2,0	3	0,30
6	30	1,8	10	0,10
7	30	1,7	10	0,05
8	30	1,6	10	0,02
9	30	1,7	10	0,02
10	30	1,8	10	0,02



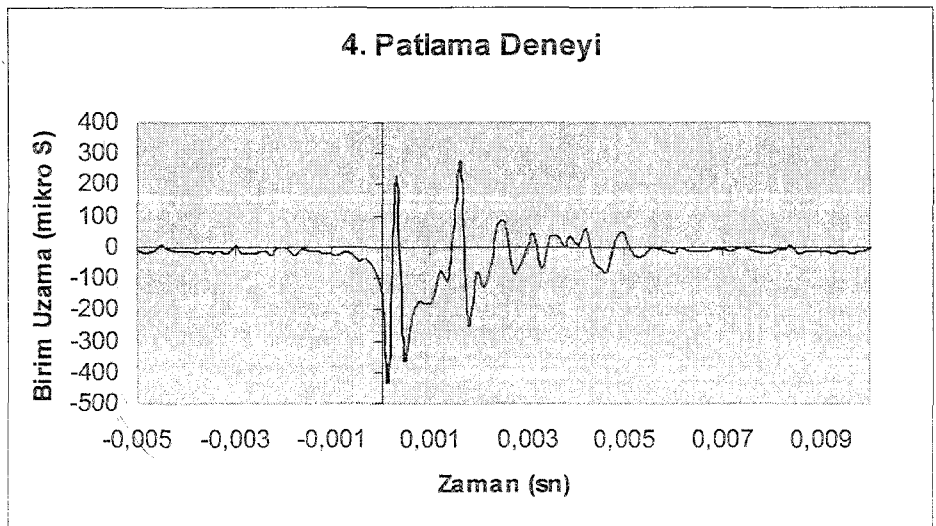
Şekil B.1 1.Patlama deneyi sonuç grafiği



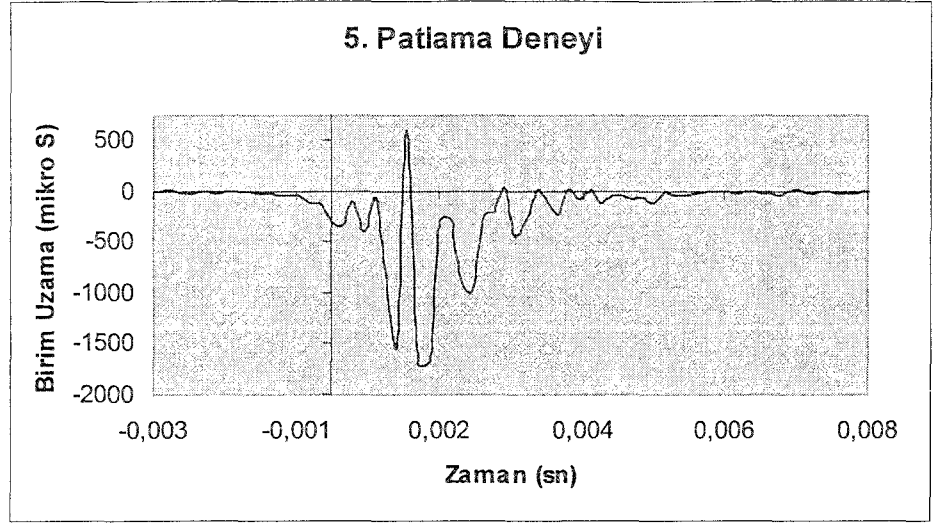
Şekil B.2 2.Patlama deneyi sonuç grafiği



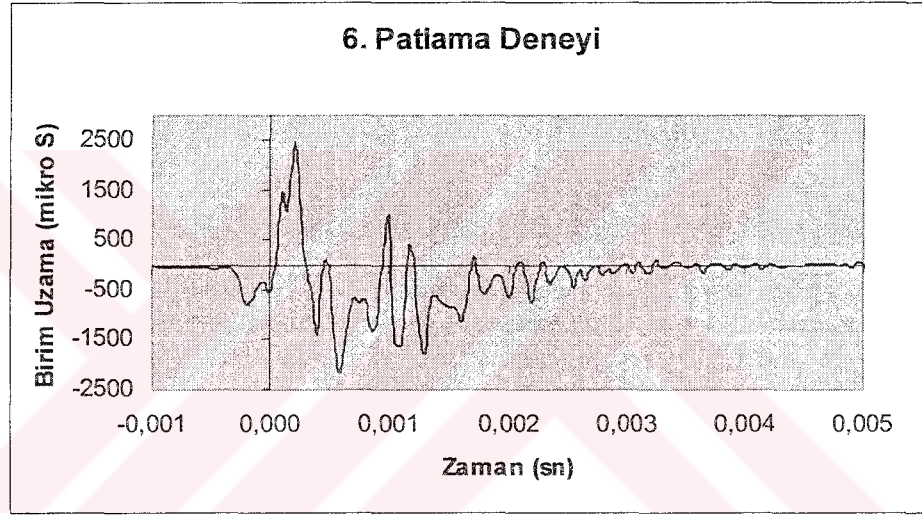
Şekil B.3 3.Patlama deneyi sonuç grafiği



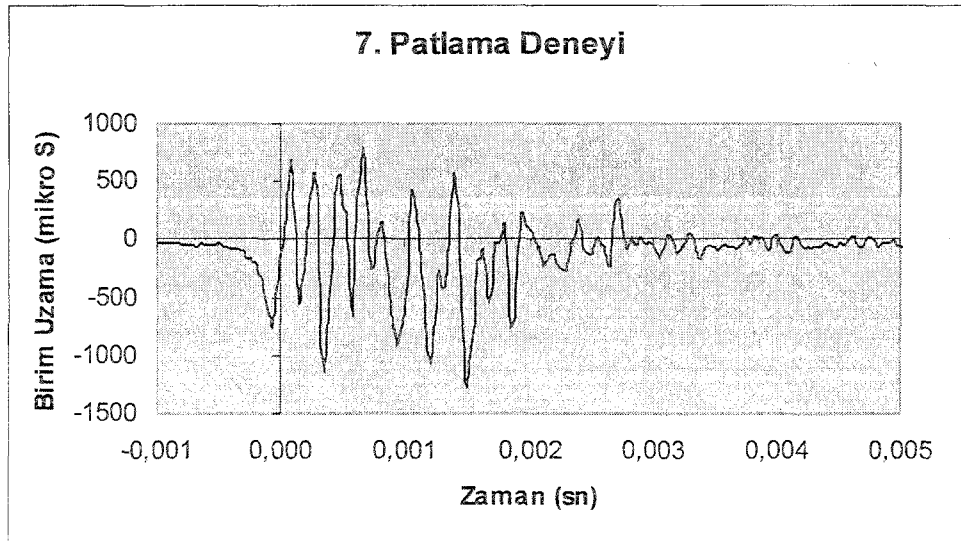
Şekil B.4 4.Patlama deneyi sonuç grafiği



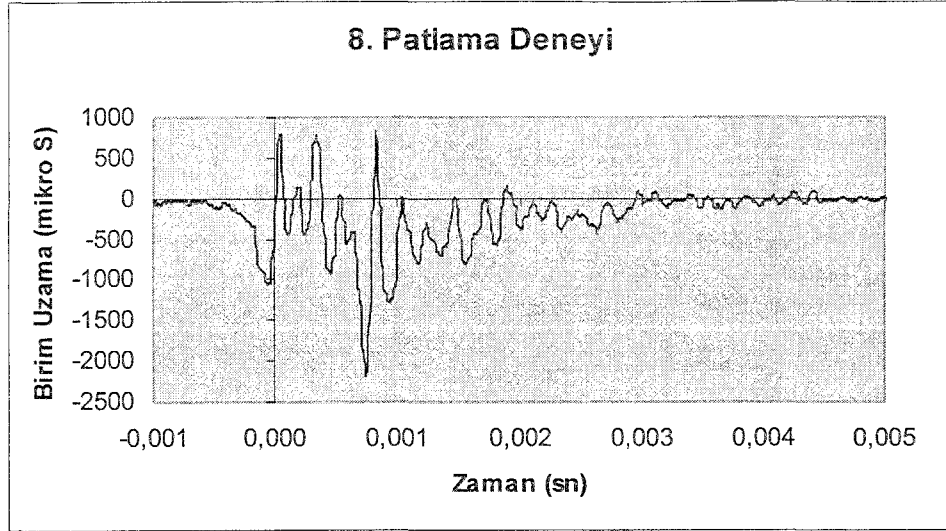
Şekil B.5 5.Patlama deneyi sonuç grafiği



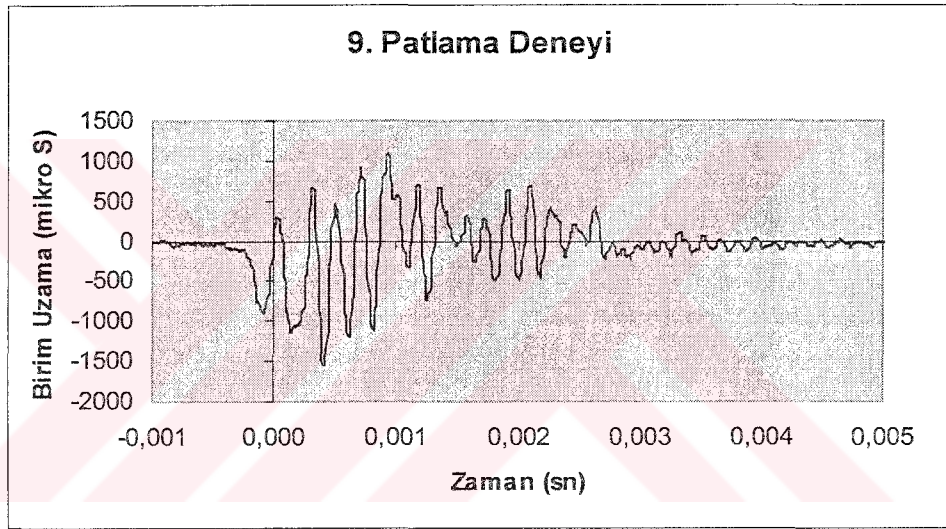
Şekil B.6 6.Patlama deneyi sonuç grafiği



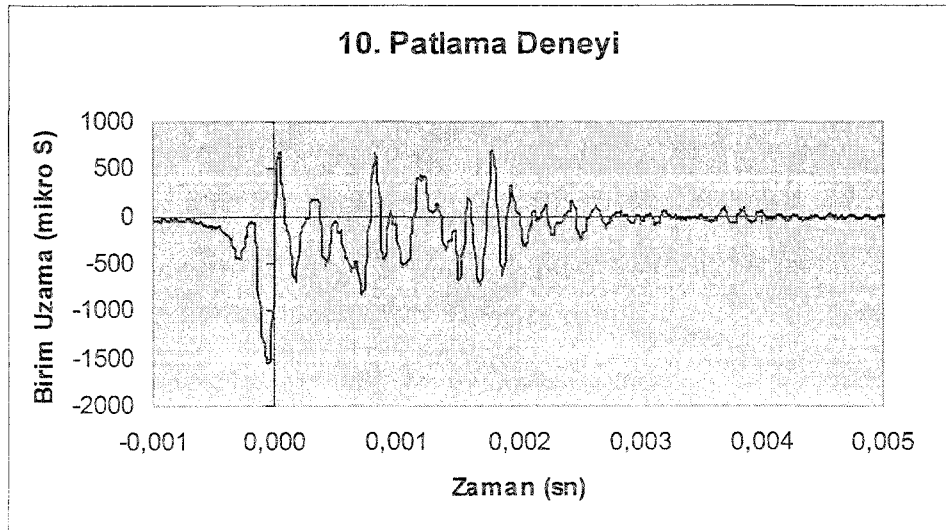
Şekil B.7 7.Patlama deneyi sonuç grafiği



Şekil B.8 8.Patlama deneyi sonuç grafiği



Şekil B.9 9.Patlama deneyi sonuç grafiği



Şekil B.10 10 Patlama deneyi sonuç grafiği