

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METAL KATMANLAR İÇEREN HİBRİT KATMANLI
KOMPOZİT PLAKLARIN ANLIK BASINÇ YÜKÜ
ALTINDAKİ DİNAMİK CEVABININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Akın ÖMERCİKOĞLU**

Anabilim Dalı : Uçak ve Uzay Mühendisliği

Programı : Uçak ve Uzay Mühendisliği

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METAL KATMANLAR İÇEREN HİBRİT KATMANLI
KOMPOZİT PLAKLARIN ANLIK BASINÇ YÜKÜ
ALTINDAKİ DİNAMİK CEVABININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Akın ÖMERCİKOĞLU
(511071103)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 4 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 3 Haziran 2009

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

HAZİRAN 2009

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanması sırasında desteğini, engin tecrübesini ve değerli vaktini benimle paylaşan danışman hocam Prof. Dr. Zahit Mecitoğlu'na, fikirleri ve önerileri ile çalışmamın gelişimine katkıda bulunan Prof. Dr. Mehmet Hakkı Omurtag ve Doç. Dr. Halit Süleyman Türkmen'e teşekkürlerimi sunarım. Kompozit plakların hazırlanmasında ve deneylerin gerçekleştirilmesi aşamasında yardımlarını hiçbir zaman benden esirgemeyen ROTAM teknisyenlerinden Aytekin Güven ve Müslüm Çakır'a, çalışma arkadaşlarım Berat Gürdal Tugay, İdil Sezer ve Ali Baş'a teşekkür ederim. Ayrıca, lisansüstü eğitimim boyunca, beni Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı tarafından verilen burs ile destekleyen TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak, maddi ve manevi her türlü desteklerini hiçbir zaman benden esirgemeyen, bana güvenen aileme ve Hafize Ebru Sevgi'ye tüm kalbimle teşekkür ederim.

Mayıs 2009

Akın ÖMERCİKOĞLU
(Uçak Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	7
2.1 Kompozit Malzemelerin Olumlu ve Olumsuz Özellikleri	7
2.2 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	8
2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	9
2.3.1 Metal matrisli kompozitler	9
2.3.2 Seramik matrisli kompozitler	9
2.3.3 Polimer matrisli kompozitler	10
2.4 Polimer Matrisli Kompozitlerin Elemanları.....	10
2.4.1 Matris elemanı.....	10
2.4.1.1 Polyester reçine	11
2.4.1.2 Vinilester reçine	11
2.4.1.3 Epoksi reçine.....	12
2.4.2 Takviye elemanı	13
2.4.2.1 Cam elyafı	14
2.4.2.2 Karbon elyafı.....	14
2.4.2.3 Aramid elyafı	14
2.4.3 Dolgu elemanı	15
2.5 Sürekli Elyafların Dokuma Çeşitleri	15
2.5.1 Düz (Plain)	16
2.5.2 Çapraz (Twill)	16
2.5.3 Saten (Satin)	16
2.5.4 Sepet (Basket)	17
2.6 Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin İmalat Yöntemleri	17
2.6.1 Püskürtme yöntemi	17
2.6.2 Islak elle yatırma yöntemi	18
2.6.3 Vakumlama yöntemi	19
2.6.4 Reçine transfer kalıplama yöntemi	19
2.6.5 Prepregler	20
3. ÇEKME DENEYLERİ.....	23
3.1 Deney Donanımı.....	23
3.1.1 Çekme cihazı.....	24
3.1.2 Gerinim ölçüm cihazı.....	24
3.1.3 Gerinim ölçüm yazılımı	27

3.2 Kompozit Malzeme Çekme Deneyi Numunelerinin Hazırlanması.....	29
3.2.1 Kompozit imalat masası.....	30
3.2.2 Kompozit malzemelerin imalatı.....	30
3.2.3 Kompozit çekme numunelerinin kesilmesi.....	35
3.3 Epoksi Çekme Deneyi Numunelerinin Hazırlanması.....	36
3.3.1 Kalıpların hazırlanması.....	36
3.3.2 Epoksi numunelerin imal edilmesi.....	37
3.4 Pirinç Malzeme Çekme Deneyi Numunelerinin Hazırlanması.....	38
3.5 Gerinim Ölçer (Staingauge).....	40
3.5.1 Gerinim ölçerlerin çalışma prensibi.....	40
3.5.2 Gerinim ölçerlerin yapıştırılması.....	41
3.5.3 Kullanılan gerinim ölçerler modelleri.....	42
3.6 Çekme Deneylerinin Gerçekleştirilmesi.....	42
3.6.1 Kompozit malzemelerin çekme deneyi sonuçları.....	43
3.6.1.1 Karbon-epoksi.....	44
3.6.1.2 Cam-epoksi.....	46
3.6.1.3 Kevlar-epoksi.....	48
3.6.1.4 Çekme hızının kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi.....	49
3.6.2 Epoksi reçinenin çekme deneyi sonuçları.....	51
3.6.3 Pirinç malzemenin çekme deneyi sonuçları.....	52
3.7 Malzemelerin Kalınlıkları ve Yoğunlukları.....	53
4. MALZEME ÖZELLİKLERİNİN DOĞRULANMASI	55
4.1 Statik Testler.....	55
4.1.1 Statik test düzeneği.....	56
4.1.2 Statik testlerin gerçekleştirilmesi.....	56
4.2 Modal Testler.....	57
4.2.1 Çekiç seti.....	57
4.2.2 Modal testlerin gerçekleştirilmesi.....	58
4.3 Sonlu Elemanlar Analizleri.....	59
4.3.1 Statik sonlu elemanlar analizi.....	60
4.3.2 Modal sonlu elemanlar analizi.....	61
4.3.3 Sonlu elemanlar analizleriyle malzeme özelliklerinin güncellenmesi.....	62
5. ANLIK BASINÇ YÜKÜ DENEYLERİ	65
5.1 Deney Düzeneği.....	65
5.1.1 Basınç depolama ünitesi.....	66
5.1.2 Deney platformu.....	67
5.1.3 Veri toplama sistemi.....	68
5.1.3.1 Veri toplama sistemi bağlantıları.....	69
5.1.3.2 Veri toplamada kullanılan basınç duyargaları ve gerinim ölçerler	70
5.1.3.3 Basınç duyargalarının ve gerinim ölçerlerin plaklar üzerindeki yerleşimleri.....	71
5.2 Kompozit Plaklar.....	72
5.2.1 Kompozit plakların bağlantı şekilleri.....	73
5.3 Membranlar.....	75
6. SAYISAL ANALİZLER VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI	79
6.1 Basınç Fonksiyonları.....	79
6.2 Sayısal Analizler.....	83
6.3 Sonuçların Karşılaştırılması.....	84
6.3.1 300 mm x 300 mm'lik plak.....	84

6.3.2 400 mm x 300 mm'lik plak.....	86
6.3.3 400 mm x 200 mm'lik plak.....	90
7. DEĞERLENDİRME	95
KAYNAKLAR	97
EKLER.....	101
ÖZGEÇMİŞ.....	107

KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Materials
AE	: Aramid/epoksi
CE	: Cam/epoksi
E	: Epoksi
FTF	: Frekans Tepki Fonksiyonları
HP	: Hewlett Packard
SCP	: Signal Conditioning Plug-on
KE	: Karbon/epoksi
P	: Pirinç

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Çekme testleri sırasında kullanılan standartlar.....	23
Çizelge 3.2 : Kumaş cinslerine göre RC katsayıları [36].	32
Çizelge 3.3 : Epoksi çekme deneyi numunelerinin boyutları [49].	37
Çizelge 3.4 : Pirinç çekme deneyi numunelerinin boyutları [50].	39
Çizelge 3.5 : Çekme deneylerinde kullanılan gerinim ölçerler.	42
Çizelge 3.6 : Bağlantı kısıkaçları sıkma basınçları.....	43
Çizelge 3.7 : Çekme deneyleri yapılan elyaflar.	44
Çizelge 3.8 : Karbon-epoksinin malzeme özellikleri.	46
Çizelge 3.9 : Cam-epoksinin malzeme özellikleri.....	47
Çizelge 3.10 : Kevlar-epoksinin malzeme özellikleri.....	49
Çizelge 3.11 : Farklı çekme hızlarında elde edilmiş kompozit malzeme özelliklerinin kıyaslanması.	51
Çizelge 3.12 : Epoksi reçine malzemesinin özellikleri.....	52
Çizelge 3.13 : Pirinç malzemesinin özellikleri.....	53
Çizelge 3.14 : Kompozit ve pirinç malzemelerin kalınlıkları ve yoğunlukları.	54
Çizelge 4.1 : PCB 086C03 çekicinin özellikleri.....	58
Çizelge 4.2 : PCB 352C68 ivme sensörünün özellikleri.	58
Çizelge 4.3 : 300 mm x 300 mm’lik plağın ilk 4 doğal frekansı.....	59
Çizelge 4.4 : Statik deney sonuçlarından elde edilen gerinim değerlerinin analiz sonuçları ile kıyaslanması.....	63
Çizelge 4.5 : Modal testler sonucunda elde edilen doğal frekansların modal analiz sonuçları ile kıyaslanması.	63
Çizelge 4.6 : Yenilenen malzeme özellikleri.....	64
Çizelge 5.1 : LQ-125 Basınç duyargasının özellikleri.....	70
Çizelge 5.2 : FRA-2-11-3L Gerinim ölçerin özellikleri	70
Çizelge 5.3 : Üretilen plakların katmanlaması	73
Çizelge 5.4 : Plakların ölçülen ve hesaplanan ağırlık ve kalınlıklarının karşılaştırılması	73
Çizelge 5.5 : Plak bağlantılarında kullanılan civata sayıları.....	74

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Termoset reçinelerin mekanik özelliklerinin kıyaslanması [36].	12
Şekil 2.2 : Kompozitlerin matris elemanlarına göre sınıflandırılması.	13
Şekil 2.3 : Piyasada sıkça kullanılan dokuma çeşitleri [36,38].	16
Şekil 2.4 : Püskürtme yöntemi [36,38].	17
Şekil 2.5 : Islak elle Yatırma Yöntemi [36,38].	18
Şekil 2.6 : Vakumlama yöntemi [36,38].	19
Şekil 2.7 : Reçine transfer kalıplama yöntemi [36,38].	20
Şekil 3.1 : MTS Hidrolik kuvvet uygulayıcısı, yük hücresi ve bağlantı kısaçları.	24
Şekil 3.2 : VXi marka EX1629 48 kanallı gerinim ölçüm cihazı [40].	25
Şekil 3.3 : EX1629 120 Ohm çeyrek köprü bağlantı şeması [40].	26
Şekil 3.4 : EX1629 için klemens kullanılarak yapılan çeyrek köprü bağlantısı.	27
Şekil 3.5 : DAC Express “Channels” menüsü [41].	28
Şekil 3.6 : DAC Express “Data Recorder” menüsü [41].	29
Şekil 3.7 : HCS7500-06-321212 Kompozit imalat masası [43].	30
Şekil 3.8 : Fiberlerin reçine emdirilmiş fırça ile ıslatılması.	33
Şekil 3.9 : Kompozit imalatı sırasında yapılan katmanlama işlemi.	34
Şekil 3.10 : Kürleme sıcaklığının zamanla değişimi.	34
Şekil 3.11 : Kesimi yapılacak kompozit numunelerin plak üzerinde yerleşimi (mm).	35
Şekil 3.12 : Karbon elyaf çekme numunelerinin CNC ile kesimi.	36
Şekil 3.13 : Epoksi çekme deneyi numunelerinin teknik resmi [49].	37
Şekil 3.14 : Kenarlarına sızdırmazlık bandı çekilmiş kalıplar.	38
Şekil 3.15 : Epoksi çekme numuneleri.	38
Şekil 3.16 : Metal çekme deneyi numunelerinin teknik resmi [50].	39
Şekil 3.17 : Hazırlanmış olan pirinç çekme deneyi numuneleri.	39
Şekil 3.18 : Çeyrek Wheatstone köprüsü [51].	40
Şekil 3.19 : Gerinim ölçerin malzeme yüzeyine yapıştırılması.	41
Şekil 3.20 : Gerinim ölçer yapıştırılmış kompozit malzeme numuneleri.	42
Şekil 3.21 : Karbon-epoksinin normal gerinim-gerilme grafiği.	45
Şekil 3.22 : Karbon-epoksinin kayma gerinimi-gerilme grafiği.	45
Şekil 3.23 : Cam-epoksinin normal gerinim-gerilme grafiği.	46
Şekil 3.24 : Cam-epoksinin kayma gerinimi-gerilme grafiği.	47
Şekil 3.25 : Kevlar-epoksinin normal gerinim-gerilme grafiği.	48
Şekil 3.26 : Kevlar-epoksinin kayma gerinimi-gerilme grafiği.	48
Şekil 3.27 : Cam, karbon ve kevlar-epoksinin farklı çekme hızlarındaki normal gerinim gerilme grafikleri.	50
Şekil 3.28 : Cam, karbon ve kevlar-epoksinin farklı çekme hızlarındaki kayma gerinimi- gerilme grafikleri.	50
Şekil 3.29 : Epoksi reçinenin normal gerinim-gerilme grafiği.	52
Şekil 3.30 : Pirinç malzemenin normal gerinim-gerilme grafiği.	53
Şekil 4.1 : Statik test platformu.	56

Şekil 4.2 : NI 9234 veri toplama kartı.	57
Şekil 4.3 : Shell 91 Elemanının düğüm noktaları ve koordinat sistemi [56].	59
Şekil 4.4 : Çözüm ağı ve sınır koşulları.	60
Şekil 4.5 : Plagın 20 kg yük altındaki yer değiştirmesi (m).	61
Şekil 4.6 : Plagın 1. , 2. ve 3. mod şekilleri ve frekansları.	62
Şekil 4.7 : Plagın 4. , 5. ve 6. ve mod şekilleri ve frekansları.	62
Şekil 5.1 : Deney düzeneği şeması.	66
Şekil 5.2 : Kompresör ve basınç tankı.	66
Şekil 5.3 : Deney platformu.	67
Şekil 5.4 : Deney düzeneği.	68
Şekil 5.5 : EX 1629'ın voltaj ölçümü için bağlantı şeması [40].	69
Şekil 5.6 : LQ-125 basınç duyargası için bağlantı şeması.	70
Şekil 5.7 : Gerinim ölçer ve basınç duyargalarının 30 cm x 30 cm plak üzzerindeki yerleşimleri ve isimlendirmeleri.	71
Şekil 5.8 : Gerinim ölçer ve basınç duyargalarının 40 cm x 30 cm plak üzzerindeki yerleşimleri ve isimlendirmeleri.	72
Şekil 5.9 : Gerinim ölçer ve basınç duyargalarının 40 cm x 20 cm plak üzzerindeki yerleşimleri ve isimlendirmeleri.	72
Şekil 5.10 : Plak bağlantı şekilleri	74
Şekil 5.11 : Birinci bağlantı tipinde gerinimin zamanla değişimine örnek	75
Şekil 5.12 : İkinci bağlantı tipinde gerinimin zamanla değişimine örnek	75
Şekil 5.13 : Düzgün şekilde yırtılma göstermeyen membranlar.	76
Şekil 5.14 : Pirinç membranların hazırlanması.	77
Şekil 5.15 : Polikarbon membranların hazırlanması.	77
Şekil 6.1 : 300 mm x 300 mm plak için deneysel ve matematiksel basınç dağılımı.	81
Şekil 6.2 : 400 mm x 300 mm plak için deneysel ve matematiksel basınç dağılımı.	81
Şekil 6.3 : 400 mm x 200 mm plak için deneysel ve matematiksel basınç dağılımı.	82
Şekil 6.4 : $t = 0.005$ anında 300 mm x 300 mm boyutlarındaki plak üzzerinde oluşan basınç dağılımı.	82
Şekil 6.5 : $t = 0.003$ anında 400 mm x 300 mm boyutlarındaki plak üzzerinde oluşan basınç dağılımı.	83
Şekil 6.6 : $t = 0.0045$ anında 400 mm x 200 mm boyutlarındaki plak üzzerinde oluşan basınç dağılımı.	83
Şekil 6.7 : 300 mm x 300 mm plak için orta nokta yer değiştirmesi.	84
Şekil 6.8 : 300 mm x 300 mm boyutlarındaki plak için arka yüzeyin orta noktasının y-eksenindeki gerinimi.	85
Şekil 6.9 : 300 mm x 300 mm boyutlarındaki plak için ön yüzeyin orta noktasının y-eksenindeki gerinimi.	86
Şekil 6.10 : 400 mm x 300 mm plak için orta nokta yer değiştirmesi.	86
Şekil 6.11 : 400 mm x 300 mm boyutlarındaki plak için arka yüzeyin orta noktasının x-eksenindeki gerinimi.	87
Şekil 6.12 : 400 mm x 300 mm boyutlarındaki plak için arka yüzeyin orta noktasının y-eksenindeki gerinimi.	88
Şekil 6.13 : 400 mm x 300 mm boyutlarındaki plak için ön yüzeyin orta noktasının x-eksenindeki gerinimi.	88
Şekil 6.14 : 400 mm x 300 mm boyutlarındaki plak için ön yüzeyin orta noktasının y-eksenindeki gerinimi.	89
Şekil 6.15 : Değişen titreşim frekanlarının hesaplanması.	89
Şekil 6.16 : 400 mm x 200 mm plak için orta nokta yer değiştirmesi.	90

Şekil 6.17 : 400 mm x 200 mm boyutlarındaki plak için arka yüzeyin orta noktasının x-eksenindeki normal gerinimi.....	91
Şekil 6.18 : 400 mm x 200 mm boyutlarındaki plak için arka yüzeyin orta noktasının y-eksenindeki normal gerinimi.....	92
Şekil 6.19 : 400 mm x 200 mm boyutlarındaki plak için ön yüzeyin orta noktasının x-eksenindeki normal gerinimi.....	92
Şekil 6.20 : 400 mm x 200 mm boyutlarındaki plak için ön yüzeyin orta noktasının y-eksenindeki normal gerinimi.....	93
Şekil 6.21 : Gerinim değerlerinde etkin olan ikinci modun belirlenmesi.....	93
Şekil A.1 : Çekiçten okunan kuvvet verisinin zamanla değişimi	101
Şekil A.2 : İvme sensöründen okunan ivme verisinin zamanla değişimi	101
Şekil A.3 : Kuvvet verisinin spekturum analizi	102
Şekil A.4 : İvme verisinin spekturum analizi	102
Şekil A.5 : Deney sonucunda elde edilen FTF	102
Şekil B.1 : 400 mm x 300 mm'lik plağın 1. ve 2. mod şekilleri ve frekansları.....	103
Şekil B.2 : 400 mm x 300 mm'lik plağın 3. ve 4. mod şekilleri ve frekansları.....	103
Şekil B.3 : 400 mm x 200 mm'lik plağın 1. ve 2. mod şekilleri ve frekansları.....	103
Şekil B.4 : 400 mm x 200 mm'lik plağın 3. ve 4. mod şekilleri ve frekansları.....	104
Şekil C.1 : Etkin plak boyu 300 mm x 300 mm olan plağın üstten görünüşü.....	105
Şekil C.2 : Etkin plak boyu 400 mm x 200 mm olan plağın üstten görünüşü.....	105
Şekil C.3 : Etkin plak boyu 400 mm x 300 mm olan plağın üstten görünüşü.....	106

METAL KATMANLAR İÇEREN HİBRİT KATMANLI KOMPOZİT PLAKLARIN ANLIK BASINÇ YÜKÜ ALTINDAKİ DİNAMİK CEVABININ İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada, farklı açıklık oranlarına sahip metal katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü etkisi altındaki dinamik davranışları incelenmiştir. Çalışma kapsamında, kompozit malzemelerin çeşitleri ve üretim yöntemleri araştırılmış, deneyler gerçekleştirilmiş ve ANSYS 11 sonlu elemanlar yazılımı ile analizler yapılmıştır.

Deneysel çalışma olarak, cam/epoksi (CE), aramid epoksi (AE), karbon/epoksi (KE), saf epoksi (E) ve pirinç (P) malzemelerinin çekme testleri sonucunda malzeme özellikleri elde edilmiştir. Daha sonra, kompozit plak P/KE/KE/KE/AE/AE/AE/CE/CE/CE katmanlamasıyla imal edilmiştir. Elde edilen malzeme özelliklerini sonlu elemanlar analizleri ile doğrulamak ve güncellemek için, üretilen plaklardan biri hem statik olarak hem de modal olarak test edilmiştir. Daha sonra, anlık basınç yükü deneyleri, özel olarak tasarlanmış bir platform üzerinde gerçekleştirilmiştir. Anlık basınç yükü, şok tüpü içersinde bulunan basınçlı havanın, tüpün ağzında yer alan metal membranı yırtıp hibrit katmanlı plak yüzeyine çarpmasıyla elde edilmiştir. Deneyler sırasında plak yüzeyinden hem basınç hem de gerinim verileri ölçülmüştür. Ölçülen basınç verileri kullanılarak anlık basınç yükleri için uygun matematiksel modeller oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modeller, sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri için ANSYS kütüphanesinde yer alan 8 düğüm noktalı, her düğüm noktasında 6 serbestlik derecesine sahip Shell 91 elemanı tercih edilmiştir. Sonuç olarak elde edilen deneysel ve sayısal sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmış, titreşim frekansları ve tepe gerinim değerleri için benzer sonuçlar elde edilmiştir.

DYNAMIC RESPONSE ANALYSES OF LAMINATED COMPOSITE HYBRID PLATE INCLUDING METAL LAYERS UNDER BLAST LOAD

SUMMARY

In this study, the dynamic behaviors of laminated composite hybrid plates, which are also including metal layers, with different aspect ratios are examined under blast load. Firstly, composite materials and their manufacturing processes are examined. Then, experimental study and finite element analyses (FEA) are performed.

For the experimental study, material properties of glass/epoxy (CE), aramid/epoxy (AE), carbon/epoxy (KE), pure epoxy (E) and brass (P) are obtained by tensile tests. Then, laminated composite hybrid plates are manufactured with the following lamination: P/CE/CE/CE/AE/AE/AE/GE/GE/GE. Static and modal tests of the laminated composite hybrid plate are performed in order to confirm and update the material properties by FEA. After that, blast load tests are performed on a special experimental setup. The blast load is simulated by air pressure which acts on to the laminated composite hybrid plate by the rupture of a membrane, which stands in front of a shock tube. During the blast load tests, both strains and pressures are measured from the surface of the plate. According to the measured pressures, appropriate mathematical models for the blast loads are constituted. The mathematical models for the blast loads are used in the FEA. For the FEA, ANSYS v11's Shell 91 element, which has 8 nodes and 6 degrees of freedom at each node, is preferred. In conclusion, comparing the experimental results with the FEA results gives a good agreement in terms of vibration frequencies and peak strain values.

1. GİRİŞ

Bu çalışmada, değişik açıklık oranlarına sahip pirinç katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü altındaki dinamik davranışları deneysel olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar ANSYS sonlu elemanlar yazılımının sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Plak yapıları havacılık, gemi inşaat, otomotiv ve savunma sanayii sektörlerinde genellikle taşıtların dış yüzey kaplamalarında sıkça kullanılan yapılardır. Bu yapılarda, gerek sağladıkları yüksek mukavemet/ağırlık gerekse diğer avantajları nedeniyle kompozit malzemelerin kullanımı günden güne artmaktadır. Kompozit malzeme imalatında cam, aramid ve karbon elyafların birlikte kullanılması durumunda kompozit malzeme, hibrit katmanlı olarak adlandırılmaktadır. Hibrit katmanlı kompozit malzemeler cam elyafın ucuz olma özelliğini, aramid elyafın yüksek darbe dayanımı özelliğini ve karbon elyafın yüksek çekme dayanımı özelliğini bir arada toplamaktadırlar.

Kompozit malzemelerin metal katmanlarla birlikte kullanılması fikri ilk kez 1974 yılında Amerikan Hava Kuvvetleri'nin "Hasar Toleranslı Tasarım" fikrini ortaya atmasıyla çıkmıştır. 1978 yılında Amerikan Federal Havacılık Dairesinin (FAA), taşımacılık yapan uçaklara hasar toleransı ve yorulma ömrü için sertifikasyon zorunluluğunu getirmesiyle (FAR 25.571) birlikte, bu konu üzerinde çalışmalar başlamıştır. Hollanda'nın Delft Teknoloji Üniversitesi'nin 1978 yılında dünyaya alüminyum-aramid elyafı ARALL'ı, ardından 1990 yılında da alüminyum-cam elyafı "GLARE"'i tanıtmalarıyla çalışmalar ivme kazanmıştır [1]. Fiber-metal katmanlı kompozitler (FML), metal katman içermeyen diğer kompozitlere göre daha yüksek yorulma, darbe ve hasar dayanımı göstermektedir. Ayrıca metal katmanlı kompozitler yangına ve korozyona karşı da çok daha fazla dirençlidirler [2]. Tüm bu nedenlerden ötürü metal katmanlı hibrit kompozitler özellikle havacılık sektöründe daha yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanmakta ve üzerinde yürütülen çalışmalara devam edilmektedir.

Metal katmanlar içeren hibrit kompozit plaklar kullanıldıkları yerlere bağlı olarak atmosferde oluşan türbülanslar, sonik patlamalar, yakıt patlamaları ve şok dalgaları nedeniyle anlık basınç yüklerine maruz kalmaktadırlar. Anlık basınç yükünde, büyük miktardaki yükler çok kısa bir sürede yapının üzerine etkimekte ve ardından kalkmaktadır. Bu nedenle plakların anlık basınç yükü altındaki dinamik davranışlarının incelenmesi güvenli yapıların tasarlanabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Literatürde şok dalgası ve çeşitli patlamalar nedeniyle düzgün ve düzgün olmayan anlık basınç yüklerine maruz kalan farklı geometrideki metal, kompozit ve hem kompozit hem de metal katmanlardan birlikte imal edilmiş plaklar için birçok çalışma bulunmaktadır. Librescu ve Nosiert [3], simetrik katmanlanmış dikdörtgen kompozit panellerin sonik patlama ve anlık basınç yükü etkisi altındaki dinamik cevaplarını teorik olarak incelemişlerdir. Teorik çalışma kapsamında yanlamasına kayma deformasyonlarını, yanlamasına normal gerilmeleri ve yüksek mertebe etkilerini dikkate alarak çözümler yapmışlardır. Elde ettikleri sonuçları literatürde yer alan başka teorilerle karşılaştırmışlardır. Librescu ve arkadaşları [4], başka bir çalışmalarında ise sandviç kompozit panellerin anlık basınç yükü altındaki lineer ve lineer olmayan dinamik davranışlarını teorik olarak incelemişlerdir. Çalışma kapsamında patlamanın büyüklüğünün, karakteristiğinin, panel yüzeyine olan uzaklığının, sönümleme katsayısının, tabakaların yönelimlerinin ve lineer olmayan geometrinin dinamik davranışa olan etkileri için yapısal modeller geliştirmişlerdir.

Türkmen ve Mecitoğlu [5], iki farklı anlık basınç yüküne maruz kalan katmanlı kompozit bir plağın lineer olmayan bölgedeki dinamik davranışlarını hem teorik, hem sayısal, hem de deneysel olarak inceleyip elde ettikleri sonuçları birbirleriyle karşılaştırmışlardır. Türkmen ve Mecitoğlu [6], yaptıkları başka bir çalışmada ise takviye ile güçlendirilmiş kompozit bir plağın yine iki farklı anlık basınç yükü altındaki dinamik cevabını deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda lineer ve lineer olmayan bölgede maksimum gerinim ve titreşim frekansları açısından benzer sonuçlar elde etmişlerdir.

Kazancı ve Mecitoğlu [7], basit mesnetli katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü altındaki lineer olmayan dinamik davranışlarını araştırmışlardır. Çalışma kapsamında geliştirilen yaklaşımlı sayısal analizlerle, sonlu elemanlar analizlerini ve literatürdeki diğer çalışmaları karşılaştırmışlardır.

Jacinto ve arkadaşları [8], metal plakların anlık basınç yükü altındaki dinamik davranışlarını incelemek ve sayısal modellenmesi konusunda rehber olmak amacıyla iki farklı metal plağın iki farklı sınır koşulunda deneylerini gerçekleştirmiş ve sonlu elemanlar yazılımıyla analizlerini yapmışlardır. Sonuç olarak da, anlık basınç yüküne maruz kalan plakların sayısal modellerinin geliştirilmesiyle ilgili olarak tavsiyelerde bulunmuşlardır.

Stoffel ve arkadaşları [9], şok yüklerine maruz kalan çelik plakları deneysel olarak incelemiş, modellenmesi ve sayısal simülasyonu üzerinde çalışmışlardır. Çalışmalarında deney ve simülasyon arasındaki korelasyonu, plakların dinamik cevaplarının malzeme özelliklerindeki değişimle olan duyarlılığını, şok yükü altında oluşan gerilme ve yer değiştirmeleri araştırmışlardır.

Doğan [10], anlık basınç yükü altında simetrik olmayan açılı katmanlanmış kompozit plakların lineer ve lineer olmayan dinamik deplasman cevaplarını araştırmıştır. Çalışmasında sönümleme katsayısı, lineer olmayan geometri, mod sayıları, anlık basınç yükü karakteristiği, plak boyutları ve fiber yönelimleri gibi parametrelerin etkilerini incelemiştir.

Gong ve Andreopoulos [11] ankastre olarak mesnetlenmiş dairesel bir alüminyum, bir çelik ve birçok kompozit plakların üzerine anlık basınç yükü uygulayarak, plakların aeroelastik cevaplarını ve titreşim modlarını araştırmışlardır. Deneysel olarak elde ettikleri titreşim frekanslarını sayısal ve teorik hesaplamalarla karşılaştırmışlardır. Metal plakların titreşim frekansları için yakın sonuçlar elde ederken, kompozit plaklar için elde edilen sonuçlarda bir miktar farklılık gözlemlenmiştir.

Veldman ve arkadaşları [12], statik basınç yükü altında bulunan kare alüminyum plakların anlık basınç yükü altındaki elastik ve elastik olmayan dinamik cevabını deneysel olarak araştırmış ve elde ettikleri sonuçları sonlu elemanlar analizleriyle karşılaştırmışlardır. Gerek elastik bölgede gerekse elastik olmayan bölgede tutarlı sonuçlar elde etmişlerdir. Veldman ve arkadaşları [13] diğer çalışmalarının devamı niteliğinde yaptıkları başka bir çalışmada ise, statik basınç yükü altında bulunan takviyeli dikdörtgen alüminyum plakların anlık basınç yükü altındaki deformasyonlarını ve hasarlarını deneysel olarak incelemiş, deneyleri hızlı kamerayla kaydederek plakların yırtılma mekanizmaları araştırmışlardır.

Batra ve Hassan [14], elyaflarla güçlendirilmiş kompozitlerin su altında meydana gelen patlama yükleri altındaki dinamik cevaplarını ve hasar mekanizmalarını ticari olmayan bir sonlu elemanlar kodu ile araştırmışlardır. Batra ve Hassan [15] bir önceki çalışmalarının devamı olarak yaptıkları başka bir çalışmada ise, çok sayıda tek yönlü elyaflarla güçlendirilmiş kompozitlerin anlık basınç yükü etkisi altındaki üç boyutlu dinamik deformasyonunu ve hasar mekanizmalarını incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda Batra ve Hassan, patlama yüklerine daha dayanıklı ve daha fazla enerji yutabilen kompozit yapıların tasarlanması için önemli sonuçlar elde etmişlerdir.

Langdon ve arkadaşları [16-17] anlık basınç yüküne maruz kalan plaklarla ilgili birçok çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalardan ilk iki tanesinde farklı şekillerdeki takviye elemanları ile güçlendirilmiş çelik panellerin düzgün ve düzgün olmayan anlık basınç yükü altındaki dinamik cevaplarını sayısal ve deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Langdon ve arkadaşları [18-24] yaptıkları başka bir seri çalışmada ise metal katmanlar içeren çeşitli kalınlıklardaki kompozit plakların düzgün ve düzgün olmayan anlık basınç yükü altındaki hasar mekanizmalarını deneysel olarak araştırmışlar ve tiplerine göre karakterize etmişlerdir. Ayrıca plakların ön ve arka yüzeylerde meydana gelen kalıcı yer değiştirmelerini araştırmış ve elde ettikleri verileri kullanarak, boyutsuzlaştırılmış yer değiştirme grafikleri çıkarmışlardır.

Harras ve arkadaşları [25] metal katmanlar içeren kompozit bir plağın lineer ve lineer olmayan dinamik davranışını hem deneysel olarak hem de teorik olarak araştırmışlardır. Çalışmaları kapsamında metal katmanlı kompozit bir plağın lineer bölgedeki doğal frekanslarını, mod şekillerini ve sönüm katsayısını incelemişlerdir. Ayrıca lineer olmayan bölgede plak açıklık oranlarının, titreşim genliklerinin gerilmeye olan etkilerini araştırmış ve izotropik bir plakla olan karşılaştırmasını yapmışlardır.

Ayrıca, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde anlık basınç yüküne maruz kalan kompozitten imal edilmiş sandviç plaklarla, katmanlı plaklarla ve kabuklarla ilgili olarak da birçok yüksek lisans ve doktora tezi bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genel olarak, anlık basınç yüküne maruz kalan yapılar deneysel olarak incelenmiş ve sonlu elemanlar yazılımlarıyla karşılaştırılmıştır [26-31].

Bu çalışma kapsamında öncelikle, kompozit malzemeler ve onların üretim teknikleri araştırılmıştır. Daha sonra metal katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plakların imalatında kullanılacak cam/epoksi, aramid/epoksi, karbon/epoksi, saf epoksi ve pirinç malzemelerin çekme test numuneleri hazırlanmış ve çekme testleri sonucunda malzeme özellikleri elde edilmiştir. Farklı açıklık oranlarına sahip metal katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plaklar imal edildikten sonra, plaklardan biri elde edilen malzeme özelliklerinin doğruluğunu kontrol etmek için statik olarak ve doğal frekansları ölçülerek dinamik olarak test edilmiştir. Test sonuçları ANSYS sonlu elemanlar yazılımının sonuçları ile karşılaştırılmış ve malzeme özellikleri güncellenmiştir. Daha sonra anlık basınç yükünün gerçekleştirileceği deney düzeneği ve veri toplama sistemi hazırlanmıştır. Anlık basınç yükü, şok tüpü içerisinde bulunan basınçlı havanın tüpün ağzında yer alan metal membranı yırtmasıyla elde edilmiştir. Deneyler sırasında plak yüzeyinden basınç ve gerinim değerleri ölçülmüştür. Ölçülen basınç değerleri kullanılarak, oluşan anlık basınç yükünün matematiksel modeli çıkartılmış ve çıkartılan bu model ANSYS yazılımına yapılan analizler sırasında kullanılmıştır. Son olarak, deneyler neticesinde elde edilen sonuçlar ANSYS sonlu elemanlar yazılımının sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Geçtiğimiz son 25 yıllık süreçte, kompozit malzemeler havacılık alanı başta olmak üzere birçok alanda metal ve seramik malzemelerin yerine kullanılmaya başlamışlardır. Kompozit malzemelerin kullanım alanlarının ve miktarlarının artması, kompozit malzemeler üzerinde yürütülen araştırma ve geliştirme çalışmalarının da bunlara paralel olarak artmasına neden olmaktadır. Bu çalışma kapsamında da metal katmanlar içeren kompozit plaklar inceleneceği için, bu bölümde kompozit malzemelerin özellikleri, sınıflandırılması, bileşenleri ve imalat yöntemleri anlatılacaktır.

2.1 Kompozit Malzemelerin Olumlu ve Olumsuz Özellikleri

Farklı endüstri alanlarında kompozit malzeme kullanımı günden güne artmaktadır. Bunun başlıca sebepleri kompozit malzemelerin aşağıda verilen olumlu özelliklere sahip olmalarıdır [32-36].

- Yüksek mukavemet / ağırlık oranı
- Yüksek katılık / ağırlık oranı
- Uzun yorulma ömrü
- İyi titreşim sönümleme karakteristikleri
- Yüksek korozyon dayanımı
- Yüksek dielektrik direnimi
- Düşük ısı genleşme katsayısı
- Tasarım esnekliği
- Tek parça olarak imalat ve parça sayısının azaltılması

Kompozit malzemelerin tüm bu olumlu özelliklerinin yanında bazı olumsuz yönleri de vardır. Bunlar aşağıda belirtilmiştir [32-36].

- Ham madde ve imalat işlemlerinin maliyetli oluşu
- Mamul kalitesinin, imalat yöntemine ve kalitesine bağlı oluşu, standart olmayışı

- Deneyimli işçi gereksinimi
- Yerel gerilme konsantrasyonları
- İzotrop malzemelerin aksine 2 yerine 9 adet malzeme özelliği ile ifade edilmeleri
- Karmaşık anizotropik analiz gereksinimi

2.2 Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemeler bir önceki bölümde belirtilen olumlu özellikleri sayesinde çeşitli amaçlar doğrultusunda aşağıda verilen farklı sektörlerde sıkça kullanılmaktadır [32-36].

- Havacılık Sektörü: Uçak ve helikopterlerin gövdelerinde, kanat ve rotorlarında, iniş takımlarında,
- Savunma Sanayii: Kurşungeçirmez panellerde, havan toplarının gövdelerinde ve sandıklarında, miğferlerde,
- Denizcilik Sektörü: Yelkenli/motorlu teknelerde, şamandıralarda, kanolarda, deniz motosikletlerinde ve sörf tahtalarında,
- Otomotiv Sektörü: Otomobil kaportalarında, kamyon ve otobüs yan panellerinde, tır dorse yan çıtalarında,
- İnşaat Sektörü: Dış ve iç cephe kaplamalarında, prefabrik binalarda, beton kalıplarında, taşıyıcı profillerde,
- Gıda ve Tarım Sektörü: Silolarda, gıda depolama tanklarında, balıkçılık ekipmanlarında, seralarda ve sulama kanallarında,
- Kimya Sektörü: Boru ve bağlantı parçalarında, asit tankları ve kaplamalarında, arıtma ekipmanlarında, endüstriyel platform ve korkuluklarda,
- Elektrik Sektörü: İzolatörlerde, antenlerde, devre kesicilerde, yalıtkan platformlarda ve kablo taşıyıcılarında,
- Isı Sektörü: Güneş enerjisi sistemi ekipmanlarında, izolasyon cidarlarında, soğutma kulelerinde ve havalandırma kanallarında,
- Diğer Uygulamalar: Birçok spor ekipmanında (raket, kayak, bisiklet vs...), müzik aletlerinde, lunapark gereçlerinde, havuz başı ekipmanlarında,

2.3 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Genel olarak, kompozit malzemelerin tanımı, iki veya daha fazla sayıdaki malzemenin, en iyi özelliklerini bir arada toplamak ya da ortaya yeni bir özellik çıkarmak amacıyla, makroskopik boyutta birleşmesiyle oluşan anizotropik malzeme türü olarak yapılır.

Kompozit malzemeler esas olarak 2 ana elemandan oluşmaktadır. Bunlar bağlayıcı ve takviye elemanlarıdır. Takviye elemanının görevi malzemeyi mekanik özellikler bakımından güçlendirmektir. Bağlayıcı elemanının görevi ise takviye elemanının bütünlüğünü sağlamak ve takviye elemanını çevresel ve kimyasal etkilerden korumaktır. Bağlayıcı eleman, birçok kaynakta matris elemanı olarak da adlandırılmaktadır. Bu iki esas elemanın dışında bazı uygulamalarda dolgu malzemeleri de kullanılarak sandviç yapılar oluşturulmaktadır. Kompozit malzeme elemanları ileriki bölümlerde daha detaylı biçimde açıklanacaktır.

Kompozit malzemeleri kullanılan takviye, matris ve dolgu malzemelerinin cinslerine göre birçok farklı şekilde sınıflandırmak mümkündür. Günümüzde kompozitler daha yaygın olarak matris malzemesinin cinsine göre sınıflandırılmaktadır [35-36]. Bu nedenle bu çalışma kapsamında bu sınıflandırma kullanılmıştır.

2.3.1 Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozit malzemelerde, isminden de anlaşılacağı üzere matris elemanı olarak metaller kullanılmaktadır. Alüminyum veya alüminyum alaşımları en çok tercih edilen matris elemanı olmakla birlikte, magnezyum ve bakır matrisler de bazı uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Takviye elemanı olarak ise genellikle silikon karbid, bor veya grafit tercih edilmektedir. Metal matrisli kompozitler otomotiv sektöründe sıkça kullanılmakla birlikte maliyetleri yüksektir.

2.3.2 Seramik matrisli kompozitler

Seramik malzemeler yüksek sıcaklıklara ve aşınmaya karşı dayanıklıdır. Fakat seramik malzemelerin kırılma tokluğu ve kopma dayanımı gibi mekanik özellikleri düşüktür. Seramik malzemelerin mekanik özelliklerini artırmak için, seramik matrisi silikon karbid ve bor nitrit gibi takviye elemanları ile güçlendirilirler. Bu şekilde elde edilmiş yüksek sıcaklıklara dayanabilen, mekanik özellikleri iyileştirilmiş malzemelere de seramik matrisli kompozitler olarak adlandırılırlar. Seramik matrisli

kompozitler daha çok yarış arabaları ve hava araçlarının fren balatalarında kullanılmaktadır.

2.3.3 Polimer matrisli kompozitler

Günümüzde kullanımı en yaygın olan kompozit malzeme türü polimer matrisli kompozitlerdir. Gerek maliyetlerinin düşük olması, gerekse imalat yöntemlerinin diğer kompozitlere göre daha kolay olması bunda en önemli etkidir. Polimer matrisli kompozitlerde, matris elemanı olarak polimer malzeme kullanılırken, takviye elemanı olarak cam, karbon ve aramid elyaflar tercih edilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan çalışmaların tümünde polimer matrisli kompozit malzemeler kullanılmıştır. Bu nedenle bundan sonraki bölümlerde polimer matrisli kompozit malzemeler incelenecektir.

2.4 Polimer Matrisli Kompozitlerin Elemanları

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere, kompozit malzemeler matris ve takviye elemanı olmak üzere iki ana elemandan ve bunlara ek olarak da yardımcı dolgu elemanından oluşmaktadır. Bu bölümde polimer matrisli kompozitleri oluşturan elemanlar ayrıntılı olarak tanıtılacaktır [35-36].

2.4.1 Matris elemanı

Matris elemanı esas olarak takviye elemanlarının bütünlüğünün sağlanması, kompozit malzemeye etki eden yüklerin düzgün bir şekilde takviye elemanlarına aktarılması ve takviye elemanlarının çevresel ve kimyasal etkilerden korunması için kullanılmaktadırlar.

İyi bir matris elemanı yüksek yapıştırma kapasitesine sahip ve çevre şartlarına karşı dayanıklı olmalıdır. Matris malzemeleri genellikle sert ve dış etkilere karşı dayanıklı olmakla birlikte gevrek malzeme gibi davranarak düşük mekanik özellikler göstermektedir.

Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan matris elemanları, termoplastikler ve termosetler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Termoplastikler düşük sıcaklıklarda katı ve sert halde bulunurken yüksek sıcaklıklarda yumuşarlar. Isıl işlemle şekillendirilmiş termoplastikler, tekrar ısıtıldıklarında tekrar şekil değişimine uğrarlar. Bu sayede tekrar tekrar kullanılabilen

termoplastikler, termosetlere göre daha uzun raf ömrüne ve daha yüksek kırılma tokluğuna sahiptirler. Fakat tüm bu olumlu özelliklerine rağmen, maliyetinin ve şekillendirme için yüksek ısı gereksinimi nedeniyle kompozit malzemelerin imalatı sırasında yaygın olarak tercih edilmezler. Termosetler daha çok yüksek çekme ve eğilme dayanımları nedeniyle havacılık sanayiinde yüksek mukavemet gerektiren parçalarda kullanılmaktadır. Ayrıca geri dönüşüm sürecine uygunluğundan dolayı da otomotiv sektöründe tercih edilmektedirler.

Termosetler, polimer matrisli kompozit malzemelerin imalatları sırasında termoplastiklere göre daha yaygın olarak kullanılırlar. Oda sıcaklığında sıvı halde bulunan termosetler, reçine olarak da isimlendirilirler. Termoset reçineler, sertleştirici veya katalizörlerin ilave edilip karıştırılması sonucunda kimyasal tepkimeye girerek sertleşir ve katı hale geçerler. Kimyasal tepkimenin gerçekleştiği ortamın sıcaklığı termoset reçinelerin mekanik özelliklerini ve tepkime süresini etkilemektedir. Termosetler, termoplastiklerden farklı olarak yüksek sıcaklıklarda yumuşamazlar ve tekrardan şekillendirilemezler. Fakat termosetler gerek maliyetlerinin ucuz olması gerekse kullanımının kolay olması nedeniyle çok avantajlıdır. Bu çalışma kapsamında imal edilen kompozit plaklarda termoset polimer matris kullanıldığından, bir sonraki bölümde kompozit parça imalatında en çok kullanılan termoset reçineler incelenmiştir.

2.4.1.1 Polyester reçine

Polyester reçinenin maliyeti, termoset reçineler arasında en düşük olanıdır. Ayrıca kullanımının kolay ve suya karşı dayanıklı olması sebebiyle de denizcilik ve inşaat sektöründe sıkça kullanılmaktadır. Polyester reçineler kimyasal tepkimeye girmek için katalizör ve hızlandırıcıya ihtiyaç duyarlar. Polyester reçinelerin olumsuz yönleri olarak ise kimyasal reaksiyon sırasında çekmeleri, raf ömürlerinin kısa, mekanik özelliklerinin ise vinilester ve epoksiye göre daha düşük olması gösterilebilir.

2.4.1.2 Vinilester reçine

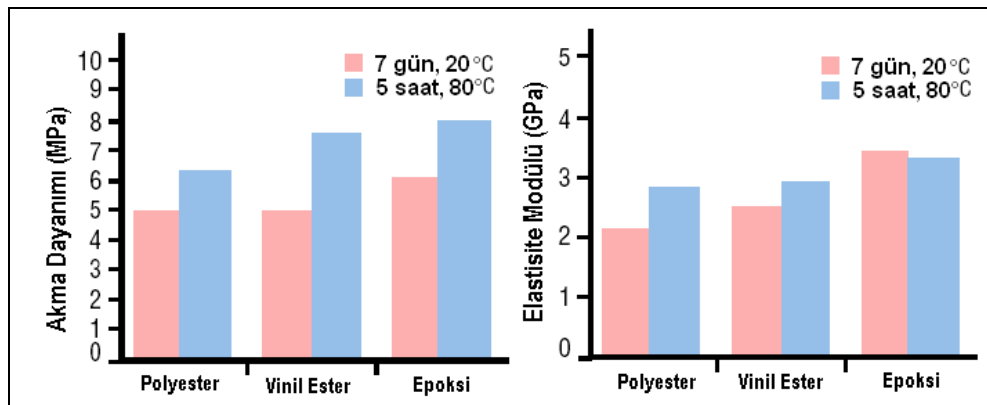
Vinilester, kimyasal yapısı bakımından polyester reçineye benzemekle beraber ısı işlem uygulanması durumunda, mekanik özellikleri ve kimyasallara karşı dayanımı bakımından polyester reçineden daha üstündür. Maliyet olarak polyesterden daha pahalı olan vinilester, bazı uygulamalarda polyester kullanılarak üretilmiş olan parçanın dış yüzeyini korumak amaçlı da kullanılmaktadır. Vinilester daha çok

kompozit kimyasal tankların ve kompozit boru hatlarının imalatı sırasında kullanılmaktadır.

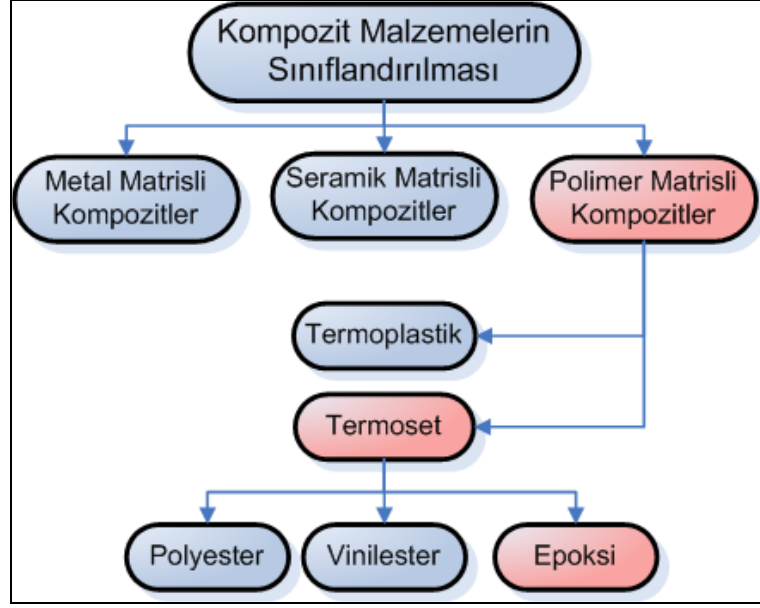
2.4.1.3 Epoksi reçine

Epoksi reçinelerin mekanik özellikleri diğer termoset reçinelere oranla daha yüksektir ve kimyasal reaksiyon sırasında daha az çekmektedirler. Epoksi reçineler biri sertleştirici diğeri esas reçine olmak üzere iki farklı bileşenden oluşmaktadır. Bileşenlerin doğru oranlarda karıştırılması büyük önem taşımaktadır. Maliyetinin diğer reçinelere göre yüksek olmasına rağmen, mekanik özelliklerinin daha iyi olması nedeniyle havacılık, otomotiv, savunma, ulaşım ve diğer birçok alanda en sık kullanılan termoset reçine çeşididir. Bu çalışma kapsamında imal edilen kompozit plaklarda reçine olarak epoksi tercih edilmiştir.

Önceki kısımlarda anlatılan polyester, vinilester ve epoksi reçinelerin farklı kuruma sıcaklığı ve süresi sonucunda elde edilmiş mekanik özelliklerinin kıyaslanması Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Ayrıca kompozit plakların imalatında kullanılan epoksi reçinenin, kompozitlerin sınıflandırılmasındaki yeri Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.1 : Termoset reçinelerin mekanik özelliklerinin kıyaslanması [36].



Şekil 2.2 : Kompozitlerin matris elemanlarına göre sınıflandırılması.

2.4.2 Takviye elemanı

Takviye elemanının kompozit malzeme içerisindeki esas görevi malzemeye dayanıklılık ve sağlamlık katmaktır. Bu nedenle kullanılan takviye elemanının cinsi, kompozit malzemenin mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Takviye elemanları üç farklı türde incelenmektedir. Bunlar parçacıklar, sürekli ve süreksiz elyaflardır.

Parçacık şeklinde olan takviye elemanları sürekli ve süreksiz elyaflara göre daha düşük mekanik özelliklere sahiptir. Parçacıklı takviye elemanı içeren kompozitler için bilenen en yaygın örnek silikat esaslı hidrolik çimento ve asfalt yol kaplamalarında kullanılan asfalt betondur. Viskoz ve düşük mukavemetli asfalt ile sert ve gevrek taşın meydana getirdiği kompozit malzemesi sünek ve yüksek mukavemetli bir yapı oluşturmaktadır [37].

Takviye elemanı olarak süreksiz elyaf içeren kompozit malzemelerin mekanik özellikleri parçacık içeren kompozitlere göre daha iyidir. Süreksiz elyaflar, sürekli elyafların kırık parçalarından oluşmaktadır. Kırık elyaf parçaları, preslenerek karmaşık (random) diye isimlendirilen elyaf kumaş türünü oluşturmaktadır. Bu kumaş türünün belli bir standardı yoktur ve maliyeti sürekli elyaf içeren kumaşlara göre daha düşüktür ve yüksek dayanım gerektirmeyen, ağırlığın çok önemli olmadığı yerlerde tercih edilirler.

Kompozit malzeme imalatında en yaygın olarak kullanılan takviye elemanı sürekli elyaflardır. Sürekli elyaflar tek başlarına ya da kumaş oluşturacak şekilde dokunarak takviye elemanı olarak kullanılırlar. Sürekli elyafların dokuma tipleri sonraki bölümlerde detaylı olarak açıklanacaktır. Bu bölümde ise en çok kullanılan elyaf türü olan cam, karbon ve aramid elyaflar kıyaslanacaktır [36].

2.4.2.1 Cam elyafı

Silika, kolemanit, alüminyum oksit ve soda gibi cam imalat maddelerinden elde edilen cam elyafı, teknolojiye kullanılan en eski elyaf tipidir. Birçok farklı tipi olmakla birlikte kompozit malzeme imalatında en çok E ve S tipi tercih edilmektedir. Cam elyafı, diğer elyaf tiplerine göre en ucuz olanıdır. Kuru cam elyafının rengi beyazdır ve yoğunluğu yaklaşık olarak 2500 kg/m^3 olarak verilmektedir. E ve S tipi cam elyaflarının elastisite modülleri 69 GPa ile 86 GPa arasında değişirken, kopma dayanımları 2400 MPa ile 3450 MPa arasında değişmektedir. Maliyetinin düşük olması sebebiyle birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

2.4.2.2 Karbon elyafı

Siyah renkli karbon elyafı, organik olarak karbon bakımından zengin malzemelerin kontrollü yanması ve karbonizasyonu sonucunda elde edilirler. Farklı sıcaklıklarda uygulanan ısıtma işlemleri sonucunda, farklı mekanik özelliklere sahip karbon elyafları üretilmektedir. Maliyeti diğer elyaflara göre oldukça yüksek olan karbon elyaflar, çok yüksek çekme dayanımına ve elastisite modülü değerlerine sahiptirler. Karbon elyafının çekme dayanımı 2000 MPa ile 5500 MPa arasında, elastisite modülü ise 160 GPa ile 440 GPa arasında değişmektedir. Karbon elyaflar ayrıca korozyon ve yorulma bakımından da diğer elyaflardan üstündürler. Fakat karbon elyafın darbe dayanımı cam ve aramid elyaflarından oldukça düşüktür. Karbon elyafın yoğunluğu ortalama olarak 1800 kg/m^3 olarak verilmektedir. Maliyetinin yüksek olmasına rağmen sağladığı avantajlar nedeniyle, özellikle havacılık sanayiinde ve spor araç gereçlerinin imalatı sırasında tercih edilmektedir.

2.4.2.3 Aramid elyafı

Aramid elyafı ilk olarak DuPont firması tarafından üretilmeye başlandığı için bazı kaynaklarda firmanın kodu olan Kevlar olarak da isimlendirilmektedir. Sarı renkli olan aramid, 1450 kg/m^3 ile diğer elyaf türleri arasında en düşük yoğunluğa sahiptir.

Maliyeti karbon elyafından düşük cam elyafından yüksek olan aramid elyafının elastisite modülü 60 GPa ile 180 GPa arasında, çekme dayanımı ise 3100 MPa ile 3600 MPa arasında değişmektedir. Diğer elyaf türlerine göre darbe dayanımı çok yüksek olan aramid elyafı kurşungeçirmez yapıların imalatında ve balistik uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır.

2.4.3 Dolgu elemanı

Basit mukavemet teorilerinden de bilindiği üzere bir kirişin eğilme rijitliği, kalınlığının kübü ile doğru orantılı bir şekilde artmaktadır. Bu nedenle kompozit malzemelerin eğilme rijitliğini artırabilmek amacıyla kalınlığının artması gerekmektedir. Daha fazla kompozit katman kullanarak kalınlığın artması aynı zamanda ağırlığın da artmasıyla sonuçlanacağı için bu yöntem tercih edilmemektedir. Bunun yerine, kompozit katmanların arasına yoğunluğu kompozite göre oldukça düşük olan dolgu maddeleri yerleştirilerek sandviç denilen yapının oluşması sağlanmaktadır. Sandviç yapı “I” kesitli bir kiriş gibi davranır. Kompozit katmanlar “I” kirişin başlıklarına benzer olarak eğilme kuvvetlerini, dolgu maddesi de “I” kirişin perdesine benzer şekilde kesme kuvvetlerini taşırlar. Dolgu maddesi olarak genellikle köpük, bal peteği ve balsa ağacı kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında üretilen kompozit plaklarda dolgu maddesi kullanılmadığı için dolgu maddeleri daha fazla detaylandırılmamıştır.

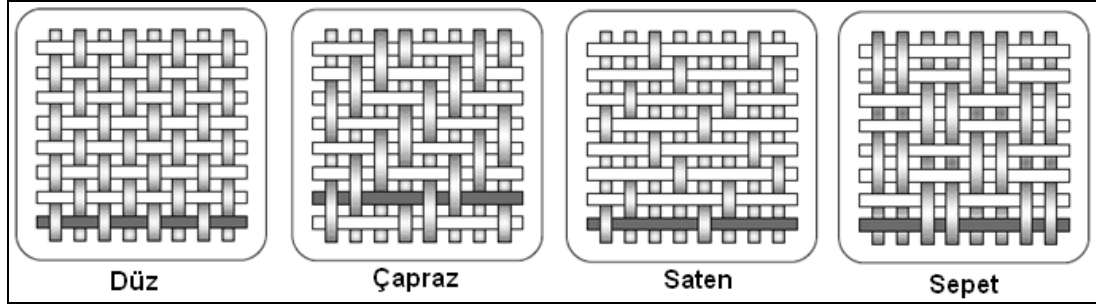
2.5 Sürekli Elyafların Dokuma Çeşitleri

Sürekli cam, karbon ve aramid elyafların düz bir yüzey oluşturacak şekilde birbirlerine bağlanmasıyla veya birleştirilmesiyle elyaf kumaşlar elde edilmektedir. Elyaflar birbirlerine, elyaf lifler ya da ufak iplikler kullanılarak bağlanırlar.

Elyafların ufak iplikler kullanılarak bağlanması durumunda kumaşlar tek yönlü olarak tanımlanır ve sadece elyaf yönünde yük taşırlar. Tek yönlü kumaşlar, kuvvetin daha çok bir yönden geldiği yerlerde ağırlığı ve maliyeti azaltmak amacıyla tercih edilmektedirler.

Birçok kompozit malzeme imalatında kullanılan kumaş çeşidi ise elyafların yine elyaflar yardımıyla birbirlerine bağlandığı dokuma kumaş çeşididir. Dokuma kumaşlar yatay ve dikey yönlü elyafların birbirlerine farklı şekillerde dokunmasıyla elde edilirler. Bu kumaşlar dokuma şekillerine göre farklı özelliklere sahiptirler ve

değişik kullanım alanları mevcuttur. Piyasada sıkça kullanılan dokuma çeşitlerinin resimleri Şekil 2.3’de gösterilmiştir [36,38].



Şekil 2.3 : Piyasada sıkça kullanılan dokuma çeşitleri [36,38].

2.5.1 Düz (Plain)

Bu dokuma çeşidinde, yatay yönlü elyaflar, dikey yönlü elyafların bir altından bir üstünden geçecek şekilde dokunurlar. Düz şekilde dokunmuş olan kumaşlar simetrik ve kararlıdır. Fakat düz dokunmuş kumaşların kıvrılması ve katlanması oldukça zordur. Kavisli yüzeylerde kullanılması durumunda diğer dokuma çeşitlerine göre daha düşük mekanik özellikler elde edilmektedir. Genellikle ince elyafların dokunmasında tercih edilirler.

2.5.2 Çapraz (Twill)

Çapraz dokumada, yatay yönlü elyaflar, her defasında çapraz şekilde birden fazla dikey yönlü elyafları atlayarak dokunurlar. Bu dokuma şekli, görsel olarak bakıldığında $+45^{\circ}/-45^{\circ}$ yönelimli dokunmuş hissi yaratmaktadır ve kumaş üzerinde çapraz çizgiler görülmektedir. Kıvrılabilme ve reçneyi emme bakımından düz dokuma çeşidine göre daha üstündür. Kararlılığı düz dokuma stilinden bir miktar düşük olsa da, mekanik özellikleri daha iyidir.

2.5.3 Saten (Satin)

Saten dokuma aslında çapraz dokumanın bir çeşididir. Bu dokumada yatay ve dikey elyaflar birbirleriyle daha az kesişirler. Yatay elyaflar genellikle 4,5 veya 8 elyafta bir, çapraz şekilde bir miktar kayarak dikey elyafların altından ve üstünden geçerler. Saten dokumadaki kumaşlar oldukça düzdürler, reçneyi kolay bir şekilde emerler ve kolayca kıvrılabilirler. Saten dokumadaki kumaşların kararlılıkları iyi değildir ve asimetrictirler. Asimetrik olmaları nedeniyle bir yüzeyde yatay elyaflar baskınken diğer yüzeyde dikey elyaflar baskındır.

2.5.4 Sepet (Basket)

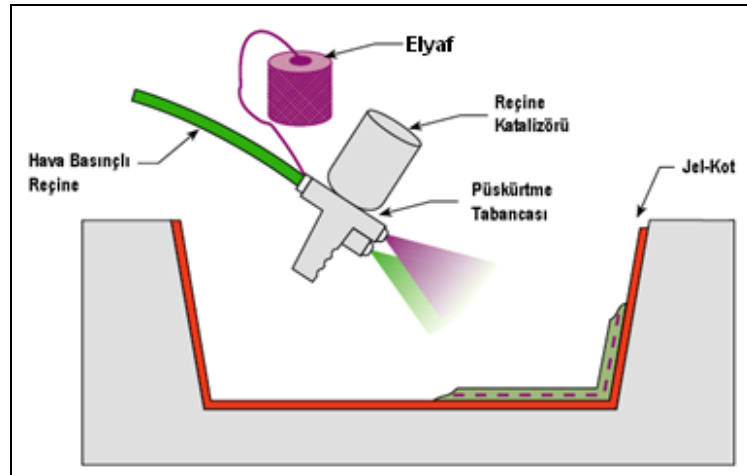
Sepet dokuma genel olarak düz dokumanın bir çeşididir. Sepet dokunmasında 2 veya daha fazla yatay yönlü elyaf, 2 veya daha fazla dikey yönlü elyafın altından ve üstünden geçerler. 2 yatay yönlü elyafın, 2 dikey yönlü elyafın altından ve üstünden geçmesi durumunda, dokuma Sepet 2x2 olarak adlandırılır. 8x2 veya 5x4 gibi asimetrik sepet dokumaları da kullanılmaktadır. Basket dokuması düz dokumaya göre daha dayanıklı olmasına rağmen kararlılığı ve kıvrılabilirliği daha düşüktür. Genellikle ağırlığı ve kalınlığı fazla olan elyafların dokumasında tercih edilmektedir.

2.6 Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerin İmalat Yöntemleri

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, imalatları sırasında kullanılan reçine, elyaf ve çekirdek malzemelerinin çeşitlerinin ve özelliklerinin dışında hangi imalat yöntemlerinin kullanıldığına bağlı olarak da farklılık göstermektedir. Bu nedenle bu bölümde kompozit plak imalatında kullanılabilecek olan imalat yöntemleri açıklanmıştır [36,38].

2.6.1 Püskürtme yöntemi

Önceden hazırlanmış olan kalıbın üzerine fiber parçaları ve reçine karışımı püskürtülerek gerçekleştirilen bir imalat yöntemidir. Bu yöntemde boya tabancasına benzer bir püskürtme tabancası kullanılır ve sürekli elyaflar püskürtme tabancasının içersinde kırılarak parçalanır. Püskürtme işleminin ardından yüzey rulo ile düzeltilir ve oda sıcaklığında kurumaya bırakılır. Mamulun kalıptan kolayca ayrılması için jel-kot kullanılabılır. İmalatın şematik gösterimi Şekil 2.4’de verilmiştir.

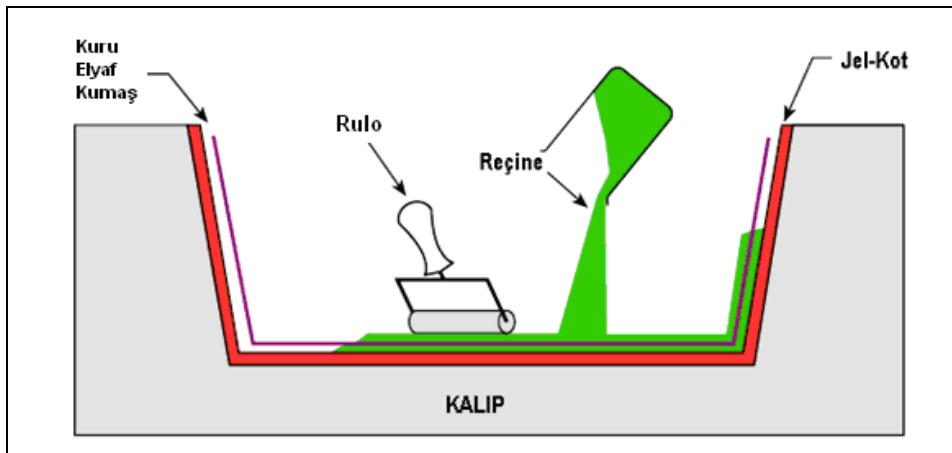


Şekil 2.4 : Püskürtme yöntemi [36,38].

İmalat bakımından maliyeti düşük ve kolay bir yöntemdir. Fakat kırılmış elyafların ve püskürtülebilmesi için düşük yoğunluklu reçinelerin kullanılmasından dolayı mekanik özellikleri sınırlıdır. Ayrıca püskürtülen elyaflar reçine bakımından oldukça yoğun olduklarından imal edilen parça diğer imalat yöntemlerine göre daha ağır olmaktadır. Genellikle hafif yüklere maruz kalan, ağırlığın çok fazla önemli olmadığı yapısal panellerde, banyo ve duş küvetlerinde ve ufak sandalların imalatında kullanılmaktadır.

2.6.2 Islak elle yatırma yöntemi

Bu yöntem genellikle dokuma kumaşlar ile kullanılmaktadır. Şekil 2.5’de gösterilen jel-kot sürülmüş kalıbın üzerine elle yerleştirilen kumaşlar daha sonra reçine emdirilmiş bir fırça veya rulo yardımıyla ıslatılmaktadır. Bu sayede reçinenin elyafların içine işlemesi ve elyafların reçine ile ıslanması amaçlanmaktadır. Büyük yüzeylerde reçine, kalıbın içersine dökülerek de emdirme işlemi gerçekleştirilebilir. Öğrenilmesi kolay ve basit ekipmanlarla uygulanabilen ucuz bir yöntem olması sebebiyle sıkça kullanılmaktadır. Püskürtme yönteminin aksine fiberlerin kırılmadan kullanılması daha iyi mekanik özelliklerin elde edilmesini sağlamaktadır. Ağır elyaflarda ve büyük yüzeylerde yorucu bir yöntemdir. Ayrıca reçinenin karışım oranı ve kalitesi mamulün kalitesini etkilemektedir. İmalat sırasında kullanılan reçinenin, sağlık ve güvenlik koşullarına dikkat edilmeli ve imalatın yapıldığı ortam düzgün bir şekilde havalandırılmalıdır. Genellikle standart rüzgar palalarında, tekne ve mimari kalıpların imalatında kullanılmaktadır.

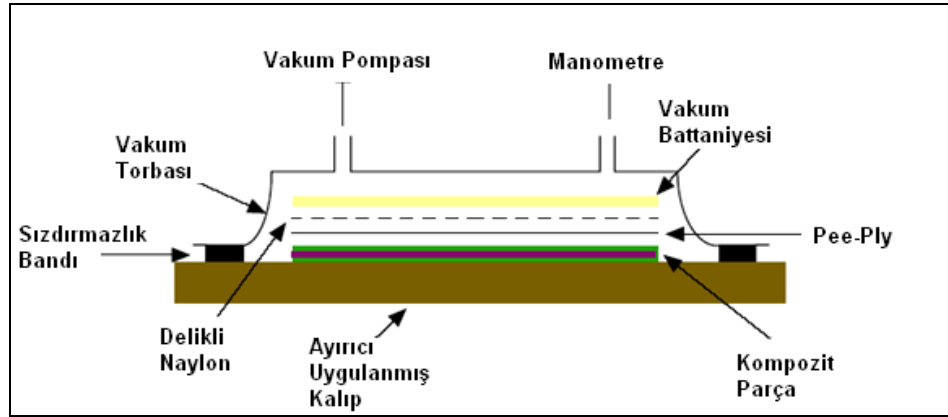


Şekil 2.5 : Islak elle Yatırma Yöntemi [36,38].

2.6.3 Vakumlama yöntemi

Genel olarak ıslak elle yatırma yönteminin devamı olan bir imalat yöntemidir. Elle yatırma yöntemindeki gibi ıslatılan kumaşlar Şekil 2.6’da gösterildiği gibi vakumlu bir torbanın içersine konularak üzerine atmosfer basıncının etkimesi sağlanmaktadır. Bu sayede hem kumaşların tam olarak kalıbın şeklini alması hem de fazla reçinenin kenarlardan taşmasıyla parçanın daha hafif olması sağlanmaktadır. Ayrıca bazı uygulamalarda fazla reçineyi almak için delikli bir naylonun arkasına “pee-ply” denilen bir katman konularak parçanın daha da hafif olarak imalatı mümkün olmaktadır. Parçanın üzerine basınç uygulandığı için, parçanın kalıba yapışmaması için kalıbın yüzeyine genellikle kalıp ayırıcı sürülmektedir.

Elle yatırma yöntemine göre daha kaliteli ve mekanik özellikleri daha yüksek parçaların imal edilmesine olanak sağladığı için tercih edilmektedir. Vakumlama yönteminde, elyaflar basınç nedeniyle daha düzgün bir şekilde reçineyi emerler. Farklı birçok malzemenin kullanılması nedeniyle maliyeti bir önceki yöntemlere göre daha yüksektir ve imalat için daha tecrübeli çalışanlara ihtiyaç duyulmaktadır. Genellikle tekne ve araba parçalarının imalatları sırasında tercih edilirler.

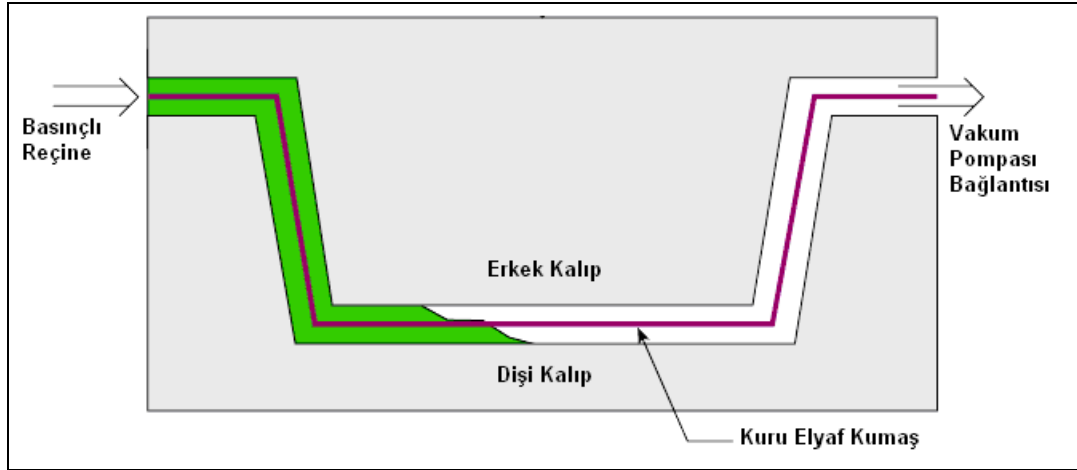


Şekil 2.6 : Vakumlama yöntemi [36,38].

2.6.4 Reçine transfer kalıplama yöntemi

Bu imalat yönteminde kuru kumaşlar dişi ve erkek kalıpların arasına Şekil 2.7’de gösterildiği biçimde yerleştirilir. Daha sonra iki kalıbın arasında kalan bir tarafındaki delikten basınçla reçine verilmeye başlanır. Bazı uygulamalarda kumaşların daha düzgün bir şekilde reçineyi emmesi için kalıpların diğer tarafındaki delikten de vakum uygulanmaktadır. Tüm kumaşların ıslanmasının ardından reçine verme ve vakumlama işlemi durdurularak, reçinenin kuruması beklenir. Bu yöntem daha çok

alt ve üst yüzeyinin düzgün olması istenen parçalarda tercih edilmektedir. Ayrıca elle yatırma yöntemine göre daha hızlı ve kaliteli imalat sağlanmaktadır. Kapalı kalıp sayesinde ortadan kalkan zehirli gazlar ve artan yüzey kalitesi ile ufak ve karmaşık uçak ve otomobil gibi önemli yapıların imalatları sırasında tercih edilen bir yöntemdir. Basınca dayanıklı ve hassas kalıpların imalatı nedeniyle pahalı olan bu yöntem, ufak parçaların imalatına daha uygundur.



Şekil 2.7 : Reçine transfer kalıplama yöntemi [36,38].

2.6.5 Prepregler

Prepregler, bir imalat yönteminden daha çok hazır reçine emdirilmiş kumaşlara verilen isimdir. Üretici firma tarafından düzgün bir şekilde reçine emdirilmiş kumaşlar basınç ve ısı veya çözücü kimyasallar kullanılarak katalize edilirler. Prepreg malzemeler, dondurulmuş olarak haftalarca hatta aylarca kullanıma hazır olarak saklanabilirler. Prepreglerin özelliklerini yitirmemesi için özel saklanma koşullarına mutlak suretle dikkat edilmesi gereklidir. Elle ya da makineyle kalıp içersine serilen “prepreg” malzemeler, vakumlama işleminin ardından 120-180 °C’ye kadar ısıtılırlar. Isıtma işlemi sayesinde, katalize edilmiş reçine tekrar akışkan hale geçerek kürleşir ve sertleşir. Önemli parçaların imalatı sırasında, bu işlem otoklav denilen parça üzerine yüksek basınçlar uygulayabilen fırınların içerisinde gerçekleştirilir. Prepregler özellikle uçak yapılarında, F1 yarış arabalarında ve profesyonel spor araç gereçlerinin imalatları sırasında kullanılırlar.

Prepreglerin reçine karışım oranları üretici firmalar tarafından ayarlandığı için yüksek kalitede ve standartlarda mamuller elde edilir. Diğer imalat yöntemlerine göre sağlık ve güvenlik kriterleri açısından daha üstündürler. Prepreg malzemelerin

oda sıcaklığında pişme süresi çok uzundur ve bu sayede uzun çalışma zamanı gerektiren imalatlar için de tercih edilmektedir. Ayrıca prepreg malzemeler kullanılarak yapılan imalat yöntemi, otomasyona uygundur ve iş gücü gereksinimini azaltmaktadır. Fakat prepreg malzemelerin fiyatları diğer kompozit malzemelere göre yüksektir. Ayrıca prepreglerle beraber kullanılacak olan kalıpların ve çekirdek malzemelerinin uygulanacak olan yüksek sıcaklıklara dayanması gerekmektedir.

3. ÇEKME DENEYLERİ

Sayısal çalışmaların, deneysel çalışmalarla kıyaslanması sırasında yaşanan en büyük sorunlardan biri malzeme özelliklerinin tam olarak bilinmemesidir. Literatürde farklı kaynaklarda aynı tip malzemeler için, farklı mekanik özellikler verilebilmektedir. Ayrıca deneyler sırasında kullanılan malzemelerin, literatürde yer alan malzemenin aynısı olduğundan emin olmak da oldukça güçtür. Özellikle örgülü elyaf kompozit malzemeler ile ilgileniliyorsa malzemelerin mekanik özelliklerini doğru bir şekilde elde etmek daha da zorlaşmaktadır. Çünkü örgülü elyaf kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, imalatı sırasında kullanılan yöntem, uygulanan ısı ve matris olarak kullanılan reçinenin cinsine göre farklılık göstermektedir [36]. Bu nedenlerden dolayı, bu çalışma kapsamında anlık basınç yükü deneyleri sırasında kullanılacak olan malzemelerin mekanik özelliklerinin, çekme deneyleri sonucunda elde edilmesine karar verilmiştir. Çekme deneyi numunelerinin hazırlanmasından önce, literatürde çekme deneyleri ile ilgili olan standartlar araştırılmış ve bunlardan ASTM standartlarının kullanılmasına karar verilmiştir. Çekme testleri sırasında kullanılan standartların kodları ve içerikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Çekme testleri sırasında kullanılan standartlar.

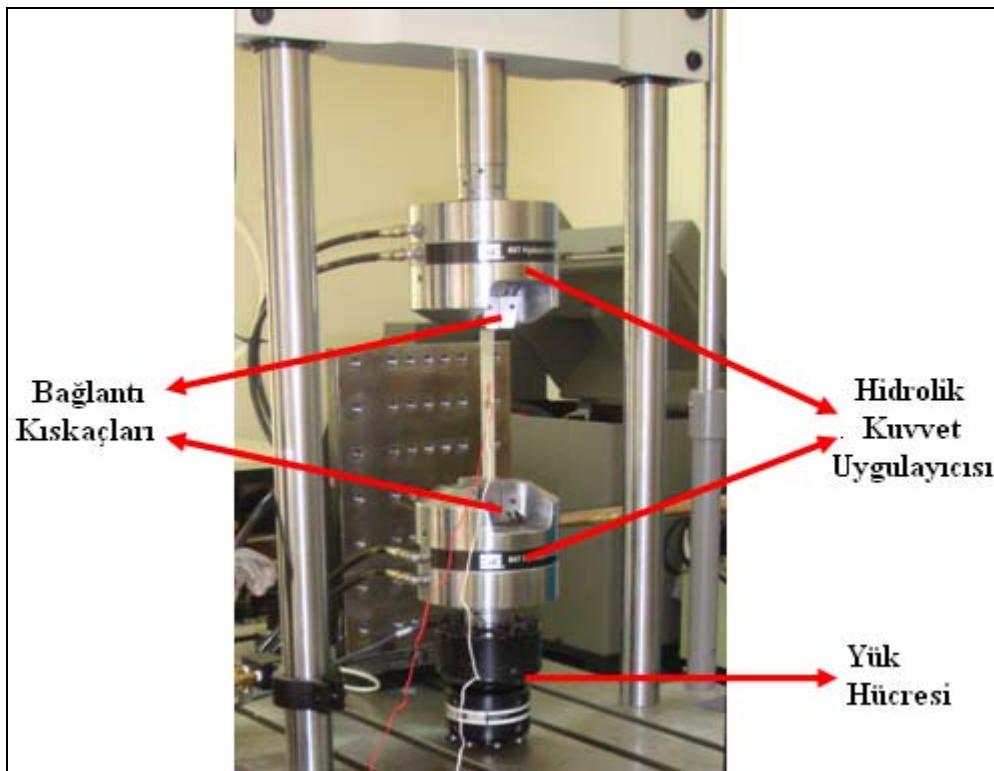
Standardın Kodu	Standardın İçeriği
ASTM D 3039 / D 3039M	Kompozit numunelerin 0° / 90° yönünde çekilmesi
ASTM D 3518 / D 3518M	Kompozit numunelerin +45° / -45° yönünde çekilmesi
ASTM D 638-08	Epoksi reçine numunelerin çekilmesi
ASTM E8/ E8M - 08	Pirinç numunelerin çekilmesi
ASTM E 1012 -05	Numunelerin çekme cihazına bağlanması

3.1 Deney Donanımı

Bu kısımda çekme deneylerinde kullanılan cihazların özellikleri belirtilmiş ve veri alma sistemi sırasında kullanılan bilgisayar yazılımı kısaca tanıtılmıştır.

3.1.1 Çekme cihazı

Çekme testleri sırasında MTS 322 deney donanımı kullanılmıştır. Deney donanımı MTS marka, 244.22 model, 100 kN'a kadar yük uygulayabilen hidrolik kuvvet uygulayıcısından ve 661.20F03 model 100 kN'luk yük hücresinden oluşmaktadır. Yük hücresinin hassasiyeti toplam kapasitesinin % 0.03'ü kadardır. Ayrıca hazırlanan çekme numunelerini yük hücrelerine bağlamak için MTS marka, 647.10 model bağlantı kısıkaçları kullanılmıştır. Kısıkaçların ağızları en fazla 7.6 mm'ye kadar açılabilirler. Çekme deneyi için kullanılan hidrolik kuvvet uygulayıcısı, yük hücresi ve bağlantı kısıkaçları Şekil 3.1'de gösterilmiştir [39].



Şekil 3.1 : MTS Hidrolik kuvvet uygulayıcısı, yük hücresi ve bağlantı kısıkaçları.

3.1.2 Gerinim ölçüm cihazı

Çekme testleri sırasında gerinim (strain) değerlerini ölçmek için Şekil 3.2'de gösterilen VXI Technology marka, EX1629 model 48 kanallı gerinim ölçüm cihazı tercih edilmiştir. EX1629'un tercih edilmesinin en büyük sebebi hızlı ve kolay ölçüm yapılabilmesidir.

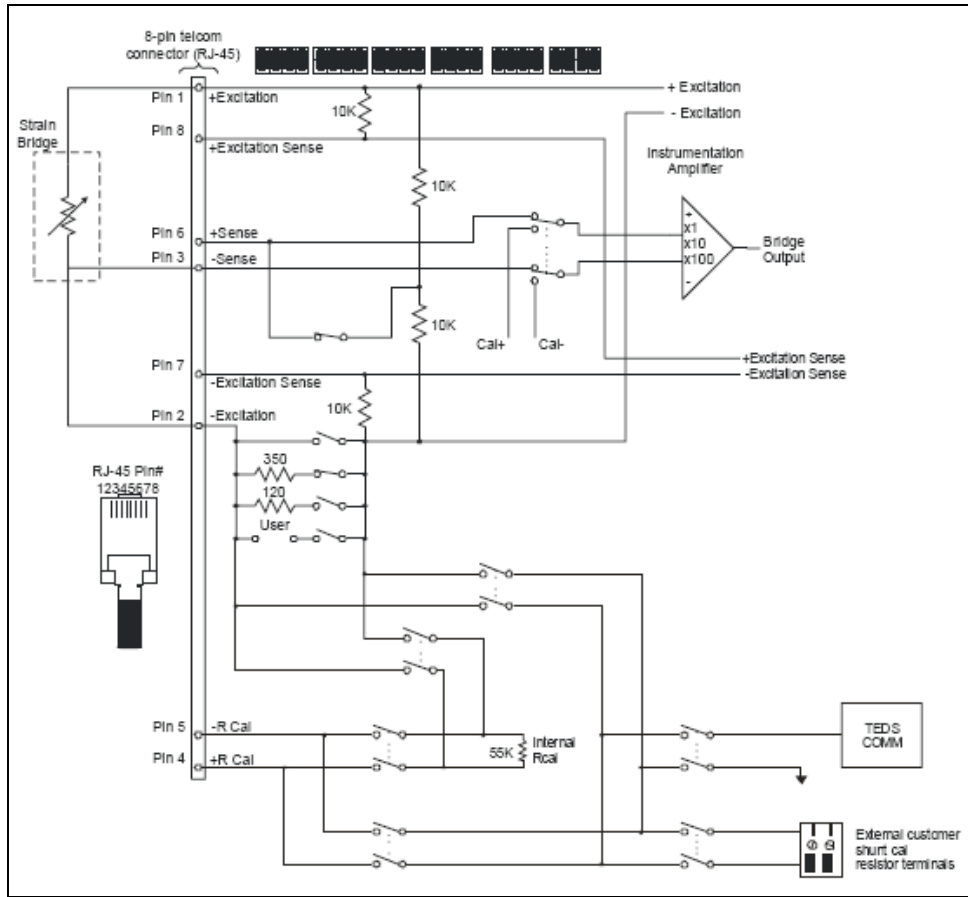


Şekil 3.2 : VXI marka EX1629 48 kanallı gerinim ölçüm cihazı [40].

EX1629 48 kanallı gerinim ölçüm cihazı bilgisayar ile Ethernet portu üzerinden veri aktarımı gerçekleştirmektedir. Bu sebeple EX1629'un birlikte kullanılacağı bilgisayar, diğer veri alma sistemlerinin çoğunda olduğu gibi başka bir veri aktarım kartına gereksinim duymamaktadır.

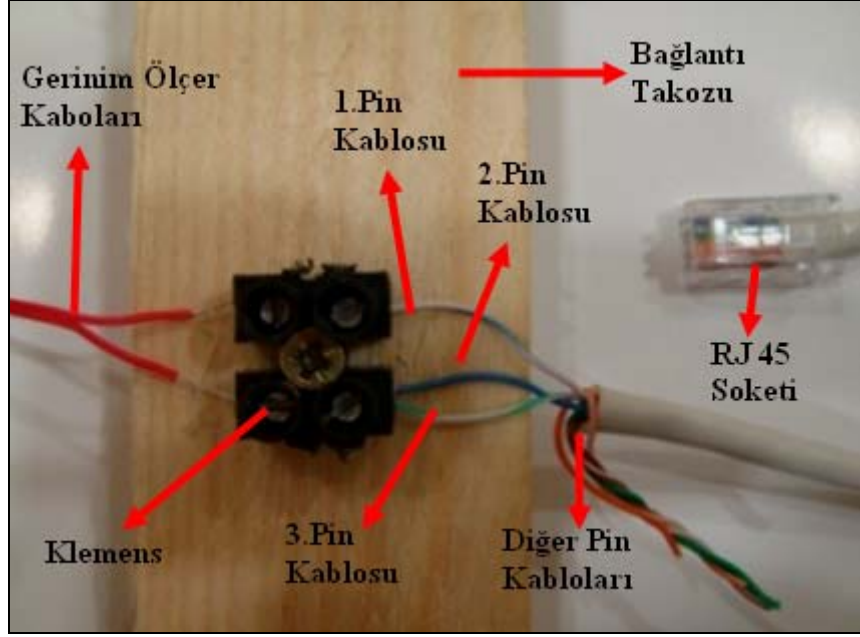
EX1629 48 kanallı gerinim ölçerde, her bir kanal kendine ait sinyal koşullandırıcı elektronik devresine, uyarıcı bir sinyal kaynağına ve 24 bitlik Analog-Dijital Çeviriciye (ADC) sahip olduğundan, kanallar diğer kanalların durumundan ve performansından etkilenmemektedir. EX1629 tam köprü, yarım köprü, 120 ve 350 Ohm'luk çeyrek köprü gerinim ölçüm sistemleriyle ölçüm yapabilmektedir. EX1629, her bir kanalı uyarıcı sinyal kaynağı ile $\pm 8V$ aralığında 50 mA ile uyarabilir. Ayrıca her bir kanal için tipi, derecesi ve kesme frekansı seçilebilen alçak frekans geçirgen filtreleme yapabilir. EX1629 1, 10 ve 100 şeklinde ayarlanabilir kazanç oranları ile daha hassas ölçüm yapılmasına imkan vermektedir. EX1629 48 kanaldan aynı anda 10 kHz ile ölçüm alabilmektedir. Eğer kanal sayısı 16 ile sınırlandırılırsa örnekleme frekansı 25 kHz'e kadar çıkmaktadır [40].

EX1629 giriş bağlantısı olarak, ucuz ve her yerde kolayca bulunabilen RJ45 soketlerini kullanmaktadır. RJ45 soketleri cihaza takıldıktan sonra, sokete giren kablolar, kullanılan gerinim ölçer (strain gauge) köprüsünün cinsine göre bağlantı yapılması gerekmektedir. Çekme deneyleri sırasında 120 Ohm'luk çeyrek köprü kullanılmıştır ve bağlantı şeması Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3 : EX1629 120 Ohm çeyrek köprü bağlantı şeması [40].

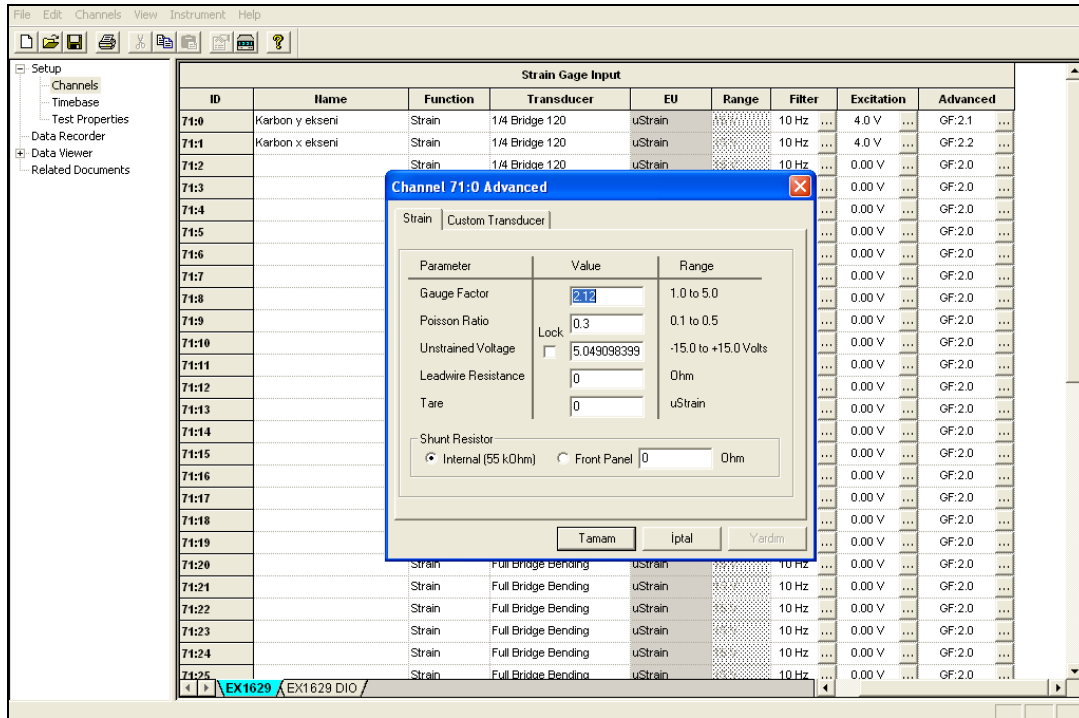
Verilen bağlantı şemasından da anlaşılacağı üzere gerinim ölçerin iki bacağından çıkan kablolardan birinin, RJ45 socketinin ilk pinine bağlı olan kabloya, diğerinin ise RJ45 socketinin ikinci pininine bağlı olan kabloya lehimlenmesi gerekmektedir. Ayrıca RJ45 socketinin üçüncü pinine bağlı olan kablunun, ikinci pine bağlı olan kablo ile birlikte lehimlenmesi gerekmektedir. Veri toplama sırasında oluşan gürültü seviyesini azaltmak ve deney sırasında oluşabilecek herhangi bir temassızlığı önlemek amacıyla, bağlantılar için lehim yapılması en sağlıklı yöntemdir. Fakat çekme testleri sırasında birçok numunenin arka arkaya deneniş olması ve çekme deneylerinin fazla dinamik etkileri içermemesi sebebiyle, RJ45 socketlerinin serbest tarafındaki kablolar ile gerinim ölçerden gelen kabloların birleşimi için elektrikçiler tarafından sıkça kullanılan klemenslerden yararlanılmıştır. Klemens kullanılarak bir gerinim ölçer için yapılan bağlantı Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : EX1629 için klemens kullanılarak yapılan çeyrek köprü bağlantısı

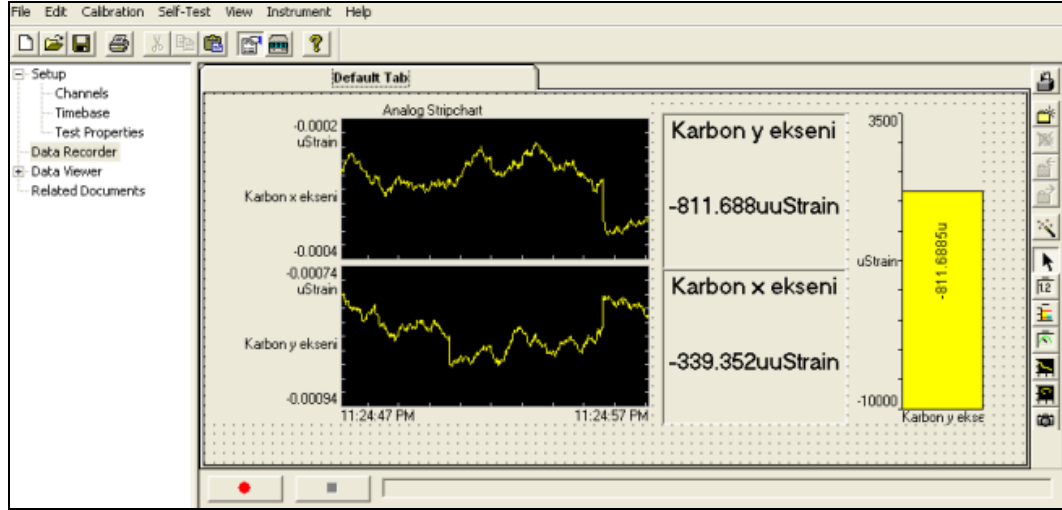
3.1.3 Gerinim ölçüm yazılımı

Çekme deneyleri sırasında gerinimi ölçmek için EX1629 48 kanallı gerinim ölçüm cihazını otomatik olarak tanıyan VXI Technology tarafından geliştirilmiş olan DAC Express 3.4 kullanılmıştır. Kullanımı oldukça kolay olan bu program genel olarak, 4 ana menüden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi “Channels” menüsüdür. Bu menüde gerinim ölçmek için hangi kanalların kullanılacağı, hangi köprü tipinin tercih edileceği, kullanılacak olan alçak geçirgen filtrenin kesme frekansı, gerinim ölçerin kaç volt ile besleneceği ve gerinim ölçerin ölçüm katsayısı (gauge faktör) gibi ayarlarının yapıldığı detaylı ayar bölümleri de bulunmaktadır. Detaylı ayar alt bölümünün açık olduğu “Channels” menüsünün görüntüsü Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5 : DAC Express “Channels” menüsü [41].

Programın ikinci esas menüsü “Timebase”dir. Bu bölümde ölçümün ne zaman başlayacağını, ne zaman sona ereceğinin ve ölçüm sırasında kullanılacak olan örnekleme frekansının ayarlandığı alt kısımlar bulunmaktadır. Üçüncü esas menü ise “Data Recorder” bölümüdür. Bu bölümde sağ tarafta açılan ufak resimli pencereden, istenilen görsel veri alma özellikleri seçilerek, veri alma işlemi sırasındaki ekran görüntüsü ayarlanmaktadır. “Data Recorder” menüsünün bir diğer amacı da veri alma sisteminin kalibrasyonunu gerçekleştirmektir. Kalibrasyon işlemi, bu menüye girildiğinde sol üst tarafta otomatik olarak kendiliğinden çıkmaktadır. Kalibrasyonun sağlıklı bir biçimde yapılabilmesi için cihazın kalibrasyon işleminden önce, 1 saat açık kalması gerekmektedir. Ayrıca her yeni ölçümden önce mutlaka bu bölümünde yer alan “Unstrained Voltage” kalibrasyonunun da yapılması gerekmektedir. “Data Recorder” menüsünün son önemli özelliği ise, veri almaya başlama komutunun bu menüden veriliyor olmasıdır. Menünün ekran görüntüsü Şekil 3.6’da verilmiştir. DAC Express programının önemli olan bir başka menüsü ise “Data Viewer” menüsüdür. Bu menüde kaydedilmiş olan veriler görsel olarak verilmekte, istenir ise farklı formatlarda kaydedilerek başka programlara aktarılabilir.



Şekil 3.6 : DAC Express “Data Recorder” menüsü [41].

3.2 Kompozit Malzeme Çekme Deneyi Numunelerinin Hazırlanması

Testi yapılacak olan kompozit numuneler ortotrop malzemeler oldukları için mekanik özellikleri yöne bağlı olarak değişmektedir. İzotrop malzemeleri tanımlamak için elastisite modülü ve Poisson oranı gibi 2 malzeme özelliğinin bilinmesi yeterli iken ortotrop malzemeleri tanımlayabilmek için 9 farklı malzeme özelliğinin bilinmesine gerek vardır. Bu 9 farklı malzeme özelliği şu şekilde sıralanabilir; E_{xx} , E_{yy} , E_{zz} , ν_{xy} , ν_{xz} , ν_{yz} , G_{xy} , G_{xz} , G_{yz} [42].

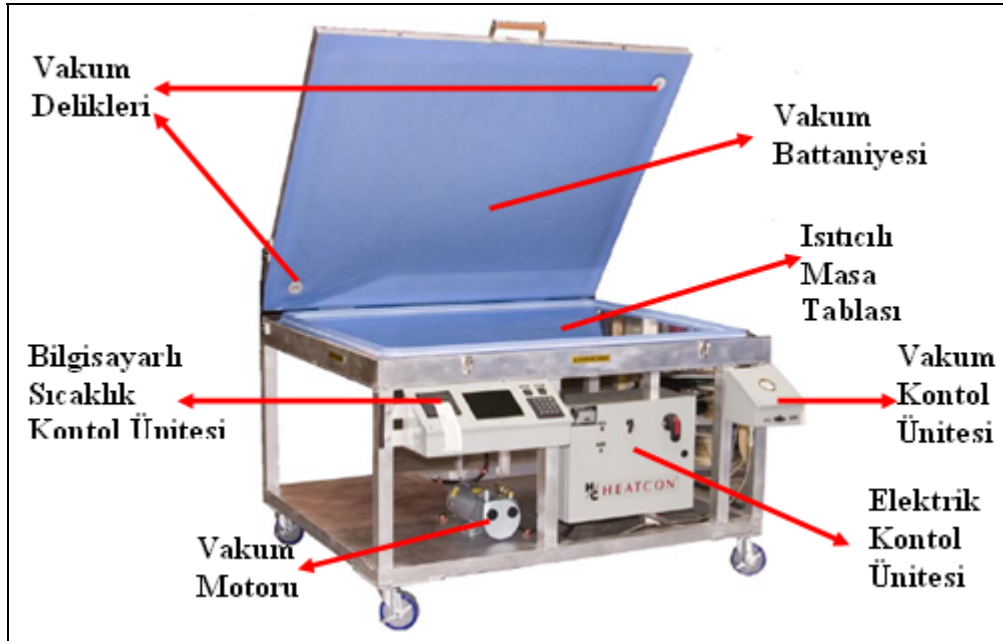
Bu malzeme özelliklerinden; E_{xx} ve ν_{xy} $0^\circ/90^\circ$ yönlenmiş kompozit numunelerini x eksen yönünde çekerek, E_{yy} $0^\circ-90^\circ$ yönelmiş kompozit numunelerini y eksen yönünde çekerek elde edilebilir. Eğer elyafların x ve y eksenlerindeki miktarları ve dokuma stilleri aynı ise E_{xx} ve E_{yy} elastisite modüllerinin aynı olduğu kabul edilerek sadece bir yönde çekme testi yapmak yeterli olacaktır. Ayrıca G_{xy} malzeme özelliği, $-45^\circ/+45^\circ$ yönelmiş kompozit numunelerini çekerek elde edilebilir. Geri kalan malzeme özellikleri, kompozit malzemenin kalınlık yönündeki özelliklerini içermektedir ve bu özellikleri elde etmek oldukça zordur. Bu nedenle kalınlık yönündeki malzeme özelliklerine, kullanılan epoksi reçinenin malzeme özelliklerinden yararlanılarak bir yaklaşımda bulunulabilir.

Daha önce de bahsedildiği üzere, kompozit malzemelerin mekanik özellikleri imalat tekniğine ve koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterebilmektedir. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini elde etmekte kullanılacak olan numunelerin kendi içinde olabildiğince tutarlı olması için, CNC makinesi ile büyük bir plaktan

düzgün açılarda kesilerek elde edilmesine karar verilmiştir. Bu sebeple çekme numunesi hazırlanacak olan elyaflardan öncelikle istenilen katman sayısında plak imalatı gerçekleştirilmiştir. Daha sonra $0^{\circ}/90^{\circ}$ ve $-45^{\circ}/+45^{\circ}$ yönelimindeki numuneler tek bir plak üzerinden CNC yardımıyla hassas bir şekilde kesilerek elde edilmiştir.

3.2.1 Kompozit imalat masası

Gerek kompozit numunelerin, gerekse kompozit plakların imalatı sırasında Şekil 3.7’de gösterilen Heatcon Composite Systems marka, HCS7500-06-321212 model kompozit imalat masası kullanılmıştır. Kompozit imalat masası 152.4 cm boyunda, 121.9 cm enindedir. Kompozit imalat masası, 260°C ’ye kadar kompozit malzemeyi ısıtarak kürleme işlemi gerçekleştirebilmektedir. Kürleme işlemi sırasında kürleme sıcaklığı, kürleme süresi ve ısıtma eğimi ($^{\circ}\text{C}/\text{dakika}$) iki kademe olarak kompozit imalat masasının bilgisayarlı kontrol ünitesine girilebilmektedir. Ayrıca kompozit malzemenin imalatı sırasında vakum işlemi de yine kompozit imalat masası tarafından yapılmaktadır [43].



Şekil 3.7 : HCS7500-06-321212 Kompozit imalat masası [43].

3.2.2 Kompozit malzemelerin imalatı

Hem kompozit çekme numunelerinin hem de kompozit plakların imalatında kısım 2.6.3’de anlatılan vakumlama yöntemi tercih edilmiştir. Kompozitlerin imalatları sırasında gerek maliyeti, gerek hazırlanış sürecinin uzun olması, gerekse kıvrımlı yüzeylerin bulunmaması sebebiyle kalıp kullanılmamıştır. Kalıp kullanılmadan

yapılan plak imalatlarında plak kalınlığı kenarlara yaklaştıkça incelme gösterebilmektedir. Bu sorunu aşmak amacıyla imal edilecek olan plağın boyutları gerekli boyutlardan en az 3'er cm uzun olacak şekilde belirlenmiştir. Elyaf kumaşlar kesilirken, elyaf yönlerinin kayma ve elyafların ayrılma olasılığı bulunmaktadır. Bu nedenle kesilecek olan kumaşların boyutları, düzgün bir yüzeyde elyaf doğrultularına dikkat ederek asetat kalemiiyle çizilmiş ve kesilecek olan hatların üzerine kağıt bant yapıştırılmıştır. Kesim sırasında sağlık önlemleri nedeniyle maske ve eldiven kullanılmıştır. Ayrıca karbon fiber kesimi sırasında etrafta bulunan elektrikli aletlerin ve prizlerin üzerleri kapatılmıştır. Karbon elyaf tozları etrafa uçarak elektrikli cihazlara kısa devre yaptırabilmekte ve arızalanmalarına sebep olmaktadır [44].

Kumaşlar kesildikten sonraki aşama ise vakum malzemelerini ve kompozit masasını imalat için hazırlamaktır. İmal edilecek olan parçanın üst ve alt yüzeylerinin pürüzsüz bir şekilde olması istendiği için özel olarak 3 mm kalınlığında imal edilecek parçaların boyutlarından en az 10'ar cm büyük olan, yüzeylerinde herhangi bir çizik bulunmayan 2 adet alüminyum plaka kestirilmişir. İmalat sırasında ısı işlem uygulanacağından dolayı ısı iletkenliği yüksek olan alüminyum tercih edilmiştir. Daha sonra, kesilmiş olan bu alüminyum plakların üzeri tek parça streç film ile kaplanmış ve imal edilecek olan parçanın boyutları asetat kalemiiyle streç filmin üzerine çizilmiştir. Kaplama sırasında streç film kenarlardan iyice gerdirilmiş ve ortada kabarıklık yapmamasına dikkat edilmiştir.

İmalat sırasında vakum yapıldığından fazla reçineler kenarlardan taşarak masaya akmakta ve kompozit imalat masasına zarar verebilmektedir. Bu nedenle kompozit imalat masasının alt tablası streç film ile kaplanmışir. Ayrıca, taşan reçinelerin vakum battaniyesine yapışarak zarar vermesini önlemek için masanın boyutlarında başka büyük bir streç film daha kesilmiştir. Vakum sırasında vakum deliklerinin kapanmaması ve vakum pompasının her noktadan hava çekebilmesi için özel olarak satılan beyaz renkli vakum battaniyesinden, masanın tablasını tamamen kapatacak şekilde 2 kat kesilmiştir.

Bir sonraki aşama ise epoksi reçinenin hazırlanmasıdır. Gerekli olan reçine miktarı kullanılan kumaşların ağırlığına ve cinsine göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle reçine hazırlanmadan önce kesilen kumaşlar, cinslerine göre (cam/karbon/kevlar) ayrı ayrı tartılmışir. Daha sonra her cins için Denklem (3.1)'de

verilen formül yardımıyla gerekli olan reçine miktarı ayrı ayrı hesaplanmış ve toplanarak gerekli olan tüm reçine miktarı elde edilmiştir.

$$\text{Gerekli Reçine Miktarı} = \frac{A \cdot n \cdot W_f \cdot RC}{(1 - RC)} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1’de; A her bir kompozit katmanın alanını, n katman sayısını, W_f kullanılan kumaşın metrekare başına olan ağırlığını ifade etmektedir. RC değeri ise kullanılan kumaşın cinsine göre değişen bir katsayıdır [36]. Cam, karbon ve kevlar kumaşlar için bu katsayının değerleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Yapılan bu hesaba fırçalarda, kapta ve etrafta kalması muhtemel reçine ağırlıkları dahil değildir. Formülün verildiği SP Kompozit Kılavuzunda, etrafta kalan reçine miktarını da hesaba katmak amacıyla hesaplanan değer 1.5 katsayısı ile çarpılması tavsiye edilmektedir. Fakat yapılan pratik uygulamalarda bu değer gereğinin çok üzerinde olduğu saptanmıştır. Bu nedenle, etrafta kalacak olan reçine miktarının, imal edilecek olan parçanın boyutuna, kullanılan fırça sayısına ve kabın büyüklüğüne bağlı olarak yaklaşık bir şekilde hesaplanarak, reçine ağırlığına eklenmesinin daha uygun olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 3.2 : Kumaş cinslerine göre RC katsayıları [36].

Kumaş Cinsleri	RC Katsayıları
Cam Fiber	0.46
Karbon Fiber	0.55
Kevlar Fiber	0.61

Daha önce kısım 2.4.1.3’te anlatıldığı üzere epoksi reçineler iki farklı bileşenden oluşmaktadırlar ve iki bileşenin doğru oranlarda karıştırılması büyük önem taşımaktadır. Belirtilen miktarların dışında karıştırılması, kuruma süresini değiştirmezken reçinenin mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Farklı marka reçinelerin farklı karışım oranları bulunmaktadır. Gerek çekme numunelerinin, gerekse plakların imalatı sırasında HEXION marka MGS L285 yapıştırıcı ve MGS L287 sertleştirici kullanılmıştır. Yapıştırıcının sertleştiriciye karışım oranı ağırlıkça 5’e 2 olarak verilmektedir. MGS L287’in oda sıcaklığında kuruma süresi yaklaşık 5-6 saat olarak verilmektedir [45].

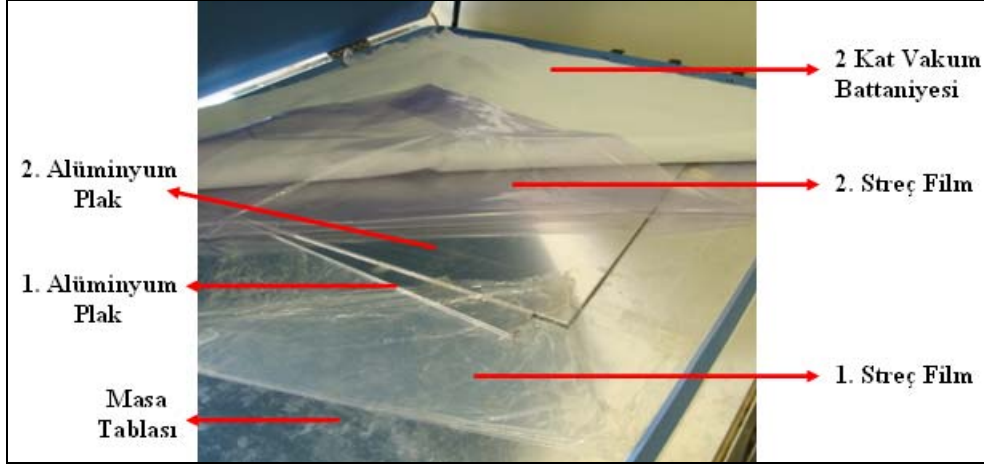
Reçinenin doğru miktarlarda karıştırılmasından sonraki aşama, elyaf kumaşların reçine ile ıslatılmasıdır. Bu işlem sırasında maliyetinin düşük olması sebebi ile

plastik saplı 3 numara kestirme boya fırçası kullanılmıştır. Birinci kumaş katmanı daha önceden streç filmle kaplanmış olan alüminyum plakalardan birinin üzerine yatırılmıştır. Daha sonra reçine kabına batırılan fırça, kumaşın üzerine vurularak Şekil 3.8’de gösterildiği gibi kumaşların ıslanması sağlanmıştır. Kompozit imalatı sırasında her katmanın ayrı ayrı ıslatılması gerekmektedir. Çok katmanlı imalatlarda, bir sonraki katman bir önceki ıslatılmış katmanın üzerine serilerek fırça ile ıslatma işleminin tekrarlanması gerekmektedir. Kumaşları ıslatma işlemi sırasında kuru kısımların kalmadığından emin olmak mekanik özellikleri doğru bir şekilde elde etmek açısından önemlidir.



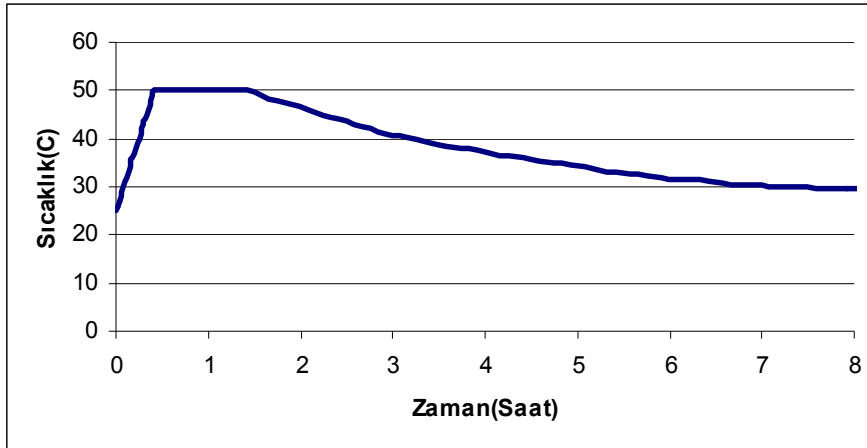
Şekil 3.8 : Fiberlerin reçine emdirilmiş fırça ile ıslatılması.

Kumaşların ıslatılmasının ardından, streç filmle kaplanmış olan ikinci alüminyum plaka birincisinin üzerine kapatılmıştır. Daha sonra arasında imal edilmiş parçanın bulunduğu iki alüminyum levha, kompozit imalat masasının orta kısmına yerleştirilmiştir. Önceden masa boyutlarında kesilmiş olan 2. streç film, masaya yerleştirilmiş olan plakların üzerine örtülmüştür. Son olarak vakum işlemi sırasında vakum deliklerinin tıkanmaması için streç filmin üzerine önceden kesilmiş olan 2 kat beyaz renkli vakum battaniyesi serilmiştir. Yukarıda anlatılan katmanlama işlemi Şekil 3.9’da detaylı olarak gösterilmiştir. Bu işlemin ardından kompozit masasının mavi renkli üst battaniyesi kapatılarak, masa kenarlardan kilitlenmiştir.



Şekil 3.9 : Kompozit imalatı sırasında yapılan katmanlama işlemi.

Daha önce Şekil 2.1’de verildiği üzere kompozit malzemelerin mekanik özellikleri, kürleme işleminin hangi sıcaklıkta ve ne kadar sürede yapıldığına bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle gerek kompozit parça numunelerini gerekse kompozit plakların imalatı sırasında aynı kürleme profilinin kullanılmasına dikkat edilmiştir. Bütün imalatlar sırasında, kompozit masasının bilgisayar ünitesine, kürleme sıcaklığı 50°C, kürleme sıcaklığına çıkış eğimi 1°C/dakika ve kürleme süresi 1 saat olarak girilmiştir. Kompozit imalat masasının sıcaklık ünitesinin gece çalışmaya devam etmesi güvenlik sebebi ile tehlikeli olabileceğinden kürleme süresi kısa tutulmuştur. Kompozit imalat masasının herhangi bir soğutma ünitesi bulunmadığından dolayı, sıcaklık çevreyle olan ısı alışverişi sonucunda düşmektedir. Kompozit masasının üzerinde bulunan ısı yalıtımlı battaniye sayesinde soğuma işlemi oldukça yavaş bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu sebeple kürleme süresinin 1 saat olarak belirlenmiş olması Şekil 3.10’da verilen kürleme profilinden de anlaşılabileceği gibi aslında daha uzun bir kürleme süresine denk gelmektedir.

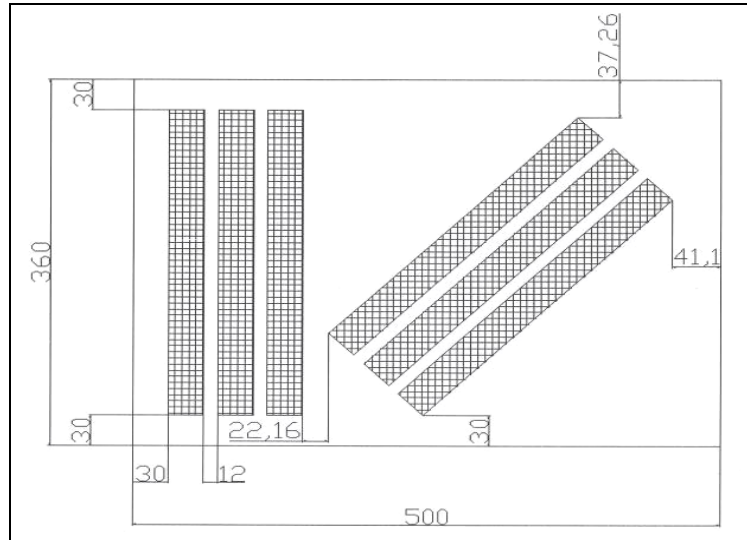


Şekil 3.10 : Kürleme sıcaklığının zamanla değişimi.

3.2.3 Kompozit çekme numunelerinin kesilmesi

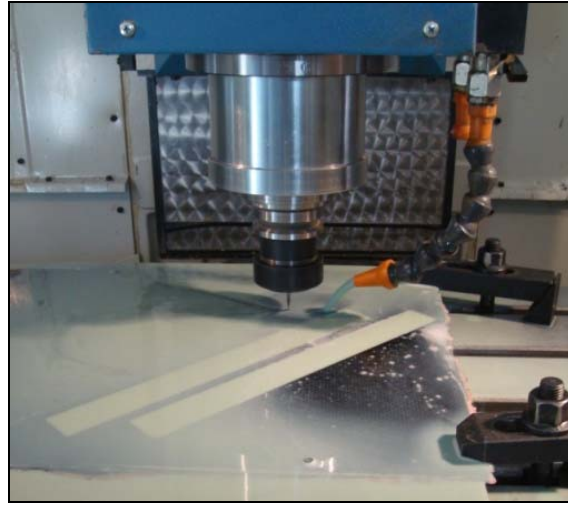
Çekme numunelerinin kendi içinde olabildiğince özdeş olabilmeleri için, numunelerin imal edilmiş olan bir plak üzerinden CNC yardımıyla kesilerek elde edilmesine karar verildiği daha önceki kısımlarda belirtilmişti. Malzeme özellikleri belirlenecek olan kompozitlerin, x ve y yönlerindeki elyaf miktarları ve dokuma stilleri aynıdır. Bu nedenle elastisite modülünü ve Poisson oranını elde etmek için sadece tek bir eksen yönünde çekme testi gerçekleştirmek yeterlidir. Bu amaçla elastisite modülünü ve Poisson oranını elde etmek için $0^\circ/90^\circ$, kayma modülünü elde etmek için de $-45^\circ/+45^\circ$ yönelimde olmak üzere toplam iki tipte numunenin hazırlanması gerektiğine karar verilmiştir. Ayrıca her tipteki numuneden 3'er adet üretilerek ortalama değerlerinin malzeme özelliği olarak kullanılmasının daha sağlıklı olacağı düşünülmüştür. Numunelerin kesimi için imal edilen plakların boyutları ve numunelerin plak üzerindeki yerleşimi Şekil 3.11'de verilmiştir.

ASTM D3039 ve D3518 standartlarında çekme numunelerinin boyutları için 25 mm en ve 250 mm boy tavsiye edilmektedir [46-47]. Fakat yine standartlarda bu ölçülerin belli koşullara bağlı kalmak şartıyla değiştirilebileceği yer almaktadır. İstanbul Teknik Üniversitesi Mekanik Laboratuvarında yapılan önceki kompozit malzeme çekme testlerinde 30 mm x 300 mm'lik numuneler tercih edildiği için ASTM standartlarında verilen numune boyutları koşullara bağlı kalmak şartıyla bu şekilde değiştirilmiştir.



Şekil 3.11 : Kesimi yapılacak kompozit numunelerin plak üzerinde yerleşimi (mm).

Kompozit çekme numunelerinin kesim işlemi İstanbul Teknik Üniversitesi Trisonik Araştırma Merkezinde bulunan TAKSAN marka 3 eksenli TMC-700V model CNC makinesinde gerçekleştirilmiştir. CNC makinesinin tezgah ölçüleri 700 mm x 450 mm, maksimum kafa devri ise 6000 devir/dak olarak verilmektedir [48]. Kesim işlemi sırasında Linix marka elmas uçlu M4x25x75 freze çakısı tercih edilmiştir. Numunelerin kenar kısımlarındaki liflerin tüylenmesini önlemek amacıyla yüksek devirde ve düşük ilerleme hızı ile kesim yapılmıştır. Kesim sırasında sağlık açısından zararlı olan toz parçacıklarının etrafa uçuşmasını önlemek amacıyla aslında soğutma amaçlı olarak kullanılan bor yağı açılmıştır. Örnek olarak karbon elyaf numunelerinin CNC makinesi ile kesimi Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12 : Karbon elyaf çekme numunelerinin CNC ile kesimi.

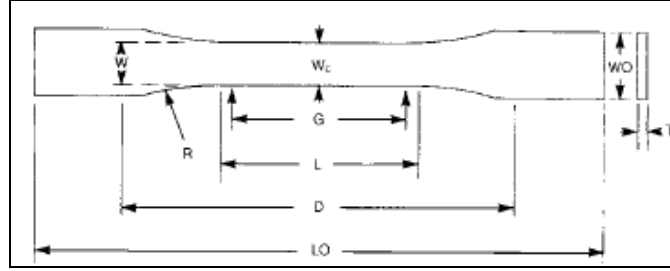
3.3 Epoksi Çekme Deneyi Numunelerinin Hazırlanması

Daha önce kısım 3.2’de de bahsedildiği üzere kompozit malzemelerin kalınlık yönündeki malzeme özelliklerini elde etmek oldukça güçtür. Bu nedenle kalınlık yönündeki malzeme özelliklerine, kullanılan reçinenin malzeme özelliklerinden yararlanılarak bir yaklaşımda bulunulabilir. Bu amaçla kompozit malzemelerin imalatı sırasında kullanılan epoksi reçinenin de malzeme özelliklerinin elde edilmesine karar verilmiştir.

3.3.1 Kalıpların hazırlanması

Kompozit malzemelerin imalatı sırasında kullanılan epoksi reçinenin malzeme özelliklerini elde edebilmek amacıyla daha önce Çizelge 3.1’de de belirtilmiş olan ASTM D 638-08 standartlarından yararlanılmıştır. Kalıp imalatı için, standartlarda 3.

tip olarak yer alan teknik resmi Şekil 3.13'te, boyutları ise Çizelge 3.3'de verilen numune tipi tercih edilmiştir. Tercih edilen numune tipi, kalınlığı 7 mm ile 14 mm olan numuneler için geçerlidir [49].



Şekil 3.13 : Epoksi çekme deneyi numunelerinin teknik resmi [49].

Çizelge 3.3 : Epoksi çekme deneyi numunelerinin boyutları [49].

Kısaltma	Açıklama	Değer(mm)
T	Geçerli olan kalınlık aralığı	7-14
W	Dar kesit genişliği	19
WO	Geniş kesit genişliği	29
L	Dar kesit uzunluğu	57
LO	Numune uzunluğu	246
D	Çeneler arası mesafe	115
G	Ölçüm kısmının uzunluğu	50
R	Yuvarlatma yarıçapı	76

Kalıp imalatı için 10 mm kalınlığında balsa levhaların kullanılması uygun bulunmuştur. Kullanılacak olan numune şekli CATIA V5R15 programı yardımıyla çizilmiş ve daha sonra “dxf” formatında kaydedilmiştir. Bu işlemin ardından, “dxf” formatında kaydedilmiş olan çizim CorelDraw 11 programı yardımıyla balsa levhaların boyutlarına göre ayarlanmış ve toplam 8 olarak çoğaltılmıştır. Elde edilmiş olan ikinci çizim İstanbul Teknik Üniversitesi Trisonik Araştırma Merkezinde bulunan LaserPro marka Mercury model lazer kesim cihazı yardımıyla kesilmiş ve kesilen parçaların balsa levhaların içinden çıkartılmasıyla kalıp imalat işlemi tamamlanmıştır. Kesim sırasında, lazer kesim cihazının hızı 1.5 ve gücü 92 olarak ayarlanmıştır. Kesme işlemi aynı parça için, balsa levhalar hiç hareket ettirilmeden üst üste 3 defa tekrarlanmak suretiyle gerçekleştirilmiştir.

3.3.2 Epoksi numunelerin imal edilmesi

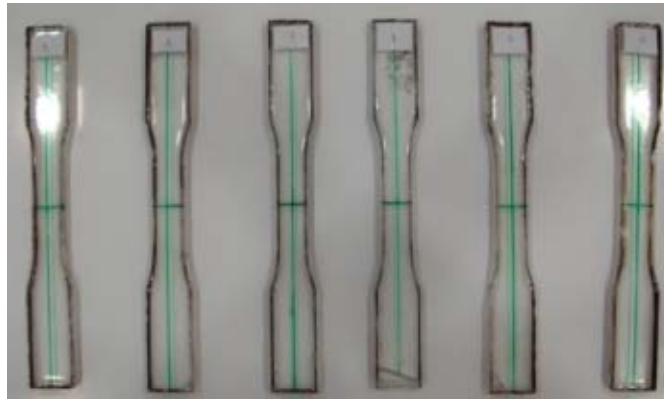
İmal edilen kalıplar kompozit imalatında da kullanılan streç film ile kaplanmış alüminyum plakların üzerine Japon yapıştırıcısı yardımıyla yapıştırılmıştır. Alüminyum plakların üzerine yapıştırılmış olan kalıpların dış yüzeylerine, imalat

sırasında herhangi bir sızıntı olmaması amacıyla, Şekil 3.14'deki gibi sızdırmazlık bandı çekilmiştir.



Şekil 3.14 : Kenarlarına sızdırmazlık bandı çekilmiş kalıplar.

Reçinelerin donduktan sonra kalıptan kolay bir şekilde çıkabilmesi amacıyla da kalıpların iç kısımlarına vaks sürülmüştür. Kompozit malzemelerin imalatı sırasında kullanılmış olan HEXION marka MGS L285 yapıştırıcı ve MGS L287 sertleştirici doğru karışım oranlarında karıştırılarak kalıpların içine dökülmüştür. Bu işlem sırasında kalıpların içinde hava kabarcıklarının kalmamasına dikkat edilmiştir. Kalıplar kompozit imalatında olduğu gibi kompozit imalat masasının içine yerleştirilmiş ve daha önce Şekil 3.10'da gösterilen ısıtma işlemi uygulanarak kurumaya bırakılmıştır. Epoksi çekme numunelerine, kompozit malzemelerin imalatı sırasında uygulanan vakumlama işlemi uygulanmamıştır. İmalatı tamamlanmış epoksi çekme numuneleri Şekil 3.15'de gösterilmiştir.

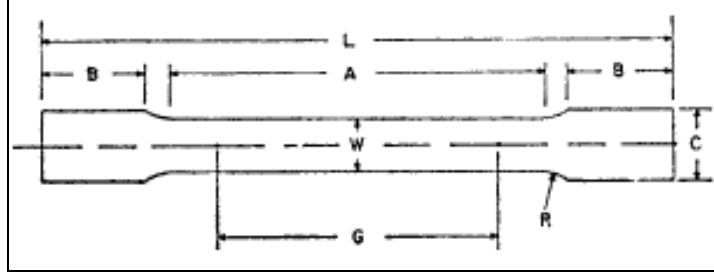


Şekil 3.15 : Epoksi çekme numuneleri.

3.4 Pirinç Malzeme Çekme Deneyi Numunelerinin Hazırlanması

Metal katmanlar içeren kompozit plakların imalatı sırasında, metal katman olarak pirinç levhaların kullanılmasına karar verilmiştir. Pirinç malzemesinin özelliklerini

elde etmek için daha önce Çizelge 3.1’de verilen ASTM E 8/E 8M-08 standartlarından yararlanılmıştır [50]. Numune imalatı için, standartlarda levha tipi olarak yer alan Şekli 3.16’da teknik resmi, Çizelge 3.4’de boyutları verilen numune şekli tercih edilmiştir.



Şekil 3.16 : Metal çekme deneyi numunelerinin teknik resmi [50].

Çizelge 3.4 : Pirinç çekme deneyi numunelerinin boyutları [50].

Kısaltma	Açıklama	Değer(mm)
W	Dar kesit genişliği	12.5
C	Geniş kesit genişliği	20
R	Yuvarlatma yarıçapı	12.5
G	Ölçüm kısmının uzunluğu	50
A	Dar kesit uzunluğu	57
L	Numune uzunluğu	200
B	Çene kısmının uzunluğu	50

Numuneleri imal etmek için daha önce kısım 3.3.1’de detaylı şekilde anlatılan lazer kesim yöntemiyle, 4 mm kalınlığındaki kontra plaktan bir tane örnek şablon kesilmiştir. Lazer kesim işlemi sırasında, cihazın hızı 1.3 gücü ise 93 olarak ayarlanmıştır. Daha sonra bu şablon kullanılarak numune çizimi pirinç levhanın üzerine aktarılmış ve maket bıçağı yardımı ile kesilerek Şekil 3.17’deki gibi pirinç çekme numuneleri elde edilmiştir.



Şekil 3.17 : Hazırlanmış olan pirinç çekme deneyi numuneleri.

3.5 Gerinim Ölçer (Strain Gauge)

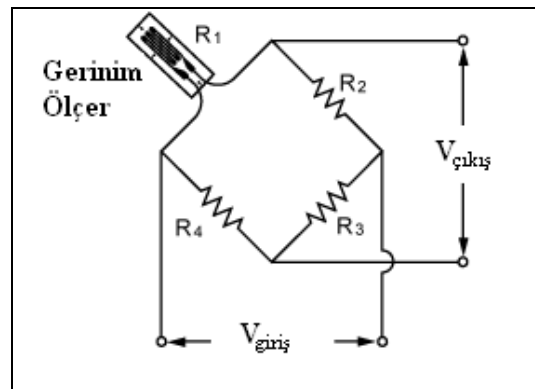
Gerinim ölçerler çok ince direnç tellerinin elektrik iletkenliği bakımından izole edilmiş bir film şeridi üzerine yapıştırılmasıyla oluşturulmuş duyargalardır. Gerinim ölçerler, gerinim dışında kuvvet, tork, ivme ve basınç ölçmek için de kullanılan algılayıcıların bazılarının içinde de bulunmaktadır.

3.5.1 Gerinim ölçerlerin çalışma prensibi

Gerinim ölçerler gerinim ölçümü yapılmak istenen malzemenin üzerine yapıştırılırlar. Kuvvet uygulanan malzeme, üzerine yapıştırılmış olan gerinim ölçer ile birlikte şekil değişimine uğrar. Bu şekil değişimi gerinim ölçerin içinde yer alan ince direnç tellerinin direncinin değişmesine sebep olur. Değişen bu direncin ölçülmesi ile de malzeme üzerinde oluşan gerinimin değeri hesaplanmış olur.

Genellikle ölçülmesi gereken direnç değişim değerleri çok küçük olduğu için, direnç değişiminin voltaj değişimi cinsinden ölçülmesi gerekmektedir. Bu nedenle gerinimi ölçmek için Wheatstone köprü devresi kullanılmaktadır.

Wheatstone köprü devresinde 4 adet direnç bulunmaktadır. Bu dirençlerden bir tanesinin yerine gerinim ölçerin kullanılması durumunda devre çeyrek köprü olarak isimlendirilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan bütün gerinim ölçümleri sırasında Şekil 3.18’de verilen 120 Ω ’luk çeyrek köprü kullanılmıştır. Wheatstone çeyrek köprü devresinde direnç değişimi sonucunda çıkış voltajının giriş voltajı cinsinden ifadesi ise Denklem 3.2’ de verilmiştir [51].

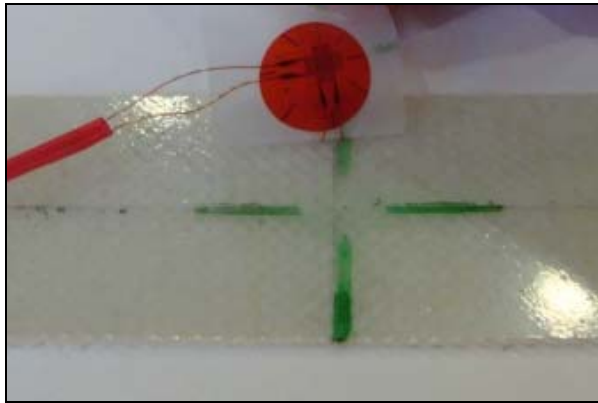


Şekil 3.18 : Çeyrek Wheatstone köprüsü [51].

$$V_{\text{çıkış}} = \frac{(R_1 \cdot R_3) - (R_2 \cdot R_4)}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \cdot V_{\text{giriş}} \quad (3.2)$$

3.5.2 Gerinim ölçerlerin yapıştırılması

Gerinim ölçerlerin malzeme üzerine yapıştırılması sırasında dikkat edilmesi gereken önemli hususlar bulunmaktadır. Bunlarda birincisi, kullanılacak olan yapıştırıcının cinsidir. Gerinim ölçerleri malzeme üzerine yapıştırmak için genel amaçlı uygulamalarda “Cyanoacrylate” yapıştırıcısının kullanılması gerekmektedir. Bu yapıştırıcı piyasada genelde Japon yapıştırıcısı olarak da bilinmektedir. İkinci olarak, gerinim ölçerin yapıştırılacağı yüzeyin temiz ve kuru olması gerekmektedir. Eğer yüzeyde pürüzlülükler varsa, yüzey hafifçe zımparalanmalı, alkol veya kolonya yardımıyla temizlenerek yapıştırılacak yüzey üzerinde toz veya benzeri parçacıkların kalmaması sağlanmalıdır. Üçüncü olarak, gerinim ölçerlerin yapıştırılacağı doğrultunun düzgün bir biçimde belirlenmesi gelmektedir. Gerinim ölçerler yapıştırıldıkları noktadaki ve doğrultudaki gerinim ölçümünü vermektedir. Bu nedenle istenilen doğrultu dışında açılı bir şekilde yapıştırılması yanlış gerinim değerinin ölçülmesi anlamına gelmektedir. Gerinim ölçerlerin istenilen doğrultuda yapıştırılabilmesi için öncelikle yapıştırılacak yüzeydeki doğrultular çizilmelidir. Doğrultuların çizilmesinin ardından, gerinim ölçerin beyaz renkli üzeri yazılabilir bandın üzerine aktarılması, bir sonraki adımda cyanoacrylate ile yüzeye yapıştırma işlemini kolaylaştıracaktır. Gerinim ölçerin üzerinde bulunan ufak doğrultu çizgileri ile malzeme üzerine çizilen doğrultu çizgileri üst üste gelecek şekilde gerinim ölçer beyaz bant ile malzeme yüzeyine Şekil 3.19 da gösterildiği şekilde yapıştırılır.



Şekil 3.19 : Gerinim ölçerin malzeme yüzeyine yapıştırılması.

Daha sonra bant bir kenarından hafifçe kaldırılır ve gerinim ölçerin film şeridinin altına bir damla kadar “cyanoacrylate” sürülüp bant tekrar gergin bir şekilde yüzeye yapıştırılır. Bu işlemin hemen ardından gerinim ölçerin düzgün bir şekilde yapışması için, üzerine parmak yardımıyla 1-2 dakika kadar basınç uygulanır. Kuruma

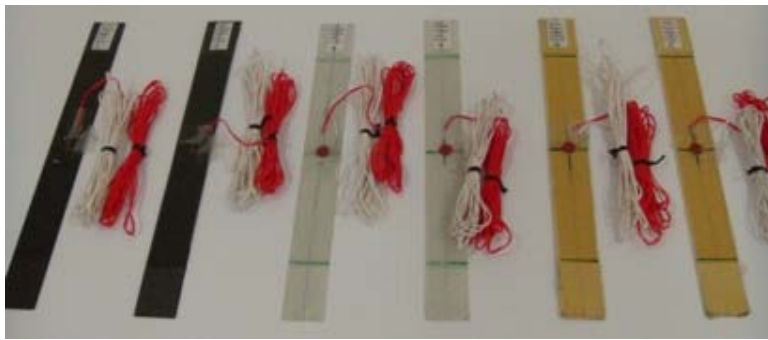
işleminin ardından üst tarafta kalan bant yavaşça sökülür. Son olarak gerinim ölçerin düzgün bir şekilde çalışıp çalışmadığını kontrol etmek amacıyla avometre yardımıyla direncinin kontrol edilmesinde yarar vardır [51].

3.5.3 Kullanılan gerinim ölçerler modelleri

Farklı türdeki malzemeler için farklı gerinim ölçerlerin kullanılması üretici firma tarafından tavsiye edilmektedir. Geçirimleri ölçmek için TML marka gerinim ölçerler kullanılmıştır. Numunelerin çekme testleri sırasında numune üzerlerine yapıştırılan gerinim ölçerlerin modelleri ise Çizelge 3.5’de verilmiştir. Kullanılan tüm gerinim ölçerler iki eksenli rozet şeklindedir. Gerinim ölçer rozetleri, bir eksenleri uzunlamasına (y-ekseni), diğer eksenleri yanlamasına (x-ekseni) olacak şekilde numunelerin üzerlerine Şekil 3.20’deki yapıştırılmıştır [51].

Çizelge 3.5 : Çekme deneylerinde kullanılan gerinim ölçerler.

	Model No	Kullanıldığı Yer	Gauge Faktörü	Gauge Uzunluğu (mm)	Gauge Genişliği (mm)	Direnç (Ω)	Gerinim Limiti %
	FCA-3-11-3L	Kompozit Çekme Numuneleri	2.12	3	1.7	120	3
	FCA 5-11	Kompozit Çekme Numuneleri	2.10	5	1.7	120	3
	GFCA-3-50	Epoksi Çekme Numuneleri	2.13	3	1.7	120	3
	FCA-1-11	Pirinç Çekme Numuneleri	2.12	1	0.7	120	3



Şekil 3.20 : Gerinim ölçer yapıştırılmış kompozit malzeme numuneleri.

3.6 Çekme Deneylerinin Gerçekleştirilmesi

İmalatı tamamlanan çekme numunelerine kısım 3.5.2’de anlatıldığı gibi gerinim ölçerler yapıştırılmıştır. Daha sonra numuneler kısım 3.1.1’de anlatılmış olan MTS çekme cihazına bağlanmıştır. Numuneler çekme cihazına bağlanırken hidrolik kuvvet

uygulayıcılarının burulma yönünde aynı konumda olmalarına, bağlanan numunenin orta noktasının eksenel doğrultuya denk gelmesine ve bağlantı kısıkaçları arasındaki mesafenin standartlarda verilen değerin altında olmamasına dikkat edilmiştir [52]. Numunelerin bağlantı kısıkaçlarına bağlanması sırasında dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise bağlantı kısıkaçlarının uygulayacağı sıkma basıncıdır. Bağlantı kısıkaçlarının az basınç uygulaması durumunda numune kısıkaçlardan kaymakta, fazla basınç uygulanması durumunda ise numune test sırasında bağlantı kısıkaçlarının bittiği noktadan kopmaktadır. Yapılan çekme deneylerindeki doğru sıkma basıncını bulmak için bir kaç deneme yapılmış ve deneyler Çizelge 3.6’da verilen sıkma basınçlarıyla gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.6 : Bağlantı kısıkaçları sıkma basınçları.

Çekme Deneyi Yapılan Malzeme	Bağlantı Kısıkaçları Sıkma Basıncı (MPa)
Cam Fiber	2.5 – 3.0
Kevlar Fiber	2.5 – 3.0
Karbon Fiber	3.0 – 4.0
Epoksi Reçine	0.75 – 1.0
Pirinç	3.0 – 3.5

Daha sonra numunelerin üzerinde yer alan gerinim ölçerler kısım 3.1.2’de anlatıldığı gibi EX1629 48 kanallı gerinim ölçüm cihazına bağlanmıştır. Çekme deneyleri sırasında MTS çekme cihazının yazılımından zaman ve uygulanan kuvvet değerleri, EX1629 48 kanallı gerinim ölçüm cihazı için kullanılan DAC Express programından ise zaman ve gerinim değerleri ölçülmüştür. İki farklı bilgisayardan ve iki farklı programdan aynı anda veri toplandığı için, iki program aynı anda kayda başlatılmıştır. Ayrıca toplanılan verilerin kolay işlenebilmesi amacıyla iki programın örnekleme frekansı, iki programda da en büyük ortak frekans olan 16 Hz olarak seçilmiştir.

Yapılan çekme deneylerinde, amaç sadece malzemenin elastisite modülü, kayma modülü ve Poisson oranını elde etmek olduğundan deneyler sırasında numuneler çekilerek kopartılmamıştır.

3.6.1 Kompozit malzemelerin çekme deneyi sonuçları

Kompozit malzemelerin malzeme özelliklerini elde etmek amacıyla Çizelge 3.7’de verilen kumaşlardan imal edilmiş olan kompozit malzemelerin çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Tüm kompozit malzeme numunelerinin imalatı sırasında 4

katman kumaş kullanılmıştır. Deneylere başlamadan önce, tüm numunelerde gerinin ölçerlerin yapıştırıldığı yerlerin kalınlıkları mikrometre ile genişlikleri ise kumpas ile ölçülmüş ve kesit alanları hesaplanmıştır. Ayrıca her bir numunenin ağırlığı ölçülerek, yoğunlukları bulunmuştur.

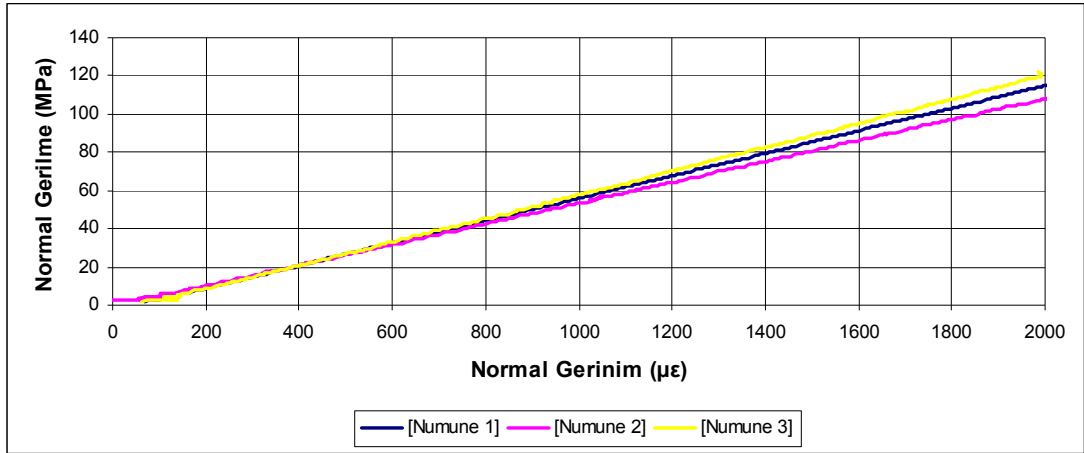
Çizelge 3.7 : Çekme deneyleri yapılan elyaflar.

Kumaş Cinsi	Markası	Kodu	Ağırlığı(gr/m ²)	Dokuma Tipi
Karbon	Texindustria	CC 302	300	Plain
Cam	Texindustria	EE 280	280	Plain
Kevlar	Texindustria	115	115	Twill 2/2

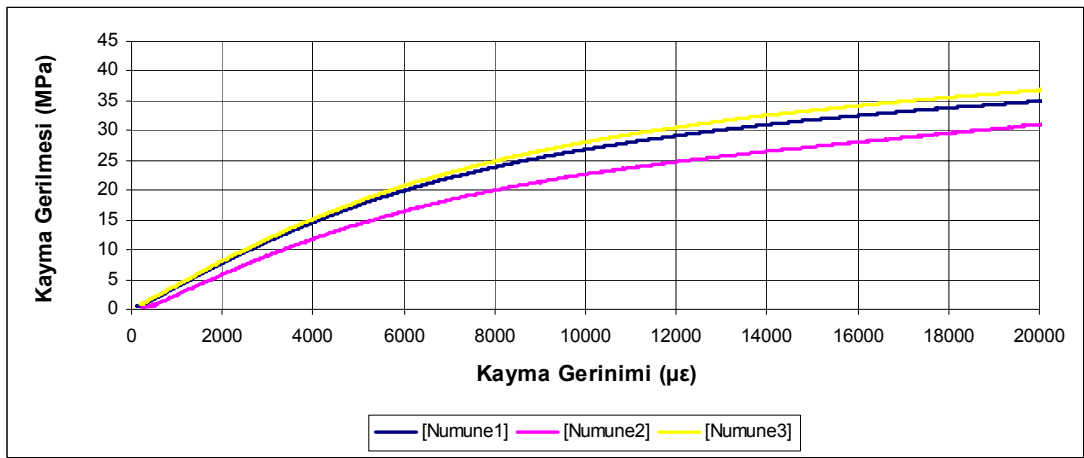
ASTM standartlarında hem 0°/90° hem de +45°/-45° yönelimli kompozit numunelerin çekilmesi sırasında 2 mm/dakika çekme hızı ile çekme işleminin gerçekleştirilmesi gerektiği yer almaktadır. Çekme hızının malzeme özelliklerinin elde edilmesini etkileyip etkilemediği görmek amacıyla cam, karbon ve kevlar elyafın her iki tipteki numunelerinden 1'er tanesi hem 2 mm/dakika hem de 1 mm/dakika çekme hızı ile çekilmiştir. Çekme hızının, malzeme özelliğinin hesaplanmasındaki etkisi bu bölümün sonunda tartışılacaktır. Malzeme özelliklerinin belirlenmesi için ASTM standartlarında yer alan formüller ve yöntemler kullanılmıştır.

3.6.1.1 Karbon-epoksi

CC 302 kodlu karbon-epoksi E_{xx} , E_{yy} ve ν_{xy} malzeme özellikleri 3 adet 0°/90° yönelimli 4 katmanlı numunelerin çekilmesi ile G_{xy} malzeme özelliği ise +45°/-45° yönelimli 3 adet 4 katmanlı numunenin çekilmesi ile elde edilmiştir. 0°-90° yönelimli numunelerin gerinin gerilme grafikleri Şekil 3.21'de verilmiştir. Poisson oranı değeri, 2 numunenin de yanıl eksendeki gerinin ölçerlerinde sorun olması sebebi ile sadece bir numuneden alınabilmiştir. +45°/-45° yönelimli numunelerin kayma gerinimi gerilme grafiği ise Şekil 3.22'de verilmiştir.



Şekil 3.21 : Karbon-epoksinin normal gerinim-gerilme grafiği.



Şekil 3.22 : Karbon-epoksinin kayma gerinimi-gerilme grafiği.

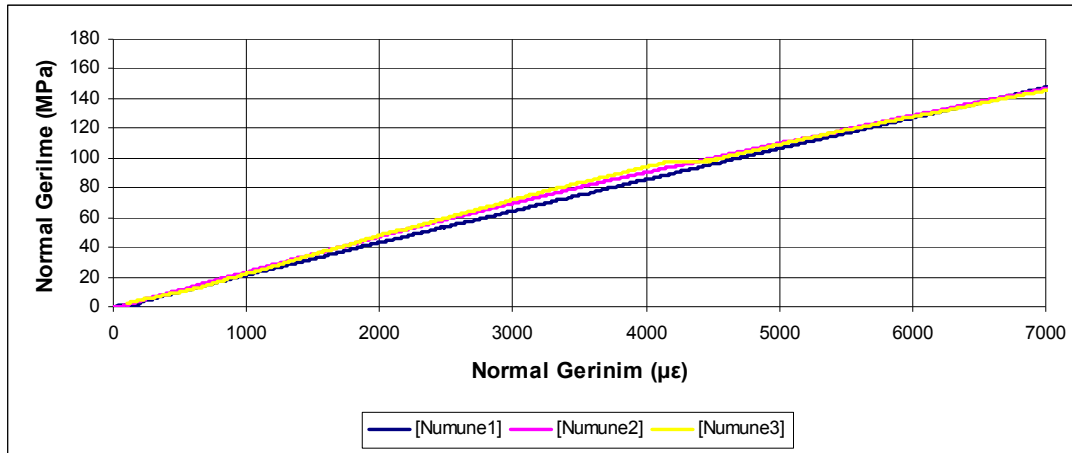
Karbon-epoksinin $0^\circ/90^\circ$ yönelimli numunelerinin çekilmesi sonucunda, 3 numunede de E_{xx} elastisite modülü değerinin ufak bir saçılım ile benzer çıktığı görülmüştür. Karbon-epoksinin $+45^\circ/-45^\circ$ yönelimli numunelerinin çekilmesi sonucunda ise iki numunenin birbirine oldukça yakın sonuç verdiği, bir numunenin ise diğerlerinden bir miktar sapma gösterdiği gözlenmiştir. Çekme deneyleri sonucunda CC 302 kodlu kumaş, MGS L285 yapıştırıcı ve MGS L287 sertleştirici kullanılarak Şekil 3.10'da verilmiş olan kütleme işlemine tabi tutularak imal edilmiş olan karbon-epoksinin malzeme özellikleri Çizelge 3.8'deki gibi hesaplanmıştır.

Çizelge 3.8 : Karbon-epoksinin malzeme özellikleri.

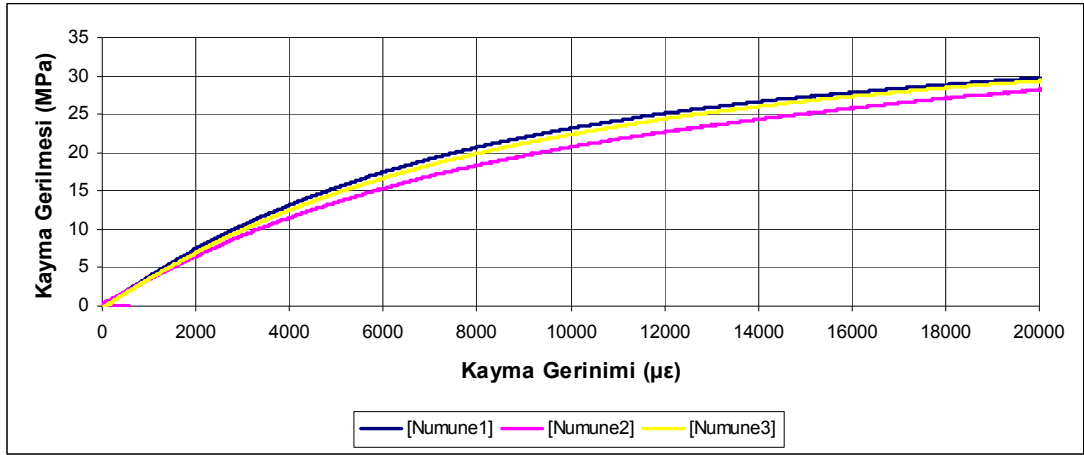
Numune No	Fiber Yönelimi	Çekme Hızı (mm/dak)	Hesaplama Noktalarındaki Değerler				Malzeme Özellikleri		
			ϵ_{min}	ϵ_{maks}	σ_{min}	σ_{maks}	E_{xx}, E_{yy}	G_{xy}	ν_{xy}
			($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(GPa)	
1	0/90	2	499.6	2002.2	26.5	115.0	58.9	-	-
2	0/90	2	503.9	2005.0	26.5	106.8	53.5	-	-
3	0/90	2	502.6	1993.5	27.1	120.4	62.6	-	0.195
						Ortalama	58.3	-	0.195
1	45/-45	2	1007.8	3999.9	3.8	14.6	-	3.6	-
2	45/-45	2	1011.2	4000.7	2.4	11.8	-	3.2	-
3	45/-45	2	1006.6	4005.0	4.1	15.2	-	3.7	-
						Ortalama	-	3,5	-

3.6.1.2 Cam-epoksi

EE280 kodlu kumaştan imal edilen cam-epoksinin E_{xx} , E_{yy} ve ν_{xy} malzeme özellikleri 3 adet 0°/90° yönelimli, G_{xy} malzeme özelliği ise +45°/-45° yönelimli 3 adet numunenin çekilmesi ile elde edilmiştir. 0°/90° yönelimli numunenin gerinim gerilme grafikleri Şekil 3.23’de, +45°/-45° yönelimli numunenin kayma gerinim gerilme grafiği ise Şekil 3.24’de verilmiştir.



Şekil 3.23 : Cam-epoksinin normal gerinim-gerilme grafiği.



Şekil 3.24 : Cam-epoksinin kayma gerinimi-gerilme grafiği.

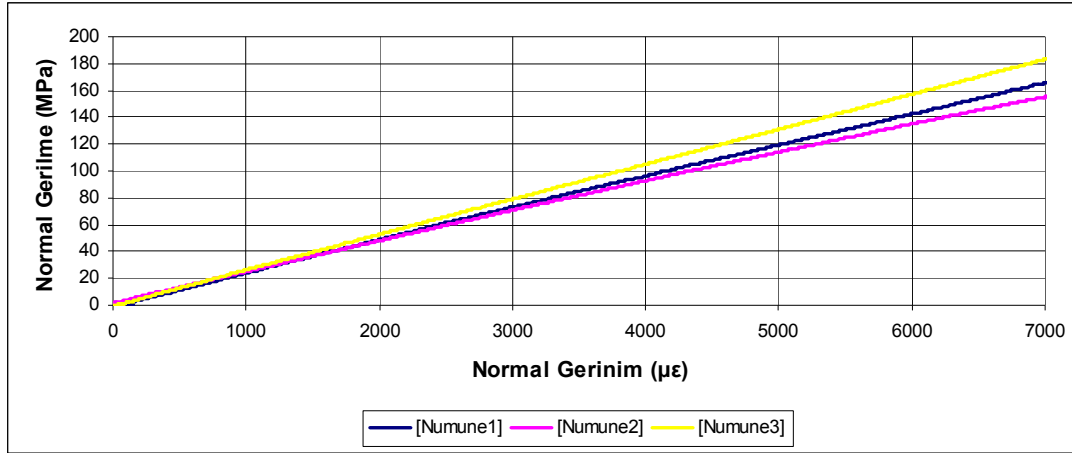
0°/90° yönelimli cam-epoksi numunelerinin çekme deneyleri sonucunda, birbirleriyle oldukça tutarlı elastisite modülü değerleri elde edilmiştir. Şekil 3.23’de verilen grafikten 3 numaralı çekme numunesinin 4500 mikro gerinim civarlarında kısmen hasara uğradığı ve gerinim gerilme eğrisinde bir kırılma gözlemlendiği söylenebilir. Fakat bu kırılma noktası malzeme özelliklerinin hesaplandığı aralığın dışında olması sebebi ile sonuçları etkilememiştir. Ayrıca hesaplanan Poisson oranı değerlerinde, 2 ve 3 numaralı numuneler aynı değeri verirken 1 numaralı numune yaklaşık % 21’lik bir sapma göstermiştir. Cam-epoksinin +45°/-45° yönelimli numunelerinin çekilmesi sonucunda, karbon-epoksinin kayma modülünde gözlenen saçılımdan daha az bir saçılım gözlenmiştir. Çekme deneyleri sonucunda EE 280 kodlu kumaş, MGS L285 yapıştırıcı ve MGS L287 sertleştirici kullanılarak Şekil 3.10’da verilmiş olan kürlleme işlemine tabi tutularak imal edilen cam-epoksinin malzeme özellikleri Çizelge 3.9’deki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 3.9 : Cam-epoksinin malzeme özellikleri.

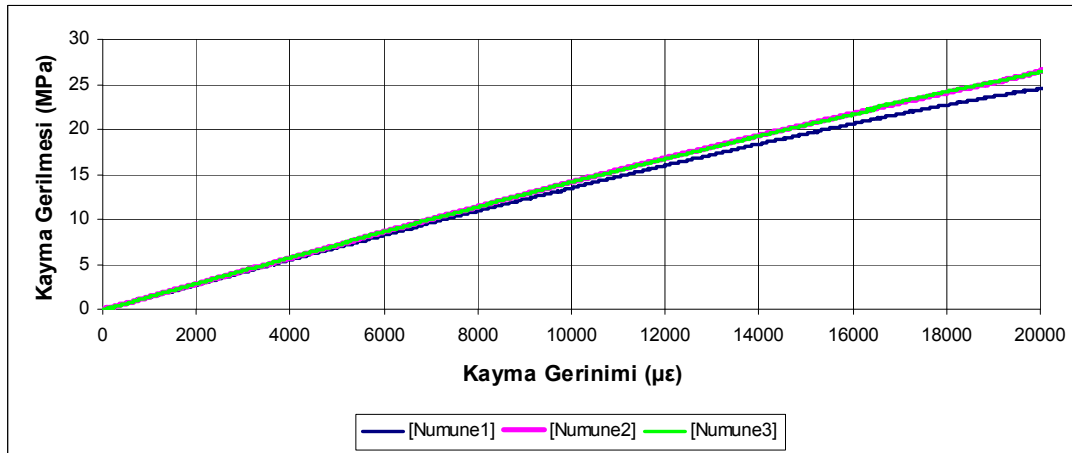
Numune No	Fiber Yönelimi	Çekme Hızı (mm/dak)	Hesaplama Noktalarındaki Değerler				Malzeme Özellikleri		
			ϵ_{min}	ϵ_{maks}	σ_{min}	σ_{maks}	E_{xx}, E_{yy}	G_{xy}	ν_{xy}
			(µε)	(µε)	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(GPa)	-
1	0/90	2	999.4	2997.9	21.3	64.2	21.5	-	0.116
2	0/90	2	1001.4	2998.7	23.2	69.5	23.2	-	0.148
3	0/90	2	1001.5	2999.6	22.1	71.9	24.9	-	0.148
Ortalama							23.2	-	0.137
1	45/-45	2	998.9	2003.9	3.8	7.5	-	3.7	-
2	45/-45	2	1004.7	2000.8	3.5	6.5	-	3.0	-
3	45/-45	2	1001.3	2008.6	3.5	7.0	-	3.4	-
Ortalama							-	3,4	-

3.6.1.3 Kevlar-epoksi

115 kodlu kumaş kullanılarak imal edilen kevlar-epoksinin E_{xx} , E_{yy} , ν_{xy} ve G_{xy} malzeme özellikleri diğer fiberlerde olduğu gibi 3 adet $0^\circ/90^\circ$ yönelimli ve 3 adet $+45^\circ/-45^\circ$ yönelimli numunenin çekme deneyleri sonucunda elde edilmiştir. $0^\circ/90^\circ$ yönelimli numunenin gerinim-gerilme grafikleri Şekil 3.25’de, $+45^\circ/-45^\circ$ yönelimli numunelerin kayma gerinimi-gerilme grafikleri ise Şekil 3.26’da verilmiştir.



Şekil 3.25 : Kevlar-epoksinin normal gerinim-gerilme grafiği.



Şekil 3.26 : Kevlar-epoksinin kayma gerinimi-gerilme grafiği.

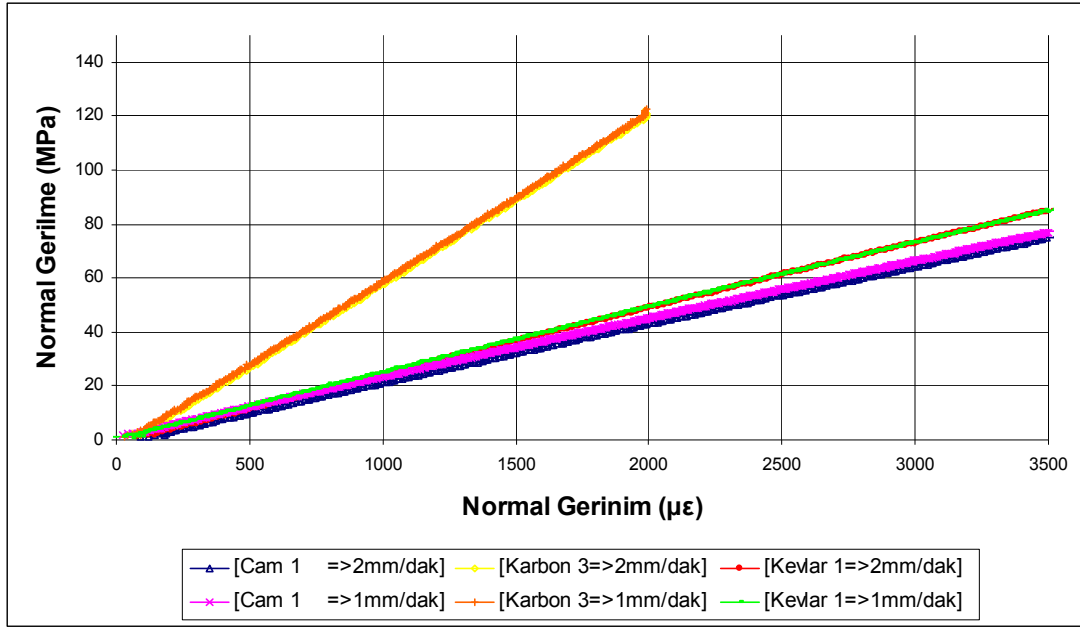
Kevlar-epoksinin $0^\circ/90^\circ$ yönelimli ve $+45^\circ/-45^\circ$ yönelimli numunelerinin çekme testleri sonucunda, gerek elastisite modülü değerleri gerekse kayma modülü değerleri yaklaşık %10’un altında bir saçılım göstermiştir. Fakat deneyler sonucunda elde edilen Poisson oranı değerleri daha geniş bir aralığa dağılmıştır. Çekme deneyleri sonucunda 115 kodlu kumaş, MGS L285 yapıştırıcı ve MGS L287 sertleştirici kullanılarak Şekil 3.10’da verilmiş olan kurlama işlemine tabi tutularak imal edilmiş olan kevlar-epoksinin malzeme özellikleri Çizelge 3.10’daki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 3.10 : Kevlar-epoksinin malzeme özellikleri.

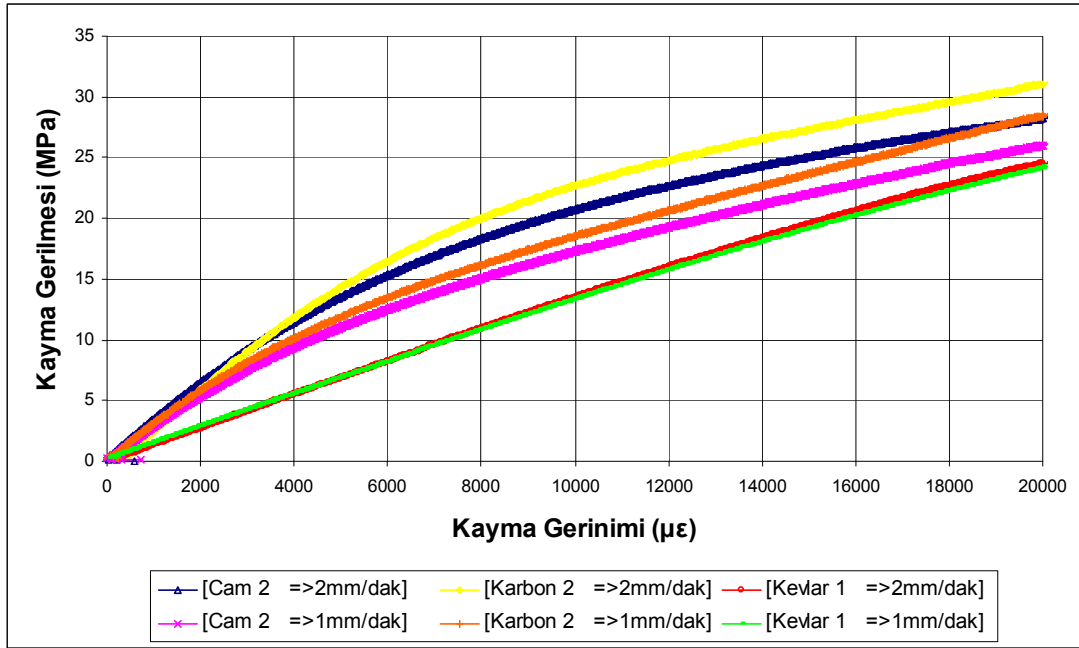
Numune No	Fiber Yönelimi	Çekme Hızı (mm/dak)	Hesaplama Noktalarındaki Değerler				Malzeme Özellikleri		
			ϵ_{min}	ϵ_{maks}	σ_{min}	σ_{maks}	E_{xx}, E_{yy}	G_{xy}	ν_{xy}
			($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(GPa)	-
1	0/90	2	997.6	3002.6	24.0	73.1	24.5	-	0.062
2	0/90	2	999.3	3006.2	25.1	71.0	22.8	-	0.091
3	0/90	2	1002.1	3005.7	26.4	79.2	26.4	-	0.123
						Ortalama	24,6	-	0,092
1	45/-45	2	2015.3	6022.4	2.7	8.2	-	1.4	-
2	45/-45	2	2007.5	6003.2	3.0	8.2	-	1.4	-
3	45/-45	2	1999.6	6007.0	2.8	8.6	-	1.4	-
						Ortalama	-	1.4	-

3.6.1.4 Çekme hızının kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi

Bu bölümün başında da bahsedildiği üzere, ASTM standartlarında kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini elde etmek için yapılacak olan deneylerde, çekme hızının 2 mm/dakika olarak kullanılması gerekmektedir. Çekme hızının farklı olarak seçilmesinin malzemenin mekanik özelliklerinin hesaplanmasında bir etkisi olup olmadığını incelemek amacıyla her bir farklı tipteki numuneden 1'er tanesi hem 2 mm/dakika hem de 1 mm/dakika olmak üzerinde iki farklı hızda çekilmiş ve elde edilen veriler kullanılarak malzeme özellikleri yeniden hesaplanmıştır. Cam, karbon ve kevlar-epoksilerin 0°/90° yönelimli numunelerinin iki farklı çekme hızıyla elde edilen normal gerinim-gerilme grafikleri Şekil 3.27'de; cam, karbon ve kevlar-epoksinin +45°/-45° yönelimli numunelerinin iki farklı çekme hızıyla elde edilen kayma gerinimi-gerilme grafikleri ise Şekil 3.28'de verilmiştir.



Şekil 3.27 : Cam, karbon ve kevlar-epoksinin farklı çekme hızlarındaki normal gerinim gerilme grafikleri.



Şekil 3.28 : Cam, karbon ve kevlar-epoksinin farklı çekme hızlarındaki kayma gerinimi- gerilme grafikleri.

Elde edilen grafiklerden ve Çizelge 3.11'den anlaşılabacağı üzere çekme hızının $0^\circ/90^\circ$ yönelimli numuneler açısından herhangi bir fark yaratmadığı net bir şekilde görülebilmektedir. Her iki çekme hızında da elde edilen değerler birbirlerine oldukça yakındırlar. Fakat $+45^\circ/-45^\circ$ yönelimli numuneleri için çekme hızının malzeme özelliklerini büyük ölçüde etkilediği görülmektedir. 1 mm/dakika hız ile çekilerek hesaplanan kayma modülü değerleri 2 mm/dakika hız ile çekilerek hesaplanan kayma

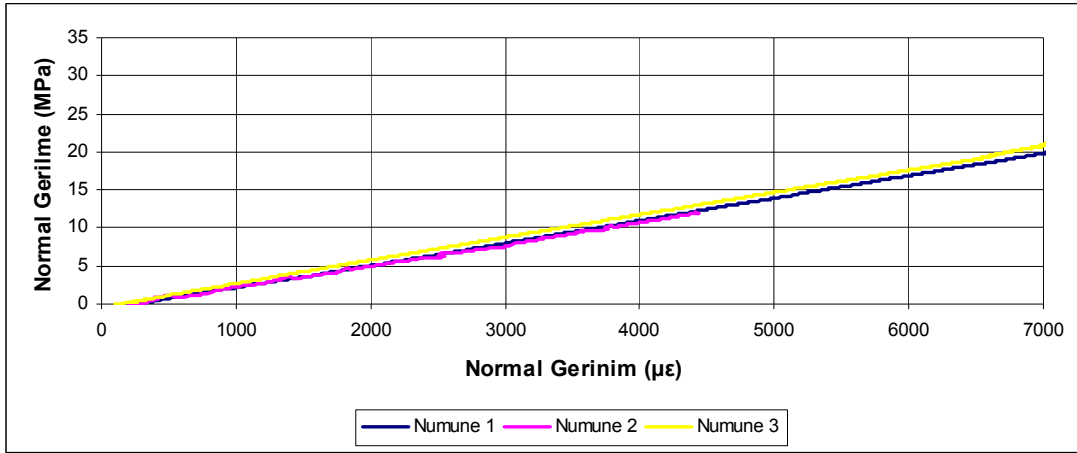
modülü değerlerinden daha düşüktür. Kevlar-epoksi için bu farkın diğer elyaf çeşitlerine göre nispeten daha az olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.11 : Farklı çekme hızlarında elde edilmiş kompozit malzeme özelliklerinin kıyaslanması.

Fiber Cinsi	Fiber Yönelimi	Numune No	Çekme Hızı (mm/dak)	Malzeme Özellikleri		
				E_{xx}, E_{yy}	G_{xy}	ν_{xy}
				(GPa)	(GPa)	-
Cam	0°/90°	Numune 1	2	21,5	-	0,116
			1	21,5	-	0,116
	45°/-45°	Numune 2	2	-	3,0	-
			1	-	2,6	-
Karbon	0°/90°	Numune 3	2	62,6	-	0,196
			1	62,7	-	0,196
	45°/-45°	Numune 2	2	-	3,2	-
			1	-	2,9	-
Kevlar	0°/90°	Numune 1	2	24,5	-	0,062
			1	24,1	-	0,059
	45°/-45°	Numune 2	2	-	1,4	-
			1	-	1,3	-

3.6.2 Epoksi reçinenin çekme deneyi sonuçları

Epoksi çekme numunelerinin orta kısımlarının kalınlıkları mikrometre ile genişlikleri ise kumpas yardımıyla ölçülmüş ve kesit alanları hesaplanmıştır. İmal edilen numunelerden 3 tanesi seçilerek, çekme deneyleri bu numunelerle gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyleri sırasında ASTM D638-08 standartlarından faydalanılmıştır. Çekme hızı olarak standartlarda yer alan 5 mm/dakika kullanılmıştır. Epoksi reçine numunelerinin çekme deneyleri sonucunda elde edilen normal gerinim-gerilme grafiği Şekil 3.29’da verilmiştir.



Şekil 3.29 : Epoksi reçinenin normal gerinim-gerilme grafiği.

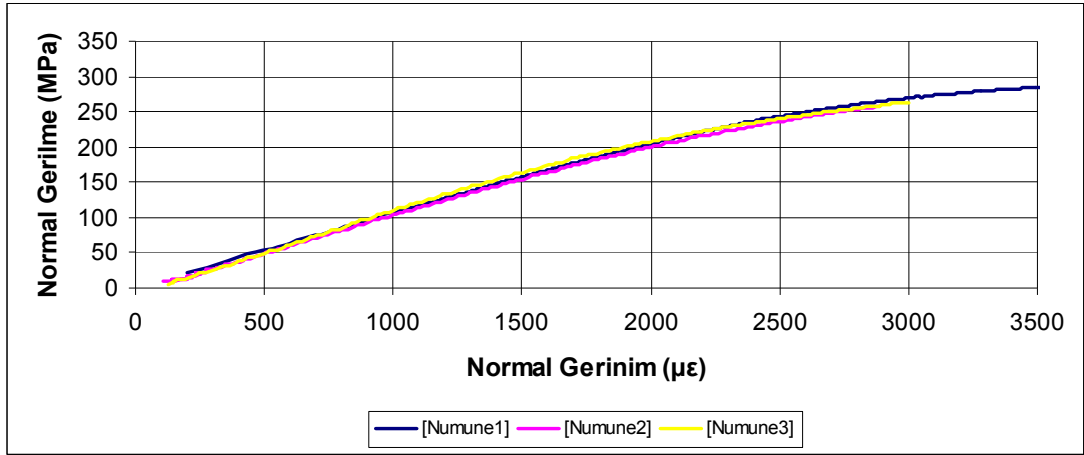
Çekme deneyleri yapılan 3 numunenin de elastisite modülü değerleri birbirlerine oldukça yakın olarak elde edilmiştir. Poisson oranı değerlerinde ise daha fazla bir saçılım gözlenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri Çizelge 3.12’de verilmiştir. Epoksinin izotrop bir malzeme olduğu kabulü ile kayma modülü de bu değerler kullanılarak hesaplanabilir.

Çizelge 3.12 : Epoksi reçine malzemesinin özellikleri.

Numune No	Çekme Hızı (mm/dak)	Hesaplama Noktalarındaki Değerler				Malzeme Özellikleri	
		ϵ_{min}	ϵ_{maks}	σ_{min}	σ_{maks}	E	ν
		($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	(MPa)	(MPa)	(GPa)	-
1	5	1016.9	4005.5	2.2	11.0	2.9	0.364
2	5	1010.1	4013.3	2.2	10.7	2.8	0.402
3	5	1022.6	4007.0	2.8	11.8	3.0	0.294
				Ortalama		2.9	0.353

3.6.3 Pirinç malzemenin çekme deneyi sonuçları

Pirinç malzemelerin malzeme özellikleri üç adet numunenin çekme deneyleri sonucunda elde edilmiştir. Çekme deneyleri sırasında daha önce Çizelge 3.1’de belirtilen ASTM E8/E8M- 08 standartlarından yararlanılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen normal gerinim gerilme grafikleri Şekil 3.30’da verilmiştir.



Şekil 3.30 : Pirinç malzemenin normal gerinim-gerilme grafiği.

Pirinç numunelerin çekme deneyleri sonucunda elde edilen elastisite modülü değerleri birbirlerine yakın olarak elde edilmiştir. Ayrıca birinci numunenin normal gerinim gerilme grafiğinin son kısmında, lineer elastik bölgenin aşıldığı görülmektedir. Pirinç malzemesi için hesaplanan elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri Çizelge 3.13 de verilmiştir. Pirinç, izotropik bir malzeme olduğu için kayma modülü, elastisite modülü ve Poisson oranı değerleri kullanılarak hesaplanabilir.

Çizelge 3.13 : Pirinç malzemesinin özellikleri.

Numune No	Çekme Hızı (mm/dak)	Hesaplama Noktalarındaki Değerler				Malzeme Özellikleri	
		ϵ min	ϵ maks	σ min	σ maks	E	ν
		($\mu\epsilon$)	($\mu\epsilon$)	(MPa)	(MPa)	(GPa)	-
1	2	494.2	1503.7	50.9	160.0	108.1	0,364
2	2	502.2	1500.8	48.5	154.1	105.8	0.301
3	2	496.3	1498.1	48.6	163.8	115.0	0.406
Ortalama						109.6	0.357

3.7 Malzemelerin Kalınlıkları ve Yoğunlukları

Sonlu elemanlar analizi sırasında, malzeme özelliklerinin yanı sıra kullanılan kompozit ve pirinç malzemelerinin, kalınlık ve yoğunluk değerlerinin de bilinmesi gerekmektedir. Bu nedenle, çekme deneyi için hazırlanan test numuneleri kullanılarak kompozit ve pirinç malzemeler için kalınlık ve yoğunluk değerleri hesaplanmıştır ve Çizelge 3.14’de verilmiştir. Çizelgede kompozitler için verilen değerler 6 adet numunenin ortalama değerleridir. Kompozit katmanların kalınlıkları, 4 katmanlı numunelerden ölçülen ortalama tek katman kalınlığıdır.

Çizelge 3.14 : Kompozit ve pirinç malzemelerin kalınlıkları ve yoğunlukları.

Malzeme	Markası	Kumaş Kodu	Katman Kalınlığı (mm)	Yoğunluk (kg/m ³)
Karbon-epoksi	Texindustria	CC 302	0.332	1340
Cam-epoksi	Texindustria	EE 280	0.243	1710
Kevlar-epoksi	Texindustria	115	0.212	1260
Pirinç	-	-	0.240	8500

4. MALZEME ÖZELLİKLERİNİN DOĞRULANMASI

3. bölümde plak imalatında kullanılacak olan kompozit malzemelerin ve pirinç malzemesinin mekanik özellikleri çekme testleri sonucunda elde edilmişti. Bu bölümde ise anlık basınç yükü deneyleri için üretilmiş olan metal katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plaklardan birinin statik testleri ve modal testleri anlatılacaktır. Daha sonra testlerden elde edilen sonuçlar, ANSYS sonlu elemanlar yazılımı ile yapılan analizlerin sonuçları ile karşılaştırılarak, çekme testleri sonucunda elde edilen malzeme özellikleri doğrulanacaktır. Sonuçlarda meydana gelen farklılıklar ise malzeme özelliklerinde gerekli değişiklikler yapılarak düzeltilecek ve bu şekilde anlık basınç yükü deneylerinin sonlu elemanlar analizleri sırasında kullanılacak malzeme özelliklerinin son hali elde edilecektir.

Zweben ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada kompozit malzemelerin çekme ve eğilme elastisite modüllerini araştırmışlardır. Yaptıkları bu çalışma, kompozit malzemeler için çekme ve eğilme elastisite modüllerinin farklı olabileceğini belirtmişler ve bunun nedenlerini incelemişlerdir. Zweben ve arkadaşları, elle yatırma yöntemi ile imal edilen kompozitlerin alt ve üst yüzeylerinde yer alan reçine katman kalınlığının çekme ve eğilme elastisite modülü hesaplarını büyük ölçüde etkilediği saptamışlardır. Ayrıca imal edilen çekme numunelerinin kalınlıklarının numune üzerinde değişkenlik göstermesi durumunda, tarafsız eksenin numunenin orta kalınlık hattından geçmeyeceğini ve bunun sonucunda çekme testleri sırasında eğilme kuvvetlerinin de ölçülen gerinim değerlerini etkileyebileceğini vurgulamışlardır [53]. Tüm bunların dışında, 3. bölümde anlatılan çekme testleri sırasında elde edilen malzeme özelliklerinin bir miktar da olsa saçılım göstermesi ve kayma modüllerinin hesapları sırasında çekme hızının, değerleri etkilemesi sebebiyle malzeme özelliklerinin doğrulanması ve düzeltilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

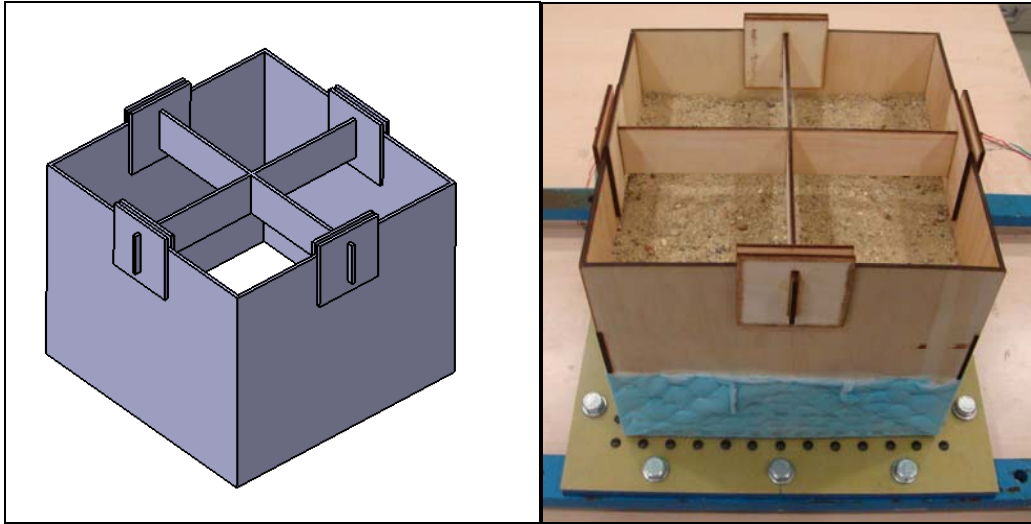
4.1 Statik Testler

Statik testlerde, etkin iç boyutları 300 mm x 300mm olarak üretilmiş olan, metal katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plak 3 farklı düzgün yayılı yük altında test

edilmiştir. Testler sırasında, plağın ön ve arka yüzeylerinden gerinim değerleri ölçülmüştür. Plağın boyutları ve katmanlaması kısım 5.2’de detaylı bir şekilde açıklanırken, gerinim ölçerlerin plak üzerindeki konumları ise kısım 5.1.1.3’te verilmiştir.

4.1.1 Statik test düzeneği

Deneyler sırasında plak yüzeyine düzgün yayılı statik yük uygulayabilmek için kum kullanmasına karar verilmiştir. Bu nedenle, Şekil 4.1’de gösterilen platform CATIA V5R15 programında tasarlanmıştır. Daha sonra, epoksi çekme numunelerinin kalıplarını imal etmek için kısım 3.3.1’de anlatılan lazer kesim yöntemiyle, platform 4mm’lik kontra plaktan imal edilmiştir. Platformun içine yerleştirilen kumun yüzeyi tamamen takip edebilmesi için, platformun altı esnek ve dayanıklı bir kumaş ile kaplanmış. Kumaş, platformun kenarlarına 250’den fazla zımba kullanılarak tutturulmuştur.



Şekil 4.1 : Statik test platformu.

Testler sırasında gerinim değerlerini ölçmek için kısım 3.1.2’de anlatılan VXi marka EX1629 veri toplama cihazı ve kısım 3.1.3’de anlatılan DAC Express veri toplama yazılımı kullanılmıştır.

4.1.2 Statik testlerin gerçekleştirilmesi

Metal katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plak, 5. Bölümde detaylı olarak anlatılacak olan anlık basınç yükü deney platformunun bağlantı parçaları kullanılarak kenarlarından ankastre olarak mesnetlenmiştir. Daha sonra içi kum dolu olan statik

test platformu plağın üzerine yavaşça yerleştirilmiş ve gerinim değerleri ölçülmüştür. Bu işlem 10, 15 ve 20 kg'lık yayılı yüklerin her biri için 2 kez, toplamda da 6 kez tekrarlanmıştır. Statik testlerden elde edilen sonuçlar, sonlu elemanlar analizi sonuçları ile birlikte kısım 4.3.3'de tartışılacaktır.

4.2 Modal Testler

Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan malzeme özelliklerini doğrulamak ve düzeltmek için kullanılan bir başka yöntem ise, plağın doğal frekanslarını deneysel olarak tespit etmektir [54]. Bu kapsamda, statik testlerde de kullanılan metal katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plağın doğal frekansları çekiç seti yardımıyla ölçülmüş ve ANSYS sonlu elemanlar yazılımıyla modal analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.2.1 Çekiç seti

Metal katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plağın doğal frekanslarını ölçebilmek için National Instruments marka, NI 9234 model, veri toplama kartı kullanılmıştır. Şekil 4.2'de gösterilen NI 9234, ± 5 V aralığında 4 kanaldan aynı anda 51.2 kHz ile ölçüm yapabilmektedir. NI 9234'ün üzerinde 24 bitlik analog dijital çevirici ve ikiz yanılmasını (antialiasing) önleyen filtre de bulunmaktadır. NI 9234 kartı ile bilgisayar USB portu üzerinden iletişim kurmaktadır. Veri toplama programı olarak ise m+p International firması tarafından geliştirilen SO Analyzer R 3.3 kullanılmıştır.



Şekil 4.2 : NI 9234 veri toplama kartı.

Doğal frekansları ölçebilmek için kenarlarından ankastre olarak mesnetlenmiş plak PCB marka, 086C03 model çekiç ile tahrik edilmiş ve yine PCB marka, 352C68 model tek eksenli ivme sensörü ile hareketleri ölçülmüştür. Kullanılan çekiç ve ivme sensörünün özellikleri sırasıyla Çizelge 4.1'de ve 4.2'de verilmiştir. Hem çekiç seti

hem de ivme sensörü NI 9234 veri toplama kartına BNC soketler yardımıyla bağlanmıştır.

Çizelge 4.1 : PCB 086C03 çekicinin özellikleri.

Hassasiyet	2.25 mV/N
Ölçüm Aralığı	± 2200 N
Frekans Aralığı	0 - 8 kHz
Çekiç Ağırlığı	160 gr
Uç tipi	Sert
Uç çapı	0.63 cm

Çizelge 4.2 : PCB 352C68 ivme sensörünün özellikleri.

Hassasiyet	10.2 mV/(m/s ²)
Ölçüm Aralığı	± 490 m/s ²
Frekans Aralığı	0.5 - 12 kHz
Sensör Ağırlığı	2 gr

4.2.2 Modal testlerin gerçekleştirilmesi

Dinamik testler sırasında örnekleme frekansının düzgün bir biçimde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Nyquist teoremine göre örnekleme frekansı, ilgilenilen en yüksek frekansın en az 2 katı olmalıdır. Fakat bu değer pratikte çok yeterli değildir. Sağlıklı bir ölçümün yapılabilmesi için örnekleme frekansının, ilgilenilen en yüksek frekanstan en az 2.5-3 kat daha fazla olması önerilmektedir [55]. Ayrıca, sistemde ilgilenilen frekanstan daha yüksek frekanslar mevcutsa, ikiz yanılması sonucunda verilerin birbirleriyle karışıp üst üste gelmemesi için alçak geçirgen ikiz yanılması filtresinin mutlaka kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle örnekleme frekansını belirlemeden önce, 3.bölümde elde edilmiş olan malzeme özellikleri kullanılarak ANSYS sonlu elemanlar yazılımında modal analiz yapılmış ve yaklaşık olarak plağın doğal frekansları elde edilmiştir. Daha sonra ilk 3 modun yeterli olacağı düşüncesiyle örnekleme frekansı 1280 Hz, alçak geçirgen filtrenin kesme frekansı da 640 Hz olarak belirlenmiştir. Statik testlerde kullanılmış olan plak kenarlarından ankastre olarak mesnetlendikten sonra, yüzeyine ivme sensörü vaks yardımıyla yapıştırılmıştır. Plak çekiç yardımıyla tahrik edilmiş ve ivme verileri ölçülmüştür. Bu işlem farklı tahrik noktaları ve farklı ivme sensörü konumları için 10 defa tekrarlanmıştır. Tahrik işlemi sırasında, çekicinin plak yüzeyine 1 defa dan fazla vurmamasına ve lineer bölgenin aşılması için ufak kuvvetlerin uygulanmasına dikkat edilmiştir. Her bir deneyden elde edilen kuvvet ve ivme verilerinin SO Analyzer programı yardımıyla, frekans tepki fonksiyonları (FTF) ve spektrumları

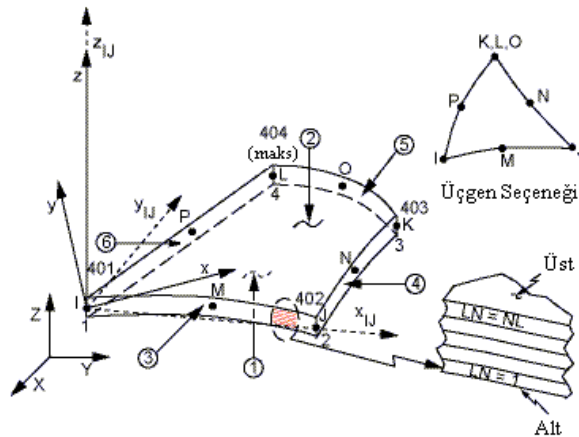
çıkartılmıştır. Elde edilen grafikler birlikte incelenerek plağın doğal frekansları tespit edilmiştir. Örnekleme frekansın, 3.modun titreşim frekansının 2 katından fazla seçilmesi sebebiyle başlangıçta planlanmamasına rağmen plağın 4. doğal frekansı da deneyler sonucunda elde edilmiştir. Modal testler sonucunda elde edilen doğal frekanslar Çizelge 4.3’de verilmiştir. Örnek olması amacıyla doğal frekans deneylerinden birinin sonucunda elde edilen grafikler EK A’da verilmiştir.

Çizelge 4.3 : 300 mm x 300 mm’lik plağın ilk 4 doğal frekansı.

Mod Sayısı	Frekans (Hz)
1.	188.13
2.	391.25
3.	408.44
4.	571.56

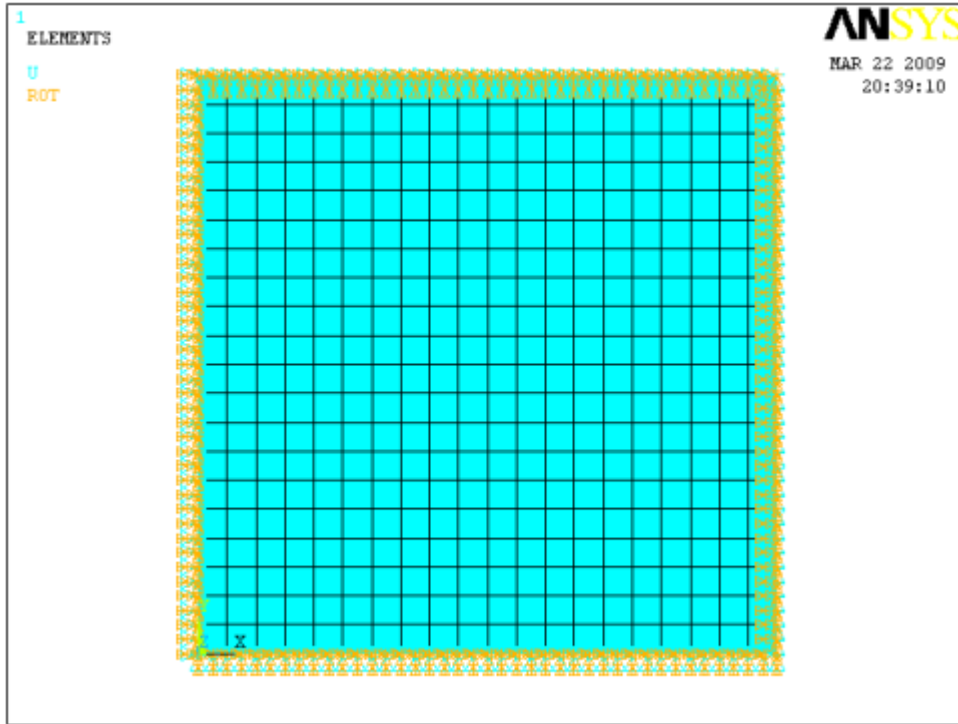
4.3 Sonlu Elemanlar Analizleri

Sonlu elemanlar analizleri ANSYS yazılımıyla gerçekleştirilmiştir. Hibrit katmanlı kompozit plağın modellenmesi için ANSYS kütüphanesinde bulunan 8 düğüm noktalı Shell 91 elemanı tercih edilmiştir. Düğüm noktaları ve eleman koordinat sistemi Şekil 4.3’de verilen Shell 91 elemanının her düğüm noktasında x, y, z eksenlerinde yer değiştirme ve dönme olmak üzere toplam 6 serbestlik derecesi bulunmaktadır. Shell 91 elemanını katmanlı kabuk yapıları ve orta kalınlıktaki sandviç yapıları modellemek için kullanılan bir eleman tipidir. Shell 91 elemanı Mindlin-Reissner kabuk teorisine dayanan birinci derece kayma deformasyonu teorisini kullanmaktadır. Shell 91 lineer, büyük dönme veya lineer olmayan büyük gerinim problemleri için uygun bir elemandır [56].



Şekil 4.3 : Shell 91 Elemanının düğüm noktaları ve koordinat sistemi [56].

Sonlu elemanlar analizi yaparken dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri de çözüm ağı oluşturulurken kullanılan eleman sayısıdır. Yeterli sayıda elemanın kullanılmaması durumunda modellenen yapı daha rijit bir şekilde davranarak yanlış sonuçların elde edilmesine sebep olmaktadır. Fazla eleman kullanılması durumunda ise çözüm süresi artmaktadır. Yapılan çözüm ağı yakınsaması sonucunda, boyutları 300 mm x 300 mm olan plak için 20 x 20 elemandan oluşan bir çözüm ağının yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Oluşturulan çözüm ağı ve kenarlara uygulanan ankastre sınır koşulları Şekil 4.4’de verilmiştir.



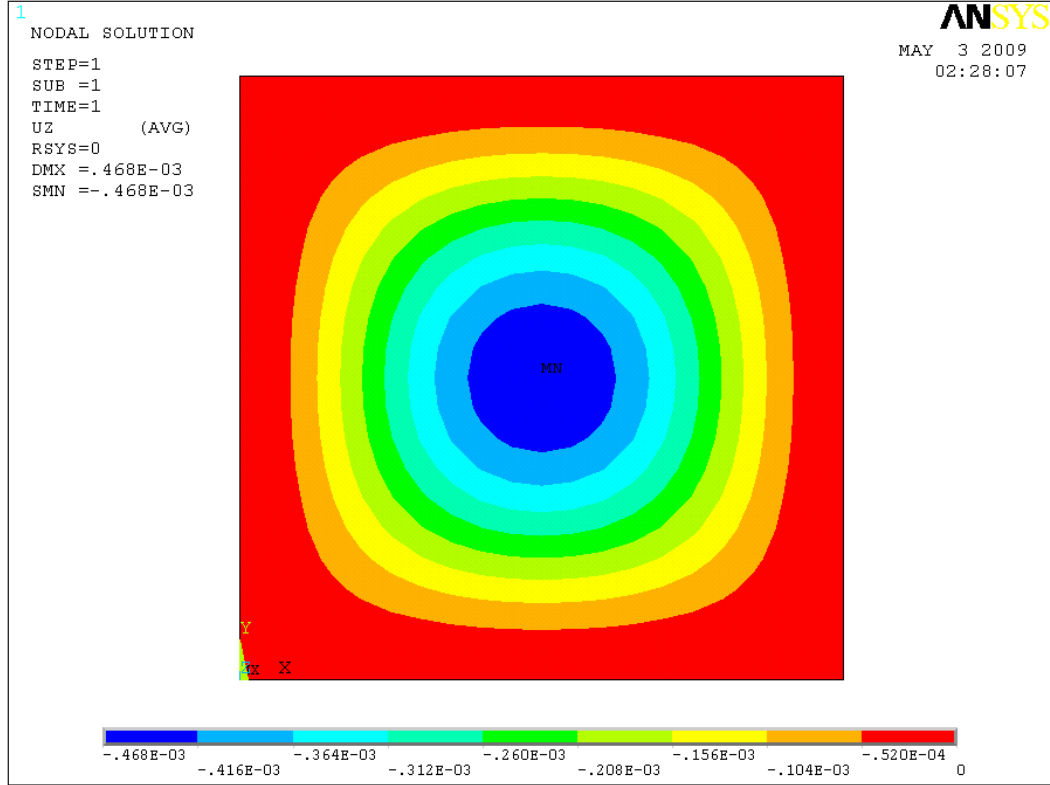
Şekil 4.4 : Çözüm ağı ve sınır koşulları.

4.3.1 Statik sonlu elemanlar analizi

Statik analizlerde, deneylerde kullanılan 10, 15 ve 20 kg’lık yükler plak yüzeyine düzgün yayılı basınç yükü olarak uygulanmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde, gerinim ölçüm rozetinin yapıştırıldığı plak orta noktasında her üç eksendeki gerinim değerlerinin aynı olduğu gözlenmiştir. Yapılan statik deneylerin sonuçlarında da ufak sapmalarla benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle statik analizlerle, deneylerin karşılaştırılmasında gerinim ölçüm rozetinden ölçülen 3 gerinim değerinin ortalaması kullanılmıştır.

Statik analizler sırasında, 20 kg yükün uygulandığı durumda plak orta noktasındaki yer değiştirmesi Şekil 4.5’de verildiği üzere 0.468 mm olarak bulunmuştur.

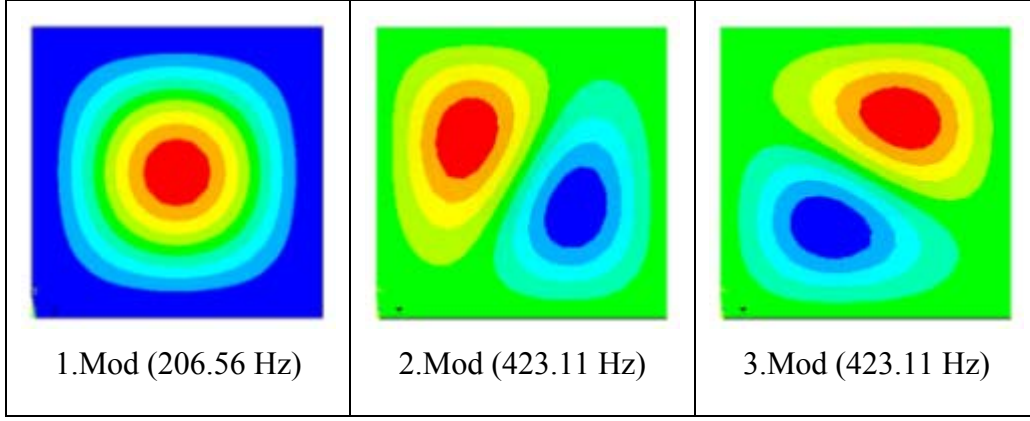
Hesaplanan plak kalınlığının 2.62 mm olduğu düşünöldüğünde, maksimum yer değıştirme plak kalınlığının %18'i kadardır ve bu nedenle statik testlerin tamamı küçük yer değıştirme kabulüyle gerçekleştirilmiştir.



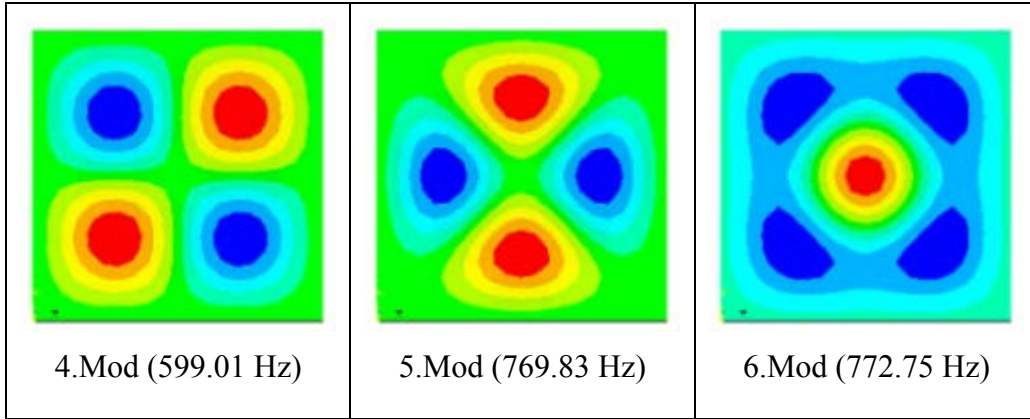
Şekil 4.5 : Plagın 20 kg yük altındaki yer değıştirmesi (m).

4.3.2 Modal sonlu elemanlar analizi

Modal analizlerde de yine Şekil 4.4'de verilen sınır şartları ve çözüm ağı kullanılmış ve hibrit katmanlı kompozit plagın ilk 6 mod şekli ve frekansı incelenmiştir. Modal analizler sırasında kabuk elemanlar için uygun olan ve hızlı çözüm sağlayan Block Lanczos yöntemi tercih edilmiştir [56]. 3. bölümde elde edilmiş olan malzeme özellikleri kullanılarak yapılan ilk analizler neticesinde mod şekilleri ve frekansları Şekil 4.6 ve 4.7'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.6 : Plağın 1. , 2. ve 3. mod şekilleri ve frekansları.



Şekil 4.7 : Plağın 4. , 5. ve 6. ve mod şekilleri ve frekansları.

4.3.3 Sonlu elemanlar analizleriyle malzeme özelliklerinin güncellenmesi

3. bölümde çekme testleri sonucunda elde edilen malzeme özellikleri kullanılarak yapılan sonlu elemanlar analizleri hem statik testlerden hem de modal testlerden bir miktar sapma göstermiştir. Bu nedenle malzeme özellikleri belli oranlarda düşürülerek analiz sonuçlarının deneysel sonuçlara olabildiğince yaklaşması sağlanmıştır. Statik ve modal testlerin sonuçlarının, 3. bölümde belirlenen ve yeni malzeme özellikleri kullanılarak yapılmış analizlerle karşılaştırması Çizelge 4.4 ve 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Statik deney sonuçlarından elde edilen gerinim değerlerinin analiz sonuçları ile kıyaslanması.

Yük	Deney ^[1]		Analiz							
	Üst Katman Cam	Alt Katman Pirinç	Üst Katman Cam ^[2]	Alt Katman Pirinç ^[2]	Fark Üst ^[2] %	Fark Alt ^[2] %	Üst Katman Cam ^[3]	Alt Katman Pirinç ^[3]	Fark Üst ^[2] %	Fark Alt ^[2] %
10 kg	-62.2	26.0	-54.7	26.8	12.0	3.1	-67.7	30.6	8.9	17.7
15 kg	-104.3	44.0	-82.1	40.2	21.3	8.6	-101.0	46.0	3.2	4.5
20 kg	-158.7	73.7	-109.0	53.6	31.3	27.2	-135.0	61.3	14.9	16.8
[1] Yapılan 2 farklı deney sonucunda elde edilen 6 gerinim değerinin ortalaması										
[2] 3.bölümde elde edilen malzeme özellikleri kullanılarak yapılan analizlerin sonuçları										
[3] Malzeme özellikleri değiştirilerek yapılan analizlerin sonuçları										

Çizelge 4.5 : Modal testler sonucunda elde edilen doğal frekansların modal analiz sonuçları ile kıyaslanması.

	Deney		Analiz		
	Frekans Hz	Frekans (Hz) ^[1]	Fark ^[1]	Frekans (Hz) ^[2]	Fark ^[2]
1.mod	188.1	206.6	%9.8	188.0	%0.1
2.mod	391.3	423.1	%8.1	385.1	%1.6
3.mod	408.4	423.1	%3.6	385.1	%5.7
4.mod	571.6	599.0	%4.8	545.1	%4.6
[1] 3.bölümde elde edilen malzeme özellikleri kullanılarak yapılan analizlerin sonuçları					
[2] Malzeme özellikleri değiştirilerek yapılan analizlerin sonuçları					

Malzeme özelliklerinin güncellenmesinin ardından yeni malzeme özellikleri ile yapılan analizlerde Çizelge 4.4 ve 4.5’den de görülebileceği üzere, plak titreşiminde daha çok etkin olan 1. ve 2. doğal frekanslara oldukça iyi bir şekilde yaklaşıırken, statik test sonuçlarında çok fazla bir iyileştirme elde edilememiştir. Elde edilen ve anlık basınç yükü analizlerinde kullanılacak olan en son malzeme özellikleri Çizelge 4.6’da verilmiştir. Elde edilen yeni malzeme özellikleri kullanılarak 400 mm x 300 mm ve 400 mm x 300 mm boyutlarındaki diğer plaklar için yapılan modal analiz sonuçları ise EK B’de yer almaktadır.

Çizelge 4.6 : Yenilenen malzeme özellikleri.

	Pirinç	Karbon/Epoksi	Kevlar/Epoksi	Cam/Epoksi
E_{xx} (GPa)	104.10	45.50	19.20	18.10
E_{yy} (GPa)	104.10	45.50	19.20	18.10
E_{zz} (GPa)	104.10	3.65	3.65	3.65
ν_{xy}	0.357	0.195	0.092	0.137
ν_{xz}	0.357	0.353	0.353	0.353
ν_{yz}	0.357	0.353	0.353	0.353
G_{xy} (GPa)	38.40	2.70	1.10	2.60
G_{yz} (GPa)	38.40	1.35	1.35	1.35
G_{xz} (GPa)	38.40	1.35	1.35	1.35

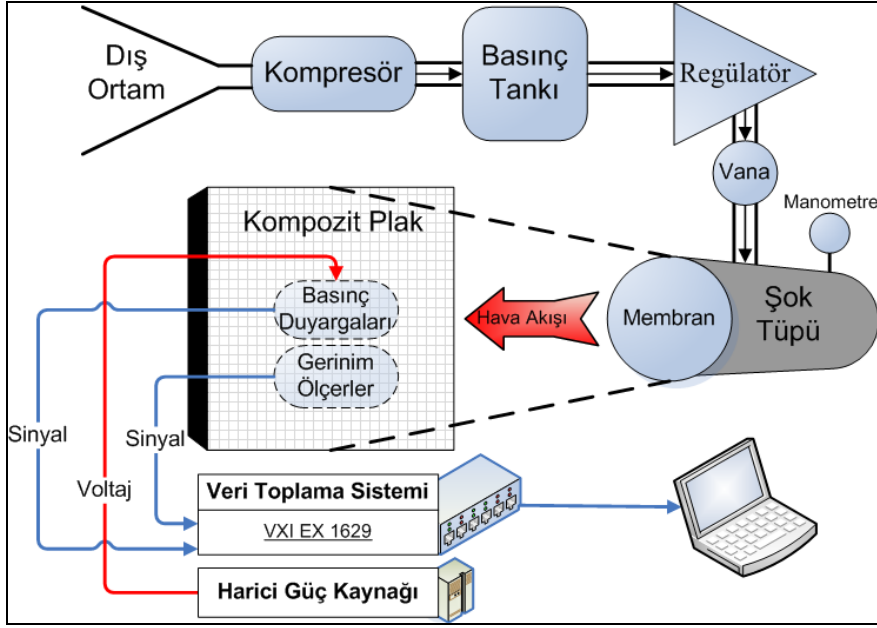
5. ANLIK BASINÇ YÜKÜ DENEYLERİ

Bu bölümde, öncelikle anlık basınç yükü deneylerinin gerçekleştirildiği düzeneğin işleyişi ve düzeneği oluşturan sistemler anlatılmıştır. Daha sonra anlık basınç yükü deneyleri sırasında kullanılan kompozit plakların özellikleri ve bağlantı şekilleri hakkında bilgiler verilmiştir. Son olarak da, anlık basınç yükünün uygulanmasında etkin rolü olan membranların yırtılma şekilleri tartışılmıştır. Anlık basınç yükü deneylerinden elde edilen sonuçlara 6.bölümde sayısal analizlerin sonuçları ile birlikte verilmiştir.

5.1 Deney Düzeneği

Anlık basınç yükü deneylerinin gerçekleştirildiği düzenek Şekil 5.1’de verilen şemaya göre İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Kompozit ve Yapı Laboratuvarında kurulmuştur. Deney düzeneğinin çalışması, kompresörün dış ortamdan aldığı havayı, basınç tankına göndererek tank içerisinde depolamasıyla başlamaktadır. Tank içerisinde yeterli basınca ulaşıldıktan sonra kompresör kapatılmakta ve regülatör yardımıyla tanktan çıkış basıncı ayarlanmaktadır. Hava akışı, basınç tankının üzerinde bulunan vananın açılmasıyla başlatılmaktadır. Basınç tankından çıkan basınçlı hava deney platformuna bağlı olan şok tüpünün içerisinde birirmektedir. Şok tüpünün içerisinde yeterli basınca ulaşıldığında, tüpün ağzında bulunan membran yırtılarak platformun diğer tarafına bağlı olan kompozit plak üzerinde anlık basınç yükü oluşturmaktadır. Ayrıca, kompozit plak üzerinde veri alma sistemine bağlı bulunan basınç duyargaları ve gerinim ölçerler bulunmaktadır. Basınç duyargaları veri alma sisteminden voltaj ile beslenirken, ölçülen basınç sinyallerini sisteme göndermektedir. Gerinim ölçerler ise herhangi bir beslemeye gerek duymaksızın gerinim sinyallerini direk olarak sisteme göndermektedirler.

Sonraki bölümlerde deney düzeneğini oluşturan sistemler üç ana başlık altında detaylı bir biçimde açıklanacaklardır. Bu alt sistemler şu şekildedir; basınç depolama ünitesi, deney platformu ve veri toplama sistemi.



Şekil 5.1 : Deney düzeneği şeması.

5.1.1 Basınç depolama ünitesi

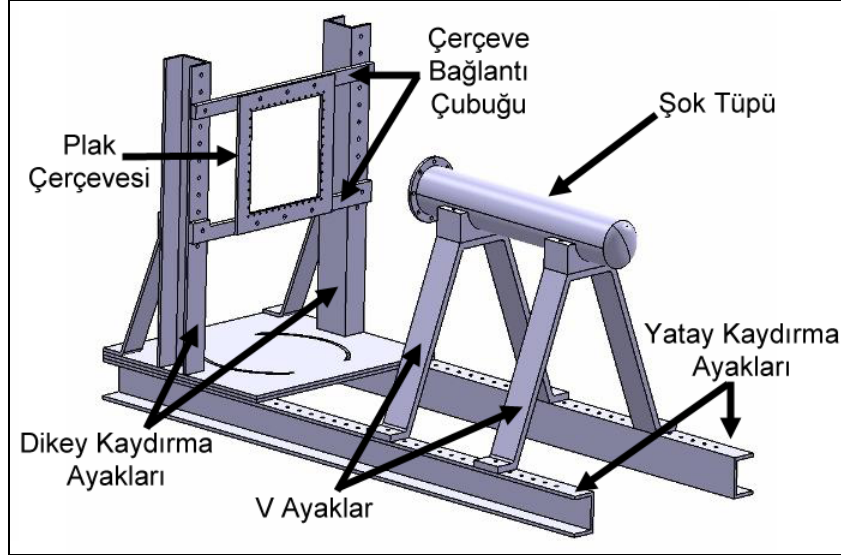
Basınç depolama ünitesi kompresör, basınç tankı, regülatör ve vanadan oluşmaktadır. Kompresör olarak Şekil 5.2’de sol tarafta gösterilen 40 bar’a kadar hava basabilen Dalgakıran marka DKK 40 model kompresör kullanılmıştır. Basınç tankı olarak ise Şekil 5.2’de sağ tarafta gösterilen 500 lt’lik tank kullanılmıştır. Basınç tankı üretici firma tarafından 60 bar’da hidrolik olarak test edilmiştir. Basınç tankının üstünde kompresörü durdurmak için ayarlanabilir elektronik bir kontrol vanası ile basıncı göstermek için bir manometre de bulunmaktadır. Basınç tankının çıkış ağzında ise vana ve regülatör yer almaktadır. Orma marka regülatör ile çıkış basıncı 0 ila 25 bar arasında ayarlanabilmektedir. Vana vasıtasıyla da ayarlanan basınçta hava akışının başlaması sağlanmaktadır.



Şekil 5.2 : Kompresör ve basınç tankı.

5.1.2 Deney platformu

Bu bölümde anlatılan deney platformu yüksek lisans öğrencisi Ali Baş [31] tarafından 106M450 nolu TÜBİTAK Projesi kapsamında tasarlanmıştır. Deney platformu Şekil 5.3'te verilen birçok parçanın düzgün bir biçimde montajı ile elde edilmektedir.



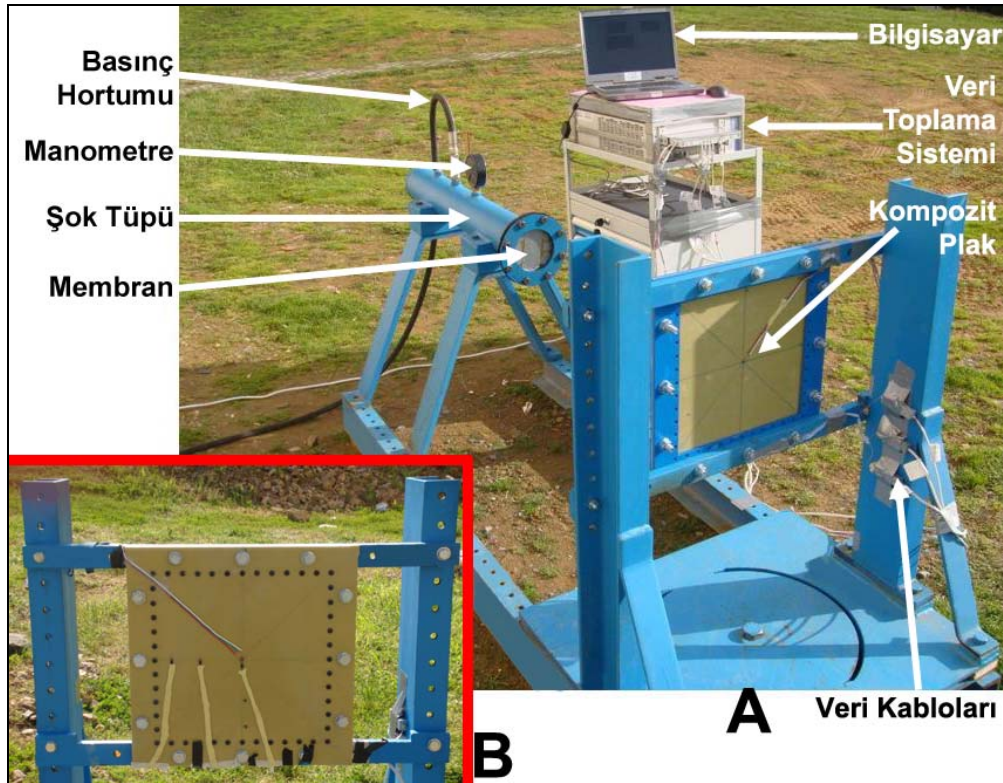
Şekil 5.3 : Deney platformu.

Anlık basınç yükünün plak üzerine etkimesini sağlayan şok tüpünün iç çapı 12 cm, boyu ise 82 cm'dir. Şok tüpü ile bir önceki bölümde anlatılan basınç tankı arasındaki hava akışı Hydra Power marka 256 bar'a dayanaklı yarım parmak basınç hortumu ile sağlanmıştır. Şok tüpü, deney platformunun tabanını oluşturan yatay kaydırma ayaklarına iki adet "V" ayak ile bağlanmaktadır. V ayaklar ile bağlanan şok tüpünün merkezinin yerden yüksekliği 75 cm olmaktadır. Yatay kaydırma ayaklarının boyu 202 cm'dir ve üzerinde şok tüpünün konumunun değiştirilebilmesi için her 5 cm' de bir bağlantı deliği bulunmaktadır. Bu sayede şok tüpü ile plak arasındaki mesafe 20 cm'den 85 cm'e kadar değiştirilebilmektedir.

Plakların deney platformuna bağlanabilmesi için iki adet dikey kaydırma ayağı, yatay kaydırma ayaklarının üzerine monte edilmiştir. Dikey kaydırma ayaklarının boyu 90 cm ve iki dikey kaydırma ayağı arasındaki mesafe 60 cm'dir. Yatay kaydırma ayaklarının üzerinde de her 5 cm' de bir bağlantı delikleri bulunmaktadır. Bu sayede farklı boylardaki plakların deney platformuna bağlanması sağlanmaktadır. Ayrıca yatay kaydırma ayakları arasındaki mesafeden daha küçük endeki plakların da deney platformuna bağlanabilmesi için 2 adet çerçeve bağlantı çubuğu bulunmaktadır.

Farklı boy ve ene sahip plakların ankastre sınır koşullarını sağlamak ve deney platformuna sabitleyebilmek için, plaklar iki adet 6 mm kalınlığındaki çerçeve vasıtasıyla çerçeve bağlantı çubuklarının üzerine monte edilmektedirler.

Yukarıda anlatılan deney platformuna monte edilmiş olan kompozit plağın bir sonraki bölümde anlatılacak olan veri toplama sistemiyle birlikte olan resmi Şekil 5.4A'da verilmiştir. Şekil 5.4B'de ise kompozit plağın dikey bağlantı ayaklarına bağlanmış hallinin önden görünüşü verilmektedir.



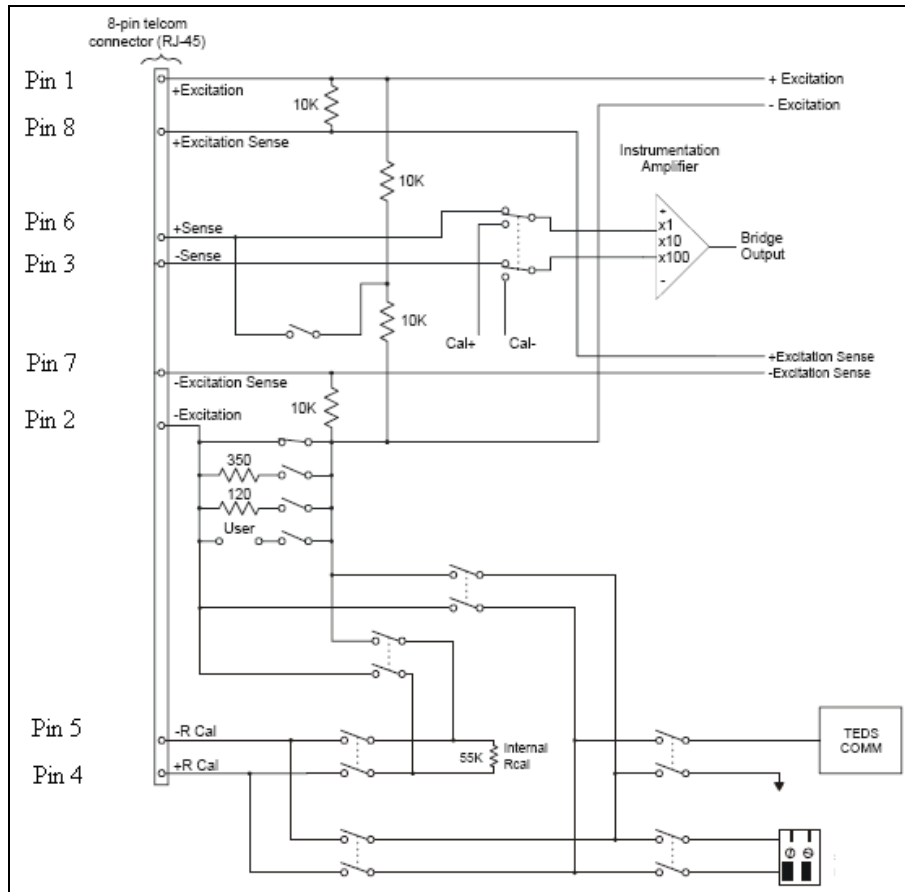
Şekil 5.4 : Deney düzeneği.

5.1.3 Veri toplama sistemi

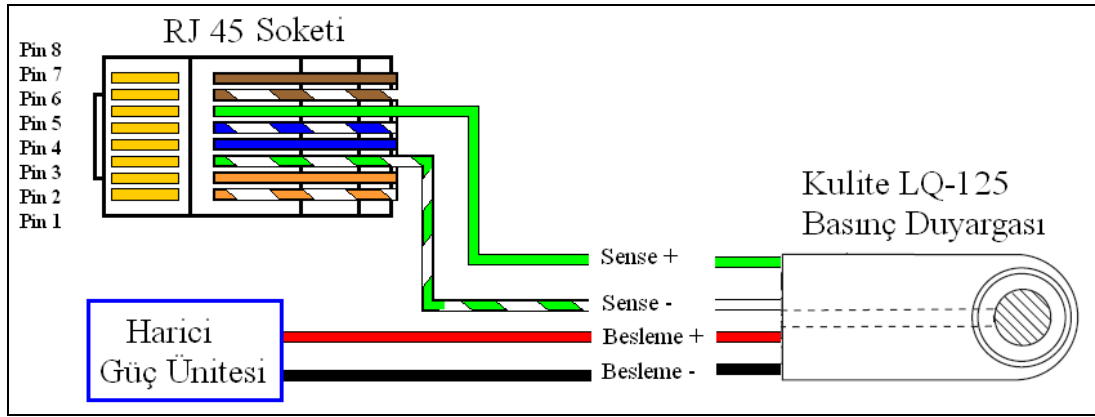
Anlık basınç yükü deneylerinde veri toplama sistemi olarak daha önce kısım 3.1.2' de anlatılan VXI Technology marka EX 1629 48 kanallı gerinim ölçüm cihazı kullanılmıştır. Basınç duyargalarından gelen voltaj sinyalleri de cihaz üzerindeki gerekli bağlantılar yapılarak yine EX 1629 tarafından ölçülmüştür. Basınç duyargalarının voltaj beslemesi ise, veri toplama sisteminden haricen kurulan bir güç ünitesi ile sağlanmıştır. Veri toplama programı olarak da yine daha önce detaylı bir şekilde açıklanan DAC Express 3.4 kullanılmıştır. Patlama anında oluşan anlık basınç yükünün karakteristiğini ve tepe noktasını yakalayabilmek için örnekleme frekansı programa 10 kHz olarak girilmiştir.

5.1.3.1 Veri toplama sistemi bağlantıları

Gerek gerinim ölçerlerin gerekse basınç sensörlerinin bağlantıları klemensler yardımıyla EX 1629 cihazına yapılmıştır. Gerinim ölçerlerin bağlantı şeması daha önce kısım 3.1.2’de detaylı olarak gösterilmiştir. Basınç duyargalarının bağlantı şeması ise Şekil 5.5’de verilmiştir. Gerinim ölçerlerinkine benzer olarak, RJ 45 soketlerinden çıkan 3 nolu pin basınç duyargasının Sense (-)’sine, 6 nolu pin ise basınç duyargasının Sense (+)’sine bağlanmıştır. Ayrıca EX 1629 cihazından ayrı olarak kurulan güç ünitesinin Besleme (+)’sı basınç duyargasının Besleme (+)’sına, Besleme (-)’si de basınç duyargasının Besleme (-)’sine bağlanmıştır. Basınç duyargası için yapılan bağlantının şematik gösterimi ise Şekil 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.5 : EX 1629’ın voltaj ölçümü için bağlantı şeması [40].



Şekil 5.6 : LQ-125 basınç duyargası için bağlantı şeması.

5.1.3.2 Veri toplamada kullanılan basınç duyargaları ve gerinim ölçerler

Plak üzerine etki eden basınç değerlerini ölçebilmek için kompozit plakların üst yüzeylerine Kulite marka LQ-125 model basınç duyargaları yapıştırılmıştır. Kullanılan LQ-125 basınç duyargaları şok ve titreşim yüklerine karşı dayanıklı, doğal frekansı yüksek olan basınç duyargalarıdır. Ayrıca, LQ-125’ler küçük yüzey alanına sahip ve geniş sıcaklık aralıklarında çalışabilen duyargalardır. LQ-125 basınç duyargalarının özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : LQ-125 Basınç duyargasının özellikleri

Ölçüm Tipi	Mutlak
Maksimum Ölçüm Basıncı	7 bar
Voltaj Beslemesi	10 V (DC)
Doğal Frekans	380 KHz
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-55°C ile +120°C
Kablo Hariç Ağırlığı	0.2 gr

Plak yüzeylerindeki gerinim değerlerini ölçmek için Tokyo Sokki Kenkyujo marka 3 eksenli FRA-2-11-3L model gerinim ölçerler kullanılmıştır. Kullanılan gerinim ölçerlerin özellikleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

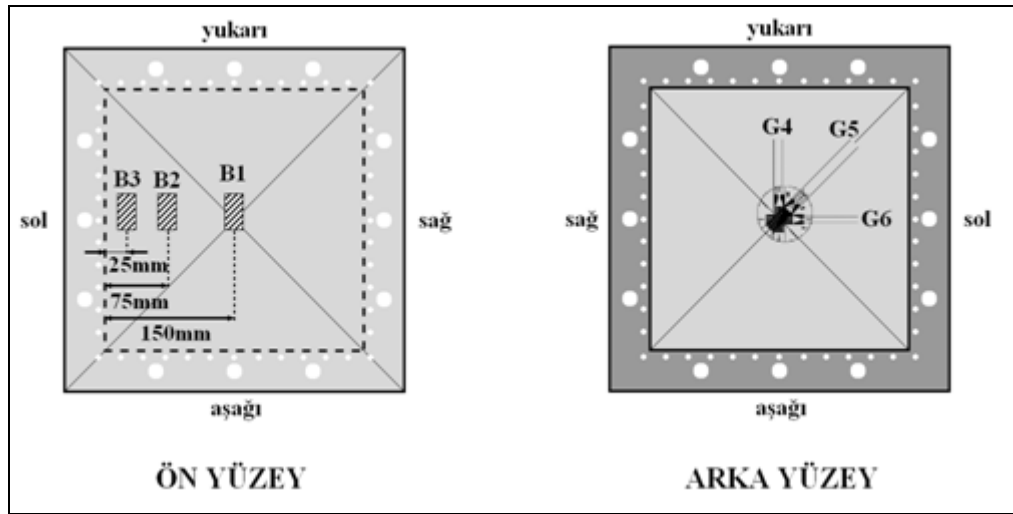
Çizelge 5.2 : FRA-2-11-3L Gerinim ölçerin özellikleri

Gauge Faktörü	2.09
Gauge Uzunluğu	2 mm
Gauge Genişliği	0.9 mm
Direnç	120 Ω
Gerinim Limiti	3%
Yorulma Dayanımı	1×10^6 ($\pm 1500 \mu\epsilon$)

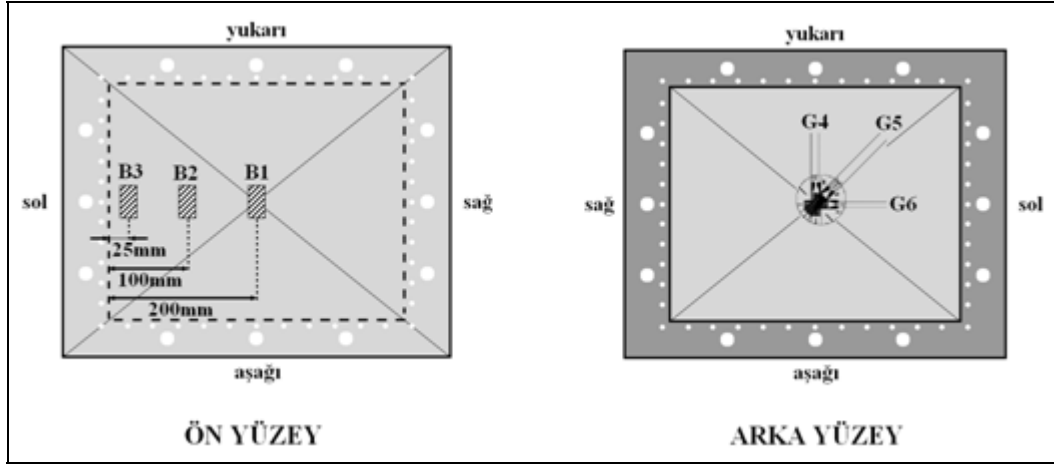
5.1.3.3 Basınç duyargalarının ve gerinim ölçerlerin plaklar üzerindeki yerleşimleri

Anlık basınç yükü deneyleri sırasında, plak yüzeyine etki eden basıncı yükünü ölçmek için 3 noktadan basınç ölçümü alınmıştır. Basınç duyargalarını yüzeye yapıştırmak için sıcak silikon kullanılmıştır. Sıcak silikonun tercih edilmesinin sebebi hem gerekli olan yapışma kalitesini sağlaması hem de 5 dakika gibi kısa bir sürede kurumasıdır. Sıcak silikon tercih edilmeden önce, basınç duyargalarının silikonun erime sıcaklığında herhangi bir hasara uğrayıp uğramadığı araştırılmıştır.

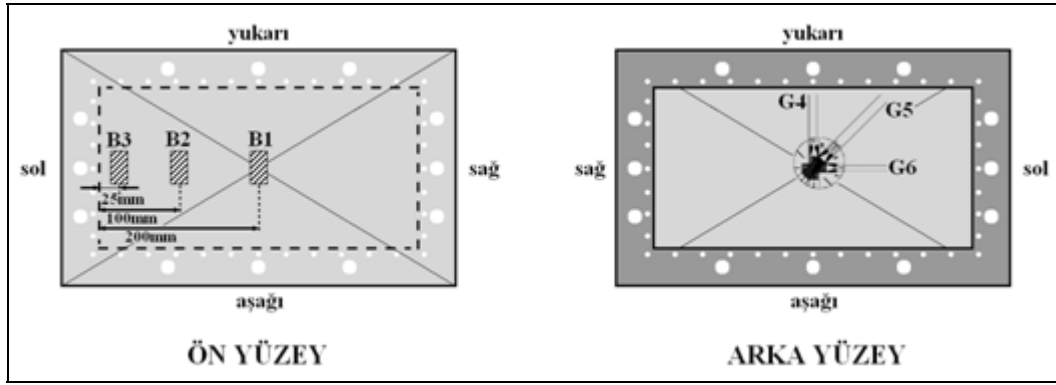
Deneyler esnasında plak yüzeylerindeki gerinimleri ölçmek için 2 adet 3 eksenli gerinim ölçer kullanılmıştır. Gerinim ölçerlerden biri ön yüzeyin tam ortasına, diğeri arka yüzeyin tam ortasına denk gelecek şekilde yapıştırılmıştır. Gerinim ölçerlerin ve basınç duyargalarının 3 farklı boyuttaki plak üzerindeki yerleşimleri ve isimlendirmeleri Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9'da verilmiştir. Ön yüzde yer alan gerinim ölçerler, basınç duyargaları ile karışmaması için şekil üzerinde gösterilmemiştir. Ön yüzdeki gerinim ölçerler ise G1 G4'ün arkasında, G2 G5'in arkasında ve G3'de G6'nın arkasında olacak şekilde isimlendirilmiştir.



Şekil 5.7 : Gerinim ölçer ve basınç duyargalarının 30 cm x 30 cm plak üzerindeki yerleşimleri ve isimlendirmeleri.



Şekil 5.8 : Gerinim ölçer ve basınç duyargalarının 40 cm x 30 cm plak üzerindeki yerleşimleri ve isimlendirmeleri.



Şekil 5.9 : Gerinim ölçer ve basınç duyargalarının 40 cm x 20 cm plak üzerindeki yerleşimleri ve isimlendirmeleri.

5.2 Kompozit Plaklar

Anlık basınç yükü deneylerini gerçekleştirmek için aynı katmanlamaya sahip, farklı açıklık oranında 3 adet metal katmanlı kompozit plak üretilmiştir. İmalat yöntemi olarak daha önce bölüm 3.2.2’de çekme numunelerinin imalatında kullanılan yöntem tercih edilmiştir. İmalat sırasında metal katman olarak 0.26 mm kalınlığındaki pirinç levhalar kullanılırken, kumaş olarak daha önceden çekme testleri yapılan ve Çizelge 3.7 de verilmiş olan kumaşlar kullanılmıştır. Pirinç levhaların elyaf kumaş yüzeyleriyle olan yapışma kalitesini artırmak için levhaların yüzeyleri 240 numara zımpara ile zımparalanmıştır. Plakları tam ölçüsünde kesmek ve bağlantı deliklerini açmak için yine CNC’den yararlanılmıştır.

Üretilen metal katmanlı kompozit plakların katmanlaması ve özellikleri Çizelge 5.3’de verilmiştir. Ayrıca plakların boyutları ve bağlantı deliklerinin yerleri EK C’de yer almaktadır.

Çizelge 5.3 : Üretilen plakların katmanlaması.

Katman	Malzeme
1. (Basıncın Etkidiği Yüzey)	Cam/Epoksi
2.	Cam/Epoksi
3.	Cam/Epoksi
4.	Kevlar/Epoksi
5.	Kevlar/Epoksi
6.	Kevlar/Epoksi
7.	Karbon/Epoksi
8.	Karbon/Epoksi
9.	Karbon/Epoksi
10.(Arka Yüzey)	Pirinç Levha

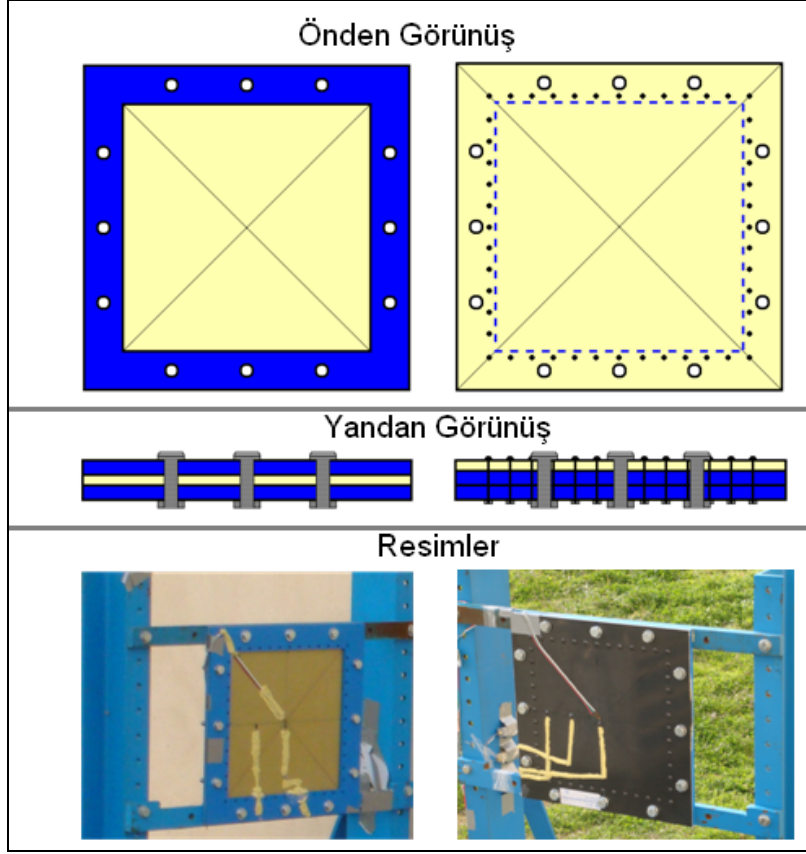
Üretilen kompozit plakların ölçülen ağırlık ve kalınlık değerlerinin, kısım 3.7 de yer alan Çizelge 3.14'e göre hesaplanan değerlerle karşılaştırması Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.4 : Plakların ölçülen ve hesaplanan ağırlık ve kalınlıklarının karşılaştırılması.

Boyut		Ölçülen	Hesaplanan	% Fark
300 mm x 300 mm	Ağırlık (gr)	509.4	500.8	1.7
	Ortalama Kalınlık (mm)	2.54	2.62	-3.3
400 mm x 300 mm	Ağırlık (gr)	699.8	667.7	4.6
	Ortalama Kalınlık (mm)	2.68	2.62	2.3
400 mm x 200 mm	Ağırlık (gr)	448.8	445.2	0.8
	Ortalama Kalınlık (mm)	2.71	2.62	3.2

5.2.1 Kompozit plakların bağlantı şekilleri

Deney düzeneğinin tasarım aşamasında kompozit plakların, çerçevelere 2 farklı bağlantı tipi ile bağlanması öngörülmüştür. Birinci bağlantı tipinde plağın iki adet 6 cm'lik çelik çerçeve arasına konularak M12 cıvatalar ile Şekil 5.10'un sol tarafındaki gibi bağlanması planlanmıştır. İkinci bağlantı şeklinde ise kompozit plağın iki çelik çerçevenin üst kısmına hem M12 cıvata ile hem de bombe başlı M5 cıvata ile Şekil 5.10'un sağ tarafındaki gibi bağlanması planlanmıştır. 3 farklı boyuttaki plakları bağlamak için kullanılan cıvata sayıları Çizelge 5.5'de verilmiştir.

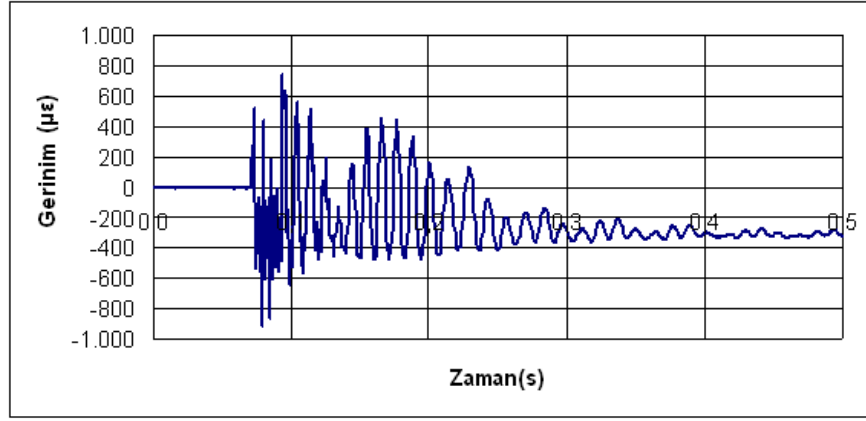


Şekil 5.10 : Plak bağlantı şekilleri.

Çizelge 5.5 : Plak bağlantılarında kullanılan cıvata sayıları.

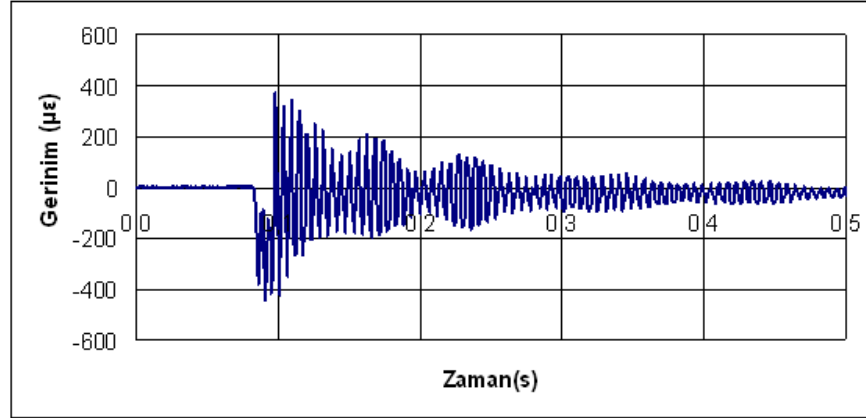
Etkin Plak Boyutu	Dış Çerçeve Boyutları	M12 Cıvata Sayısı	M5 Cıvata Sayısı
300 mm x 300 mm	404 mm x 404 mm	12	48
400 mm x 300 mm	504 mm x 404 mm	14	52
400 mm x 200 mm	504 mm x 304 mm	14	44

Birinci bağlantı tipi ile yapılan ilk deneylerde elde edilen gerinim değerlerinin, Şekil 5.11’de verildiği gibi sıfır etrafında salınım yapmak yerine, belirli bir gerinim etrafında salınım yaptığı görülmüştür. Buna sebep olarak, anlık basınç yükünün plak yüzeyine etkimesi sonucunda plağın bağlantı cıvatalarından kayarak yükün geldiği yönde belli bir deplasman yaptıktan sonra salınımlarını gerçekleştirdiği sonucu çıkartılmıştır. M12 bağlantı cıvatalarının daha fazla sıkılması da sonuçları değiştirmemiştir. Ayrıca bu bağlantı şeklinde, plağın orta noktasına etkiyen hava akımının plak üzerinden kenarlara kaçarken, çerçevenin iç kenarlarına çarptığı ve girdaplar oluşturduğu tahmin edilmektedir. Bu girdaplar neticesinde basınç sensörlerinin ölçtükleri değerlerde çok fazla çalkantıların olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.11 : Birinci bağlantı tipinde gerininin zamanla değişimine örnek.

İkinci bağlantı tipi ile yapılan deneylerde elde edilen gerinim değerlerinin Şekil 5.12 de görüldüğü gibi sıfır etrafında salınım gösterdiği ve basınç sensörlerinin ölçtükleri değerlerdeki salınımların azaldığı gözlenmiştir. Bu nedenle ikinci bağlantı tipinin ankastre sınır koşulları açısından daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Bundan sonra yapılacak olan bütün anlık basınç yükü deneylerinde ikinci tip bağlantının kullanılmasına karar verilmiştir.

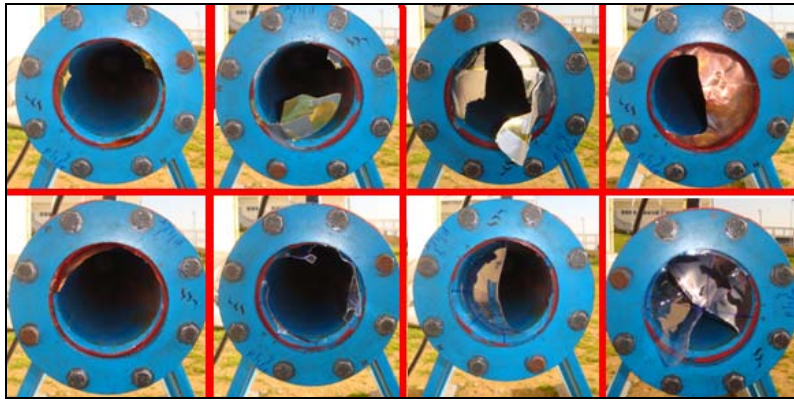


Şekil 5.12 : İkinci bağlantı tipinde gerininin zamanla değişimine örnek.

5.3 Membranlar

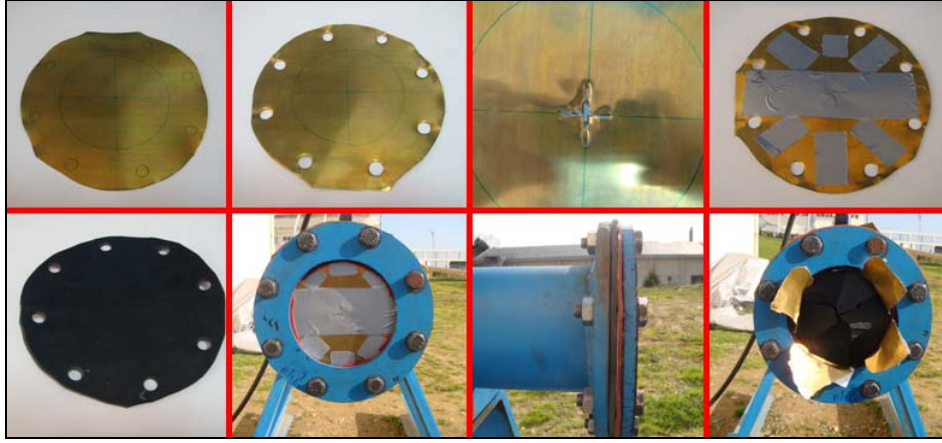
Anlık basınç yükü deneylerinin en önemli kısımlarından biri de, şok tüpünün ağız kısmında bulunan membrandır. Şok tüpünün içerisinde yeterli basınç olduğu anda membran yırtılarak anlık basınç yükünün plak üzerine etkimesini sağlamaktadır. Yırtılma sırasında membrandan herhangi bir parçanın koparak plak yüzeyine çarpması durumunda, plak üzerinde bulunan basınç sensörlerinin ve gerinim ölçerlerin zarar görmesi ve alınan verilerin anlık basınç yükü dışındaki etkileri de içermesi söz konusudur. Bu nedenle membranın yırtılması sırasında, herhangi bir

parçanın kopmaması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, plak yüzeyinde düzgün bir anlık basınç yükü dağılımının elde edilebilmesi için, membranın orta noktasından itibaren yaprak şeklinde açılması gerekmektedir. Bu nedenle, kompozit plak ve veri toplama sistemi kullanılmadan, sadece membranların istenildiği şekilde yırtılması için 40'ın üzerinde deney yapılmıştır. Bu deneyler sırasında farklı kalınlıklarda pirinç, bakır, kauçuk lastik ve polikarbon membranlar kullanılmıştır. Bu membranlara birçok farklı zayıflatma yöntemi uygulanarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin büyük bir bölümünde Şekil 5.13'de gösterildiği gibi, düzgün bir yırtılma elde edilememiştir.



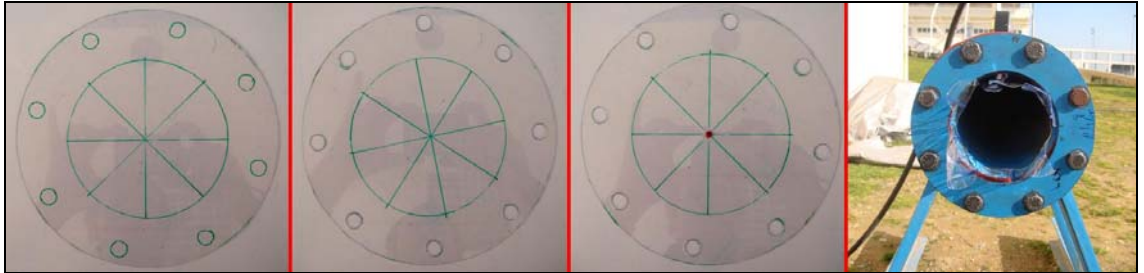
Şekil 5.13 : Düzgün şekilde yırtılma göstermeyen membranlar.

Yapılan deneyler sonucunda istenildiği gibi yırtılma sağlayan 2 farklı membran malzemesi ve zayıflatma yöntemi bulunmuştur. Bunlardan birinci yöntem şu şekildedir; 0.20 mm ve 0.25 mm kalınlığındaki pirinç levhaların orta noktaları, uzunluğu 20 mm civarında olan bir artı (+) şeklinde kesilmektedir. Kesilen kısmın üzerine 3 kat duck bant çekilmekte ve iyice yapıştırılmaktadır. Daha sonra membranın kenar kısımları yine duck bant yardımıyla güçlendirilmektedir. Bu şekilde hazırlanan membran, şok tüpünün ağız kısmına membranla aynı büyüklükte kesilmiş olan kauçuk lastikle birlikte bağlanmaktadır. Ayrıca hava sızıntısını önlemek için diğer tarafa kauçuk conta kullanılmaktadır. Pirinç membranın hazırlanma aşamaları ve bağlantı resimleri Şekil 5.14'de gösterilmiştir. Kauçuk lastiğin, basıncın etkisi ile birlikte yırtılabilmesi için çok fazla esnemesi gerekmektedir. Bu esneme sırasında, ön tarafında bulunan pirinç membranı kesik olan noktalarından açarak kenarlara doğru itmekte ve istenilen yırtılma şeklinin oluşmasını sağlamaktadır. Bu şekilde hazırlanan membranların yırtılma basıncı 3 ila 5 bar arasında değişmektedir.



Şekil 5.14 : Pirinç membranların hazırlanması.

İkinci yöntem birinci yönteme göre daha basit olmakla birlikte yırtılma basıncının yüksek olması nedeniyle tüm deneyler sırasında kullanılamamaktadır. Bu yöntemde 0.75 mm kalınlığındaki polikarbon membran tam orta noktasından sivri bir cisim ile puntolanmaktadır. Hava sızıntısını önlemek için ön ve arkasına conta konularak şok tüpünün ağzına bağlanmaktadır. Hazırlanışı ve patlama sonucu şekli Şekil 5.15’de gösterilen polikarbon membranların yırtılma basınçları 7 ila 10 bar arasında değişmektedir.



Şekil 5.15 : Polikarbon membranların hazırlanması.

6. SAYISAL ANALİZLER VE SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde öncelikle anlık basınç yükü deneyleri sırasında basınç duyargalarından okunan basınç verileri kullanılarak, plaklar üzerinde oluşan basınç dağılımlarının konuma ve zamana bağlı matematiksel modelleri oluşturulmuştur. Daha sonra basınç dağılımı için oluşturulan matematiksel modeller ANSYS 11 sonlu elemanlar yazılımına girilerek metal katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plakların analizleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak ise ANSYS yazılımından zamana bağlı olarak elde edilen gerinim değerleri, deneysel olarak elde edilmiş veriler ile karşılaştırılmıştır.

6.1 Basınç Fonksiyonları

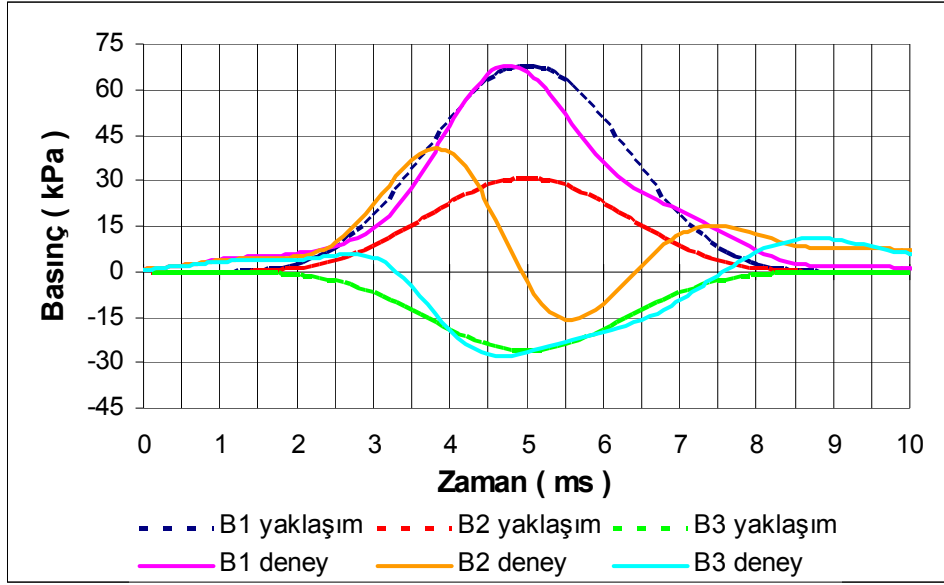
Anlık basınç yükü deneyleri sonucunda plak yüzeylerinde oluşan basınç dağılımları Şekil 5.7, 5.8 ve 5.9'da gösterilen B1, B2 ve B3 basınç duyargalarından zamana bağlı olarak Şekil 6.1, 6.2 ve 6.3'deki gibi ölçülmüştür. Membranın yırtılmasıyla birlikte anlık basınç yükü plağın orta noktasına etkimekte ve tepe noktasına ulaştıktan sonra sıfıra düşmektedir. Plağın orta noktasından kenarlara doğru uzaklaşılınca ise, anlık basınç yükü belli bir artım gösterdikten sonra, emme etkisi yaratmakta ve daha sonra sıfır değerine çıkmaktadır. Yapılan çalışmalar neticesinde ölçülen basınç yükleri için, Denklem 6.1'de verilen fonksiyon ile yaklaşımda bulunulmuştur. Deneyler sırasında sadece x doğrultusundaki basınçlar ölçüldüğü için, yaklaşım fonksiyonunda x ve y yönlerindeki basınç dağılımlarının simetrik olduğu kabulünde bulunulmuştur. Yaklaşım fonksiyonunda P_t tepe noktası basıncını, P_e kenar kısımlarda oluşan emme basıncı, t_e yükün etki ettiği süreyi ve a ile b'de plak boyutları ifade etmektedir. Fonksiyonda yer alan u, v, w ifadeleri ise basıncın konuma ve zamana bağlı olarak değişimini ayarlamak için kullanılan değişkenlerdir. Açıklık oranları farklı olan üç farklı plağın üzerlerine etki eden üç farklı basınç yükünü modellemek için kullanılan fonksiyon değişkenleri Çizelge 6.1'de belirtilmiştir.

$$P(x, y, t) = \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{t_e}\right) \right]^u \left\{ \frac{P_t + P_e}{2^u \cdot 2^v \cdot 2^w} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{a}\right) \right]^v \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi (y + (a-b)/2)}{a}\right) \right]^w - \frac{P_e}{2^u} \right\} \quad (6.1)$$

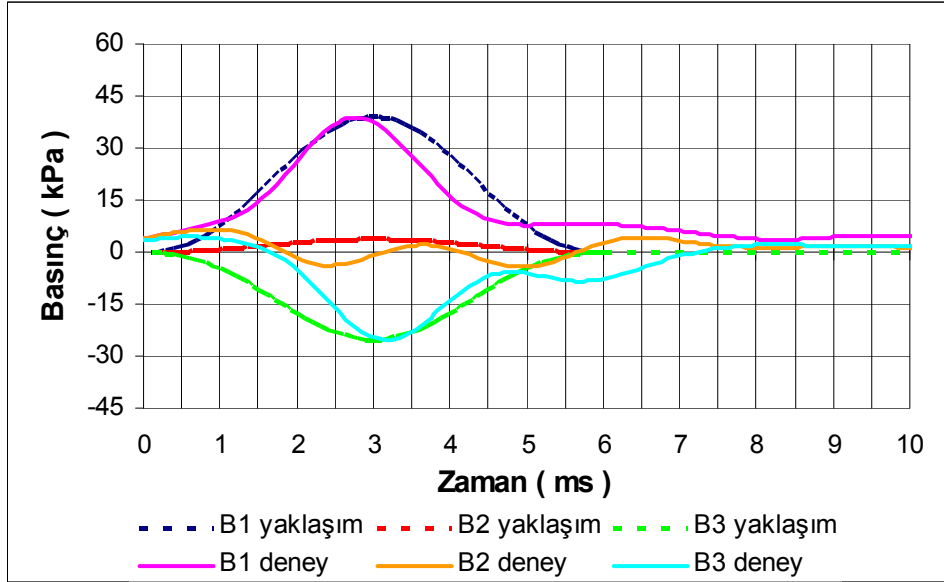
Çizelge 6.1 : Basınç fonksiyonları için kullanılan parametreler.

	Birimler	300 mm x 300 mm	400 mm x 300 mm	400 mm x 200 mm
a	m	0.3	0.4	0.4
b	m	0.3	0.3	0.2
t _e	s	0.010	0.006	0.009
u	-	3.1	1.2	6
v	-	0.5	1.1	3
w	-	0.5	1.1	3
P _t	Pa	68000	39000	93000
P _e	Pa	59000	27000	29000

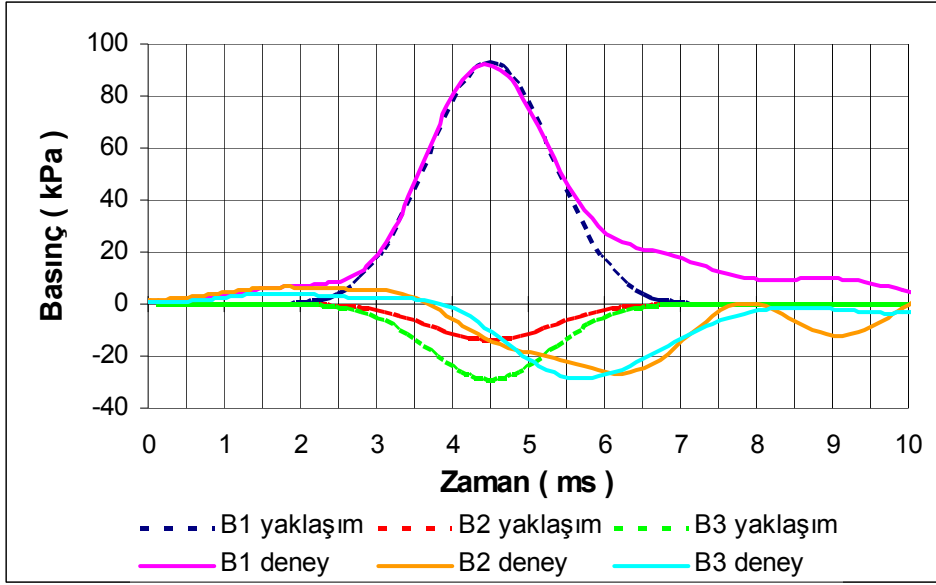
Çizelgede yer alan değişkenler belirlenirken, öncelikle plakların orta noktalarında bulunan B1 basınç duyargalarının okuduğu maksimum basınç değerleri ve B3 kenar basınç duyargalarının okuduğu maksimum emme değerleri göz önünde bulundurulmuştur. Daha sonra basıncın modellenebileceği maksimum süre belirlenmiştir. Son olarak, genel davranışa uygun ve B1 ile B3 basınç duyargalarının arasında yer alan B2 basınç duyargasından ölçülen basınç değerlerini en yakın şekilde sağlayan u, v, w parametreleri belirlenmiştir. Çizelge 6.1’de verilen değerler kullanılarak 3 farklı yük dağılımı için elde edilen matematiksel yük modellerinin basınç duyargalarından ölçülen basınç verileri ile kıyaslanması sırasıyla 300 mm x 300 mm boyutlarındaki plak için Şekil 6.1’de, 400 mm x 300 mm boyutlarındaki plak için Şekil 6.2’de ve 400 mm x 200 mm boyutlarındaki plak için Şekil 6.3’de verilmiştir.



Şekil 6.1 : 300 mm x 300 mm plak için deneysel ve matematiksel baskınç dağılımı.

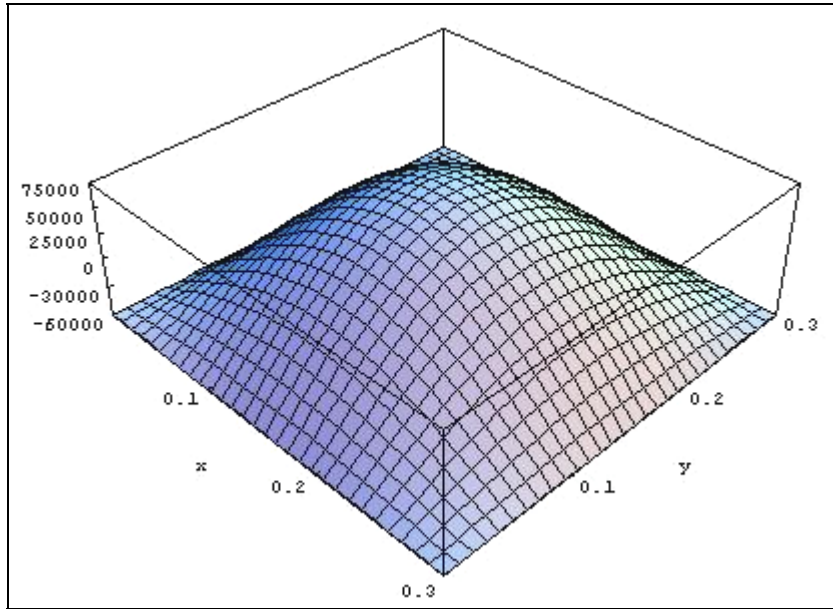


Şekil 6.2 : 400 mm x 300 mm plak için deneysel ve matematiksel baskınç dağılımı.

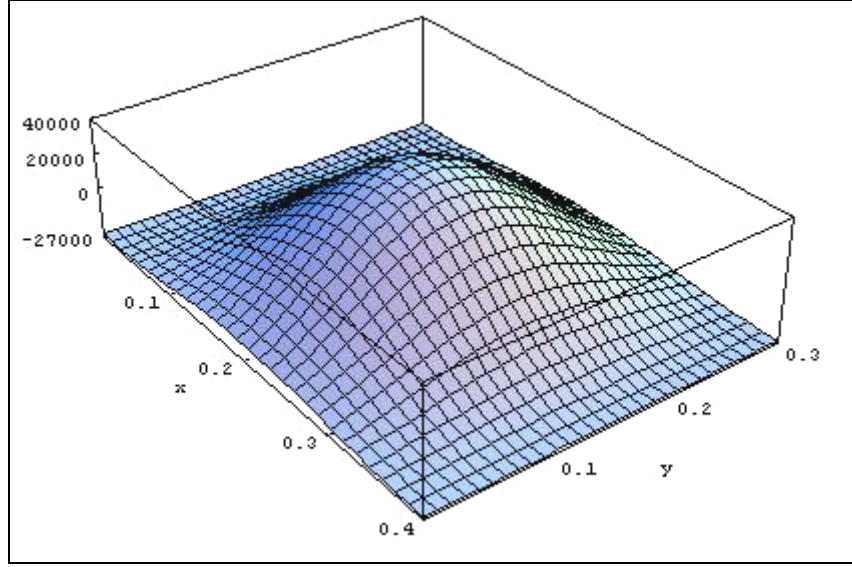


Şekil 6.3 : 400 mm x 200 mm plak için deneysel ve matematiksel basınç dağılımı.

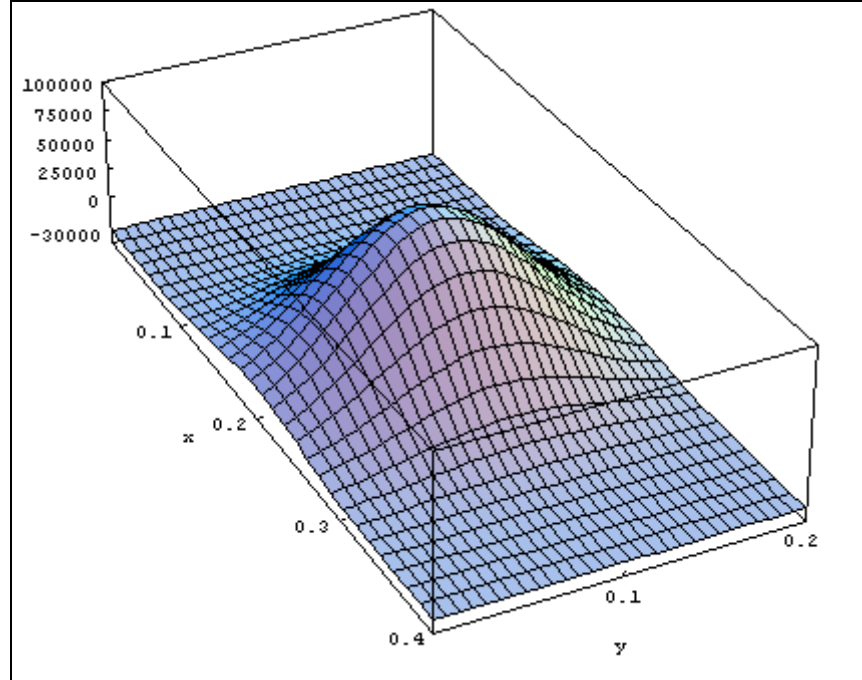
Ayrıca, basınç fonksiyonları kullanılarak basıncın etki ettiği sürenin tam ortasında plak yüzeyinde oluşan basınç yüklerinin 3 boyutlu görüntüleri sırasıyla 300 mm x 300 mm boyutlarındaki plak için Şekil 6.4'de, 400 mm x 300 mm boyutlarındaki plak için Şekil 6.5'de ve 400 mm x 200 mm boyutlarındaki plak için Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.4 : $t = 0.005$ anında 300 mm x 300 mm boyutlarındaki plak üzerinde oluşan basınç dağılımı.



Şekil 6.5 : $t = 0.003$ anında 400 mm x 300 mm boyutlarındaki plak üzerinde oluşan basınç dağılımı.



Şekil 6.6 : $t = 0.0045$ anında 400 mm x 200 mm boyutlarındaki plak üzerinde oluşan basınç dağılımı.

6.2 Sayısal Analizler

Üç farklı açık oranına sahip plak için yapılan analizlerde kısım 4.3’de anlatılan Shell 91 elemanı kullanılmıştır. Farklı açıklık oranlarına sahip plaklar için kullanılan eleman ve düğüm noktası sayıları Çizelge 6.2’de verilmiştir. Plaklar kenarlarından ankastre olarak mesnetlenmişler ve üzerlerine kısım 6.1’de anlatılan yük fonksiyonları ayrı ayrı uygulanmıştır. Yapılan ilk analizlerde plak orta noktasına oluşan yer

değiştirmelerin plak kalınlığı mertebelerinde çıkması sebebiyle analizlerin hepsi büyük deformasyon teorisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler sırasında zaman integrasyonu için Newton Rapson yöntemi tercih edilmiş ve her bir analiz için plakların ikinci doğal frekansları göz önünde bulundurularak farklı zaman adımları belirlenmiştir.

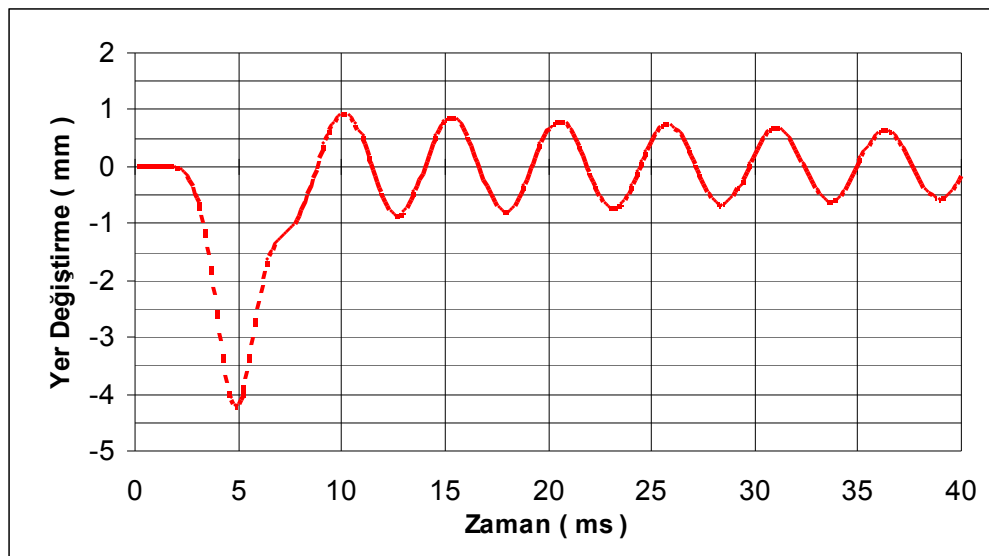
Çizelge 6.2 : Plaklar için kullanılan çözüm ağları.

Plak Boyutu	Açıklık Oranı	Kullanılan Çözüm Ağı	Toplam Eleman Sayısı	Toplam Düğüm Noktası Sayısı
300 mm x 300 mm	1.0	20 x 20	400	1281
400 mm x 300 mm	1.3	30 x 20	600	1901
400 mm x 200 mm	2.0	30 x 14	420	1335

6.3 Sonuçların Karşılaştırılması

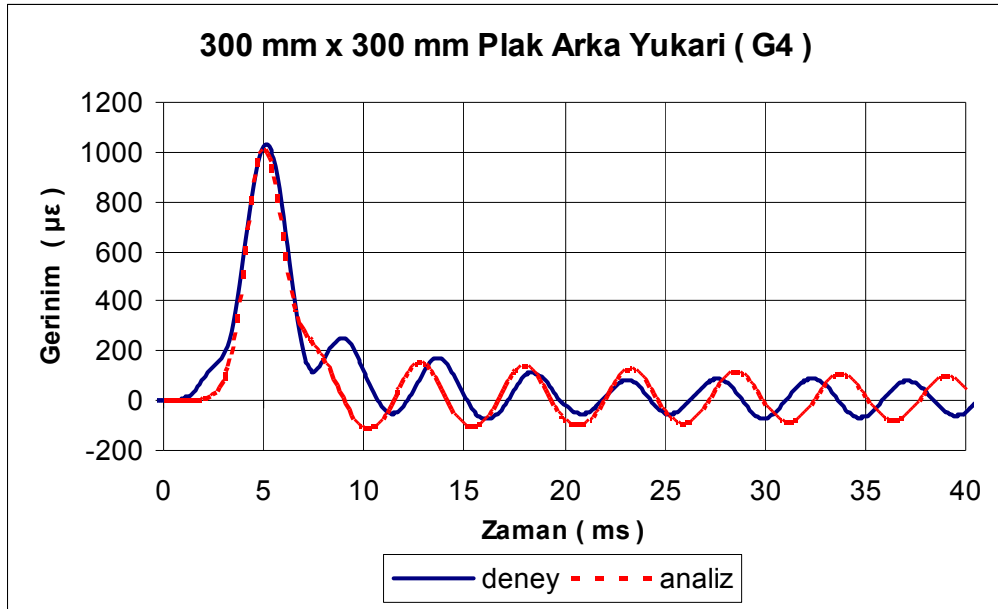
6.3.1 300 mm x 300 mm’lik plak

300 mm x 300 mm boyutlarındaki pirinç katman içeren hibrit katmanlı kompozit kare plağın Şekil 6.1’de verilen anlık basınç yükü altındaki dinamik davranışı için yapılan analizlerde plağın ikinci doğal frekansı olan 385.1 Hz dikkate alınarak zaman adımı 0.13 ms olarak belirlenmiştir. Ayrıca analizler sırasında Rayleigh’in viskoz sönüm parametreleri olan α kütle matris çarpanı 2, β katılık matris çarpanı da 2×10^{-5} olarak kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, plak orta noktasının zamanla olan yer değiştirmesi Şekil 6.7’deki gibi elde edilmiştir. Oluşan 4.22 mm’lik maksimum yer değiştirme, plak kalınlığının 1.61 katıdır.

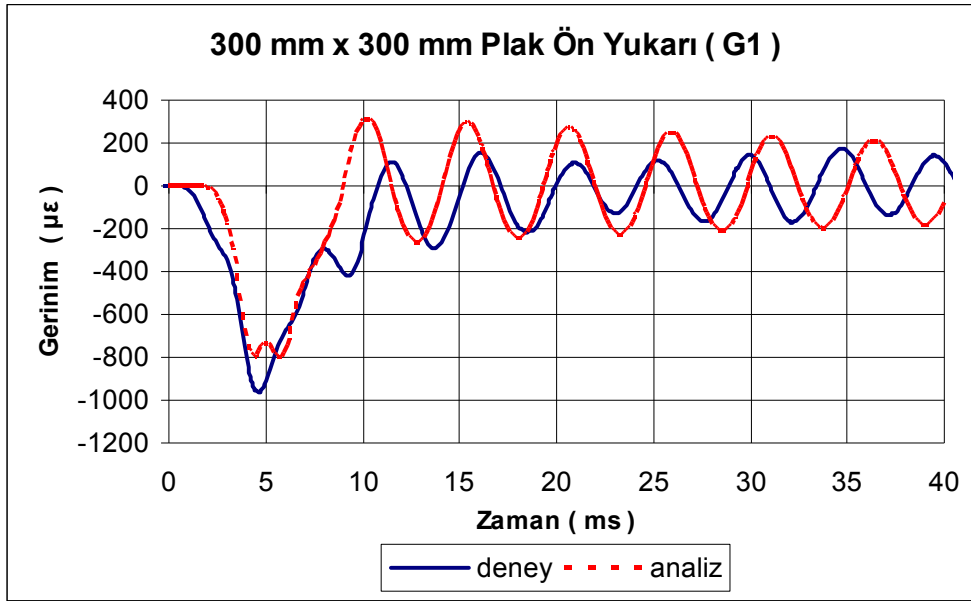


Şekil 6.7 : 300 mm x 300 mm plak için orta nokta yer değiştirmesi.

Deney sonucunda plağın orta hattında, merkezden 7.5 cm uzakta bulunan Şekil 6.1’de verilen B2 basınç duyargasından ölçülen basınç değerlerine basınç yaklaşım fonksiyonu ile çok iyi bir yaklaşımda bulunulamamasına karşın, plak arka yüzeyindeki maksimum gerinim değeri olan ve Şekil 6.8’de verilen $1030 \mu\epsilon$ ’e %1.9 farkla yaklaşılmıştır. Şekil 6.9’da verilen plak ön yüzey geriniminin, maksimum değerine çıkışı ve inişi düzgün bir şekilde elde edilmesine rağmen maksimum gerinim değeri olan $-963 \mu\epsilon$ ’e ancak %17 farkla yaklaşılabilmektedir. Plağın deneysel olarak ölçülmüş olan serbest titreşim frekanslarıyla analizler neticesinde elde edilen frekanslar arasında bir miktar faz farkı gözlenmiş olsa da, titreşim karakteristiği bakımından sonuçlar birbirleriyle uyumludur.



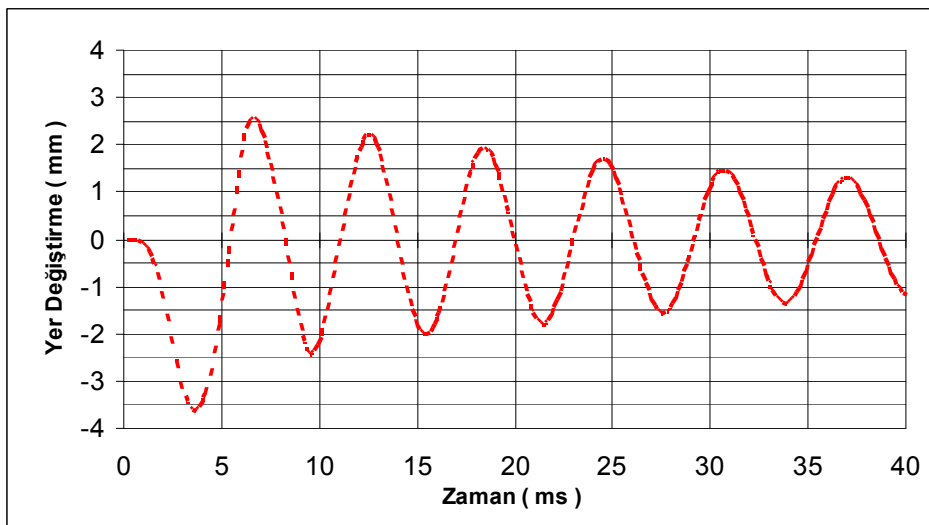
Şekil 6.8 : 300 mm x 300 mm boyutlarındaki plak için arka yüzeyin orta noktasının y-eksenindeki gerinimi.



Şekil 6.9 : 300 mm x 300 mm boyutlarındaki plak için ön yüzeyin orta noktasının y-eksenindeki gerinimi.

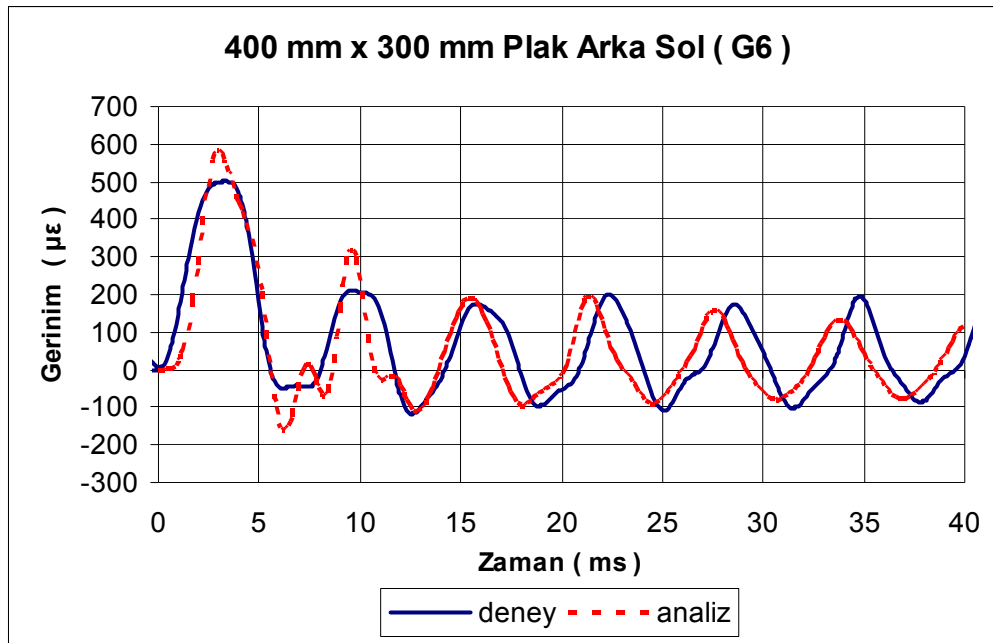
6.3.2 400 mm x 300 mm'lik plak

400 mm x 300 mm boyutlarındaki pirinç katman içeren hibrit katmanlı, açıklık oranı 1.33 olan, dikdörtgen plağın Şekil 6.2'de verilen anlık basınç yükü altındaki dinamik davranışı için yapılan analizlerde, plağın ikinci doğal frekansı olan 248.95 Hz dikkate alınarak zaman adımı 0.2 ms olarak belirlenmiştir. Ayrıca analizler sırasında Rayleigh'in viskoz sönüm parametreleri olan α kütle matris çarpanı 5, β katılık matris çarpanı da 4×10^{-5} olarak kullanılmıştır. Yapılan analizler neticesinde, plak orta noktasının yer değiştirmesi Şekil 6.10'daki gibi elde edilmiştir. Oluşan 3.66 mm'lik maksimum yer değiştirme, plak kalınlığının 1.39 katıdır.

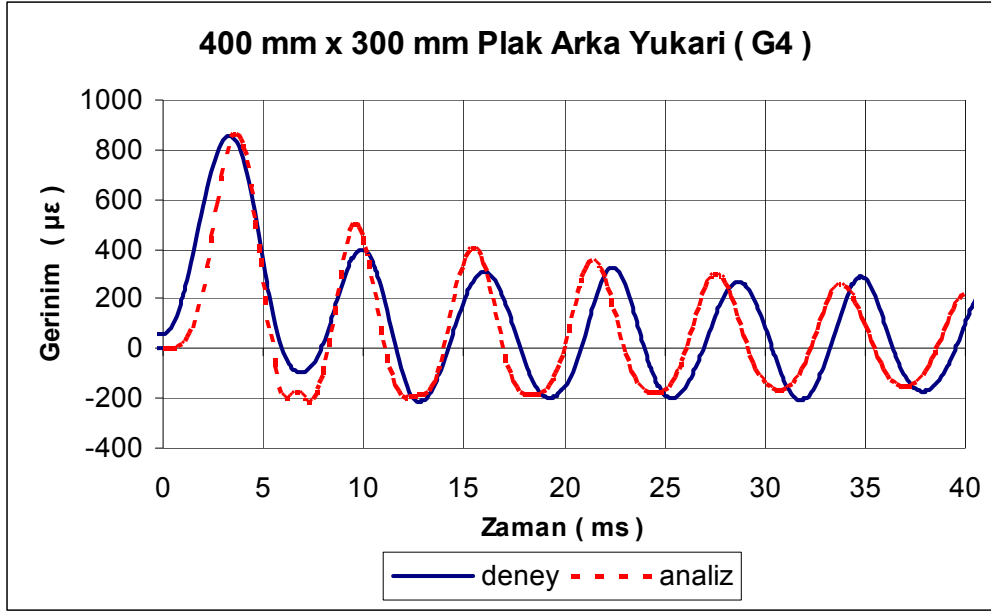


Şekil 6.10 : 400 mm x 300 mm plak için orta nokta yer değiştirmesi.

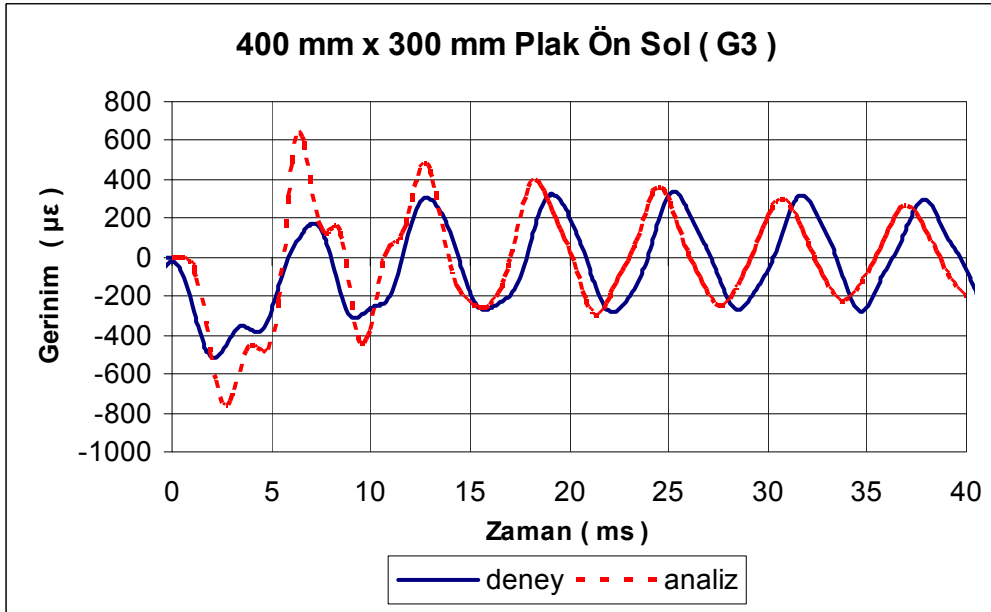
Plağın arka yüzeyinin orta noktasındaki x ve y yönlerindeki gerinimlerin deney ve analiz sonuçları Şekil 6.11 ve 6.12’de verilmiştir. Plağın uzun kenar doğrultusundaki maksimum gerinim değeri $501 \mu\epsilon$ ve kısa kenar doğrultusundaki maksimum gerinim ise $857 \mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Analizler sonucunda ise uzun kenar doğrultusundaki maksimum gerinim değeri %16.4 farkla $583 \mu\epsilon$, kısa kenar doğrultusundaki maksimum gerinim değeri ise %0.6 farkla $862 \mu\epsilon$ olarak hesaplanmıştır. Basıncın etki ettiği ön yüzeyin uzun kenar yönündeki maksimum gerinim değeri deneysel olarak $-516 \mu\epsilon$, analiz sonucu olaraksa $-767 \mu\epsilon$ olarak elde edilirken; kısa kenar yönündeki maksimum gerinim değeri, deneysel olarak $-1106 \mu\epsilon$, analiz sonucu olaraksa $-741 \mu\epsilon$ olarak elde edilmiştir. Plak ön yüzeyindeki gerinimlerin zamanla değişimi ise Şekil 6.13 ve 6.14’de verilmiştir. 400 mm x 300 mm boyutlarındaki plağın anlık basınç yükünün ortadan kalkmasının ardından yaptığı titreşim hareketleri ise, deney sonuçlarına benzer bir şekilde elde edilmiştir.



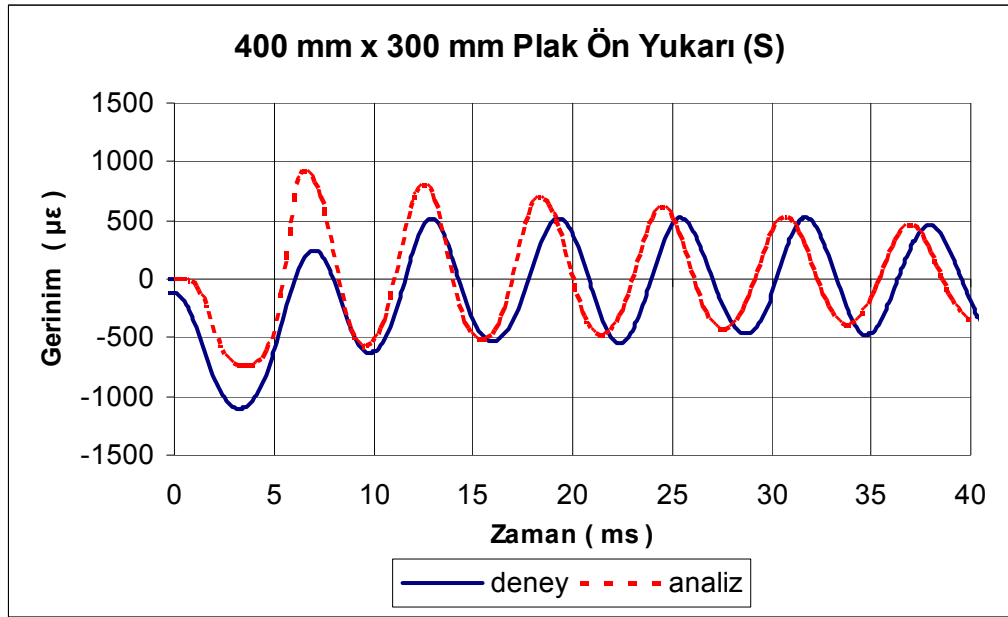
Şekil 6.11 : 400 mm x 300 mm boyutlarındaki plak için arka yüzeyin orta noktasının x-eksenindeki gerinimi.



Şekil 6.12 : 400 mm x 300 mm boyutlarındaki plak için arka yüzeyin orta noktasının y-eksenindeki gerinimi.

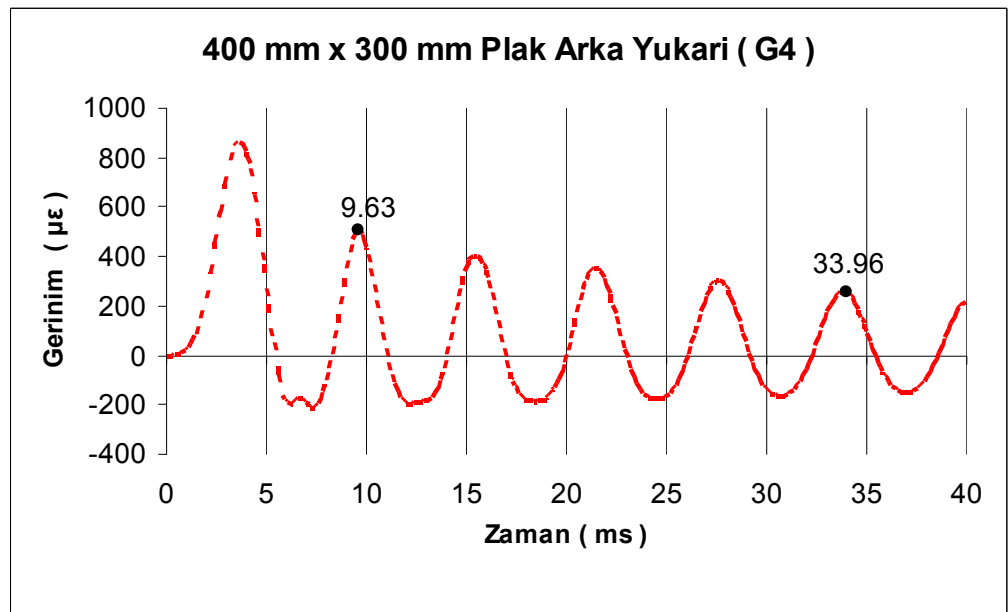


Şekil 6.13 : 400 mm x 300 mm boyutlarındaki plak için ön yüzeyin orta noktasının x-eksenindeki gerinimi.



Şekil 6.14 : 400 mm x 300 mm boyutlarındaki plak için ön yüzeyin orta noktasının y-eksenindeki gerinimi.

Ayrıca 400 mm x 300 mm boyutlarındaki plağın, analizler sonucunda arka tarafının y doğrultusundaki gerinim değerleri Şekil 6.15’deki gibi daha dikkatli bir şekilde incelendiğin de, gerinimlerin plağın 1. doğal frekansından daha yüksek bir frekansta titreşim gösterdiği görülmektedir. Bunun için, Şekil 6.15’te verilen gerinim değerlerinin 2. ve 6. tepe noktalarının zamanları okunup, bu sürede gerçekleşen çevrim sayısı olan 4’e bölerek bir çevrim periyodu ve titreşim frekansı Denklem 6.3 ve 6.4’deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 6.15 : Değişen titreşim frekanlarının hesaplanması.

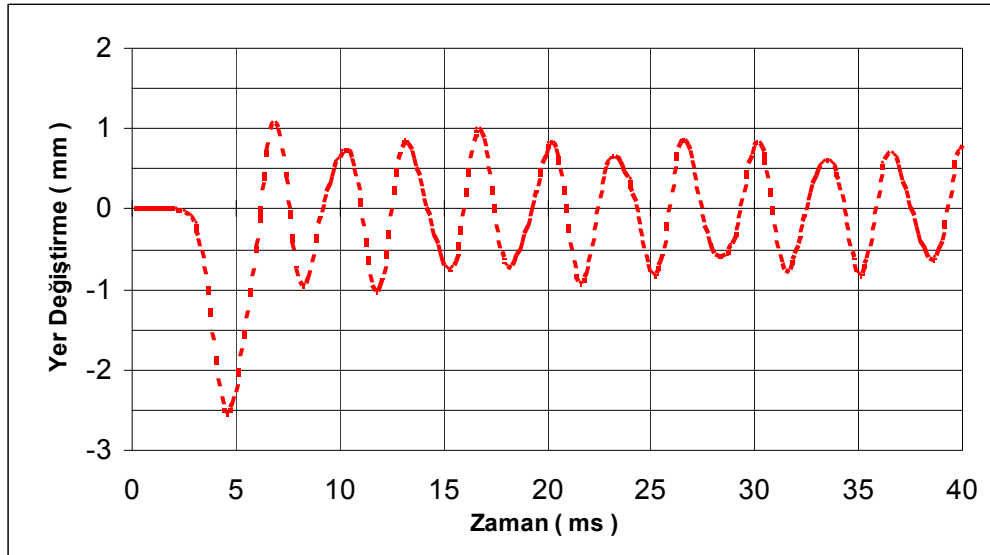
$$\tau = \frac{(33.96 - 9.63)}{4} = 6.0825ms \quad (6.2)$$

$$f = \frac{1}{0.0060825s} = 164.40Hz \quad (6.3)$$

400 mm x 300 mm boyutlarındaki metal katmanlı hibrit kompozit plağın EK B’de verilen modal analizlerde ise plağın birinci doğal frekansı 150.95 Hz olarak elde edilmişti. Geometrik nonlineerlikler ve düzlem içi katılık etkileri sebebiyle gerinim değerlerinin frekanslarında yaklaşık %10 oranında bir yükselme gözlenmiştir. Diğer plaklar için yapılan analizlerde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

6.3.3 400 mm x 200 mm’lik plak

400 mm x 200 mm boyutlarındaki pirinç katman içeren hibrit katmanlı, açıklık oranı 2 olan kompozit plağın Şekil 6.3’de verilen anlık basınç yükü altındaki dinamik davranışı için yapılan analizlerde plağın ikinci doğal frekansı olan 368.9 Hz dikkate alınarak zaman adımı 0.14 ms olarak belirlenmiştir. Ayrıca analizler sırasında Rayleigh’in viskoz sönüm parametreleri olan α kütle matris çarpanı 4, β katılık matris çarpanı da 3×10^{-6} olarak kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, plak orta noktasının zamanla olan yer değiştirmesi Şekil 6.16’daki gibi elde edilmiştir. Oluşan 2.55 mm’lik maksimum yer değiştirme, plak kalınlığının %97.3’ü kadardır.

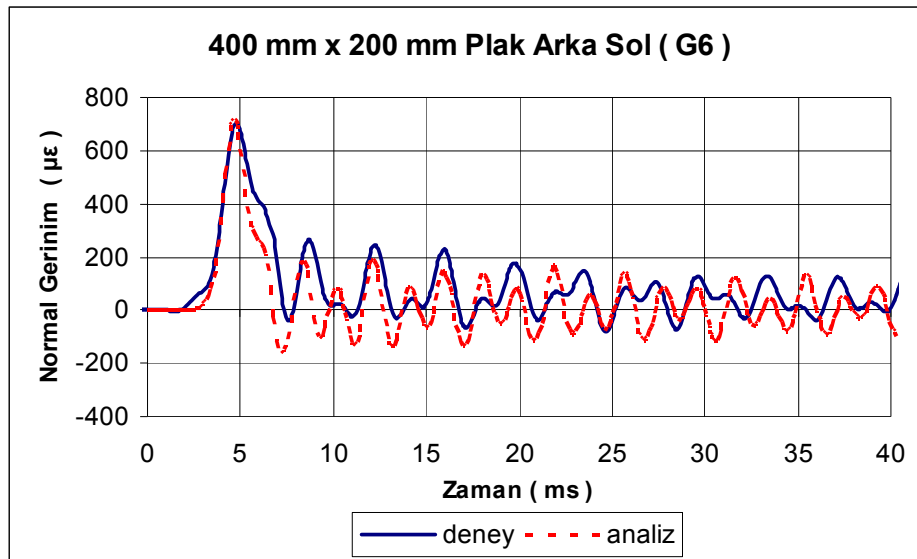


Şekil 6.16 : 400 mm x 200 mm plak için orta nokta yer değiştirmesi.

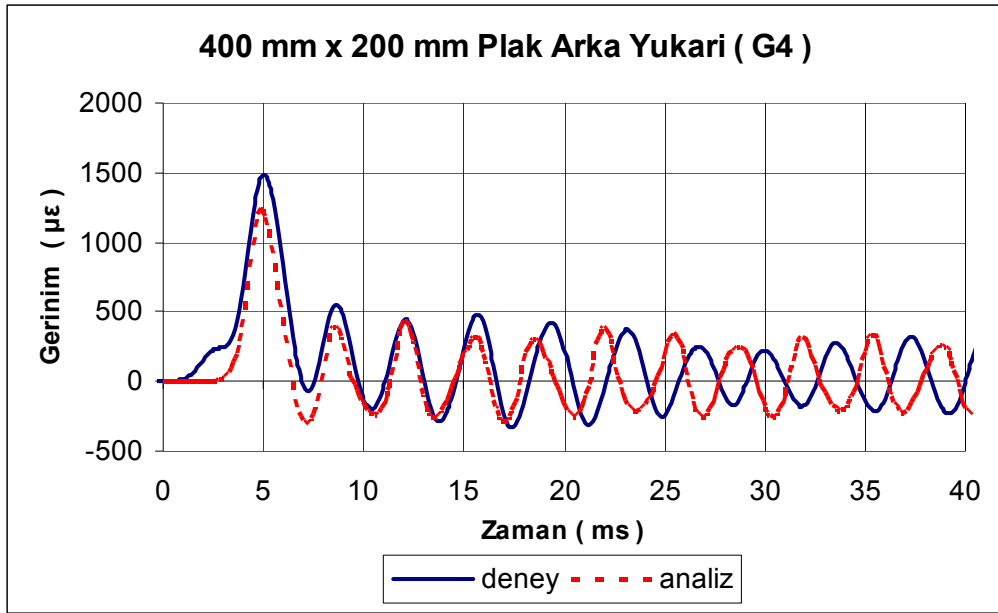
Plağın arka yüzeyinin orta noktasındaki x ve y yönlerindeki gerinimlerin deney ve analiz sonuçları Şekil 6.17 ve 6.18’de verilmiştir. Plağın uzun kenar doğrultusundaki

maksimum gerinim değeri $703 \mu\epsilon$ ve kısa kenar doğrultusundaki maksimum gerinim ise $1485 \mu\epsilon$ olarak ölçülmüştür. Analizler sonucunda ise uzun kenar doğrultusundaki maksimum gerinim değeri %1.4 farkla $712 \mu\epsilon$, kısa kenar doğrultusundaki maksimum gerinim değeri ise %16.4 farkla $1241 \mu\epsilon$ olarak hesaplanmıştır. Basıncın etki ettiği ön yüzeyin uzun kenar yönündeki maksimum gerinim değeri deneysel olarak $-499 \mu\epsilon$, analiz sonucu olarak $-1085 \mu\epsilon$ olarak elde edilirken; kısa kenar yönündeki maksimum gerinim değeri, deneysel olarak $-1983 \mu\epsilon$, analiz sonucu olarak $-1384 \mu\epsilon$ olarak elde edilmiştir. Plak ön yüzeyindeki gerinimlerin zamanla değişimi ise Şekil 6.19 ve 6.20’de verilmiştir.

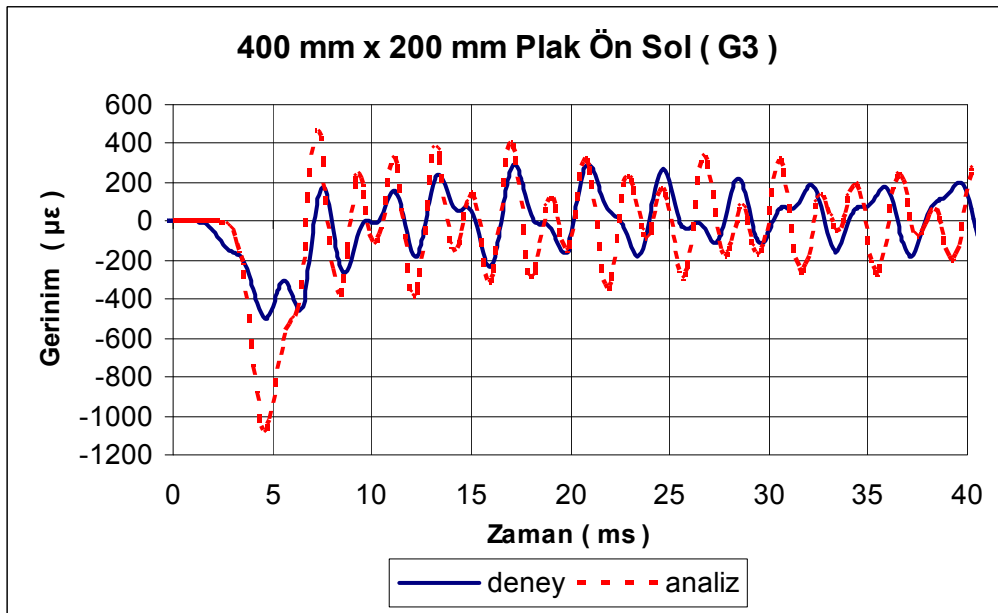
400 mm x 200 mm boyutlarındaki plağın anlık basınç yükünün ortadan kalkmasının ardından yaptığı serbest titreşim hareketlerinde, uzun kenar doğrultusundaki gerinimlerin diğer plaklardan farklı olarak birinci doğal frekans dışında başka bir frekanstan daha da etkilendiği gözlenmektedir. Bunun nedeni plak yüzeyine etki eden anlık basınç yükünün diğer plaklara etki eden basınç yüklerine göre daha yüksek olmasıdır. Gerinimleri etkileyen frekansın hangi moda ait olduğu bu kısmın sonunda tartışılacaktır. Analizler sonucunda elde edilen gerinim değerleri karakter olarak deneyler sonucunda elde edilen gerinim değerlerine özellikle ilk 20 ms süresince benzemekle birlikte, 20. ms’den sonra deney ve analiz sonuçları arasındaki frekans uyumsuzluğu giderek artmaktadır.



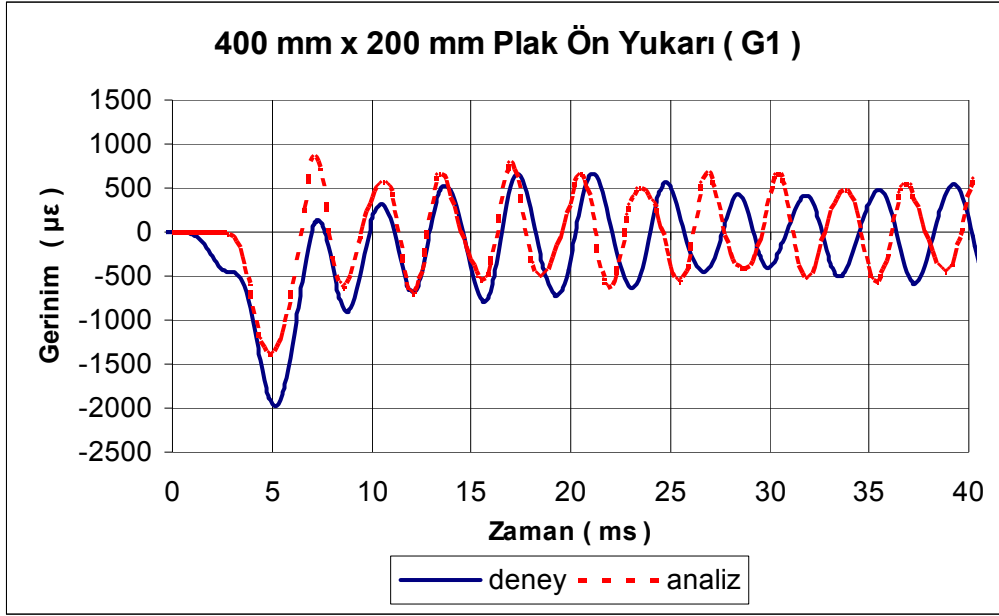
Şekil 6.17 : 400 mm x 200 mm boyutlarındaki plak için arka yüzeyin orta noktasının x-eksenindeki normal gerinimi.



Şekil 6.18 : 400 mm x 200 mm boyutlarındaki plak için arka yüzeyin orta noktasının y-eksenindeki normal gerinimi.

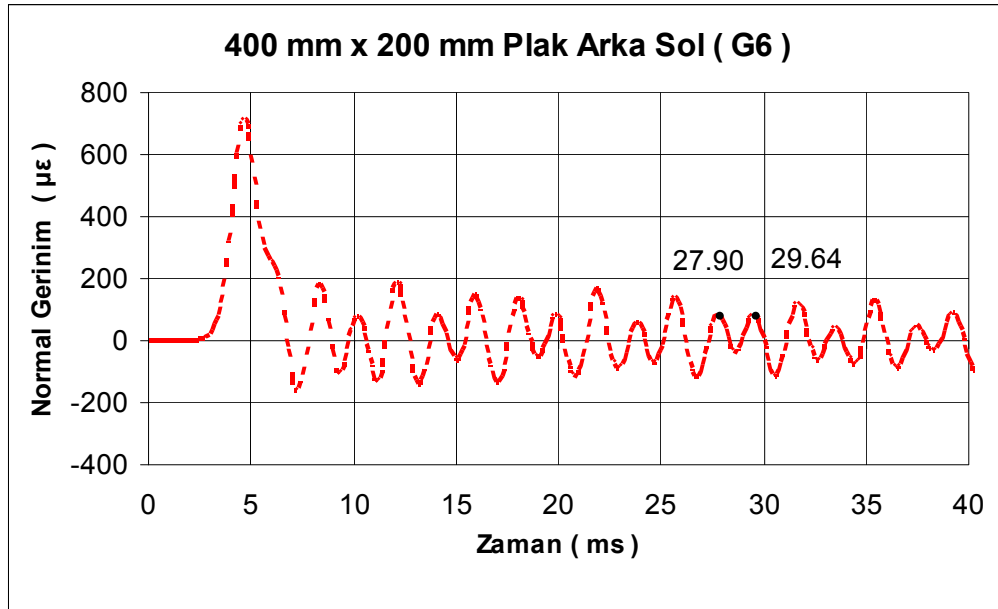


Şekil 6.19 : 400 mm x 200 mm boyutlarındaki plak için ön yüzeyin orta noktasının x-eksenindeki normal gerinimi.



Şekil 6.20 : 400 mm x 200 mm boyutlarındaki plak için ön yüzeyin orta noktasının y-eksenindeki normal gerinimi.

400 mm x 200 mm boyutlarındaki plağın, analizler sonucunda arka tarafının x doğrultusundaki gerinim değerleri Şekil 6.21’deki gibi daha dikkatli bir şekilde incelendiğin de, gerinimlere etki eden ikinci frekans Denklem 6.4 ve 6.5’deki gibi elde edilebilir.



Şekil 6.21 : Gerinim değerlerinde etkin olan ikinci modun belirlenmesi.

$$\tau = \frac{(29.64 - 27.90)}{1} = 1.74ms \quad (6.4)$$

$$f = \frac{1}{0.00174ms} = 574.71Hz \quad (6.5)$$

400 mm x 200 mm boyutlarındaki metal katmanlı hibrit kompozit plağın EK B’de verilen modal analizlerde 1.modun doğal frekansı 295.96, 2.modun doğal frekansı 368.89 ve 3.modun doğal frekansı 515.74 olarak hesaplanmıştır. Geometrik nonlinearlikler ve düzlem içi katılık etkileriyle doğal frekanların yükseldiği de göz önüne alındığında, gerinim değerlerinde etkin olan 2.frekansın, 3. moda ait olduğu net bir şekilde söylenebilir. İlk bakışta 1. moddan sonra 2. modun etkin olacağı görüşü hakim olsa da, yüklemenin ve plağın orta hat düzlemlerine göre simetrik olmasından dolayı titreşime sadece simetrik olan modlardan katkı gelmektedir. EK-B’ den de görüleceği üzere plağın 1. ve 3. modu simetrikken 2.ve 4. modu asimetriktir. Bu nedenle Şekil 6.21’de verilen gerinim-zaman grafiğinde etkin olan modalar 1. ve 3. modlardır.

7. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada 3 farklı açıklık oranlarına sahip metal katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü etkisi altındaki dinamik davranışları incelenmiştir.

Yapılan çalışmanın büyük bir bölümü kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin doğru bir şekilde saptanması ve kontrol edilmesi için harcanmıştır. Kompozit malzemelerle ilgili yapılacak diğer benzer çalışmalarda reçine/fiber oranı düzgün bir şekilde imalatçı firma tarafından ayarlanan prepreg malzemelerin kullanılmasının, gerek harcanan çaba gerekse verilerin doğruluğu açısından daha avantajlı olduğu düşünülmektedir. Çalışmanın önemli bir başka bölümü ise sağlıklı bir şekilde veri toplanabilmesi için cihazların kurulmasına, bağlantılarının yapılmasına ve programın yazılmasına harcanmıştır. Bu aşamada veri toplama cihazları için topraklama bağlantısının büyük önem taşıdığı öğrenilmiş ve paket programların firmalar tarafından yazılan diğer programlara göre daha güvenilir olduğu tecrübe edilmiştir. Bunların dışında, deney platformunun imal ettirilmesi ve membranların istenilen şekilde yırtılarak düzgün anlık basınç yükünü oluşturması için de büyük bir zaman ve çaba gösterilmiştir. Membranların yaprak şekilde açılabilmesi için, kauçuk lastiğin ön kısmına yerleştirilen zayıflatılmış pirinç membranların en iyi sonucu verdiği yapılan birçok deneme sonucunda belirlenmiştir. Kompozit plakların imalatı için vakum masasının kullanılması imalatı kolaylaştırırken, kesim için de CNC makinesinin kullanılması bağlantı deliklerinin hassas bir şekilde açılmasına olanak sağlamıştır.

Plakların imalatından sonra gerçekleştirilen anlık basınç yükü deneylerinde, plak yüzeyinde oluşan basınç yükü farklı konumlarda yer alan 3 farklı basınç duyargasından zamana bağlı olarak ölçülmüş ve matematiksel bir fonksiyon yardımıyla modellenmiştir. Bundan sonra yapılacak olan diğer çalışmalarda plak yüzeyindeki daha fazla noktadan basınç ölçümü alınmasının, anlık basınç yükünün davranışını daha iyi anlaşılması açısından faydalı olacağı fikrine varılmıştır. Bu

aşamada daha fazla noktadan basınç ölçümü alınması durumunda, basınç yükünün modellenmesi için daha karmaşık bir fonksiyona ihtiyaç duyulacağı da aşıkardır.

Farklı açıklık oranlarındaki plakların her biri için zamana ve konuma bağılı olarak değişen yük fonksiyonlarının belirlenmesinin ardından, belirlenen fonksiyonlar ANSYS 11.0 sonlu elemanlar yazılımına girilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda plakların ön ve arka yüzeylerinin tam orta noktalarında yatay ve dikey eksen doğrultusunda hesaplanan gerinim değerleri, deneysel olarak ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır. Plak arka yüzeyinde yer alan pirinç katmandan ölçülen maksimum gerinim değerleri ile analizler sonucunda elde edilen maksimum gerinim değerleri birbirlerine yakın bir şekilde elde edilmiştir. Cam elyafının bulunduğu ve basıncın etki etiği yüzeyden ölçülen gerinim değerleri ile analiz sonucunda elde edilen maksimum gerinim değerleri arasında ise bir miktar farklılık gözlenmiştir. Bu farklılığın, gerek gerinim ölçerlerin yapıştirıldığı kompozit yüzeylerinin kalitesinin çok iyi olmamasından, gerekse yüzeye etki eden yüksek basıncın gerinim ölçerlerin sağlıklı veri almasını engelliyor olabileceğinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, anlık basınç yükünün ortadan kalkmasının ardından deneysel olarak ölçülen titreşim frekansları ve genlikleri ile analizler sonucunda elde edilen değerler arasında bazı farklılıklar olsa da, titreşim karakteristikleri açısından oldukça benzer sonuçlar elde edilmiştir. Titreşim karakteristikleri, detaylı bir şekilde incelendiğinde ise geometrik nonlineerlikler ve düzlem içi katılık etkileri sebebiyle plakların doğal frekanslarından yaklaşık olarak %10 daha yüksek frekanslarda titreştiği saptanmıştır. Yüksek miktarlardaki anlık basınç yüklerinin plak yüzeylerine etkimesi durumunda plağın 1. doğal frekansı dışında başka frekanslarının da titreşimde etkin olduğu gözlenmiştir. Bu frekansların yüklemenin ve plağın, orta hat doğrultusundan geçen eksenlere göre simetrik olması durumu da sadece simetrik modlardan kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın devamı olarak metal katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü etkisi altındaki hasar mekanizmalarının ve enerji soğurabilirliklerinin hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmesinin, çalışmanın gelişmesi ve kompozit malzemeler hakkındaki bilinmezliklerin azaltılması açısından önemli adımlar olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Asundi, A., Choi, A.Y.N.**, 1997: Fiber Metal Laminates: An Advanced Material for Future Aircraft, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. **63**, pp. 384-394.
- [2] **Iaccarino, P., Langella, A., Caprino, G.**, 2007: A simplified model to predict the tensile and shear stress-strain behaviour of fiberglass/aluminium laminates, *Composites Science and Technology*, Vol. **67**, pp. 1784-1793.
- [3] **Librescu, L. ve Nosier, A.**, 1990: Response of laminated composite flat panels to boom and explosive blast loadings, *AIAA Journal*, Vol. **28**, pp. 345-352.
- [4] **Librescu, L., Oh, S.Y. ve Hohe, J.**, 2004: Linear and non-linear dynamic of sandwich panels to blast loading, *Composites: Part B*, Vol. **35**, pp. 673-683.
- [5] **Türkmen, H.S ve Mecitoğlu, Z.**, 1999: Nonlinear structural response of laminated composite plates subjected to blast loading, *AIAA Journal*, Vol **37**, pp. 1639-1647.
- [6] **Türkmen, H.S ve Mecitoğlu, Z.**, 1999: Dynamic response of stiffened laminated composite plate subjected to blast load, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **231**, pp. 371-389.
- [7] **Kazancı, Z., Mecitoğlu, Z.**, 2008: Nonlinear dynamic behavior of simply supported laminated composite plates subjected to blast load, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **317**, pp. 883-897.
- [8] **Jacinto, A.C., Ambrossini, R.D. and Danesi R.F.**, 2001: Experimental and computational analysis of plates under air blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **25**, pp. 927-947.
- [9] **Stoffel, M., Schmidt, R., Weichert, D.**, 2001: Shock wave-loaded plates, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. **38**, no. 42-43, pp. 7659-7680.
- [10] **Doğan, V.Z.**, 2008: Dynamic multimode response of composite plates to sonic boom and blast loadings. *Journal of Aircraft*, Vol. **45**, no. 2.
- [11] **Gong, M., Andreopoulos, Y.**, 2008: Shock wave impact on monolithic and composite material plates: The preferential aeroelastic response, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **313**, pp. 171-194.
- [12] **Veldman, R.L., Ari-Gur, J., Clum, C., A. DeYoung, Folkert, J.**, 2006: Effects of pre-pressurization on blast response of clamped aluminum plates, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **32**, no.10 pp. 1678-1695.

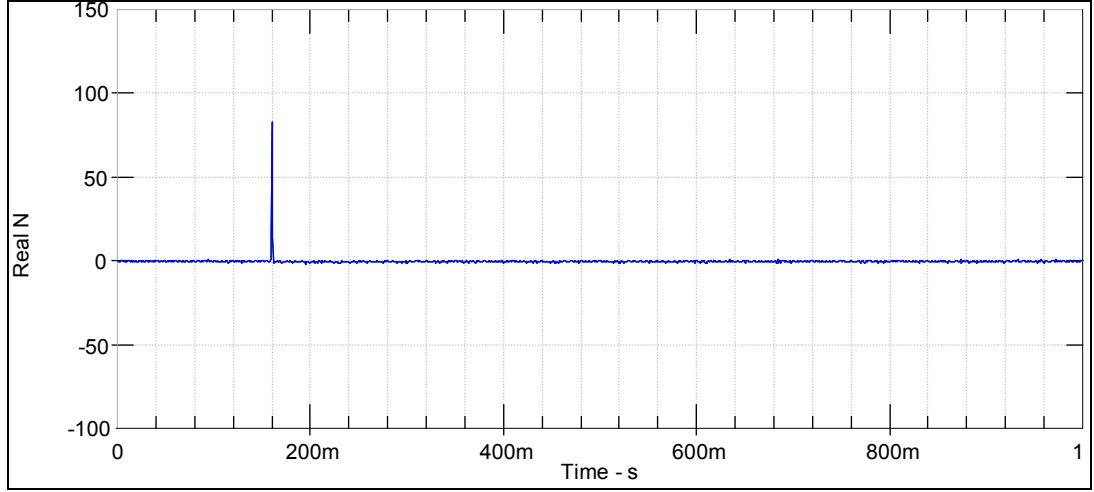
- [13] **Veldman, R.L., Ari-Gur, J., Clum, C.**, 2008: Response of pre-pressurized reinforced plates under blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **35**, no. 4, pp. 240-250.
- [14] **Batra, R.C., Hassan, N.M.**, 2007: Response of fiber reinforced composites to underwater explosive loads, *Composites Part B: Engineering*, Vol. **38**, no. 4, pp. 448-468.
- [15] **Batra, R.C., Hassan, N.M.**, 2008: Blast resistance of unidirectional fiber reinforced composites, *Composites Part B: Engineering*, Vol. **39**, no. 3, pp. 513-536.
- [16] **Yuen, S.C.K., Nurick, G.N.**, 2005: Experimental and numerical studies on the response of quadrangular plates. Part I: Subjected to uniform blast loads, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **31**, pp.55-83.
- [17] **Langdon, G.S., Yuen, S.C.K., Nurick, G.N.**, 2005: Experimental and numerical studies on the response of quadrangular plates. Part II: Localised blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **31**, pp. 85-111.
- [18] **Langdon, G.S., Cantwell, W.J., Nurick, G.N.**, 2005: The blast response of novel thermoplastic-based fibre-metal laminates – some preliminary results and observations, *Composites Science and Technology*, Vol. **65**, pp. 861-872.
- [19] **Langdon, G.S., Nurick, G.N., Cantwell, W.J.**, 2008: The response of fibre metal laminate panels subjected to uniformly distributed blast loading, *European Journal of Mechanics A/Solids*, Vol **27**, pp. 107-115.
- [20] **Langdon, G.S., Cantwell, W.J., Nurick, G.N.**, 2007: Localised blast loading of fibre-metal laminates with a polyamide matrix, *Composites Part B: Engineering*, Vol. **38**, pp. 902-913.
- [21] **Langdon, G.S., Lemanski, S.L., Nurick, G.N., Simmons, M.C., Cantwell, W.J., Schleyer, G.K.**, 2007: Behaviour of fibre-metal laminates subjected to localised blast loading : Part I – Experimental observations, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **34**, pp. 1202-1222.
- [22] **Lemanski, S.L., Nurick, G.N., Langdon, G.S., Simmons, M.C., Cantwell, W.J., Schleyer, G.K.**, 2007: Behaviour of fibre-metal laminates subjected to localised blast loading : Part II –Quantitative analysis, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. **34**, pp. 1223-1245.
- [23] **Lemanski, S.L., Nurick, G.N., Langdon, G.S., Simmons, M.C., Cantwell, W.J., Schleyer, G.K.**, 2006: Understanding the behaviour of fibre metal laminates subjected to localised blast loading, *Composite Structures*, Vol. **76**, pp. 82-87.
- [24] **Langdon, G.S., Nurick, G.N., Lemanski, S.L., Simmons, M.C., Cantwell, W.J., Schleyer, G.K.**, 2007: Failure characterisation of blast-loaded fibre-metal panels based on aluminium and glass-fibre reinforced polypropylene, *Composites Science and Technology*, Vol. **67**, pp. 1385-1405.

- [25] **Harras, B., Benamar, R., White G.R.**, 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**, pp. 281-315.
- [26] **Tkmen, H.S.**, 1997. Katmanlı kompozit panellerin anlık basınç yüküne dinamik cevabı, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [27] **Kazancı, Z.**, 2006. Anlık basınç yükü etkisi altındaki katmanlı kompozit bir plağın lineer olmayan dinamik davranışı, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü İstanbul.
- [28] **Yüksel, H.M.**, 2005. Anlık basınç yükü etkisi altında kompozit malzemeden yapılmış yarı küresel bir kabuk yapının dinamik davranışının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [29] **zdemirli, E.**, 2006. Anlık Basınç yükü etkisindeki kompozit sandaviç plağın dinamik davranışının deneysel ve sayısal incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [30] **oğuz, B.A.**, 2006. Katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü altında dinamik davranışlarının deneysel incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [31] **Baş, A.**, 2009. Hibrit katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü altındaki dinamik cevabı, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [32] **mercikoğlu, A.**, 2007. Bir Helikopter Palası Esnek Kirişinin Yorulma Testleri ve Analizi, *Lisans Bitirme Tezi*, İTÜ Uçak Uzak Bilimleri Fakültesi, İstanbul.
- [33] **Türkmen, H.S.**, 2007. Composite Materials Ders Notları, İTÜ Uçak Uzak Bilimleri Fakültesi, İstanbul.
- [34] **Arge Portalı**, Polimer esaslı kompozit malzemeler ve ürün tasarımında kullanımları <<http://www.argeportal.com/content/view/36/90/>>, alındığı tarih 20.02.2007.
- [35] **GM Composite**, Kompozitlerin Kullanılm Alanları, <http://www.gmcomposite.com/index.php?option=com_content&task=view&id62&Itemid=59>, alındığı tarih 20.02.2007.
- [36] **SP Systemes**, 2006. Guide to Composites.
- [37] **Onaran, K.**, 2000. Malzeme Bilimi, Bilim Teknik Yayınevi, 8. Baskı, İstanbul.
- [38] **Sevgi H.E.**, 2007 Bir Plağın Deneysel ve ANSYS Programı Yardımıyla İncelenmesi, *Lisans Bitirme Tezi*, İTÜ Uçak Uzak Bilimleri Fakültesi, İstanbul.
- [39] **MTS**, rn Kataloğ, <<http://www.mts.com/en/Material/index.asp>>, alındığı tarih 14.12.2008.
- [40] **VXI Technology**, EX1629 rn Kataloğ, <<http://www.vxitech.com/ProductDescription.aspx?PID=1163>>, alındığı tarih 14.12.2008.

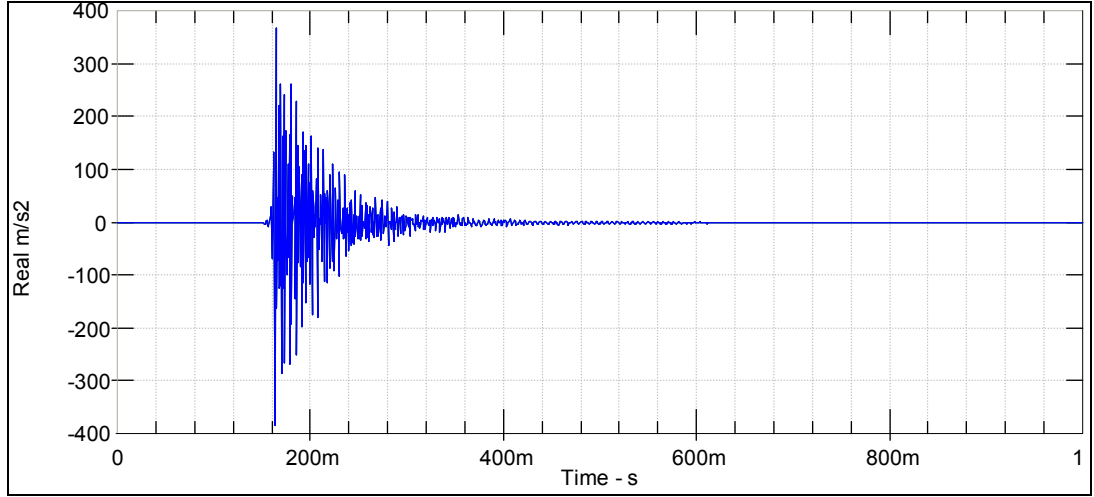
- [41] **VXI Technology**, DAC Express Data Acquisition/Recorder V 3.14, Yardım menüsü.
- [42] **Berthelot, J.M.**, 1999. Composite Materials, Springer, Verlag, New York.
- [43] **Heatcon Composite Systems**, 2008. HCS7500-06-321212 Ürün Kataloğu.
- [44] **The Japan Carbon Fiber Manufacturers Association** <<http://www.carbonfiber.gr.jp/english/tanso/06.html>> alındığı tarih 28.12.2008.
- [45] **Hexion Speciality**, 2008. Chemicals Laminating Resin MGS L285 Ürün Kataloğu.
- [46] **ASTM D 3039/D 3039M-07**, 2008. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, *American Society for Testing and Materials*, ABD.
- [47] **ASTM D 3518/D 3039M-94**, 2007. Standard Test Method for In Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of ± 45 Laminate, *American Society for Testing and Materials*, ABD.
- [48] **TAKSAN**, CNC makinası ürün kataloğu <<http://www.taksan.com/trtaksan/urunlerimiz/tmc500/tmc500teknikozellikler.htm>> alındığı tarih 03.1.2009.
- [49] **ASTM D 638-08**, 2007. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, *American Society for Testing and Materials*, ABD.
- [50] **ASTM E 8/E 8M -08**, 2008. Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials, *American Society for Testing and Materials*, ABD.
- [51] **Tokyo Sokki Kenkyujo**, Straingauge ürün kataloğu <<http://www.tml.jp/e/>> alındığı tarih 15.1.2009.
- [52] **ASTM E 1012-05**, 1999. Standard Practice for Verification of Test Frame and Specimen Alignment Under Tensile and Compressive Axial Force Application, *American Society for Testing and Materials*, ABD.
- [53] **Zweben, C., Smith, W.S., Wardle, M.W.**, 1979, Test methods for fiber tensile strength, composite flextural modulus, and properties of fabricreinforced laminates, Composite Materials: Testing and Design Conference.
- [54] **Kay, M.S., İbaçoğlu, H., Körük, H.**, 2008, Deneysel modal analiz sonuçlarının kullanılarak insansız helikopter palası sonlu eleman modelinin iyileştirilmesi, Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı.
- [55] **Şanlıtürk, K.Y.**, 2008. Data Acquisition and Signal Processing Ders Notları, İTÜ Makina Fakültesi, İstanbul.
- [56] **Release 11.0 Documentation for ANSYS**, Kısım 3.13.

EKLER

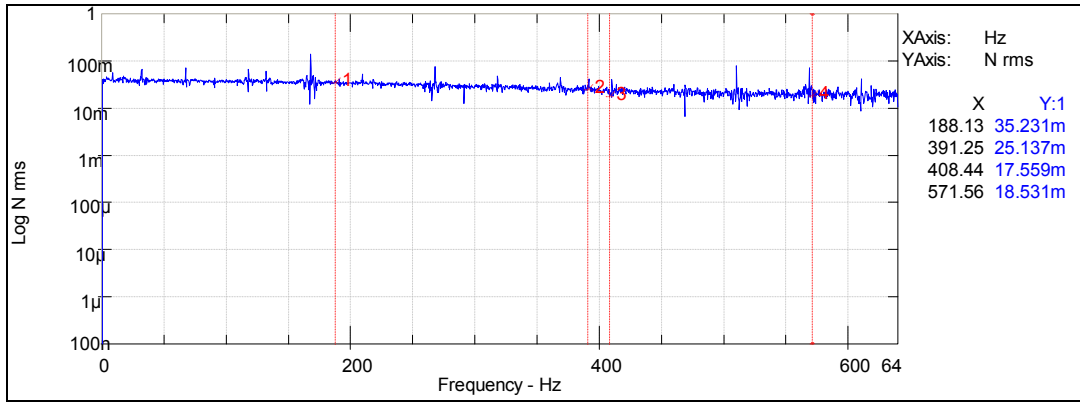
EK A: ELDE EDİLEN ÖRNEK ÇEKİÇ SETİ SONUÇLARI



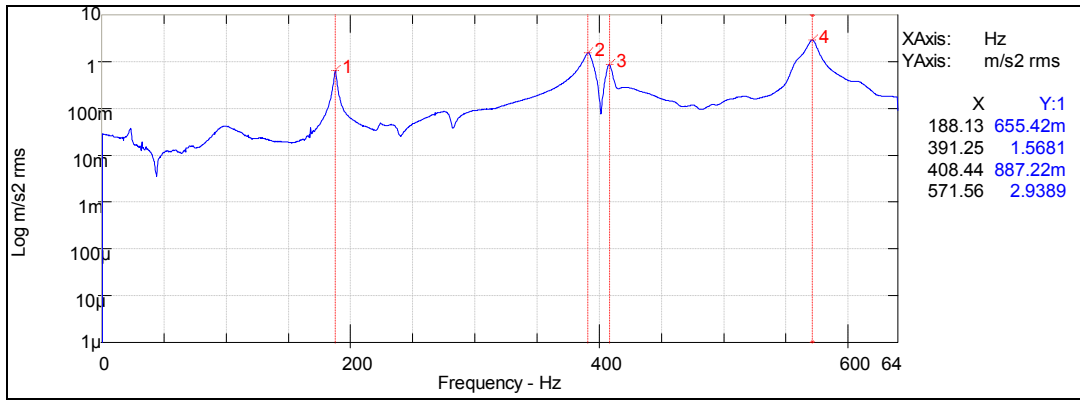
Şekil A.1 : Çekiçten okunan kuvvet verisinin zamanla değişimi.



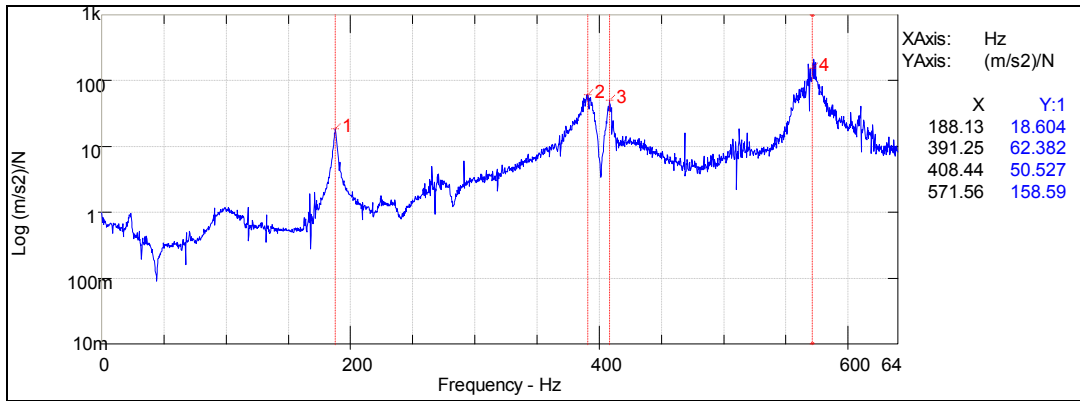
Şekil A.2 : İvme sensöründen okunan ivme verisinin zamanla değişimi.



Şekil A.3 : Kuvvet verisinin spekturum analizi.

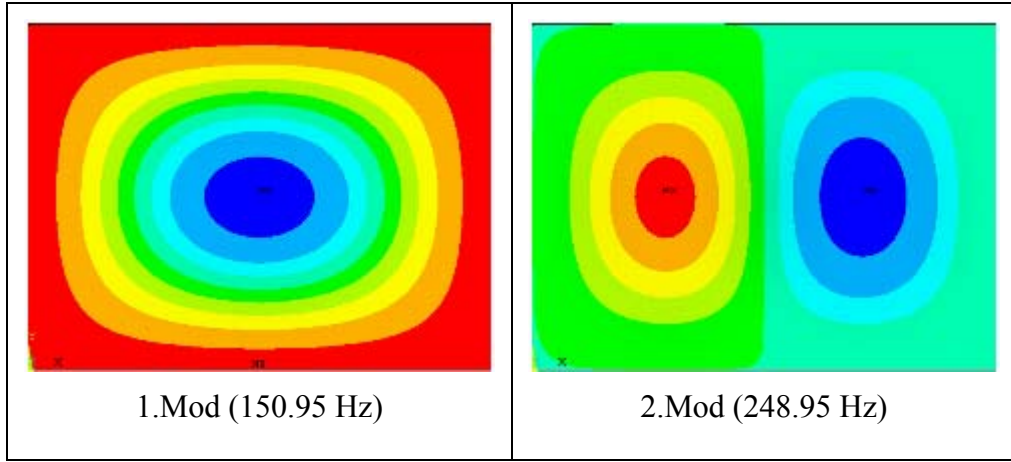


Şekil A.4 : İvme verisinin spekturum analizi.

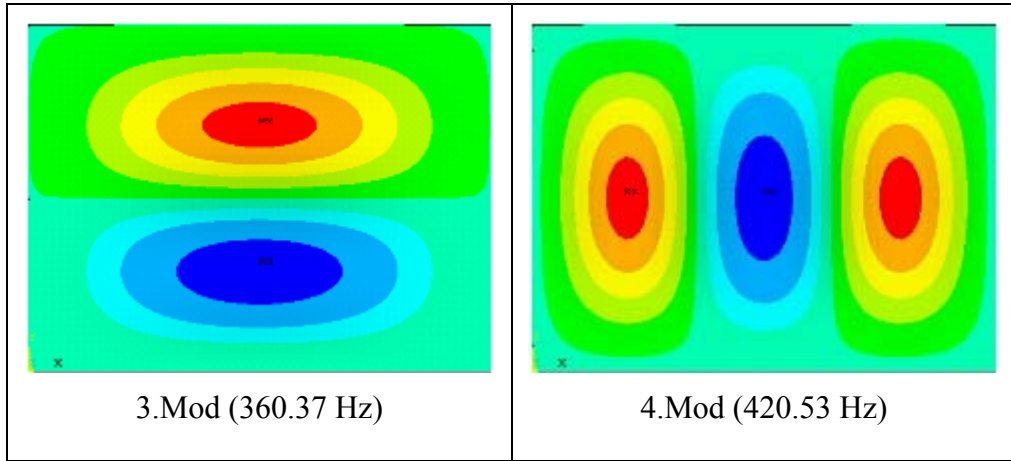


Şekil A.5 : Deney sonucunda elde edilen FTF.

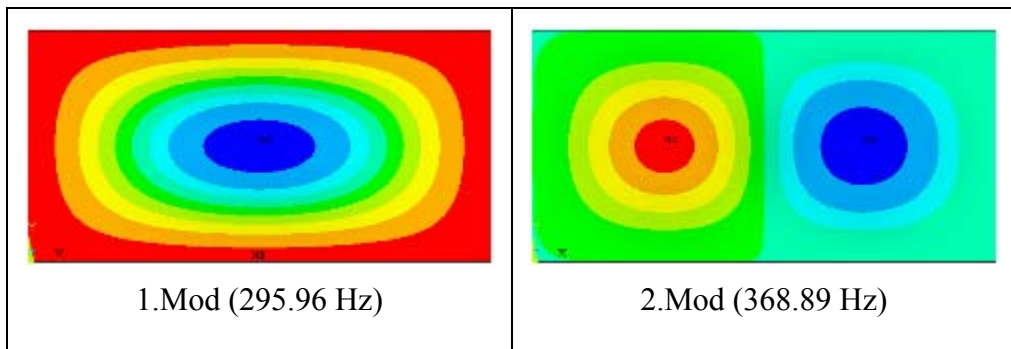
EK B: PLAKLARIN İLK 4 MOD ŞEKİLLERİ VE FREKANSLARI



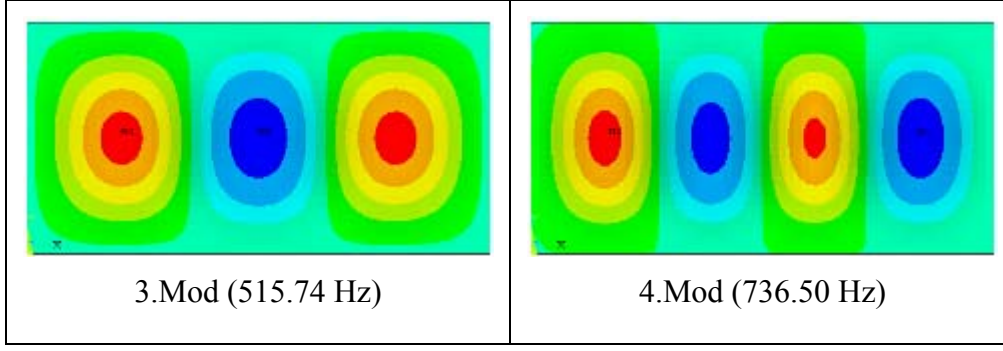
Şekil B.1 : 400 mm x 300 mm'lik plağın 1. ve 2. mod şekilleri ve frekansları.



Şekil B.2 : 400 mm x 300 mm'lik plağın 3. ve 4. mod şekilleri ve frekansları.

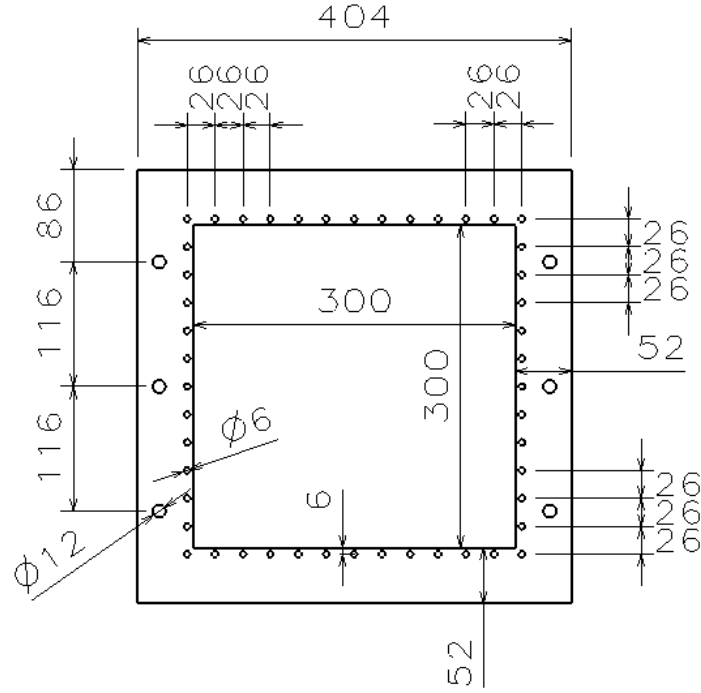


Şekil B.3 : 400 mm x 200 mm'lik plağın 1. ve 2. mod şekilleri ve frekansları.

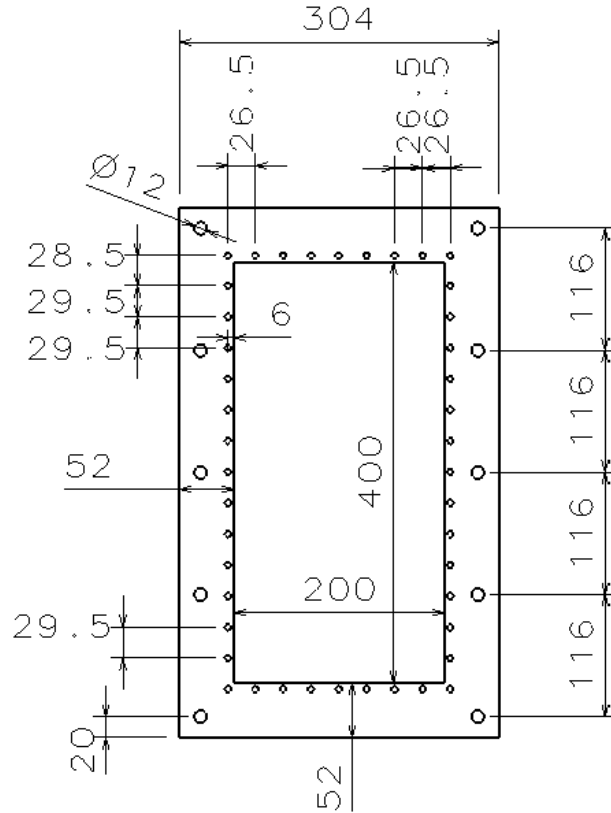


Şekil B.4 : 400 mm x 200 mm'lik plağın 3. ve 4. mod şekilleri ve frekansları.

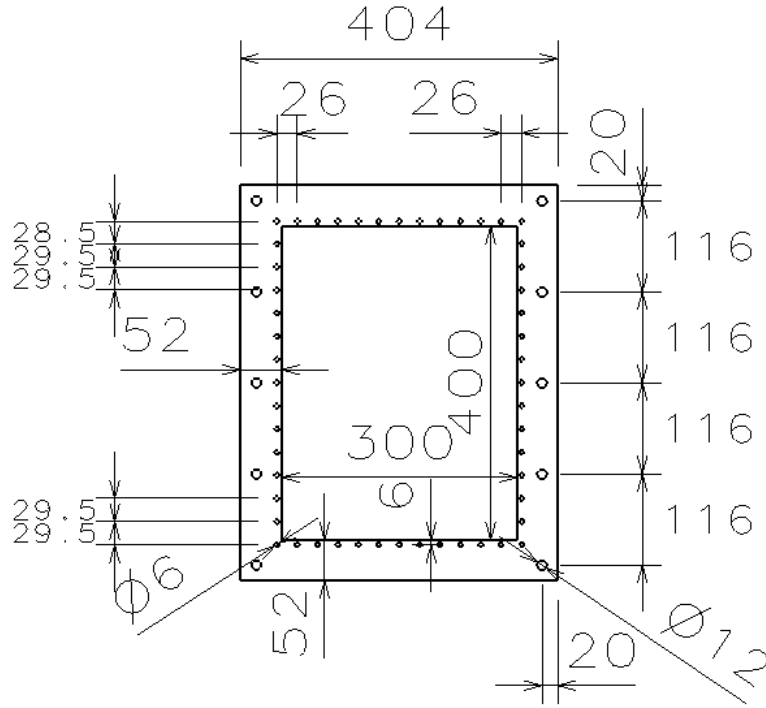
EK C: KOMPOZİT PLAKLARIN ÜSTTEN GÖRÜNÜŞLERİ



Şekil C.1 : Etkin plak boyu 300 mm x 300 mm olan plağın üstten görünüşü.



Şekil C.2 : Etkin plak boyu 400 mm x 200 mm olan plağın üstten görünüşü.



Şekil C.3 : Etkin plak boyu 400 mm x 300 mm olan plağın üstten görünüşü.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Akın Ömercikoğlu

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul, 1984

Adres: Bankacılar Sokak Gönül Dostları Sitesi

Mine Apt No: 33, 34734, Sahrayıcedit/ İSTANBUL

Lisans Üniversitesi:

İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak Mühendisliği Bölümü