

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ANLIK BASINÇ YÜKÜNE MARUZ İNCE CİDARLI TAKVİYELİ SANDVIÇ
KOMPOZİT PLAĞIN DİNAMİK DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bilgehan ÖZCAN

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

ARALIK 2016

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ANLIK BASINÇ YÜKÜNE MARUZ İNCE CİDARLI TAKVİYELİ SANDVIÇ
KOMPOZİT PLAĞIN DİNAMİK DAVRANIŞI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Bilgehan ÖZCAN
(511131154)**

Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı

Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Demet BALKAN

ARALIK 2016

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 511131154 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Bilgehan ÖZCAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ANLIK BASINÇ YÜKÜNE MARUZ İNCE CİDARLI TAKVİYELİ SANDVIÇ KOMPOZİT PLAĞIN DİNAMİK DAVRANIŞI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Demet BALKAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Zahit Mecitoğlu**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Özgür DEMİR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 14 Kasım 2016
Savunma Tarihi : 09 Aralık 2016





Aileme,



ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanışı sırasında hiçbir konuda desteğini benden esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç Dr. Demet Balkan'a, proje konusunda beni bilgilendirdiği için Uzay Mühendisi Yiğit Okur'a, her konuda bana yardımcı olan çalışma arkadaşım Ramazan Enis Ün'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Kompozit plakların üretimi sırasında yönlendirmeleri ve ayrıntılı açıklamaları için Araş. Gör. Yağmur Ateşcan'a da ayrıca teşekkür ederim.

114M404 numaralı proje kapsamında çalışmalarına sağladığı destekten ötürü TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak aldığım tüm kararlarda hayatım boyunca beni destekleyen değerli ailemin tüm bireylerine bütün kalbimle teşekkür ederim.

Aralık 2016

Bilgehan ÖZCAN
(Uzay Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Literatür Araştırması	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER.....	5
2.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	5
2.1.1 Matris elemanları	6
2.1.1.1 Polyester reçine	7
2.1.1.2 Vinilester reçine	7
2.1.1.3 Epoksi reçine.....	8
2.1.2 Pekiştirici elemanlar.....	8
2.1.2.1 Cam elyaf	9
2.1.2.2 Aramid elyaf.....	9
2.1.2.3 Karbon elyaf.....	10
2.2 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	10
2.2.1 Elle yatırma yöntemi	10
2.2.2 Vakumlama yöntemi	10
2.2.3 İnfüzyon yöntemi	11
3. KOMPOZİT PLAK ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİ	13
3.1 Kompozit Plak ve Takviye Elemanı Üretimi	13
3.2 Kompozit Malzeme Özellikleri ve Modal Testler.....	16
4. ANLIK BASINÇ YÜKÜ	21
4.1 Anlık Basınç Yüğü Deneyi	21
4.1.1 Basınç depolama ve iletim üniteleri.....	22
4.1.2 Deney platformu	23
4.1.3 Veri toplama sistemi	24
4.1.4 Basınç ve gerinim sensörleri	25
4.1.5 Bağlantılar ve güç kaynağı.....	26
4.2 Takviye Elemanı Deneyleri ve Analizleri	28
4.2.1 Filtre kullanılmadan yapılan deneyler.....	30
4.2.1.1 Deneyler ve gerinim verileri	31
4.2.1.2 Basınç fonksiyonu ve gerinim analizi	32
4.2.2 Filtre kullanılarak yapılan deneyler	33

4.2.3 Parametrik Çalışma	40
4.3 Anlık Basınç Yüğü Fonksiyonu Deneyi	41
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR.....	47
ÖZGEÇMİŞ	49



KISALTMALAR

- 1C+PP+3C** : 1 kat karbon üzerine polipropilen üzerine 3 kat karbon takviye elemanı
2C+PP+2C : 2 kat karbon üzerine polipropilen üzerine 2 kat karbon takviye elemanı
3C+PP+1C : 3 kat karbon üzerine polipropilen üzerine 1 kat karbon takviye elemanı





SEMBOLLER

m	: Gereken Epoksi Miktarı
A	: Kumaş Alanı
n	: Kumaş Katman Sayısı
W	: Kumaşın Metrekare Başına Ağırlığı
RC	: RC Katsayısı
E_x, E_y, E_z	: Üç Eksendeki Elastisite Modülleri
G_x, G_y, G_z	: Üç Eksendeki Young Modülleri
v_x, v_y, v_z	: Üç Eksendeki Poisson Oranları
P_t	: Tepe Basıncı
P_e	: Emme Basıncı
t_e	: Etkime Süresi
ω_i	: Doğal frekans
α	: Kütle Matris Çarpanı
β	: Katılık Matris Çarpanı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Kumaş cinslerine göre RC katsayıları.	14
Çizelge 3.2 : Karbon-epoksi kompozit malzeme özellikleri.	17
Çizelge 3.3 : Kompozit plağın ilk 10 modal frekansı.	18
Çizelge 3.4 : Polipropilen malzeme özellikleri.....	19
Çizelge 3.5 : Tek takviyeli kompozit plağın ilk 10 modal frekansı.....	19
Çizelge 4.1 : Basınç sensörleri seri numaraları ve konumları.	30
Çizelge 4.2 : Basınç sensörleri seri numaraları ve konumları.	33
Çizelge 4.3 : Gerinim ölçer konumları.	34
Çizelge 4.4 : Takviyesiz plak basınç fonksiyonu için kullanılan parametreler.	34
Çizelge 4.5 : Tek takviyeli plakta basınç fonksiyonu için kullanılan parametreler...	37
Çizelge 4.6 : Basınç sensörleri seri numaraları ve konumları.	42



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Epoksi reçinenin, karbon elyafın ve sandviç malzemenin kompozit malzeme sınıflandırmasındaki yeri.	6
Şekil 2.2 : Epoksi reçine – Sertleştirici karışımı.....	8
Şekil 2.3 : Karbon elyaftan üretilen plak.	10
Şekil 3.1 : Karbon elyaf kumaşların kesilmesi ve alüminyum üzerine yerleştirilmesi.....	13
Şekil 3.2 : İnfüzyon yöntemi üretim aşamaları.....	14
Şekil 3.3 : Epoksi-Sertleştirici karışımı.	15
Şekil 3.4 : İnfüzyon yöntemi.	15
Şekil 3.5 : Karbon kompozit plak.	16
Şekil 3.6 : Takviye elemanı üretimi.....	16
Şekil 3.7 : Karbon kompozit katmanları.....	17
Şekil 3.8 : Karbon kompozit plağın ilk dört mod şekli.	18
Şekil 3.9 : Takviyeli plakların sonlu eleman modelleri.	18
Şekil 3.10 : Tek takviyeli karbon kompozit plağın ilk dört mod şekli.	19
Şekil 4.1 : Deney düzeneği şeması.	22
Şekil 4.2 : Basınç tankı (solda), kompresör (sağ üstte) ve Hydra Power hortum (sağ altta).	23
Şekil 4.3 : Patlamadan önce ve sonra membran.	23
Şekil 4.4 : Deney düzeneği.	24
Şekil 4.5 : VXI EX1629 veri toplama cihazı [19].	24
Şekil 4.6 : Kulite LQ-125 basınç sensörü [20].	25
Şekil 4.7 : Kulite LQ-125 basınç sensörü şeması [20].	26
Şekil 4.8 : RS232 kablonun güç kaynağına ve klemensler ile RJ45 kablolarına bağlantısı.	27
Şekil 4.9 : Güç kaynağı-RJ45 bağlantıları (solda ve sağ üstte) ve GPS4303 regülatör (sağ altta).....	27
Şekil 4.10 : Yuasa YTX14-BS batarya.....	28
Şekil 4.11 : T568B standartı ile bağlanan RJ45 kablo ucu.....	28
Şekil 4.12 : Basınç sensörleri konumları.	30
Şekil 4.13 : Takviyesiz plağın (solda) ve tek takviye elemanlı plağın (sağda) deney sırasında arkadan görünüşü.	31
Şekil 4.14 : Üç takviye elemanlı plağın (solda) ve iki takviye elemanlı plağın (sağda) deney sırasında arkadan görünüşü.	31
Şekil 4.15 : Plakların orta noktasında y yönündeki gerinimleri.	32
Şekil 4.16 : Plakların orta noktasında y yönündeki gerinimlerinin ilk tepe noktası..	32
Şekil 4.17 : Takviyesiz eleman deneyi basınç değerleri.....	33
Şekil 4.18 : Basınç sensörleri konumları.	34

Şekil 4.19 : Takviyesiz plak için deney verileri ve matematiksel yaklaşım fonksiyonu kıyaslaması.....	35
Şekil 4.20 : Takviyesiz plakta sönüm katsayılarının belirlenebilmesi için alınan x_1 ve x_2 değerleri.	35
Şekil 4.21 : Takviyesiz plakta arka yüzeyin ortasının x eksenindeki gerinimi ve analiz verileri.....	36
Şekil 4.22 : Takviyesiz plakta arka yüzeyin ortasının y eksenindeki gerinimi ve analiz verileri.....	36
Şekil 4.23 : Takviye elemanlı plağın arka yüzeyi.....	37
Şekil 4.24 : Tek takviyeli plak için 200 Hz’de yapılan deney verileri ve matematiksel yaklaşım fonksiyonu kıyaslaması.	38
Şekil 4.25 : 200Hz ile yapılan deneydeki takviyeli plakta sönüm katsayılarının belirlenebilmesi için alınan x_1 ve x_2 değerleri.	38
Şekil 4.26 : Tek takviyeli plakta arka yüzeyin ortasının x eksenindeki gerinimi ve analiz verileri.....	39
Şekil 4.27 : Tek takviyeli plakta arka yüzeyin ortasının y eksenindeki gerinimi ve analiz verileri.....	39
Şekil 4.28 : Tek takviyeli plakta x eksenindeki gerinimlerin takviye elemanının karbon tabakaları ile değişimi.	40
Şekil 4.29 : Tek takviyeli plakta y eksenindeki gerinimlerin takviye elemanının karbon tabakaları ile değişimi.	40
Şekil 4.30 : Basınç sensörleri(solda) ve RS232 bağlantıları(sağda).	41
Şekil 4.31 : Basınç sensörleri veri grafiği.....	42
Şekil 4.32 : 106 ve 114 seri numaralı basınç sensörlerinin veri grafiği.....	43

ANLIK BASINÇ YÜKÜNE MARUZ İNCE CİDARLI TAKVİYELİ SANDVİÇ KOMPOZİT PLAĞIN DİNAMİK DAVRANIŞI

ÖZET

Bu çalışmada, anlık basınç yüküne maruz katmanlı kompozit plağın dinamik davranışı incelenmiştir. Çalışma kapsamında kompozit malzemelerin üretim teknikleri ve malzeme özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca sandviç kompozit plak üzerine belli doğrultularda takviye elemanları yerleştirilmiş ve bu elemanların yapının dinamik davranışına etkisi incelenmiştir.

Kompozit plağın anlık basınç yüküne vereceği dinamik cevabın belirlenebilmesi için anlık basınç yükü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerde vakum infüzyon yönetimiyle üretilmiş olan karbon epoksi kompozit plak kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak ise polipropilen bal peteği çekirdek ve karbon yüzey katmanlarından oluşan sandviç yapının kullanılmasına karar verilmiştir. Takviye elemanındaki karbon yüzey katmanlarının, polipropilen peteğin altına ve üstüne çeşitli sayılarda yerleştirilmesi ile iki farklı tipte takviye elemanı oluşturulmuştur. Takviye elemanlarının üretimi için elle yatırma yöntemi kullanılmıştır.

Anlık basınç yükü deneyleri İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Kompozit Yapı Laboratuvarı'nda yer alan test düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test sistemi basınç depolama tankı, kompresör, regülatör, basınca dayanıklı hortum, şok tüpü, veri toplama sistemi, bağlantılar ve güç kaynaklarından oluşmaktadır. Deney kapsamında anlık basınç yükü, şok tüpü içerisindeki basınçlı havanın membranı yırtarak delinmesi sonucunda elde edilmiştir. Oluşan basınç yükü, test plağı üzerinde farklı konumlarda bulunan sensörler yardımıyla ölçülmüş ve basıncın zamanla değişim grafikleri elde edilmiştir. Plak üzerinde farklı konumlara, farklı sayılarda takviye elemanı yapıştırılarak, takviyeli plağın basınç yüklerine cevabı incelenmiştir. Bu deneylerden elde edilen sonuçlar grafik şeklinde sunulmuştur. Daha sonra veri toplama sisteminin filtreleme seçeneği kullanılarak yeni deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden elde edilen veriler ve uygun bir fonksiyon yaklaşımı kullanılarak anlık basınç yükü dağılımları elde edilmiştir. DeneySEL veriler, ANSYS ticari yazılımında gerçekleştirilen sayısal analiz verileriyle karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Ayrıca takviye elemanının değişik konfigürasyonlarda kullanılması ile oluşabilecek değişik gerinim değerlerinin incelenmesi için ANSYS yazılımında parametrik çalışma da yapılmıştır.

İlerleyen çalışmalarda kullanılmak üzere yeni bir basınç fonksiyonu üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda rijit bir plak üzerindeki basınç değerlerinin deneySEL verilerine Lagrange interpolasyon polinomu uygulanması sonucu yeni bir yaklaşım elde edilmiştir.



DYNAMIC RESPONSE OF A STIFFENED LAMINATED SANDWICH COMPOSITE PLATE UNDER BLAST LOAD

SUMMARY

In this study, effectiveness of the damage resistance of sandwich composite plates against explosive blasts is determined. Composite manufacturing techniques and material properties are researched, data obtained from literature used in creating finite element models and modal tests for composite plates were conducted.

Four layered carbon composite plate and polypropylene sandwich materials are produced in order to use for blast loading tests. The manufacturing process is made in Istanbul Technical University Faculty of Aeronautics and Astronautics Laboratory. Carbon fiber roll is cut by composite cutter tool. An aluminum plate is used as mold after sanded. Mold release wax is applied on aluminum plate. The cut square carbon fabric is placed on waxed aluminum. Double sided tape is applied on the sides of aluminum plate to fixate vacuum bag. Peel-ply, mesh and vacuum bag and vacuum tubes placed on plate. Epoxy resin and hardener are combined and applied on carbon fiber.

Polypropylene and carbon fabric materials was used for the production of stiffened sandwich composite elements. For the process of producing sandwich material, manual lay-up method was preferred. With this method, two separate reinforcements were produced. The first stiffener element is produced in the form of a 1-layer carbon, a polypropylene honeycomb and a 3-layer carbon fabric, respectively, from top to bottom. The second stiffener element is made of 2-layer carbon, polypropylene comb and 2-layer carbon fabric.

Modal analysis of four layer carbon fiber composite material has done on ANSYS Mechanical APDL. A 4-layer carbon fiber composite plate model was created. For this purpose Shell 281 elements are used. The plate modal frequencies obtained from the finite element software are given as table. The mode shapes obtained from the program are also shown.

In the stiffened sandwich composite plate model, the carbon plate in the upper and lower layers is modeled with Shell 281 element. The Solid 186 model is used in the model of the polypropylene sandwich element in the stiffener. Single stiffener, two stiffener and three stiffener plates are modeled for use in the works. 2-layer carbon, polypropylene comb and 2-layer carbon stiffened plate mode shapes and frequencies are given.

In order to determine the composite plate's dynamic response for blast loading, series of blast pressure experiments were conducted. To obtain blast pressure, air was pressured with a compressor to 500 litre capacity storage unit. Pressured air was sent to a hose through a regulator. The output of hose is connected to shock tube. The shock tube is a tube sealed with some kind of membrane to contain compressed air to

intended pressure value. The blast load was obtained from the pressured air inside the shock tube.

LQ125 pressure transducers are used for obtaining pressure data as electrical signals. Power units provide sufficient energy to transducers. Also strain gages placed on the plate for obtaining strain data. The VXI EX1629 data analysing system was connected to strain gages and transducers.

30x30 cm carbon composite plate was experimented with single, double and triple reinforcement components. 1-layer carbon, a polypropylene honeycomb and a 3-layer carbon fabric stiffener was used in these experiments. Also unreinforced composite plate was used for confirmation of results. Three pressure transducers placed in front of the plate and three strain gages placed back side.

Four different experiments were conducted. The resultant data with graphics are presented. The effects of material and reinforcements on the dynamic behaviour are investigated. These experiments were performed without activating the filter option of the data acquisition device.

New experiments were carried out by activating the filter option of the data acquisition device. Experiments were carried out on non-stiffened and single stiffened plates. 2-layer carbon, polypropylene comb and 2-layer carbon fabric stiffener element used in these experiments.

Various filter values have been tested in order to ensure that the pressure data can be analyzed without noise. It was decided to analyze the experiment with 200 Hz filter. The obtained pressure data was tried to be approximated to the pressure function. The pressure approximation function was then analyzed by applying it to models created in ANSYS software. For analysis in ANSYS, Shell 281 element is used for carbon and Solid 186 is used for polypropylene sandwich. Rayleigh type damping coefficients were used during the pressure analyzes.

Comparison of experiment and analysis data for non-stiffened plate and single stiffened plate is given. Analysis results are compatible with the maximum and minimum strains in the experiment.

Parametric study has been carried out in ANSYS software to examine the various strain values that can be formed by using the reinforcement element in different configurations. In the single reinforced plate, the analysis was performed to measure the strain change by the number of carbon plates at the top and bottom of the reinforcing element. From the data it is observed that as the number of layers on the reinforcement element increases, the strain value decreases.

A rigid sandwich composite plate with dimensions 29.5x29.5 cm was used for finding a pressure function to be used in subsequent studies. For obtaining pressure gradient optimally, five pressure sensors were placed on a rigid plate and the pressure values were examined experimentally. The sensors are placed on the line of the plate diagonal so that the pressure gradient can be obtained in an optimal manner while some of the available sensors were placed at an equal distance from the origin for verification. In these experiments, the data of the sensors used for verification show a good fit. A general analytical pressure function, which can be applied to all pressure values, has been derived from the data obtained as a result of the experiments. This pressure function is expressed in terms of point values by a Lagrange interpolation polynomial.

In conclusion, dynamic response of sandwich composite plate under blast load was examined. Experimental results of reinforced composite plates are compared with numerical results. A new pressure equation for blast loading was found.





1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler sağladıkları yüksek özgül dayanımları sayesinde hafif ve dayanıklı yapılar gerektiren havacılık, otomotiv, gemi inşaat, savunma gibi sanayi dallarında kendilerine yer edinmiştir. Bu malzemeler yüksek mukavemet, ısı dayanımı ve korozyon dayanımı göstermektedir. Kompozit malzemeler, ağırlığının düşük olması ve mukavemetinin yüksek olması sayesinde anlık yüksek basınca karşı dayanıklılık gerektiren darbe dayanımlı zırh yapımında da tercih edilmeye başlanmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında takviye elemanlarla güçlendirilmiş sandviç kompozit plağın anlık basınç yüküne dayanımı incelenmiştir. Bu kapsamda öncelikle kompozit plakların üretim teknikleri araştırılmış; kullanılacak malzemelerin mekanik özelliklerini eldesi için çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, anlık basınç yükü etkisi ile plakta oluşan gerinim verileri, ANSYS sonlu elemanlar yazılımı yardımı ile gerçekleştirilen sayısal analizlerden elde edilen gerinim değerleriyle karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

Tekalur ve diğ. (2008) patlama enerjisinin emilimi için kompozit plak üzerinde poliüre uygulanması yöntemini araştırmışlardır. Kullandıkları cam-vinil-ester sandviç kompozite uygulanan poliüre katmanı sayesinde malzemenin patlama direncinin ciddi miktarlarda arttığını gözlemlemişlerdir [1]. Gardner ve diğ. (2011) ise yaptıkları benzer deneyde; 102 milimetre genişliğinde, 254 milimetre uzunluğunda ve 48 milimetre kalınlığındaki cam-vinil-ester ve Corecell'den oluşan sandviç yapılı kompozitlerini şok ve patlama yükü testlerine tabi tutmuşlardır. Çıkan sonuçlarda; poliüre tabakasının, patlamanın olduğu yönde yerleştirilmesinin direnci azaltıcı etkide

bulunduğunu göstermişler ve tabakanın kompozitin şok dalgasını karşılayan tarafının arkasında bulunmasının malzemenin direncini arttıracakını belirtmişlerdir [2].

Türkmen ve Mecitoğlu (1998) sıvılaştırılmış petrol gazı ve oksijenin sertleştirilmiş lamine kompozit plaklar üzerinde patlama etkilerini araştırmışlardır. Levhaları patlama merkezinden 35 ve 100 cm uzağa koyarak yaptıkları deneylerde uzaklığın basınç değişkeninin karakterine doğrudan bağlı olduğunu ve uzaklığın yaklaşık üç kat azalmasının levhadaki maksimum basıncın on kat artmasına sebep olduğunu tespit etmişlerdir. Daha sonra ANSYS paket programını kullanarak deneylerin nümerik analizini gerçekleştirmişlerdir. Analiz sonuçlarında yapısal sönümlemeye bağlı olarak çıkan sonuçlarda bazı farklılıklar görülmesine rağmen yapı frekansları ve zamana bağlı oluşturulan grafiklerde deney ve sayısal analizin uyumlu olduğunu görmüşlerdir [3]. Hanssen ve diğ. (2001) alüminyum köpük panelleri üzerinde yakın mesafeden patlama testi gerçekleştirmişlerdir. Test düzeneği için sarkaç sistemini kullanmışlar ve çıkan sonuçları LS-DYNA paket programında oluşturdukları simülasyon ile kıyaslamışlardır [4].

Andrews ve Moussa (2008) kompozit sandviç panellerin patlamaya karşı olan tepkilerini test etmişlerdir. Bu kapsamda yazdıkları FORTRAN kodunda 91 kilogramlık TNT'nin 9.15 metre uzaklıktan patlamasını simüle etmişler ve çıkan sonuçları not almışlardır [5].

Fatt ve Palla (2009) sandviç yapılar için analitik yöntemler kullanarak kompozit plakların patlama yüklerine karşı vereceği tepkiyi hesaplamışlardır. 250 milimetre çapında ve 27 milimetre kalınlığında cam vinilester ve Divinycell malzemesi düşünülerek 10 megapaskal patlama için yapılan hesaplamalar daha sonra ABAQUS paket programı kullanılarak iki boyutlu ve üç boyutlu olarak modellenmiştir. Çıkan sonuçların değerlendirilmesi sonucunda analitik metod ve paket programının sonuçlarının arasında yüzde 7'den daha az bir fark olduğu saptanmıştır [6].

Kazancı ve Mecitoğlu (2008) patlama yükü sonucu oluşan ve lineer olmayan dinamik davranışı belirleyebilmek için Von Karman ince plakların eğilme teorisini kullanmışlardır. Zaman bölgesinde gerekli lineer olmayan diferansiyel denklemleri elde edebilmek için ise Galerkin metodunu kullanmışlardır. Bulunan yaklaşık nümerik sonuçları literatür araştırması yaparak ve ANSYS paket programı kullanarak kıyaslamışlardır. Bulunan titreşim karakterleri ve frekanslarının yapılan karşılaştırmalarla uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır [7].

LeBlanc ve diğ. (2006) 3Weave firmasının ürettiği üç boyutlu dokuma kompozit plaklara patlama testi yapmıştır. Kenarları 0.3 metre, kalınlığı 6.35 milimetre ve ağırlıkları 93, 98, 100 ve 190 ons olan dört farklı kare levhaya şok tüpünden değişik miktarlarda basınç uygulanmıştır. 5.65 megapaskaldan düşük basınçlarda fiber kırılmasına veya matris çatlamasına rastlanmamıştır. 5.65 megapaskaldan yüksek basınçlarda ise 93, 100 ve 190 onsluk kompozitlerde delaminasyon ve fiber kırılması gözlenmiştir. 98 onsluk kompozit aralarında en iyi patlama direncini göstermiştir [8]. Dolce ve diğ. (2010) kenarı 800 milimetre olan karbon fiber kare kompozit levhalara 150 milimetre uzaklıkta C-4 patlayıcıları yerleştirerek patlamanın etkilerini ölçmüşlerdir. 750 gram ve 825 gram olmak üzere yapılan iki farklı test sonuçları daha sonra LS-DYNA paket programı kullanılarak modellenmiştir. Oluşturulan modelde CONWEP yükleme fonksiyonu ve MMALE patlama modeli kullanılmıştır. Nümerik modelden çıkan sonuçların, gerçek hasar morfolojileri ile uyduğu belirtilmiştir [9]. Bahei-El-Din ve diğ. (2006) 50 milimetre kalınlıkta H100 köpük malzemesi içeren takviye elemanlı sandviç yapılı plakları anlık basınç yüküne tabi tutmuşlardır. Daha sonra takviye elemanının 5 milimetresini poliüre malzeme ile değiştirerek sonuçları gözlemlemişlerdir. Elde ettikleri verilere göre takviye malzemesine poliüre eklenmesinin oluşan maksimum kinetik enerjiyi %43 oranında azalttığını tespit etmişlerdir [10].

Hause ve Librescu (2007) çift eğimli anizotropik sandviç plakların basınç yükü altındaki dinamik davranışı incelemişlerdir. Bu konuda yaptıkları teorik ve nümerik çalışmalar sonucunda yapısal örgü şekillerinin sandviç yapılarda salınım genliğinin düşürülmesinde ve malzemenin dayanımının arttırılmasında büyük rol oynadığını belirtmişlerdir [11].

Goel ve diğ. (2012) Johnson-cook malzeme modeli ve Drucker-Prager plastisite modeli kullanarak takviye elemanlı bir çelik-kum kompozit plağın dinamik davranışını araştırmışlardır. Malzeme üzerine etkiyen yükler için üniform basınç yükü fonksiyonu kullanarak değişik konumlardaki takviye elemanlarının etkilerini incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda takviye elemanının plak üzerindeki gerinim enerjisini ve kinetik enerjiyi azalttığı sonucuna ulaşmışlardır [12].

Matsagar (2014) yaptığı çalışmada değişik malzemelerdeki 5 farklı kompozit plağın takviye elemanlı ve takviye elemansız olarak basınç yüküne verdiği cevabı incelemiştir. Abaqus 6.11 sonlu elemanlar yazılımında yaptığı analizler için takviye elemanlarını 10 farklı geometrik konfigrasyonda düzenlemiştir. Elde ettiği sonuçlarda

köpük malzemenin kalınlığının arttıkça enerji transferinin ve gerilimlerin azaldığını bulmuştur [13].



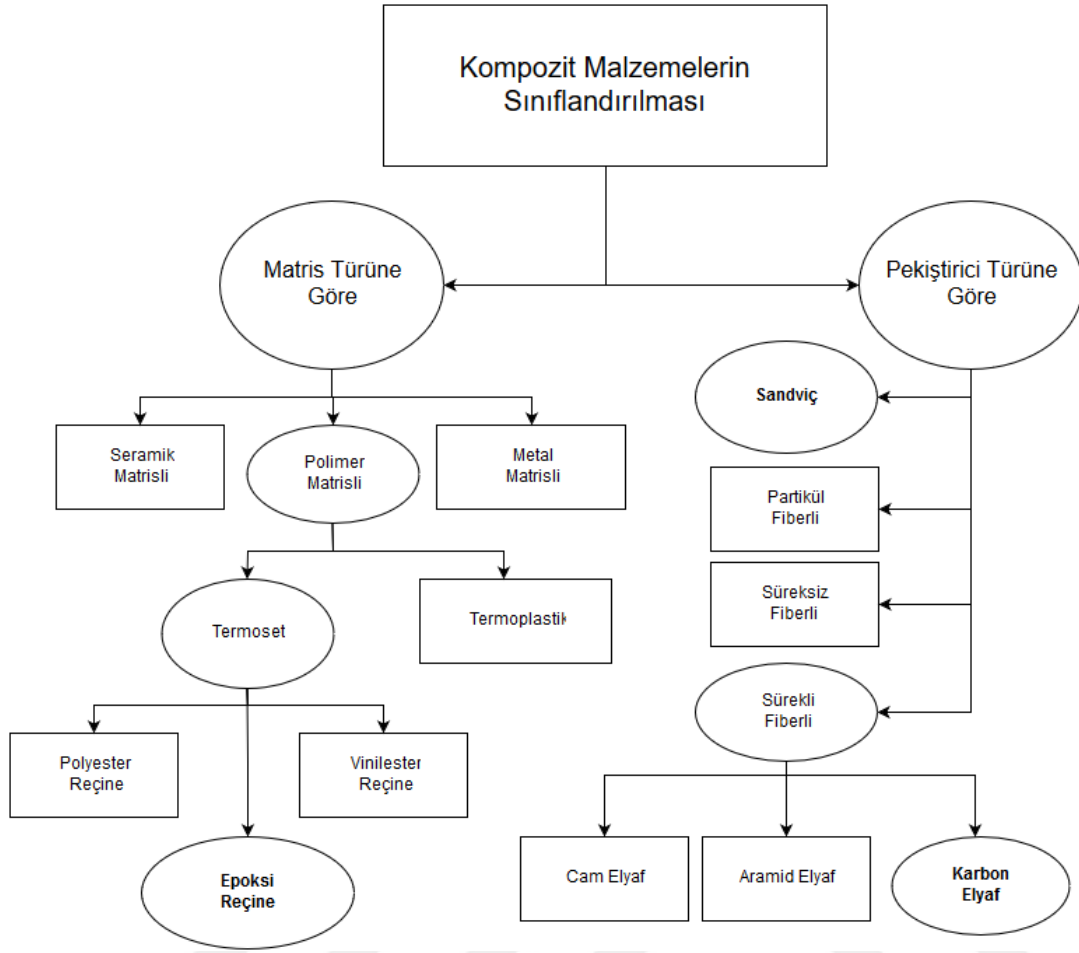
2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla malzemenin uygun özelliklerini tek malzemede toplamak veya yeni bir özellik çıkarmak amacıyla birleştirilmesi sonucu oluşturulan malzemeler olarak tanımlanır. Bu malzemeleri oluşturmak için genellikle birbirinden farklı fiziksel özelliklere sahip pekiştirici elemanların, matris malzemesi ile bir araya getirilmesi yöntemi kullanılır.

Kompozit malzemeler; yüksek mukavemet, iyi düzeyde titreşim sönümleyebilme yetenekleri, uzun yorulma ömürleri, düşük ısı genleşme katsayısı, yüksek korozyon direnci gibi olumlu özellikleri ile günümüzde kullanılan klasik malzemelerden ayrılmaktadır. Ancak üretim için deneyimli işçi gereksinimi, malzemenin imalat yöntemlerinin pahalı olması, üretilen malzemenin özelliklerinin üretim yöntemine göre değişmesi ve izotropik özellik göstermemesi gibi olumsuz yönleri vardır. Bu nedenlerden dolayı kompozit malzemeler kullanılmadan önce hakkında ayrıntılı araştırma ve bütçe gerektirmektedir.

2.1 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler ana bileşenleri ile matris ve pekiştirici elemanlar olarak adlandırılan iki elemandan oluşmaktadır. Pekiştirici eleman malzemeyi mekanik özellikler açısından güçlendirirken; matris elemanı, pekiştirici elemanların bir arada kalmasını ve gelen yüklerin eşit şekilde dağılmasını sağlar. Kompozit malzemeler kullanıldıkları alanlara göre çeşitli şekillerde sınıflandırılabilirler. Bu çalışmada kullanılan malzemeler doğrultusunda pekiştirici dağılımı ve matris türü olarak sınıflandırılacaktır. Matris türüne göre kompozit malzemeler; polimer matrisli, seramik matrisli ve metal matrisli kompozitler olarak sınıflandırılırken polimer matrisli malzemeler termoset ve termoplastik olarak ikiye ayrılır. Pekiştirici dağılımına göre kompozit malzemeler ise süreksiz fiberli, sürekli fiberli, partikül fiberli ve sandviç eleman olmak üzere dörde ayrılır [14]. Bu çalışma kapsamında pekiştirici için karbon fiber ve sandviç; matris için ise epoksi reçine kullanılmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 : Epoksi reçinenin, karbon elyafın ve sandviç malzemenin kompozit malzeme sınıflandırmasındaki yeri.

2.1.1 Matris elemanları

Matris elemanları pekiştirici elemanı destekleyen, ayıran ve koruyan malzemedir. Matris elemanlarının yoğunluğu ve mukavemeti genellikle pekiştirici elemanlara göre daha az olur. Pekiştirici elemanda yükün iletimini ve pekiştirici elemanın kırılması durumunda yükün yeniden dağılımını sağlar. Matris elemanlarının pekiştirici ile bağlantısını sağlamak için genellikle kimyasal işlem uygulanır. Metal, seramik ve polimer; yaygın kullanılan matris türleridir [14].

Metal matrisli kompozitler matris elemanı olarak demir, nikel, alüminyum, magnezyum, titanyum, bakır gibi metal ve alaşımları kullanmaktadırlar. Metal kompozitler elektrik ve ısı iletkenliği özelliğine sahiptir. Manyetik özellik gösterirler ve yüksek mukavemete sahiptirler. Bu matris elemanları düşük korozyon direncine sahiptir. Maliyeti yüksek ve uygulanması zordur. Metal matrisli kompozitler otomotiv, havacılık ve savunma sektörlerinde sıklıkla kullanılmaktadır [14].

Seramik matrisli kompozitler genellikle yüksek sıcaklık ve aşınma oluşabilecek yerlerde tercih edilirler. Yüksek sertliğe ve düşük yoğunluğa sahiptirler. Ancak kırılgan yapıları ve şekil vermenin zorluğu gibi olumsuz özellikler de barındırmaktadırlar [14-15].

Polimer matrisli kompozitler ise günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer kompozit türlerine göre maliyetinin düşük olması, yüksek korozyon direnci ve imalat yöntemlerinin kolaylığı tercih edilmesindeki başlıca sebeplerdendir. Ayrıca bu kompozitler ağırlığına göre yüksek mukavemet göstermektedirler. Polimer matrisli kompozitler için pekiştirici eleman olarak cam fiber, karbon fiber, bor fiber ve aramid fiber gibi malzemeler seçilmektedir. Polimer matris malzemeleri termosetler ve termoplastikler olarak iki grup altında incelenebilir [14-15].

Termoplastik malzeme, polimer zincirleri çapraz bağlı olmayan matristir. Oda sıcaklığında katı halde bulunurlar. Bu malzemelere yeniden şekil verilebilmesi için oluşturulduğu sıcaklığa kadar ısıtılması gereklidir. Termoplastikler; yüksek kırılma toklukları ve uzun raf ömrüne sahiptirler. Ancak maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle yaygın değildirler [15].

Termoset polimerlerin polimer zincirleri çapraz bağlıdır. Oda sıcaklığında sıvı halde bulunurlar ve ısıtılarak sertleştirici katalizör yardımıyla kürlenirler. Termoset malzemeler işlendikten sonra sıcaklık verilerek yeniden şekillendirilemezler. Ancak termoset matrisli kompozitlerin imalatının kolay, ucuz olması ve yüksek mekanik özellikleri sayesinde özellikle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Termoset matris elemanları reçine olarak da adlandırılırlar. Kompozit üretiminde kullanılan başlıca reçineler polyester, vinilester, ve epoksi reçinelerdir [15].

2.1.1.1 Polyester reçine

Polyester reçineler düşük akmazlık özelliği gösteren matrislerdir. Düşük maliyetlidirler ve kullanımları kolaydır. Buna karşın raf ömürleri kısa olması, mekanik özellikleri düşüklüğü gibi olumsuz özellikleri vardır. Denizcilik alanında ve yüksek mukavemet gerektirmeyen uygulamalarda sıkça kullanılırlar.

2.1.1.2 Vinilester reçine

Vinilester reçineler, polyesterler reçinelerin mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla oluşturulmuşlardır. Kolay işlenirler ve sertleştirici ile hızlı tepkimeye girerler. Korozyona karşı yüksek dayanıma sahiptirler.

2.1.1.3 Epoksi reçine

Epoksi reçineler diğer termosetlere göre daha yüksek mekanik özelliklere sahiptirler ve kompozit imalatı sırasında daha az çekmeye uğrarlar. Elyaf yapılarında yüksek bağ mukavemeti sağlarlar. Yüksek korozyon ve kimyasal dirence sahiptir. Ancak maliyetleri diğer reçinelere oranla daha yüksektir. Mekanik özelliklerinin iyi olmasından dolayı havacılık, savunma, otomotiv endüstrilerinde yaygın olarak kullanılırlar (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : Epoksi reçine – Sertleştirici karışımı.

2.1.2 Pekiştirici elemanlar

Pekiştirici elemanlar, kompozit yapıyı güçlendiren ve dayanımını arttıran elemanlardır. Pekiştirici elemanlar, takviye elemanları olarak da bilinirler. Ancak bu “takviye elemanı” bu çalışma kapsamında başka bir terimi kapsayacağından tercih edilmemiştir. Pekiştirici elemanlarda uzunluğun çapa göre çok daha büyük olduğu özel tip malzeme aynı zamanda fiber olarak da adlandırılmaktadır. Pekiştirici elemanlar; partikül, süreksiz fiberli, sürekli fiberli ve sandviç kompozit olmak üzere dört farklı türde incelenebilir.

Sandviç kompozitler alttan ve üstten yüksek mukavemetli iki cidar arasına sandviç panel yerleştirilerek oluşturulan kompozit türüdür. Sandviç ara paneli, cidarlardan daha hafif ve daha kalın olan bal peteği, köpük veya balsa gibi malzemelerden oluşabilir. Bal peteği yapıli sandviç panelde; petek malzemesi olarak aramid, alüminyum veta polipropilen gibi malzemeler tercih edilmektedir. Bu yapının kullanıldığı sandviç paneller sertliğin ağırlığa olan oranının önemli olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir. Bal peteği sandviç yapısı I tipi kiriş özelliği gösterir. Bu tip malzemedde cidarlardan birine uygulanan yük sandviç malzemesi

içinden kesme gerilmesi aracılığıyla geçerek üst ve alt cidarlar arasında bağlantı oluşturmaktadır [15].

Partikül kompozitler küçük boyutlarda fazla miktarda pekiştirici içeren malzemelerdir. Bu kompozitlerdeki partiküller makroskopik veya mikroskopik boyutlarda olabilir. Partiküllerin matris içinde homojen dağılması sonucu izotropik malzeme gibi değerlendirilebilirler. Bu kompozit malzemeler diğer fiber pekiştiricili kompozitlere göre daha ekonomik olmalarına karşın mekanik özellikleri daha düşüktür [15].

Süreksiz fiberli kompozitler, kırılmış fiber parçalarından oluşmaktadır. Mekanik özellikleri partikül kompozitlere göre daha iyidir. Maliyetinin sürekli fiber kompozitlere oranla daha düşük olması yüksek dayanım gerektirmeyen uygulamalarda sıklıkla kullanılabilmelerini sağlar [15].

Sürekli fiberli kompozitler ince ve uzun yapıların dokuma yöntemi ile bağlanmasıyla oluşturulurlar. Fiberler kendi boyları doğrultusunda kompozit plakların mekanik özelliklerini büyük yonde arttırırlar. Sürekli fiberli malzemeler başlıca cam, karbon ve aramid elyaflardan üretilmektedir [15].

2.1.2.1 Cam elyaf

Cam elyafı üretiminde, geleneksel cam üretiminde de kullanılan silika ve alüminyum oksit gibi ham maddelerden faydalanılmaktadır. A-camı, C-camı, E-camı, ve S-camı gibi farklı türleri bulunmaktadır. Maliyetinin düşük olması sayesinde hafif yapılı plastik yapıların sağlamlaştırılmasında kullanılmaktadır [15].

2.1.2.2 Aramid elyaf

Aramid elyafı, kompozit plaklara yüksek mukamevet ve sertlik kazandıran hafif bir malzemedir. Genellikle ilk üreticisi olan “DuPont” firmasındaki ticari ismi olan “Kevlar” adıyla bilinmektedir [14]. Aramid elyaflar düşük yoğunluk, yüksek mukavemet, yüksek yorulma dayanımı, yüksek darbe dayanımı, yüksek aşınma dayanımı, yüksek kimyasal dayanım ve düşük yoğunluk gibi özellikler göstermektedirler. Aramid elyaflar yüksek darbelere karşı balistik koruma gerektiren uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadırlar.

2.1.2.3 Karbon elyaf

Karbon elyaf , yüksek miktarda karbon içeren hammaddelerin ısıtılması sonucu elde edilir. Bu malzeme yüksek elastisite modülüne sahiptir. Karbon elyafından üretilen kompozit plaklar düşük yoğunluk, yüksek sıcaklık dayanımı, korozyon dayanımı, yüksek mukavemet, yüksek yorulma dayanımı, yüksek sertlik gibi özellikler gösterirler. Karbon elyafların maliyeti yüksektir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 : Karbon elyaftan üretilen plak.

2.2 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemeler üretim yöntemine göre farklı mekanik özellik kazanabilirler. Kompozit malzemelerin üretimi için bu çalışma kapsamında kullanılmış olan elle yatırma, vakumlama ve infüzyon yöntemleri aşağıda açıklanmaktadır.

2.2.1 Elle yatırma yöntemi

Elle yatırma yönteminde pekiştirici eleman kalıp üzerine elle yatırılarak sıvı reçinenin fırça veya rulo ile elyaflara yedirilmesi amaçlanır. Üretimin ilk aşamasında malzemenin kalıba yapışmasını önlemek amacıyla ayırıcı sıvı (jelkot) uygulanır. Daha sonra istenilen kalınlık elde edilene kadar reçinenin elyaf üzerine uygulanması işlemi tekrarlanır. Elle yatırma yöntemi ucuz ancak üretilecek malzeme boyutlarına göre fazla miktarda iş gücüne ve zamana gereksinim duyan bir üretim yöntemidir.

2.2.2 Vakumlama yöntemi

Vakumlama yöntemi fazla reçinenin malzeme üzerinden atılması için kullanılan bir yöntemdir. Elle yatırma yöntemi kullanıldıktan sonra kürleme aşamasındaki ısıtılan

kumaşlar vakum torbasının içerisine konulup pompa yardımıyla vakum oluşturularak içerisindeki hava ve fazla reçine çekilir. Vakumlama yönteminde, elyaflar reçineyi daha homojen şekilde emmektedirler. Bu yöntem kullanılarak işçiliğin malzeme üzerinde oluşturabileceği hatalar önlenabilir ve elle yatırma yöntemine göre daha kaliteli ve mekanik özellikleri yüksek parçalar elde edilebilir. Vakum torbası, vakum pompası gibi ek üretim araçları gerektirdiğinden dolayı maliyeti yüksek bir yöntemdir.

2.2.3 İnfüzyon yöntemi

İnfüzyon yönteminde vakum kullanılarak reçinenin bulunduğu kaynaktan çekilerek doğrudan malzeme üzerine uygulanması sağlanmaktadır. Yöntemde öncelikle malzemenin şeklini alması istenen kalıbın tamamıyla pürüzsüz olması sağlanır. Bu pürüzsüz yüzey üzerine ayırıcı sıvı uygulanarak malzemenin kalıba yapışması önlenir. Kalıbın çevresine ise kompozit malzemenin üretileceği boyuttan daha büyük olacak şekilde bir alana sızdırmazlık macunu uygulanır. Daha sonra kalıbın üzerine sırasıyla pekiştirici elemanlar, mesh (reçinenin düzenli dağılmasını sağlayacak plastik file) ve peel-ply (reçinenin fazlasını emen bir çeşit kumaş) serilir. Bu katmanların üzerine vakum pompası ve reçine girişi için delikli plastik borular yerleştirilir. Serim işlemi tamamlandıktan sonra vakum torbası daha önceden uygulanmış olan sızdırmazlık macununa yapıştırılarak izole bir ortam oluşturulur. Daha sonra vakumlama işlemi başlatılır ve vakum torbası ile kalıp arasındaki hava tamamen çekildikten sonra plastik boru, reçine dolu kaynağa yerleştirilerek reçinenin elyaf üzerinde ilerlemesi sağlanır. Reçinenin bütün katmanları ıslatmasına ve vakum çıkışına gelmesine emin olunana kadar bu işlem devam eder. Daha sonra sistemdeki borular hava girişine engel olacak şekilde kapatılır. Bu işlem sonucu oluşturulan reçine ve elyaf daha sonra kürlenmeye bırakılır. Bu yöntem reçine ve pekiştirici elemana doğrudan müdahale gerektirmez ve reçinenin elyaflar üzerinde daha homojen dağılmasını sağlar.



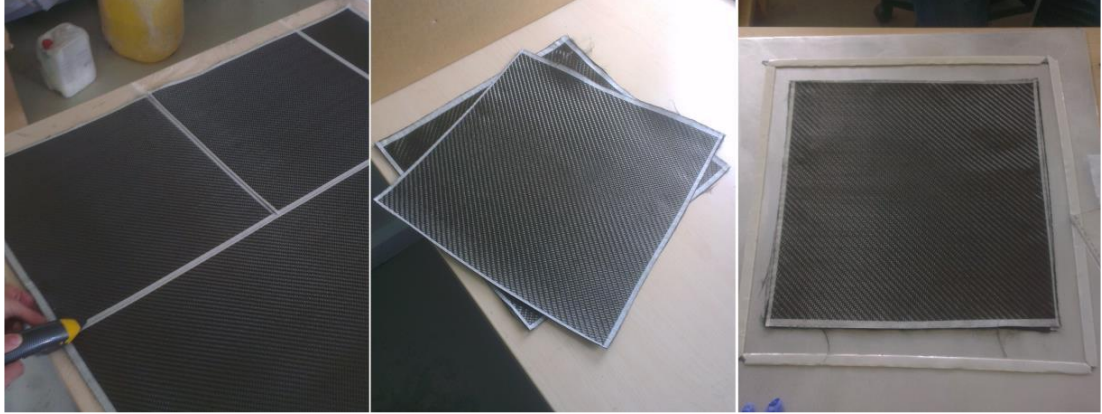
3. KOMPOZİT PLAK ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİ

Bu bölümde, çalışma kapsamında yapılmış olan anlık basınç yükü deneyleri için kullanılan sandviç kompozit plağın ve takviye elemanlarının üretimi açıklanmıştır.

3.1 Kompozit Plak ve Takviye Elemanı Üretimi

Anlık basınç deneylerinde kullanılmak üzere dört kat karbondan oluşan plak ve karbon/polipropilen sandviç takviye elemanları üretilmiştir.

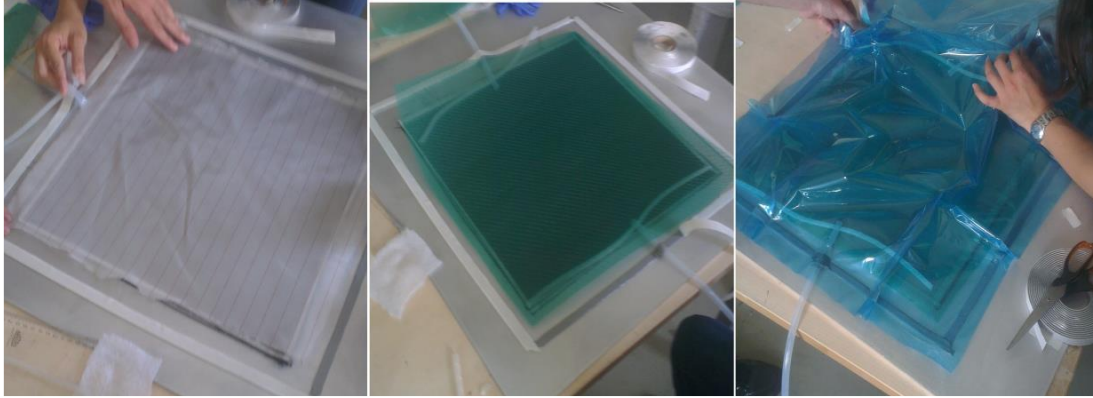
Karbon kompozit plağın üretimi için infüzyon yöntemi tercih edilmiştir. Üretim için gereken karbon fiber kumaş kompozit kesme makinesi kullanılarak, rulodan 40x40 cm olacak şekilde kesilmiştir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 : Karbon elyaf kumaşların kesilmesi ve alüminyum üzerine yerleştirilmesi.

Kesim işleminin ardından üretimin gerçekleşeceği yüzey hazırlanmıştır. Plağın herhangi bir eğrilik içermesi gerekmediği için kalıp yerine düz alüminyum levha kullanımına karar verilmiştir. Levha üzerine bölüm 2.2.3’de değinilen sızdırmazlık macunu kumaşa pay verecek şekilde yapıştırılarak üretim ortamı hazırlanmıştır. Kompozit plağın üretimden sonra alüminyum levha üzerine yapışmasını önlemek için alüminyuma NC 770 ayırıcı sıvı uygulanmıştır. Daha sonra sırasıyla dört kat karbon kumaş, peel-ply ve mesh katmanları levha üzerine yerleştirilmiştir. Bu işlemlerden

sonucu vakum torbası, sızdırmazlık macununa yapıştırılarak vakum yapılacak ortam hazırlanmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 : İnfüzyon yöntemi üretim aşamaları.

Vakum ortamı için gerekli işlemlerin tamamlanmasının ardından reçine işlemlerine geçilmiştir. Bölüm 2.1.1’de de bahsedildiği üzere epoksi yapıştırıcı ve sertleştirici olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır ve bu iki bileşen belirli bir karışım oranı ile birleştirilir. Bu çalışmadaki plakların ve takviye elemanının imalatında HEXION marka MGS L285 yapıştırıcı ve MGS L287 sertleştirici kullanılmıştır. Yapıştırıcının sertleştiriciye ağırlıkça oranı 5’e 2 olarak belirlenmiştir [16]. Kompozit plağı oluşturmak için gereken epoksi reçine ve sertleştirici miktarı aşağıdaki denklem yardımı ile belirlenmiştir (3.1).

$$m = \frac{A \cdot n \cdot W \cdot RC}{(1 - RC)} \quad (3.1)$$

Bu denklemde m gereken reçine miktarını, A her bir kompozit katman alanını, n katman sayısını, W kullanılan kumaşın metrekare başına olan kütlesini ifade etmektedir. RC ise kullanılan elyaf kumaşın cinsine göre değişen bir katsayıdır [14]. Bazı kumaş cinsleri için RC katsayıları Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Kumaş cinslerine göre RC katsayıları.

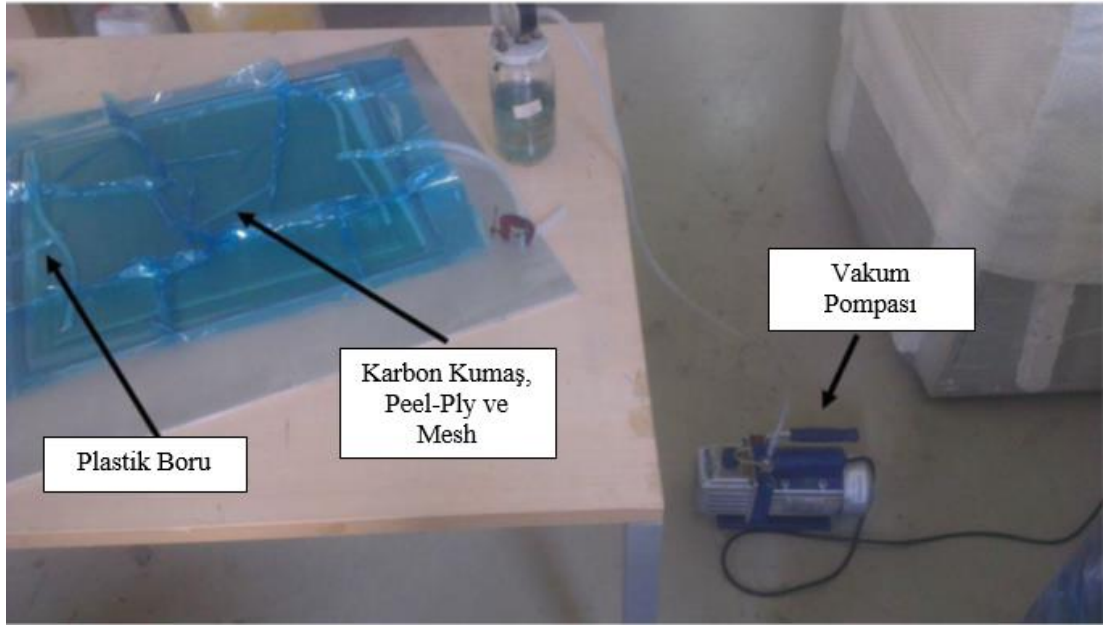
Kumaş Türü	RC katsayısı
Cam Elyaf	0.46
Kevlar Elyaf	0.61
Karbon Elyaf	0.55

Karbon elyaf için 0.55 olan RC katsayısı kullanılarak gerekli olan reçine miktarı belirlendikten sonra infüzyon üretiminde sonraki aşamaya geçilmiştir (Şekil 3.3).



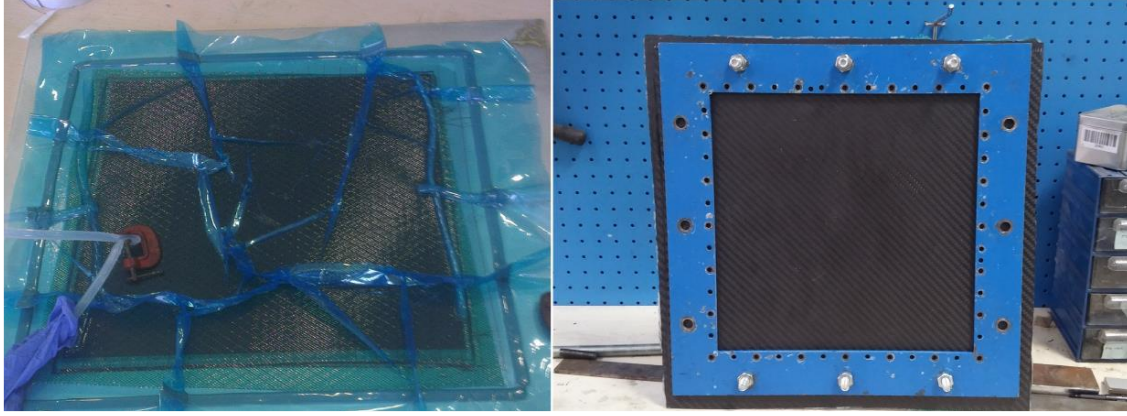
Şekil 3.3 : Epoksi-Sertleştirici karışımı.

Reçine miktarı ayarlandıktan sonra vakum pompasının plastik boruya bağlanması yardımıyla kumaşın etrafındaki hava çekilmiştir. Daha sonra epoksi-sertleştirici karışımı vakum ortamının diğer çıkışındaki borudan verilerek kumaşların ıslatılması işlemine başlanmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 : İnfüzyon yöntemi.

Reçinenin kumaşları tamamiyle ıslattığına emin olunduktan sonra plastik borular mengenerlerin yardımıyla sıkıca kilitlenerek plak 24 saat boyunca oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılmıştır. Kompozit plak, kürlenme işleminin ardından deney düzeneğine yerleştirilmek üzere metal çerçeveye sabitlenmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Karbon kompozit plak.

Kompozit plağın üretiminin ardından takviye elemanının üretimi işlemine geçilmiştir. Takviye elemanının üretimi için karbon kumaş ve polipropilen malzemelerin elle yatırma yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile iki ayrı takviye elemanı üretilmiştir. Birinci takviye elemanı alttan üste doğru sırasıyla 1 kat karbon, polipropilen petek ve 3 kat karbon kumaş (1C+PP+3C) şeklinde üretilmiştir. İkinci takviye elemanı ise, 2 kat karbon, polipropilen petek ve 2 kat karbon kumaş (2C+PP+2C) olacak şekilde üretilmiştir. Elle yatırma işleminin ardından epoksinin kumaş ve peteğe iyice nüfuz edebilmesi için takviye elemanına üstten ağırlık elemanları uygulanmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 : Takviye elemanı üretimi.

3.2 Kompozit Malzeme Özellikleri ve Modal Testler

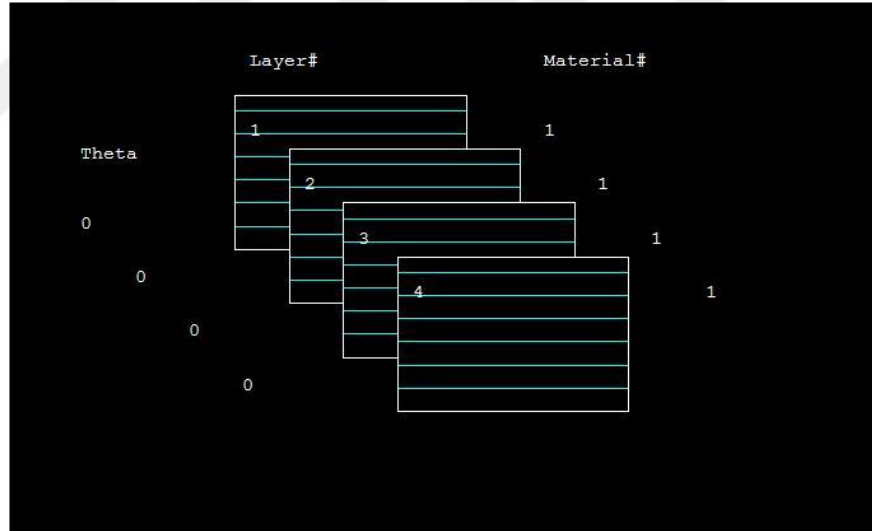
Kompozit malzemeler; anizotropik malzeme özelliği göstermesi nedeniyle teorik ve deneysel çalışmalar arasında farklı davranışlar gösterebilmektedir. Bu nedenle

kompozit malzemeleri doğru olarak tanımlanabilmek için 9 farklı malzeme özelliğinin belirtilmesine ihtiyaç duymaktadırlar. Bu malzeme özellikleri $E_x, E_y, E_z, V_{xy}, V_{xz}, V_{yz}, G_{xy}, G_{xz}, G_{yz}$ şeklinde sıralanabilir. Bu çalışma kapsamında kullanılan malzemeler fiberlerin yönelimi nedeniyle ortotropik özellik gösterdiği için E_x, E_y değerleri, V_{xy}, V_{xz} değerleri ve G_{xy}, G_{xz} değerleri eşit olarak alınabilir. Karbon-epoksi malzeme özellikleri için Ömercikoğlu'nun çalışmasında çekme testleri ve statik testlerle elde ettiği değerler Çizelge 3.2'de gösterilmektedir. Yapılan sayısal analizlerde bu malzeme özellikleri kullanılmıştır [17].

Çizelge 3.2 : Karbon-epoksi kompozit malzeme özellikleri.

Yoğunluk (kg/m ³)	E_x, E_y (GPa)	E_z (GPa)	ν_x	ν_y, ν_z	G_x (GPa)	G_y, G_z (GPa)
1337	45.5	3.65	0.195	0.353	2.7	1.35

Bu değerler kullanılarak yapılacak analizler için ANSYS sonlu elemanlar programında 4 katlı karbon fiber kompozit plak modeli oluşturulmuştur (Şekil 3.7).

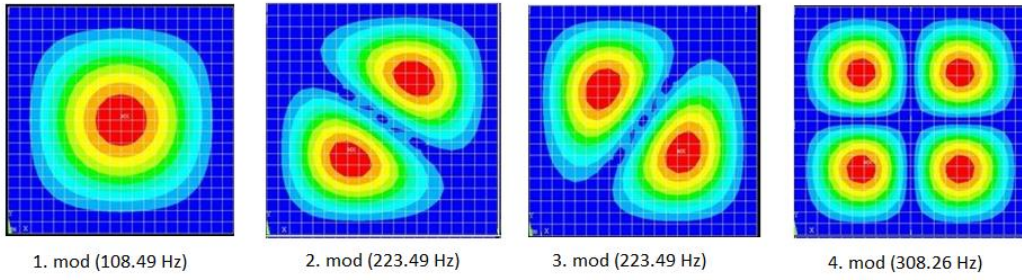


Şekil 3.7 : Karbon kompozit katmanları.

Takviyesiz plağın doğal frekanslarını bulmak için ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılmış ve modal testler yapılmıştır. Karbon plağın modellenmesi için Shell 281 elemanı kullanılmıştır. ANSYS paket programından elde edilen plağın modal frekansları Çizelge 3.3'de verilmiştir. Yine programdan elde edilen ilk 4 mod şekli Şekil 3.8'de gösterilmiştir.

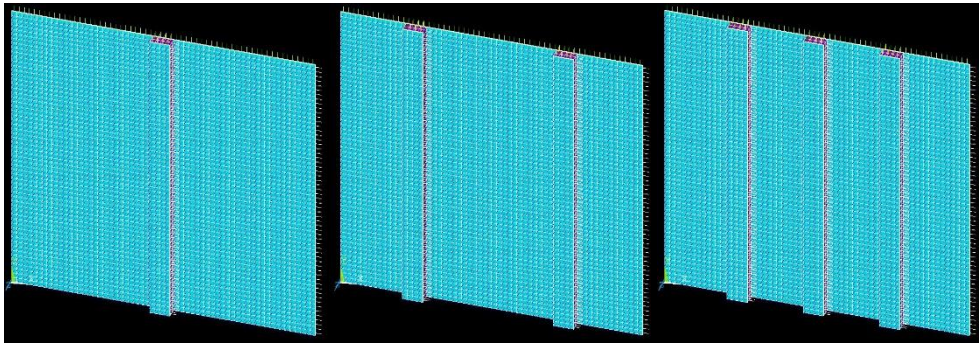
Çizelge 3.3 : Kompozit plağın ilk 10 modal frekansı.

Mod sayısı	Frekans (Hz)
1	108.49
2	223.49
3	223.49
4	308.26
5	411.94
6	412.99
7	475.35
8	475.35
9	611.51
10	668.20



Şekil 3.8 : Karbon kompozit plağın ilk dört mod şekli.

Takviye elemanı modelinde alt ve üst tabakalarda bulunan karbon plak yine Shell 281 elemanı ile modellenmiştir. Takviye elemanındaki polipropilen sandviç elemanı modellenmesinde ise Solid 186 modeli kullanılmaktadır. Çalışmalarda kullanılmak üzere tek takviyeli, iki takviyeli ve üç takviyeli plaklar modellenmiştir (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 : Takviyeli plakların sonlu eleman modelleri.

Polipropilen malzeme özellikleri için Ezer'in çalışmasında bulunan malzeme bilgileri kullanılmıştır. Bu malzeme özellikleri Çizelge 3.4'de gösterilmektedir [18].

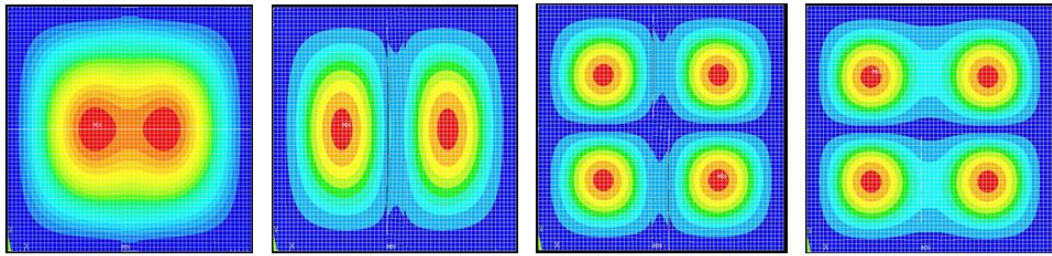
Çizelge 3.4 : Polipropilen malzeme özellikleri.

Yoğunluk (kg/m ³)	E _x , E _y (MPa)	E _z (MPa)	ν_x	ν_y, ν_z	G _x (MPa)	G _{y, G_z} (MPa)
80	40	97	0.35	0.15	5	12.8

2C+PP+2C takviyeli plak için ANSYS paket programından elde edilen doğal frekanslar Çizelge 3.5’de verilmiştir. Yine programdan elde edilen ilk 4 mod şekli Şekil 3.10’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 : Tek takviyeli kompozit plağın ilk 10 modal frekansı.

Mod sayısı	Frekans (Hz)
1	182.52
2	210.97
3	308.83
4	324.44
5	383.82
6	458.67
7	469.55
8	546.79
9	597.14
10	665.65



1. mod (182.52 Hz)

2. Mod(210.97 Hz)

3. Mod(308.83 Hz)

4. Mod(324.44 Hz)

Şekil 3.10 : Tek takviyeli karbon kompozit plağın ilk dört mod şekli.



4. ANLIK BASINÇ YÜKÜ

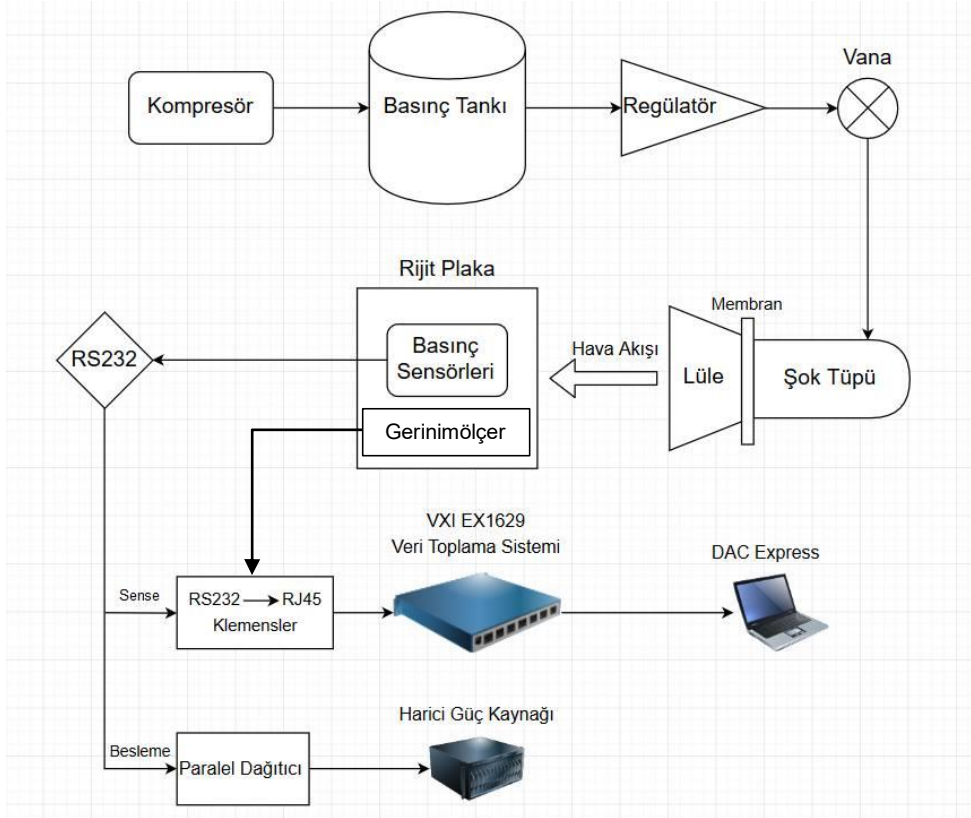
Bu bölümde kompozit plağın anlık basınç yüküne vereceği cevap incelenmiştir. Öncelikler üretilen takviyesiz katmanlı kompozit plak üzerinde anlık basınç yükü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra bu plak üzerine belli doğrultularda sandviç yapıdaki takviye elemanları yapıştırılmıştır. Elde edilen yeni plak yapısı üzerinde benzer deneysel çalışmalar gerçekleştirilerek yapının anlık basınç yüklerine cevabı incelenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar, literatürden alınmış fonksiyon kullanılarak ANSYS paket programından elde edilen analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır. Ayrıca plak üzerinde çok noktadan basınç verisi alınarak, bu veriler yardımı ile anlık basınç yüklerini tanımlayacak yeni bir analitik fonksiyon elde edilmesi konusunda çalışmalar devam etmektedir.

4.1 Anlık Basınç Yükü Deneyi

Basınç yükü sonucu yüzey üzerinde oluşacak yük dağılımını bulmak için İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Kompozit ve Yapı Laboratuvarı'nda kurulmuş olan anlık basınç yükü test düzeneği kullanılmıştır. Deney kapsamında, plak yüzeyi üzerine çarpan yüksek basınçlı havanın plak üzerinde oluşturduğu etkiler incelenmiştir.

Anlık basınç yükü deneyleri için kurulan düzenekte öncelikle kompresör yardımı ile toplanan hava basınç tankında depolanmaktadır. Daha sonra sıkıştırılmış hava vana açıldığında regülatör yardımı ile şok tüpüne iletilmekte ve burada birikmektedir. Şok tüpünün ucunda kullanılan membran ise havayı içerde tutmakta ve belirli basınç değerine ulaştığında yırtılarak açılmaktadır. Basınçlı hava lüleden geçerek basınç sensörlerine gelir. Plak üzerinde bulunan sensörlere gelen hava elektrik sinyaline dönüşerek kablolarla iletilir. Burada sensörlerin kabloları boylarının yetersizliğinden dolayı ve gürültü engellemesi için RS232 bağlantısı yardımıyla kalın kablolarla bağlanmıştır. Bu kabloların Besleme uçları harici güç kaynağına gitmekte, Sense uçları ise klemenslere bağlanmaktadır. Klemenslerde bağlanan uçlar RJ45 Ethernet uçlarına

dönüştürülerek VXI EX1629 veri toplama sistemine aktarılmakta ve yine Ethernet kablosu aracılığı ile bilgisayara gönderilmektedir. Bilgisayarda ise DAC Express isimli yazılım kullanılarak veri hem anlık olarak görüntülenebilmekte hem de kaydedilip daha sonra analiz edilebilmektedir. Basınç deneyi için yapılması düşünülen düzenek Şekil 4.1’deki şemada gösterilmiştir. Bu deney için kullanılacak üniteler; basınç depolama ve iletim üniteleri, deney platformu, veri toplama sistemi, basınç ve gerinim sensörleri, bağlantılar ve güç kaynağı olarak beş başlıkta incelenecektir.



Şekil 4.1 : Deney düzeneği şeması.

4.1.1 Basınç depolama ve iletim üniteleri

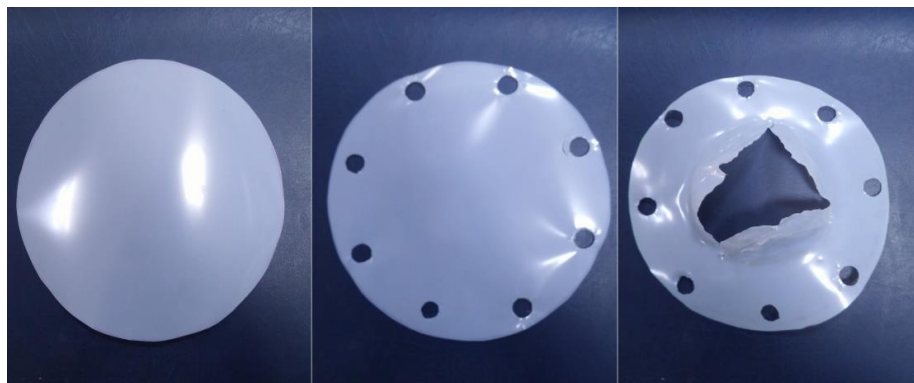
Basınç depolama üniteleri kompresör, basınç tankı, regülatör, vana ve sıkıştırılmış havanın iletilebilmesi için basınca dayanıklı hortumdan oluşmaktadır. Deneyde Dalgakıran marka DKK 40 model kompresör kullanılmıştır. Basınç tankı olarak ise 500 litre kapasiteli, 60 bar’a kadar hava depolayabilen hava tankı tercih edilmiştir. Tank üzerinde basınç bilgisi için manometre bulunmaktadır. Basınç tankı çıkışında vana ve Orma marka regülatör bulunmaktadır. Regülatör vasıtasıyla çıkış basıncı 25 bar’a kadar ayarlanabilmektedir. Vana yardımıyla da regülatörden ayarlanan basınçta hava, Hydra Power marka hortuma iletilmektedir. Basınç depolama ve iletim üniteleri Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2 : Basınç tankı (solda), kompresör (sağ üstte) ve Hydra Power hortum (sağ altta).

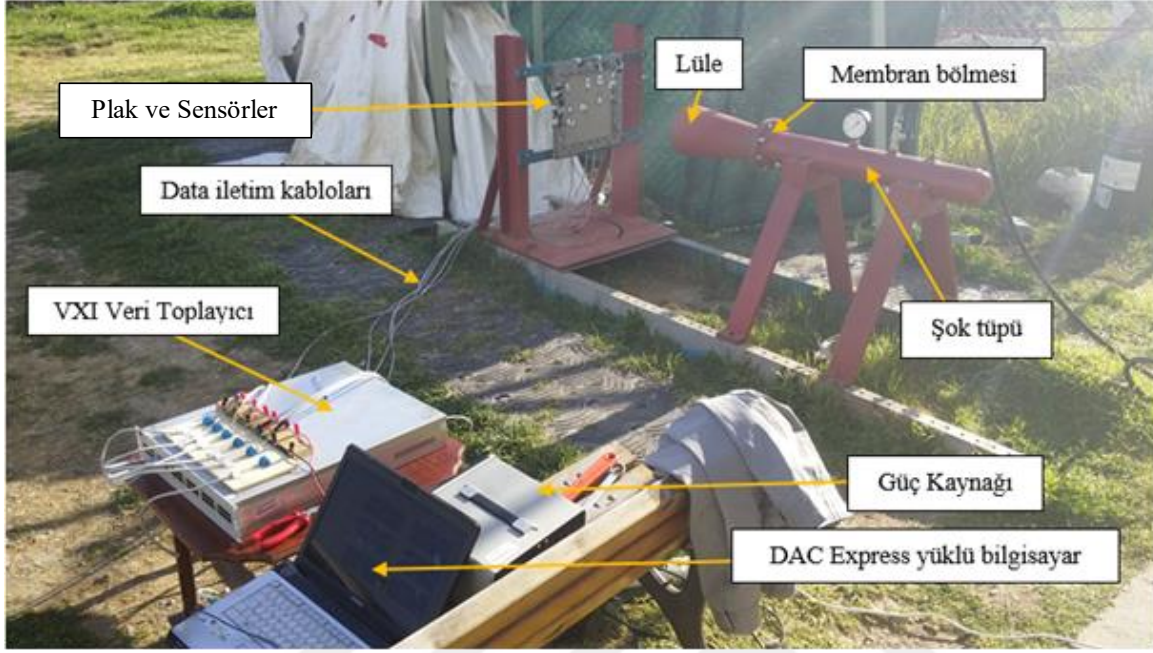
4.1.2 Deney platformu

Basınç aktarımının gerçekleştiği deney platformu ana hatlarıyla çerçeve ve şok tüpünden oluşmaktadır. Deneyin uygulanacağı plak çerçeveye M5 civatalarıyla sabitlendikten sonra çerçeve bağlantı çubuğuna M10 civataları yardımıyla bağlanmaktadır. Şok tüpü ise iç çapı 12 cm, boyu 82 cm olan bir borudur. Şok tüpünün yerden yüksekliği 75 cm'dir. Bir önceki bölümde bahsedilen Hydra Power marka boru şok tüpüne bağlanılarak basınçlı havanın tüpe iletimi sağlanmaktadır. Şok tüpünün ağız kısmı yeterli basınç oluşana kadar kapalı kalması için membran yardımıyla kapatılmaktadır. Kullanılan membran belirli basınç değerine ulaştığında yırtılarak açılmakta ve basınç dalgasını çerçeve üzerindeki kompozit plağa iletmektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 : Patlamadan önce ve sonra membran.

İletilen hava akışının düzenli olması ve basınç değerinin korunması için çapı 19 cm olan lüle, şok tüpünün ucuna bağlanmıştır. Deney düzeneğinin resmi ve kullanılan elemanlar Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4 : Deney düzeneği.

4.1.3 Veri toplama sistemi

Deney sırasında sensörlerden gelecek basınç değerlerinin ölçülmesi amacıyla VXI Technology marka EX1629 model veri toplama sistemi kullanılmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 : VXI EX1629 veri toplama cihazı [19].

EX1629 veri toplama sistemi, strain ve voltaj değerlerinin ölçümünü 48 ayrı kanaldan gerçekleştirebilmektedir. Sistem bu verileri 10 kHz (saniyede 10000 adet veri) ile işleyebilmektedir. İstenirse kanal sayısı 16'ya düşürülerek örnekleme frekansını 25 kHz'e (saniyede 25000 adet veri) çıkarmak mümkündür. Ayrıca EX1629'da bulunan her kanal kendine ait sinyal koşullandırıcı elektronik devreye, ± 8 volt 50mA uyarıcı sinyal kaynağına ve 24 bit analog-dijital çeviriciye sahiptir [19]. Sistem hem ölçüm cihazlarına hem de ölçüm bilgilerinin görüleceği bilgisayara RJ45 Ethernet portu ile

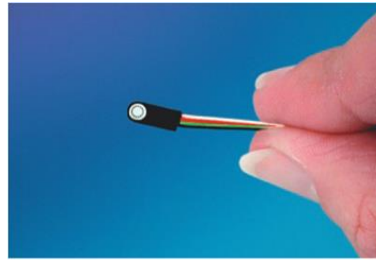
bağlanmaktadır. Voltaj bilgisinin gelebilmesi için RJ45 soketlerinin 3 ve 6 numaralı uçları ölçüm cihazının sense uçlarına bağlanmalıdır.

Alınan verileri bilgisayardan okumak için yine VXI Technology tarafından geliştirilmiş olan ve EX1629 cihazını doğrudan tanıyan DAC Express isimli program kullanılmıştır. Program ilk açıldığında çıkan “Channels” menüsünden çalışması istenen kanalları açmak ve bu kanalların hangi tipte (Strain, Voltage, Radiometric) ölçüm yapacağını belirlemek mümkündür. Ayrıca yine bu menüden besleme voltajı değeri ve filtre değeri girilebilir. “Timebase” menüsünde ise ölçümün başlangıç ve bitiş zamanları ayarlanabilmekte, aynı zamanda örnekleme frekansı girilebilmektedir. “Data Recorder” menüsünde ise açık olan kanallardan hangilerinden veri alınmak isteniyorsa ona ait görsel sinyal görülebilir ve gelen veriler kaydedilebilir. Ayrıca yine bu menüdeyken sistemin kalibrasyon işlemi gerçekleştirilebilir. “Auto Cal” işlemi ile veri toplama sisteminin kalibrasyonu gerçekleştirilmektedir. Ancak bu işlem için cihazın kalibrasyon işleminden önce bir saat boyunca açık kalması gereklidir. “Unstrained voltage” kalibrasyon işlemi ile gelen mutlak verinin sıfırlanması sağlanmaktadır. “Data Viewer” menüsünde ise kaydedilmiş olan veriler görüntülenerek .csv veya .txt formatlarından birinde kaydedilmesi sağlanmaktadır.

4.1.4 Basınç ve gerinim sensörleri

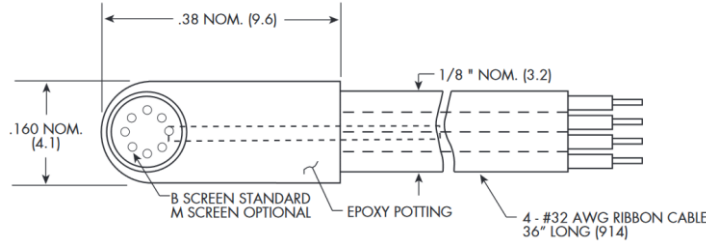
Yapılacak çalışmada plak üzerine etki edecek anlık basınç değerini ölçmek için plağın ön yüzüne Kulite marka LQ-125 model basınç sensörleri yerleştirilmiştir. Arka yüzeyine gelen gerinim değerlerini ölçmek için ise üç eksenli rozet gerinim ölçerler kullanılmıştır.

LQ-125 basınç sensörleri 10 volt besleme ile çalışmaktadır. Basınç sensörünün maksimum ölçüm basıncı 34 bar’dır. Sensör, kablosu hariç, 0.2 gram ağırlıktadır. -55°C ile +120°C aralığındaki sıcaklıklarda operasyonel olarak çalışabilir [20]. Şekil 4.6’da basınç sensörü görünmektedir.



Şekil 4.6 : Kulite LQ-125 basınç sensörü [20].

Sensörün teknik datasında bulunan kalibrasyon katsayısı sayesinde okunan voltaj değerleri, bar cinsinden basınç değerine dönüştürülebilmektedir. Şekil 4.7’de Kulite LQ-125 basınç sensörü şeması görünmektedir.



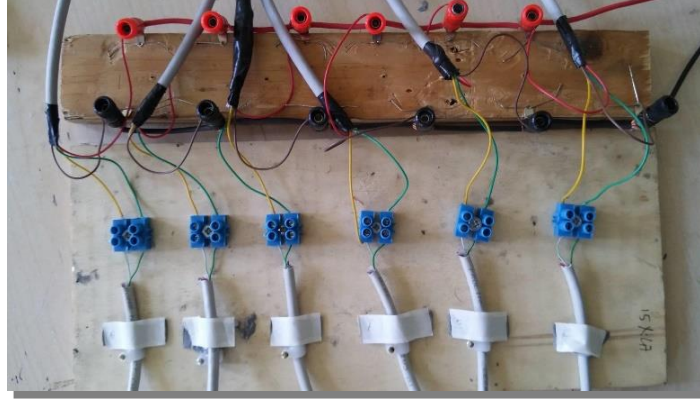
Şekil 4.7 : Kulite LQ-125 basınç sensörü şeması [20].

LQ-125 sensörleri dört farklı renk kablo bulundurmaktadır. Bunlardan kırmızı olanı pozitif besleme, siyah olanı negatif besleme, yeşil olanı pozitif sense ve beyaz olanı da negatif sense uçlarına bağlanmalıdır. Ancak LQ-125 sensörlerinden çıkan kablolar yeterli uzunluğa sahip olmadığı ve hassaslığı nedeniyle zarar görme olasılığı olduğu için erkek RS232 girişine kaynak yapılmış ve üretilen uzatma kablolarına bağlanmıştır. RS232 konnektörüne bağlanan kablo renkleri ve uç numaraları sırasıyla şunlardır: 1-kırmızı, 2-yeşil, 4-beyaz, 5-siyah.

4.1.5 Bağlantılar ve güç kaynağı

Sensörlerin, veri toplama cihazıyla bağlantısını sağlamak için altı adet uzatma kablosu üretilmiştir. Bu kabloların bir ucu dişi RS232 ucuna kaynak yapılmış, diğer ucu ise klemenslere bağlanmak üzere açıkta bırakılmıştır. Dişi RS232 uçlarına bağlanan kabloların renk sıralaması şunlardır: 1-kahverengi, 2-sarı, 4-yeşil, 5-kırmızı. Kablonun açık olan uçlarından kırmızı olan güç kaynağının pozitif ucuna, kahverengi olan güç kaynağının negatif ucuna, yeşil olan klemens yardımı ile sense kablosunun pozitif ucuna ve sarı olan klemens yardımı ile sense kablosunun negatif ucuna bağlanmıştır. RS232 kablonun güç kaynağına ve klemensler ile RJ45 kablolarına bağlantısı Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

VXI EX1629 veri toplama cihazının sağladığı 8 volt besleme, LQ-125 sensörlerinin çalışması için gereken 10 beslemeyi sağlayamadığı için harici güç kaynağı gerekli olmuştur. Bu güç kaynağından gelecek voltajı altı ayrı kabloya paralel dağıtacak şekilde kablolama sistemi yapılmıştır.



Şekil 4.8 : RS232 kablonun güç kaynağına ve klemensler ile RJ45 kablolarla bağlantısı.

Güç kaynağı olarak ilk deneyler dört kanallı 0-30 volt aralığında besleme sağlayabilen, 200 watt gücünde, düşük gürültü değerine sahip Gw-Instek marka GPS-4303 model regülatör ile gerçekleştirilmiştir. Deney kapsamında yapılan bağlantılar ve güç kaynağı olarak ilk deneylerde kullanılan regülatör Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



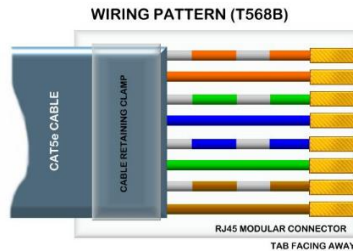
Şekil 4.9 : Güç kaynağı-RJ45 bağlantıları (solda ve sağ üstte) ve GPS4303 regülatör(sağ altta).

Ancak şebeke hattından gelen frekansın sinyal kalitesini etkilemesi nedeniyle sonraki deneylerde güç kaynağı olarak regülatör yerine 10 volt DC akım verebilecek Yuasa marka YTX14-BS model batarya kullanılmıştır (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 : Yuasa YTX14-BS batarya.

Klemenslere bağlanan sense uçlarının veri toplama cihazına aktarılması için ise altı adet kablo bağlantı elemanı üretilmiştir. Bu elemanlara crossover kablolarla görülen T-568B standartına uygun şekilde (1-beyaz/turuncu 2-turuncu 3-beyaz/yeşil 4-mavi 5-beyaz/mavi 6-yeşil 7-beyaz/kahverengi 8-kahverengi) RJ45 konnektör ucu çakılmıştır (Şekil 4.11). Bu sayede kabloyu VXI EX1629 ölçüm cihazına bağlamak mümkün olmuştur. Kablonun diğer tarafında ise 3 ve 6 numaralı uçlar klemenslere bağlanarak sensör ile veri toplama cihazı arasındaki köprü kurulmuştur.



Şekil 4.11 : T568B standardı ile bağlanan RJ45 kablo ucu.

4.2 Takviye Elemanı Deneyleri ve Analizleri

Anlık basınç yükünün plak üzerinde uyguladığı etkinin takviye elemanları ile nasıl etkilendiğini belirleyebilmek için üretilen karbon plak ve takviye elemanları ile deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde üretilen dört kat karbon plak üzerindeki 30 cm genişliğinde ve 30 cm yüksekliğinde bir alan basınca maruz kalmaktadır. Bu plak üzerinde en sol alt köşenin orijin kabul edilmesiyle bir koordinat sistemi oluşturulmuştur.

Plaklar üzerinde yapılan deneylerin ANSYS sonlu elemanlar yazılımında sayısal olarak incelenebilmesi için konuma ve zamana bağlı bir basınç fonksiyonu gereklidir. Bu nedenle daha önceki çalışmalarda kullanılmış olan Denklem 4.1'deki verilen fonksiyon kullanılmıştır [17].

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

Denklemde verilen P konuma ve zamana bağlı basınç değişkenini ifade eder. Denklemdeki a ile b'de plak boyutlarını, P_t tepe noktası basıncını, P_e emme basıncı, t_e basıncın etki ettiği süreyi tanımlamaktadır. Fonksiyonda bulunan u, v, w değişkenleri ise basıncın konuma ve zamana bağlı değişimini ayarlayan ifadelerdir.

Yapılan basınç analizleri sırasında Rayleigh tipi sönümleme katsayıları kullanılmıştır. Viskoz sönüm parametrelerinin hesaplanması için kullanılan ifadeler 4.2'deki denklemlerde verilmiştir [18].

$$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2}$$

$$\delta = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (4.2)$$

Denklemdeki x₁ ve x₂ değerleri, gerinim verilerinde ardışık iki tepe noktası alınarak bulunabilir. Denklemdeki ζ küçük bir değer olarak bulunursa Denklem 4.3'de gösterildiği şekilde sadeleştirilebilir [18].

$$\ln \frac{x_1}{x_2} = 2\pi\zeta \rightarrow \zeta = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{x_1}{x_2} \quad (4.3)$$

Bulunan ζ sayısı Denklem 4.4'de gösterildiği şekilde Rayleigh viskoz sönüm katsayılarını bulmak için kullanılabilir [21].

$$\zeta = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (4.4)$$

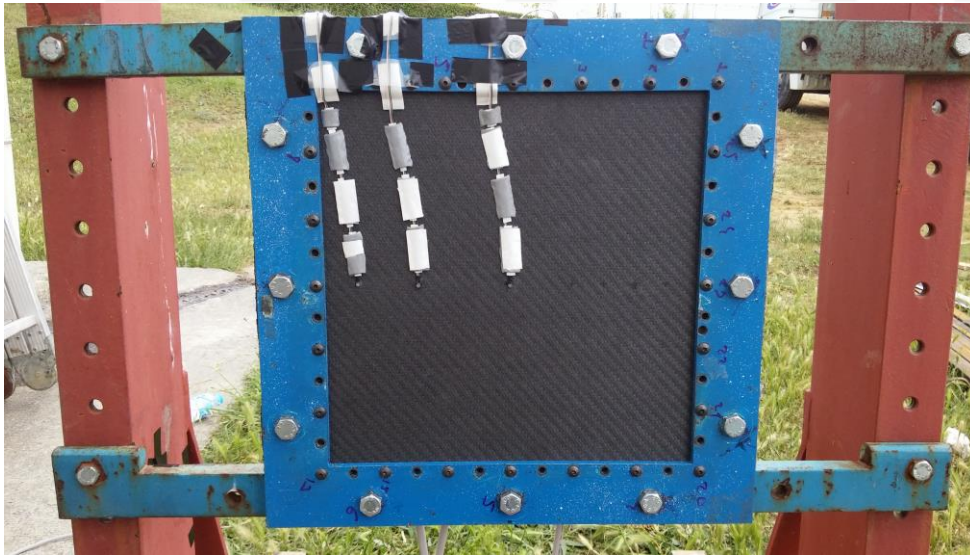
Buradaki ω_i değeri için bölüm 3.2’de elde edilmiş 1. doğal frekans değerleri kullanılmaktadır. Denklemdaki α kütle matris çarpanını β katılık matris çarpanını ifade etmektedir.

4.2.1 Filtre kullanılmadan yapılan deneyler

Basınç ve gerinim verilerini detaylı bir şekilde yakalayabilmek için ilk deneyler veri toplama cihazının filtre seçeneği aktif hale getirilmeden gerçekleştirilmiştir. Deneyler takviyesiz, tek takviyeli, iki takviyeli ve üç takviyeli olmak üzere 4 değişik konfigürasyonda yapılmıştır. Takviye elemanı olarak 1C+PP+3C kullanılmıştır. Karbon plağın ön yüzüne 3 adet basınç sensörü yerleştirilmiştir. Yerleştirilen 106, 110 ve 112 seri numaralı sensörlerin konumları Çizelge 4.1’de verilmiştir (Şekil 4.12).

Çizelge 4.1 : Basınç sensörleri seri numaraları ve konumları.

Sensör Seri No	Sensör x yönünde konumu (cm)	Sensör y yönünde konumu (cm)
Kulite 106	2.5	15
Kulite 110	7.5	15
Kulite 112	15	15



Şekil 4.12 : Basınç sensörleri konumları.

Plağın arka yüzeyine basınç sensörleri ile aynı konuma gelecek şekilde üç adet gerinim ölçer yerleştirilmiştir. Takviye elemanı ile yapılan deneylerde yüzey üzerindeki gerinim ölçerler sökülerek, takviye elemanının üzerine yeni gerinim ölçerler yerleştirilmiştir.

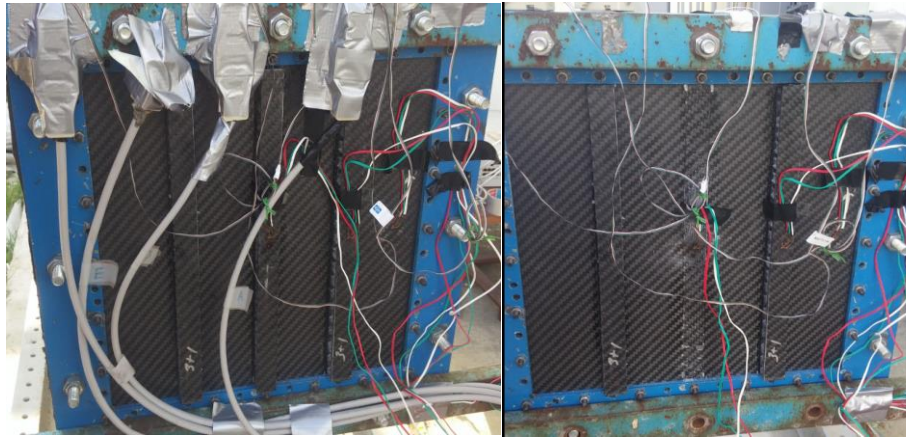
4.2.1.1 Deneyler ve gerinim verileri

Anlık basınç yükünün genel etkisinin belirlenebilmesi için ilk deneyler takviyesiz plak üzerinde yapılmıştır. Takviyesiz eleman ile deneylerin gerçekleştirilmesinin ardından karbon plak üzerine 2 cm eninde takviye elemanının orta kısma dikey olarak yapıştırılması ile tek takviyeli plak elde edilmiştir. Takviyesiz plak ve tek takviyeli plak üzerine yapıştırılan gerinim ölçerler ve kablolama elemanları Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



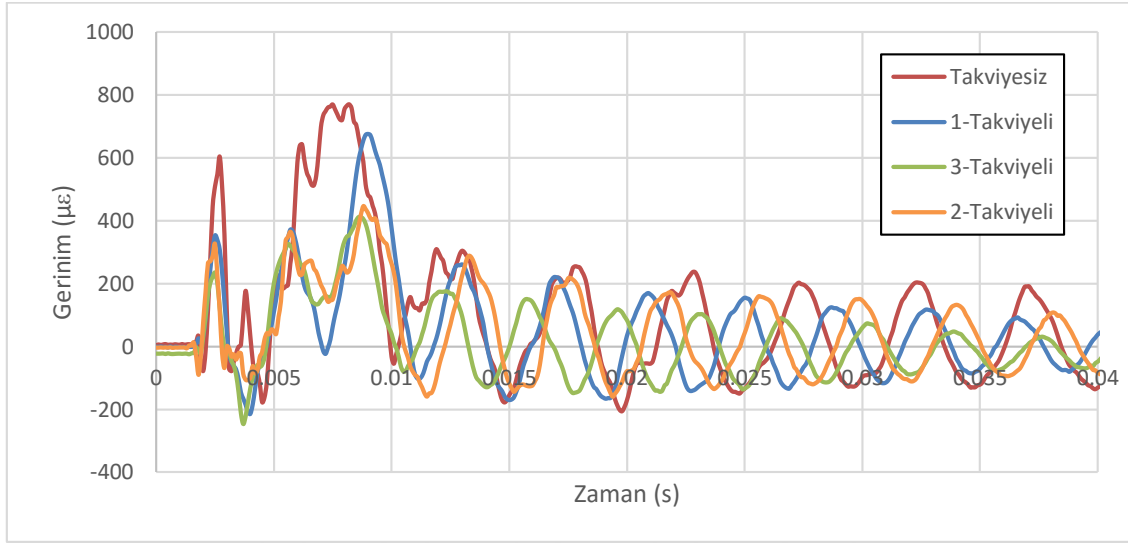
Şekil 4.13 : Takviyesiz plağın (solda) ve tek takviye elemanlı plağın (sağda) deney sırasında arkadan görünüşü.

Üç takviye elemanlı plağı elde etmek için tek takviye elemanlı plak üzerine iki adet takviye elemanı plağın kenarlarından 7.5 cm uzaklıkta dikey olarak yapıştırılmıştır. Üç takviye elemanlı plak ile yapılan deneylerin ardından ortadaki takviye elemanın çıkarılması ve yüzeyin hafifçe zımparalanması ile iki takviye elemanlı plak elde edilmiştir. (Şekil 4.14)

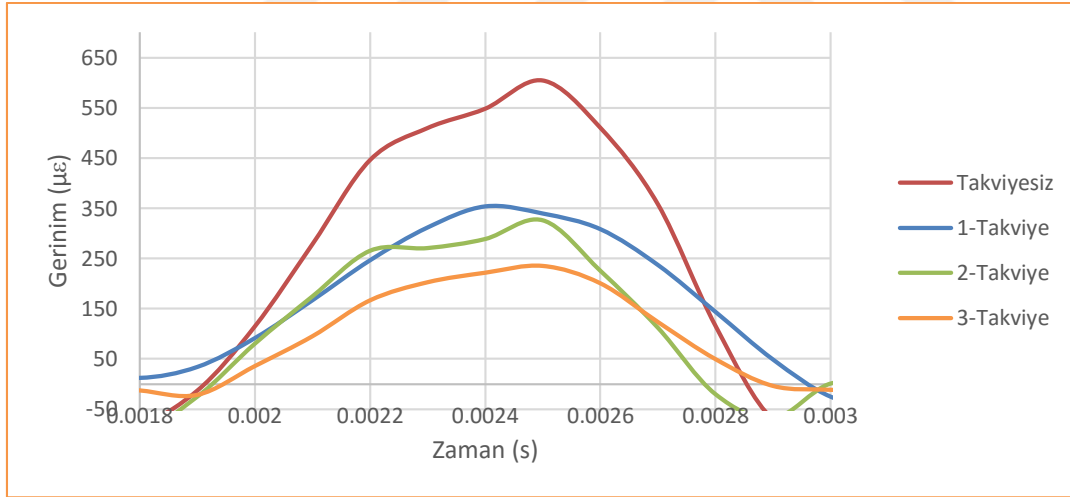


Şekil 4.14 : Üç takviye elemanlı plağın (solda) ve iki takviye elemanlı plağın (sağda) deney sırasında arkadan görünüşü.

Yapılan bu deneylerin ardından elde edilen gerinim değerleri çeşitli şekillerde kıyaslanmıştır. Plakların orta noktasında y yönündeki gerinimlerinin kıyaslanması Şekil 4.15’de verilmiştir. Bu gerinimlerin ilk tepe nokta kıyaslaması Şekil 4.16’da gösterilmektedir.



Şekil 4.15 : Plakların orta noktasında y yönündeki gerinimleri.



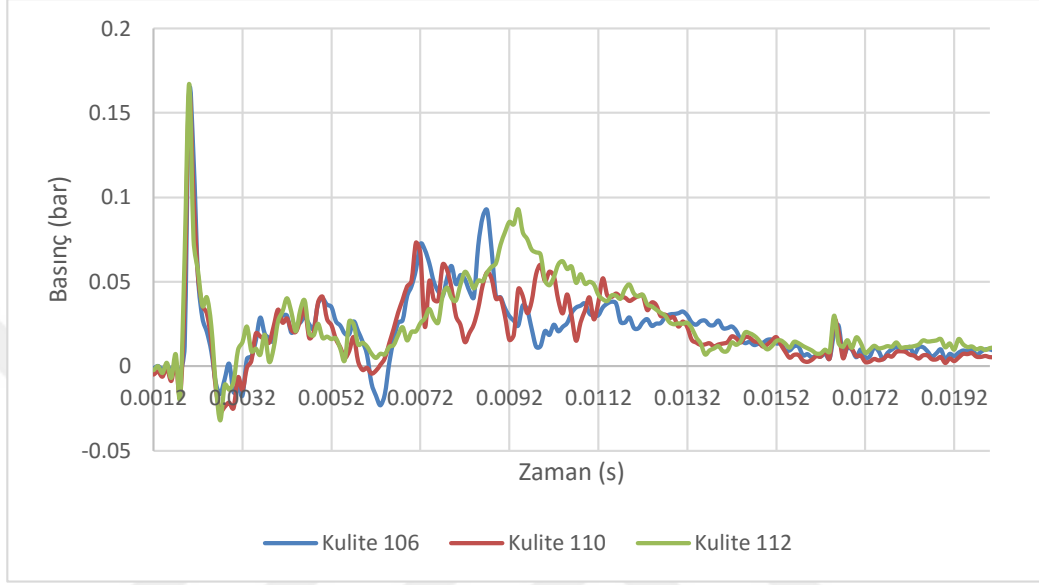
Şekil 4.16 : Plakların orta noktasında y yönündeki gerinimlerinin ilk tepe noktası.

Gerinimlerin kıyaslanması sonucu en büyük gerinim değerinin takviyesiz plakta çıktığı gözlemlenmiştir.

4.2.1.2 Basınç fonksiyonu ve gerinim analizi

Dinamik testleri gerçekleştirilmiş plakların basınç yükü altındaki davranışlarının sayısal olarak incelenmesi istenmiştir. Bu amaç doğrultusunda kısım 4.2’de bulunan basınç fonksiyonu, deneyler sonucunda elde edilen basınç değerlerine

yakınlaştırılmaya çalışılmıştır. Ancak Şekil 4.17’de görülebileceği üzere filtre kullanılmadan yapılan deneylerdeki basınç değerleri dış ortam etkileri ve voltaj değişiminininden dolayı yüksek parazit içermektedir ve fonksiyona yaklaşım gerçekleşmemektedir. Bu sebeple gerinim analizi filtre kullanılmadan yapılan deneylerde uygulanamamıştır.



Şekil 4.17 : Takviyesiz eleman deneyi basınç değerleri.

4.2.2 Filtre kullanılarak yapılan deneyler

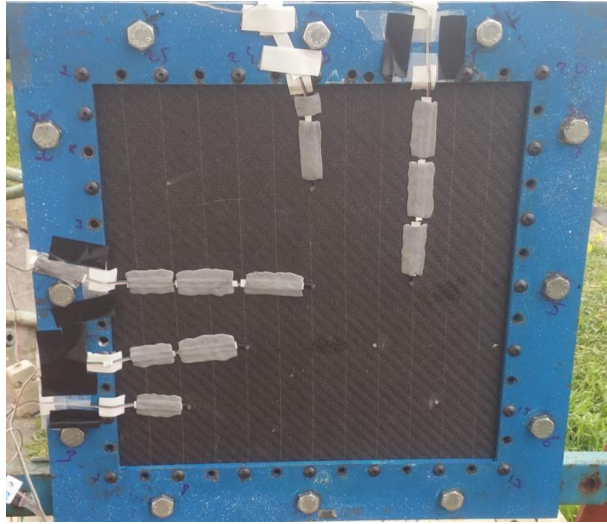
Filtre kullanılmadan yapılan deneyler sonucunda elde edilen verilerin parazitli olması nedeniyle veri toplama cihazının filtre seçeneği aktif hale getirilerek yeni deneyler gerçekleştirilmiştir.

Karbon plağın ön yüzüne 5 adet basınç sensörü yerleştirilmiştir. Yerleştirilen 104, 106, 110, 112 ve 114 seri numaralı sensörlerin konumları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Deneyler takviyesiz ve tek takviyeli olmak üzere 2 değişik konfigürasyonda yapılmıştır. Takviye elemanı olarak 2C+PP+2C kullanılmıştır.

Çizelge 4.2 : Basınç sensörleri seri numaraları ve konumları.

Sensör Seri No	Sensör x yönünde konumu (cm)	Sensör y yönünde konumu (cm)
Kulite 112	15	15
Kulite 110	15	22.5
Kulite 104	22.5	15
Kulite 106	10	10
Kulite 114	5	5

Karbon plağın ön yüzü ve kullanılan basınç sensörleri Şekil 4.18’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18 : Basınç sensörleri konumları.

Plağın arka yüzeyine iki adet gerinim ölçer yerleştirilmiştir. Yerleştirilen gerinim ölçerlerin konumu Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Gerinim ölçer konumları.

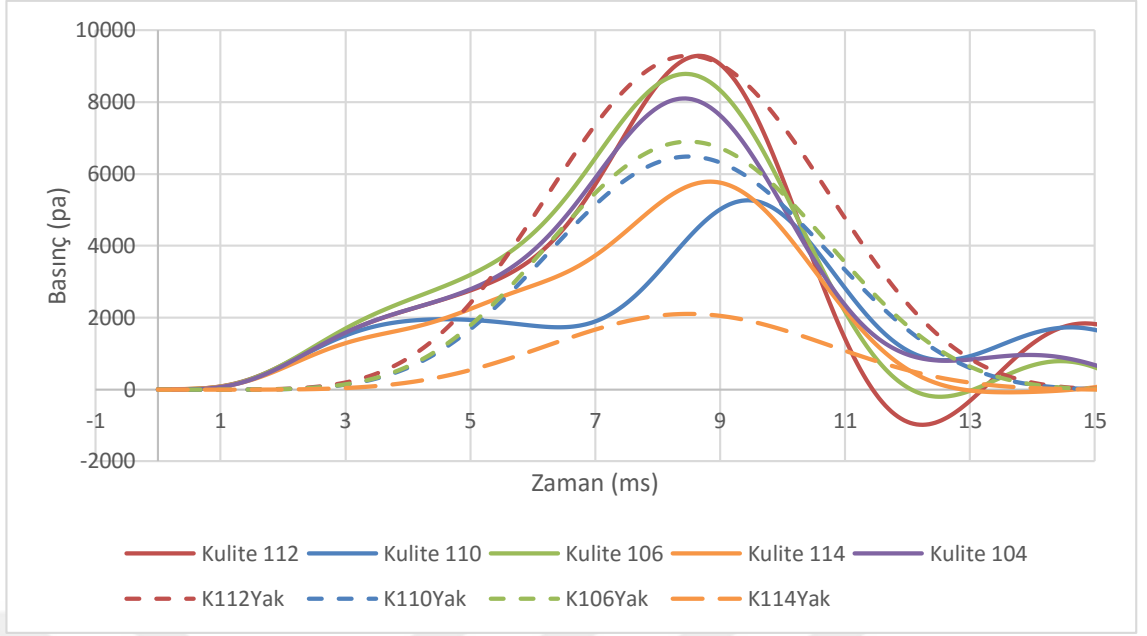
Sensör Seri No	Sensör x yönünde konumu (cm)	Sensör y yönünde konumu (cm)
Gerinim Ölçer 1	15	15
Gerinim Ölçer 2	7.5	15

Deney düzeneğinin hazırlanmasının ardından ilk deneyler takviye elemanı kullanılmadan yapılmıştır. Yapılan deneylerde basınç verilerinin analiz edilebilecek şekilde parazitsiz olaması için çeşitli filtre değerleri denenmiştir. Veriler incelendikten sonra 200 Hz filtre ile yapılan deneyin analiz edilmesine karar verilmiştir.

Elde edilen basınç verileri Bölüm 4.2’de verilen basınç fonksiyonuna yaklaştırılmaya çalışılmıştır. Fonksiyonu gerçek dağılıma yaklaştırmak için takviyesiz plakta kullanılan parametreler Çizelge 4.4’de görülmektedir. Uygun yaklaşım fonksiyonunun zamana bağlı grafiği Şekil 4.19’da gösterilmiştir.

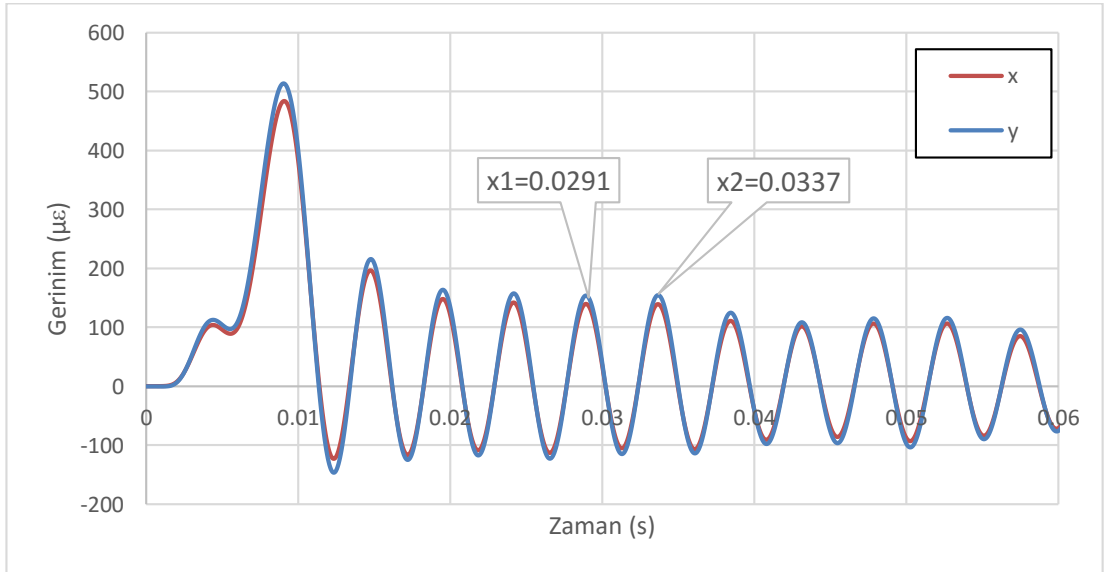
Çizelge 4.4 : Takviyesiz plak basınç fonksiyonu için kullanılan parametreler.

a (m)	b (m)	t_e (s)	u	v	w	P_e (Pa)	P_t (Pa)
0.3	0.3	0.017	3	0.05	0.05	9300	300



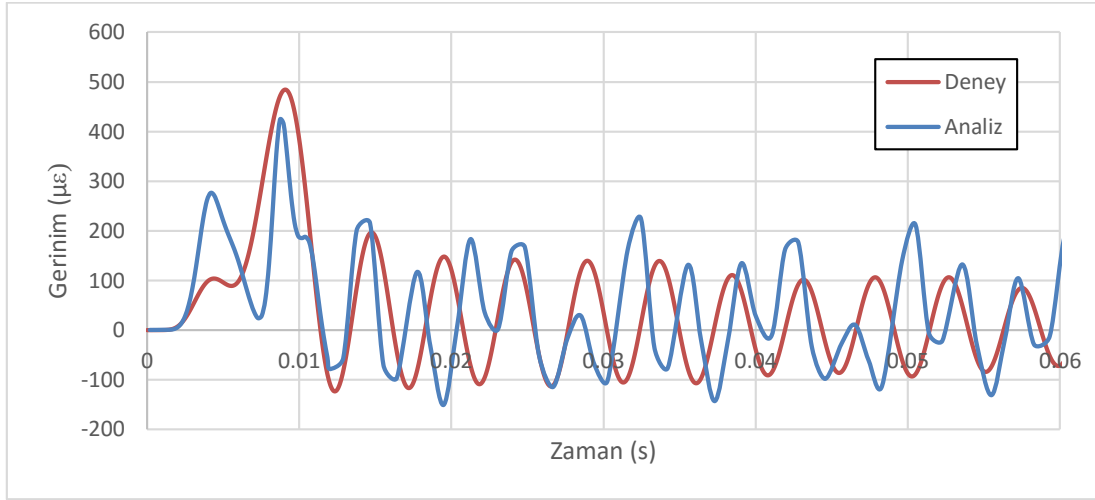
Şekil 4.19 : Takviyesiz plak için deney verileri ve matematiksel yaklaşım fonksiyonu kıyaslaması.

Bulunan basınç yaklaşım fonksiyonu daha sonra ANSYS yazılımında oluşturulmuş modellere uygulanarak analiz yapılmıştır. Rayleigh'in viskoz sönüm parametrelerini bulabilmek için kullanılan x_1 ve x_2 değerleri Şekil 4.20'de gösterildiği üzere 0.0291 ve 0.0337 olarak alınmıştır. Bölüm 4.2'de verilen denklemler kullanılarak yapılan hesaplar sonucu α kütle matris çarpanı 0, β katılık matris çarpanı da 0.0004 olarak belirlenmiştir.

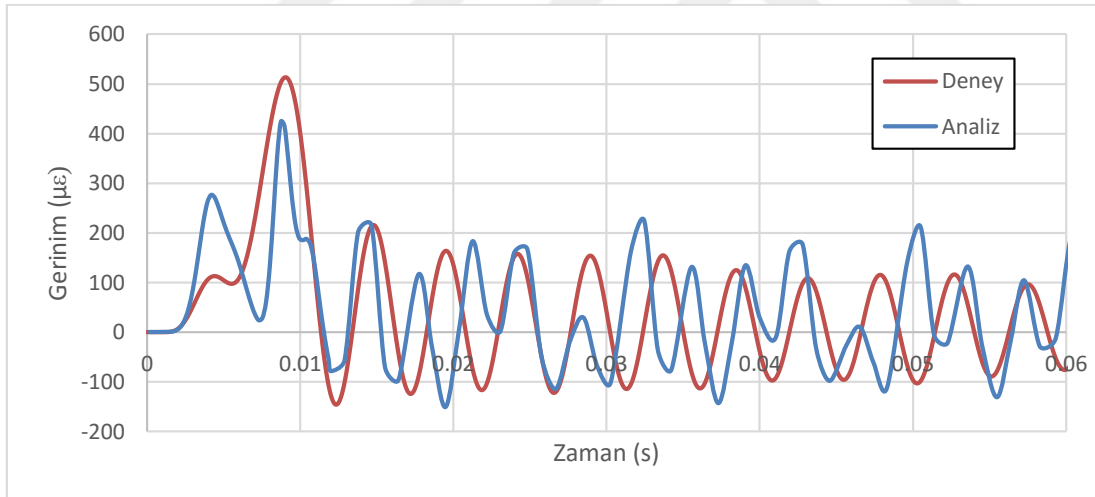


Şekil 4.20 : Takviyesiz plakta sönüm katsayılarının belirlenebilmesi için alınan x_1 ve x_2 değerleri.

Sayısal olarak gerinim verileri elde edilmiş ve elde edilen veriler deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Yapılan analizlerde β katılık matris çarpanı da 0.00001 olarak alınmasının daha uygun sonuçlar verildiği görülmüştür. Takviyesiz plağın orta noktası için deney ve analiz verileri kıyaslaması Şekil 4.21’de ve Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.21 : Takviyesiz plakta arka yüzeyin ortasının x eksenindeki gerinimi ve analiz verileri.

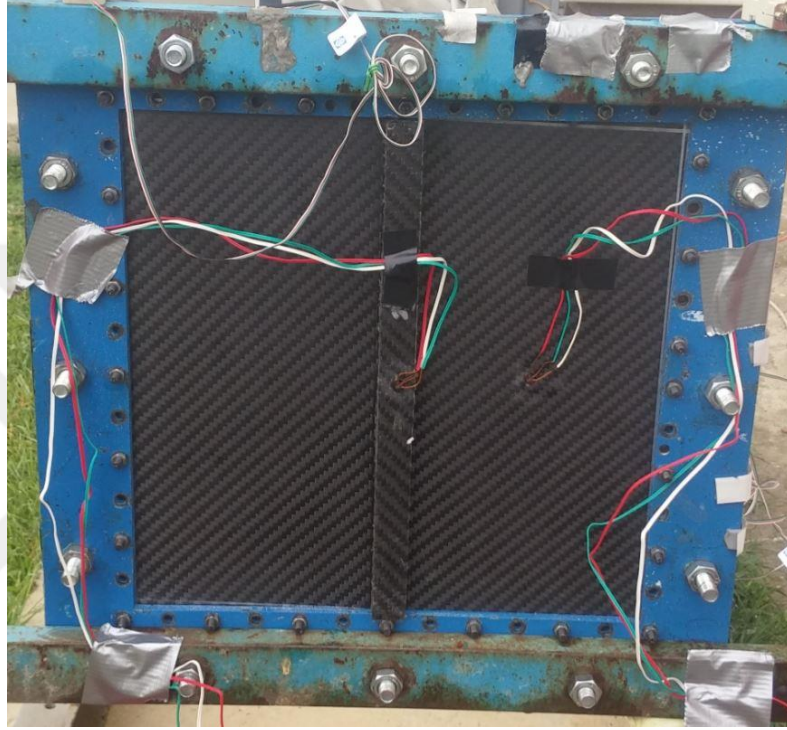


Şekil 4.22 : Takviyesiz plakta arka yüzeyin ortasının y eksenindeki gerinimi ve analiz verileri.

Verilen grafikler incelendiğinde ϵ_x gerinimi maksimum 484.1828 $\mu\epsilon$, ϵ_y gerinimi maksimum 513.2295 $\mu\epsilon$ olarak gözlenmiştir. Yapılan analizde ise orta nokta için maksimum gerinim 426.0663 $\mu\epsilon$ olarak bulunmuştur. Bulunan analiz sonucu ile deney sonuçları arasında x yönünde %12 , y yönünde %17 fark bulunmaktadır. Ancak plağın salınımının devam ettiği süre içerisinde frekanslar açısından uyumsuzluk gözlenmektedir. Bunun nedeni olarak sönüm katsayısının deneysel olarak

belirlenememesi ve üretilen plağın malzeme özelliklerinin analizde kullanılandan farklı olabileceği düşünülmektedir.

Takviyesiz plaktan verilerin elde edilmesinin ardından tek takviyeli plak için deneye geçilmiştir. Bu deneylerde takviye elemanı olarak 2C+PP+2C kullanılmıştır. Şekil 4.23'de takviye elemanlı plağın arka yüzeyi gerinim ölçerler ile birlikte görünmektedir.

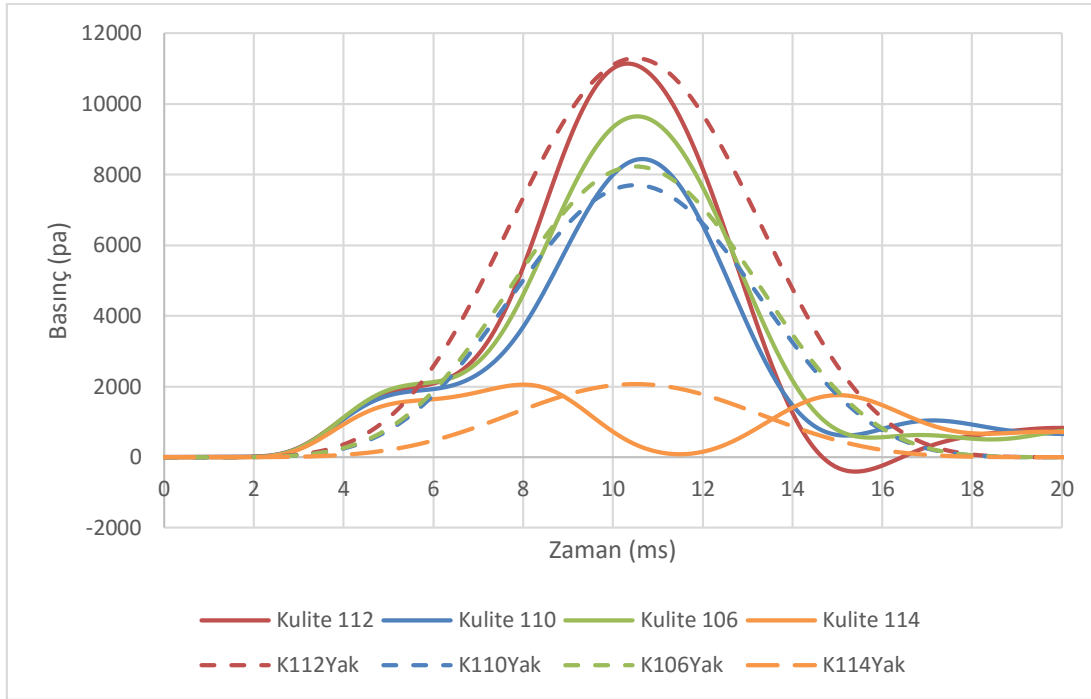


Şekil 4.23 : Takviye elemanlı plağın arka yüzeyi.

Tek takviyeli plakta 200 Hz filtre ile yapılan deneyde fonksiyonu gerçek dağılıma yaklaştırmak kullanılan parametreler Çizelge 4.6'de görülmektedir. Uygun yaklaşım fonksiyonunun zamana bağlı grafiği Şekil 4.24'de gösterilmiştir.

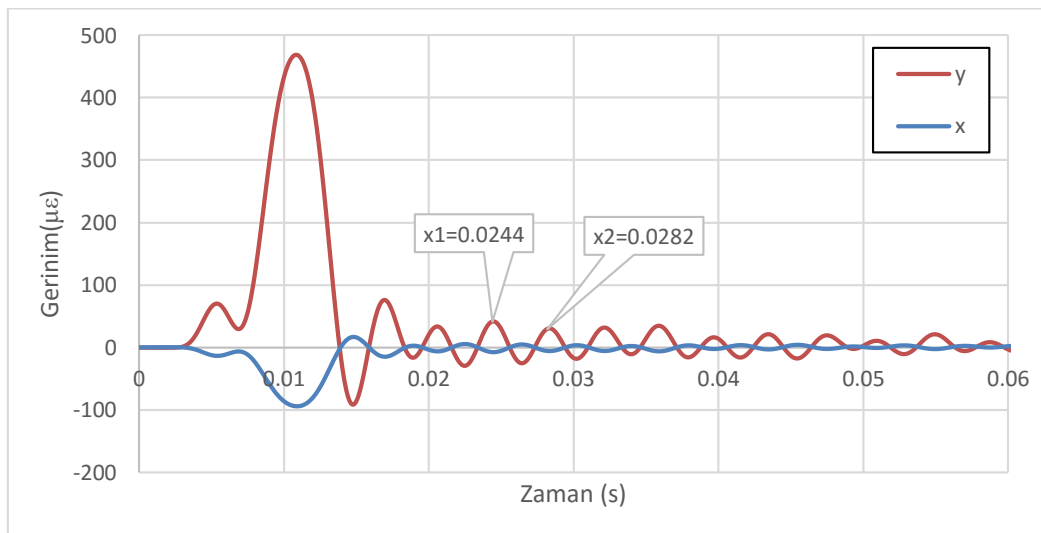
Çizelge 4.5 : Tek takviyeli plakta basınç fonksiyonu için kullanılan parametreler.

a (m)	b (m)	t_e (s)	u	v	w	P_e (Pa)	P_t (Pa)
0.3	0.3	0.021	3	0.5	0.5	11300	1000



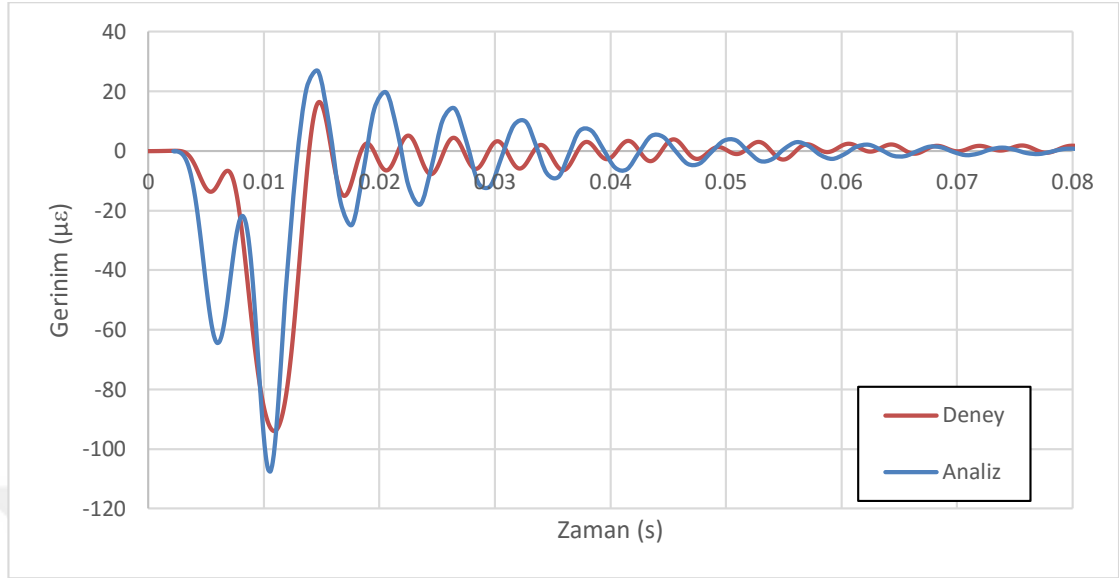
Şekil 4.24 : Tek takviyeli plak için 200 Hz'de yapılan deney verileri ve matematiksel yaklaşım fonksiyonu kıyaslaması.

Takviyeli plakta 200 Hz ile yapılan deneyde Rayleigh viskoz sönüm parametrelerini bulabilmek için kullanılan x_1 ve x_2 değerleri Şekil 4.25'de gösterildiği üzere 0.0244 ve 0.0282 olarak alınmıştır. Bölüm 4.2'de verilen denklemler kullanılarak yapılan hesaplar sonucu α kütle matris çarpanı 0, β katılık matris çarpanı da 0.00025 olarak belirlenmiştir.

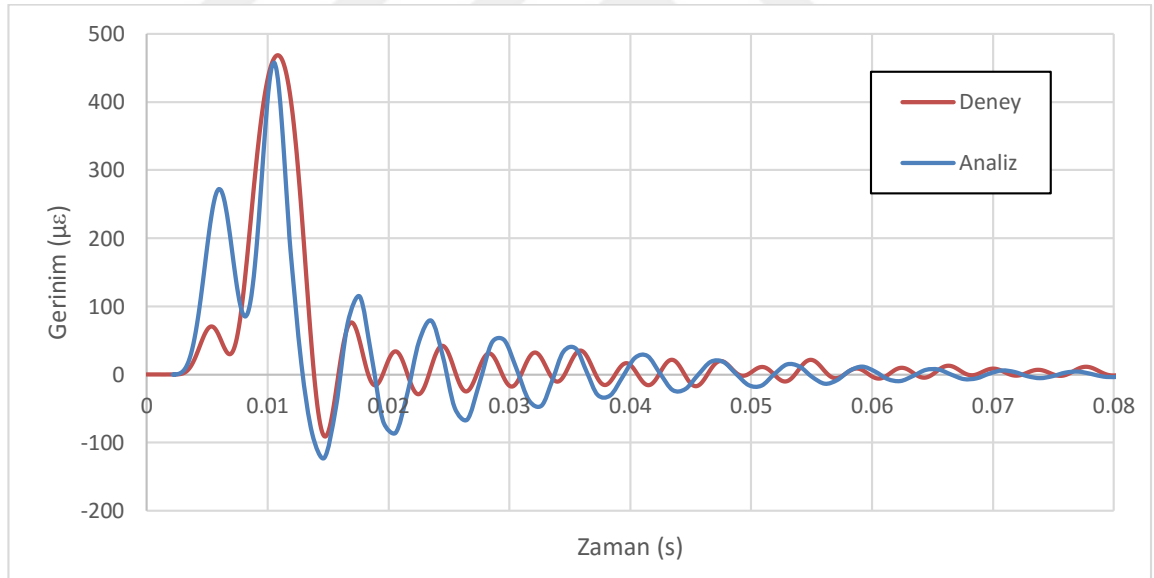


Şekil 4.25 : 200Hz ile yapılan deneydeki takviyeli plakta sönüm katsayılarının belirlenebilmesi için alınan x_1 ve x_2 değerleri.

Tek takviyeli plağın orta noktası için deney ve analiz verileri kıyaslaması Şekil 4.26’da ve Şekil 4.27’de verilmiştir.



Şekil 4.26 : Tek takviyeli plakta arka yüzeyin ortasının x eksenindeki gerinimi ve analiz verileri.



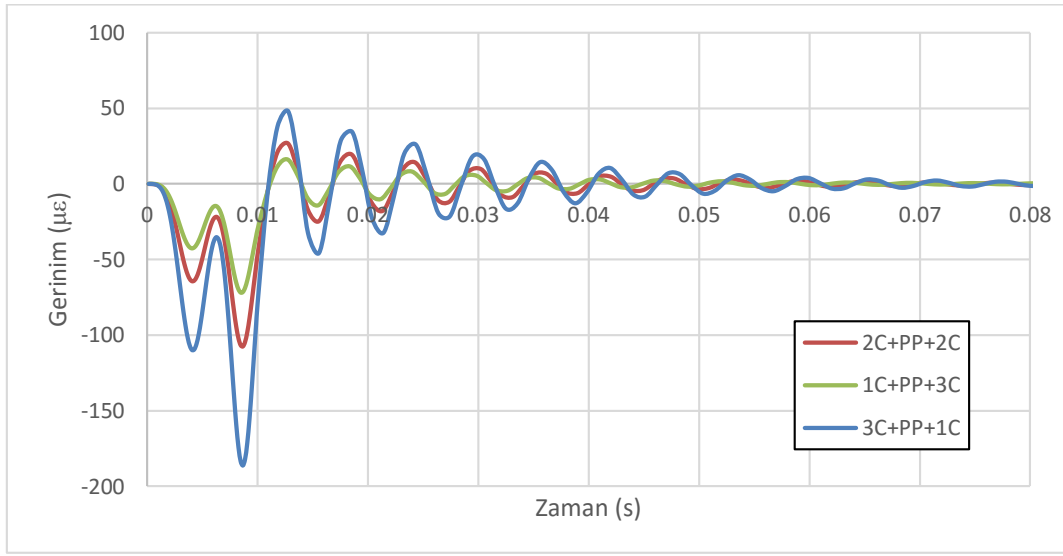
Şekil 4.27 : Tek takviyeli plakta arka yüzeyin ortasının y eksenindeki gerinimi ve analiz verileri.

Deneyde ϵ_x gerinimi minimum $-94.0171 \mu\epsilon$ olarak elde edilirken, analiz sonucu bu değer %14.2 farkla -107.554 olarak bulunmuştur. Deneyde ϵ_y gerinimi maksimum $468.4393 \mu\epsilon$ olarak elde edilirken, analiz sonucu bu değer %2.2 farkla 457.815 olarak bulunmuştur. Plağın salınımının devam ettiği süre içerisinde yine frekans

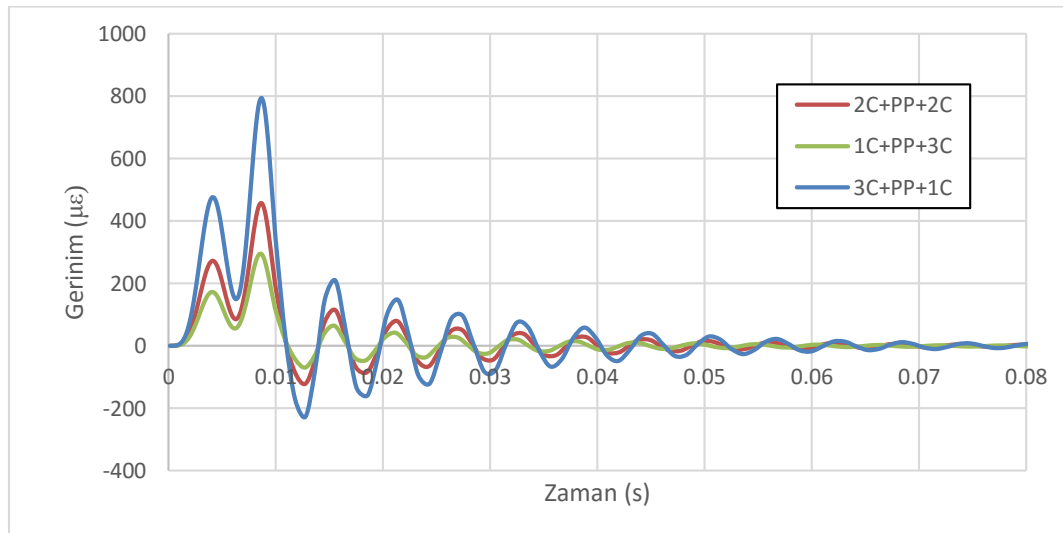
uyumsuzluğu görünmesine karşın gerininin sönümlendiği zaman dilimi deney ve analizde uyumlu çıkmaktadır.

4.2.3 Parametrik Çalışma

Takviye elemanının değişik konfigrasyonlarda kullanılması ile oluşabilecek değişik gerinim değerlerinin incelenmesi için ANSYS yazılımında parametrik çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada Çizelge 4.7’de bulunan veriler kullanılarak elde edilen basınç fonksiyonu kullanılmıştır. Şekil 4.28’de ve Şekil 4.29’da bu çalışmalardan elde edilen grafikler gösterilmiştir.



Şekil 4.28 : Tek takviyeli plakta x eksenindeki gerinimlerin takviye elemanının karbon tabakaları ile değişimi.



Şekil 4.29 : Tek takviyeli plakta y eksenindeki gerinimlerin takviye elemanının karbon tabakaları ile değişimi.

Tek takviyeli plakta, takviye elemanının üst ve altında bulunan karbon tabakalarının sayısı ile gerinim değişimini ölçmek için 1C+PP+3C, 2C+PP+2C, 3C+PP+1C takviye elemanları ile de analiz yapılmıştır. Takviyeli plağın orta noktası için takviye elemanı karbon katmanı değişimi verilerinin kıyaslaması x yönünde Şekil 4.28’de, y yönünde Şekil 4.29’da verilmiştir. Verilerden görülebileceği üzere takviye elemanının üstündeki tabaka sayısı arttırıldıkça gerinim değeri düşmektedir.

4.3 Anlık Basınç Yüğü Fonksiyonu Deneyi

TÜBİTAK 114M404 projesi kapsamında daha sonraki çalışmalarda kullanılmak üzere bir basınç fonksiyonunun bulunması üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla rijit bir plak üzerine beş adet basınç sensörü yerleştirilerek basınç değerlerinin deneysel incelenmesi sonucu analitik bir basınç fonksiyonu elde edilmiştir.

Deneyin üstünde gerçekleştiği rijit plak 29.5 cm genişliğinde ve 29.5 cm yüksekliğinde bir alanda basınca maruz kalmaktadır. Rijit plaknın en sol alt köşesi orijin kabul edilerek iki boyutlu bir koordinat sistemi oluşturulmuştur. Şekil 4.30’da rijit plak üzerindeki basınç sensörleri ve bağlantıları gösterilmektedir.



Şekil 4.30 : Basınç sensörleri(solda) ve RS232 bağlantıları(sağda).

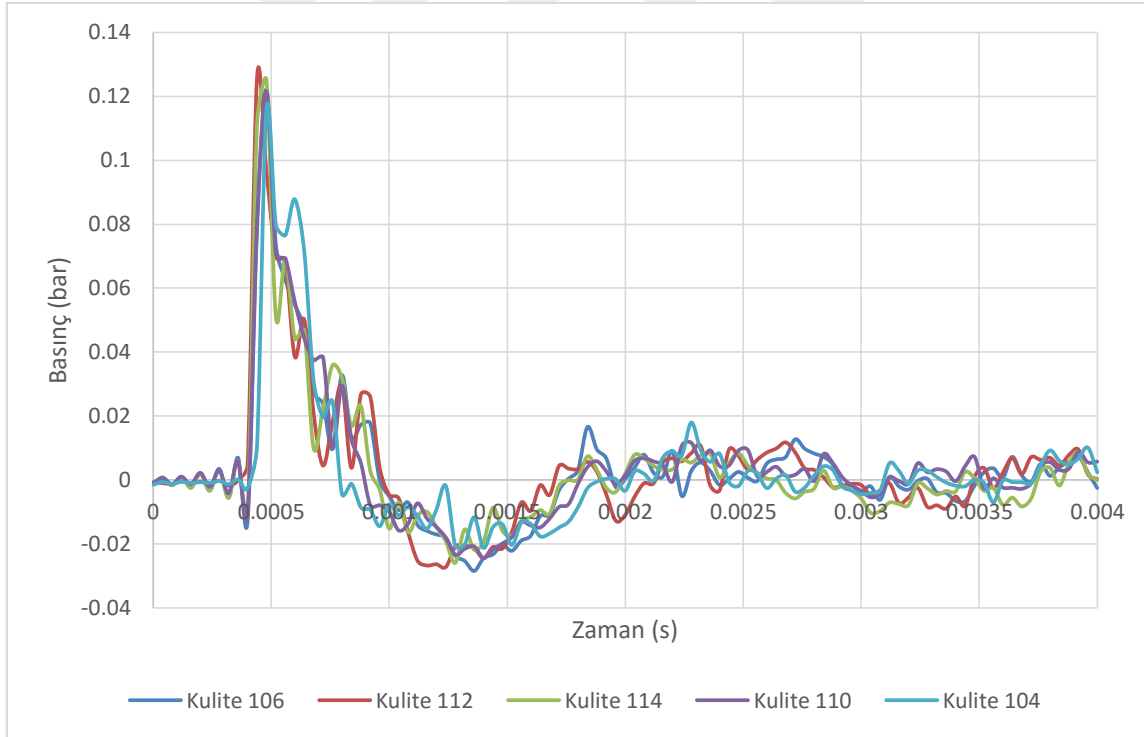
Basınç gradyeninin optimal şekilde elde edilebilmesi için sensörler plağın köşegeni üzerindeki hatta yerleştirilmiştir. Mevcut sensörlerden bir kısmı ise doğrulama için orijinden eşit uzaklıkta başka bir konuma yerleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılmış olan deney için basınç sensörlerinin seri numaralarına göre konum bilgileri Çizelge 4.6’da verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Basınç sensörleri seri numaraları ve konumları.

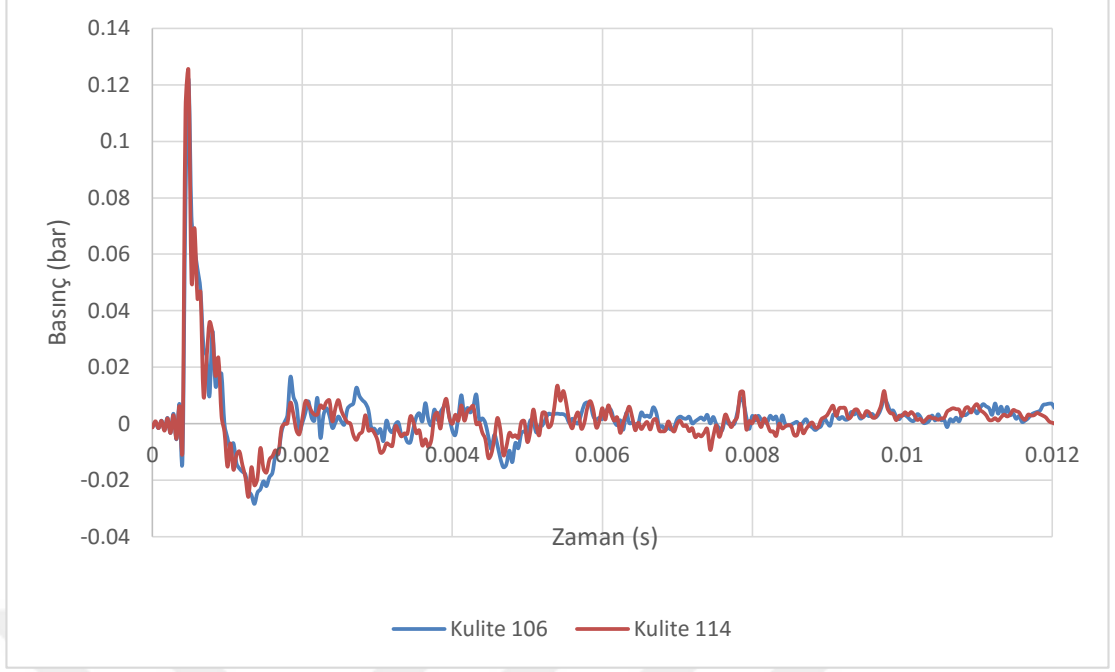
Sensör Seri No	Sensör x yönünde konumu (cm)	Sensör y yönünde konumu (cm)
Kulite 104	3.688	3.688
Kulite 106	14.75	22.12
Kulite 110	7.37	7.37
Kulite 112	14.75	14.75
Kulite 114	9.54	9.54

Bu deneyde köşegen üzerine yerleştirilen 104, 110, 114 ve 112 seri numaralı sensörler basınç dağılımını bulmakta kullanılırken 106 numaralı sensör veri doğrulaması için kullanılmaktadır.

Yapılan deneyde tüm basınç sensörlerinden alınan veriler Şekil 4.31’de gösterilmiştir. Doğrulama için kullanılan 114 ve 106 seri numaralı sensörlerin verileri ise Şekil 4.32’de detaylı olarak verilmiştir. Şekil üzerinden de görüldüğü gibi veriler iyi bir uyum göstermektedirler.



Şekil 4.31 : Basınç sensörleri veri grafiği.



Şekil 4.32 : 106 ve 114 seri numaralı basınç sensörlerinin veri grafiğı.

Deneylerin sonucunda elde edilen verilerden bütün basınç değerlerine uygulanabilecek genel bir analitik basınç fonksiyonu çıkarılmıştır. Bu basınç fonksiyonu, bir Lagrange interpolasyon polinomu ile, noktasal değerler cinsinden aşağıda görüldüğü şekilde ifade edilmiştir (4.5).

$$P(r, t) = \sum_{i=1}^n \frac{\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (r - r_k)}{\prod_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (r_i - r_k)} P_i(t) \quad (4.5)$$

Burada r , plak kesitinin orta noktasına olan uzaklığa karşılık gelmektedir. Bu koordinat sisteminden kartezyen koordinat sistemine geçiş aşağıdaki şekilde yapılacaktır (4.6).

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4.6)$$



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında karbon epoksi kompozit plakğın anlık basınç yüküne takviyeli ve takviyesiz olarak verdiği cevaplar incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda ayrıca kompozit plağın üretim teknikleri araştırılmış, plağın modal analizi yapılmış, anlık basınç için genel bir fonksiyon tanımlanmaya çalışılmıştır.

Yapılan çalışmada kompozit plak üretimi için reçine kalitesinin son derece önemli olduğu gözlenmiş, uygun reçinenin kullanılmaması durumunda üretilen kompozit plağın mekanik özelliklerinin oldukça düştüğü belirlenmiştir. Bu bağlamda ileride yapılacak çalışmalar için prepreg malzemelerin kullanılmasının daha doğru olacağı düşünülmüştür.

Ayrıca çalışma sırasında anlık basınç yükü hakkında pek çok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalardan elde edilen bulgular doğrultusunda anlık basınç yükünün saptanmasının oldukça hassas bir işlem olduğu ve verileri elde etmek için kurulan deney düzeneğinin bütün elemanlarına büyük hassasiyet gösterilmesi gerektiği belirlenmiştir. Basınç deneyleri için kullanılan sistemlerin dışarıdan gelebilecek parazit sinyallere karşı yalıtılmasının son derece önemli olduğu saptanmıştır. Bu çalışmada kullanılan veri toplama sisteminin ise yeterli olmadığı, ilerleyen çalışmalar için daha kapsamlı ve dış sinyallere karşı korumalı bir veri toplama cihazının gerekliliği düşünülmektedir. Anlık basınç yükü için daha önceki çalışmalarda kullanılan fonksiyonun yanı sıra yeni bir fonksiyon tanımlanmaya çalışılarak daha sonraki çalışmalarda doğrulanmanın artırılması amaçlanmaktadır. Kullanılan membranın ise tutarlı basınç değerlerinde patladığı gözlenmiştir. Ancak patlama esnasında membranda oluşan plastik şekil değişimi hava akımının karakteristiğini değiştirebilmektedir.

Bu çalışmanın devamı olarak kompozit plakların ve takviye elemanlarının değişik geometrilerde verdiği farklı tepkilerin incelenmesinin önemli olduğu düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] **Tekalur S.A., Shukla A., Shivakumar K.** (2008). Blast resistance of polyurea based layered composite materials, *Composite Structures*, 84 (3), 271–281.
- [2] **Gardner N., Wang E., Kumar P., Shukla A.** (2011). Blast Mitigation in a Sandwich Composite Using Graded Core and Polyurea Interlayer, *Experimental Mechanics*, 52 (2), 119-133.
- [3] **Turkmen, H. S., Mecitoglu, Z.** (1999). Dynamic response of a stiffened laminated composite plate subjected to blast load, *Journal of Sound and Vibration*, 221 (3), 371–389.
- [4] **Hanssen, A. G., Enstock, L., Langseth, M.** (2009). Close-range blast loading of aluminium foam panels, *International Journal of Impact Engineering*, 27 (6), 593–618.
- [5] **Andrews , E. W., Moussa, N. A.** (2008). Failure mode maps for composite sandwich panels subjected to air blast loading, *International Journal of Impact Engineering*, 36 (3), 418–425.
- [6] **Fatt, M. S. H., Palla, L.** (2009). Analytical modeling of composite sandwich panels under blast loads, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 11 (4), 357-380.
- [7] **Kazanci, Z., Mecitoglu, Z.** (2008). Nonlinear dynamic behavior of simply supported laminated composite plates subjected to blast load, *Journal of Sound and Vibration*, 317 (3-5), 883–897.
- [8] **LeBlanc a, J., Shukla, A., Rousseau, C., Bogdanovich, A.** (2006). Shock loading of three-dimensional woven composite materials, *Composite Structures*, 79 (3), 344–355.
- [9] **Dolce, F., Meo, M., Wright, A., French, M.** (2010). Structural response of laminated composite plates to blast load, *Plastics Rubber and Composites* 39 (3-5) 180-188.
- [10] **Bahei-El-Din Y. A., Dvorak G. J., Fredricksen O. J.** (2006). A blast-tolerant sandwich plate design with a polyurea interlayer, *International Journal of Solids and Structures* 43 (25-26) 7644–7658.
- [11] **Hause T., Librescu L.** (2007). Dynamic response of doubly-curved anisotropic sandwich panels impacted by blast loadings, *International Journal of Solids and Structures* 44 (20), 6678–6700.
- [12] **Goel M. D., Chakraborty T., Matsagar V. A.** (2012). Dynamic Response Of Steel-Sand Composite Stiffened Plates Underimpulsive Loading, *Journal Of Battlefield Technology*, 15 (3), 7.

- [13] **Matsagar V. A.** (2013). Computing Stress and Displacement Response of Composite plates under blast, *Disaster Advances*, 7 (1), 23-38.
- [14] **SP Systems**, 2006. Guide to Composites.
- [15] **CamElyaf Sanayii**, 2009. CTP Teknolojisi.
- [16] **Hexion Speciality**, 2008. Chemicals Laminating Resin MGS L285 Ürün Kataloğu.
- [17] **Ömercikoğlu, A.**, (2009). *Metal katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü altındaki dinamik cevabın incelenmesi.* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] **Ezer, O. A.**, (2010). *Sönümlü takviye ile güçlendirilmiş katmanlı kompozit bir plağın anlık basınç yükü altındaki dinamik davranışı.* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] **VXI Technology** <<http://www.vtiinstruments.com/Files/datasheet/EX1629.pdf>>, erişim tarihi 11.10.2016.
- [20] **Kulite** <<http://www.kulite.com/docs/products/LQ-080.125.pdf>>, erişim tarihi 11.10.2016.
- [21] **Chowdhury I., Dasgupta S. P.** (2003). Computation of Rayleigh Damping Coefficients for Large Systems, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 43, 6855-6868.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Bilgehan Özcan
Doğum Tarihi ve Yeri : İzmir, 1991
E-posta : ozcanbi@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uzay Mühendisliği