

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KATMANLI ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ PLAKLARIN
ANLIK BASINÇ YÜKÜNE CEVABININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ertan TENGİZ**

Anabilim Dalı : Uçak ve Uzay Mühendisliği

Programı : Uçak ve Uzay Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Halit S. Türkmen

HAZİRAN 2010

**KATMANLI ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ PLAKLARIN
ANLIK BASINÇ YÜKÜNE CEVABININ İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Ertan TENGİZ
(511081107)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 14 Haziran 2010

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Halit S. TÜRKMEN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Zahit MECİTOĞLU (İTÜ)
Y. Doç. Dr. Şenol ATAÖĞLU (İTÜ)**

HAZİRAN 2010

ÖNSÖZ

Bu çalışmada katmanlı çekirdekli sandviç plağın anlık basınç yükü altındaki dinamik davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sandviç plak üç farklı çeşit çekirdek malzemesi kullanılarak üretilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında, statik ve serbest titreşim testleri ile anlık basınç yükü deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal kısmında ise, statik, serbest titreşim ve geçici (transient) sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilerek deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmamın her aşamasında bana yol gösteren ve yardımını esirgemeyen danışman hocam sayın Doç. Dr. Halit Süleyman Türkmen'e ve önerileri ile çalışmamın gelişimine katkıda bulunan sayın Prof. Dr. Zahit Mecitoğlu'na en derin saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca deneysel çalışmalar sırasında iyi niyetlerini ve yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Demet Keçeci Balkan ile ROTAM çalışanlarından Aytekin Güven ve Müslüm Çakır'a, dostluğu ve desteği ile çalışma arkadaşım Oya Acar Ezer'e ve lisansüstü eğitimim süresince verilen burs ile eğitimimi ve çalışmamı destekleyen 108M131 Numaralı "Viskoelastik Çekirdeğe Sahip Sandviç Kompozit Plakların Anlık Basınç Yükü Altındaki Davranışının Teorik ve Deneysel İncelenmesi" konulu TÜBİTAK projesini finanse eden TÜBİTAK'a teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak, hiçbir zaman benden desteğini esirgemeyen, beni bugünlere getiren anneme sonsuz teşekkür ederim.

Mayıs 2010

Ertan TENGİZ

(Uçak Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
2. SANDVIÇ KOMPOZİTLER.....	7
2.1 Sandviç Yapı Kavramı	7
2.2 Çekirdek Kısım	8
2.3 Sandviç Yapıların Avantajları	9
3. SANDVIÇ PLAK İMALATI	11
3.1 Malzeme Seçimi	11
3.2 Sandviç Plakın İmalat Süreci	14
4. SANDVIÇ PLAĞIN STATİK TESTLERİ.....	19
4.1 Giriş	19
4.2 Gerinim Ölçer Yapıştırılması	19
4.3 Statik Testlerin Yapılması	21
5. SANDVIÇ PLAĞIN DİNAMİK TESTLERİ	25
5.1 Deney Platformu	25
5.2 Kompresör Ve Basınç Tankı	27
5.3 Basınç Duyargaları	28
5.3.1 Basınç duyargalarının sandviç plak üzerindeki konumları	29
5.4 Membranlar	32
5.5 Sandviç Plakın Anlık Basınç Yüğü Deneylerinin Akış Şeması	34
5.6 Sandviç Plakın Serbest Titreşim Testi	36
6. SANDVIÇ PLAĞIN SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ VE SONUÇLARI	37
6.1 Sonlu Elemanlar Modeli.....	37
6.1.1 Geometri ve malzeme	37
6.1.2 Çözüm ağı ve sınır koşulları	38
6.2 Statik Sonlu Elemanlar Analizi	39
6.3 Serbest Titreşim Sonlu Elemanlar Analizi	41
6.4 Geçici Sonlu Elemanlar Analizi	42
6.5 Çekirdek Sırası Değiştirilerek Geçici Sonlu Elemanlar Analizi	46
7. DEĞERLENDİRME	57
KAYNAKLAR	59
EKLER.....	61
ÖZGEÇMİŞ.....	63

KISALTMALAR

PUR	: Poliüretan
PS	: Polistiren
PVC	: Polivinil klorür
PMI	: Polimat akrilamid
PEI	: Polietheremid
PF	: Polifenolik
RC	: Reçine sabiti
FEA	: Sonlu eleman analizi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Aramid bal peteği ve Cam/Epoksi malzeme özellikleri.....	12
Çizelge 3.2 : Lexan® ve Airex®'in malzeme özellikleri [20,21].	13
Çizelge 3.3 : Kumaş cinslerine göre RC katsayıları [22]	15
Çizelge 4.1 : Gerinim ölçer bilgileri [23].	20
Çizelge 4.2 : Dinamik gerinim ölçüm cihazı ile G1 ve G2 gerinim ölçerlerinden okunan ortalama gerinim değerleri ($\mu\epsilon$)	23
Çizelge 4.3 : Statik gerinim ölçüm cihazı ile G1 ve G2 gerinim ölçerlerinden okunan gerinim değerleri ($\mu\epsilon$).	23
Çizelge 5.1 : Sandviç plak katmanları.	32
Çizelge 6.1 : Malzeme kalınlık ve yoğunlukları.....	38
Çizelge 6.2 : Test ve analiz sonucu elde edilen gerinim değerlerinin ($\mu\epsilon$) karşılaştırması	41
Çizelge 6.3 : Serbest titreşim testi ve analizi sonucu 1.moda karşılık gelen doğal frekansın kıyaslanması	42
Çizelge 6.4 : Basınç fonksiyonunda kullanılan parametreler.	43
Çizelge 6.5 : Plak konfigürasyonlarının katmanları	46
Çizelge 6.6 : İki konfigürasyondaki yer değiştirme, ϵ_x ve σ_x 'in maksimum değerlerinin karşılaştırması.....	56
Çizelge 6.7 : İki konfigürasyondaki τ_{xy} ve γ_{xy} 'nin maksimum değerlerinin karşılaştırması	56

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Sandviç yapı kısımları [15]	7
Şekil 2.2 : Çekirdek yapı tipleri [16]	8
Şekil 2.3 : Bal peteği yapılar [17].....	9
Şekil 3.1 : Sandviç plak malzemelerinin işlenmemiş hali	14
Şekil 3.2 : Heatcon marka kompozit imalat masası.....	15
Şekil 3.3 : Sandviç plağın kompozit imalat masasına yerleştirilmesi.	16
Şekil 3.4 : İmalatı tamamlanan sandviç plağın önden görünüşü.	17
Şekil 3.5 : Sandviç plağın yandan görünüşü.....	17
Şekil 4.1 : Plağın ankastre olarak bağlanması.	19
Şekil 4.2 : Plağın arka yüzeyindeki gerinim ölçerlerin şematik gösterimi.	20
Şekil 4.3 : Yayılı yük uygulamasının yapıldığı ahşap kutu.	21
Şekil 4.4 : VXI EX1629 dinamik gerinim ölçüm cihazı	22
Şekil 4.5 : TC-31K statik gerinim ölçüm cihazı	22
Şekil 5.1 : Deney platformunun tasarım çizimi [8]	26
Şekil 5.2 : Üretilen deney platformu.....	26
Şekil 5.3 : Kompresör ve basınç tankı	28
Şekil 5.4 : Measurement Specialties marka basınç duyargası	29
Şekil 5.5 : Basınç duyargası konumlarının şematik gösterimi.	30
Şekil 5.6 : Basınç duyargalarının konumları ve koruma altına alınması	31
Şekil 5.7 : Gerinim ölçerlerin konumları ve duyarga soketlerinin koruma altına alınması.....	31
Şekil 5.8 : Cam/Epoksi membranın yırtılmadan önceki ve sonraki hali	33
Şekil 5.9 : Cam/Epoksi membranların hazırlanması.	33
Şekil 5.10 : Deney akış şeması.	34
Şekil 5.11 : Sandviç plağın 1.moduna karşılık gelen doğal frekansı.....	36
Şekil 6.1 : Shell281 elemanı [25].	38
Şekil 6.2 : Sandviç plağa uygulanan sınır koşulu ve yükleme.	39
Şekil 6.3 : Sandviç plağın statik analiz sonucu	40
Şekil 6.4 : Sandviç plağın ilk 6 mod şekli ve doğal frekansları	41
Şekil 6.5 : Yaklaşım ve deneysel basınç eğrileri	43
Şekil 6.6 : Plak üzerinde oluşan basınç dağılımının üç boyutlu görüntüsü	44
Şekil 6.7 : Plak orta noktasının zaman göre yer değiştirmesi.....	44
Şekil 6.8 : Plak arka yüzeyinin orta noktasındaki ϵ_x gerinimi karşılaştırması.....	45
Şekil 6.9 : Plak arka yüzeyinin orta noktasındaki ϵ_y gerinimi karşılaştırması.....	45
Şekil 6.10 : 2. Konfigürasyonun orta noktasının zamana göre yer değiştirmesi	47
Şekil 6.11 : 2. Konfigürasyonun arka yüzeyinin orta noktasındaki ϵ_x gerinim değerinin zamanla değişimi.....	47
Şekil 6.12 : İki konfigürasyonun orta nokta yer değiştirmesi karşılaştırması	48
Şekil 6.13 : İki konfigürasyonun orta nokta gerinim değeri karşılaştırması.....	48
Şekil 6.14 : 1. Konfigürasyona ait katmanların orta noktasında oluşan σ_x normal gerilmesinin zamanla değişimi.....	49

Şekil 6.15 : 2. Konfigürasyona ait katmanların orta noktasında oluşan σ_x normal gerilmesinin zamanla değişimi	49
Şekil 6.16 : 1. Konfigürasyona ait katmanların orta noktasında oluşan ε_x geriniminin zamanla değişimi	50
Şekil 6.17 : 2. Konfigürasyona ait katmanların orta noktasında oluşan ε_x geriniminin zamanla değişimi	50
Şekil 6.18 : 1. Konfigürasyonda orta nokta için kalınlık boyunca ε_x geriniminin değişimi	51
Şekil 6.19 : 1. Konfigürasyonda orta nokta için kalınlık boyunca σ_x normal gerilmesinin değişimi	51
Şekil 6.20 : 2. Konfigürasyonda orta nokta için kalınlık boyunca ε_x geriniminin değişimi	52
Şekil 6.21 : 2. Konfigürasyonda orta nokta için kalınlık boyunca σ_x normal gerilmesinin değişimi	52
Şekil 6.22 : Plak üzerindeki τ_{xy} kayma gerilmesi ve γ_{xy} kayma gerinimi değerlerinin en büyük olduğu konumlar	53
Şekil 6.23 : 1. Konfigürasyona ait τ_{xy} kayma gerilmesinin katmanlar boyunca zamanla değişimi	54
Şekil 6.24 : 1. Konfigürasyona ait γ_{xy} kayma geriniminin katmanlar boyunca zamanla değişimi	54
Şekil 6.25 : 2. Konfigürasyona ait τ_{xy} kayma gerilmesinin katmanlar boyunca zamanla değişimi	55
Şekil 6.26 : 2. Konfigürasyona ait γ_{xy} kayma geriniminin katmanlar boyunca zamanla değişimi	55
Şekil A.1 : Örnek basınç dağılımları	61

KATMANLI ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ PLAKLARIN ANLIK BASINÇ YÜKÜNE CEVABININ İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada katmanlı çekirdekli sandviç plağın anlık basınç yükü altındaki dinamik davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında ilk olarak sandviç plak üretilmiştir. Sandviç plağın alt yüzeyinde ve üst yüzeyinde ikişer kat çift yönlü cam elyaf kullanılmıştır. Çekirdek yapı polikarbonat levha, aramid bal peteği ve köpük malzemelerinin sıralanmasıyla oluşturulmuştur. Anlık basınç yükü, şok tüpü içerisinde bulunan basınçlı havanın, tüpün ağzında yer alan membranı yırtmasıyla elde edilmiştir. Katmanlı çekirdekli sandviç plak deney platformuna ankastre olarak tutturulmuştur. Deneyler sırasında plak yüzeyinden hem basınç hem de gerinim verileri ölçülmüştür. Ölçülen basınç verileri kullanılarak anlık basınç yükleri için uygun basınç fonksiyonları oluşturulmuştur. Oluşturulan bu fonksiyonlar, sonlu elemanlar analizlerinde kullanılmıştır. Sonlu elemanlar analizleri için ANSYS kütüphanesinde yer alan Shell 281 elemanı kullanılarak katmanlı çekirdekli sandviç plak modellenmiştir. Bu model kullanılarak plağın sayısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Sayısal analizler sonucunda plak orta noktasının gerinim değeri zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Sayısal ve deneysel olarak elde edilen gerinim değerlerinin arasında bir uyum olduğu görülmüştür. Deney ve sayısal çalışma arasındaki uyum görüldükten sonra çekirdek malzemelerinin sıralanışı değiştirilerek yeni bir konfigürasyon elde edilmiştir. Yeni konfigürasyon için de sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Her iki konfigürasyonun sayısal analizleri yapılarak plak orta noktasında, katmanlar arasındaki gerinim ve gerilme değerleri zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, deneysel ve sayısal sonuçlardan elde edilen plak orta noktasındaki gerinim değerleri birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

INVESTIGATION OF DYNAMIC BEHAVIOUR OF LAMINATED SANDWICH PLATES WITH STEPWISE GRADED CORES UNDER BLAST LOADING

SUMMARY

In this study, the dynamic behavior of a laminated sandwich plate with a stepwise graded core is studied experimentally and numerically. In experimental study, firstly sandwich plate is manufactured. It has four layers of bidirectional glass epoxy face sheets. Lexan® polycarbonate sheet, Airex® structure foam and aramid honeycomb are used for core materials. Air blast load is obtained by compressing the air in a tube and then suddenly expanding the compressed air by using a membrane. Sandwich plate is clamped at all edges to a fixed steel frame. Pressure sensors and strain gauges are used to measure the pressure and strain. Pressure distribution is gained from the experimental study. According to this distribution a pressure function is formed. Then, this function is used in the FEA. For the FEA, laminated sandwich plate was modeled by using Shell281 element which is from ANSYS v11.0 library. Using this finite element model, transient analysis is performed. The strain-time history results at the center point of the plate obtained from the transient analysis. Core materials' stacking sequence changed after a good agreement between the results. In the same way, transient analysis performed for this new configuration. Finally, results with experimental study and numerical analysis are compared according to strain rates.

1. GİRİŞ

Bu çalışmada, katmanlı çekirdekli sandviç plakların anlık basınç yüküne cevabı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma ANSYS sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilmiştir ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır.

Kompozit malzemelerin bilinen en eski kullanım alanı inşaat sektörüdür. Eski Mısır'da saman ile güçlendirilmiş çamurdan duvarlar ilk kompozit malzeme uygulamalarındandır. Teknolojinin gelişmesiyle kompozit malzemeler gittikçe artan oranlarda ve yeni sektörlerde kullanılmaya başlanmıştır.

Kompozitler, tasarımcılara sunduğu istenilen özelliklere göre (neme karşı dayanıklı, korozyon direnci yüksek, sıcaklığa karşı direnci yüksek, titreşim sönümleme ve uzun yorulma ömrü gibi) malzeme üretebilme olanağından dolayı günümüzde çokça kullanılmaktadır. Havacılık sektörü kompozitlerin bu faydalarından en çok yararlanan sektör konumundadır. Savaş uçaklarından ticari uçaklara, uydulardan insansız hava araçlarına kadar birçok hava taşıtında kompozit malzemeler öncelikli olarak kullanılmaktadır.

Kompozitlerin kullanım alanlarının artmasıyla birlikte çok çeşitli kompozit yapılarda geliştirilmeye başlanmıştır. Genel olarak kompozitler tabakalı ve sandviç tipi olmak üzere ikiye ayrılabilir. Sandviç kompozitler ile ilgili detaylı bilgi bir sonraki bölümde verilecektir.

Kompozitlerin havacılık sektöründe bu denli geniş kullanım alanları bulmasıyla birlikte, kompozit malzemelerden üretilen yapıların hasar ve onarımları da detaylı bir şekilde incelenmeye başlanmıştır [1]. En şiddetli hasar oluşumlarından biri patlama sonucu oluşan hasarlardır. Patlama sonucu anlık olarak bir basınç yükü oluşur ve olayın gerçekleştiği yerdeki yapılarda büyük hasarlara sebep olur. Bu sebeple anlık basınç yüküne maruz kalan sandviç veya katmanlı kompozit yapıların incelenmesi önemli bir araştırma konusudur.

Anlık basınç yüküne maruz kalan katmanlı veya sandviç kompozit plak ve kabuk konusunda İstanbul Teknik Üniversitesi'nde gerçekleştirilen ve İTÜ Mustafa İnan Kütüphanesi'nde araştırmacılara ve akademisyenlere sunulan çeşitli yüksek lisans ve doktora tezi bulunmaktadır.

Türkmen [2], katmanlı kompozit panellerin anlık basınç yüküne dinamik cevaplarını deneysel, nümerik ve teorik olarak incelemiştir. Teorik kısmında panellerin hareket denklemleri çıkartılarak çeşitli sayısal yöntemler yardımıyla çözülmüştür. Deneysel çalışmada ise anlık basınç yükü sağlayacak detonasyon tüpü ve gerekli donanım kurularak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları ile analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Kazancı [3], anlık basınç yükü etkisi altındaki katmanlı kompozit plakların çeşitli sınır şartları için dinamik davranışlarını teorik ve sayısal olarak incelemiştir. Ayrıca problem ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Teorik-sayısal analiz ve sonlu elemanlar analizi sonuçları literatürdeki deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Yüksel [4], anlık basınç yükü etkisi altında kompozit malzemeden yapılmış yarı küresel bir kabuk yapının dinamik davranışını incelemiştir. Çalışma kapsamında, anlık basınç yükü deney düzeneği tasarlanarak üretilmiş ve bu düzenek kullanılarak çeşitli mesafe ve basınçlarda deneyler gerçekleştirilmiştir. ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak sayısal analizleri yapılmıştır. Sayısal analiz sonuçları ile deneysel sonuçlar kıyaslanmıştır.

Özdemirli [5], sandviç kompozit bir plağı iki farklı sınır koşulu için anlık basınç yüküne cevabını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Deneysel çalışmada plağın ön yüzeyinde iki farklı noktaya basınç sensörü, arka yüzeyine ise gerinim ölçerler yerleştirilerek birim uzama değerleri ölçülmüştür. Sayısal çalışmada ise ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak serbest titreşim ve geçici analizler yapılarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Çoğuz [6], anlık basınç yükü altında katmanlı kompozit malzemeden imal edilmiş plakların, ankastre ve konsol mesnet şartlarındaki dinamik davranışları deneysel ve sayısal olarak incelemiştir.

Ömercikoğlu [7], metal katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü altındaki dinamik cevabını incelemiştir. Çalışma kapsamında kompozit

plaklar üretilerek anlık basınç yükü testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak analizler yapılmıştır. Deney sonuçları ile analiz sonuçları kıyaslanmıştır.

Baş [8], hibrit katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü altındaki dinamik davranışını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Deneysel kısmını gerçekleştirebilmek için öncelikle deney donanımı tasarlanmış ve imal ettirilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında plağın ön yüzeyinden basınç verisi, arka yüzeyinden ise birim uzama değerleri veri toplama sistemi yardımıyla alınmıştır. Sayısal kısmında ise malzeme özellikleri belirlenen plakların geçici analizleri gerçekleştirilerek deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Literatürde farklı anlık basınç yüklerine maruz kalan katmanlı veya sandviç kompozit plaklar üzerine birçok çalışma bulunmaktadır.

Wang, Gardner ve Shukla [9], sıralı dizilmiş çekirdek malzemeli sandviç kompozit yapıların anlık basınç yüküne mukavemetini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışma için iki farklı dizilime sahip sandviç kompozit yapı üretilmiştir. yapıların dış yüzeyleri cam vinil esterden, çekirdek yapıları ise farklı yoğunluklara sahip stiren köpükten oluşmaktadır. Farklı yoğunluklara sahip stiren köpüklerin sırası değiştirilerek farklı dizilimli sandviç kompozit yapılar elde edilmiştir. Birinci dizilim düşük/orta/yüksek yoğunluklu stiren köpüklerin sıralanması ile oluşturulmuştur iken, ikinci dizilim orta/düşük/yüksek yoğunluklu stiren köpüklerin sıralanması ile oluşturulmuştur. Şok basınç profilleri ve yüksek hızlı kameralar kullanılarak elde edilen deformasyon görüntüleri yardımıyla numunelerin deformasyon enerjileri hesaplanmıştır. Gerçekleştirilen deneyler sonucunda, birinci dizilim ikinci dizilime göre anlık basınç yüküne daha çok mukavemet göstermiştir.

Bahei-El-Din, Dvorak ve Fredricksen [10], yaptıkları çalışmada, klasik bir sandviç plak ile poliürea arakatman içeren sandviç plağın anlık basınç yüküne karşı mukavemetini karşılaştırmışlardır. Her iki plakta aynı malzemeler kullanılarak üretilmiştir. Tek fark poliürea katmanlı plakta, dış yüzey katmanı ile çekirdek malzemesi arasına poliürea ara katmanı yerleştirilerek modifiye edilmesidir. Anlık basınç yükü altında plakların cevabına bakıldığında, modifiyeli plakta daha az hasar olduğu gözlemlenmiştir. Poliürea arakatman dış yüzeyi alttan destekleyerek basınç yükünün oluşturduğu gerilme dalgalarının çekirdek malzemesine geçişini

zorlaştırmıştır. Böylelikle dış yüzeyde oluşan gerinimlerde ve toplam deformasyonda önemli azalmalar yaratılacağı sonucuna varmışlardır.

Tekalur ve arkadaşları [11], poliürea ve cam elyaf vinil esterden üretilen katmanlı ve sandviç kompozit yapıların şok tüpü kullanılarak oluşturulan anlık basınç yüküne dayanımını deneysel olarak araştırmışlardır. Bunun için poliürea/cam vinil ester ve cam vinil ester/poliürea diziliminde iki tip katmanlı kompozit dikdörtgen plak ve cam vinil ester/poliürea/cam vinil ester diziliminde sandviç kompozit dikdörtgen plak üretilmiştir. Deneyler sonucunda deformasyona uğrayan plaklar, görsel olarak ve mikroskopik olarak incelenmişlerdir. İncelemeler sonucunda, anlık basınç yükünün önce poliüreaya geldiği poliürea/cam vinil ester sıralanışlı katmanlı kompozit plakta anlık basınç yüküne dayanımının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Anlık basınç yüküne en iyi mukavemet gösteren yapı ise sandviç kompozit dikdörtgen plak olmuştur. Yine Tekalur ve arkadaşları [12] yaptıkları başka bir çalışmada, cam elyaf yüzeyli ve köpük dolgu çekirdekli sandviç kompozit panellerin şok yüklemesine cevabını incelemişlerdir.

Langdon ve arkadaşları [13], Glare panellerin anlık basınç yüküne cevaplarını deneysel olarak incelemişlerdir. Ankastre olarak tutturulmuş Glare paneller, detonasyon tüpü ile elde edilen anlık basınç yüküne maruz kalmışlardır. Testler sonucunda Glare panellerin monolitik metal panellere benzer bir davranış sergilediği görülmüştür. Boyutsuz formdaki sonuçlar incelendiğinde, Glare panellerin anlık basınç yüküne karşı dayanımının monolitik metal paneller ile kıyaslandığında geliştirilebilir bir potansiyele sahip olduğu görülmüştür.

Bahei-El-Din ve Dvorak [14], çalışmalarında sandviç plakların anlık basınç yüküne karşı güçlendirilmesi ile ilgilenmişlerdir. Bu kapsamda bir tane standart, üç tane de değiştirilmiş sandviç plak analiz edilmiştir. Standart sandviç plağın yüzeyi karbon epoksi, çekirdeği ise köpükten oluşturulmuştur. Değiştirilen sandviç plakların ilkinde poliüretan ara katman, ikincisinde elastomerik köpük ve üçüncüsünde hem poliüretan ara katman hem de elastomerik köpük, yüzey malzeme ile çekirdek malzemesinin arasına yerleştirilmiştir. Bu şekilde dört farklı sandviç yapının anlık şok yüküne cevabı incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, değiştirilmiş sandviç plakların, standart plağa göre daha çok enerji emerek, daha az zarar gördükleri belirtilmiştir.

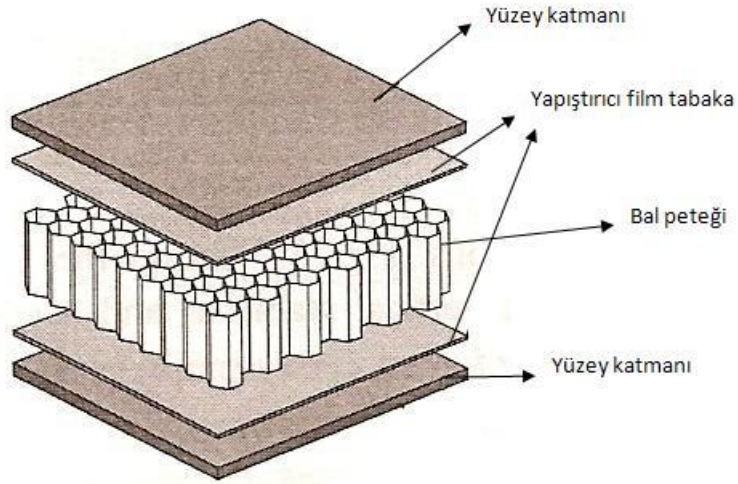
Bu alışma için öncelikle sandviç kompozit yapılar ve çekirdek malzemeleri incelenmiştir. Ardından u farklı çekirdek malzemesine sahip katmanlı çekirdekli sandviç plak üretilmiştir. Üretilen sandviç plağın üzerine basınç duyargaları ve birim uzama ölçerler (strain gauge) yerleştirilerek patlama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Patlama deneylerinden alınan basınç ve birim uzama verileri veri toplama sistemi yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır. Deneylerden elde edilen basınç dağılımları kullanarak oluşturulan basınç fonksiyonu ANSYS sonlu elemanlar yazılımında girilerek plağın geçici analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak deneysel sonuçlar ve analiz sonuçları karşılaştırılarak çalışma tamamlanmıştır.

2. SANDVIÇ KOMPOZİTLER

Sandviç kompozit yapılar, artan kompozit malzeme kullanımının bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Katmanlı kompozitlerden daha karmaşık bir yapıya sahip olmalarına rağmen birçok avantajlarından dolayı tercih edilmektedirler. Bu bölümde, sandviç yapı kavramından, çekirdek kısım ve sandviç yapıların avantajlarından bahsedilecektir.

2.1 Sandviç Yapı Kavramı

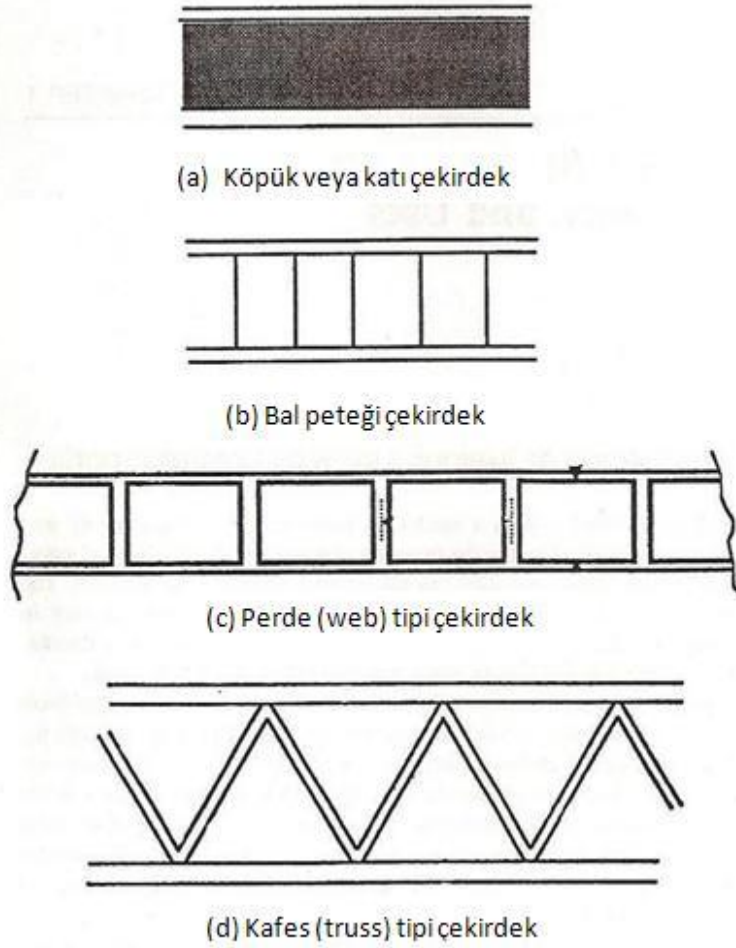
Sandviç yapı, iki tane ince ve sert yüzey malzemesinin arasına daha kalın ve zayıf bir çekirdek malzemenin yapıştırıcı film ile yapıştırılmasıyla oluşturulur. Şekil 2.1’de sandviç yapının kısımları gösterilmiştir [15]. Yüzey malzemesi olarak genellikle cam, karbon, aramid elyaflar veya alüminyum, çelik gibi metaller kullanılır. Yüzey malzemesi olarak metal kullanımı istenmeyen ağırlık artışlarına sebep olur.



Şekil 2.1: Sandviç yapı kısımları [15].

2.2 Çekirdek Kısım

Sandviç yapıların çekirdek kısmında farklı malzemeler kullanılarak farklı tasarımlar oluşturulabilir. Ancak genelde Şekil 2.2’de gösterildiği gibi sandviç yapıların çekirdek kısımları dört sınıfta toplanır [16]: (a) köpük veya katı çekirdek, (b) bal peteği çekirdek, (c) perde (web) tipi çekirdek, (d) kafes (truss) tipi çekirdek.

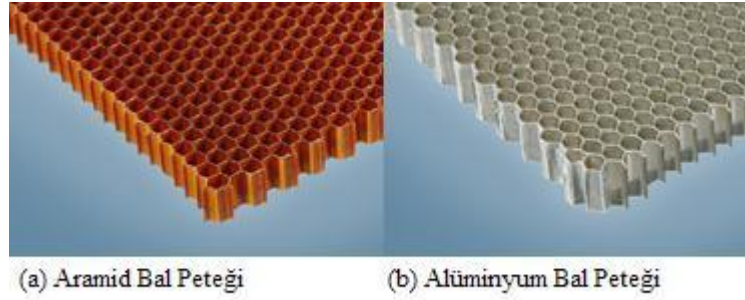


Şekil 2.2: Çekirdek yapı tipleri [16].

İlk sandviç yapılarda çekirdek malzemesi olarak balsa ağacı kullanılmaktaydı. Günümüzde hala bazı uygulamalarda balsa ağacı kullanılmasına rağmen, gelişen malzeme teknoloji sayesinde çok çeşitli malzemeler çekirdek malzemesi olarak kullanılmaktadır.

En çok kullanılan çekirdek malzemeleri, polimer bazlı köpüklerdir. Poliüretan (PUR), polistiren (PS), polivinil klorür (PVC), polimat akrilamid (PMI), polietheremid (PEI) ve polifenolik (PF) köpükler bunlardan bazılarıdır.

Bal peteği çekirdek yapıları sac haldeki metallere, elyafla güçlendirilmiş veya güçlendirilmemiş polimerlerden ve kâğıttan üretilebilir. Şekil 2.3'te en çok kullanılan bal peteği yapıları gösterilmiştir [17]. (a) fenolik reçine emdirilmiş aramid bal peteği ve (b) alüminyumdan üretilen bal peteği.



Şekil 2.3: Bal peteği yapılar [17].

2.3 Sandviç Yapıların Avantajları

Sandviç yapılar tasarımcılara sağladığı avantajları şu şekilde sıralanabilir [15]:

- Yüksek katılık – ağırlık oranı
- Yüksek eğilme mukavemeti – ağırlık oranı
- Uzun yorulma ömrü
- Akustik yalıtımının iyi olması
- Çekirdek kısmında bal peteği malzemesinin kullanımı ile termal yalıtımın sağlanması
- Üretimde büyük parçalar şeklinde üretilebilmesinden dolayı çok fazla cıvata, perçin bağlantısına ihtiyaç duyulmaması

Sandviç yapılarının avantajlarından en çok faydalanan sektör olan havacılıktır. Uçakların kontrol yüzeylerinde sandviç yapılar kullanılarak, yüzeylere gelen yüksek kuvvetlerin burulma oluşturmaya olanak vermezler. Bu yükleme durumunda sandviç yapının yüksek katılık ve eğilme mukavemeti ön plana çıkar. Bu yüklerin altında yüzeyin pürüzsüzlüğünü kaybetmemesi, uçak kanadı aerodinamiğinin de bozulmamasını sağlar. Bu avantajlarının yanında diğer malzemelerden daha hafif

olmasından dolayı, havacılık gibi ağırlığın çok önemli olduğu bir sektörde, uçak ağırlığını azaltarak operasyonel yakıt tüketimini de azaltırlar.

3. SANDVIÇ PLAK İMALATI

Bu bölümde statik ve anlık basınç yükü testlerinin gerçekleştirileceği katmanlı çekirdekli sandviç plak için malzeme seçiminden ve özelliklerinden bahsedilip sandviç plağın imalat aşamaları anlatılmıştır.

3.1 Malzeme Seçimi

Anlık basınç yüklerine maruz kalan plakların malzeme seçimi çok büyük önem taşımaktadır. Ayrıca bu çalışmada çekirdek malzemelerinin sırasının değiştirilmesi de söz konusu olduğu için yüzey malzemelerinin yanı sıra çekirdek malzemelerinin seçimi de önemli hale gelmektedir.

İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Kompozit Yapı Laboratuvarında çeşitli dokuma tiplerinde ve yoğunluklarda karbon, aramid, cam ve hibrid elyaf lar bulunmaktadır. Farklı projeler kapsamında bu elyaf türleri kullanılarak birçok plak ve kiriş yapı üretilmiştir. Daha önceki çalışmalardan kazanılmış olan bilgi birikimi ile bu çalışma kapsamında üretilecek olan sandviç yapının yüzey malzemesinin cam elyaf ı olmasına karar verilmiştir. Texindustria marka EE280 kodlu 0.243mm kalınlığında ve 0°/90° yönlenmesindeki iki yönlü cam elyaf kullanılmıştır.

Önceki çalışmalardan elde edilen malzeme özelliklerine bakıldığında mevcut elyaf tipleri içinde en düşük elastisite modülüne sahip olanın cam elyaf olduğu görülmüştür. Düşük elastisite modülüne sahip olan elyaf türünün seçilmesinin nedeni ise, yapının sandviç olmasından ötürü anlık basınç yüküne karşı gerekli mukavemeti gösterebileceğidir.

Ayrıca çalışmanın esas amacı, çekirdek malzemelerin sırasının değiştirilmesi ile yapının anlık basınç yüküne cevabının nasıl değişeceği olduğundan düşük elastisite modüllü bir yüzey malzemesi seçilerek çekirdek malzemelerinin etkisinin daha iyi görülebilmesi sağlanmıştır.

Kompozit Yapı Laboratuvarında yapılan önceki çalışmalarda Cam/Epoksi kirişler çekme testlerine tabi tutularak malzeme özellikleri elde edilmiştir [7]. Cam/Epoksinin malzeme özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çekirdek malzemesi seçiminde farklı yoğunluklara ve farklı malzeme özelliklerine sahip olan malzemeler göz önüne alınmıştır. Bu şekilde sıralamanın değiştirilmesinin etkisi daha belli olacağı düşünülmüştür. Bu kapsamda İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Kompozit Yapı Laboratuvarında bulunan aramid bal peteği, Lexan® polikarbonat levha ve Airex® marka köpük seçilmiştir.

Havacılık sektöründe en yaygın olarak kullanılan çekirdek malzemesi aramid bal peteğidir. Bunun en önemli sebebi, düşük yoğunluğuna rağmen sağladığı yüksek mekanik özellikleridir. Bu sebeple sandviç yapıda kullanılacak çekirdek malzemelerinin biri aramid bal peteği olarak düşünülmüştür. Aramid bal peteğinin malzeme özellikleri de Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Aramid bal peteği ve Cam/Epoksi malzeme özellikleri.

	E_{xx} (MPa)	E_{yy} (MPa)	E_{zz} (MPa)	ν_{xy}	ν_{xz}	ν_{yz}	G_{xy} (MPa)	G_{yz} (MPa)	G_{xz} (MPa)
Aramid Bal Peteği	25	25	55	0.3	0.11	0.11	10	15	15
Cam/Epoksi [7]	18100	18100	3650	0.137	0.353	0.353	2600	1350	1350

Lexan®, GE (General Electric) firması tarafından üretilen polikarbonat bazlı levhadır. Lexan polikarbonat levhanın genel özellikleri şu şekilde sıralanabilir [18]:

- Yüksek darbe dayanımı
- Yapısından kaynaklanan su berraklığında şeffaflık
- Yüksek ısılarda boyutsal stabilite
- Alev direnci
- Hafiflik

- Tabiat şartlarına dayanıklılık
- Şekillendirilebilirlik

Lexan® polikarbonat levha çekirdek malzemesi olmamasına rağmen yüksek darbe dayanımı özelliğinden dolayı çekirdek kısmında kullanılmıştır. Lexan® polikarbonat levha, cephe kaplamalarında, spor salonu ve stadyum uygulamalarında, havuz üstü kapamalarında, otoban ses bariyer yapımında, polis kask ve kalkan imalatında kullanılır [19].

Airex® C70 köpük, denizcilik, raylı taşıma, rüzgar enerjisi, kış sporları eşyalarında ve havacılık gibi bir çok endüstride kullanılan bir yapısal köpüktür. Airex® C70 köpüğün genel özellikleri şu şekilde sıralanabilir [20]:

- Yüksek mukavemet / ağırlık oranı
- Yüksek katılık / ağırlık oranı
- Darbe mukavemeti
- Yüksek yorulma ömrü
- Alev direnci (Kendi kendine sönebilen)
- Ses ve ısı yalıtımı

Lexan® polikarbonat levha ve Airex® C70 köpük özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Lexan® ve Airex®’in malzeme özellikleri [20,21].

	Lexan®	Airex®
E (MPa)	1620	83
v	0.37	0.23

3.2 Sandviç Plağın İmalat Süreci

Anlık basınç yükü deneylerinin yapılacağı sandviç plak İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Kompozit Yapı Laboratuvarında imal edilmiştir. İlk önce sandviç plağın malzemeleri, plağın son ebadından biraz daha fazla olacak şekilde pay bırakılarak kesilip hazırlanır. Bunun sebebi ileride anlatılacaktır. Sandviç plağın ön ve arka yüzeyleri için ikişer kat cam elyaf, çekirdek kısmı oluşturan Lexan® polikarbonat levha, aramid bal peteği ve Airex® köpükten de birer kat kullanılması planlanmıştır. Şekil 3.1’de sandviç plak malzemelerinin işlenmemiş hali gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : Sandviç plak malzemelerinin işlenmemiş hali.

İmalata başlamadan önce epoksi reçine ve sertleştirici miktarının hesaplanması gerekir. Bunun için aşağıdaki denklem kullanılır.

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

Denklemden:

A: Kompozit malzemenin yüzey alanı

n: Katman sayısı

W_f : Metrekare başına kumaş ağırlığı

RC: Kumaş tipine göre değişen reçine sabiti

Çeşitli kumaş türlerine göre RC katsayısının değişimi Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3: Kumaş cinslerine göre RC katsayıları [22].

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

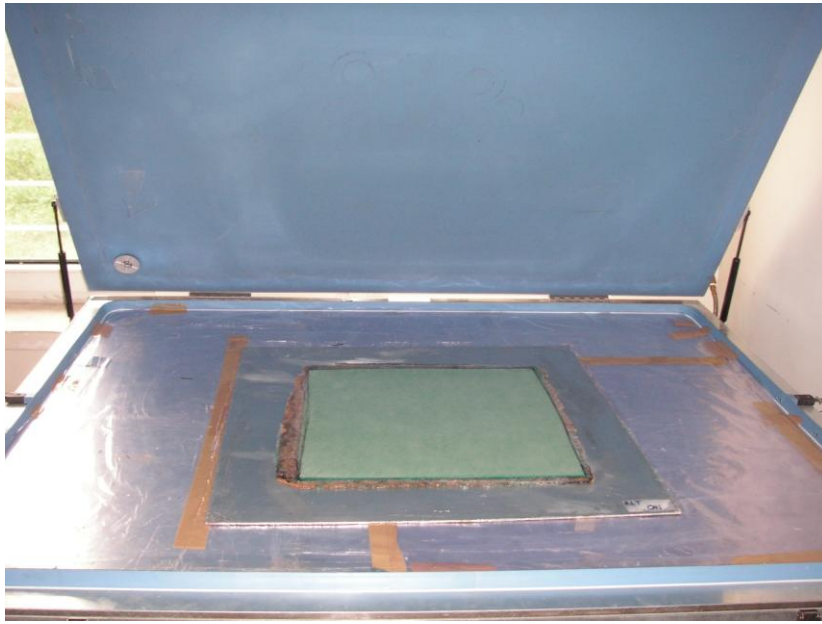
Denklemden gerekli RC katsayıları kullanılarak toplam reçine miktarı hesaplanır. Kullanılan epoksi reçinenin MGS L285 yapıştırıcı ve MGS L287 sertleştirici olmak üzere iki bileşeni vardır. Hesaplanan reçine miktarının 5/7'si yapıştırıcı, 2/7'si sertleştirici olmak üzere ayrı ayrı tartılır. Bu iki bileşen tek bir kapta dikkatlice karıştırılarak epoksi reçine hazırlanmış olur.

Sıradaki aşama, epoksi reçinenin elyaflara tatbik edilmesidir. Alüminyum levhanın üzerine yerleştirilen cam elyafa fırça yardımıyla epoksi reçine tatbik edilir. İlk cam elyaf iyice reçine ile ıslatıldıktan sonra elyaf açılarına dikkat edilerek tam üstüne ikinci kat elyaf yerleştirilir ve aynı şekilde reçine ile ıslatılır. İki kat cam elyafın ıslatılma işi bittikten sonra, üzerlerine sırasıyla polikarbonat levha, bal peteği ve köpük yerleştirilir. Çekirdek malzemelerin birbirlerine yapışması için yeterli miktarda epoksi reçine kullanılır. Son olarak iki kat cam elyaf daha reçine ile ıslatılarak köpüğün üzerine serilir. Böylece sandviç plak, kompozit imalat masasına yerleştirilmeye hazır hale gelir. Şekil 3.2'de gösterilen Heatcon marka kompozit imalat masası, vakum uygulayarak ısı verme özelliğine sahiptir.



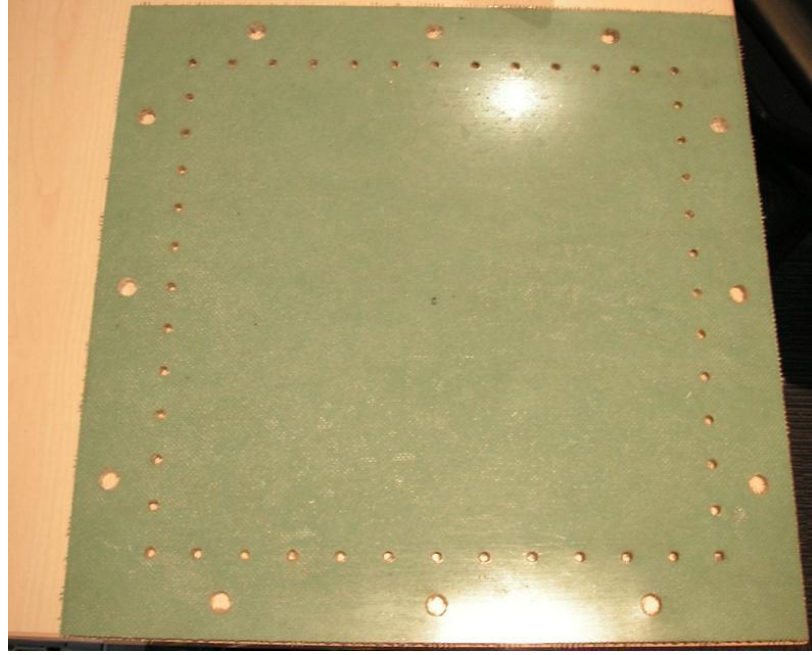
Şekil 3.2 : Heatcon marka kompozit imalat masası.

Sandviç plağın dış yüzeylerinin pürüzsüz olması için, plak iki tane alüminyum levha arasına yerleştirilerek kompozit imalat masasına yerleştirilir. Şekil 3.3’de kompozit imalat masasına yerleştirilen sandviç plak gösterilmiştir. Kompozit imalat masasında sandviç yapı 45°C’ye kadar ısıtıldıktan sonra ısı vermesi durdurulur ve bu sıcaklıkta yaklaşık 500 milibar basınçta 16 saat kür edilir. İmalatı yapılan sandviç plağın 500 milibarlık basınçta kür edilmesinin sebebi, çekirdek yapının ezilmesini önlemektir. Katmanlı kompozitlere göre daha düşük bir basınçta kür edilen sandviç plak daha uzun süre kompozit imalat masasında tutularak güvenli bir imalat yapılmış olur. Genelde katmanlı kompozitler 750-800 milibar arasında kür edilirler.

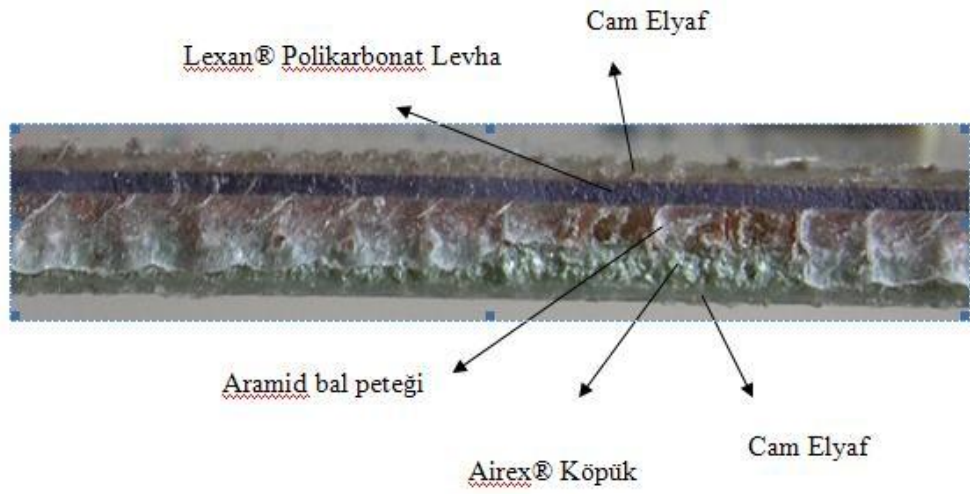


Şekil 3.3 : Sandviç plağın kompozit imalat masasına yerleştirilmesi.

Masa vakum yapmaya başladığı zaman alüminyum levhaların köşeleri ezilmektedir ve böylece içinde bulunan kompozit yapının da köşeleri ezilir. Bu durumdan kaçınmak için plak olması gerekenden daha büyük ölçülerde hazırlanır. Kür işlemi bittikten sonra plak CNC tezgâhında istenilen ölçüye getirilir ve deney platformuna bağlanmasını sağlayacak bağlantı delikleri açılır. CNC tezgâhından çıkan sandviç plağın dış çerçeve boyutu 404 mm × 404 mm’ye getirilmiştir. Deney platformuna bağlamak için hazırlanan sandviç plağın önden ve yandan görünüşleri sırasıyla Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4 : İmalatı tamamlanan sandviç plağın önden görünüşü.



Şekil 3.5 : Sandviç plağın yandan görünüşü.

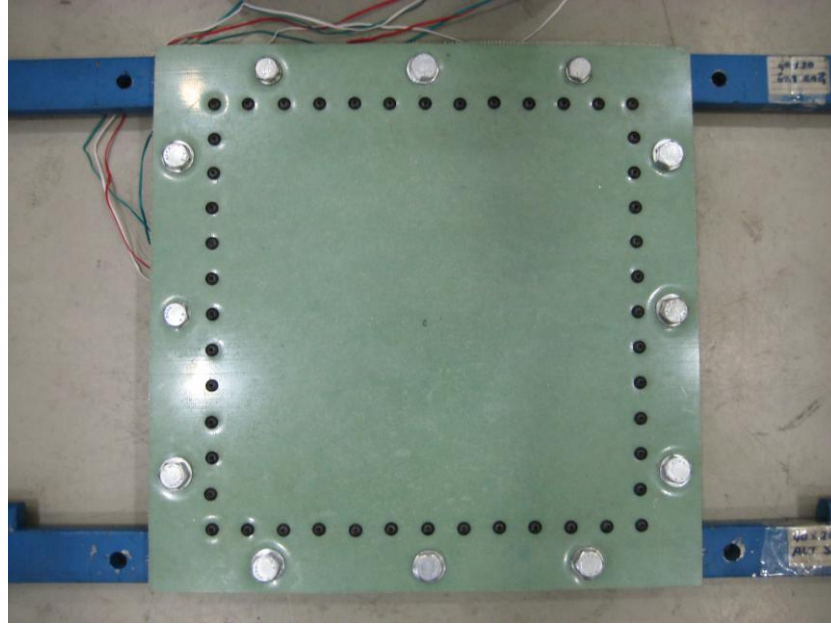
4. SANDVIÇ PLAĞIN STATİK TESTLERİ

4.1 Giriş

Bu bölümde sandviç plağın statik testleri yapılmıştır. Bu kapsamda, plağa gerinim ölçerler yapıştırılarak yayılı kum yükü uygulanmıştır.

4.2 Gerinim Ölçer Yapıştırılması

Öncelikle sandviç plak ankastre sınır koşulunu sağlayacak şekilde tasarlanan çerçeveye Şekil 4.1'deki gibi bağlanarak dört kenarından sabitlenir. Sabitleme işlemi 12 tane M12 ve 48 tane M5 cıvata kullanılarak yapılır. Dış çerçeve boyutları 404 mm × 404 mm olan sandviç plağın cıvatalarla ankastre olarak sabitlenmesinden sonra etkin alanı 300 mm × 300 mm olarak ölçülür. Ardından gerinim ölçerlerin yapıştırma işlemi yapılır.



Şekil 4.1: Plağın ankastre olarak bağlanması.

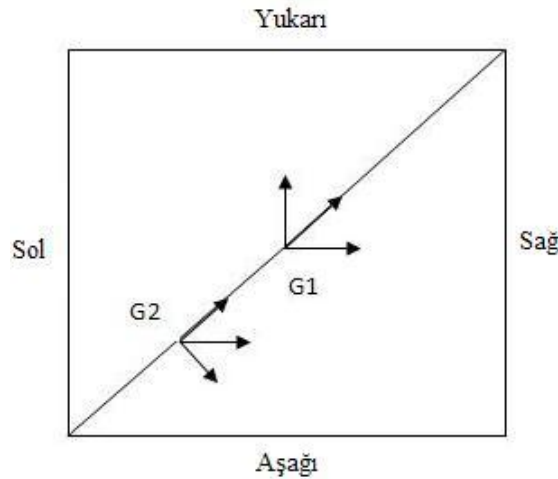
Gerinim ölçerler yapıştırılmadan önce yapıştırılacak yüzeyde pürüzler varsa zımparalanarak temizlenir. Pürüzsüz hale getirilen yüzey alkolle temizlenerek gerinim ölçerleri yapıştırarak hale getirilir. Plağın üzerinde gerinim ölçerlerin yapıştırılacağı noktalar işaretlenir ve bu noktalardan geçecek birbirine dik iki çizgi

çizilir. Bu çizilen çizgiler gerinim ölçerlerin x ve y eksenlerine karşılık gelir. Yapıştırma işlemi sırasında gerinim ölçerler üzerinde bulunan çok ince eksen çizgileri bu çizilen çizgilerle çakışacak şekilde üst üste getirilir ve siyano akrilat cinsi bir yapıştırıcı ile yapıştırılır. Sandviç plağın arka yüzeyine yukarıda anlatıldığı gibi iki tane üç eksenli gerinim ölçer yapıştırılmıştır. Kullanılan gerinim ölçerler kendiliğinden kablolu olduğu için terminal kullanılarak kablo bağlantısı yapılmasına gerek kalmamıştır. Gerinim ölçerlerin kabloları ufak bantlarla plak üzerine tutturularak tellerin gerginliği azaltılmıştır. Kullanılan gerinim ölçerlerin bilgileri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Gerinim ölçer bilgileri [23].

	Model	Tipi	Gauge Faktörü	Gauge Uzunluğu(mm)	Gauge Genişliği(mm)	Direnç (Ω)
	FRA-2-11	Genel Amaçlı	2.09	2	0.9	120

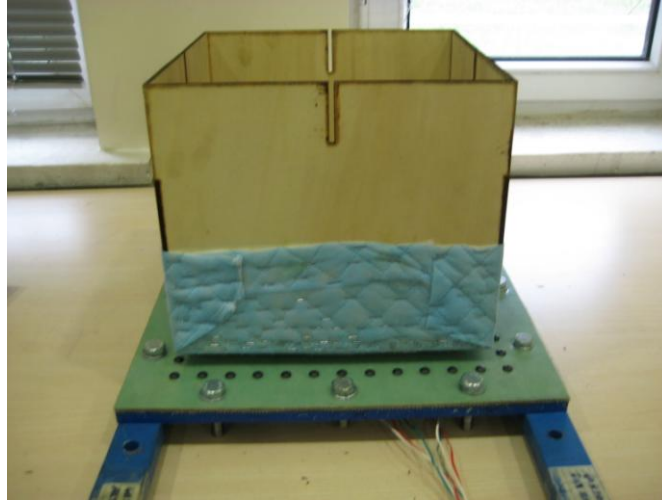
Gerinim ölçerlerden ilki (G1) plağın etkin alanının (300 mm $\times$ 300 mm) tam orta noktasına gelecek şekilde yapıştırılmıştır. İkinci gerinim ölçer (G2) ise, plağın köşegeni üzerinde plağın tam orta noktası ile köşe noktasının tam ortasına yerleştirilmiştir. Şekil 4.2’de gerinim ölçerlerin yerleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Plağın arka yüzeyindeki gerinim ölçerlerin şematik gösterimi.

4.3 Statik Testlerin Yapılması

Statik test olarak sandviç plak üzerine yayılı bir yükün uygulanması düşünülmüştür. Bu amaçla olabildiğince düzgün yayılı bir yük elde etmek için kum kullanılmıştır. Plâğın etkin alanının (300 mm × 300 mm) tam üstüne gelecek şekilde tasarlanmış ahşap kutunun içine kum konularak plâğın üzerine yerleştirilmiştir. Kullanılan ahşap kutu Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Yayılı yük uygulamasının yapıldığı ahşap kutu.

Gerinim ölçerlerin okuduğu gerinim değerleri iki farklı gerinim ölçüm cihazı tarafından ölçülmüştür. İlk ölçümler, VXI Technology marka EX1629 48 kanallı gerinim ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Veri toplama programı olarak DAC Express 3.4 kullanılmıştır. EX1629 48 kanallı gerinim ölçüm cihazı, aynı anda bütün kanallardan veri alma kabiliyetine sahiptir. DAC Express yazılımı kullanılarak, veri toplama sistemi kısa sürede kalibre edilebilir. DAC Express'in kullanıcılara sunduğu, uyarıcı gerilimi kalibrasyonu (excitation voltage calibration), filtre edilmemiş gerilim kalibrasyonu (unstrained voltage calibration) ve otomatik kalibrasyon (auto calibration) sayesinde veriler sağlıklı bir şekilde toplanır. Şekil 4.4'te 48 kanallı VXI EX1629 dinamik gerinim ölçüm cihazı gösterilmiştir [24].



Şekil 4.4: VXI EX1629 dinamik gerinim ölçüm cihazı.

İkinci ölçümler ise statik gerinim ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Bu şekilde iki ayrı gerinim ölçüm cihazı kullanılarak ölçümlerin doğruluğu kanıtlanmıştır.

TML marka TC-31K statik gerinim ölçüm cihazı, zamana bağlı olmaksızın gerinim miktarını tek bir değer olarak üzerindeki dijital ekranından göstermektedir. Gerinim ölçerlerin kabloları cihaza bağlanıp, gerinim ölçerin direnç değeri içindeki yazılıma girilerek ölçümler yapılır. Pratik kullanımından dolayı statik durumlarda kullanılması çok uygundur. Şekil 4.5'te statik gerinim ölçüm cihazı gösterilmiştir. Ayrıca istenildiği takdirde cihaza değiştirme kutusu (switch box) bağlanarak birden çok kanaldan teker teker gerinim değerleri okunabilir.



Şekil 4.5: TC-31K statik gerinim ölçüm cihazı.

Statik testlerde 11.534 kilogramlık kum kütlesi kullanılarak yapılmıştır. Aynı yük için test üç kez tekrar edilmiştir. Her üç ayrı test için G1 ve G2 gerinim ölçerlerinden okunan gerinim değerlerinin ortalamaları Çizelge 4.2' sunulmuştur.

Çizelge 4.2: Dinamik gerinim ölçüm cihazı ile G1 ve G2 gerinim ölçerlerinden okunan ortalama gerinim değerleri ($\mu\epsilon$).

		Test #1	Test #2	Test #3
G1	Sağ	81	80	80
	Çapraz	81	80	80
	Yukarı	78	78	78
G2	Sağ	71	71	70
	Çapraz	22	22	21
	Yukarı	-7	-7	-10

Statik gerinim ölçüm cihazı kullanılarak yapılan ikinci ölçümlerin bilgileri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Statik gerinim ölçüm cihazı ile test birkaç kez tekrar edilmiştir. Her testte okuduğu gerinim değeri en fazla $\pm 1 \mu\epsilon$ fark etmiştir.

Çizelge 4.3: Statik gerinim ölçüm cihazı ile G1 ve G2 gerinim ölçerlerinden okunan gerinim değerleri ($\mu\epsilon$).

		Gerinim Değeri ($\mu\epsilon$)
G1	Sağ	80
	Çapraz	80
	Yukarı	78
G2	Sağ	70
	Çapraz	19
	Yukarı	-13

5. SANDVIÇ PLAĞIN DİNAMİK TESTLERİ

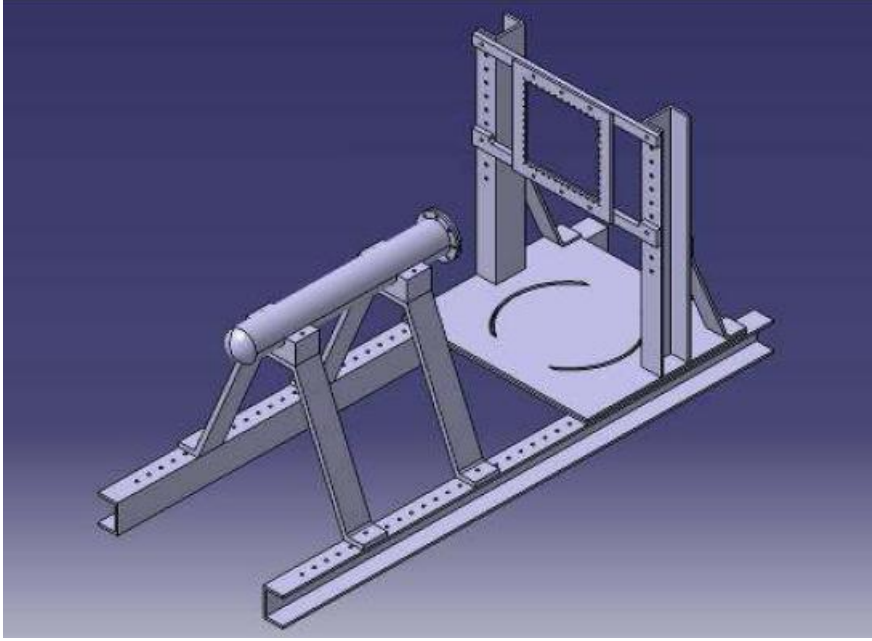
Bu başlık altında öncelikle anlık basınç yükü deneylerinin gerçekleştirileceği deney platformu ve ekipmanları anlatılarak, basınç duyargalarının özelliklerinden ve sandviç plak üzerinde yerleştirdikleri konumlarından bahsedilmiştir. Deneylerde kullanılan membranların üretimi ve yırtılma şekilleri verilmiştir. Ardından, anlık basınç yükü deneyinin akış şeması açıklanmıştır. Son olarak da sandviç plağın serbest titreşim testleri gerçekleştirilmiştir.

5.1 Deney Platformu

Deney platformu 106M450 numaralı TÜBİTAK projesi olan “Anlık Basınç Yükü Etkisindeki Homojen olmayan Plakların, Doğrusal Olmayan Dinamik Davranışının Sonlu Elemanlarla Çözümü” adlı çalışmanın bir parçası olarak Baş [8] tarafından tasarlanmıştır. Deney platformu çok amaçlı deney yapılabilmesi için fonksiyonel bir platform olarak tasarlanıp ürettirilmiştir. Deney platformunun özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Farklı boyutlara ve farklı açıklık oranlarına sahip kompozit plak deneyleri aynı platformda gerçekleştirilebilir,
- Anlık basınç yükü, platforma bağlanan plakların tam orta noktasına etki etmesinin haricinde istenildiğinde farklı noktalarına da etki ettirebilir,
- Deneyde kullanılan plaklar, düzeneğe farklı sınır şartlarıyla monte edilebilir,
- Farklı anlık basınç yüklerinin elde edilebilmesi için farklı yüksek basınç tüpleri kullanılabilir,
- Anlık basınç yükü için gerekli olan havanın depolandığı yüksek basınç tüplerinin deneyde kullanılan plağa olan uzaklığı değiştirilebilir,
- Anlık basınç yüküne maruz kalacak plak deney platformuna kolayca monte edilebilir.

Bu özellikleri bünyesinde barındıran deney platformunun tasarım çizimi Şekil 5.1’de [8], üretilen platform ise Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Deney platformunun tasarım çizimi [8].



Şekil 5.2: Üretilen deney platformu.

Deneylerde kullanılan yüksek basınç tüpünün iç çapı 12 cm, boyu ise 82 cm’dir. Yüksek basınç tüpü kaydırılabilir ayaklar sayesinde plağa olan mesafesi ayarlanabilir. Yüksek basınç tüpü ile plak arasındaki mesafe 20 cm ile 85 cm arasında olabilir. Ayrıca plağın platforma sabitlenmesinde kullanılan dikmelerin

üzerindeki cıvata delikleri kullanılarak, yüksek basınç tüpünden çıkan anlık basınç yükünün plağın farklı bölgelerine gelmesi ayarlanabilir.

5.2 Kompresör Ve Basınç Tankı

Deney platformundaki basınç tüpünün içine yüksek basınçlı havanın doldurulabilmesi için bir adet basınç tankına ve kompresöre ihtiyaç vardır. İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi ROTAM’da bulunan basınç tankı ve kompresör deneylerde kullanılmıştır.

40 bara kadar hava basma kapasitesine sahip kompresör dış ortamdan aldığı havayı sıkıştırarak basınç tankına doldurur. Kompresörün sürekli çalışması halinde sıcaklığı artmaktadır. Sıcaklığının artmasından dolayı oluşabilecek tehlikeli durumları ortadan kaldırmak için otomatik olarak devreye girerek kompresörü kapatan bir sigorta bulunmaktadır.

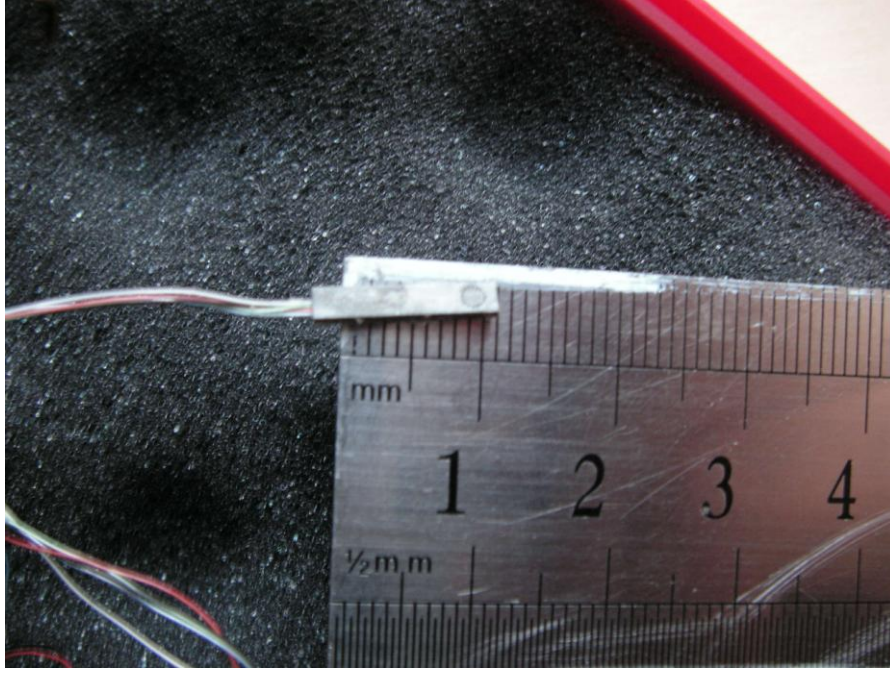
Basınç tankı olarak 60 bara kadar dayanıklı 500lt’lik bir tank kullanılmıştır. Basınç tankının içindeki basınçlı havayı ölçmek için tankın üzerinde bir manometre bulunmaktadır. Ayrıca tankın içerisinde istenilen basınçtan daha yüksek bir basınç okunduğu vakit tankın içindeki basınçlı havayı güvenli bir şekilde tahliye edebilecek bir emniyet valfi bulunmaktadır. Basınç tankına depolanmış basınçlı hava güvenli bir şekilde regülatör yardımıyla tanktan, deney platformundaki yüksek basınç tüpüne yüksek basınçlara dayanıklı basınç hortumu kullanılarak aktarılır. Kompresör ve basınç tankı Şekil 5.3’de gösterilmiştir [7].



Şekil 5.3 : Kompresör ve basınç tankı [7].

5.3 Basınç Duyargaları

Anlık basınç yükü deneylerinin yapılabilmesi için hassas ve dinamik ölçüm yapabilen minyatür basınç duyargalarına ihtiyaç vardır. Yapılan deneylerde Measurement Specialties firmasının ürettiği EPI-C01-35B-/L3M ve EPI-C01-15B-/L3M serisi minyatür basınç duyargaları kullanılmıştır. İki tip basınç duyargasının tek farkı ölçüm aralıklarıdır. EPI-C01-35B-/L3M serisi basınç duyargaları 35 bara kadar ölçüm yapabilmektedirler. EPI-C01-15B/L3M serisi basınç duyargaları ise 15 bara kadar ölçüm yapabilme özelliğine sahiptirler. 35 bara kadar ölçüm yapılabilen duyargalarda 70 barı, 15 bara kadar ölçüm yapabilen duyargalarda da 30 barı duyargaların güvenliği sebebiyle aşmamak gerekir. Her iki tip basınç duyargaları da -40°C ile 120°C arasındaki sıcaklıklarda çalışabilmektedirler. İki tip basınç duyargasının da dış görünüşleri aynı olduğu için Şekil 5.4'te bir tanesi gösterilmiştir.



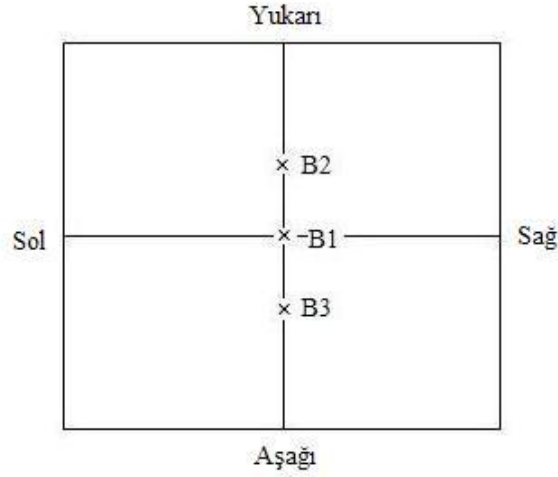
Şekil 5.4 : Measurement Specialties marka basınç duyargası.

5.3.1 Basınç duyargalarının sandviç plak üzerindeki konumları

Anlık basınç yükü deneylerinde, sandviç plağın ön yüzeyindeki üç noktadan basınç verisinin alınması kararlaştırılmıştır. Bu sebeple üç tane Measurement Specialties marka basınç duyargası sandviç plağın tam orta noktasından geçen y eksenini boyunca şu şekilde yerleştirilmiştir:

- B1 duyargası, sandviç plağın tam orta noktasına,
- B2 duyargası, sandviç plağın tam orta noktasından geçen y eksenini üzerinde orta noktadan 5 cm yukarıya,
- B3 duyargası ise, sandviç plağın tam orta noktasından geçen y eksenini üzerinde orta noktadan 5 cm aşağıya yerleştirilmiştir.

B1, B2 ve B3 basınç duyargalarının yerlerinin şematik gösterimi Şekil 5.5'te verilmiştir.



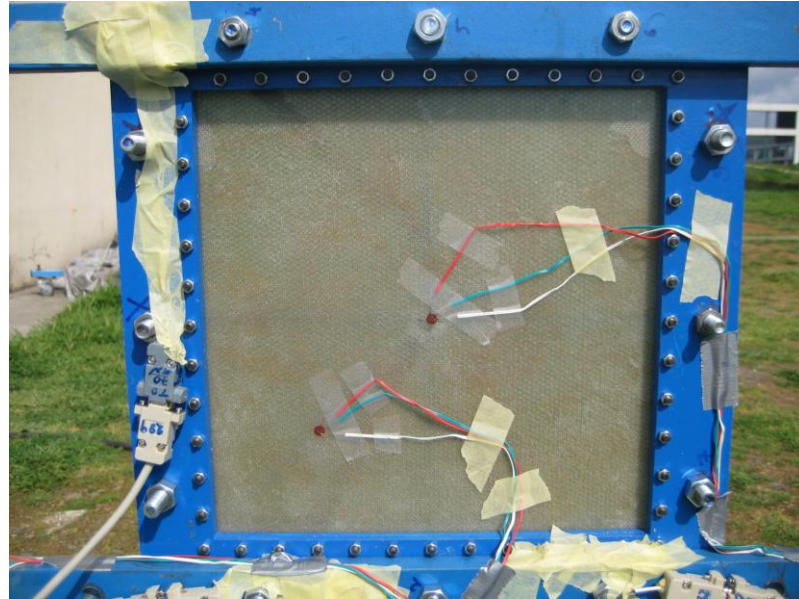
Şekil 5.5: Basınç duyargası konumlarının şematik gösterimi.

Basınç duyargalarının kompanse edilen sıcaklığı aralığı 20°C ile 80°C arasında olduğundan sandviç plağa yapıştırırken sıcak silikon kullanılmamıştır. Bunun yerine duyargaları yapıştırmada soğuk silikon kullanılmıştır. Sandviç plak üzerinde yerleri belirlenen basınç duyargaları soğuk silikon kullanılarak yapıştırılıp bir gün boyunca kuruması beklenir. Kuruma işlemi bittikten sonra, basınç duyargalarının kabloları koruma altına alınmıştır. Bunun için kabloların üzeri ilk önce elektrik bantı kullanılarak kaplanmıştır. Duyargaların üzerine yüksek basınçlı hava geldiği için sadece elektrik bantı duyargaların kablolarını korumada yeterli değildir. Bu sebeple elektrik bantının üzerine sarı renkli yalıtım bantı kaplanarak basınç duyargalarının kabloları iyice koruma altına alınmıştır. Basınç duyargalarının plak üzerinde koruma altına alınmış hali Şekil 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.6: Basınç duyargalarının konumları ve koruma altına alınması.

Şekil 5.7’de ise basınç duyargalarının soketlerinin ve gerinim ölçerlerin kablolarının koruma altına alınmış hali gösterilmiştir.



Şekil 5.7: Gerinim ölçerlerin konumları ve duyarga soketlerinin koruma altına alınması.

Bölüm 4’te verilen statik testler sırasında yapıştırılan gerinim ölçerler anlık basınç yükü deneylerinde de kullanılmıştır. Basınç duyargalarının yukarıda anlatıldığı gibi güvenli bir şekilde yerleştirilmesinden sonra sandviç plak anlık basınç yükü

deneylerine hazır hale gelmiştir. Katmanlı çekirdekli sandviç plağın katmanlaması Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Sandviç plak katmanları.

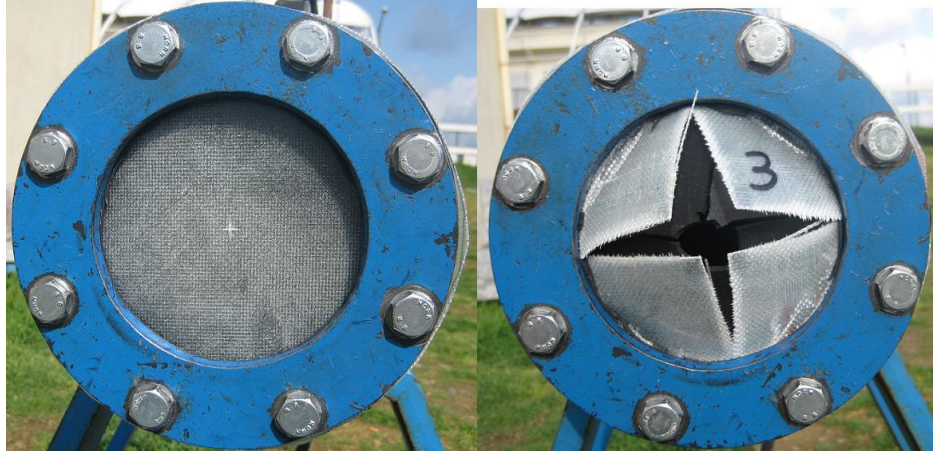
Katman	Malzeme
1. Basınç duygularının yerleştirildiği yüzey	Cam / Epoksi
2.	Cam / Epoksi
3.	Airex® Köpük
4.	Aramid Bal Peteği
5.	Lexan® Polikarbonat Levha
6.	Cam / Epoksi
7. Gerinim ölçerlerin yerleştirildiği yüzey	Cam / Epoksi

5.4 Membranlar

Daha önce İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Kompozit Yapı Laboratuarında gerçekleştirilen anlık basınç yükü deneylerinde kullanılan membran türlerinden farklı olarak bu çalışmada Cam/Epoksiden üretilen membranlar kullanılmıştır. Önceki çalışmalarda farklı kalınlıklarda pirinç, bakır ve polikarbonat levha gibi membranlar kullanılmıştır. Ancak bu membranların yırtılma şekilleri için ne kadar çok teknik geliştirilse de, yine de çeşitli faktörler çok fazla etkin olmaktadır. Bu sebeptendir ki Cam/Epoksi membranlar kullanılmıştır.

Plak üzerinde düzgün bir anlık basınç yükü dağılımı elde etmek için membranların tam orta noktasından yaprak şeklinde açılması çok önemlidir. Düzgün şekilde yırtılan Cam/Epoksi membran elde edebilmek için üç farklı membran konfigürasyonu denenmiştir. Bunlar tek katlı, çift katlı ve üç katlı Cam/Epoksi membranlardır. Cam elyafın dokumasında çok ufak da olsa boşluklar olduğu için Cam/Epoksi membran üretildikten sonra sızdırmazlık sağlaması için arkasına 4 mm kalınlığında kauçuk yerleştirilmiştir. Tek katlı Cam/Epoksi membranlar istenilenden daha az basınç değerlerinde patladığı için, üç katlı olanlar ise çok yüksek basınçlara kadar patlamadan dayanabildikleri için çift katlı Cam/Epoksi membranlar kullanılmıştır.

Çift katlı Cam/Epoksi membranların yaprak şeklinde yırtılması için membranın tam orta noktasına 2-3 mm uzunluğunda bir artı (+) işareti maket bıçağı ile çizilerek zayıflatılmıştır. Şekil 5.8’de membranın yırtılmadan önceki ve yırtıldıktan sonraki halleri gösterilmiştir.



Şekil 5.8: Cam/Epoksi membranın yırtılmadan önceki ve sonraki hali.

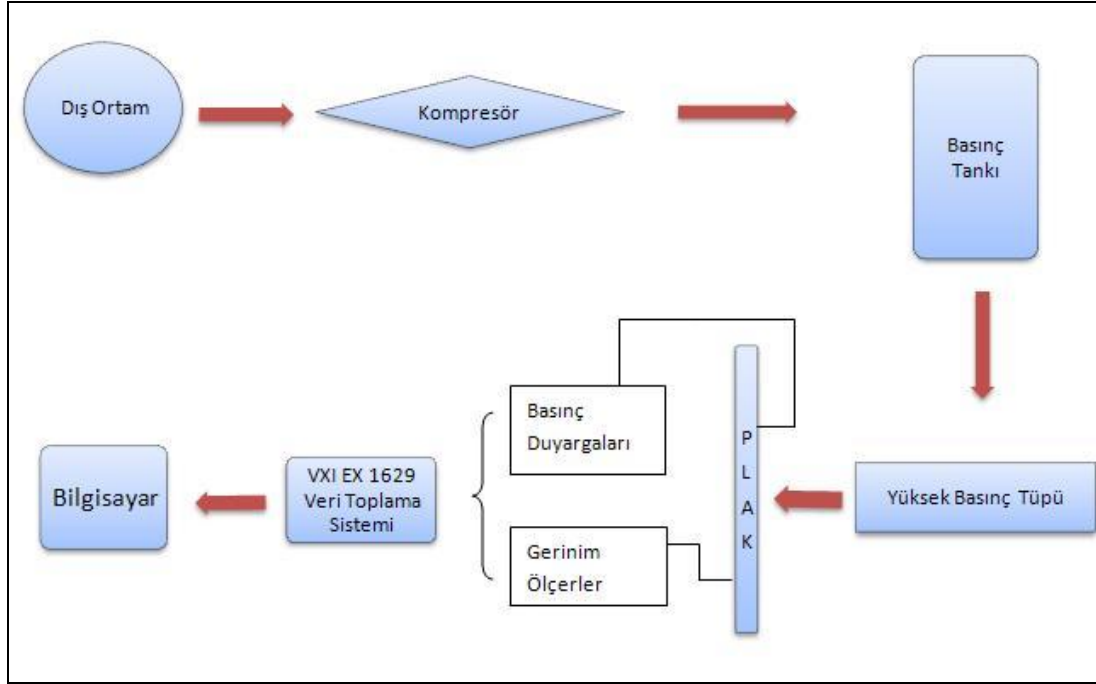
Cam/Epoksi membranların üretimi ıslak elle yatırma yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Top halindeki cam elyaf kumaştan $20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ ebatlarında cam elyaflar kesilerek ağırlıkları tartılmıştır. Ardından cam elyafların ıslatılmasında kullanılacak olan reçine miktarı Çizelge 3.4’te verilen uygun RC katsayısı kullanılarak Denklem 3.1 ile hesaplanmıştır. Reçine ile iyice ıslatılan çift katlı cam elyaflar kurlenmesi için kompozit imalat masasına yerleştirilmişlerdir. Yaklaşık 800 milibar basınç altında ve 50°C ’de 8 saat kür edilmişlerdir. Kür işlemi bittikten sonra kompozit imalat masasından çıkarılan Cam/Epoksi yapılar, daire şeklinde kesildikten sonra Şekil 5.9’da gösterildiği gibi cıvata delikleri matkapla açılmıştır. Her bir üretimden 9 adet membran çıktığı için, deneyler boyunca birçok kez üretim işlemi tekrar edilmiştir.



Şekil 5.9: Cam/Epoksi membranların hazırlanması.

5.5 Sandviç Plakın Anlık Basınç Yükü Deneylerinin Akış Şeması

Anlık basınç yükü deneylerinin şematik işleyişi Şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil 5.10: Deney akış şeması.

Buna göre deneyin işleyiş süreci şu şekilde gerçekleşir:

- İlk olarak kompresörün dış ortamdan aldığı havayı sıkıştırarak basınç tankı içerisine depolamaktadır. Basınç tankı içerisine yeterli basınçta hava basıldıktan sonra kompresör kapatılır.
- Basınç tankındaki basınçlı havayı deney platformuna aktaracak olan yüksek basınçlara dayanıklı hortum deney platformuna iyice bağlanır.
- Üzerine gerinim ölçerler ve basınç duyargaları yerleştirilmiş olan sandviç plak, deney platformuna 4 adet cıvata yardımıyla iyice sabitlenir. Deney platformunun üzerinde bulunan yüksek basınç tüpünün açık olan ağız kısmına ise Cam/Epoksi membran ile birlikte sızdırmazlık sağlayan kauçuk 8 adet cıvata ile iyice sabitlenir.

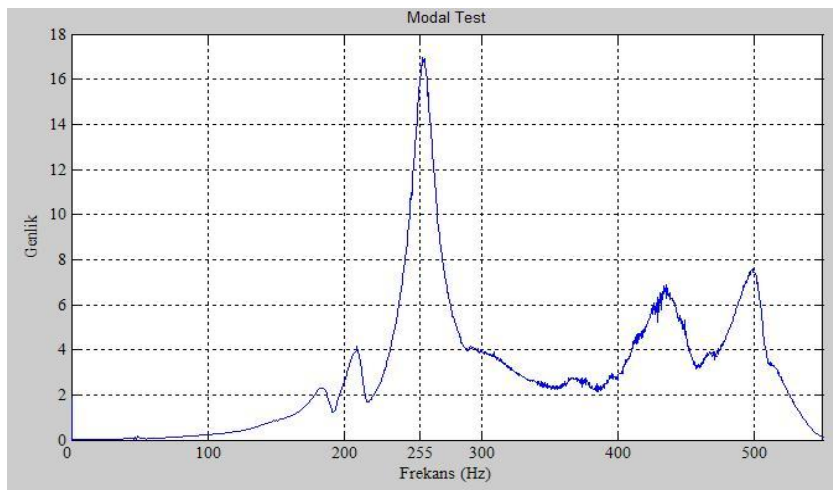
- Sandviç plak üzerindeki basınç duyargalarının ve gerinim ölçerlerin bağlantı kabloları VXI EX1629 veri toplama sistemine bağlanır. Bağlantı kabloları yüksek basınçlı hava akımından etkilenmemesi için “duct” bantı ile iyice koruma altına alınırlar.
- VXI EX1629 veri toplama sisteminin kalibrasyonlarının sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için, 1 saat önceden açılarak ısınması gerekir. Basınç duyargalarını DAC Express programına tanıtmak için eğim, ve ofset değerleri, gerinim ölçerleri tanıtmak için ise gage faktör değeri programa girilir.
- Basınç duyargaları harici güç kaynağı kullanılarak 5V gerilimle beslenirler. Gerinim ölçerlerin beslemesini ise EX1629 veri toplama sistemi tarafından yapılmaktadır. Duyargaların beslemeleri yapıldıktan sonra DAC Express programı kullanılarak sırasıyla, “Auto Cal”, “Excitation Voltage” ve “Unstrained Voltage” kalibrasyonları yapılarak duyargalar deneye hazır hale getirilir.
- Basınç tankının çıkışında bulunan vana açılarak deney platformunda bulunan yüksek basınç tüpünün içine basınçlı hava dolmaya başlar.
- Yüksek basınç tüpünün içindeki basınçlı hava, Cam/Epoksi membranın mukavemetini aştığı zaman patlama gerçekleşir ve yüksek basınçlı hava sandviç plağa doğru hareket eder.
- Sandviç plağın üzerine yerleştirilen duyargalar ölçtükleri basınç ve gerinim verilerini VXI EX 1629 veri toplama sistemine gönderir.
- DAC Express programı kullanılarak dijital hale getirilen veriler bilgisayara kaydedilip yorumlanmaya hazır hale gelir.

Anlık basınç yükü deneylerinden elde edilen basınç dağılımı ve gerinim grafikleri, sandviç plağın sonlu elemanlar analizleri ana başlığı altında, geçici sonlu elemanlar analizi alt başlığında verilecektir.

5.6 Sandviç Plağın Serbest Titreşim Testi

Bu bölümde sandviç plağın serbest titreşim testi yapılarak, sandviç plağın en baskın olan 1.modun doğal frekansı elde edilmiştir.

İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi ROTAM bünyesinde bulunan PCB marka 086C03 model çekiş seti kullanılarak sandviç plak tahrik edilmiştir. Yine PCB marka tek eksenli ivme ölçer kullanılarak sandviç plağın doğal frekansları incelenmiştir. İvme ölçere alçak geçirgen filtre tanımlanarak daha yüksek doğal frekansların toplanması engellenip 1.moda odaklanılmıştır. Şekil 5.11’de görüldüğü gibi sandviç plağın 1. moduna karşılık gelen frekans değeri 258Hz olmuştur.



Şekil 5.11: Sandviç plağın 1.moduna karşılık gelen doğal frekansı.

6. SANDVIÇ PLAĞIN SONLU ELEMANLAR ANALİZLERİ VE SONUÇLARI

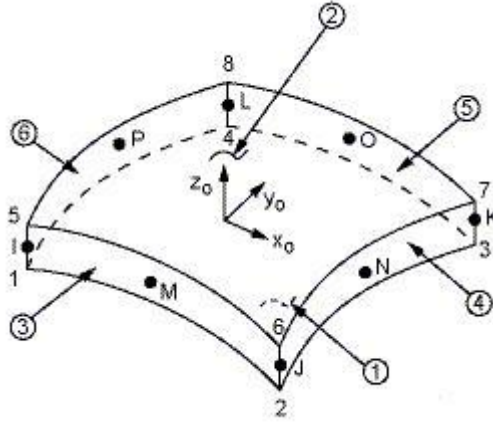
Bu bölümde sırasıyla sandviç plağın statik, serbest titreşim ve geçici (transient) sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan geometri, malzeme bilgileri, çözüm ağı ve yükleme bilgileri verilmiştir. Ardından sonlu elemanlar analizleri ile yapılan statik, serbest titreşim ve anlık basınç yükü testlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır.

6.1 Sonlu Elemanlar Modeli

Sonlu elemanlar modeli ANSYS v11.0 sonlu elemanlar programında modellenmiştir. Bu bölüm altında geometri ve malzeme bilgileri, kullanılan eleman tipinin özellikleri, çözüm ağı ve sınır koşullarından bahsedilmiştir.

6.1.1 Geometri ve malzeme

Ankastre olarak çerçevelere bağlanan sandviç plağın etkin alanı $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ olarak ölçüldüğünden sonlu elemanlar analizinde $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ boyutlarında bir kare geometri kullanılmıştır. Kurulan sonlu eleman modelinde ANSYS 11.0 kütüphanesinde bulunan Shell281 elemanı kullanılmıştır. Bu eleman ince veya kısmen kalın kabuk yapıların analiz edilmesinde kullanılır. Ayrıca katmanlı kabuk yapıların ve sandviç yapıların modellenmesinde de kullanılır. Shell281 üç boyutlu kabuk elemanı, 4 tane köşelerde ve 4 tane de kenar orta noktalarında olmak üzere toplam 8 tane düğüm noktasına sahiptir. Her bir düğüm noktasında x, y ve z doğrultularında yer değiştirme ve dönme olmak üzere 6 serbestlik derecesine sahiptir. Şekil 6.1’de Shell281 elemanının düğüm noktalarının konumları görülmektedir. Shell281 elemanı lineer, büyük dönme veya lineer olmayan büyük gerinim uygulamalarında kullanılır. Teori olarak Mindlin-Reissner kabuk teorisine dayanan birinci derece kayma deformasyonu teorisini kullanmaktadır.



Şekil 6.1: Shell281 elemanı [25].

Bölüm 3.1’de verilen malzeme özelliklerine ek olarak Çizelge 6.1’de gösterilen malzeme kalınlık ve yoğunlukları da analize girilmiştir.

Çizelge 6.1 : Malzeme kalınlık ve yoğunlukları.

	Kalınlık (m)	Yoğunluk (kg/m ³)
Cam / Epoksi	0.243×10^{-3}	1604
Airex® Köpük	1.2×10^{-3}	112.7
Aramid Bal peteği	1.5×10^{-3}	40.63
Lexan® Polikarbonat Levha	0.8×10^{-3}	1147.3

6.1.2 Çözüm ağı ve sınır koşulları

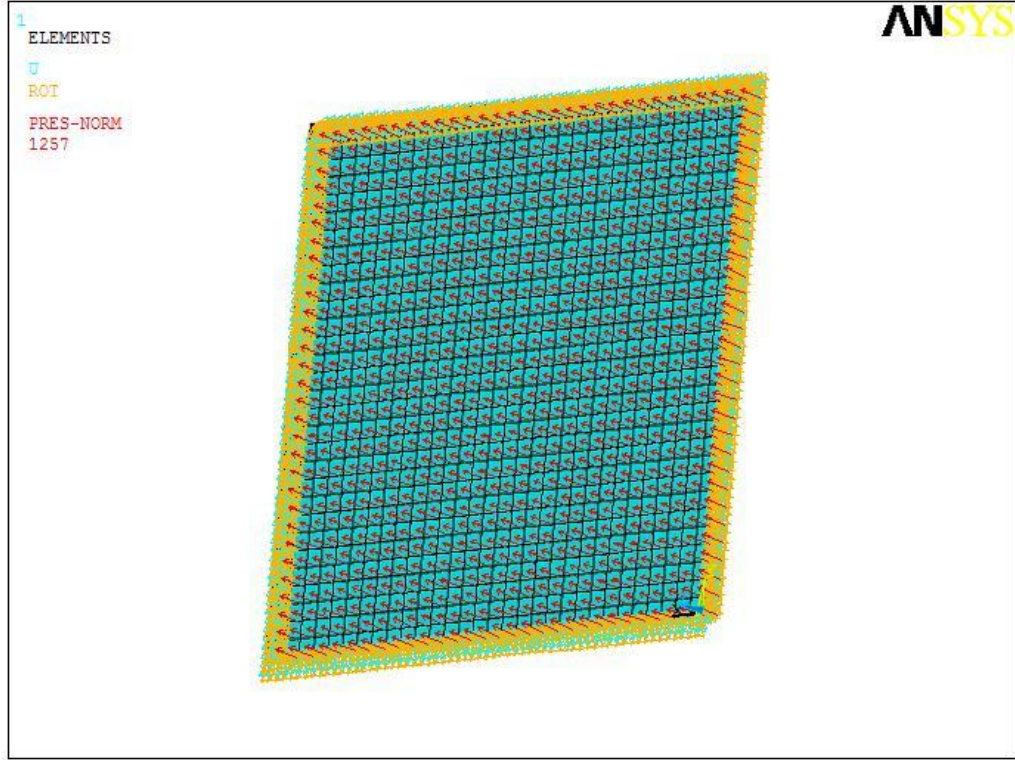
Eleman tipi seçilip bütün malzeme özellikleri programa girildikten sonra çözüm ağı oluşturulur. Çözüm ağı oluşturmak sonlu elemanlar analizlerinde en önemli kısımdır. Gerektiğinden daha az elemanlı bir çözüm ağı kullanılırsa, analiz sonuçlarının hassasiyeti düşer ve doğru sonuç vermez. Gerektiğinden daha çok elemanlı bir çözüm ağı oluşturulursa ise bu analizin gerçekleşmesi çok uzun sürer ve vakit kaybına sebep olur. Bu sebeple her bir kenarı 30 elemana bölerek toplamda 900 elemanlık bir çözüm ağı sandviç yapının analizi için yeterli görülmüştür.

Çözüm ağını oluşturduktan sonra, sandviç plak ankastre olarak bağlı olduğu için sonlu elemanlar analizinde de kare geometrinin dört kenarını x, y ve z

doğrultularındaki yer değıştirme ve dönmeler sıfır olacak şekilde ankastre olarak tutturulmuştur.

6.2 Statik Sonlu Elemanlar Analizi

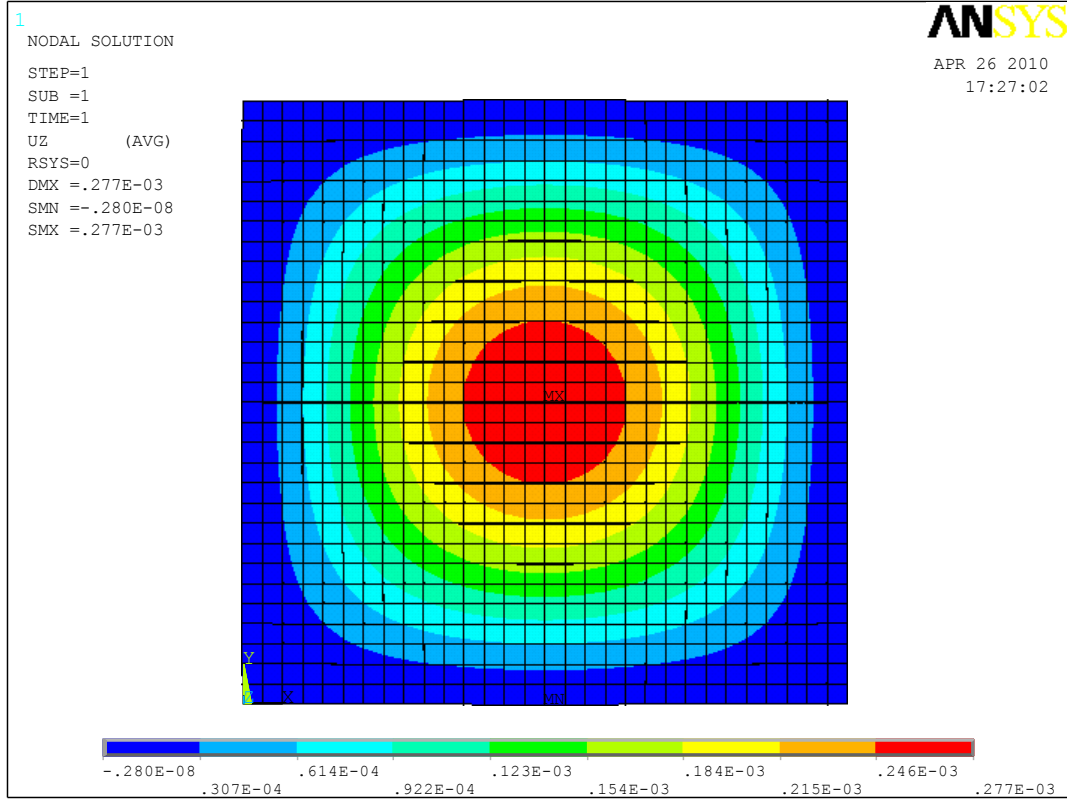
Statik testte kullanılan kumun kütlesi, 300 mm × 300 mm'lik bir alana gelen basınç yükü olarak dönüştürülerek analize girilir. Şekil 6.2'de sandviç plağa uygulanan sınır koşulları ve yükleme gösterilmiştir.



Şekil 6.2 : Sandviç plağa uygulanan sınır koşulu ve yükleme.

Gerçekleştirilen statik sonlu elemanlar analizinin sonucuna bakıldığında orta noktadaki maksimum yer değıştirme değeri 0.277 mm olduğu görülmüştür. Sandviç plağın toplam kalınlığının 4.472 mm olduğu göz önüne alındığında maksimum yer değıştirme sandviç kalınlığının % 6.19'u kadar olduğu görülmüştür. Bu nedenle yapılan statik test küçük yer değıştirme kabulü ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.3'de sandviç plağın statik analiz sonucu gösterilmiştir.

Statik analizin sonunda, ANSYS sonlu elemanlar yazılımından istenilen noktadaki sadece x ve y yönündeki gerinim değeri alınabilir. Ancak testte kullanılan gerinim ölçerler üç eksenli olduğundan gerinim ölçerlerin eksenlerinin hangi doğrultulara denk geldiğinin belirtilmesi gerekir.



Şekil 6.3 : Sandviç plağın statik analiz sonucu.

G1 gerinim ölçerinde, test sonucu olarak sağ ve yukarı olarak belirtilen gerinim değerleri yapılan statik analizde sırasıyla x ve y yönlerindeki gerinim değerlerini karşılamaktadırlar.

G2 gerinim ölçerinde ise yapıştırılma şekline göre, test sonucu olarak çapraz olarak belirtilen gerinim değeri yapılan statik analizde x yönündeki gerinim değerine karşılık gelmektedir.

İki ayrı gerinim ölçüm cihazı ile alınan gerinim değerleri birbirine çok yakın olduğundan bu ölçümlerin ortalaması ile sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen gerinim değerleri Çizelge 6.2’te karşılaştırılmıştır.

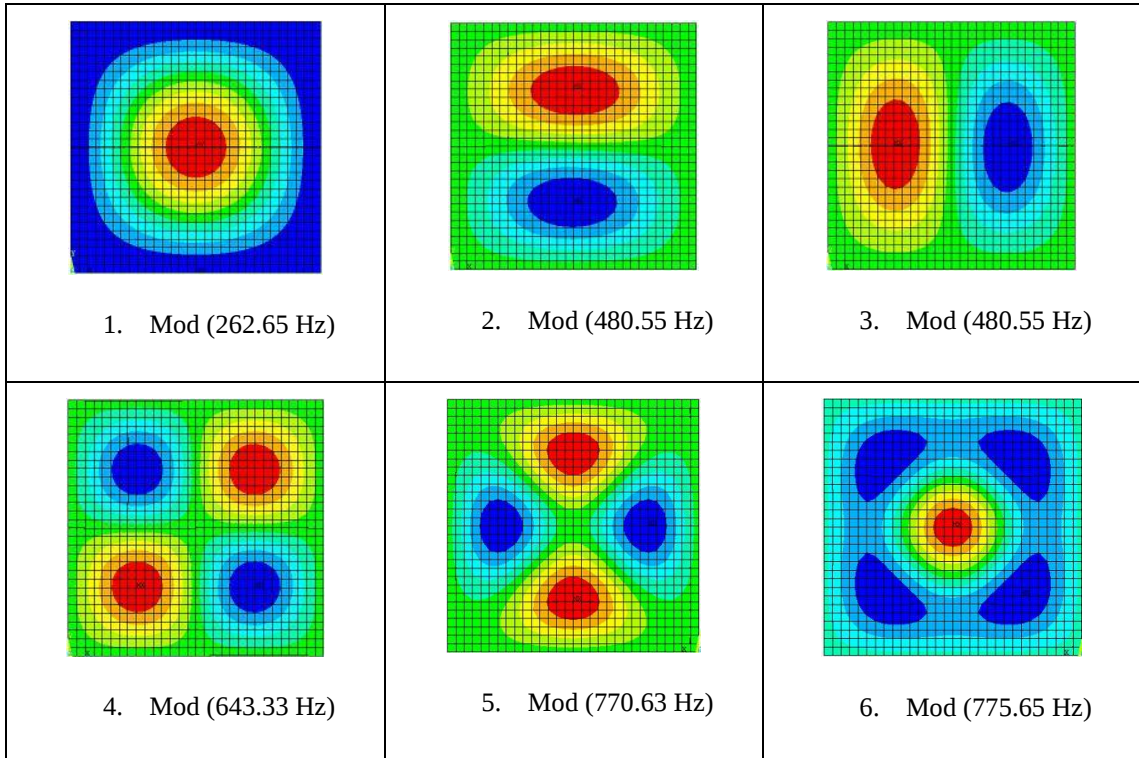
Çizelge 6.2: Test ve analiz sonucu elde edilen gerinim değerlerinin ($\mu\epsilon$) karşılaştırması.

	G1 X yönündeki gerinim	G1 Y yönündeki gerinim	G2 X yönündeki gerinim
Test	80	78	21
Analiz	68.4	68.4	12.1
Fark	%14.5	%12.3	%42

Statik testlerden elde edilen gerinim değerleri ile statik sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen gerinim değerleri karşılaştırıldığında, G1 gerinimlerinde yaklaşık %10'luk bir fark, G2 gerinimlerinde ise %42'lik bir fark saptanmıştır.

6.3 Serbest Titreşim Sonlu Elemanlar Analizi

Sandviç plağın statik sonlu elemanlar analizleri için oluşturulan model kullanılarak serbest titreşim analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen, sandviç plağın ilk 6 mod şekli ve doğal frekansları Şekil 6.4'de verilmiştir.



Şekil 6.4: Sandviç plağın ilk 6 mod şekli ve doğal frekansları.

Çizelge 6.3’de verilen, serbest titreşim testi ve analizi sonucu 1.moda karşılık gelen doğal frekans değerlerini kıyaslarsak %1.7 gibi makul bir fark görülmüştür.

Çizelge 6.3: Serbest titreşim testi ve analizi sonucu 1.moda karşılık gelen doğal frekansın kıyaslanması.

	Test	Analiz	Fark
1. Mod	258 Hz	262.65 Hz	% 1.7

6.4 Geçici Sonlu Elemanlar Analizi

Statik ve serbest titreşim sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan sandviç plak modeli geçici sonlu elemanlar analizi için de kullanılmıştır. Geçici sonlu elemanlar analizinde, anlık basınç yükünü modelleyebilmek için bir basınç fonksiyonuna ihtiyaç vardır. Önceki çalışmalarda kullanılmış olan basınç fonksiyonu kullanılarak plak üzerindeki basınç dağılımına yaklaşımda bulunulmuştur. Denklem 6.1’de kullanılan yaklaşım basınç fonksiyonu verilmiştir [8].

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

t_e : Etkime süresi

P_t : Tepe basıncı

P_e : Emme basıncı

u : Zaman üssü

v : x konum üssü

w : y konum üssü

a : Plak boyu

b : Plak eni

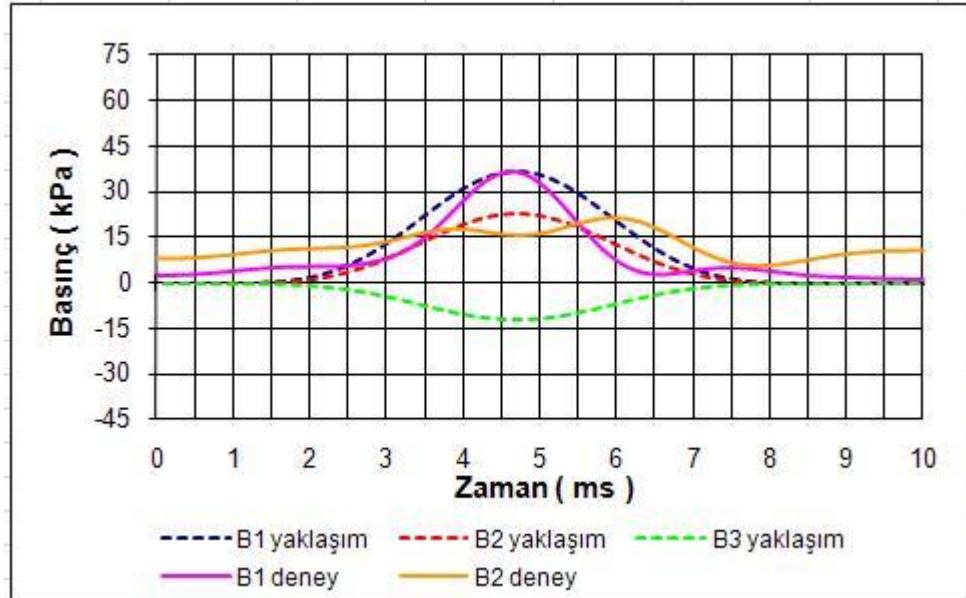
Anlık basınç yükü deneylerinden elde edilen P_t ve P_e değerleri Denklem 6.1’e girilmiştir. Ancak anlık basınç yükü deneyleri sırasında B3 basınç duyargasından veri alınamadığı için P_e değeri, daha önce aynı tepe basıncına (P_t) sahip olan

deneylerin emme karakteristiğine bakılarak belirlenmiştir. EK A’da daha önceki anlık basınç yükü deneylerinden elde edilen basınç dağılımlarından örnekler verilmiştir. Geçici sayısal analiz sonucu elde edilen gerinim değerleri ile anlık basınç yükü deneylerinde elde edilen gerinim değerleri karşılaştırılarak yaklaşım basınç fonksiyonun u, v ve w parametreleri elde edilmiştir. 300 mm × 300 mm etkin alana sahip sandviç plak için basınç fonksiyonunda kullanılan parametreler Çizelge 6.4’te verilmiştir.

Çizelge 6.4: Basınç fonksiyonunda kullanılan parametreler.

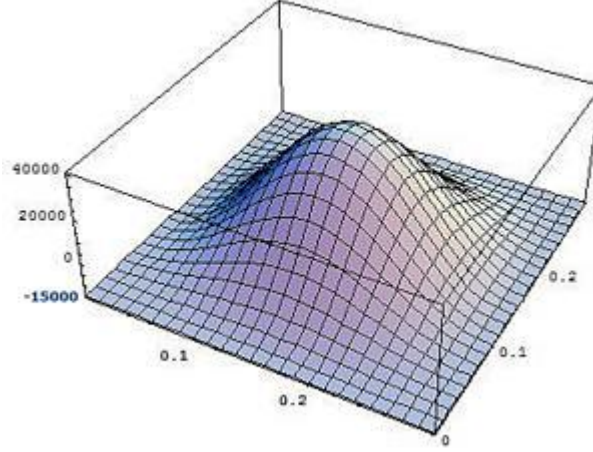
	Birimler	300 mm x 300 mm
a	m	0.3
b	m	0.3
t_e	s	0.0094
u	-	3
v	-	1.1
w	-	1.1
P_t	Pa	36670
P_e	Pa	15000

Bu parametreler kullanılarak çizilen yaklaşım eğrileri ve deneyden elde edilen basınç eğrileri Şekil 6.5’te gösterilmiştir.



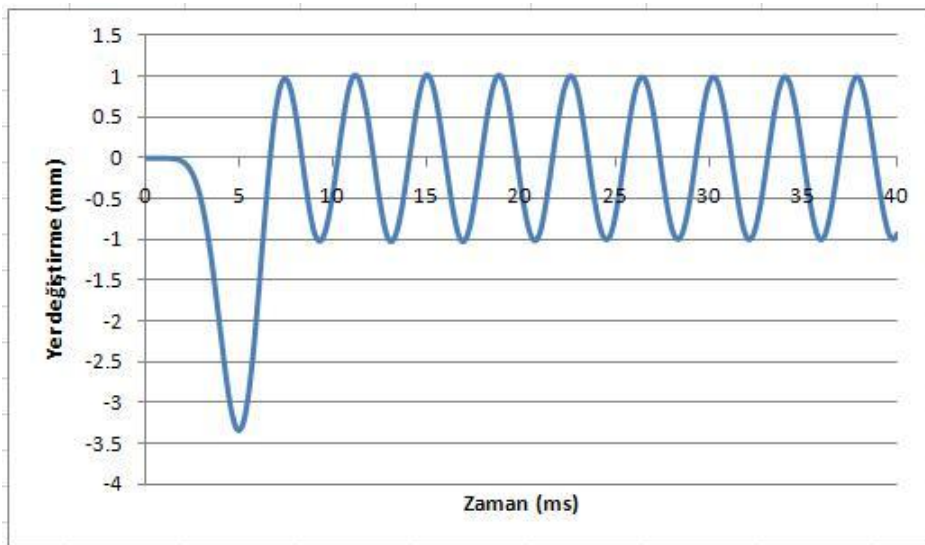
Şekil 6.5: Yaklaşım ve deneysel basınç eğrileri.

Yaklaşım basınç fonksiyonu kullanılarak basıncın etki ettiği sürenin tam ortasında plak yüzeyinde oluşan basınç dağılımının 3 boyutlu görüntüsü Şekil 6.6’da verilmiştir.



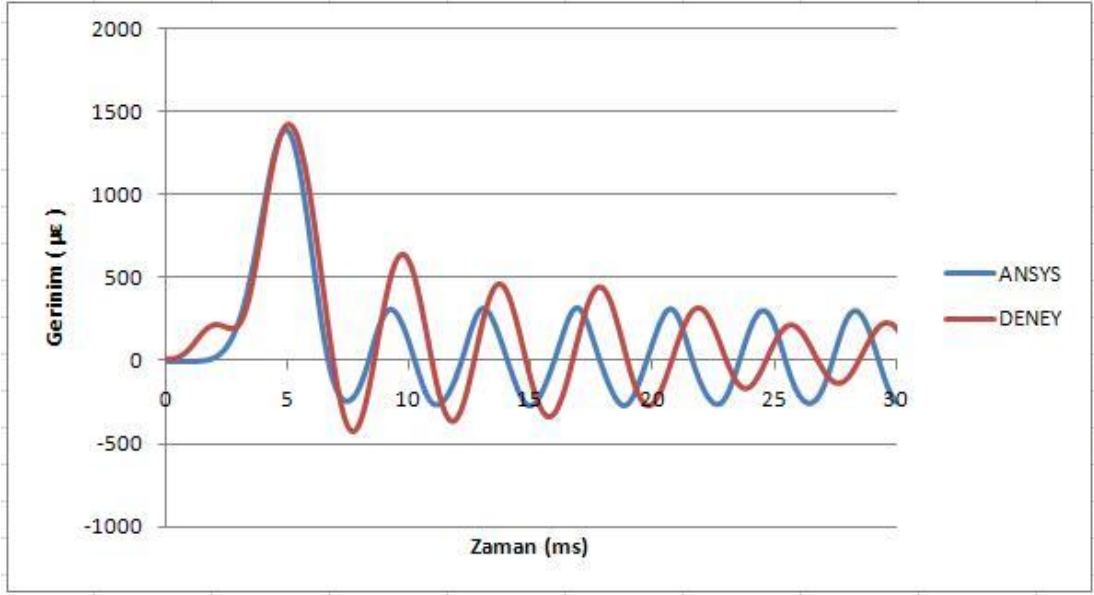
Şekil 6.6: Plak üzerinde oluşan basınç dağılımının üç boyutlu görüntüsü.

Geçici analizlerde, plağın orta noktasındaki yer değiştirme değeri plağın toplam kalınlığının %30’unu geçmesinden ötürü analizler büyük yer değiştirme kabulü yapılarak gerçekleştirilmiştir. Plağın birinci doğal frekansı olan 262.65 Hz dikkate alınarak zaman adımı 0.19 ms olarak belirlenmiştir. Katmanlı çekirdekli sandviç plağın ANSYS’de yapılan geçici analizi sonuçta orta noktasının zamana göre yer değiştirmesi Şekil 6.7’de verilmiştir. Plak orta noktasında 3.344 mm’lik maksimum yer değiştirme oluşmuştur.

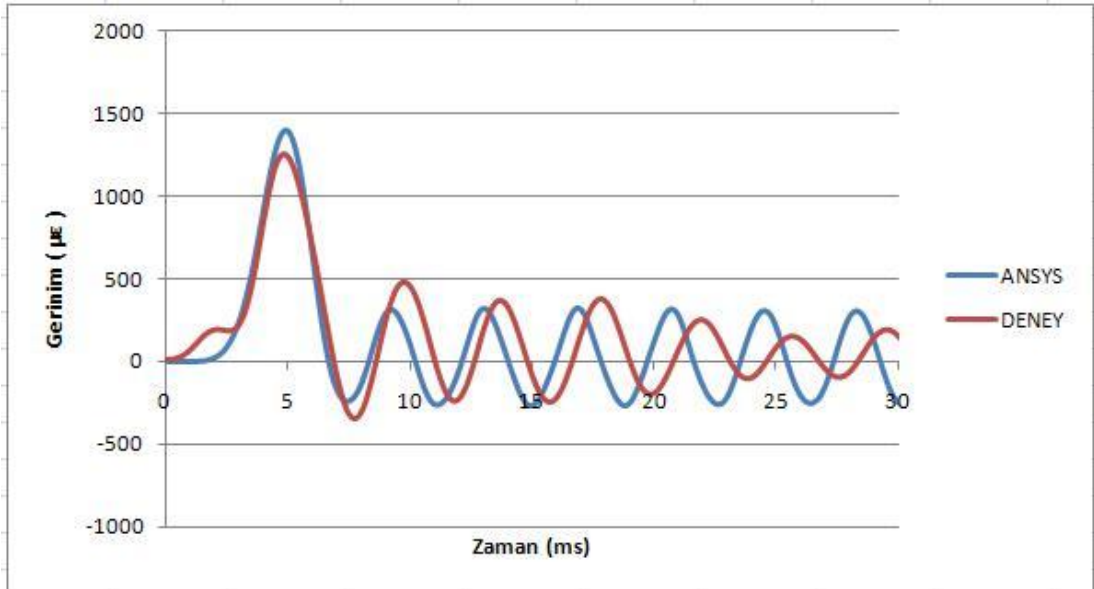


Şekil 6.7: Plak orta noktasının zamana göre yer değiştirmesi.

Sandviç plağın arka yüzeyindeki G1 gerinim ölçerinden alınan x ve y yönündeki gerinim değerleri, geçici analizden elde edilen gerinim değerleri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da sırasıyla ϵ_x ve ϵ_y gerinim değerlerinin karşılaştırmaları verilmiştir. Deney sonucu plak orta noktasında oluşan maksimum ϵ_x gerinim değeri olan $1423\mu\epsilon$ ’e %2 fark ile yaklaşılmıştır. Aynı şekilde plak orta noktasında oluşan maksimum ϵ_y gerinim değeri olan $1253\mu\epsilon$ ’e ise %10 fark ile yaklaşılmıştır.



Şekil 6.8: Plak arka yüzeyinin orta noktasındaki ϵ_x gerinimi karşılaştırması.



Şekil 6.9: Plak arka yüzeyinin orta noktasındaki ϵ_y gerinimi karşılaştırması.

Anlık basınç yükü deneyleri sırasında köşedeki gerinim ölçerden düzgün ölçüm yapılamadığı için geçici sonlu elemanlar analizi sonuçları ile kıyaslanmamıştır.

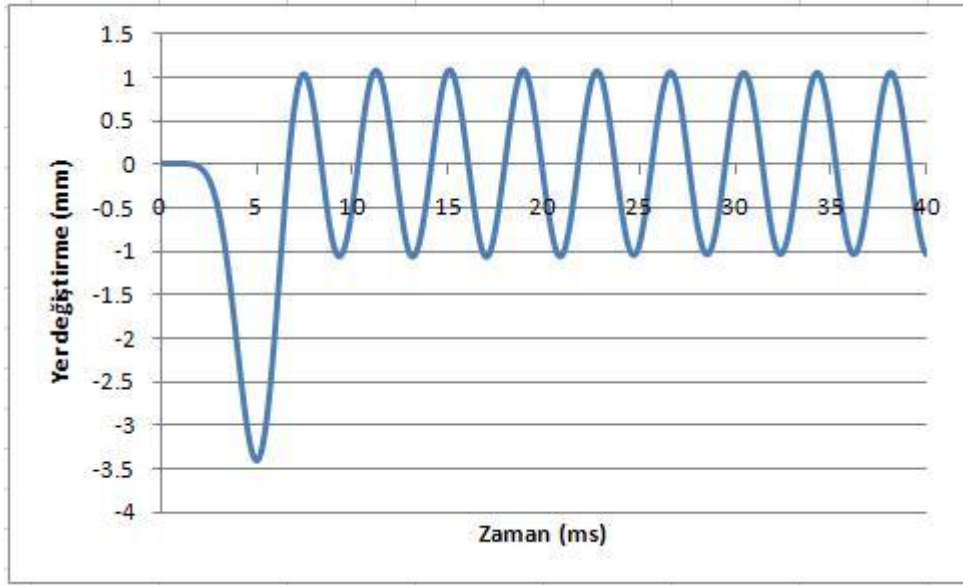
6.5 Çekirdek Sırası Değiştirilerek Geçici Sonlu Elemanlar Analizi

Deneyisel sonuçlar ile geçici sonlu elemanlar analizi sonuçlarının uyumu görüldükten sonra sandviç plağın çekirdek kısmının sırası değiştirilerek geçici sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Anlık basınç yükü deneyleri yapılan sandviç plağın sıralanışına 1. konfigürasyon, sırası değiştirilmiş haline de 2. konfigürasyon isimlendirilmesi yapılmıştır. Çizelge 6.5'te her iki konfigürasyonun katmanlaması verilmiştir.

Çizelge 6.5: Plak konfigürasyonlarının katmanları.

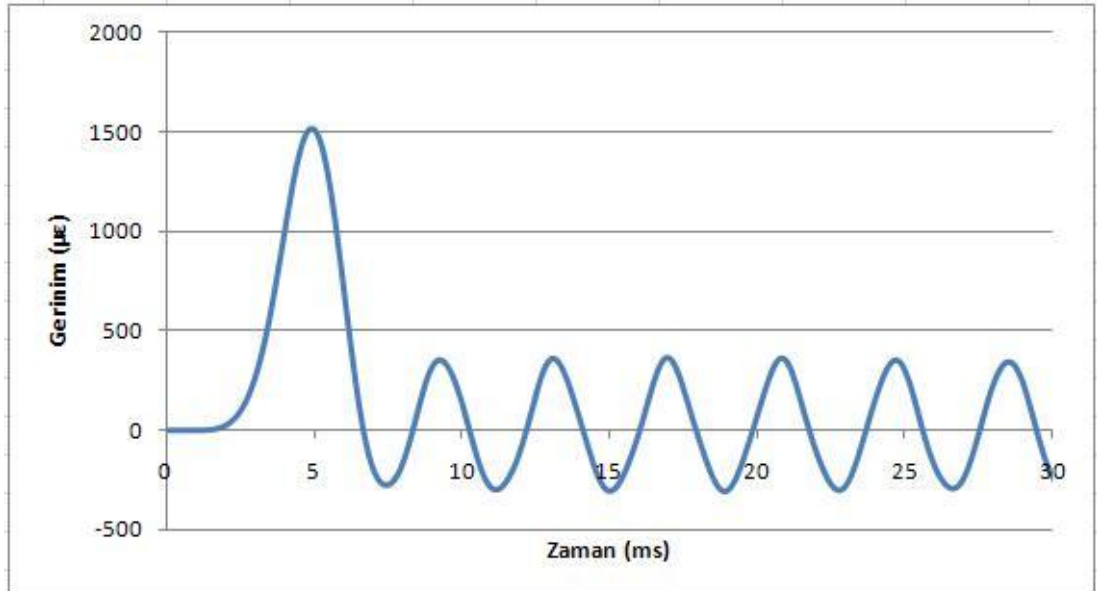
Katman	1. Konfigürasyon	2. Konfigürasyon
1. Anlık basınç yükünün etki ettiği yüzey	Cam / Epoksi	Cam / Epoksi
2.	Cam / Epoksi	Cam / Epoksi
3.	Airex® Köpük	Airex® Köpük
4.	Aramid Bal Peteği	Lexan® Polikarbonat Levha
5.	Lexan® Polikarbonat Levha	Aramid Bal Peteği
6.	Cam / Epoksi	Cam / Epoksi
7.	Cam / Epoksi	Cam / Epoksi

2. konfigürasyona sahip olan plak, 1. konfigürasyona sahip plak gibi aynı yaklaşım basınç fonksiyonu kullanılarak geçici sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Bu şekilde her iki plak konfigürasyonunda da aynı yükleme şartları sağlanmıştır. 2. konfigürasyona sahip plağın geçici sonlu elemanlar analizi sonucu plak orta noktasının zamana göre yer değiştirmesi Şekil 6.10'da verilmiştir. 2. Konfigürasyonun orta noktasında 3.415 mm'lik maksimum yer değiştirme oluşmuştur.



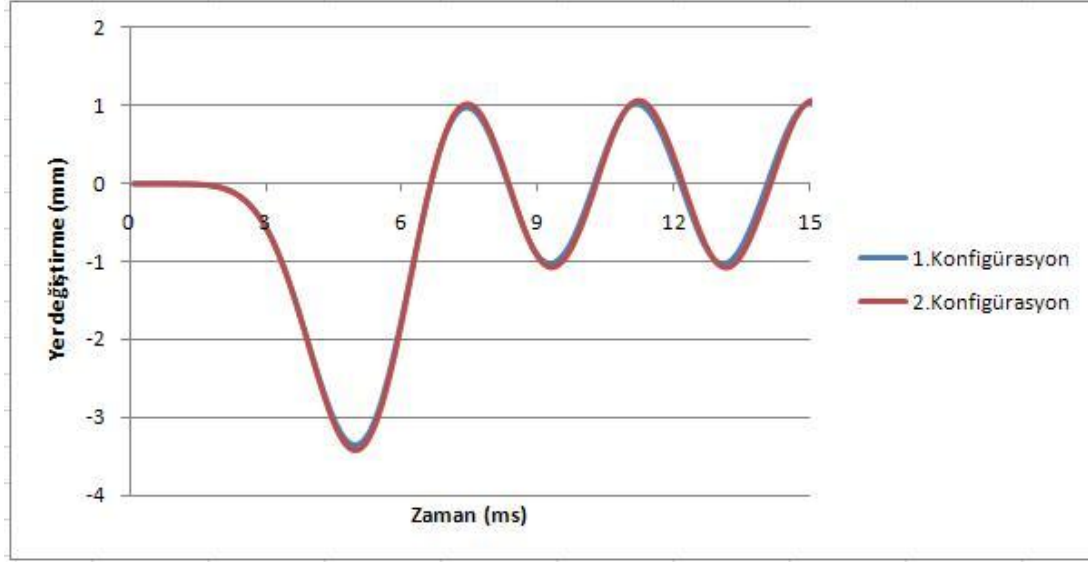
Şekil 6.10: 2. Konfigürasyonun orta noktasının zamana göre yer değişimi.

2. konfigürasyonun geçici sonlu elemanlar analizi sonucunda, orta noktadaki x ve y yönündeki gerinim değerlerine bakıldığında, beklendiği üzere tam orta nokta olmasından dolayı aynı gerinim değerlerini vermiştir. Bu yüzden orta noktadaki gerinimin zamanla değişimi için tek bir grafik konmuştur. Arka yüzeyin orta noktasından ölçülen ϵ_x gerinimin zamanla değişimi Şekil 6.11’de verilmiştir. Plak orta noktasında oluşan maksimum ϵ_x gerinim değeri $1516\mu\epsilon$ ’dir.



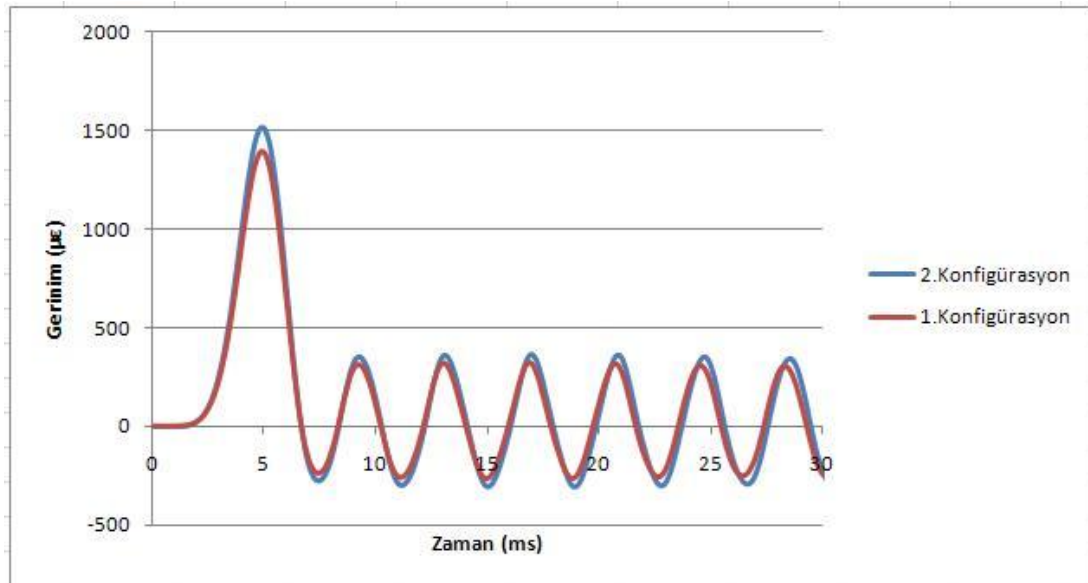
Şekil 6.11: 2. Konfigürasyonun arka yüzeyinin orta noktasındaki ϵ_x gerinim değerinin zamanla değişimi.

Her iki konfigürasyonun orta noktalarındaki yer değiştirmelere bakıldığında, 2. konfigürasyonun ilkinde göre % 2.08'lik daha fazla yer değiştirdiği görülmüştür. Şekil 6.12'de her iki konfigürasyonun orta nokta yer değiştirmeleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.12: İki konfigürasyonun orta nokta yer değiştirmesi karşılaştırması.

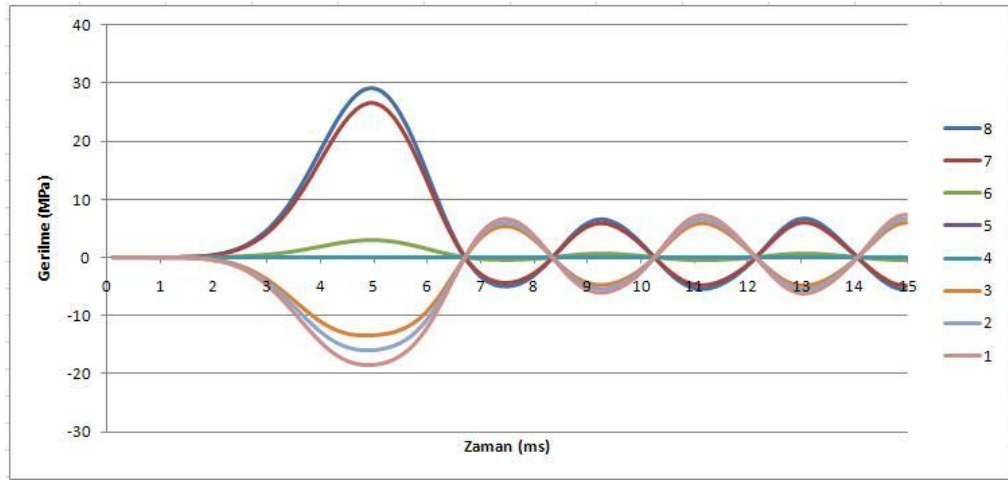
Plakların orta noktalarının x yönündeki gerinim değerleri karşılaştırıldığında, 2. konfigürasyonda, 1. konfigürasyona göre yaklaşık $123\mu\epsilon$ daha fazla gerinim oluşmuştur. Bu fark yaklaşık olarak orta noktada görülen gerinim değerinin %8.1'i kadardır. Şekil 6.13'de her iki konfigürasyonun orta noktasındaki x yönündeki gerinim değerleri karşılaştırılmıştır.



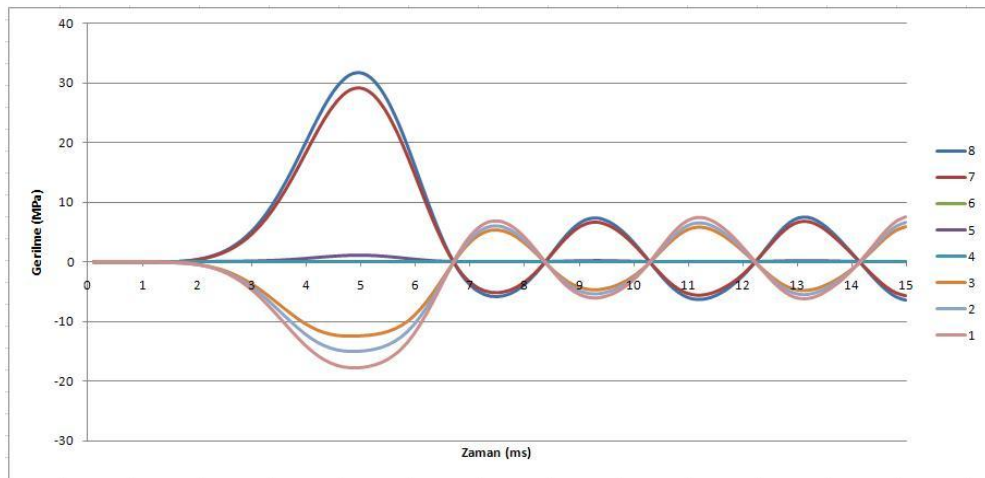
Şekil 6.13: İki konfigürasyonun orta nokta gerinim değeri karşılaştırması.

Her iki konfigürasyonun geçici sonlu elemanlar analizi sonucu, en büyük yer değiştirmenin olduğu plak orta noktasında, her katman yüzeyinde oluşan σ_x normal gerilmesi ve ε_x gerinimi zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Sandviç plak katmanları 1'den 8'e numaralandırılmıştır. 1 numaralı yüzey anlık basınç yükünün geldiği yüzeydir. 8 numaralı yüzey ise gerinim ölçerin yapıştırıldığı arka yüzeydir.

1. ve 2. konfigürasyonlara ait katmanların orta noktalarında oluşan σ_x normal gerilme-zaman grafiği Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'te verilmiştir. Her iki konfigürasyonda da maksimum σ_x normal gerilme değeri 8 numaralı yüzeyde görülmüştür. İlk konfigürasyonda maksimum σ_x değeri 29.22 MPa, ikincisinde ise 31.80 MPa'dır.

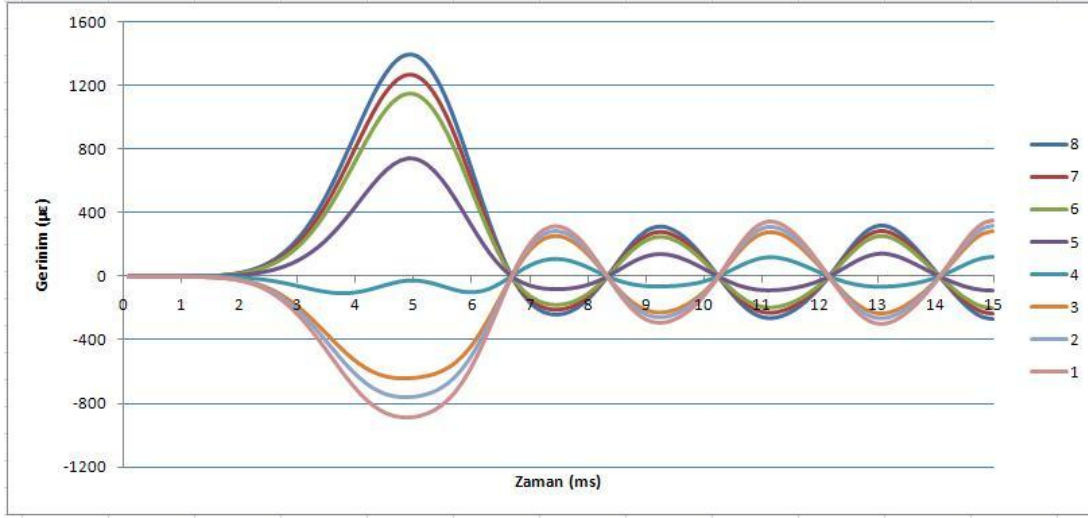


Şekil 6.14: 1. Konfigürasyona ait katmanların orta noktasında oluşan σ_x normal gerilmesinin zamanla değişimi.

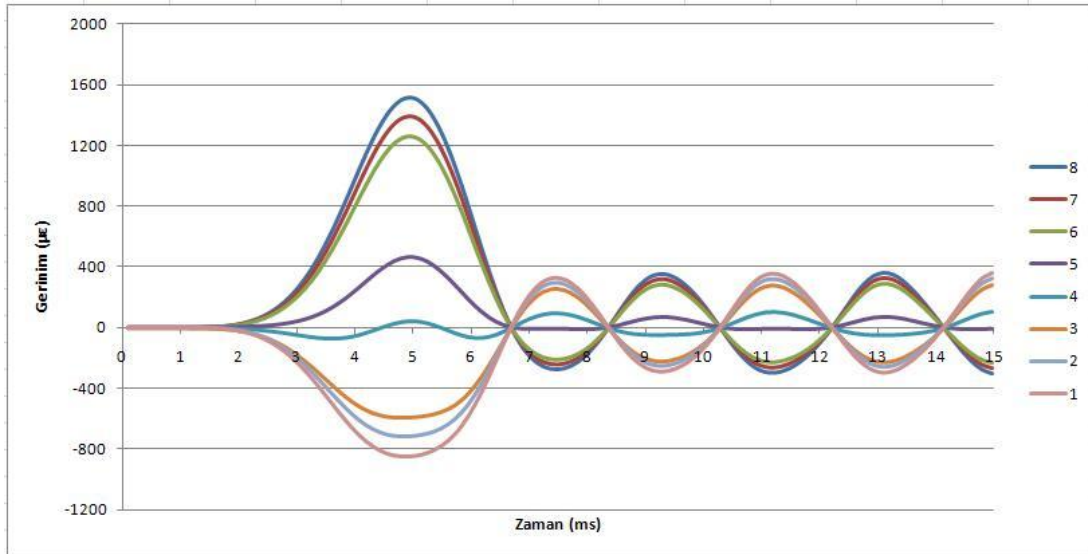


Şekil 6.15: 2. Konfigürasyona ait katmanların orta noktasında oluşan σ_x normal gerilmesinin zamanla değişimi.

Şekil 6.16 ve Şekil 6.17’de ise her iki konfigürasyon için her bir katmandaki orta noktadaki ϵ_x gerinim değerlerinin zamanla değişimi verilmiştir. Maksimum ϵ_x gerinim değeri her iki konfigürasyonda da 8 numaralı yüzeyde görülmüştür.

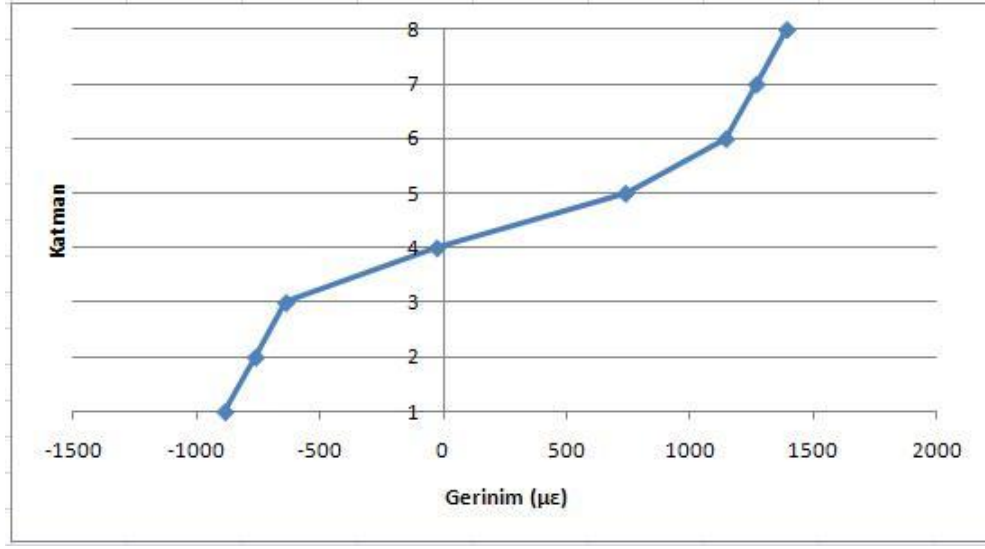


Şekil 6.16: 1. Konfigürasyona ait katmanların orta noktasında oluşan ϵ_x geriniminin zamanla değişimi.



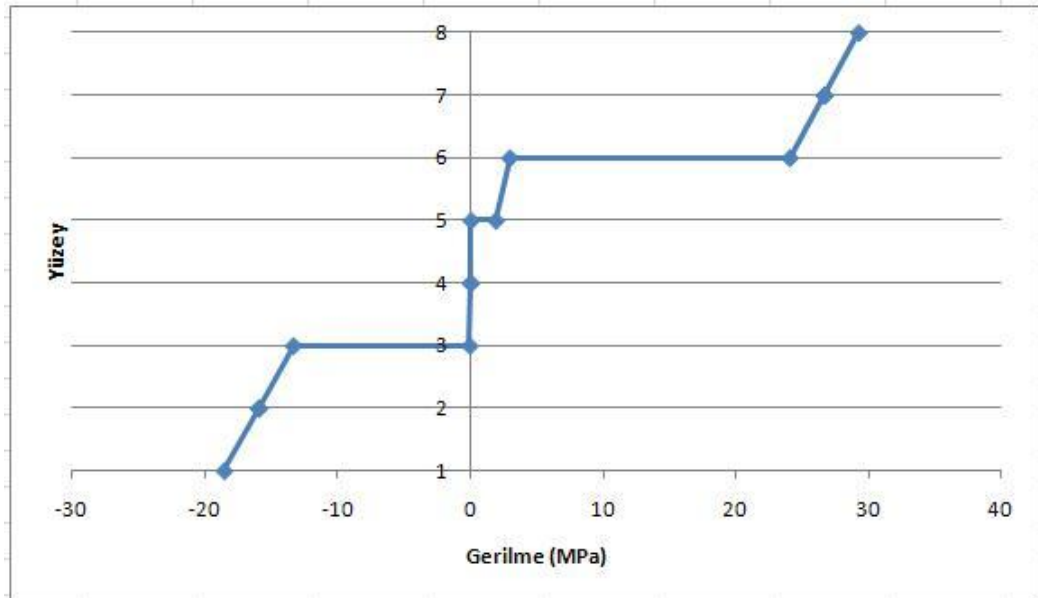
Şekil 6.17: 2. Konfigürasyona ait katmanların orta noktasında oluşan ϵ_x geriniminin zamanla değişimi.

1. konfigürasyonda kalınlık boyunca ϵ_x gerinimine orta nokta için bakıldığında Şekil 6.18'deki gibi değiştiği görülmüştür.



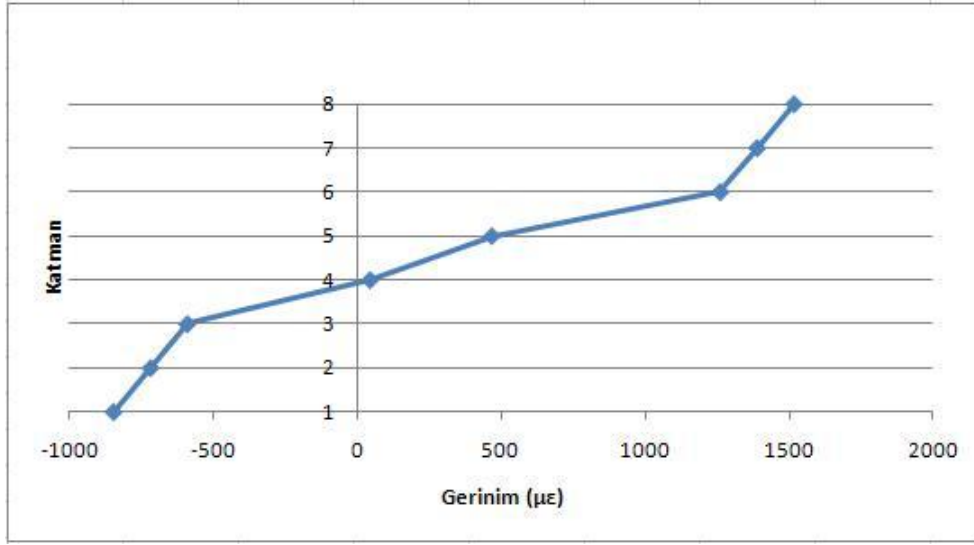
Şekil 6.18: 1. Konfigürasyonda orta nokta için kalınlık boyunca ϵ_x geriniminin değişimi.

ANSYS sonlu elemanlar programında her katmanın hem alt hem üst yüzeylerine bakılarak elde edilen orta noktadaki kalınlık boyunca σ_x normal gerilme değişimi Şekil 6.19'da verilmiştir.



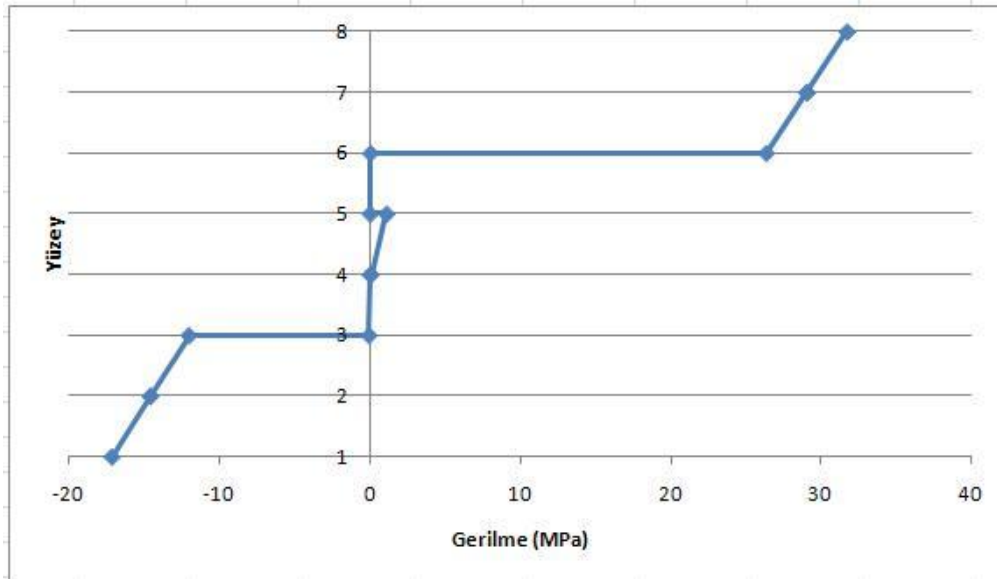
Şekil 6.19: 1. Konfigürasyonda orta nokta için kalınlık boyunca σ_x normal gerilmesinin değişimi.

Şekil 6.20’de 2. konfigürasyon için ϵ_x geriniminin orta nokta için kalınlık boyunca değişimi grafiği verilmiştir.



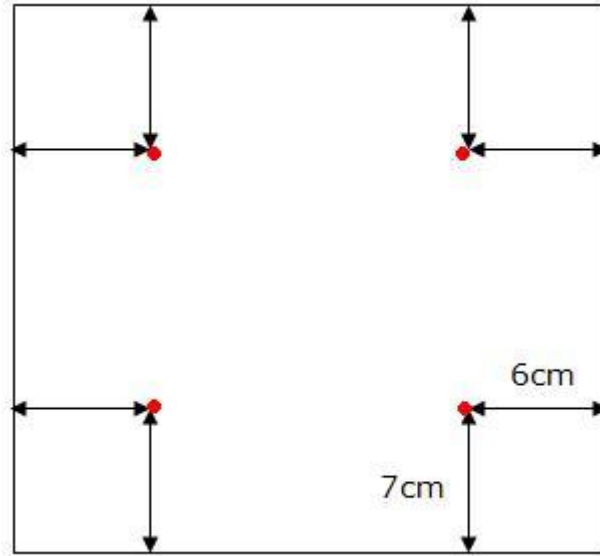
Şekil 6.20: 2. Konfigürasyonda orta nokta için kalınlık boyunca ϵ_x geriniminin değişimi.

Her katmanın hem alt hemde üst yüzeylerine bakılarak elde edilen orta noktadaki kalınlık boyunca σ_x normal gerilmesinin 2. konfigürasyon için değişimi Şekil 6.21’de verilmiştir.



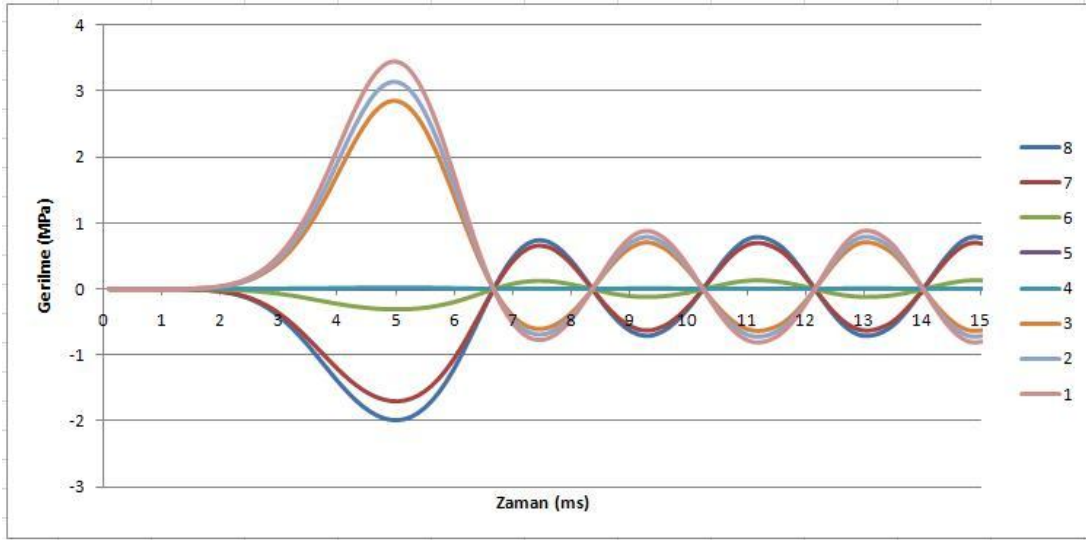
Şekil 6.21: 2. Konfigürasyonda orta nokta için kalınlık boyunca σ_x normal gerilmesinin değişimi.

Geçici sonlu elemanlar analizi sonucunda, plak yüzeylerinde oluşan kayma gerilmeleri ve kayma gerinimlerine bakıldığında τ_{xy} kayma gerilmesi ve γ_{xy} kayma gerinimi diğer yöndeki kayma gerilmelerine ve gerinimlerine göre daha büyük değerler almışlardır. τ_{xy} kayma gerilmesi ve γ_{xy} kayma gerinimi plağın sağ kenarından 6 cm içeride, alt kenarından ise 7 cm yukarıda en büyük değeri almışlardır. Plak yüzeyinde oluşan maksimum τ_{xy} kayma gerilmesi ve γ_{xy} kayma gerinimi görülen yerler Şekil 6.22’de gösterilmiştir.

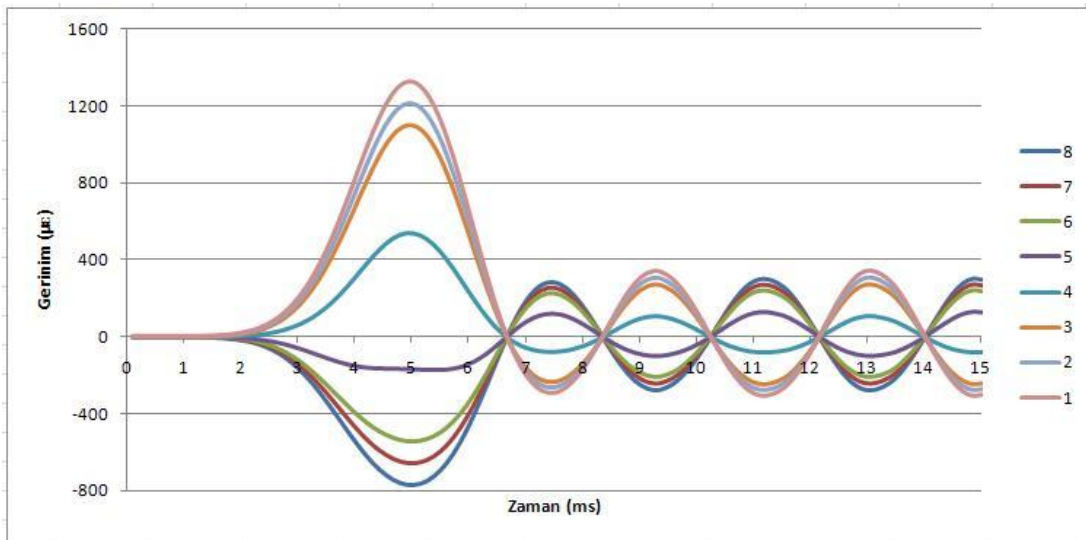


Şekil 6.22: Plak üzerindeki τ_{xy} kayma gerilmesi ve γ_{xy} kayma gerinimi değerlerinin en büyük olduğu konumlar.

1. konfigürasyonun τ_{xy} kayma gerilmesi ve γ_{xy} kayma geriniminin katmanlar boyunca zamanla değişimi Şekil 6.23 ve Şekil 6.24’de verilmiştir. 1. konfigürasyon için maksimum τ_{xy} kayma gerilmesi ve γ_{xy} kayma gerinimi 1 numaralı yüzeyde olup, değerleri sırasıyla 3.44 MPa ve 1323 $\mu\epsilon$ ’dir.

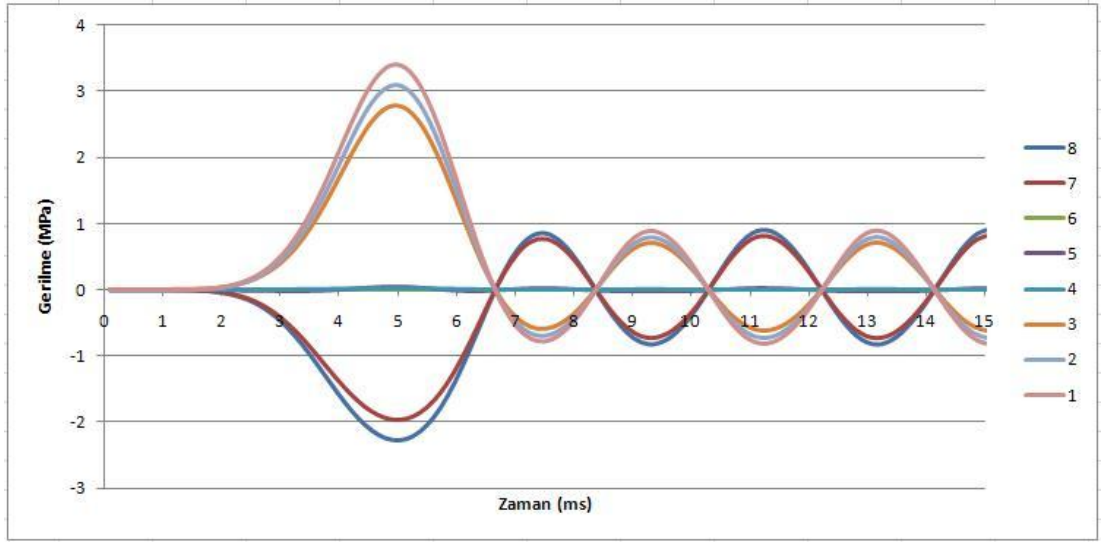


Şekil 6.23: 1. Konfigürasyona ait τ_{xy} kayma gerilmesinin katmanlar boyunca zamanla değişimi.

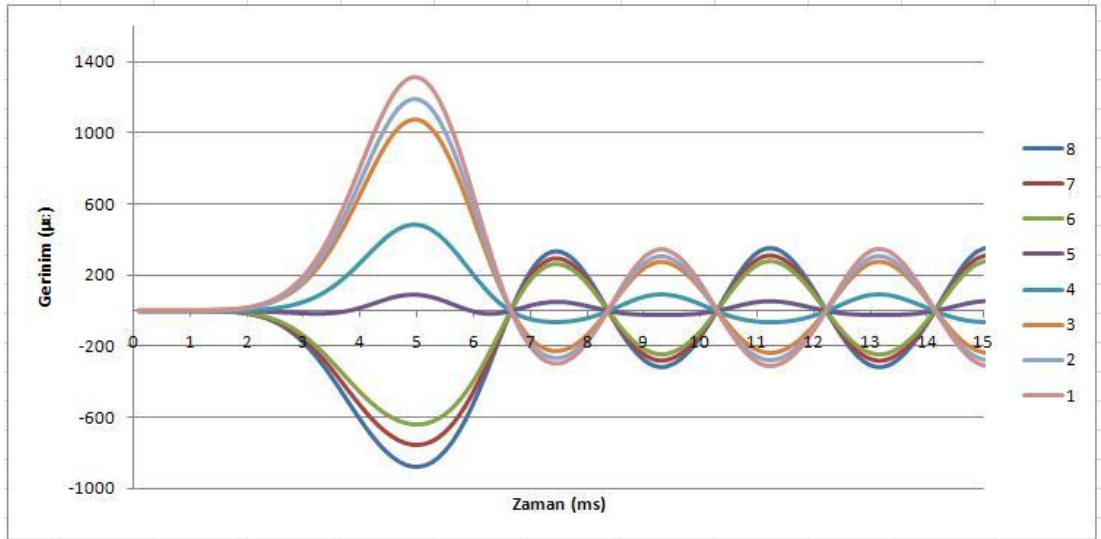


Şekil 6.24: 1. Konfigürasyona ait γ_{xy} kayma geriniminin katmanlar boyunca zamanla değişimi.

2. konfigürasyonun τ_{xy} kayma gerilmesi ve γ_{xy} kayma geriniminin katmanlar boyunca zamanla değişimi Şekil 6.25 ve Şekil 6.26’da verilmiştir. 2. konfigürasyon için maksimum τ_{xy} kayma gerilmesi ve γ_{xy} kayma gerinimi 1 numaralı yüzeyde olup, değerleri sırasıyla 3.40 MPa ve 1308 $\mu\epsilon$ ’dir.



Şekil 6.25: 2. Konfigürasyona ait τ_{xy} kayma gerilmesinin katmanlar boyunca zamanla değişimi.



Şekil 6.26: 2. Konfigürasyona ait γ_{xy} kayma geriniminin katmanlar boyunca zamanla değişimi.

İki konfigürasyonun orta noktadaki yer değiştirme ϵ_x ve σ_x 'in maksimum değerlerinin karşılaştırması Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.6: İki konfigürasyondaki yer değiştirme, ϵ_x ve σ_x 'in maksimum değerlerinin karşılaştırması.

	1. Konfigürasyon	2. Konfigürasyon
Yer değiştirme (mm)	3.344	3.415
$\epsilon_x (\mu\epsilon)$	1393	1516
σ_x (MPa)	29.22	31.80

İki konfigürasyonun kayma gerilmesinin en büyük değere ulaştığı noktadaki τ_{xy} ve γ_{xy} 'nin maksimum değerlerinin karşılaştırması Çizelge 6.7'de verilmiştir.

Çizelge 6.7 : İki konfigürasyondaki τ_{xy} ve γ_{xy} 'nin maksimum değerlerinin karşılaştırması.

	1. Konfigürasyon	2. Konfigürasyon
τ_{xy} (MPa)	3.44	3.40
$\gamma_{xy} (\mu\epsilon)$	1323	1308

7. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada katmanlı çekirdekli kompozit plağın anlık basınç yüküne cevabı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında, plağın statik testleri, serbest titreşim testi ve anlık basınç yükü deneyleri yapılmıştır. Statik, serbest titreşim ve geçici sonlu elemanlar analizleri ise çalışmanın sayısal kısmını oluşturmuştur. Sonlu elemanlar analizleri ANSYS yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen katmanlı çekirdekli sandviç plağın sonlu elemanlar analizi ile validasyonu sağlandıktan sonra, sonlu elemanlar programında çekirdek malzemesinin sırası değiştirilerek analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmanın ilk aşamasını, sandviç plağın üretimi ve deney platformuna yerleştirilmesi için uygun ebatlarda kesilmesi oluşturmuştur. Ardından ankastre sınır şartlarını sağlamak için sandviç plak, çelik çerçeveye 12 tane M12, 48 tane M5 cıvata ile sabitlenmiştir. Plağın arka yüzeyine iki tane gerinimölçer yerleştirilerek gerinim değerleri ölçülmüştür. Anlık basınç yükü deneyleri için ise plağın ön yüzeyine üç tane basınç duyargası yerleştirilmiştir. Ancak basınç duyargalarının iki tanesinden veri alınabilmiştir.

Sandviç plağın statik test ve analiz sonuçları karşılaştırıldığı zaman, orta noktadaki gerinim değerlerinde yaklaşık %14'lük bir fark görülmüştür. Uygulanan yükün tam olarak yayılı olduğu varsayılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Ancak kumun içindeki kum toprakları nedeniyle tam olarak yayılı olmadığı aşikârdır. Bu yüzden, yükün uygulanması sırasındaki birkaç mikro gerinim değeri az veya fazla ölçülmesi toplam ölçülen gerinim değeri çok az olduğundan oranlandığı vakit yüksek bir yüzde ortaya çıkarmıştır. Değer olarak bakıldığında 12 mikro gerinimlik bir fark saptanmıştır.

Sandviç plağın serbest titreşim test ve analiz sonuçları karşılaştırıldığı zaman plağın 1.moda karşılık gelen doğal frekansının yaklaşık % 1.7'lik bir farkla elde edildiği görülmüştür. Z-yönündeki yer değiştirmelerinde en baskın modun 1. mod olduğu anlaşıldığından serbest titreşim testinde 1.modun elde edilmesi yeterli görülmüştür.

Anlık basınç yükü deneylerinde elde edilen basınç verileri yaklaşım basınç fonksiyonunda kullanılarak plak yüzeyindeki basınç dağılımına bir yaklaşım yapılmıştır. Geçici sonlu elemanlar analizinde bu basınç dağılımı yaklaşımı kullanılarak, plağın arka yüzeyinin orta noktasındaki gerinimin zamanla değişimi çok iyi bir şekilde yakalanmıştır. Deney ile analizin uyumundan sonra, plağın çekirdek malzemesinin sırası değiştirilmiş ve aynı yaklaşım basınç fonksiyonu kullanılarak analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda çekirdek sırası değiştirilen plağın orta nokta yer değiştirmesinde %2.08, aynı noktadaki maksimum ϵ_x gerinim ve σ_x normal gerilmesinde ise %8'lik bir artış görülmüştür. Analizlerde yaklaşık 36 kPa'lık maksimum basınç kullanılmıştır. Bu maksimum basınç değeri plakta herhangi bir kalıcı deformasyona sebep olmayıp, plak güvenli yükleme sınırları içinde tutulmuştur. Buradan çıkarılacak sonuç, daha yüksek basınç yüklerinin altında aynı yoğunluk ve aynı malzemeler kullanılarak üretilen sandviç plakların sadece uygun konfigürasyonu seçilerek kullanıldığında yer değiştirme ve gerinim gibi plağın istikrarını bozan etkilerde minimum %8'lik bir azalma sağlanabileceğidir.

İleriki çalışmalarda, daha fazla noktadan basınç verisi alınarak, plak üzerindeki basınç dağılımına daha çok güvenilmesi sonucu, farklı basınç yüklerinde plaklarda oluşan gerinim ve yer değiştirme değerleri incelenebilir. Bu şekilde plak kritik yükleme koşulları elde edilir ve sonrasında çekirdek sırası değiştirilerek aynı kritik yükleme koşulunda, çekirdek sıranın değişiminin tasarımcıya ne kadar kazanç sağladığı araştırılabilir.

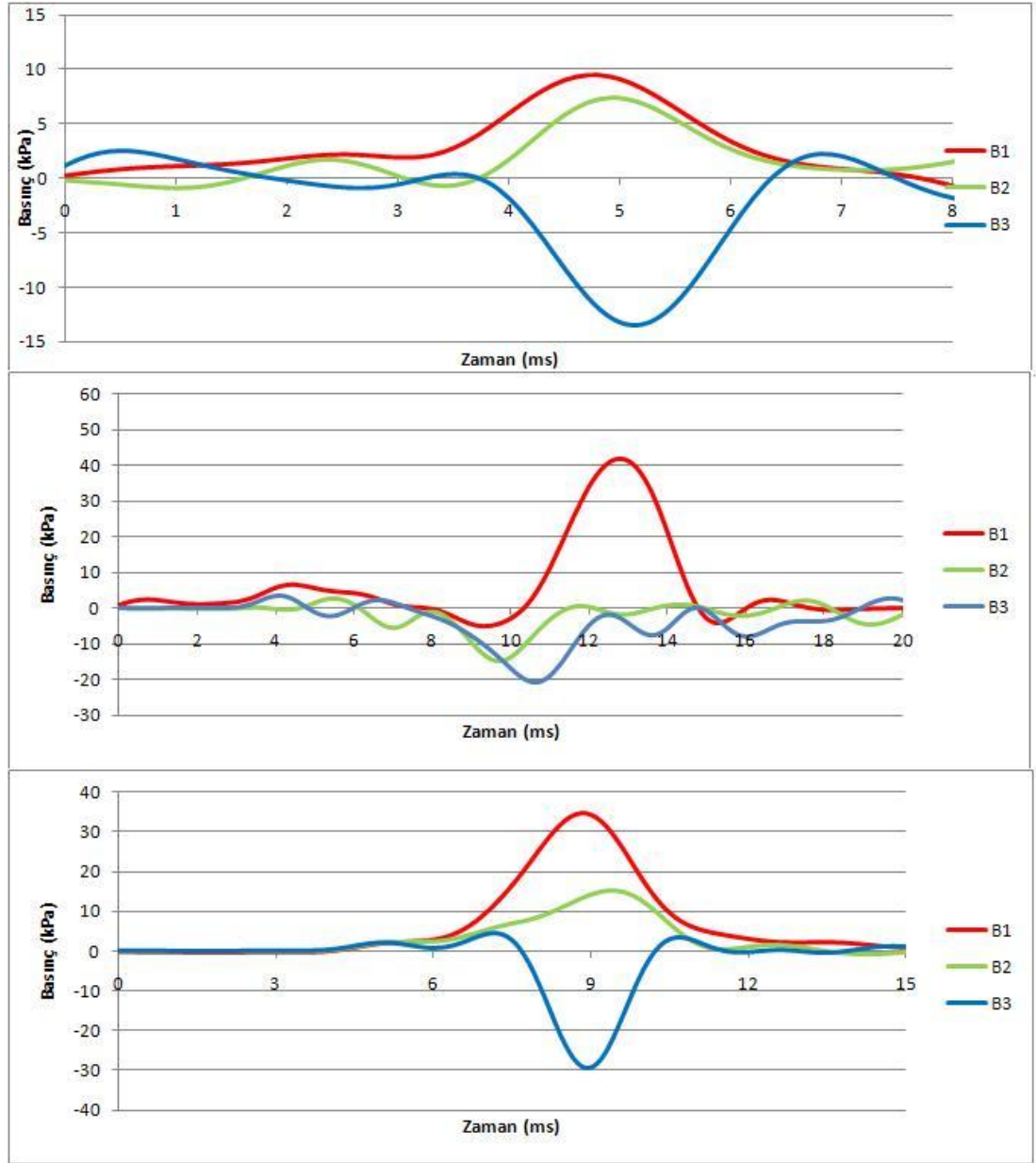
KAYNAKLAR

- [1] **Tengiz, E.**, 2008. Hasarlı bir kompozit yapının onarımı ve onarılan yapının mukavemetinin deneysel olarak incelenmesi, *Lisans Bitirme Tezi*, İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İstanbul.
- [2] **Türkmen, H.S.**, 1997. Katmanlı kompozit panellerin anlık basınç yüküne dinamik cevabı, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] **Kazancı, Z.**, 2006. Anlık basınç yükü etkisi altındaki katmanlı kompozit bir plağın lineer olmayan dinamik davranışı, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **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.
- [5] **Özdemirli, E.**, 2006. Anlık Basınç yükü etkisindeki kompozit sandviç plağın dinamik davranışının deneysel ve sayısal incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [6] **Çoğuz, B.A.**, 2006. Katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü altında dinamik davranışlarının deneysel incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] **Ömercikoğlu, A.**, 2009. Metal katmanlar içeren hibrit katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü altındaki dinamik cevabının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] **Baş, A.**, 2009. Hibrit katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü altındaki dinamik davranışının deneysel ve sayısal incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] **Wang E., Gardner N., Shukla A.**, 2009: The blast resistance of sandwich composites with stepwise graded cores, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. **46**, pp. 3492-3502.
- [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* Vol. **43**, pp. 7644-7658.
- [11] **Tekalur, S.A., Shukla A., Shivakumar K.**, 2008: Blast resistance of polyurea based layered composite materials, *Composite Structures* Vol. **84**, pp. 271-281.
- [12] **Tekalur, S.A., Bogdanovich A.E., Shukla A.**, 2009: Shock loading response of sandwich panels with 3-D woven E-glass composite skins and stitched foam core, *Composite Science and Technology*, Vol. **69**, pp. 736-753.

- [13] **Langdon, G.S., Chi Y., Nurick G.N., Haupt P.**, 2009: Response of **GLARE®** panels to blast loading, *Engineering Structures*, Vol. **31**, pp. 3116-3120.
- [14] **Bahei-El-Din Y.A., Dvorak G.J.**, 2008: Enhancement of blast resistance of sandwich plates, *Composites Part B*, Vol. **39**, pp. 120-127.
- [15] **Zenkert, D.**, 1997. The Handbook of Sandwich Construction, EMAS Publishing, London, United Kingdom.
- [16] **Vinson, J.R., Ph.D., P.E.**, 1999. The Behaviour of Sandwich Structures of Isotropic and Composite Materials, TECHNOMIC Publishing, Pennsylvania, U.S.A.
- [17] **Plascore**, Bal Peteği Malzemeler, <<http://www.plascore.com/product-honeycomb-cores.htm>>, alındığı tarih 03.02.2010.
- [18] **Lexan®**, Polikarbonat Levha Genel Özellikler, <http://www.plastas.net/index.php?option=com_content&view=article&id=5&Itemid=8>, alındığı tarih 10.03.2010.
- [19] **Lexan®**, Polikarbonat Levha Kullanım Alanları, <<http://www.sel.com.tr/disticaret/tr/products/lexan.pdf>>, alındığı tarih 10.03.2010.
- [20] **Airex® C70**, Universal Yapısal Köpük Uygulama Alanları ve Genel Özellikleri, <<http://www.topplast.ee/files/2/AIREXC70.pdf>>, alındığı tarih 10.03.2010.
- [21] **Lexan® 9600**, Polikarbonat Levha Malzeme Özellikleri, <<http://www.orionind.com/lexan9600.pdf>>, alındığı tarih 10.03.2010.
- [22] **SP Systems**, 2006. Guide to Composites.
- [23] **TML Strain Gauges**, TML Gerinim Ölçer Katalogu.
- [24] **VXI Technology Inc.**, EX1629 48-Channel Strain Gage Instrument User's Manual.
- [25] **ANSYS Help Menu**, Release 11.0 Documentation for ANSYS.

EKLER

EK A: ELDE EDİLEN ÖRNEK BASINÇ DAĞILIMLARI



Şekil A.1 : Örnek basınç dağılımları.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Ertan Tengiz

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul / 1985

Adres: Gazeteciler Sitesi Darüşşafaka Mah. D7 Blok Daire:4 Tarabya

Lisans Üniversite: İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak Mühendisliği