

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ANLIK BASINÇ YÜKÜ ETKİSİNDEKİ KOMPOZİT
SANDVIÇ PLAĞIN DİNAMİK DAVRANIŞININ
DENEYSEL ve SAYISAL İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uçak Müh. Enis ÖZDEMİRLİ

**Anabilim Dalı: DİSİPLİNLERARASI PROGRAMLAR
Programı: UÇAK VE UZAY MÜHENDİSLİĞİ**

HAZİRAN 2006

ANLIK BASINÇ YÜKÜ ETKİSİNDEKİ KOMPOZİT
SANDVIÇ PLAĞIN DİNAMİK DAVRANIŞININ
DENEYSEL ve SAYISAL İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Uçak Müh. Enis ÖZDEMİRLİ
511031006

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12 Mayıs 2006

Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2006

Tez Danışmanı : Prof Dr. Zahit MECİTOĞLU
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Erol ŞENOCAK
Yrd. Doç. Dr. Vedat DOĞAN



HAZİRAN 2006

ÖNSÖZ

Sandviç yapılar, günümüzde inşaat sektöründen makine sanayine kadar çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Özellikle kompozit malzemeden üretilmiş olan sandviç yapılar, ağırlık/dayanım oranlarının yüksek olması nedeniyle uçak ve uzay sanayinde geniş uygulama alanına sahiptirler.

Uzay mekiklerinde, uçak kabin içi yapılarında, uçuş kumanda yüzeylerinde, kargo kapılarında, gövde yapılarında kompozit sandviç yapılar kullanılmaktadır. Kullanılan sandviç yapılar patlama sonucu, şok dalgaları etkisi ve detonasyon sonucu oluşan ani basınç yüklerine maruz kalmaktadır. Çok kısa sürede yapı üzerine yüksek miktarda yükler etki etmektedir. Bu nedenle sandviç yapıların anlık yüklere karşı cevaplarının bilinmesi son derece önemlidir.

Bu çalışmada, kompozit malzemeden üretilmiş bir sandviç plağın iki farklı sınır şartında anlık basınç yükü etkisindeki davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneylerde, sandviç plak üzerine anlık hava basıncı etki ettirilmiş, plak üzerinde farklı noktalarda basınç ve birim uzama değerleri ölçülmüştür. Ölçülen basınç değerleri sonlu eleman yazılımında kullanılarak birim uzamalar hesaplanmıştır. Deneysel ve sayısal birim uzama sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tez danışmanlığımı kabul eden ve çalışmalarında yol göstererek benden yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Zahit Mecitoğlu'na saygılarımı ve şükranlarımı sunarım. Aynı zamanda, deneylerin yapılmasında emeği geçen İ.T.Ü. Trisonik Araştırma Merkezi teknikeri Müslüm Çakır'a teşekkür ederim. Ayrıca kompozit sandviç plağın yapılmasına imkan sağlayan THY Teknik A.Ş.'ye ve deneylerde kullanılan veri toplama sisteminin kurulumunda destek veren BİS Sistem Entegrasyon Elektronik Bilişim Hiz. Tic. Ltd. Şti. Müdürü sayın A. İhsan Arslan'a çok teşekkür ederim.

Haziran 2006

Enis Özdemirli

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. SANDVIÇ YAPILAR	4
2.1. Sandviç Yapının Kısımları	4
2.1.1. Çekirdek Kısım	4
2.1.2. Yüzey Kısımları	5
2.1.3. Yapıştırıcı ve Reçineler	5
2.2. Prepreg Sandviç Yapı	5
2.3. Sandviç Yapıların Özellikleri ve Avantajları	5
2.4. Sandviç Yapıların Üretim Yöntemleri	7
2.5. Prepreg Sandviç Yapıların Test Yöntemleri	7
3. SİNYAL KOŞULLAMA	8
3.1. Duyargalar	9
3.2. Sinyal Koşullama Fonksiyonları	12
3.3. Sinyal Koşullama Sistemleri	14
4. DENEY	15
4.1. Deney Numunesi	15
4.1.1. Çekirdek	15
4.1.2. Yüzeyler	17
4.1.3. Yapıştırıcı	18
4.2. Deney Donanımı	19
4.2.1. Basınç Tüpü	19
4.2.2. Membran	20
4.2.3. Manometre	21
4.2.4. İskelet	22
4.2.5. Mesnet	22
4.2.6. Mesnet Sehpaı	23
4.2.7. Duyargalar	24
4.2.8. Ölçüm Sistemi	27
4.2.9. VEE Programı	28

4.3. Deneylerin Yapılışı	30
4.3.1. Basınç Ölçümü	30
4.3.2. Birim Uzama Ölçümü	31
5. SAYISAL ANALİZLER	32
5.1. Kullanılan Eleman	32
5.2. Sınır Şartları	33
5.2.1. Ankastre Plak	33
5.2.2. Konsol Plak	33
5.3. Analizler	34
5.3.1. Statik Analiz	34
5.3.2. Serbest Titreşim Analizi	37
5.3.3. Transient Analiz	38
6. SONUÇLAR	42
7. DEĞERLENDİRME	45
KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ	50
EKLER	51
EK-A (SOYULMA TESTİ)	52
EK-B (BASINÇ DUYARGALARININ KALİBRASYON SERTİFİKASI)	54
EK-C (ANKASTRE PLAK MOD ŞEKİLLERİ)	57
EK-D (KONSOL PLAK MOD ŞEKİLLERİ)	61

KISALTMALAR

I/O	: Input / Output
SCP	: Signal Conditioning Plug-On
HP	: Hewlett –Packard
DC	: Direct Current / Doğru Akım
AC	: Alternate Current / Alternatif(Dalgalı) Akım
FM	: Frequency Modulation
V	: Volt
F_p	: Soyulma tork kuvveti
C_p	: Soyulma dayanımı

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1: Sandviç yapıların özellikleri	6
Tablo 3.1: Bazı duyargaların karakteristik özellikleri	9
Tablo 4.1: Balpeteği özellikleri (katalog bilgileri)	16
Tablo 4.2: Bal peteği özellikleri (Hexcel firmasından edinilen değerler)	17
Tablo 4.3: ANSYS yazılımında kullanılan bal peteği özellikleri	17
Tablo 4.4: HexPly® 6268 malzeme özellikleri	18
Tablo 4.5: Deneylerde kullanılan strain gauge özellikleri	25
Tablo 4.6: Deneylerde kullanılan basınç duyargalarının özellikleri	26
Tablo 4.7: Basınç duyargaları kalibrasyon değerleri	30
Tablo 5.1: Ankastre plağın doğal frekansları	37
Tablo 5.2: Konsol plağın doğal frekansları	38

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2.1: Sandviç yapı	4
Şekil 2.2: Sandviç yapı ve I profilli bir kiriş.....	6
Şekil 2.3: Sandviç yapı üretim yöntemleri.....	7
Şekil 2.4: Vakum yöntemi ile sandviç yapı üretimi.....	7
Şekil 3.1: Sinyal koşullamanın genel yapısı	8
Şekil 3.2: Veri toplama sistemi.....	9
Şekil 3.3: Yarım köprü konfigürasyonlu strain gauge.....	10
Şekil 3.4: Akım sinyali	11
Şekil 3.5: 2 yollu RTD konfigürasyonu.....	12
Şekil 4.1: Altıgen hücreli bal peteği şekli.....	16
Şekil 4.2: Basınç tüpü	19
Şekil 4.3: Portatif başlık.....	20
Şekil 4.4: Membranın folyo tabaka ve basınç tüpüne göre kesilmiş görüntüsü	20
Şekil 4.5: Membranın patlama sonrası görüntüsü	21
Şekil 4.6: Gliserinli manometre	21
Şekil 4.7: İskelet	22
Şekil 4.8: Mesnet	23
Şekil 4.9: Mesnet sehpası.....	23
Şekil 4.10: Destek ve tek kanatlı mesnet sehpası	24
Şekil 4.11: WFCA 3-11-1L tipi strain gauge.....	24
Şekil 4.12: Strain gauge'ların plak üzerindeki yerleri	25
Şekil 4.13: LE-125 basınç duyargası	26
Şekil 4.14: Basınç duyargalarının sandviç plak üzerindeki yerleri.....	27
Şekil 4.15: Çeyrek köprü Wheatstone bağlantısı.....	31
Şekil 4.16: Birim uzama SCP'si jumper ayarları.....	31
Şekil 5.1: SHELL91 katmanlı kabuk eleman	32
Şekil 5.2: Ankastre plağın ANSYS modeli.....	33
Şekil 5.3: Konsol plağın ANSYS modeli	34
Şekil 5.4: Statik analiz aşamasında plağa uygulanan düzgün yayılı basınç yükleri..	35
Şekil 5.5: Ankastre sınır şartında ϵ_x birim uzama dağılımı	36
Şekil 5.6: Konsol sınır şartında ϵ_x birim uzama dağılımı	36
Şekil 5.7: Ankastre plak için spektrum analizi ile doğal frekansların belirlenmesi...	37
Şekil 5.8: Konsol plak için spektrum analizi ile doğal frekansların belirlenmesi	38
Şekil 5.9: Ankastre plak ortasındaki basınç	39
Şekil 5.10: Ankastre plak kenarındaki	40
Şekil 5.11: Konsol plak ortasındaki basınç.....	40
Şekil 5.12: Konsol plak kenarındaki basınç.....	41
Şekil 6.1: Ankastre plak ortasındaki ϵ_x birim uzama.....	42
Şekil 6.2: Ankastre plak kenarındaki ϵ_x birim uzama	42
Şekil 6.3: Konsol plak ortasındaki ϵ_x birim uzama	43
Şekil 6.4: Konsol plak kenarındaki ϵ_x birim uzama	43

Şekil A.1: Soyulma Testi	53
Şekil A.2: Soyulma testi düzeneği	53
Şekil C.1: Ankastre plak 1. mod	58
Şekil C.2: Ankastre plak 2. mod	58
Şekil C.3: Ankastre plak 3. mod	59
Şekil C.4: Ankastre plak 4. mod	59
Şekil C.5: Ankastre plak 5. mod	60
Şekil D.1: Konsol plak 1. mod	62
Şekil D.2: Konsol plak 2. mod	62
Şekil D.3: Konsol plak 3. mod	63
Şekil D.4: Konsol plak 4. mod	63
Şekil D.5: Konsol plak 5. mod	64

SEMBOL LİSTESİ

E_x	: X eksenî yönündeki elastisite modülü
G_{xy}	: XY düzlemindeki kayma modülü
P_{kenar}	: Plak kenarındaki basınç
P_{orta}	: Plak ortasındaki basınç
t_m	: Basıncın en düşük seviyeye ulaştığı süre
t_p	: Basıncın en yüksek seviyeye ulaştığı süre
V	: Volt
ν_{xy}	: Poisson oranı
α	: Şekil faktörü
β	: Şekil faktörü
Ω	: Ohm

ÖZET

Bu tez çalışmasında kompozit malzemeden üretilmiş sandviç plağın anlık basınç yükü etkisindeki dinamik davranışı, dört kenarı ankastre (ankastre) ve tek kenarı ankastre (konsol) olmak üzere iki farklı sınır şartı için deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir.

Deneysel çalışmada, basınç tüpü içerisinde basınçlandırılan hava ani olarak plak üzerine etki ettirilmiştir. Plak ön yüzüne iki farklı noktada yerleştirilen basınç duyarlıları ile basınç zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Plak arka yüzüne yerleştirilen strain gauge'ler ile plak arka yüzündeki birim uzamaların zamanla değişimi ölçülmüştür. Deney verileri HP 1415A veri toplama cihazı ile toplanmıştır. Veri toplama cihazının programlanması, verilerin bilgisayar ortamına aktarılması ve doğal frekansların hesaplanması için VEE 6.0 programı kullanılmıştır.

Sayısal analizde ANSYS 10.0 sonlu eleman yazılımı kullanılmıştır. Sandviç plak, bu yazılımın kütüphanesinde bulunan SHELL91 katmanlı kabuk eleman ile modellenmiştir. Öncelikle plak için lineer statik analizler yapılarak normal birim uzamaların yüksek olduğu bölgeler belirlenmiştir. Ayrıca serbest titreşim analizleri gerçekleştirilerek lineer halde yapının doğal frekansları ve mod şekilleri belirlenmiştir. Daha sonra, deneylerde ölçülen basıncın zamanla değişim grafiğine bir fonksiyonla yaklaşım yapılarak ve bu basınç fonksiyonu plak üzerine uygulanarak transient analiz yapılmıştır. Hesaplanan birim uzama değerleri ve titreşim frekansları deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF DYNAMIC BEHAVIOUR OF COMPOSITE SANDWICH PLATE UNDER AIR BLAST LOADING

SUMMARY

Dynamic behaviour of composite sandwich plate is studied experimentally and also numerically for two different boundary conditions; four edges clamped and one edge clamped.

In experimental study, air blast is affected on sandwich plate which is pressurized in a pressure tube. Time dependent pressure is measured by pressure transducers which are located on two different points on front face of sandwich plate. By means of strain gauges which are mounted on back side of sandwich plate, variations of micro strains are measured by time. Experiment data is gained by HP 1415A data acquisition device. VEE 6.0 program is used for programming data acquisition device, transferring experiment data to computer and calculating natural frequencies of sandwich plate.

For numerical analysis, ANSYS 10.0 finite element software is used. Sandwich plate is modeled with SHELL91 layered shell element which is present in the library of the software. First of all, linear static analysis is carried out and regions are determined where normal strains are maximum. Furthermore, by means of modal analysis, natural frequencies and mod shapes of construction are found. Later on, a mathematical approach is made to the pressure which was measured during experiments and that mathematical pressure function is applied on the plate, so transient analysis is carried out. Natural frequencies and are compared with experiment results.

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında anlık basınç yüküne maruz bırakılan kompozit malzemeden üretilmiş sandviç bir plağın dinamik davranışları deneysel olarak incelenmiş ve ANSYS sonlu eleman yazılımı ile elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Anlık basınç yükleri, patlama sonucu, şok dalgaları etkisi ve detonasyon sonucunda oluşabilmektedir. Özellikle savaş uçakları, it dalaşı adıyla bilinen hava muharebeleri sırasında patlama sonucu oluşan ani basınç yüklerine veya ses üstü hızlarda seyreden uçakların, roketlerin veya mermilerin oluşturdukları şok dalgalarına maruz kalabilirler. Büyük miktarda yükler, yapı üzerine kısa sürede etki etmektedir. Bu nedenle yapıların bu tür yüklere verdikleri dinamik cevaplarının bilinmesi son derece önemlidir.

Literatürde sandviç plaklar üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda sandviç yapıların dinamik davranışları teorik olarak incelenmiş, analitik olarak modellenmiş ve bazılarında yeni dinamik modeller geliştirilmiştir.

Librescu ve diğerleri, sandviç panellerin anlık basınç yükü altında lineer ve nonlineer dinamik davranışlarını incelemişlerdir [1]. Geliştirilen yapısal modelde sandviç panellerin, su altında ve atmosferik ortamda patlama sonucu oluşan ani basınç yüklerine verdikleri dinamik cevaplar incelenmiştir. Sönümleme katsayısı, dış yüzey tabakalarının yönlendirilme açıları, patlamaya olan uzaklık gibi parametrelerin, dinamik davranışa etkileri ele alınmıştır.

Malekzadeh ve diğerleri, kompozit sandviç panellerin düşük hızda meydana gelen çarpma etkisine verdikleri cevabı incelemişlerdir [2]. Çalışmalarında yeni bir yapısal model oluşturmuşlar, sonuçları daha önce yayımlanan yapısal modellere ve deneysel sonuçlara göre kıyaslamışlardır.

Xue ve Hutchinson, sandviç paneller ile ilgili ön değerlendirme niteliğinde bir çalışma yapmışlardır [3]. Katı plak için yapısal bir model geliştirmişler, analitik sonuçları ABAQUS yazılımı kullanarak yaptıkları analiz sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Ayrıca aynı malzemeden üretilmiş ve eşit ağırlığa sahip sandviç

plağın anlık basınç yüklerine verdiği cevaplar elde edilmiş ve sonuçlar katı plak için elde edilen sonuçlar ile gerilme, deformasyon ve enerji Emilimi yönünden karşılaştırılmıştır.

Hause ve Librescu, anizotropik düz sandviç panellerin, patlama etkisi ile oluşan basınç yüklerine karşı dinamik davranışlarını incelemişlerdir [4]. Diğer bir ifade ile anizotropik tabakalı kompozit yüzeyler ve ortotropik çekirdek katmandan oluşan sandviç panellerin, zaman bağlı dış yükler altında eğilmeye karşı dinamik davranışı ele alınmıştır. Yapılan bu çalışmada, değişik türdeki yüklerin, panel geometrisinin, dış yüzeylerdeki tabaka yönlendirmesinin ve sınır şartlarının, dinamik davranışa etkileri incelenmiştir.

Türkmen ve Mecitoğlu, takviyeli kompozit plağın LPG ve O₂ karışımının patlaması sonucu oluşan şok dalgaları etkisindeki dinamik davranışını deneysel olarak gözlemlemişlerdir [5]. Ayrıca deneysel sonuçları, bilgisayar yazılımı kullanarak elde ettikleri sonuçlar ile karşılaştırmışlar, lineer ve nonlineer kesimde sonuçların uyumlu olduğunu görmüşlerdir.

Ganapathi ve diğerleri, yeni bir yapısal model geliştirerek kalın kompozit plakların ve sandviç plakların serbest ve zorlanmış titreşimlerini nonlineer seviyede incelemişler, sonuçları daha önce yayımlanan diğer yapısal modellerin sonuçları ile karşılaştırmışlardır [6]. Formülasyon, geometrik nonlineer etkileri göz önüne alarak kalınlık boyunca yer değişimini hesaplamaktadır. Zorlanmış titreşimlerde plağa ısı ve mekanik yükler etki ettirilmiştir.

Yuan ve Dawe, “B-Spline Finite Strip Method” kullanarak takviyeli sandviç plakların titreşim analizlerini ve mod şekillerini incelemişlerdir [7]. Sandviç plakların çekirdek kısmı üç boyutlu katı şeklinde, yüzey tabakalar ise klasik ince plak veya şekil değiştiren plak şeklinde modellenerek titreşim ve burkulma analizleri yapılmıştır.

Bu çalışmada, anlık basınç yüküne maruz kalan katmanlı kompozit bir plağın dört kenarı ankastre (ankastre) ve tek kenarı ankastre (konsol) olmak üzere iki farklı sınır şartındaki dinamik cevabı deneysel ve sayısal olarak incelenmiş, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada anlık basınç yükü, silindir biçimindeki bir basınç tüpü kullanılarak elde edilmiştir. Basınç tüpünün açık olan ucu pirinçten imal edilmiş ince bir membran ile kapatılmış ve tüpün diğer ucundan içine kompresör

aracılığı ile basınçlı hava gönderilmiştir. Kapalı tüp içindeki anlık basınç gliserinli bir manometre ile ölçülmüştür. Artan iç basınç sonucunda pirinç membranın patlaması ile tüpün içindeki basınçlı havanın, sandviç plağa doğru hızla boşalması sağlanmıştır. Böylece, sandviç plak anlık basınç yüküne maruz bırakılmıştır. Sandviç plağın ön yüzüne yerleştirilen basınç duyargaları aracılığıyla, plak üzerine etki eden anlık basınç yükünün büyüklüğü, plak üzerindeki dağılımı ve zamana göre değişimi ölçülmüştür. Aynı anda, plağın arka yüzüne yapıştırılan strain gauge'ler ile plakta oluşan birim uzamalar zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Ölçülen birim uzamaların spektrum analizi ile plakların doğal frekansları bulunmuştur.

Sayısal çalışmada ise, öncelikle deneylerde kullanılan sandviç kompozit plağın ANSYS yazılımı ile sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Daha sonra, plağın statik analizi yapılarak gerilme dağılımları belirlenmiş ve böylece plak üzerine strain gauge yapıştırılacak noktalar belirlenmiştir. Arkasından yapılan modal analiz ile plağın doğal frekansları ve mod şekilleri bulunmuştur. Son olarak, deneylerde elde edilen basınç değerleri ve zamana bağlı değişimleri kullanılarak transient (geçici) analizleri yapılmıştır.

Sonuç olarak, elde edilen deney sonuçları ile sonlu eleman analizinde bulunan sonuçlar karşılaştırılmış, çeşitli sebeplerden dolayı sonuçların farklı oldukları görülmüştür.

2. SANDVIÇ YAPILAR

Bu bölümde, sandviç yapılar ile ilgili genel birtakım bilgiler verilmiştir. Sandviç yapıların kısımları ve kullanılan malzeme türleri, prepreg sandviç yapılar, sandviç yapıların özellikleri ve avantajları anlatılmış, sandviç yapıların üretim yöntemlerine değinilmiştir.

Sandviç yapılar, uçak ve uzay sanayinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle uçuş kumanda yüzeyleri, iniş akımı panelleri, kargo ve yolcu kapıları, kabin içi zemini ve duvar panelleri ve radomlar sandviç yapılardan imal edilmektedirler.

2.1. Sandviç Yapının Kısımları

Sandviç yapılar, çekirdek ve yüzey olmak üzere iki temel kısımdan oluşurlar. Şekil 2.1’de sandviç yapının kısımları gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Sandviç yapı [8]

2.1.1. Çekirdek Kısım

Çekirdek (core) sandviç yapının iki yüzeyi arasında kalan orta kesimidir. Yüzey kısımlarına kıyasla kalınlığı daha fazladır. Kayma gerilmelerini bu bölüm taşır. Genellikle bal peteği (honeycomb), köpük, balsa türünden malzemeler kullanılır.

2.1.2. Yüzey Kısımları

Sandviç yapının yüzey kısımları, çekme ve basma kuvvetlerini taşırlar. Bu nedenle çekirdek kısma çok düzgün bir şekilde tutturulması gerekmektedir. Ayrıca yüzeyler, sandviç yapının kullanıldığı yere göre aerodinamik yapıya uygun olmalı, yeterli pürüzlüğe sahip olmalı veya aşınmaya karşı dirençli olmalıdırlar. Yüzey malzemesi olarak genellikle alüminyum, çelik, cam elyafı, karbon kumaşlar kullanılır.

2.1.3. Yapıştırıcı ve Reçineler

Sandviç yapının çekirdek kısmı ile yüzeylerini birbirine sabitlemek için yapıştırıcı film veya reçine kullanılır. Diğer yandan, sandviç yapının dış yüzeylerinin tabakalı kompozit yapıda ise bu kısımda da reçineler kullanılmaktadır. Yapıştırıcı malzemeler, sandviç yapının montaj süresine, kullanılan malzeme türüne, uygulanan basınca ve ısıtılma işlemine göre seçilir. Üç farklı yapıştırıcı türü vardır:

(i) Yüksek sıcaklık altında tatbik edilen yapıştırıcılar: Bu sınıfa giren yapıştırıcılar çekirdek ve yüzeylere uygulanırlar ve yüksek sıcaklık altında monte edilirler [9].

(ii) İki bileşimli yapıştırıcı: Bu tür yapıştırıcıların ilk bileşimi çekirdek ve yüzey kısımlarına tatbik edildikten sonra ısıtılma işlemi uygulanır. Daha sonra ikinci bileşim yapıya tatbik edilir ve montaj gerçekleştirilir [9].

(iii) Oda sıcaklığında uygulanan yapıştırıcılar: Bu tür yapıştırıcılar oda sıcaklığında kullanılarak sandviç yapı meydana getirilir. Ancak oda sıcaklığında uygulanan yapıştırıcı ile üretilen sandviç yapı dayanıklılık açısından verimli değildir [9].

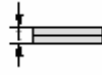
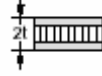
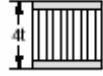
2.2. Prepreg Sandviç Yapı

Sandviç yapı, yüksek dayanımlı ince prepreg katmanların, kendinden daha kalın çekirdek katman diye adlandırılan bal peteği, köpük veya balsa malzemesine tutturulması ile oluşturulur. Kendinden yapışkanlı prepreg malzeme, ilave yapıştırıcı gerektirmez ve bu sayede düşük maliyetli ve daha hafif yapılar imal edilebilir.

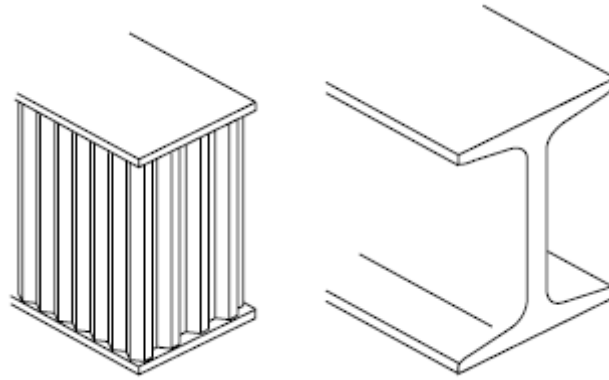
2.3. Sandviç Yapıların Özellikleri ve Avantajları

Sandviç yapıların bazı özellikleri karşılaştırmalı olarak Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1: Sandviç yapıların özellikleri [8]

Özellik	Katı malzeme	Sandviç Yapı	Sandviç Yapı
			
Çekirdek tabaka kalınlığı	-	t	3t
Katılık	1,00	7,00	37,00
Eğilme mukavemeti	1,00	3,50	9,20
Ağırlık	1,00	1,03	1,06

Ayrıca bal peteği çekirdeğe sahip bir sandviç yapının I profilili bir kiriş (Şekil 2.2) ile benzeşimi şu şekilde sıralanabilir [8]:



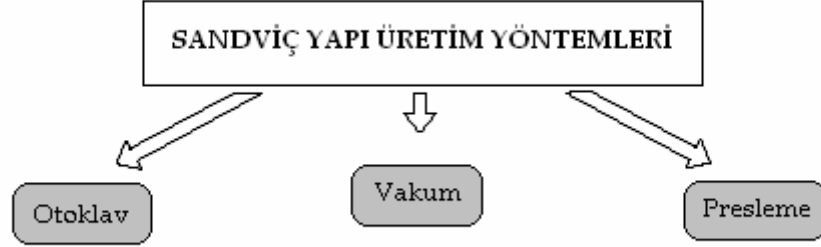
Şekil 2.2: Sandviç yapı ve I profilili bir kiriş [8]

- Çekme ve basma gerilmeleri, dış yüzeyler tarafından karşılanır.
- Kayma gerilmesi, bal peteği çekirdek tarafından karşılanır.
- Dış yüzeyler, uzunlukları boyunca kararlıdır.
- Birçok yönde rijitlik.
- Ağırlık yönünden oldukça hafiftirler. Sıradan yapılara nazaran %30'a varan ağırlık tasarrufu sağlanabilir [10].

Ayrıca sandviç yapıların sıradan yapılara göre akustik yorulma dahil yüksek yorulma dayanımları vardır. Bu yapılar düzgün yüzeylere sahiptirler ve bu sayede aerodinamik verimleri oldukça yüksektir.

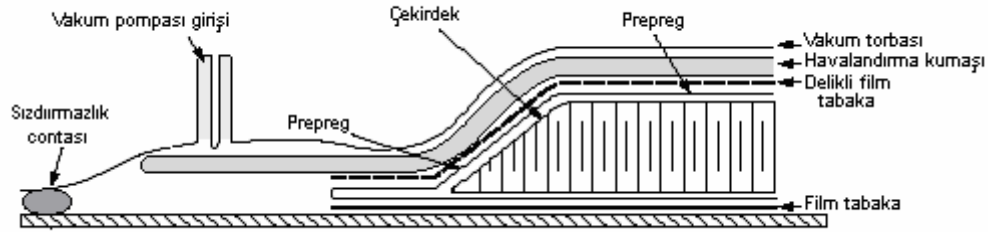
2.4. Sandviç Yapıların Üretim Yöntemleri

Sandviç yapıların 3 temel üretim yöntemi bulunmaktadır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3: Sandviç yapı üretim yöntemleri

Sandviç yapılar, otoklav, presleme ve vakum yöntemi (Şekil 2.4) ile üretilebilirler. Otoklav ve presleme yönteminde, sandviç yapı bir kalıp içine serilir ve ardından ısıtıl işlem uygulanarak tek aşamada üretilir. Ancak vakum yönteminde, sandviç yapının büyüklüğüne bağlı olarak serme ve kür uygulama işlemleri çok aşamalı olarak gerçekleşebilir. Bu işlem, boşlukların giderilmesini garanti altına alır ve yapının kalitesini artırır. Ancak aşırı basınç, çekirdeğin hareket etmesine ve yer değiştirmesine neden olur.



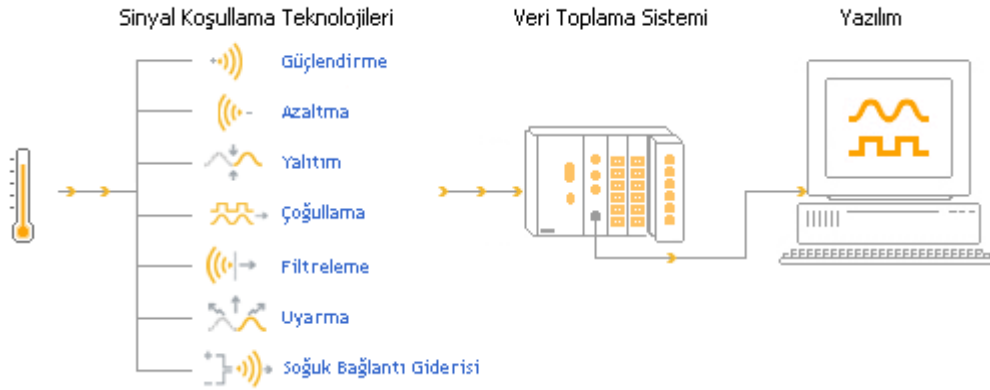
Şekil 2.4: Vakum yöntemi ile sandviç yapı üretimi [8]

2.5. Prepreg Sandviç Yapıların Test Yöntemleri

Sandviç yapılara uygulanan test yöntemleri monolitik yapılara uygulanan test yöntemlerinden oldukça farklıdır. Sandviç yapılar üzerinde yapılan Soyulma Testi Ek A'da açıklanmıştır.

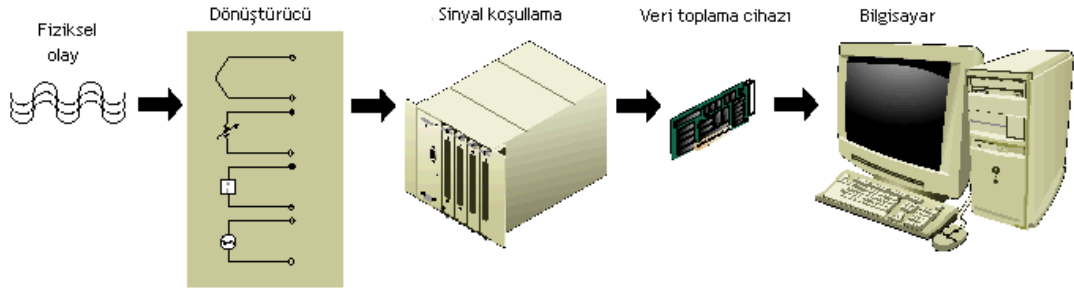
3. SİNYAL KOŞULLAMA

Bilgisayar tabanlı ölçüm sistemleri günümüzde birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Laboratuarlarda, teknik servislerde ve üretim bantlarında bu tür sistemler genel maksatlı ölçüm sistemi görevi görürler. Ancak günümüzde çoğu algılayıcı ve dönüştürücüler, bilgisayarın düzgün olarak sinyal toplayabilmesi için sinyal koşullama işlemine gerek duyarlar. Sinyal koşullama, çeşitli algılayıcı ve dönüştürücülerden alınan sinyallerin bir veri toplama cihazı aracılığıyla verilere dönüştürülmesi işlemidir (Şekil 3.1). Diğer bir deyişle, sinyal koşullama işlemi uyarılara şekil veren, kırpan, dijitalleştiren veya lineerleştiren bir cihaz yardımıyla sinyallerin şeklini veya yapısını anlaşılır hale getirme işlemidir [11].



Şekil 3.1: Sinyal koşullamanın genel yapısı [12]

Sinyal koşullama işlemi, sinyal güçlendirme, azaltma, filtreleme, elektriksel yalıtım, eş zamanlı örnekleme ve çoğullama gibi fonksiyonlar içerir. Ayrıca bir çok duyarga, elektriksel uyarı, köprü devresi veya doğrusallaştırma gibi işlemlere gerek duyar. Bu nedenle, bilgisayar tabanlı ölçüm sistemleri Şekil 3.2’de gösterildiği veri toplama cihazları yanı sıra sinyal koşullama işlemi de içerirler.



Şekil 3.2: Veri toplama sistemi [13]

3.1. Duyargalar

Duyargalar, sıcaklık, birim uzama, basınç veya ışık gibi fiziksel bir olayı başka türe çeviren aygıtlardır. Duyargalar fiziksel verileri genellikle voltaj veya direnç türünden elektriksel veriye dönüştürürler. Duyargaların karakteristik özellikleri ölçüm sisteminin sinyal koşullama gereksinimlerini belirler. Tablo 3.1’de belli başlı duyargaların temel karakteristik özellikleri ve koşullama ihtiyaçları verilmiştir.

Tablo 3.1: Bazı duyargaların karakteristik özellikleri [13]

Duyarga	Elektriksel Özellik	Sinyal Koşullama Gereksinimi
Thermocouple	Düşük voltaj çıkışı, düşük hassasiyet, non-lineer çıkış	Referans sıcaklık ölçer, yükseltici, lineerleştirme
Strain gauge	Düşük direnç, düşük hassasiyet, non-lineer çıkış	Gerilim veya akım uyarısı, yükseltici, köprü devresi, lineerleştirme, kalibrasyon
Thermistor	Yüksek direnç ve hassasiyet, yüksek mertebede non-lineer çıkış	Gerilim veya akım uyarısı, ayarlı bir referans direnç, lineerleştirme
İvme Ölçer	Yüksek mertebede gerilim veya akım çıkışı, lineer çıkış	Güç kaynağı, orta seviyede yükseltici
RTD	Düşük direnç (genellikle 100 Ω), düşük hassasiyet, non-lineer çıkış	Akım uyarısı, dört yollu/üç yollu konfigürasyon, lineerleştirme

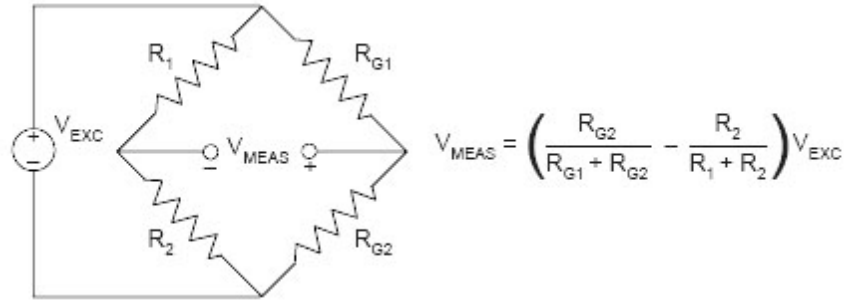
(i) Thermocouple:

Thermocouple’lar, sıcaklık ölçmek için yaygın olarak kullanılan cihazlardır. Maliyeti düşüktür ve geniş sıcaklık aralığında çalışabilirler. Tek türden sinyal koşullamaya gerek duyurlar [13].

(ii) Strain Gauge:

Strain gauge'ler, mekanik test ve ölçüm işlemlerinde yaygın biçimde kullanılan cihazlardır. En çok bilinen türleri, direnç bağlı olanlarıdır. Aygıtta birim uzama verildiğinde grid elektrik direnci doğrusal orantılı biçimde değişir. Strain gauge kullanılırken deney numunesine bağlanır, test aşamasında kuvvet uygulanır ve elektrik direncindeki değişimler ölçülerek birim uzama hesaplanır. Strain gauge'ler, kuvvet, ivme, basınç veya titreşim ölçen algılayıcılarda da kullanılmaktadır.

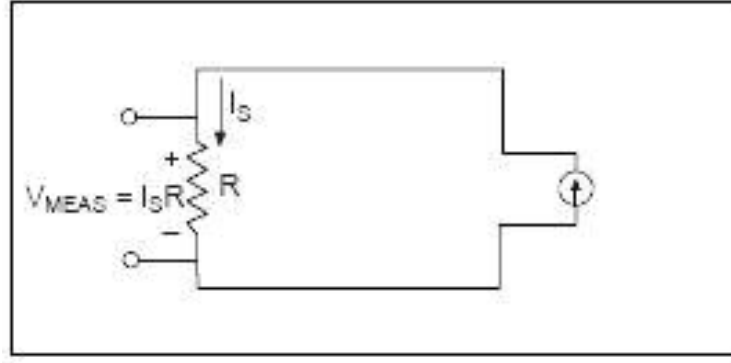
Birim uzama ölçmek için çok düşük mertebede direnç değişimin yakalamak gerekir. Bu yüzden genellikle Wheatstone köprü devresi kullanılır. Wheatstone köprü devresi, dört adet direnç elemanı ve köprünün uçlarına uygulanan bir adet gerilim uyarı kaynağından oluşur. Strain gauge'ler, köprü devresinin bir, iki veya dört kolunu meşgul ederler; geriye kalan boş yerler ayarlı dirençler tarafından işgal edilir. Şekil 3.3'te iki strain gauge elemanlı (R_{G1} ve R_{G2}), iki direnç elemanı bağlı (R_1 ve R_2) yarım köprü konfigürasyonunu göstermektedir [13].



Şekil 3.3: Yarım köprü konfigürasyonlu strain gauge [13]

(iii) Akım Sinyali:

Kontrol ve görüntüleme uygulamalarında kullanılan birçok algılayıcı 4~20mA veya 0~20mA aralığında akım sinyali üretirler. Ortamdaki gürültüden ve gerilim değişiminden kaynaklanan hatalara daha az duyarlı olmaları nedeniyle bazı hallerde akım sinyalleri kullanılır. Sinyal koşullama sistemleri, akım sinyallerini gerilim sinyaline dönüştürmek zorundadırlar. Bunu yapmanın en kolay yolu Şekil 3.4'te gösterildiği gibi akım sinyalini ayarlı dirençten geçirmektir [13].



Şekil 3.4: Akım sinyali [13]

Veri toplama sistemi, ayarlı dirençten ölçülen $V_0 = I_s R$ gerilimini ölçmek için kullanılabilir. İstenilen gerilimi ölçmek için uygun aralıkta bir ayarlı direnç seçilebilir. Düşük ısı katsayısı olan ve yüksek doğruluğa sahip bir ayarlı direnç seçilmelidir. Örnek olarak, 249Ω , $\pm 0,1$, $5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ özelliklere sahip bir ayarlı direnç, $4\sim 20 \text{ mA}$ akım sinyalini $0,996\sim 4,98 \text{ V}$ gerilime dönüştürür [13].

(iv) İvme Ölçer:

İvme ölçerler, genellikle ivme ve titreşim ölçmek için kullanılan aygıtlardır. Bilinen bir kütlenin piezoelektrik elemanla birleştirilmesinden oluşmaktadır. İvme ölçer hareket ettiği sırada kütle, piezoelektrik elemana kuvvet uygular ve bu sayede elektrik yükü açığa çıkar. Bu elektrik yükü okunarak ivme değeri belirlenir. İvme ölçerler eksenel çalışırlar; sadece tek bir eksen boyunca ölçüm yapabilirler. Üç boyutlu ivme ölçebilmek için, çok eksenli ivme ölçer aygıtların kullanılması gerekir.

Aktif ve pasif olmak üzere iki türlü ivme ölçer bulunmaktadır. Pasif ivme ölçerler, piezoelektrik eleman tarafından üretilen elektrik yükünü gönderirler. Sinyal çok zayıf olduğundan, pasif ivme ölçerler sinyal gücünü artıran ve yüksek empedanslı tampon vazifesi gören yükselticiye gerek duyarlar. Aktif ivme ölçerler kendi bünyesinde elektrik yükünü gerilim sinyaline dönüştüren bir devre içerdiğinden yükselticiye gerek duymazlar. Ancak devrenin beslenmesi için güç kaynağı gereklidir [13].

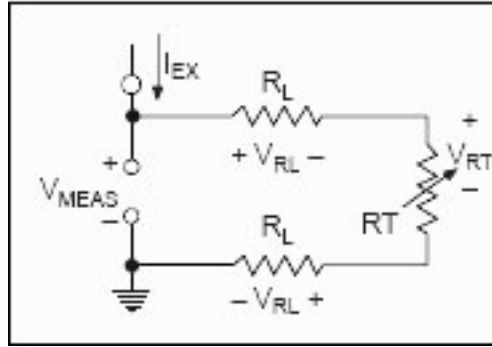
(v) RTD:

Sıcaklık ölçmek için yaygın olarak kullanılan diğer bir aygıt da RTD'dir. RTD'ler geniş sıcaklık aralığında kullanılabilmeleri ve yüksek kararlılıkları ve doğru veri çıkışı sağlamaları yönünden oldukça elverişli cihazlardır. RTD yapısında direnci sıcaklıkla artan helezon biçiminde bir tel veya saf metalden üretilmiş bir film tabaka

bulunur. Çeşitli RTD türleri bulunmasına rağmen en bilineni platinyum malzemesinden üretilmiş olanıdır.

RTD'ler pasif direnç gösteren aygıtlar olmaları sebebiyle veri toplama cihazının ölçüm yapabilmesini sağlayacak kadar gerilim elde etmek için RTD'ye akım göndermek gerekir. RTD'ler genellikle 100Ω gibi düşük dirence sahip olduklarından dirençleri sıcaklıkla çok az değişir ($0,4 \Omega/^{\circ}\text{C}$ 'den daha az). Bu nedenle dirençten alınan veri hatalarını en aza indirmek için özel konfigürasyonlar gerekir.

Şekil 3.5'te 2 yollu RTD konfigürasyonu gösterilmiştir. R_T ile gösterilen RTD aracılığı ile, R_L direncinden geçen I_{EXC} akımından kaynaklanan uyarılma nedeniyle gerilim düşmekte ve düşen gerilim V_0 gerilimine eklenmektedir [13].



Şekil 3.5: 2 yollu RTD konfigürasyonu [13]

3.2. Sinyal Koşullama Fonksiyonları

Kullanılan algılayıcının ve duyarganın türü ne olursa olsun, uygun sinyal koşullama donanımı veri toplama sisteminin kalitesini ve performansını artırır. Bu bölümde, bazı kullanışlı sinyal koşullama fonksiyonları hakkında bilgi verilmiştir.

(i) Yükseltme (Kuvvetlendirme):

Pratikte, elde edilen sinyalin gücü yeteri kadar büyük değildir. Yükselticiler giriş sinyalinin kuvvetini analog-dijital duyargaların algılayabileceği seviyeye kadar artırır ve böylelikle yapılan ölçümün çözünürlüğü ve hassasiyeti artmış olur. Ayrıca sinyal kaynağına veya duyargalara yakın yerleştirilmiş harici sinyal koşullayıcılar kullanıldığında ortam gürültüsü etkilerini yok ederek sinyal-gürültü oranını iyileştirilmiş olur [13].

(ii) Azaltma (İndirgeme):

Yükseltme işleminin tam tersi, azaltma olarak bilinir. Gerilim, gerilimi dijital formata dönüştüren cihazların giriş aralığından yüksek olması durumunda azaltma işlemine ihtiyaç duyulur. Azaltma, yüksek gerilim ölçme işlemlerinde gerek duyulan bir yöntemdir [13].

(iii) Filtreleme:

Sinyal koşullayıcılar, belirli frekans aralığı dışında istenmeyen gürültüyü geri çeviren filtreler içerebilirler. Neredeyse tüm veri toplama sistemleri 50~60Hz elektrik bozuntusuna maruz kalırlar. Bu yüzden çoğu koşullayıcılar en fazla 50~60Hz gürültü frekansını önleyici alt geçiren (lowpass) filtre içerirler [13].

Filtreler, diğer sinyallerin oluşumunu engellemek için de kullanılmaktadır. Bu olay genellikle çok yavaş sinyal örnekleme durumunda ortaya çıkar. Nyquist teoremine göre analog sinyal örnekleme sırasında ana sinyalin yarısı frekansında sinyaller oluşur. Bu tip sinyal bozuntularından alt geçiren filtre kullanımı ile örneklenen sinyallerin yarısı frekansındaki sinyaller elenerek kurtulabilir [13].

(iv) Yalıtım:

Ölçüm problemlerini oluşturan en önemli nedenler arasında yanlış topraklama gelir. Sinyal koşullama sistemlerinin yalıtımı bu problemleri önleyici bir işlemdir. Bu gibi cihazlar, sinyali kaynağından ölçüm cihazına herhangi bir fiziksel temas olmadan geçirirler [13].

(v) Çoğullama:

Sinyali dijitalleştiren cihazlar (digitizer) veri toplama sistemlerinin en pahalı parçalarındandır. Çoğullama yöntemi ile çok sayıda sinyali soralı olarak tek bir dijitalleştirici cihaza yollamak mümkündür. Bu sayede düşük maliyet ile sistemin yüksek miktarda veri toplaması sağlanmış olur [13].

(vi) Eş Zamanlı Örnekleme:

Aynı anda birden fazla sinyal toplamak gerektiği durumlarda, eş zamanlı örnekleme yöntemine başvurulur. Bu yöntem sayesinde, veri toplama sistemi her kanal başına dijitalleştirici cihazlar almak yerine düşük maliyet ile çözüm sağlanmış olur. Titreşim

ölçümlerinde ve faz farklılığı ölçümlerinde eş zamanlı örnekleme yönteminden faydalanılır [13].

3.3. Sinyal Koşullama Sistemleri

Bölüm 3.2’de anlatılan sinyal koşullama fonksiyonları, çok sayıda sinyal koşullama ürünlerinde kullanılırlar. Bu ürünler çeşitli fiyatlarda ve kabiliyette olabilirler. Bu bölümde bazı sinyal koşullama sistemleri hakkında bilgi verilmiştir.

(i) SCXI:

SCXI sistemi dayanıklı şasiye sahip, bünyesinde duyargalardan alınan sinyalleri yükselten, filtreleyen veya yalıtan sinyal koşullama modülleri bulunduran bir sistemdir [13].

(ii) SCC:

SCC sistemi, E serisi veri toplama sistemlerin uyumlu bir sinyal koşullama sistemidir. Bünyesinde thermocouple’lar ve duyargalar için 20 adet çift kanallı SCC modülü bulundurur. SCC sistemi, az veri toplama gerektiren küçük portatif uygulamalar için tasarlanmıştır. Ayrıca bu sistem kolay anlaşılır ve esnek bağlantı seçeneklerine sahiptir [13].

(iii) 5B Serisi:

5B sistemi sekiz veya onaltı tek kanallı modülden oluşur [13].

(iv) FieldPoint:

FieldPoint sistemi, endüstriyel uygulamalar için tasarlanmış dağınık bir ölçüm sistemidir. Tek bankada (seri veya ethernet modülü olmak üzere) en fazla dokuz adet giriş-çıkış (I/O) modülü bulundurur. Her bir giriş çıkış modülü sekiz veya onaltı kanala sahiptir. FieldPoint sistemi değişik yerlerde konuşlandırılmış giriş-çıkış grupları uygulamaları için tasarlanmıştır. Ayrıca düşük hızla görüntüleme gerektiren uygulamalarda az maliyetli bir sistemdir [13].

4. DENEY

Bu bölümde, deneylerde kullanılan malzemeler, deney düzeneği, cihaz ve program hakkında bilgi verilmiştir.

4.1. Deney Numunesi

4.1.1. Çekirdek

Deney numunesinde kullanılan çekirdek malzeme bal peteği yapısındadır ve Hexcel firmasının üretmiş olduğu HexWeb® Fibertruss® HFT® 3/16-2.0 türü malzemesidir.

HexWeb® HFT®, fiberglass $\pm 45^\circ$ Fibertruss verev dokuma ile güçlendirilmiş/fenolik bal peteği yapıyı simgeler. Verevli dokuma, balpeteği'nin kayma modülü değerini yükseltir. HexWeb® HFT® malzemesinin kayma modülü değeri, HRP® (honeycomb made of straight weave fiberglass) malzemesinin kayma modülü değerinin yaklaşık iki katı, HRH® (honeycomb made from Nomex®) malzemesinin değerinin yaklaşık üç katıdır. Bu özellik, çok az deformasyon gereken yerlerde HexWeb® HFT® kullanımının tercih sebebidir.

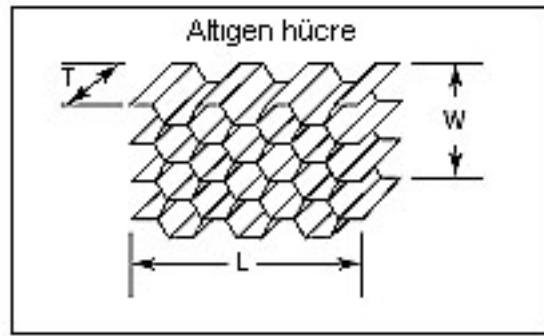
HexWeb® HFT®, hücrelerinde kullanılan ve hücre duvarlarının köşelerini daha esnek tutan 45° elyaf yönlenmesi sayesinde gelişmiş darbe dayanımına ve kolay kullanım özelliğine sahiptir. Bu yüksek esnek özelliği sayesinde HexWeb® HFT®, düz dokuma bal peteğine kıyasla daha kolay şekil verilebilir. Sonuç olarak imalat aşamasında daha düşük maliyet ve daha basit montaj parçaları kullanımı imkanı doğar.

HexWeb® HFT®, güçlü bağ yapısına ve yüksek esnekliğe sahip olduğundan 1/8" hücre boyutlarında bal peteği üretimine imkân sağlar. Tüm bu özellikler, HexWeb® HFT®'nin grafit veya diğer yüzey malzemeleri ile birlikte kolaylıkla kullanılmasını sağlar [8].

HexWeb® HFT®'nin bazı özellikleri şu şekilde sıralanabilir.

- $\pm 45^\circ$ fiber yönlenmesi sayesinde yüksek kayma gerilmesi dayanımı
- Küçük hücre ebatları.
- Gelişmiş esneklik özelliği, darbe dayanıklılığı, $0^\circ/90^\circ$ fiber yönlenme kabiliyeti, kolay kullanım
- 176° sıcaklığa kadar dayanıklılık
- Düşük nem tutma özeliği
- Düşük duman yayma özelliği

HexWeb® HFT®, kanat, uçuş kumanda yüzeyleri, kaplamalar, nacelle, bulkhead, helikopter palası yapılarında kullanılmaktadır. Ayrıca düşük elektrik geçirgenliği, küçük hücre boyutları ve kolay kullanımı sayesinde uçak radomlarında da kullanılmaktadır.



Şekil 4.1: Altıgen hücreli bal peteği şekli [8]

Malzeme isimlendirmesi şu sistematığe dayanmaktadır.

HFT – 3/16 – 2.0 (Malzeme cinsi – hücre ebatı – yoğunluk)

HFT - verev dokumalı cam elyafı fenolik bal peteği malzemesi

3/16 - hücre ebadı (inch)

2.0 - yoğunluk (pound/foot³)

Tablo 4.1: Balpeteği özellikleri (katalog bilgileri) [14]

	Basma			Kayma					
	Sabitlenmiş			L			W		
	Dayanıklılık psi		Modül psi	Dayanıklılık psi		Modül psi	Dayanıklılık psi		Modül psi
	170	130	17	115	90	15	60	50	5
HFT – 3/16 – 2.0	Dayanıklılık kPa		Modül MPa	Dayanıklılık kPa		Modül MPa	Dayanıklılık kPa		Modül kPa
	1172	896	117,21	793	620	103,42	414	344	34,47

Tablo 4.2: Bal peteği özellikleri (Hexcel firmasından edinilen değerler) [15]

HFT – 3/16 – 2.0					
Özellik	Değer (US)	Değer (EU)	Özellik	Değer (US)	Değer (EU)
E_x	0,03 ksi	0,20 MPa	G_{xy}	0,1 ksi	0,69 MPa
E_y	0,06 ksi	0,41 MPa	G_{yz}	15 ksi	103,42 MPa
E_z	17 ksi	117,21 MPa	G_{xz}	5 ksi	34,47 MPa
ν	0,3	0,3	ρ	2,0 lb/ft ³	32 kg/m ³

Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de Hexcel firmasından edinilen bal peteği özellikleri yer almaktadır. Ancak bal peteği E_z değerı E_x ve E_y ’den çok büyüktür. ANSYS yazılımında “sandwich option” seçili iken (Bölüm 5.1) elastisite modülleri arasında çok büyük farklara izin verilmemektedir. Honecomb’un, X ve Y eksenleri boyunca çekme ve basma kuvvetine maruz kalmadığı düşünülerek, E_y değerı E_z değerının 1/10 oranında 11,72 Mpa alınmıştır (Joel Cugnoni, ATLAS SCT MODEL, 30 Mayıs 2001). Bal peteğinin X eksenı doğrultusundaki dayanımının Y eksenı yönündeki dayanımından daha düşük olması nedeniyle E_x değerı 8,8 Mpa alınmıştır. Yapılan kabullerin ardından bal peteği özellikleri Tablo 4.3’te verildiği gibi alınmıştır.

Tablo 4.3: ANSYS yazılımında kullanılan bal peteği özellikleri

HFT – 3/16 – 2.0					
Özellik	Değer	Özellik	Değer	Özellik	Değer
E_x	8,80 MPa	G_{xy}	0,69 MPa	ν_{xy}	0,30
E_y	11,72 MPa	G_{yz}	100,00 MPa	ν_{yz}	0,11
E_z	117,21 MPa	G_{xz}	34,50 MPa	ν_{xz}	0,11
ρ	32 kg/m ³				

4.1.2. Yüzeyler

Deney numunesinin dış yüzeyleri, 90° açısı verilerek tek katman halinde Hexcel firmasının ürünü olan HexPly® 6268 malzemesinden imal edilmiştir. Bu malzeme, önceden reçine emdirilmiş karbon prepreg kumaştır. Bu özellik sayesinde, çekirdek malzemeye yapışma özelliği oldukça yüksektir.

HexPly® 6268 malzemesinin bazı özelliklerini şu şekilde sıralayabiliriz.

- Bal peteği yapıya kusursuz yapışma sağlar.
- Çevre şartlarına dayanıklıdır.
- 2~10 bar basınç aralığında ısıtılabilir.
- 100°C sıcaklığa kadar malzeme özelliklerini muhafaza eder.
- Kendinden bağlayıcı madde içermesi sebebiyle kullanımı kolaydır.

HexPly® 6268 malzemesi 90 dakika süre ile 125°C sıcaklıkta 2-10 bar basınç aralığında kür edilebilir. Kür işlemi esnasında dakikada 1,5°C~5°C sıcaklık artışı meydana getirilmelidir. 23°C sıcaklıkta 21 gün boyunca depolanabilir.

Tablo 4.4'te HexPly® 6268 malzemesinin mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.4: HexPly® 6268 malzeme özellikleri [15]

HexPly® 6268			
Özellik	Değer	Özellik	Değer
E_x	62 GPa	G_{xy}	8 GPa
E_y	62 GPa	G_{yz}	2 GPa
E_z	4 GPa	G_{xz}	2 GPa
$\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$	0,16	ρ	1400 kg/m ³

HexPly® 6268 malzemesi için Hexcel firmasından sadece E_x , E_y ve G_{xy} değerleri edinilmiştir. E_z değeri için epoxy özelliği kullanılmış, G_{xy} ve G_{yz} özellikleri de buna bağlı olarak hesaplanmıştır.

4.1.3. Yapıştırıcı

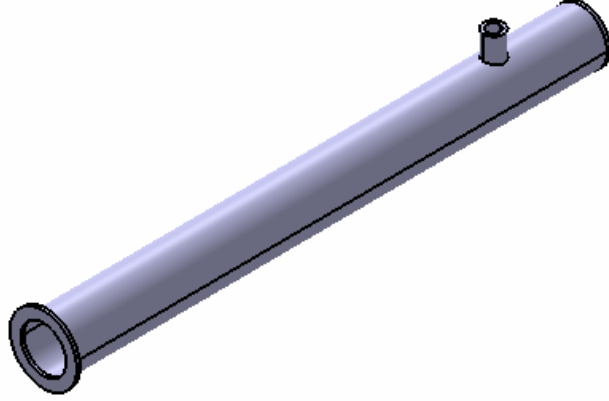
Deney numunesi olarak kullanılan sandviç yapıda dış yüzeyler, film adhesive ile bal peteğine tutturulmuştur. Film adhesive, 1mm kalınlığında yapışkan bir film tabakadır. Yüzeylerden gelen yükleri eşit ve düzgün olarak bal peteğine aktardığı varsayılarak sonlu elemanlar analizinde ihmal edilmiştir.

4.2. Deney Donanımı

Bu bölümde, deney düzeneği, donanım, kullanılan araç ve gereçler hakkında bilgi verilmiştir.

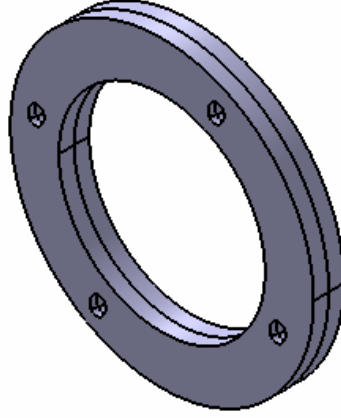
4.2.1. Basınç Tüpü

Deney düzeneğinin bir parçası olan basınç tüpü Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2: Basınç tüpü

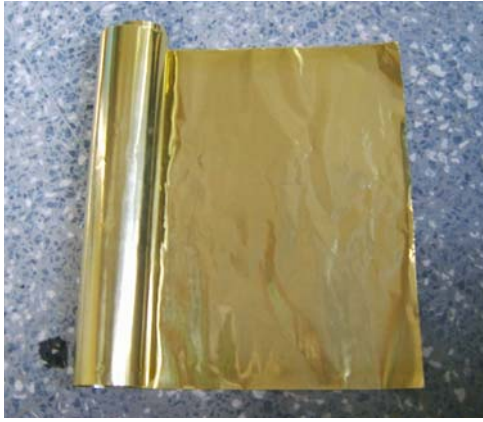
Basınç tüpü 6 mm et kalınlığına, 80 mm dış çapa ve 800 mm uzunluğa sahiptir. Arka kısımda kompresörden gelen hortumun bağlanacağı bir giriş bulunmaktadır. Ön kısımda ise istenen seviyeye kadar iç basınç oluşmasını ve daha sonra basınçlandırılan havanın patlayarak çıkmasını sağlayan membranın sabitlendiği başlık bulunmaktadır. Başlığın iç çapı 50 mm, dış çapı 100 mm ve kalınlığı da 5 mm’dir. Aynı ölçülerde diğer bir başlık ise portatif halledir ve dört adet cıvata yardımıyla mebranı basınç tüpünün çıkışına sabitlemektedir. Portatif başlık Şekil 4.3’te gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Portatif başlık

4.2.2. Membran

Membran, basınç tüpünün içine yollanan havanın belli bir basınca kadar çıkmasını ve daha sonra patlamasını sağlamaktadır. Mebran olarak 0,05 mm kalınlığında pirinç folyo kullanılmıştır. Şekil 4.4'te membranın folyo tabaka halindeki görüntüsü ve basınç tüpünün ağzına uyacak şekilde kesilmiş fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 4.4: Membranın folyo tabaka ve basınç tüpüne göre kesilmiş görüntüsü

Şekil 4.5'te ise membranın basınçlı havanın patlamasından sonraki hali görülmektedir.



Şekil 4.5: Membranın patlama sonrası görüntüsü

4.2.3. Manometre

Deneylede Şekil 4.6’da gösterilen 0-10 bar arasında ölçüm yapabilen gliserinli manometre kullanılmıştır.

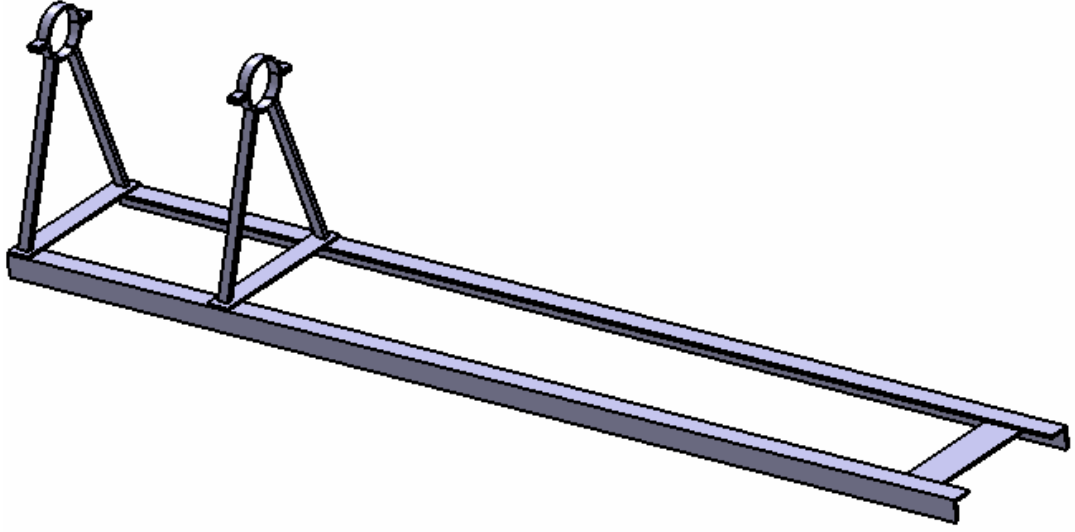


Şekil 4.6: Gliserinli manometre

Manometre yapısında bulunan gliserin, patlama sonrasında ani basınç düşümü yaşanması sebebiyle manometre ibresinin yavaşça düşmesini sağlayarak ibrenin zarar görmesini önler ve kalibrasyon sorununu ortadan kaldırır [16].

4.2.4. İskelet

Deneylerde kullanılan iskelet, Şekil 4.7’de gösterilmiştir.

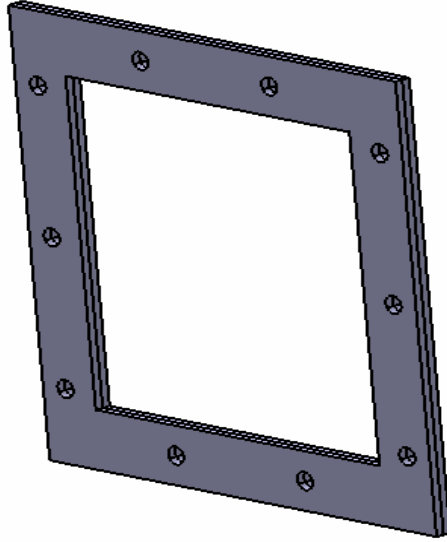


Şekil 4.7: İskelet

İskelet, basınç tüpünün ve mesnet sehpasının sabitlenmesini sağlamaktadır. 40 mm kol uzunluklarına ve 5 mm et kalınlığına sahip 1800 mm boyundaki L profillere 20x10 mm kesitli kutu profiller ve 40 mm genişliğindeki lamaların kaynatılması ile imal edilmiştir. Ayrıca basınç tüpünün takılabilmesi için 80 mm’lik kelepçeler kutu profillere kaynatılmıştır. L profil rayların üzerindeki delikler sayesinde basınç tüpü ile deneyde kullanılacak plak arasındaki mesafe 50 mm’lik aralıklarla ayarlanabilmektedir [16].

4.2.5. Mesnet

Şekil 4.8’de gösterilen mesnet, deneylerde kullanılan sandviç plağın dört kenarının da ankastre olarak sabitlenmesini sağlamak için iki parçadan imal edilmiştir.

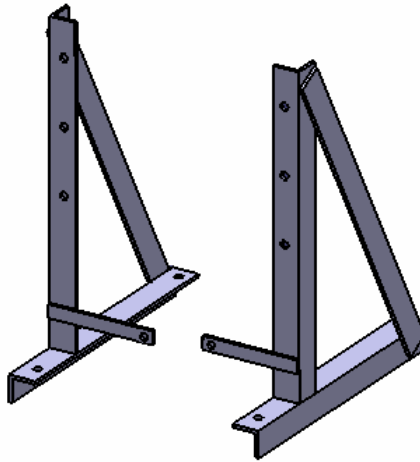


Şekil 4.8: Mesnet

Mesnet, 40 mm kalınlığında, 5 mm kalınlığında ve 305 mm boyundaki lamaların kaynatılması ile imal edilmiştir. Böylece, orta kısımda sandviç plağın takılabilmesi için 225x225 mm'lik bir alan oluşması sağlanmıştır. Sandviç plak, bu iki parçanın arasına yerleştirildikten sonra dikey kenarlarda üçer, yatay kenarlarda da ikişer olmak üzere toplam 10 adet cıvata sıkılarak ankastre mesnet elde edilmiştir [17].

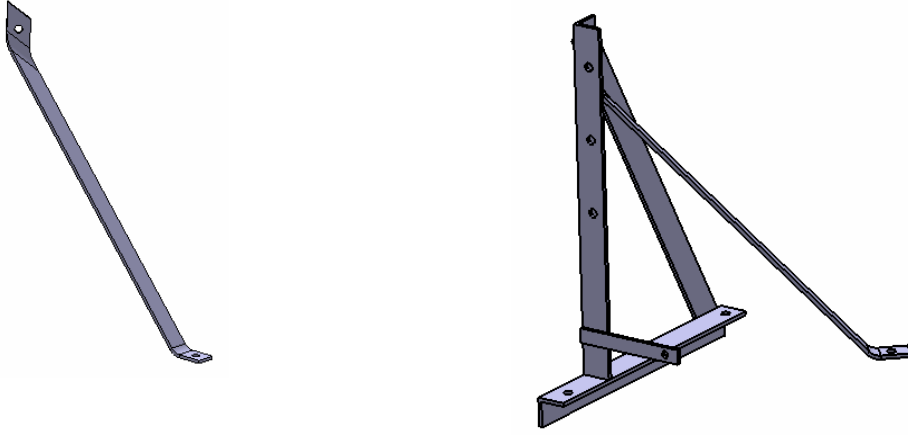
4.2.6. Mesnet Sehpaı

Mesnet sehpaı, mesnetlerin takıldığı ve dinamik basınçtan etkilenmemesi için yeterli rijitliği olan yapıdır (Şekil 4.9). 40x40 mm boyutlarında ve 5 mm et kalınlığına sahip L profiller ile 40x5 mm kesite sahip lamalardan imal edilmiştir [17].



Şekil 4.9: Mesnet sehpaı

Düşey iki kanat, istenildiği zaman orta kısımdaki iki adet cıvata yuvası vasıtasıyla birbirine sabitlenebilir şekilde yapılmıştır. Yalnızca sol kanat, iskelete Şekil 4.10’da gösterilen destek ile sabitlenerek konsol sınır şartını yerine getirmek için kullanılmıştır.



Şekil 4.10: Destek ve tek kanatlı mesnet sehpası.

Ankastre sınır şartı sağlanması için, her iki kanat birbirine monte edilerek sabitlenmiştir.

4.2.7. Duyargalar

Deneylerde kullanılan strain gauge’lar ve basınç duyargaları hakkında bilgi verilmiştir.

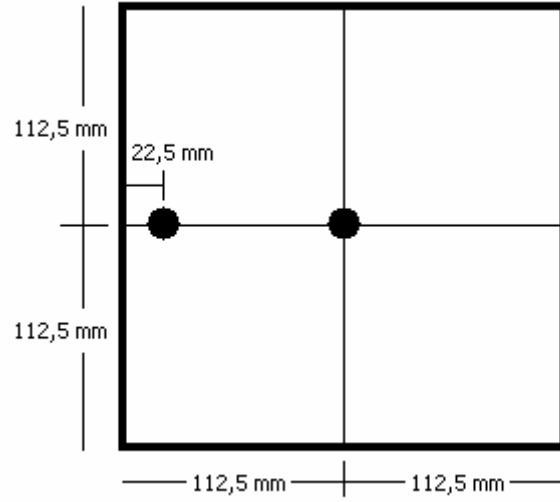
(i) Strain Gauge

Deneyler sırasında birim uzamaların ölçümü için TML firmasının üretmiş olduğu WFCA-3-11-1L model strain gauge’ler kullanılmıştır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11: WFCA 3-11-1L tipi strain gauge [18]

Strain gauge’ler, tavsiye edilen Cyanoacrylate esaslı özel yapıştırıcı ile sandviç plağa şekil 4.12’de gösterildiği yerlere yapıştırılmıştır.



Şekil 4.12: Strain gauge'ların plak üzerindeki yerleri

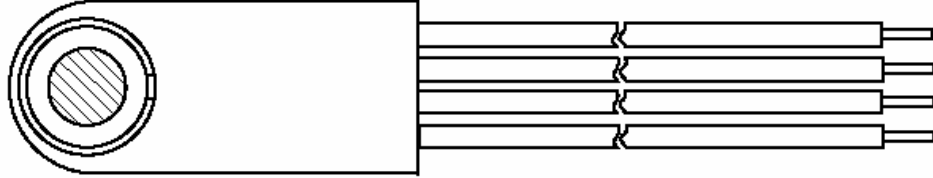
Strain gauge'lerin özellikleri ise Tablo 4.5'te verilmiştir.

Tablo 4.5: Deneylerde kullanılan strain gauge özellikleri [18]

Gauge Faktörü	2.1
Gauge Uzunluğu	3 mm
Gauge Genişliği	1.7 mm
Sırt Uzunluğu	17 mm
Sırt Genişliği	8 mm
Kablo	Paralel, 1 m
Direnç	120 Ω
Yönlenme	-45°/45°
Birim Uzama Limiti	%3
Çalışma Sıcaklığı	0~80°

(ii) Basınç Duyargaları

Yapılan çalışmalarda uygulanan anlık basıncın hassas bir şekilde ve dinamik olarak ölçülebilmesi için Kulite firmasının Şekil 4.13'te gösterilen LE-125 tipi basınç duyargası kullanılmıştır.



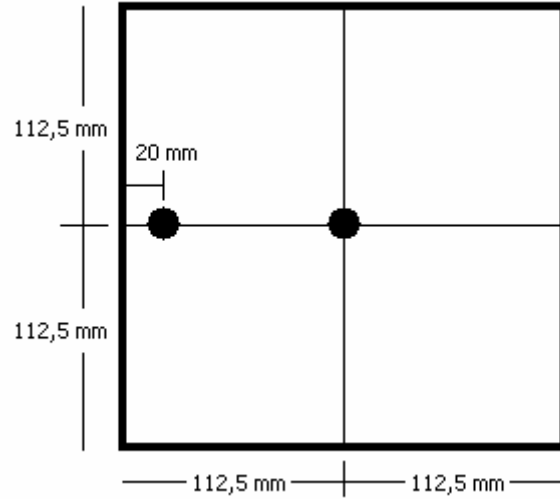
Şekil 4.13: LE-125 basınç duyargası [19]

Bu basınç duyargasının özellikleri Tablo 4.6'da verilmiştir [19].

Tablo 4.6: Deneylerde kullanılan basınç duyargalarının özellikleri [19]

Basınç aralığı	0,7~35 bar (10~500 psi)
Oranlı elektriksel uyarı	10 V DC/AC
En yüksek elektriksel uyarı	15V DC/AC
Doğal frekans	500 kHz
Kullanım sıcaklığı	-55°C ~ 235°C
Doğrusal titreşim	10~2000 Hz sinüs, 100g maks.

Basınç duyargaları, sandviç plak üzerinde basınç dağılımını etkin bir biçimde ölçebilmek için Şekil 4.14'te gösterilen pozisyonlarda yerleştirilmiştir.



Şekil 4.14: Basınç duyargalarının sandviç plak üzerindeki yerleri.

4.2.8. Ölçüm Sistemi

Duyargalardan gelen deney verilerinin toplanması ve işlenmesi için VXI Technology firmasının HP E1415A – Algorithmic Closed Loop Controller cihazı kullanılmıştır. Transient birim uzama ölçümü yapabilmek için ise bu cihaza HP E1511A – Dört Kanallı Transient Birim Uzama SCP’si (Signal Conditioning Plug-on, Sinyal Koşullama Kartı) takılmıştır. Bu sayede, toplanan veriler milivolt birimi yerine microstrain biriminde elde edilmiştir [17].

(i) HP E1415A Algorithmic Closed Loop Controller

E1415A(VT1415A) C boyutlu, tek slotlu, hem çok fonksiyonlu giriş/çıkış (veri toplama) hem de güçlü kontrol yeteneklerine sahip VXI modülüdür. Statik ve dinamik modlarda analog ve dijital giriş/çıkış işlemleri yapabilen güçlü bir veri toplama modülü olarak kullanılabilir. Dijital kabiliyeti sayesinde, statik durumların algılanmasını ve ayarlamasını, giriş frekanslarının ve periyotlarının ölçülmesini, PWM ve FM sinyallerinin girişlerini veya çıkışlarını sağlar. En fazla 64 kanaldan aynı anda ölçüm yapabilmektedir. Toplam 65024 adet veri toplama kapasitesine sahiptir. Eğer birim uzama ölçülmek istenirse her 4 kanal bir birim uzama için kullanılmaktadır [17].

(ii) HP E1511A Dört Kanallı Transient Birim Uzama SCP’si

HP E1511, iki slotu takılan ve HP 1413 Yüksek Hızlı A/D Modülü için 4 kanallı birim uzama ölçümü yapabilen bir sinyal koşullama kartıdır (SCP). Bu kart, 4 kanal birim uzama ölçümü için gerekli köprü tamamlama devresini, programlanabilir filtreyi içermekte ve bu devreler için uyarı gerilimini verebilmektedir. Bu sayede, Örnekle ve Tut (Sample and Hold) yöntemini kullanarak 4 kanallı birim uzama ölçümünü gerçekleştirmektedir. Sample and Hold devresi de SCP tarafından sağlanmaktadır. SCP, uyarı geriliminin ölçümünü köprü bağlantısından uzaktan algılama ile veya yerel olarak Terminal Modülünden yapmak için ayarlanabilmektedir. HP E1511 SCP'si HP 1413'ün yanı sıra HP E1415A, HP E1313A ve HP 1413B&C sürümleri ile de kullanılabilir. HP E1413A ile kullanımı ise desteklenmemektedir [17].

4.2.9. VEE Programı

HP E1415A cihazını ve üzerinde takılı bulunan SCP'leri bilgisayar ortamında kontrol edebilmek amacıyla VEE 6.0 Pro yazılımı kullanılmıştır. Ölçümleri alabilmek için gerekli algoritmalar aşağıda verilmiştir [17].

writefifo(I116)	17 nolu kanaldan okunan veriyi tampon belleğe yazar
writefifo(I117)	18 nolu kanaldan okunan veriyi tampon belleğe yazar
O140=10	41 nolu kanala 10 Volt uyarı gerilimi gönderir
O141=10	42 nolu kanala 10 Volt uyarı gerilimi gönderir
writefifo(I100)	1 nolu kanaldan okunan veriyi tampon belleğe yazar
writefifo(I101)	2 nolu kanaldan okunan veriyi tampon belleğe yazar

Bu algoritmalar VEE programında “alg:def” komutu ile tanımlanır. Komutun kullanılışı şöyledir:

alg:def 'alg1', 'writefifo(I116);'

Her bir algoritma ayrı ayrı bu şekilde tanımlanır. Algoritma adlarının burada belirtildiği gibi alg1, alg2 vs. olarak girilmesi gerekmektedir. Farklı algoritma isimleri kabul edilmemektedir.

VEE programında komutların eklenebilmesi için aşağıdaki yol takip edilir:

- I/O → Instrument Manager → E1415(e1415a@16208) seçilir → Direct I/O tıklanır.

- Açılan pencere herhangi bir yere yerleştirildikten sonra “Double-Click to Add Transaction” seçeneğine çift tıklanır.
- Yeni pencerede sırasıyla WRITE, TEXT seçilir ve imlecin bulunduğu üçüncü bölüme gerekli komutlar tırnak işareti(“ ”) içinde yazılır. VEE programında komutların yazılışı için büyük, küçük harf farkı bulunmamaktadır.

Bağlantıların tamamlanmasının ardından elde edilen verilerin bilgisayar ortamına aktarılabilmesi için gerekli olan komutlar VEE programına girilmelidir. Aşağıda iki kısım halinde verilen komutlar, uyarı gerilimini ve belirtilen kanallarda ölçümler için gerekli parametreleri belirler. [17].

Uyarı ve Köprü Tamamlama Devrelerinin Kurulumu ve Kalibrasyonu [17]:

OUTP:VOLT:AMPL 2,(@116:119)	17-20 Kanalları için 2 V uyarı gerilimi verir
INP:LOW WVOL,(@116:119)	Wagner geriliminin uygulanmasını sağlar
INP:FILT:FREQ 1000,(@116:119)	Sample and Hold altgeçiren süzgeç için frekansı 1000 Hz olarak belirler
INP:GAIN 64,(@116:119)	Sample and Hold devresi için kazancı(gain) belirler
CAL:TARE (@116:119)	17-20 Kanallarında yüklemmeden önceki gerilimi ölçerek kalibrasyonu yapar
CAL:TARE?	Kalibrasyonun durumunu kontrol eder. Tamamlanmadan bir sonraki komutları çalıştırmaz.

Ölçümlerin Konfigürasyonu [17]:

STR:GFAC 2.1,(@116:119)	17-20 Kanalları için Gauge Faktörünü 2.1 olarak belirler
FUNC:STR:QUAR 1,(@116:119)	17-20 Kanallarında köprü tipinin seçilerek birim uzama ölçümleri için gerekli EU (Engineering Unit) dönüşümlerinin yapılmasını ve böylece sonuçların ε cinsinden alınmasını sağlar

4.3. Deneylerin Yapılışı

Deneyler, İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Trisyonik Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Sandviç plağın membrana uzaklığı değiştirilerek çok sayıda deney yapılmıştır. Deney numunesi üzerine yerleştirilen basınç duyargaları ve strain gauge'ler aracılığı ile 0,35 ms zaman aralıkları ile basınç ve birim uzama değerleri elde ölçülmüştür. Ölçüm cihazından alınan deney verileri Vee 6.0 programı kullanılarak derlenmiş ve bilgisayar ortamına aktarılmıştır. İşlenen veriler, daha sonra ANSYS yazılımı sonuçları ile karşılaştırmak için kullanılmıştır.

4.3.1. Basınç Ölçümü

Basınç duyargalarının (+) ve (-) kabloları terminal modülün ilgili yerlerine bağlanmıştır. Bu sayede basınç duyargalarına elektriksel uyarı terminal modül aracılığı ile sağlanmıştır. Terminal modülümüzde elektriksel uyarıyı verecek kaynak olmasaydı, basınç duyargaları harici bir güç kaynağı ile beslenecekti.

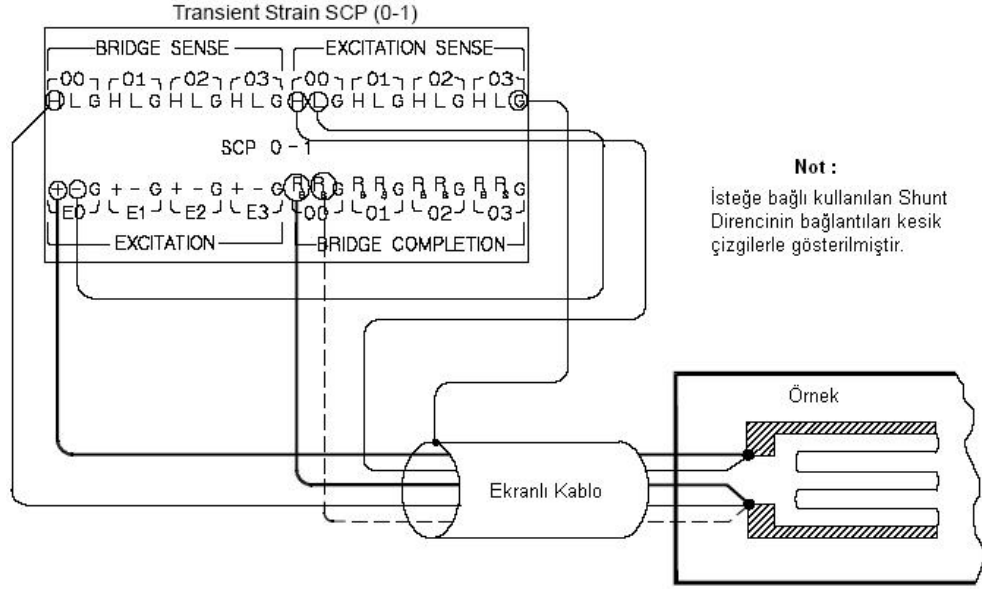
Basınç duyargalarından elde edilen veriler milivolt değerindedir. Bu nedenle, basınç sinyallerinin atmosferik basınç değerine dönüştürülmesi için Kulite firmasının, deneylerde kullanılan 288 ve 305 seri numaralı basınç duyargaları için yayınlamış olduğu kalibrasyon sertifikasındaki değerler kullanılmıştır. Bu değerler Tablo 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.7: Basınç duyargaları kalibrasyon değerleri [Ek B]

Basınç Duyargası S/N	Hassasiyet	Çıkış Empedansı	Giriş Empedansı
6272-4-288	1,015 mV/Psi	1771 Ω	3297 Ω
6289-3-305	0,708 mV/Psi	737 Ω	2275 Ω

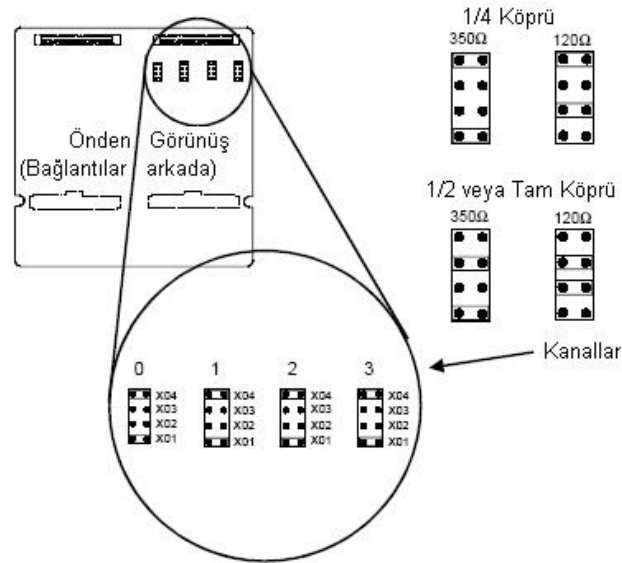
4.3.2. Birim Uzama Ölçümü

Strain gauge kullanarak birim uzama ölçümü yapabilmek için çeyrek köprü Wheatstone devresi kurulmuştur. Çeyrek köprü devrenin kurulabilmesi için strain gauge kabloları Şekil 4.15'te gösterildiği gibi bağlanmıştır.



Şekil 4.15: Çeyrek köprü Wheatstone bağlantısı [20]

Veri toplama cihazı, dört kanallı transient birim uzama SCP'si içermektedir. Birim uzama SCP'si üzerinde Şekil 4.16'da gösterildiği şekilde jumper ayarları yapılmıştır. Bu sayede alınan veriler herhangi bir dönüşüme gerek kalmaksızın doğrudan mikrostrain olarak kaydedilmiştir.



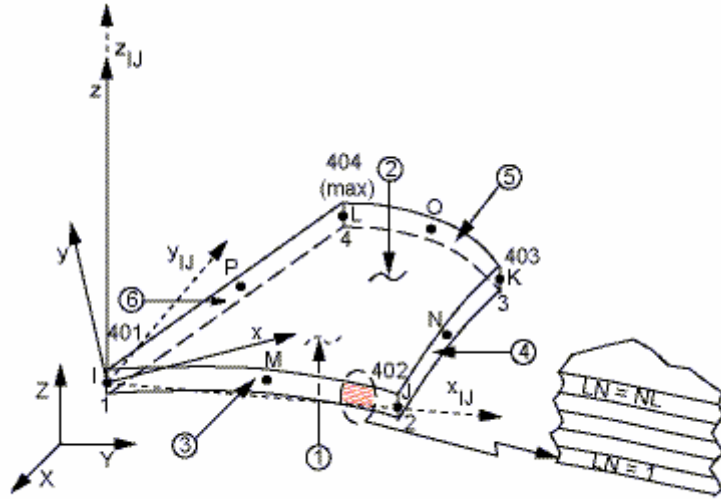
Şekil 4.16: Birim uzama SCP'si jumper ayarları [20]

5. SAYISAL ANALİZLER

Sonlu eleman analizi için ANSYS yazılımı kullanılmıştır. Analizlerde SHELL 91 tipi yapısal eleman kullanılmıştır. Ankastre ve konsol olmak üzere iki farklı sınır şartı için statik, modal ve transient analizler yapılmıştır.

5.1. Kullanılan Eleman

Sonlu eleman analizinde ANSYS yazılımı kütüphanesinde bulunan SHELL91 tipi yapısal eleman kullanılmıştır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: SHELL91 kaymanlı kabuk eleman [21]

SHELL91 elemanı, köşelerde ve kenar orta noktalarında olmak üzere 8 düğüm noktasına sahiptir. Ayrıca x, y, z eksenleri boyunca öteleme ve yine x, y, z eksenleri etrafında dönme olmak üzere 6 serbestlik derecesine sahiptir. 100 tabakaya kadar yapılandırılabilir ve her tabakaya farklı malzeme özellikleri tanımlanabilir [21].

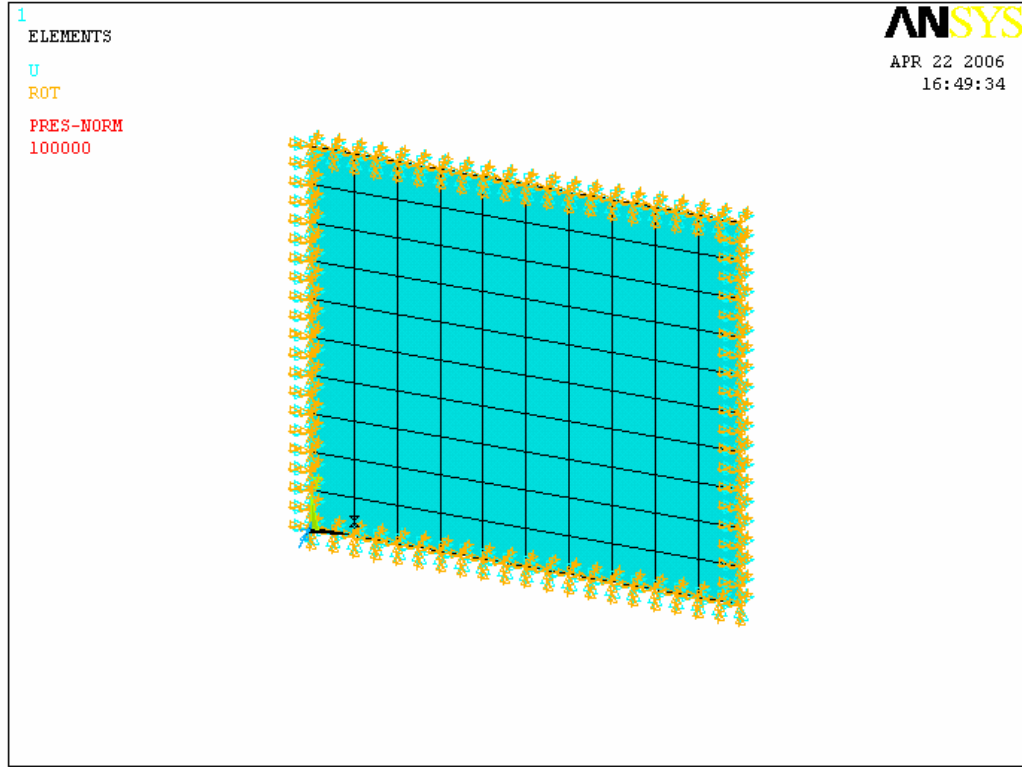
Sandviç plak, SHELL91 elemanı ile modellenirken bal peteği kalınlığının (6,4 mm) toplam kalınlığa (7,4 mm) oranının 5/7 değerinden büyük olması nedeniyle eleman özelliklerinde KEYOPT(9)=1 ve KEYOPT(5)=1 olarak ayarlanmıştır. Bu sayede sırasıyla “thick sandwich option is included” ve “element output per layer is middle of layer” olarak belirlenmiştir.

5.2. Sınır Şartları

Deneylerde kullanılan sandviç plağın, dört kenarı mesnetli (ankastre) ve tek kenarı mesnetli (konsol) olmak üzere iki farklı sınır şartında dinamik davranışı incelenmiştir. Ankastre sınır şartında plağa etki eden basınç alanı 225mm x 225mm, konsol sınır şartında plak, mesnet sehpasına mesnet yerine sadece tek bir lama ile tutturulduğundan, plağa etki eden basınç alanı 275mm x 360 mm'dir.

5.2.1. Ankastre Plak

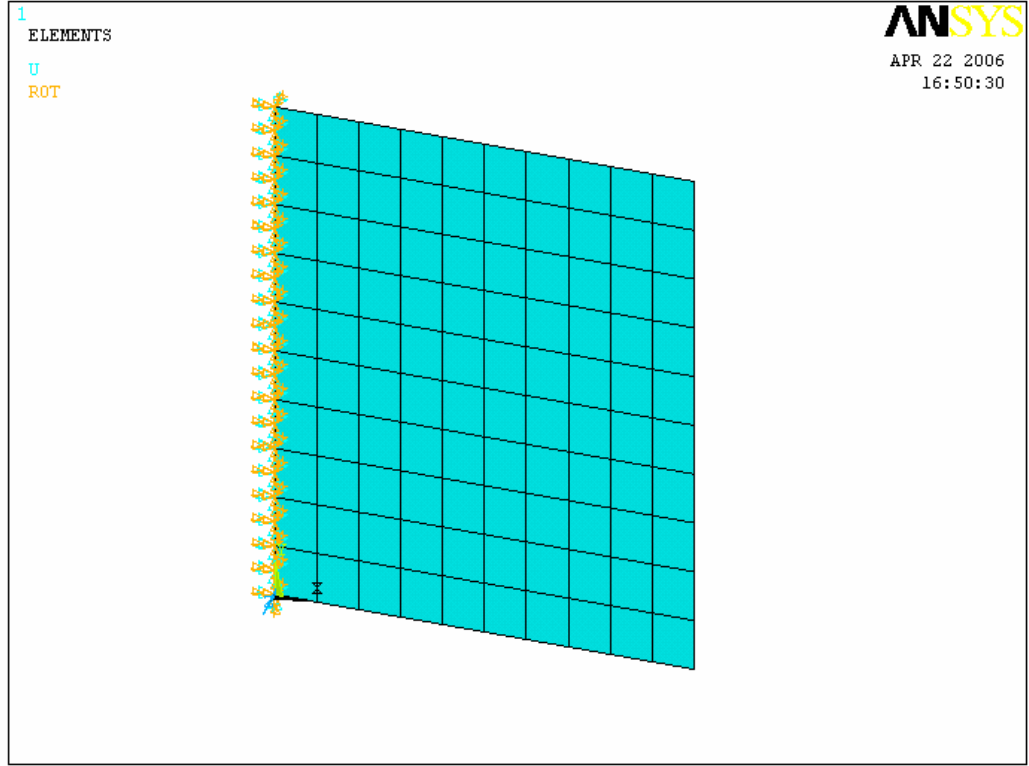
ANSYS yazılımı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulan sandviç plağın her bir kenarı 10'a bölünerek toplam 100 adet SHELL91 eleman ile yapısal modeli oluşturulmuş, her bir kenarı ankastre şeklinde sabitlenmiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2: Ankastre plağın ANSYS modeli

5.2.2. Konsol Plak

ANSYS yazılımı kullanılarak sandviç plağın her bir kenarı 10 eşit parçaya bölünmüş ve toplam 100 adet SHELL91 elemanı kullanılmıştır. Plağın sadece bir kenarı ankastre olarak sabitlenmiştir (Şekil 5.3).

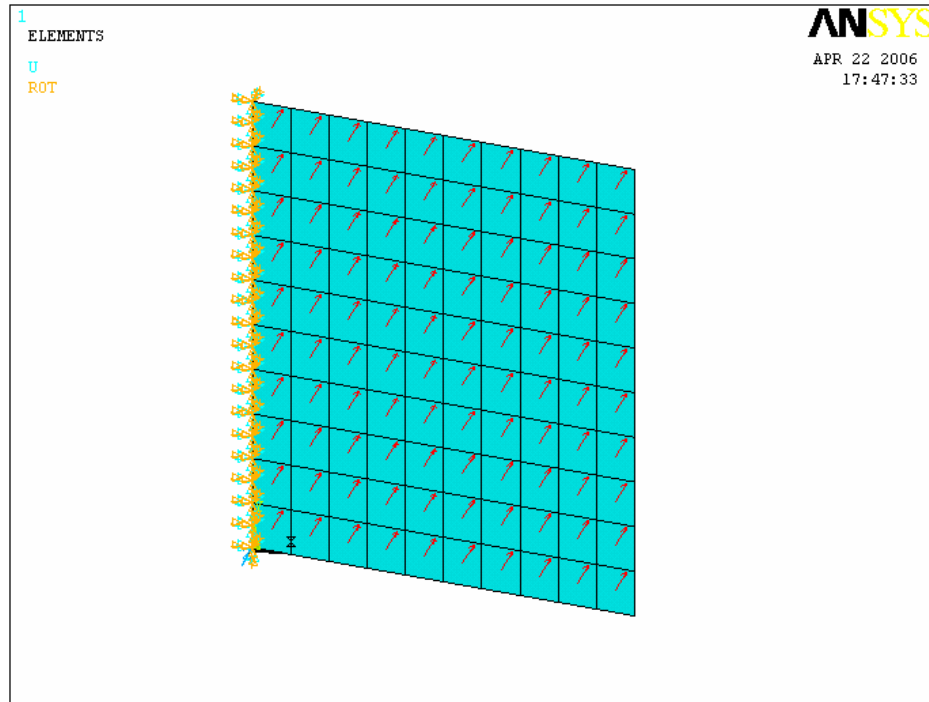
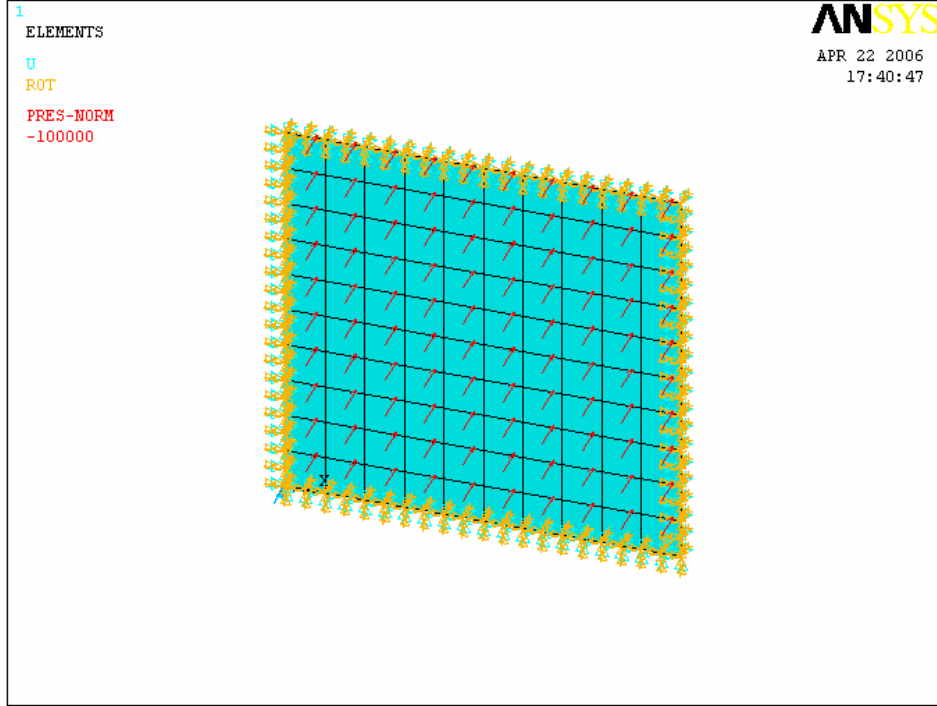


Şekil 5.3: Konsol plağın ANSYS modeli

5.3. Analizler

5.3.1. Statik Analiz

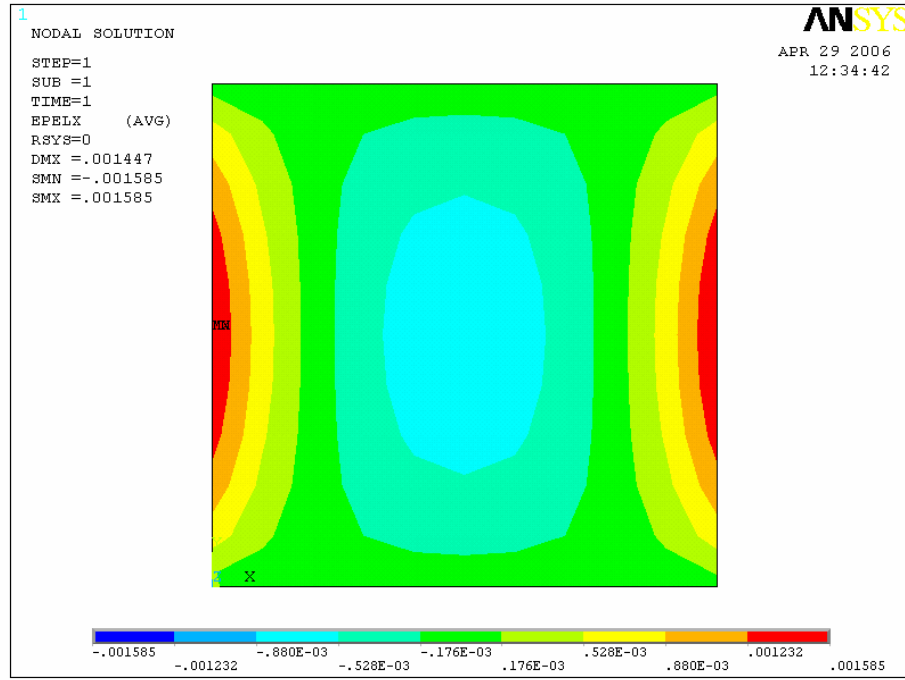
Strain gauge'lerin ve basınç duyargalarının sandviç plak üzerinde en etkin biçimde yerleştirilebilmesi için plağın gerilme ve birim uzama değerlerinin kritik olduğu noktalar belirlenmiştir. Bunun için ANSYS yazılımı kullanılarak her iki sınır şartı için plak üzerine Şekil 5.4'te gösterildiği gibi 100 kPa'lık düzgün yayılı basınç yükü uygulanmış ve meydana gelen deplasmanlar plak kalınlığına nazaran küçük mertebede olduğundan lineer statik analiz yapılmıştır.



Şekil 5.4: Statik analiz aşamasında plağa uygulanan düzgün yayılı basınç yükleri

(i) Ankastre Plak

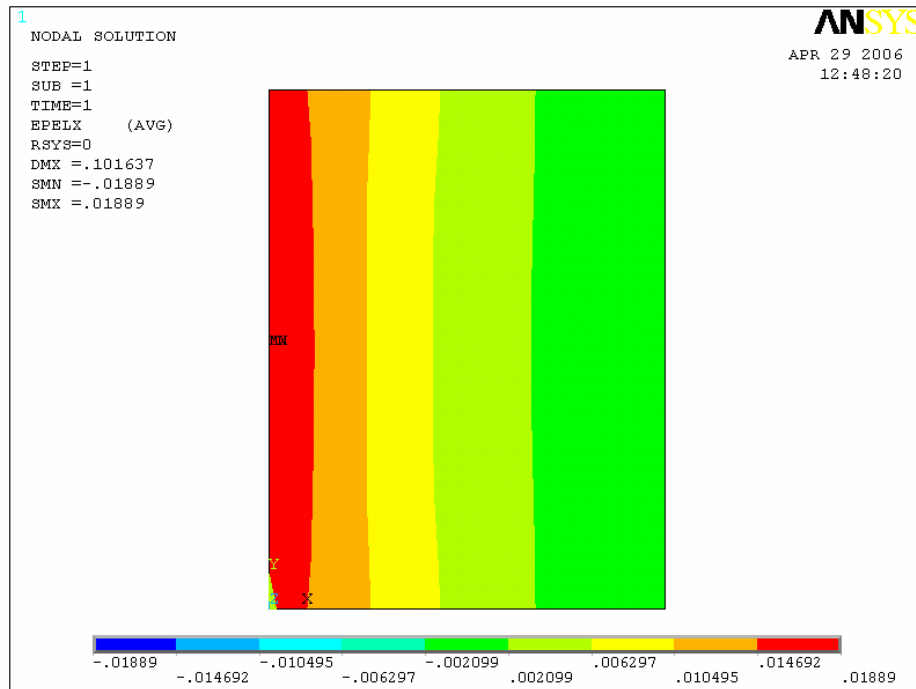
Ankastre sınır şartı uygulanan plak için ϵ_x birim uzama dağılımı Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5: Ankastre sınır şartında ϵ_x birim uzama dağılımı

(ii) Konsol Plak

Konsol sınır şartı uygulanan plak için ϵ_x birim uzama dağılımı Şekil 5.6'da verilmiştir.



Şekil 5.6: Konsol sınır şartında ϵ_x birim uzama dağılımı

5.3.2. Serbest Titreşim Analizi

ANSYS yazılımı kullanılarak sandviç plağın ankastre ve konsol sınır şartlarındaki modları belirlenmiştir. Ayrıca deneylerden elde edilen birim uzama verilerinden yararlanılmış, Vee 6.0 programı kullanılarak genlik-frekans spektrum analizi yapılmıştır. Sayısal ve deneysel sonuçlar mukayese edilmiştir.

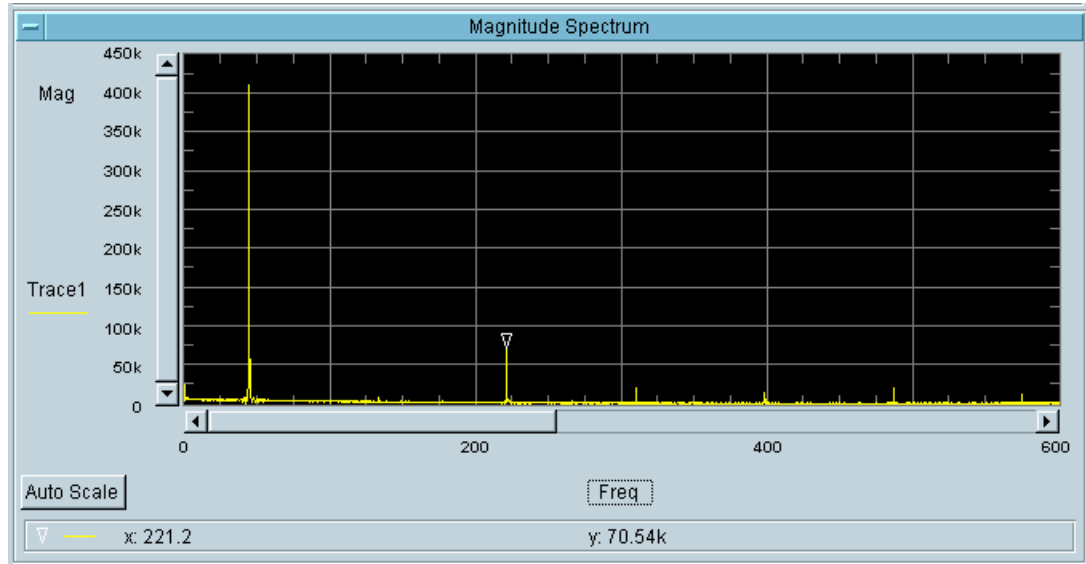
(i) Ankastre Plak

Ankastre plak için ANSYS yazılımı ile hesaplanan ve Vee 6.0 programında hesaplanan doğal frekanslar Tablo 5.1’te verilmiştir.

Tablo 5.1: Ankastre plağın doğal frekansları

	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod	5.Mod
Ansyz	1283 Hz	1845 Hz	2380 Hz	2588 Hz	2761 Hz
Deney	1278				

Şekil 5.6’da ise Vee 6.0 programında gerçekleştirilen genlik-frekans spektrum analizi şekli görülmektedir.



Şekil 5.7: Ankastre plak için spektrum analizi ile doğal frekansların belirlenmesi

Ayrıca, ankastre sınır şartı altındaki sandviç plağın mod şekilleri EK C’de verilmiştir.

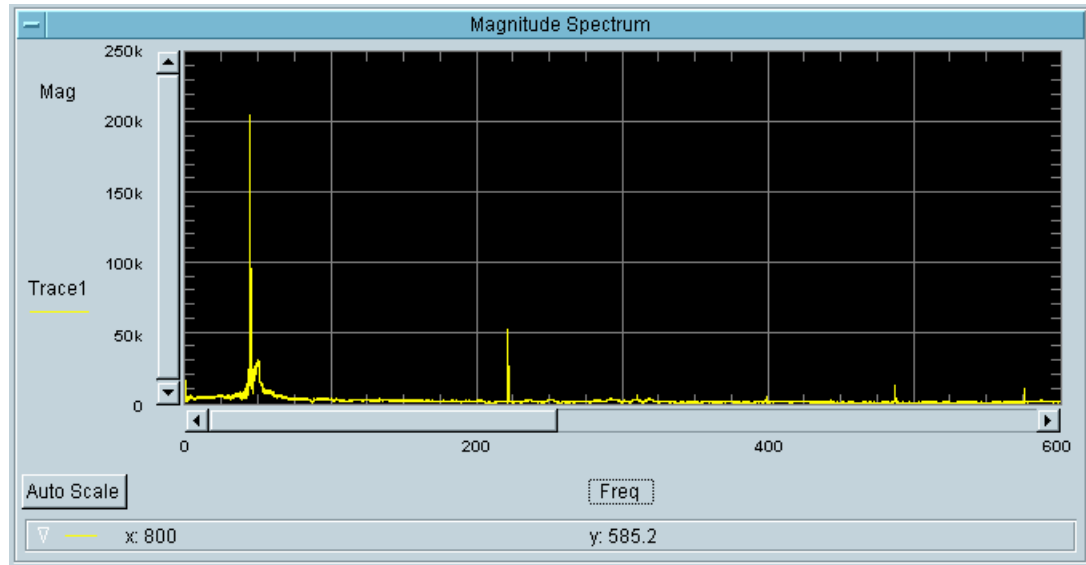
(ii) Konsol Plak

Konsol plak için ANSYS yazılımı kullanılarak hesaplanan doğal frekanslar ve deneylerde edilen birim uzamalar kullanılarak Vee 6.0 programında bulunan doğal frekanslar Tablo 5.2’de verilmiştir. ANSYS yazılımı ile bulunan mod şekilleri EK D’de görülebilir.

Tablo 5.2: Konsol plağın doğal frekansları

	1.Mod	2.Mod	3.Mod	4.Mod	5.Mod
Ansys	254 Hz	276 Hz	590 Hz	818 Hz	882 Hz
Deney			575,6		

Konsol plak için Vee 6.0 programında gerçekleştirilen spektrum analizi Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.8: Konsol plak için spektrum analizi ile doğal frekansların belirlenmesi

5.3.3. Transient Analiz

Yapılan deneyler sonucunda basıncın zamanla değişimi grafiksel olarak incelenmiştir. Gerçekte ortaya çıkan basınç eğrisi, Denklem 5.1’de verilen geliştirilmiş Friedlander fonksiyonu ile matematiksel olarak modellenmiştir.

(5.1)

$$F(x, y, t) = P_{orta} \cdot \sin\left(\pi \frac{x}{a}\right)^2 \cdot \sin\left(\pi \frac{y}{b}\right)^2 \cdot e^{(-\alpha \frac{t}{t_p})} - P_{kenar} \cdot (\sin\left(\pi \frac{x}{a}\right) \cdot \sin\left(\pi \frac{y}{b}\right) - 1) \cdot \left(1 - \frac{t}{t_m}\right) \cdot e^{(-\beta \frac{t}{t_m})}$$

Oluşturulan basınç fonksiyonu, daha sonra ANSYS yazılımında çözüm için kullanılmıştır.

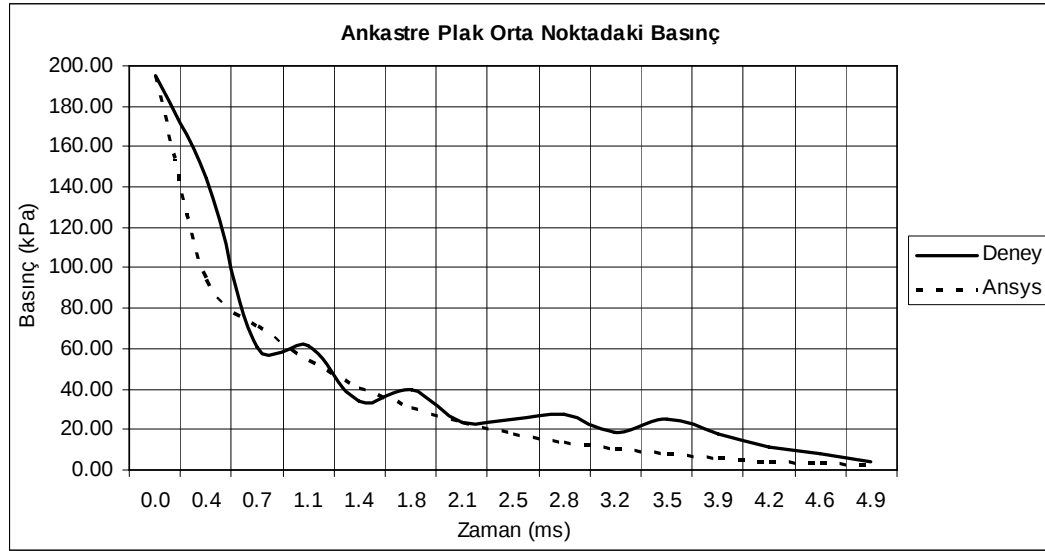
(i) Ankastre Plak:

ANSYS yazılımı kullanılarak yapılan transient analizde, elde edilen en sağlıklı deney verileri olması nedeniyle basınç tüpüne 50 cm uzaklıktan yapılan deney sonuçları kullanılmıştır.

Basınç yükünü modellemek amacıyla ankastre plağın orta noktası için Denklem 5.1'in ilk kısmı olan Denklem 5.2 kullanılmıştır.

$$F(x, y, t) = P_{orta} \cdot \sin\left(\pi \frac{x}{a}\right)^2 \cdot \sin\left(\pi \frac{y}{b}\right)^2 \cdot e^{(-\alpha \frac{t}{t_p})} \quad (5.2)$$

Şekil 5.8'de, deneyde elde edilen basınç ile Denklem 5.2 kullanılarak elde edilen basıncın eğrileri görülmektedir.

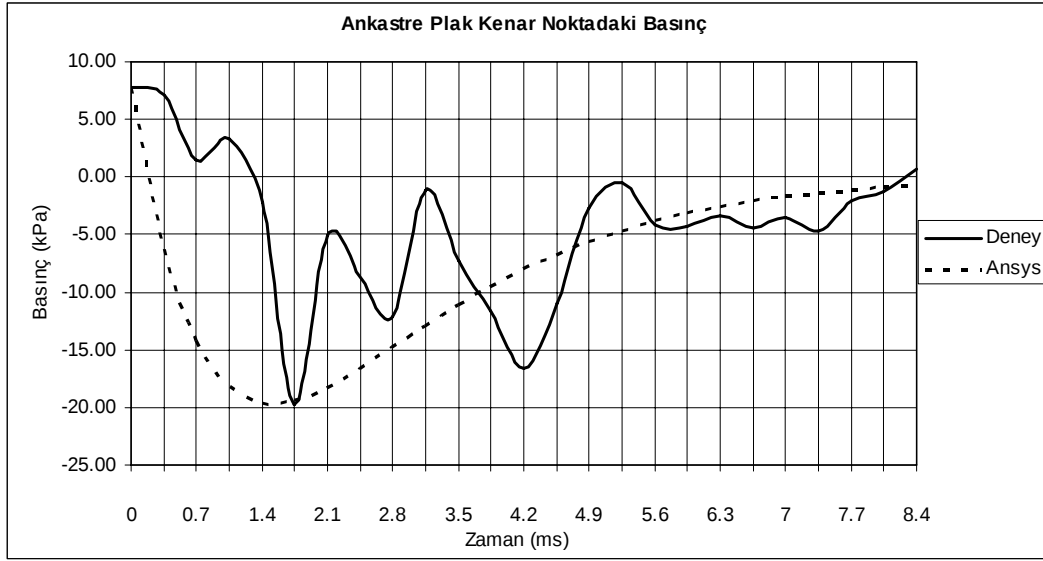


Şekil 5.9: Ankastre plak ortasındaki basınç

Kenar noktasındaki basınç yükünü modellemek amacıyla Denklem 5.1'in ikinci kısmı olan Denklem 5.3 kullanılmıştır.

$$F(x, y, t) = P_{kenar} \cdot (\sin\left(\pi \frac{x}{a}\right) \cdot \sin\left(\pi \frac{y}{b}\right) - 1) \cdot \left(1 - \frac{t}{t_m}\right) \cdot e^{(-\beta \frac{t}{t_m})} \quad (5.3)$$

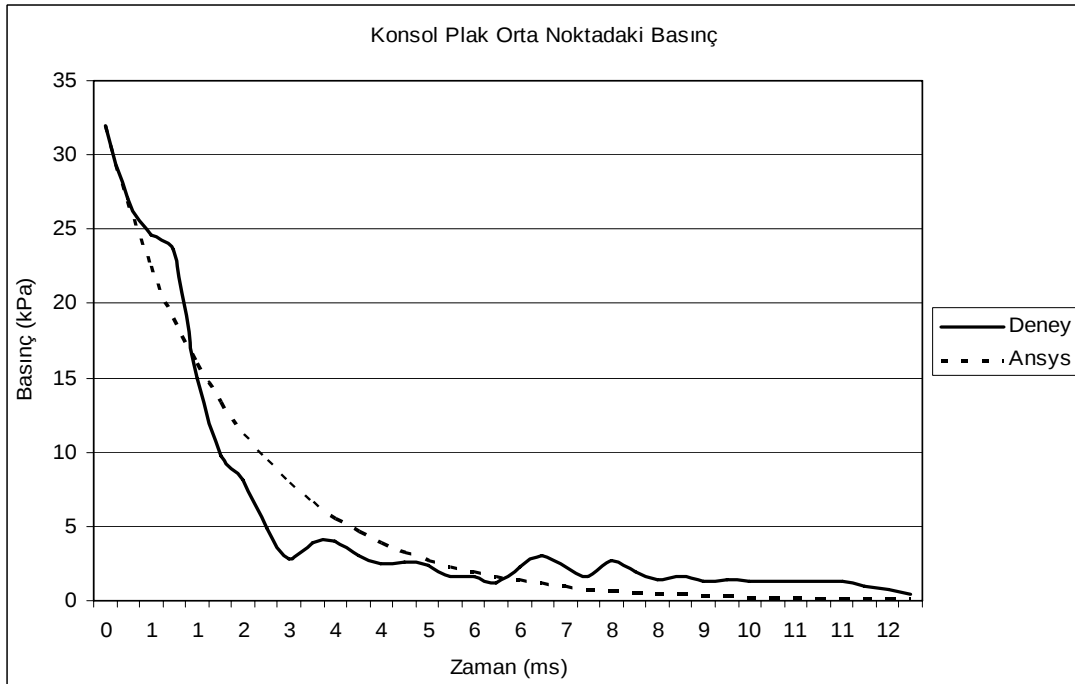
Basıncın plak kenarındaki gerçek ve matematiksel yaklaşım eğrileri Şekil 5.9’da verilmiştir.



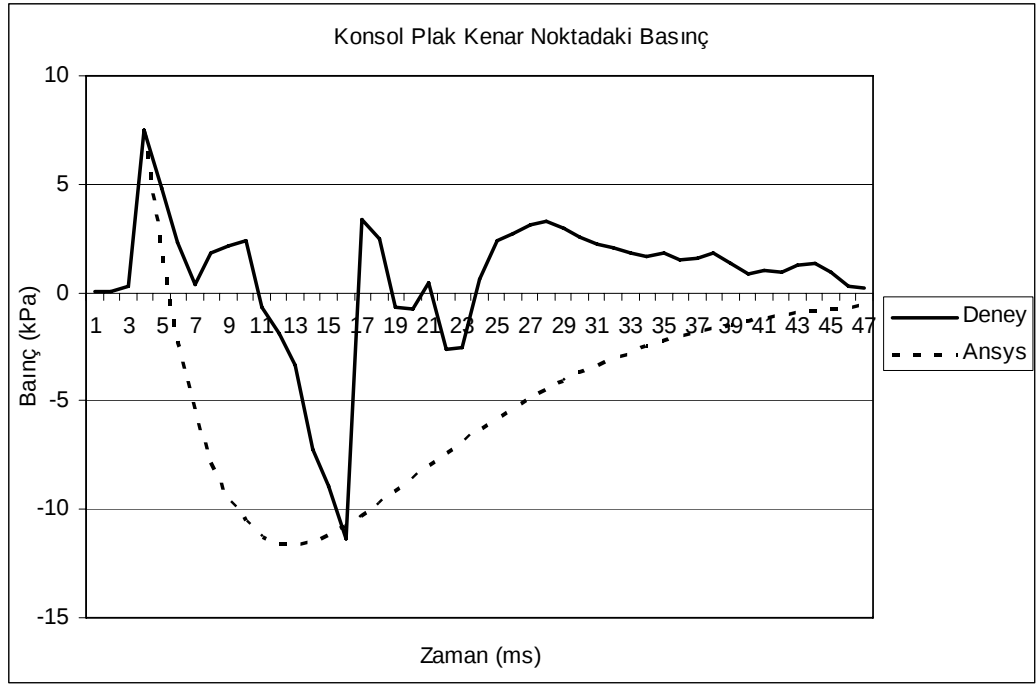
Şekil 5.10: Ankastre plak kenarındaki

(ii) Konsol Plak:

Konsol plak için yapılan deneylerden en düzgün veriler, basınç tüpüne 80 cm uzaklıkta yapılan deneyde elde edilmiştir. Plak ortasındaki ve kenarındaki basıncın zamanla değişimini gösteren grafikler Şekil 5.12 ve 5.13’te verilmiştir.



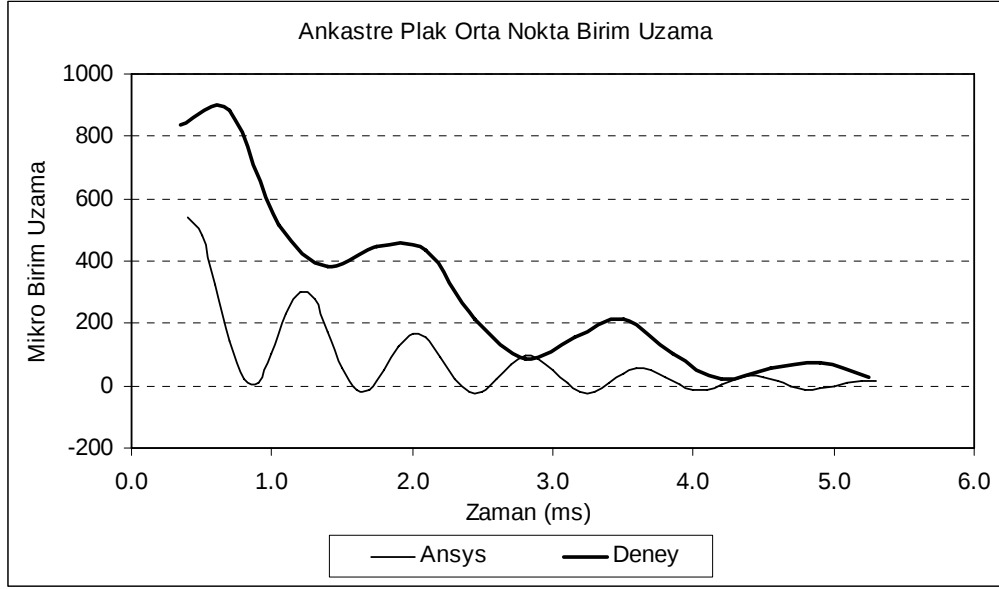
Şekil 5.11: Konsol plak ortasındaki basınç



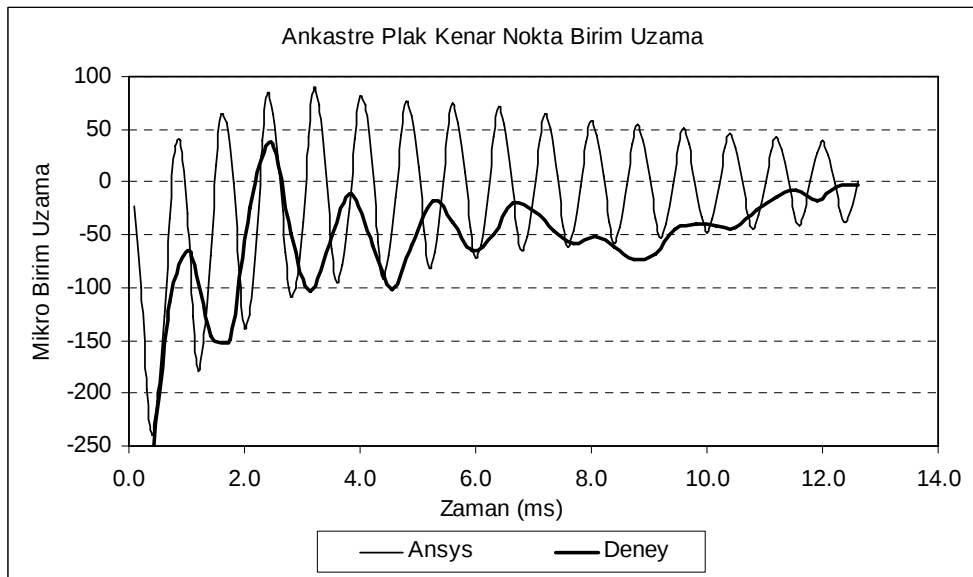
Şekil 5.12: Konsol plak kenarındaki basınç

6. SONUÇLAR

Deney sonucu ölçülen birim uzama ile ANSYS transient analizi sonucu bulunan birim uzama, plak orta noktası için Şekil 6.1’de, plak kenarı için Şekil 6.2’de karşılaştırmalı olarak görülebilir.

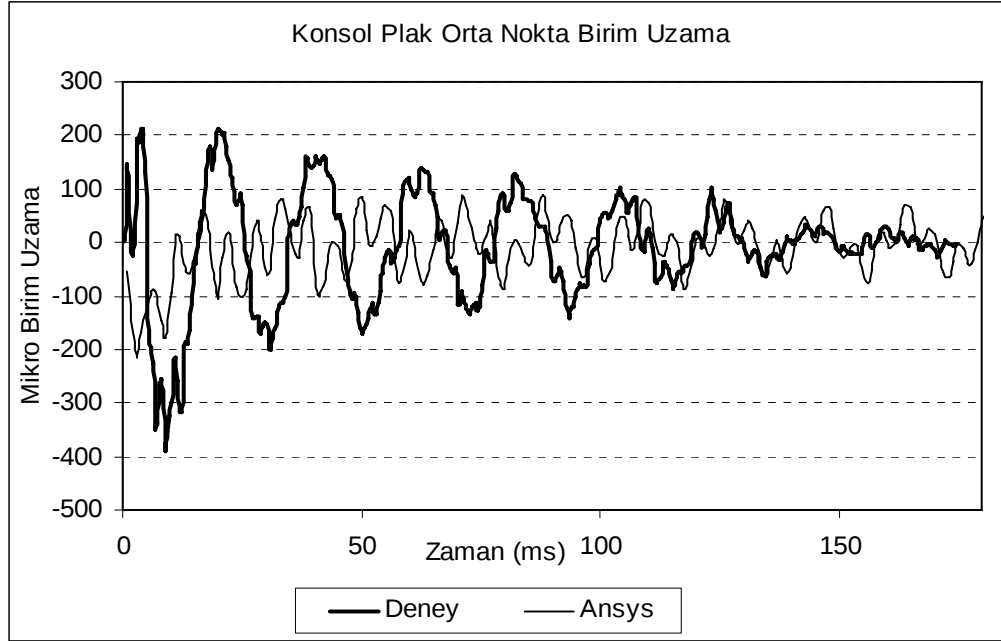


Şekil 6.1: Ankastre plak ortasındaki ϵ_x birim uzama

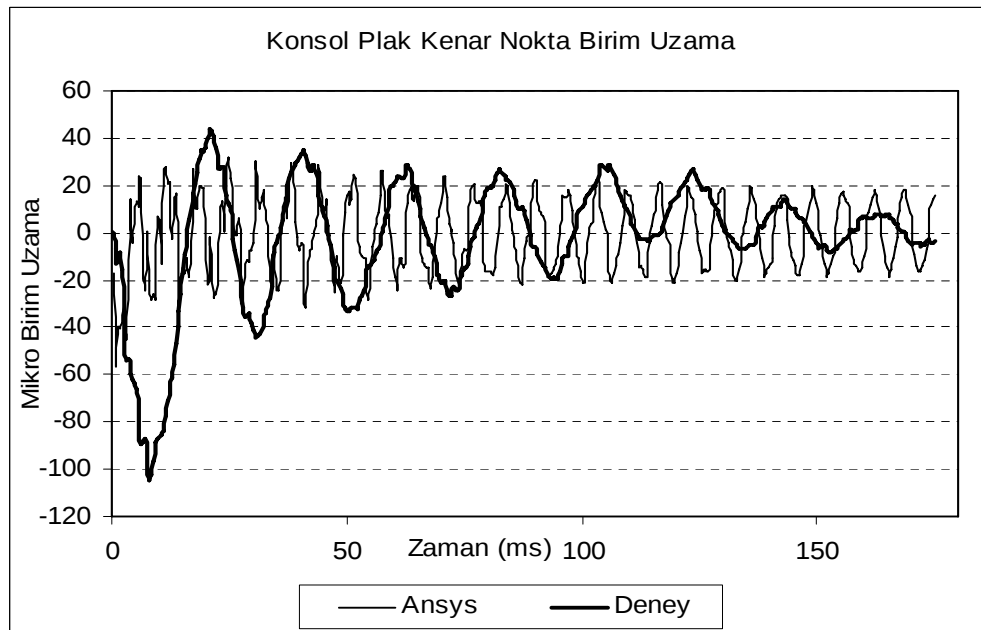


Şekil 6.2: Ankastre plak kenarındaki ϵ_x birim uzama

Deneysel çalışmaların ardından gerçek koşullarda kompozit plağın sayısal analiz sonuçlarına kıyasla daha az sayıda titreşim yaptığı ortaya çıkmıştır. Neticede ankastre plağın deneysel ve sayısal sonuçları arasında karakter olarak bir uyum yakalansa da frekans değerleri ve birim uzama değerleri arasında farklılık olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.3: Konsol plak ortasındaki ϵ_x birim uzama



Şekil 6.4: Konsol plak kenarındaki ϵ_x birim uzama

Konsol plak için elde edilen deney verileri ankastre plağa kıyasla daha sağlıklıdır. Konsol plak frekanslarının daha düşük olması sayesinde 0,35 ms aralıklarla yapılan ölçümler yeterli olmuştur. Ancak kompozit plağın ANSYS yazılımında yeterli derecede modellenememesi sonucu sayısal analiz sonuçları ile deney sonuçları arasında genlik ve frekans değerleri açısından bir uyum yakalanamamıştır.

7. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında sandviç bir plağın anlık basınç yükü altındaki dinamik davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada dört kenarından ankastre ve konsol sınır şartları altında plak üzerine anlık basınç yükleri etki ettirilerek plak üzerinde iki noktadan basınç ve birim uzama değerleri ayrı ayrı ölçülmüştür. Aynı zamanda kompozit plağın ANSYS yazılımı ile sonlu eleman modeli oluşturularak deneyde elde edilene benzer anlık basınç yükleri altında geçici (transient) analizleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar karakter itibariyle benzemekle birlikte sayısal değerler bakımından bazı uyumsuzlukların olduğu belirlenmiştir.

Sağlıklı deney sonuçları elde edebilmek için her iki sınır şartında çok sayıda deney yapılmıştır. Yapılan deneylerin ardından veriler bilgisayarda işlenerek kendi aralarında karşılaştırılmış ve sayısal analizlerde her bir sınır şartı için en uygun deney sonuçlarından faydalanılmıştır.

Bazı deneyler kolaylıkla gerçekleştirildiği gibi bazı deneyler esnasında birtakım zorluklarla karşılaşmıştır. Ölçüm aletlerinin çok hassas olması nedeniyle, her bir deney sonrası test düzeneğinin kontrol edilmesi gerektiği anlaşılmıştır. Herhangi bir deney sonrası test düzeneğinde meydana gelen bir aksaklık, sonraki deney sonuçlarının hatalı elde edilmesine yol açabilmektedir.

Deneylerde kullanılan cihazın veri toplama kapasitesinin 65024 adetle sınırlı olması ve deneylerde dört kanaldan aynı anda ölçüm yapılması nedeniyle 0,35 ms zaman adımlarında ölçüm yapılabilmektedir. Bu süre, özellikle doğal frekansların yüksek olduğu ankastre sınır şartında sandviç plağın dinamik davranışını incelemek için yeterli olmamıştır. Buna bağlı olarak deney sırasında plağın birim uzama uç nokta değerlerinin (peak values) yakalanamamış olması muhtemeldir. Bu nedenle ANSYS analiz sonuçlarında, deney sonuçlarına kıyasla daha fazla sayıda titreşim görülmektedir.

Benzer olarak, deney sırasında basıncın zamanla değişimi ölçülürken veri toplama cihazının yavaş kalması nedeniyle bazı basınç değerlerinin yakalanamamış olması muhtemeldir. Bu sebepten dolayı ANSYS transient analizlerinde gerçek koşullardaki basınç yükü plak üzerine uygulanamamıştır. ANSYS birim uzama sonuçlarının deney birim uzama verilerine kıyasla daha düşük kalması bu nedenden ötürüdür.

Diğer bir ifadeyle yüksek frekansa sahip yapıların dinamik davranışlarının sağlıklı bir şekilde belirlenebilmesi için yüksek hızlarda veri toplama cihazı kullanılmalıdır. Aksi takdirde, deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçlar arasında farklılıklar görülebilmektedir.

Deney sırasında plağa etki eden gerçek basınç dağılımı ANSYS yazılımında matematiksel olarak birebir ifade edilememiştir. Fonksiyon gerçeğe yakın bir basınç dağılımı örneklese de, ortaya çıkan farklılıklar nedeniyle birim uzamalarda uyuşmazlıklar meydana gelmiştir.

Ayrıca, sandviç plağın modellenmesi için çok sayıda özelliğinin bilinmesi gerekmektedir. Yanlış girilen her bir özellik yapının yapısal olarak yanlış modellenmesine ve buna bağlı olarak sayısal analizlerde gerçeğe uzak davranış sergilemesine yol açmaktadır. Bu nedenle deneylerde kullanılacak olan numunenin tüm yapısal özelliklerinin önceden bilinmesi gerekmektedir.

Sandviç plağın malzeme özelliklerinin ANSYS yazılımında gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi için statik yükleme deneyi yapılmıştır. Konsol sınır şartında plak ortasına büyüklüğü bilinen bir yük konarak plağın ankastre kenarının karşısındaki serbest kenarında meydana gelen deplasman ölçülmüştür. Aynı yük altında ANSYS yazılımı kullanılarak yapılan statik analizlerde aynı deplasman değeri elde edilene kadar yüzey katmanlarının elastisite modülü değerleri değiştirilmiştir. Bu değerlerle yapılan serbest titreşim analizleri doğal frekanslar için deneydekilere uygun sonuçlar vermiştir.

Ancak bu malzeme özellikleri ile yapılan transient analizler oldukça yüksek birim uzama genlikleri vermektedir. Konsol plak kökünde 50000 mikro birim uzama değerine kadar çıkmaktadır. Hâlbuki kullanılan strain gauge'lerin birim uzama üst limit değeri %3'tür (30000 mikro birim uzama). Bu durumda, deney sırasında konsol plak için birim uzama limitlerinin aşıldığı görülmektedir. Bu da ölçülen birim uzama değerlerinin hatalı olması ile sonuçlanmıştır. Strain gauge'lerin yapısının

bozulduğunu göstermek için yukarı belirtilen duruma benzer tarzda bir statik test gerçekleştirilmiş ve birim uzamalar ölçülmüştür. ANSYS sonuçları ile yapılan karşılaştırmada, deney değerlerinin sayısal değerlerin 1/10 mertebesinde daha küçük olduğu belirlenmiştir. Gelecek çalışmalarda bu tür olumsuz durumlarla karşılaşmamak için öncelikle sayısal çalışmalarla oluşabilecek maksimum birim uzama seviyelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Buna göre ya uygun strain gauge seçilmeli ya da uygulanacak basınç seviyesi sınırlandırılmalıdır.

Diğer yandan bal peteği yapının malzeme özellikleri ANSYS yazılımının kabul kriterleri dışına çıkmıştır. Bu nedenle ANSYS yazılımında oluşturulan yapısal modelde, Bölüm 4.1.1 ve 4.1.2’de belirtildiği gibi bazı mekanik özellikler yaklaşım yapılarak hesaplanmıştır. Gerçek özellikler sayısal analizlerde birebir girilememiştir. Neticede sayısal analiz sonuçları ile deney sonuçları arasında farklılıklar ortaya çıkmıştır.

Bundan sonraki çalışmalarda aynı deney düzeneği kullanılarak farklı sınır şartlarının etkisi, farklı malzeme kombinasyonlarına sahip sandviçlerin davranışları, nem-sıcaklık etkileri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Librescu, L., Oh, S.Y. and Hohe J.**, 2004, Linear and non-linear dynamic response of sandwich panels to balst loading, *Composites: Part B*, **35**, 673-683
- [2] **Malekzadeh, K., Khalili, M.R. and Mittal, R.K.**, 2005, Response of composite sandwich panels with transversely flexible core to low velocity transverse impact: A new dynamic model, *International Journal of Impact Engineering*
- [3] **Xue, Z. and Hutchinson, J. W.**, 2003, Preliminary assesment of sandwich plates subjected to blast loads, *International Journal of Mechanical Sciences*, **45**, 687-705
- [4] **Hause, T. and Librescu, L.**, 2005, Dynamic response of anisotropic sandwich flat panels to explosive pressure pulses, *Internaitonal Journal of Impact Engineering*, **31**, 607-628
- [5] **Türkmen, H.S. and Mecitoğlu, Z.**, 1999, dynamic response of a stiffened laminated composite plate subjected to blast load, *Journal of Sound and Vibration*, **221(3)**, 371-389
- [6] **Ganapathi, M., Patel, B.P. and Makhecha, D.P.**, 2004, Nonlinear dynamic analysis of thick composite/sandwich laminates using an accurate higher order theory, *Composites: Part B*, **35**, 345-355
- [7] **Yuan, W.X. and Dawe D.J.**, 2004, Free vibration analysis of stiffened sandwich plates, *Composite Structures*, **63**, 123-137
- [8] <http://www.hexcel.com/NR/rdonlyres/230A6C2A-FDFA-4EC7-B048-E4EB28E3BC8C/0/PrepregTechnology2.pdf>
- [9] **Forest Products Laboratory**, 1951. Sandwich Construction for Aircraft, Subcommittee on Air Force-Navy-Civil Aircraft Design Criteria, Munitions Board Aircraft Committee, Washington
- [10] **Plantema, F. J.**, 1966. Sandwich construction : the bending and buckling of sandwich beams, plates, and shells, New York, Wiley
- [11] http://www.flw.com/define_s.htm
- [12] <http://www.ni.com/signalconditioning/whatis.htm>
- [13] http://zone.ni.com/devzone/conceptd.nsf/2d17d611efb58b22862567a9006ffe76/0bec43673921bb8186256865006b6527?opendocument&node=1603_US
- [14] http://www.hexcel.com/NR/rdonlyres/DE6AB4C9-C397-4AA5-81DF-B30B4F34DEC1/0/HexWeb_Fibertruss_global.pdf

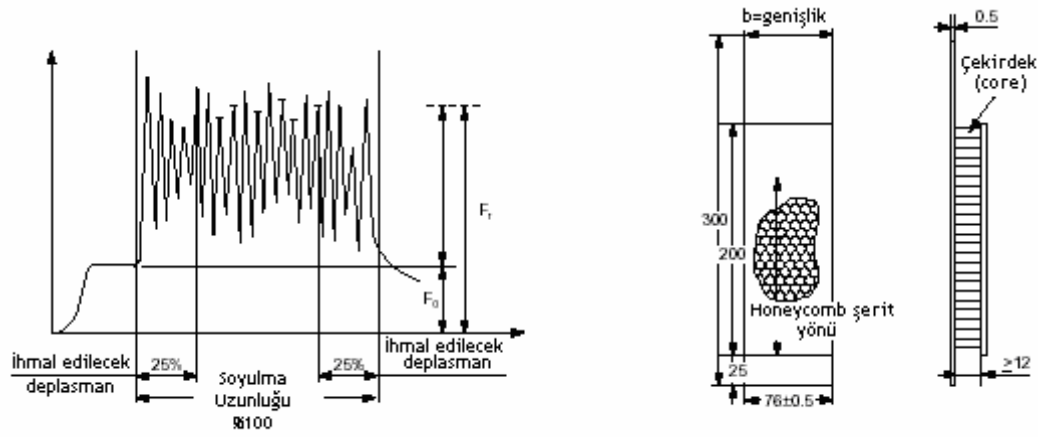
- [15] Chekherdeman, G. **Country Sales Manager, Hexcel Composites, 2006. Kişisel görüşme.**
- [16] **Yüksel, M.H.**, 2005. Anlık basınç yükü etkisi altında kompozit malzemeden yapılmış yarı küresel bir kabuk yapının dinamik davranışının incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] **Çoğuz, B.A.**, 2006. Katmanlı kompozit plakların anlık basınç yükü altında dinamik davranışlarının deneysel incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18] http://www.tokyosokki.co.jp/e/product/strain_gauge/list/wf_list.html
- [19] http://www.kulite.com/pdfs/pdf_Data_Sheets/LE-080.125.pdf
- [20] HP E1511A Four Channel Transient Strain Signal Conditioning Plug-on User's Manual
- [21] **Release 10.0 Documentation for ANSYS**, Chapter 17. Analysis Procedures

ÖZGEÇMİŞ

Enis Özdemirli, 1980 yılında Gaziantep’te doğdu. 1998 yılında Halkalı Orhan cemal Fersoy Lisesi’ni bitirdi. Aynı yıl İ.T.Ü. Uçak Mühendisliği bölümünü kazandı. 2003 yılında bölüm altıncısı olarak mezun oldu ve aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Uçak ve Uzay Mühendisliği disiplinler arası programında yüksek lisans eğitime başladı. Ocak 2004 tarihinden itibaren Türk Hava Yolları A.O. Teknik biriminde mühendis olarak çalışmaktadır.

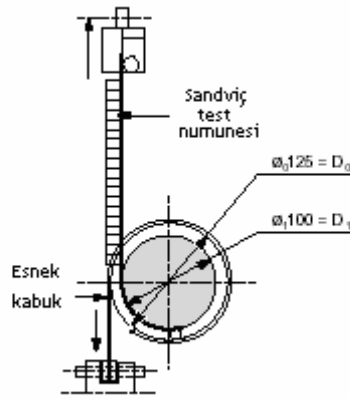
EKLER

EK-A
SOYULMA TESTİ



Şekil A.1: Soyulma Testi

Soyulma testi, sandviç yapıdaki çekirdek kısım ile dış yüzeyler arasındaki bağın dayanıklılığını ölçen bir yöntemdir.



Şekil A.2: Soyulma Testi düzeneği

Soyulma dayanımı:

$$F_p(N) = F_r - F_0 \quad (A.1)$$

Soyulma tork kuvveti:

$$C_p(Nmm/mm) = \frac{F_p(D_0 - D_1)}{2b} \quad (A.2)$$

Bu test, kür yönteminin ve bağlantı kuvvetinin kalitesini ölçmek için yaygın olarak kullanılan pratik bir kontrol yöntemidir.

EK-B

BASINÇ DUYARGALARI KALİBRASYON SERTİFİKASI



RELATIONSHIP CONTINUED

REF ID: A672-4-283

P.O. 032703-01

SPECIAL CONNECTIONS:

GREEN +Output
WHITE -Output

TEST CONDITIONS

Operational Mode: ABSOLUTE

200 FBI A

VOLUME: 13.1

Maximum Excitation: 15.00 VDC

CALIBRATION

1.015mV/PSI A

Temperature Range: 34 DEG.C to 232 DEG.C

VI Ohms	Input Impedance:	3297 Ohms
---------	------------------	-----------

ON SCREEN

REMARKS :

QUALITY ASSURANCE: calibration traceable to NIST

Model#: FCB 400

Inspected by _____

Date: Aug 11 2011

The calibration of Kulite Semiconductor Products, Inc. Instrumentation is in conformance with ISO 10012

[illegible]



CALIBRATION CERTIFICATE

Serial No: 6289-1-305

P.O. # 032703-01

SPECIAL CONNECTIONS:

GREEN +Output
WHITE -Output

TEST CONDITIONS.

Operational Mode: ABSOLUTE

200 FBI A

GROUP : N.A.

Excitation

Maximum Excitation: 15.00 VDC

CALIBRATION

0.766mV/PSt A

4.7.1 - SEM-ED

Temp. Range: -34 DEG.C to 232 DEG.C

Input Impedance: 2275 Ohms

SCREEN

CONCLUSIONS

QUALITY ASSURANCE: calibration traceable to NIST

Model #: 119000

Traceable to NIST

Inspected by:

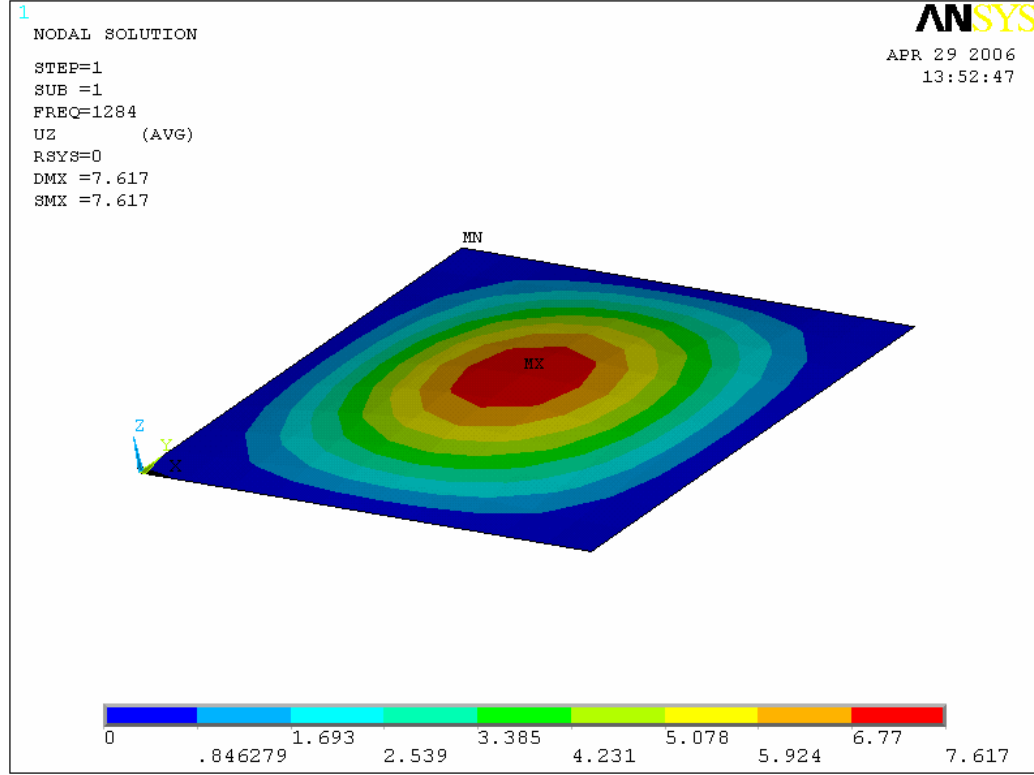
Date:

1999

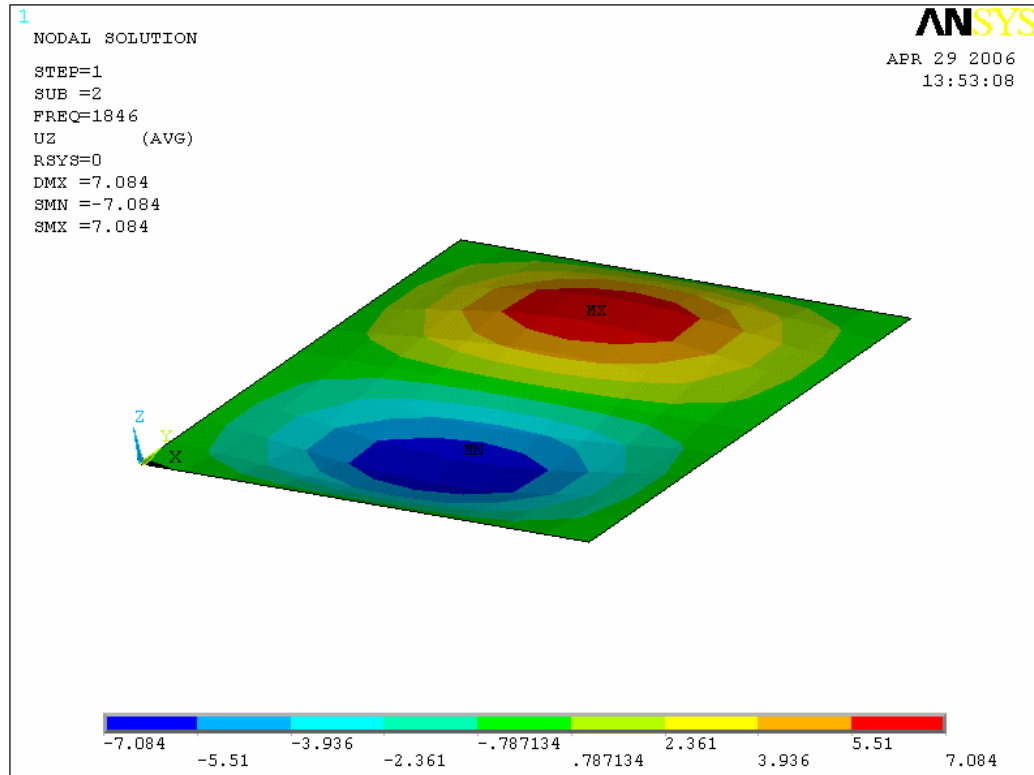
The calibration of Kulite Semiconductor Products, Inc. Instrumentation is in conformance with ISO 10012

[illegible]

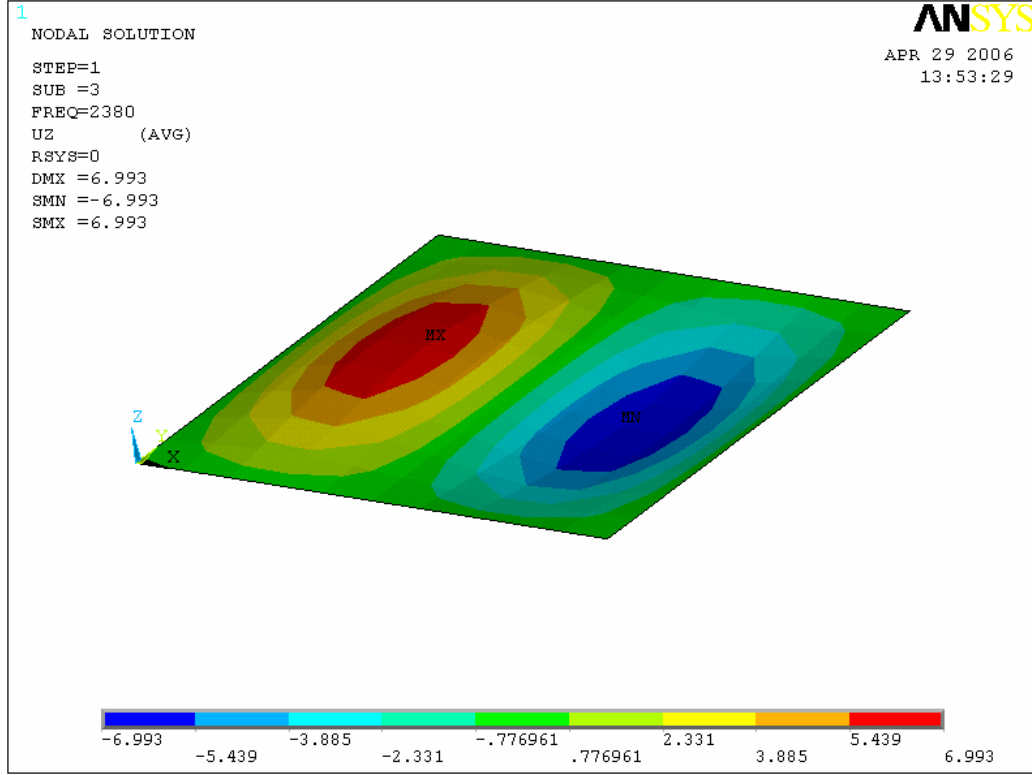
EK-C
ANKASTRE PLAK MOD ŞEKİLLERİ



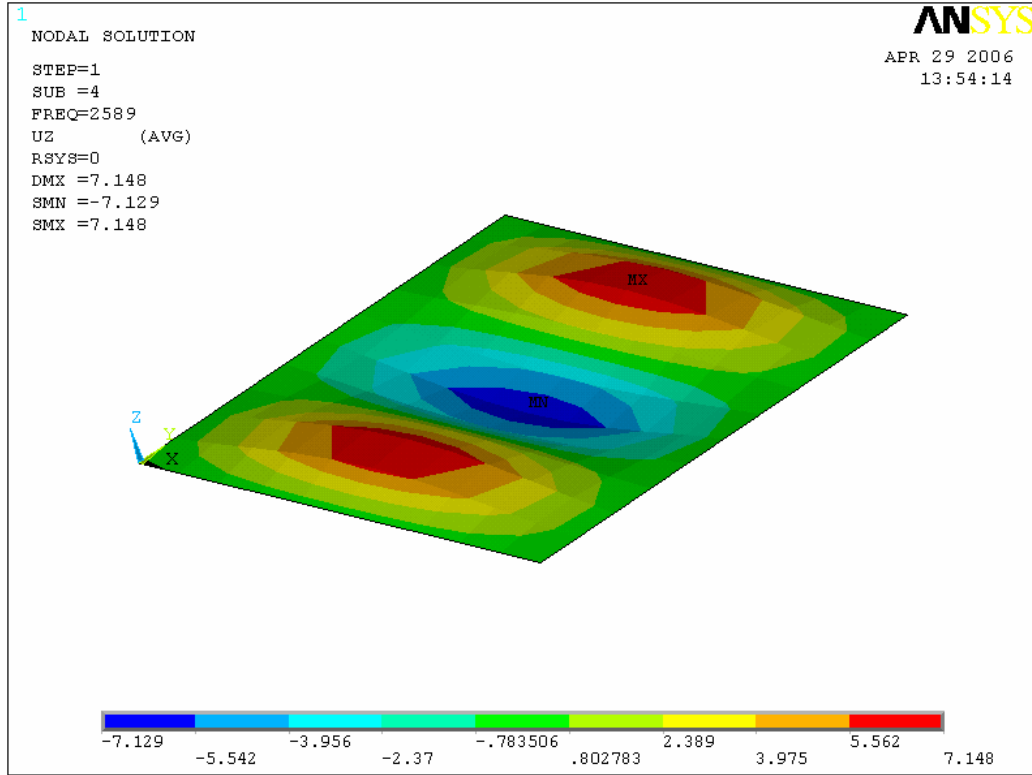
Şekil C.1: Ankastre plak 1. mod



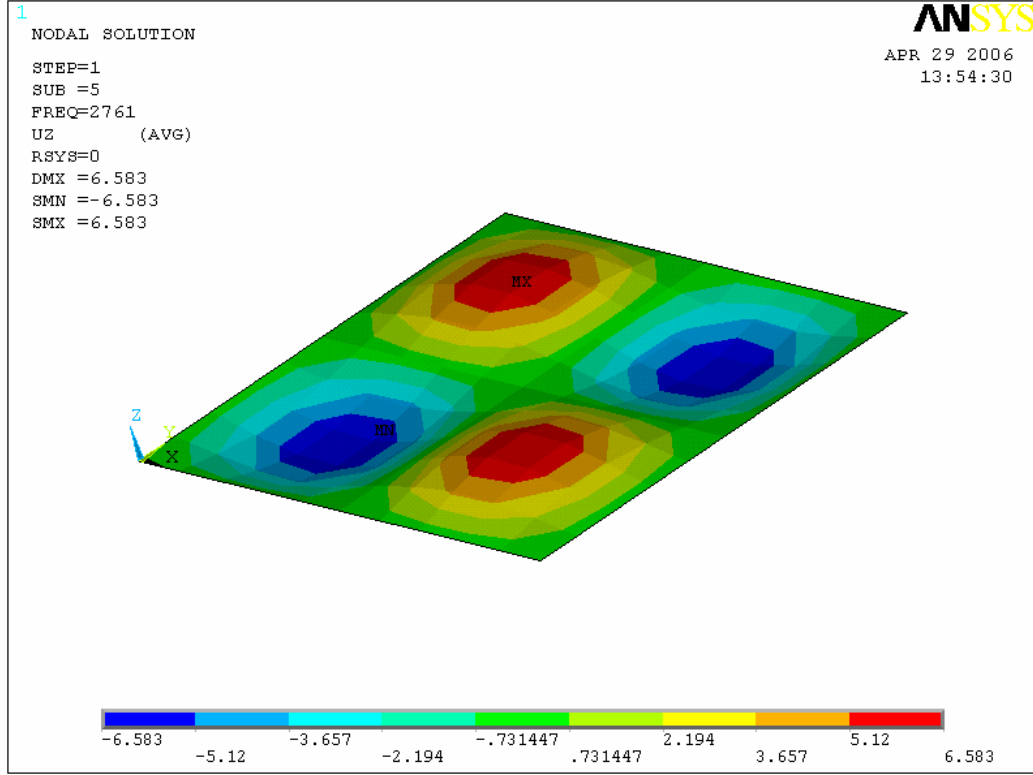
Şekil C.2: Ankastre plak 2. mod



Şekil C.3: Ankastre plak 3. mod

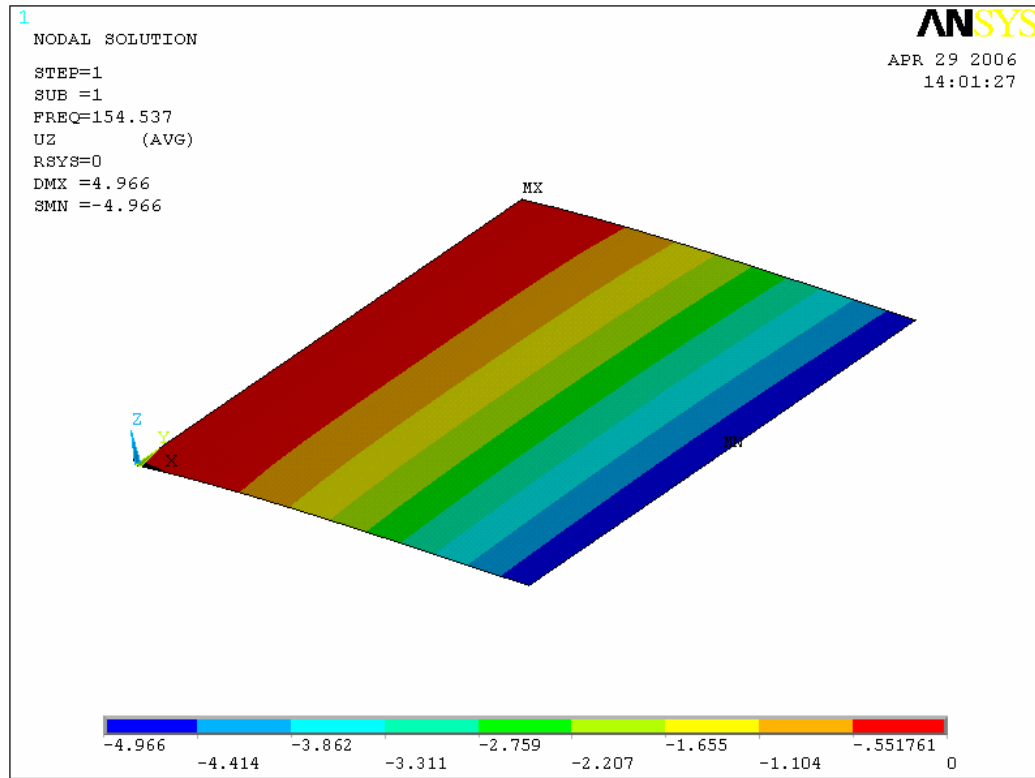


Şekil C.4: Ankastre plak 4. mod

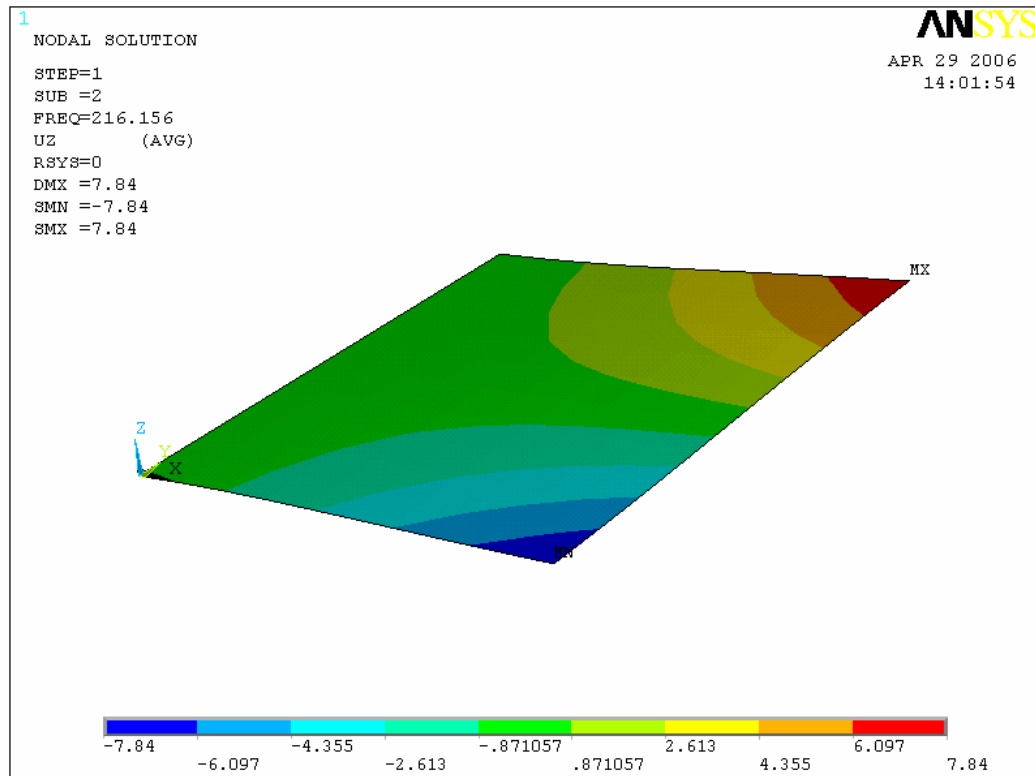


Şekil C.5: Ankastre plak 5. mod

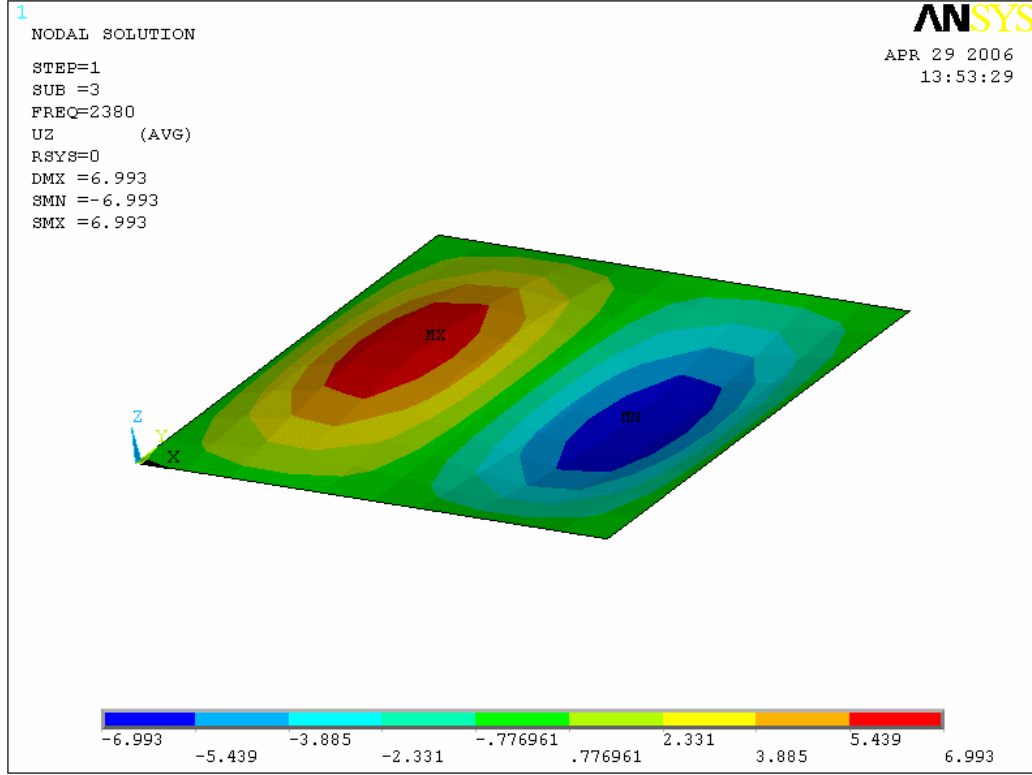
EK-D
KONSOL PLAK MOD ŞEKİLLERİ



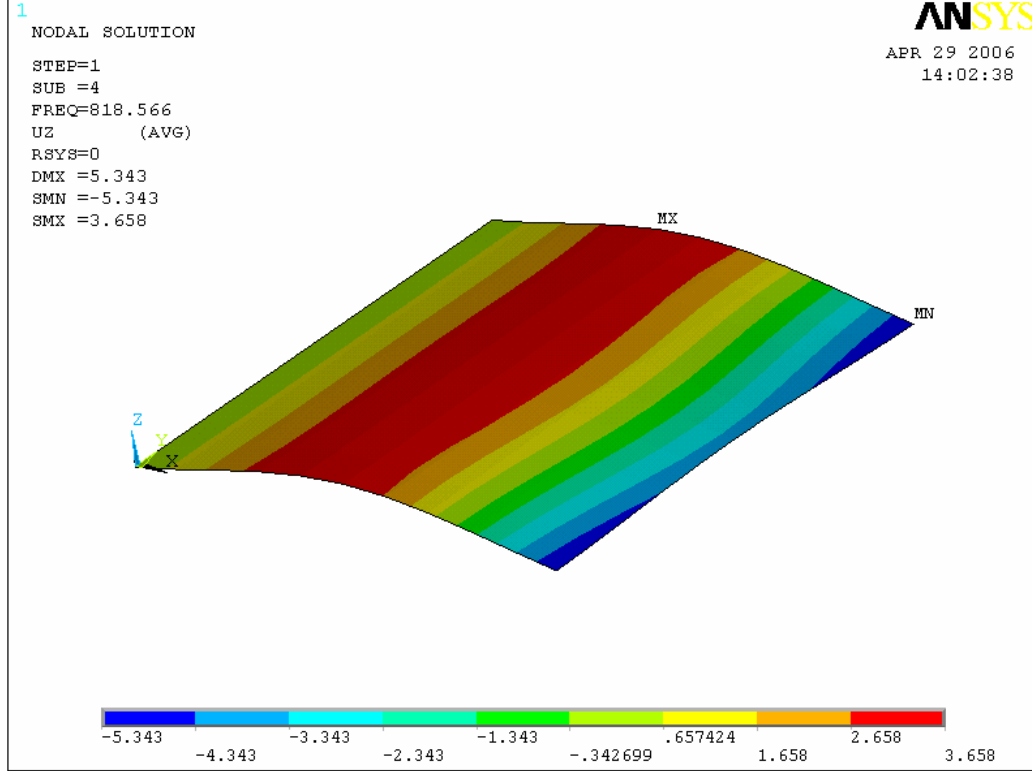
Şekil D.1: Konsol plak 1. mod



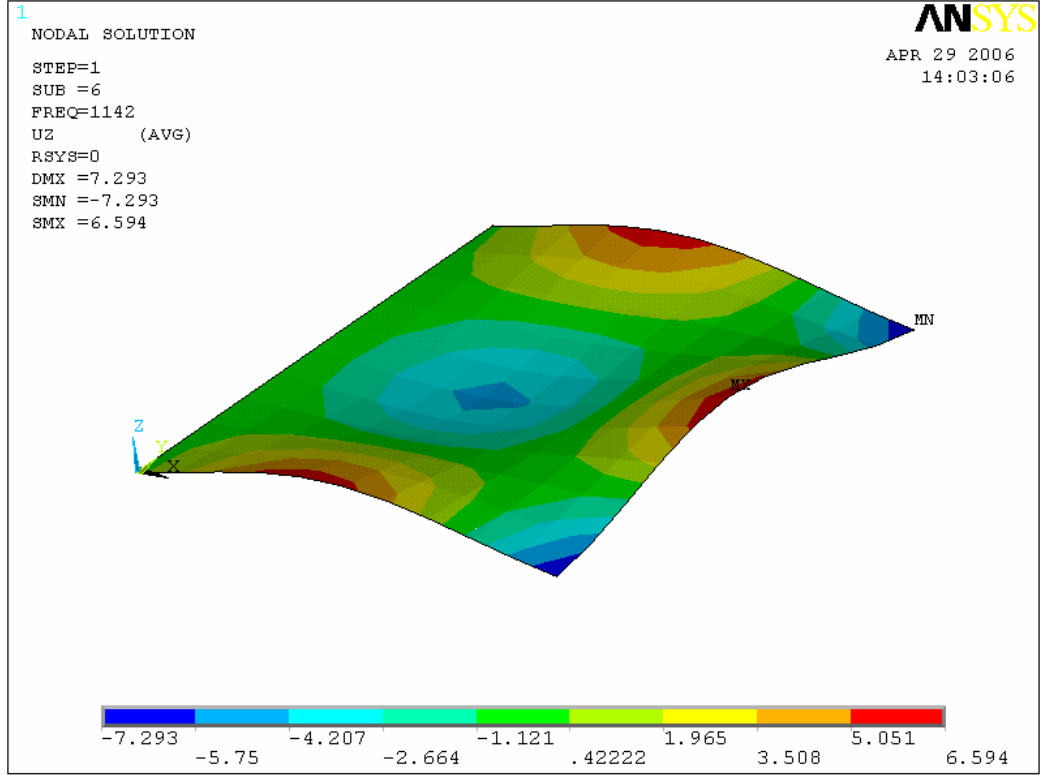
Şekil D.2: Konsol plak 2. mod



Şekil D.3: Konsol plak 3. mod



Şekil D.4: Konsol plak 4. mod



Şekil D.5: Konsol plak 5. mod