İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI SINIR ŞARTLARINA SAHİP SANDVİÇ PLAKLARIN STATİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uzay Müh. Meral CARBAŞ

Anabilim Dalı : UZAY MÜHENDİSLİĞİ
Programı : UZAY MÜHENDİSLİĞİ

HAZİRAN 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI SINIR ŞARTLARINA SAHİP SANDVİÇ PLAKLARIN STATİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SAYISAL İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uzay Müh. Meral CARBAŞ
(511981028)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Mayıs 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Haziran 2007

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Zahit MECİTOĞLU**
Diğer Jüri Üyeleri	**Doç. Dr. Halit S. TÜRKMEN**
	Yrd. Doç. Dr. Ahmet Sinan ÖKTEM (Y.T.Ü.)

HAZİRAN 2007

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım boyunca bana yol gösteren ve yardımlarını benden esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Zahit MECİTOĞLU'na teşekkür eder, saygılarımı sunarım.Çalışmalarım esnasında ANSYS sonlu eleman analizlerinde yardımcı olan araştırma görevlisi Selen BAYAR'a ve deneylerin yapılmasında emeği geçen İ.T.Ü. Trisonik Araştırma Merkezi teknikeri Müslüm ÇAKIR'a teşekkür ederim. Çalışmalarım boyunca bana yardımcı olan ve sabır göstererek beni destekleyen annem Şükriye CARBAŞ ve kızkardeşim Tuba CARBAŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2007 Müh. Meral CARBAŞ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ii
İÇİNDEKİLER iii
TABLO LİSTESİ v
ŞEKİL LİSTESİ vi
SEMBOL LİSTESİ viii
ÖZET ix
SUMMARY x

1. GİRİŞ 1

2. SANDVİÇ YAPILAR VE TEMEL DENKLEMLERİ 4

2.1. Sandviç Yapının Kısımları 4
2.1.1. Çekirdek kısım 4
2.1.2. Yüzey kısımları 6
2.1.3. Yapıştırıcı ve reçineler 6
2.2. Prepreg Sandaviç Yapı 6
2.3. Sandviç Yapıların Özellikleri ve Avantajları 7
2.4. Sandviç Yapıların Üretim Yöntemleri 8
2.5. Kompozitler 9
2.6. Sandviç Plaklar 11
2.6.1. Birim uzama-yerdeğiştirme denklemlerinin elde edilmesi 17
2.6.2. Basit mesnetli dikdörtgen plaklarda meydana gelen çökmenin elde edilmesi 17
2.6.3. Basit mesnetli dikdörtgen plaklar için Navier çözümü 19
2.6.4. Sayısal örnek 20

3. DENEYSEL ÇALIŞMA 22

3.1. Deney Numunesi 22
3.1.1. Kullanılan plakların çekirdek ve yüzey malzeme özellikleri 22
3.2. Deney Donanımı 29
3.2.1. Dijital strainmetre TC-31K 29
3.2.2. Strain gauge 30
3.2.3. Mesnetler 32
3.2.4. Ağırlıklar 33
3.3. Deneylerin Yapılışı 33

4. SAYISAL ANALİZLER 35

4.1. Kullanılan Eleman 35
4.2. Sınır Şartları 36
4.2.1. Ankastre plak 36

4.2.2. Basit mesnetli plak 36
4.3. Analizler 37
4.3.1. I. Plak için yapılan analizler 37
4.3.2. II. Plak için yapılan analizler 40
4.3.3. III. Plak için yapılan analizler 46

5. DENEYSEL VE SAYISAL SONUÇLAR 49

6. DEĞERLENDİRME 52

KAYNAKLAR 53

ÖZGEÇMİŞ 55

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: ANSYS yazılımında kullanılan bal peteği özellikleri..... 24
Tablo 3.2: HexPly® 6268 malzeme özellikleri..... 25
Tablo 3.3: HRH-10-3 / 16-2.0 malzeme özellikleri 25
Tablo 3.4: BMS 9-3 style 181 kumaş malzeme özellikleri 26
Tablo 3.5: Köpük özellikleri 26
Tablo 3.6: E-Glass Fiberin mekanik özellikleri 27
Tablo 3.7: III. Plakda kullanılan reçine'nin (Epoxy) özellikleri 27
Tablo 3.8: III. Plağın yüzey malzeme özellikleri 28
Tablo 3.9: I. Plak da kullanılan strain gauge özellikleri..... 32
Tablo 3.10: II. ve III. Plak da kullanılan strain gauge özellikleri 32
Tablo 5.1: Basit mesnet için I. plağın deney ve analiz sonuçları 49
Tablo 5.2: Ankastre mesnet için II. plağın deney ve analiz sonuçları 50
Tablo 5.3: Basit mesnet için II. plağın deney ve analiz sonuçları..... 50
Tablo 5.4: Basit mesnet için III. plağın deney ve analiz sonuçları 51

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Sandviç Yapı 4
Şekil 2.2: Sandviç yapı Tipleri 5
Şekil 2.3: Sandviç ve monokok yapının dik kesiti 7
Şekil 2.4: a x b boyutlarında dikdörtgen sandviç bir plak 11
Şekil 3.1: Altıgen hücreli bal peteği şekli 23
Şekil 3.2: TC-31 K dijital strain metre 30
Şekil 3.3: WFCA–3–11–1L tipi strain gauge 31
Şekil 3.4: Strain gauge'lerin plak üzerindeki yerleri 31
Şekil 3.5: Ankastre mesnet 33
Şekil 3.6: Basit mesnet 33
Şekil 3.7: Kum torbası 33
Şekil 4.1: SHELL 91 katmanlı kabuk eleman 35
Şekil 4.2: Ankastre plağın ANSYS modeli 36
Şekil 4.3: Basit mesnetli plağın ANSYS modeli 37
Şekil 4.4: Basit mesnet sınır şartı için 3,8 kPa'lık yük altındaki I. plakta meydana gelen çökme dağılımı 38
Şekil 4.5: Basit mesnet sınır şartı için I. plağın 3,8 kPa'lık yük altındaki ε_x birim uzama dağılımı 38
Şekil 4.6: Basit mesnet sınır şartı için I.plağın 3,8 kPa'lık yük altındaki ε_y birim uzama dağılımı 39
Şekil 4.7: Basit mesnetli I. plakta orta yatay eksen boyunca birim uzamaların değişimi 40
Şekil 4.8: Ankastre mesnetli II. plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen çökme dağılımı 41
Şekil 4.9: Ankastre mesnetli II. plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen ε_x dağılımı 41
Şekil 4.10: Ankastre mesnetli II. plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen ε_y dağılımı 42

Şekil 4.11: Ankastre mesnetli II. plakta orta yatay eksen boyunca birim uzamaların değişimi 42
Şekil 4.12: Basit mesnetli II. plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen çökme dağılımı 44
Şekil 4.13: Basit mesnetli II. plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen ε_x dağılımı 44
Şekil 4.14: Basit mesnetli II. plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen ε_y dağılımı 45
Şekil 4.15: Basit mesnetli II. plakta orta yatay eksen boyunca birim uzamaların değişimi 45
Şekil 4.16: Basit mesnetli III. plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen çökme dağılımı 46
Şekil 4.17: Basit mesnetli III. plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen ε_x dağılımı 47

Şekil 4.18: Basit mesnetli III. plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen ε_y dağılımı 48
Şekil 4.19: Basit mesnetli III. plakta orta yatay eksen boyunca birim uzamaların değişimi 48

SEMBOL LİSTESİ

c	: Sandviç plağın çekirdek kalınlığı
D	: Eğilme rijitliği
E	: Elastisite modülü
$\mathbf{G_{xy}}$	: xy düzlemindeki kayma modülü
K	:Uzama rijitliği
$\mathbf{K_x, K_y, K_{xy}}$	: Deformasyona uğramış plağın orta yüzeyinden geçen teğetin x ekseni ile yapmış olduğu açının değişim oranı
$\mathbf{M_x, M_y}$	: Bir plağın sıra ile x ve y eksenlerinin birim uzunluğuna isabet eden eğilme momentleri
$\mathbf{M_{xy}}$	: Bir plağın, x eksenine dik kesitinin birim uzunluğuna isabet eden burulma momenti
P	: Tekil yük
$\mathbf{Q_x, Q_y}$	: x ve y eksenlerindeki kesme kuvvetleri
$\mathbf{r_x, r_y}$	: xz ve yz düzlemindeki eğrilik yarıçapları
t	: Sandviç plağın yüzey kalınlığı
V	:Sandviç plağın kompozit yüzeyini oluşturan malzeme hacmi
W	:Sandviç plağın kompozit yüzeyini oluşturan malzeme ağırlığı
$\mathbf{w_i}$	:Kompoziti oluşturan bileşenlerin ağırlık oranları
w	: Çökme
x, y, z,	: Kartezyen koordinatlar
γ_{xy}	: xy düzlemindeki kayma birim uzaması
$\varepsilon_x, \varepsilon_y$	: x ve y yönlerindeki normal birim uzamalar
ν	: Poisson oranı
ρ	: Yoğunluk
υ_i	: Kompoziti oluşturan bileşenlerin hacim oranları

FARKLI SINIR ŞARTLARINA SAHİP SANDVİÇ PLAKLARIN STATİK DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SAYISAL iNCELENMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında yüzeyleri kompozit malzemeden ve çekirdek kısmı bal peteğinden veya köpükten üretilmiş sandviç plaklar çeşitli ağırlık yüklerinin etkisi altında bırakılmış ve plak üzerinde oluşan birim uzamalar ölçülmüştür. Dörtkenarından ankastre ve dörtkenarından basit mesnetli durumlar olmak üzere iki farklı sınır şartı için deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalarda sandviç plaklar kullanıldığı için ilk bölümde sandviç plaklar hakkında bilgi verilmiştir ve sandviç plak denklemleri elde edilmiştir. Sandviç plağın yüzeyleri kompozit malzemeden üretildiği için kompozitlere değinilmiş ve sandviç plakların çeşitli çekirdek yapıları hakkında bilgiler verilmiştir. Çeşitli kabuller altında sandviç plak, normal homojen plak kabul edilmiş ve basit mesnetli hal için Navier metodu kullanılarak çökme hesabı yapılmıştır, bulunan sonuç ile sayısal analiz sonucu bulunan değer karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada plağın orta ekseni boyunca belirlenen üç noktaya strain gauge rozetleri yapıştırılmıştır. Basit mesnetli ve ankastre mesnetli olmak üzere iki ayrı sınır şartında plak üzerine çeşitli ağırlıklarda kum torbaları konularak bu yük durumlarında plakta oluşan birim uzama değerleri strain metreden okunarak belirlenmiştir. Sayısal analizler için ANSYS 10.0 sonlu eleman yazılımı kullanılmıştır. Sandviç plak bu yazılım kütüphanesinde bulunan SHELL91 katmanlı kabuk elemanı ile modellenmiştir. Kullanılan malzemenin özelliklerine ve ağırlık yüklerine göre hesaplanan birim uzama değerleri deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ve sayısal sonuçların genellikle iyi bir uyum içinde oldukları gösterilmiştir. Bazı ölçüm sonuçlarında karşılaşılan uyumsuzlukların nedenleri yorumlanmıştır.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF STATIC BEHAVIOUR OF SANDWICH PLATES WITH DIFFERENT BOUNDARY CONDITIONS

SUMMARY

In this study, strains are determined for sandwich plates whose faces are made of composite materials and cores are honeycomb or foam. The plates are subjected to uniform distributed loads and two different boundary conditions, four edges clamped and four edges simply supported. The experimental and numerical studies are performed for the sandwich plates with different boundary and loading conditions. In the first section, the sandwich plates, their composite face materials and core materials are introduced and governing differential equations of sandwich plates are derived. Under the various assumptions, the governing differential equation of isotropic sandwich plate is reduced to the governing differential equation of isotropic homogeneous plate. For plates under the simply supported edge boundary condition used Navier's method and calculated deflections produced in a simply supported rectangular plate by a load uniformly distributed over the entire surface of the plate. Results obtained by the use of Navier's method are compared with the results of finite element analysis. In the experimental study, three points are determined throughout middle axes of sandwich plate and strain gauge rosettes are attached at these points. Lead wires of strain gauge are connected to terminal board of strain meter and sand bags have different weights are put on the plate, strain measurement values which are displayed on LCD of strainmeter are determined. These experiments are made for two different boundary conditions; four edges clamped end four edges simply supported and for the different weights of sand bag. For numerical analysis, ANSYS 10.0 finite element software is used. Sandwich plate is modeled with SHELL 91 layered shell element which is present in library of the software. Strains are determined for features of used material and varied loads and are compared with experimental results. For some sandwich plates with certain boundary conditions, it is observed that analysis results agree very well with the experimental

data. Some discrepancies between the numerical and experimental results are obtained for the some plates under the clamped edge boundary conditions. The reasons of these discrepancies are explained.

1. GİRİŞ

Bu tez çalışmasında değişik ağırlık yüklerine maruz bırakılan yüzeyleri kompozit malzemeden üretilmiş, çekirdek yapısı bal peteği olan sandviç plağın statik davranışları deneysel olarak incelenmiş ve ANSYS sonlu eleman yazılımı ile elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Literatürde sandviç plaklar üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda sandviç yapıların statik ve dinamik davranışları teorik olarak incelenmiş, analitik olarak modellenmiştir.

Chang ve arkadaşları, oluklu çekirdek (corrugated-core) yapıya sahip lineer olarak modellenmiş bir sandviç plağın genel kapsamlı analizini gerçekleştirmişlerdir.[1] Çeşitli sınır şartlarında sandviç plaktaki eğilmeyi tarif etmek için Mindlin-Reissner plak teorisi kullanılmıştır. Üç boyutlu sandviç panel iki boyutlu ortotropik ince normal bir plağa indirgenmiştir. Deneysel araştırmalarda gözlenmiş bazı yeni olaylar, daha önce yapılmış ve doğrulanmış sayısal analizlerde bulunamamıştır. Şimdiki sayısal analizlerde ise eğilme momentleri ve (deflections) çökmeler için yapılan deneysel araştırmalarla uygunluk göstermiştirler. Böylece oluklu yapıdaki çekirdeğe sahip sandviç plaklar üzerinde oluşan rijitlik ve gerilme halleri incelenebilmektedir. Ayrıca bu çalışmada görülmüştür ki y yönündeki negatif momentler her durum için oluşmamaktadır.

Liang ve Chen, exsenel yükler altındaki kare hücreli (square cell) bal peteği yapılarını araştırmışlardır [2]. Yapılan araştırmada, kare hücreli bal peteği yapısındaki çekirdeğe sahip kiriş ve sandviç panelin çökmesi incelenmiştir. Kare hücre yapısına, kesit alanına göre yeni, değişik plak ve kiriş modelleri geliştirilmiştir. Burulma mode'larının üçlü seri çözümleri sunulmuş ve yüzeyler üzerinde oluşan gerilmeler türetilmiştir. Bal peteği çekirdek yapısındaki sandviç paneller; ince, orta ve kalın plaklar olarak sınıflandırılmıştır. Farklı burulma mod'larına ve farklı temel denklemlere sahip farklı hücre çeşitleri bulunmuştur. Kare bal peteği çekirdek

yapısındaki sandviç paneller için yeni karakteristik optimizasyon dizayn metotları geliştirilmiştir. Son olarak da sonlu eleman sayısal simulasyonları sunulmuştur.

Bau-Madsen, ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada ankastre sandviç plakların büyük çökme analizi için deneyler yapmışlardır [3]. Yüzey birim uzamaları ve çökmeler lateral yük fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Çökme durumuna göre gerilme durumundan daha belirgin bir nonlineerlik gözlenmiştir. Gerilmiş yüzeylerdeki birim uzama artımının sıkışmış yüzeylerdeki birim uzama azalmasından daha az olduğu gözlenmiştir. Sonuçlar sonlu eleman analizi ile mukayese edilmiştir.

Lee ve Fan, çalışmalarında, kompozit sandviç plakların sonlu eleman analizini yapmışlardır [4]. Plağın yüzeyleri Mindlin plak teorisi'ne göre modellenmiştir. Sandviç çekirdek (core) malzemesinin yer değiştirme alanı, plağın iki yüzeyinin yer değiştirmesine bağlı olarak doğrusal interpolasyon yapılmıştır. Bu kabullere göre, enine normal birim uzamalar çekidek kalınlığı boyunca sabit kalırken, enine kayma deformasyonların doğrusal olarak değiştiği görülmüştür.

Mindlin formulasyonu esas alınarak nine-node izoparametrik element kullanılarak sonlu eleman analizi yapılmıştır. Ayrıca çekirdekteki deformansyon etkilerini araştırmak için statik ve serbest titreşim problemleri çözülmüştür. Noktasal yüke maruz sandviç plaklarda çekirdekte meydana gelen normal deformasyonların ihmal edilemeyeceği bulunmuştur.

Thomsen, çekirdeği köpük olan merkezinden yüklü, ankastre olarak mesnetlenmiş dairesel bir plak'ta meydana gelen lokal eğilme etkilerini teorik ve deneysel olarak incelemiştir [5]. Teorik incelemede lokal eğilme analizi yaklaşım metodu kullanılmıştır. Elastik temel yaklaşımı ile yüklü yüzeyde meydana gelen deformasyon dikkate alınmıştır. Yüklü yüzey ile çekirdek malzemesi arasındaki kayma etkileşiminin etkileri hesaba katılmıştır. Deneysel araştırmada, holografik girişim ölçme tekniği kullanılmıştır. Yüklü yüzeyin yerdeğiştirme alanı hakkında detaylı bilgi elde edilmiştir. Deneysel ve teorik çalışmalar sonunda bulunan yerdeğiştirme alanları arasındaki mukayesede ikna edici bir uyum gözlenmiştir.Böylece, basit elastik temel yaklaşımının, lokal eğilme olaylarını çok iyi tarif edebildiği anlaşılmıştır.

Cheng ve arkadaşları, sonlu eleman analizi metodunu kullanarak çeşitli tiplerdeki çekirdek yapısına sahip sandviç yapıların eşdeğer katılık özelliklerini belirlemeyi amaçlamışlardır [6]. Çekirdek, klasik kontinuum veya bal peteği yapısından farklı olarak sürekli veya ayrık yapısal bileşenlerin birleşmesi sonucu oluşan bir çekirdek olabilir. Bu şekilde ki yapıların davranışlarının analizi için 3 boyutlu sandviç yapılar, eşdeğer 2 boyutlu kalın kontinuum plaklara indirgenmiştir. Hesaplanan sonuçlar ile bilinen teorik sonuçların mukayese edilmesi sonucu sunulan metodun doğruluğu anlaşılmıştır.

Bu çalışmada değişik ağırlıklardaki yüklere maruz kalan kompozit sandviç plağın dörtkenarı ankastre ve dörtkenarı basit mesnetli olmak üzere iki farklı sınır şartlarındaki statik analizi gerçekleştirilmiştir. Sandviç plak deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada, öncellikle plak basit mesnet ve ankastre mesnet durumu için ayrı ayrı incelenmiştir. Daha sonra mesnetlenmiş sandviç plağın üzerine monte edilmiş strain gage'lerın uçlarındaki teller bir birim uzama ölçere takılmıştır. Sandviç plak üzerine konan kum torbalarının plakta meydana getirdiği birim uzamalar birim uzama ölçer yardımı ile belirlenmiştir. Sonuç olarak, elde edilen deney sonuçları ile sonlu eleman analizinde bulunan sonuçlar karşılaştırılmış ve genellikle iyi bir uyum olduğu görülmüştür.

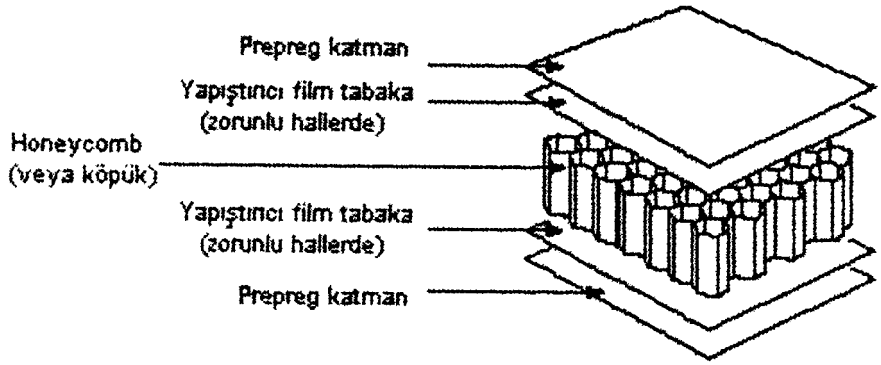
2. SANDVİÇ YAPILAR VE TEMEL DENKLEMLERİ

Bu bölümde, sandviç yapılar ve kompozitler ile ilgili genel bir takım bilgiler verilmiştir. Sandviç yapıların kısımları ve kullanılan malzeme türleri, sandviç yapıların özellikleri ve avantajları anlatılmış, sandviç yapıların üretim yöntemlerine değinilmiştir. Sandviç plaklar için temel denklem ve birim uzama denklemleri elde edilmiştir.

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 edilmektedir.

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 [7]

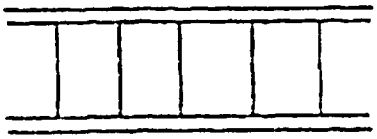
2.1.1. Çekirdek kısım

Çekirdek (core) sandviç yapının iki yüzeyi arasında kalan orta kesimidir. Yüzey kısımlarına kıyasla kalınlığı daha fazladır. Genel olarak 4 tip olabilir.

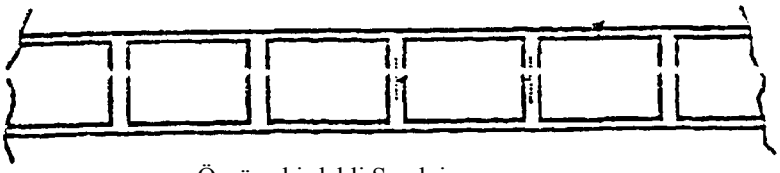
a) Köpük veya katı çekirdek
b) Bal peteği (honeycomb) çekirdek
c) Örgü çeirdek.
d) Oluklu veya kiriş çekirdek.



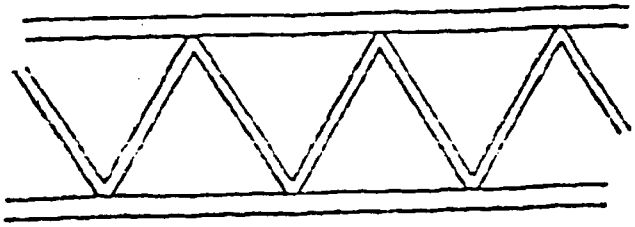
Köpük Çekirdekli Sandviç



Bal Peteği Çekirdekli Sandviç



Örgü çekirdekli Sandviç



Kriş Çekirdekli Sandviç

Şekil 2.2: Sandviç yapı tipleri [8]

Sayılan çeirdek modelleri Şekil2.2'de gösterilmiştir.Bal peteği (honeycomb) çekirdek kullanımı II. Dünya Savaşı'ndan sonra yayılmıştır. En yaygın iki tipi, altıgen şeklinde hücre (hexcell) ve kare hücre. Örgü (Web) çekirdek yapılar birbirlerine flençlerle kaynamış I kiriş gruplarına benzerler. Kiriş çekirdek yapılar çok basitten complex kesitlere değişebilir. Kiriş çekirdek ve örgü çekirdek yapılarda çekirdek içindeki boşluklar sıvı deposu veya ısı değiştirici gibi kullanılabilir.

Bütün hallerde; çekirdek, enine kayma yüklerine direnirken düzlem içi ve (lateral) yanal yükler yüzeyler tarafından taşınır. Köpük ve petek çekirdekli sandviç yapıların çoğunda düzlem içi yükler ve yanal eğilme yükleri yalnızca yüzeyler tarafından taşınırken, kiriş çekirdek ve örgü çekirdek yapılarda bu yüklerin bir kısmı da çekirdek tarafından taşınır.

Yeni çekirdek yapıların gelişimi devam etmektedir. Köpük veya solid core yapılar oldukça ucuz ve balsa ağacındandır [8].

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 olmalıdır. 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 yüzeyleri tabakalı kompozit yapıda ise bu kısımda da reçine kullanılmaktadır. Yapıştırıcı malzemeler, sandviç yapının montaj süresine, kullanılan malzeme türüne, uygulanan basınca ve ısıl işleme göre seçilir. Üç farklı yapıştırıcı türü vardır:

i) Yüksek sıcaklık altında tatbik edilen yapıştırıcılar : Bu sınıfa giren yapıştırıcılar çekirdek ve yüzeylere uygulanır ve yüksek sıcaklık altında monte edilirler [7].

ii) İki bileşimli yapıştırıcı : Bu tür yapıştırıcıların ilk bileşimi çekirdek ve yüzey kısımlarına tatbik edildikten sonra ısıl işlem uygulanır. Daha sonra ikinci bileşim yapıya tatbik edilir ve montaj gerçekleştirilir [7].

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 [7].

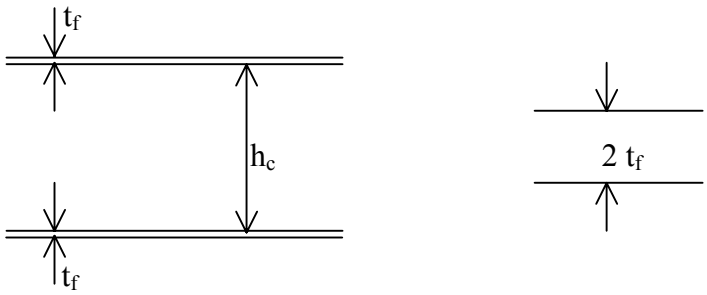
2.2. Prepreg Sandviç Yapı

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 kullanımındaki artışın sebepleri şöyle sıralanabilir. Öncelikle diğer yapılara oranla daha hafif yapılardır, daha yüksek doğal frekanslara dayanma gücüne sahiptirler, daha yüksek burkulma direncine sahiptirler ve daha düşük yanal deformasyonuna uğrarlar.

İzotropik sandviç yapılarla aynı yüzey ağırlığına sahip (ince cidarlı) monokok yapıların karşılaştırılması yapılabilir (Şekil 2.3). Aşağıda sol tarafta aynı (t_f) yüzey kalınlığı ve (h_c) yüzeyler arası mesafesi olan sandviç yapı görülmektedir. Sağ tarafta ise monokok yapı olarak $2t_f$ kalınlığında düz bir plak mevcuttur.



Şekil 2.3: Sandviç ve monokok yapının dik kesiti [8]

İzotropik yüzey malzemesi için Elastisite modülü E_f, sandviç ve monokok yapıların her ikisi içinde birim genişlik başına düşen uzama katılığı,

$$K = 2\, E_f t_f / (1 - \nu_f^2)$$

Yani düzlem içi gerilme ve sıkıştırma (burkulma düşünülmez) yükler için iki yapıda aynı uzama katılığına sahiptir. Ancak, birim genişlik başına olan eğilme katılığında farklılık görülür (D),

$$D_{mon} = \frac{E_f (2t_f)^3}{12(1-\nu_f^2)} = \frac{2E_f t_f^{\,3}}{3(1-\nu_f^2)}$$

İzotropik köpük (foam) veya balpeteği çekirdek yapısına sahip sandviç yapılar için eğilme katılığı aşağıda verilmiştir.

$$D_{san} = 2\, E_f\, t_f\, (h_c/2)^2 \,/\, \left(1-\nu_f^2\right) = \frac{E_f\, t_f\, h_c^2}{2\left(1-\nu_f^2\right)}$$

Burada çekirdeğin eğilme katılığına katkısı olmadığı farzedilir ve $t_f / h_c << 1$.

$\frac{D_{san}}{D_{man}} = \frac{3}{4}\left(\frac{h_c}{t_f}\right)^2$ olur.

Örneğin, $\frac{h_c}{t_f} = 20$ olursa sandviç yapının eğilme katılığı, monokok yapının eğilme katılığının 300 misli olur. Sonuç olarak sandviç yapılar hemen hemen aynı ağırlıkta olan monokok yapılara oranla çok daha az yanal deformasyona uğrarlar. Ayrıca daha yüksek titreşim frekansına sahip olurlar ve daha yüksek burkulma yüklerine maruz kalabilirler [6]. 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:

a) Otoklav
b) Vakum
c) Presleme.

Otoklav ve presleme yönteminde, sandviç yapı bir kalıp içine serilir ve ardından ısıl 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 etmesi ve yer değiştirmesine neden olur.

2.5. Kompozitler

Bu çalışmada kullanılan sandviç plakların yüzeyleri katmanlı kompozit malzemeden yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan III. Plağın kompozit yüzeylerinin malzeme özellikleri kompoziti oluşturan bileşenlerin hacim oranları bulunarak belirlenmiştir. Dolayısıyla bu kısımda kompozitlere kısaca değinilerek hacim oranlarının belirlenmesi hakkında bilgi verilmiştir.

Yapı malzemeleri dört temel kategoriye bölünebilir; metaller, polimerler, seramikler ve kompozitler. Kompozitler, iki veya daha fazla malzemenin makroskopik yapısal bir birimde birleştirilmesi ile oluşturulur. Eğer yapısal birim, makroskopik seviyeden ziyade mikroskopik seviyede oluşturulursa, malzeme iki veya daha fazla bileşenden oluşturulmuş olmasına rağmen kompozit olarak isimlendirilmez. En yaygın olan fiber kompozitlerdir. İlk olarak Griffith 1920'de, fiber yapıda olan malzemelerin, bulk (blok) yapıdaki malzemelerden daha güçlü ve kırılmaz olduklarını göstermiştir. Farklı çaplardaki cam elyaflar ve cam çubukların gerilme dirençlerini ölçmüştür. Griffith çubukların ve fiberlerin inceldiğini görmüş ve bunların daha güçlendiğini gözlemiştir. Çünkü çaplar küçüldükçe yüzey çatlaklarının oluşma olasılığı da azalmıştır. Fiber form'da malzeme kullanımının dezavantajları da vardır; fiberler tek başlarına uzunlamasına sıkıştırma yüklerine dayanamazlar ve de transverse (enine) mekanik özellikleri, boyuna olan özellikleri kadar da iyi değildir. Bu yüzden enine destek sağlanmadıkça ve matrix veya yapıştırıcı madde ile yapısal olarak bir arada tutulmadıkça yapı malzemeleri olarak kullanılmazlar. Matrix'ler fiberleri çevresel etkenlerden ve dış hasarlardan korum görevini yaparlar. Düşük modüllü fiber (12 x 10^6 psi'den az)'ler hafif hacimli uygulamalarda kullanılırlar ve bunların maliyeti de düşüktür, bunlara "basic" kompozitler denir. Yüksek modüllü fiberler; grafit, silikon, karpit, aramid polimer, boran'dan yapılmış kompozitler "advanced" kompozitlerdir, bunların maliyeti yüksektir ve uzay araçlarında kullanılırlar. Advanced fiberlerin avantajları, daha yüksek modüle sahip olmaları ve yoğunluklarının düşük olmasıdır. Yapı ağırlıklarının önemli olduğu otomotive ve uzay araçlarının yapımında kullanılır.

Kompozitlerin özelliklerinin belirlenmesinde kompoziti oluşturan bileşenlerin ağırlık oranları ve hacim oranlarının bilinmesi önemlidir. Kompoziti oluşturan bileşenlerin

hacim oranlarının toplamı 1 olmalıdır, n adet bileşen malzemesi için bileşen hacim oranları;

$$\sum_{i=1}^{n} \upsilon_i = 1 \qquad \textbf{(2.1)}$$

buradan $\upsilon_i = V_i / V_c$ = bileşenlerin hacim oranları

V_i = i'nci bileşenin hacmi

V_c = kompozitin toplam hacmi

Bazı hallerde (2.1) denklemi (2.2) denklemine indirgenir,

$$\upsilon_f + \upsilon_m + \upsilon_v = 1 \qquad \textbf{(2.2)}$$

burada υ_f, υ_m ve υ_v; sırası ile fiberin, matrix ve boşluğun hacim oranlırıdır. Ağırlık oranları içinde aynıdır;

$$\sum_{i=1}^{n} w_i = 1 \qquad \textbf{(2.3)}$$

$$w_f + w_m = 1 \qquad \textbf{(2.4)}$$

$w_i = W_i / W_c$, $w_f = W_f/W_c$, $w_m=W_m/W_c$ ve W_i, W_f, W_m ve W_c; sırası ile i'nci bileşenin, fiberin, matrix'in ve kompozitin ağırlıklarıdır. Karışım kuralına göre;

$$\rho_c = \sum_{i=1}^{n} \rho_i \upsilon_i \quad \text{veya} \qquad \textbf{(2.5)}$$

$$\rho_c = \rho_f \upsilon_f + \rho_m \upsilon_m \qquad \textbf{(2.6)}$$

ρ_i, ρ_f, ρ_m ve ρ_c i'nci bileşenin, fiberin, matrix ve kompozitin yoğunluklarıdır.

$$\rho_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \left(w_i / \rho_i \right)} \qquad \textbf{(2.7)}$$

$$\rho_c = \frac{1}{\left(w_f / \rho_f \right) + \left(w_m / \rho_m \right)} \qquad \textbf{(2.8)}$$

(2.2) denklemi yeniden düzenlenerek ağırlık ve yoğunluk ölçülerinden boşluk oranı belirlenebilir;

$$\upsilon_v = 1 - \frac{(W_f / \rho_f) + (W_c - W_f)/\rho_m}{W_c / \rho_c} \qquad \textbf{(2.9)}$$

Karışım oranları bilinen kompozit malzeme için uzama modülü ve poisson oranları belirlenebilir.

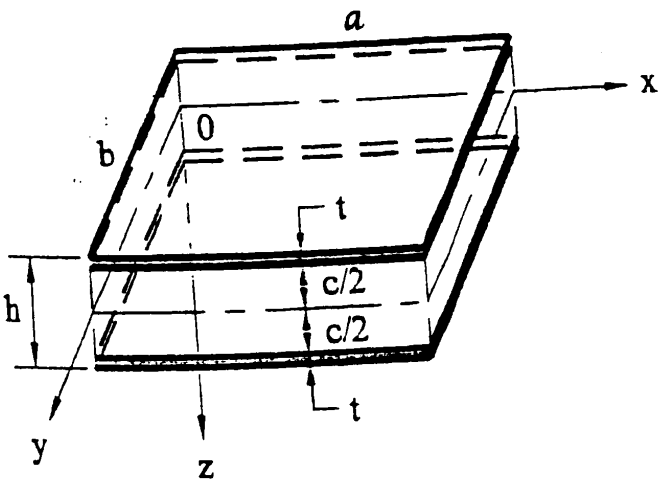
Karışım kuralına göre;

$E = E_f \upsilon_f + E_m \upsilon_m$ ve

$\nu = \nu_f \upsilon_f + \nu_m \upsilon_m$ denklemleridir. [13].

2.6. Sandviç Plak Denklemleri

Şekil 2.4 de gösterilen plağın orta düzlemi (middle plane) xy düzlemi boyuncadır. Yüzey kalınlığı "t" ve iç kalınlık "c"dir. Sandviç plaklar için olan küçük çökme teorisi ilk olarak Libove ve Batdorf [15] tarafından geliştirildi. Sandviç plakların eğilme teorisinin, klasik plakların eğilme teorisinden farkı içteki zayıf malzemenin düşük enine katılığıdır. Bu katılık artık ihmal edilemiyor ve bütün sandviç hesaplarında, göz önünde bulunduruluyor ve hesaba katılıyor.



Şekil 2.4: a x b boyutlarında dikdörtgen sandviç bir plak [9]

Libove ve Batdorf'a göre küçük çökmeli plaklardaki eğilme teorisi aşağıdaki kabuller esas alınarak açıklanabilir:

a) Farklı ortotropik malzemeden yapılmış yüzeyler çekirdek kalınlığı ile kıyaslanınca çok çok ince kalır. $t << c$

Bu yüzden yüzeylerin eğilme rijitliği ihmal edilebilir.

b) Bütün eğilme ve burulma momentlerini yüzeyler taşır.

c) Çekirdek ortotropik olabilir ve çekirdek malzemesi plağın orta yüzeyine dik yönde tamamen rijit olarak kabul edilebilir. Kayma gerilmeleri (τ_{xz} ve τ_{yz}) çekirdek' de meydana gelir ve bu kayma gerilmeleri çekirdek tarafından karşılanır. Bunlar çekirdek kalınlığı boyunca uniformdur.

d) x ve y eksenleri ortotropinin esas eksenleridir.

e) Kayma (shear) nedeni ile olan çökme'lerin hesaba katıldığı düz ortotropik plaklar için olan genel küçük çökme teorisi, sandviç plaklara da uygulanır. Sandviç plaklarında normal bir plak gibi olduğu farzedilir. Sandviç plakların eğilmeleri (flexural behaviour) tarif etmek için belirli fiziksel sabitler alınır ve bunlar plağın temel özellikleri gibi düşünülür.

Bu denklemlerde kullanılan sabitlerden (flexural) eğilme ve (twisting) burulma katılıkları, D_x, D_y ve D_{xy} aşağıda verilmiştir.

$$D_x = -\frac{M_x}{\partial^2 w / \partial x^2}, \qquad D_y = -\frac{M_y}{\partial^2 w / \partial y^2}; \qquad D_{xy} = -\frac{M_{xy}}{\partial^2 w / \partial x \partial y} \quad \textbf{(2.10)}$$

- Enine katılıklar, D_{Qx} ve D_{Qy} :

$$D_{Qx} = \frac{Q_x}{\gamma_{xz}}, \quad D_{Qy} = \frac{Q_y}{\gamma_{yz}} \text{ dır.} \qquad \textbf{(2.11)}$$

- Poisson oranları, ν_x ve ν_y :

$$\nu_x = \frac{\partial^2 w / \partial y^2}{\partial^2 w / \partial x^2} \qquad \nu_y = -\frac{\partial^2 w / \partial x^2}{\partial^2 w / \partial y^2} \text{ dır.} \qquad \textbf{(2.12)}$$

Dört sabit; D_x, D_y, ν_x ve ν_y birbirlerinden bağımsız değillerdir. Eğer bunların üçü bilinirse, dördüncü aşağıdaki denklikten bulunabilir;

$$\nu_x D_y = \nu_y D_x$$

Bu ifade Betty karşıtlık teoreminden elde edilebilir. Basit tiplerdeki sandviç yapılar için olan fiziksel sabitler, kullanılan malzemenin geometrik ve fiziksel özelliklerinden belirlenebilir (teorik olarak). Daha karmaşık yapılar için bu sabitler yalnızca deneysel olarak belirlenir. Sandviç plakların orta yüzeylerindeki çökme w; enine kesme kuvvetleri Q_x , Q_y ve gerilme moment çiftleri olan eğilme ve burulma momentleri plağın orta yüzeyi ile bağlantılıdırlar. Sandviç plaklardaki çökme (deflection); çekirdekdeki kayma (shear) ve yüzeylerdeki eğilme tarafından oluşturulur. Bu yüzden, xz ve yz yönlerindeki eğrilikler; M_x, M_y eğilme momentlerinden dolayı meydana gelmiştir ve ayrıca Q_x, Q_y kesme kuvvetlerinin değişimlerinden dolayı bu eğrilikler oluşur. Eğilme eğrilikleri için diferansiyel denklem;

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = -\frac{M_x}{D_x} + \nu_y \frac{M_y}{D_y} + \frac{1}{D_{Qx}} \quad \frac{\partial Q_x}{\partial x}; \qquad \textbf{(2.13.a)}$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \nu_x \frac{M_x}{D_x} - \frac{M_y}{D_y} + \frac{1}{D_{Qy}} \quad \frac{\partial Q_y}{\partial y} \qquad \textbf{(2.13.b)}$$

şeklinde yazılabilir.

Burulma, M_{xy} momentinden dolayı ve Q_x ve Q_y değişimlerinden dolayı oluşur. Burulma eğriliğini veren diferansiel denklem aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = -\frac{M_{xy}}{D_{xy}} + \frac{1}{2} \quad \frac{1}{D_{Qx}} \quad \frac{\partial Q_x}{\partial y} + \frac{1}{2} \frac{1}{D_{Qy}} \frac{\partial Q_y}{\partial x}. \qquad \textbf{(2.13.c)}$$

i) Denge Denklemleri

(2.13.a), (2.13.b) ve (2.13.c) denklemlerinden M_x, M_y, M_{xy} için olan denklemler (2.14) denklemleri ile verilmiştir.

$$M_x = -\ D_x^*\left[\frac{\partial}{\partial_x}\left(\frac{\partial w}{\partial x}-\frac{Q_x}{D_{Qx}}\right)+\nu_y\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial w}{\partial_y}-\frac{Q_y}{D_{Qy}}\right)\right] \qquad \textbf{(2.14.a)}$$

$$M_y = -\ D_y^*\left[\frac{\partial}{\partial_y}\left(\frac{\partial w}{\partial y}-\frac{D_y}{D_{Qy}}\right)+\nu_x\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial w}{\partial x}-\frac{Q_x}{D_{Qx}}\right)\right] \qquad \textbf{(2.14.b)}$$

$$M_{xy} = -\frac{D_{xy}}{2}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial w}{\partial y}-\frac{Q_y}{D_{Qy}}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial w}{\partial x}-\frac{Q_x}{D_{Qx}}\right)\right] \qquad \textbf{(2.14c)}$$

Burada $D_x^* = \dfrac{D_x}{1-\nu_x\nu_y}, \qquad D_y^* = \dfrac{D_y}{1-\nu_x\nu_y}$ **(2.15)**

(2.14) denklemleri, aşağıda yazılan denklemler ile ilişkilendirilirse;

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x}+\frac{\partial Q_y}{\partial y}+P=0$$

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial M_y}{\partial y}-Q_y=0$$

$$\frac{\partial M_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial M_x}{\partial x}-Q_x=0$$

aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\left(D_{xy}+\nu_y\ D_x^*\right)\frac{\partial^3 w}{\partial x\partial y^2}+D_x^*\frac{\partial^3 w}{\partial x^3}=\frac{D_x^*}{D_{Qx}}\frac{\partial^2 Q_x}{\partial x^2}+\frac{1}{2}\frac{D_{xy}}{D_{Qx}}\frac{\partial^2 Q_x}{\partial y^2}$$

$$+\left(\frac{1}{2}\frac{D_{xy}}{D_{Qy}}+\frac{\nu_y D_x^*}{D_{Qy}}\right)\frac{\partial^2 Q_y}{\partial x\partial y}-Q_x, \qquad \textbf{(2.16.a)}$$

$$\left(D_{xy}+\nu_x\ D_y^*\right)\frac{\partial^3 w}{\partial x^2\partial y}+D_y^*\frac{\partial^3 w}{\partial y^3}=\frac{D_y^*}{D_{Qy}}\frac{\partial^2 Q_y}{\partial y^2}+\frac{1}{2}\ \frac{D_{xy}}{D_{Qy}}\frac{\partial^2 Q_y}{\partial x^2}$$

$$+\left(\frac{1}{2}\ \frac{D_{xy}}{D_{Qx}}+\frac{\nu_x D_y^*}{D_{Qx}}\right)\frac{\partial^2 Q_x}{\partial x\partial y}-Q_y, \qquad \textbf{(2.16.b)}$$

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} = -P \qquad \textbf{(2.16.c)}$$

ii) Sınır şartları

Yukarıda ifade ettiğimiz (2.16) denklemlerindeki w, Q_x, Q_y'ler sandviç plakların eğilme problemlerinin çözümleri içinde uygundur. Sandviç plakların kenarlarındaki sınır şartları yukarıdaki denklemler ile uyumlu olmalıdır. Bu sınır şartlarını şöyle sıralanabilir:

a) Basit mesnet, (y = sabit)

$$w = 0,\ M_y = 0,\ \frac{Q_x}{D_{Qx}} = 0 \qquad \textbf{(2.17.a)}$$

b) Serbest kenar, (y = sabit)

$$M_y = 0,\quad M_{xy} = 0,\quad Q_y = 0 \qquad \textbf{(2.17.b)}$$

c) Ankastre mesnet (y = sabit)

$$w = 0,\quad \frac{Q_x}{D_{Qx}} = 0,\quad \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{Q_y}{D_{Qy}} = 0 \qquad \textbf{(2.17.c)}$$

Bu şekilde x = sabit kenarlar üzerinde de sınır şartları formüle edilebilir.

Eşit kalınlıklı izotropik yüzeylere ve izotropik dolaylı gerilme taşıyan çekirdek'e sahip sandviç plakların özel hallerini düşünelim. Bu özel hal için t << c varsayalım.

$$D_x^* = D_y^* = D_s = \frac{E_f\, td^2}{2(1-\nu_f^2)}\ ;\ \nu_x = \nu_y = \nu_f\ ; \qquad \textbf{(2.18)}$$

$$D_{Qx} = D_{Qy} = D_Q = G_C \frac{d^2}{c};\quad D_{xy} = D_s(1-\nu_f)$$

Burada E_f ve ν_f sandviç plağın yüzeylerinin elastisite modülü ve Poisson oranıdır; izotropik çekirdeğin rijitlik modülü G_C; d = c + t ise yüzeylerin orta noktaları arasındaki mesafedir. D_s ve D_Q, izotropik sandviç plağın eğilme ve enine kesme katılıklarıdır.

Bu özel hal için (2.16.a, b, c) denklemleri tek bir denkleme indirgenebilir.

(2.14)'deki M_x, M_y, M_{xy} denklemleri

$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} = -P(x,y)$ denkleminde yerlerine yazılır ve (2.18)'daki ifadelerle ilişkilen dirilip hesaba katılırsa aşağıdaki diferansiyel denklem elde edilir;

$$D_S \nabla^2 \nabla^2 w - \frac{D_S}{D_Q}\left(\frac{\partial^3 Q_x}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 Q_y}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 Q_x}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 Q_y}{\partial x^2 \partial y}\right) = P \qquad \textbf{(2.19)}$$

$$\frac{\partial^3 Q_x}{\partial x^3} + \frac{\partial^3 Q_y}{\partial y^3} + \frac{\partial^3 Q_x}{\partial x \partial y^2} + \frac{\partial^3 Q_y}{\partial x^2 \partial y} = \nabla^2\left(\frac{\partial Q_x}{\partial_x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y}\right) = -\nabla^2 P$$

böylece (2.19) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$D_S \nabla^2 \nabla^2 w = \left(1 - \frac{D_S}{D_Q}\nabla^2\right) P \qquad \textbf{(2.20)}$$

(2.20) denklemi izotropik sandviç plaklar için olan temel denklemdir.

$G_C \to \infty$ kabulü yapılırsa (2.20) denklemi $\left[\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{P}{D}\right]$ izotropik, homojen normal bir plağın diferansiel denklemine dönüşür (eğilme rijitliği D_S olan plak) [9].

Dört kenarı basit mesnet ile mesnetlenmiş (a x b) boyutlarında dikdörtgen plaklardaki çökme ifadesi ve bu tür plaklar için Navier çözümü 2.6.2. ve 2.6.3. kısımlarında verilmiştir.

2.6.1. Birim uzama-yer değiştirme denklemlerinin elde edilmesi

Deformasyona uğramış bir plağın orta yüzeyinde geçen teğetin x ekseni ile yapmış olduğu açının (slope angle) değişim oranı eğrilik olarak bilinir ve K_x, K_y, K_{xy} olarak ifade edilir.

$$K_x = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{1}{r_x}, \qquad K_y = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{1}{r_y}, \qquad K_{xy} = \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = \frac{1}{r_{xy}} \tag{2.21}$$

r_x, r_y, r_{xy} eğrilik yarıçaplarıdır. Birim uzamalar;

$$\varepsilon_x = -z\,K_x, \qquad \varepsilon_y = -z\,K_y, \qquad \gamma_{xy} = -2z\,K_{xy}$$

şeklinde yazılabilir. Plaklar için yapılan kabullerden dolayı, $\varepsilon_z=0$, $\gamma_{yz} = 0$, $\gamma_{xz} = 0$'dır.

$$\varepsilon_x = -z\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \qquad \varepsilon_y = -z\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \qquad \gamma_{xy} = -2z\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \tag{2.22}$$

Sandviç plak için $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$, $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$, $\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$ ifadeleri ε_x, ε_y ve γ_{xy}'lerde yazılırsa;

$$\varepsilon_x = -z\left(-\frac{M_x}{D_x} + \nu_f \frac{M_y}{D_y} + \frac{1}{D_{Qx}} \frac{\partial Q_x}{\partial x}\right) \tag{2.23}$$

$$\varepsilon_y = -z\left(\nu_f \frac{M_x}{D_x} - \frac{M_y}{D_y} + \frac{1}{D_{Qy}} \frac{\partial Q_y}{\partial y}\right) \tag{2.24}$$

$$\gamma_{xy} = -2z\left(-\frac{M_{xy}}{D_{xy}} + \frac{1}{2} \frac{1}{D_{Qx}} \frac{\partial Q_x}{\partial y} + \frac{1}{2} \frac{1}{D_{Qx}} \frac{\partial Q_y}{\partial x}\right). \tag{2.25}$$

2.6.2. Basit mesnetli dikdörtgen plaklarda meydana gelen çökmenin elde edilmesi

Plağın yüzeyi üzerine yayılmış olan yük, $q = q_0 \sin\frac{\pi x}{a} \sin\frac{\pi y}{b}$, ifadesi ile verilmiş olsun. Burada q_0, plağın merkezindeki yükün şiddetidir, şu halde elastik eğriye ait differansiyel denklem (2.26)'da verilmiştir.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q_0}{D}\sin\frac{\pi x}{a}\sin\frac{\pi y}{b} \qquad \textbf{(2.26)}$$

Basit mesnet sınır şartları şunlardır:

x=0 ve x=a için w=0, M_x=0

y=0 ve y=b için w=0, M_y=0

Eğilme momentlerinin sıfır olması nedeni ile $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0$ ve $\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0$ dır.

Çökmeler için $w = C\sin\frac{\pi x}{a}\sin\frac{\pi y}{b}$ ifadesi alındığı zaman sınır şartlarının sağlandığı görülür.Çökme ifadesi, elastik eğriye ait differansiyel denklemde yazılarak

$$\pi^4\left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}\right)^2 C = \frac{q_0}{D},$$

bulunur. Buradan (2.26) denklemini ve basit mesnet sınır şartlarını sağlayan çözümün

$$w = \frac{q_0}{\pi^4 D\left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}\right)^2}\sin\frac{\pi x}{a}\sin\frac{\pi y}{b} \qquad \textbf{(2.27)}$$

olduğu bulunur.

Sinüzoidal yük yayılışı, $q = q_0\sin\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{n\pi y}{b}$, denklemi ile verilirse çökme ifadesi,

$$w = \frac{q_0}{\pi^4 D\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^2}.\sin\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{n\pi y}{b} \qquad \textbf{(2.28)}$$

olarak bulunur.

2.6.3. Basit mesnetli dikdörtgen plaklar için Navier çözümü

Bir önceki kısımda verilen çözüm, $q = f(x, y)$ denklemi ile verilen herhangi bir yükleme etkisi ile basit mesnetli dikdörtgen bir plakta oluşan çökmeleri hesap etmek için kullanabilir. Bu maksatla f (x,y) fonksiyonu çift trigonometrik bir seri şeklinde gösterilebilir.

$$f(x,y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \sin\frac{m\pi x}{a} \sin\frac{n\pi y}{b} \qquad \textbf{(2.29)}$$

Bu serinin herhangi bir özel $a_{m'n'}$ katsayısını hesap etmek için (2.29) denkleminin her iki tarafını $\sin\frac{n'\pi y}{b}dy$ ile çarparak 0' dan b ye kadar entegre edilir.

$$\int_0^b \sin\frac{n\pi y}{b} \sin\frac{n'\pi y}{b} dy = 0, \qquad n \neq n'$$

$$\int_0^b \sin\frac{n\pi y}{b} \sin\frac{n'\pi y}{b} dy = \frac{b}{2}, \qquad n = n'$$

bu yoldan,

$$\int_0^b f(x,y) \sin\frac{n'\pi y}{b} dy = \frac{b}{2} \sum_{m=1}^{\infty} a_{mn'} \sin\frac{m\pi x}{a} \qquad \textbf{(2.30)}$$

bulunur. (2.30) denkleminin her iki tarafı $\sin\frac{m'\pi x}{a}dx$ ile çarpılır ve 0 dan a ya kadar entegre edilirse,

$$\int_0^a \int_0^b f(x,y) \sin\frac{m'\pi x}{a} \sin\frac{n\pi y}{b} dxdy = \frac{ab}{4} a_{m'n'}$$

elde edilir. Buradan

$$a_{m'n'} = \frac{4}{ab} \int_0^a \int_0^b f(x,y) \sin\frac{m'\pi x}{a} \sin\frac{n'\pi y}{b} dxdy \qquad \textbf{(2.31)}$$

bulunur.

(2.31) ifadesindeki entegrasyon verilen bir f (x,y) için alınırsa (2.29) deki serinin katsayıları bulunur ve bu suretle verilen yükü kısmi sinüzoidal yüklerin toplamı olarak gösterilir. Bir önceki paragrafta incelenmiş olan her bir kısmi yükleme ile oluşan çökme ve toplam çökme; (2.28) ile verilen terimlerin toplamı ile belirlenir Bu halde plaktaki çökme ifadesi,

$$w = \frac{1}{\pi^4 D}\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{a_{mn}}{\left(\frac{m^2}{a^2}+\frac{n^2}{b^2}\right)^2}\sin\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{n\pi y}{b} \qquad \textbf{(2.32)}$$

bulunur.

f (x,y) = q_0, uniform olarak yayılmış bir yükleme hali için,

$$a_{mn} = \frac{4q_0}{ab}\int_0^a\int_0^b \sin\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{n\pi y}{b}dxdy = \frac{16q_0}{\pi^2 mn},$$

bulunur. Burada m ve n tek sayılardır. m ve n' den birisi veya her ikisi çift sayı olduğu zaman a_{mn}=0 dır.

Bu haller için çökme ifadesi,

$$w = \frac{16q_0}{\pi^6 D}\sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{mn\left(\frac{m^2}{a^2}+\frac{n^2}{b^2}\right)^2}\sin\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{n\pi y}{b} \qquad \textbf{(2.33)}$$

bulunur [14].

2.6.4. Sayısal örnek

Bu tez çalışmasında kullanılan II. plağın özellikleri kullanılarak böyle bir plaktaki çökme değeri Navier metodu ile çözülebilir. Bu çözümün yapılması için homojen normal plak kabulü yapılarak eşdeğer D belirlenir. Elastisite modülü olarak yüzeyin elastisite modülü alınır. E_f = 10.000 MPa, boyutları (225mm x 225mm) olan, (yüzey kalınlığı) t_f =0,2286mm ve (çekirdek kalınlığı) d = 5.08mm olan plağa $\frac{20\times 9{,}81}{225\times 225}$ N/mm^2'lik basınç yükü uygulanarak ve ν_f = 0,18 alınarak çözüm yapılır.

$$D = \frac{E_f t_f d^2}{2\left(1 - \nu_{f^2}\right)} = 30490 \text{ N.mm}$$

değeri bulunur.

Plağın maksimum çökmesi merkezde olacağı için, bu değer

$$w_{max} = 0{,}00416 \frac{P_0 a^4}{D} = 1{,}355 \text{ mm}$$

olarak bulunur. (Serinin ilk üç terimi alınmıştır)

ANSYS analizi sonucu bulunan $w_{max} = 1{,}432$ mm' dir.

ANSYS analiz sonucu esas alınırsa, $hata \cong \%\ 5$ sonucu çıkar.

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde kullanılan üç adet plağın yüzey ve çekirdek malzeme özellikleri verilmiştir. Deneylerin yapılması esnasında kullanılan cihazlar hakkında bilgi verilmiştir. Son olarak deneylerin yapılışı anlatılmıştır.

3.1. Deney Numuneleri

Deney esnasında birbirinden farklı özelliklere sahip üç plak kullanılmıştır. Plaklar I, II, III plakları olarak isimlendirilmiştir. I. plak yüzeyi HexPly® 6268 malzemesinden imal edilmiş ve çekirdek malzemesi bal peteği yapısında olan HexWeb® Fibertruss® HFT® 3/16-2.0 türü malzemeden üretilmiştir. II. plak yüzeyi BMS 9-3 style 181 kumaş ile kaplanmış olup çekirdeği HRH-10 aramid elyaf takviyeli bal peteği yapısındadır. III. plak yüzeyleri cam elyaf ile kaplanmış olup çekirdeği köpük olan bir plaktır. Plakların ANSYS yazılımında kullanılan özellikleri tablolar halinde verilmiştir.

3.1.1. Kullanılan plakların çekirdek ve yüzey malzeme özellikleri

i) I. plağın çekirdek malzeme özellikleri:

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 $\pm 45^{o}$ Fibertruss verev dokuma ile güçlendirilmiş/fenolik bal peteği yapıyı simgeler. Verevli dokuma, balpeteğinin kayma modülü değerini yükseltir. HexWeb® malzemesinin kayma modülü değerinin yaklaşık iki katı, HRH® malzemesinin değerinin yaklaşık üç katıdır. Bu özellik, çok az deformasyon gereken yerlerde HexWeb® HFT® kullanımının tercih sebebidir.

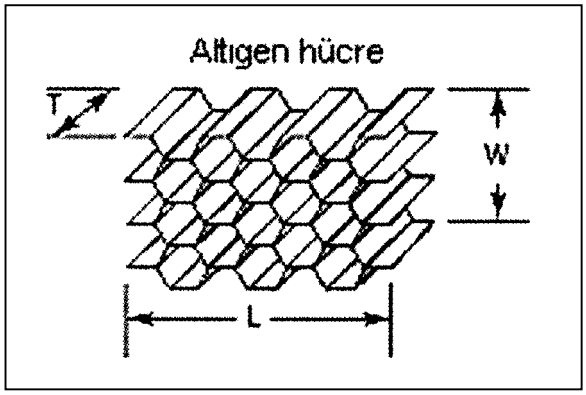
HexWeb® HFT®, hücrelerinde kullanılan ve hücre duvarlarının köşelerini daha esnek tutan 45^{o} elyaf yönlenmesi sayesinde gelişmiş darbe dayanımına ve kolay

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®'nin bazı özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

* $\pm 45^{o}$ fiber yönlenmesi sayesinde yüksek kayma gerilmesi dayanımı
* Küçük hücre ebatları
* Gelişmiş, esneklik özelliği, darbe dayanıklılığı, $0^{o}/90^{o}$ fiber yönlenme kabiliyeti, kolay kullanım
* 176^{o} sıcaklığa kadar dayanıklılık
* Düşük nem tutma özelliği
* 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. Bal peteği yapısındaki çekirdek malzemesinin özellikleri Tablo 3.1 de verilmiştir.



Şekil 3.1: Altıgen hücreli bal peteği şekli [7]

Tablo 3.1: ANSYS yazılımında kullanılan bal peteği özellikleri

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

ii) I. Plağın yüzey malzeme özellikleri:

Deney numunesinin dış yüzeyleri, 90^o açı 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 ısıl işleme tabi tutulabilir.
* 100 ^{o}C sıcaklığa kadar malzeme özelliklerini muhafaza eder.
* Kendinden bağlayıcı madde içermesi sebebiyle kullanımı kolaydır.

HexPly® 6268 malzemesi 90 dakika süre ile 125 ^{o}C sıcaklıkta 2-10 bar basınç aralığında kür edilebilir. Kür işlemi esnasında dakikada 1,5^{o}C-5^{o}C sıcaklık artışı meydana getirilmelidir. 23^{o}C sıcaklıkta 21 gün boyunca depolanabilir. Tablo 3.2'de HexPly® 6268 malzemesinin mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.2: HexPly® 6268 malzeme özellikleri

HexPly® 6268			
Özellik	Değer	Özellik	Değer
E_x	44000 MPa	G_{xy}	3860 MPa
E_y	44000 MPa	G_{yz}	2000 MPa
E_z	3600 MPa	G_{xz}	2000 MPa
ν_{xy} / ν_{yz} / ν_{xz}	0,06 / 0,11 / 0,11	ρ	1400 kg/m^3

HexPly® 6268 malzemesi için Hexcell 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.

iii) Plak da kullanılan yapıştırıcı:

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

iv) II.Plağın çekirdek malzeme özellikleri:

II. deneyde kullanılan kompozit plağın çekirdeği, HRH-10 aramid elyaf takviyeli balpeteği olup özellikleri Tablo 3.3'de verilmiştir. Kullanılan çekirdek malzemesinin kalınlığı 5,08 mm.'dir.

Tablo 3.3: HRH-10-3 / 16-2.0 malzeme özellikleri

HRH-10-3 / 16-2.0					
Özellik	Değer	Özellik	Değer	Özellik	Değer
E_x	29,65 MPa	G_{xy}	14 MPa	ν_{xy}	0,3
E_y	14,48 MPa	G_{yx}	40 MPa	ν_{yz}	0,11
E_z	75,84 MPa	G_{xz}	40 MPa	ν_{xz}	0,11

v) II. Plağın yüzey malzeme özellikleri:

II. deneyde kullanılan bal petek kompozit plakanın alt ve üst yüzeyleri tek tabaka BMS 9-3 style 181 kumaş ile kaplanmış olup çekme deneyleri sonucunda elde edilen malzeme özellikleri Tablo 3.4'de verilmiştir. Kullanılan yüzey malzemesinin kalınlığı 0,2286 mm'dir.

Tablo 3.4: BMS 9-3 style 181 kumaş malzeme özellikleri

BMS 9-3 Style 181 Kumaş					
Özellik	Değer	Özellik	Değer	Özellik	Değer
E_x	10000 MPa	G_{xy}	4000 MPa	ν_{xy}	0,18
E_y	10000 MPa	G_{yz}	2000 MPa	ν_{yz}	0,18
E_z	4980 MPa	G_{xz}	2000 MPa	ν_{xz}	0,18

vi) III. Plağın çekirdek malzeme özellikleri:

III. Plaka'nın çekirdeği köpük olup özellikleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5: Köpük özellikleri

Özellikler	Birim		Standart
Yoğunluk	kg/m^3 Ibs./cu.ft.	32 2	DIN 53 420/ISO 845 ASTM D 1622
Sıkıştırma Direnci	MPa Psi	0.4 58	DIN 53 421/ISO 844 ASTM D 1621
Gerilme Direnci	MPa Psi	1 145	DIN 53 455/ISO 527-2 ASTM D 638
Eğilme Direnci	MPa Psi	0.8 116	DIN 53 423/ISO 1209 ASTM D 790
Kesme Direnci	MPa Psi	0.4 58	DIN 53 294 ASTM C 273
Elastisite Modülü	MPa Psi	36 5,220	ISO 527-2 ASTM D 638
Kayma Modülü	MPa psi	13 1,885	DIN 53 294 ASTM C 273
Kopmadaki uzama Miktarı	%	3.5	DIN 53 455/ISO 527-2 ASTM D 638

Analizlerde köpük izotrop malzeme olarak kabul edilerek kayma modülü ve elastisite modülünden poisson oranı elde edilmiştir.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \Rightarrow 13 = \frac{36}{2(1+\nu)} \Rightarrow \quad \nu = 0{,}38$$

vii) III.plağın yüzey malzeme özellikleri:

III. Plağın yüzeyleri cam elyaf ile kaplanmış olup özellikleri Tablo 3.6'da sunulmuştur.

Tablo 3.6: E-Glass Fiberin mekanik özellikleri

Yoğunluk	g/cc	2,55
Elastisite modülü	GPa	74,2
Kayma modülü	GPa	30
Poisson oranı		0,2

Tablo 3.7: III. Plakda kullanılan reçine'nin (epoxy) özellikleri

Yoğunluk	gr/cm^3	1.17
Elastisite modülü	GPa	2.76
Eğilme direnci	GPa	0.126
Sıkıştırma direnci	GPa	0.111
Gerilme direnci	GPa	0.076

ν = 0,3 alınarak epoksinin kayma modülü aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$G_e = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{2{,}76}{2(1+0{,}3)} = 1{,}06\,GPa$$

Bu plağın yüzey malzeme özellikleri E_x, E_y, E_z, ν ve G değerlerinin belirlenmesi için ayrı bir işlem yapılmıştır. Bu değerlerin belirlenmesi için önce plaka için kullanılan malzemelerin karışım oranları belirlenip, daha önce ifade edilen kompozitler kısmında verilen formüller yardımıyla E, ν ve G değerleri bulunmuştur. Şöyle ki;

Plak da kullanılan malzeme ağırlıkları, EPS köpük = 25 gr, Cam elyaf = 130 gr ve Epoxy = 60,6 gr'dır.

Plağın boyutları (360 mm x 360 mm) dir.

Plağın kalınlığı = 4,3 mm, yüzey kalınlığı = 0,4 mm,

Toplam yüzey hacmi = V_c = 360 x 360 x 0,8 = 103700 mm^3

Elyaf'ın hacmi = $V_f = \frac{130gr}{2.57x10^{-3}} = 50580mm^3$

Epoksi'nin hacmi = $V_e = \frac{60,6}{1.17x10^{-3}} = 51790mm^3$

Bu değerler kullanılarak karışım oranları;

$\upsilon_e = \frac{V_e}{V_c} = 0,49$, $\upsilon_f = \frac{V_f}{V_c} = 0,48$

şeklinde elde edilir.

$E_x = E_y = \frac{\upsilon_e}{2}.E_e + \frac{\upsilon_f}{2}.E_f$ =18480 MPa

$E_z = E_e$ = 2760 MPa

$\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz} = \frac{\upsilon_e}{2}.\nu_e + \frac{\upsilon_f}{2}.\nu_f = 0,12$

$G_{xz} = G_{yz} = G_e$ = 1060 MPa

$G_{xy} = \frac{\upsilon_e}{2}.G_e + \frac{\upsilon_f}{2}.G_f \cong$ 7500 MPa

Tablo 3.8: III. Plağın yüzey malzeme özellikleri

Özellik	Değer	Özellik	Değer	Özellik	Değer
E_x	18480 MPa	G_{xy}	7500 MPa	ν_{xy}	0,12
E_y	18480 MPa	G_{xz}	1060 MPa	ν_{xz}	0,12
E_z	2760 MPa	G_{yz}	1060 MPa	ν_{yz}	0,12

3.2. Deney Donanımı

Bu kısımda, deney donanımı, kullanılan cihazlar ve strain gauge'ler hakkında bilgi verilmiştir.

3.2.1. Dijital strainmetre TC-31 K

TC – 31 K, strain gauge ölçümleri için dizayn edilmiş elle taşınabilen bir cihazdır. Az yer tutar ve sızıntıya dayanıklıdır. ölçüm nokta sayısı bir olabildiği gibi 5 kanallı otomatik ölçümde yapılabilir. Terminal board, strain gauge'in kurşun tellerinin elle kolayca takılıp çıkartılabilmesine olanak verecek şekilde oluşturulmuştur. AA boyutlarında piller kullanılmaktadır. Alkali kuru pil veya şarj edilebilen Ni-Cd piller kullanılır. Kullanılan pillerin kullanım süresi çevre sıcaklığı ve bağlanan sensör tipi gibi şartlara bağlıdır. Mesela 5 kanallı ölçüm yapmak için kullanılan CSW-5A "switching box" iken pillerin kullanım süresi azalmaktadır. Çevre sıcaklığı 23^{o}C iken daha fazla kullanılan pillerin ömrü 0^{o}C sıcaklıktaki bir ortamda daha kısa olmaktadır.

Veri hafızası maksimum 20 bölüme ayrılabilir ve her bölüm "coefficient" gibi parametrelerin ölçümlerini yapabilir. Yalnızca ölçüm değerleri değil ayrıca "sensor mode " ve "coefficient " değerlerini de (LCD) ekranda daima görebiliriz.

TC-31K'nın (data memory) very hafızasında kayıt edilmiş veriler flash hafıza kartı içine kaydedilebilir ve ayrıca hafıza kartı içine kayıt edilmiş datalar okunabilir ve PC yardımı ile analiz edilebilir. DC voltage, thermo couple ve Pt-RTD strain ölçümleri kullanılır. Interval timer ile otomatik ölçüm yapılabilir. Yukarıda ifade edildiği gibi veri hafızası mevcuttur. Ekranda grafik çizimi yapılabilir. RS-232C arayüzü kullanılarak data transferi ve kontrol yapılabilir. Flash hafıza kartı kullanılır. Strain gauge kontrolü için direnç ve yalıtkan direnç ölçümleri yapılabilir.

TC – 31 K'nın çalışma yöntemi ikiye ayrılır;
a) Temel operasyon (Basic operation)
b) Uygulamalı operasyon (Applied operation)

Temel operasyon, normal mode ve multi-channel mode olmak üzere ikiye ayrılır.Bizim deneylerimiz esnasında; TC – 31 K, normal mode'da ölçüm yapacak şekilde ayarlandı. Normal mode veya multi-channel mode seçimi "F2 " ve "shift" tuşlarına basılarak yapılabilir. "Coefficient ", "Decimal Point " ve "Physical Unit "

değerlerinin ayarlanması için ise önce 4 tuşuna basılır ve ekranın alt kısmında "COEF ", "POINT " ve "UNIT " fonksiyonları gözükür. Bu fonksiyonlardan örneğin katsayı değerinin ayarlanması için "F1 " tuşuna basılır, girilmesi gereken değer sayısal tuşlar kullanılarak girilir. Eğer katsayı değeri ekranda mevcut ise ve bunun istenen değere dönüştürülmesi için cursor tuşları kullanılır. Yeni bir ölçüm yapmak için daha önce yapılmış ve ekranda var olan değeri sıfırlamak gerekir. Bunun için ise önce 5 tuşuna basıp sonra "Enter " tuşuna basılmalıdır [10].



Şekil 3.2: TC-31 K dijital strainmetre

3.2.2. Strain gauge

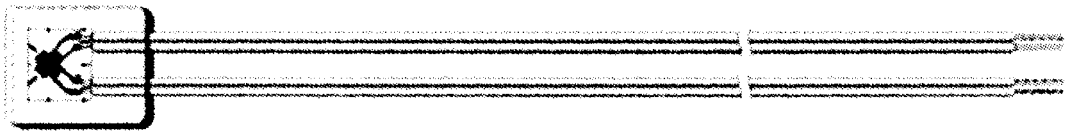
Strain gauge'ler, mekanik test ve ölçüm işlemlerinde yaygın biçimde kullanılan cihazlardır. Dört tip strain gauge sistemi vardır;

a) Mekanik
b) Optik
c) Elektrik
d) Akustik

Bunların içinde en yaygın olarak kullanılan elektrik dirençli strain gauge'lerdir. Elektrik dirençli strain gauge'ler, yük, tork, basınç ve ivme ölçmek için dizayn edilmiş transducer'larda sıklıkla kullanılırlar. Strain gauge kullanılırken deney numunesine bağlanır, test aşamasında yük veya kuvvet uygulanır ve elektrik direncindeki değişimler ölçülerek birim uzama hesaplanır.

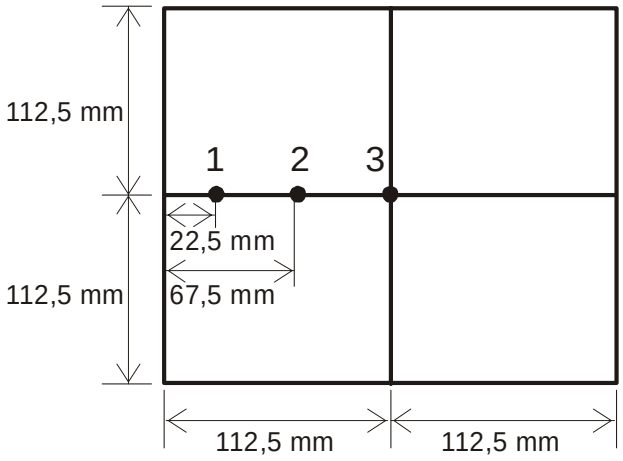
Birim uzama ölçmek için çok düşük mertebede direnç değişimlerini yakalamak gerekir. Bunun için genellikle Wheatstone köprü devresi kullanılır. Dirençli Strain gauge'lerin geliştirilmesi 1856'da Lord Kelvin tarafından gerçekleştirilmiştir. Lord Kelvin direnç değişimlerini ölçmek için Wheatstone köprüsü kullanmıştır [10].

Deneyler sırasında birim uzamaların ölçümü için TML firmasının üretmiş olduğu WFCA-3-11-1L model strain gauge'ler kullanılmıştır. (Şekil 3.3)



Şekil 3.3: WFCA–3–11–1L tipi strain gauge [7].

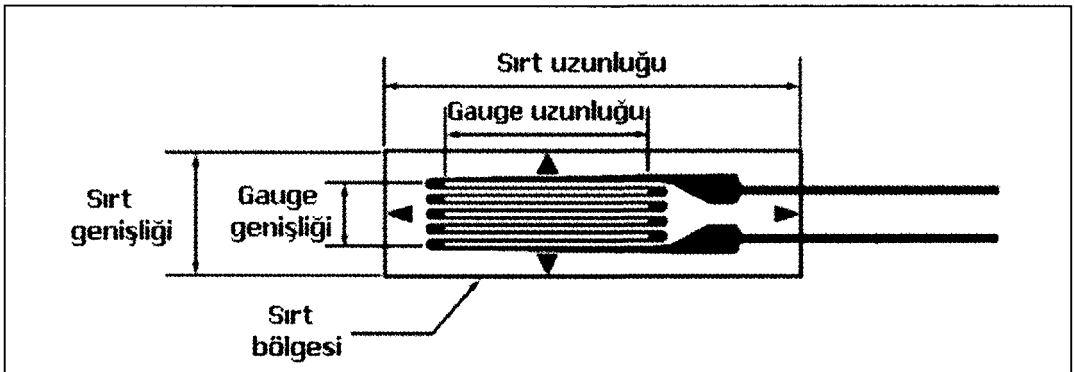
Plak üzerine yapıştırılan strain gauge'lerin yerleri Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Strain gauge'lerin plak üzerindeki yerleri

Deneylerde kullanılan strain gauge özellikleri Tablo 3.9 ve 3.10'da verilmiştir.

Tablo 3.9: I. Plak da kullanılan strain gauge özellikleri [7]



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°

Tablo 3.10: II. ve III. Plak da kullanılan strain gauge özellikleri

Gauge Faktörü	2,13
Gauge Uzunluğu	5 mm
Direnç	120 ± 0,5 Ω

3.2.3. Mesnetler

Deneylerde ankastre ve basit olmak üzere iki ayrı mesnet kullanılmıştır. Bu mesnetler Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.5: Ankastre mesnet



Şekil 3.6: Basit mesnet

3.2.4. Ağırlıklar

Deneylerde, 4kg, 20kg, ve 30kg'lık kum torbaları kullanılmıştır. Bunların plaklar üzerinde oluşturdukları düzgün yayılı basınç yükleri $\frac{4\times 9{,}81}{225\times 225}=$ 0.77 kPa, $\frac{20\times 9{,}81}{225\times 225}=$ 3.8 kPa, $\frac{30\times 9{,}81}{225\times 225}=$ 5.8 kPa şeklinde hesaplanabilir. Bu basınç yüklerini oluşturmak üzere deneylerde kullanılan kum torbası Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7: Kum torbası

3.3. Deneylerin Yapılışı

Deneyler İstanbul Teknik Üniversitesi, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Laboratuarı'nda gerçekleştirilmiştir. Sandviç plak ayrı ayrı basit ve ankastre olarak mesnetlenmiş ve plağın üzerine yapıştırılmış olan strain gauge'in telleri strain

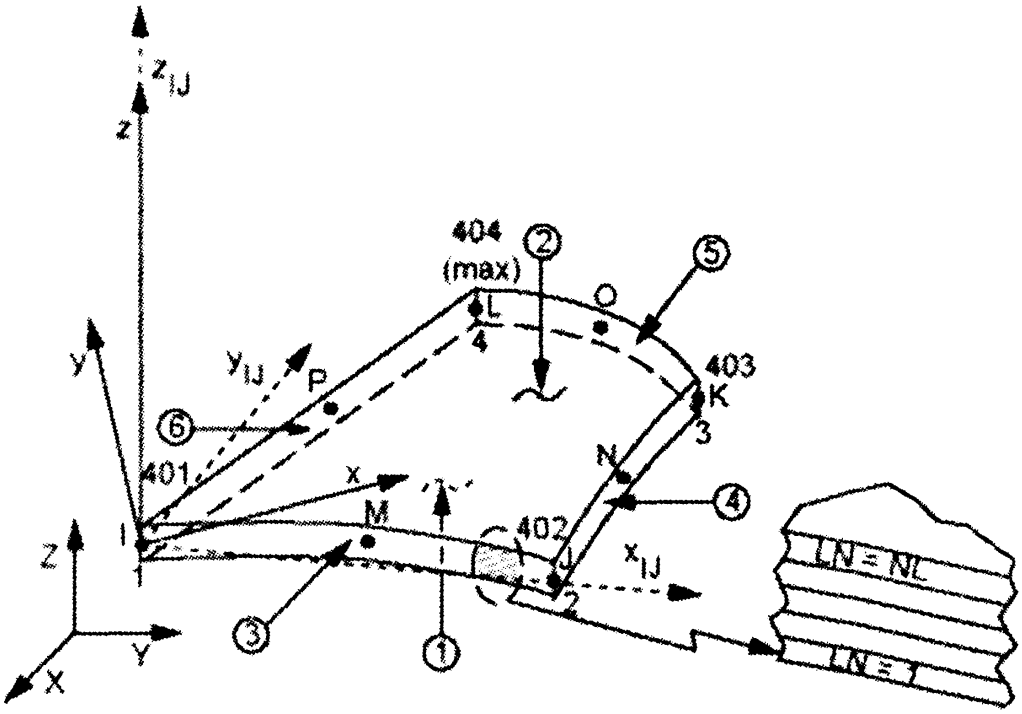
metreye takılmıştır. Daha sonra plak üzerine konan kum torbalarının plakta meydana getirdiği birim uzamalar mikro strain mertebesinde ölçülmüştür.Bu işlemler I.,II. ve III. plak için ayrı ayrı uygulanarak her üç plakta meydana gelen birim uzamalar belirlenmiştir.

4. SAYISAL ANALİZLER

Sonlu elaman analizi için ANSYS yazılımı kullanılmıştır. Analizlerde SHELL91 elemanı kullanılmıştır. Ankastre ve basit mesnet olmak üzere iki farklı sınır şartı için analizler yapılmıştır.

4.1. Kullanılan Eleman

Sonlu eleman analizinde ANSYS yazılımı kütüphanesinde bulunan SHELL91 tipi yapısal eleman kullanılmıştır. (Şekil 4.1)



Şekil 4.1: SHELL 91 katmanlı kabuk eleman [11]

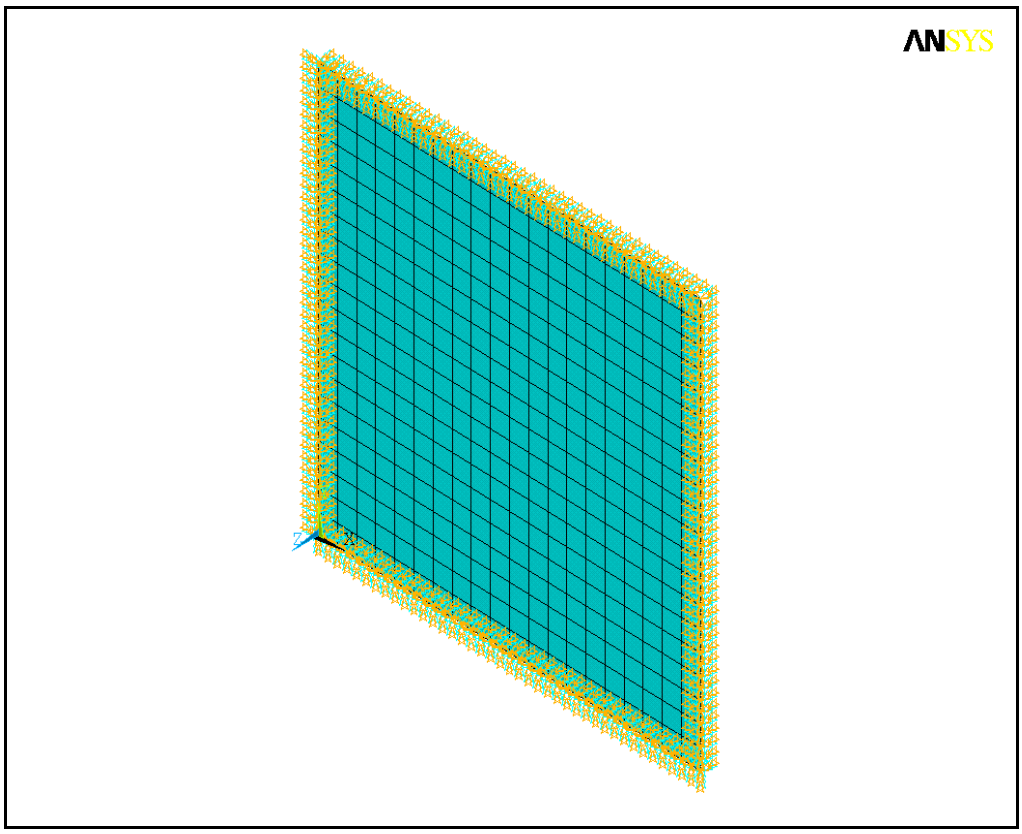
SHELL 91 elemanı, köşelerde ve kenar orta noktalarda olmak üzere 8 düğüm noktasına sahiptir. Ayrıca x, y, z eksenleri boyunca öteleme ve x, y, z eksenleri etrafında dönme olmak üzere 6 serbestlik derecesine sahiptir. 100 tabakaya kadar yapılandırılabilir ve her tabaka için farklı malzeme özellikleri tanımlanabilir [11].

4.2. Sınır Şartları

Deneylerde kullanılan sandviç plağın, dört kenarı ankastre ve dört kenarı basit mesnetli olmak üzere iki farklı sınır şartı için analizleri gerçekleştirilmiştir.

4.2.1. Ankastre plak

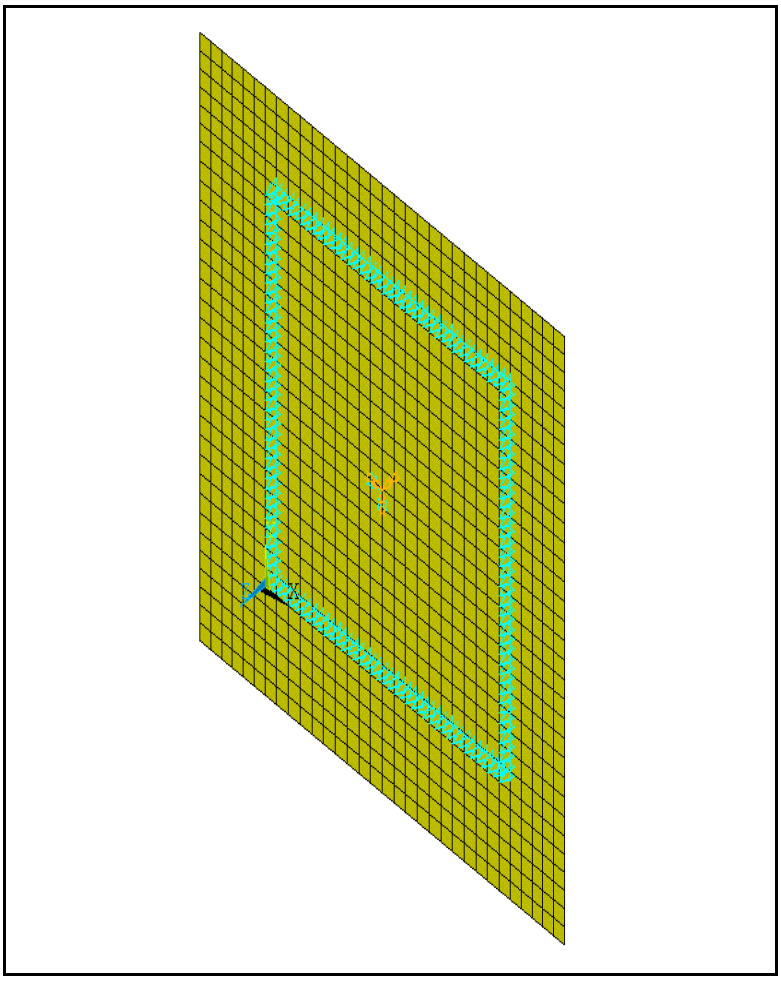
ANSYS yazılımı kullanılarak sonlu eleman modeli oluşturulan sandviç plağın her bir kenarı 20'ye bölünerek 400 adet SHELL91 elemanı ile yapısal model oluşturulmuş, her bir kenar ankastre olarak sabitlenmiştir. (Şekil 4.2)



Şekil 4.2: Ankastre plağın ANSYS modeli

4.2.2. Basit mesnetli plak

Basit mesnet hali içinde ANSYS yazılımı kullanılarak SHELL91 elemanı ile model oluşturulmuştur (Şekil 4.3).

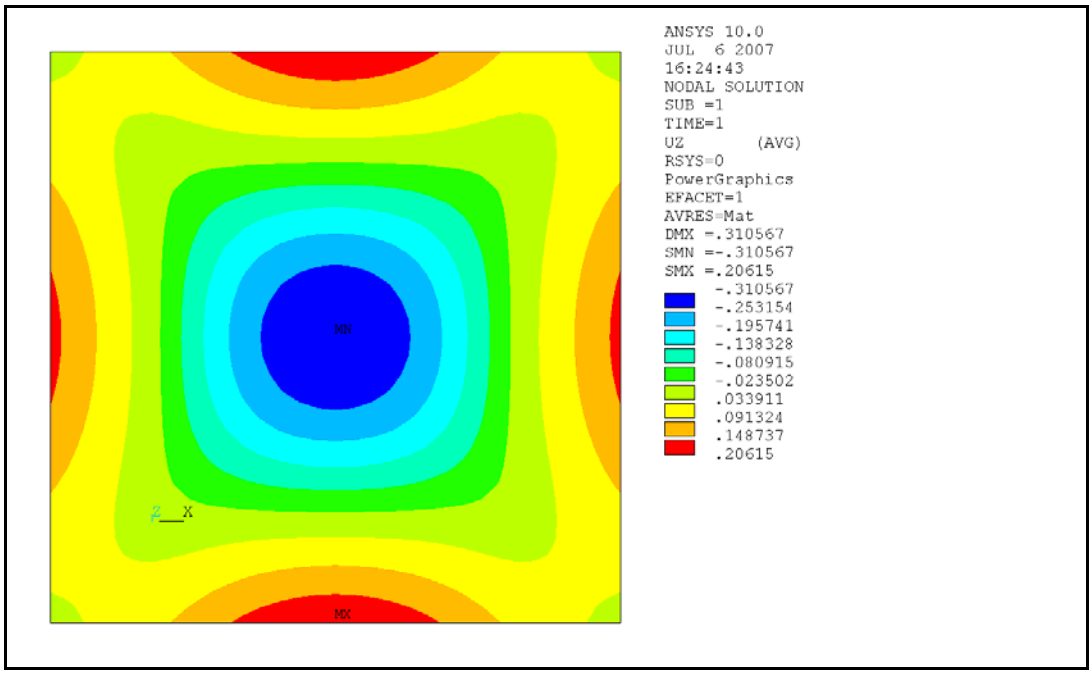


Şekil 4.3: Basit mesnetli plağın ANSYS modeli

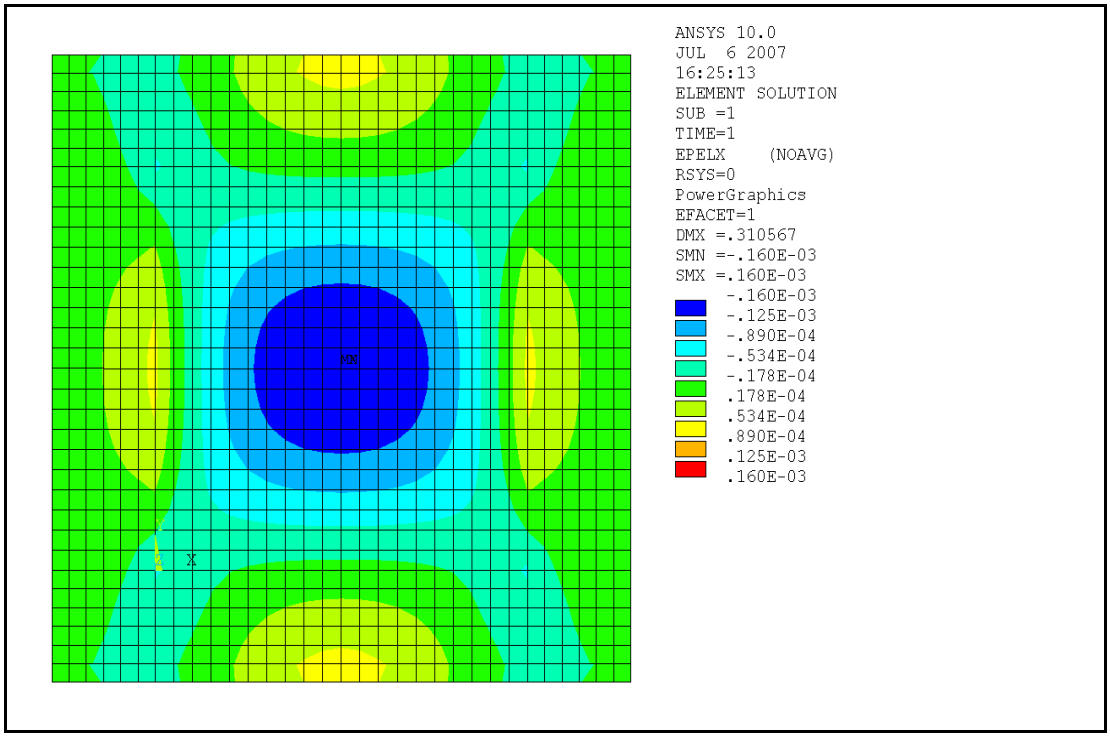
4.3. Analizler

4.3.1. I. Plak için yapılan analizler

I. plak için yapılan çalışmalarda sadece basit mesnet hali için deney ve sayısal analiz sonuçlarında uyum gözlendiği için basit mesnet hali için ANSYS analizleri sonucu elde edilen şekiller verilmiştir. Basit mesnet sınır şartı uygulanan plakta 3,8 kPa'lık bir yük altında meydana gelen çökme Şekil 4.4'de, ε_x ve ε_y birim uzamalarının dağılımları Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de verilmiştir.



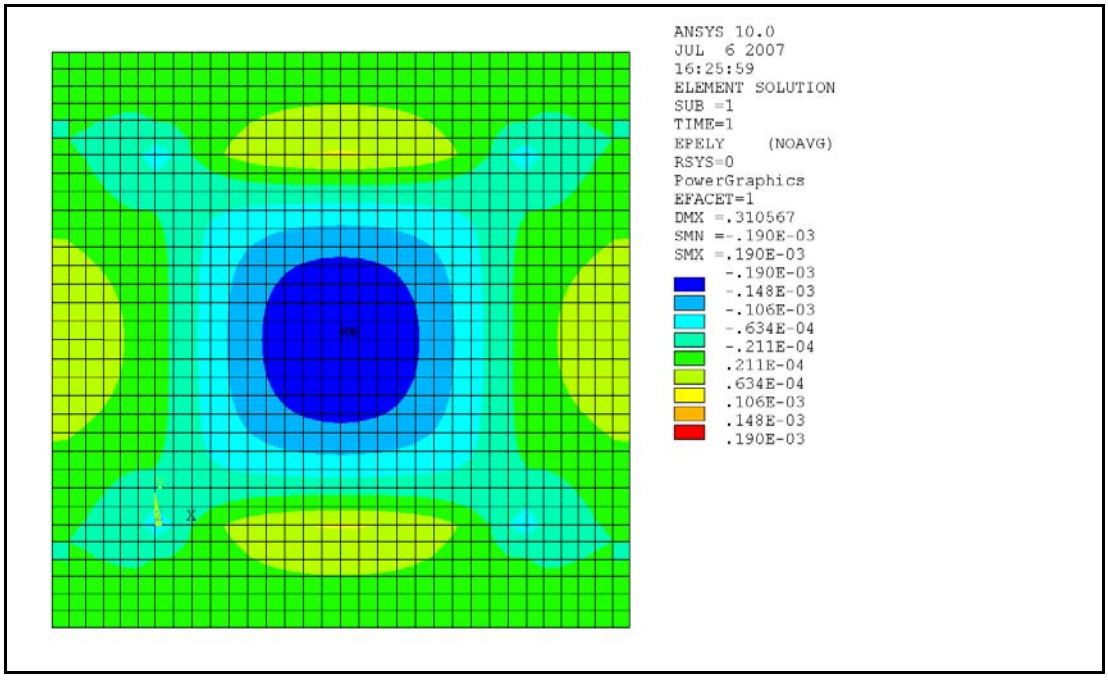
Şekil 4.4: Basit mesnet sınır şartı için 3,8 kPa'lık yük altındaki I. plakta meydana gelen çökme dağılımı



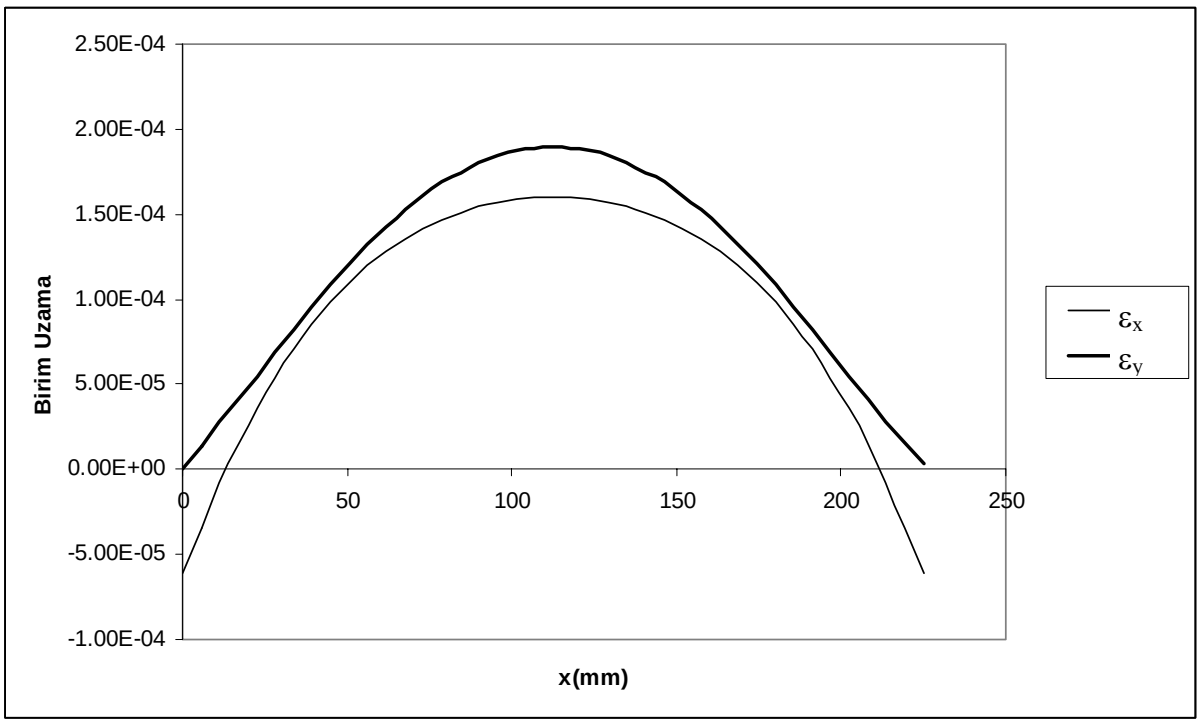
Şekil 4.5: Basit mesnet sınır şartı için I. plağın 3,8 kPa'lık yük altındaki ε_x birim uzama dağılımı

Şekil 4.4 incelendiğinde basit mesnetli plakta oluşan maksimum çökmenin plağın ortasında meydana geldiği görülmüştür. 3,8 kPa'lık yük etkisi ile plağın üst yüzeyinde basma meydana gelirken plağın alt yüzeyinde çekme oluşmuştur. Şekilden de görüleceği gibi plaka meydana gelen maksimum çökme değeri mutlak değerce 0,310567 mm'dir. Şekil 4.3'ten görülebileceği gibi basit mesnet sınır şartı olarak olak içerisinde kalan belirli hatlar boyunca düşey yer değiştirmeler sıfır yapıldığından kenarlarda da çökmeler olduğu görülmektedir. Plağın ortasının çökmesinden dolayı kenarları bir miktar yukarıya doğru kalkma yapmaktadır.

Şekil 4.5 incelendiğinde basit mesnetli plakta oluşan maksimum birim uzama değerinin plak ortasında oluştuğu ve 160 $\mu\varepsilon$ değerinde olduğu görülebilir. Plağın bu yükleme şartında geometrik lineer davranış gösterdiğinden plağın üst yüzeyinde meydana gelen maksimum basma birim uzama değeri ile plağın alt yüzeyinde meydana gelen maksimum çekme birim uzama değerinin mutlak değerce birbirine eşittir. Bu durumda, şekilden görülebileceği gibi, plağın alt yüzeyinde 160 $\mu\varepsilon$'lik birim uzama meydana gelirken alt yüzeyde de 160 $\mu\varepsilon$'lik birim uzama oluşur.



Şekil 4.6: Basit mesnet sınır şartı için I.plağın 3,8 kPa'lık yük altındaki ε_y birim uzama dağılımı



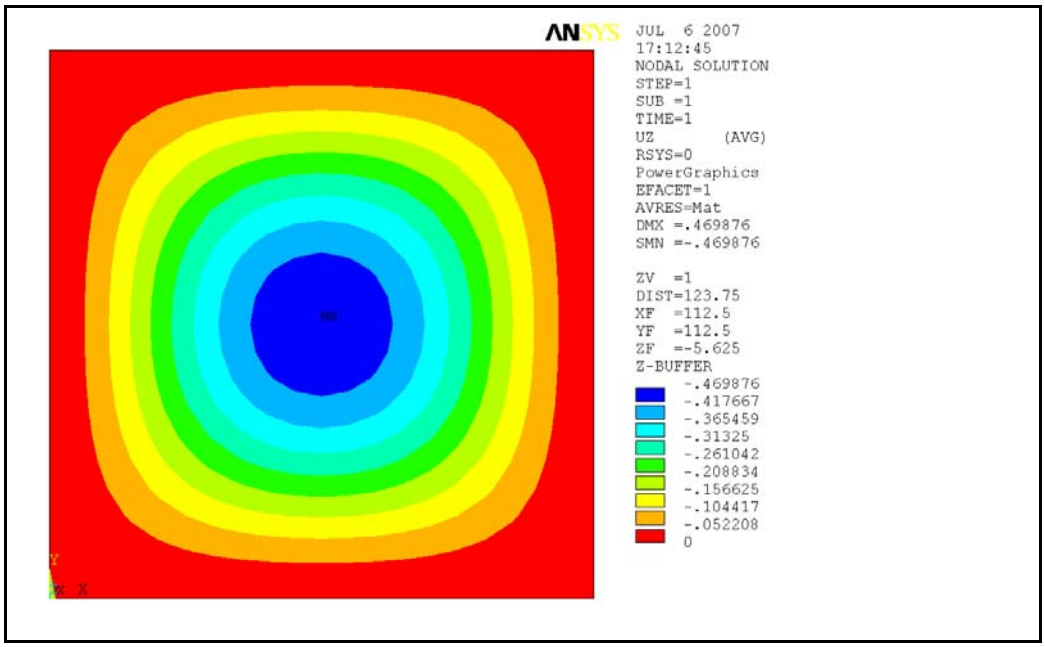
Şekil 4.7: Basit mesnetli I. plakta orta yatay eksen boyunca birim uzamaların değişimi

Şekil 4.6'da Şekil 4.5 gibi yorumlanabilir. Normalde $\varepsilon_{x,}$ ile ε_y değerlerinin birbirine eşit olmaları gerekirken bu plakta farklılık görülmüştür. Maksimum ε_x birim uzama değeri Şekil 4.5'de 160 $\mu\varepsilon$ olarak okunurken Şekil 4.6'da maksimum ε_y birim uzama değeri 190 $\mu\varepsilon$ olarak okunmuştur.

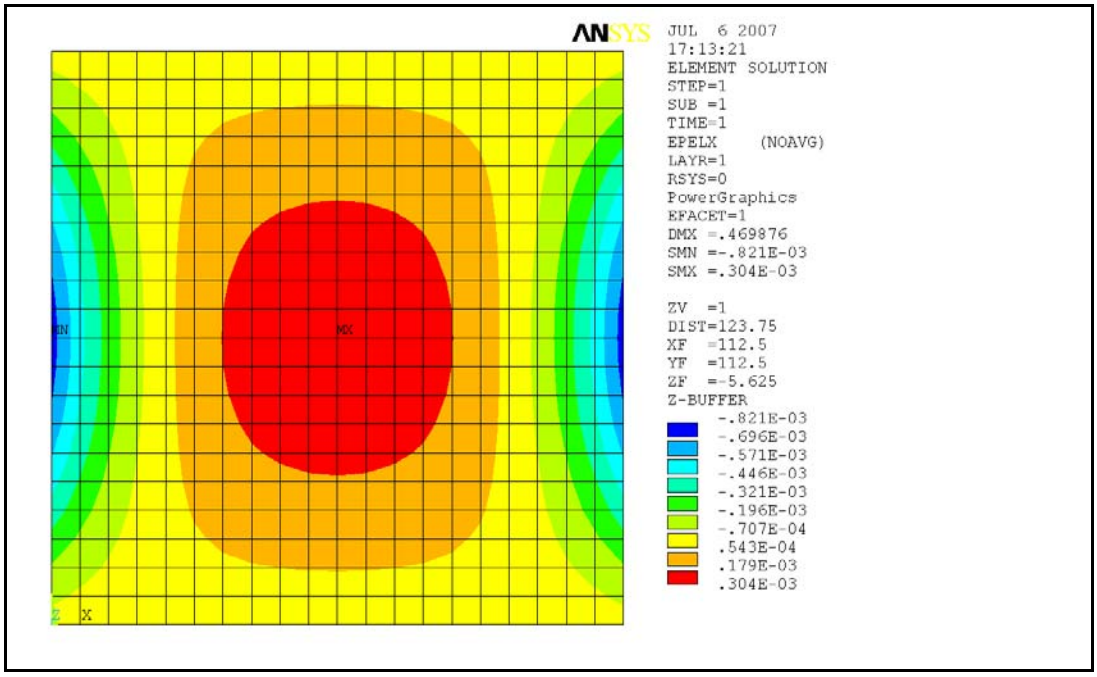
Şekil 4.5 - 4.7'den görüleceği gibi ε_x ve ε_y plağın orta noktasında maksimum değerlerini almaktadır ve alt yüzey itibariyle çekme şeklindedirler. Alt yüzeydeki yatay eksen boyunca plak kenarlarına doğru giderken değerler azalmaktadır. Plak kenarında ε_x değeri sıfır olurken ve ε_y basma birim uzaması haline gelmekte ve sıfırdan farklı olmaktadır.

4.3.2. II. Plak için yapılan analizler

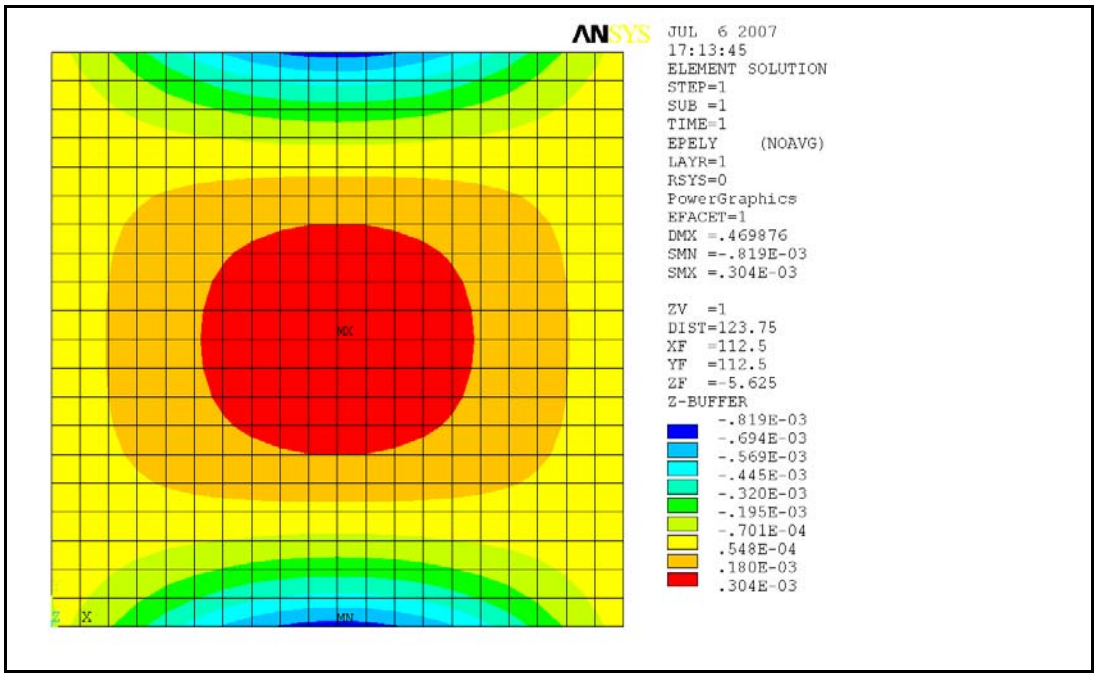
II. plak için yapılan çalışmalarda her iki mesnet hali için deney ve sayısal analiz sonuçlarında uyum gözlendiği için her iki mesnet hali için ANSYS analizi sonucunda elde edilen şekiller verilmiştir. Ankastre mesnet sınır şartı uygulanan plakta 3,8 kPa'lık bir yük altında meydana gelen çökme dağılımı Şekil 4.8'de, ε_x ve ε_y birim uzamaları, sırasıyla, Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de verilmiştir.



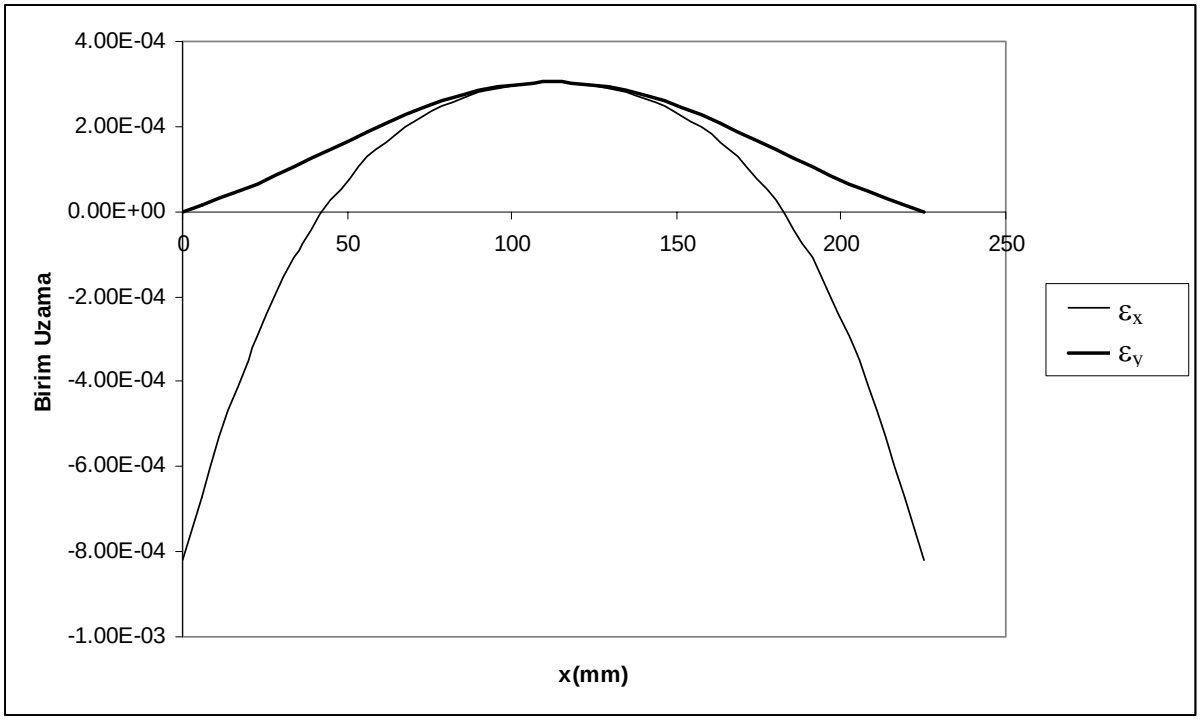
Şekil 4.8: Ankastre mesnetli II. Plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen çökme dağılımı



Şekil 4.9: Ankastre mesnetli II. plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen ε_x dağılımı



Şekil 4.10: Ankastre mesnetli II. plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen ε_y dağılımı



Şekil 4.11: Ankastre mesnetli II. plakta orta yatay eksen boyunca birim uzamaların değişimi

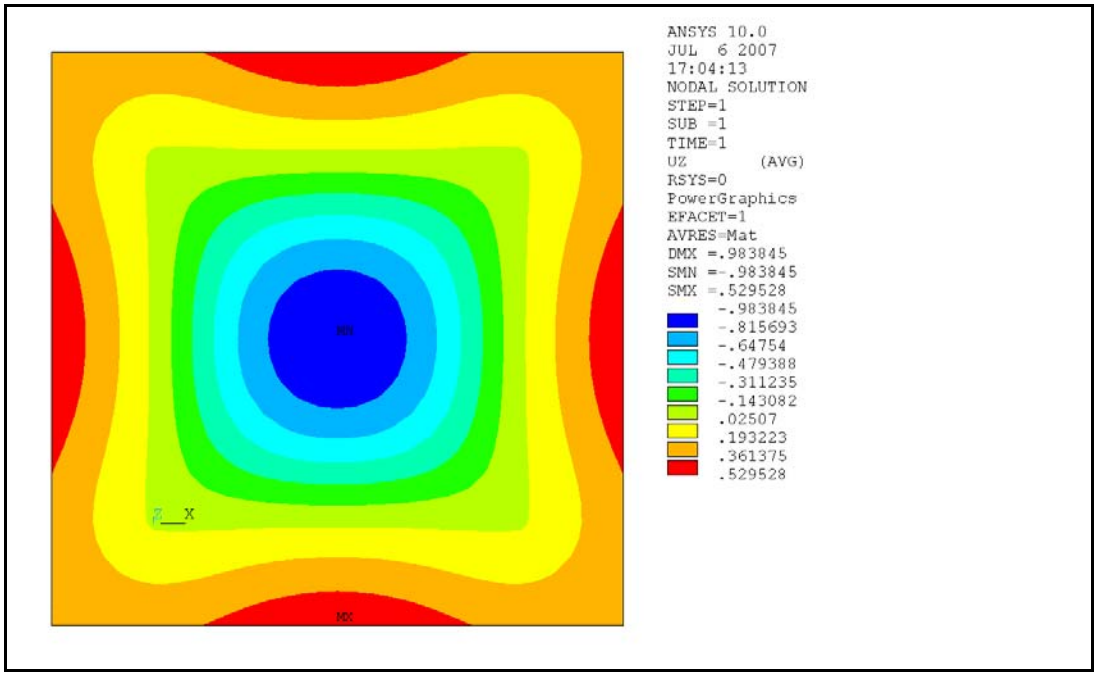
Şekil 4.8 incelendiğinde ankastre mesnetli II. plakta oluşan maksimum çökme değerinin beklenildiği gibi plak ortasında oluştuğu görülebilir. Plak ortasında oluşan maksimum çökme değeri mutlak değerce 0,469876 mm olarak okunabilir. Plak ankastre mesnetli olduğu için mesnetlendiği kenarlarda çökme meydana gelmemiştir.

Şekil 4.9'a bakıldığında ankastre mesnetli II. plaktaki ε_x birim uzama dağılımı görülebilir. Burada da beklenildiği gibi maksimum çekme birim uzamaları plak ortasında oluşmuştur ve maksimum birim uzama değeri 304 $\mu\varepsilon$ olarak belirlenmiştir. Plak ankastre mesnet ile mesnetlendiği için minumum birim uzama değerleri plağın kenarlarında meydana gelmiş olup, -821 $\mu\varepsilon$ (basma birim uzaması) değerindedir.

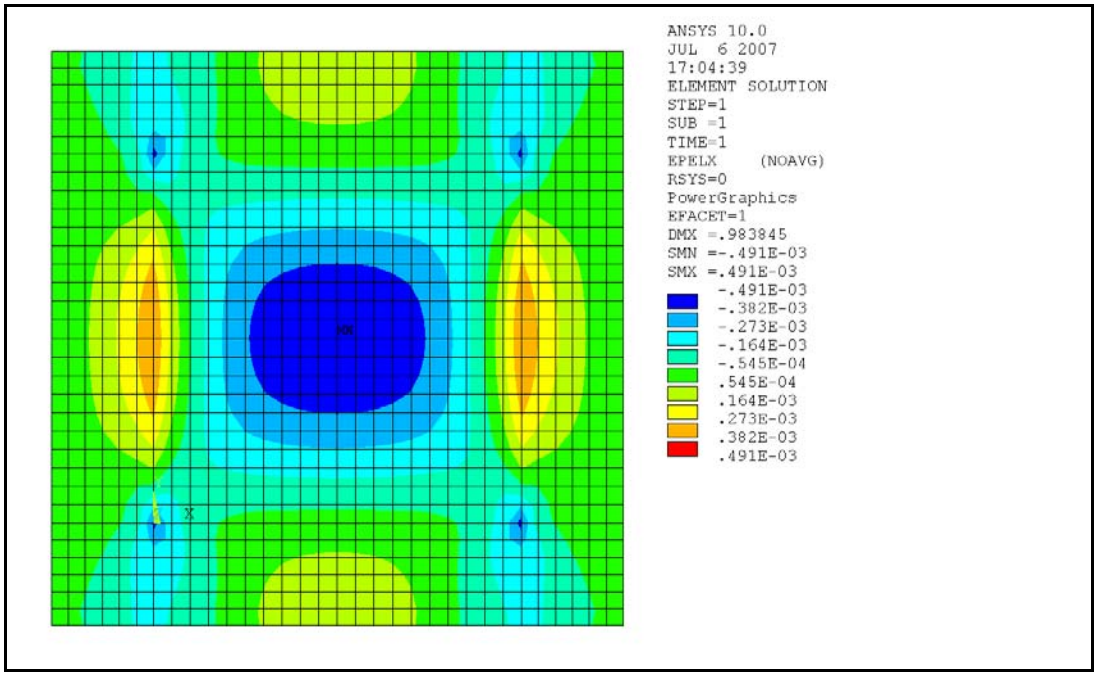
Şekil 4.10 ile Şekil 4.9 birbirine benzer sonuçlar göstermişlerdir ki böyle olması beklenen bir durumdur. Bu analizde de maksimum çekme birim uzamalar plak ortasında meydana gelmiş olup değer olarak da Şekil 4.9'daki ile aynıdır. Ancak kenarlarda oluşan minumum birim uzama değerlerinde eşitlik gözlenmemiştir. Şekil 4.10'da kenarlarda okunan minumum birim uzama değeri, 819 $\mu\varepsilon$ basma olarak okunmuştur. Ancak bu farklılık oldukça azdır ve sayısal çözümden kaynaklanmaktadır.

Şekil 4.9 - 4.11'den görüleceği gibi ε_x ve ε_y plağın orta noktasında maksimum değerlerini almaktadır ve alt yüzey itibariyle çekme şeklindedirler. Plak ortasının belirli bir bölgesinde ε_x ve ε_y değerleri bibirine eşittir. Alt yüzeydeki yatay eksen boyunca plak kenarlarına doğru giderken değerler azalmaktadır. Plak kenarında ε_x değeri sıfıra gitmektedir. ε_y birim uzaması kenara doğru giderken belirli bir noktada sıfır olmakta daha sonra basma birim uzaması haline gelmektedir. ε_y birim uzamasının mutlak değerce maksimum değeri plak kenarında ortaya çıkmaktadır.

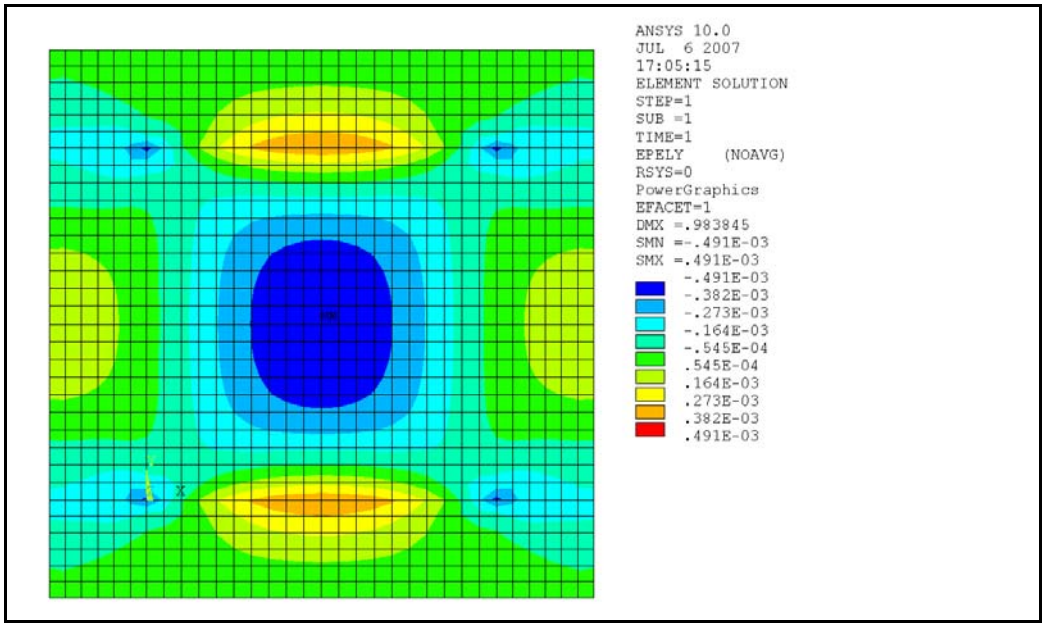
II. plak için basit mesnet sınır şartı halinde meydana gelen çökme dağılımı Şekil 4.12'de, ε_x ve ε_y birim uzamalarının plak alt yüzeyi üzerindeki değişimleri de Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'de verilmiştir.



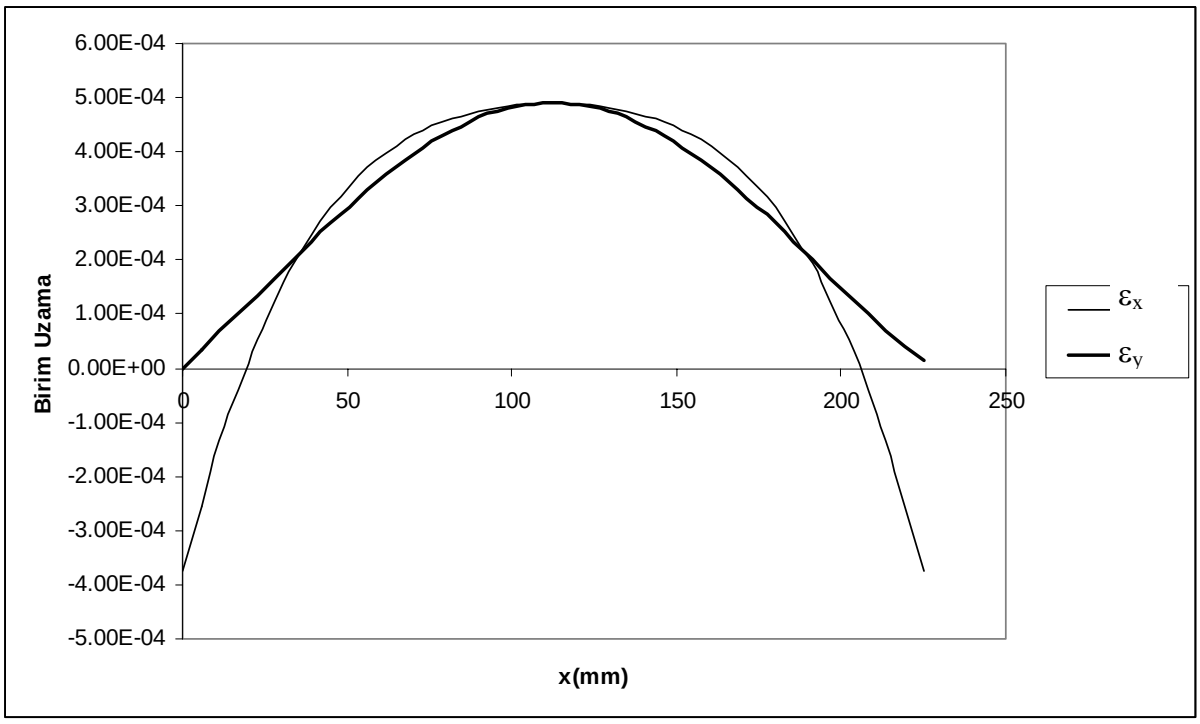
Şekil 4.12: Basit Mesnetli II. plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen çökme dağılımı



Şekil 4.13: Basit Mesnetli II. plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen ε_x dağılımı



Şekil 4.14: Basit mesnetli II. plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen ε_y dağılımı



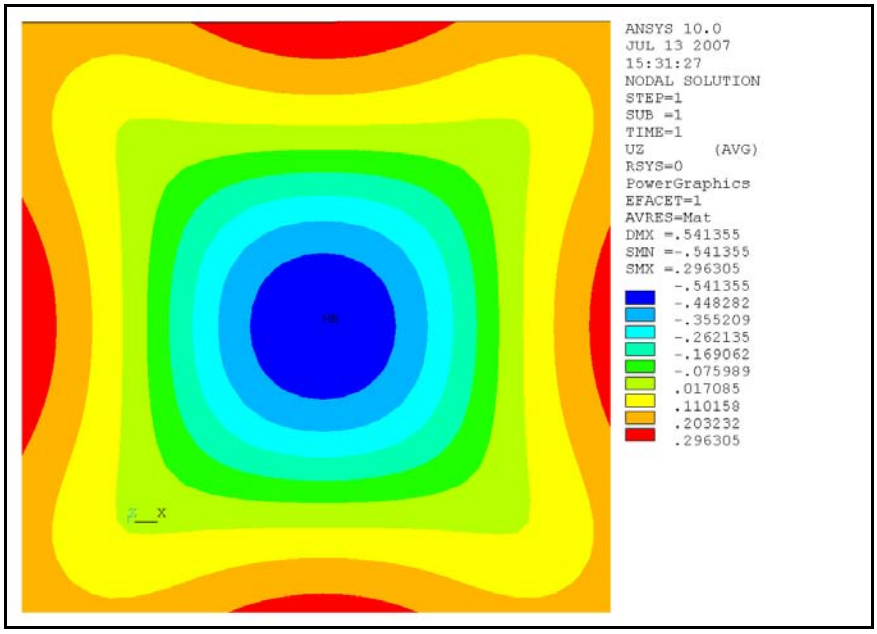
Şekil 4.15: Basit mesnetli II. plakta orta yatay eksen boyunca birim uzamaların değişimi

Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 incelendiğinde, Şekil 4.12'da verilen çökme dağılımında maksimum çökmenin plak ortasında oluştuğu görülebilir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 incelendiğinde her iki şekil içinde maksimum birim uzama değerlerinin plak ortasında meydana geldiği ve değerlerinin 491 $\mu\varepsilon$ olduğu görülebilir.

Şekil 4.15'te 3.8 kPa yayılı yük için alt yüzeydeki yatay eksen boyunca ε_x ve ε_y birim uzamalarının değişimi görülmektedir. Bu birim uzamalar en büyük değerlerini plak ortasında almaktadırlar. Bu noktada değerleri birbirine eşittir. Plak kenarına doğru giderken birbirlerinden bir miktar farklılaşırken belirli bir noktada değerleri yine eşitlenmektedir. Plak kenarında ε_x değeri sıfıra gitmektedir. ε_y birim uzaması kenara doğru giderken belirli bir noktada sıfır olmakta daha sonra basma birim uzaması haline gelmektedir.

4.3.3. III. Plak için yapılan analizler

III. plak için yapılan çalışmalarda her iki mesnet hali durumunda deney ve sayısal analizler neticesinde elde edilen sonuçlarda uyum gözlenememiştir. Ancak örnek teşkil etmesi amacıyla sadece basit mesnet hali için yapılan ANSYS analizi sonucunda elde edilen şekiller verilmiştir.

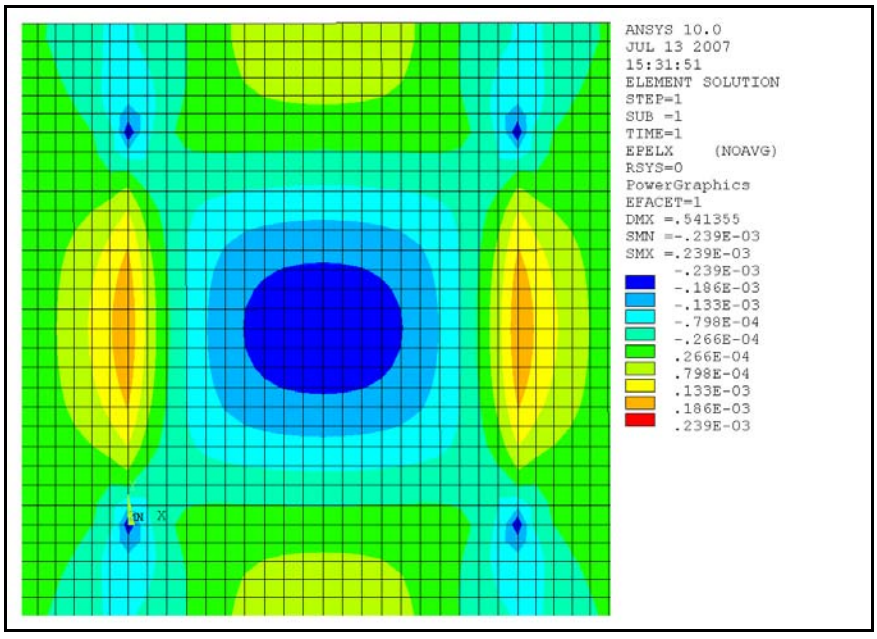


Şekil 4.16: Basit mesnetli III. plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen çökme dağılımı

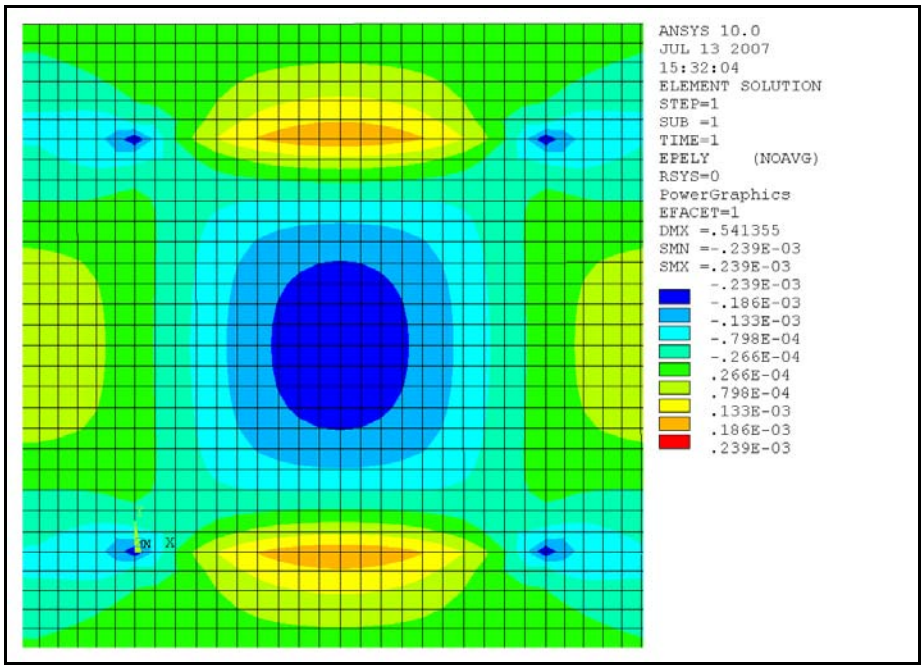
Basit mesnet sınır şartı uygulanan plakta 3,8 kPa'lık bir yük altında meydana gelen çökme dağılımı Şekil 4.16'de, ε_x, ε_y birim uzama dağılımları Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da verilmiştir.

III. plak için yapılan analiz sonucunda elde edilen Şekil 4.16, Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 incelendiğinde, Şekil 4.17'de verilen çökme dağılımına bakılırsa maksimum çökmenin plağın orta kısmında meydana geldiği ve mutlak değerinin 0,541 mm olduğu görülmektedir. Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilen birim uzama dağılımların da incelenmesi halinde maksimum birim uzamaların plak ortasında meydana geldiği ve her ikisinin de 239 $\mu\varepsilon$ olduğu görülebilir.

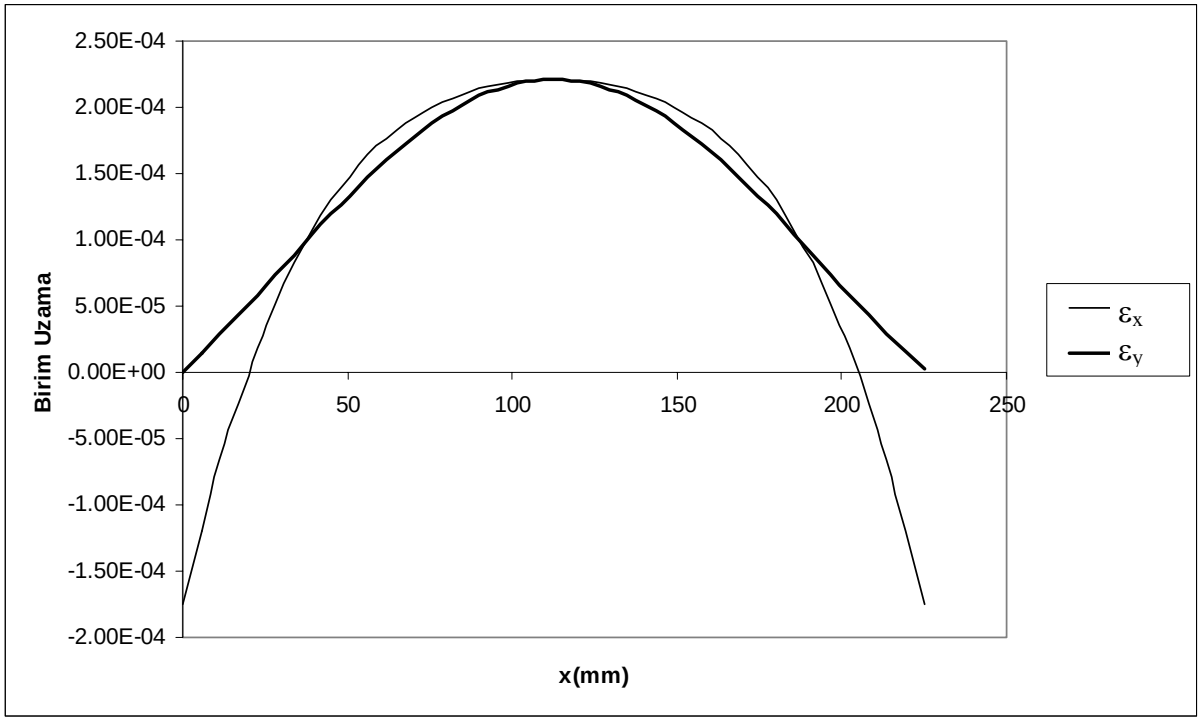
Şekil 4.19'da 3.8 kPa yayılı yük için alt yüzeydeki yatay eksen boyunca ε_x ve ε_y birim uzamalarının değişimi görülmektedir. Bu birim uzamalar en büyük değerlerini plak ortasında almaktadırlar. Bu noktada değerleri birbirine eşittir. Plak kenarına doğru giderken birbirlerinden bir miktar farklılaşırken belirli bir noktada değerleri yine eşitlenmektedir. Plak kenarında ε_x değeri sıfıra gitmektedir. ε_y birim uzaması kenara doğru giderken belirli bir noktada sıfır olmakta daha sonra basma birim uzaması haline gelmektedir.



Şekil 4.17: Basit mesnetli III. plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen ε_x dağılımı



Şekil 4.18 Basit mesnetli III. plak için 3,8 kPa'lık yük altında meydana gelen ε_y dağılımı



Şekil 4.19: Basit mesnetli III. plakta orta yatay eksen boyunca birim uzamaların değişimi

5. DENEYSEL VE SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölümde deneysel çalışmalardan elde edilen ölçme sonuçları plakların ANSYS yazılımı ile elde edilen sonlu eleman çözümleri ile karşılşatırılmıştır. Ancak bazı plaklarda belirli sınır şartları için çok farklı sonuçlar elde edildiğinden, bunlar için karşılşatırmalı sonuçlar verilmemiş, yalnızca deney sonuçları sunulmuştur.

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen değerler ve ANSYS yazılımı kullanılarak yapılan analizlerin sonuçları ile karşılaştırılması aşağıdaki tablolar halinde verilmiştir.

Tablo 5.1'de dört kenarından basit mesnetli haldeki I. plağın deney ve analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Genel olarak ε_y değerleri oldukça uyumlu çıkmakla birlikte ε_x değerlerinde % 42'lere varan sapmalar görülebilmektedir. Ayrıca plak kenarına yakın konumda bulunan 1 no'lu straingage'den yapılan ölçümler sayısal sonuçlarla çok farklı olduğundan ilgili sonuçlar tabloya konulmamıştır.

Tablo 5.1: Basit mesnet için I. plağın deney ve analiz sonuçları

Strain Gauge No		**20 x 9,81 Newton**			**30 x 9,81 Newton**		
		Deney Sonuçları	Analiz Sonuçları	Hata Oranları	Deney Sonuçları	Analiz Sonuçları	Hata Oranları
2	$\varepsilon_x(\mu\varepsilon)$	150	128	17 %	194	192	1 %
	$\varepsilon_y(\mu\varepsilon)$	150	143	4 %	214	214	% 0
3	$\varepsilon_x(\mu\varepsilon)$	106	160	33 %	138	240	42 %
	$\varepsilon_y(\mu\varepsilon)$	178	190	6 %	230	284	19 %

Tablo 5.2'de ve Tablo 5.3'de, sırasıya, dört kenarından ankastre mesnetli ve dört kenarından basit mesnetli haldeki I. plağın deney ve analiz sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu tablolardan görülebileceği gibi yine genel olarak ε_y değerleri,

ε_x değerlerine göre daha uyumlu çıkmaktadırlar. Bu plak için üç straingage'den alınan ölçümler ve analiz sonuçları verilmiştir. Tabloların incelenmesinden genel olarak yüksek yükler için elde edilen uyumların düşük yüklerdeki uyuma göre daha iyi oldukları söylenebilir.

Tablo 5.2: Ankastre mesnet için II. plağın deney ve analiz sonuçları

Strain Gauge No		**4 x 9,81 Newton**			**20 x 9,81 Newton**			**30 x 9,81 Newton**		
		Deney Sonuçları	Analiz Sonuçları	Hata Oranları	Deney Sonuçları	Analiz Sonuçları	Hata Oranları	Deney Sonuçları	Analiz Sonuçları	Hata Oranları
1	$\varepsilon_x(\mu\varepsilon)$	-43	-51	15%	-258	-283	8%	-358	-424	15 %
	$\varepsilon_y(\mu\varepsilon)$	9	11	18%	60	64	6%	85	96	11%
2	$\varepsilon_x(\mu\varepsilon)$	15	36	58%	118	196	39%	208	294	29%
	$\varepsilon_y(\mu\varepsilon)$	24	40	4%	235	221	6%	346	332	4%
3	$\varepsilon_x(\mu\varepsilon)$	31	53	41%	284	290	2%	380	436	12%
	$\varepsilon_y(\mu\varepsilon)$	30	53	43%	277	291	4%	454	436	4%

Tablo 5.3: Basit mesnet için II. plağın deney ve analiz sonuçları

Strain Gauge No		**4 x 9,81 Newton**			**20 x 9,81 Newton**			**30 x 9,81 Newton**		
		Deney Sonuçları	Analiz Sonuçları	Hata Oranları	Deney Sonuçları	Analiz Sonuçları	Hata Oranları	Deney Sonuçları	Analiz Sonuçları	Hata Oranları
1	$\varepsilon_x(\mu\varepsilon)$	21	11	90%	83	55	50%	138	82	6%
	$\varepsilon_y(\mu\varepsilon)$	21	27	22%	197	135	45%	285	200	42%
2	$\varepsilon_x(\mu\varepsilon)$	69	84	17%	384	422	9%	586	633	7%
	$\varepsilon_y(\mu\varepsilon)$	52	77	32%	467	385	21%	689	578	19%
3	$\varepsilon_x(\mu\varepsilon)$	73	98	25%	532	491	8%	749	736	1%
	$\varepsilon_y(\mu\varepsilon)$	98	98	% 0	590	491	20%	862	736	17%

Tablo 5.4'de dört kenarından basit mesnetli haldeki III. plağın yalnızca deney sonuçları sunulmuştur. Bu plak için her iki mesnet şartında da deney ve analiz sonuçları arasında bir uyum bulunamamıştır. Bu uyumsuzluklarda özellikle malzeme özelliklerinin uygun bir şekilde belirlenememesinin rol oynadığı düşünülmektedir. Ancak sandviç plakların matematiksel modellenmesinden kaynaklanan bir takım analiz hatalarının da söz konusu olabileceği göz ardı edilmemelidir.

Tablo 5.4: Basit mesnet için III. plağın deney ve analiz sonuçları

Strain Gauge No		**4 x 9,81 Newton**		**20 x 9,81 Newton**		**30 x 9,81 Newton**	
		Deney Sonuçları	Analiz Sonuçları	Deney Sonuçları	Analiz Sonuçları	Deney Sonuçları	Analiz Sonuçları
1	$\varepsilon_x(\mu\varepsilon)$	54	4	149	19	212	28
	$\varepsilon_y(\mu\varepsilon)$	48	12	226	58	290	87
2	$\varepsilon_x(\mu\varepsilon)$	116	38	553	188	796	282
	$\varepsilon_y(\mu\varepsilon)$	94	35	577	173	819	259
3	$\varepsilon_x(\mu\varepsilon)$	129	44	621	221	872	332
	$\varepsilon_y(\mu\varepsilon)$	99	44	619	221	896	332

6. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında, ankastre ve basit mesnet sınır şartlarındaki üç adet sandviç plağın çeşitli ağırlık yükleri altındaki birim uzamaların ölçülmesi ve sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda bazı durumlarda oldukça uyumla sonuçlar elde edilirken, bazı durumlarda çok uzak sonuçlarla karşılaşılmıştır.

Plaklarda genellikle basit mesnet sınır şarlarında daha iyi uyum elde edilmiştir. Uyumsuzluklarda plakların yüzey ve çekirdek malzeme özelliklerinini doğru bir şekilde tesbit edilememiş olmasının yanısıra ANSYS'te sandviç yapıları modellemek için kullanılan katmanlı kompozit kabukların bu tür yapıları yeterli bir doğrulukta modelleyememelerinin de etkili olabileceği düşünülmektedir.

Diğer taraftan deneylerde kullanılan cihazların hassasiyeti, hafif ağırlıklı yüklerde düştüğü için özellikle düşük yüklemeler neticesinde elde edilen sonuçlarda uyumsuzluğun arttığı gözlenmiştir. Ayrıca düşük yüklemeler halinde yayılı yük yüzeye tam olarak yayılamadığı için deney sonuçlarında, düşük ağırlıklı yükler için bir sağlıksızlık gözlenmiştir. Bu durumlar neticesinde elde ettiğimiz sayısal değerlerle, deneyler sonucunda elde ettiğimiz değerler arasında farklılıklar ortaya çıkmıştır.

Bundan sonraki çalışmalarda, farklı sınır şartlarının etkisi, farklı malzeme kombinasyonlarından oluşan sandviç plakların davranışları ve sıcaklık etkisi altında oluşan gerilmeler incelenebilir. Sıcaklığın ve nemin malzeme özelliklerini değiştirmesinin statik davranış üzerindeki etkileri incelenebilir. Yine değişik yükleme hallerinde, örneğin, tekil yük veya plak yüzeyi üzerinde değişen yayılı yük etkisi altındaki sandviç plakların davranışları incelenebilir. Plak kalınlığının, plak açıklık oranlarının plağın statik davranışı üzerindeki etkileri parametrik olarak çalışılabilir.

KAYNAKLAR

[1] **Chang, W.-S., Wentsel, E., Krauthammer, T. and John**, J., 2005, Bending behaviour of corrugated-core sandwich plates, *Composite structure*, **70**, 81-89.

[2] **Liang, S. and Chen, H.L**., 2006, Investigation on the square cell honeycomb structure under axial loading, *Composite structure*, **72**, 446-454

[3] **Bau-Madsen, N.K., Svendsen, K.-H. and Kildegaard, A.**, 1995, Large deflections of sandwich plates–an experimental investigation, *Composite Structure*, **30**, 85-101

[4] **Lee, L.J. and Fan, Y.J.**, 1996, Bending and Vibration analysis of composite sandwich plates, *Computeres and Structures*, **60**, 103-112.

[5] **O.T. Thomsen**, 1995, Theoritical and experimental investigation of local bending effects in sandwich plates, *Composite Structure*, **30**, 85-101.

[6] **Q. H. Cheng, H. P. Lee and C. Lu**, A numerical approach for evaluating elastic constants of sandwich structures with various cores, *Composite Structure*, **74**, 226-236.

[7] **Özdemirli, E.**, 2006, Anlık basınç yükü etkisindeki Sandviç Plağın dinamik davranışının deneysel ve sayısal incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[8] **Vinson, J.R.**, 2001, Sandwich Structures, *American Society of Mecanical Engineers*, **54.**

[9] **Ventstel, E. and Krauthammer, T.**, Thin Plates and Shells**,** MARCEL DEKKER, Inc. New York, 2001

[10] TC – 31 K Digital Strainmeter Operation Manual.

[11] Release 10.0 Documentation for ANSYS, Chapter 17. Analysis Procedures.

[12] **Dally, J. W. and Riley, W.F.**, McGRAW-HILL, KOGAKUSH, Tokyo 1978 Experimental Stress Analysis.

[13] **R.F. Gibson**, McGRAW-HILL, Inc.,Singapore, 1994, Principles of Composite Material Mechanics

[14] **S. Timoshenko,** ÜÇLER Basımevi İstanbul, 1950, Plak ve Kabuklar Teorisi.

[15] **Libove, C. and Butdorf, S. B.,** A General Small-Deflection Theori for Flat Sandwich Plates, *NACA TN* 1526, 1948

ÖZGEÇMİŞ

Meral CARBAŞ, 1971 yılında İstanbul'da doğdu. Lise eğitimini Şehremini Lisesi'nde tamamladı. 1992 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Uzay Bilimleri ve Teknolojisi Mühendisliği Bölümüne girdi ve 1997 yılında mezun oldu.