

**CNT TAKVİYELİ KARBON/EPOKSİ YÜZEYE SAHİP
NOMEX ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ YAPININ
EĞİLME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Osman Fevzi YAMAN

DANIŞMAN

Prof. Dr. Muhammet YÜRÜSOY

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Mayıs 2017

**AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**CNT TAKVİYELİ KARBON/EPOKSİ YÜZEYE SAHİP
NOMEX ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ YAPININ
EĞİLME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Osman Fevzi YAMAN

DANIŞMAN

Prof. Dr. Muhammet YÜRÜSOY

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Mayıs 2017

TEZ ONAY SAYFASI

Osman Fevzi YAMAN tarafından hazırlanan “CNT TAKVİYELİ KARBON/EPOKSİ YÜZEYE SAHİP NOMEX ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ YAPININ EĞİLME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması lisansüstü eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 22/05/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Muhammet YÜRÜSOY

Başkan : Doç. Dr. Fatih AKSOY
Afyon Kocatepe Ün., Teknoloji Fakültesi,

Üye : Prof. Dr. Muhammet YÜRÜSOY
Afyon Kocatepe Ün., Teknoloji Fakültesi,

Üye : Yrd. Doç. Dr. Özgür Solmaz
Manisa Celal Bayar Ün., H.F.T. Teknoloji Fakültesi,

İmza

İmza

İmza

Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun
...../...../..... tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hüseyin ENGİNAR

Enstitü Müdürü


BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

22/05/2017


İmza

Osman Fevzi YAMAN

ÖZET
Yüksek Lisans Tezi

CNT TAKVİYELİ KARBON/EPOKSİ YÜZEYE SAHİP
NOMEX ÇEKİRDEKLİ SANDVIÇ YAPININ
EĞİLME ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Osman Fevzi YAMAN
Afyon Kocatepe Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Muhammet YÜRÜSOY

Bu çalışmada sandviç yapıların eğilme kuvveti altında ki dinamik davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında ilk olarak sandviç yapının alt ve üst yüzeyini oluşturacak olan %0 CNT içeren, %1 CNT takviyeli, %2 CNT takviyeli plakalar ile çekirdek yapıyı oluşturacak olan aramid esaslı bal peteği yapısının malzeme özellikleri elde edilmiştir. İkinci olarak sandviç plakalar üretilmiştir. aramid esaslı bal peteği yapısına sahip çekirdek yapıyla alt ve üst yüzeyi oluşturacak olan %0 CNT içeren, %1 CNT takviyeli, %2 CNT takviyeli plakaların tabakaları birbirine epoksi bazlı yapıştırıcıyla yapıştırılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan sandviç yapıya sahip test numuneleri üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Yapılan deneysel çalışmada uygulanan eğilme kuvvetleri ölçülmüştür. Çalışmada sandviç yapıyı oluşturan alt ve üst yüzey ile aramid esaslı çekirdek yapı Abaqus programı yardımıyla modellenmiştir. ABAQUS programın da sayısal olarak üç nokta eğme testine tabi tutulmuş ve ayrıca hasar oluşumları, deformasyonları belirlenmiştir. Deneysel test sonuçları sonucunda elde edilen verilerle sonlu elamanlar metoduyla elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.

2017, x + 75 sayfa

Anahtar Kelimeler: Üç nokta eğme, Sandviç yapı, Karbon nanotüp,

ABSTRACT
M.Sc Thesis

**CNT INVESTIGATION ON THE BENDING PROPERTIES OF NOMEX
SEED VARIOUS SANDWICH WITH REINFORCED CARBON/EPOXY SURFACE**

Osman Fevzi YAMAN
Afyon Kocatepe University
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering
Supervisor: Prof. Muhammet YÜRÜSOY

In this study, dynamic behaviors of sandwich structures under bending force were investigated experimentally and numerically. In the experimental study, material properties of the aramid based honeycomb structure, which will form core with 0% CNT, 1% CNT reinforced, 2% CNT reinforced plates, which will form the top and bottom surfaces of the sandwich structure, were obtained. Secondly, sandwich plates were produced. The layers of plates with 0% CNT, 1% CNT reinforced and 2% CNT reinforced with aramid based honeycomb structure were formed by adhering each other with epoxy-based adhesive. The test specimens with the sandwich structure formed were subjected to a three-point bend test. The bending forces applied in the experimental work were measured. The bottom and top surfaces forming the sandwich in the study and the aramid based core structure are modeled by the Abaqus program. The ABAQUS program was also subjected to three-point bending tests numerically and also the damage formations and deformations were determined. The data obtained as a result of the experimental test results and the data obtained by the method of the final elemen were compared.

2017, x + 75 pages

Keywords: Three point bending, Sandwich construction, Carbon nanotube

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarında dolayı tez danışmanım, araştırma ve yazım süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Muhammet YÜRÜSOY'a her konuda öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Osman Fevzi YAMAN
AFYONKARAHİSAR, 2017

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	iv
KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
RESİMLER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ.....	2
2.1 Kompozit Malzemeler	2
2.2 Sandviç Yapıların Kısımları	3
2.2.1 Çekirdek Yapı	4
2.2.3 Yapıştırıcılar	4
2.3 Bal Peteği Yapısına Sahip Sandviç Yapılar.....	5
2.4 Petekli Yapı Üretim Yöntemleri	5
2.4.1 Uzatarak Şekil Verme Yöntemi	5
2.4.2 Kıvrılarak Şekil Verme Yöntemi	6
2.5 Literatürde Sandviç Malzemelerle Yapılan Çalışmalar	7
3. MATERİYAL ve METOT.....	17
3.1 Çekme Testine Tabi Tutulacak Deney Numunelerinin Hazırlanması	17
3.1.1 Karbon Plakaların Özellikleri Ve İmalatı	17
3.2 Eğme Testine Tabi Tutulacak Deney Numunelerinin Hazırlanması	21
3.3 Test Metodolojisi	23
3.3.1 Çekme Testi	25
3.3.1.1 %0 CNT İçeren Çekme Testi Numuneleri.....	25
3.3.1.2 %1 CNT Takviyeli Çekme Testi Numuneleri	27
3.3.1.3 %2 CNT Takviyeli Çekme Testi Numuneleri	29
3.3.1.4 %0 CNT İçeren 45° Çekme Testi Numuneleri.....	31
3.3.1.5 %1 CNT Takviyeli 45° Çekme Testi Numuneleri.....	33
3.3.1.6 %2 CNT Takviyeli 45° Çekme Testi Numuneleri.....	35

3.3.2 Üç Nokta Eğme Testi	37
3.3.2.1 %0 CNT İçeren Eğme Testi Numuneleri.....	37
3.3.2.2 %1 CNT Takviyeli Eğme Testi Numuneleri	39
3.3.2.3 %2 CNT Takviyeli Eğme Testi Numuneleri	41
3.3.3 Abaqus Programında Sonlu Elamanlarla Modelleme.....	43
3.3.3.1 Abaqus Programında “Part” Aşaması.....	43
3.3.3.2 Abaqus Programında “Property” Aşaması	47
3.3.3.3 Abaqus Programında “Assembly” Aşaması	48
3.3.3.4 Abaqus Programında “Step” Aşaması	49
3.3.3.5 Abaqus Programında “Interaction” Aşaması	53
3.3.3.6 Abaqus Programında “Load” Aşaması	54
3.3.3.7 Abaqus Programında “Mesh” Aşaması	55
3.3.3.8 Abaqus Programında “Job” Aşaması.....	55
3.3.3.9 Abaqus Programında “Visualization” Aşaması	55
3.4 Üç Nokta Eğme Deneyinin Abaqus Programında Analiz Sonuçları	59
4. TARTIŞMA Ve SONUÇ	67
5. KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ.....	75

KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

A	Kesit Alanı
A (%)	% Uzama
a0	Kalınlık
b0	Genişlik
CFP	Karbon Fiber Plaka
CNT	Karbon Nano Tüp
dc	Petek Hücre Boyutu
D	Petek Boyutu
E-Modülü	Elastisite Modülü
E1 Modülü	X Yönündeki Elastisite Modülü
E2 Modülü	Y Yönündeki Elastisite Modülü
Fmax	Maximum Kuvvet
Fmin	Minimum Kuvvet
G12	X Kayma Gerilmesi
G13	Y Kayma Gerilmesi
G23	z Kayma Gerilmesi
l	Uzunluk
Lv	Mesnetler Arası Mesafe
L0	Eksansometre Mesafesi
Min.	Minimum
Max.	Maximum
n	Dizideki Numune Sayısı
No	Numara
R	En Yüksek ve En Düşük Arasındaki Fark
Rm (MPa)	Gerilme
Rm (N)	Kuvvet
RP	Referans Noktası
s0	Kesit Alanı
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
t	Kalınlık
Uz	Y Yönünde Uygulanan Kuvvet
\bar{x}	Değerlerin Ortalaması
X11	X Yönü
X22	Y Yönü
X33	z Yönü
3D	3 Boyutlu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1 %0 CNT İçeren Çekme Test Numunesi Gerilme-%Uzama Diyagramı.....	25
Şekil 3.2 %1 CNT Takviyeli Çekme Test Numunesi Gerilme-%Uzama Diyagramı	27
Şekil 3.3 %2 CNT Takviyeli Çekme Test Numunesi Gerilme-%Uzama Diyagramı	29
Şekil 3.4 %0-45° Çekme Test Numunesi Gerilme-%Uzama Diyagramı.....	31
Şekil 3.5 %1-45° Çekme Test Numunesi Gerilme-%Uzama Diyagramı	33
Şekil 3.6 %2-45° Çekme Test Numunesi Gerilme-%Uzama Diyagramı	35

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1 %0 CNT İçeren Numunlerin Çekme Testi Sonuçları	25
Çizelge 3.2 %0 CNT İçeren Numunelerin Çekme Testi Sayısal Değerleri	26
Çizelge 3.3 %0 CNT İçeren Numunlerin Çekme Testi İstatiksel Değerleri	26
Çizelge 3.4 %1 CNT Takviyeli Numunelerin Çekme Testi Sonuçları	27
Çizelge 3.5 %1 CNT İçeren Numunelerin Çekme Testlerindeki Sayısal Değerleri	28
Çizelge 3.6 %1 CNT Takviyeli Numunlerin Çekme Test İstatiksel Değerleri	28
Çizelge 3.7 %2 CNT Takviyeli Numunelerin Çekme Testi Sonuçları	29
Çizelge 3.8 %2 CNT Takviyeli Numunelerin Çekme Testi Sayısal Değerleri	30
Çizelge 3.9 %2 CNT Takviyeli Numunlerin Çekme Testi İstatiksel Değerleri	30
Çizelge 3.10 %0 CNT İçeren (45°) Numunelerin Çekme Testi Sonuçları	31
Çizelge 3.11 %0 CNT İçeren (45°) Numunelerin Çekme Testi Sayısal Değerleri	32
Çizelge 3.12 %0 CNT İçeren (45°) Numunelerin Çekme Testi İstatiksel Değerleri	32
Çizelge 3.13 %1 CNT Takviyeli (45°) Numunelerin Çekme Testi Sonuçları	33
Çizelge 3.14 %1 CNT Takviyeli (45°) Numunelerin Çekme Testi Sayısal Değerleri... ..	34
Çizelge 3.15 %1 CNT Takviyeli (45°) Numunelerin Çekme Testi İstatiksel Değerleri	34
Çizelge 3.16 %2 CNT Takviyeli (45°) Numunelerin Çekme Testi Sonuçları	35
Çizelge 3.17 %2 CNT Takviyeli (45°) Numunelerin Çekme Testi Sayısal Değerleri... ..	36
Çizelge 3.18 %2 CNT Takviyeli (45°) Numunelerin Çekme Testi İstatiksel Değerleri	36
Çizelge 3.19 %0 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi Sonuçları	37
Çizelge 3.20 %0 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi Değerleri.....	38
Çizelge 3.21 %0 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi İstatiksel Verileri.....	38
Çizelge 3.22 %1 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi Sonuçları	39
Çizelge 3.23 %1 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi Değerleri.....	40
Çizelge 3.24 %1 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi İstatiksel Değerleri	40
Çizelge 3.25 %2 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi Sonuçları	41
Çizelge 3.26 %2 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi Değerleri.....	42
Çizelge 3.27 %2 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi İstatiksel Verileri.....	42
Çizelge 3.28 Mesnet Ve Kuvvet Çubuğu Modelleme	43
Çizelge 3.29 Çekirdek Yapı Üç Boyutlu Modelleme	44
Çizelge 3.30 Çekirdek Tek Hücre Modelleme	45
Çizelge 3.31 Sandviç Yapı Yüzey Kaplaması Üç Boyutlu Modelleme	46
Çizelge 3.32 Bal Peteği Çekirdek Yapı Malzeme Özellikleri.....	47

Çizelge 3.33 Kuvvet ve Mesnet Modellemesi	47
Çizelge 3.34 Karbon Alt-Üst Yüzey Modellemesi	47
Çizelge 3.35 Karbon Yüzey Analiz Değerleri.....	48
Çizelge 3.36 Abaqus Programındaki Veriler	59
Çizelge 4.1 %0-%2 Karbon Çekme Test Numunelerinin Sonuçları.....	67
Çizelge 4.2 %0-%2 Karbon Çekme Test Numunelerinin Karşılaştırılması.....	67
Çizelge 4.3 %0-%2 Karbon Eğme Test Numunelerinin Sonuçları.....	68
Çizelge 4.4 %0-%2 Karbon Eğme Test Numunelerinin Sonuçları.....	68

RESİMLER DİZİNİ

	Sayfa
Resim 2.1 Kompozit Yapıların Kullanım Alanları	2
Resim 2.2 Sandviç Yapıyı Oluşturan Kısımlar	3
Resim 2.3 Çekirdek Yapı Malzemeleri	4
Resim 2.4 Uzatarak Şekil Verme	6
Resim 2.5 Kıvrılarak Şekil Verme.....	6
Resim 3.1 Vakum Destekli Reçine Transfer	18
Resim 3.2 Vakum Destekli Reçine Transfer Kesit.....	19
Resim 3.3 Sandviç Plaka	19
Resim 3.4 Nomex Kağıt Tabakası	20
Resim 3.5 Karbon Fiber Plakalar (CFP).....	20
Resim 3.6 Çekme Test Numunelerinin Kodlanması	21
Resim 3.7 Eğme Testine Tabi Tutulacak Numuneler.....	23
Resim 3.8 Çekme Test Cihazı	24
Resim 3.9 Eğme Test Cihazı	24
Resim 3.10 Mesnet ve Kuvvet Çubuğu Tasarımı.....	43
Resim 3.11 Çekirdek Yapı Üç Boyutlu Model.....	44
Resim 3.12 Çekirdek Tek Hücre Üstten Görünüş	45
Resim 3.13 Abaqus Programında Çift Duvar Görünüşü	45
Resim 3.14 Abaqus Programında Sandviç Yapı Alt ve Üst Yüzey Modeli	46
Resim 3.15 Sandviç Yapı Üç boyutlu Montajı.....	48
Resim 3.16 Abaqus ‘Step’ Aşama 1	49
Resim 3.17 Abaqus ‘Step’ Aşama 2	49
Resim 3.18 Abaqus ‘Step’ Aşama 3	50
Resim 3.19 Abaqus ‘Step’ Aşama 4	50
Resim 3.20 Abaqus‘Step’ Aşama 5	51
Resim 3.21 Abaqus ‘Step’ Aşama 6	51
Resim 3.22 Abaqus ‘Step’ Aşama 7	52
Resim 3.23 Abaqus ‘Step’ Aşama 8	52
Resim 3.24 Abaqus ‘Interaction’ Aşaması	54
Resim 3.25 Abaqus ‘Mesh’ Aşaması	55
Resim 3.26 Abaqus Analiz Sonuç Aşaması 1	56
Resim 3.27 Abaqus Analiz Sonuç Aşaması 2	56

1. GİRİŞ

Sandviç yapılar, ortada ki çekirdek denilen daha kalın bir kısım ve çekirdeğin alt ve üst yüzeyine yerleştirilen ince plakalardan oluşur. Sandviç yapılar değişik ihtiyaçlar ve uygulamalar için alt ve üst yüzey ile çekirdeğin malzeme özellikleri ile geometrileri değiştirilerek değişik optimal yapılar elde edilebilmektedir. Sandviç kompozitler sıradan malzemelere nazaran daha hafif ve yüksek “dayanım/ağırlık” oranına sahiptirler (Güldoğan ve Şakar 2015).

Bal peteği çekirdek yapısına sahip sandviç yapılar son yılların en önemli keşiflerindedir. Havacılık sanayi başta olmak üzere birçok endüstride kullanılmaktadır. Petek hücreleri, sandviç yapının alt ve üst yüzeyini kaplayan malzemelere sağlam ve yayılı bir şekilde destek olmaktadır. Sandviç yapıda kullanılan yapıştırıcılar sayesinde bütünsellik oluşturup özellikle burkulma ve eğilmeye çalışan yerlerde oldukça yüksek dayanım oluşturmaktadırlar.

Bal peteği çekirdek yapıları sandviç yapılar, diğer malzemelere göre yapı yüklerini azaltmaları, üretim maliyetlerinin düşük ve dayanımlarının yüksek olması gibi avantajlardan dolayı kompozitler arasında ayrı öneme sahiptir (Bekem *et al.* 2011).

Sandviç yapıyı oluşturan alt ve üst yüzey plakalar ilk etapta çekme ve basma yüklerini taşırlar. Çekirdek yapıyı oluşturan bal peteği ise enine kesme yüklerini taşımakla birlikte ayrıca sandviç yapıya kalınlık verirler. Altıgen yapıdaki çekirdek yapı atalet momentinin ve her yöndeki eğilme rijitliğinin artırılmasına ve darbe enerjisinin emilimine de olumlu katkı sağlar (Asprone *et al.* 2013).

Bu çalışmada çekirdek yapısı Aramid malzemedен oluşan bal peteği yapısıyla alt ve üst yüzeyleri %0 CNT içeren, %1 CNT takviyeli ve %2 CNT takviyeli plakalardan oluşan sandviç yapılar incelenmiştir. Eğilme testine tabi tutulan sandviç yapıların cevabı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal çalışma Abaqus sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilmiştir ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Kompozit Malzemeler

Yapı malzemeleri incelendiğinde dört kategoriye ayırabiliriz bunlar; metaller, polimerler, seramikler ve kompozitlerdir. Kompozit malzemeler iki ya da daha fazla malzemenin makroskopik yapısal bir birimde birleştirilmesi ile oluşturulurlar. Eğer mikroskobik seviyede birleştirilmişlerse bunlara kompozit malzeme denilmez. En yaygın kullanılanları fiber kompozitlerdir.

İlk olarak Griffith 1920'de fiber yapıya sahip olan malzemelerin blok yapıda olan malzemelere nazaran daha esnek ve daha sağlam olduğunu gözlemlemiştir. Fiber kesit çapları azaldıkça yapısal çatlaklar daha az görülür. Fiberlerin lif uzama yönlerinde ki özellikleri daha iyiyken enine yöndeki özellikleri daha düşüktür. Fiber malzemelerin tek başlarına uzunlamasına sıkıştırma yüklerine dayanmaları zordur. Bunun için kesinlikle fiber malzemelere enine destek sağlanması, matris veya yapıştırıcı malzemeyle bir arada tutulması gerekmektedir.

Yüksek modüllü fiberler; grafit, silikon, karpit, aramid polimer, boran'dan yapılırlar. Yüksek modüle sahip olmaları ve yoğunluklarının düşük olmasından dolayı yapı ağırlıklarının önemli olduğu otomotiv ve uzay araçlarının yapımında kullanılırlar (Carbaş 2007).



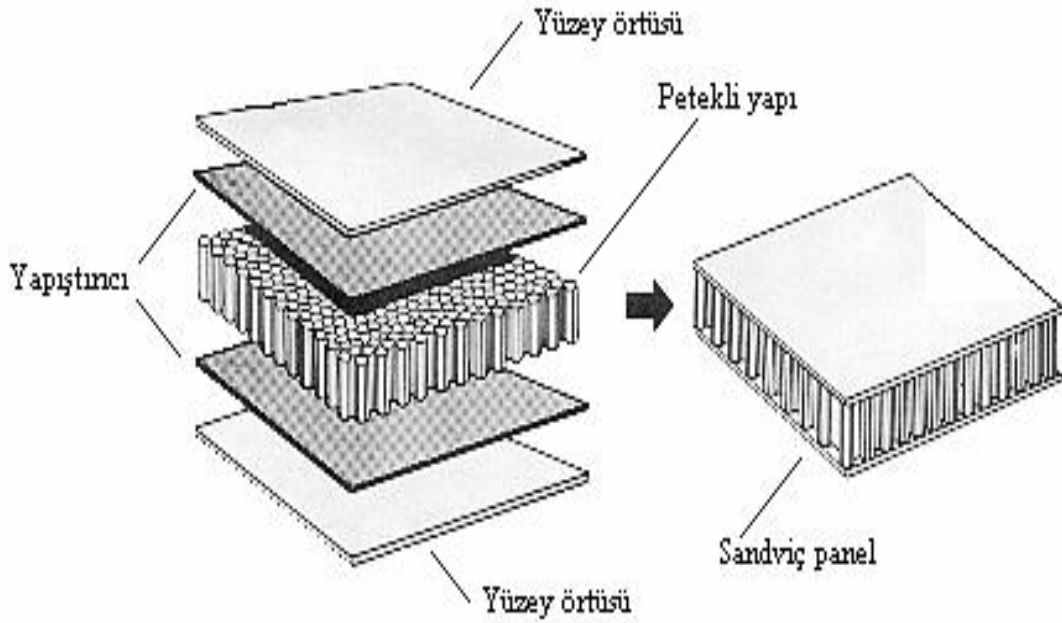
Resim 2.1 Kompozit Yapıların Kullanım Alanları.

Kompozit malzemeler kullanıldığı yerlerde mukavemet, sertlik, korozyon ve aşınma dirençlerinin iyileştirilmesi, korozyon aşınma dirençlerinin artırılması, yorulma ömrünün uzatılması, ısı ve akustik izolasyon özelliklerinin iyileştirilmesi gibi amaçlar için kullanılırlar. Bütün bunları yaparken de en temel amaç yapı yükünün ve kullanım alanında ki ağırlığın azaltılmasıdır.

Kompozit malzemeler genel olarak; lifli kompozitler; lamine kompozitler, parçacık kompozitler olmak üzere sınıflandırılabilir (Aydıncak 2007).

2.2 Sandviç Yapıların Kısımları

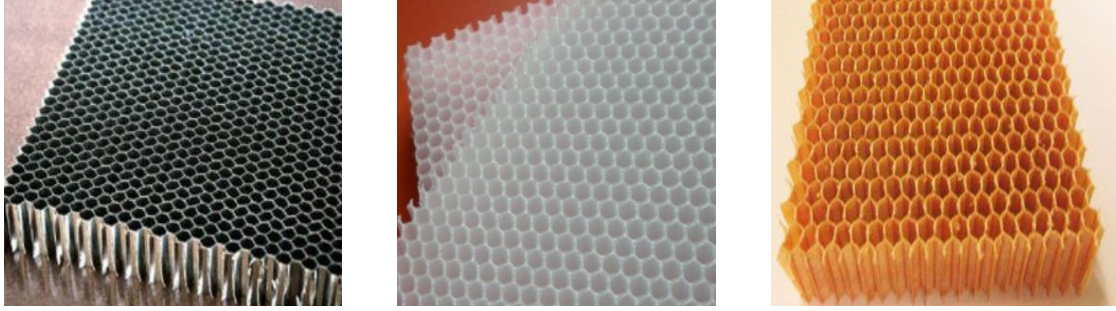
Sandviç yapılar çekirdek, yüzey örtüleri ve bunları birbirine bağlayan yapıştırıcılardan oluşur.



Resim 2.2 Sandviç Yapıyı Oluşturan Kısımlar.

2.2.1 Çekirdek Yapı

Çekirdek yapılar, iki ince yüzey örtüsü arasında kalan ve nispeten daha kalın olup yapıda dolgu elamanı olarak kullanılan hafif malzemelerdir. İzotropik malzeme ya da elyaf takviyeli kompozit lamine çekirdek malzemesi metal, aramid, polimer veya köpük malzemeden olabilirler (Chai *et al.* 2006). Genel olarak çekirdek malzemeleri, hücreli çekirdekler, oluklu çekirdekler ve petek çekirdekler şeklinde sınıflandırılabilir.



Resim 2.3 ekirdek Yapı Malzemeleri.

2.2.2 Yüzey Örtüsü

Sandviç yapıların yüzeylerinde kullanılan yüzey örtülerinin en önemli avantajları gelen kuvvetler etkisiyle oluşan aksenal, eğilme ve düzlemsel kaymaları taşımaktır aynı zamanda kuvvet etkisiyle gerekli bükülmeyi sağlamaktadır.

Sandviç yapılarda kullanılan yüzey örüntüleri alüminyum, elik, aramid, karbon, fiberglas gibi malzemelerden yapılabilmektedir.

2.2.3 Yapıştırıcılar

Kullanılan yapıştırıcıların amacı yüzey örtüsü ile çekirdek yapıyı birbirine bağlamaktır. Nitril-Vinil fenolik, epoksi bazlı, polyamid esaslı, üretan esaslı. gibi çok değişik yapıştırıcılar mevcuttur. Kullanılan yapıştırıcının sandviç yapıya gelen kuvvetin etkisiyle oluşan makaslama ve çekme gerilmelerini taşıması gerekmektedir.

2.3 Bal Peteği Yapısına Sahip Sandviç Yapılar

Bal arılarının yaptığı bal peteğinden esinlenilerek oluşturulan petekli kompozit yapılar 1940'dan sonra havacılık sektöründe ve uçak gövdelerinde kullanılmaya başlamıştır. Son yıllarda ise arabalarda, yarış teknelerinde, yarış bisikletlerinde, rüzgâr tribünlerinde başta olmak üzere birçok makine ve alet imalatında petekli yapılar kullanılmaktadır.

Çekirdek dediğimiz sandviç yapının orta kısmında bal peteği yapısı konulurken, alt ve üst yüzeylerine değişik malzemelerden yüzeyi örten plakalar konulup yapıştırılmasıyla oluşurlar.

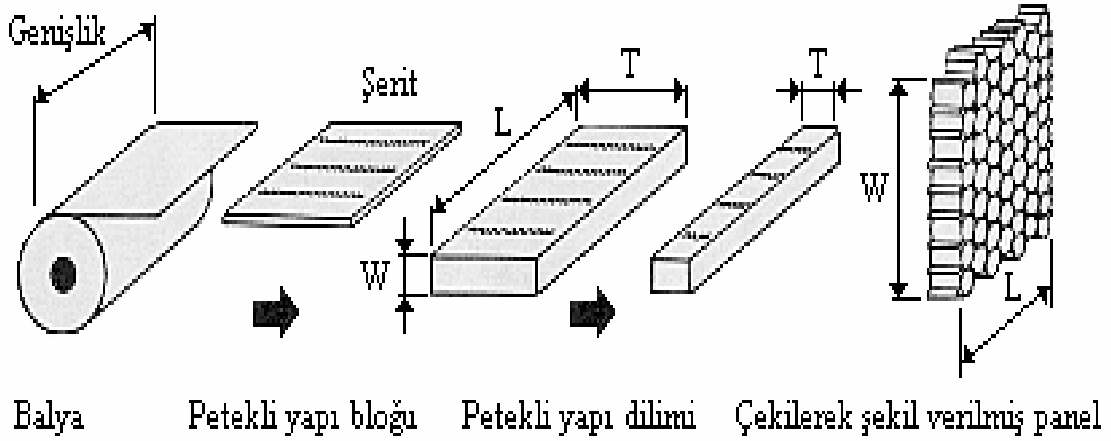
Bal peteği sandviç yapılar yüksek rijitliğe ve dayanım/ağırlık oranına sahipken aynı zamanda da oldukça düşük yapı ağırlığına sahiptirler (Arslan ve Kaman 2002).

2.4 Petekli Yapı Üretim Yöntemleri

Genel anlamda petekli yapıların üretiminde iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; Uzatarak Şekil Verme, Kıvrırma yöntemi.

2.4.1 Uzatarak Şekil Verme Yöntemi

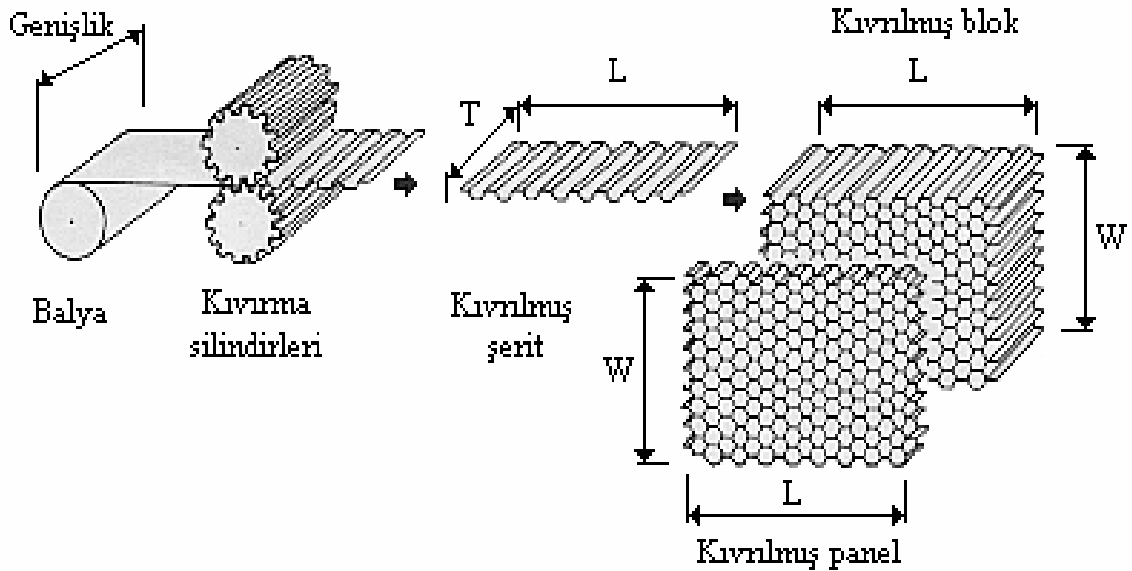
Metal ve metal olmayan petek yapıların birçoğu bu yöntem kullanılarak imal edilmektedir. Bu yöntemlerden biride uzatarak Şekil verme yöntemidir. İmalatta kullanılacak olan levhalar üst üste dizilirler. Levhaların arasına uygun özellikte yapıştırıcı sürülür. Levhalar istenilen kalınlığa uygun sayıda üst üstte dizilir. Petekli yapı bloğu uygun sıcaklıkta presten geçirilir.



Resim 2.4 Uzatarak Şekil Verme.

2.4.2 Kıvrılarak Şekil Verme Yöntemi

Bu yöntemle yoğunluğu ve et kalınlığı fazla olan petekli yapılar imal edilir. İlk olarak şerit halinde ki levhalar uygun profil de kıvrılarak oluşturulur. Bağlantı yapacak temas noktalarına yapıştırıcı sürülür. Son olarak levhalar üst üste konularak bloklar elde edilip daha sonrada istenilen kalınlıkta bu bloktan dilimler çıkartılır.



Resim 2.5 Kıvrılarak Şekil Verme.

2.5 Literatürde Sandviç Malzemelerle Yapılan Çalışmalar

Aktay ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada alüminyum ve nomex yapıya sahip bal peteği sandviç yapıların duvar kalınlıkları ve hücre büyüklüklerinin enine ezilme davranışlarına etkisi incelenmiştir. Bu incelemede deneysel çalışmalarla birlikte yine SEM yöntemi ve yarı adaptif sayısal kavrama kullanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bal peteği yapısının duvar kalınlığı arttıkça oluşan deplasmanın azaldığı gözlemlenmiştir. Bal peteği yapısının duvar kalınlığı çift duvar olarak tasarlandığında tek duvar kalınlığına göre benzer bir Kuvvet-Deplasman eğrisi olduğu gözlenmiştir. Çift duvar kalınlığında oluşan deplasman miktarının tek duvar kalınlığında ki deplasmana nazaran daha az olduğu da tespit edilmiştir.

Bal peteği yapısının hücre büyüklüğü değiştirilmiş, test sonuçlarıyla ve sayısal nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hücre boyutu artırıldığında aynı kuvvet düzeyinde oluşan deplasmanın oldukça arttığı görülmüştür. Deneyler ile elde edilen sonuçlarla, yük-deplasman eğrileri sayısal model çalışmaları karşılaştırılmıştır.

Nümerik sayısal çalışmalar içerisinde homojenize ayırık yarı adaptif sayısal kavrama (SEM) metodu ile deneysel çalışmalar arasındaki korelasyon yüksek olmuştur (Aktay *et al.* 2012).

Abbadı ve arkadaşlarının çalışmada aramid ve alüminyum çekirdek esaslı sandviç yapıları dört nokta eğme testine tabi tutulmuşlardır. Yorulma dayanımları ve hasar analizleri incelenmiştir. Bal peteği çekirdek yapı değişik petek yoğunlukları ve petek hücre oryantasyonları (W ve L yerleşimi) değişik yönlerde petek yapı kullanıldığında ki bağlı Kuvvet-Deplasman durumları ve yorulma dayanımlarına bakılmıştır. Petek malzemelerin yoğunlukları artırıldığında malzeme dayanımlarının ve arttığı gözlemlenmiştir. Petek malzeme sertliğinin artmasının malzeme dayanımına ve sünekliğine olumsuz etki yaptığı gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak aramid ve alüminyum sandviç yapıdaki hücre yerleşim oryantasyonlarından L şeklinde yerleşim yapıldığında W yerleşimine göre dayanımın daha fazla olduğu görülmüştür. Özellikle alüminyum petek yapıda malzeme sertliğinden dolayı L yerleşiminin W yerleşimine göre dayanımın oldukça fazla olduğu görülmüştür (Abbadi *et al.* 2009).

Asprone ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda sandviç yapıyı oluşturan alt ve üst yüzey plakalar ilk etapta çekme ve basma yüklerini taşırlar. Fenolik reçine emdirilmiş nomex petekli sandviç basınç testine tabi tutularak hücre bazlı özellikleri incelemiştir. Ayrıca aynı sandviç yapı SEM ile modellenerek basınç kuvveti uygulaması sonrası değerler elde edilip deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada tek bir petek hücresinin duvar kalınlıklarının etkileri incelenmiştir. Daha çok lineer burkulma, burkulma yükleri ve burkulma sonrası hücre davranışları üzerinde durulmuştur.

Sonuç olarak oda sıcaklığında ve -55°C civarındaki sıcaklıklarda ve kuru durumda sandviç yapının sertliğinin artmasından dolayı basınç dayanımlarının arttığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak yüksek sıcaklıklarda, nem oranının fazla olduğunda sandviç plakaların dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Ayrıca aynı şartlar dahilinde yapılan deney ve SEM çalışmalarında hücre duvarı kalınlığında olabilecek değişikliklerin ortalama basınç dayanımında bariz değişiklikler sebep olduğu görülmüştür (Asprone *et al.* 2013).

Ahmad ve arkadaşları yapmış oldukları bu çalışmada bal peteği sandviç yapıların eğilme davranışlarını deneysel ve analitik olarak incelemiştir. Deneyde kullanılan sandviç yapının çekirdek kısmı alüminyum bal peteği yapıdan yüzey kısımları ise cam elyaf kompozit plakalardan oluşturulmuştur.

Deneysel ve analitik sonuçlar karşılaştırıldığında deneyde elde edilen sonuçlarda ki sapma değerlerinin teorik değerlerden daha fazla olduğu görülmüştür. Üç nokta eğme deneyi sırasında oluşan burkulma kuvvetinin yüzey tabakasından çekirdek kısmının ayrılmasına sebep olmuştur.

Deney numunelerinde testler sırasında oluşan başarısızlıkların çekirdek tabakanın bükülmesinden kaynaklanmıştır. Maksimum kırılma yükü sırasında oluşan standart sapma değerinin en yüksek olduğu görülmüştür (Ahmat *et al.* 2015).

Bezazi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada çekirdek kısmı nomex bal peteği yapısına sahip üst yüzeyleri karbon plakalardan oluşan sandviç yapı 3 nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Çalışmada çevrimsel olarak yorulma yüküne tabi tutularak sandviç yapının yorulma davranışları incelenmiştir. Deplasman miktarı olarak arıza yükünün % 60 kadarlık kısmı olacak şekilde deneye tabi tutulmuştur. Yorulma testleri, yükleme seviyesi ve sertlik derecesi olmak üzere üç farklı faz kullanılmıştır. Sertlik bozulmasının değerlendirilmesinde deneysel verilerle amprik fonksiyonların interpolasyonu kullanılmıştır.

Sonuç olarak üst yüzeyle deri arasında deliminasyon gözlemlenmiştir. Sandviç yapıdaki hasarın çekirdek yapıdan kaynakladığı ve yüzeyde sertlik bozulmalarının olduğu görülmüştür (Bezazi *et al.* 2014).

Chai ve arkadaşları yaptıkları çalışmada sandviç panel aramid esaslı petek malzemesi normal şerit halindeyken ve petek yapı haline getirildikten sonra çekme testine tabi tutulmuşlardır. Yapının elastisite modülü, uzama, Mak. Dayanım gibi malzeme özellikleri elde edilmiştir ve petek yapısı basma testine tabi tutulmuştur. x, y ve z yönlerinde ki elastisite modülleri ve dayanım değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca yapılan çalışmalar SEM ile modellenerek simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak E11 ve E22 yönlerindeki dayanımların deney sonuçlarıyla Sem sonuçları arasında benzerlik görülürken Z yönü, E33 yönünde farklılıklar görülmüştür. E33 de elde edilen değerlerin farklı olmasının nedeni iki farklı şekilde açıklanmıştır. Bunlardan bal peteği yapının boyut farklılığı ile teorik denklemin izotropik yapı gibi düşünülmüştür halbuki nomex malzemesi anizotropiktir (Chai *et al.* 2007).

Chang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, alüminyum petek sandviç yapıların dört nokta eğilme testine tabi tutularak yorulma ömürleri üzerinde çalışılmıştır.

Ayrıca SEM metoduyla petek yapıyı oluştururken kullanılan yapıştırıcı boyutları dikkate alınarak yerel gerilme-zorlanmalar tespit edilmiştir. Ayrıca küresel parametreler kullanılarak yapı malzemelerinin temel teorileri kullanılmıştır.

Yorulma dayanımlarının tespitinde kiriş içi nispi yoğunluklarının arttığı gözlemlenmiştir. Petek ile üst yüzey arasındaki bağ açma durumunun sonuçları yorumlamada hataya sebep olmaktadır. Küresel parametrelerle eğilme gerilmesi ile kesme kuvveti arasında ilişki olduğu görülmüştür. Ancak yapılan çalışmalarda yapıştırıcı eklemlerinde ki yorulmanın öngörülmesinde çalışma yeterli olmadığı vurgulanmıştır (Chang and Jen 2008).

Crupi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda 2 farklı alüminyum petek sandviç tipolojisi kullanılmıştır. Bunlar petek boyutu olarak $d = 3$ mm ve $d = 6$ mm dir. Çalışmada enerji dengesi modeline dayalı sandviç yapı ve bir teorik yaklaşım uygulanmıştır. Petek yapının hasar durumu 3D bilgisayarlı tomografi kullanarak elde edilmiştir. Oluşturulan sandviç yapılar üç nokta eğme testleri farklı mesnet açıkları olacak şekilde tekrarlanarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak çökme teorik değerleri ile yapılan deney sonuçları kıyaslanmıştır. Alüminyum petek sandviç yapıların mesnet açıklıkları arttıkça eğilme dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Yine hücre boyutu küçüldükçe değişen mesnet açıklarında sandviç yapıların absorbe ettikleri enerji miktarları da azalmaktadır. Eğilme kuvvetinin etkisiyle 3 nokta eğme testinde oluşan düşük darbe hızı etkisine bağlı deplasmanda azalma gözlemlenmiştir (Crupi *et al.* 2012).

Choi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda petek yapıyı oluşturmada kullanılan nomex kâğıdı ilk etapta çekme testine tabi tutulmuştur. nomex kâğıdının fiber ve fibere dik yön için elde edilen elastisite modülleri ve dayanımları bulunmuştur. Daha sonra da petek yapı haline getirilip tekrar çekme testine tabi tutulmuş ve elastisite modülü, dayanım özellikleri tespit edilmiştir. Sonra Aramid esaslı petek yapıdan oluşturulan sandviç yapı basma testine tabi tutulmuştur.

X, Y ve Z yönlerindeki elastisite modülleri ve dayanım değerleri bulunmuş ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca yapılan çalışmaların SEM ile modellenerek simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

Sonlu elemanlar kullanılarak X22, X11 ve X33 yönünde uygulanan kuvvetler sonucunda oluşan Kuvvet-Uzama diyagramları bulunmuştur. X33 de elde edilen değerlerin diğer yönlere ait değerlerden farklı olduğu görülmüştür. X33 yönündeki test değerlerinin farklı olmasının nedeni iki farklı şekilde açıklanmıştır. Bunlardan biri, bal peteği yapının boyut farklılığıdır. Diğerisi ise teorik denklemin izotropik yapı düşünülerek elde edilmesidir hâlbuki nomex malzemesi anizotropik yapıdadır (Choi *et al.* 2007).

Choi ve arkadaşları yaptığı çalışmada nomex kâğıt malzeme çıkarılan numune ve Fenolik reçineden oluşturulan deney numunesi ayrı ayrı çekme testine tabi tutulmuştur. Çekme testi sonucunda oluşan gerilmeler, elastisite modülü ve uzama değerler kaydedilmiştir. Sonra nomex kâğıt fenolik reçine ile kaplanmış ve çekme testine tabi tutulmuştur. Fenolik reçine kaplı nomex kâğıt çekme testi sonucunda elde edilen değerlerin test sonuçları kaydedilmiştir.

Fenolik reçine kaplı nomex malzeme çekme testi sonuçları incelendiğinde, fenolik reçinenin etkisiyle lineer bir gerilme-% uzama eğrisi ortaya çıktığı gözlenmiştir. SEM ile nomex kâğıt malzeme, fenolik reçine numunesi ve fenolik reçine kaplı nomex oluşan numuneler modellenmiştir.

SEM ile oluşturulan bütün bu numuneler programda çekme testine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarıyla SEM ile yapılan analiz sonuçları karşılaştırıldığında aralarında yüksek bir korelasyonun olduğu gözlemlenmiştir (Choi *et al.* 2014).

Cuia ve arkadaşları bu çalışmada alüminyum çekirdek yapıları sandviç yapılarla nomex çekirdek yapısına sahip sandviç yapıları üç nokta eğme testine tabi tutmuşlardır. Ayrıca bu petek yapıları SEM yöntemiyle modellenerek nümerik analiz yapılmıştır.

Burada özellikle petek yapıyı oluşturan üst yüzey, çekirdek ve petek yapıyı oluşturan alt yüzeyde oluşan gerilmeler üzerinde durulmuştur. Buna göre yükleme alanı referans alındığında gerilme değerlerinin üst yüzey, çekirdek ve alt yüzey arasında giderek azaldığı gözlemlenmiştir.

Üst yüzeyde ve üst yüzey ile petek yapı arasında yükleme alanının her iki yanında çatlaklar ve yırtıklar gözlemlenmiştir. Alt yüzeyde ise bu durum çok daha azdır. Yine metal petek yapıları sandviç yapılara nazaran nomex yapıları sandviç yapıların çok daha yüksek eğilme dayanımlarına sahip olduğu gözlemlenmiştir (Cuia *et al.* 2015).

Es-Said ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada nomex çekirdek yapıya sahip sandviç yapı teorik modellenmesi yapılmıştı. Basit mesnetli kiriş gibi modellenen sandviç yapı iki noktadan yük uygulanarak eğilmeye tabi tutulmuştur. Sandviç yapıyı belirli bir eğilme miktarı için oluşturduğumuzda çekirdek yapı incelenmiştir. Belirli bir eğilme miktarı oluşturduğumuzda ortaya çıkan kritik kayma gerilmeleri ve burkulma gerilmeleri üzerinde durulmuştur (Es-Said *et al.* 2008).

Dash ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada dikişli çekirdek kısmı köpük sandviç yapılar üç nokta eğilme özellikleri incelenmiştir. Dört farklı çekirdek arası dikiş yönlenmesi üzerinde durulmuştur. Bunlar 90° , 45° , $90^\circ/45^\circ/90^\circ$ ve de $90^\circ/45^\circ$ dir. Sandviç yapının alt ve üst yüzeylerinde cam elyaf takviyeli ve çift yönlü dokumalı yüzeyler kullanılmıştır. Farklı açılarda oluşturulmuş modifiye edilmiş kilitleme dikiş yönleri kullanılarak yüzeyler birleştirilmiştir.

Deney sonrasında $90^\circ/45^\circ/90^\circ$ dikiş yönlenmesiyle birleştirilmiş yapıların eğilme rijitliklerinin diğerlerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Sadece yapıştırılmış dikişsiz kompozitlerle dikişli kompozit yapılar karşılaştırıldığında dikişli kompozit yapıların eğilme dayanımlarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Sandviç yapıdaki çekirdek kısmını dolduran köpük malzemenin hafiflik sağladığı ayrıca rijitliği arttırdığı görülmüştür.

Deneysel çalışmalarda ki yetersizlikler gerçek mühendislik çalışmalarında farklı yüzey tabakaları kullanılarak giderilebileceği tespit edilmiştir. Değişik ve daha mukavemetli yüzey tabakaları kullanıldığında eğilme dayanımlarında daha iyi bir performans elde edilebileceği vurgulanmıştır (*Dash et al. 2012*).

Freund ve Karakoç yaptığı çalışmada nomex çekirdekten oluşan ve farklı malzeme yönelimlerine sahip ortotropik sandviç yapıları tek eksenli çekme deneyine tabi tutmuşlardır. Gerilmenin dış yükleme durumları ile çekirdek geometrileri arasındaki bağlantısı araştırılmıştır. Yapılan deney sonuçları ile en küçük kareler metodu çalışmasıyla yapılan analitik sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. İdeal sandviç dayanımları için hücre geometrisinin nasıl olması gerektiği üzerinde araştırma yapılmıştır. Lineer elastik sınırlar ve yük uygulama sırasında nomex yapıdaki yer değiştirmeler analiz edilmiştir. Hücre yapısı hücre köşe açısı, duvar kalınlığı ve uzunluğu faktörlerine bakılmıştır. Hücre köşe açısı ve duvar kalınlığının hücre yapısı ve geometrisi açısından bakıldığında en etkili parametreler olduğu anlaşılmıştır (Freund and Karakoç 2012).

Freund ve arkadaşları bu çalışmada sandviç petek yapıların hücre geometrisindeki değişikliklerin etkileri istatistiksel simülasyon modeli etkin düzlem uyum matrisleri kullanarak incelenmiştir. Mikromekanik model, dış yükler, sınır koşulları ve simülasyonlar üzerinden durulmuştur. Deney, SEM metodu ve istatistiksel yaklaşımlar kullanılmıştır. Özellikle petek yapıdaki hücre genişliği, duvar kalınlığı ve bunların birbirlerine orantılarının etkileri incelenmiştir.

Bu özelliklerden petek köşe açısı, hücre duvar kalınlığının yüksekliğine oranının sandviç yapının dayanım özelliklerine etkisinin büyük olduğu vurgulanmıştır. Deney numunesinin mesnetler arası yerleşimi, deney cihazı ve numune arasında oluşabilecek eksantrik yüklemeler hata kaynakları olarak görülmüştür (Freund *et al.* 2013).

Gilioli ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarda sandviç panel üzerinde üç nokta eğme testi yapılarak yine FEM metoduyla sanal ortamda yapılan deneyler karşılaştırılmıştır. Modelleme için bal peteği ve yüzey yapısı Kabuk Model olarak düşünülmüştür.

Sandviç yapının çekirdek kısmında malzeme özellikleri olarak HRH 10-3/16-2 olan 32 kg/m³ özgül ağırlığa sahip nomex balpeteği kullanılmıştır. Sandviç yapıyı oluşturan alt ve üst yüzeyde ise AL2024-T3 malzemesi kullanılmıştır.

Yapılan üç nokta eğilme testi ile SEM kullanılarak oluşturulan modelin kuvvet-yer değiştirme eğrileri birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Benzer karşılaştırma yapının absorbe ettiği enerji değeri içinde yapılmıştır. Sandviç yapıya yük uygulandığında sırada oluşan deformasyon fotoğraflanmış ve SEM ile elde edilen simülasyon sonuçları karşılaştırmıştır. Deney sonuçları ile nümerik sayısal çalışmaların uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Aynı çalışmada farklı sürtünme katsayılarında yapılan dinamik analiz simülasyonları ile deneysel çalışmada elde edilen hasar görüntüleri karşılaştırılmıştır. Sürtünme katsayısı olmayan ve sürtünme katsayısı 0,3 ve 0,6 olan SEM ile yapılan simülasyonlar da elde edilen kuvvet-deplasman grafikleri, deneysel çalışma ile yapılan eğri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca aynı çalışmada sürtünmesiz modelin ve deneysel çalışmaların absorbe ettikleri enerji, maksimum kuvvet ve deplasman değerleri de verilmiştir.

SEM modellemeyle deney sonrasında elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, enerji emilim değerleri arasında SEM modellemedeki sonuçlarla test sonuçları arasında (%1.9) fark bulunmuştur. Maksimum kuvvette ise SEM modelleme ile test sonuçları arasında (%0.29) fark bulunmuştur.

Gerek Yük-Deplasman eğri sonuçları gerekse hasar oluşum görüntüleri açısından SEM modeli ve test sonuçları arasında korelasyonun oldukça iyi olduğu gözlemlenmiştir (Gilioli *et al.* 2012).

Guan ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada nomex bal peteği çekirdek yapıya sahip sandviç yapı çekme ve stabilize olarak kuvvet uygulanarak sıkıştırma testlerine tabi tutulmuştur. Sonlu elamanlar metoduyla yine bu test numunesi modellenmiş ve sonrasında hücre duvarı modeli çıkarılarak incelenmiştir.

Test sonuçlarında petek yapının çökme sebebinin fenolik reçinenin kırılma davranışı sonucunda olduğu görülmüştür. Reçine kaplamanın ayrıca petek yapının çökme mukavemet değerinde pozitif etkisi olmuştur. Enlemesine gelen yükün reçine kaplamada kırılma sebebinin olduğu gözlemlenmiştir. Nomex yapıda yük uygulama esnasında ezilme gerçekleştikten sonra kopma olayının olduğu görülmüştür. Reçine kırılma eğilimi rastgele olarak hücre duvarlarının ortasında olmuştur. Hücre duvarı çok ince olduğundan çekirdek eş değer gerilme mukavemetinin eş değer çökme gerilmesinden daha yüksek olduğunu gözlemlenmiştir. Petek hücre duvarının bükülmesi yerel kırılmalara sebep olmuştur (Guan et al. 2015).

Petras ve Sutcliffe nomex petek yapı ve deri yapıya sahip sandviç yapılar 3 nokta eğme testine tabi tutularak davranışları incelenmiştir. Sandviç yapıların yüksekliği boyunca oluşan dikey yer değiştirmelerin incelenmesi yapılmıştır. Teorik öngörülerle deneysel çalışmalar incelenerek temas kuvvetinin hangi yollarla çekirdeğe iletildiği incelenmiştir. Eğmeye tabi tutulan silindirik çapı ile sandviç deri ara yüzeyi arasında kontak yükünün oluştuğu görülmüştür (Petras and Sutcliffe 1999).

Şakar ve arkadaşları Sandviç kompozit yapıların serbest-serbest sınır şartlarındaki doğal frekansları deneysel ve nümerik olarak belirlenmiş ayrıca bu frekanslara karşılık gelen titreşim biçimleri araştırmıştır. Ayrıca sandviç yapıyı oluşturan alt ve üst yüzey kompozit tabaka özelliklerinin, (Tabaka sayısı, yönelme açısı gibi) ayrıca çekirdek malzemenin yüksekliğinin titreşim karakteristiklerine olan etkileri incelenmiştir. Nümerik analizler ANSYS paket programı ile yapılmıştır. Nümerik analizler parametrik olarak gerçekleştirilmiş, böylelikle sandviç yapının titreşim karakteristiğinde etkili olan en önemli parametreler elde edilmiştir. Titreşim karakteristiklerinin belirlenmesi, bilgisayar tabanlı çok kanallı bir analiz sistemi olan PULSE titreşim ölçüm sistemi ile yapılmıştır. Bu çalışmada, malzeme üzerinde belirli noktalardan darbe çekici ile tahrik kuvveti uygulanmış ve malzemenin titreşim cevabı ölçülerek aradaki transfer fonksiyonu ve modal analiz yardımıyla elde edilmiştir. Uygulanan tahrik kuvveti bir çekiç ile cevap ise Lazer Vibrometre ile ölçülmüştür.

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar yapılan nümerik analizler ile karşılaştırılmıştır. Sandviç model oluşturulurken bire bir gerçek bal peteği geometrileri kullanılmıştır.

Bu çalışmada bal peteği sandviç kompozit yapıların serbest titreşim analizi deneysel ve nümerik olarak yapılmıştır. Üretilen sandviç kirişlerin serbest-serbest ve ankastre-serbest sınır şartlarındaki doğal frekansları ve bunlara karşılık gelen titreşim biçimleri belirlenmiştir. Yapılan çalışmada sandviç yapıyı oluşturan alt ve üst kompozit levhaların fiber yönlenmelerinin ve çekirdek yüksekliğinin doğal frekanslar üzerinde en etkili parametreler olduğu belirlenmiştir. Sandviç yapıyı oluşturan levha kalınlıklarının da dinamik yüklemelere maruz sandviç kompozit yapıların tasarımında dikkat edilmesi gerekli parametreler olduğu gözlenmiştir (şakar and Bolat 2015).

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Çekme Testine Tabi Tutulacak Deney Numunelerinin Hazırlanması

İlk olarak sandviç yapının alt ve üst yüzeylerini oluşturacak %0 CNT içeren, %1 CNT takviyeli ve %2 CNT takviyeli plakaların malzeme özellikleri belirlenecektir. Plakalar düz dokumalı karbon fiber kumaşlardan üretilmiştir. Plakalar tek tabakalıdır [0/90]. Plakaların üretiminde genel laminasyon reçinesi olan Momentive L160/ H160 kullanılmıştır.

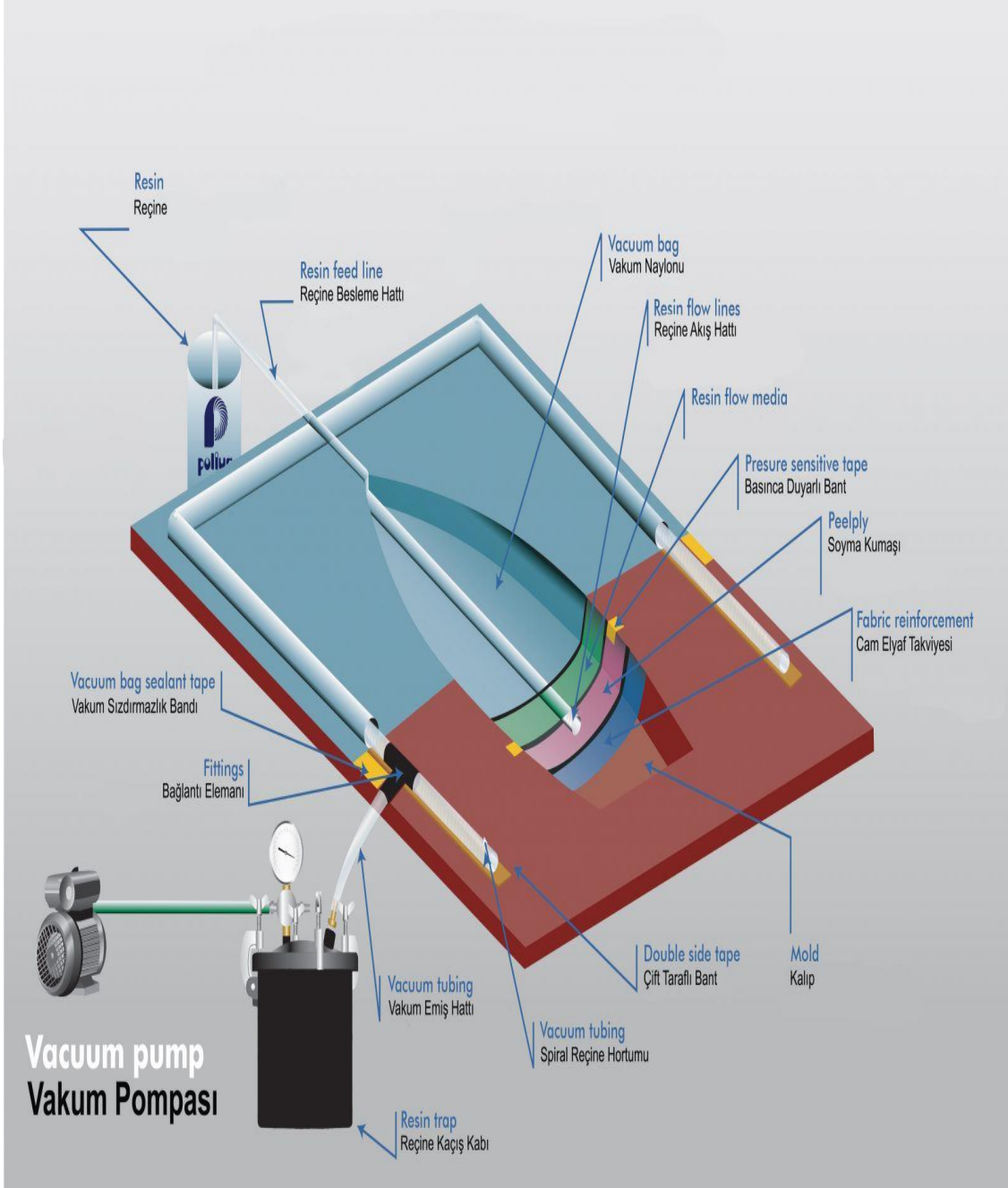
3.1.1 Karbon Plakaların Özellikleri Ve İmalatı

Sandviç yapının üst ve alt yüzeylerini oluşturan karbon plakalar Matris dediğimiz kısım ile karbon kumaş kısımlarının birleşiminden oluşmuştur. Bu iki malzeme biçim ve kimyasal özellikler bakımından birbirinden farklı olan ayrıca birbiri içinde çözünmeyen malzemelerdir.

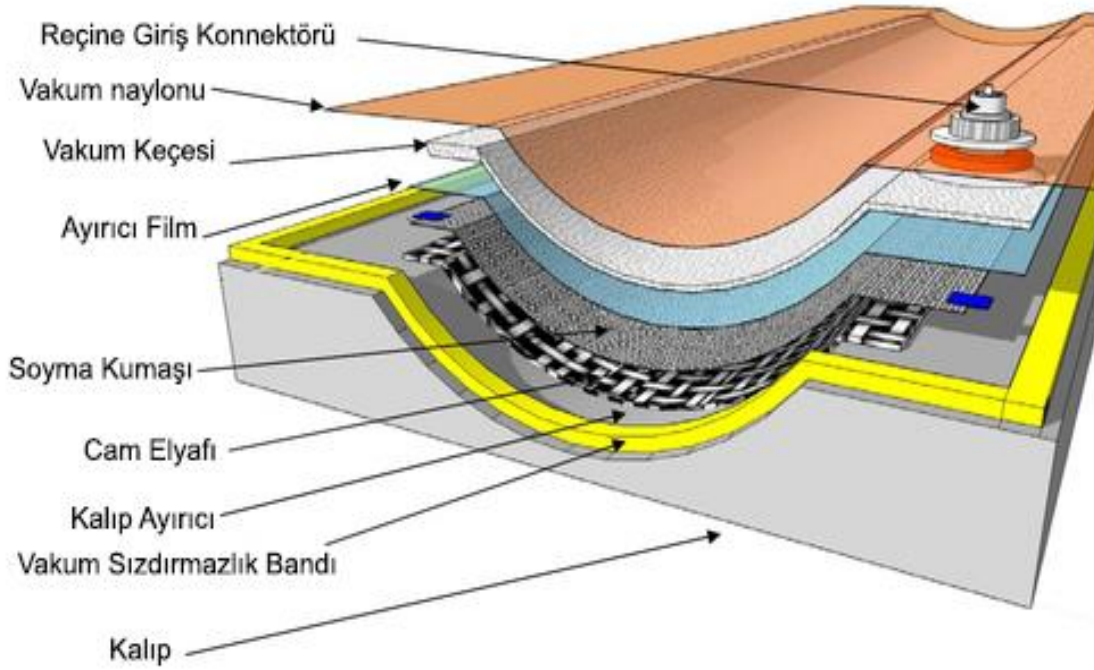
Matris, son ürüne şekil veren, takviye malzemesi olan karbon kumaşı bir arada tutup dış etkenlerden koruyan bir yapıya sahiptir. Matris ayrıca gelen yükü takviye malzemesi olan kumaşa ileten, tokluk, mukavemet, darbe gibi mekanik özellikleri iyileştiren kısımdır.

Karbon kumaş, matrisin içinde kalan ve kompozitin içinde yükün büyük bir kısmını taşıyan kısımdır. Takviye fazı olan bu kısım tanecik ya da elyaf formunda olabilir. Kompozitlerde ki mukavemet elyafın tipine, oranına yönelmesine ve dağılımına bağlıdır. Elyaf lar yükü lifler boyunca taşıyacağından kompozitin mukavemetli olabilmesi uygulanan yük elyaf lif uzanma yönüyle paralel olmalıdır. Yük farklı eksenlerden etki ederse kompozitte ki elyaf ların yönelmesi iki ya da üç boyutta olabilmektedir.

Karbon plaka yüzey tabakaları üretimi Atard A.Ş. ne, reçine infüzyonu yöntemi kullanılarak yaptırılmıştır. Karbon nanotüpler plakaların içinde tek duvarlı 5-9 nonometre boyut özelliklerine sahip karbon nano tüpler vardır. CNT ve reçine mekanik karıştırma yöntemi kullanılarak karıştırılmıştır. Elde edilen karışımdan vakumlama yapılarak köpüklenmesi giderilmiş ve infüzyona hazır hale getirilmiştir.



Resim 3.1 Vakum Destekli Reçine Transfer.



Resim 3.2 Vakum Destekli Reçine Transfer Kesit.

CNT takviyeli plakaların üretimi için %0 CNT içeren, %1 ve %2 oranlarında çok duvarlı CNT takviyesi reçine içine katılarak vakum destekli reçine transfer yöntemiyle üretilmiştir. Oda şartlarında kürlenme gerçekleştirilmiştir.



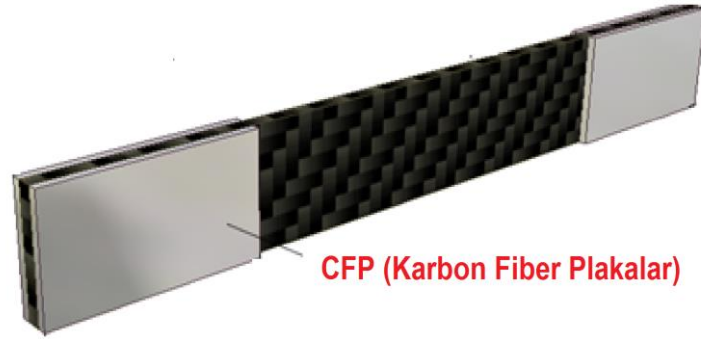
Resim 3.3 Sandviç Plaka.

Bu çerçevede ASTM 393 standartlarına uygun çekme testi yapılacaktır. %0 CNT içeren, %1 CNT takviyeli ve %2 CNT takviyeli plakaların her birinden 150x250 mm ebatlarında birer adet parça kesilmiştir. Kesilen bir parçadan 25x200 mm ebatlarında dörder tane şerit şeklinde test numuneleri çıkartılmıştır.



Resim 3.4 Nomex Kağıt Tabakası.

Çıkartılmış olan şerit test numunelerinin çekme test cihazına bağlanabilmesi için uç kısımlarına 25x50 ebatlarında ikişer adet CFP yapıştırılmalıdır. Bunun için 25x200 mm ebatlarında fiber plakalar 2x25x50 mm olacak şekilde dişsiz elektrikli testere ile kesilmiştir.



Resim 3.5 Karbon Fiber Plakalar (CFP).

Çekme test numuneleri ile CFP'ları birbirine yapıştırmak gerekmektedir. Yapıştırma işleminde epoksi bazlı 404 süper epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. 404 süper epoksi yapıştırıcı ikili karışım halinde bulunmaktadır. %0 CNT içeren, %1 CNT takviyeli ve %2 CNT takviyeli test numunelerinin her iki ucuna sekiz tabakadan oluşan toplam 2 mm kalınlığa sahip CFP yapıştırılmıştır. Yapıştırma sonrasında parçaların üzerlerine ağırlık konularak oda sıcaklığında kürlenmiştir.

% CNT içeren, %1 CNT takviyeli ve %2 CNT takviyeli plakalardan çıkartılmış her birinden dörder tane olmak üzere toplamda on iki adet test numunesi elde edilmiştir. Test numunelerine ait malzeme bilgilerinin çekme testi sonucunda tam olarak belirlenmesi önemlidir. Daha doğru sonuçlar alabilmek için her bir test numunesinin boyutsal özellikleri ayrı ayrı ölçülmüştür. Bu iş için her bir test numunesine kod verilmiştir.



Resim 3.6 Çekme Test Numunelerinin Kodlanması.

3.2 Eğme Testine Tabi Tutulacak Deney Numunelerinin Hazırlanması

İlk olarak oluşturacağımız bal peteği çekirdek yapısına sahip sandviç yapının alt ve üst plakaları elde edilmiştir. %0 CNT içeren, %1 CNT takviyeli ve %2 CNT takviyeli her bir plaka 300x400 mm ebatlarında ve her birinden ikişer adet olmak üzere kesilmiştir. Sonra oluşturacağımız sandviç yapının ortasında yer alan çekirdek yapı elde edilmiştir. Bu iş için ise rulo halinde bulunan aramid esaslı bal peteği tabakasından her biri 300x400 mm olacak şekilde üç adet parça kesilmiştir.

Sandviç yapıyı oluşturan malzemeler reçine bazlı bir yapıştırıcıyla yapıştırılmıştır. Bu yapıştırıcıyı elde etmek için Momentive L160 / H160 epoksi reçineden %75, katalizörden %25 olacak şekilde elektronik bir tartı yardımıyla tartılarak bir kaba konulmuş ve iyice karıştırılmıştır.

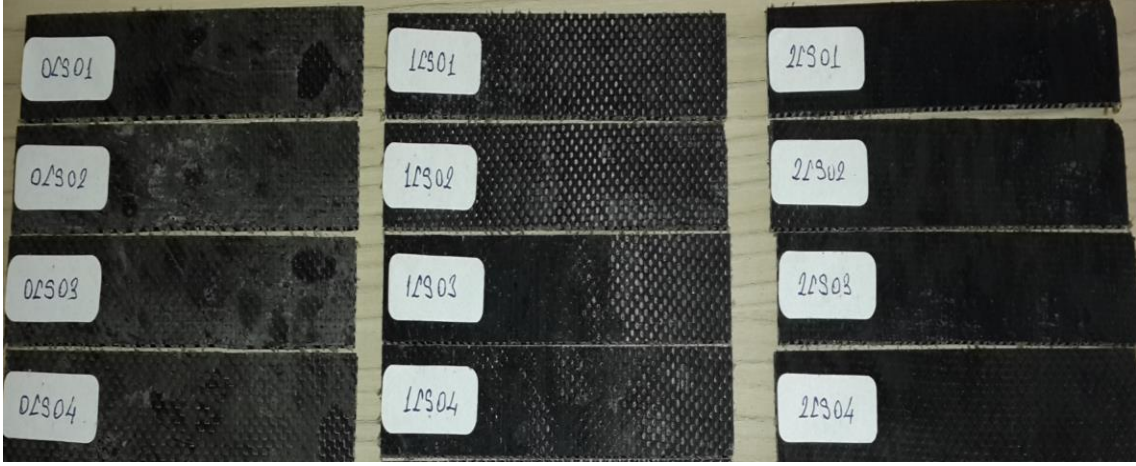
İlk olarak bal peteği yapısına sahip %0 CNT içeren sandviç yapı oluşturulmuştur. İki adet 300x400 mm ebatlarında olan plakadan biri alınarak sert bir tezgahın üzerine parlak yüzleri aşağı gelecek şekilde konulmuştur. Hazırlanmış olan reçine bazlı yapıştırıcı plakanın üstte kalan tüm yüzeyine bir fırça yardımıyla homojen bir dağılım sağlayacak şekilde sürölmüştür. Bu sırada 350x450 mm ebatlarında önceden hazırlanmış olan iki adet camdan ilkinin yüzeyi kalıp ayırıcı sürölmüştür.

Hazırladığımız bir yüzeyi reçine bazlı yapıştırıcı sürölmüş olan %0 CNT içeren plaka, kalıp yağıyla yağlanmış olan camın üzerine plakanın yapıştırıcı sürölü kısmı yukarıda kalacak şekilde konulmuştur. Önceden 300x400 mm ebatlarında hazırlamış olduğumuz aramid esaslı bal peteği plaka düzgün bir şekilde yapıştırıcı sürölerek yerleştirilmiştir. Yine aynı şekilde ikinci plakanın parlak yüzeyi üste gelecek şekilde diğer yüzeyine reçine bazlı yapıştırıcı homojen bir şekilde sürölmüştür. Yapıştırıcı sürölmüş yüzey bal peteği yapısının üzerine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. İkinici cam tabakanın yüzeyi yine kalıp yağıyla iyice yağlanarak kalıp yağı yağlı tarafı sandviç yapının üzerine gelecek şekilde konulmuştur. Oluşturulan sandviç yapının üzerine ağırlıklar konularak 60° sıcaklıkta ki etüv içerisinde yaklaşık 90 dk. kalacak şekilde kürlenmiştir.

Yukarıda anlatmış olduğumuz işlemler sırasıyla %1 CNT takviyeli ve %2 CNT takviyeli plakalar içinde tekrarlanarak toplamda üç adet 300x400 mm sandviç plaka oluşturulmuştur. Sandviç yapıları üç nokta eğme testine tabi tutabilmek için her bir sandviç yapıdan dörder adet 30x150 mm ebatlarında numune çıkarılmıştır. Numunelerin ebatlanması için elektrikli dişsiz testere kullanılmıştır.

Her bir sandviç yapıdan çıkartılan dörder adet numune eğme testine tabi tutulduğundan boyutlarının belirlenmesi önemlidir. Bunun için test numunelerinin her birinin boyutsal özellikleri ayrı ayrı ölçölmüştür.

Elde edilmiş olan ve üç nokta eğme testine tabi tutulacak olan test numunesine aşağıda göröldüğü gibi ayrı ayrı kodlar verilmiştir



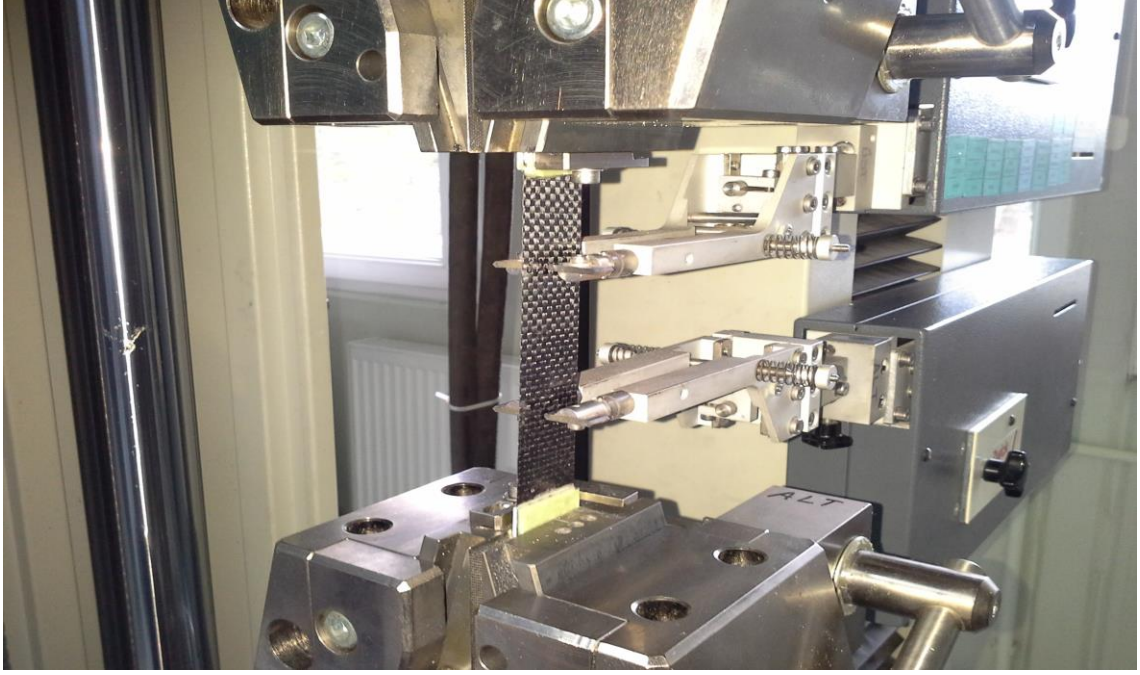
Resim 3.7 Eğme Testine Tabi Tutulacak Numuneler.

3.3 Test Metodolojisi

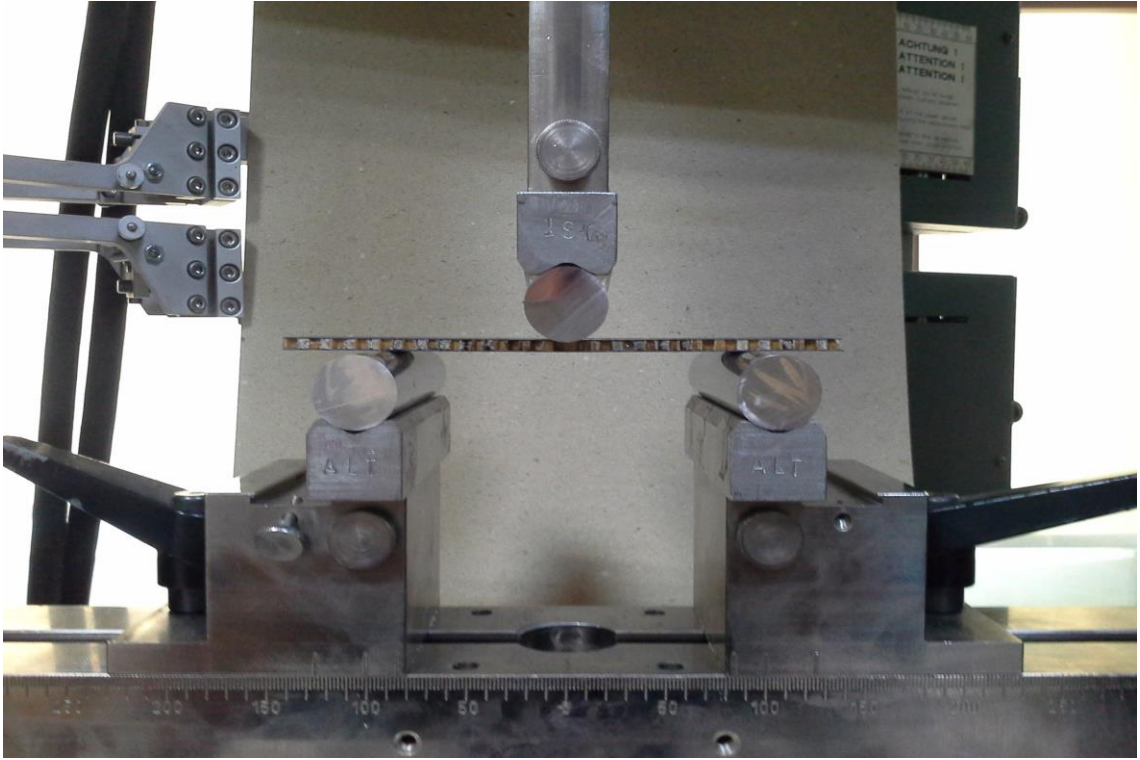
Deneylerde Zwick Z250 üniversal test cihazı kullanılmıştır. Yük okuma daha hassas olması için 5 kN yük hücresiyle yapılmıştır. Çekmede kullanılan numune ebatları **25x200 mm**, ekstansometre açıklığı $L_0= 50\text{mm}$ alınmıştır. Çekme test hızı 2 mm/dak. alınmıştır. Test cihazı yazılımı EN ISO 178'e uygun hesaplanmıştır. Elastisite modülü gerilme-genleme eğrisinde iki noktadan çizgi çekilerek bilgisayar tarafından hesaplanmıştır. Bu hesaplama sırasında çizginin lineer olmasını kontrol edildi. Tek noktadan tanjant olan m eğimi yerine iki noktadan lineer olan eğim çizgisi alınmıştır.

Eğmede gerilme ve elastisite modülü dikdörtgen kesitli numunenin tam orta noktasında sıfır olan üst kısımda basma, alt kısımda çekme olan bir gerilme kabul edildi. Bu durum ancak çok küçük eğilmelerde lineerdir. Bu yüzden eğme elastisite modülü ile çekme deneyleri sonucunda oluşacak elastisite modülleri fark edecektir. Ayrıca kompozit olmasından dolayı non-lineerlikler de olacaktır.

Her birinden dörder adet olmak üzere, %0, %1, %2 CNT'e sahip plakalardan on iki adet ve bu plakaların 45° açılı olarak kesilmiş şekilde olanlarından on iki adet olmak üzere yirmi dört adet çekme numunesi oluşturulmuştur. Her birinden dörder adet olmak üzere %0, %1, %2 CNT'e sahip alt ve üst kağıt plakalı, ortası nomex bal peteği yapıya sahip toplam on iki adet sandviç eğme numunesi oluşturulmuştur



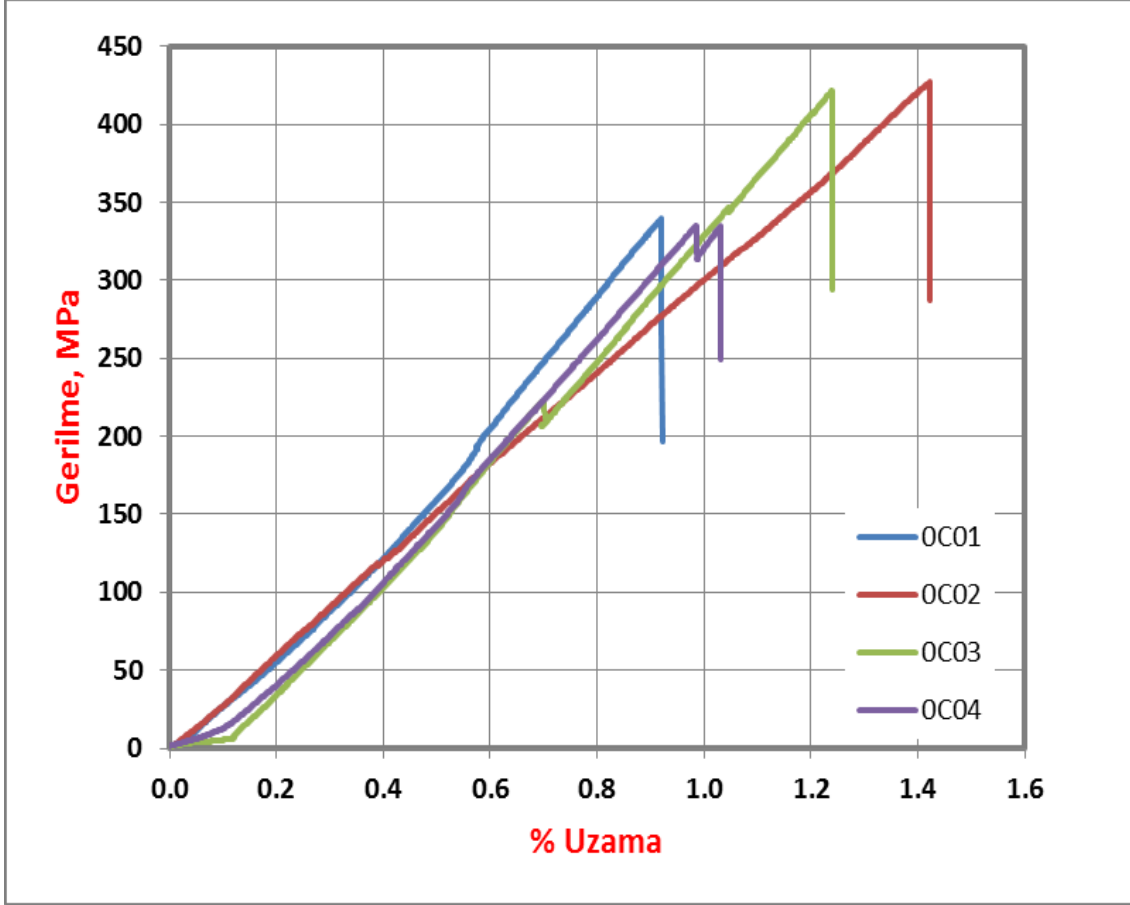
Resim 3.8 Çekme Test Cihazı.



Resim 3.9 Eğme Test Cihazı.

3.3.1 Çekme Testi

3.3.1.1 %0 CNT İçeren Çekme Testi Numuneleri



Şekil 3.1 %0 CNT İçeren Çekme Test Numunesinin Gerilme-%Uzama Diyagramı.

Çizelge 3.1 %0 CNT İçeren Numunelerin Çekme Testi Sonuçları.

<u>No</u>	<u>E Modülü (MPa)</u>	<u>Çekme Mukavemeti (Mpa)</u>	<u>%Uzama ϵ_M</u>
0C01	32576	339.8	0.3
0C02	32179	427.4	0.5
0C03	35104	421.3	0.3
0C04	34457	334.9	0.2
Ortalama :	33579	380.8	0.3

Şekil 3.1’de %0 CNT içeren dört adet test numunesi çekme testine tabi tutulmuş ve %Uzama-Gerilme grafikleri çizilmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 3.1’de özetlenmiştir. Buna göre ortalama elastisite modülü 33579 MPa çıkarken, ortalama çekme mukavemeti 380.8 MPa, ortalama yüzde uzamada %0.3 olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.2 %0 CNT İçeren Numunelerin Çekme Testi Sayısal Değerleri.

No	a0 mm	b0 mm	S0 mm²	L0 mm	E - Modülü MPa	Rm MPa	Rm N	A %
0C01	0.300	23.24	6,972	50.03	32576	339.80	2369	0.3
0C02	0.300	25.27	7,581	50.02	32179	427.40	3240	0.5
0C03	0.300	23.15	6,945	50.03	35104	421.30	2926	0.3
0C04	0.300	25.73	7,719	50.03	34457	334.90	2585	0.2

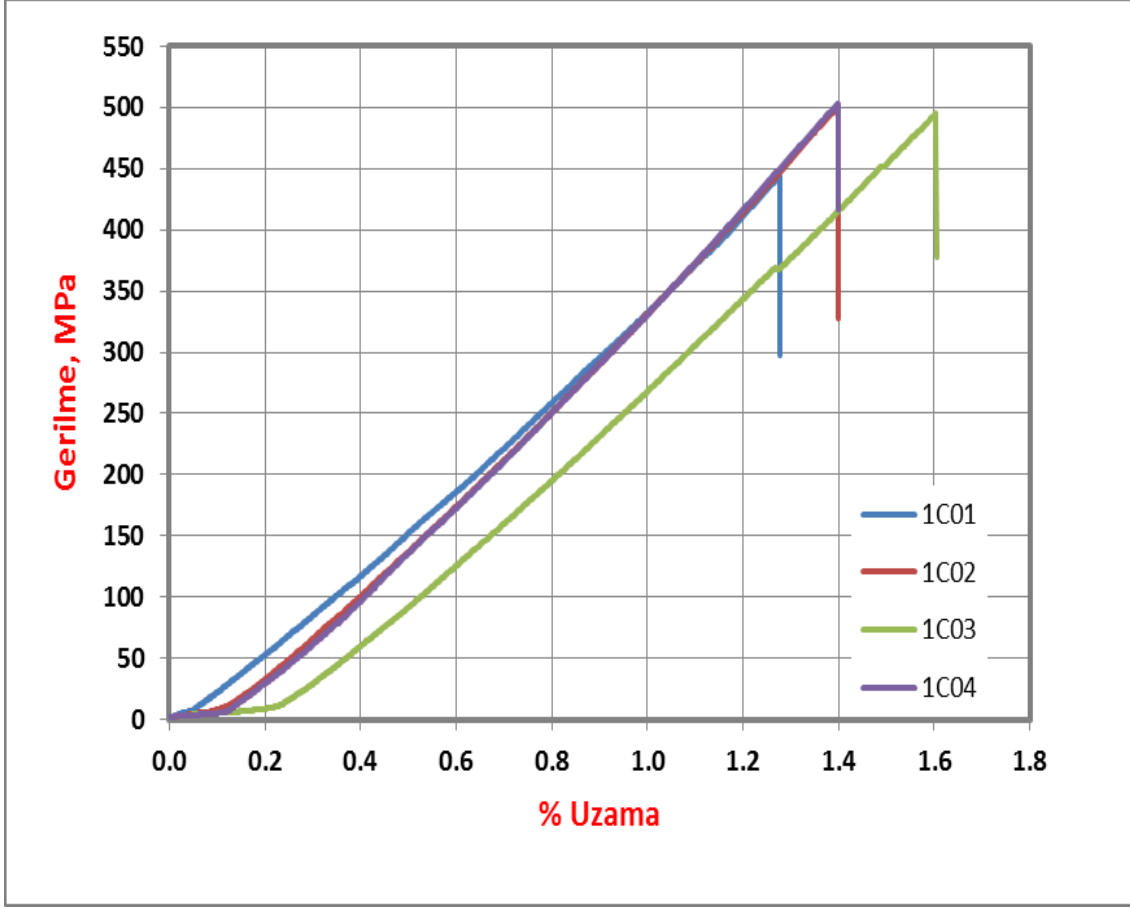
Çizelge 3.2’deki tablonun satır kısmında %0 CNT içeren dört adet çekme test numunesine ait sırasıyla kalınlığı, genişliği, çekme kuvvetinin etki ettiği kesit alanı, elastisite modülü tespiti için eksansometre mesafesi, elastisite modülü, maksimum gerilme, maksimum kuvvet ve yüzde uzama verilmiştir. Sütun kısmında ise test numunelerinin numaralandırmaları verilmiştir.

Çizelge 3.3 %0 CNT İçeren Numunelerin Çekme Testi İstatiksel Değerleri.

Seri n = 4	a0 mm	b0 mm	S0 mm²	L0 mm	E - Modülü MPa	Rm MPa	Rm N	A %
\bar{X}	0.300	24.35	7,304	50.03	33579	380.80	2780	0.3
min.	0.300	23.15	6,945	50.02	32179	334.90	2369	0.2
max.	0.300	25.73	7,719	50.03	35104	427.40	3240	0.5
R	0.000	2.58	0.774	0.01	2925	92.50	871	0.3

Çizelge 3.3’deki tablonun sütun kısmında %0 CNT içeren dört adet çekme testinin sonuçlarına ait Çizelge 3.2’deki verilerle ilgili değerlerin sırasıyla, ortalaması, minimum değer, maksimum değer, en büyük ve en küçük değer arasındaki fark verilmiştir.

3.3.1.2 %1 CNT Takviyeli Çekme Testi Numuneleri



Şekil 3.2 %1 CNT Takviyeli Çekme Testi Numunesinin Gerilme-%Uzama Diyagramı.

Çizelge 3.4 %1 CNT Takviyeli Numunelerin Çekme Testi Sonuçları.

<u>No</u>	<u>E Modülü (MPa)</u>	<u>Çekme Mukavemeti (Mpa)</u>	<u>%Uzama ϵ_M</u>
1C01	34244	444.1	0.4
1C02	36819	498.9	0.4
1C03	34604	494.9	0.3
1C04	37658	502.9	0.1
Ortalama :	35831	485.2	0.3

Şekil 3.2’de %1 CNT olan dört adet test numunesi çekme testine tabi tutulmuş ve % Uzama- Gerilme grafikleri çizilmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 3.4’de özetlenmiştir. Buna göre ortalama elastisite modülü 35831 MPa çıkarken, ortalama çekme mukavemeti 485.2 MPa, ortalama yüzde uzamada % 1.5 olduğu görülmüştür

Çizelge 3.5 %1 CNT İçeren Numunelerin Çekme Testlerindeki Sayısal Değerleri.

No	a0 mm	b0 mm	S0 mm²	L0 mm	E - Modülü MPa	Rm MPa	Rm N	A %
1C01	0.300	26.27	7,881	50.01	34244	444.10	3500	0.4
1C02	0.300	25.73	7,719	50.01	36819	498.90	3851	0.4
1C03	0.300	25.73	7,719	50.01	34604	494.90	3820	0.3
1C04	0.300	25.73	7,719	50.00	37658	502.90	3882	0.1

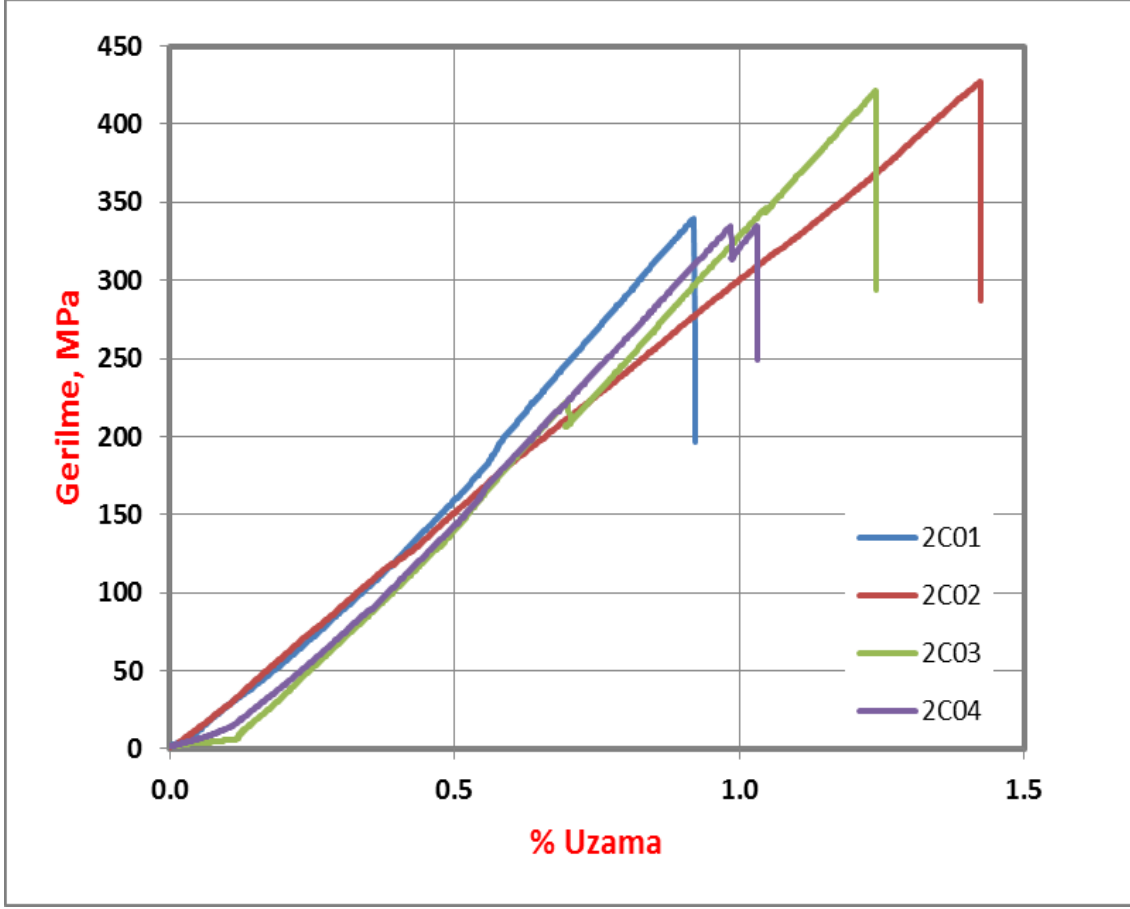
Çizelge 3.5’deki tablonun satır kısmında %1 CNT olan dört adet çekme test numunesine ait sırasıyla kalınlığı, genişliği, çekme kuvvetinin etki ettiği kesit alanı, elastisite modülü tespiti için eksansometre mesafesi, elastisite modülü, maksimum gerilme, maksimum kuvvet ve yüzde uzama verilmiştir. Sütun kısmında ise test numunelerinin numaralandırmaları verilmiştir.

Çizelge 3.6 %1 CNT Takviyeli Numunelerin Çekme Test İstatiksel Değerleri.

Seri n = 4	a0 mm	b0 mm	S0 mm²	L0 mm	E - Modülü MPa	Rm MPa	Rm N	A %
\bar{X}	0.300	25.87	7,759	50.01	35831	485.20	3763	0.3
min.	0.300	25.73	7,719	50.00	34244	444.10	3500	0.1
max.	0.300	26.27	7,881	50.01	37658	502.90	3882	0.4
R	0.000	0.54	0.162	0.01	3413	58.80	382	0.2

Çizelge 3.6’de ki tablonun sütun kısmında %1 CNT olan dört adet çekme testinin sonuçlarına ait Çizelge 3.5’deki verilerle ilgili değerlerin sırasıyla, ortalaması, minimum değer, maksimum değer, en büyük ve en küçük değer arasındaki fark verilmiştir.

3.3.1.3 %2 CNT Takviyeli Çekme Testi Numuneleri



Şekil 3.3 %2 CNT Takviyeli Çekme Testi Numunesinin Gerilme-%Uzama Diyagramı.

Çizelge 3.7 %2 CNT Takviyeli Numunelerin Çekme Testi Sonuçları.

<u>No</u>	<u>E Modülü (MPa)</u>	<u>Çekme Mukavemeti (Mpa)</u>	<u>%Uzama ϵ_M</u>
2C01	33103	365.1	0.4
2C02	40871	422.5	0.3
2C03	32874	269.8	0.2
2C04	39521	339.4	0.5
Ortalama :	36592	349.2	0.4

Şekil 3.3’de %2 CNT olan dört adet test numunesi çekme testine tabi tutulmuş ve % Uzama- Gerilme grafikleri çizilmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 3.7’de özetlenmiştir. Buna göre ortalama elastisite modülü 36592 MPa çıkarken, ortalama çekme mukavemeti 349.2 MPa, ortalama yüzde uzamada %0.4 olduğu görülmüştür

Çizelge 3.8 %2 CNT Takviyeli Numunelerin Çekme Testi Sayısal Değerleri.

No	a0 mm	b0 mm	S0 mm²	L0 mm	E - Modülü MPa	Rm MPa	Rm N	A %
2C01	0.300	25.01	7,503	50.01	33103	365.1	2740	0.40
2C02	0.300	23.59	7,077	50.00	40871	422.5	2990	0.3
2C03	0.300	24.40	7.32	50.01	32874	269.8	1975	0.2
2C04	0.300	25.27	7,581	50.00	39521	339.4	2573	0.5

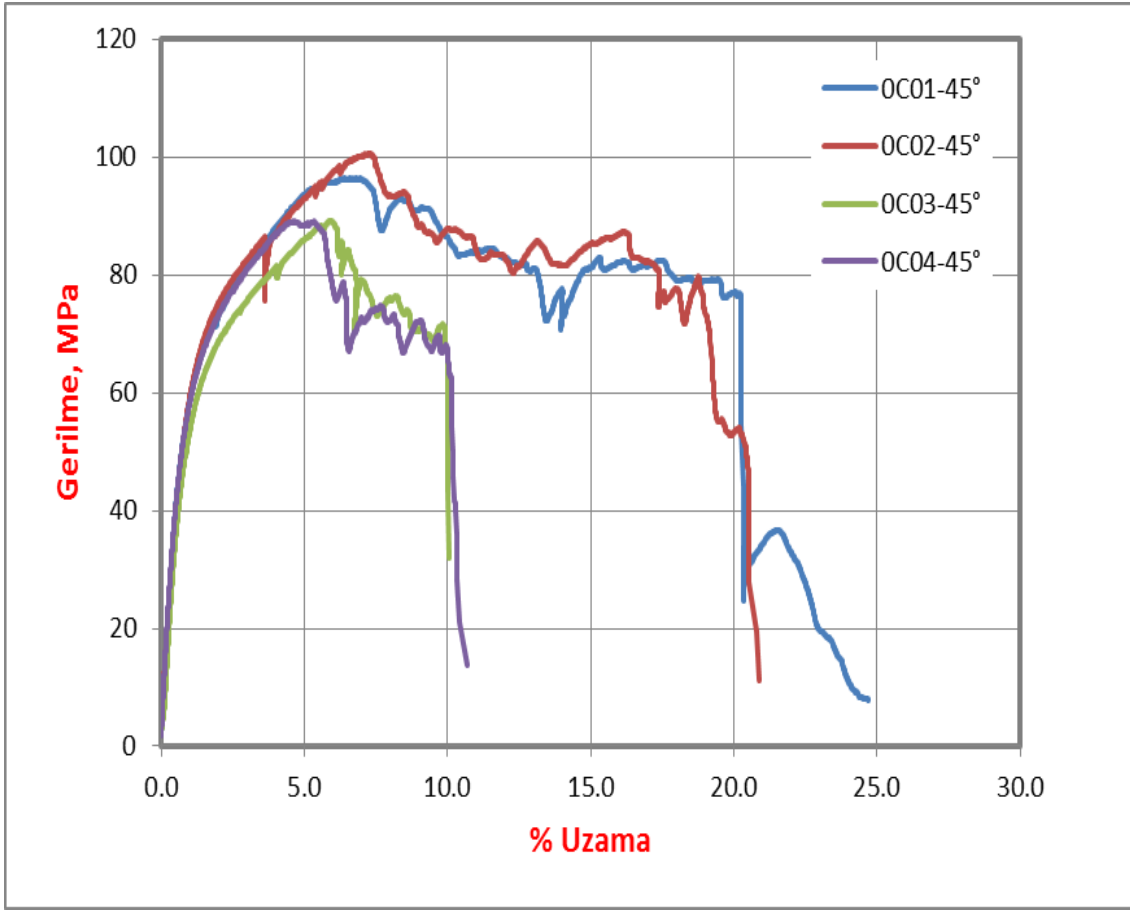
Çizelge 3.8’deki tablonun satır kısmında %2 CNT olan dört adet çekme test numunesine ait sırasıyla kalınlığı, genişliği, çekme kuvvetinin etki ettiği kesit alanı, elastisite modülü tespiti için eksansometre mesafesi, elastisite modülü, maksimum gerilme, maksimum kuvvet ve yüzde uzama verilmiştir. Sütun kısmında ise test numunelerinin numaralandırmaları verilmiştir.

Çizelge 3.9 %2 CNT Takviyeli Numunelerin Çekme Testi İstatiksel Değerleri.

Seri n = 4	a0 mm	b0 mm	S0 mm²	L0 mm	E - Modülü MPa	Rm MPa	Rm N	A %
\bar{X}	0.300	24.57	7.37	50.00	36592	349.2	2569	0.4
min.	0.300	23.59	7,077	50.00	32874	269.8	1975	0.2
max.	0.300	25.27	7,581	50.01	40871	422.5	2990	0.5
R	0.000	1.68	0.504	0.01	7997	152.7	1015	0.3

Çizelge 3.9’de ki tablonun sütun kısmında %2 CNT olan dört adet çekme testinin sonuçlarına ait Çizelge 3.8’de ki verilerle ilgili değerlerin sırasıyla, ortalaması, minimum değer, maksimum değer, en büyük ve en küçük değer arasındaki fark verilmiştir.

3.3.1.4 %0 CNT İçeren 45° Çekme Testi Numuneleri



Şekil 3.4 %0-45° Çekme Test Numunesi Gerilme-%Uzama Diyagramı.

Çizelge 3.10 %0 CNT İçeren (45°) Numunelerin Çekme Testi Sonuçları.

<u>No</u>	<u>E Modülü (MPa)</u>	<u>Çekme Mukavemeti (Mpa)</u>	<u>%Uzama ϵ_M</u>
0C01(45°)	9237	96.3	24.6
0C02(45°)	8673	100.6	20.8
0C03(45°)	8397	89.2	9.6
0C04(45°)	8745	89.0	10.6
Ortalama :	8763	93.	16.4

Şekil 3.11’de %0 CNT ve 45° açılı olarak çıkartılan dört adet test numunesi çekme testine tabi tutulmuş ve %Uzama-Gerilme grafikleri çizilmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 3.10’de özetlenmiştir. Buna göre ortalama elastisite modülü 8763 MPa çıkarken, ortalama çekme mukavemeti 93 MPa, ortalama yüzde uzamada %16.4 olduğu görülmüştür

Çizelge 3.11 %0 CNT İçeren (45°) Numunelerin Çekme Testi Sayısal Değerleri.

No	a0 mm	b0 mm	S0 mm²	L0 mm	E - Modülü MPa	Rm MPa	Rm N	A %
0C01-45°	0.300	26.27	7,881	50.00	9237	96.3	759	24.6
0C02-45°	0.300	24.89	7,467	50.00	8673	100.6	751	20.8
0C03-45°	0.300	25.51	7,653	50.00	8397	89.2	683	9.6
0C04-45°	0.300	25.01	7,503	50.01	8745	89.0	668	10.6

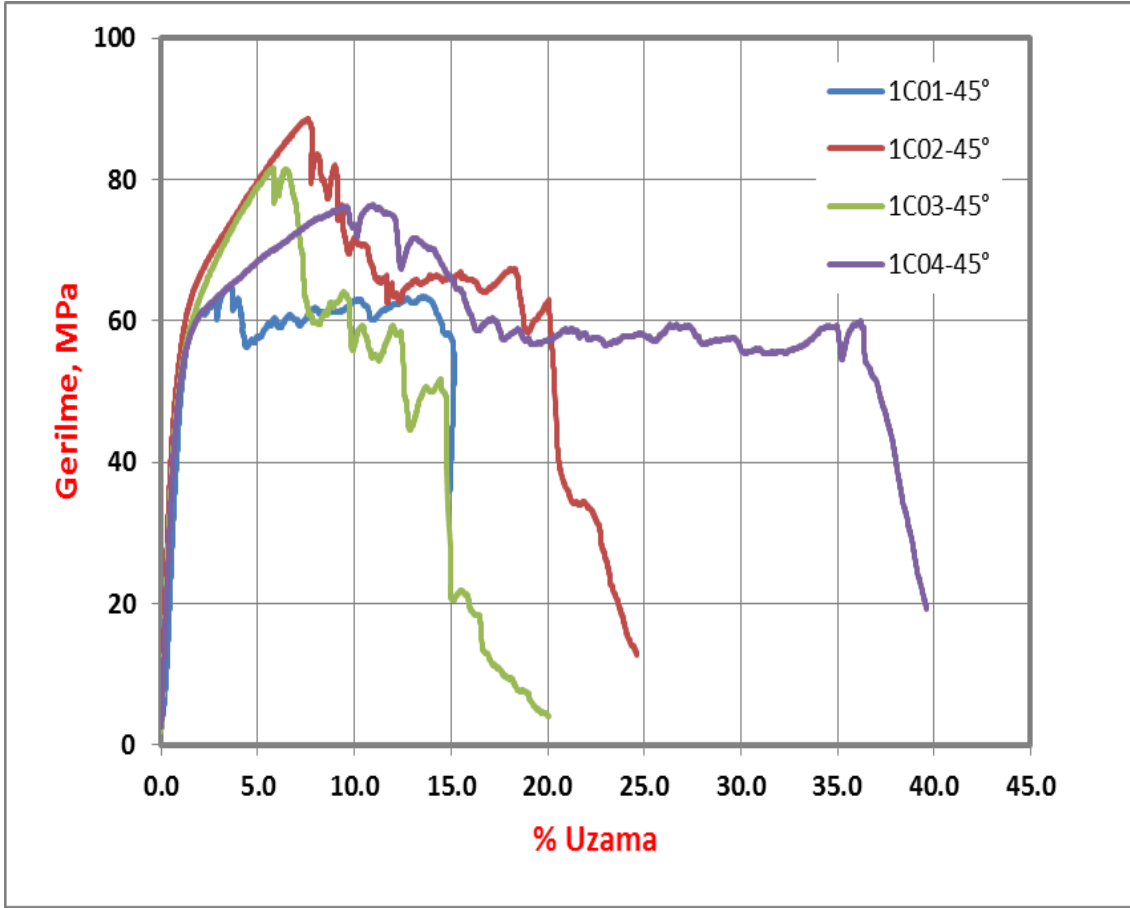
Çizelge 3.11’deki tablonun satır kısmında %0 CNT içeren ve 45° açılı çıkartılmış olan dört adet çekme test numunesine ait sırasıyla kalınlığı, genişliği, çekme kuvvetinin etki ettiği kesit alanı, elastisite modülü tespiti için eksansometre mesafesi, elastisite modülü, maksimum gerilme, maksimum kuvvet ve yüzde uzama verilmiştir. Sütun kısmında ise test numunelerinin numaralandırmaları verilmiştir.

Çizelge 3.12 %0 CNT İçeren (45°) Numunelerin Çekme Testi İstatiksel Değerleri.

Seri n = 4	a0 mm	b0 mm	S0 mm²	L0 mm	E - Modülü MPa	Rm MPa	Rm N	A %
\bar{X}	0.300	25.42	7,626	50.00	8763	93.8	715	16.4
min.	0.300	24.89	7,467	50.00	8397	89.0	668	9.6
max.	0.300	26.27	7,881	50.01	9237	100.6	759	24.6
R	0.300	1.38	0.414	0.01	840	11.5	91	15.0

Çizelge 3.12’deki tablonun sütun kısmında %0 CNT içeren ve 45° açılı çıkartılmış olan dört adet çekme testinin sonuçlarına ait Çizelge 3.11’deki verilerle ilgili değerlerin sırasıyla, ortalaması, minimum değer, maksimum değer, en büyük ve en küçük değer arasındaki fark verilmiştir.

3.3.1.5 %1 CNT Takviyeli 45° Çekme Testi Numuneleri



Şekil 3.5 %1-45° Çekme Test Numunesi Gerilme-% Uzama Diyagramı.

Çizelge 3.13 %1 CNT Takviyeli (45°) Numunelerin Çekme Testi Sonuçları.

<u>No</u>	<u>E Modülü (MPa)</u>	<u>Çekme Mukavemeti (Mpa)</u>	<u>%Uzama ϵ_M</u>
1C01(45°)	6348	64.7	14.2
1C02(45°)	9509	88.6	24.5
1C03(45°)	8096	81.6	20.0
1C04(45°)	7226	76.3	39.4
Ortalama :	7795	77.8	24

Şekil 3.5’de %1 CNT takviyeli ve 45° açılı çıkartılmış olan dört adet test numunesi çekme testine tabi tutulmuş ve %Uzama-Gerilme grafikleri çizilmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 3.13’de özetlenmiştir. Buna göre ortalama elastisite modülü 7765 MPa çıkarken, ortalama çekme mukavemeti 77.8 MPa, ortalama yüzde uzamada %24 olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.14 %1 CNT Takviyeli (45°) Numunelerin Çekme Testi Sayısal Değerleri.

No	a0 mm	b0 mm	S0 mm²	L0 mm	E - Modülü MPa	Rm MPa	Rm N	A %
1C01-45°	0.300	24.32	7,296	49.99	5532	64.7	472	14.2
1C02-45°	0.300	25.41	7,623	50.01	9771	88.6	675	24.5
1C03-45°	0.300	23.71	7,113	50.02	8112	81.6	580	20.0
1C04-45°	0.300	23.35	7,005	50.02	7226	76.3	535	39.4

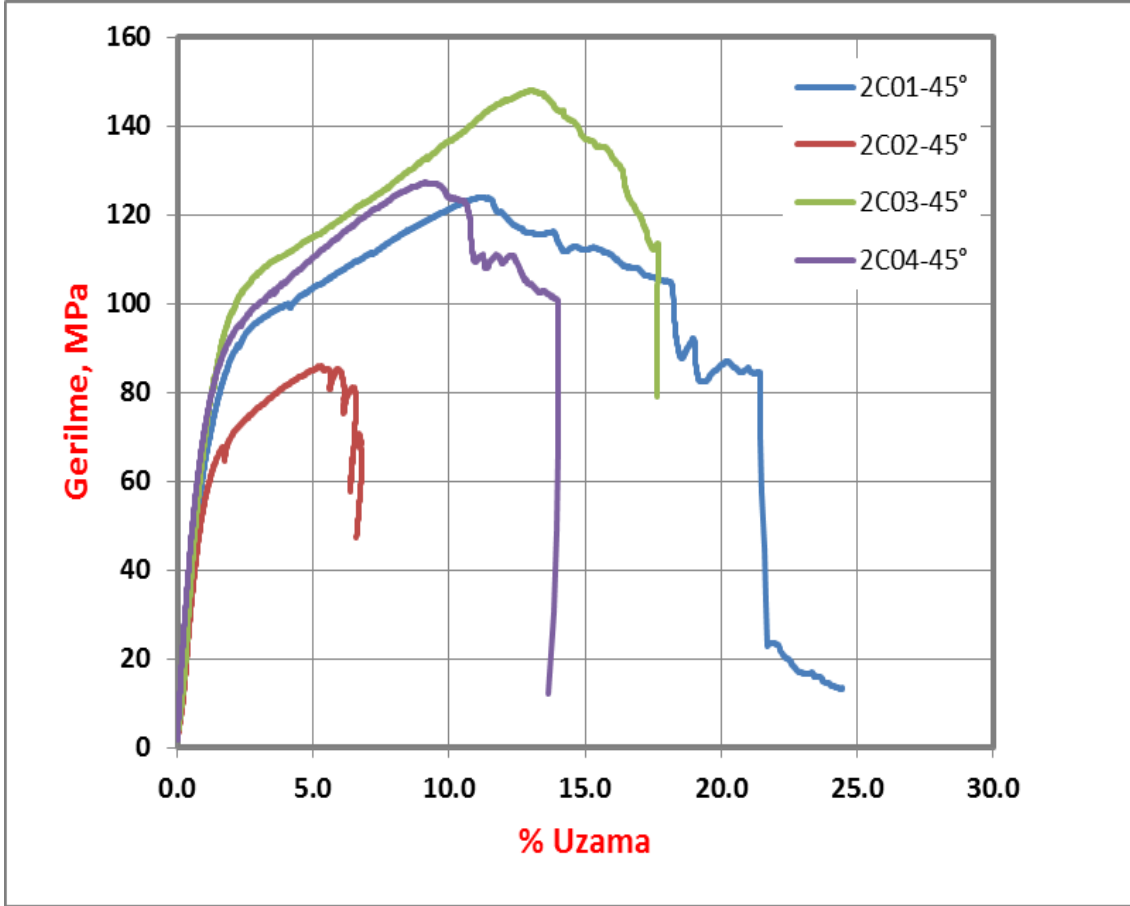
Çizelge 3.14’deki tablonun satır kısmında %1 CNT takviyeli ve 45° açılı çıkartılmış olan dört adet çekme test numunesine ait sırasıyla kalınlığı, genişliği, çekme kuvvetinin etki ettiği kesit alanı, elastisite modülü tespiti için eksansometre mesafesi, elastisite modülü, maksimum gerilme, maksimum kuvvet ve yüzde uzama verilmiştir. Sütun kısmında ise test numunelerinin numaralandırmaları verilmiştir.

Çizelge 3.15 %1 CNT Takviyeli (45°) Numunelerin Çekme Testi İstatiksel Değerleri.

Seri n = 4	a0 mm	b0 mm	S0 mm²	L0 mm	E - Modülü MPa	Rm MPa	Rm N	A %
\bar{x}	0.300	24.20	7,259	50.01	7660	77.8	586	24.5
min.	0.300	23.35	23.35	49.99	5532	64.7	472	14.2
max.	0.300	25.41	25.41	50.02	9771	88.6	675	39.4
R	0.300	2.06	2.06	0.03	4239	23.8	203	25.2

Çizelge 3.15’deki tablonun sütun kısmında %1 CNT takviyeli ve 45° açılı çıkartılmış olan dört adet çekme testinin sonuçlarına ait Çizelge 3.14’deki verilerle ilgili değerlerin sırasıyla, ortalaması, minimum değer, maksimum değer, en büyük ve en küçük değer arasındaki fark verilmiştir.

3.3.1.6 %2 CNT Takviyeli 45° Çekme Testi Numuneleri



Şekil 3.6 %2-45° Çekme Test Numunesi Gerilme-% Uzama Diyagramı.

Çizelge 3.16 % 2 CNT Takviyeli (45°) Numunelerin Çekme Testi Sonuçları.

<u>No</u>	<u>E Modülü (MPa)</u>	<u>Çekme Mukavemeti (Mpa)</u>	<u>%Uzama ϵ_M</u>
2C01(45°)	9199	123.9	24.3
2C02(45°)	7850	85.9	5.9
2C03(45°)	8788	148.0	16.7
2C04(45°)	11185	127.3	13.5
Ortalama :	9256	121.3	15.1

Şekil 3.6’ da %2 CNT takviyeli ve 45° açılı çıkartılmış olan dört adet test numunesi çekme testine tabi tutulmuş ve % Uzama- Gerilme grafikleri çizilmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 3.16’da özetlenmiştir. Buna göre ortalama elastisite modülü 9256 MPa çıkarken, ortalama çekme mukavemeti 121.3 MPa, ortalama yüzde uzamada %15.1 olduğu görülmüştür.

Çizelge 3.17 %2 CNT Takviyeli (45°) Numunelerin Çekme Testi Sayısal Değerleri.

No	a0 mm	b0 mm	S0 mm²	L0 mm	E - Molüdü MPa	Rm MPa	Rm N	A %
2C01-45°	0.300	24.12	7,236	50.02	9199	123.9	897	24.3
2C02-45°	0.300	24.98	7,494	50.01	7850	85.9	644	5.9
2C03-45°	0.300	24.51	7,353	50.01	8788	148.0	1088	16.7
2C04-45°	0.300	24.95	7,485	50.02	9541	127.3	953	13.6

Çizelge 3.17’deki tablonun satır kısmında %2 CNT takviyeli ve 45° açılı çıkartılmış olan dört adet çekme test numunesine ait sırasıyla kalınlığı, genişliği, çekme kuvvetinin etki ettiği kesit alanı, elastisite modülü tespiti için eksansometre mesafesi, elastisite modülü, maksimum gerilme, maksimum kuvvet ve yüzde uzama verilmiştir. Sütun kısmında ise test numunelerinin numaralandırmaları verilmiştir.

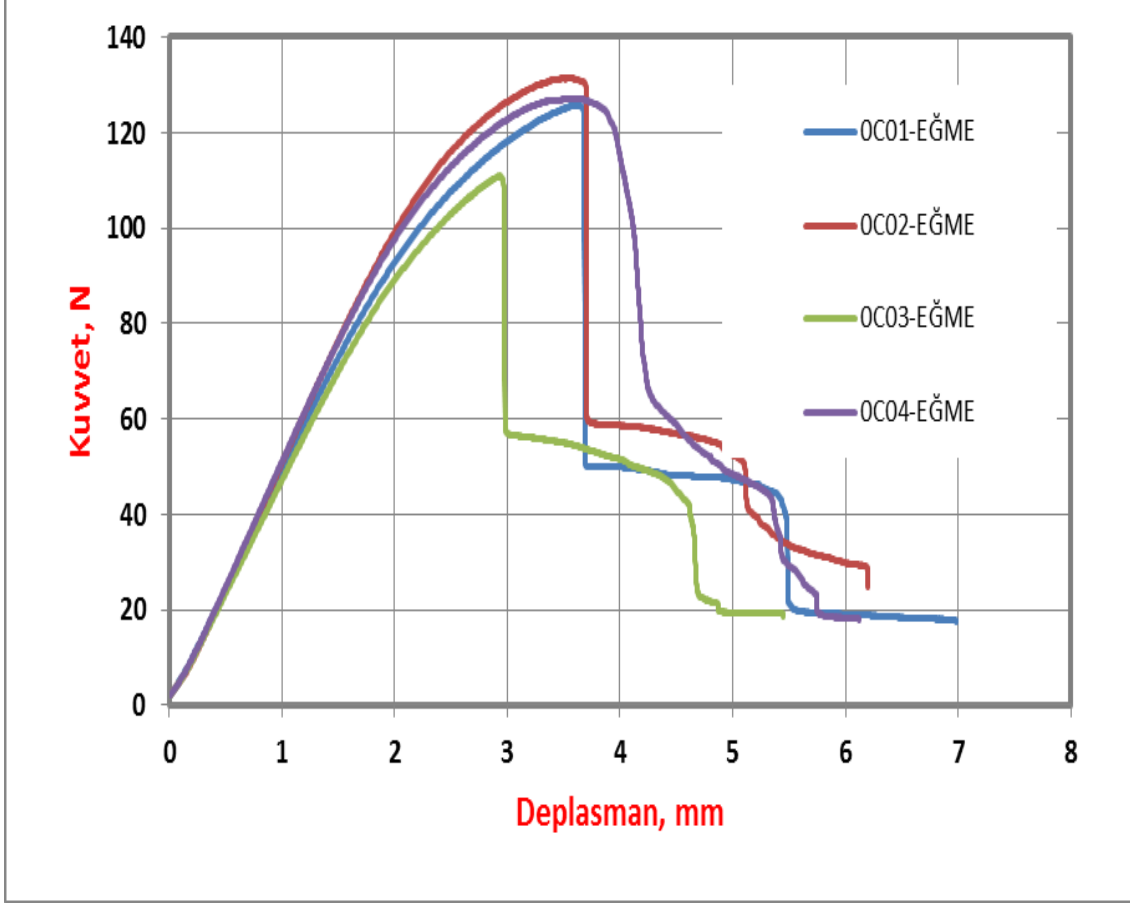
Çizelge 3.18 %2 CNT Takviyeli (45°) Numunelerin Çekme Testi İstatiksel Değerleri.

Seri n = 4	a0 mm	b0 mm	S0 mm²	L0 mm	E - Molüdü MPa	Rm MPa	Rm N	A %
\bar{X}	0.300	24.64	7,392	50.02	8845	121.3	895	15.1
min.	0.300	24.12	7,236	50.01	7850	85.9	644	5.9
max.	0.300	24.98	7,494	50.02	9541	148.0	1088	24.3
R	0.300	0.86	0.258	0.01	1691	62.1	444	18.4

Çizelge 3.18’deki tablonun sütun kısmında %2 CNT takviyeli ve 45° açılı çıkartılmış olan dört adet çekme testinin sonuçlarına ait Çizelge 3.17’deki verilerle ilgili değerlerin sırasıyla, ortalaması, minimum değer, maksimum değer, en büyük ve en küçük değer arasındaki fark verilmiştir.

3.3.2 Üç Nokta Eğme Testi

3.3.2.1 %0 CNT İçeren Eğme Testi Numuneleri



Şekil 3.7 %0 Gerilme-Deplasman Diyagramı.

Çizelge 3.19 %0 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi Sonuçları.

<u>No</u>	<u>Eğilme Elastik Modülü (MPa)</u>	<u>Eğilme Mukavemeti (MPa)</u>
0CS01	9126	58.8
0CS02	9084	72.2
0CS03	8884	60.3
0CS04	8628	61.7
Ortalama :	8931	63.2

Şekil 3.7’de %0 CNT içeren dört adet test numunesi eğme testine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlara göre kuvvet deplasman grafiği çizilmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 3.19’da özetlenmiştir. Test sonuçlarında ortalama elastisite modülü 8932 MPa, eğilme mukavameti 63.2 MPa çıkmıştır.

Çizelge 3.20 %0 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi Değerleri.

Seri n = 4	a0 mm	b0 mm	A mm²	Lv mm	E - Modülü MPa	Fmax. Mpa	Fmax. N
0C01	3.82	29.55	112.9	100	7505	43.7	126
0C02	3.78	29.31	110.8	100	8282	47.0	131
0C03	3.79	29.22	110.7	100	7439	39.6	111
0C04	3.83	29.48	112.9	100	7880	44.1	127

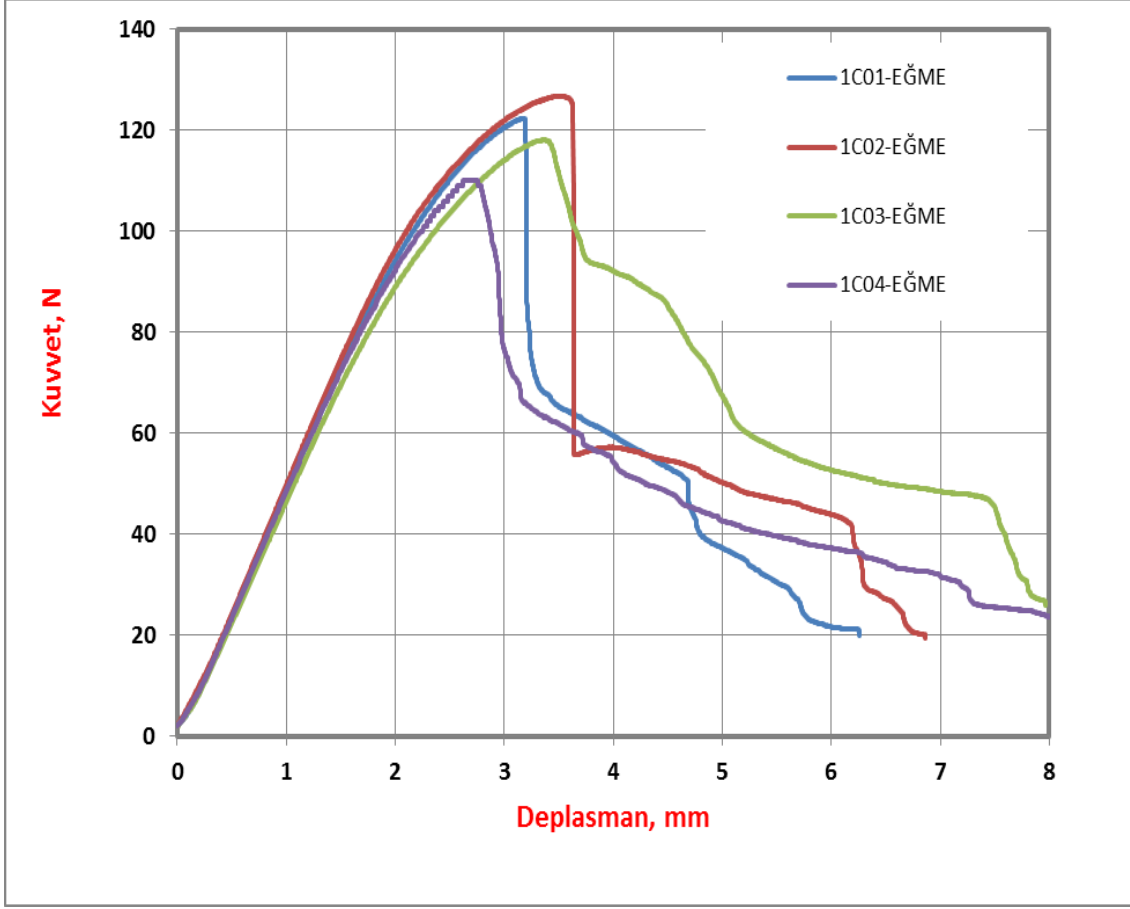
Çizelge 3.20’deki tablonun satır kısmında %0 CNT içeren dört adet eğme test numunesine ait sırasıyla kalınlığı, genişliği, eğme numunesi kesit alanı, mesnetler arası mesafe, elastisite modülü, maksimum gerilme, maksimum kuvvet verilmiştir. Sütun kısmında ise test numunelerinin numaralandırmaları verilmiştir.

Çizelge 3.21 %0 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi İstatiksel Değerleri.

Seri n = 4	a0 mm	b0 mm	A mm²	Lv mm	E - Modülü MPa	Fmax. Mpa	Fmax. N
\bar{X}	3,805	29.39	111.8	100	7777	43.6	124
min.	3.78	29.22	110.7	100	7439	39.6	111
max.	3.83	29.55	112.9	100	8282	47.0	131
R	0.05	0.33	2,165	0.000	843	7.4	20

Çizelge 3.21’deki tablonun sütun kısmında %0 CNT içeren dört adet eğme test numunesinin sonuçlarına ait Çizelge 3.20’deki verilerle ilgili değerlerin sırasıyla, ortalaması, minimum değer, maksimum değer, en büyük ve en küçük değer arasındaki farklar verilmiştir.

3.3.2.2 %1 CNT Takviyeli Eğme Testi Numuneleri



Şekil 3.8 %1 Gerilme-Deplasman Diyagramı.

Çizelge 3.22 %1 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi Sonuçları.

<u>No</u>	<u>Eğilme Elastik Modülü (MPa)</u>	<u>Eğilme Mukavemeti (MPa)</u>
1CS01	7955	44.2
1CS02	7980	45.7
1CS03	8509	45.9
1CS04	7801	39.3
Ortalama :	8061	43.8

Şekil 3.8’de %1 CNT takviyeli dört adet test numunesi eğme testine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlara göre kuvvet deplasman grafiği çizilmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 3.22’de özetlenmiştir. Test sonuçlarında ortalama elastisite modülü 8061 MPa, eğilme mukavemeti 43.8 MPa çıkmıştır.

Çizelge 3.23 %1 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi Değerleri.

Seri n = 4	a0 mm	b0 mm	A mm²	Lv mm	E - Modülü MPa	Fmax. Mpa	Fmax. N
1C01	3.81	28.58	108.9	100	7955	44.2	122
1C02	3.82	28.53	109	100	7980	45.7	127
1C03	3.65	28.98	105.8	100	8509	45.9	118
1C04	3.81	29.06	110.7	100	7801	39.3	110

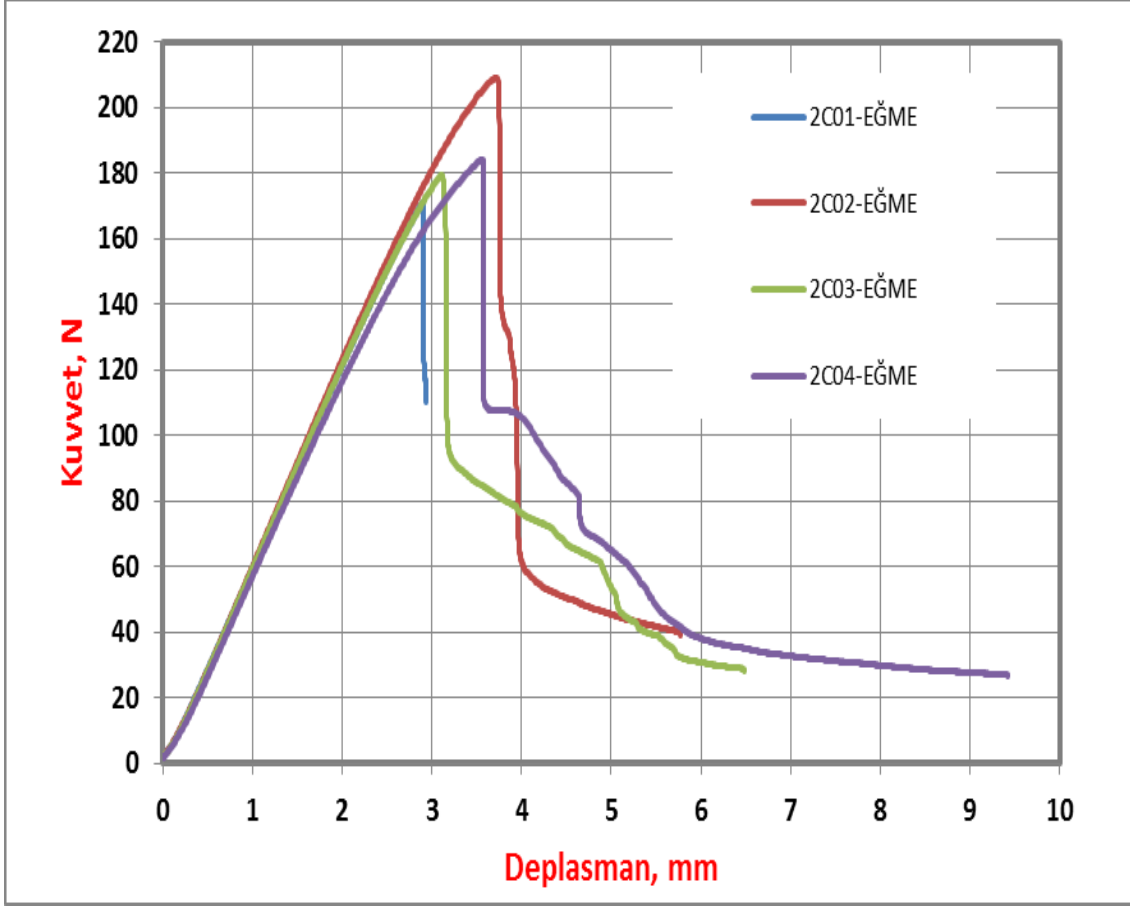
Çizelge 3.23’deki tablonun satır kısmında %1 CNT takviyeli dört adet eğme test numunesine ait sırasıyla kalınlığı, genişliği, eğme numunesi kesit alanı, mesnetler arası mesafe, elastisite modülü, maksimum gerilme, maksimum kuvvet verilmiştir. Sütun kısmında ise test numunelerinin numaralandırmaları verilmiştir.

Çizelge 3.24 %1 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi İstatiksel Değerleri.

Seri n = 4	a0 mm	b0 mm	A mm²	Lv mm	E - Modülü MPa	Fmax. Mpa	Fmax. N
\bar{X}	3,773	28.79	108.6	100	8061	43.8	119
min.	3.65	28.53	105.8	100	7801	39.3	110
max.	3.82	29.06	110.7	100	8509	45.9	127
R	0.17	0.53	4,942	0.000	708	6.6	16

Çizelge 3.24’deki tablonun sütun kısmında %1 CNT takviyeli dört adet eğme test numunesinin sonuçlarına ait Çizelge 3.23’deki verilerle ilgili değerlerin sırasıyla, ortalaması, minimum değer, maksimum değer, en büyük ve en küçük değer arasındaki farklar verilmiştir.

3.3.2.3 %2 CNT Takviyeli Eğme Testi Numuneleri



Şekil 3.9 %2 Karbon Gerilme-Deplasman Diyagramı.

Çizelge 3.25 %2 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi Sonuçları.

<u>No</u>	<u>Eğilme Elastik Modülü (MPa)</u>	<u>Eğilme Mukavemeti (MPa)</u>
2CS01	7505	43.7
2CS02	8282	47.0
2CS03	7439	39.6
2CS04	7880	44.1
Ortalama :	7777	43.6

Şekil 3.9’de %2 CNT takviyeli dört adet test numunesi eğme testine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlara göre kuvvet deplasman grafiği çizilmiştir. Elde edilen veriler Çizelge 3.25’de özetlenmiştir. Test sonuçlarında ortalama elastisite modülü 7777 MPa, eğilme mukavemeti 43.6 MPa çıkmıştır.

Çizelge 3.26 %2 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi Değerleri.

Seri n = 4	a0 mm	b0 mm	A mm²	Lv mm	E - Molüdü MPa	Fmax. Mpa	Fmax. N
2C01	3.83	29.76	114	100	9126	58.8	171
2C02	3.9	28.52	111.2	100	9084	72.2	209
2C03	3.88	29.6	114.8	100	8884	60.3	179
2C04	3.89	29.59	115.1	100	8628	61.7	184

Çizelge 3.26’deki tablonun satır kısmında %2 CNT takviyeli dört adet eğme test numunesine ait sırasıyla kalınlığı, genişliği, eğme numunesi kesit alanı, mesnetler arası mesafe, elastisite modülü, maksimum gerilme, maksimum kuvvet verilmiştir. Sütun kısmında ise test numunelerinin numaralandırmaları verilmiştir.

Çizelge 3.27 %2 CNT Takviyeli Numunelerin Eğme Testi İstatiksel Verileri.

Seri n = 4	a0 mm	b0 mm	A mm²	Lv mm	E - Molüdü MPa	Fmax. Mpa	Fmax. N
\bar{X}	3,875	29.37	113.8	100	8931	63.2	186
min.	3.83	28.52	111.2	100	8628	58.8	171
max.	3.9	29.76	115.1	100	9126	72.2	209
R	0.07	1.24	3,877	0.000	498	13.3	38

Çizelge 3.27’deki tablonun sütun kısmında %2 CNT takviyeli dört adet eğme test numunesinin sonuçlarına ait Çizelge 3.26’deki verilerle ilgili değerlerin sırasıyla, ortalaması, minimum değer, maksimum değer, en büyük ve en küçük değer arasındaki farklar verilmiştir.

3.3.3 Abaqus Programında Sonlu Elamanlarla Modelleme

Abaqus programında ki modellemeyi üç başlıkta toplayabiliriz.

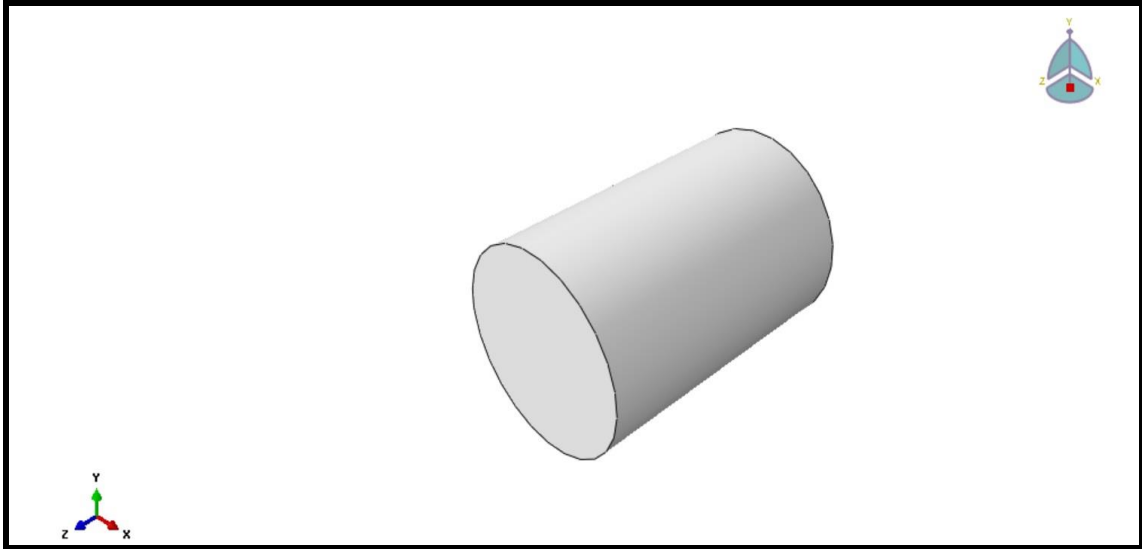
- 1) Eğme testine ait mesnetler ve yük çubuğunun modellenmesi
- 2) Sandviç yapının bal peteği yapısına sahip çekirdek kısmının modellenmesi
- 3) Sandviç yapının üst ve alt yüzeyleri olan kısımların modellenmesi

3.3.3.1 Abaqus Programında “Part” Aşaması

Eğme testinde sandviç yapıya mesnetlik yapacak çubuklarla yine kuvveti iletimini yapacak çubuklar tasarlanmıştır.

Çizelge 3.28 Mesnet Ve Kuvvet Çubuğu Modelleme.

Modelleme Türü	Çubuk Çapı (m)	Çubuk Boyu (m)
Katı	0.01	0.3

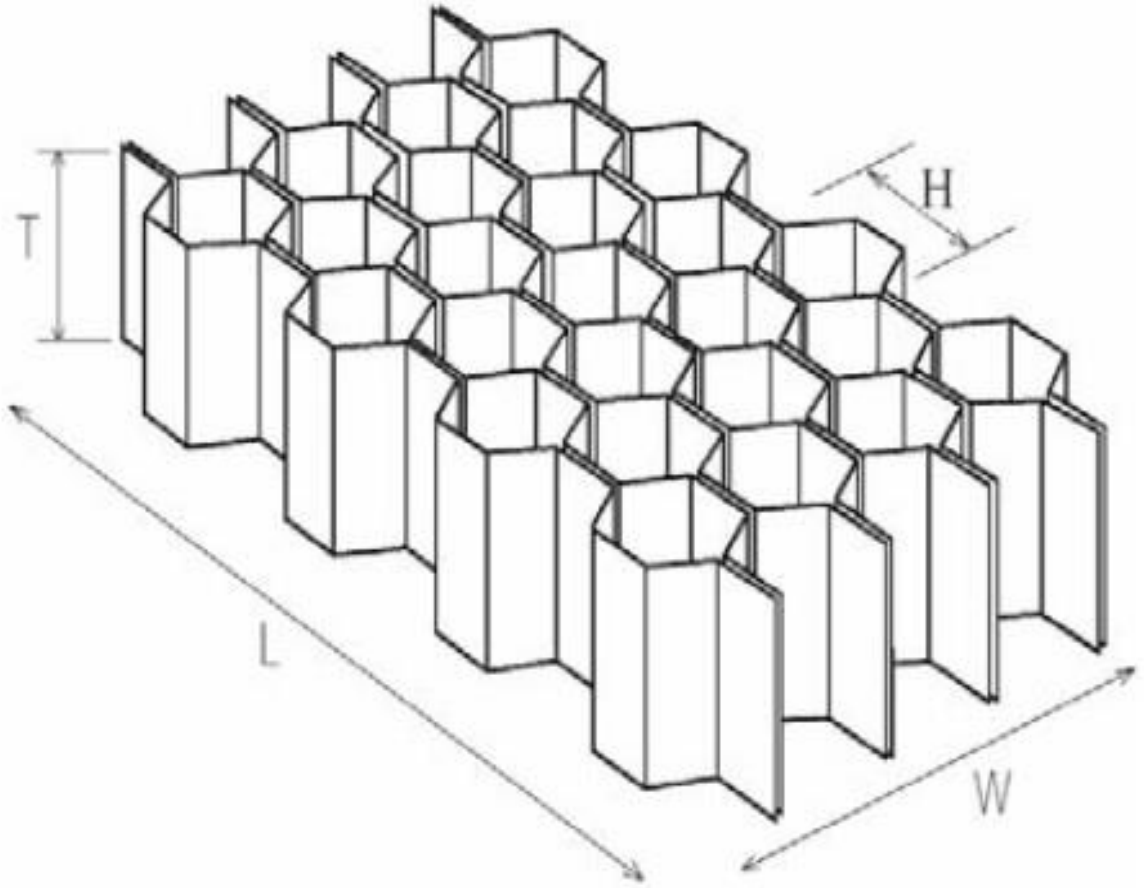


Resim 3.10 Mesnet ve Kuvvet Çubuğu Tasarımı.

Sandviç yapının çekirdek kısmını oluşturan nomex yapıya sahip bal peteği yapısının Abaqus programında eğme testine tabi tutulacak boyutlara göre W ve L boyutları belirlenmiştir.

Çizelge 3.29 Çekirdek Yapı Üç Boyutlu Modelleme.

Modelleme Türü	H (m)	T (m)	W (m)	L (m)
Kabuk	0.00368	0.003	0.03	0.152

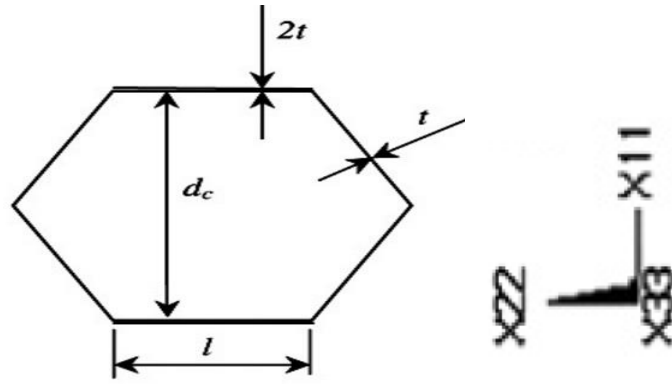


Resim 3.11 Çekirdek Yapı Üç Boyutlu Model.

Bal peteği yapının hücre boyutlarına uygun olarak modellenmiştir. Gerçeğine uygun hücrede tek duvar ve çift duvar olacak kısımlar abaküste belirlenerek gerekli kalınlıklar atanmıştır.

Çizelge 3.30 Çekirdek Tek Hücre Modelleme.

dc (m)	t (m)	l (m)
0.0032	0.00055	0.00185



Resim 3.12 Çekirdek Tek Hücre Üstten Görünüşü.

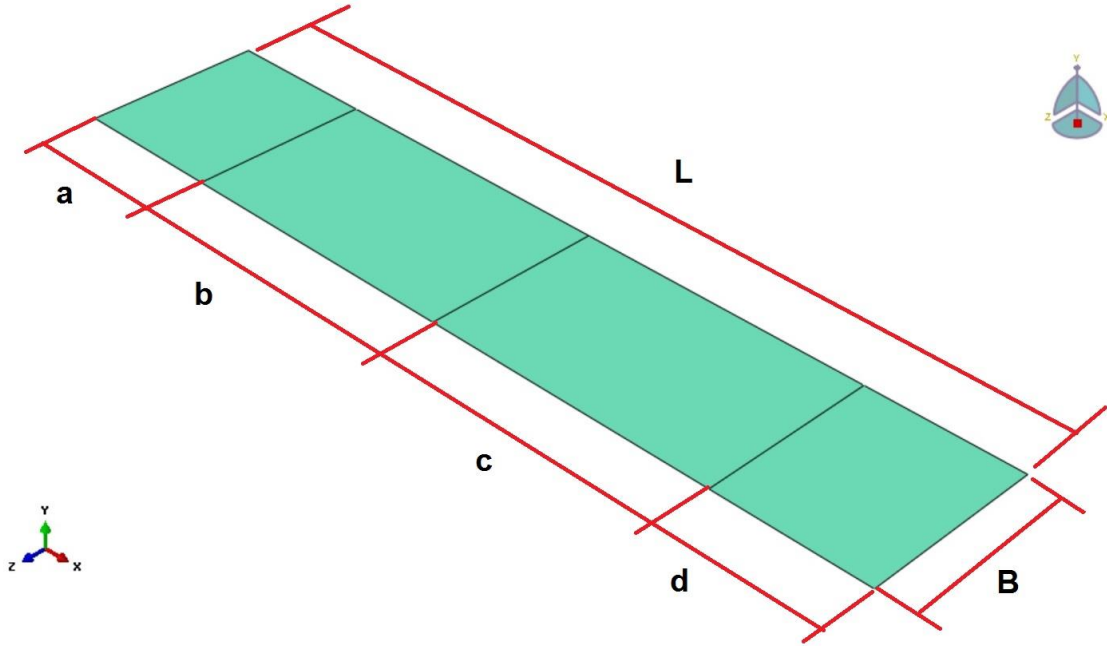


Resim 3.13 Abaqus Programında Çift Duvar Görünüşü.

Sandviç yapının alt ve üst yüzeyini oluşturacak karbon tabakaları oluşturmak için en, boy ve kalınlık bilgileri kullanılarak Abaqus programında tasarlanmıştır. Kalınlık değeri olarak ilk aşama olarak 0.00018 m olarak alınmıştır. Değişik kalınlıklarda (0.0002 m, 0.00022 m, 0.00024 m) programda analiz yaparken kullanılmıştır. Mesnetleri ve baskı çubuğunu yerleştirebilmek ve yüzey ilişkisi tanımlayabilmek içinde a, b, c, d boyutlarında bölümlenmiştir.

Çizelge 3.31 Sandviç Yapı Yüzey Kaplaması Üç Boyutlu Modelleme.

Modelleme Türü	Kalınlık (m)	B (m)	L (m)	a (m)	b (m)	c (m)	d (m)
Kabuk	0.00018	0.03	0.152	0.01	0.05	0.05	0.01



Resim 3.14 Abaqus Programında Sandviç Yapı Alt ve Üst Yüzey Modeli.

3.3.3.2 Abaqus Programında “Property” Aşaması

Sandviç yapıya üç nokta eğme testi uygulamak için mesnetler ve kuvvet uygulayan bir çubuğa ihtiyaç olacaktır. Malzemesi çelik olarak seçilmiştir.

Çizelge 3.32 Bal Peteği Çekirdek Yapı Malzeme Özellikleri.

Modellemenin Adı	Kütle Yoğunluğu Kg / m³	Poisson Oranı	E-Modülü (GPa)	Elastik Malzeme Tipi
Nomex Balpeteği Çekirdek Yapı	0.03	0.30	200	İzotropik

Nomex bal peteği yapıya sahip çekirdek yapının malzeme özellikleri programa girilmiştir. Burada E Modülü gerçek test sonuçlarından elde edilen değerler konularak yapılmıştır. Bal peteği yapısına ait tasarımda tek duvar olan kısımlarla çift duvar olan kısımlar yine seçilerek ayrı ayrı belirlenmiştir.

Çizelge 3.33 Kuvvet ve Mesnet Modellemesi.

Modellemenin Adı	Kütle Yoğunluğu Kg / m³	Poisson Oranı	E-Modülü (GPa)	Elastik Malzeme Tipi
Mesnet Ve Kuvvet Çubuğu	7800	0.35	4	İzotropik

Çizelge 3.34 Abaqus programında kullanılan mesnetlerin özellikleri çizelgedeki değerler esas alınarak yapılmıştır.

Çizelge 3.35 Karbon Alt-Üst Yüzey Modellemesi.

Modellemenin Adı	Kütle Yoğunluğu Kg / m³	Nu12	E-Modülü (GPa)	Elastik Malzeme Tipi
Sandviç Yapı Alt Ve üst Yüzeyleri	1450	0.05	Değişken	Lamina

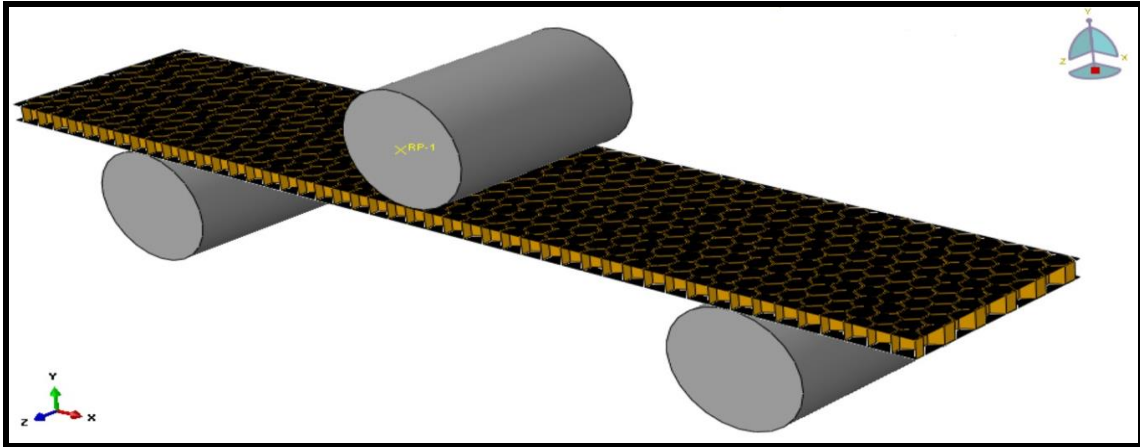
Çizelge 3.36 Karbon Yüzey Analiz Değerleri.

Modellemenin Adı	E1 Modülü	E2 Modülü	G12 (GPa)	G13 (GPa)	G23 (GPa)
Sandviç Yapı Alt Ve üst Yüzeyleri	Değişken	Değişken	3	3	3

Çizelge 3.37 ve Çizelge 3.5 te Abaqus programında sandviç yapının yüzeylerinde tasarım özellikleri kullanılmıştır.

3.3.3.3 Abaqus Programında “Assembly” Aşaması

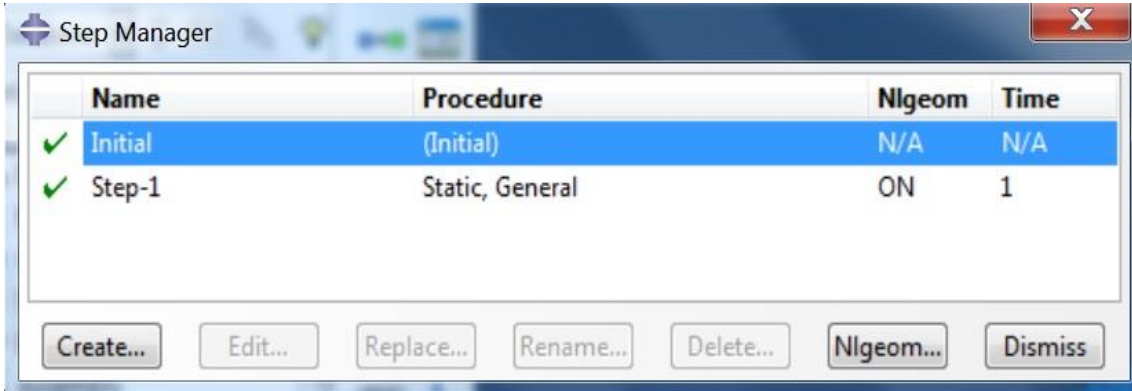
Abaqus'te ki montaj aşamasında ilk önce kabuk şekilde tasarlanan bal peteği yapısı ve karbon yüzeyler birbirlerinin üzerine gelecek şekilde montajlanır. Daha sonra yüzeyler üzerinde mesnet noktaları için şekilde böldüğümüz kısımlara (a,b,c,d) temas edecek şekilde kuvvet ve mesnet çubuklarımız yerleştirilmiştir. Sonuç olarak mesnetler arası açıklık 0.10 m olacak şekilde bir model oluşturulmuştur.



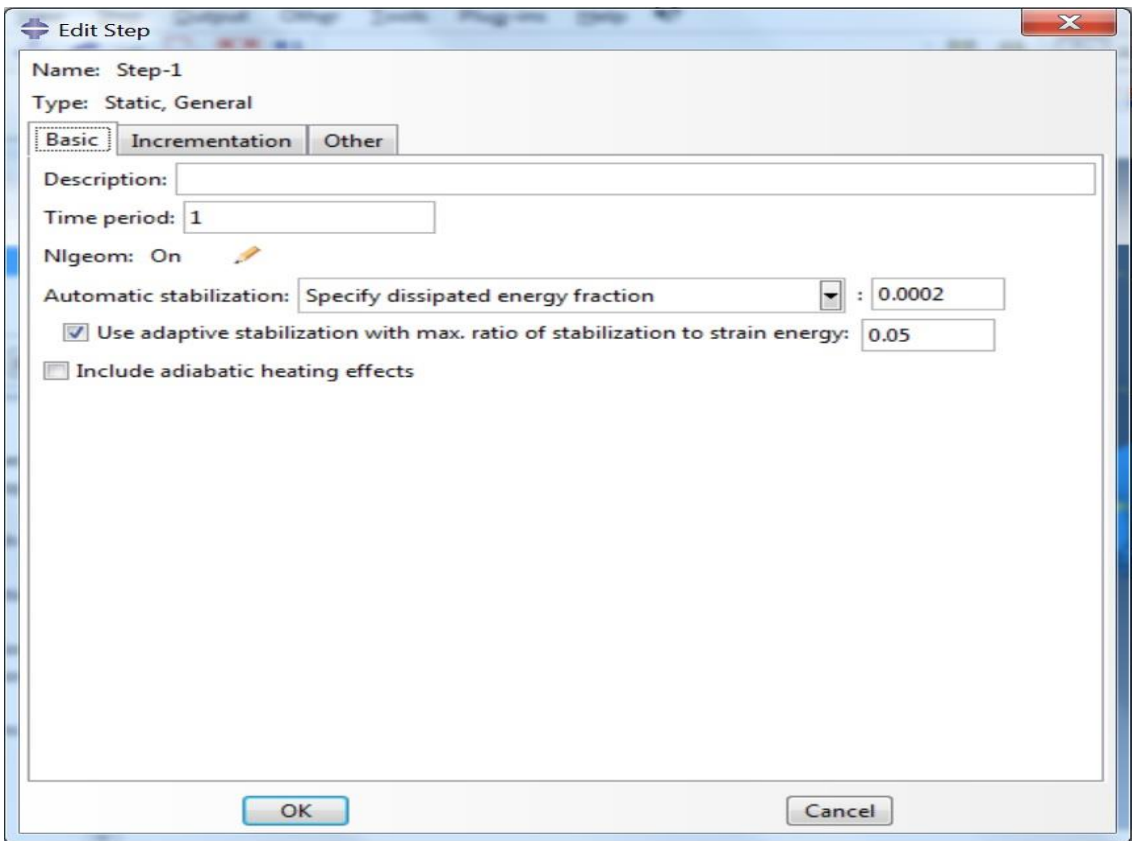
Resim 3.15 Sandviç Yapı Üç boyutlu Montajı.

3.3.3.4 Abaqus Programında “Step” Aşaması

Sırasıyla Step Manager, Edit Step, Edit Field Output Requests ve History Output Requests Manager aşamaları tamamlanmıştır.

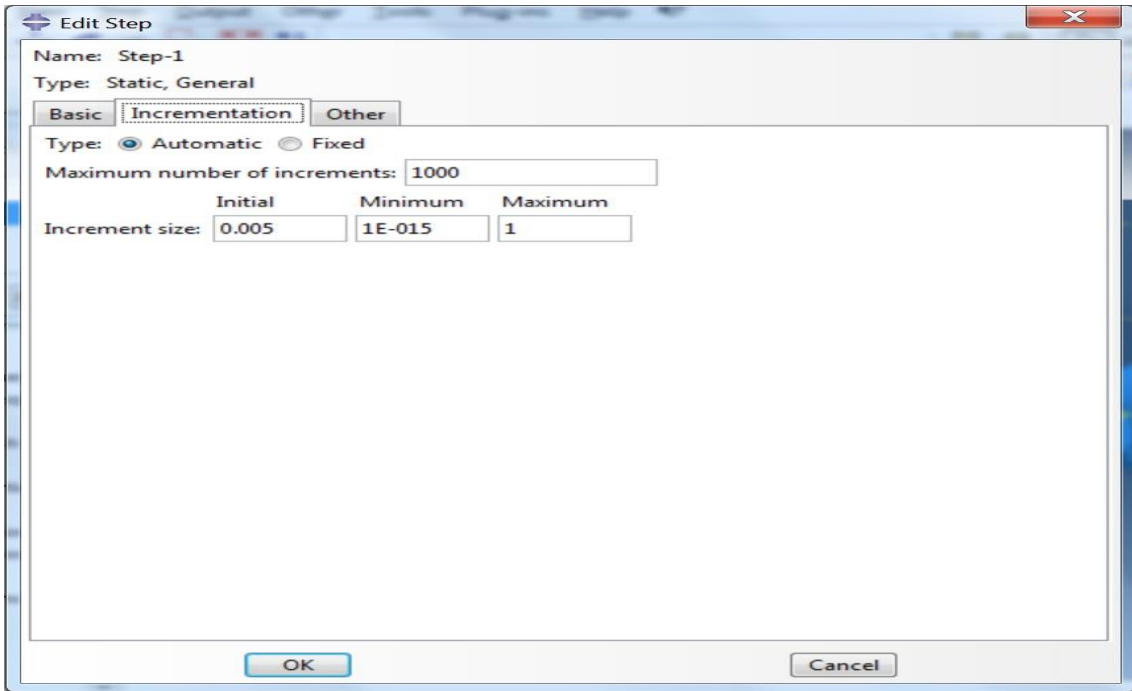


Resim 3. 16 Abaqus 'Step' Aşama 1.

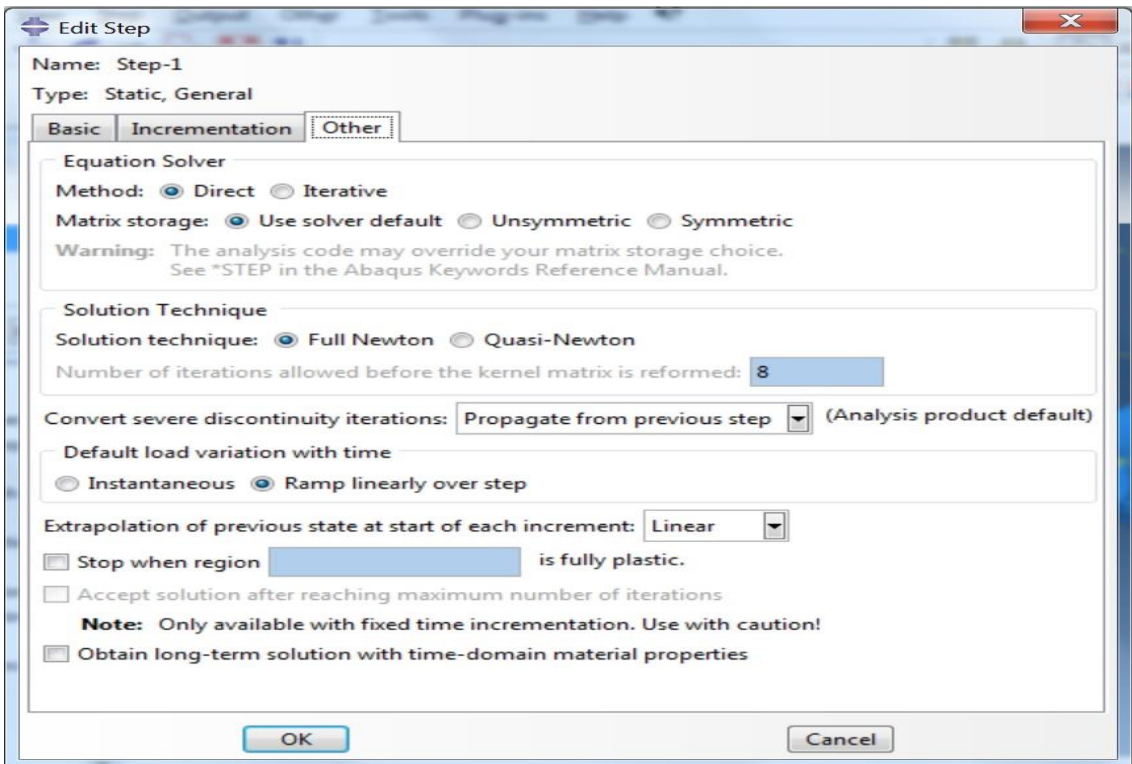


Resim 3. 17 Abaqus 'Step' Aşama 2.

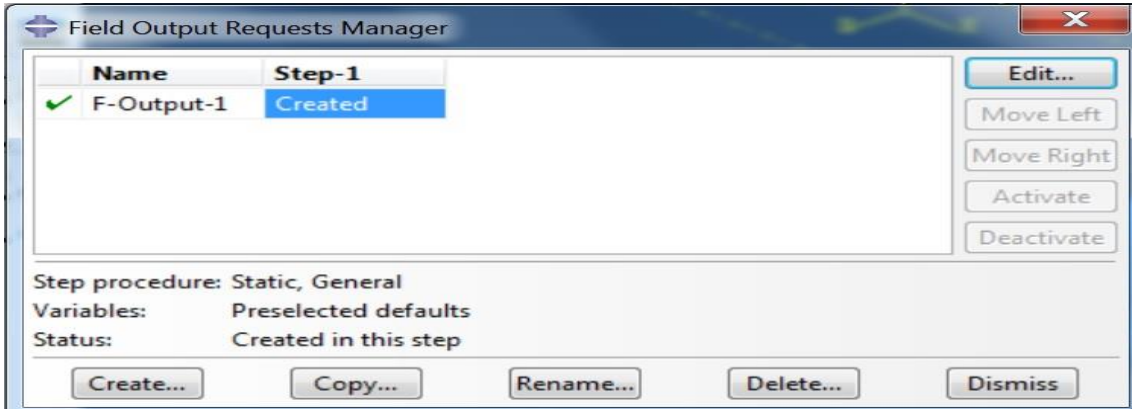




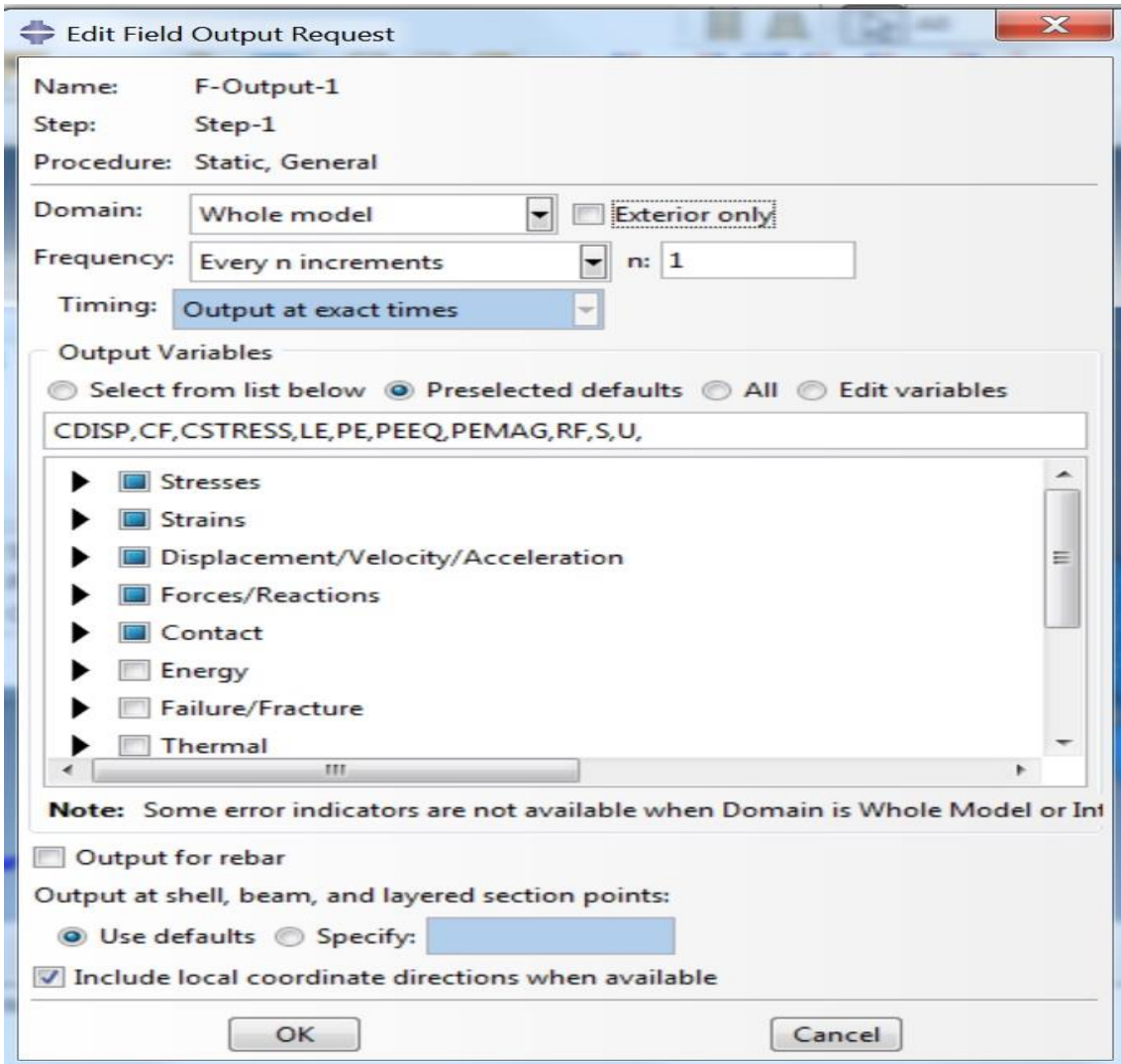
Resim 3.18 Abaqus 'Step' Aşama 3.



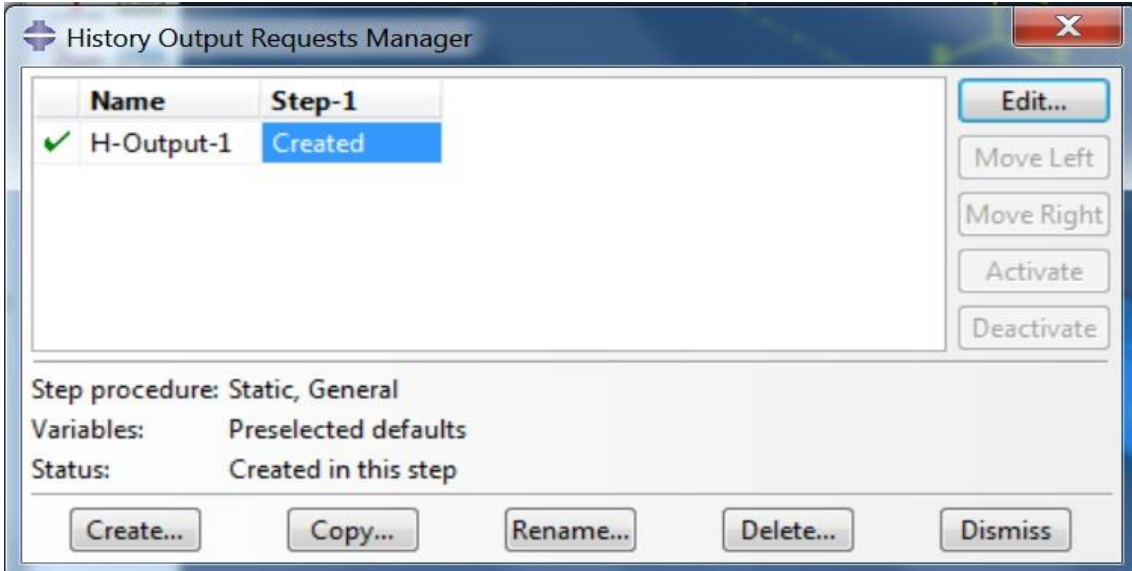
Resim 3.19 Abaqus 'Step' Aşama 4.



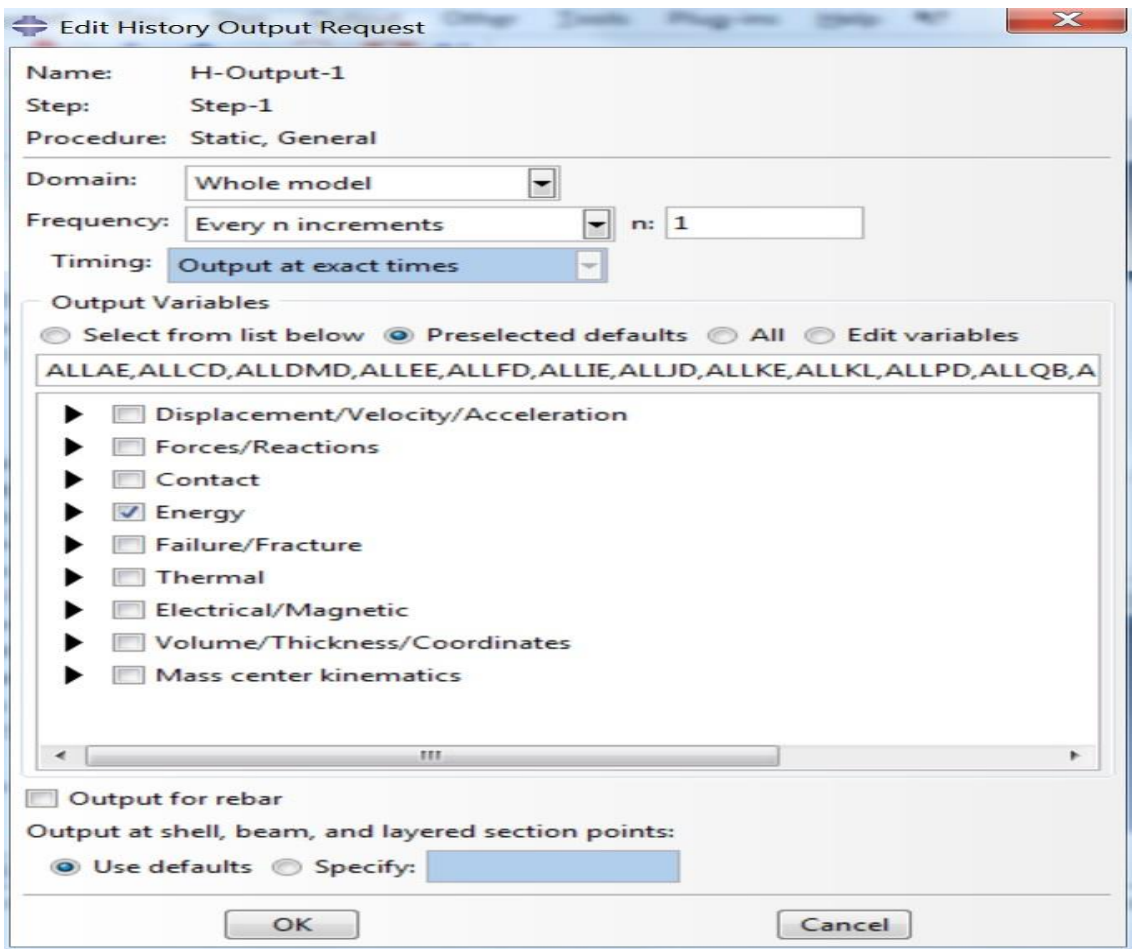
Resim 3.20 Abaqus 'Step' Aşama 5.



Resim 3.21 Abaqus 'Step' Aşama 6.



Resim 3.22 Abaqus 'Step' Aşama 7.



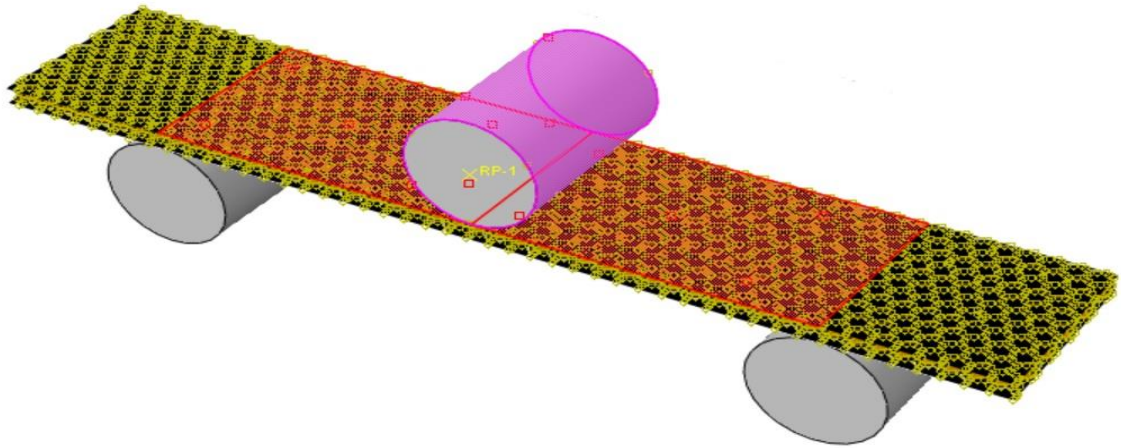
Resim 3.23 Abaqus 'Step' Aşama 8.

3.3.3.5 Abaqus Programında “Interaction” Aşaması

Sırasıyla Interaction Manager, Interaction Property Manager ve Constraint Manager aşamaları kullanılır. Bu bölümdeki amaç montajı oluşturan parçalar arasında yüzey ve temas ilişkilerini tanımlamaktır.

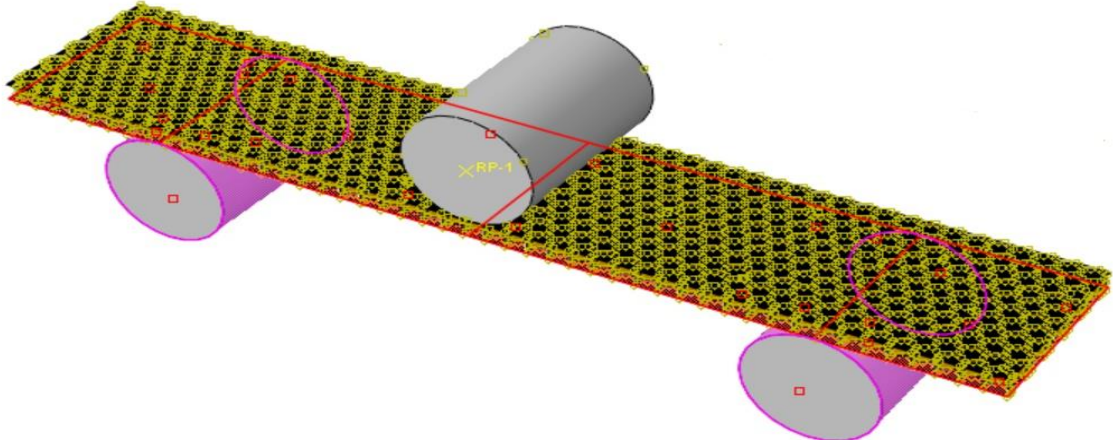
Part aşamasında sandviç yapının yüzey elamanlarında bölüntüler yapmıştık. Bu bölüntülerin amacı mesnet ve kuvvet çubuklarıyla yüzey eleman arasında ki ilişkiyi tanımlayabilmektir.

Interaction Manager aşamasında kuvvet uygulayacak olan çubukla, yüzey elemanın tam ortasında ki çizgi arasında “ Surface To Surface” uygulaması yapıp yüzey temas ilişkisini tanımlanmıştır.



Resim 3.26 Abaqus ‘Interaction’ Aşama 1.

Yine mesnetlerle alt yüzey arasında temas ilişkisini tanımlayarak mesnetler arası 0.1m olacak şekilde daha önce yüzeyde yapılmış bölüntülerle mesnet çubukları birbirine bağlanmıştır.

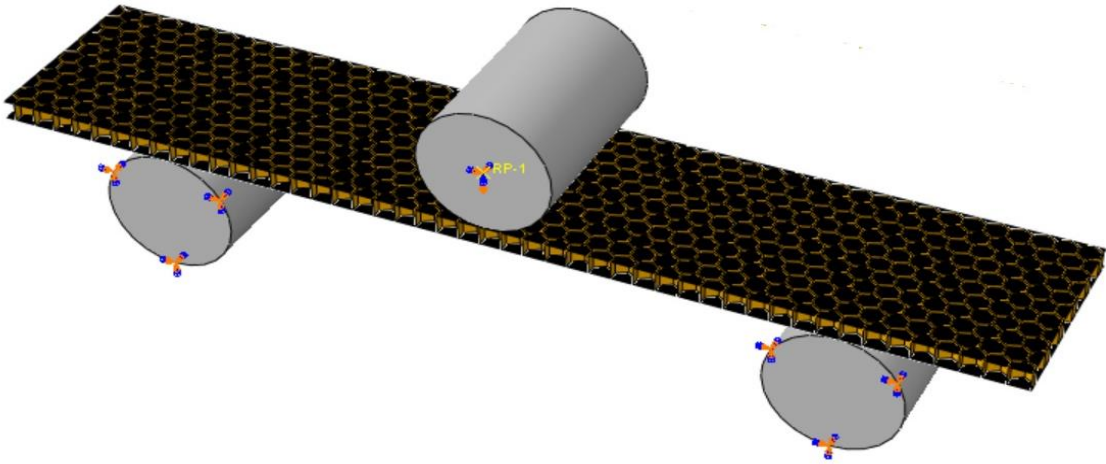


Resim 3.24 Abaqus ‘Interaction’ Aşaması.

Constraint Manager aşamasında yüzey bağlantılarının yapılma aşamasıdır. İlk olarak bal peteği çekirdek yapısıyla, yüzey elemanlar arasında “Tie” bağlantısı yaparak bal peteğini hücre köşe noktaları karbon tabaka yüzeylerle temas bağları oluşturulmuştur.

3.3.3.6 Abaqus Programında “Load” Aşaması

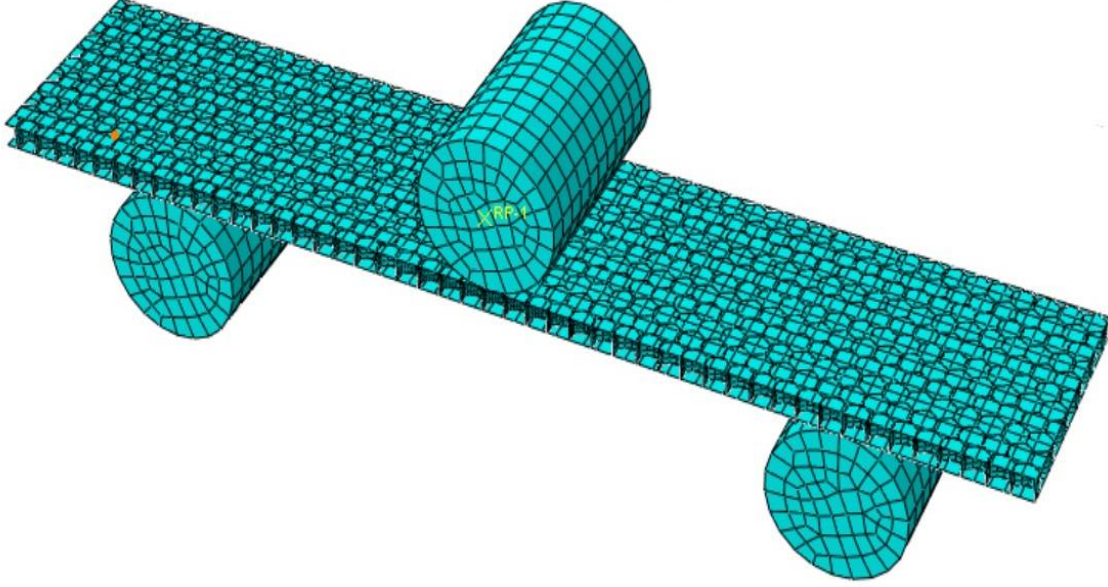
Abaqus programında Load aşamasında mesnetler ilk olarak x, y ve z yönlerinde hareket etmeyecek ve moment oluşmayacak şekilde ankastre hale getirilmiştir. Kuvvet çubuğunun merkezinde bulunan RP 1 noktası sadece y yönünden hareket edecek şekilde ve 0.004 m deplasman mesafesi verilerek belirlenmiştir.



Resim 3.28 Abaqus ‘Load’ Aşaması Son Hali.

3.3.3.7 Abaqus Programında “Mesh” Aşaması

19745 S4R, 22 S3, 2640 C3D8R olmak üzere toplam 22407 mesh oluşturulmuştur.



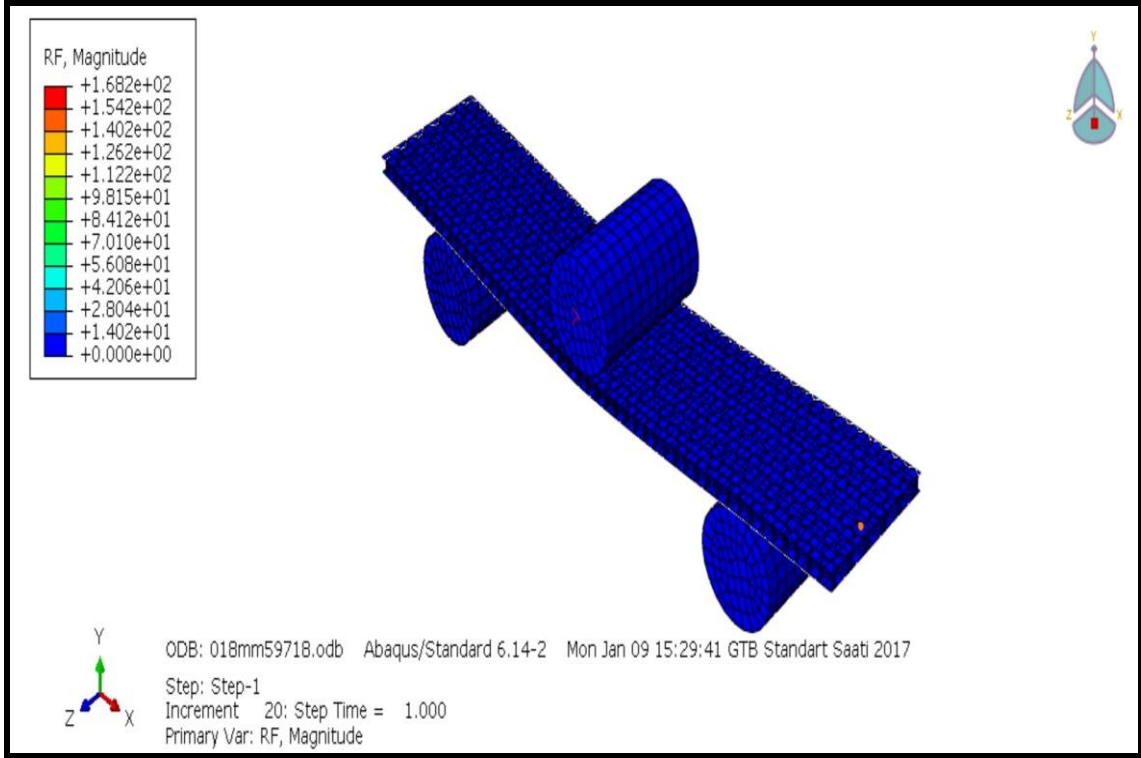
Resim 3.25 Abaqus ‘Mesh’ Aşaması.

3.3.3.8 Abaqus Programında “Jop” Aşaması

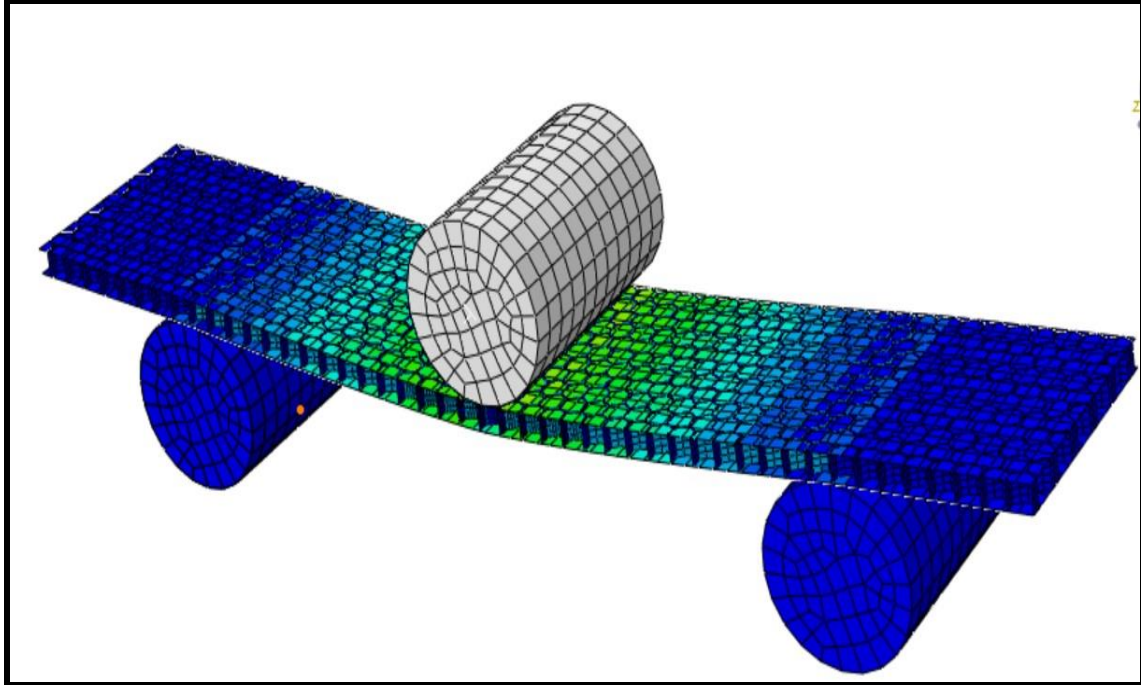
“Jop” aşamasında girdiğimiz tüm verilerin sonucunda analiz yapma aşamasıdır. “Submit” yaptıktan sonra analizin tamamlanmasını bekleyip “Results” yapıp analiz sonuçları değerlendirilmiştir.

3.3.3.9 Abaqus Programında “Visualization” Aşaması

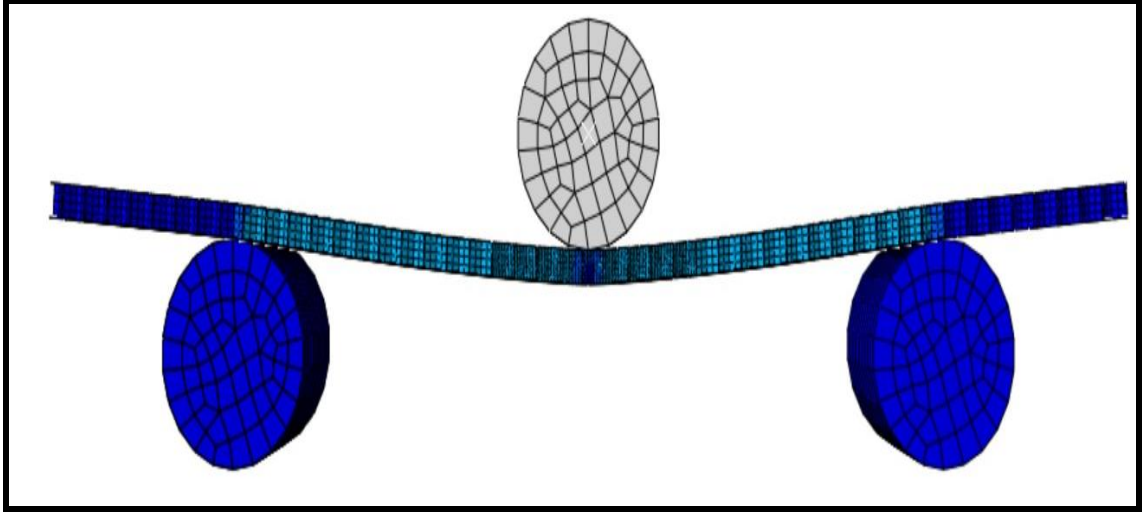
Bu aşamada yapılan analizin grafiksel ve sayısal sonuçlarının çıktılarının alındığı aşamadır. Yapılan tasarım Abaqus programında çalıştırılmıştır.



Resim 3.26 Abaqus Analiz Sonuç Aşaması 1.

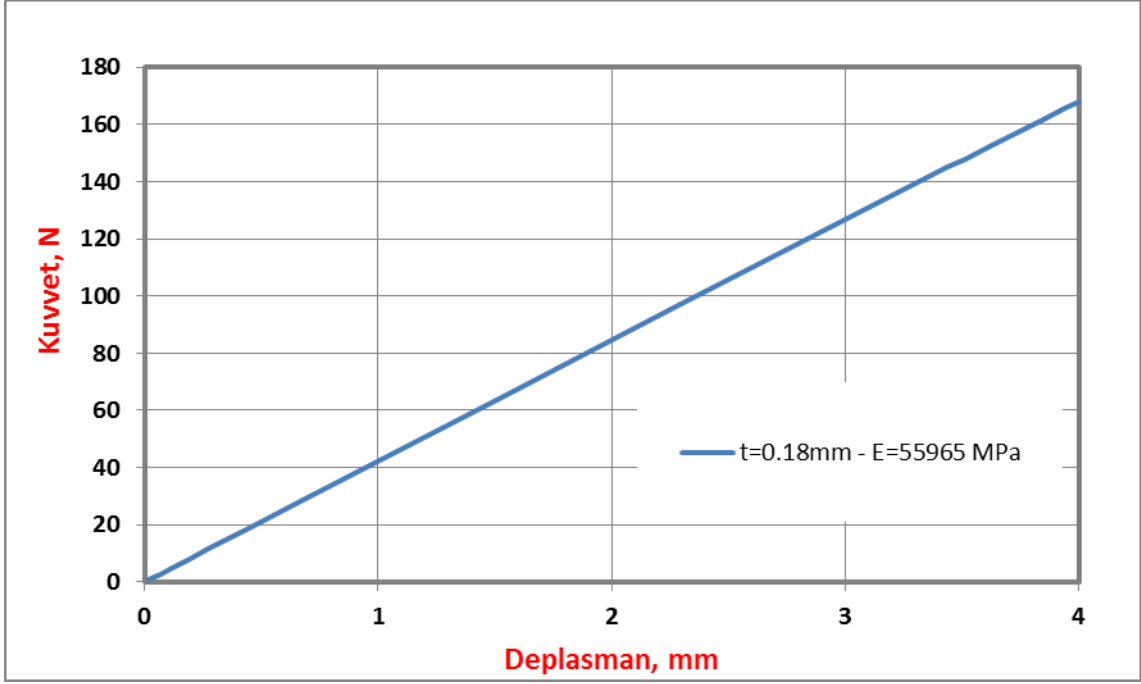


Resim 3.27 Abaqus Analiz Sonuç Aşaması 2.



Resim 3.32 Abaqus Analiz Sonuç Aşaması 3.

Analiz sonuçlarının alınabilmesi için reaksiyon kuvvetinin ve deplasmanın hangi ekseninde alınacağını programa tanımlanması gerekmektedir. Kuvvet y ekseninde boyunda “RF2” ve deplasmanda yine y ekseninde boyunda “U2” olarak sonuçlar çıkartılır. Son olarakta “Plot” kuvvet ve deplasman seçilir ve çıktılar bilgisayara kaydedilmiştir.



Şekil 3.10 Abaqus Kuvvet-Deplasman Grafiği.

Abaqus programında modelleme yaparken dikkat edilecek hususlardan biride çekme deneylerinde kullanılan kalınlık 0.30 mm dir. Bu kalınlık matris+karbon kumaş kalınlığının toplamıdır. Bizim CNT etkisi tam olarak incelememiz için matristen arındırılmış kalınlık olan karbon kısmın kalınlığı esas alınmıştır. Abaqus programında sayısal modelleme yaparken 0.18 mm kalınlık esas alınarak ilk olarak Şekil 3.10'daki grafik elde edilmiştir. Sonrada sırasıyla 0.20 mm, 0.22 mm, 0.24 mm kalınlıklar esas alınarak modelleme üzerinden değişiklikler yapıp grafikler elde edilmiştir. Tabiki matristen arındırılmış kalınlıklar kullanılırken elastisite modülünde farklı olacaktır. Abaqus programında kullanılan veriler, deneysel sonuçlarda elde edilen verilerin Hook kanununa ait formüller ve kompozit malzemeler için üç nokta eğilmede elastisite modülü formülleri gibi formüller kullanarak dönüştürülmüştür.

3.4 Üç Nokta Eğme Deneyinin Abaqus Programında Analiz Sonuçları

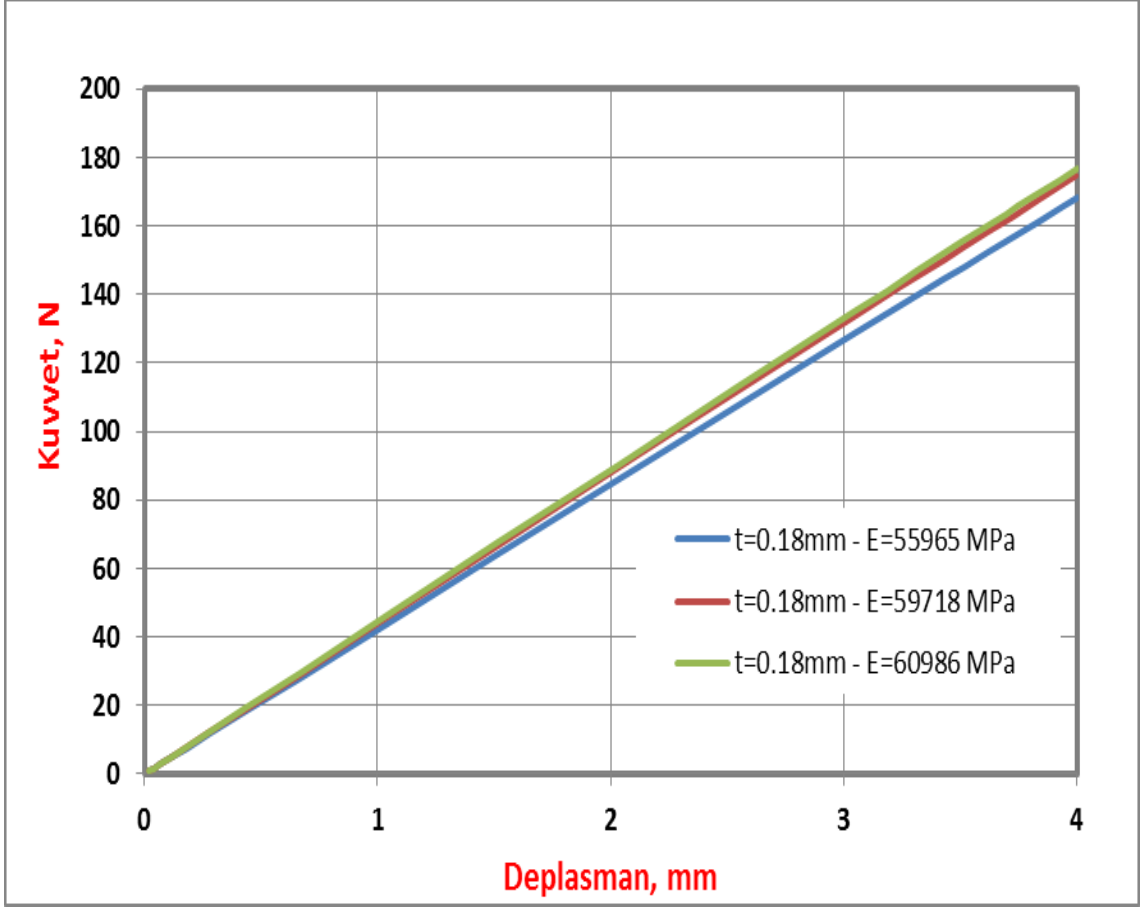
Çizelge 3.38 Abaqus Programındaki Veriler.

t (mm)	%2 Karbon		%1 Karbon		%0 Karbon	
	E-Modülü (MPa)	F Max (N)	E-Modülü (MPa)	F Max (N)	E-Modülü (MPa)	F Max (N)
0.18 mm		176.6		174.6		168.2
0.20 mm	60986	177.7	59718	175.6	55965	169.3
0.22 mm		178.9		176.7		170.3
0.24 mm		180.1		178.9		171.4

Çizelge 3.36’da deneysel sonuçlarda elde edilen veriler üç nokta eğilme elastisite modülü hesabı, Hook kanunundaki formüller gibi formüller kullanılmıştır. Elde edilen elastisite modülleri sabit kalarak yüzey karbon yüzey kalınlıkları değiştirilmiş ve elde edilen maksimum eğilme kuvvetleri tabloda verilmiştir.

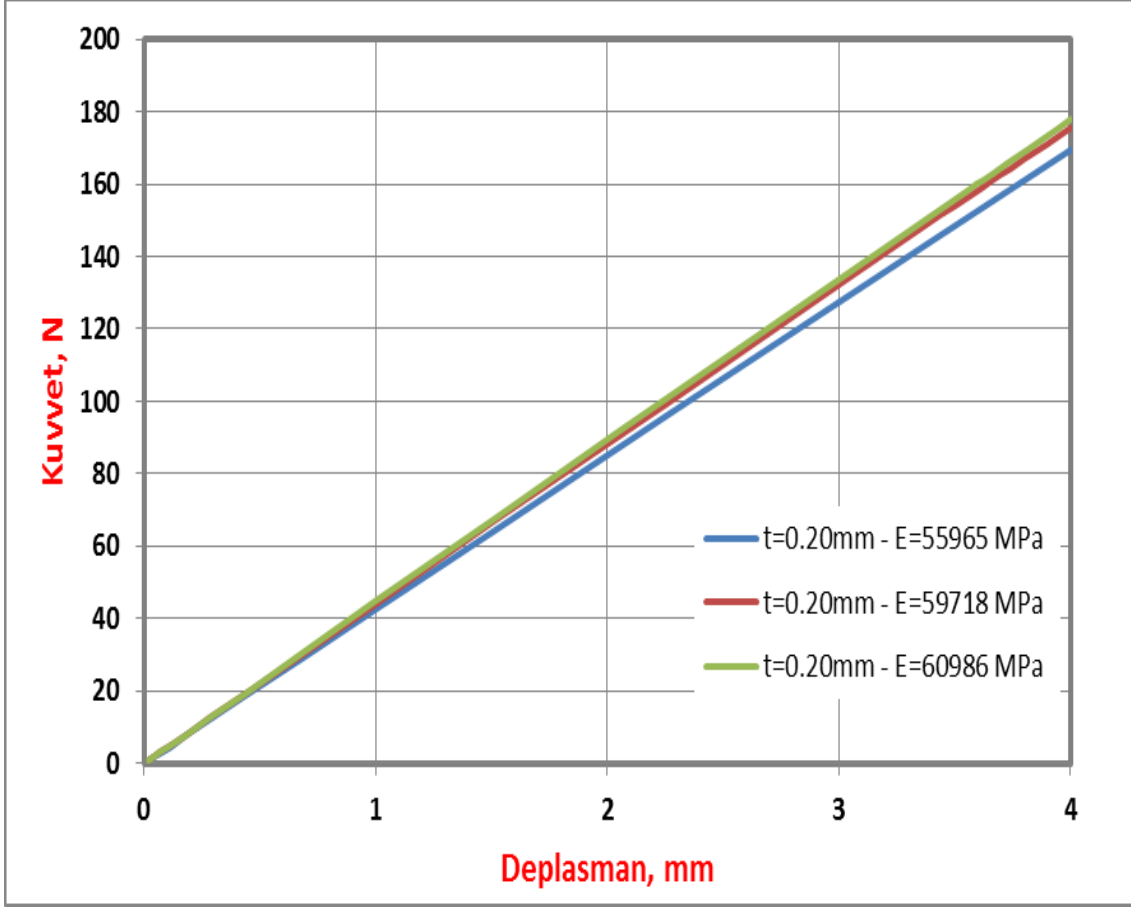
0.18 mm kalınlık için min. F Max 176.6 N iken max. F Max 168.2 N; 0.20 mm kalınlık için min. F Max 169.3 N iken max. F Max 177.7 N; 0.22 mm kalınlık için min. F Max 170.3 N iken max. F Max 178.9 N; 0.24 mm kalınlık için min. F Max 171.4 N iken max. F Max 180.1 N olmuştur.

Min. elastisite modülü 55965 MPa için F Max 168.2 N iken max. F Max 171.4 N; Max. elastisite modülü 60986 MPa için F Max 176.6 N iken max. F Max 180.1 N olmuştur.



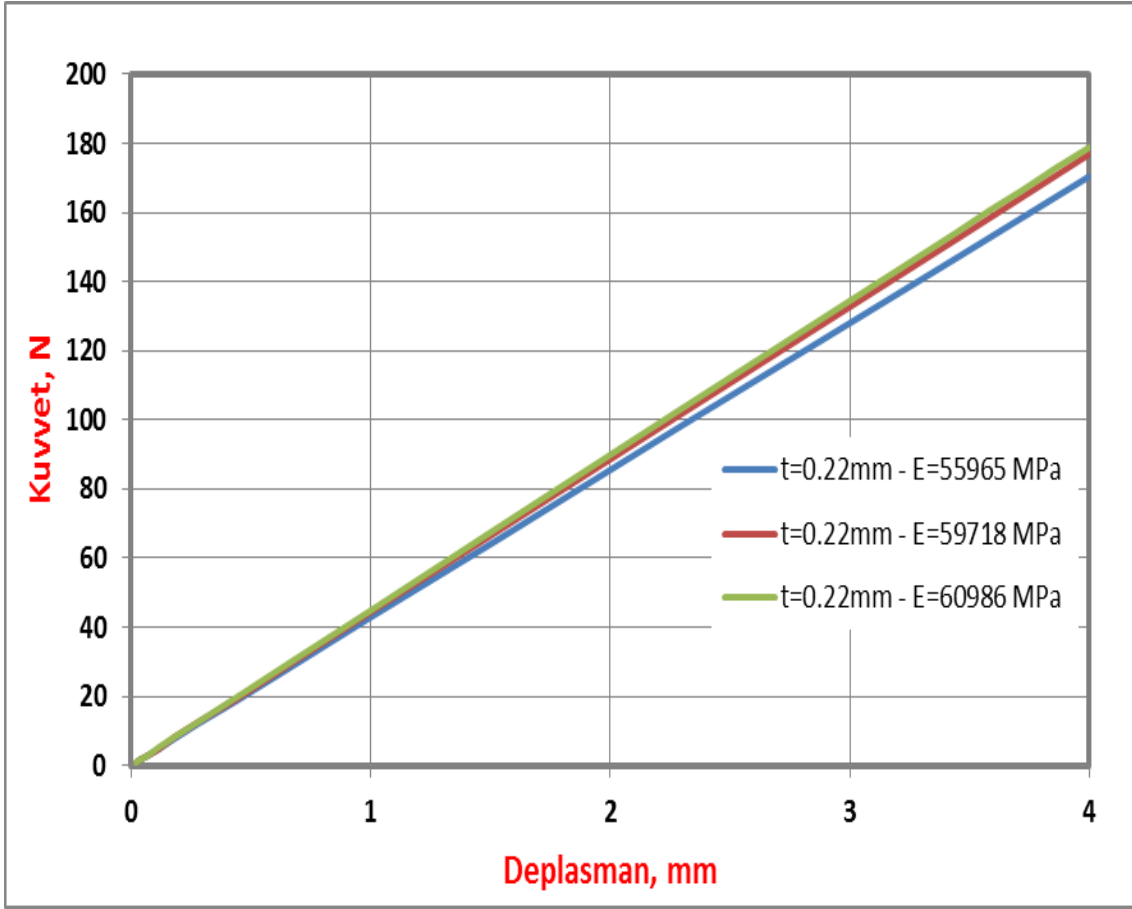
Şekil 3.11 Abaqus 0.18 mm Kalınlık İçin Kuvvet-Deplasman Grafiği.

Şekil 3.11’de test sonuçlarının matrsten arındırılmış şekilde dönüştürülerek elde edilen üç elastisite modüllü 0.18 mm karbon kumaş kalınlığı esas alınarak Abaqus programında modellenmiştir ve üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Kuvvet-deplasman grafiği çizdirilmiştir. Elastisite modülü arttıkça lineer bölgenin eğimide artmıştır.



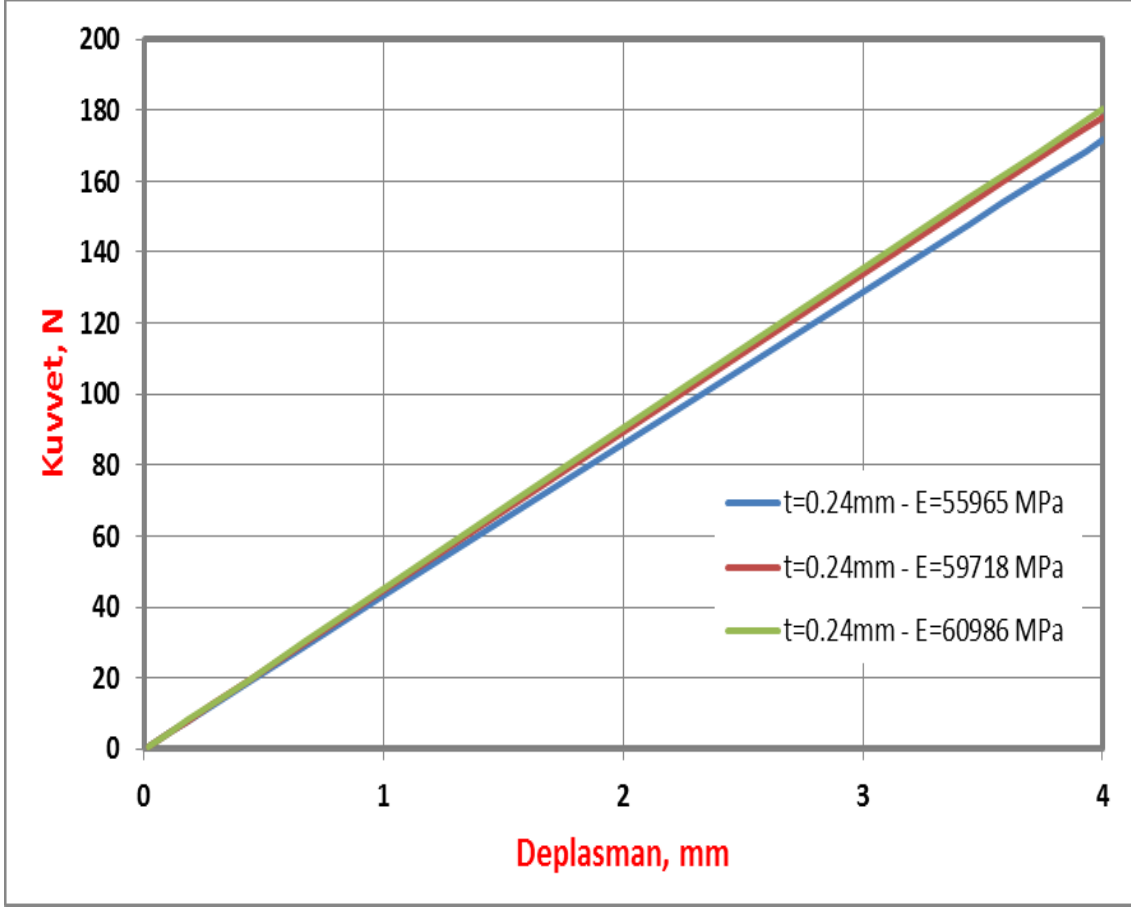
Şekil 3.12 Abaqus 0.20 mm Kalınlık İçin Kuvvet-Deplasman Grafiği.

Şekil 3.12’de test sonuçlarının matrsten arındırılmış şekilde dönüştürülerek elde edilen üç elastisite modüllü 0.20 mm karbon kumaş kalınlığı esas alınarak Abaqus programında modellenmiştir ve üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Kuvvet-deplasman grafiği çizdirilmiştir. Elastisite modülü arttıkça lineer bölgenin eğimide artmıştır.



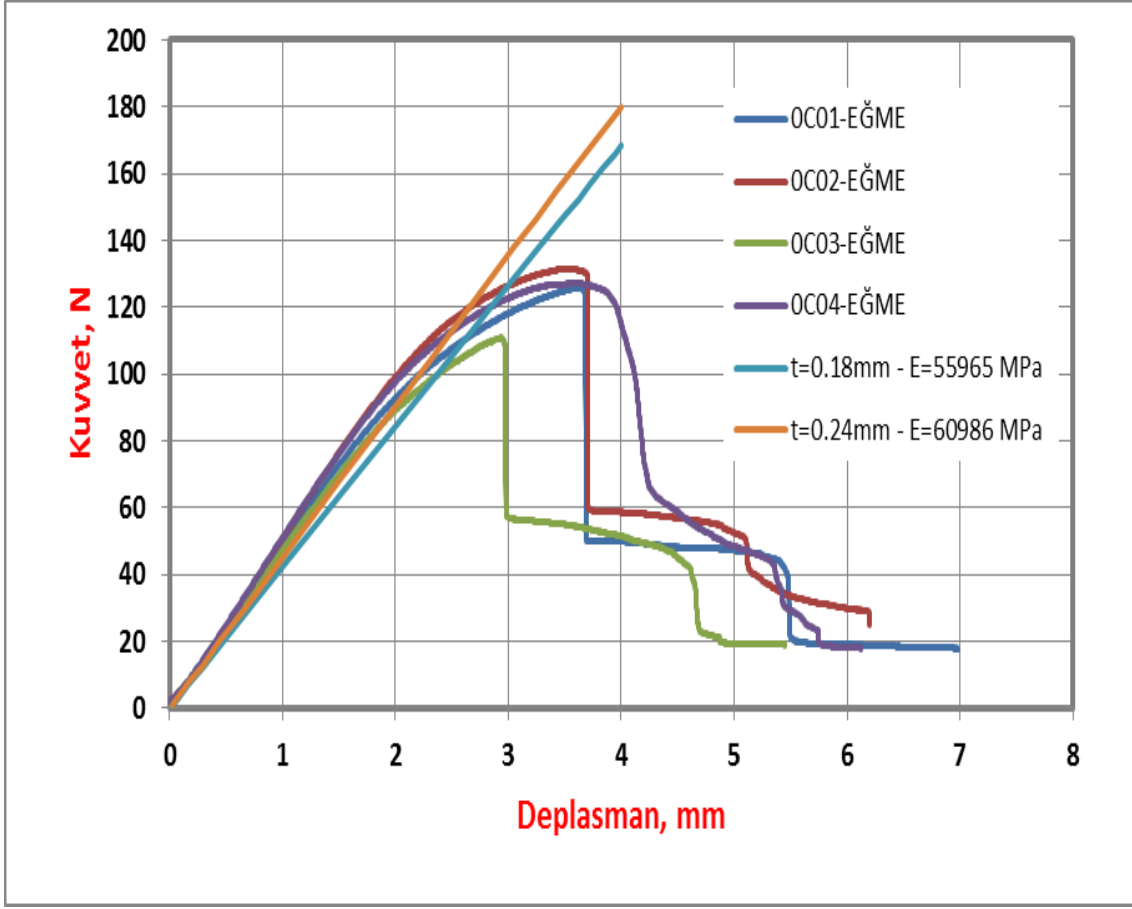
Şekil 3.13 Abaqus 0.20 mm Kalınlık İçin Kuvvet-Deplasman Grafiği.

Şekil 3.13’de test sonuçlarının matristen arındırılmış şekilde dönüştürülerek elde edilen üç elastisite modüllü 0.22 mm karbon kumaş kalınlığı esas alınarak Abaqus programında modellenmiştir ve üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Kuvvet-deplasman grafiği çizdirilmiştir. Elastisite modülü arttıkça lineer bölgenin eğimide artmıştır.



Şekil 3.14 Abaqus 0.20 mm Kalınlık İçin Kuvvet-Deplasman Grafiği.

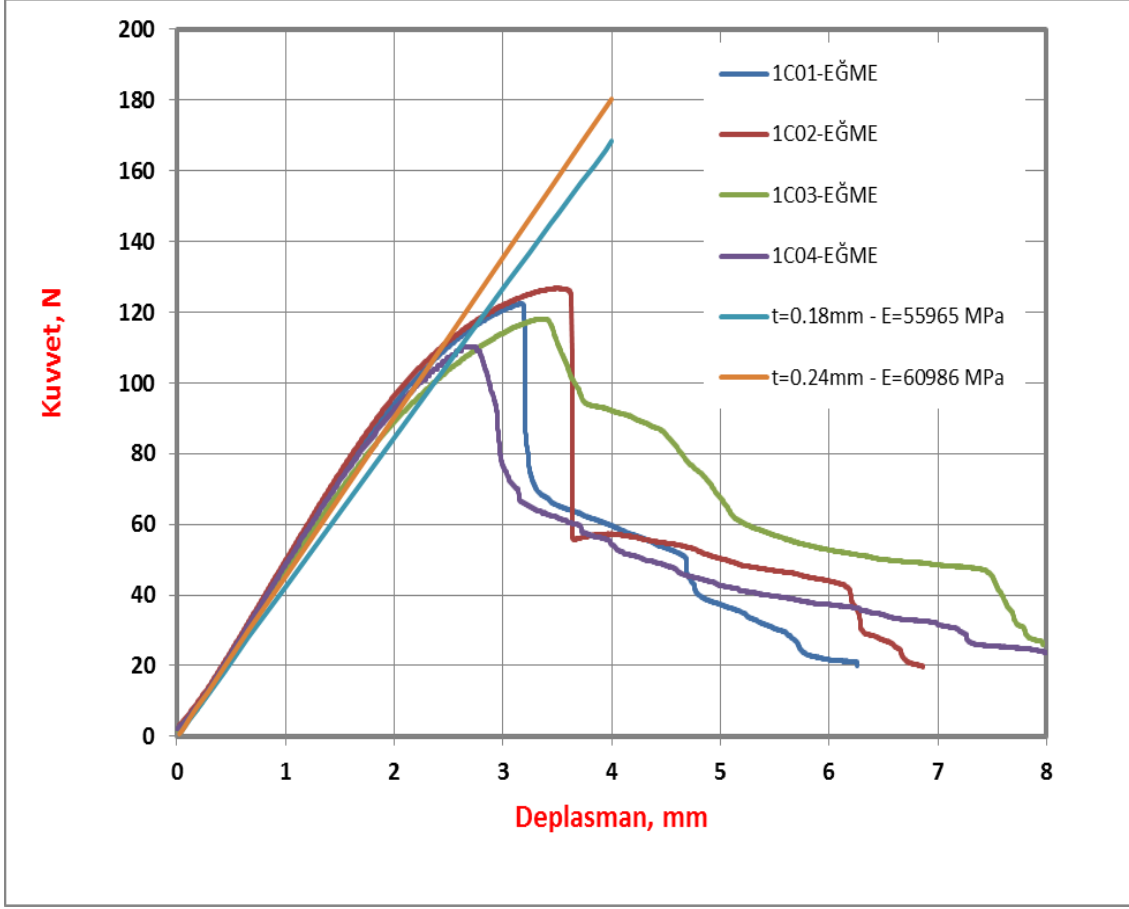
Şekil 3.14’de test sonuçlarının matristen arındırılmış şekilde dönüştürülerek elde edilen üç elastisite modüllü 0.24 mm karbon kumaş kalınlığı esas alınarak Abaqus programında modellenmiştir ve üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur. Kuvvet-deplasman grafiği çizdirilmiştir. Elastisite modülü arttıkça lineer bölgenin eğimide artmıştır.



Şekil 3.15 %0 Karbon Eğme Test Sonuçlarıyla Abaqus Sonuçlarının Karşılaştırılması.

Şekil 3.15’de matristen arındırılmış kalınlık esas alınan karbon nanotüp takviyesi olmayan (%0 CNT) eğme test numunelerinden elde edilen min. ve max. elastisite modüllü, 0.18 mm karbon kumaş kalınlığı esas alınarak Abaqus programında modellenmiştir. Sonrasında üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur ve kuvvet-deplasman grafikleri çizilmiştir. Karbon nanotüp takviyesi olmayan (%0 CNT) test numunelerinin kuvvet-deplasman grafikleriyle karşılaştırılmıştır.

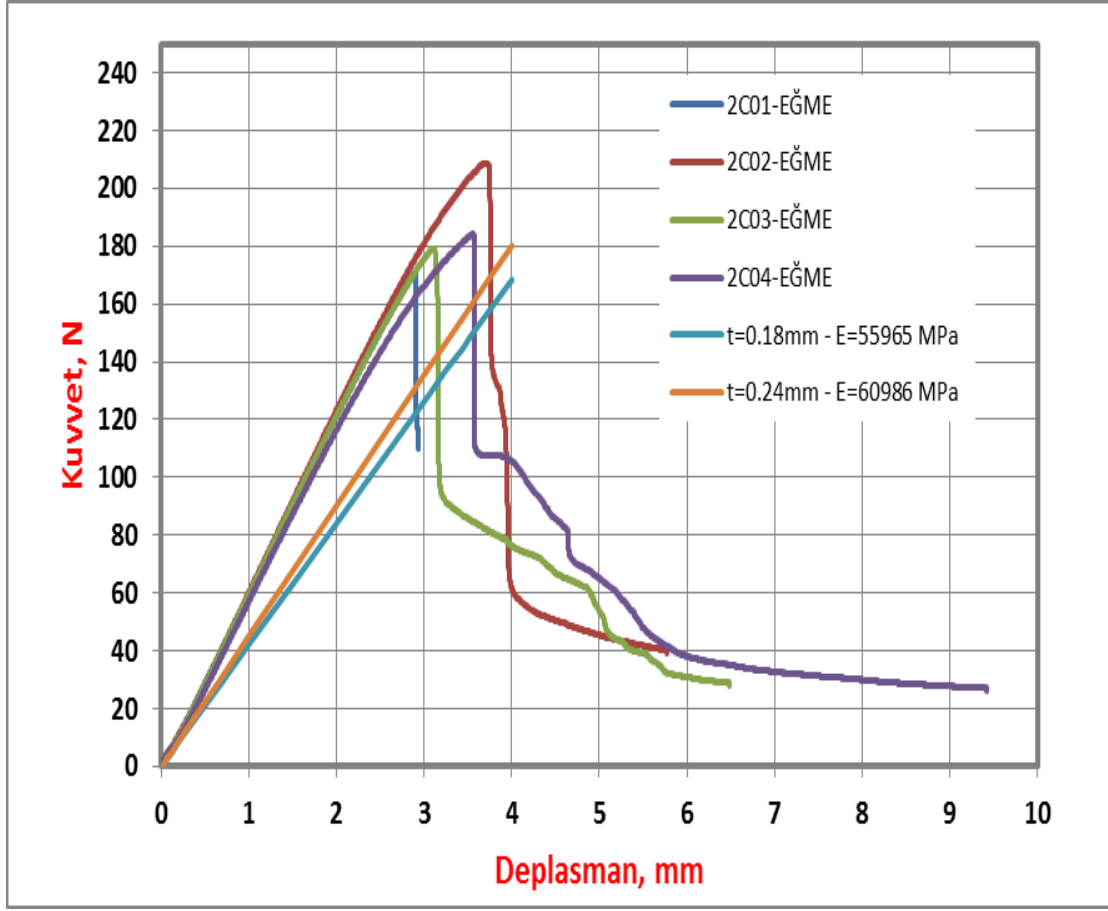
Üç nokta eğme testi sonuçları ve Abaqus programındaki eğme testi sonuçları karşılaştırıldığında lineer bölgenin yüksek korelasyonda örtüştüğü görülmüştür.



Şekil 3.17 %1 Karbon Eğme Test Sonuçlarıyla Abaqus Sonuçlarının Karşılaştırılması.

Şekil 3.17’de matristen arındırılmış kalınlık esas alınan %1 CNT takviyeli eğme test numunelerinden elde edilen min. ve max. elastisite modüllü, 0.18 mm karbon kumaş kalınlığı esas alınarak Abaqus programında modellenmiştir. Sonrasında üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur ve kuvvet-deplasman grafikleri çizilmiştir. %1 CNT takviyeli test numunelerinin kuvvet-deplasman grafikleriyle karşılaştırılmıştır.

Üç nokta eğme testi sonuçları ve Abaqus programındaki eğme testi sonuçları karşılaştırıldığında lineer bölgenin yüksek korelasyonda örtüştüğü görülmüştür.



Şekil 3.18 %1 Karbon Eğme Test Sonuçlarıyla Abaqus Sonuçlarının Karşılaştırılması.

Şekil 3.18’de matristen arındırılmış kalınlık esas alınan %2 CNT takviyeli eğme test numunelerinden elde edilen min. ve max. elastisite modüllü, 0.18 mm karbon kumaş kalınlığı esas alınarak Abaqus programında modellenmiştir. Sonrasında üç nokta eğme testine tabi tutulmuştur ve kuvvet-deplasman grafikleri çizilmiştir. %2 CNT takviyeli test numunelerinin kuvvet-deplasman grafikleriyle karşılaştırılmıştır.

Üç nokta eğme testi sonuçları ve Abaqus programındaki eğme testi sonuçları karşılaştırıldığında lineer bölgede ayrışma olduğu görülmüştür. Çekme testinden elde edilen test elastisite modülleri kullanılarak Abaqus programında yapılan eğme testinde karbon nanotüp etkisi tam olarak deneye yansıtılmadığından sonuçlar arasında bu farklılaşmaların olduğu düşünülmektedir.

4. TARTIŞMA Ve SONUÇ

Çizelge 4.1’de Karbon nanotüp takviyesinin etkilerini daha iyi yorumlayabilmek üzere %0 karbonlu çekme numuneleri ile %2 karbon nanotüp takviyeli çekme numunelerinin test sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan çekme testleri sonucunda elde edilen veriler tablolaştırılmıştır.

Çizelge 4.1 %0 - %2 Karbon Çekme Test Numunelerinin Sonuçları.

%0 Çekme Test Sonuçları				%2 Çekme Test Sonuçları			
Nr	E - Molüdü MPa	Rm MPa	Rm N	Nr	E - Molüdü MPa	Rm MPa	Rm N
0C01	32576	339.80	2369	2C01	33103	365.1	2740
0C02	32179	427.40	3240	2C02	40871	422.5	2990
0C03	35104	421.30	2926	2C03	32874	269.8	1975
0C04	34457	334.90	2585	2C04	39521	339.4	2573
Ort:	33579	380.8	2780	Ort:	36592	349.2	2569

Çizelge 4.1’de %0 CNT ile %2 CNT takviyeli çekme test numunelerinin sonuçları tablolaştırılmıştır.

Çizelge 4.2 %0 - %2 Karbon Çekme Test Numunelerinin Karşılaştırılması.

E - Molüdü (MPa)	Rm (MPa)	Rm (N)
(+) % 8	(-) % 8	(-) % 7

- Çizelge 4.2’de çekme testlerine baktığımızda karbon nanotüp oranı arttınca E-Modülünde bir artış olduğu görülmektedir. Buna karşın max. gerilme ve max. kuvvette bir azalma görülmektedir bu durum muhtemelen deney numunelerin üretiminden ve karbon yüzeylerdeki homojenizasyon sorunlarından kaynaklanmaktadır

Çizelge 4.3 %0 - %2 Karbon Eğme Test Numunelerinin Sonuçları.

%0 Eğme Test Sonuçları				%2 Eğme Test Sonuçları			
Nr	E - Modülü Mpa	F max. Mpa	Fmax. N	Nr	E - Modülü Mpa	Fmax. Mpa	Fmax. N
0C01	7505	43.7	126	2C01	9126	58.8	171
0C02	8282	47.0	131	2C02	9084	72.2	209
0C03	7439	39.6	111	2C03	8884	60.3	179
0C04	7880	44.1	127	2C04	8628	61.7	184
Ort:	7776.5	43.6	123.75	Ort:	8930.5	63.25	185.75

Çizelge 4.3’de %0 CNT ile %2 CNT takviyeli eğme test numunelerinin sonuçları tablollaştırılmıştır.

Çizelge 4.4 %0 - %2 Karbon Eğme Test Numunelerinin Sonuçları.

%0 - %2 EĞME TEST SONUÇLARI ARASINDA YÜZDESEL DEĞİŞİMLER		
(+) %13	(+) %31	(+) %33

- Çizelge 4.3’de ve Çizelge 4.4’e baktığımızda karbon nanotüplerin etkisine baktığımızda elastite modülünde, max. gerilmelerde ve max. kuvvet değerlerinde bir artış olduğu görülmektedir.
- 0-45° açılı olan çekme test sonuçları incelendiğinde %0 ile %1 karbon numunelerle %2 karbon takviyeli test numuneleri karşılaştırıldığında karbon nanotüp takviyesinin pozitif yönlü etkisi görülmektedir.

- %0 ile %1 karbon numunelerin max. gerilme ortalaması 85.8 Mpa, E-Modülü ortalamaları 8211 MPa hesaplanmıştır. %2 karbon takviyeli numunelere bakıldığında ise 121.3 Mpa, E-Modülü ortalamaları 8845 MPa hesaplanmıştır. Karbon nanotüp takviyesi arttığında gerek elastisite modülünün gerekse dayanımı bariz bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir.
- %2 karbon takviyeli numunelerin sonuçları karşılaştırıldığında ise test sonuçlarının sonlu elamanlar yöntemiyle elde edilen sonuçlardan farklılaşmanın olduğu görülmüştür. Bu farklılaşmanın sebebi incelendiğinde %0 ile %2 karbon numunelerin çekme test sonuçlarıyla, eğme test sonuçlarında elde edilen elastisite modüllerine bakıldığında, çekmede % 8'lik bir artış varken eğmede bu artış %13'ü olmuştur. Çekme testi verileri eğme testinde kullanıldığı için Abaqus programında karbon nanotüp etkisi tam yansıtılamamıştır.
- Çekme ve eğme testlerinde kullanılan yüzey tabakaları matris ve karbon takviye kısmı olarak iki kısımdan oluşmuştur, dolayısıyla testlerde kullanılan kalınlıklar matris + karbon kumaş kısımlarının oluşturduğu bir kalınlıktır. Bu tezde incelediğimiz karbon nanotüp kullanımının etkisini incelemek adına karbon kumaş kalınlıklarının kalınlıklarını kullanarak bir yorum yapmak gerekmektedir.

0.18 mm ile 0.24 mm arasında kalınlığa sahip olan karbon kumaşların etkisi incelemek adına sayısal testlerde bu kalınlıklar kullanılmıştır. Abaqus programında yapılan analizlerde matristen ayrıştırılmış kalınlıklar kullanılmıştır. Bu durumda tabii ki gerçek test sonuçlarıyla sayısal testler arasında farklılıklara sebep olabilmektedir.

Aşağıda sayacağımız sebeplerden dolayı üretilen tüm test numunelerini aynı özellikte imal etmekte sorunlara oluşabilmektedir. Bu sebepler gerek çekme gerekse eğme deneylerinde oluşan sonuçları etkileyebilmektedir.

- 1) Reçine ve karbon karışımlarının birleşimiyle oluşan kompozit yüzey malzemesinin oluşturulmasında vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. Vakum infüzyon yönteminde 5-9 nanometre büyüklüğündeki karbon partiküllerin karıştırılması ve yayılması sırasında homojinasyon sorunları oluşabilmektedir. Çünkü mekanik karıştırma yapıldığından oluşturulan karbon plakalarda bölgesel farklılıklar oluşabilmektedir.
- 2) Karbon yüzey tabakalarından deney numunelerin hazırlanması sırasında makas kullanılmıştır. Makas gözle görülmeyen mikro çatlaklar oluşturup çentik etkisi yaparak test numunelerinin olduğundan daha az mukavemet değerlerine ulaşmasına neden olabilmektedir. Günümüzde bu kesim işlerinde su jetiyle gibi daha hassas kesim teknikleri kullanılabilir.
- 3) Çekme deney numunelerinde kullanılan karbon fiber plakaların yapıştırılmasında kullanılan reçine ve katalizör elle karıştırılarak hazırlanmıştır. Elle karıştırma ve bu reçine/katalizör oranlamasında oluşabilecek farklılıklar CFP ile karbon kağıt arasında kayma gerilmesine sebep olabileceğinde daha erken mukavemet değerlerinde kopmalar gerçekleşebilmektedir. Yine karbon fiber plakaların prese bağlanan kısımlarından karbon plakaya geçişte oluşacak gerilme yığılmasını önlemek için karbon plakaların uç kısımlarına 45° açıyla pah yapılabilir.
- 4) Sandviç plakaların oluşturulmasında petek yapıyla karbon yüzeyler arasındaki reçine bazlı yapıştırma işlemi mekanik karıştırma yöntemiyle yapılmıştır. Mekanik karıştırmanın ve elle yapıştırıcı malzemenin sürülmesi sırasında numuneler arasında farklılıklar oluşabilmektedir. Daha homojen karışım yapabilecek karıştırıcılar ve zaman kontrollü karıştırma yöntemi kullanılabilir. Yapıştırıcı kalınlığını her noktada eşit olacak şekilde homojen yayılım sağlayacak şekilde farklı yöntemler kullanılabilir.

- 5) Sandviç plakalar oluşturulduktan sonra test numunesi boyutunda kesilmesi dişsiz elektrikli testere ile yapılmıştır. Kesim sırasında yine mikro çatlaklar oluşup çentik etkisiyle daha düşük dayanımların elde edilmesine neden olabilmektedir. Bunun yerine su jeti tarzında çentik etkisi azaltacak kesme yöntemleri kullanılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Abbadi, A., Azari, Z., Belouettar, R., Belouettar, S. and Freres, P. (2009). Experimental investigation of static and fatigue behaviour of composites honeycomb materials using four point bending tests. *Composite Structures*, **87**: 265–273
- Ahmad, M., Ahmad, S., Amjad1, M., Badshah, S., Jan, S. and Ullah khan R. (2015). Flexural strength of honey comb sandwich structures. *Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, Vol: 4, Issue 1,
- Aktay, L., Johnson, A. and Kröplin, B. (2008) Numerical modelling of honeycomb core crush behaviour. *Engineering Fracture Mechanics*, **75**: 2616–2630
- Arslan, N. ve Kaman, M.O. (2002). Alüminyum, kağıt ve cam elyaf petek yapılı kompozitlerin üretim teknikleri ve mekanik özelliklerinin araştırılması. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir
- Asprone, D., Auricchio, F., Menna, C, Morganti, S., Prota, A. and Reali, A. (2013). Statistical finite element analysis of the buckling behavior of honeycomb Structures. *Composite Structures*, **105**: 240–255
- Aydıncak İ. (2007). İ nvestigation of design and analyses principles of honeycomb structures. The degree of master of science, Middle East Technical University, Ankara
- Bekem, A., Doğu, M., Ünal, A. and Ercan, H. (2011). Uçak sanayiinde kullanılan bal peteği kompozitlerin mekanik davranışlarının incelenmesi. 6th International Advanced Technologies Symposium (*IATS'11*), 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey
- Bezazi, A., Boukharouba, W. and Scarpa, F. (2014). Identification and prediction of cyclic fatigue behaviour in sandwich panels. *Measurement*, **53**: 161–170
- Carbaş M. (2007). Farklı sınır şartlarına sahip sandviç plakların statik davranışlarının deneysel ve sayısal incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Chai, G.B., Foo, C.C. and Seah, L.K. (2006). Mechanical properties of nomex material and nomex honeycomb structure. *Composite Structures*, **80**: 588–594

- Chang, L. and Jen, Y. (2008). Evaluating bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams using local parameters. *International Journal of Fatigue*, **30**: 1103–1114
- Choi, J., Park, S., Roy, R. and Kweon, J. (2014). Characterization of nomex honeycomb core constituent material mechanical properties . *Composite Structures*, **117**: 255–266
- Cuia, X., Chen, P., Gao, Y., Jie, L., Lu, C., Zhao, M. and Wang, J. (2015). Stress distribution on composite honeycomb sandwich structure suffered from bending load. *Procedia Engineering*, **99**: 405 – 412
- Crupi, V., Epasto, G. and Guglielmino, E. (2012). Collapse modes in aluminium honeycomb sandwich panels under bending and impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, **43**: 6e15
- Dash, P. K., Sabarish, M., Santhanakrishnan, R. And Joseph Stanley A. (2012) Flexural property evaluation of gfrp-foam sandwich composite an experimental approach. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol:7, No. 10
- Es-Said, O., Galletti, G. and Vinqvist, C. (2008). Theoretical design and analysis of a honeycomb panel sandwich structure loaded in pure bending. *Engineering Failure Analysis*, **15**: 555–562
- Freund, j. ve Karakoç, A. (2012). Experimental studies on mechanical properties of cellular structures using nomex honeycomb cores. *Composite Structures*, **94**: 2017–2024
- Freund, J., Karakoc, A. and Santaoja, K. (2013). Simulation experiments on the effective in-plane compliance of the honeycomb materials. *Composite Structures*, **96**: 312–320
- Gilioli, A., Giglio, M. and Manes, A. (2012). Numerical investigation of a three point bending test on sandwich panels with aluminum skins and nomex honeycomb core. *Computational Materials Science*, **56**: 69–78

- Guan, Z., Liu, L. and Wang, H. (2015). Experimental and numerical study on the mechanical response of nomex honeycomb core under transverse. *Composite Structures*, **121**: 304–314
- Güldoğan, A. and Şakar, G. (2015) Delaminasyonlu sandviç kompozitlerin dinamik davranışlarının incelenmesi. Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu, İzmir, 14-17 Haziran 20153
- Petras, A. and Sutcliffe, M.P.F. (1999). Indentation resistance of sandwich beams. *Composite Structures*, **46**: 413-424
- Şakar, G. ve Bolat, F. C. (2015). The free vibration vnalysis of honeycomb sandwich beam using 3D and continuum model. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, Vol:9, No:6, 2015

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Osman Fevzi YAMAN
Doğum Yeri ve Tarihi : Afyon - 1979
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0532 644 47 066

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Afyon E.M.L, (1993-1996)
Lisans : Marmara Üniversitesi, T.E.F., Tasarım Ve Kons.
Öğrt., (2000-2004)
Eskişehir Anadolu Üniversitesi,
İşletme Fakültesi (2009-2013)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri
Enstitüsü, İş Güvenliği Anabilim Dalı, (2014-
2016)
Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri
Enstitüsü, Makine Müh. Anabilim Dalı, (2015-
2017)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl: MEB (2005-2007)

Mimari Çizim Bürosu (2007-2009)
Baraz Mak. (2010-2012)
Yüntaş A.Ş. (2011-Devam)