

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**FARKLI DESTEK MESAFELERİNDE POLİVİNİL KLORÜR  
(PVC) ÇEKİRDEK YAPILI SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN  
EĞİLME DAVRANIŞININ NÜMERİK ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**METE OĞUZHAN EFE**

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2019**

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**FARKLI DESTEK MESAFELERİNDE POLİVİNİL KLORÜR  
(PVC) ÇEKİRDEK YAPILI SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN  
EĞİLME DAVRANIŞININ NÜMERİK ANALİZİ**

**YÜKSEK LISANS TEZİ**

**METE OĞUZHAN EFE**

**Jüri Üyeleri : Prof. Dr. İrfan AY (Tez Danışmanı)**

**Dr.Öğr.Üyesi Mehmet İREN**

**Dr.Öğr.Üyesi Ege Anıl DİLER**

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2019**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

Mete Oğuzhan EFE tarafından hazırlanan “FARKLI DESTEK MESAFELERİNDE POLİVİNİL KLORÜR (PVC) ÇEKİRDEK YAPILI SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN EĞİLME DAVRANIŞININ NÜMERİK ANALİZİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 05.07.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

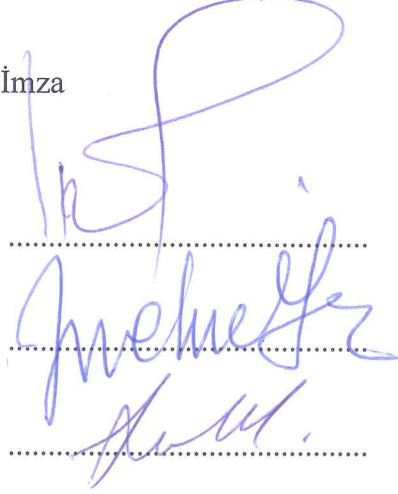
Jüri Üyeleri

Danışman  
Prof.Dr. İrfan AY

Üye  
Dr.Öğr.Üyesi Mehmet İREN

Üye  
Dr.Öğr.Üyesi Ege Anıl DİLER

İmza



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

## ÖZET

**FARKLI DESTEK MESAFELERİNDE POLİVİNİL KLORÜR (PVC)  
ÇEKİRDEK YAPILI SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN EĞİLME  
DAVRANIŞININ NÜMERİK ANALİZİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METE OĞUZHAN EFE  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. İRFAN AY)**

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2019**

Bu çalışmada denizcilik uygulamaları için geliştirilmiş sandviç kompozit yapıların eğilme davranışlarının nümerik analizleri yapılmıştır. Cam fiber takviyeli yüzey tabaka ve PVC çekirdek malzemeden oluşan sandviç kompozit modelleri oluşturulmuştur. Bu yapıların üç nokta ve dört nokta eğilme yükleri altındaki mekanik davranışları nümerik analiz yönetimiyle incelenmiş ve deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Eğilme davranışı hakkında daha doğru varsayım yapabilmek için geometri ve materyallerin doğrusal olmayan özellikleri de tasarım sürecine dahil edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı farklı destek mesafelerindeki farklı kesik konfigürasyonlarına sahip PVC çekirdek malzemelerden oluşan sandviç kompozit yapıların eğilme davranışlarının karşılaştırılmasıdır. Nümerik analiz modelleri  $\frac{1}{4}$  ölçeğinde farklı destek mesafeleri ve testere kesikli, bıçak kesikli ve oluklu kesikli köpük çekirdek malzeme konfigürasyonları kullanılarak oluşturulmuştur. Nümerik analizler ANSYS Workbench 16.0 sonlu elemanlar analizi programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen nümerik analiz sonuçları deneysel verilerle doğrulanmıştır. Elastik ve plastik bölgelerde hasar başlangıcına kadar deneysel sonuçlarla nümerik analiz sonuçlarının uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Sandviç yapıların hasar yükleri ve rijitlik değerleri mesnet mesafesindeki artışa bağlı olarak azalmıştır. Testere kesikli köpük çekirdek konfigürasyonuna sahip modeller mesnet aralığına bağlı olarak sandviç yapıların rijitlik değerlerinde %39-%92.3, hasar yüklerinde ise %50-%81 oranında artış sağlamıştır. Reçinece zengin bölgelerde kesik kalınlığındaki artış sandviç yapıların rijitlik değerlerinde ve yük taşıma kapasitelerinde artışa sebep olmuştur. Bunun yanı sıra oluklu kesikli köpük çekirdek konfigürasyonuna sahip modellerin, diğer kesik konfigürasyonlarına sahip modellere göre daha rijit bir yapıya sahip olduğu ve daha fazla yük taşıdığı nümerik analiz sonuçlarında gözlemlenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Sandviç kompozitler, eğilme davranışı, nümerik analiz.

## **ABSTRACT**

### **NUMERICAL ANALYSIS OF FLEXURAL BEHAVIOR OF SANDWICH COMPOSITES MADE OF POLYVINYL CHLORIDE (PVC) CORE WITH DIFFERENT SPAN LENGTHS**

**MSC THESIS**

**METE OGUZHAN EFE**

**BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
MECHANICAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: PROF. DR. IRFAN AY )**

**BALIKESİR, JUNE 2019**

In this study, numerical analysis of flexural behavior of sandwich composite structures developed for maritime applications was performed. Sandwich composite models are formed of fiberglass skins and PVC core material. The mechanical behavior of these structures under three-point and four-point bending loads was investigated by numerical analysis and compared with experimental datas. In order to make more accurate assumptions about bending behavior, geometry and nonlinear properties of materials were also included in the design process.

The aim of this study is to compare the flexural behavior of sandwich composite structures with PVC core materials having different cut configurations at different span lengths. Numerical analysis models with  $\frac{1}{4}$  scales are created using three different span lengths with saw-cut, knife-cut and grooved-cut foam core configurations. Numerical analyzes were performed using commercial finite element analysis software, ANSYS Workbench 16.0.

Numerical analysis results were verified by experimental data. It was found that there is an compliance between numerical analysis results and the experimental results. Bending ultimate load and stiffness values of sandwich structures decreased with increasing span length. Using saw-cut core increased the bending stiffness values by 39% and 92.3% and ultimate loads bt 50% and 81% depending on span length. Thicker cuts increased stiffness values and ultimate load capacities of sandwich structures due to resin-riched regions. It was observed from the numerical analysis results that the grooved-cut foam cored models have better stiffness values and ultimate load capacities than the models with other cut configurations.

**KEYWORDS:** Sandwich composites, flexural behavior, numeric analysis.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>4</b>
<b>3. SANDVIÇ KOMPOZİT YAPILAR</b> .....	<b>8</b>
3.1 Takviye Elemanları .....	<b>9</b>
3.1.1 Cam Fiber Takviye Elemanları .....	10
3.1.2 Polimer Fiber Takviye Elemanları .....	11
3.1.3 Karbon Fiber Takviye Elemanları .....	12
3.2 Reçineler(Matriks Elemanları) .....	12
3.2.1 Polyester Reçineler .....	13
3.2.2 Vinil Ester Reçineler .....	14
3.2.3 Epoksi Reçineler .....	14
3.2.4 Termoplastik Reçineler .....	15
3.3 Çekirdek Malzemeler .....	15
3.3.1 Balsa Çekirdek Malzeme .....	15
3.3.2 PVC Köpükler.....	16
3.3.3 Petek Yapılı Çekirdek Malzeme .....	17
<b>4. PVC ÇEKİRDEK YAPILI SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN EĞİLME DAVRANIŞLARININ ANSYS İLE NÜMERİK ANALİZİ</b> .....	<b>18</b>
4.1 Sonlu Elemanlar Modeli.....	18
<b>5. ANALİZ SONUÇLARI</b> .....	<b>27</b>
5.1 Nümerik Analiz Sonuçları .....	29
5.1.1 TK3N ve TK4N Modellerinin Analiz Sonuçları .....	29
5.1.1.1 TK3N ve TK4N Analiz Sonuçlarının Destek Mesafelerine Göre Karşılaştırılması.....	37
5.1.2 BK3N ve BK4N Modellerinin Analiz Sonuçları.....	42
5.1.2.1 BK3N ve BK4N Analiz Sonuçlarının Destek Mesafelerine Göre Karşılaştırılması.....	50
5.1.3 OK3N ve OK4N Modellerinin Analiz Sonuçları .....	55
5.1.3.1 OK3N ve OK4N Analiz Sonuçlarının Destek Mesafelerine Göre Karşılaştırılması.....	63
5.1.4 R3N ve R4N Modellerinin Analiz Sonuçları.....	68
5.1.4.1 R3N ve R4N Analiz Sonuçlarının Destek Mesafelerine Göre Karşılaştırılması.....	76
5.1.5 Modellerin Çekirdek Konfigurasyonlarına Göre Karşılaştırılması ..	81
<b>6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ</b> .....	<b>84</b>
<b>7. KAYNAKLAR</b> .....	<b>85</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 1.1:</b> Kompozit malzemelerin monolitik geleneksel malzemelerle karşılaştırılması. [1].....	1
<b>Şekil 3.1:</b> Sandviç kompozit yapının bileşenleri. ....	8
<b>Şekil 3.2:</b> Karbon fiber malzemenin mukavemetinin çap artışına karşın azalması. [1] .....	9
<b>Şekil 3.3:</b> Balsa hücre geometrisi. A: ortalama hücre uzunluğu= 0.06cm, B: Ortalama hücre çapı=0.003cm, C: Ortalama hücre kalınlığı= 0.00015cm. ....	16
<b>Şekil 4.1:</b> AIREX® ticari köpük modellerinin kesik konfigürasyonları. ....	20
<b>Şekil 4.2:</b> ASTM C393 üç nokta eğilme ve ASTM D7249 dört nokta eğilme konfigürasyonları. ....	21
<b>Şekil 4.3:</b> Kesiksiz referans sandviç kiriş sonlu elemanlar modeli. (R3N180)	23
<b>Şekil 4.4:</b> Testere kesikli sandviç kiriş sonlu elemanlar modeli. (TK3N180)..	24
<b>Şekil 4.5:</b> Bıçak kesikli sandviç kiriş sonlu elemanlar modeli. (BK3N180)....	25
<b>Şekil 4.6:</b> Oluklu kesikli sandviç kiriş sonlu elemanlar modeli. (OK3N180)..	26
<b>Şekil 5.1:</b> TK3N180 ve R3N180 modellerinin üç nokta eğilme deneysel ve nümerik analiz kuvvet-deplasman sonuçlarının karşılaştırılması. .	27
<b>Şekil 5.2:</b> TK3N300 ve R3N300 modellerinin üç nokta eğilme deneysel ve nümerik analiz kuvvet-deplasman sonuçlarının karşılaştırılması. .	27
<b>Şekil 5.3:</b> TK3N450 ve R3N450 modellerinin üç nokta eğilme deneysel ve nümerik analiz kuvvet-deplasman sonuçlarının karşılaştırılması. .	28
<b>Şekil 5.4:</b> TK4N450 ve R4N450 modellerinin dört nokta eğilme deneysel ve nümerik analiz kuvvet-deplasman sonuçlarının karşılaştırılması. .	28
<b>Şekil 5.5:</b> TK3N180 için normal gerilim dağılımı.....	30
<b>Şekil 5.6:</b> TK3N180 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.....	30
<b>Şekil 5.7:</b> TK3N180 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.....	31
<b>Şekil 5.8:</b> TK3N180 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.....	31
<b>Şekil 5.9:</b> TK3N300 için normal gerilim dağılımı.....	32
<b>Şekil 5.10:</b> TK3N300 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.....	32
<b>Şekil 5.11:</b> TK3N300 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.....	33
<b>Şekil 5.12:</b> TK3N300 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.....	33
<b>Şekil 5.13:</b> TK3N450 için normal gerilim dağılımı. ....	34
<b>Şekil 5.14:</b> TK3N450 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.....	34
<b>Şekil 5.15:</b> TK3N450 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.....	35
<b>Şekil 5.16:</b> TK3N450 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.....	35
<b>Şekil 5.17:</b> TK4N450 için normal gerilim dağılımı. ....	36

<b>Şekil 5.18:</b> TK4N450 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.....	36
<b>Şekil 5.19:</b> TK4N450 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.....	37
<b>Şekil 5.20:</b> TK4N450 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.....	37
<b>Şekil 5.21:</b> Testere kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki normal çeki gerilmeleri.....	38
<b>Şekil 5.22:</b> Testere kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki normal bası gerilmeleri.....	38
<b>Şekil 5.23:</b> Testere kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki maks. kayma gerilmeleri.....	39
<b>Şekil 5.24:</b> Testere kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki maks. elastik kayma uzaması.....	39
<b>Şekil 5.25:</b> Testere kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki eşdeğer plastik uzama.....	40
<b>Şekil 5.26:</b> Testere kesikli modellerden kalınlık doğrultusunda alınan bir kesitteki normal gerilme değişimleri.....	41
<b>Şekil 5.27:</b> BK3N180 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.....	43
<b>Şekil 5.28:</b> BK3N180 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.....	43
<b>Şekil 5.29:</b> BK3N180 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.....	44
<b>Şekil 5.30:</b> BK3N180 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.....	44
<b>Şekil 5.31:</b> BK3N300 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.....	45
<b>Şekil 5.32:</b> BK3N300 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.....	45
<b>Şekil 5.33:</b> BK3N300 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.....	46
<b>Şekil 5.34:</b> BK3N300 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.....	46
<b>Şekil 5.35:</b> BK3N450 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.....	47
<b>Şekil 5.36:</b> BK3N450 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.....	47
<b>Şekil 5.37:</b> BK3N450 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.....	48
<b>Şekil 5.38:</b> BK3N450 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.....	48
<b>Şekil 5.39:</b> BK4N450 için normal gerilim dağılımı.....	49
<b>Şekil 5.40:</b> BK4N450 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.....	49
<b>Şekil 5.41:</b> BK4N450 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.....	50
<b>Şekil 5.42:</b> BK4N450 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.....	50
<b>Şekil 5.43:</b> Bıçak kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki normal çeki gerilmeleri.....	51
<b>Şekil 5.44:</b> Bıçak kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki normal bası gerilmeleri.....	51



<b>Şekil 5.45:</b> Bıçak kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki maks. kayma gerilmeleri.....	52
<b>Şekil 5.46:</b> Bıçak kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki maks. elastik kayma uzaması.....	52
<b>Şekil 5.47:</b> Bıçak kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki eşdeğer plastik uzama.....	53
<b>Şekil 5.48:</b> Bıçak kesikli modellerden kalınlık doğrultusunda alınan bir kesitteki normal gerilme değişimleri.....	54
<b>Şekil 5.49:</b> OK3N180 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.....	56
<b>Şekil 5.50:</b> OK3N180 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.....	56
<b>Şekil 5.51:</b> OK3N180 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.....	57
<b>Şekil 5.52:</b> OK3N180 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.....	57
<b>Şekil 5.53:</b> OK3N300 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.....	58
<b>Şekil 5.54:</b> OK3N300 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.....	58
<b>Şekil 5.55:</b> OK3N300 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.....	59
<b>Şekil 5.56:</b> OK3N300 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.....	59
<b>Şekil 5.57:</b> OK3N450 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.....	60
<b>Şekil 5.58:</b> OK3N450 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.....	60
<b>Şekil 5.59:</b> OK3N450 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.....	61
<b>Şekil 5.60:</b> OK3N450 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.....	61
<b>Şekil 5.61:</b> OK4N450 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.....	62
<b>Şekil 5.62:</b> OK4N450 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.....	62
<b>Şekil 5.63:</b> OK4N450 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.....	63
<b>Şekil 5.64:</b> OK4N450 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.....	63
<b>Şekil 5.65:</b> Oluklu kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki normal çeki gerilmeleri.....	64
<b>Şekil 5.66:</b> Oluklu kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki normal bası gerilmeleri.....	64
<b>Şekil 5.67:</b> Oluklu kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki maks. kayma gerilmeleri.....	65
<b>Şekil 5.68:</b> Oluklu kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki maks. elastik kayma uzaması.....	65
<b>Şekil 5.69:</b> Oluklu kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki eşdeğer plastik uzama.....	66
<b>Şekil 5.70:</b> Oluklu kesikli modellerden kalınlık doğrultusunda alınan bir kesitteki normal gerilme değişimleri.....	67
<b>Şekil 5.71:</b> R3N180 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.....	69
<b>Şekil 5.72:</b> R3N180 için köpük malzemedeki maks kayma gerilimi dağılımı.....	69

<b>Şekil 5.73:</b> R3N180 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.....	70
<b>Şekil 5.74:</b> R3N180 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.....	70
<b>Şekil 5.75:</b> R3N300 sandviç numune için normal gerilim dağılımı. ....	71
<b>Şekil 5.76:</b> R3N300 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.	71
<b>Şekil 5.77:</b> R3N300 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.....	72
<b>Şekil 5.78:</b> R3N300 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.....	72
<b>Şekil 5.79:</b> R3N450 sandviç numune için normal gerilim dağılımı. ....	73
<b>Şekil 5.80:</b> R3N450 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.	73
<b>Şekil 5.81:</b> R3N450 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.....	74
<b>Şekil 5.82:</b> R3N450 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.....	74
<b>Şekil 5.83:</b> R4N450 sandviç numune için normal gerilim dağılımı. ....	75
<b>Şekil 5.84:</b> R4N450 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.....	75
<b>Şekil 5.85:</b> R4N450 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.....	76
<b>Şekil 5.86:</b> R4N450 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.....	76
<b>Şekil 5.87:</b> Kesiksiz modellerin farklı destek mesafelerindeki normal çeki gerilmeleri. ....	77
<b>Şekil 5.88:</b> Kesiksiz modellerin farklı destek mesafelerindeki normal bası gerilmeleri. ....	77
<b>Şekil 5.89:</b> Kesiksiz modellerin farklı destek mesafelerindeki maks. kayma gerilmeleri. ....	78
<b>Şekil 5.90:</b> Kesiksiz modellerin farklı destek mesafelerindeki maks. elastik kayma uzaması. ....	78
<b>Şekil 5.91:</b> Kesiksiz modellerin farklı destek mesafelerindeki eşdeğer plastik uzama. ....	79
<b>Şekil 5.92:</b> Kesiksiz modellerden kalınlık doğrultusunda alınan bir kesitteki normal gerilme değişimleri. ....	80
<b>Şekil 5.93:</b> 180mm destek mesafesinde ve üç nokta eğilme altındaki kuvvet-deplasman grafiği. ....	81
<b>Şekil 5.94:</b> 300mm destek mesafesinde ve üç nokta eğilme altındaki kuvvet-deplasman grafiği. ....	81
<b>Şekil 5.95:</b> 450mm destek mesafesinde ve üç nokta eğilme altındaki kuvvet-deplasman grafiği. ....	82
<b>Şekil 5.96:</b> 450mm destek mesafesinde ve üç nokta eğilme altındaki kuvvet-deplasman grafiği. ....	82

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 1.1:</b> Kompozit malzemeler ve bazı geleneksel malzemelerin mekanik özellikleri. [2] .....	2
<b>Tablo 3.1:</b> Cam fiberlerin gösterimleri ve çapları. ....	10
<b>Tablo 3.2:</b> E-Cam ve S-Cam fiberlerin cam bileşenleri. ....	11
<b>Tablo 3.3:</b> Bazı fiber takviye elemanlarının mekanik özellikleri. ....	12
<b>Tablo 3.4:</b> Termoset reçinelerin mekanik özellikleri. ....	14
<b>Tablo 3.5:</b> Bazı çekirdek malzemelerin mekanik özellikleri. ....	17
<b>Tablo 4.1:</b> E-Cam fiber takviyeli yüzey tabakaların deneysel verileri. [38] ....	19
<b>Tablo 4.2:</b> AIREX® C70.75 köpük malzemenin mekanik özellikleri. ....	19
<b>Tablo 4.3:</b> Sertleşmiş Polives™ 702 reçine için mekanik özellikler. ....	21
<b>Tablo 4.4:</b> Modellerin geometrik boyutları ve analiz kodu açıklamaları. ....	22
<b>Tablo 4.5:</b> Sonlu elemanlar modellerinin ağ yapısı özellikleri. ....	22
<b>Tablo 5.1:</b> Deneysel ve nümerik analiz verilerinin karşılaştırılması. ....	29
<b>Tablo 5.2:</b> Nümerik analiz verilerinin karşılaştırılması. ....	83

## ÖNSÖZ

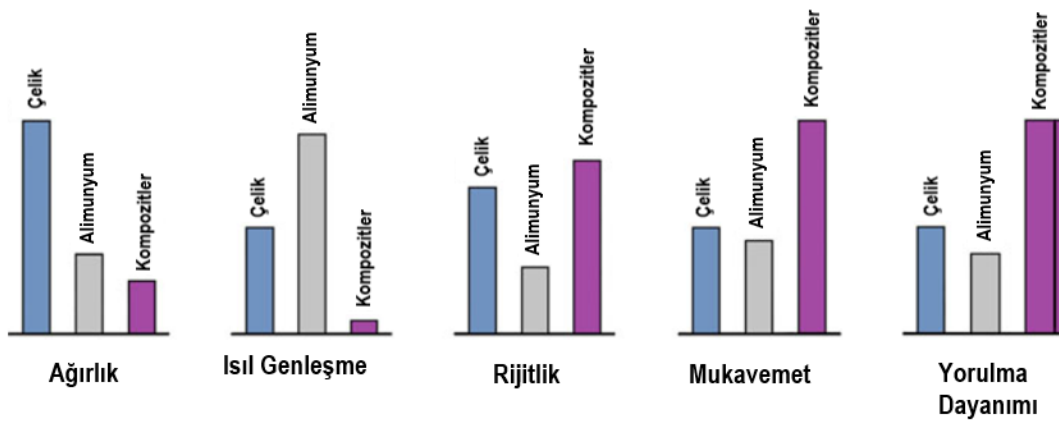
Tez çalışmam sırasında bilgi ve tecrübesi ile bana yol gösteren çok değerli hocalarım Prof. Dr. İrfan Ay ve Dr. Öğretim Üyesi Akın ATAŞ'a ve çalışmamın nümerik analizi aşamasında, büyük bir özveri göstererek bana yardımcı olan Arş. Gör. Fatih BALIKOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca maddi ve manevi desteğini hiç eksik etmeyen aileme ve dostlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

# 1. GİRİŞ

Her geçen gün gelişmekte olan teknolojinin ihtiyaç duyduğu teknik gereklilikleri geleneksel mühendislik malzemelerinin tam anlamıyla karşılayamamasına karşın tasarımcılar geçmişten günümüze zorlu koşullarda en iyi dayanımı sağlayacak malzemeleri seçmek için çeşitli çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmaların sonucu olarak türlü mühendislik uygulamalarında kullanılmaya başlanan kompozit malzemeler, uzay/havacılık, otomotiv, denizcilik gibi sektörlerin ihtiyacı olan yüksek özgül mukavemet ve rijitlik, yorulma direnci ve düşük ısıl genleşme katsayısı gibi özelliklere sahiptirler. Tasarımcı hangi mekanik özelliğe ihtiyaç duyuyorsa kompozit malzemeyi, doğru bileşenleri seçerek ihtiyacı doğrultusunda tasarlayabilmektedir.

Aşağıda Şekil 1.1’de görüldüğü üzere kompozit malzemeler ile monolitik geleneksel malzemelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması sonucunda kompozit malzemelerin diğer geleneksel malzemelere kıyasla daha hafif ağırlıklarda daha mukavemetli bir yapıya sahip oldukları görülmektedir. Kompozit malzemelerin yüksek mekanik performansların ve nispeten düşük maliyetleri gibi avantajlarından dolayı bu alandaki çalışmalar gün geçtikçe daha çok önem kazanmıştır.



Şekil 1.1: Kompozit malzemelerin monolitik geleneksel malzemelerle karşılaştırılması. [1].

**Tablo 1.1:** Kompozit malzemeler ve bazı geleneksel malzemelerin mekanik özellikleri. [2].

Malzeme Adı	Özgül ağırlık	Elastisite Modülü	Maksimum Mukavemet	Özgül Modül	Özgül Mukavemet
		GPa	MPa	GPa – m <sup>3</sup> /kg	MPa – m <sup>3</sup> /kg
Grafit Fiber	1.8	230	2067	0.1278	1.148
Aramid fiber	1.4	124	1379	0.08857	0.985
Cam fiber	2.5	85	1550	0.034	0.62
Tek yönlü grafit/epoksi	1.6	181	1500	0.1131	0.9377
Tek yönlü cam/epoksi	1.8	38.6	1062	0.02144	0.59
Çapraz tabakalı grafit/epoksi	1.6	96	373	0.06	0.2331
Çapraz tabakalı cam/epoksi	1.8	23.5	88	0.0131	0.049
Yarı-izotropik grafit/epoksi	1.6	69.6	275	0.04553	0.1728
Yarı-izotropik cam/epoksi	1.8	19	73	0.01053	0.0406
Çelik	7.8	210	650	0.02652	0.08309
Alüminyum	2.6	70	275	0.02652	0.1061

Kompozit malzemeler gözle görülebilen düzeyde birbiri içinde çözünmeyen ve tasarımcının ihtiyaçları doğrultusunda seçilmiş farklı mekanik özelliklere sahip iki veya daha malzemenin birleştirilmesi ile elde edilen yapılardır. Bu malzeme bileşenleri kompozit yapıların mekanik performanslarının belirleyici ve ayrılmaz parçalarıdır. Kompozit yapıların mekanik davranışlarını daha iyi anlayabilmek için bu bileşenleri detaylı bir şekilde ayrı ayrı incelemek çok önemlidir. Kompozit malzeme bileşenlerini üç grupta incelemek mümkündür.

- Takviye elemanları
- Reçineler (matrik elemanları)
- Çekirdek malzemeler

Tatmin edici mukavemet özelliklerine ve işlenebilir bir yapıya sahip olmalarının yanı sıra maliyetlerinin uygun olması nedeniyle denizcilik uygulamalarında sıkça kullanılan kompozit yapılar için tercih edilen takviye elemanı E-Cam fiber malzemedir. Buna karşılık havacılık uygulamalarında daha güvenilir olduğu düşünülen takviye elemanları karbon fiber malzemelerdir. Karbon, aramid

fiberler ve diğere özel takviye elemanları optimum verimliliğe ulaşmak için yüksek mühendislik işlemlerinden geçerek genellikle denizcilik ve uzay/havacılık uygulamalarında kullanılmaktadır. Bu takviye elemanlarının geometrisi ve kumaş dokuma şekilleri doğru malzeme seçiminin en önemli kriterleridir.

Reçineler muhtemelen tasarımcı ve üretici için anlaşılması en zor malzeme grubudur. Yeni formülasyonların geliştirilmesine ve bu konudaki çalışmaların devam etmesine rağmen denizcilik endüstrisi yapısal olarak zorlu projeler ve yüksek hassasiyet gerektiren ürünler için vinilester ve epoksi reçine eğilimlerine sahip polyester reçine kullanmayı uygun görmüştür. Bu reçine sistemlerinin davranışları formülasyonlardan, katkı maddelerinden ve kürlenme koşullarından etkilenmektedir. Bu yüzden kürlenmiş bir reçine kompozit yapının matriks elemanı olarak oldukça karmaşık bir mekanik davranışa sahiptir. Ancak bu matriks elemanları için birçok deneysel veri mevcuttur. Bu veriler sayesinde tasarım sürecine rahatlıkla dahil edilebilmektedirler.

Çekirdek malzemeler, denizcilik uygulamalarında birçok avantajı beraberinde getiren sandviç kompozit yapılar için bir temel oluşturmaktadır. Bu malzemeler iki güçlü yüzey tabaka arasına yerleştirilmiş ve sandviç yapı boyunca kayma kuvvetlerini taşıyan malzemelerdir. Çekirdek malzemeler balsa ve kontrplak gibi doğal yapılardan yüksek mühendislik gerektiren petek ve köpük yapılara kadar çeşitlilik göstermektedir. Bu yüzden sandviç kompozit yapının mekanik davranışı, kullanılan çekirdek malzemenin özellikleri ile doğrudan ilişkilidir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sandviç yapılar ile ilgili ilk araştırma makalesi, 1944 yılında Marguerre [3] tarafından, düzlem içi basma yüklerine maruz kalan sandviç paneller hakkında yazılmıştır. 1944 yılında Marguerre ile başlayan sandviç yapılar hakkındaki çalışmalar 1960'lı yılların ortalarında önemli ölçüde artmıştır. 1966'da Plantema [4] sandviç yapılar üzerine yazılan ilk kitabı yayımlamıştır ve hemen ardından 1969'da H.G. Allen [5] da sandviç yapılar üzerine başka bir kitap yayımlamıştır. Bu kitaplar, 1990'ların ortasına kadar sandviç yapılar için temel kitaplar olmuştur. Ayrıca 1960'lı yıllarında ortalarında, Donanma Uçak Mühendisliği Merkezi cam fiber sandviç kompozitlerin geliştirilmesi için yapılan çalışmalara sponsor olmuştur. Bu araştırmaların büyük bir kısmının esas amacı asgari ağırlık optimizasyon yöntemlerinin geliştirilmesi olmuştur. Ancak bu şekilde cam fiber sandviç kompozit malzemeler, pazarda hali hazırda kullanılan alüminyum malzemelerle rekabet edebilirdi [6-11]. 1989'da Ha [12] sandviç yapıların sonlu elemanlar analizi hakkında bir çalışma yaparak bu karmaşık yapıların tasarım sürecine daha çok dahil edilmelerinin gereğini vurgulamıştır. 20.yüzyıldan günümüze dek sandviç kompozit yapılar hakkındaki çalışmalar, bu yapıların karmaşık mekanik davranışlarına daha net kestirim yöntemleri geliştirebilmek için artarak devam etmiştir.

Sandviç yapıların eğilme yükleri altındaki davranışlarını ve hasar modları konu alan birçok çalışma vardır. [13-17]

V. Iyer ve diğ. [18] köpük çekirdek ve cam epoksi yüzey tabakalardan oluşan sandviç kompozitlerin üç nokta ve dört nokta eğilme davranışları arasında karşılaştırmalı bir deneysel çalışma gerçekleştirmişlerdir. Her iki durumda da eğilmeye bağlı hasarlar gözlemlenmiştir. Karşılaştırmalar sonucunda normal gerilmeler için her iki durumda da aynı değerler elde edilmiştir. Üç nokta eğilmeye maruz kalan numunelerde kayma gerilmesi değerlerinin, dört nokta eğilmeye maruz kalan numunelere kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Mujika [19] üç nokta ve dört nokta eğilme testleri ile elde edilen eğilme modüller üzerine deneyler yapmıştır. Deneylerin sonucunda, üç nokta ve dört nokta



eğilme yükleri altındaki aynı numunelerin farklı eğilme rijitliklerine sahip oldukları görülmüştür.

Murthy ve diğ. [20] dört nokta eğilme yükü altında petek çekirdekli sandviç yapılar için yarı-amprik denklemler türeterek mukavemet ve rijitlik optimizasyonu çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmaların amacı sandviç yapının sonlu ve sonsuz destek mesafelerindeki mekanik davranışlarını daha iyi anlayabilmektir.

Herranen ve diğ. [21] farklı çekirdek malzemelerden oluşturulmuş sandviç yapıların tasarımı ve testleri ile alakalı çalışmalar gerçekleştirmiştir. Elde ettiği sonuçlara göre çekirdek malzemesi seçiminin, çekirdek kalınlığından daha önemli olduğu sonucuna varmıştır.

Gdoutos ve diğ. [22] sandviç kompozit kirişlerin hasar modlarını incelemiştir. Hasar modlarının yükleme türüne, malzeme bileşenlerine ve geometrik boyutlar bağlı olduğu görülmüştür. Çekirdek malzemede kayma hasarı, yüzey tabakalarda basmaya bağlı kırılmalar ve ezilme hasarları tespit edilmiştir.

Mostafa ve diğ. [23] statik eğilme yükü altında farklı çekirdek malzemelerinden oluşturulmuş sandviç panellerin mekanik davranışlarını incelemiştir. Kuvvet-deplasman eğrisinin başlarda doğrusal elastik davranış gösterdiğini ve daha sonra kırılmadan hemen önce eğimde bir düşüş gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Mostafa ve diğ. [24] cam fiber yüzey tabakaları ve PVC köpükten oluşan sandviç kompozit panelleri için dört nokta eğilme yükü altında deneysel, teorik ve nümerik analizler gerçekleştirmiştir. Baskın hasar modlarının çekirdek malzemede kayma hasarları olduğunu ve destek kafalarına yakın yerlerde çekirdek ve yüzey tabaka arasında delaminasyon hasarları olduğunu gözlemlenmişler ve deneysel bulgularını teorik ve nümerik analizler ile doğrulamışlardır.

Birçok araştırmacı [25-27], destek mesafesi/derinlik oranının, sandviç yapıların hasar davranışlarının ve yapısal performanslarının üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu belirtmiştir.

Manalo [28] fenolik-çekirdekli sandviç kirişlerin farklı destek mesafesi/derinlik oranlarındaki eğilme davranışlarını araştırmıştır. Sonuç olarak bu

oranının artmasına bağlı olarak, sandviç kirişinin hasar yükünün azaldığı ve kirişteki sehimin arttığı gözlemlenmiştir

Ferdous ve diğ. [29] cam fiber yüzey tabakadan ve fenolik-çekirdekten oluşan sandviç kirişlerin yatay ve dişey pozisyonlarda eğilme davranışlarını farklı destek mesafesi/yükseklik oranlarında dört nokta eğilmeye maruz bırakarak ayrıntılı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Yatay pozisyonda kırılan bir davranış göstererek hasar alan sandviç kiriş, dikey pozisyonda iken kademeli bir şekilde hasar almıştır. Aynı destek mesafelerindeki kesit boyutunun artmasıyla sandviç kiriş yatay pozisyonda benzer hasarlar alırken dikey pozisyonda birbirinden çok farklı hasar modlarına sahip olduğu gözlemlenmiştir. Sandviç kirişlerin eğilmeye yönelik tasarımından dolayı yatay pozisyonda kullanılmaları tercih edilmiştir. Bunun yanı sıra dikey pozisyonda iken kayma gerilmelerine karşı mükemmel bir mukavemet gösteren bir yapı ortaya çıkmıştır.

Umer ve diğ. [30] infüzyon yöntemi ile üretilmiş sandviç kompozit yapıların eğilme davranışlarını, farklı yoğunluklara ve kalınlıklara sahip PVC köpükler kullanarak üç nokta ve dört nokta eğilme yüklemeleri altında deneysel ve nümerik analiz yaparak incelemiştir. Nümerik analiz verilerinin deneysel analiz verileri ile mükemmel bir şekilde örtüştüğü belirtilmiştir.

Borsellino ve diğ. [31] kevlar, cam fiber ve karbon fiber gibi farklı takviyeli tabakalardan oluşan sandviç kompozit yapının bütün karakteristiklerini çıkarabilmek ve karşılaştırma yapabilmek için basma, kayma ve eğilme testlerinin deneysel ve nümerik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Fiber takviyeli tabakaların farklılığı sandviç kompozit yapının rijitliği üzerinde önemli bir etki göstermemiştir, ancak hasar mekanizmalarını büyük ölçüde etkilemiştir.

Belouttar ve diğ. [32] aramid fiberlerden ve alüminyumdan oluşan bal peteği çekirdekleri ve alüminyum yüzey tabakalı sandviç kompozit yapıların statik ve yorulma davranışlarının dört nokta eğilme yükü altında farklı çekirdek yoğunluklarını dikkate alarak deneysel olarak araştırmışlardır. Çekirdek malzemenin yoğunluğundaki artışın sandviç kompozit yapının rijitliğini ve hasar yüklerini arttırdığı gözlemlenmiştir.

Russo ve Zuccarello [33] cam fiber takviyeli yüzey tabakalardan ve PVC köpük veya polyester çekirdeklerden oluşan sandviç panellerin deneysel ve nümerik analizlerini yapmıştır. Öngörülen mukavemetin doğruluğunun hasar moduna bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Hasarın yüzey tabakalarda kopma hasarı olarak meydana geldiği durumlarda hata oranı %15 iken çekirdekte kayma hasarı olarak meydana gelen durumlarda bu oran %100'e kadar çıkabilmektedir.

Corigliano ve diğ. [34] denizcilik uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanmış sandviç kompozit yapıların mekanik davranışlarını üç nokta ve dört nokta eğilme yükleri altında deneysel ve nümerik olarak analiz etmiştir. Nümerik analizler için seçilen modellerin gerçek malzemelerle benzer davranışlar gösterdiğini ve endüstriyel ortamda nümerik analizlerin uygun maliyetli bir analiz aracı olabileceğini dile getirmişlerdir.

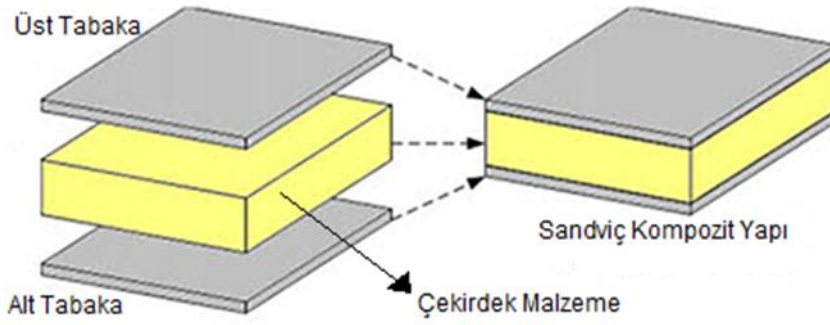
Fathi ve diğ. [35] kesikli konfigürasyonlardaki farklı çekirdek malzemelerinin, sandviç yapının mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Reçine ile dolan kesikli bölgelerin enine kayma gerilmelerine karşı takviye edici bir özellik gösterdiği ve sonuç olarak kayma mukavemetinin artışına sebep olduğu görülmüştür. Optimum tasarım ve daha iyi performans için kesim konfigürasyonlarının daha ayrıntılı bir şekilde analiz edilmesi gerektiği açıktır. Bu yüzden farklı kesik konfigürasyonlarının etkisini daha iyi anlamak için nümerik analizlerinin yapılması gerekmektedir.

Laustsen ve diğ. [36] modern rüzgâr türbini kanatlarının aerodinamik dış kabuğunu oluşturan sandviç panelleri oluşturan kesikli konfigürasyonlardaki köpük malzemelerin deneysel incelemesini gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonucunda elde edilen yüksek eğilme rijitlikleri ve mukavemetleri nedeniyle kesikli konfigürasyonlara sahip köpük çekirdek malzemelerinin rüzgâr türbini kanatlarında kullanımı tavsiye edilmiştir.

Bu çalışmada, kesikli ve kesiksiz PVC köpüklerden oluşan sandviç kompozit yapıların farklı destek mesafelerindeki eğilme performansları karşılaştırılmıştır. PVC köpüklerde, testere kesikli, bıçak kesikli ve oluklu kesikli olmak üzere üç farklı kesik konfigürasyonu kullanılmıştır. Testere kesikli ve kesiksiz referans modellerin nümerik analizleri deneysel verilerle doğrulanmıştır.

### 3. SANDVIÇ KOMPOZİT YAPILAR

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi iki ince ve rijit kompozit plaka arasına yerleştirilmiş nispeten daha kalın, daha yumuşak ve daha hafif ağırlığa sahip bir köpük malzemeden oluşan sandviç kompozit yapılar, tabakalı kompozit malzemelerin özel bir türüdür. Hüresel köpükler panellerin, konteynırların, tır dorselerinin, küçük ve orta boy gemilerin yapımında ve uzay/havacılık uygulamalarında çekirdek yapı olarak kullanılırlar.



Şekil 3.1: Sandviç kompozit yapının bileşenleri.

Polimerik hüresel köpükler çok çeşitlidir ve birçoğunun iyi derecede mekanik özelliklere, kapalı hücre yapısına, iyi derecede tabaka-çekirdek yapışma özelliğine ve yüksek ısı yalıtımına sahip olmaları nedeniyle kullanımları gün geçtikçe artmıştır. Sandviç yapılar, üstün rijitlik ve mukavemet/ağırlık oranları için tercih edilmiştir. Bunun yanı sıra bu tür malzemelerin birçok belirsizliğe sahip olmasından dolayı tasarımlarda istenmeyen büyük güvenlik katsayıları kullanılmıştır. Gelişmiş hesaplama yöntemleri ile bu belirsizlikler tasarım sürecine dahil edilip daha net güvenlik katsayıları kullanılmaya başlanmıştır.

Sandviç kompozit yapılar hem düzlem-içi hem de düzlem-dışı yükleri taşıyabilmekle beraber mukavemet/ağırlık ve rijitlik/ağırlık oranlarını korurken basma kuvveti altında oldukça iyi bir kararlılık sergilerler.

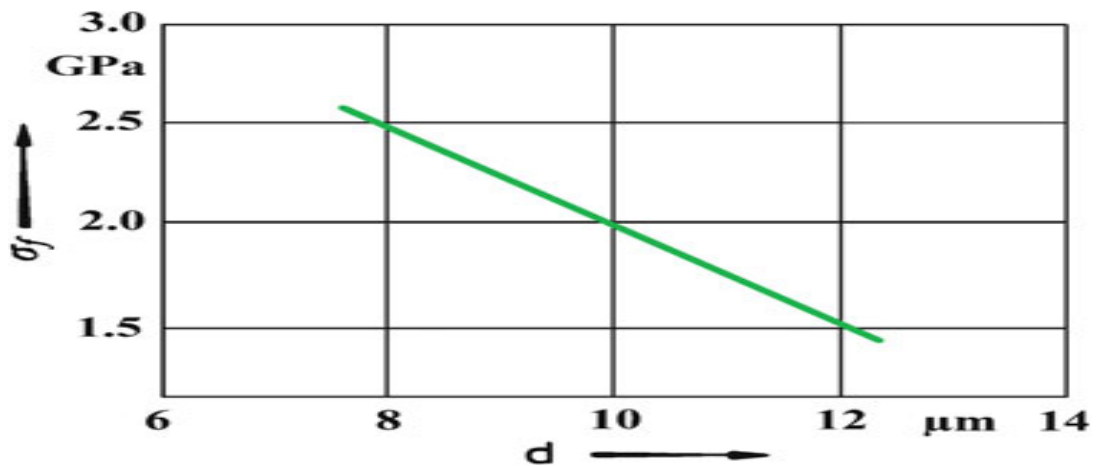
Sandviç kompozit yapıların birçok avantajı ile yeni malzemelerin geliştirilmesi, yüksek performanslı ve düşük ağırlıklı yapılara duyulan ihtiyaç, sandviç kompozit yapılara olan talebin devam etmesini sağlamıştır.

Bu malzemeleri farklı uygulamalarda kullanabilmek için statik ve yorulma davranışlarına dair bilgi edinmek gereklidir. Bu yüzden statik ve yorulma yükleme koşullarındaki mekanik davranışları çok iyi anlaşılmalıdır.

### 3.1 Takviye Elemanları

Takviye elemanları adından da anlaşılacağı gibi kompozit bir malzemeyi takviye eden yani güçlendiren ve yükü taşıyan elemanlardır. Takviye elemanları parçacık, pul, kısa(süreksiz) fiber ve uzun(sürekli) fiber gibi geometrilere sahiptirler. Bunun yanı sıra kompozit malzemelerde yaygın olarak kullanılan takviye malzemeleri sürekli fiberlerdir. Çünkü fiber geometrisi malzemelerin bir arada daha mukavemetli bir yapıya sahip olmasını sağlar. Takviye elemanı olarak fiberler düşük yoğunluklarına rağmen yüksek mukavemete ve elastisite modülüne sahip olmalarından dolayı tercih edilmişlerdir. Bunun yanısıra fiyat-performans oranlarına kıyasla düşük maliyetli olmaları da tercih edilmelerinin bir başka sebebi olmuştur.

Fiberlerin çapları genellikle 5 ila 25 mikrometre arasındadır. Malzeme yapısı küçüldükçe malzemenin içindeki mikro kusurlarda küçülür. Bu yüzden küçük çaplı üretilen fiberlerde malzeme iç yapısındaki kusurlar minimize edilmiştir. Şekil 3.2’de görülebileceği üzere fiber çapındaki artış karbon fiber malzemenin mukavemetini azaltmıştır.



Şekil 3.2: Karbon fiber malzemenin mukavemetinin çap artışına karşın azalması. [1]

### 3.1.1 Cam Fiber Takviye Elemanları

Ucuz üretim maliyeti ve ağırlıklarına kıyasla yüksek mukavemete sahip olmalarından dolayı cam fiberler, plastik malzemelerin takviyesinde kullanılan fiberlerin %90'ından fazlasını oluşturur. Buna ek olarak cam fiberlerin kimyasal dirençleri ve işlenebilirlikleri çok iyidir. Cam fiberlerin çekme dayanımlarının çok iyi olmasına rağmen uzun süre uygulanan yüklerde hasar alabilirler. Sürekli cam fiberler, erimiş camın ekstrüzyon ile 5 ila 25 mikrometre çaplı filamentlere dönüştürülmesi ile oluşturulurlar. Tablo 2.1'de CTP(cam fiber takviyeli plastik) endüstrisinde yaygın olarak kullanılan cam fiberlerin gösterimleri ve çapları verilmiştir.

**Tablo 3.1:** Cam fiberlerin gösterimleri ve çapları.

Gösterim	Çap(Mikrometre)
C	4.57
D	5.84
DE	6.35
E	7.11
G	9.65
H	10.57
K	13.46

Bu filamentlerin her biri, aşınmayı azaltmak için cilalanır ve 102 ila 204 adet civarında filament biraraya getirilerek bir fiber teli oluşturulur. Reçine emdirme işlemi sırasında cila bağlayıcı madde işlevi görür. Tablo 3.2'de hem E-Cam hem de S-Cam fiberler için ağırlıklarına göre cam bileşenleri listelenmiştir. E-Cam (kalsiyumoksit alüminyum borosilikat), iyi mukavemet özellikleri ve oksidasyona karşı direnci nedeniyle, denizcilik uygulamalarında kullanılan en yaygın takviye elemanlarıdır. S-Cam(silikon dioksit, alüminyum ve magnezyum oksitler) fiberler E-Cam fiberlere göre yaklaşık %33 daha iyi bir gerilme mukavemeti sergilerler ve genel olarak daha iyi bir yorulma direnci gösterirler. E-Cam fiberler'e karşın üstünlüklerinden dolayı S-Cam fiberlerin maliyeti üç ila dört kat daha fazladır. Tablo 3.3'te E-Cam ve S-Cam fiberler için mekanik özellikler belirtilmiştir.

**Tablo 3.2:** E-Cam ve S-Cam fiberlerin cam bileşenleri.

	<b>E-Cam</b>	<b>S-Cam</b>
Silikon Di Oksit	% 52-56	% 64-66
Kalsiyum Oksit	% 16-25	% 0-0.3
Aliminyum Oksit	% 12-16	% 24-26
Boron Oksit	% 5-10	-
Sodyum&Potasyum Oksit	% 0-2	% 0-0.3
Magnezyum Oksit	% 0-5	% 9-11
Demir Oksit	% 0.05-0.4	% 0-0.3
Titanyum Oksit	% 0-0.8	-
Florürler	% 0-1	-

### **3.1.2 Polimer Fiber Takviye Elemanları**

En yaygın kullanılan aramid fiberi DuPont tarafından geliştirilen Kevlar®'dir. Bu takviye elemanları 1970'lerin başında tekerlek lastiklerindeki çelik kayışların yerine kullanılmaya başlanmıştır. Aramidlerin öne çıkan özelliklerinden birkaçı düşük ağırlık, yüksek çekme mukavemeti ve elastisite modülü, darbe ve yorulma dayanımı ve dikilebilir olmalarıdır. Aramidlerin basma yükü altındaki performansı, düşük uzama değerlerinde doğrusal olmayan sünek davranış gösterdikleri için cam kadar iyi değildir. Aramidlerin benzersiz özellikleri dokuma ve üretim şekillerine doğrudan bağlıdır.

Allied Corporation şirketi, 1985'te tanıtılan Spectra® adlı yüksek mukavemetli genişletilmiş zincirli polietilen fiberi geliştirdi. Spectra®'nın oda sıcaklığına özgü mekanik özellikleri, Kevlar®'dan biraz daha iyidir, ancak yüksek sıcaklıklarda performansı düşmektedir. Kimyasal ve aşınma dirençleri aramidlerden daha üstündür. Hem Kevlar® hem de Spectra® fiberleri için mekanik veriler Tablo 3.3'te yer almaktadır.

Polyester ve naylon termoplastik fiberler yakın zamanda denizcilik endüstrisine birincil takviyeler olarak tanıtılmışlardır ve cam fiberlerle hibrit bir yapı elde edilmiştir. Allied Corporation şirketi, PET fiberlerin matris yapışma özelliklerini artıran COMPET® adlı bir fiber geliştirmiştir. Hoechst-Celanese şirketi, gerilmeleri azaltmak için bir jel kaplama bariyeri olarak tasarlanmış, ısı işlem görmüş bir polyester fiber kumaş olan Treveria® adında bir ürün üretmektedir.

Her ne kadar polyester elyaflar oldukça yüksek mukavemetlere sahip olsalar da rijitlikleri camın oldukça altındadır. Diğer çekici özellikleri arasında düşük yoğunluk, uygun maliyet, iyi darbe ve yorulma direnci, titreşim sönümlenmesi ve kabarma direnci bulunmaktadır.

### 3.1.3 Karbon Fiber Takviye Elemanları

"Karbon" ve "grafit" terimleri genelde birbirlerinin yerine kullanılmaktadır ancak grafit teknik olarak PAN(poliakrilonitril) bazlı fiberler için %93 ila %95 arasında olan karbon bileşimlerine karşılık %99 karbon bileşiminden daha büyük olan fiberleri belirtir. Bugüne kadar üretilen tüm sürekli karbon fiberler, PAN'a ek olarak, genel olarak düşük modüllü fiberler için kullanılan, rayon ve katran içeren organik öncüllerden yapılırlar. Karbon fiberler yaygın olarak kullanılan tüm takviye elemanlarının içinde en yüksek mukavemeti ve rijitliğe sahip olanıdır. Yüksek sıcaklık performansı özellikle göze çarpmaktadır. PAN bazlı fiberlerin en büyük dezavantajı yüksek hammadde maliyeti ve zor üretim işleminin bir sonucu olan yüksek maliyetleridir. Tablo 3.3'te karbon fiberler için karşılaştırmalı mekanik performans verileri gösterilmiştir.

**Tablo 3.3:** Bazı fiber takviye elemanlarının mekanik özellikleri.

Fiber	Yoğunluk kg/m <sup>3</sup>	Çekme Mukavemeti MPa	Elastisite Modülü GPa	Maksimum Uzama mm/mm	Maliyet \$/Kg
E-Cam	2500	3450	70	%4.8	0.36-0.47
S-Cam	2600	4600	90	%5.7	1.8
Aramid- Kevlar® 49	1390	3600	125	%2.9	7.25
Spectra® 900	930	2600	115	%3.5	10
Polyester- COMPET®	1300	1000	10	%22.0	0.8
Karbon-PAN	1800	2400-4800	230-400	%0.38-2.0	7.5-205

### 3.2 Reçineler(Matriks Elemanları)

Polimer malzemeleri oluşturan iki ana reçine grubu vardır. Bunlar termosetler ve termoplastiklerdir. Kompozit malzemelerin çoğu termoset reçinelerden



yapılmıştır. Polimerizasyon veya çapraz bağlama adı verilen bir işlemle bir sıvıdan bir katıya dönüştürülürler. Termoset reçineler, bir katalizör, ısı veya ikisinin bir kombinasyonu kullanılarak "kürlenir". Kürlendikten sonra katı termoset reçineler orijinal sıvı hallerine geri döndürülemez. Yaygın termosetler polyester, vinil ester ve epoksi reçinelerdir. Öte yandan, termoplastik reçineler çapraz bağlı değildir ve dolayısıyla geri dönüştürülebilirler. Bu reçineler, ısıtılmış bir yarı-akışkan halindeyken biçimlendirilir veya kalıplanırlar. Soğutulduklarında sertleşmektedir. Günlük hayatımızda termoplastikten yapılmış eşyaları hemen hemen her yerde görmek mümkündür.

### **3.2.1 Polyester Reçineler**

Polyester reçineler, kullanımı kolay ve iyi kimyasal direnç gösteren, en basit ve en ekonomik reçine sistemleridir. Bu reçine sisteminin yaklaşık yarım milyon tonu Amerika Birleşik Devletleri'nde her yıl kullanılmaktadır. Kürlenmesi ekzotermal kimyasal bir tepkime sonucunda gerçekleşir. Çoğu polyester reçinelerin hava ile teması kesilmelidir çünkü havaya maruz kaldıklarında sertleşmezler. Bu yüzden kürlenme işlemi sırasında yüzeyin hava ile temasının kesilmesi için reçine formülasyonuna parafin maddesi katılır. Bununla birlikte yüzeyde oluşan balmumu filmi daha sonraki yapıştırma işlemlerinde problem çıkartmaması için temizlenmelidir. Denizcilik uygulamalarında genelde hava ile teması kesilmesi gerekmeyen polyester reçineler tercih edilmiştir. Denizcilik endüstrisinde kullanılan temel reçineler ortoftalik ve izoftaliktir. Orto reçineler ilk geliştirilen polyester grubudur ve hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Kısıtlı termal kararlılığa, kimyasal dirence ve işlenebilirlik özelliklerine sahiptirler. İzo reçineler ise genellikle daha iyi mekanik özelliklere sahiptir ve daha iyi kimyasal direnç gösterirler. Su geçirgenliğine karşı arttırılmış dirençleri, birçok üreticinin bu reçineyi denizcilik uygulamalarında bir jel kaplama veya koruyucu kaplama olarak kullanmasına neden olmuştur.

Polyesterin ısı ilave edilmeden kürlenmesi için katalizörle birlikte hızlandırıcı ilave edilerek gerçekleştirilir. Jel süreleri, ortam sıcaklığı koşullarına ve laminat kalınlığına bağlı olarak geliştirilmiş formülasyonlar kullanılarak kontrol edilebilir.

Polyester reçinelerin kompozit malzeme imalatında kullanımları sırasında kısıtlı bir zaman içinde kullanılması gereken katalizörler ve kürlenme sürelerinin kestirilememesi gibi birçok teknik gereklilikten dolayı imalatta kullanımı kolay değildir.

### 3.2.2 Vinil Ester Reçineler

Vinil ester reçineler, metakrilik veya akrilik gibi tek işlevli bir doymamış asidin bir bisfenol diepoksit ile reaksiyonuyla hazırlanan doymamış reçinelerdir. Elde edilen polimer, stiren gibi doymamış bir monomer ile karıştırılır. Kürlenmesi ekzotermal kimyasal bir tepkime sonucunda gerçekleşir. Vinil esterlerin kullanımı ve performans özellikleri polyesterlere benzerdir. Vinil esterler üstün korozyon direnci, hidrolitik stabilite, darbe ve yorulma direnci gibi özelliklerinden dolayı maliyetleri yüksektir. Bunun yanı sıra vinil ester reçineler denizcilik uygulamalarında laminatlara su geçirmezlik sağlayarak kabarmayı önler.

### 3.2.3 Epoksi Reçineler

Polyester ve vinil ester reçineler gibi epoksi reçinelerinde kürlenmesi ekzotermal kimyasal bir tepkime sonucunda gerçekleşir. Epoksi reçineler geniş bir malzeme ağına sahiptir. Denizcilik uygulamalarında kullanılan tüm reçinelerin içinde epoksi reçineler en iyi mekanik ve kimyasal performansa sahip reçinelerdir. Havacılık uygulamalarında yüksek sıcaklık performansının kritik olduğu durumlar hariç, yalnızca epoksi reçine kullanılır. Ancak epoksi reçinelerin yüksek maliyetleri ve kullanım zorlukları yüzünden denizcilik endüstrisindeki kullanımları kısıtlıdır. Termoset grubu reçinelerin mekanik özellikleri tablo 3.4'te verilmiştir.

**Tablo 3.4:** Termoset reçinelerin mekanik zellikleri.

Malzeme	Polyesterler	Vinil Esterler	Epoksi
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1.24-1.32	1.04	1.11
Elastik modül (GPa)	3.9-4.0	3.4	3.65
Çekme mukavemeti (MPa)	48-70	75-83	55
Kopma uzaması (%)	1-2	5-6	7.7

### 3.2.4 Termoplastik Reçineler

Termoplastikler, termosetlerdeki üç boyutlu yapıların aksine, bir veya iki boyutlu moleküler yapıya sahiptir. Termoplastikler genellikle yüksek sıcaklıklarda yumuşayan kalıplama bileşikleri formundadır. Polietilen, polistiren, polipropilen, poliamidler ve naylon termoplastik örnekleridir. Denizcilik endüstrisindeki kullanımları genellikle küçük teknelerle ve eğlence amaçlı eşyalarla kısıtlıdır. Son zamanlarda yapısal bileşenlerin büyük ölçekli üretimi için takviye edilmiş termoplastik malzemeler araştırılmıştır. Termoplastikler kurlenmesi termosetlerdeki ekzotermal bir tepkimeye bağlı değildir. İşlenebilir ve yüksek mukavemet özelliklerinden dolayı üzerlerindeki çalışmalar hala devam etmektedir.

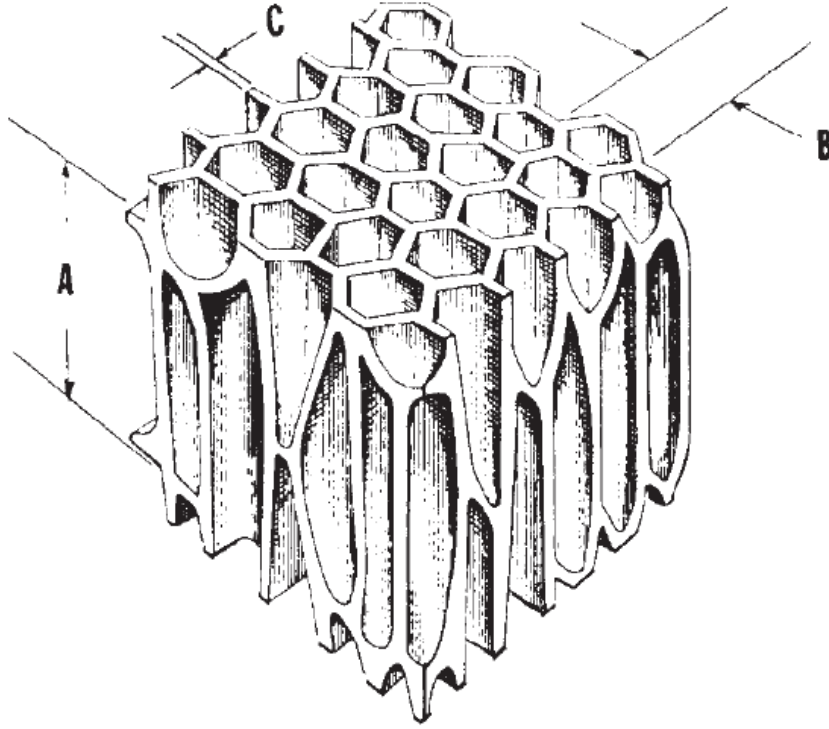
### 3.3 Çekirdek Malzemeler

Yüksek mukavemet-ağırlık oranına sahip yeni malzemelere olan talep, sandviç kompozit teknolojisinde çarpıcı bir büyüme yaratmıştır. Sandviç yapı, çekirdek malzemenin üstün mekanik özellikleri sayesinde kompozit tabakalara tek başına sahip olduğundan çok daha fazla bir eğilme mukavemeti ve eğilme modülü kazandırır. Kompozit tabakalar geleneksel yollarla bir kalıp içinde lamine edilir ve ardından çekirdek malzeme ıslak laminat içine yerleştirilir. Bu tip sandviç kompozit yapılar, tekne gövdeleri, otomobil motor kapakları, kalıplar ve uçak panelleri gibi çeşitli kompozit uygulamalarında kullanılmaktadır. Çekirdek malzemenin kalınlığı artırılarak, ağırlık ve maliyeti çok fazla arttırmadan sandviç malzemenin rijitliği artırılabilir.

#### 3.3.1 Balsa Çekirdek Malzeme

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi balsa tanesinin kapalı hücreli yapısı, uzunluğu çapında yaklaşık on altı kat fazla uzatılmış prizma hücrelerden oluşur. 0.1 ve 0.25 gr/cm<sup>3</sup> arasındaki yoğunluklarda, malzeme mükemmel bir rijitlik ve bağlanma mukavemeti sergiler. Rijitlik ve mukavemet özellikleri havacılık uygulamalarında kullanılan bal peteği çekirdeklerine çok benzerdir. Balsa panellerinin statik mukavemeti genellikle PVC köpüklerden daha yüksek olmasına rağmen, darbe

enerjisi emilimi daha düşüktür. Lokal darbe dayanımı çok iyidir, çünkü gerilmeler sandviç tabakaları arasında çok verimli bir şekilde iletilir. Bu çekirdek yapısı düz panel yapılar için düz levha formunda ve karmaşık eğrilere sahip yapılar için kumaş destekli blok formunda kullanılmaktadır.



**Şekil 3.3:** Balsa hücre geometrisi. A: ortalama hücre uzunluğu= 0.06cm, B: Ortalama hücre çapı=0.003cm, C: Ortalama hücre kalınlığı= 0.00015cm. [37].

### 3.3.2 PVC Köpükler

Çapraz bağlı ve doğrusal PVC köpükler en yaygın kullanılan köpük çekirdek malzemelerdir. PVC köpük çekirdekler, bir polivinil kopolimerini sabitleyici, plastikleştirici, çapraz bağlama bileşikleri ve kabartıcı maddelerle birleştirilerek üretilirler. Elde edilen malzeme termoplastiktir ve esnek yapısı malzemenin teknenin eğri gövdesine uymasını sağlar. Hücre çapları 0,025 ila 0,25 cm arasındadır. Airex® ve Core-Cell®, denizcilik endüstrisi için üretilen doğrusal PVC köpük çekirdek örnekleridir. Yoğunluk değerleri 75-100 g/cm<sup>3</sup> arasındadır. Bağımsız moleküler yapısından dolayı köpük hasara uğrayana kadar çok ciddi ölçülerde yer değiştirmelere izin veren PVC köpükler eşsiz mekanik özelliklere sahiptir. Nem

emilim dirençleri çok iyidir bu yüzden denizcilik uygulamalarında çok tercih edilmiştir. Tablo 3.5’te çekirdek malzemelerin fiziksel özelliklerine yer verilmiştir.

### 3.3.3 Petek Yapılı Çekirdek Malzeme

Çeşitli tiplerde üretilen petek yapılı çekirdekler havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yoğunlukları 16 ila 96 g/cm<sup>3</sup> arasında ve hücre boyutları 0.32cm ila 0.95cm arasında değişmektedir. Her ne kadar bu petek yapılı çekirdek malzemelerle çok hafif sandviç yapılar üretmek mümkün olsa da denizcilik endüstrisindeki kullanımları, karmaşık yüzeylere bağlanmasının zor olması ve su emilim potansiyellerinin olmasından dolayı kısıtlıdır. Petek yapılı çekirdek malzemenin mekanik özellikleri Tablo 3.5’te gösterilmiştir.

**Tablo 3.5:** Bazı çekirdek malzemelerin mekanik özellikleri.

Çekirdek Malzeme	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Çekme Mukavemeti (MPa)	Basma Mukavemeti (MPa)	Kayma Mukavemeti (MPa)	Kayma Modülü (MPa)
Balsa	112-145	9.1-12.3	8.2-11.9	2.7-2.8	120-150
PVC	75-96	1.2-2.5	0.86-1.8	1-1.5	11-45
Petek Yapılı	77-96	-	1.5-7.7	1.1-1.4	40

## 4. PVC ÇEKİRDEK YAPILI SANDVIÇ KOMPOZİTLERİN EĞİLME DAVRANIŞLARININ ANSYS İLE NÜMERİK ANALİZİ

Bu çalışmada çekirdek malzemenin üzerindeki çeşitli kesik konfigürasyonlarının ve farklı destek mesafelerinin sandviç kirişlere eğilme yükü altında nasıl etki ettiğini gözlemek amacı ile nümerik analizler gerçekleştirilmiştir.

Balıkoğlu ve diğ. [38] gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada testere kesikli PVC köpük çekirdek malzemenin oluşturulmuş sandviç kirişlerin üç nokta ve dört nokta yüklemeleri altındaki eğilme davranışlarını kesiksiz PVC köpük çekirdekli sandviç kirişlerin sonuçları ile karşılaştırmıştır. Deneysel olarak,  $L_1=180\text{mm}$ ,  $L_2=300\text{mm}$  ve  $L_3=450\text{mm}$  olmak üzere üç farklı destek mesafesi kullanılmıştır. Deneysel hasar yüklerine karşılık gelen sehim değerleri nümerik analizlerde girildiği olarak kullanılmıştır. Analizlerde tabaka-çekirdek ayrılması hasarı incelenmemiştir. Bu yüzden köpük malzeme ve yüzey tabakaları arasında yapışık kontak ilişkisi varsayımı yapılmıştır.

ANSYS Workbench 16.0 programı kullanılarak elde edilen sonuçlar, Balıkoğlu'nun elde ettiği deneysel verilerle kıyaslanmıştır. Deneysel ve nümerik analiz sonuçları birbirleri ile mükemmel bir şekilde örtüşmüştür. Karşılaştırma sonuçları grafikler ve tablolar ile okuyucuya aktarılmıştır.

### 4.1 Sonlu Elemanlar Modeli

Yüzey tabakalar dikişli ve kıvrımsız E-Cam fiberlerin  $[0,90]_{2s}$  dizilimiyle lamine edilmiştir. Bu laminatların deneysel verilerden elde edilen mekanik özellikleri tablo 4.1'de verilmiştir.

**Tablo 4.1:** E-Cam fiber takviyeli yüzey tabakaların deneysel verileri. [38].

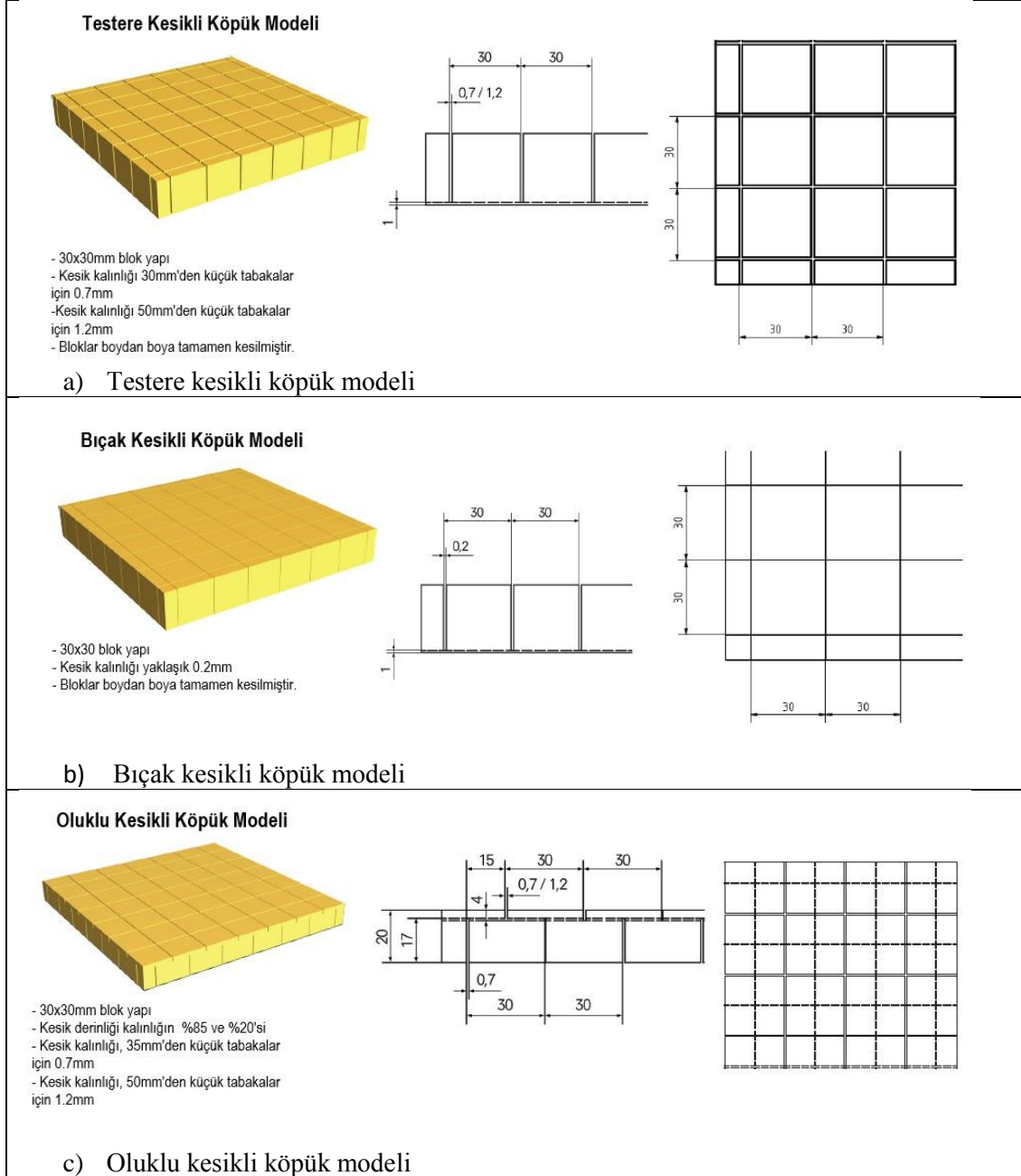
Test	Standart	Özellik	90°	0°	
Eğilme	ISO 14125	Modül (GPa)	18.16	11.4	
		Mukavemet(MPa)	431	396	
Çekme	ISO 527-1	Modül (GPa)	22.5	22.8	
		Mukavemet(MPa)	332	464	
		Maks. Uzama(%)	1.89	2.61	
		Poisson oranı	v12	0.107	
			v21	0.117	
Basma	ASTM D6641	Modül (GPa)	32.7	33.4	
		Mukavemet(MPa)	149	218	
		Maks. Uzama(%)	1.13	1.97	
Kayma	ASTM D7078	Modül (GPa)	4.96		
		Mukavemet(MPa)	51.6		

Çekirdek malzeme olarak AIREX® C70.75 PVC köpük malzemesi seçilmiştir. Köpük malzemenin mekanik özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir. Tablodaki veriler Airex AG firmasının malzeme kitapçıklarından alınmıştır.

**Tablo 4.2:** AIREX® C70.75 köpük malzemenin mekanik özellikleri.

Özellik	Standart	Birim (metrik)	Değer
Yoğunluk	ISO 845	kg/m <sup>3</sup>	72 - 92
Düzlem dışı basma mukavemeti	ISO 844	N/mm <sup>2</sup>	1.10-1.45
Düzlem dışı basma modülü	DIN 53421	N/mm <sup>2</sup>	80-104
Düzlem içi çekme mukavemeti	ISO 527 1-2	N/mm <sup>2</sup>	1.6-2.0
Düzlem içi çekme modülü	ISO 527 1-2	N/mm <sup>2</sup>	50-66
Kayma mukavemeti	ISO 1922	N/mm <sup>2</sup>	1.0-1.2
Kayma modülü	ASTM C393	N/mm <sup>2</sup>	24-30
Maks. kayma uzaması	ISO 1922	%	10-18
Isıl iletkenlik katsayısı (Oda sıcaklığında)	ISO 8301	W/m.K	0.033

Sırasıyla testere kesikli köpük, bıçak kesikli köpük ve oluklu kesikli köpük modellerin konfigürasyonları Şekil 4.1’de detaylı bir şekilde verilmiştir. Modeller Airex AG firmasının malzeme kataloğundan alınmıştır.



Şekil 4.1: AIREX® ticari köpük modellerinin kesik konfigürasyonları.

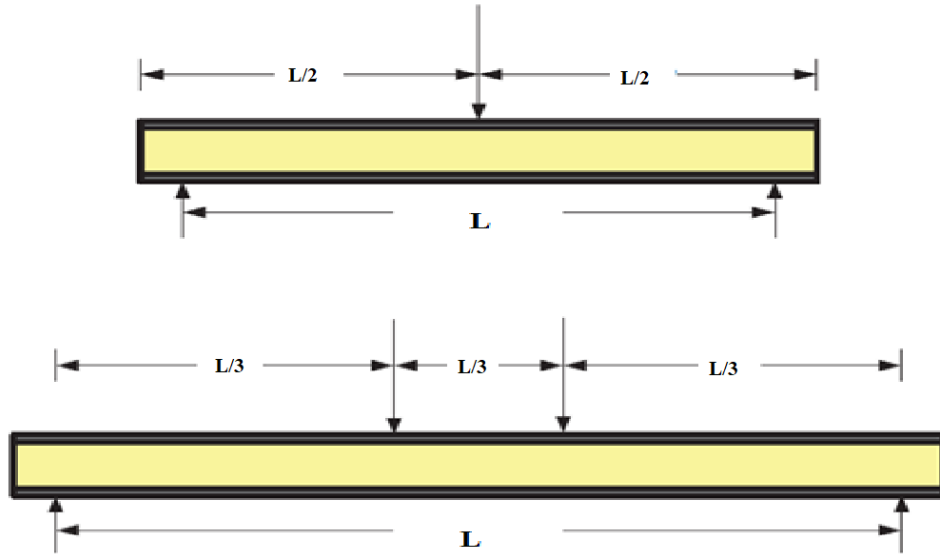


Reçine malzemesi olarak Polives™ 702 RTM ve infuzyon tipi bisfenol-a epoksi vinilester reçine kullanılmıştır. Mekanik özellikleri Tablo 4.3'te verilmiştir.

**Tablo 4.3:** Sertleşmiş Polives™ 702 reçine için mekanik özellikler.

Özellik	Standart		Value
Yoğunluk( $\text{gr}/\text{cm}^3$ ) - sıvı	ISO 1675	$\pm\%5$	1.004
Eğilme Mukavemeti (MPa)	ISO 0178	$\pm\%10$	155
Eğilme modülü (GPa)	ISO 0178	$\pm\%10$	3.5
Kopmadaki uzama(%) - eğilme	ISO 0178	$\pm\%10$	6
Çekme mukavemeti (MPa)	ISO 0527	$\pm\%10$	76
Çekme modülü (GPa)	ISO 0527	$\pm\%10$	3
Kopmadaki uzama(%) - çekme	ISO 0527	$\pm\%10$	5

Eğilme analizleri Şekil 4.2'deki ASTM konfigürasyonları kullanılarak sırasıyla,  $L_1=180\text{mm}$ ,  $L_2=300\text{mm}$  ve  $L_3=450\text{mm}$  olmak üzere üç farklı destek mesafesi için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 4.2:** ASTM C393 üç nokta eğilme ve ASTM D7249 dört nokta eğilme konfigürasyonları.

Analizlerde kullanılan kiriş boyutları sırasıyla 240x90x30, 360x90x30 ve 540x90x30 mm olarak modellenmiştir. Tablo 4.4'te modellerin geometrik boyutları ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

**Tablo 4.4:** Modellerin geometrik boyutları ve analiz kodu açıklamaları.

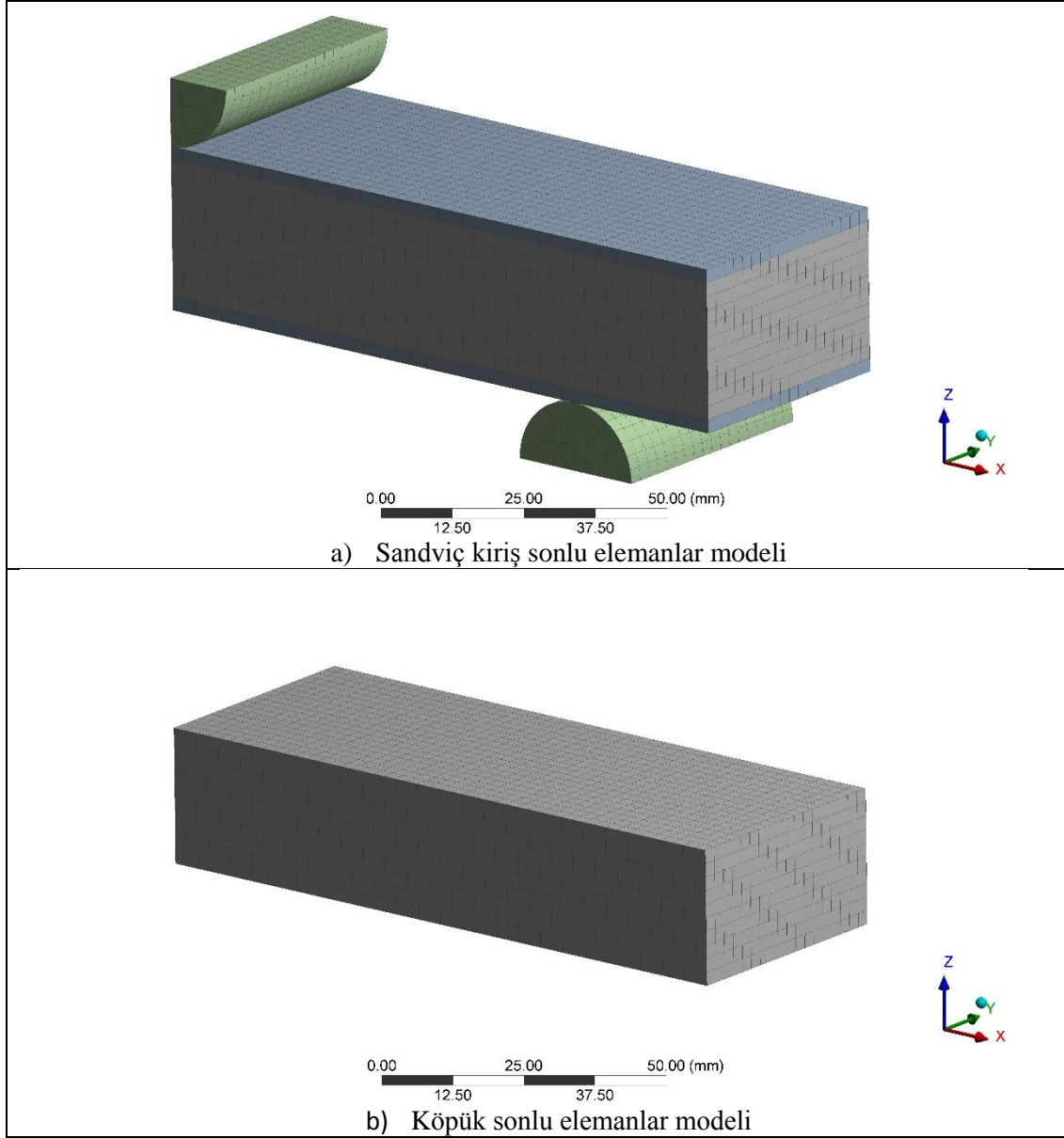
Analiz Kodu	Kesik Konfigürasyonu	Yükleme Tipi	Kesik Kalınlığı (mm)	Destek Mesafesi (mm)	Kiriş Uzunluğu (mm)	Yüzey Tabaka Kalınlığı (mm)	Köpük Kalınlığı (mm)	Derinlik (mm)
TK3N180	Testere Kesikli	Üç Nokta E.	1.5	180	240±1.5	2.5	25	90±1.5
TK3N300	Testere Kesikli	Üç Nokta E.	1.5	300	360±1.5	2.5	25	90±1.5
TK3N450	Testere Kesikli	Üç Nokta E.	1.5	450	540±1.5	2.5	25	90±1.5
TK4N450	Testere Kesikli	Dört Nokta E.	1.5	450	540±1.5	2.5	25	90±1.5
BK3N180	Bıçak Kesikli	Üç Nokta E.	0.2	180	240±0.2	2.5	25	90±0.2
BK3N300	Bıçak Kesikli	Üç Nokta E.	0.2	300	360±0.2	2.5	25	90±0.2
BK3N450	Bıçak Kesikli	Üç Nokta E.	0.2	450	540±0.2	2.5	25	90±0.2
BK4N450	Bıçak Kesikli	Dört Nokta E.	0.2	450	540±0.2	2.5	25	90±0.2
OK3N180	Oluklu Kesikli	Üç Nokta E.	0.7	180	240±0.7	2.5	25	90±0.7
OK3N300	Oluklu Kesikli	Üç Nokta E.	0.7	300	360±0.7	2.5	25	90±0.7
OK3N450	Oluklu Kesikli	Üç Nokta E.	0.7	450	540±0.7	2.5	25	90±0.7
OK4N450	Oluklu Kesikli	Dört Nokta E.	0.7	450	540±0.7	2.5	25	90±0.7
R3N180	Kesiksiz Referans	Üç Nokta E.	0	180	240	2.5	25	90
R3N300	Kesiksiz Referans	Üç Nokta E.	0	300	360	2.5	25	90
R3N450	Kesiksiz Referans	Üç Nokta E.	0	450	540	2.5	25	90
R4N450	Kesiksiz Referans	Dört Nokta E.	0	450	540	2.5	25	90

Nümerik analizlerden doğru sonuçlar elde edebilmek için modellere en uygun ağ yapısını seçilmesi gerekmektedir. Tablo 4.5'te analizlerde kullanılan ¼ ölçekli modellerin ağ yapıları ile ilgili detaylar verilmiştir.

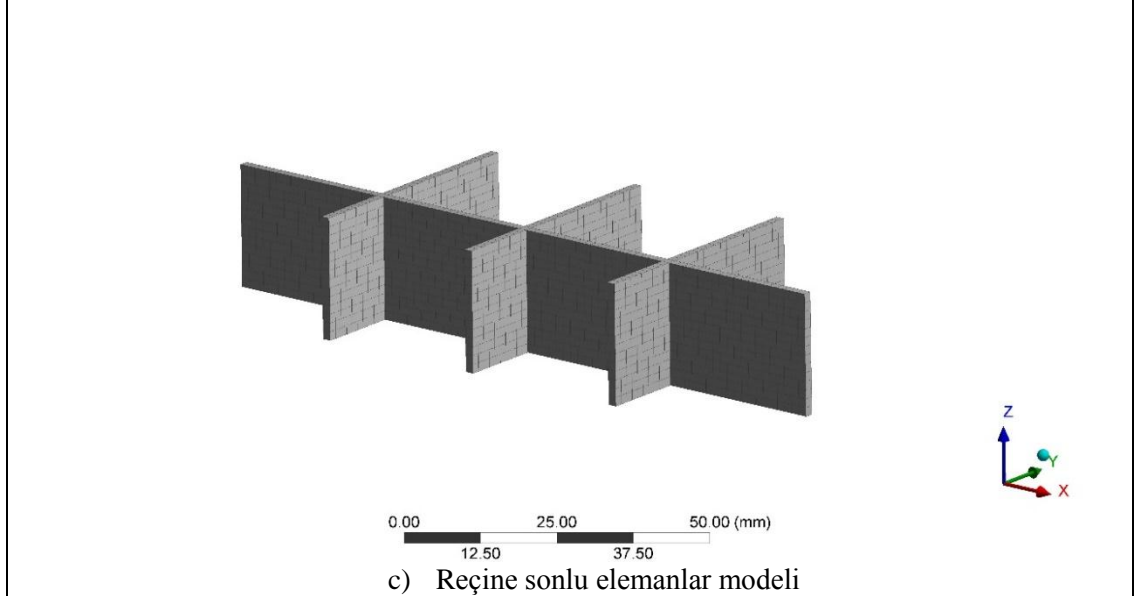
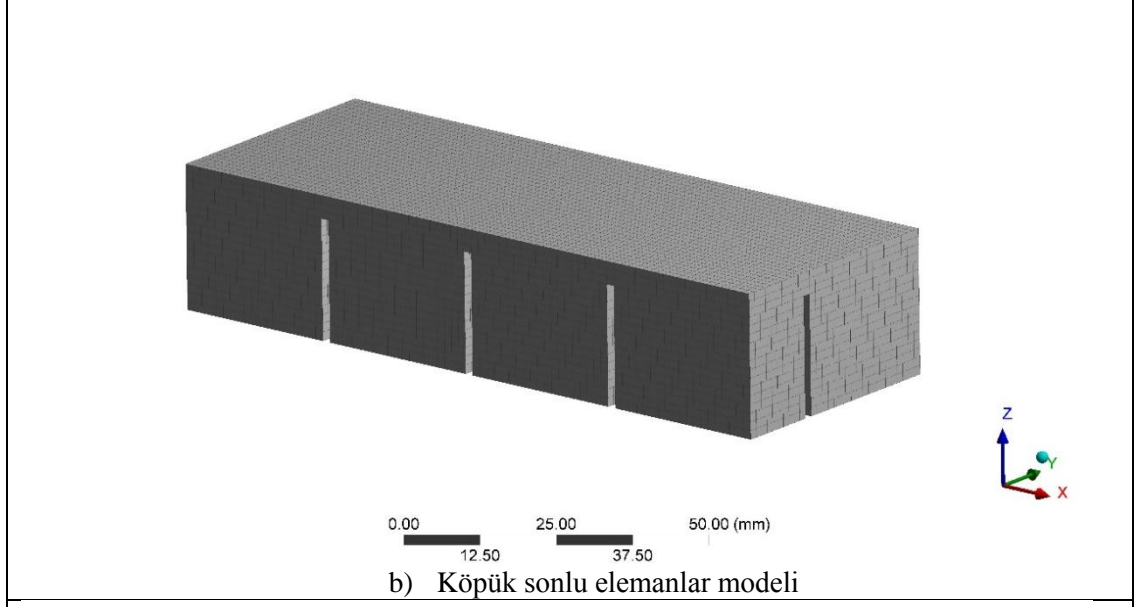
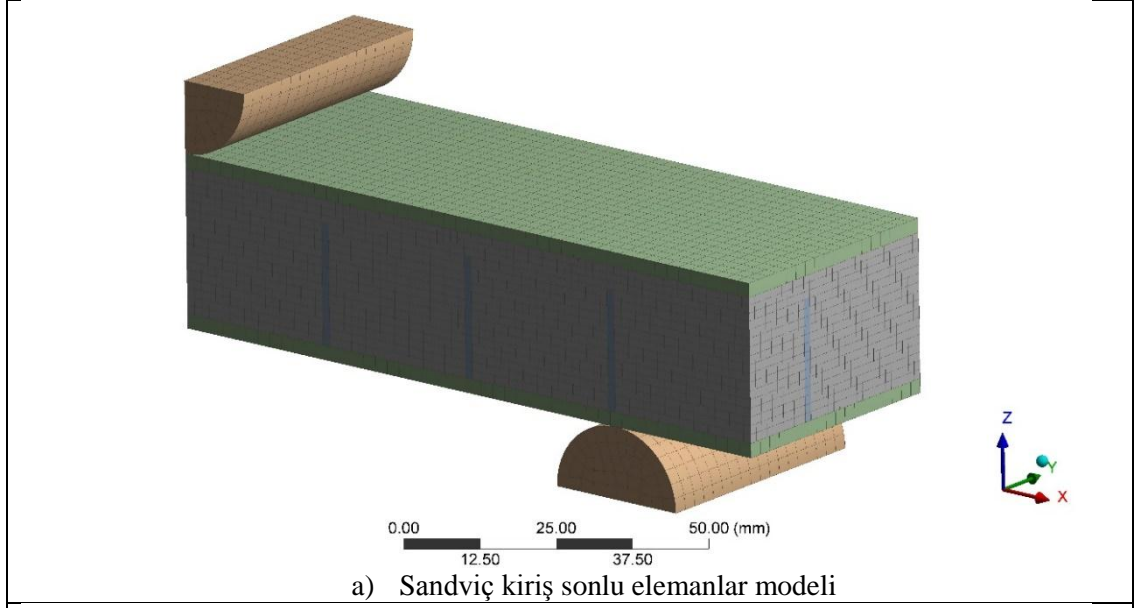
**Tablo 4.5:** Sonlu elemanlar modellerinin ağ yapısı özellikleri.

Analiz Kodu	Düğüm Sayısı	Eleman Sayısı	Eleman Tipi	Min.Mesh Boyutu(mm)	Mesh Kalitesi
TK3N180	193813	43404	Hex20	1.5	0.9964
TK3N300	287271	64632	Hex20	1.5	0.99357
TK3N450	427833	96564	Hex20	1.5	0.99742
TK4N450	429932	97014	Hex20	1.5	0.99729
BK3N180	378333	87435	Hex20	0.2	0.96229
BK3N300	564437	130887	Hex20	0.2	0.96049
BK3N450	843593	196065	Hex20	0.2	0.95897
BK4N450	845842	196551	Hex20	0.2	0.95893
OK3N180	283604	64674	Hex20	0.7	0.95691
OK3N300	422030	96606	Hex20	0.7	0.95642
OK3N450	630044	144594	Hex20	0.7	0.95591
OK4N450	632143	145044	Hex20	0.7	0.95588
R3N180	59016	11754	Hex20	2.5	0.99435
R3N300	84648	16938	Hex20	2.5	0.99571
R3N450	122946	24678	Hex20	2.5	0.99753
R4N450	125045	25128	Hex20	2.5	0.99695

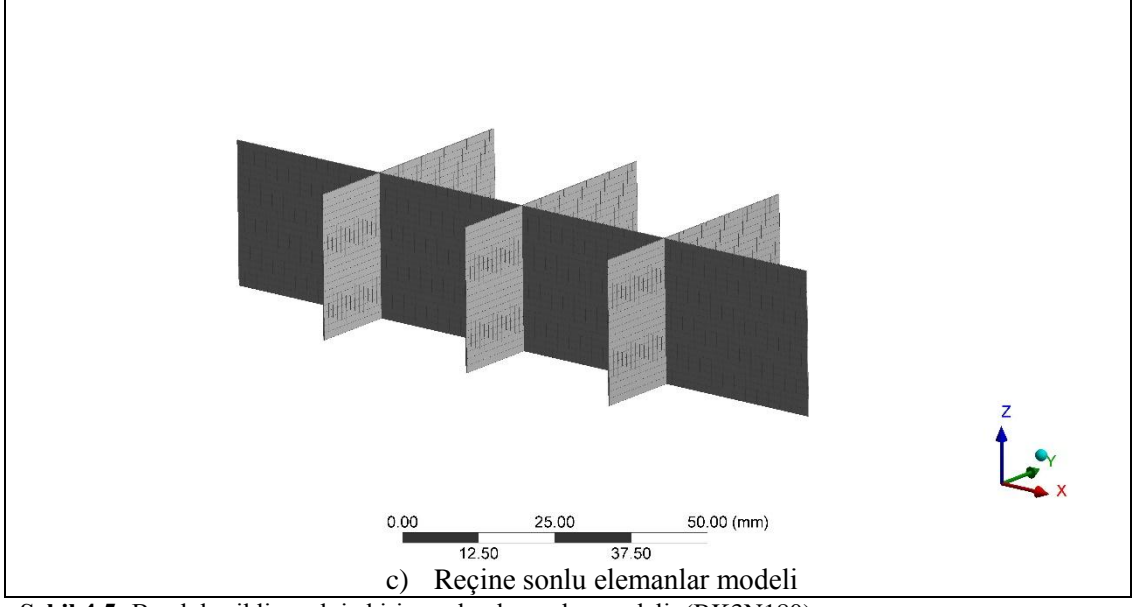
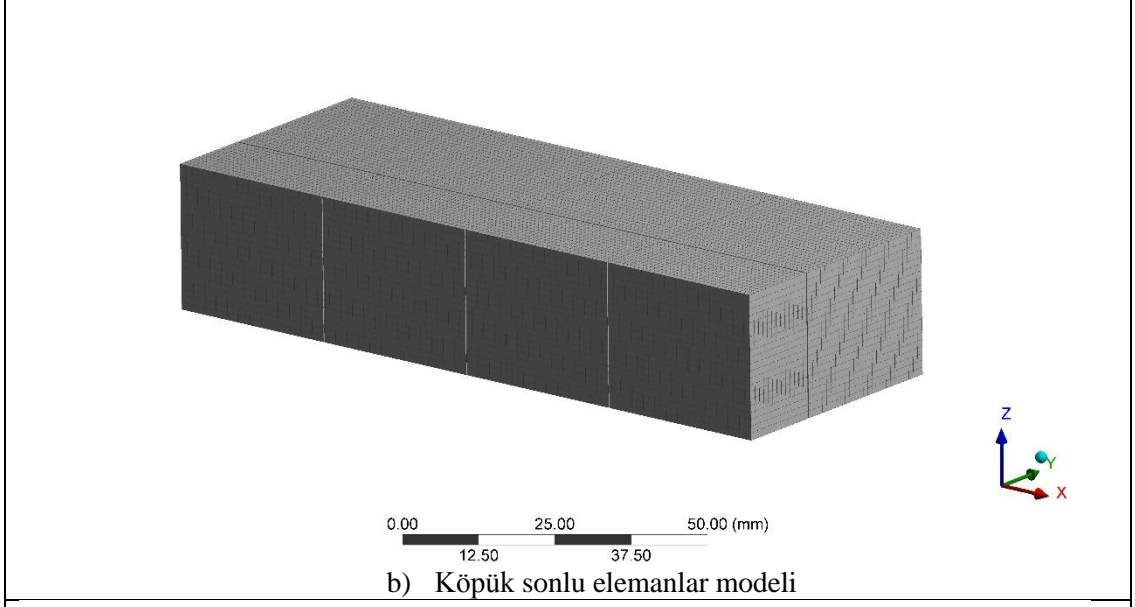
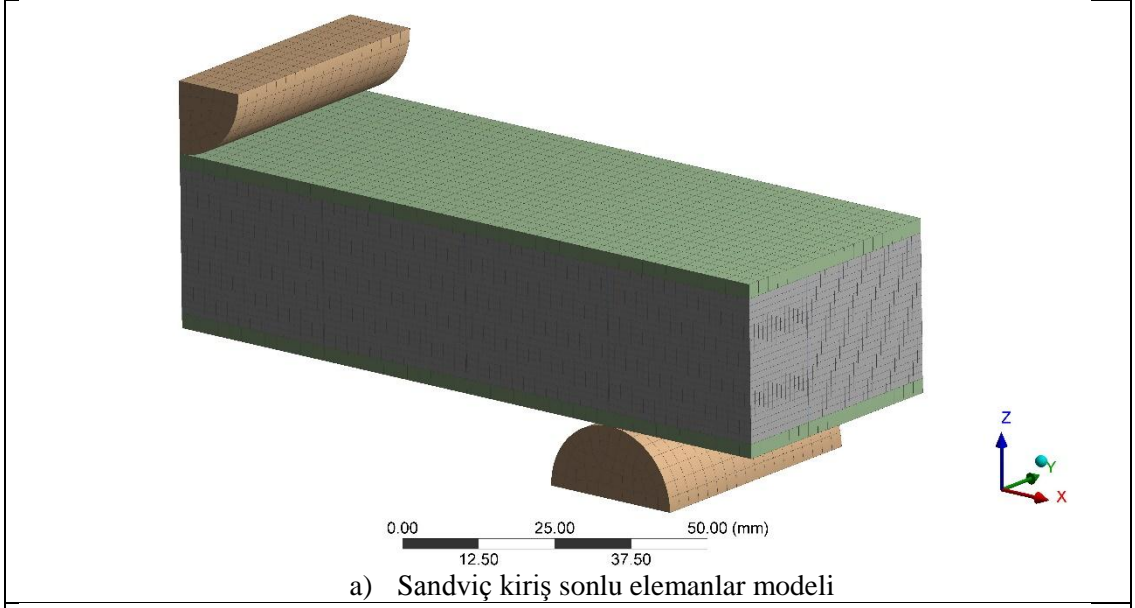
Şekil 4.3-7'de sandviç kirişlerin ANSYS'de ¼ ölçeğinde modellenmiş kesik konfigürasyonları yer almaktadır.



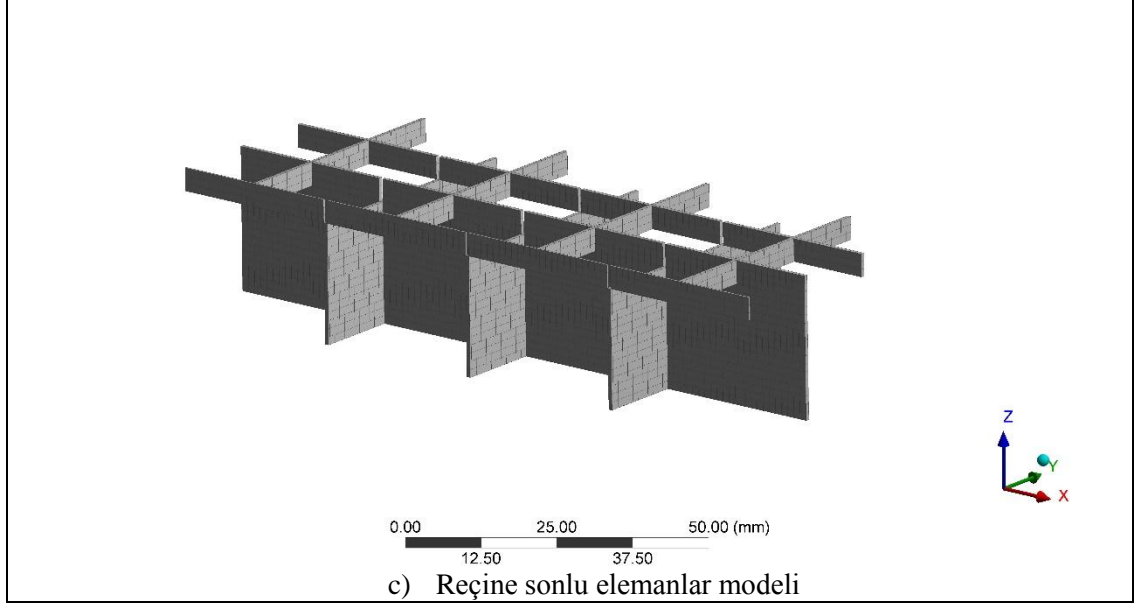
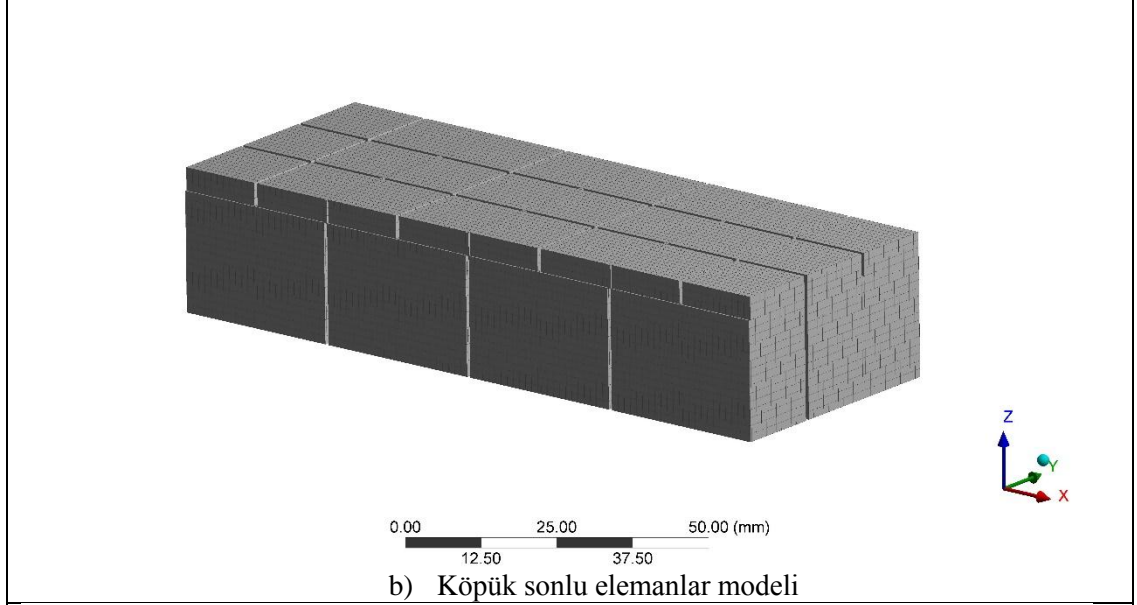
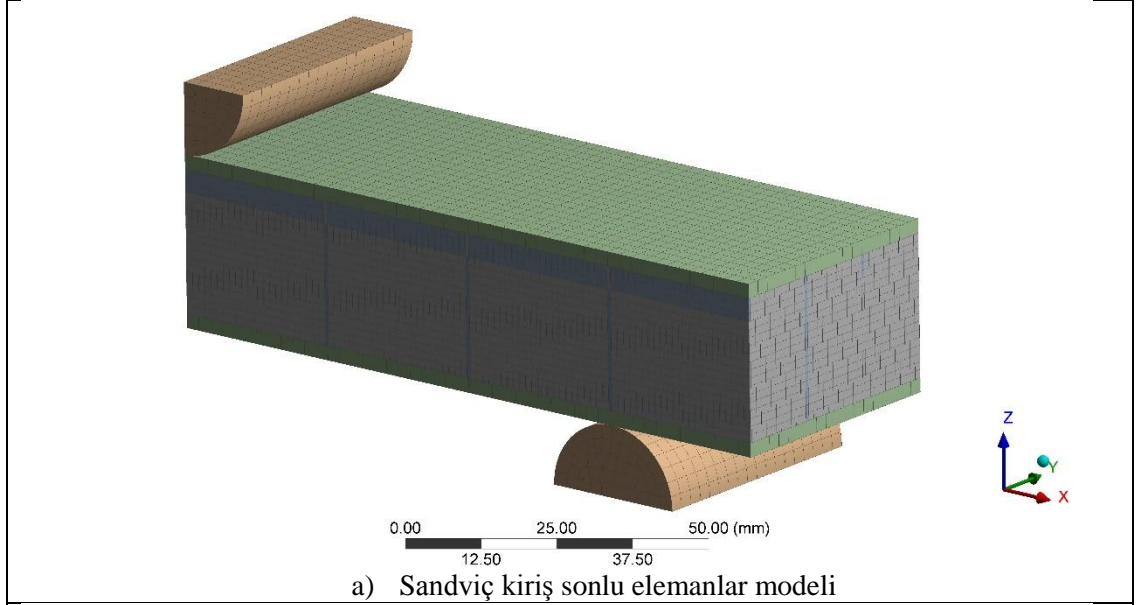
Şekil 4.3: Kesiksiz referans sandviç kiriş sonlu elemanlar modeli. (R3N180)



Şekil 4.4: Testere kesikli sandviç kiriş sonlu elemanlar modeli. (TK3N180)



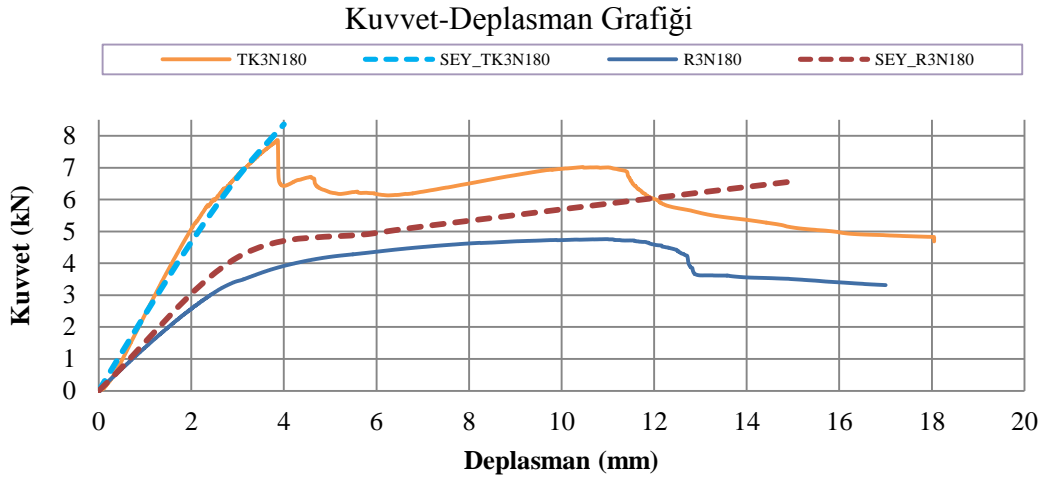
Şekil 4.5: Bıçak kesikli sandviç kiriş sonlu elemanlar modeli. (BK3N180)



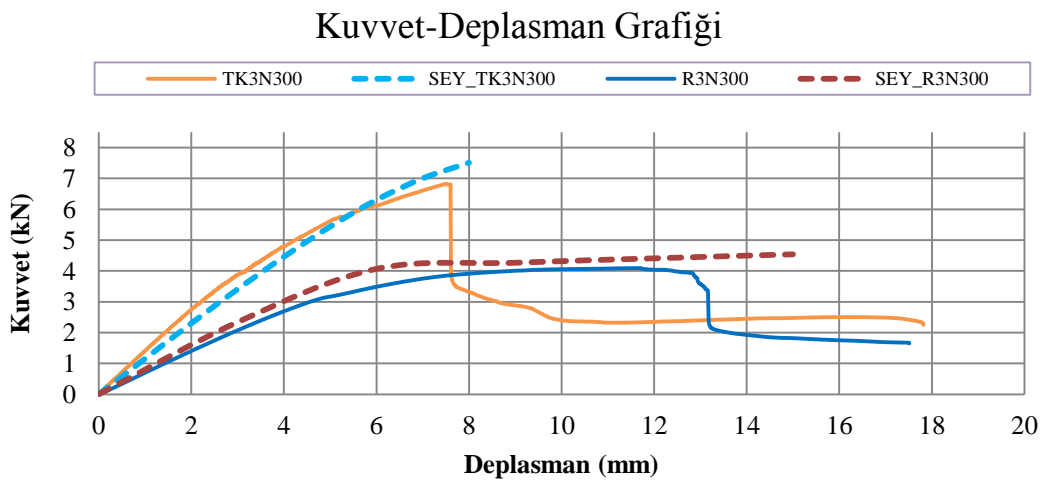
Şekil 4.6: Oluklu kesikli sandviç kiriş sonlu elemanlar modeli. (OK3N180)

## 5. ANALİZ SONUÇLARI

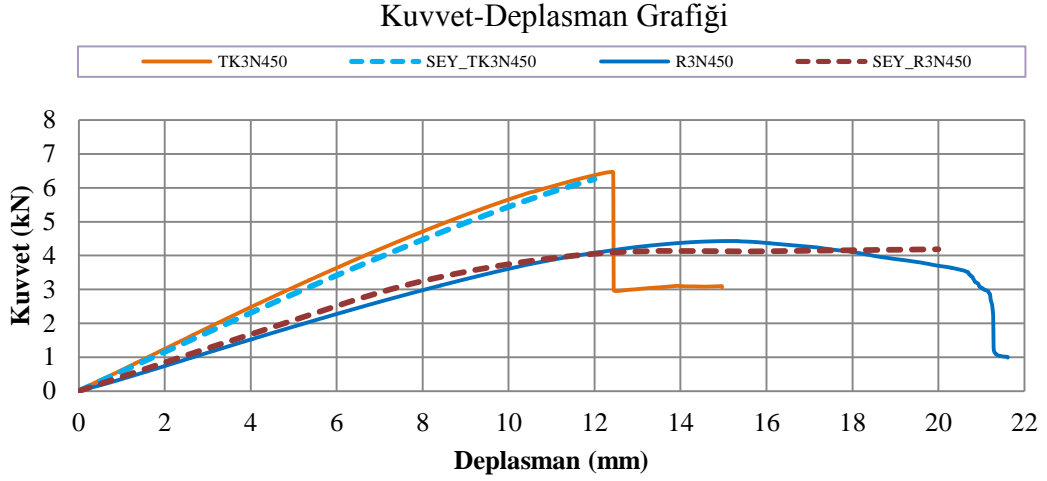
Şekil 5.1-4'teki grafiklerle gösterilen testere kesim ve referans köpüklerin farklı destek mesafelerinde üç nokta ve dört nokta eğilme yükleri altındaki deneysel ve nümerik analiz sonuçlarından elde edilen kuvvet-deplasman karşılaştırmaları yapılmıştır.



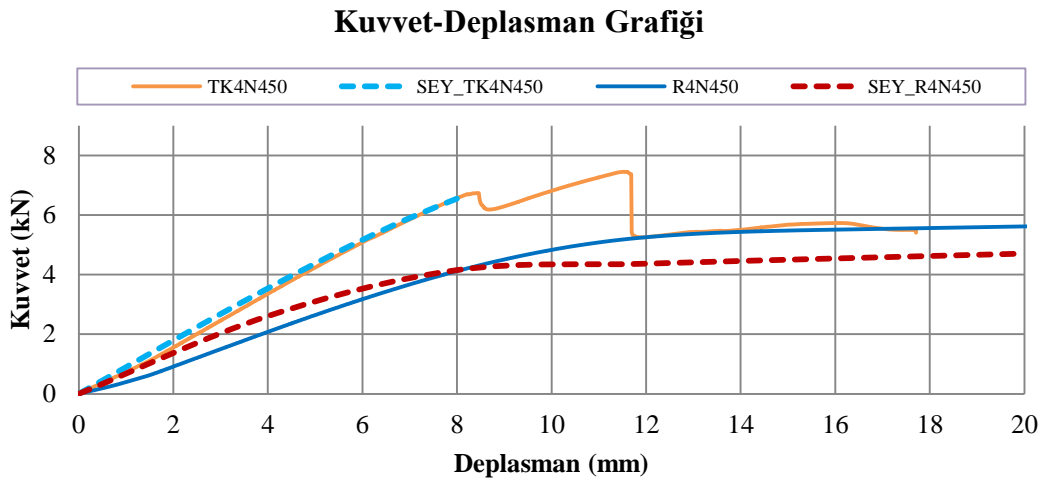
Şekil 5.1: TK3N180 ve R3N180 modellerinin üç nokta eğilme deneysel ve nümerik analiz kuvvet-deplasman sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 5.2: TK3N300 ve R3N300 modellerinin üç nokta eğilme deneysel ve nümerik analiz kuvvet-deplasman sonuçlarının karşılaştırılması.



**Şekil 5.3:** TK3N450 ve R3N450 modellerinin üç nokta eğilme deneysel ve nümerik analiz kuvvet-deplasman sonuçlarının karşılaştırılması.



**Şekil 5.4:** TK4N450 ve R4N450 modellerinin dört nokta eğilme deneysel ve nümerik analiz kuvvet-deplasman sonuçlarının karşılaştırılması.

Tablo 5.1’de testere kesikli ve kesiksiz köpük çekirdekli sandviç kirişlerin deneysel ve nümerik analizlerden elde edilen rijitlik ve maksimum hasar kuvveti değerleri verilmiştir.



**Tablo 5.1:** Deneysel ve nümerik analiz verilerinin karşılaştırılması.

Analiz Kodu	Rijitlik (kN/mm)			Maksimum Kuvvet (kN)		
	Deneysel	Nümerik	Hata %	Deneysel	Nümerik	Hata %
TK3N180	2.7	2.3	17%	7.8	8.3	-6%
TK3N300	1.18	1.09	8%	6.8	7.3	-7%
TK3N450	0.57	0.55	4%	6	6.2	-3%
TK4N450	0.83	0.85	-2%	6.55	6.6	-1%
R3N180	1.4	1.32	6%	4.3	6	-39%
R3N300	0.7	0.78	-10%	4.1	4.4	-7%
R3N450	0.41	0.38	8%	4.0	4.1	7%
R4N450	0.52	0.54	-4%	4.12	4.15	-1%

## 5.1 Nümerik Analiz Sonuçları

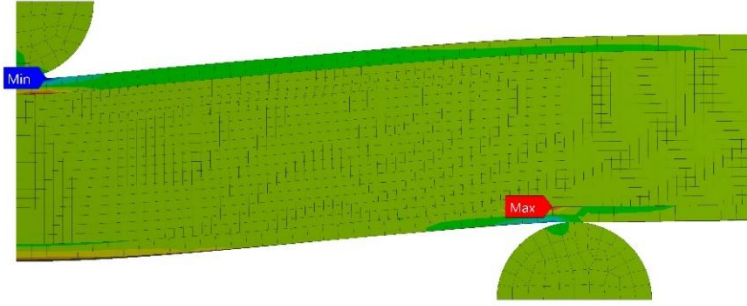
Testere kesikli, bıçak kesikli, oluklu kesikli ve kesiksiz PVC köpük malzemelerden oluşan sandviç kirişlerin sırasıyla 150, 300 ve 450mm destek mesafelerinde üç nokta ve dört nokta eğilme yüklemeleri altındaki davranışları ANSYS Workbench 16.0 sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen analiz sonuçları her bir modelin farklı destek mesafelerinde ve çekirdek konfigürasyonlarındaki davranışlarını inceleyebilmek için karşılaştırılmıştır.

### 5.1.1 TK3N ve TK4N Modellerinin Analiz Sonuçları

Şekil 5.5-20’de testere kesikli PVC köpük sandviçlerin üç nokta ve dört nokta eğilme altındaki sırasıyla normal gerilme, maks. kayma gerilmesi, maks. elastik kayma uzaması ve eşdeğer plastik uzama sonuçları gösterilmiştir.

**A: Static Structural**  
Normal Stress 2  
Type: Normal Stress(X Axis)  
Unit: MPa  
Global Coordinate System  
Time: 1  
4.06.2019 22:31

**223.86 Max**  
166.33  
108.8  
51.275  
-6.2532  
-63.781  
-121.31  
-178.84  
-236.36  
**-293.89 Min**

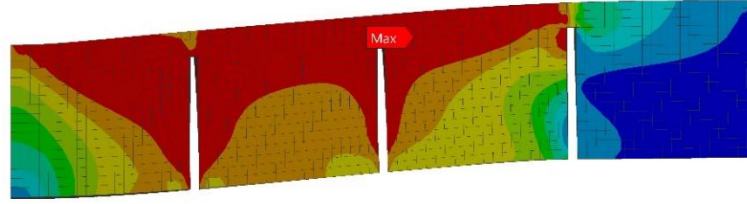


0.00 12.50 25.00 37.50 50.00 (mm)

**Şekil 5.5:** TK3N180 için normal gerilim dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Stress  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
4.06.2019 22:30

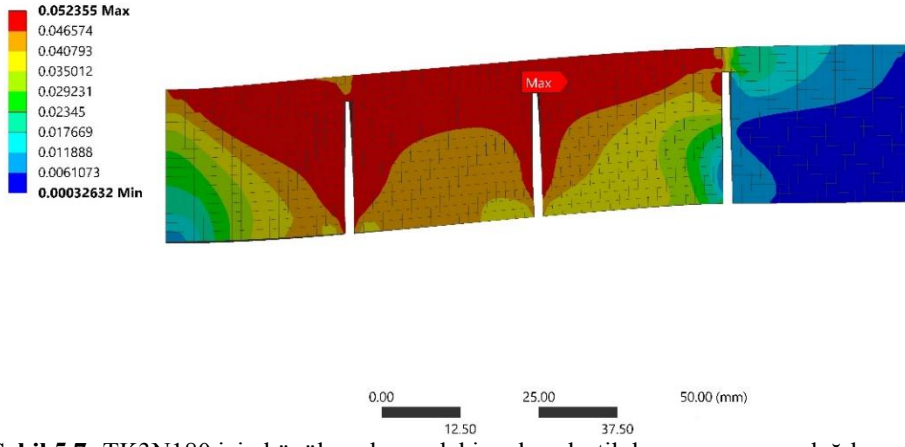
**1.299 Max**  
1.1556  
1.0122  
0.86872  
0.72529  
0.58185  
0.43841  
0.29497  
0.15153  
**0.0080967 Min**



0.00 12.50 25.00 37.50 50.00 (mm)

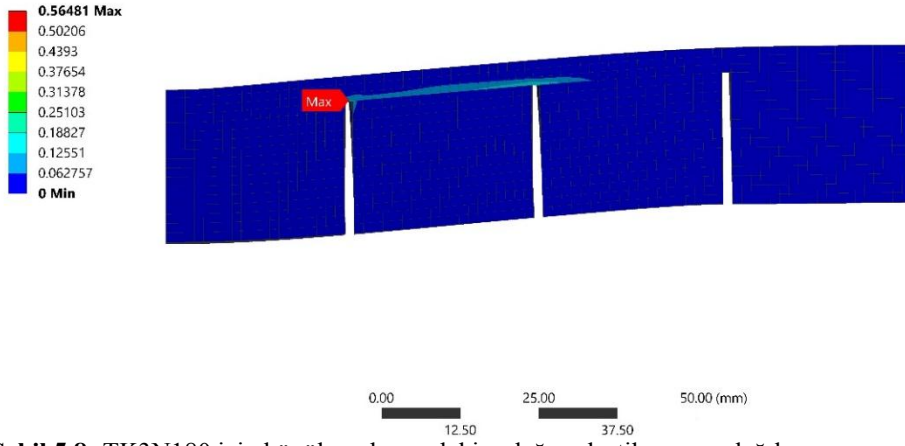
**Şekil 5.6:** TK3N180 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Elastic Strain  
Type: Maximum Shear Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
4.06.2019 22:29



**Şekil 5.7:** TK3N180 için köpük malzemedeği maks. elastik kayma uzaması dağılımı.

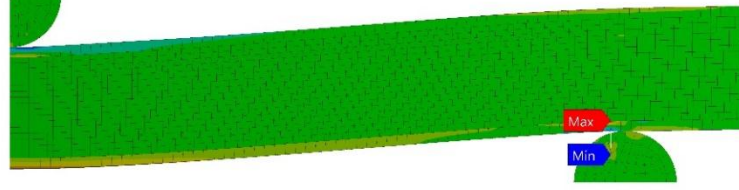
**A: Static Structural**  
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
4.06.2019 22:30



**Şekil 5.8:** TK3N180 için köpük malzemedeği eşdeğer plastik uzama dağılımı.

**A: Static Structural**  
Normal Stress 2  
Type: Normal Stress(X Axis)  
Unit: MPa  
Global Coordinate System  
Time: 1  
9.06.2019 05:19

**239.92 Max**  
180.39  
120.85  
61.312  
1.7748  
-57.762  
-117.3  
-176.84  
-236.37  
**-295.91 Min**

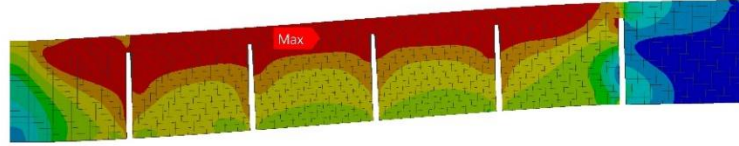


0.00 20.00 40.00 60.00 80.00 (mm)

**Şekil 5.9:** TK3N300 için normal gerilim dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Stress  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
9.06.2019 05:18

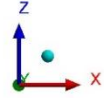
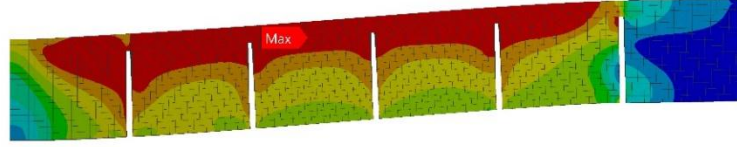
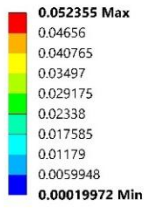
**1.299 Max**  
1.1553  
1.0115  
0.86768  
0.72389  
0.5801  
0.43632  
0.29253  
0.14874  
**0.0049555 Min**



0.00 20.00 40.00 60.00 80.00 (mm)

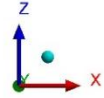
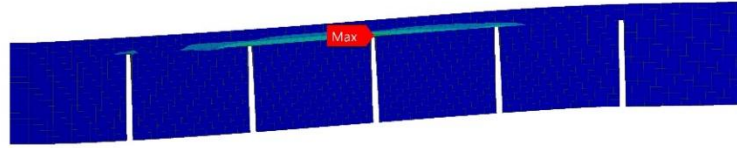
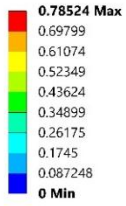
**Şekil 5.10:** TK3N300 için köpük malzemede maks. kayma gerilimi dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Elastic Strain  
Type: Maximum Shear Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
9.06.2019 05:19



**Şekil 5.11:** TK3N300 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.

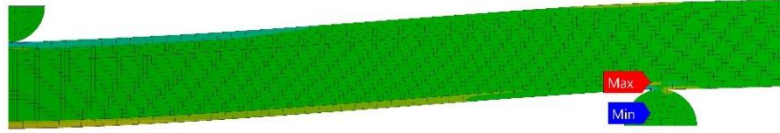
**A: Static Structural**  
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
9.06.2019 05:18



**Şekil 5.12:** TK3N300 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.

**A: Static Structural**  
Normal Stress 2  
Type: Normal Stress(X Axis)  
Unit: MPa  
Global Coordinate System  
Time: 1  
4.06.2019 21:39

**277.17 Max**  
209.44  
141.7  
73.958  
6.2195  
-61.519  
-129.26  
-197  
-264.74  
**-332.47 Min**

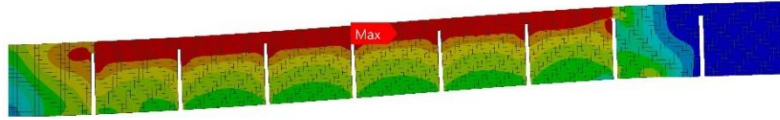


0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)

**Şekil 5.13:** TK3N450 için normal gerilim dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Stress  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
4.06.2019 21:39

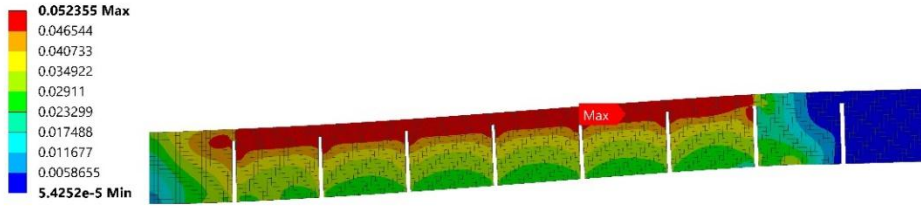
**1.299 Max**  
1.1549  
1.0107  
0.86647  
0.72229  
0.5781  
0.43391  
0.28972  
0.14553  
**0.0013461 Min**



0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)

**Şekil 5.14:** TK3N450 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.

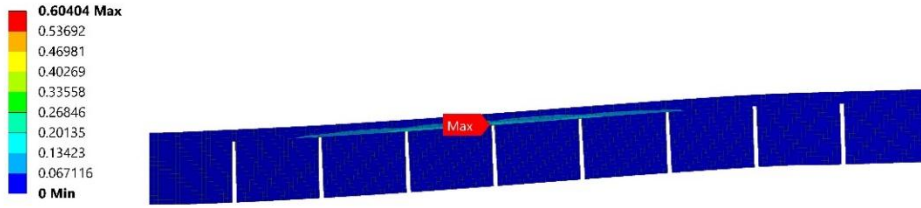
**A: Static Structural**  
Maximum Shear Elastic Strain  
Type: Maximum Shear Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
4.06.2019 21:38



0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)

**Şekil 5.15:** TK3N450 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.

**A: Static Structural**  
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
4.06.2019 21:38

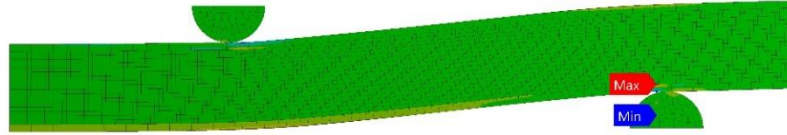


0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)

**Şekil 5.16:** TK3N450 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.

**A: Static Structural**  
Normal Stress 2  
Type: Normal Stress(X Axis)  
Unit: MPa  
Global Coordinate System  
Time: 1  
4.06.2019 23:01

**350.16 Max**  
264.11  
178.06  
92.008  
5.9566  
-80.095  
-166.15  
-252.2  
-338.25  
**-424.3 Min**

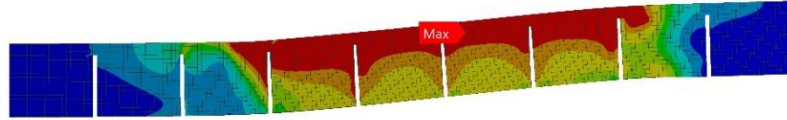


0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)

**Şekil 5.17:** TK4N450 için normal gerilim dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Stress  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
4.06.2019 23:00

**1.299 Max**  
1.1549  
1.0108  
0.86665  
0.72252  
0.57839  
0.43426  
0.29013  
0.146  
**0.0018691 Min**



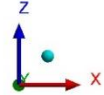
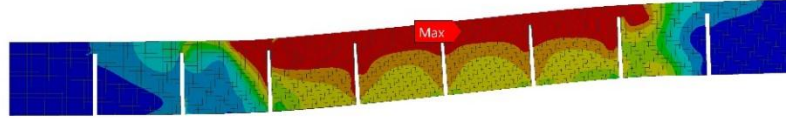
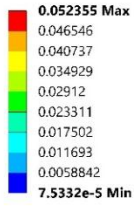
0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)

**Şekil 5.18:** TK4N450 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.



**A: Static Structural**

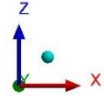
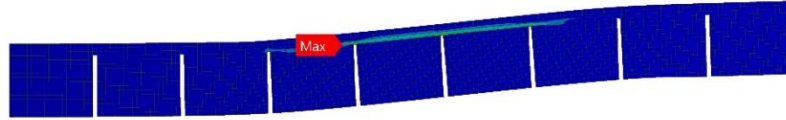
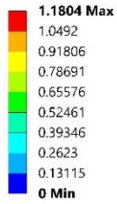
Maximum Shear Elastic Strain  
Type: Maximum Shear Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
4.06.2019 23:00



**Şekil 5.19:** TK4N450 için köpük malzemedeği maks. elastik kayma uzaması dağılımı.

**A: Static Structural**

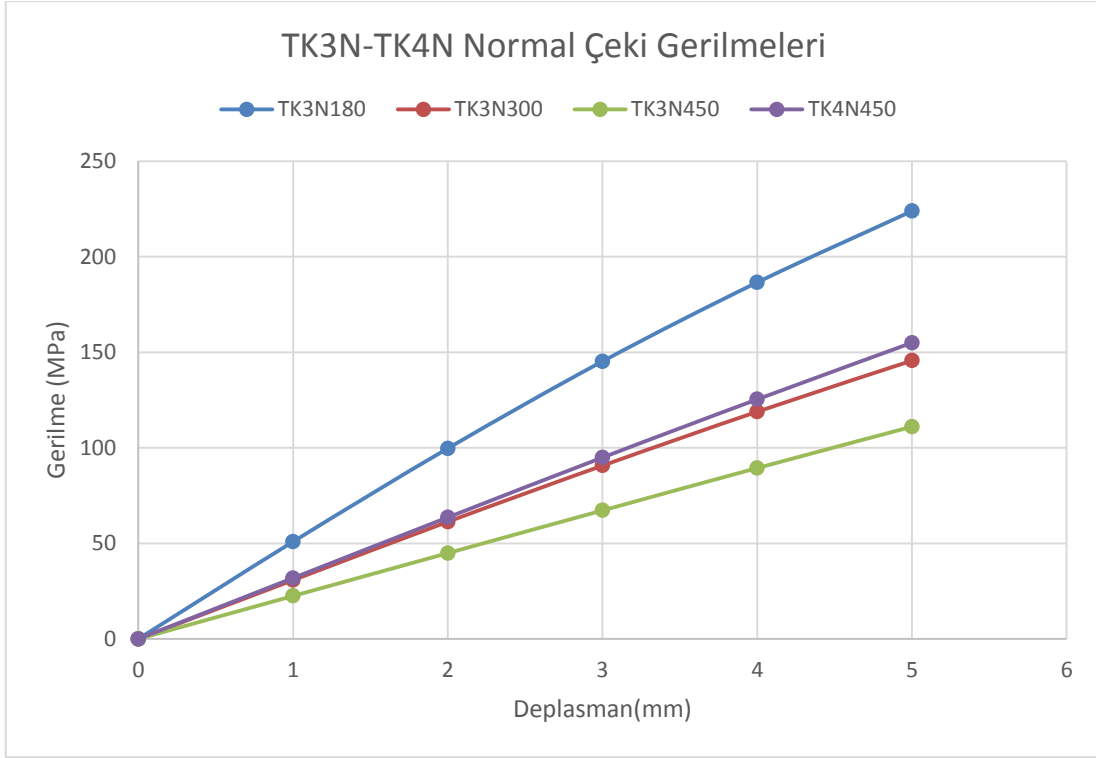
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
4.06.2019 23:00



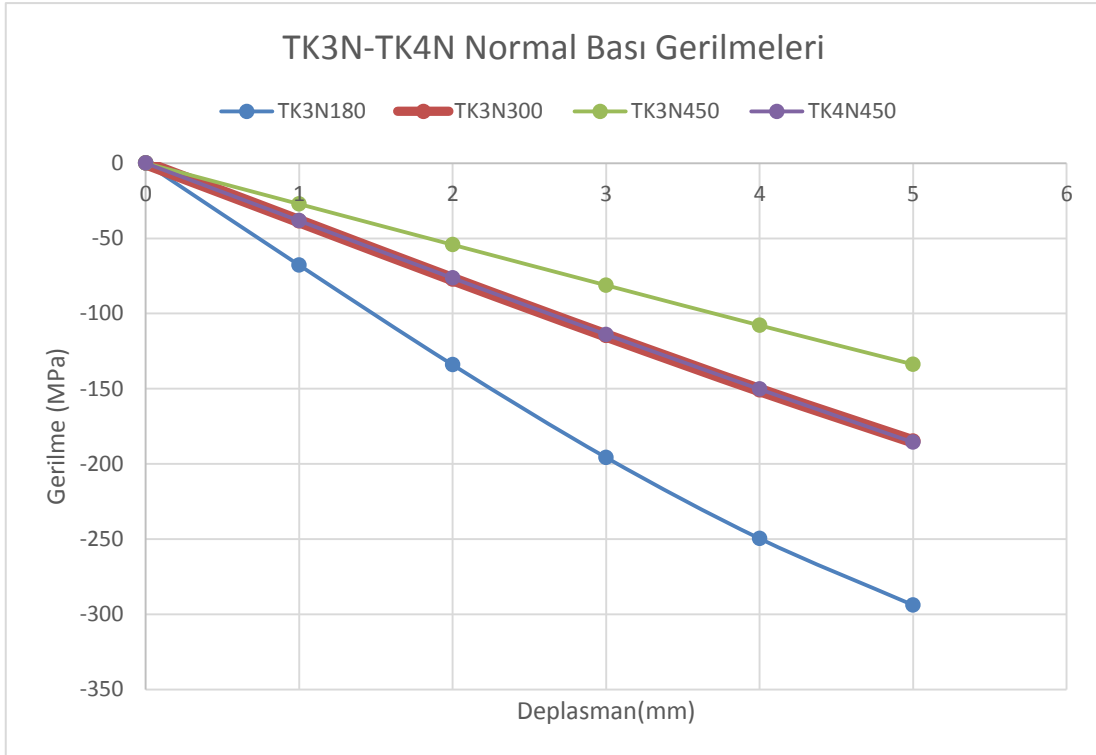
**Şekil 5.20:** TK4N450 için köpük malzemedeği eşdeğer plastik uzama dağılımı.

### 5.1.1.1 TK3N ve TK4N Analiz Sonuçlarının Destek Mesafelerine Göre Karşılaştırılması

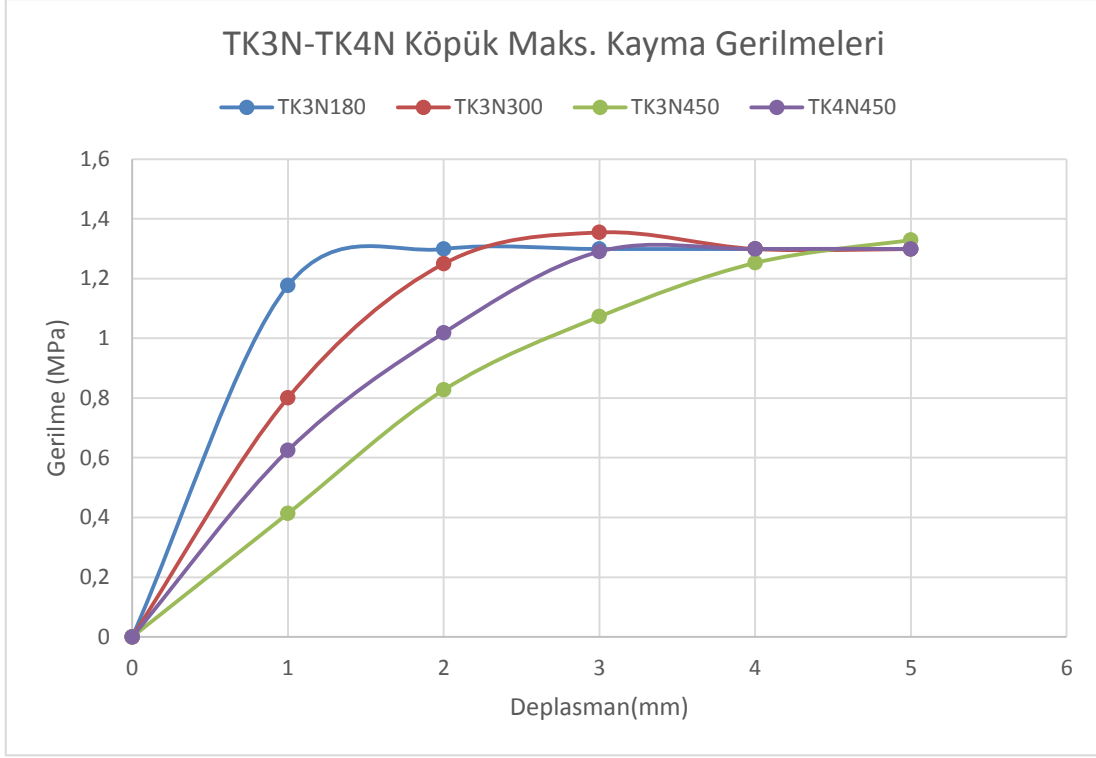
Şekil 5.21-25'teki grafiklerle gösterilen testere kesim modellerin farklı destek mesafelerindeki mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.26'da farklı destek mesafelerindeki testere kesim modellerden kalınlık doğrultusunda alınan bir kesitteki normal gerilme değişimleri verilmiştir.



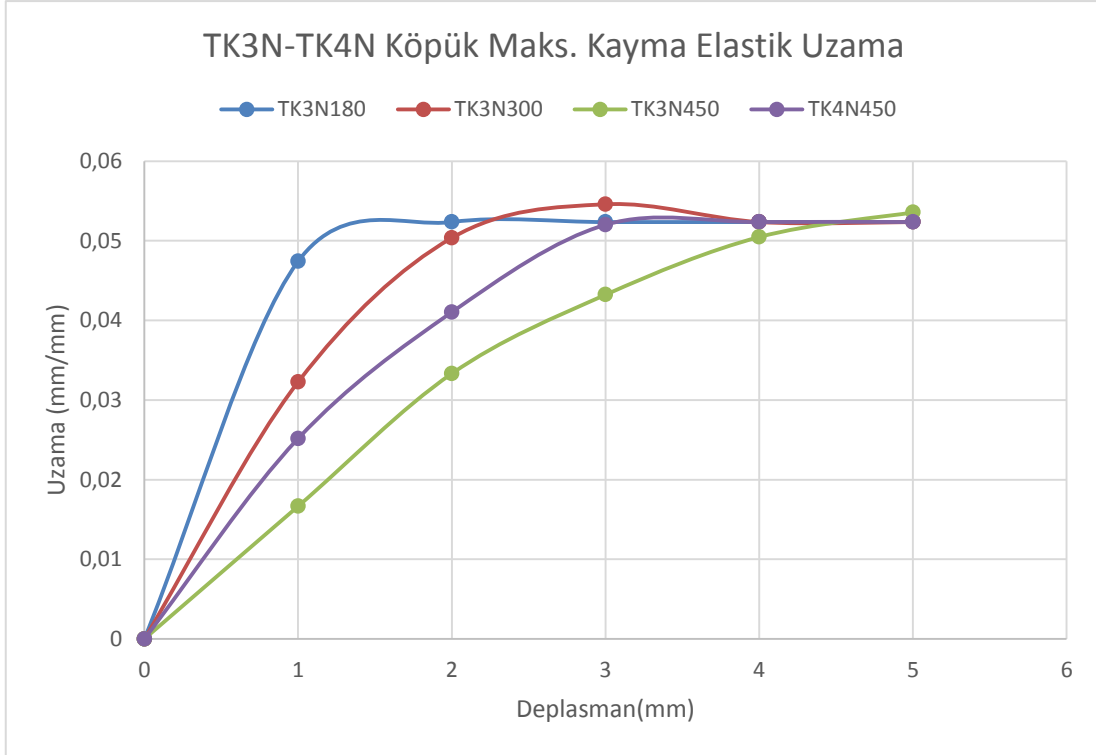
**Şekil 5.21:** Testere kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki normal çeki gerilmeleri.



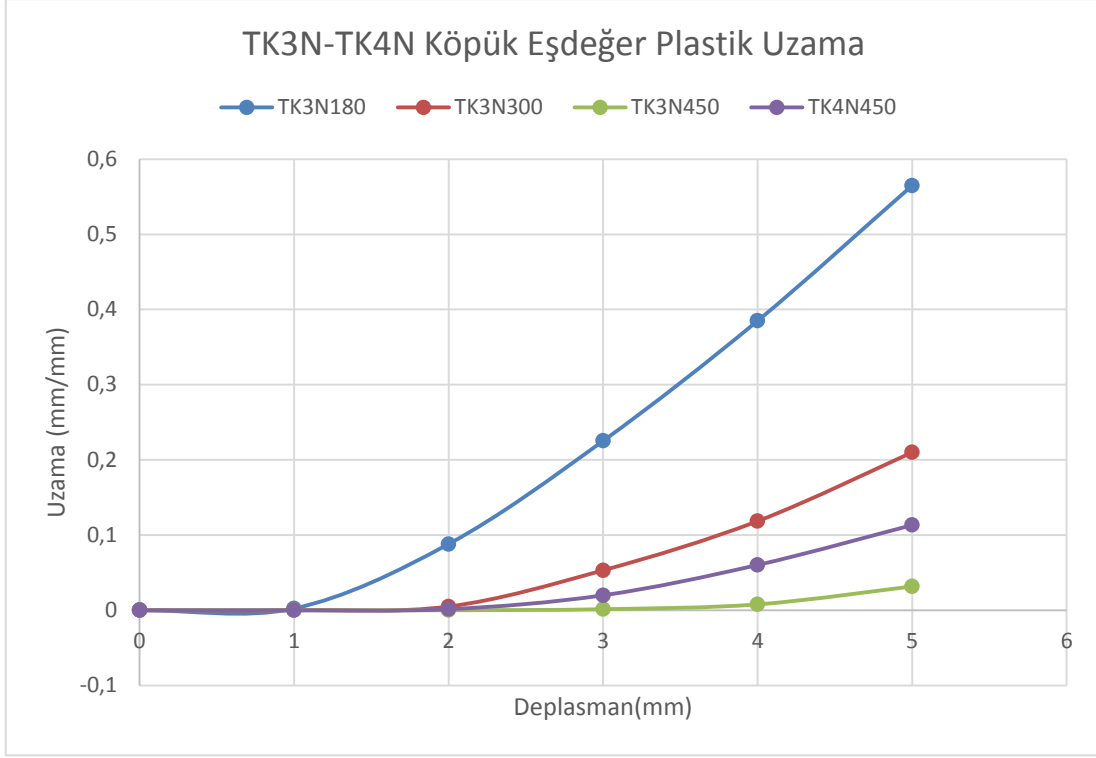
**Şekil 5.22:** Testere kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki normal bası gerilmeleri.



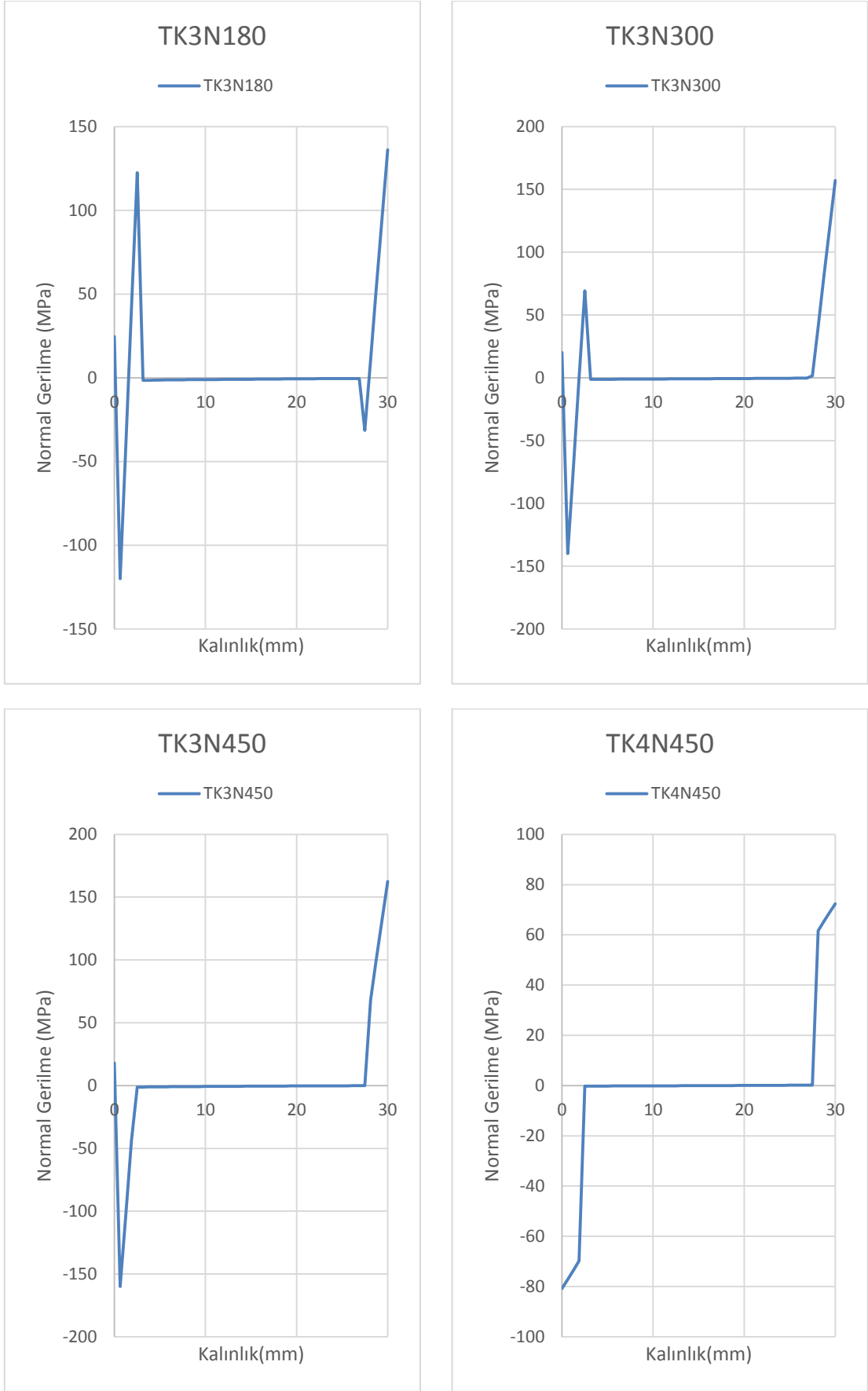
**Şekil 5.23:** Testere kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki maks. kayma gerilmeleri.



**Şekil 5.24:** Testere kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki maks. elastik kayma uzaması.



**Şekil 5.25:** Testere kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki eşdeğer plastik uzama.



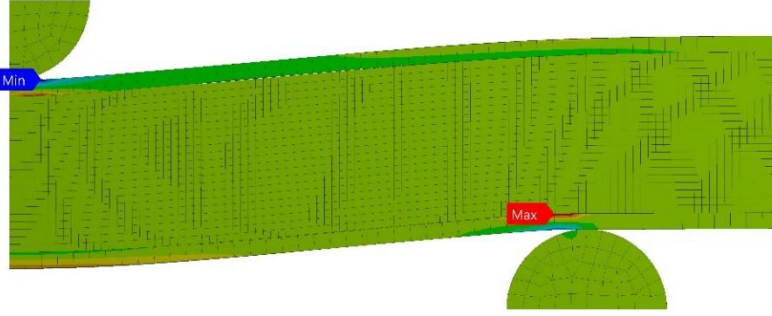
**Şekil 5.26:** Testere kesikli modellerden kalınlık doğrultusunda alınan bir kesitteki normal gerilme değişimleri.

### **5.1.2 BK3N ve BK4N Modellerinin Analiz Sonuçları**

Şekil 5.27-42’de bıçak kesikli PVC köpük sandviçlerin üç nokta ve dört nokta eğilme altındaki sırasıyla normal gerilme, maks. kayma gerilmesi, maks. elastik kayma uzaması ve eşdeğer plastik uzama sonuçları gösterilmiştir.

**A: Static Structural**  
Normal Stress 2  
Type: Normal Stress(X Axis)  
Unit: MPa  
Global Coordinate System  
Time: 1  
4.06.2019 23:42

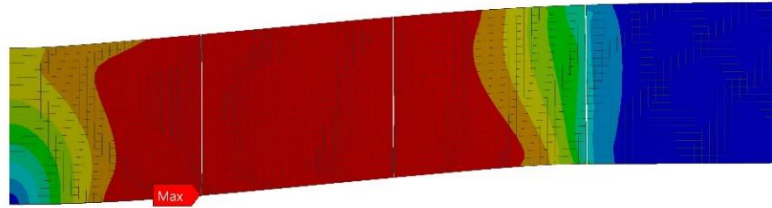
**187.7 Max**  
137.54  
87.374  
37.209  
-12.957  
-63.122  
-113.29  
-163.45  
-213.62  
**-263.78 Min**



**Şekil 5.27:** BK3N180 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Stress  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
4.06.2019 23:39

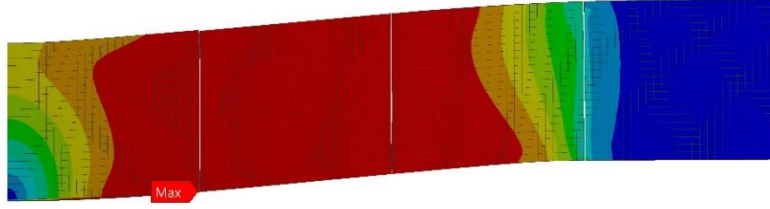
**1.299 Max**  
1.1549  
1.0108  
0.86663  
0.72249  
0.57835  
0.43422  
0.29008  
0.14594  
**0.0018061 Min**



**Şekil 5.28:** BK3N180 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Elastic Strain  
Type: Maximum Shear Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
4.06.2019 23:39

**0.052355 Max**  
0.046546  
0.040737  
0.034928  
0.029119  
0.023309  
0.0175  
0.011691  
0.0058819  
**7.2792e-5 Min**

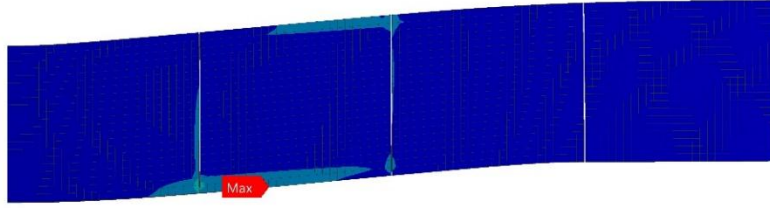


0.00 12.50 25.00 37.50 50.00 (mm)

**Şekil 5.29:** BK3N180 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.

**A: Static Structural**  
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
4.06.2019 23:39

**0.10732 Max**  
0.095394  
0.08347  
0.071545  
0.059621  
0.047697  
0.035773  
0.023848  
0.011924  
**0 Min**

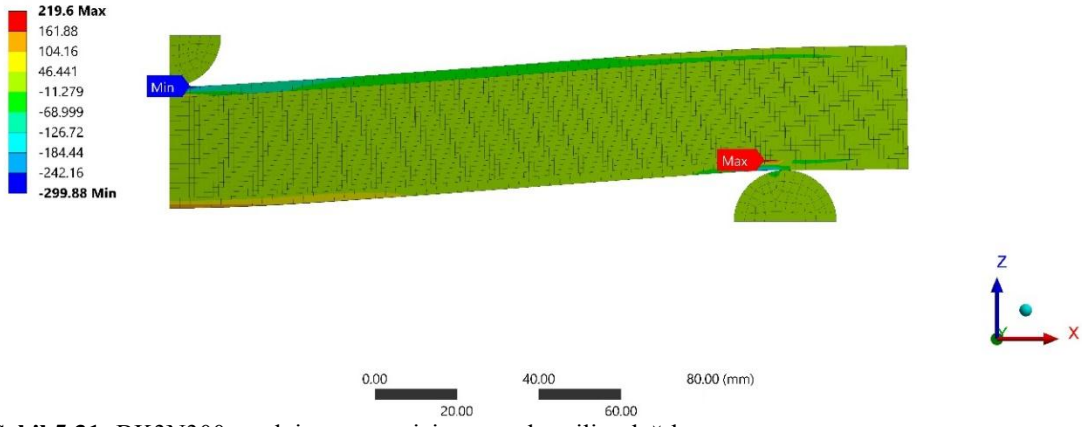


0.00 12.50 25.00 37.50 50.00 (mm)

**Şekil 5.30:** BK3N180 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.

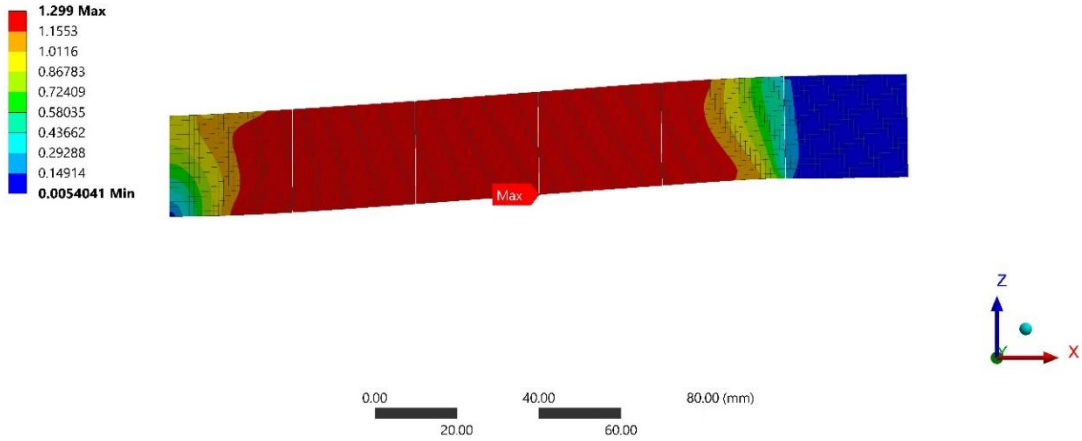


**A: Static Structural**  
Normal Stress 2  
Type: Normal Stress(X Axis)  
Unit: MPa  
Global Coordinate System  
Time: 1  
5.06.2019 00:22



**Şekil 5.31:** BK3N300 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.

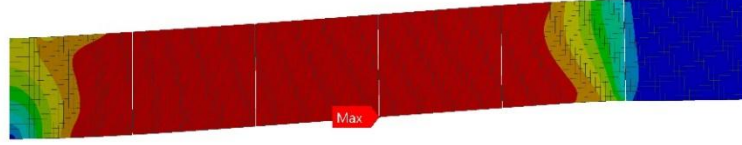
**A: Static Structural**  
Maximum Shear Stress  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
4.06.2019 23:50



**Şekil 5.32:** BK3N300 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Elastic Strain  
Type: Maximum Shear Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
4.06.2019 23:57

**0.052355 Max**  
0.046562  
0.040769  
0.034976  
0.029183  
0.02339  
0.017597  
0.011804  
0.0060108  
**0.0002178 Min**

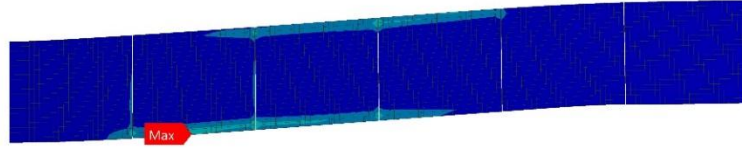


0.00 20.00 40.00 60.00 80.00 (mm)

**Şekil 5.33:** BK3N300 için köpük malzemedeği maks. elastik kayma uzaması dağılımı.

**A: Static Structural**  
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
4.06.2019 23:55

**0.1184 Max**  
0.10524  
0.092086  
0.078931  
0.065776  
0.05262  
0.039465  
0.02631  
0.013155  
**0 Min**

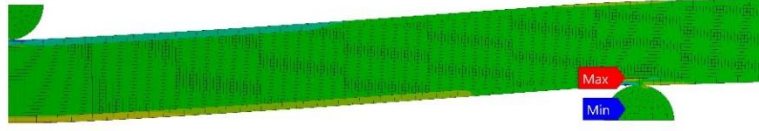


0.00 20.00 40.00 60.00 80.00 (mm)

**Şekil 5.34:** BK3N300 için köpük malzemedeği eşdeğer plastik uzama dağılımı.

**A: Static Structural**  
Normal Stress 2  
Type: Normal Stress(X Axis)  
Unit: MPa  
Global Coordinate System  
Time: 1  
5.06.2019 00:45

**254.64 Max**  
193.01  
131.39  
69.761  
8.1358  
-53.489  
-115.11  
-176.74  
-238.37  
**-299.99 Min**

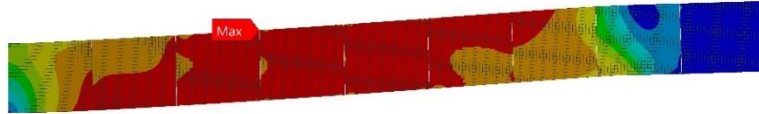


0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)

**Şekil 5.35:** BK3N450 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Stress 2  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
5.06.2019 00:38

**1.299 Max**  
1.1548  
1.0105  
0.8662  
0.72193  
0.57765  
0.43337  
0.28909  
0.14482  
**0.00053896 Min**

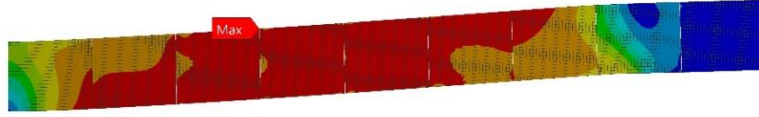


0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)

**Şekil 5.36:** BK3N450 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Elastic Strain  
Type: Maximum Shear Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 00:44

**0.052355 Max**  
0.04654  
0.040725  
0.034911  
0.029096  
0.023281  
0.017466  
0.011651  
0.0058365  
**2.1722e-5 Min**

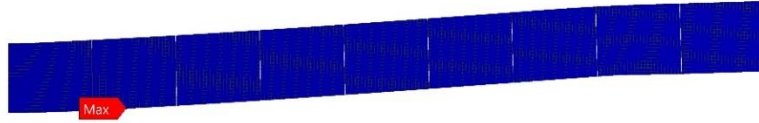


0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)

**Şekil 5.37:** BK3N450 için köpük malzemedeiki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.

**A: Static Structural**  
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 00:44

**0.060765 Max**  
0.054013  
0.047261  
0.04051  
0.033758  
0.027007  
0.020255  
0.013503  
0.0067516  
**0 Min**

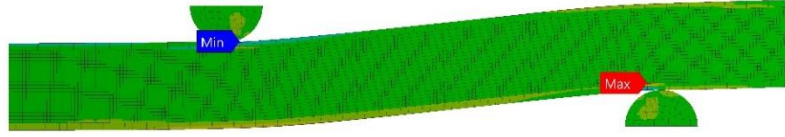


0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)

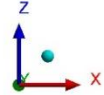
**Şekil 5.38:** BK3N450 için köpük malzemedeiki eşdeğer plastik uzama dağılımı.

**A: Static Structural**  
Normal Stress 2  
Type: Normal Stress(X Axis)  
Unit: MPa  
Global Coordinate System  
Time: 1  
5.06.2019 01:21

**315.95 Max**  
236.97  
157.99  
79.014  
0.033395  
-78.947  
-157.93  
-236.91  
-315.89  
**-394.87 Min**



0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)



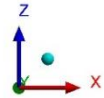
**Şekil 5.39:** BK4N450 için normal gerilim dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Stress 2  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
5.06.2019 01:17

**1.299 Max**  
1.1547  
1.0104  
0.86612  
0.72181  
0.57751  
0.4332  
0.28889  
0.14459  
**0.00028174 Min**



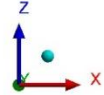
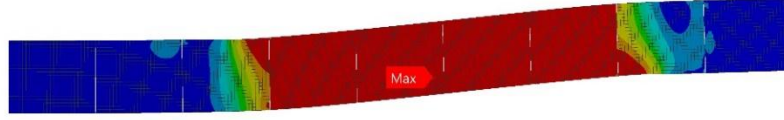
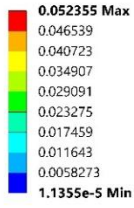
0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)



**Şekil 5.40:** BK4N450 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.

**A: Static Structural**

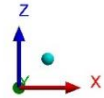
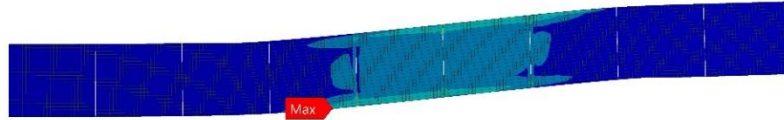
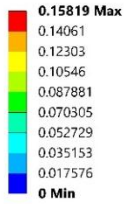
Maximum Shear Elastic Strain  
Type: Maximum Shear Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 01:20



**Şekil 5.41:** BK4N450 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.

**A: Static Structural**

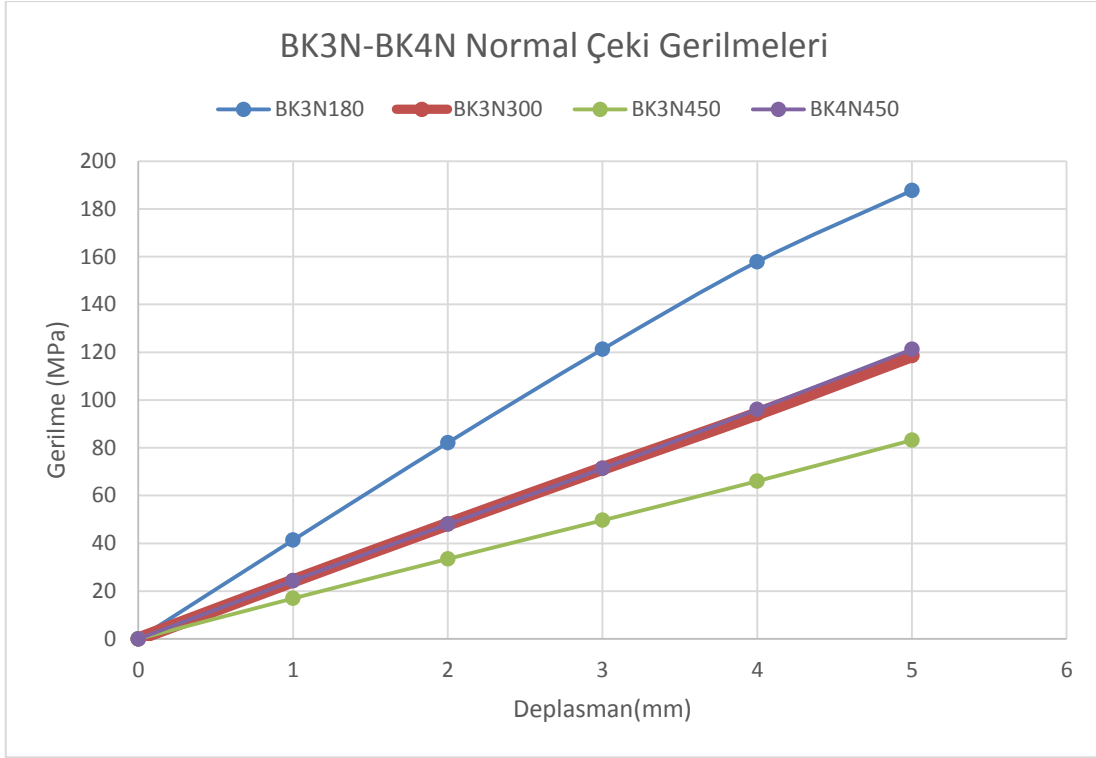
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 01:18



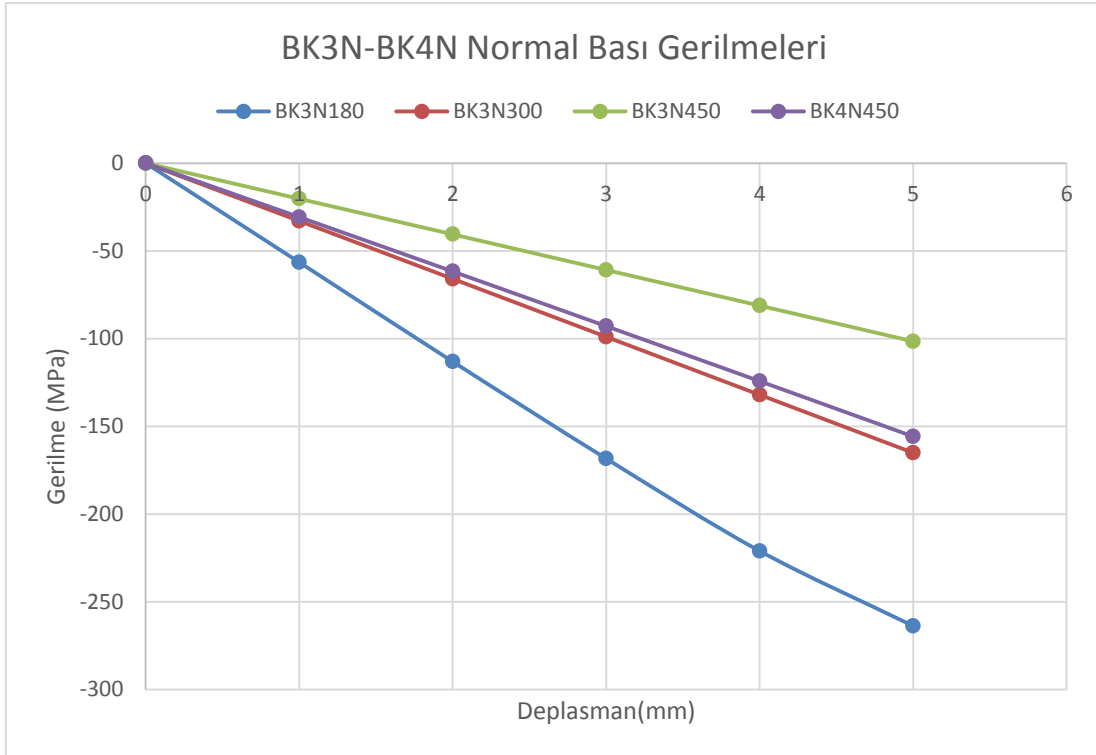
**Şekil 5.42:** BK4N450 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.

### 5.1.2.1 BK3N ve BK4N Analiz Sonuçlarının Destek Mesafelerine Göre Karşılaştırılması

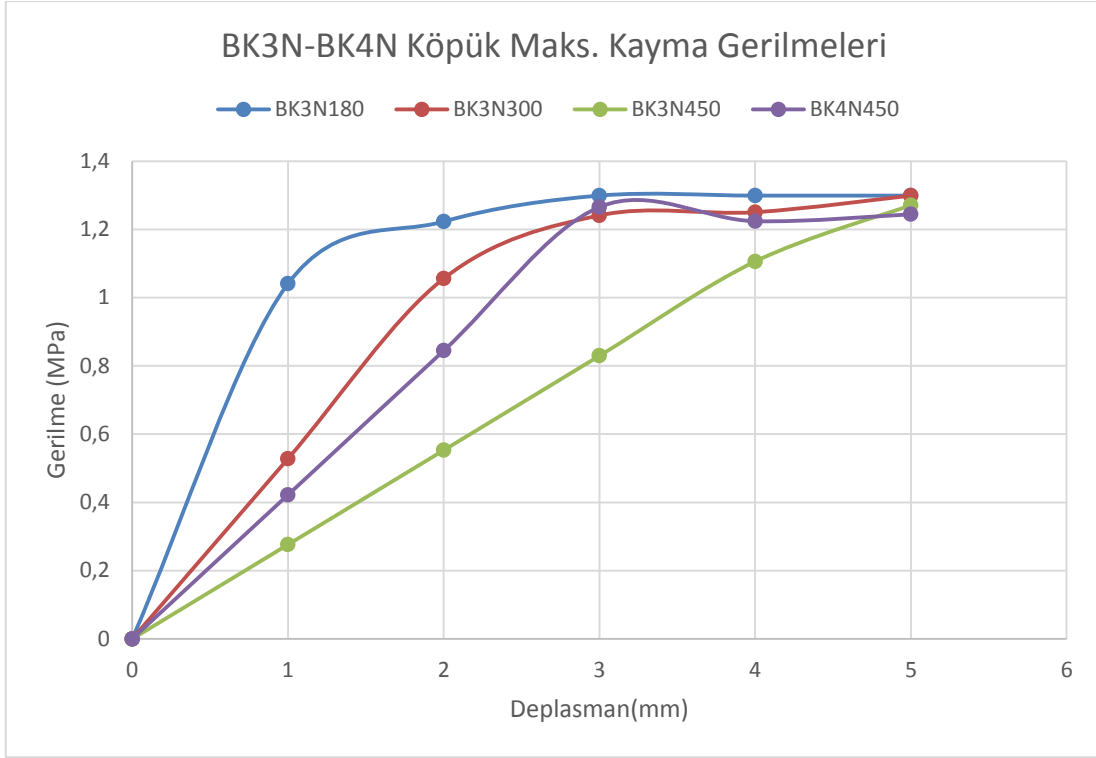
Şekil 5.43-47'deki grafiklerle gösterilen bıçak kesim modellerin farklı destek mesafelerindeki mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.48'de farklı destek mesafelerindeki bıçak kesim modellerden kalınlık doğrultusunda alınan bir kesitteki normal gerilme değişimleri verilmiştir.



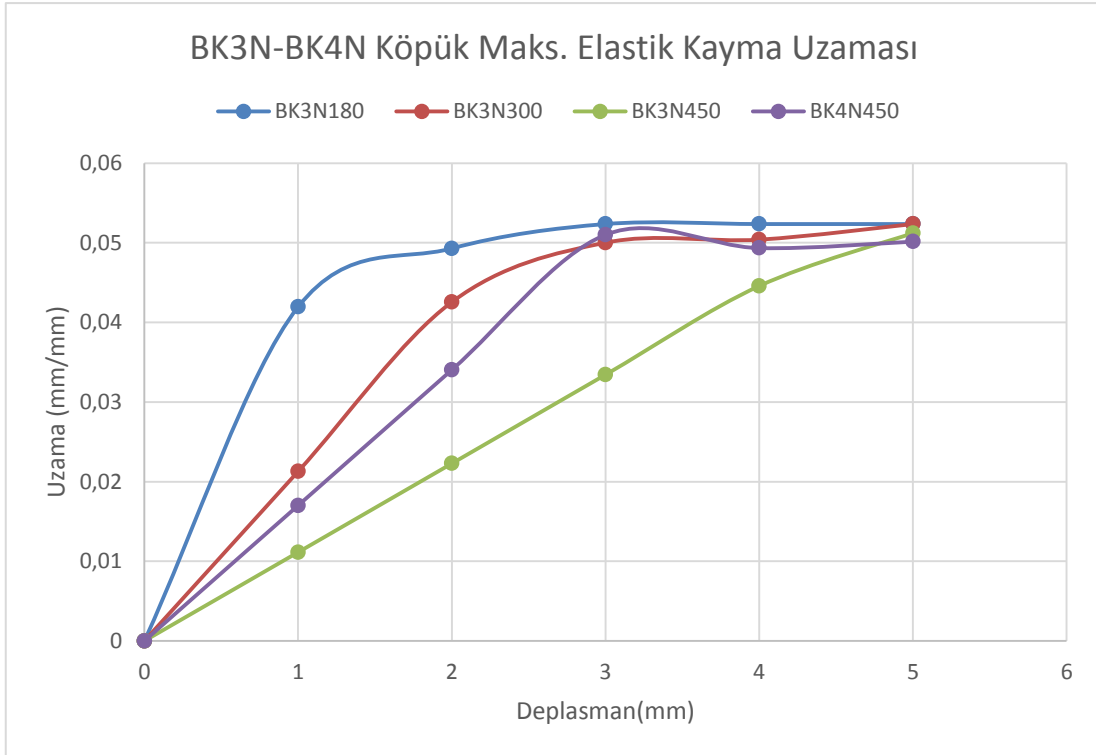
**Şekil 5.43:** Bıçak kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki normal çeki gerilmeleri.



**Şekil 5.44:** Bıçak kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki normal bası gerilmeleri.

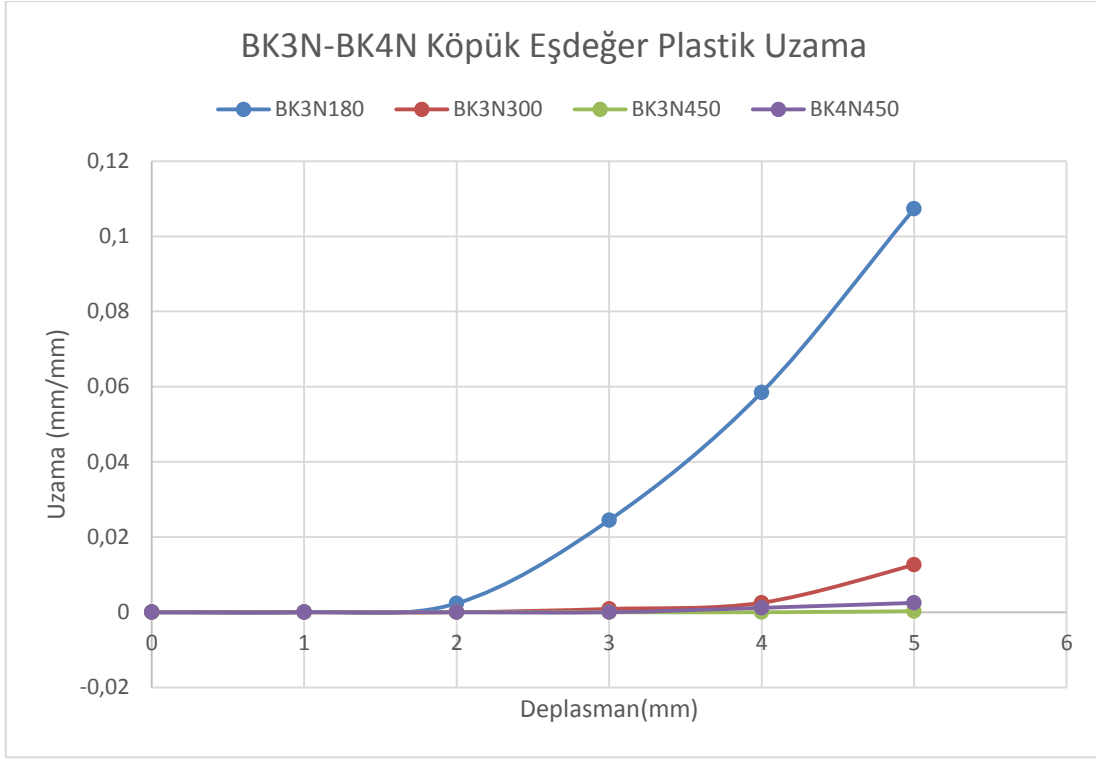


**Şekil 5.45:** Bıçak kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki maks. kayma gerilmeleri.

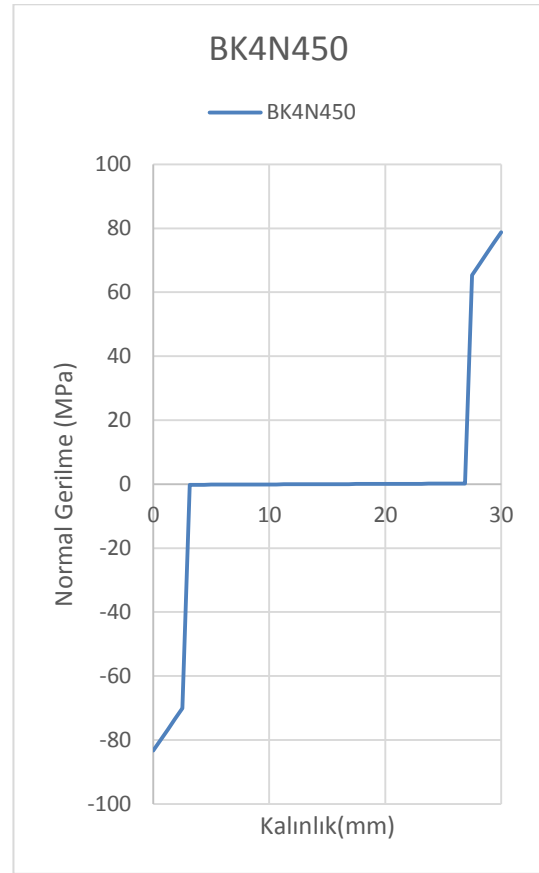
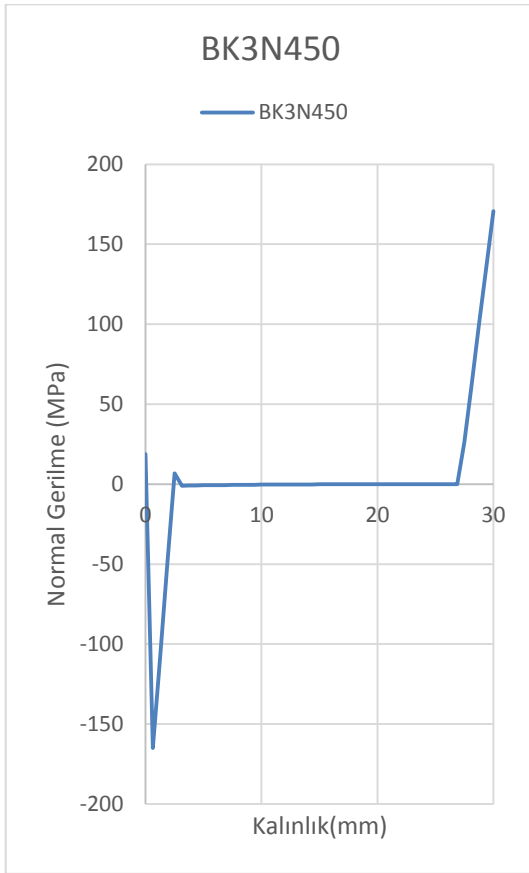
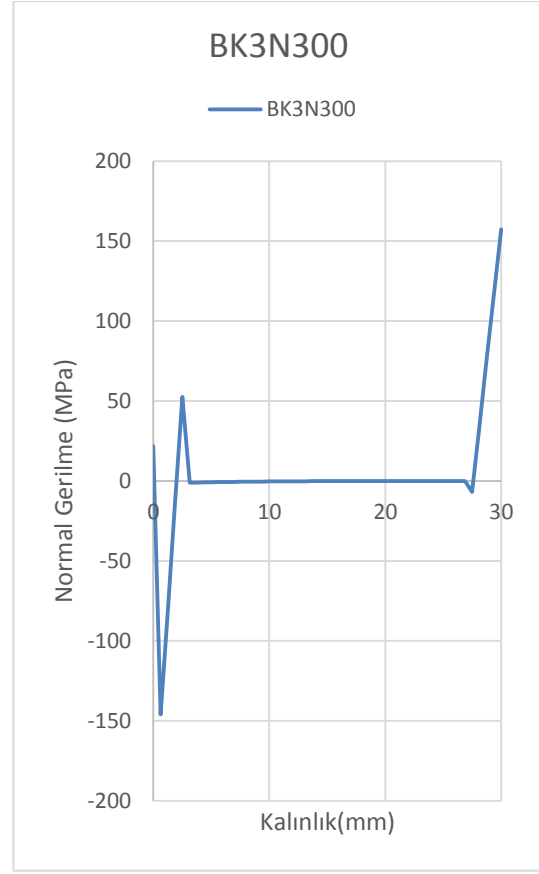
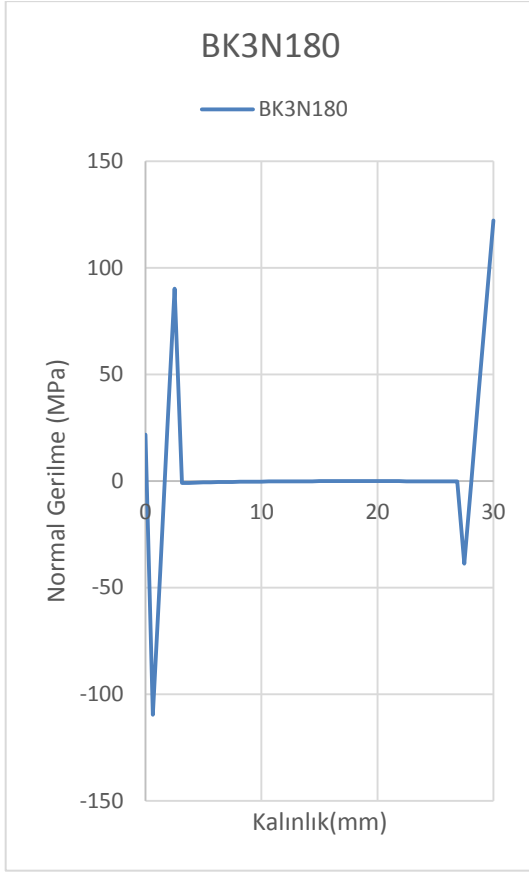


**Şekil 5.46:** Bıçak kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki maks. elastik kayma uzaması.





**Şekil 5.47:** Bıçak kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki eşdeğer plastik uzama.

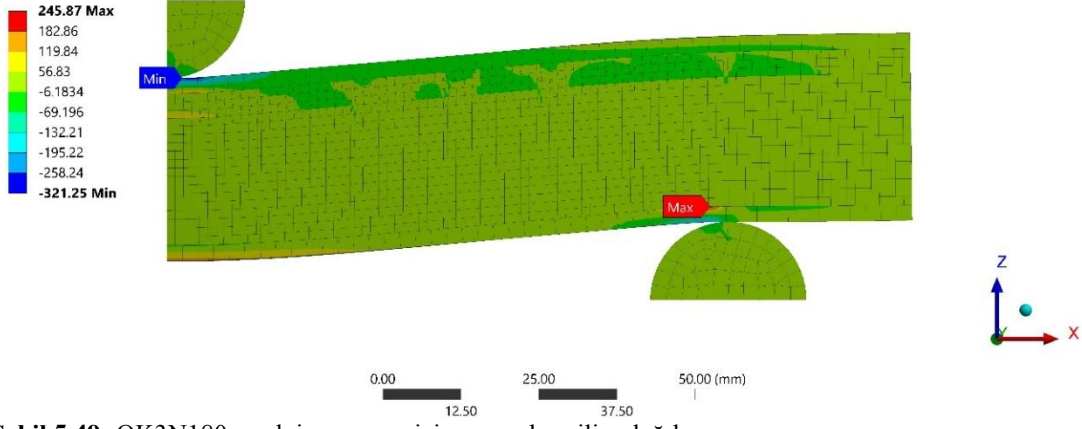


**Şekil 5.48:** Bıçak kesikli modellerden kalınlık doğrultusunda alınan bir kesitteki normal gerilme değişimleri.

### **5.1.3 OK3N ve OK4N Modellerinin Analiz Sonuçları**

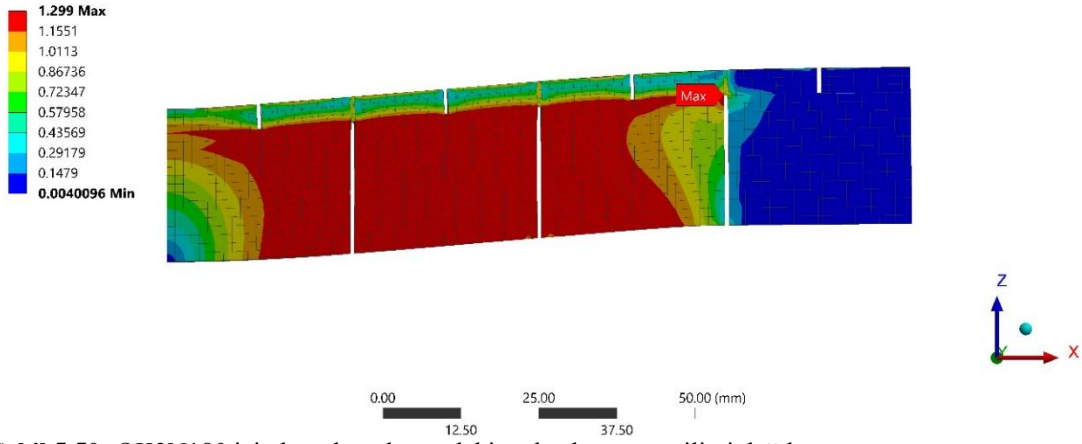
Şekil 5.49-64'te oluklu kesikli PVC köpük sandviçlerin üç nokta ve dört nokta eğilme altındaki sırasıyla normal gerilme, maks. kayma gerilmesi, maks. elastik kayma uzaması ve eşdeğer plastik uzama sonuçları gösterilmiştir.

**A: Static Structural**  
Normal Stress 2  
Type: Normal Stress(X Axis)  
Unit: MPa  
Global Coordinate System  
Time: 1  
5.06.2019 02:10



**Şekil 5.49:** OK3N180 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.

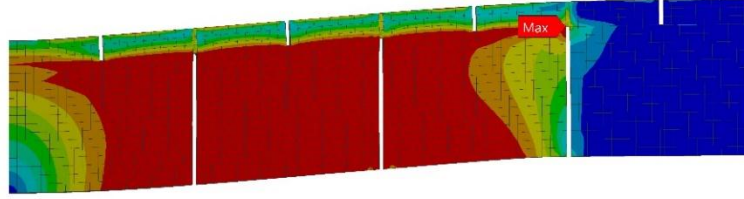
**A: Static Structural**  
Maximum Shear Stress  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
5.06.2019 02:05



**Şekil 5.50:** OK3N180 için köpük malzemedeği maks. kayma gerilimi dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Elastic Strain  
Type: Maximum Shear Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 02:06

**0.052355 Max**  
0.046556  
0.040757  
0.034957  
0.029158  
0.023359  
0.017559  
0.01176  
0.0059609  
**0.0001616 Min**

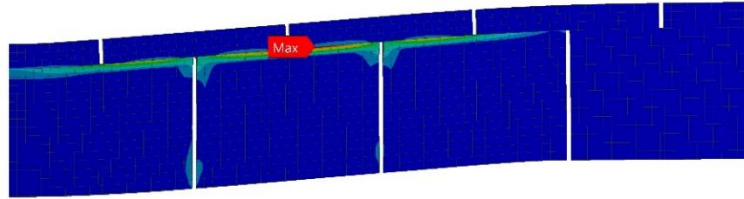


0.00 12.50 25.00 37.50 50.00 (mm)

**Şekil 5.51:** OK3N180 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.

**A: Static Structural**  
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 02:06

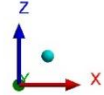
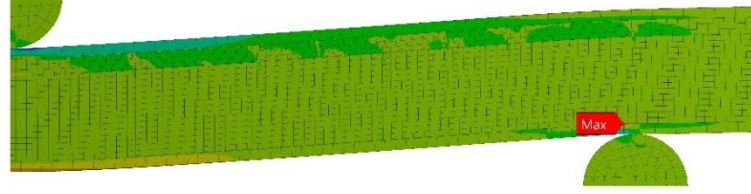
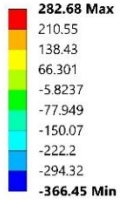
**0.14803 Max**  
0.13159  
0.11514  
0.09869  
0.082242  
0.065793  
0.049345  
0.032897  
0.016448  
**0 Min**



0.00 12.50 25.00 37.50 50.00 (mm)

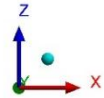
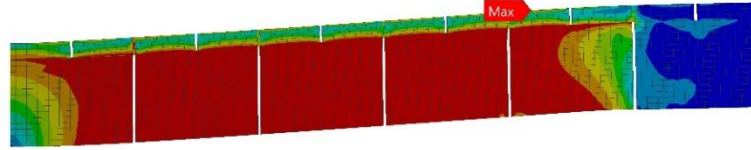
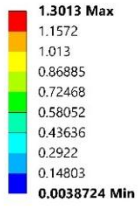
**Şekil 5.52:** OK3N180 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.

**A: Static Structural**  
Normal Stress 2  
Type: Normal Stress(X Axis)  
Unit: MPa  
Global Coordinate System  
Time: 1  
5.06.2019 02:25



**Şekil 5.53:** OK3N300 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.

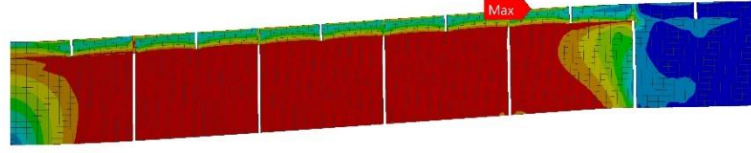
**A: Static Structural**  
Maximum Shear Stress  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
5.06.2019 02:23



**Şekil 5.54:** OK3N300 için köpük malzemede maks. kayma gerilimi dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Elastic Strain  
Type: Maximum Shear Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 02:24

**0.052448 Max**  
0.046637  
0.040827  
0.035017  
0.029207  
0.023397  
0.017587  
0.011776  
0.0059662  
**0.00015607 Min**

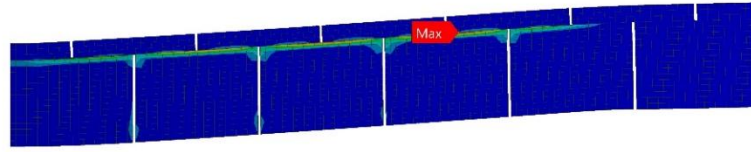


0.00 20.00 40.00 60.00 80.00 (mm)

**Şekil 5.55:** OK3N300 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.

**A: Static Structural**  
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 02:23

**0.15284 Max**  
0.13585  
0.11887  
0.10189  
0.084909  
0.067927  
0.050945  
0.033963  
0.016982  
**0 Min**

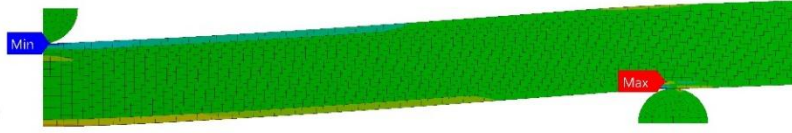


0.00 20.00 40.00 60.00 80.00 (mm)

**Şekil 5.56:** OK3N300 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.

**A: Static Structural**  
Normal Stress  
Type: Normal Stress(X Axis)  
Unit: MPa  
Global Coordinate System  
Time: 1  
5.06.2019 03:30

**293.55 Max**  
223.53  
153.51  
83.495  
13.476  
-56.543  
-126.56  
-196.58  
-266.6  
**-336.62 Min**

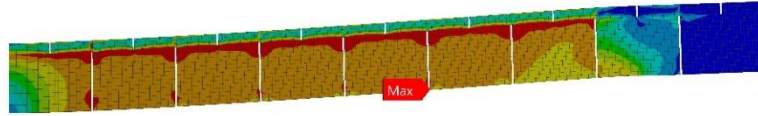


0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)

**Şekil 5.57:** OK3N450 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Stress  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
5.06.2019 03:29

**1.299 Max**  
1.1548  
1.0106  
0.86631  
0.72207  
0.57783  
0.43359  
0.28934  
0.1451  
**0.00085951 Min**



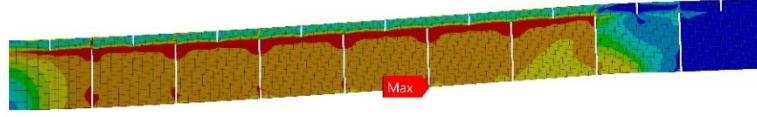
0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)

**Şekil 5.58:** OK3N450 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.



**A: Static Structural**  
Maximum Shear Elastic Strain  
Type: Maximum Shear Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 03:30

**0.052355 Max**  
0.046542  
0.040728  
0.034915  
0.029102  
0.023288  
0.017475  
0.011661  
0.005848  
**3.4641e-5 Min**

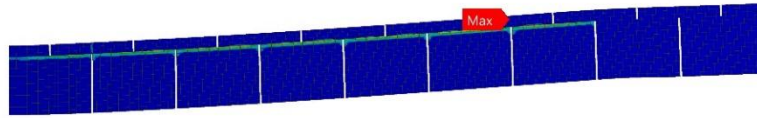


0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)

**Şekil 5.59:** OK3N450 için köpük malzemedeği maks. elastik kayma uzaması dağılımı.

**A: Static Structural**  
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 03:29

**0.076628 Max**  
0.068114  
0.059599  
0.051085  
0.042571  
0.034057  
0.025543  
0.017028  
0.0085142  
**0 Min**

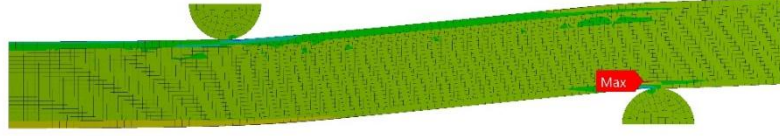


0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)

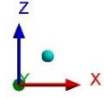
**Şekil 5.60:** OK3N450 için köpük malzemedeği eşdeğer plastik uzama dağılımı.

**A: Static Structural**  
Normal Stress 2  
Type: Normal Stress(X Axis)  
Unit: MPa  
Global Coordinate System  
Time: 1  
5.06.2019 03:52

**379.29 Max**  
280.62  
181.96  
83.291  
-15.375  
-114.04  
-212.71  
-311.37  
-410.04  
**-508.7 Min**



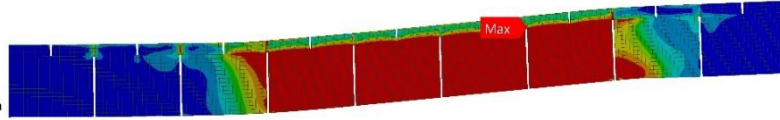
0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)



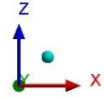
**Şekil 5.61:** OK4N450 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Stress  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
5.06.2019 03:50

**1.299 Max**  
1.1548  
1.0105  
0.86628  
0.72203  
0.57778  
0.43352  
0.28927  
0.14502  
**0.00076541 Min**



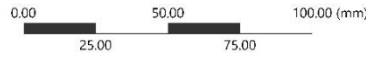
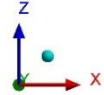
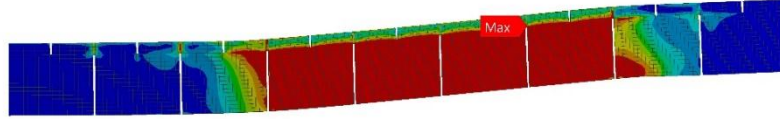
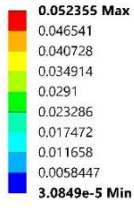
0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)



**Şekil 5.62:** OK4N450 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.

**A: Static Structural**

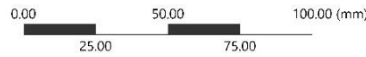
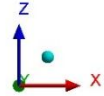
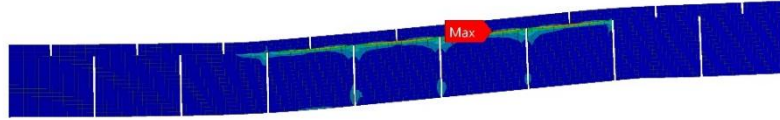
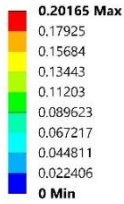
Maximum Shear Elastic Strain  
Type: Maximum Shear Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 03:51



**Şekil 5.63:** OK4N450 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.

**A: Static Structural**

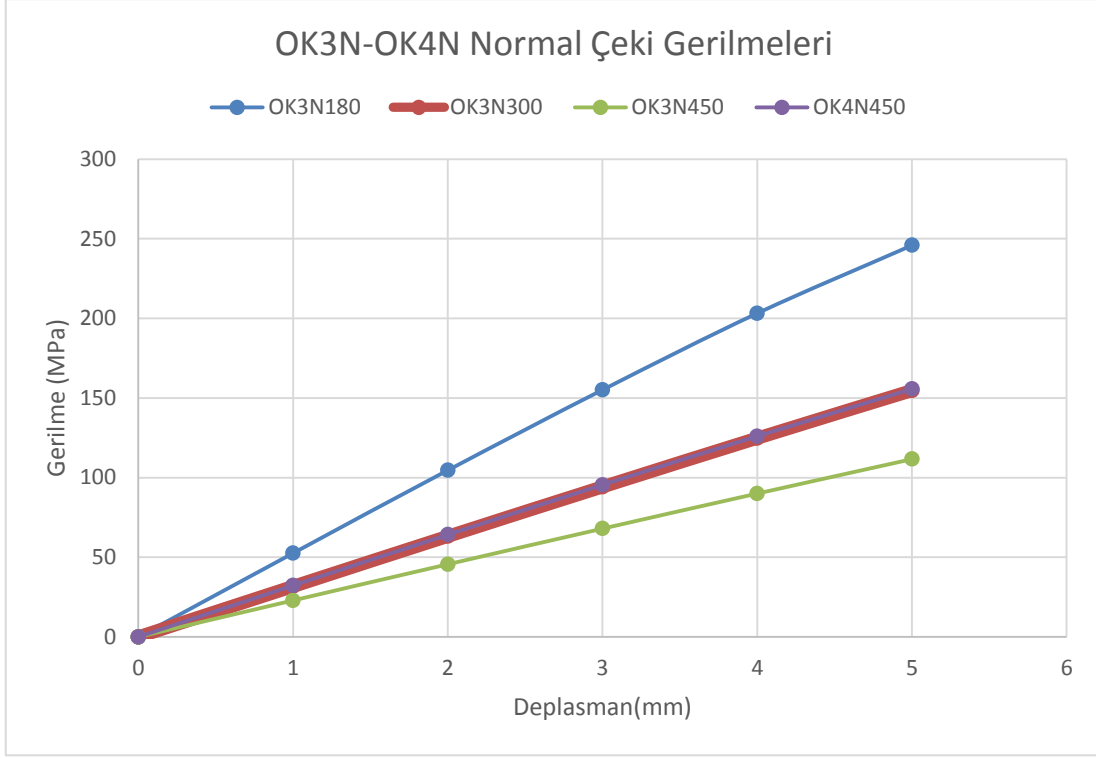
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 03:50



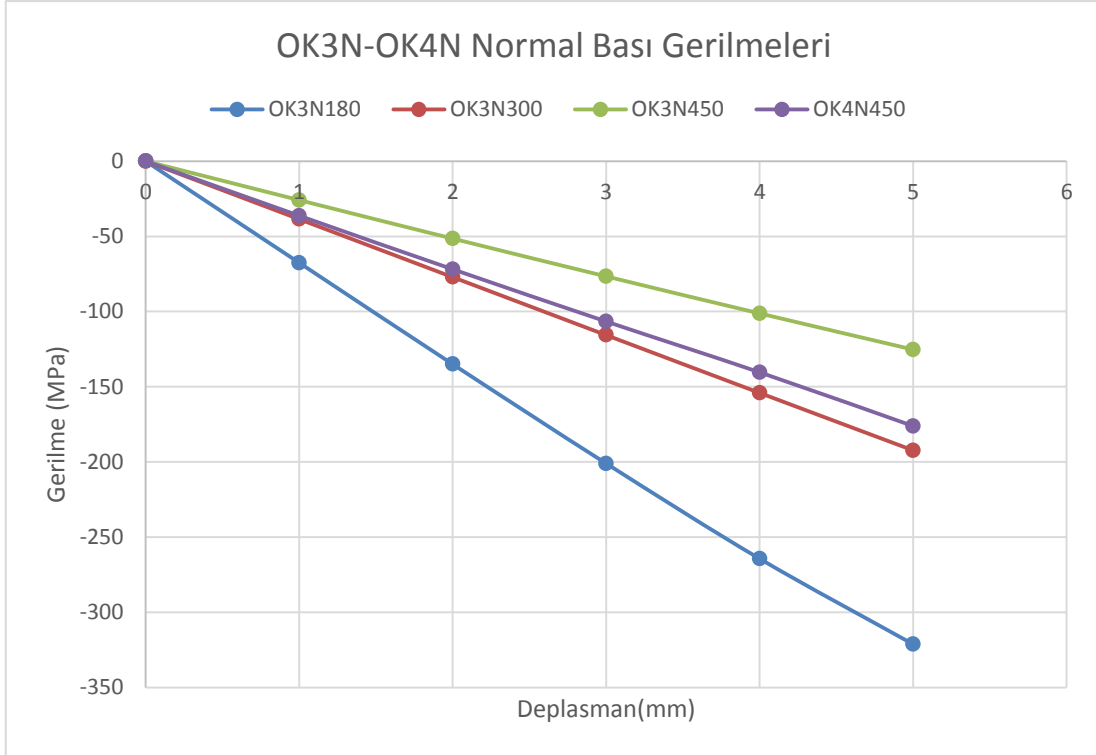
**Şekil 5.64:** OK4N450 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.

### 5.1.3.1 OK3N ve OK4N Analiz Sonuçlarının Destek Mesafelerine Göre Karşılaştırılması

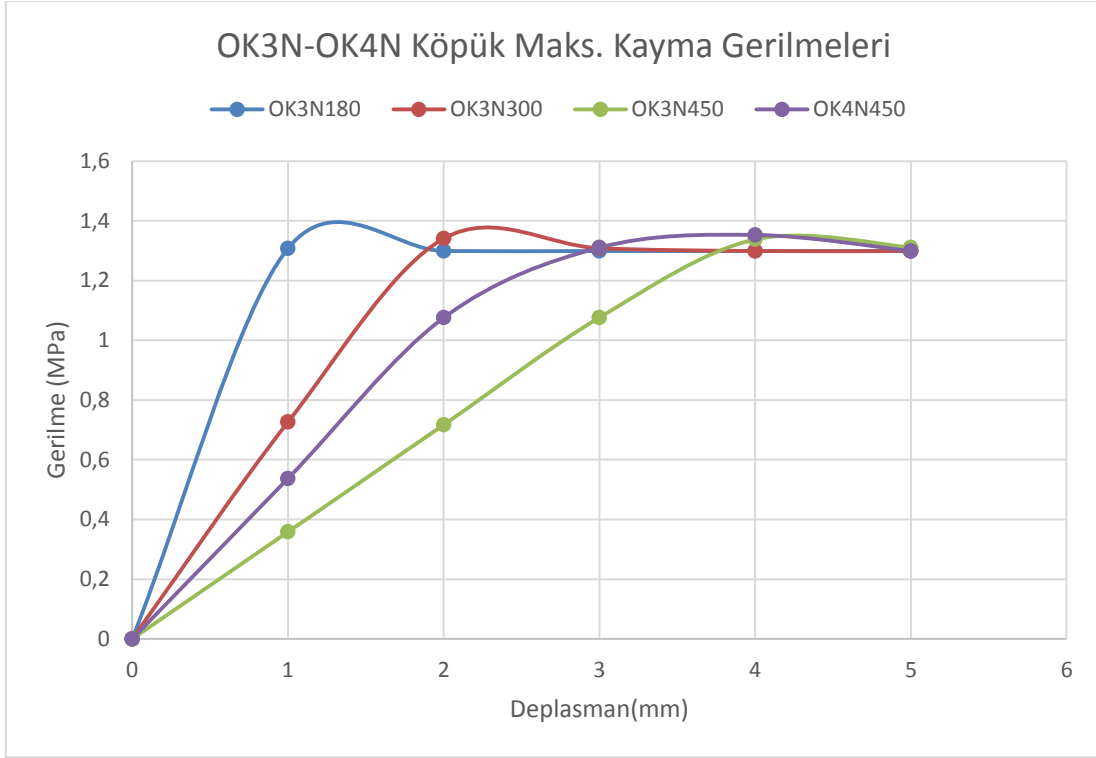
Şekil 5.65-69'daki grafiklerle gösterilen oluklu kesim modellerin farklı destek mesafelerindeki mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.70'de farklı destek mesafelerindeki oluklu kesim modellerden kalınlık doğrultusunda alınan bir kesitteki normal gerilme değişimleri verilmiştir.



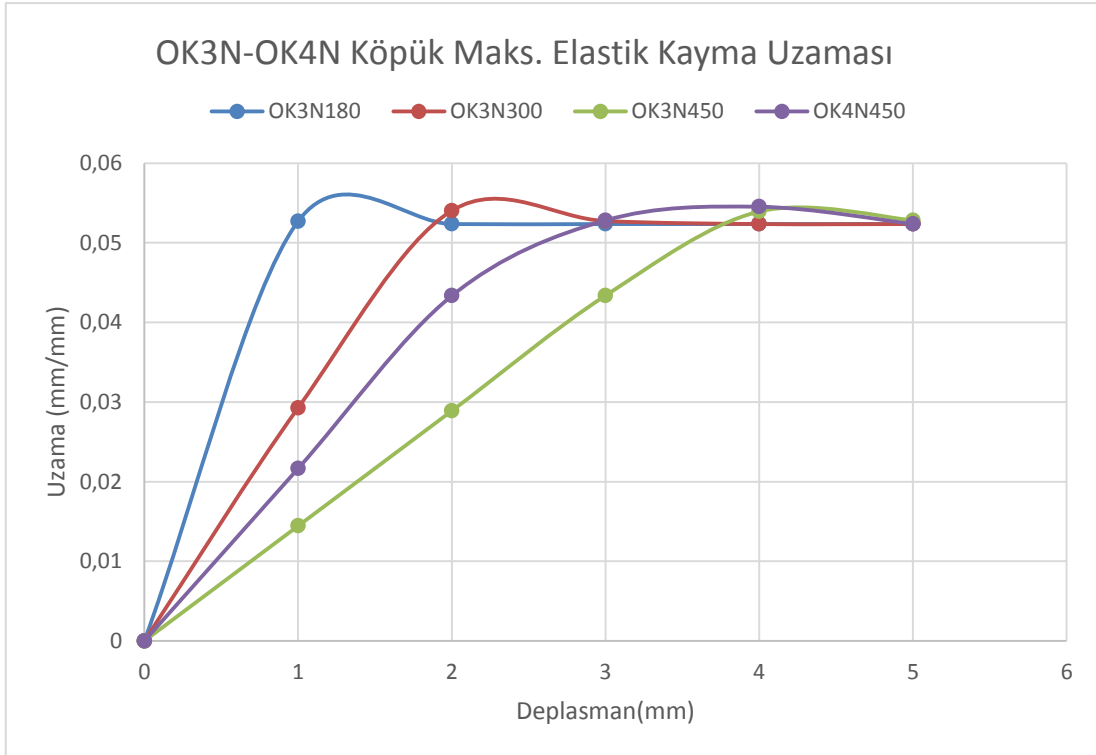
**Şekil 5.65:** Oluklu kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki normal çeki gerilmeleri.



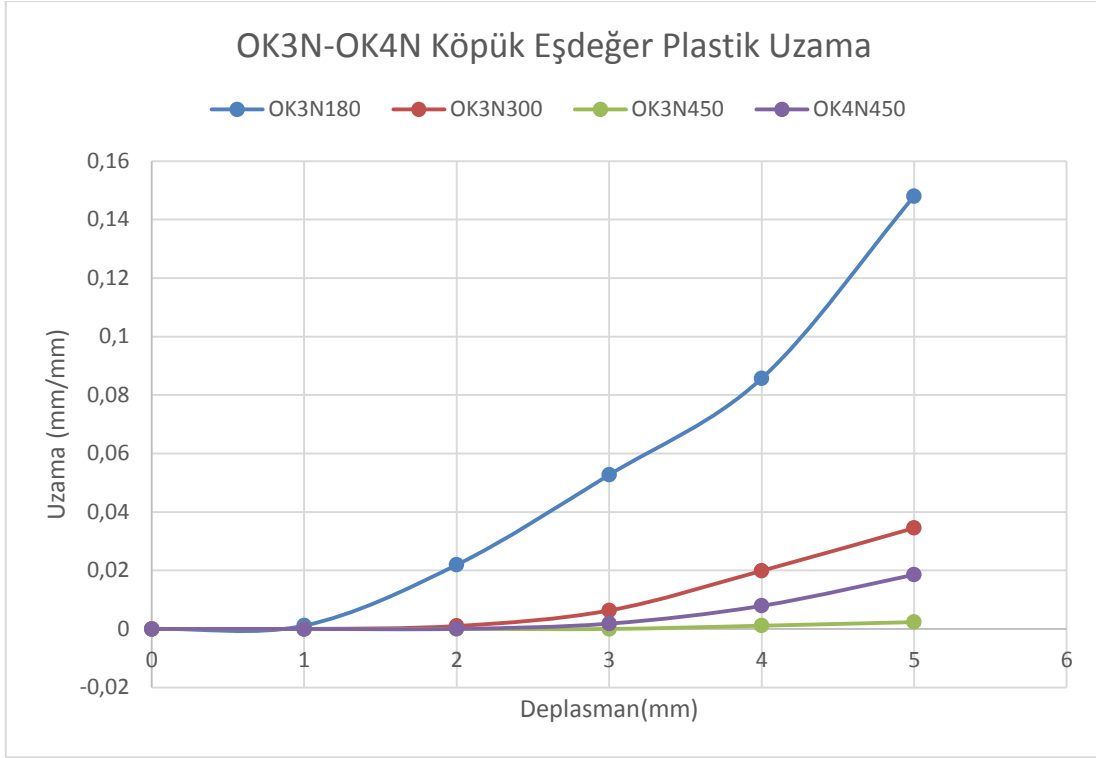
**Şekil 5.66:** Oluklu kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki normal bası gerilmeleri.



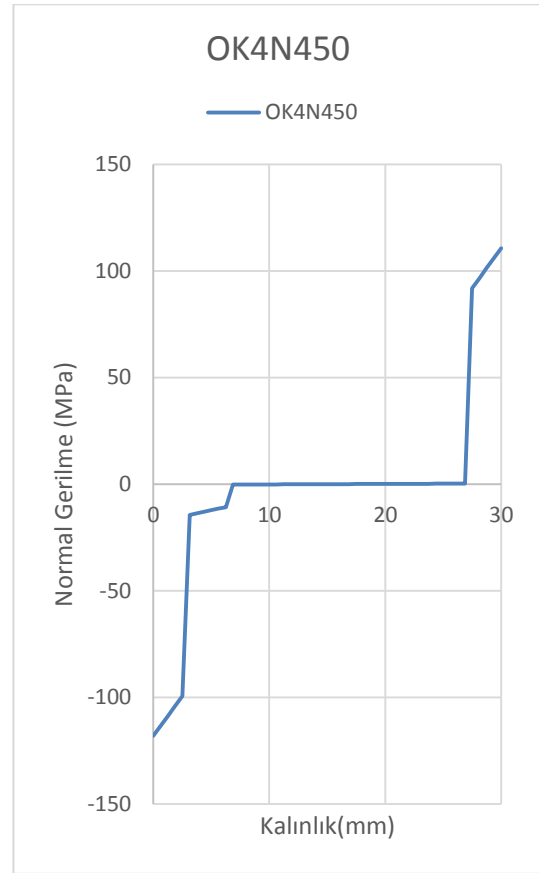
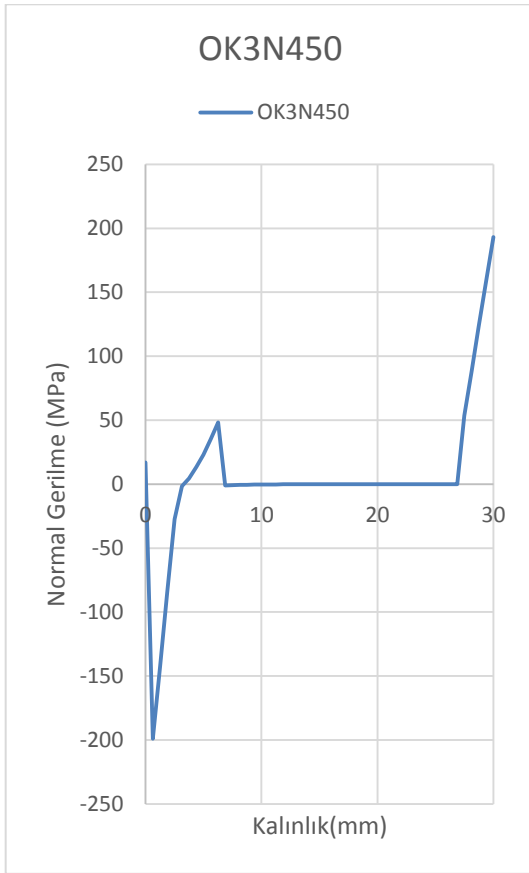
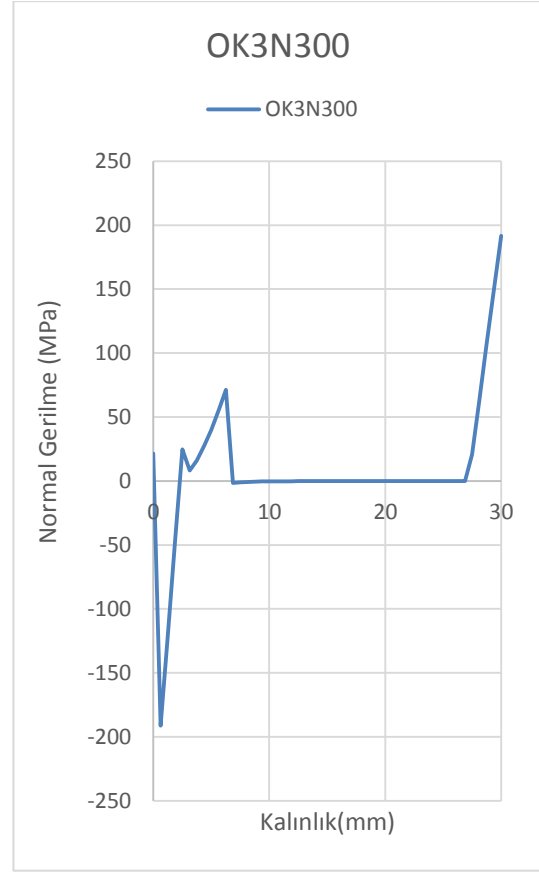
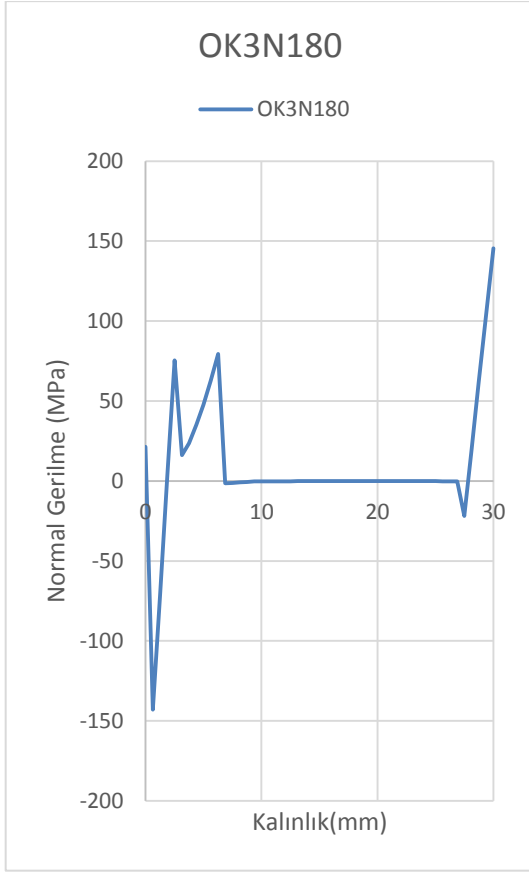
**Şekil 5.67:** Oluklu kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki maks. kayma gerilmeleri.



**Şekil 5.68:** Oluklu kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki maks elastik kayma uzaması.



**Şekil 5.69:** Oluklu kesikli modellerin farklı destek mesafelerindeki eşdeğer plastik uzama.



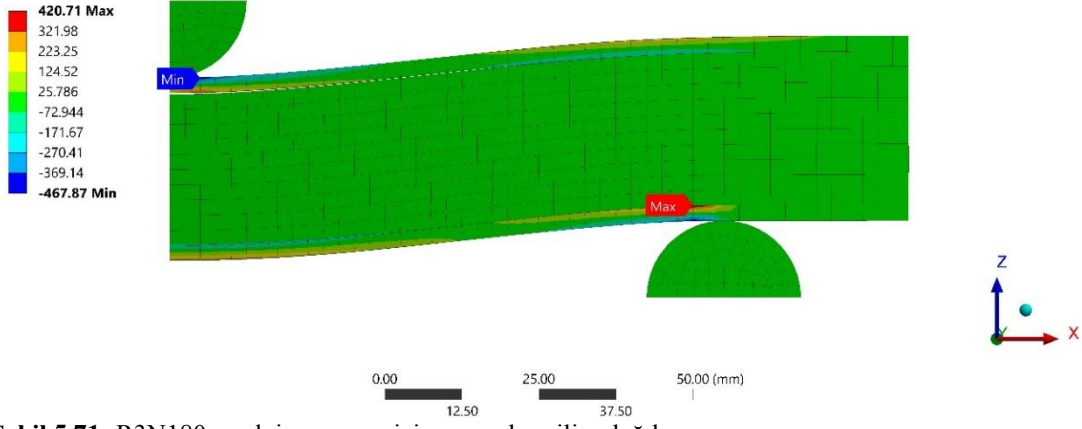
**Şekil 5.70:** Oluklu kesikli modellerden kalınlık doğrultusunda alınan bir kesitteki normal gerilme değişimleri.

#### **5.1.4 R3N ve R4N Modellerinin Analiz Sonuçları**

Şekil 5.71-86'da kesiksiz PVC köpük sandviçlerin üç nokta ve dört nokta eğilme altındaki sırasıyla normal gerilme, maks. kayma gerilmesi, maks. elastik kayma uzaması ve eşdeğer plastik uzama sonuçları gösterilmiştir.

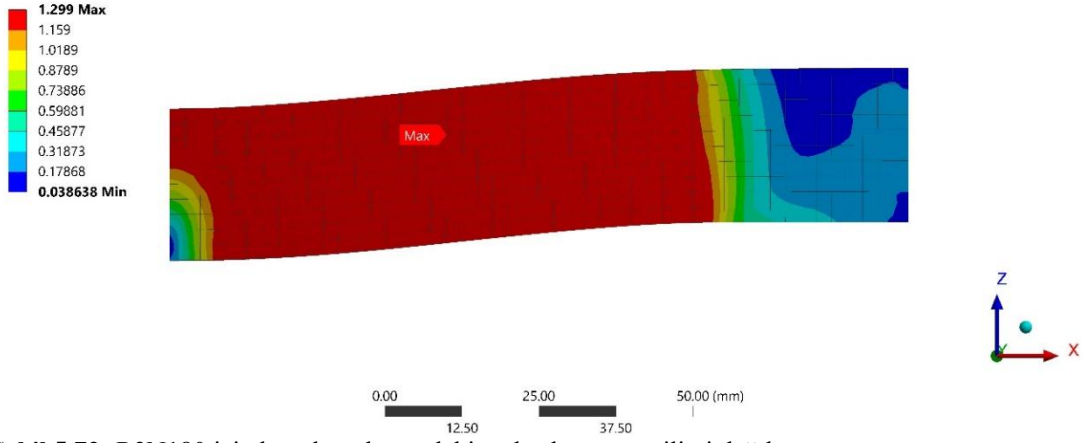


**A: Static Structural**  
Normal Stress 2  
Type: Normal Stress(X Axis)  
Unit: MPa  
Global Coordinate System  
Time: 1  
5.06.2019 04:06



**Şekil 5.71:** R3N180 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.

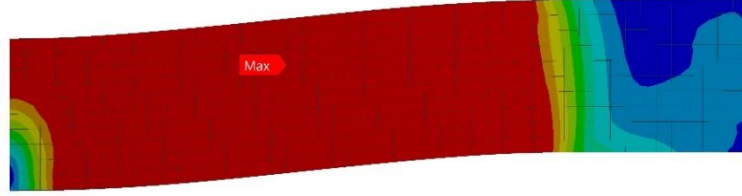
**A: Static Structural**  
Maximum Shear Stress  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
5.06.2019 04:06



**Şekil 5.72:** R3N180 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Elastic Strain  
Type: Maximum Shear Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 04:05

**0.052355 Max**  
0.046711  
0.041067  
0.035422  
0.029778  
0.024134  
0.01849  
0.012846  
0.0072014  
**0.0015572 Min**

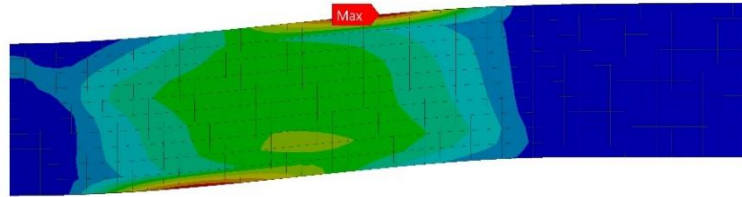


0.00 12.50 25.00 37.50 50.00 (mm)

**Şekil 5.73:** R3N180 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.

**A: Static Structural**  
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 04:05

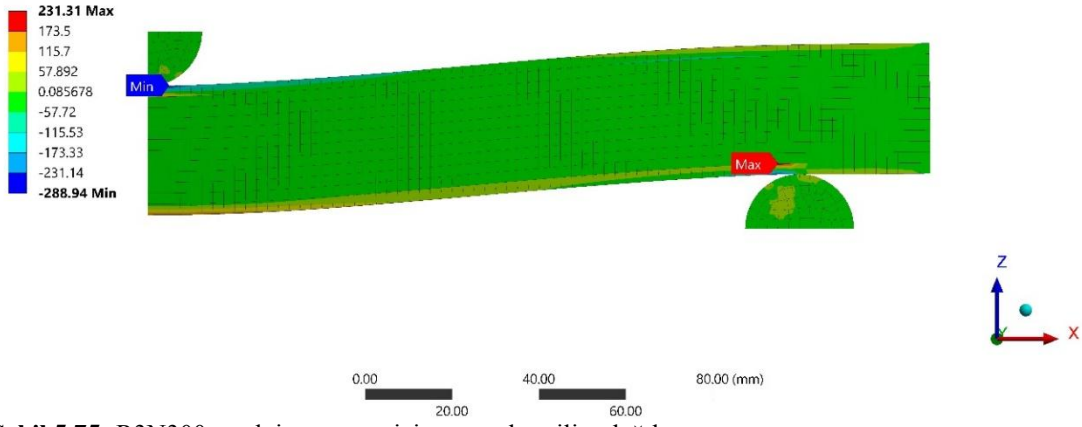
**0.2101 Max**  
0.18675  
0.16341  
0.14006  
0.11672  
0.093376  
0.070032  
0.046688  
0.023344  
**0 Min**



0.00 12.50 25.00 37.50 50.00 (mm)

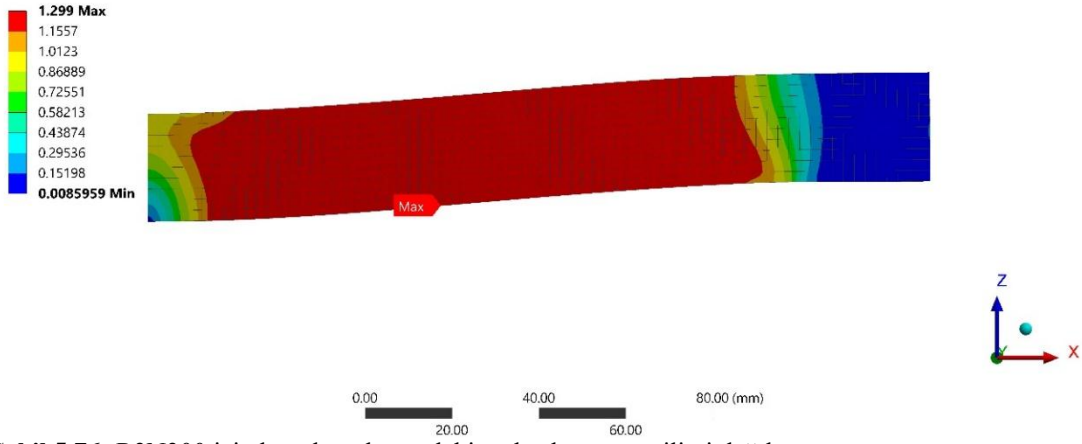
**Şekil 5.74:** R3N180 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.

**A: Static Structural**  
Normal Stress 2  
Type: Normal Stress(X Axis)  
Unit: MPa  
Global Coordinate System  
Time: 1  
5.06.2019 04:19



**Şekil 5.75:** R3N300 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.

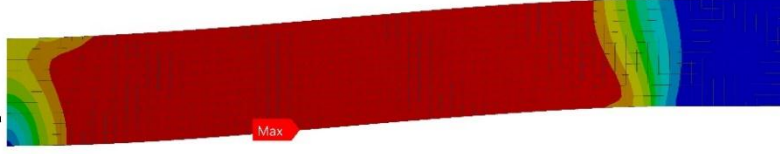
**A: Static Structural**  
Maximum Shear Stress  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
5.06.2019 04:19



**Şekil 5.76:** R3N300 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Elastic Strain  
Type: Maximum Shear Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 04:18

**0.052355 Max**  
0.046576  
0.040798  
0.035019  
0.02924  
0.023461  
0.017683  
0.011904  
0.0061252  
**0.00034644 Min**

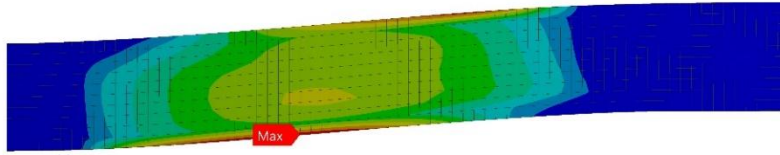


0.00 20.00 40.00 60.00 80.00 (mm)

**Şekil 5.77:** R3N300 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.

**A: Static Structural**  
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 04:18

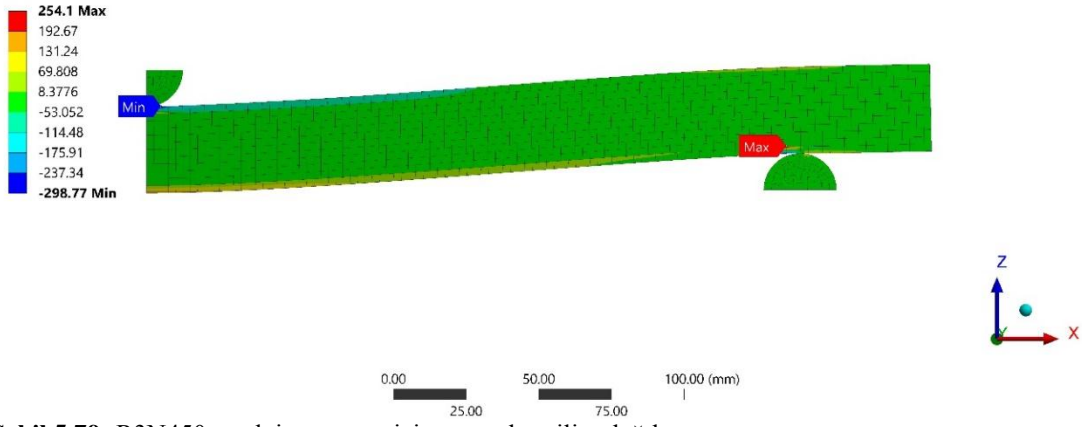
**0.073217 Max**  
0.065081  
0.056946  
0.048811  
0.040676  
0.032541  
0.024406  
0.01627  
0.0081352  
**0 Min**



0.00 20.00 40.00 60.00 80.00 (mm)

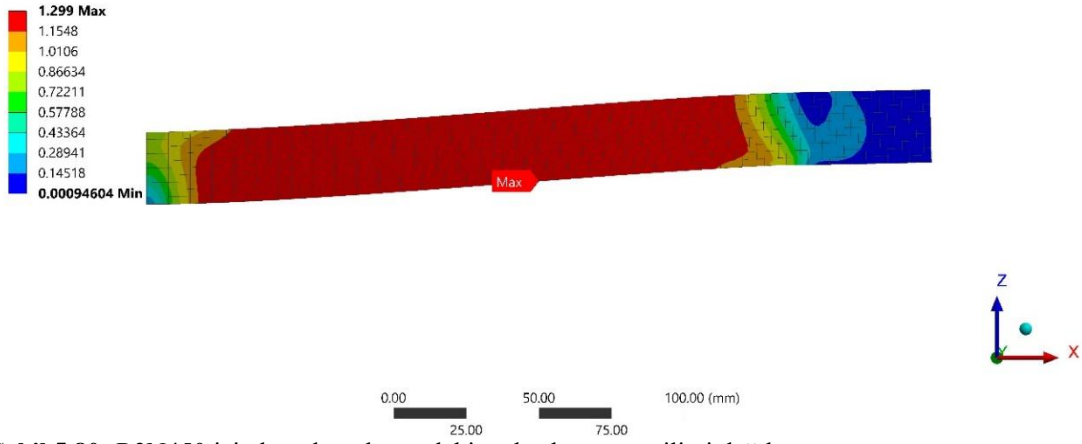
**Şekil 5.78:** R3N300 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.

**A: Static Structural**  
Normal Stress 2  
Type: Normal Stress(X Axis)  
Unit: MPa  
Global Coordinate System  
Time: 1  
5.06.2019 04:27



**Şekil 5.79:** R3N450 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Stress  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
5.06.2019 04:27



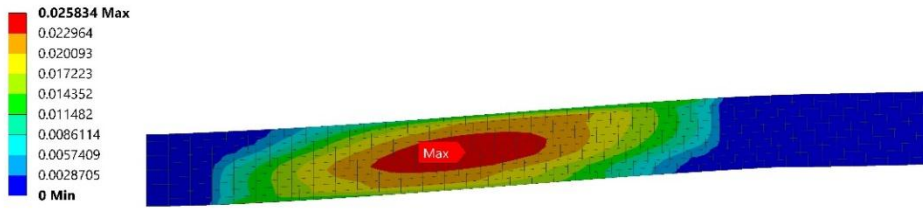
**Şekil 5.80:** R3N450 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Elastic Strain  
Type: Maximum Shear Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 04:26



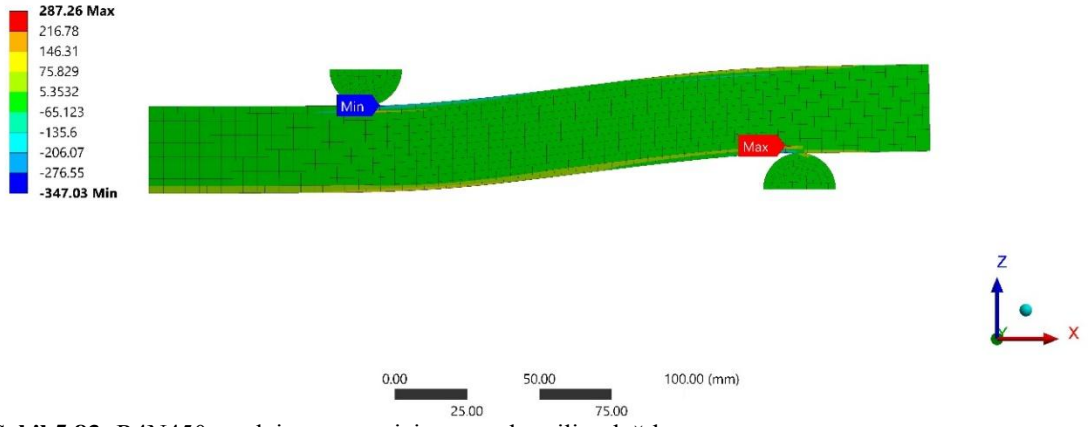
**Şekil 5.81:** R3N450 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.

**A: Static Structural**  
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 04:27



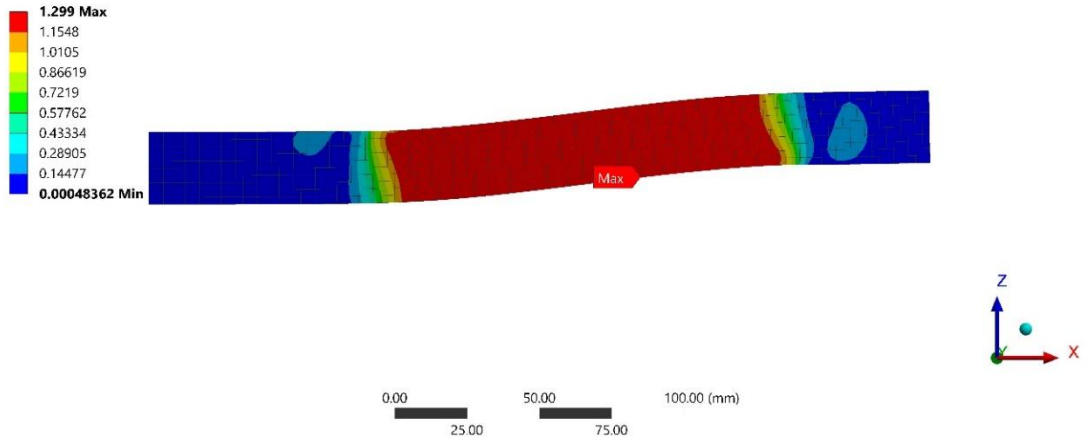
**Şekil 5.82:** R3N450 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.

**A: Static Structural**  
Normal Stress 2  
Type: Normal Stress(X Axis)  
Unit: MPa  
Global Coordinate System  
Time: 1  
5.06.2019 04:33



**Şekil 5.83:** R4N450 sandviç numune için normal gerilim dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Stress  
Type: Maximum Shear Stress  
Unit: MPa  
Time: 1  
5.06.2019 04:33



**Şekil 5.84:** R4N450 için köpük malzemedeki maks. kayma gerilimi dağılımı.

**A: Static Structural**  
Maximum Shear Elastic Strain  
Type: Maximum Shear Elastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 04:32

**0.052355 Max**  
0.04654  
0.040725  
0.03491  
0.029095  
0.02328  
0.017465  
0.01165  
0.0058346  
**1.9491e-5 Min**

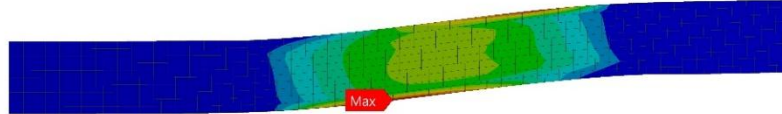


0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)

**Şekil 5.85:** R4N450 için köpük malzemedeki maks. elastik kayma uzaması dağılımı.

**A: Static Structural**  
Equivalent Plastic Strain  
Type: Equivalent Plastic Strain  
Unit: mm/mm  
Time: 1  
5.06.2019 04:32

**0.11498 Max**  
0.10221  
0.089432  
0.076656  
0.06388  
0.051104  
0.038328  
0.025552  
0.012776  
**0 Min**



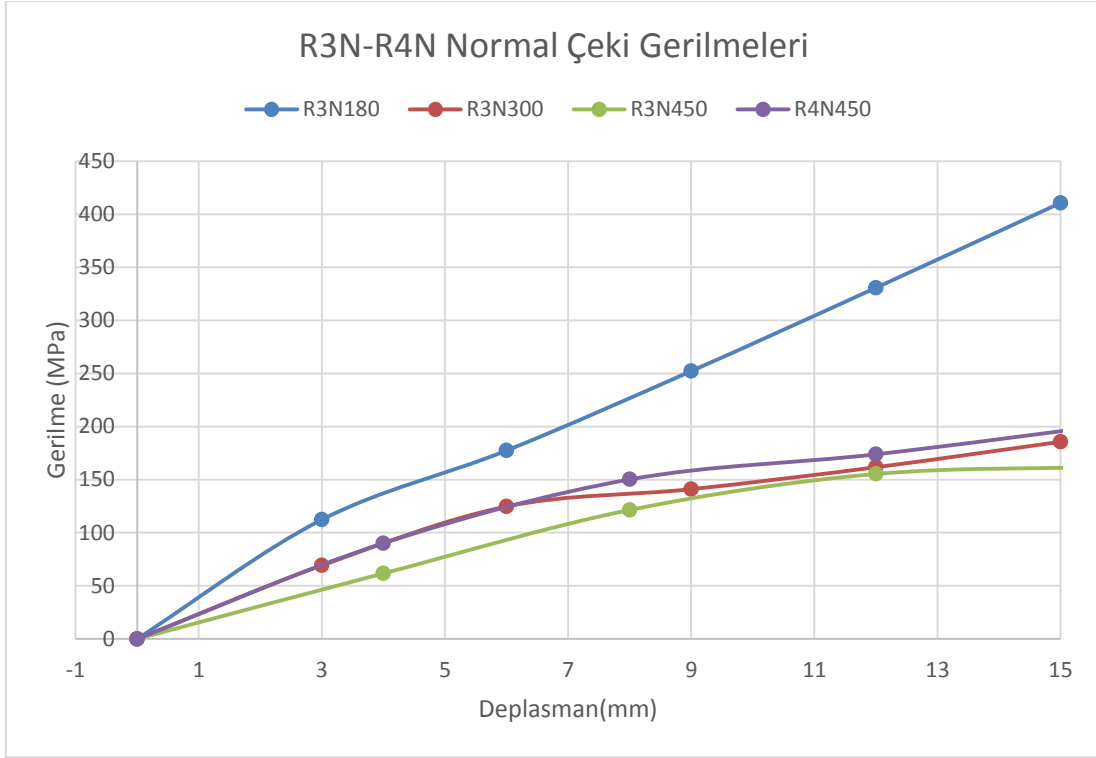
0.00 25.00 50.00 75.00 100.00 (mm)

**Şekil 5.86:** R4N450 için köpük malzemedeki eşdeğer plastik uzama dağılımı.

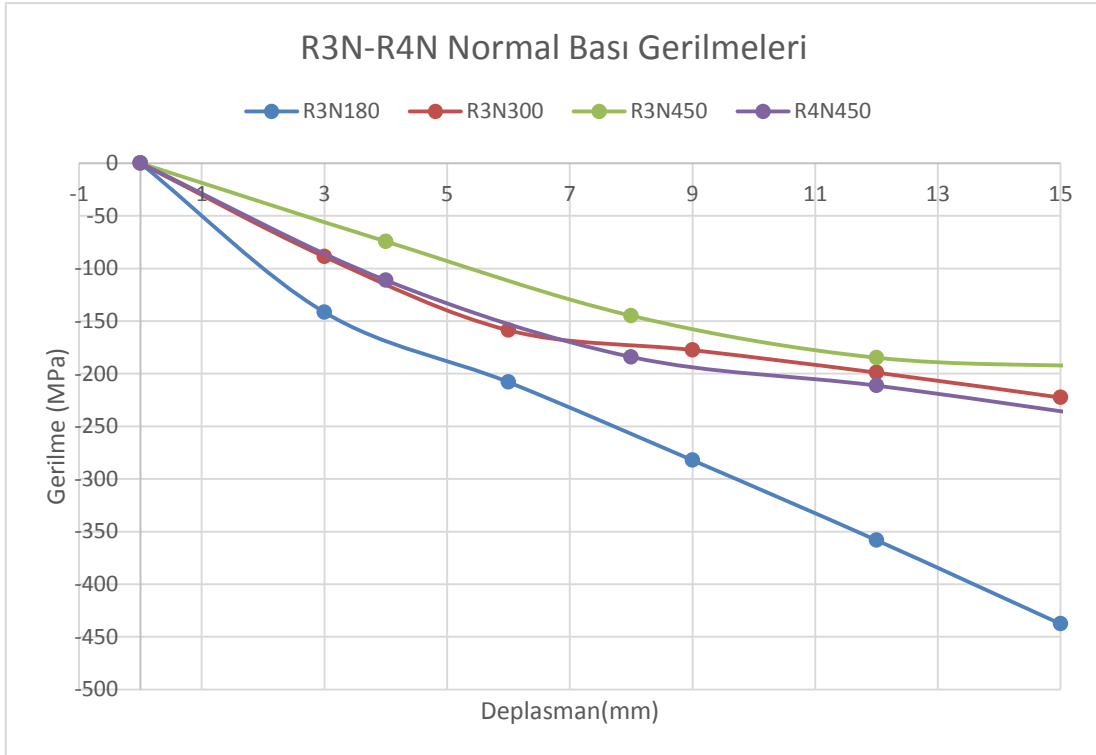
#### 5.1.4.1 R3N ve R4N Analiz Sonuçlarının Destek Mesafelerine Göre Karşılaştırılması

Şekil 5.87-91'deki grafiklerle gösterilen kesiksiz modellerin farklı destek mesafelerindeki mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.92'de farklı destek mesafelerindeki kesiksiz modellerden kalınlık doğrultusunda alınan bir kesitteki normal gerilme değişimleri verilmiştir.

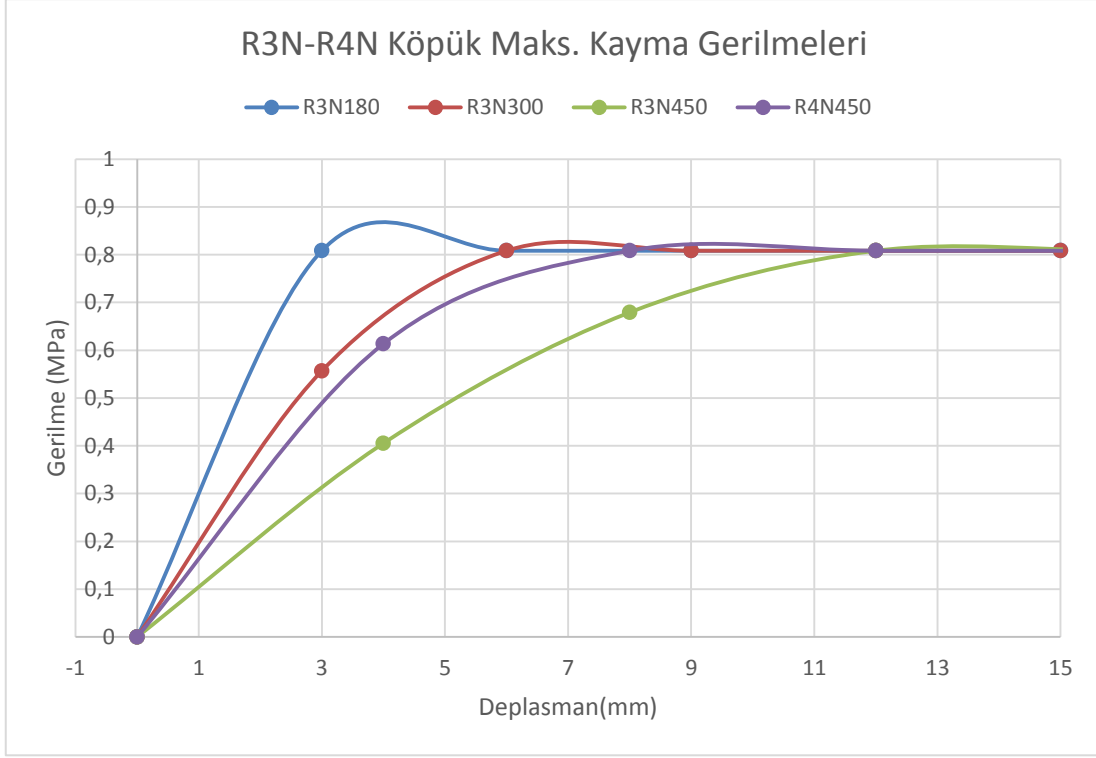




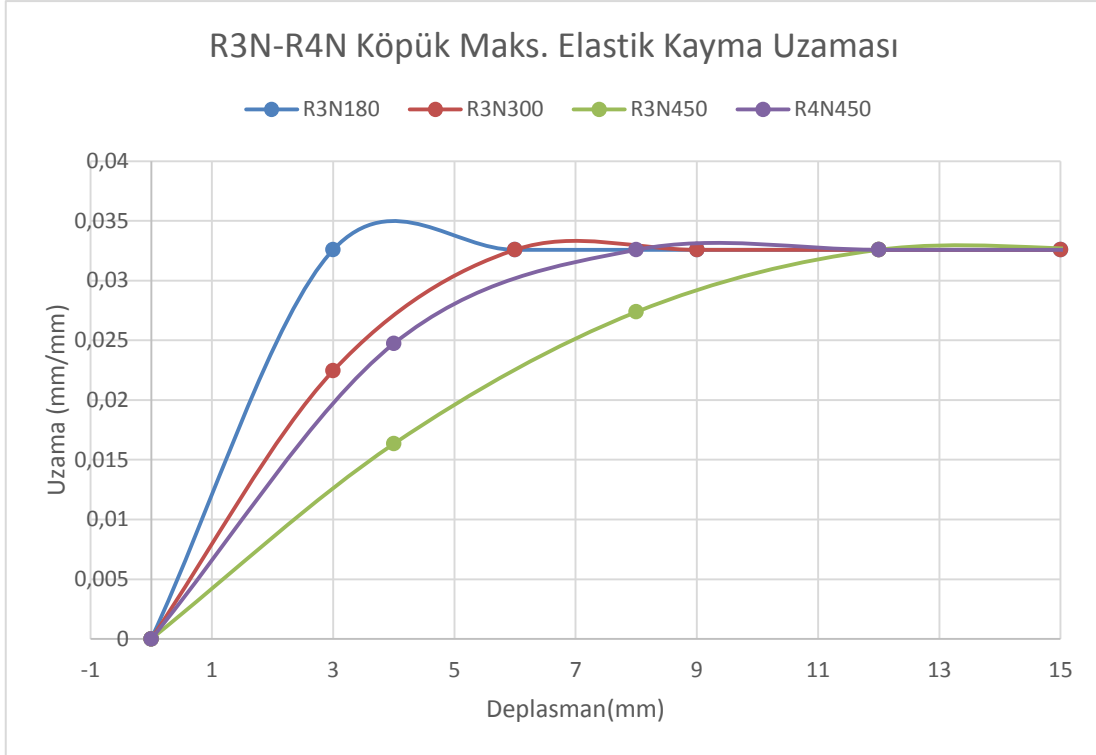
**Şekil 5.87:** Kesiksiz modellerin farklı destek mesafelerindeki normal çeki gerilmeleri.



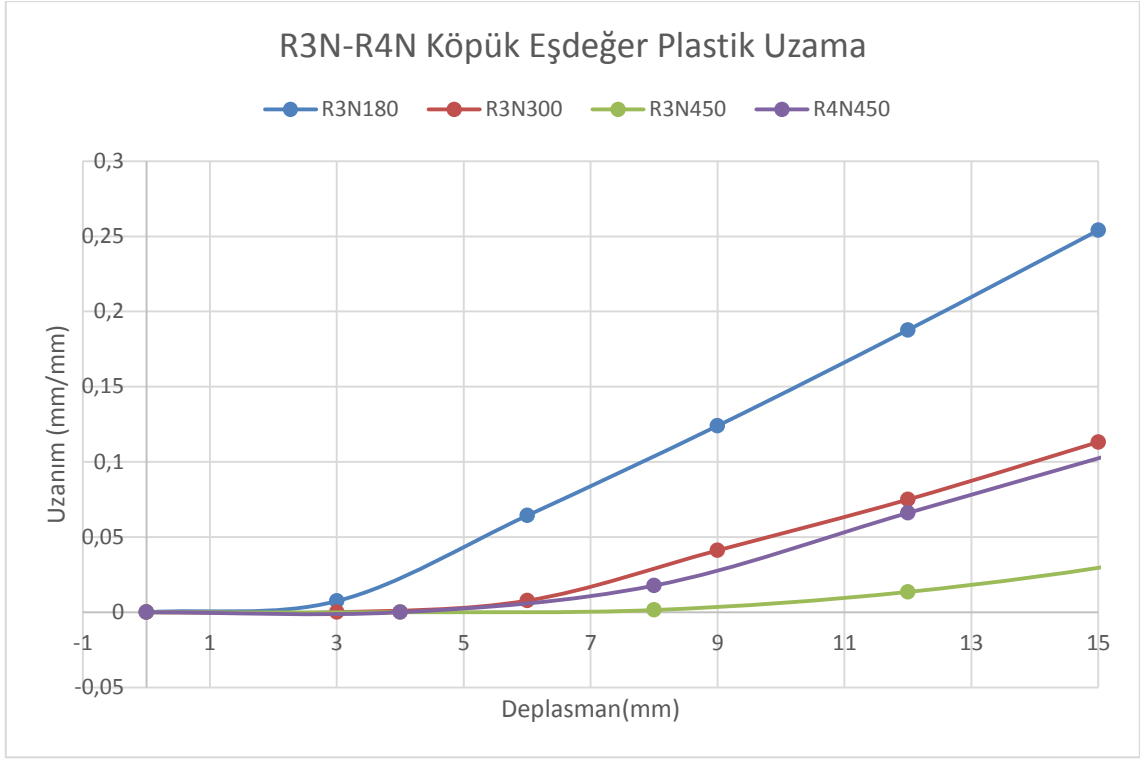
**Şekil 5.88:** Kesiksiz modellerin farklı destek mesafelerindeki normal bası gerilmeleri.



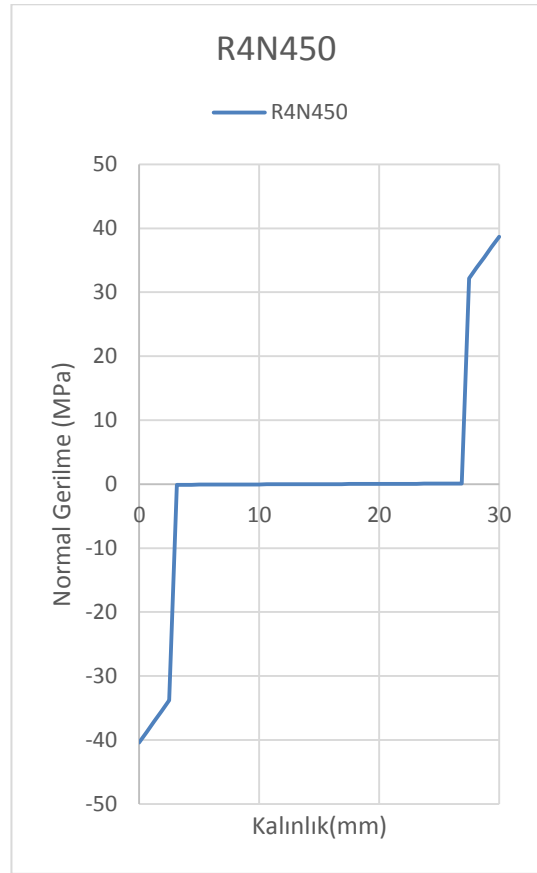
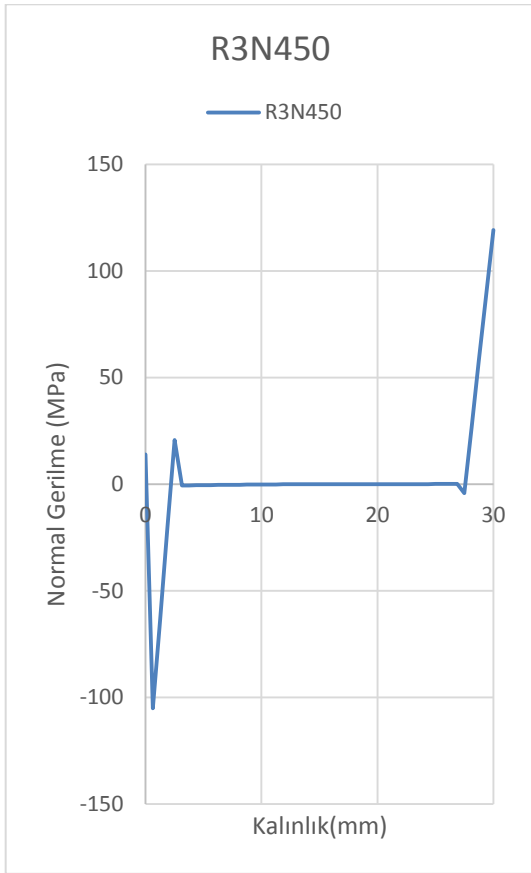
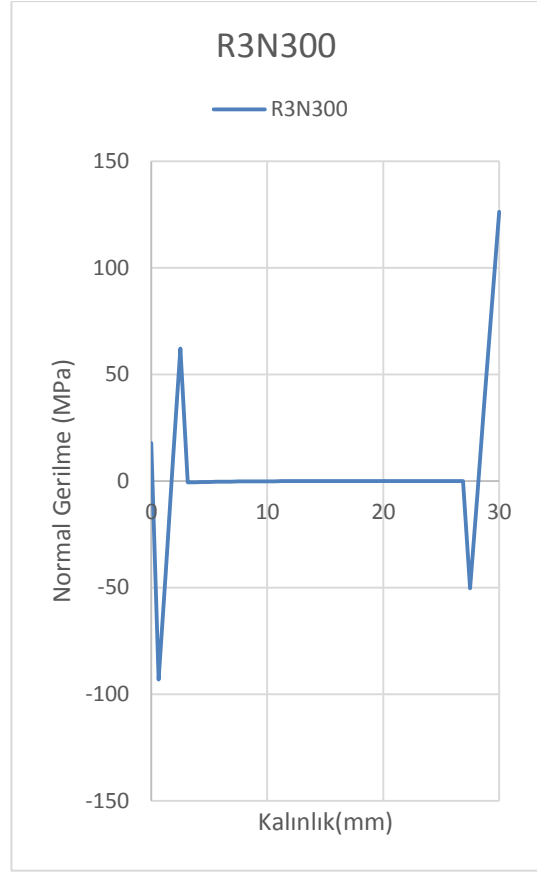
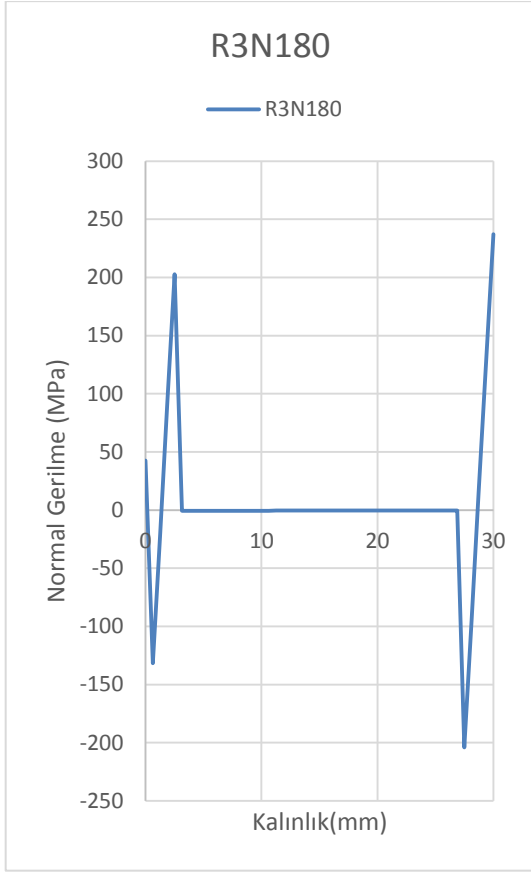
**Şekil 5.89:** Kesiksiz modellerin farklı destek mesafelerindeki maks. kayma gerilmeleri.



**Şekil 5.90:** Kesiksiz modellerin farklı destek mesafelerindeki maks. elastik kayma uzaması.



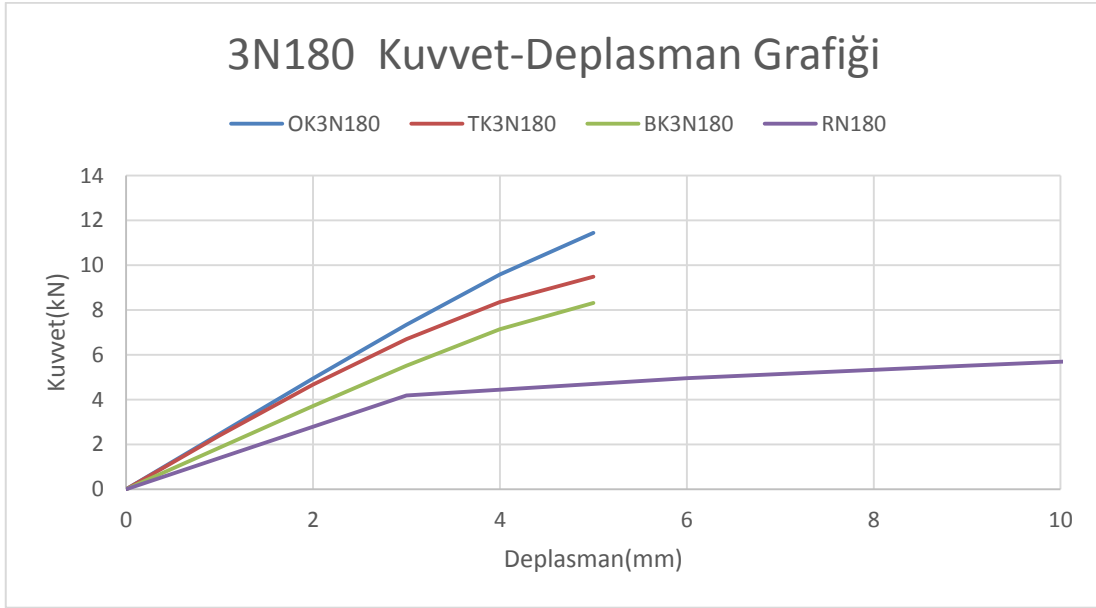
**Şekil 5.91:** Kesiksiz modellerin farklı destek mesafelerindeki eşdeğer plastik uzama.



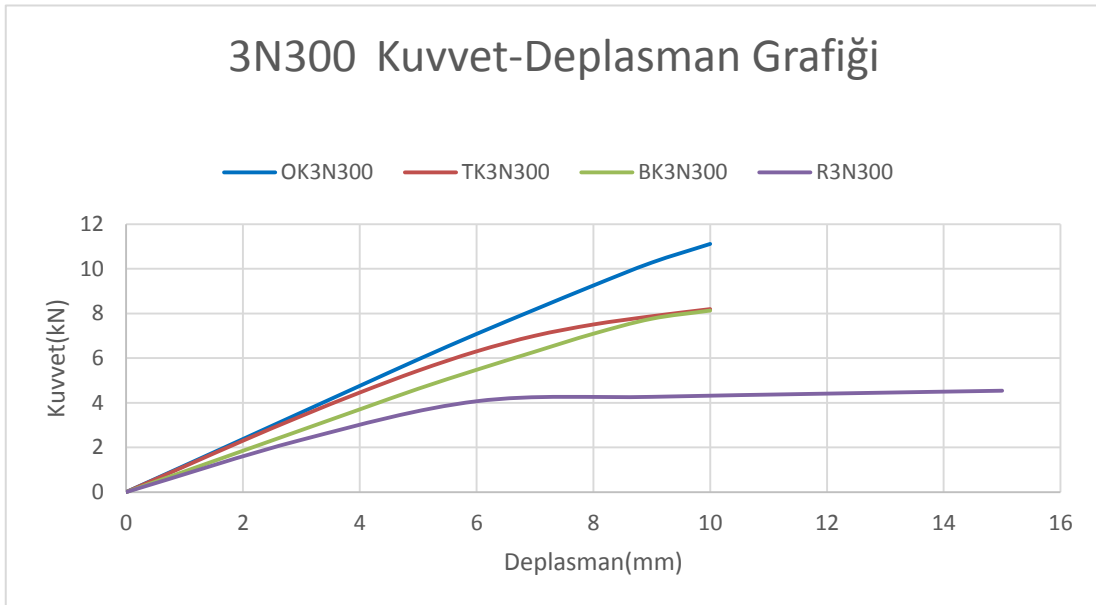
**Şekil 5.92:** Kesiksiz modellerden kalınlık doğrultusunda alınan bir kesitteki normal gerilme değişimleri.

### 5.1.5 Modellerin Çekirdek Konfigürasyonlarına Göre Karşılaştırılması

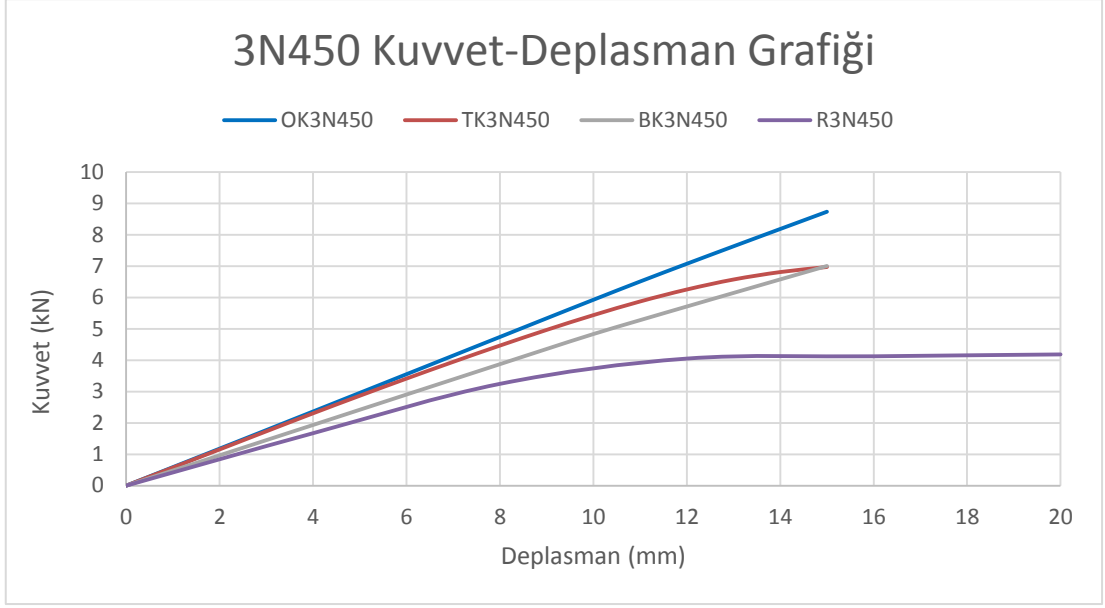
Şekil 5.93-96'da sırasıyla 180, 300 ve 450mm destek mesafelerindeki PVC köpük sandviçlerin üç nokta ve dört nokta eğilme altındaki çekirdek konfigürasyonlarına göre kuvvet-deplasman grafiklerinin karşılaştırmaları yapılmıştır. Tablo 5.2'de tüm modellerin rijitlikleri ve maks. hasar kuvvetleri listelenmiştir.



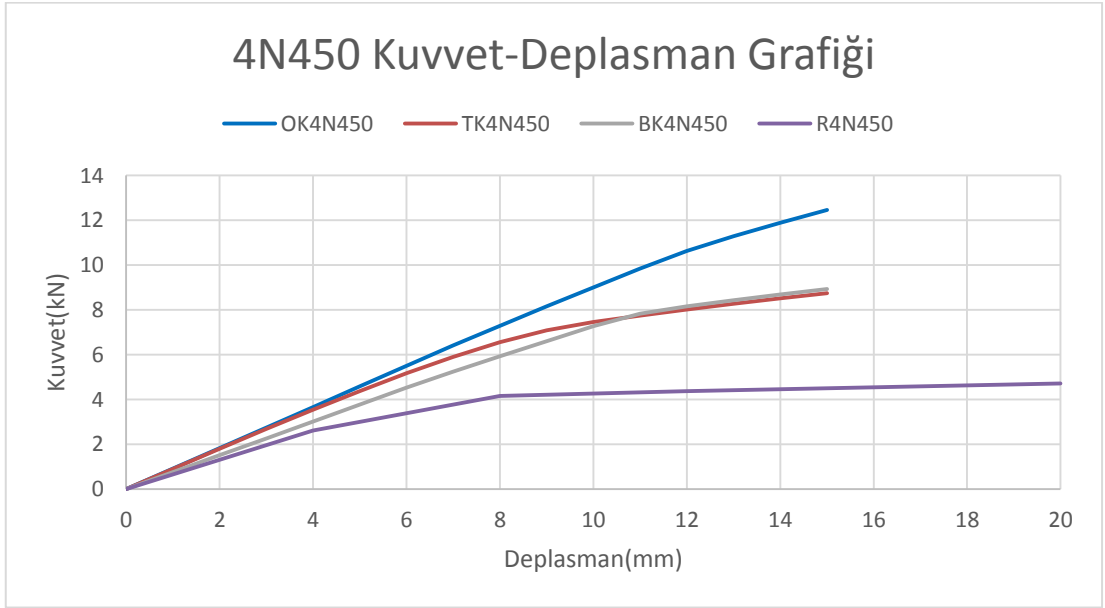
Şekil 5.93: 180mm destek mesafesinde ve üç nokta eğilme altındaki kuvvet-deplasman grafiği.



Şekil 5.94: 300mm destek mesafesinde ve üç nokta eğilme altındaki kuvvet-deplasman grafiği.



**Şekil 5.95:** 450mm destek mesafesinde ve üç nokta eğilme altındaki kuvvet-deplasman grafiği.



**Şekil 5.96:** 450mm destek mesafesinde ve üç nokta eğilme altındaki kuvvet-deplasman grafiği.

**Tablo 5.2:** Nümerik analiz verilerinin karşılaştırılması.

<b>Analiz Kodu</b>	<b>Rijitlik (kN/mm)</b>	<b>Maksimum Kuvvet (kN)</b>
TK3N180	2.27	9.4
TK3N300	1.14	8.2
TK3N450	0.56	6.9
TK4N450	0.89	8.7
BK3N180	1.84	8.3
BK3N300	0.92	8.1
BK3N450	0.48	7
BK4N450	0.75	8.9
OK3N180	2.45	11.44
OK3N300	1.18	11.1
OK3N450	0.59	8.7
OK4N450	0.92	12.4
R3N180	1.39	6
R3N300	0.78	4.5
R3N450	0.41	4.1
R4N450	0.65	4.5

## 6. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada üç nokta ve dört nokta eğilme koşullarında, çekirdek kesik konfigürasyonlarının ve destek mesafesinin PVC köpüklü sandviç malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Analizlerin daha somut sonuçlar vermesi için sonlu eleman modelleri oluşturulurken sektörde sıklıkla kullanılan E-Cam fiberler, AIREX® C70.75 ve Polives™ 702 ticari malzemelerin mekanik özellikleri girdi olarak kullanılmıştır. Tablo 5.1’de testere kesikli ve kesiksiz modellerin deneysel ve nümerik analizlerden elde edilen rijitlik ve maksimum hasar kuvveti değerleri karşılaştırılmıştır. Nümerik analizlerden elde edilen sonuçlarının deneysel verilerle örtüştüğü gözlemlenmiştir. Zamanın ve maliyetin çok önemli olduğu özel sektörde PVC çekirdekli sandviç yapıların sonlu elemanlar analiz programları ile tasarım sürecine dahil etmenin zamandan ve maliyetten tasarruf sağlayacak bir çözüm olduğu anlaşılmıştır.

Destek mesafesindeki artışın hasar kuvvetlerini, plastik uzama değerlerini ve rijitliği azalttığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.92’de görüldüğü üzere sandviç yapılarda normal gerilmeleri kompozit tabakalar taşırken kayma gerilmelerini çekirdek malzemelerin taşıması beklenir. Ancak Şekil 5.70’teki sonuçlar incelendiğinde oluklu kesik konfigürasyonuna sahip kirişlerde normal yüklerin bir kısmını çekirdek malzemenin taşıdığı görülmüştür. Testere kesikli modeller destek mesafesine bağlı olarak sandviç modellerin rijitlik değerlerinde %39 ile %92.3, hasar yüklerinde ise %50 ile %81 oranlarında artış sağlamıştır. Bu artışın sebebi olarak, köpük kesiklerinde oluşan reçine-zengin bölgelerin sandviç modellerde eğilme ve kayma rijitlik değerlerinde önemli bir artışa neden olduğu söylenebilir. Her ne kadar testere kesikli modeller oluklu kesikli modellerden reçinece daha zengin olsalar da analiz sonuçlarında oluklu kesikli modellerin oluk kısımlarındaki düzensiz plastik uzama dağılımları çatlak hasarı ilerleyişini engelleyici bir etki yaratıp daha rijit bir yapı ortaya koymuştur.

Analiz sonuçlarının karşılaştırmaları sonucunda oluklu kesikli PVC köpük çekirdekli sandviçlerin en rijit ve en mukavemetli çekirdek konfigürasyonuna sahip kirişler oldukları tespit edilmiştir.



## 7. KAYNAKLAR

- [1] Chawla, K.K., *Composite Materials, third edition*, Alabama: Springer, (2013).
- [2] Kaw, A.K., *Mechanics of Composite Materials*, Florida: Taylor & Francis Group, LLC, (2006).
- [3] Marguerre, K., “The optimum buckling load of a flexibly supported plate composed of two sheets joined by a light weight filler when under longitudinal compression”, *D.V.L.*, 1360/2, 11, (1944).
- [4] Plantema, F.J., *Sandwich Construction: The Bending and Buckling of Sandwich Beams, Plates and Shells*, New York: John Wiley and Sons, (1966).
- [5] Allen, H.G., *Analysis and Design of Structural Sandwich Panels*, Oxford: Pergamon Press, (1969).
- [6] Vinson, J.R. and Shore, S., “Bibliography on methods of structural optimization for flat sandwich panels”, *Naval Air Engineering Center Report, NAEC-ASC-1082*, (1965).
- [7] Vinson, J.R. and Shore, S., “Methods of structural optimization for flat sandwich panels”, *Naval Air Engineering Center Report, NAECASC- 1083*, (1965).
- [8] Vinson, J.R. and Shore, S., “Design procedures for the structural optimization of flat sandwich panels”, *Naval Air Engineering Center Report NAEC-ASC-1084*, (1965).
- [9] Vinson, J.R. and Shore, S., “Structural optimization of corrugated and web core sandwich panels subjected to uniaxial compression”, *Naval Air Engineering Center Report NAEC-ASC 1109*, (1967).
- [10] Vinson, J.R. and Shore, S., “Structural optimization of flat corrugated core sandwich panels under in-plane shear loads and combined uniaxial compression and in-plane shear loads”, *Naval Air Engineering Center Report NAEC-ASC-1110*, (1967).

- [11] McCoy, T.T., Vinson, J.R. and Shore, S., "A method for weight optimization of flat truss core sandwich panels under lateral loads", *Naval Air Engineering Center Report NAEC-ASC. 1111*, (1967).
- [12] Ha, K.H., "Finite element and sandwich construction: A critical review", (eds: K.A. Olsson and R.P. Reichard), *Sandwich Constructions 1- Proceedings of the First International Conference on Sandwich Construction*, EMAS Publications, United Kingdom, 69-84, (1989).
- [13] Daniel, I.M. and Abot, J.L., "Fabrication, testing and analysis of composite sandwich beams", *Composites Science and Technology*, 60(12-13), 2455–2463, (2000).
- [14] Dai, J. and Hahn, H.T., "Flexural behaviour of sandwich beams fabricated by vacuum-assisted resin transfer moulding", *Composite Structures*, 61(3), 247–253, (2003).
- [15] Mouritz, A.P. and Thomson, R.S., "Compression, flexure and shear properties of a sandwich composite containing defects", *Composite Structures*, 44(4), 263–278, (1999).
- [16] Jen, Y.M. and Chang, L.Y., "Evaluating bending fatigue strength of aluminium honeycomb sandwich beams using local parameters", *International Journal of Fatigue*, 30(6), 1103–1114, (2008).
- [17] Reis, E.M. and Rizkalla, S.H., "Material characteristics of 3-D FRP sandwich panels", *Construction and Building Materials*, 22(6), 1009–1018, (2008).
- [18] S, V.I., Chatterjee, R., M, R., E, S. and K, P., "A comparative study of the three point and four point bending behaviour of rigid foam core glass/epoxy face sheet sandwich composites", *Materials Today: Proceedings*, 5(5), 12083-12090, (2018).
- [19] Mujika, F., "On the difference between flexural moduli obtained by three-point and four-point bending tests", *Polymer Testing*, 25(5), 214-220, (2006).
- [20] Murthy, O., Munirudrappa, N., Srikanth, L. and Rao, R.M.V.G.K., "Strength and Stiffness Optimization Studies on Honeycomb Core Sandwich Panels", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25(6), 663-671, (2006).
- [21] Herranen, H., Pabut, O., Eerme, M., Majak, J., Pohla, M., Kers, J., Saarna, M., Allikas, G. and Aruniit, A., "Design and Testing of Sandwich Structures with Different Core Materials", *MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA)*, 18(1), 45-50, (2012).

- [22] Gdoutos, E.E. and Daniel, I.M., “Failure modes of composite sandwich Beams”, *Theoretical and Applied Mechanics*, 35(1-3), 105-118, (2008).
- [23] Mostafa, A., Shankar, K. and Morozov, E.V., “Behaviour of PU-foam/glass-fibre composite sandwich panels under flexural static load”, *Materials and Structures*, 48(5), 1545-1559, (2015).
- [24] Mostafa, A., Shankar, K. and Morozov, E.V., “Experimental, Theoretical and Numerical Investigation of the Flexural Behaviour of the Composite Sandwich Panels with PVC Foam Core”, *Applied Composite Materials*, 21(4), 661–675, (2014).
- [25] El-Hacha R., Abdelazeem H. and Cariaga I., “Effect of casting method and shear span to depth ratio on the behaviour of Ultra-High Performance Concrete cross arms for high voltage transmission lines”, *Engineering Structures*, 32(8), 2210–2220, (2010).
- [26] Kotsovos M.D. and Pavlovic, M.N., “Size effects in beams with small shear span-to depth ratios”, *Computers & Structures*, 82(2-3), 143–156, (2004).
- [27] Danawade B.A., Malagi R.R., Kalamkar R.R. and Sarode A.D., “Effect of span-to-depth ratio on flexural properties of wood filled steel tubes”, *Procedia Materials Science*, 5, 96-105, (2014).
- [28] Manalo, A.C., “Behaviour of fibre composite sandwich structures under short and asymmetrical beam shear tests”, *Composite Structures*, 99, 339-349, (2013).
- [29] Ferdous, W., Manalo, A. and Aravinthan, T., “Effect of beam orientation on the static behaviour of phenolic core sandwich composites with different shear span-to-depth ratios”, *Composite Structures*, 168, 292-304, (2017).
- [30] Umer, R., Waggy, E.M., Haq, M. and Loos, A.C., “Experimental and numerical characterizations of flexural behavior of VARTM-infused composite sandwich structures”, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31(2), 67-76, (2001).
- [31] Borsellino, C., Calabrese, L. and Valenza, A., “Experimental and numerical evaluation of sandwich composite structures”, *Composites Science and Technology*, 64(10-11), 1709-1715, (2004).
- [32] Belouettar, S., Abbadi, A., Azari, Z., Belouettar, R. and Freres, P., “Experimental investigation of static and fatigue behaviour of composites

- honeycomb materials using four point bending tests”, *Composite Structures*, 87(3), 265–273, (2009).
- [33] Russo, A. and Zuccarello, B., “Experimental and numerical evaluation of the mechanical behaviour of GFRP sandwich panels”, *Composite Structures*, 81(4), 575–586, (2007).
- [34] Corigliano, A., Rizzi, E. and Papa, E., “Experimental characterization and numerical simulations of a syntactic-foam/glass-fibre composite sandwich”, *Composites Science and Technology*, 60(11), 2169-2180, (2000).
- [35] Fathi, A., Wolff-Fabris, F., Altstadt, V. And Gatzi, R., “An investigation on the flexural properties of balsa and polymer foam core sandwich structures: Influence of core type and contour finishing options”, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 15(5), 487-508, (2013).
- [36] Laustsen, S., Lund, E., Kühlmeier, L. and Thomsen, O.T., “Development of a High-fidelity Experimental Substructure Test Rig for Grid-scored Sandwich Panels in Wind Turbine Blades”, *Strain*, 50(2), 111-131, (2014).
- [37] Greene, E., *Marine Composites, Second Edition*, Annapolis: Eric Greene Associates, (1999).
- [38] Balıkoğlu, F., Demircioğlu, T.K., Ataş, A. ve Arslan, N., “Effect of Face Sheet Lay-up on the Static Behavior of Balanced and Unbalanced Sandwich Beams with Different Span-to-Depth Ratios”, *8th International Advanced Technologies Symposium*, Elâzığ, 3263-3271, (2017).