T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜRESEL TAKVİYE ELEMANI İÇEREN KOMPOZİT YAPILARDA BASMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Ferhat AKPINAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ

Haziran, 2022

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KÜRESEL TAKVİYE ELEMANI İÇEREN KOMPOZİT YAPILARDA BASMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Ferhat AKPINAR tarafından hazırlanan tez çalışması 15.06.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Konstrüksiyon Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Alperen ACAR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Uğur KEMİKLİOĞLU, Üye
Doğuş Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan küresel takviye elemanı içeren kompozit yapılarda basma davranışının incelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ferhat AKPINAR

İmza

Aileme

TEŞEKKÜR

Tez sürecimin her aşamasında beni destekleyen, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, tavsiyeleri ile yol gösteren kıymetli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ ‘a teşekkür ederim.

Sunduğu laboratuvar imkanlarından dolayı değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Şenol ŞAHİN’e teşekkür ederim.

Doğuş Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’ndeki hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma yüksek lisans sürecindeki desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Hayatımın her anında beni yalnız bırakmayan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen canım aileme teşekkür ederim.

Ferhat AKPINAR

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ viii
ŞEKİL LİSTESİ ix
TABLO LİSTESİ xii
ÖZET xiii
ABSTRACT xv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 9
1.3 Hipotez 9
2 KÜRESEL TAKVİYE ELEMANI İÇEREN SANDVİÇ KOMPOZİT YAPI 10
2.1 Tasarım Faaliyetleri 10
2.1.1 Küresel Takviye Elemanlarının Tasarımı 10
2.1.2 Sandviç Kompozit Numune Tasarımları 11
2.1.3 Sandviç Kompozit Numuneler için Kalıp Tasarımları 11
2.1.4 Poliüretan Köpük Numune Kalıbı 12
2.1.5 Çekme Testi için Numune Tasarımı 13
2.2 Üretim Faaliyetleri 14
2.2.1 Küresel Takviye Elemanlarının Üretimi 14
2.2.2 Sandviç Kompozit Numune için Kalıp Üretimi 17
2.2.3 Poliüretan Köpük Numune ve Kalıp Üretimi 19
2.2.4 Çekme Numunelerinin Üretimi 20
2.2.5 Alüminyum levhaların Lazer Kesimi 22
2.2.6 Sandviç Kompozit Numunelerin İmalatı 22
2.3 Test Faaliyetleri 24
2.3.1 Küresel Takviye Elemanına Uygulanan Basma Testi 24
2.3.2 Poliüretan Köpük Basma Testi 26
2.3.3 PVC Numuneler için Çekme Testi 28
2.3.4 Sandviç Kompozit Numuneler için Basma Testi 29
3 TEST SONUÇLARI 31
3.1 KTE için Uygulanan Basma Testlerinin Sonuçları 31

3.2 Poliüretan Köpük Numunelerin Basma Testi Sonuçları 36
3.3 PVC Çekme Numunelerinin Test Sonuçları 37
3.4 Sandviç Kompozit Numunelerin Basma Testi Sonuçları 39
4 SONUÇ VE ÖNERİLER 44
KAYNAKÇA 46
A EK 49
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 58

SİMGE LİSTESİ

°C	Celsius derecesi
J	Joule
Kg	kilogram
kN	kilonewton
mm	milimetre
N	Newton
cm	Santimetre

KISALTMA LİSTESİ

ASTM	American Society for Testing and Materials
CTP	Cam Elyaf Takviyeli Plastik
FDM	Fused Deposition Modelling
EPP	Genleştirilmiş Polipropilen Köpük
KTE	Küresel Takviye Elemanı
Ort	Ortalama
PLA	Poliaktik Asit
PU	Poliüretan (Polyurathane)
PUF	Poliüretan Köpük (Polyurathane Foam)
PVC	Polivinil Klorür
SK	Sandviç Kompozit
vb	Ve Benzeri
vd	Ve Diğerleri

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Fiber takviyeli kompozit malzeme ve bileşenlerinin şematik görseli 1
Şekil 1.2 Parçacık takviyeli kompozit malzemenin şematik görseli 1
Şekil 1.3 Sandviç kompozit malzeme ve bileşenleri 2
Şekil 1.4 Bal peteği çekirdek yapısına sahip sandviç kompozit malzemeye ait şematik gösterim. (Görsel adapte edilmiştir.)[18].....4
Şekil 1.5 Yarı-statik basma testi sonuçlarına göre test edilen çekirdek yapılarının enerji absorb kapasiteleri. (Görsel adapte edilmiştir.) [29] 7
Şekil 2.1 KTE'nin tasarım çalışmalarından görseller a) 2-D taslak b) 3-D hacim 10
Şekil 2.2 KTE ile desteklenmiş sandviç kompozit malzemenin tasarım görseli .11
Şekil 2.3 a) KTE içeren SK için b) Sadece poliütetan köpük içeren SK için kalıp tasarımları.....12
Şekil 2.4 Poliüretan köpük basma numunesi için tasarlanan kalıp görseli.....13
Şekil 2.5 Poliüretan köpük basma numunesi için tasarlanan kalıbın kısmı kesit görünümü 13
Şekil 2.6 Tasarlanan çekme numunesinin görseli.....14
Şekil 2.7 Tasarlanan çekme numunesinin (mm) bazında ölçü değerleri 14
Şekil 2.8 KTE'lerin tasarımdan üretime geçiş aşamaları 15
Şekil 2.9 Dilimleme Programında çoklu KTE baskısı için hazırlıklar.....16
Şekil 2.10 Küresel takviye elemanlarının üretimin a) başlangıcından b) ortasından c) sonundan görseller.....16
Şekil 2.11 Farklı çaplardaki küresel takviye elemanları.....16
Şekil 2.12 Tıkalı nozzle ucundan çıkarılan kömürleşmiş PVC malzemelerin görseli 17
Şekil 2.13 Kalıp için dilimleme programında 3D baskı önizlemesi 18
Şekil 2.14 Kalıbın baskısı sürerken çekilmiş bir görsel 18
Şekil 2.15 Sandviç kompozit numune kalıpları 18
Şekil 2.16 PUF Kalıbının taban kısmı 3-D yazıcıda üretilirken.....19
Şekil 2.17 PUF Kalıbının yan parçası folyo ile kaplanırken.....19
Şekil 2.18 PUF Kalıbının montajlanmış hali 19
Şekil 2.19 PU Köpük numunenin imalat aşamaları 20
Şekil 2.20 Üretilen PU köpük numuneler.....20
Şekil 2.21 Çekme numunesinin üretiminden bir görsel.....21

Şekil 2.22 Dilimleme programında dolgu açısına göre çekme numunelerinin görünümleri a) 0°, b) ±45°, c) 90° 21

Şekil 2.23 Alüminyum levhalar için kesim planı 22

Şekil 2.24 KTE içeren sandviç kompozit numunelerin imalatından görseller 22

Şekil 2.25 Sadece poliüretan köpük içeren sandviç kompozit numunelerin imalataından görseller.....23

Şekil 2.26 Sandviç kompozitin kalıptan ayrılması 23

Şekil 2.27 Üretilen sandviç kompozit numuneler.....24

Şekil 2.28 Katman yönüne göre a) paralel b) dikey işaretlenmiş Ø25 mm çaplı numuneler.....25

Şekil 2.29 KTE'nin katman yönüne göre eksen takımı.....25

Şekil 2.30 Katman yükselme yönüne göre yatay konumlanmış Ø25 mmm çaplı KTE'nın basma tesi (y-ekseninde basma testi) a)öncesi b)sonrası.....26

Şekil 2.31 Katman yükselme yönüne göre düşey konumlanmış Ø25 mmm çaplı KTE'nın basma tesi (z-ekseninde) a)öncesi b)sonrası 26

Şekil 2.32 Y ekseni doğrultusunda basma testi uygulanan 2-Y numaralı poliüretan köpüğün a) test öncesi b)test sonrası hali 27

Şekil 2.33 Z ekseni doğrultusunda basma testi uygulanan 2-Z numaralı poliüretan köpüğün a) test öncesi b)test sonrası hali 27

Şekil 2.34 Çekme testinde kullanılan cihaz.....28

Şekil 2.35 Yaklaşık olarak ortasından hasar alan çekme numunesi 28

Şekil 2.36 Dartec test cihazında basma testi uygulamaya hazırlanan bir sandviç kompozitin görseli.....29

Şekil 2.37 Poliüretan köpükten çekirdeğe sahip sandviç kompozitin basma testi a) öncesi b) sonrası hali.....29

Şekil 2.38 Ø35 mm kte içeren sandviç kompozit numunenin basma testi a) öncesi b) sonrası hali 30

Şekil 2.39 Basma testi öncesi sandviç kompozit numuneler a) 50x50 KTE b) 50x50 PUF c) 60x60 KTE d) 60x60 PUF e) 70x70 KTE f) 70x70 PUF 30

Şekil 3.1 Ø25 mm çaplı küresel takviye elemanlarına uygulanan z-ekseni basma testi sonuçları.....31

Şekil 3.2 Ø30 mm çaplı küresel takviye elemanlarına uygulanan z-ekseni basma testi sonuçları.....32

Şekil 3.3 Ø35 mm çaplı küresel takviye elemanlarına uygulanan z-ekseni basma testi sonuçları.....32

Şekil 3.4 Ø25 mm çaplı küresel takviye elemanlarına uygulanan y-ekseni basma testi sonuçları.....33

Şekil 3.5 Ø30 mm çaplı küresel takviye elemanlarına uygulanan y-ekseni basma testi sonuçları.....33

Şekil 3.6 Ø35 mm çaplı küresel takviye elemanlarına uygulanan y-ekseni basma testi sonuçları.....34

Şekil 3.7 Farklı çaptaki küresel takviye elemanlarının z ekseninde basma testi sonuçlarının ortalaması (eğri uydurma işlemi uygulanmıştır.) 35

Şekil 3.8 Farklı çaptaki küresel takviye elemanlarının y ekseninde basma testi sonuçlarının ortalaması (eğri uydurma işlemi uygulanmıştır.) 35

Şekil 3.9 Z ekseninde basma testi uygulanan poliüretan köpüklerin sonuçları.36

Şekil 3.10 Y ekseninde basma testi uygulanan poliüretan köpüklerin sonuçları.36

Şekil 3.11 Z ve y ekseninde basma testi uygulanan poliüretan köpük numunelerin sonuçlarının ortalamaları (eğri uydurma işlemi uygulanmıştır.) 37

Şekil 3.12 90° dolgu açılı PVC çekme numunelerinden bir tanesinin çekme testi sonucu 38

Şekil 3.13 45° dolgu açılı PVC çekme numunelerinden bir tanesinin çekme testi sonucu 38

Şekil 3.14 0° dolgu açılı PVC çekme numunelerinden bir tanesinin çekme testi sonucu 38

Şekil 3.15 50x50 PUF çekirdekli sandviç kompozit numunelerin basma testi sonuçları 39

Şekil 3.16 50x50 KTE çekirdekli sandviç kompozit numunelerin basma testi sonuçları 40

Şekil 3.17 60x60 PUF çekirdekli sandviç kompozit numunelerin basma testi sonuçları 40

Şekil 3.18 60x60 KTE çekirdekli sandviç kompozit numunelerin basma testi sonuçları 41

Şekil 3.19 70x70 PUF çekirdekli sandviç kompozit numunelerin basma testi sonuçları 41

Şekil 3.20 70x70 KTE çekirdekli sandviç kompozit numunelerin basma testi sonuçları 42

Şekil 3.21 Sandviç kompozit numunelerin basma testi sonuçlarının ortalaması (eğri uydurma işlemi uygulanmıştır).....42

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 KTE üretiminde kullanılan 3-D yazıcı parametreleri.....15
Tablo 2.2 Kalıplar için kullanılan 3-D yazıcı parametreleri.....17
Tablo 3.1 Çekme testi sonucunda ort. numune değerleri 39
Tablo 3.2 Sandviç kompozitlerin ortalama ağırlıkları.....43

ÖZET

Küresel Takviye Elemanı İçeren Kompozit Yapılarda Basma Davranışının İncelenmesi

Ferhat AKPINAR

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ

Kompozit malzemeler günümüzde çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerde ihtiyaçlara yönelik sınıflandırmalar yapılmıştır. Kompozit malzeme tiplerinden olan sandviç kompozitlerde, mekanik özelliklerin belirlenmesinde yapı içerisindeki bileşenler etkin rol almaktadır. Sandviç kompozit malzemeler, yüzey tabakaları ile çekirdek katmanından meydana gelmektedir. Çekirdek yapısındaki değişim, sandviç yapının basma dayanımına etki eder. Literatürde sandviç kompozitin çekirdek kısmında; gözenekli, negatif poisson oranlı, bal peteği formlu gibi yapılar kullanılmıştır. Bu tez kapsamında içi boş küresel elemanlar, çekirdek tabakasında takviye elemanı olarak kullanılmıştır. Bu içi boş küresel elemanlar üç boyutlu yazıcıda PVC filament kullanılarak üretilmiştir. PVC filament yanmaya karşı dirençlidir ve yandığında kömürleşerek kendi kendine sönme eğilimindedir. Küresel elemanlardan kalan ara boşluklar ise poliüretan köpük ile doldurulmuştur. Yangına karşı dirençli poliüretan köpük türleri de vardır. Planlanan bu sandviç yapılar, esas dayanımını içi boş küresel elemanlardan sağlar. Poliüretan köpük ise içi boş küresel takviye elemanlarını ve alüminyum yüzey katmanlarını bir arada tutar. İçi boş küresel elemanların basma

yüklemesi altındaki dayanımına elemanların duvar kalınlığı, çap ölçüsü, malzeme tipi, imalat yöntemi vb. parametreler etki eder. İçi boş küresel elemanlara basma yükü uygulandığında, elemanların burkulma riski vardır. Burkulma oluşması durumunda, uygulanan basma kuvvetinin hafifçe artırılmasına karşın ani büyük deformasyonlar gözlemlenebilir. İçi boş küresel elemanlarda gözlemlenecek burkulma, basma yüklemesi altındaki sandviç kompozitin mekanik davranışına etki eder. Bu çalışmada, tasarlanan sandviç kompozit malzemelerin basma davranışı incelendi. Bununla birlikte, sandviç kompozit malzemelerin çekirdek kısmında kullanılan bileşenler içinde yapısal dayanım incelemeleri yapıldı. Ayrıca, içi boş küresel takviye elemanlarının çapları ile kompozit yapıdaki mekanik davranış arasındaki ilişki de incelendi.

Anahtar Kelimeler: İçi boş küresel takviye elemanları, sandviç kompozit, basma dayanımı

ABSTRACT

Investigation of Compression Behavior in Composite Structures Containing Spherical Reinforcements

Ferhat AKPINAR

Department of Mechanical Engineering

Masters of Science Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Birgül AŞÇIOĞLU TEMİZTAŞ

Composite materials are widely used today. Composite materials were classified according to their materialistic qualities for usage areas. Sandwich composite materials consist of face sheets and core. The change in the core structure affects the compressive strength of the sandwich structure. In the literature, Structures such as porous, auxetic, and honeycomb-shaped were used in the core part of the sandwich composite structures. In this thesis, hollow spherical elements were used as reinforcement elements in the core. These hollow spherical elements were produced by using PVC filament in a 3D printer. PVC filament is fire resistant and tends to char on its own when burned. Intermediate spaces between spherical elements were filled with polyurethane foam. There are also varieties of fire-resistant polyurethane foam. Hollow spherical elements provide the main strength of planned sandwich structures. Polyurethane foam holds the hollow spherical reinforcement elements and aluminum surface face-sheet together. The strength of hollow spherical elements under compression loading is affected by parameters like wall thickness, outer diameter size, material type, manufacturing method, etc. There is a risk of buckling when compressive loads are applied to hollow spherical elements. In the case of buckling, sudden large deformations can be observed

despite a slight increase in the applied compressive force. The buckling to be observed in hollow spherical elements affects the mechanical behavior of the sandwich composite under compression loading. In this study, the compression behavior of the designed sandwich composite materials was investigated. In addition, structural strength studies were carried out on the components used in the core of sandwich composite materials. Additionally, the diameters of hollow spherical reinforcement elements and their effects on the mechanical behavior of the composite structure were also investigated.

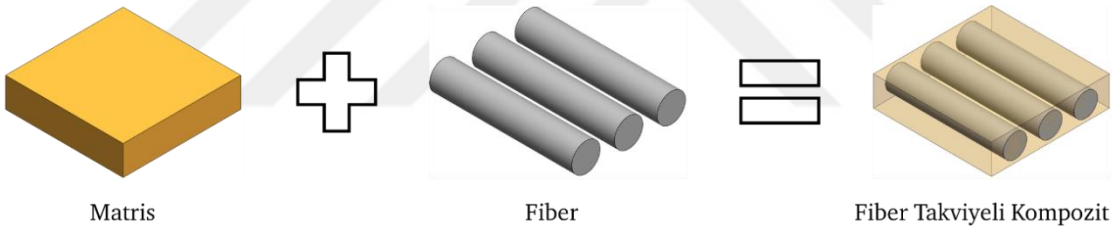
Keywords: Hollow spherical reinforcing elements, sandwich composite, compressive strength

1 GİRİŞ

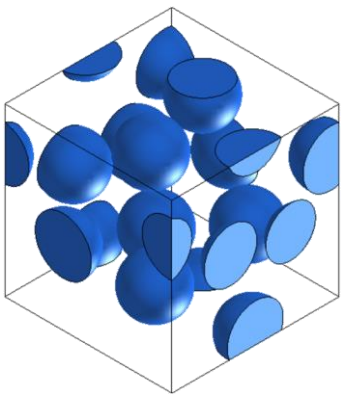
1.1 Literatür Özeti

Kompozit malzemeler, en az iki farklı malzemenin belirli bir amaç ve kullanım alanı için makro ölçekte bir araya getirilmesi ile meydana getirilen malzemelerdir.

Kompozit malzemelerde farklı sınıflandırmalar olabilmektedir. Matris malzemesi tipine göre yapılan sınıflandırmalarda metal matrisli, polimer matrisli, seramik matrisli olarak sınıflandırılabilir. [1] Kompozit malzemelerde takviye tipi esas alınarak bir sınıflandırma yapılacak olursa; fiber takviyeli, parçacık takviyeli ve yapısal takviyeli olarak sınıflandırılabilir. Yapısal takviyeli kompozitlerde kendi aralarında sınıflara ayrılır. Bu çalışma kapsamı için önemli olan sandviç kompozit malzemeler, yapısal takviye grubu altında ayrılan sınıflardan bir tanesidir. [2]

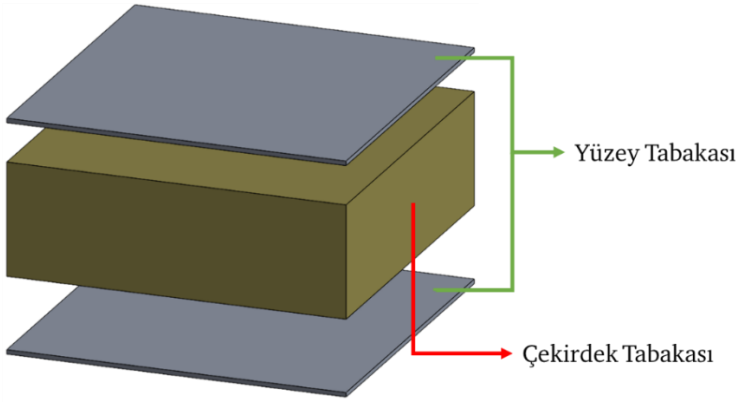


Şekil 1.1 Fiber takviyeli kompozit malzeme ve bileşenlerinin şematik görseli



Şekil 1.2 Parçacık takviyeli kompozit malzemenin şematik görseli

Sandviç kompozitler, iki yüzey katmanı arasında konumlandırılmış çekirdek katmanından meydana gelir. Yüzey katmanları ince ve dayanıklıyken çekirdek katmanı ise hafif ve kalın bir yapıdadır. [3]



Şekil 1.3 Sandviç kompozit malzeme ve bileşenleri

Sandviç kompozit malzemeler genellikle yüzey kaplama gibi görevlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Sandviç kompozit malzemelerin kullanım alanlarına inşaat sektörü, raylı ulaşım aracı sektörü, gemi inşaat sanayi, uzay ve havacılık sanayi vb. örnek olarak gösterilebilir.[4]–[8]

Sandviç kompozit malzemeler, tasarımlarından gelen bazı avantajlarından dolayı tercih edilmektedir. Sandviç yapılar, eğilme yüklemesine karşın dayanım/ağırlık kriteri baz alındığında diğer yapılardan öne çıkarlar. Bu durum sandviç yapının bileşenlerinden ve bileşenlerde seçilen geometrik ölçülerden kaynaklanmaktadır. Alt ve üst yüzey tabakaları için ince ve rijit malzeme tercih edilirken çekirdek tabakası kalın ve hafif malzemeler tercih edilmektedir. Sadece eğilmeye maruz kalan bir parçada tarafsız eksende gerilme oluşmazken, alt ve üst yüzeylerde (tarafsız eksene en uzak mesafede) olan noktalarda maksimum gerilme görülebilir. Bu durumda tarafsız eksen etrafında kalan malzeme en aza indirilir ya da daha az ağırlığa sahip malzeme ile doldurulabilir. Bu işlemin en belirgin örneklerinden bir tanesi de I kiriş profilidir. [9]

I kiriş profili gibi bir geometride geniş flanş kullanılması lokal burkulmalara yol açabilir. Petek yapılı sandviç kompozit gibi yüzey katmanını destekleyen bir yapı olursa, bu lokal burkulma riski azalır. Yüzey kaplamasının her yönden desteklenmesi iyi olacaktır. Geniş flanşlı I kiriş yapılara göre sandviç kompozit bu anlamda avantaj sağlayabilir. [9]

Sandviç kompozit malzemelerde de çekirdek tipine göre sınıflandırma mevcuttur. Çekirdek tipine göre sandviç kompozitler iki ana gruba ayrılır. Bunlar yüzey katmanlarını homojen destekleyen sandviç kompozitler ve yüzey katmanlarını yapısal destekleyen (homojen olmayan) sandviç kompozitlerdir. Yüzey katmanlarını homojen destekleyen çekirdeğe sahip sandviç kompozit tipine, köpük çekirdeğe sahip sandviç kompozitler örnek olarak verilebilir. Yüzey katmanını yapısal olarak destekleyen çekirdek katmanlı sandviç yapılar, kendi aralarında dört gruba ayrılır. Bunlar noktasal destekli, bölgesel destekli, tek yön destekli ve çift yönlü destekli çekirdek katmana sahip sandviç kompozit malzemelerdir. Tek yönden destekleyen çekirdek yapısına sahip sandviç kompozit tipine, oluklu forma sahip çekirdek katmanlı sandviç kompozit örnek olarak verilebilir. Çift yönden destekleyen çekirdek yapısına sahip sandviç kompozit tipine ise bal peteği formlu çekirdek katmana sandviç panel örnek olarak verilebilir. [10]

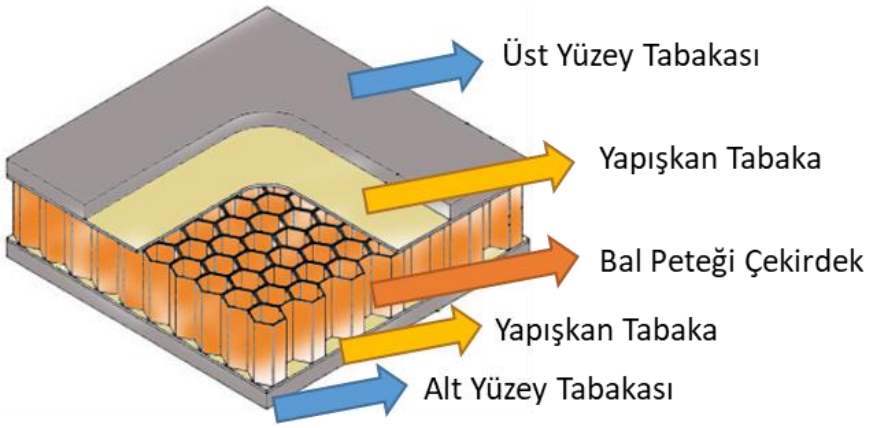
Sandviç kompozitlerde yüzey katmanı olarak farklı malzemeler kullanılabilmektedir. Sandviç kompozitlerde yüzey malzemesi olarak genel eğilim rijit ve mukavemetli malzeme seçimidir. Bu bağlamda metal ve fiber ile güçlendirilmiş kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Metal olarak alüminyum ve çelik malzemeler tercih edilmektedir. Bu alternatiflerin dışında karbon fiber-epoksi levhalar, cam fiber-epoksi levhalar vb. gibi kompozit malzemeler de kullanılabilmektedir. Ahşap esaslı malzemeden yüzey katman levhalı ve ahşap liflerinden üretilmiş çekirdekli sandviç kompozit malzemeler, akustik ve ısı yalıtımının sağlanması gereken yerlerde kullanılmaktadır.[11] Bazı hazır panel üreticilerinin katalogları incelendiğinde; alüminyum, boyalı galvaniz sac, paslanmaz çelik, mebran, cam elyaf takviyeli plastik (CTP) gibi malzemelerin yüzey katmanı olarak tercih edildiği görülmektedir.[12]

Fabrika çatıları gibi yüzeylerin kaplanmasında poliüretan köpük çekirdekli ve alüminyum yüzey katmanlı sandviç kompozit paneller yaygın olarak kullanılmaktadır. Çatı panellerinde kullanılacak yüzey tabakası için korozyon direnci yüksek, kolay şekil verilebilir ve estetik görünüşe sahip olması gibi özellikler istenebilir. Bu kriterleri sağlayan bir malzeme olarak alüminyum ön plana çıkmaktadır. Bazı sandviç kompozit panelleri üreten şirketlerin

kataloglarında, yüzey katmanı malzemesi olarak 3XXX serisi alüminyumu tercih ettikleri görülür. Yüzey tabakası kalınlığı söz konusu olduğunda; üst yüzey tabakası için 0,5 – 0,7 mm kalınlığında, alt yüzey tabakası kalınlığı için de 0,4 – 0,7 mm kalınlığında levhaları kullandıkları kataloglarından görülebilmektedir. [13],[14]

2014 yılında Manujesh vd., poliüretan köpük çekirdeğe sahip bazı sandviç kompozit yapılar için nem alma ve mekanik bozunma durumlarını araştırmışlar. Araştırma kapsamında hazırlanan poliüretan köpük çekirdekli sandviç kompozit numuneler 180 gün boyunca tuz sisine maruz bırakılmıştır ve işlem süresince gözlem yapılmıştır. İşlem sonrasında numunelerde yüzey tabakasından ayrışmalar gözlemlenmiştir. Daha sonrasında uygulanan basma testinde ise çekirdek kısmının parçalanarak hasara uğradığı görülmüştür. [15] Deniz kenarı gibi ortamlarda bu şartlar kolaylıkla görülebilir. Bu çalışmadan yola çıkarak, sandviç kompozitlerin çevre şartlarından etkilendiği sonucuna varılabilir.

Çekirdek katmanı için de farklı malzeme ve farklı yapılar tercih edilebilmektedir. Çekirdek katmanı için malzeme çeşitliliği bakımından poliüretan, poliizosiyanurat, mineral yün, alüminyum, ahşap ürünleri vb. kullanılabilmektedir. [12] Literatürde yaygın olarak kullanılan çekirdek katmanı için bal peteği formlu yapılar, oluklu forma sahip yapıldar, homojen gözenekli forma sahip yapılar, negatif poisson oranına sahip yapılar vb. sıralanabilir.[16]–[18]



Şekil 1.4 Bal peteği çekirdek yapısına sahip sandviç kompozit malzemeye ait şematik gösterim. (Görsel adapte edilmiştir.)[18]

Sandviç kompozit malzemelerin çok geniş bir kullanım alanı bulması ve çok geniş bir sınıflandırmaya sahip olması, amaca en uygun olan malzemenin belirlenmesi için olanak tanır. Bahsedilen olanaktan istifade edilebilmek için amacımızın kriterleri belirlemiş ve bu amaca hizmet edecek parçanın ise belirlenmiş olan kriterleri ne oranda sağladığını bilmemiz gerekir. Bu bağlamda sandviç kompozit malzememizin bileşenlerinin yüklemeler karşısında sergileyeceği davranışa hakim olmamız gerekir.

Çekirdek yapıların mekanik özellikleri ve bu özelliklere etki eden parametrelerin neler olduğu hakkında literatürde çalışmalar mevcuttur.

Ivañez ve ekip arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, bal peteği çekirdek yapısına sahip sandviç kompozit malzemelerin basma yüklemesi altındaki enerji absorb kabiliyetleri araştırılmıştır. Çekirdeğin malzeme türü, bal peteği geometrisindeki duvar kalınlığı, bal peteği hücrelerinin büyükleri gibi parametreler basma yüklemesi altındaki çekirdeğin ezilme davranışına etki eder.[19]

Yaygın olarak kullanılan bir başka çekirdek malzemesi poliüretan köpüktür. 1930 yılında, ilk olarak Otto Bayer tarafından Poliüretanlar(PU) üretildi. polimerik grubun en önemli üyelerinden olarak görüldü. Poliüretan köpük (PUF), poliol ve izosiyanat malzemelerinin karışımı sonucu meydana gelen kimyasal reaksiyon ile elde edilmektedir. Karışım oranları ile oynanarak çok farklı tiplerde poliüretan köpük üretimi mümkündür. Esnek, katı veya dayanımlı gibi istenen özelliklere göre üretimi mümkündür. [11] İstenen özellikleri kazandırmak için başka katkı malzemeleri de karışıma eklenebilir. 2019 yılında Li ve arkadaşları esnek poliüretan köpük malzemenin yanıcılığa karşı direncini yükseltmek için kullanılan çeşitli katkı malzemelerini incelemiştir.[20]

PUR (poliüretan) köpük malzeme ısı yalıtımı, akustik absorb, boşluk doldurma gibi amaçlarla kullanılabilmektedir. Farklı özellikler kazandırılabilen poliüretan köpükler üretmek mümkün olduğu için otomobil koltukları, dış cephe panelleri, ayakkabı imalatı gibi birçok uygulamada da görmek mümkündür. [11]

Köpük üretimi için A-B bileşenli setler satılmaktadır. Ürünler serbest yoğunluk değerine göre kategorize edilebilmektedir. Daha kolay olarak metal şişe içerisinde sıkılmaya hazır köpükler de satılmaktadır.

Poliüretan köpük malzemenin mekanik özelliklerinden biri olan basma dayanımına birçok parametre etki edebilir.

Poliüretan köpük malzemenin yoğunluğu direk olarak basma davranışına etki etmektedir. 2016 yılında Tuwair ve arkadaşları, poliüretan köpük içeren çeşitli çekirdek yapılarından kirişler oluşturmuşlardır ve oluşturdukları bu kirişlerin çekirdeklerinde düşük ve yüksek yoğunluklu poliüretan köpük malzeme kullanmışlardır. Kirişlere eğilme testi uygulamadan önce çekirdek malzemelerinin mekanik özellikleri konusunda bilgi sahip olmak için deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deney çalışmaları sonucunda; yüksek yoğunluklu poliüretan malzemenin basma dayanımının, düşük yoğunluklu poliüretan köpük malzemeye göre daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. [21]

F. Saint Michel ve arkadaşları, yüksek yoğunluklu poliüretan köpük malzeme için yoğunluk faktörünün malzeme üzerindeki etkisini araştırmıştır. Araştırma sonucunda çıkarılan grafikler incelendiğinde yoğunluk artışı ile birlikte basma dayanımının da arttığı gözlemlenmektedir. [22]

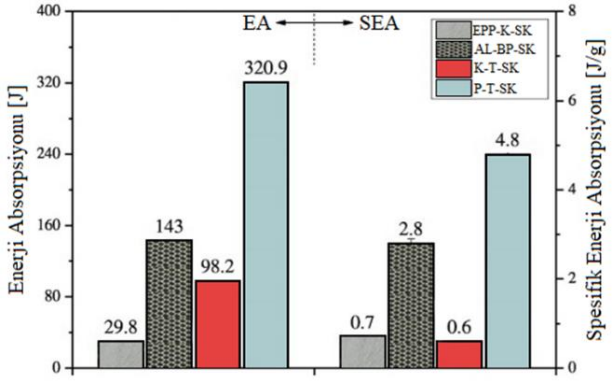
İlave edilecek katkı malzemelerindeki değişiklik, poliüretan köpük malzemenin mekanik özelliklerini değiştirecektir. İlave edilecek katkı malzemeleri; poliüretan köpük yapının yoğunluğunu, gözenek büyüklüğünü, gözeneklerin dağılımını etkileyebilir. Literatürdeki bazı katkı malzemelerini ve bu katkı malzemelerinin poliüretan köpük üzerindeki etkilerini incelemişlerdir.[23],[24]

Deformasyon hızı, malzemenin sergileyeceği mekanik davranışı değiştirebilir. Mane vd., basma testini çeşitli deformasyon hızlarında poliüretan köpük malzemeye uygulamışlardır. Deformasyon hızı arttıkça malzeme daha dayanımlı bir davranış sergilemektedir.[25]

Poliol - İzosiyanat karışımından meydana gelen poliüretan köpükte, karışım oranı değiştirmek köpüğün basma dayanımına etki eder. Sidek vd., bu konuda deneysel ve numerik çalışma yaparak oran etkisini araştırmıştır. [26]

Literatürde sandviç kompozit malzemelere uygulanabilen testler de incelenmiştir. Bu testlerde yapının davranışını etkileyen esas unsurlar da araştırılmıştır. Arnold Jędral, bal peteği çekirdekli sandviç kompozit malzemelere uygulanabilecek testleri incelemiştir. ASTM C365 (yüzey yönünde basma dayanımı için) ve ASTM C364 (kenar yönündeki basma dayanımı için) kodlu standart testlerin sandviç kompozit numunelerin basma dayanımı özelliklerinin tespiti için uygulanabileceğinden bahsetmiştir.[27]. 2018 yılında Arslan vd. tarafından farklı çekirdek ve yüzey tabakası malzemeleri kullanılarak oluşturulan sandviç kompozit numunelerin mekanik özellikleri irdelenmiştir. Yapmış oldukları basma ve eğilme testleri sonuçlarına göre; sandviç kompozit malzemenin mekanik özelliğini belirleyen ana unsurun çekirdek bileşeni olabileceği yorumu genelleyerek çıkmıştır. Yüzey yönündeki basma testleri sonucunda çekirdek malzemesinin, kenar yönündeki basma testleri sonucunda ise çekirdek ile yüzey tabakasının birleşiminin önemli olduğunu ortaya çıkmıştır.[28]

Zhang vd., karbon fiber epoxy yüzey levhaları arasında çeşitli çekirdek yapıları ile sandviç kompozit malzemeler oluşturmuştur. Bu çekirdek yapıları: EPP köpük, alüminyum bal peteği, kauçuk ve içi boş plastik toplardır. Oluşturdukları bu yapıları yarı-statik basma ve düşük hızlı darbe testlerine tabi tutmuşlardır. Yarı-statik basma testlerinden çıkan yük-yer değiştirme eğrileri sayesinde enerji abrorb kabiliyetlerini hesaplamışlardır. Şekil 1.5'te içi boş plastik topun diğer test edilen çekirdek malzemelerinden daha fazla enerji absorb kabiliyetine sahip olduğu görülmektedir. Birim ağırlık bazında da durum aynıdır. [29]



Şekil 1.5 Yarı-statik basma testi sonuçlarına göre test edilen çekirdek yapılarının enerji absorb kapasiteleri. (Görsel adapte edilmiştir.) [29]

Sandviç kompozit malzeme oluştururken yangına karşı dirayetli olması istenebilir. Özellikle fabrika çatıları gibi alanlar yangın riski taşımaktadır. Bu isteği yerine getirmek için sandviç kompozit malzemenin bileşenlerinin yangına karşı dayanıklı olması istenebilir.

Bazı şirketler yangına karşı dirençli ve kullanıma hazır poliüretan köpük ürünler satmaktadır. Bu ürünlerde de dirence göre bir sınıflandırma mevcuttur.[30] Zor alevlenmesi amacıyla poliüretan köpük için kaplama ve poliüretan köpüğe katkı malzemesi eklenmesi gibi çeşitli çalışmalar literatürde yapılmaktadır.[31],[32]

Tez konusu olan küresel takviye elemanları için de yangına karşı dirayetli olması istenmektedir. Yapılan araştırma çalışması sonucunda PVC malzemenin uygun olabileceği görülmüştür. PVC malzeme uygun fiyatlı, yüksek mukavemetli, kimyasal aşınmalara karşı dayanıklı bir polimerdir. PVC malzeme yanmaya karşı dirençlidir ve yanma sonucu kömürleşme eğilimindedir. Alev kaynağı uzaklaştırıldığında kendiliğinden söner. [33] Kömürleşme sebebi ile yangının ilerlememesi konusunda avantaj sağlayabilir. PVC malzeme yandığı sırada zehirli gaz salınımı yapabilir. Toksit gazların solunması sağlık açısından uygun olmayacaktır. PVC malzeme ile çalışma yapılıyorsa koruyucu ekipman kullanılması uygun olacaktır.

2020 yılında Hrituc vd. tarafından bir çalışma yürütülmüştür. Yürütülen çalışmada PLA malzemeden 3-D yazıcı kullanılarak içi boş plastik toplar üretmişlerdir. İçi boş küresel topların imalatında çeşitli parametreler kullanmışlardır. Bu parametreler; tabla sıcaklığı, baskı hızı, duvar kalınlığı ve soğutma hızıdır. Üretilen bu içi boş küresel toplar basma testine tabi tutulmuştur. Bu parametre değişikliklerine göre üretilen topların basma dayanımı irdelenmiştir.[34]

Literatürde yapılan birçok çalışma mevcuttur. Literatürdeki çalışmalar, genellikle sandviç kompozit malzemelerin mekanik davranışlarını belirlemek üzerinedir. Yapının davranışı esasında bileşenlerden gelmektedir. Sandviç kompozit yapının istenen özellikleri (daha dayanıklı, daha enerji absorb kabiliyeti yüksek, daha az yanıcı olması gibi) kazanması için yöntemler geliştirilmiş ve bu konularda çalışmalar devam etmektedir. Hızlı prototipleme cihazlarının gelişmesi ve yaygınlaşması ile araştırma çalışmaları için bir pencere daha açılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Çekirdek malzemesi sadece poliüretan köpük olan sandviç kompozit yapılara kıyasla içi boş küresel takviye elemanı da içeren sandviç kompozit yapıların basma yüklemesi karşısında daha dayanıklı olup olmayacağının tespiti bu çalışmanın amaçlarındandır. Ayrıca üç boyutlu yazıcıyla PVC filamentten üretilecek olan içi boş küresel takviye elemanlarında uygulanacak dış çap ölçüsündeki değişim ile sandviç kompozit malzemenin basma dayanımının nasıl etkileneceğinin araştırılması ise bu çalışmanın bir başka amacıdır. Mekanik davranış açısından sandviç kompozit malzeme bileşenlerinin de araştırılması amaçlar arasındadır.

1.3 Hipotez

Literatür incelendiğinde alüminyum yüzey levhalı ve poliüretan köpük malzemeli sandviç kompozit malzemelerde zaman içerisinde çevre şartlarına da bağlı olarak deformasyonlar gerçekleşebilmektedir. Poliüretan köpük malzemenin deforme olması durumunda yüzey ile çekirdek arasındaki bağda ayrışmalar olabilmektedir. Mukavemetli, kimyasal dayanımı yüksek ve zor alev alabilecek bir malzemeden üretilecek küresel takviye elemanları ile poliüretan çekirdek yapı desteklenebilir. Destek sayesinde poliüretan köpüğün yapışabileceği bir ara-yüzey oluşturulmuş olur. Ayrıca tezin amacı olan sandviç kompozit malzemedeki basma dayanımının artışı ise bahsi geçen içi boş küresel takviye elemanlarının yardımıyla sağlanabilir. Bu artışın gözlemlenmesi küresel takviye eleman malzemesinin poliüretan köpük malzemeden daha dayanımlı olması ile sağlanabilir. PVC malzeme de bu şartı sağlamaktadır. Hedeflenen yapıya sahip sandviç kompozit numuneler üretilebilir. Üretilen numunelere uygulanacak basma testiyle sonuçlar çıkartılabilir ve amaç doğrultusunda mukayese çalışması yapılabilir.

2
KÜRESEL TAKVİYE ELEMANI İÇEREN SANDVİÇ KOMPOZİT YAPI

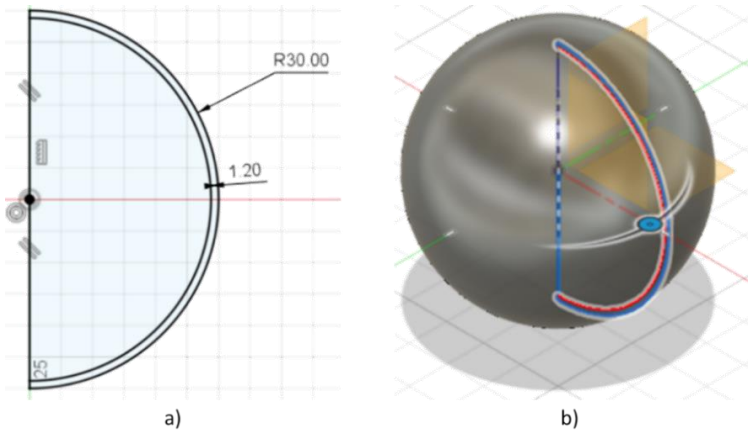
Bu bölümde tez kapsamında incelecek sandviç kompozitlerin tasarımı ele alınacaktır. Sonrasında üretilmesi hedeflenen sandviç kompozit malzemeler ve bileşen testi numunelerinin nasıl hazırlandığı bilgisi verilecektir. Bölümün sonunda ise uygulanan test prosedürleri paylaşılacaktır.

2.1 Tasarım Faaliyetleri

Bilgisayar destekli tasarım programı aracılığıyla istenen parçaların tasarımları hazırlanmıştır. Küresel takviye elemanları, sandviç kompozit numuneler, sandviç kompozit numune kalıpları, bileşen testi için numune kalıpları, çekme numunesi için tasarımlar oluşturulmuştur.

2.1.1 Küresel Takviye Elemanlarının Tasarımı

İçi boş küresel yapıda olması sebebi ile dış çap ve et kalınlığı değeri ile geometri kolayca oluşturulmuştur. Şekil 2.1'de çalışmadan görseller mevcuttur.



Şekil 2.1 KTE'nin tasarım çalışmalarından görseller a) 2-D taslak b) 3-D hacim

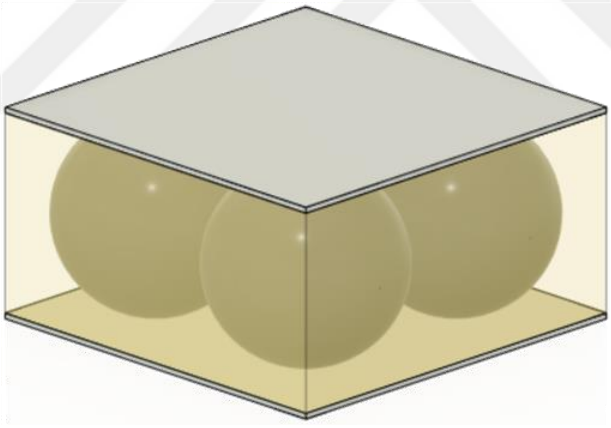
Üç ayrı tasarım oluşturulmuştur. Tüm oluşturulan tasarımlar için et kalınlığı 1,2 mm olarak belirlenmiştir. Tasarımlarda dış çap değeri değişmektedir. Dış çap değerleri Ø25 mm, Ø30 mm ve Ø35 mm olarak seçilmiştir.

2.1.2 Sandviç Kompozit Numune Tasarımları

Sandviç kompozit numunelerin tasarımına bileşenlerinin malzeme ve form seçimleri ile başlanır. Tasarımlar bilgisayar ortamında yönetilir.

Literatür incelendiğinde, sandviç kompozit malzemelerin yüzey katmanları için alüminyum levhaların sıkça tercih edildiğini görmekteyiz. Bu tez çalışması kapsamında da oluşturulacak sandviç kompozit numunelerin yüzey katmanlarında; 3105 alaşımlı, H24 ısıl işlem kodlu ve 0,7 mm kalınlıkta alüminyum levhadan kesilecek malzemeler kullanılacaktır. Yüzey katmanları için 50x50 mm, 60x60 mm ve 70x70 mm en ve boy ölçüsü tercih edilir.

KTE için tasarımlar oluşturulmuştu. Sandviç kompozit numunelerin yüzey katmanlarının arasına konumlandırılacak şekilde, aynı dış çap ölçüsünden 4 adet küresel takviye elemanı bir araya getirilmiştir. KTE dışında kalan boşluklar poliüretan köpük ile doldurulacaktır. Şekil 2.2'de tasarımdan bir görsel paylaşılmıştır.



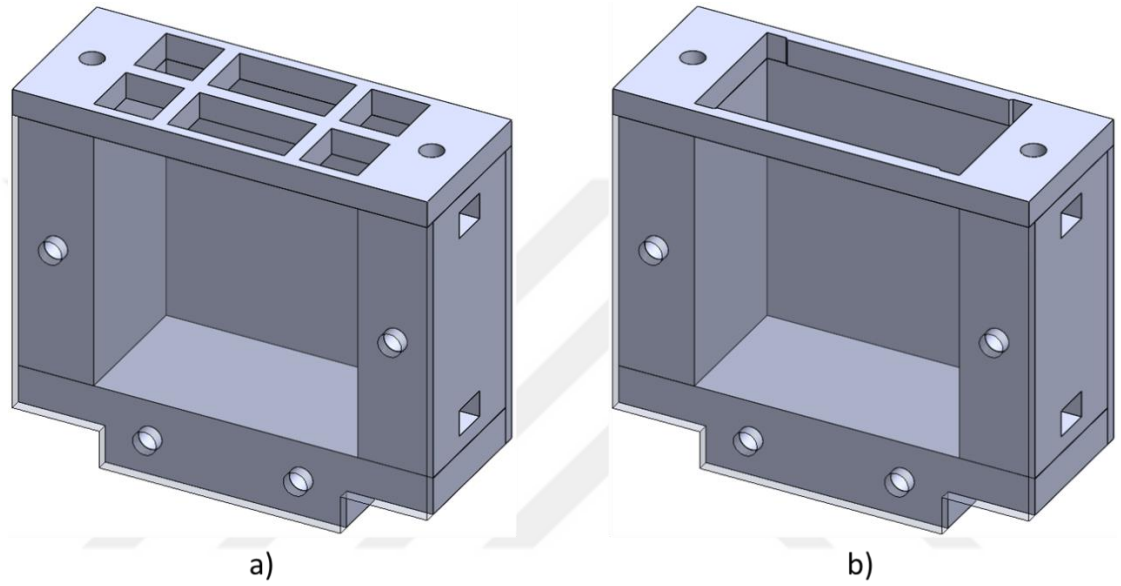
Şekil 2.2 KTE ile desteklenmiş sandviç kompozit malzemenin tasarım görseli

Çekirdek yüksekliğini, küresel takviye elemanlarının dış çap ölçüsü belirleyecektir. Sandviç kompozit numunenin en ve boy değeri, KTE'nin dış çap ölçüsünün iki katı olarak ortaya çıkacaktır.

2.1.3 Sandviç Kompozit Numuneler için Kalıp Tasarımları

Sandviç kompozit numunelerde çekirdek kısmında poliüretan köpük kullanılması hedeflenmiştir. Bu sebeple bir kalıp hazırlanması gereklidir. Bileşenleri bir arada tutacak ve istenen hacimsel boşluğu sağlayacak tasarıma ihtiyaç vardır. Kalıbın bir

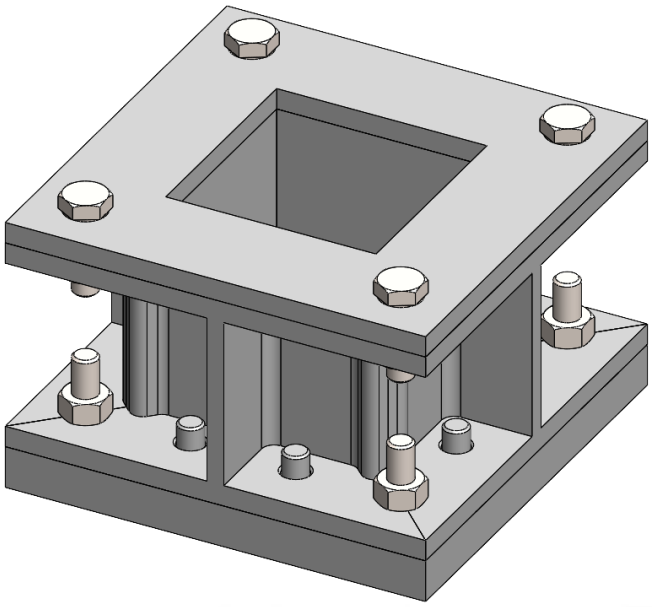
kısmında açıklık olmasıyla fazla köpük tahliye edilebilmektedir. Kalıp bileşenlerinin tamamının sökülebilir-takılabilir yapıda olmasıyla ürünler kalıptan kolayca ayrılabilmektedir. Bu istekler doğrultusunda üç kalıp tasarımı yapılmıştır. Bu tasarımlardaki fark ise sandviç kompozit numunelerin hacimlerinden kaynaklanmaktadır ve kalıp geometrisine de yansımıştır. Şekil 2.3'te KTE ve PUF çekirdekler için kalıp tasarımları görülmektedir.



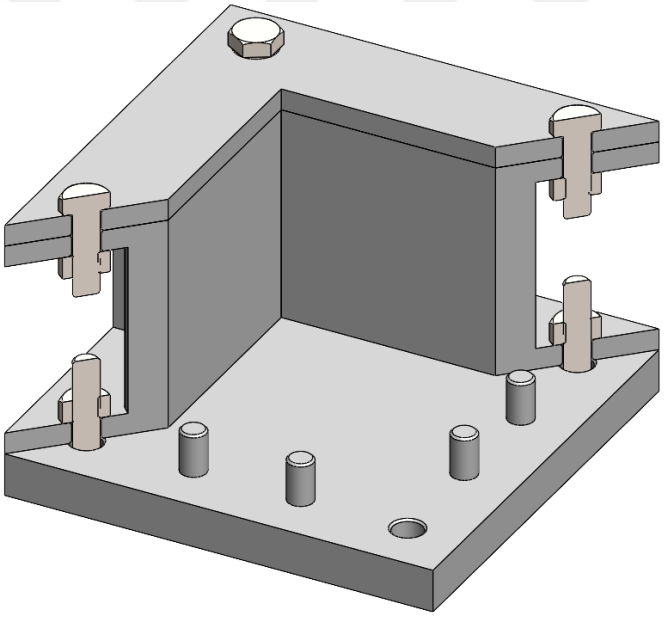
Şekil 2.3 a) KTE içeren SK için b) Sadece poliütetan köpük içeren SK için kalıp tasarımları

2.1.4 Poliüretan Köpük Numune Kalıbı

Poliüretan köpük malzemenin mekanik davranışlarını belirleyebilmek için basma testi uygulanmaktadır. Fatih Usta, Halit S. Türkmen ve Fabrizio Scarpa tarafından 2021 yılında bir çalışma yürütülmüştür. Çalışma içerisinde poliüretan köpüğün basma davranışını incelemek için 50x50x50 mm ölçülerinde poliüretan köpük küpler oluşturmuşlardır. Bu numune ölçülerinin ASTM D1621-91standardına uygun olduğunu belirtmişlerdir.[35] Aynı ölçüleri bu çalışma içinde kullanabiliriz. Bu hacmi oluşturmak üzere parçalarına ayrılabilir bir kalıp tasarımı oluşturulur. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'te görüldüğü gibi kalıp tasarımları hazırlandı.



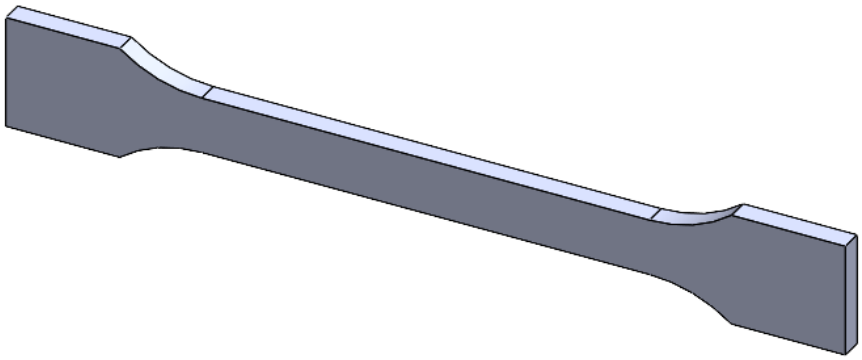
Şekil 2.4 Poliüretan köpük basma numunesi için tasarlanan kalıp görseli



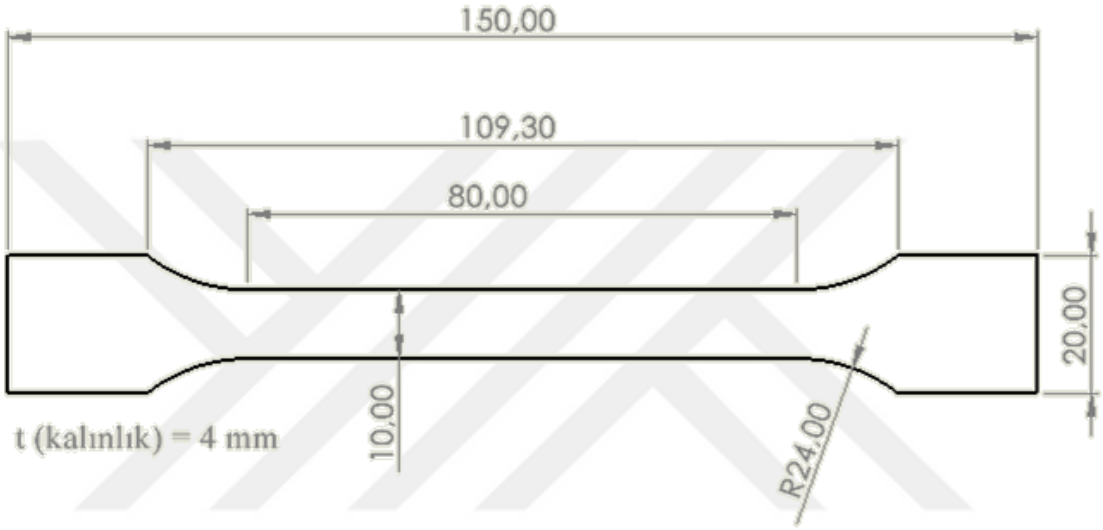
Şekil 2.5 Poliüretan köpük basma numunesi için tasarlanan kalıbın kısmı kesit görünümü

2.1.5 Çekme Testi için Numune Tasarımı

PVC malzemesinden 3-D yazıcıda çekme numunesi üretmek istenmektedir. Bu amaç doğrultusunda bilgisayar ortamında tasarım faaliyetleri yürütülmüştür. Çekme testi standardına uygun olacak şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.6 ve Şekil 2.7 'de çekme numunesi için standarda uygun bir tasarım ortaya konmuştur. Numune ölçüleri ISO 527-2 (1993) standardında Tip IA ya uygun olacak şekilde seçilmiştir.



Şekil 2.6 Tasarlanan çekme numunesinin görseli



Şekil 2.7 Tasarlanan çekme numunesinin (mm) bazında ölçü değerleri

2.2 Üretim Faaliyetleri

Tasarım kısmında yapılan hazırlıklar bu kısımda üretime dönüştürülmüştür. Üretim aşamasında kullanılan teknikler ve kullanılan parametreler bu kısımda paylaşılmaktadır.

2.2.1 Küresel Takviye Elemanlarının Üretimi

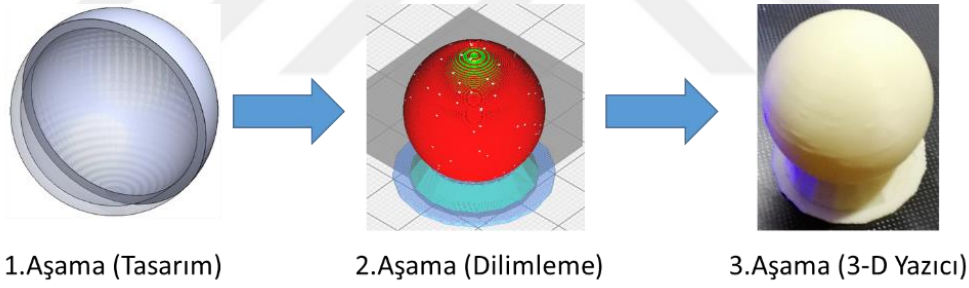
Küresel takviye elemanları 3-D yazıcıda üretilmiştir. Üretimde PVC filament kullanılmıştır. Üretim aşamasında bilgisayar ortamında hazırlanan tasarımlar dilimleme programına (Cura) aktarılmıştır. Dilimleme programı ile 3-D baskıya uygun hale getirilen tasarım için g-code dosyası çıkarılır. Tasarım dosyası ".STL" formatında Cura'ya aktarılmalıdır. Küresel bir geometri basılacağı için küre altına destek konumlandırılmıştır. Küresel takviye elemanının iç kısmında ise destek kullanılmamıştır. Dilimleme programında duvar kalınlığı 0,4 mm'den 3 kat

seçilmiştir. Baskı parametreleri Creality CR6-SE model yazıcıya uygun olacak şekilde ayarlıdır. Yazıcı değişikliği olması durumunda optimize edilmesi gerekebilir. PVC malzemeden KTE'lerin basılması için Tablo 2.1'deki değerler kullanılmıştır. Küresel cisim üretileceği için değişken katman yüksekliği opsiyonu uygulanmıştır. 3-D baskıda küresel cisim başlangıcında ve sonunda düşük hızda baskı alınmıştır. Düşük hız değerinden kastedilen hız ortalama 15 mm/dak 'dır.

Tablo 2.1 KTE üretiminde kullanılan 3-D yazıcı parametreleri

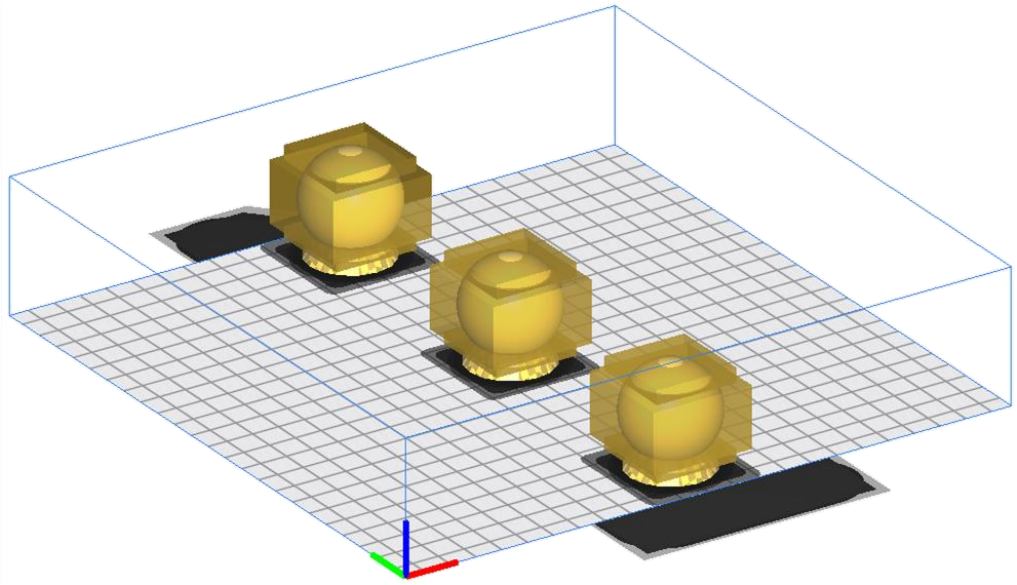
	Değer	Birim
Nozzle Sıcaklığı	≅ 215	°C
Tabla Sıcaklığı	≅ 70	°C
Tabla Yapıştırıcısı	Stick Yapıştırıcı	
Hız Ort.	≅20	mm/dak

Şekil 2.8 'deki gibi üç aşamada PVC malzemeden içi boş KTE'ler üretilmiştir. Ø25, Ø30 ve Ø35 mm için işlem tekrarlanmıştır. Her bir çap değeri için en az 30 adet numune üretilmiştir. Üretim süresi dış çap değerine göre değişiklik göstermekle birlikte, her bir kte için yaklaşık olarak 1 saat -1saat 10 dakikadır.



Şekil 2.8 KTE'lerin tasarımdan üretime geçiş aşamaları

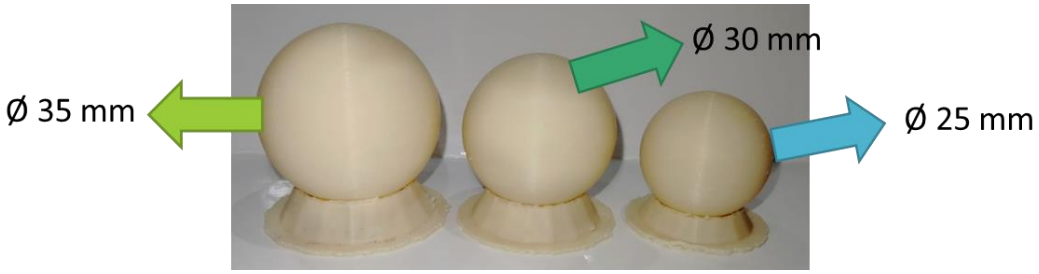
Bir seferde birden fazla KTE üretmek için dilimleme programında yapılan hazırlıklar Şekil 2.9'da gösterilmiştir. Şekil 2.10'da da üretim aşamalarından görseller paylaşılmıştır. Şekil 2.11'de üretilen farklı çaplardaki KTE'ler görülmektedir. Üretim sırasında dikkat edilmesi gereken birkaç husus bulunmaktadır. PVC malzemenin kömürleşme eğiliminde olması, baskı sırasında nozzle tıkanmalarına sebebiyet verebilir. Şekil 2.12'de bu durumla ilgili görsel paylaşılmıştır. Bu durum sıklıkla kontrol edilmelidir. Gerekirse nozzle uçları değiştirilip kalibrasyon yapılmalıdır.



Şekil 2.9 Dilimleme Programında çoklu KTE baskısı için hazırlıklar



Şekil 2.10 Küresel takviye elemanlarının üretimin a) başlangıcından b) ortasından c) sonundan görseller



Şekil 2.11 Farklı çaplardaki küresel takviye elemanları

Sıcaklık artışı tıkanıklığı açmayacağı gibi daha da çok tıkanmasına sebep olacaktır. Açık kasa yazıcı kullanıldığı için çevre şartlarından malzeme etkilenmektedir. Bu durum unutulmamalıdır. Üretim sırasında koruyucu ekipman kullanılması da tavsiye edilmektedir.



Şekil 2.12 Tıkalı nozzle ucundan çıkarılan kömürleşmiş PVC malzemelerin görseli

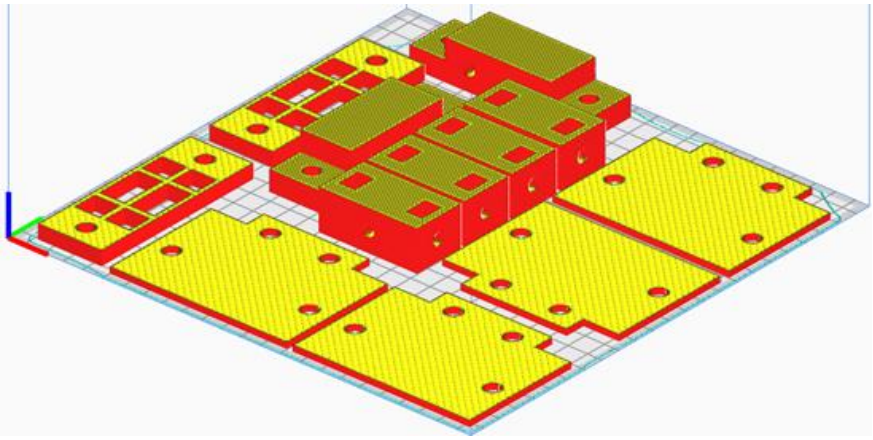
2.2.2 Sandviç Kompozit Numune için Kalıp Üretimi

Kalıpların üretimi için de 3-D yazıcı kullanılmıştır. Yapılan tasarımlar, Cura programında dilimleme işlemine alınmıştır. Yapılan tasarımların dilimleme programına aktarılması ile g-code dosyası oluşturulmuştur. Kalıplarda PLA malzeme kullanılmıştır. PLA malzeme için Tablo 2.2 'deki değerler kullanılmıştır.

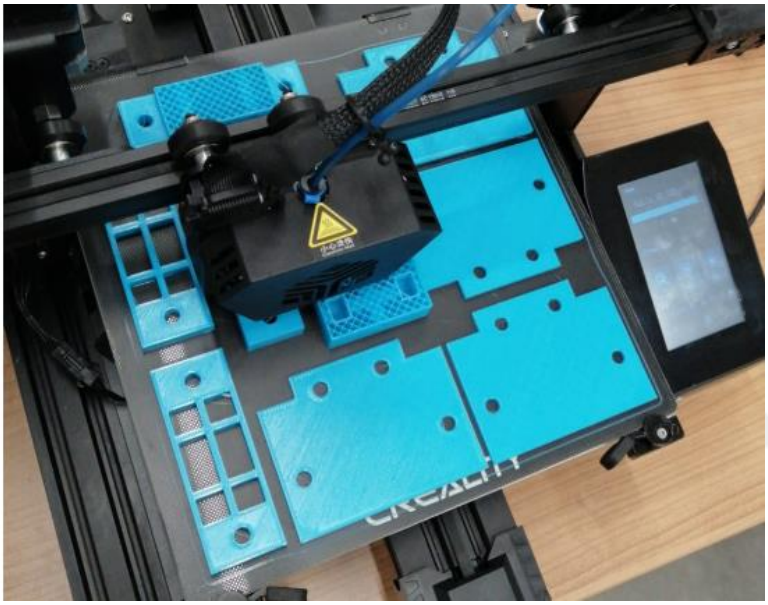
Tablo 2.2 Kalıplar için kullanılan 3-D yazıcı parametreleri

	Değer	Birim
Nozzle Sıcaklığı	≅ 210	°C
Tabla Sıcaklığı	≅ 65	°C
Tabla Yapıştırıcısı	Yok	
Hız Ort.	≅60	mm/dak

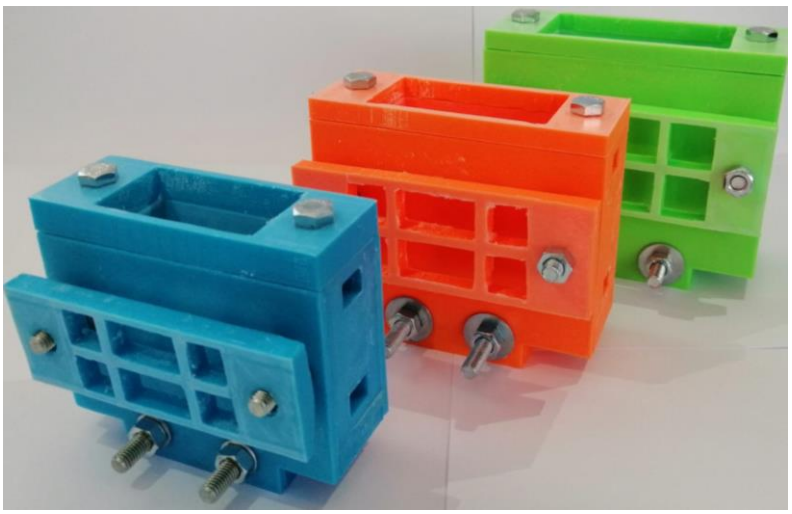
Şekil 2.13'te dilimleme programındaki kalıp yerleşimi ve baskı simülasyonu gözükmektedir. Şekil 2.14 'te kalıp imalat aşamalarından bir görsel paylaşılmıştır. KTE'in ölçülerine göre farklı renkler tercih edilmiştir. Ø25 mm dış çap değerine sahip KTE içeren sandviç kompozitin kalıbında mavi renk filament, Ø30 mm dış çap değerine sahip KTE içeren sandviç kompozitin kalıbında turuncu renk filament ve Ø35 mm dış çap değerine sahip KTE içeren sandviç kompozitin kalıbında yeşil renk filament kullanılmıştır. Şekil 2.15 'te de üç kalıp yan yana gözükmektedir. Yapışmayı önlemek için Kalıp yüzeyleri plastik folyo ile kaplandı.



Şekil 2.13 Kalıp için dilimleme programında 3D baskı önizlemesi



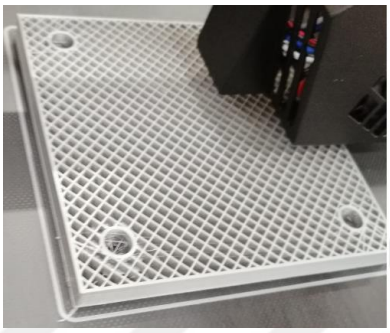
Şekil 2.14 Kalıbın baskısı sürerken çekilmiş bir görsel



Şekil 2.15 Sandviç kompozit numune kalıpları

2.2.3 Poliüretan Köpük Numune ve Kalıp Üretimi

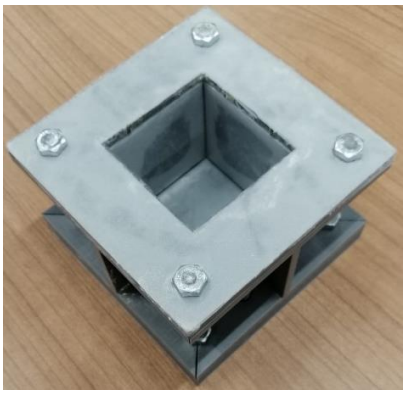
Bölüm 2.1.4'de paylaşılan kalıp tasarımı, 3-D yazıcıyla PLA malzemeden üretilmiştir. Üretimde Tablo 2.2'deki parametreler kullanılmıştır. Poliüretan köpük yapışmasını engellemek için kalp yüzeyleri plastik folyo ile kaplanmıştır. Hızlı numune üretilmesi için kalıplar gri ve mavi filament kullanılarak iki adet tam takım olacak şekilde üretilmiştir.



Şekil 2.16 PUF Kalıbının taban kısmı 3-D yazıcıda üretilirken

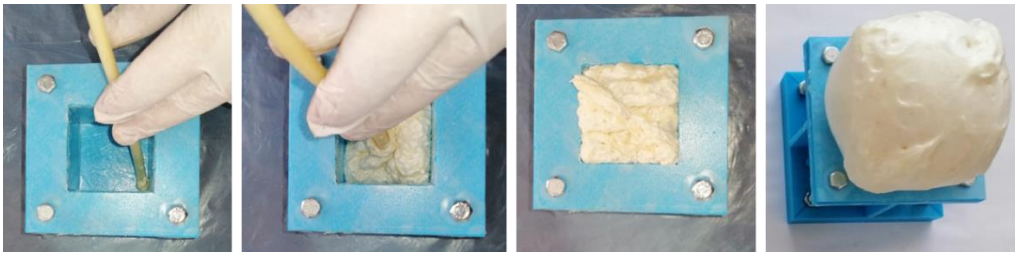


Şekil 2.17 PUF Kalıbının yan parçası folyo ile kaplanırken



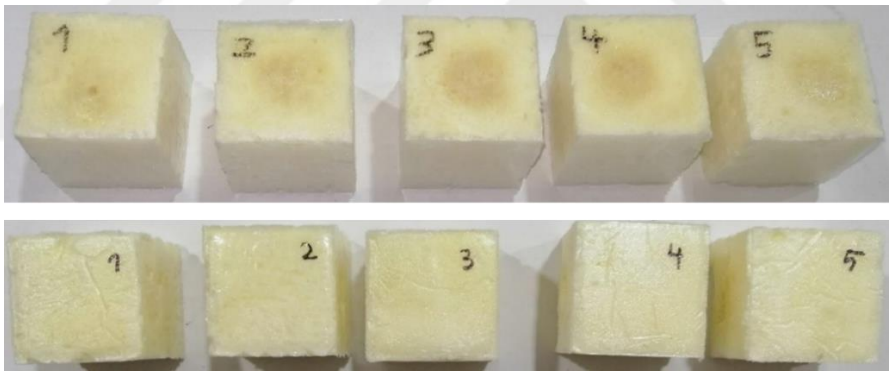
Şekil 2.18 PUF Kalıbının montajlanmış hali

Şekil 2.16-18 arasında kalıp imalatı ve yüzey kaplama işlemleriyle ilgili görseller paylaşılmıştır. Şekil 2.19 ‘de de PUF üretimi aşama aşama gösterilmiştir. Üretim sırasında kullanılan hazır şişe poliüretan köpüğün kullanım talimatında belirttiği gibi nemlendirme işlemi uygulanmıştır.



Şekil 2.19 PU Köpük numunenin imalat aşamaları

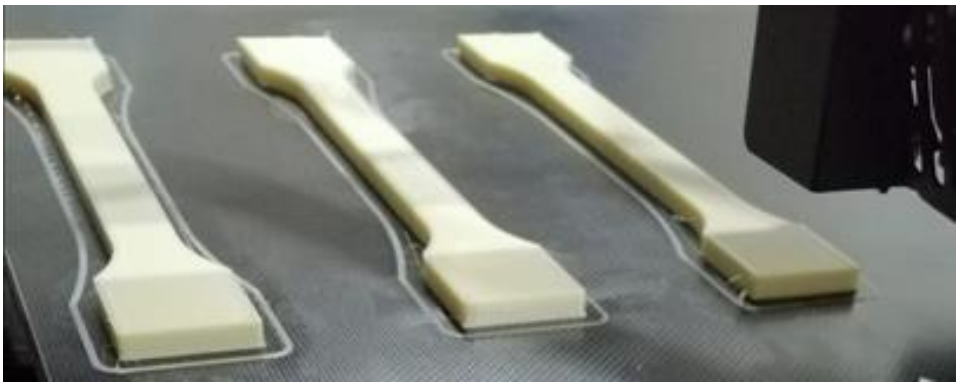
Şekil 2.19’den görüldüğü gibi köpük şişmektedir. Köpük sertleştikten sonra, kalıp dışına taşan kısım maket bıçağı ile kesilir. Bu işlemin devamında kalıptaki cıvatalar gevşetilerek kalıp açılır. Numune arasından alınır. Şekil 2.20’da üretilen numuneler gösterilmektedir.



Şekil 2.20 Üretilen PU köpük numuneler

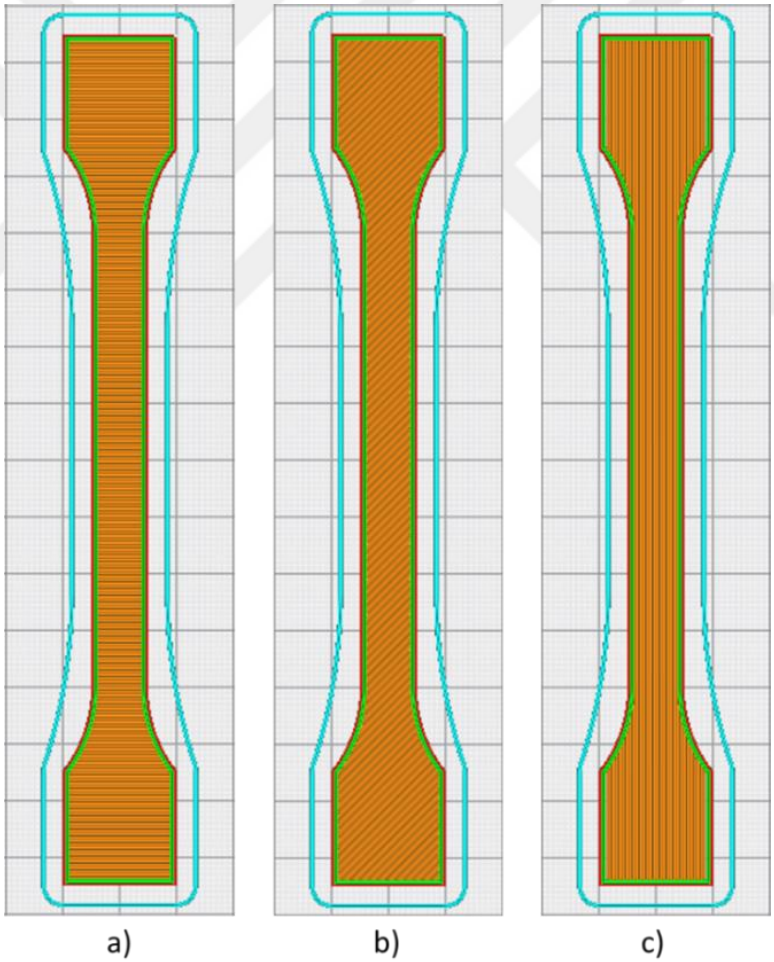
2.2.4 Çekme Numunelerinin Üretimi

Tasarımı yapılmış olan çekme numuneleri, 3-D yazıcıyla üretildi. PVC filamentten üretim yapıldı. Baskı parametreleri Tablo 2.1’deki gibidir. Dolgu açısı değiştirilerek baskı alınmıştır. 0°, ±45° ve 90° olmak üzere üç ayrı dolgu açısı kullanılmıştır. Her bir açı değeri için en az 5 adet numune hazırlanmıştır.



Şekil 2.21 Çekme numunesinin üretiminden bir görsel

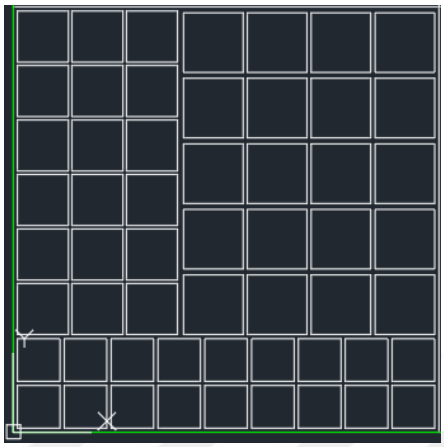
Şekil 2.21'de ise PVC filament kullanarak üretilen çekme numunelerinin imalatından bir kare gözükmektedir. Şekil 2.22 'de Cura programında oluşturulan simülasyonlardan dolgu açısına göre alınan görüntüler paylaşılmıştır.



Şekil 2.22 Dilimleme programında dolgu açısına göre çekme numunelerinin görünümleri a) 0°, b) ±45°, c) 90°

2.2.5 Alüminyum levhaların Lazer Kesimi

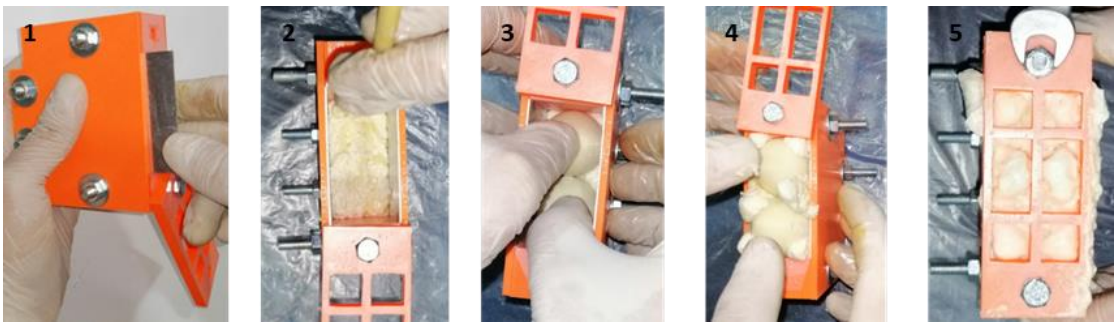
3105 H24 alüminyum levhalar temin edilmiştir. 50x50 cm olacak şekilde büyük levhalara kabaca bölünmüştür. Sonrasında ise lazerle sandviç kompozitlerin yüzey levha ölçülerine bölünmüştür. Şekil 2.23'te lazer kesim planı gözükmektedir.



Şekil 2.23 Alüminyum levhalar için kesim planı

2.2.6 Sandviç Kompozit Numunelerin İmalatı

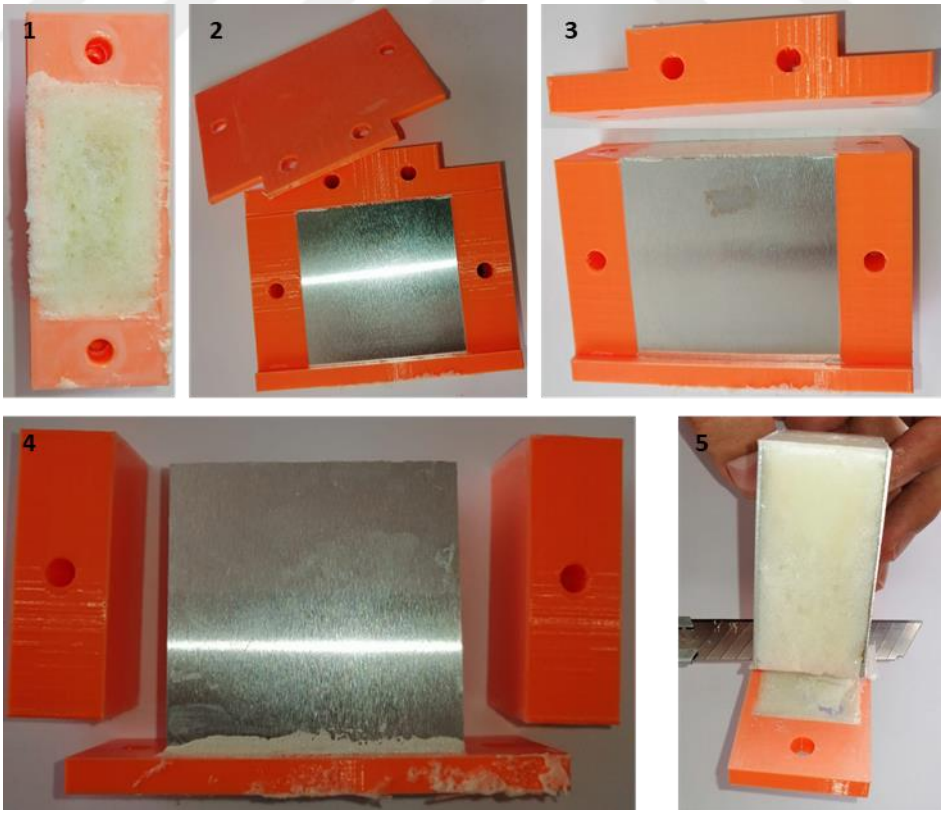
Sandviç Kompozit numuneler için hazırlanan kalıplar sayesinde numuneler üretilmiştir. Üretim sırasında Ø25 , Ø30 ve Ø35 mm KTE elemanlarını içeren sandviç kompozitlerden her biri için 5 adet üretilmiştir. Ayrıca çekirdek yüksekliği bu çaplara denk gelecek şekilde 5'er adet de sadece poliüretan köpük dolgulu içeren sandviç kompozit numuneler hazırlanmıştır. Şekil 2.24, Şekil 2.25 ve Şekil 2.26'da gösterilen işlemler diğer ölçü değerleri içinde tekrar edilmiştir.



Şekil 2.24 KTE içeren sandviç kompozit numunelerin imalatından görseller



Şekil 2.25 Sadece poliüretan köpük içeren sandviç kompozit numunelerin imalatından görseller



Şekil 2.26 Sandviç kompozitin kalıptan ayrılması

Şekil 2.7'de üretilen KTE ve PUF çekirdekli sandviç kompozitler gözükmektedir.



Şekil 2.27 Üretilen sandviç kompozit numuneler

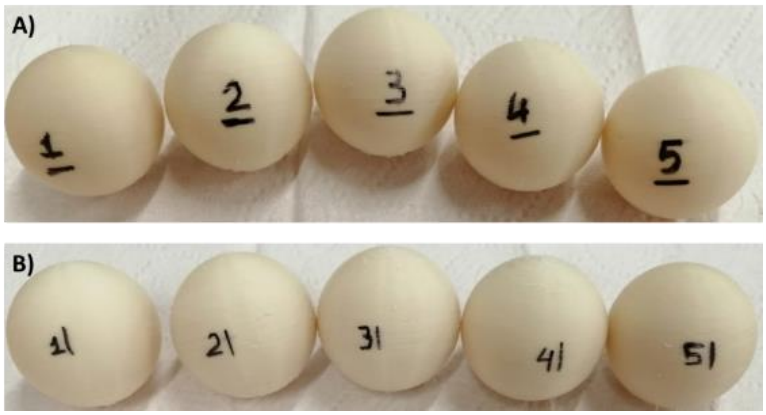
2.3 Test Faaliyetleri

2.3.1 Küresel Takviye Elemanına Uygulanan Basma Testi

Küresel takviye elemanları 3-D yazıcıda üretildiği için katman yönünün dayanıma etkisi olacaktır. Bu etkinin araştırılması için farklı açılarda basma testi uygulanabilir. Üretimdeki katman yönüne paralel ve dik olacak şekilde küresel takviye elemanlarına test uygulanır.

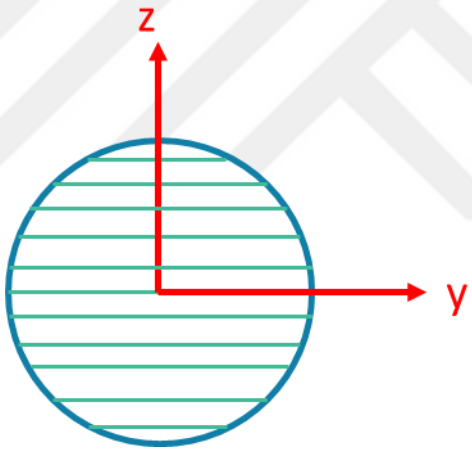
Test cihazı olarak Testometric marka çekme makinesi kullanıldı. Cihazın çeneleri değiştirilerek basma yüklemesine uygun hale getirildi. Küresel takviye elemanlarına basma yükü uygulanırken test hızı 1mm/dk (strain rate) olarak belirlendi. Alt çene sabit durarak ve üst çene dakikada 1 mm hareket ederek küresel cisimler sıkıştırılmıştır. Bu sıkıştırmada küresel numuneler üzerinde bası yükü uygulamıştır. Test sırasında, parça fırlaması riskine karşın koruyucu ekipman kullanıldı. Çift taraflı bant ile küresel test numuneleri test cihazının alt çenesine tutturuldu.

Şekil 2.28'de basma testi uygulanacak numuneler gözükmektedir. Kalıcı kalem ile numunelere numaraları verilmiştir ve test çenesine göre konumlanacak yönleri işaretlenmiştir.



Şekil 2.28 Katman yönüne göre a) paralel b) dikey işaretlenmiş Ø25 mm çaplı numuneler

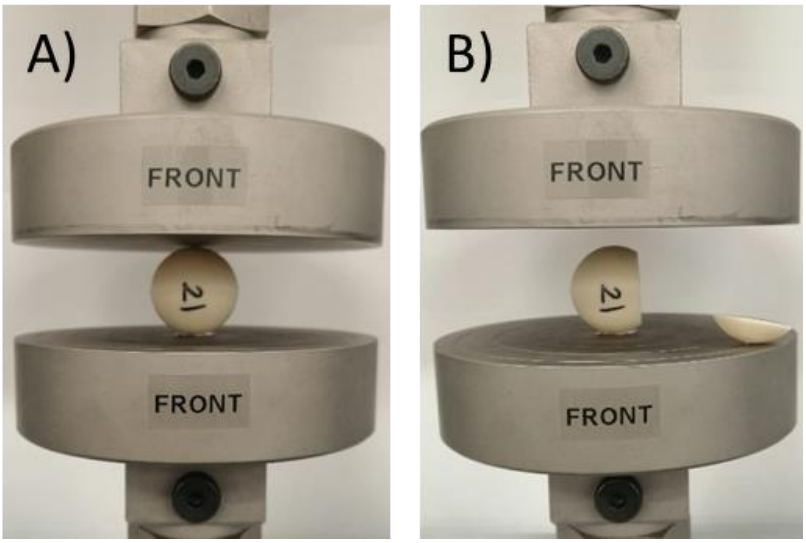
Şekil 2.29'da küresel takviye elemanlarının katmanlarını simgeleyen yatay çizgiler görülmektedir. Bu katman çizgileri referans alınarak kabul edilen eksen takımı da görülmektedir.



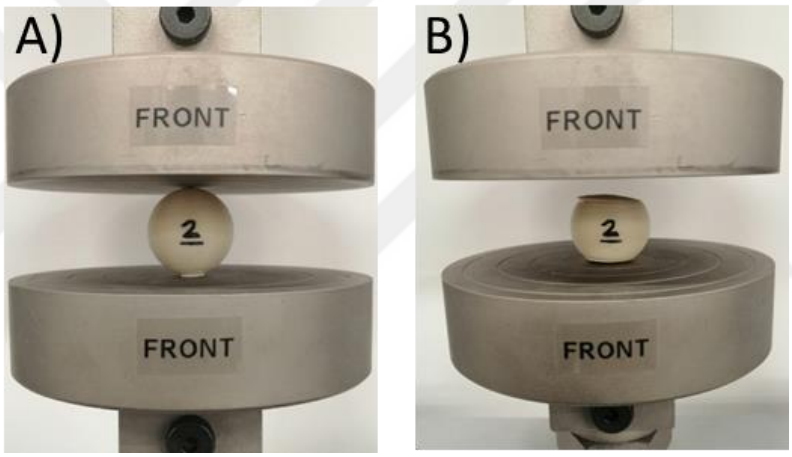
Şekil 2.29 KTE'nin katman yönüne göre eksen takımı

Şekil2.30 ve Şekil 2.31 'de, 2 numaralı ve Ø25 mm dış çaplı numunelerin test öncesi ve test sonrası görselleri verilmiştir.

Yatay ve düşey olacak şekilde Ø25, Ø30,Ø35 mm dış çapa sahip küresel takviye elemanlarına ayrı ayrı basma testleri uygulanmıştır. Test sonuçları ise 3.Bölüm içerisindedir.



Şekil 2.30 Katman yükselme yönüne göre yatay konumlanmış Ø25 mmm çaplı KTE'nın basma tesi (y-ekseninde basma testi) a)öncesi b)sonrası

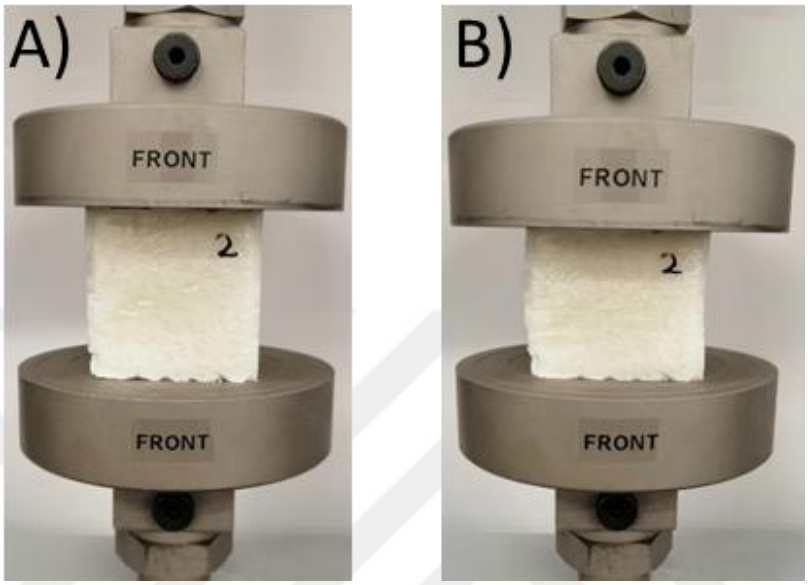


Şekil 2.31 Katman yükselme yönüne göre düşey konumlanmış Ø25 mmm çaplı KTE'nın basma tesi (z-ekseninde) a)öncesi b)sonrası

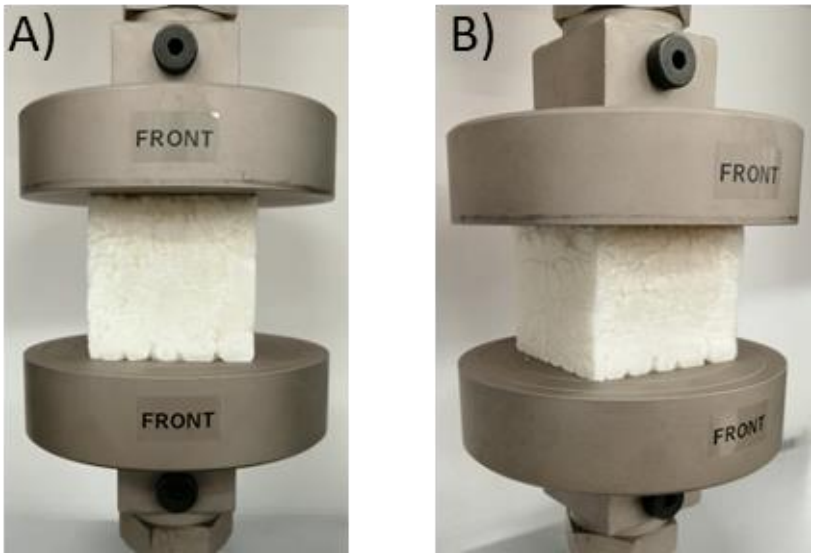
2.3.2 Poliüretan Köpük Basma Testi

Sandviç kompozit yapının bileşeni olan poliüretan köpük için basma testi çalışması yürütülmüştür. Hazırlanan numuneler yatay ve düşey olacak şekilde basma çeneleri arasında konumlandırılmıştır. Poliüretan köpüğün kalıp içinde şiştiği ve yükseldiği doğrultu z-ekseni olarak kabul edilmiştir. Kalıp tabanından poliüretan köpük sıkılmaya başlanmıştır. Kalıp eni doğrultusunda poliüretan köpük sıkılmaya devam edilerek katmanlar oluşturulmuştur. Kalıp eni boyunca olan doğrultu y-ekseni olarak kabul edilmiştir.

Test cihazı olarak Testometric marka çekme makinesi kullanıldı. Cihazın çeneleri değiştirilerek basma yüklemesine uygun hale getirildi. Basma testinde alt çene sabit üst çene hareketliydi. Üst çenenin hareket hızı 2,5 mm/dk (strain rate) olarak belirlenmiştir. Şekil 2.32 ve Şekil 2.33 'de bir poliüretan köpük numunesinin test öncesi ve sonrası görselleri mevcuttur.



Şekil 2.32 Y ekseni doğrultusunda basma testi uygulanan 2-Y numaralı poliüretan köpüğün a) test öncesi b)test sonrası hali



Şekil 2.33 Z ekseni doğrultusunda basma testi uygulanan 2-Z numaralı poliüretan köpüğün a) test öncesi b)test sonrası hali

2.3.3 PVC Numuneler için Çekme Testi

PVC malzemeden çekme numuneleri hazırlanmıştı. Şekil 2.34'te görüldüğü gibi Instron 4411 çekme cihazı kullanıldı. Test hızlarında; young modülünün hesaplanacağı kısım için çene hızı 1 mm/dk (strain rate), diğer kısımlar içinse çene hızı 50 mm/dk (strain rate) olacak şekilde belirlenmiştir. Alt çene sabittir. Şekil 2.35'te ortadan hasar alan bir numune gösterilmektedir.



Şekil 2.34 Çekme testinde kullanılan cihaz



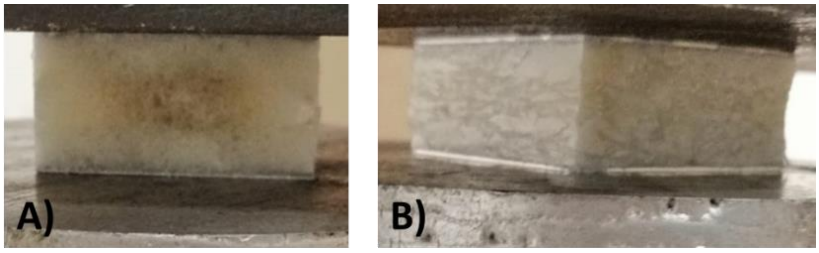
Şekil 2.35 Yaklaşık olarak ortasından hasar alan çekme numunesi

2.3.4 Sandviç Kompozit Numuneler için Basma Testi

Hazırlanan sandviç kompozitlere basma testi uygulanmıştır. DARTEC test cihazı kullanıldı. Alt çene sabit ve üst çene hızı 1 mm/dk (strain rate) olacak şekilde bası yüklemesi uygulanmıştır. Şekil 2.36'da kullanılan test cihazı gözükmektedir.

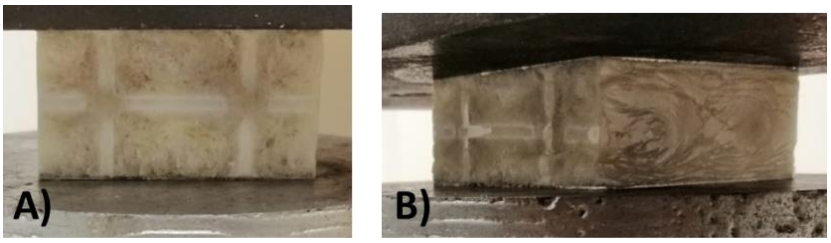


Şekil 2.36 Dartec test cihazında basma testi uygulamaya hazırlanan bir sandviç kompozitin görseli

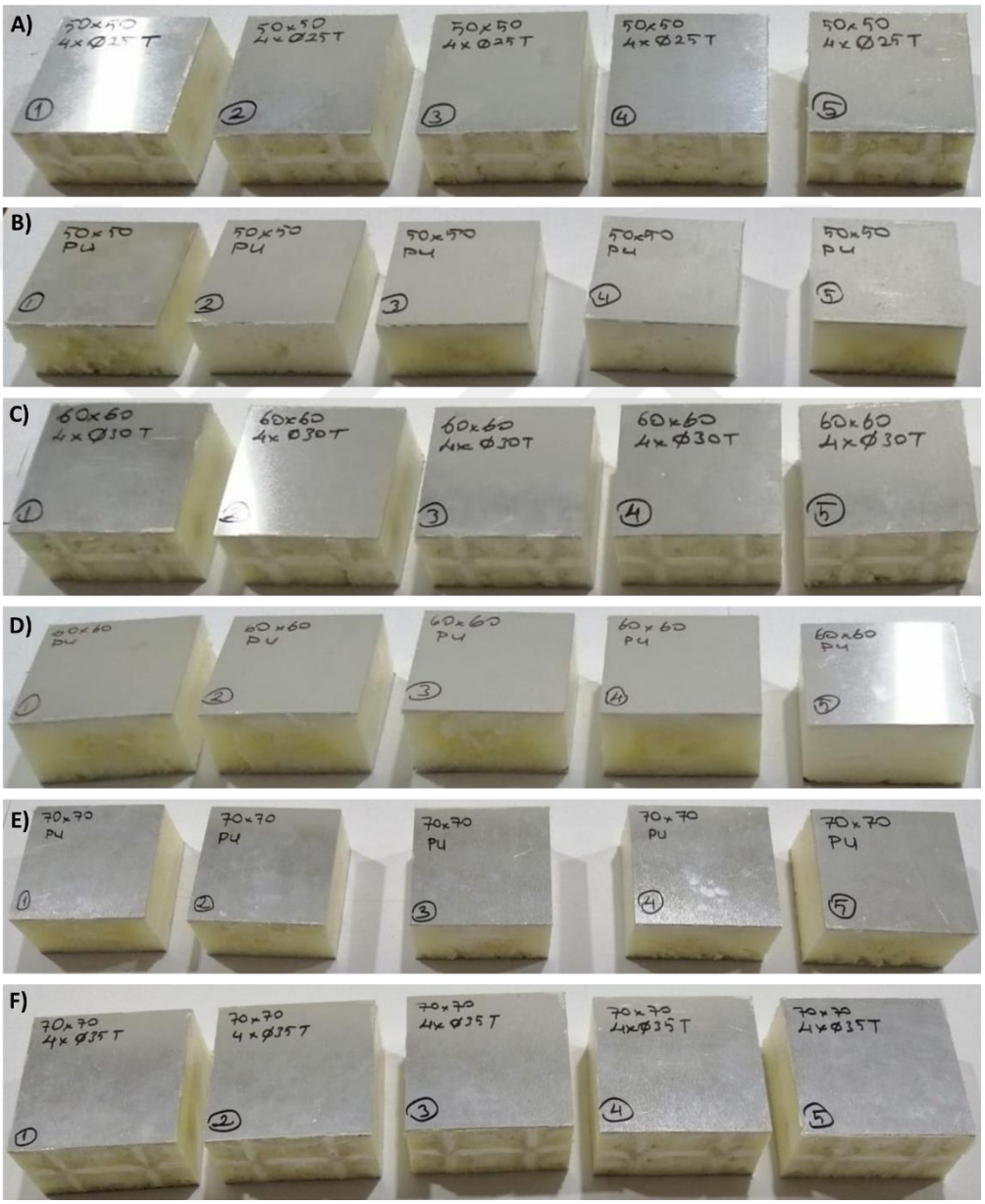


Şekil 2.37 Poliüretan köpükten çekirdeğe sahip sandviç kompozitin basma testi a)öncesi b)sonrası hali

35 mm yüksekliğindeki poliüretan köpükten çekirdeğe sahip sandviç kompozit bir numunenin test öncesi ve sonrası hali şekil 2.37'da gözükmektedir. Şekil 2.38'de de küresel takviye elemanı ve poliüretan çekirdek içeren sandviç kompozitin basma testi öncesi ve sonrası hali gözükmektedir. Şekil 2.38'de hazırlanan sandviç kompozit numuneler görülmektedir.



Şekil 2.38 Ø35 mm kte içeren sandviç kompozit numunenin basma testi a) öncesi b) sonrası hali

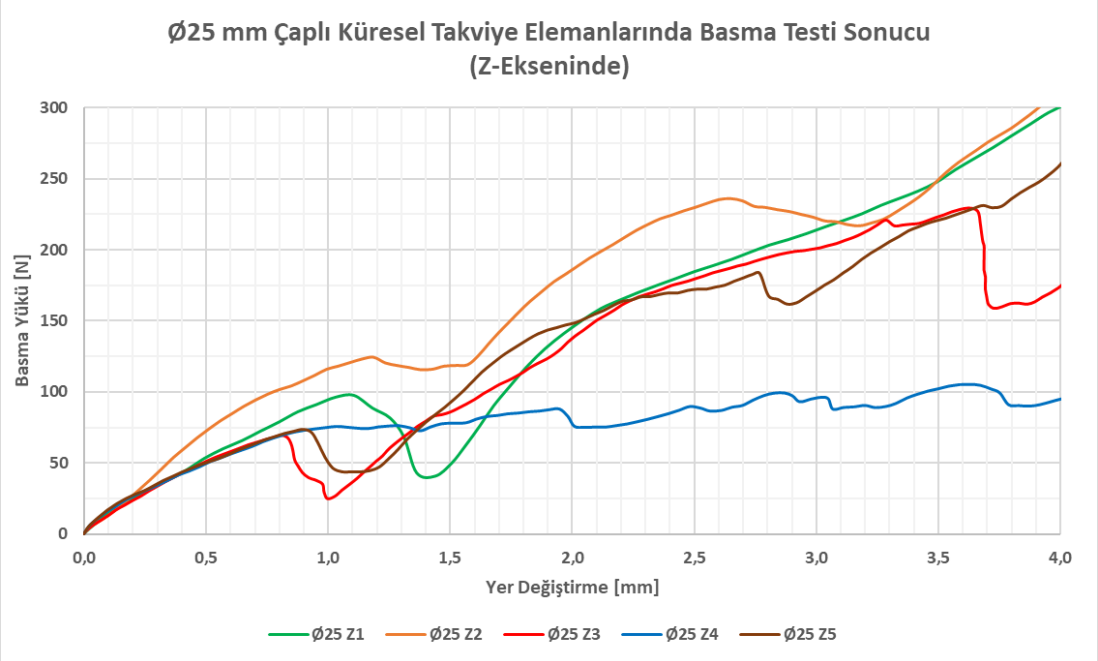


Şekil 2.39 Basma testi öncesi sandviç kompozit numuneler a) 50x50 KTE b) 50x50 PUF c) 60x60 KTE d) 60x60 PUF e) 70x70 KTE f) 70x70 PUF

3
TEST SONUÇLARI

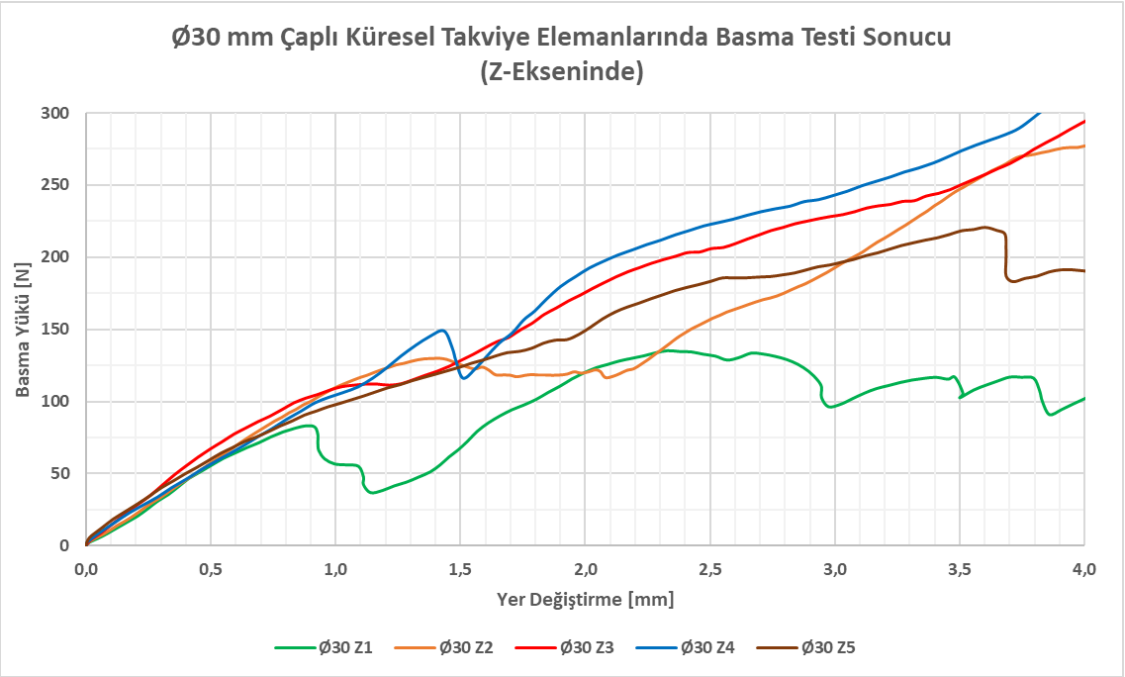
3.1 KTE için Uygulanan Basma Testlerinin Sonuçları

Küresel takviye elemanlarına basma testleri uygulanmıştı. Katman yükselme yönü referansına göre yatay ve düşey olarak elemanlar konumlanmıştı. Uygulanan bu testlerin sonuçları Şekil 3.1'den Şekil 3.6'ya kadar olan grafiklerde verilmiştir.

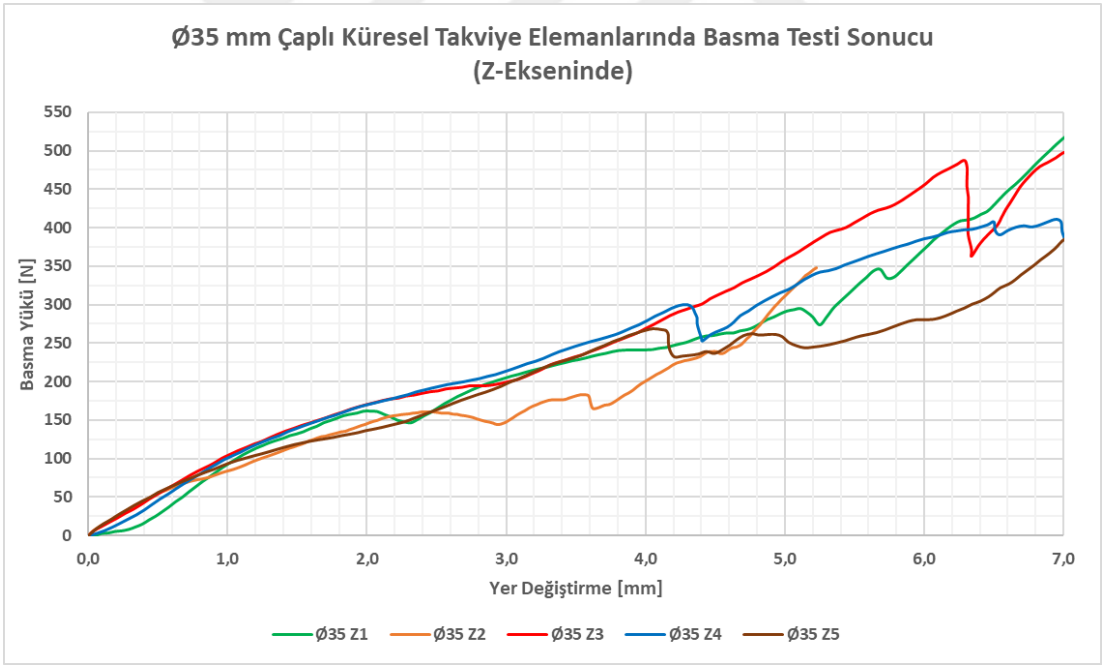


Şekil 3.1 Ø25 mm çaplı küresel takviye elemanlarına uygulanan z-ekseni basma testi sonuçları

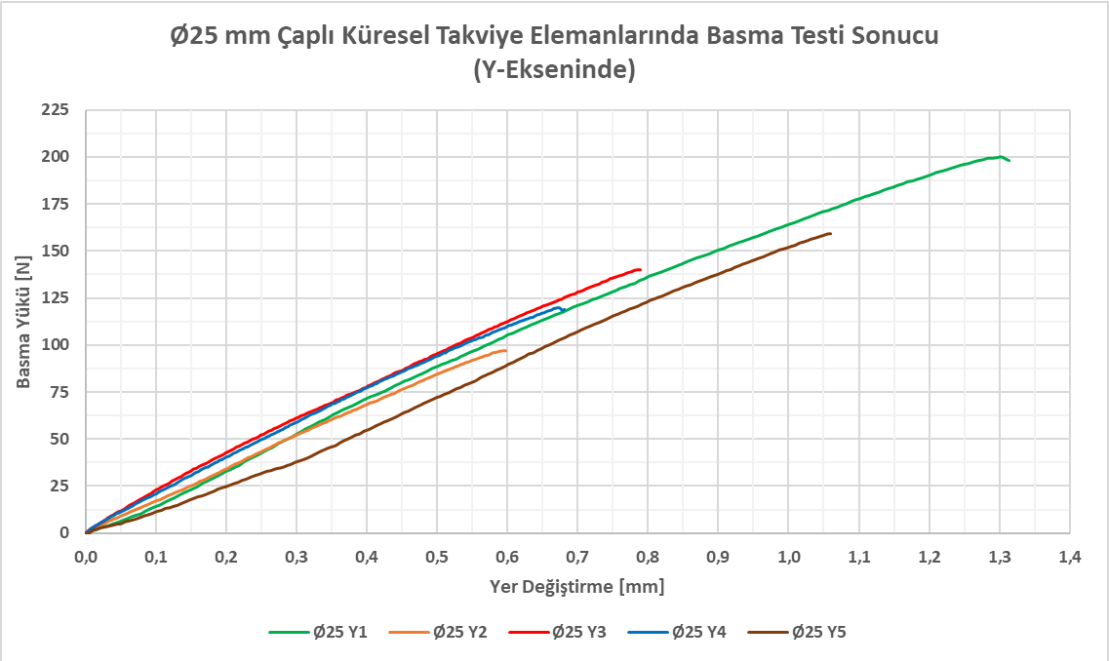
Basma çenesi ile küresel takviye elemanları basma yüklemesine maruz kalırken burkulma gözükmektedir. Küresel üst ve alt kısım ezilerek düzleşmektedir. Burkulmada küresel kısımda düzleşme olduktan sonra tekrar yük alabilir hale gelmektedir. Yük ilk önce azalmaktadır ve sonrasında tekrar artmaktadır. Bu durum, küresel takviye elemanları için Z ekseninde uygulanan basma testlerinin sonuçlarında görmek mümkündür. İncelendiğinde Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 de bahsedilen hususun olduğu görülmektedir.



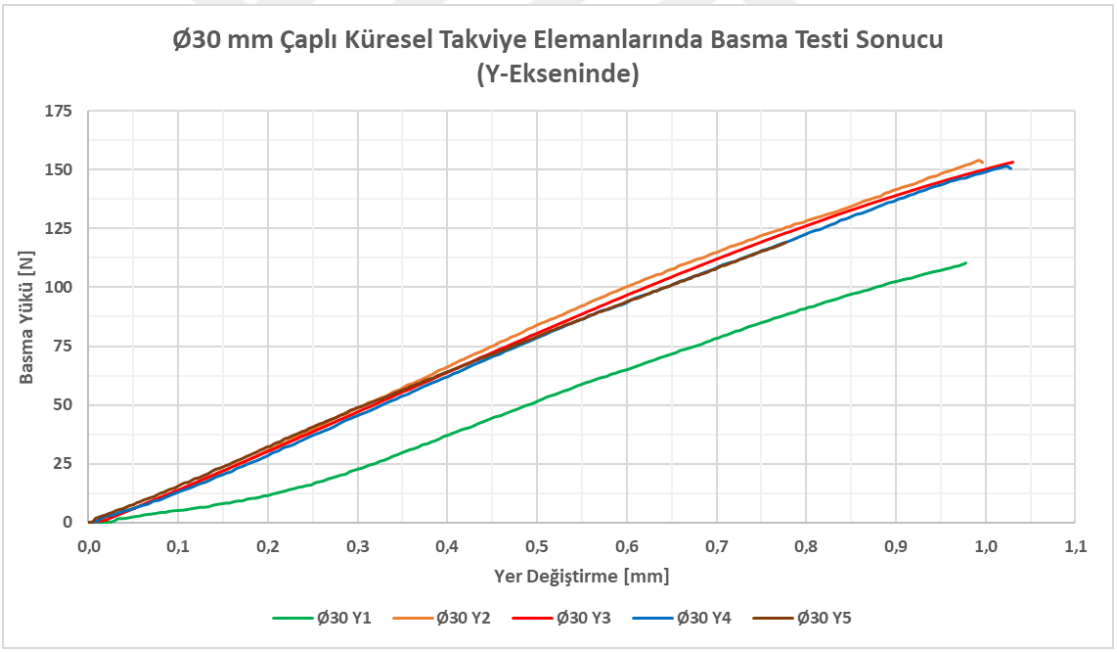
Şekil 3.2 Ø30 mm çaplı küresel takviye elemanlarına uygulanan z-ekseni basma testi sonuçları



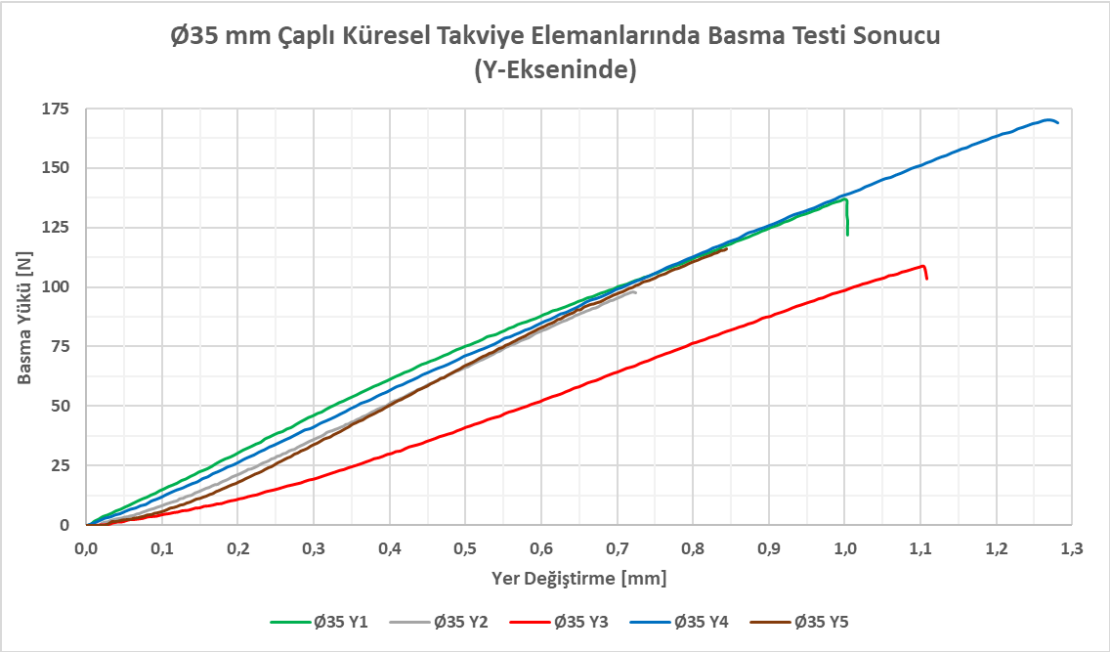
Şekil 3.3 Ø35 mm çaplı küresel takviye elemanlarına uygulanan z-ekseni basma testi sonuçları



Şekil 3.4 Ø25 mm çaplı küresel takviye elemanlarına uygulanan y-ekseni basma testi sonuçları



Şekil 3.5 Ø30 mm çaplı küresel takviye elemanlarına uygulanan y-ekseni basma testi sonuçları



Şekil 3.6 Ø35 mm çaplı küresel takviye elemanlarına uygulanan y-ekseni basma testi sonuçları

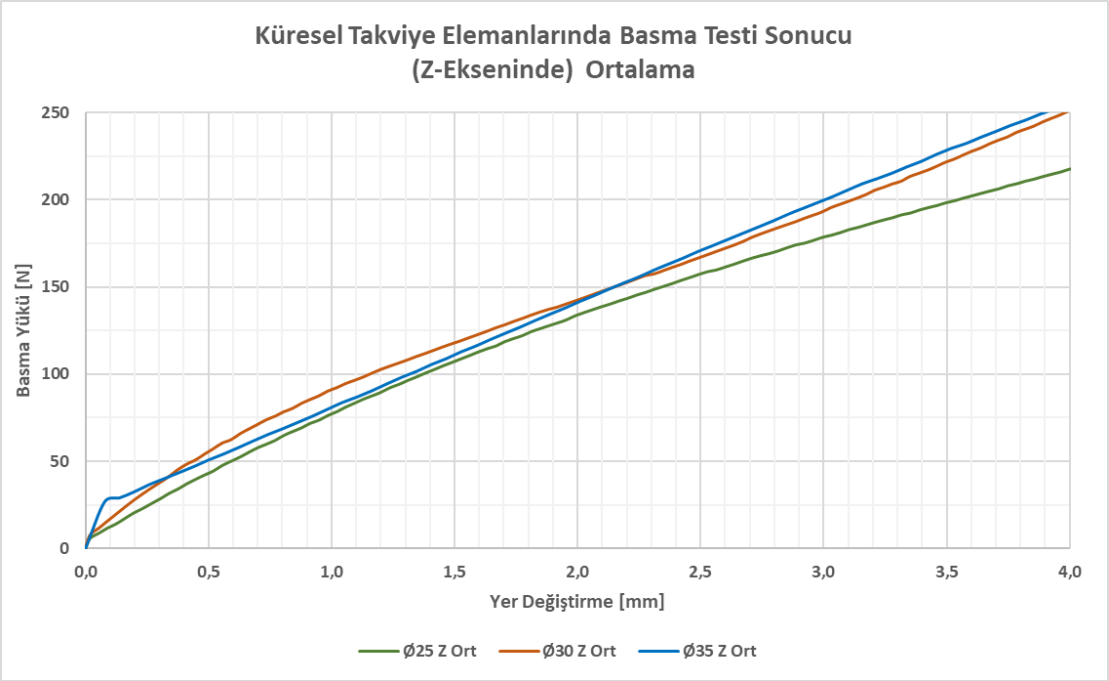
Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da farklı dış çaplardaki küresel takviye elemanlarının y ekseninde basma testi sonuçları paylaşılmıştır. Y ekseninde yüklenme hali lineere benzemektedir. Her farklı dış çap için beş numuneden bir tanesinin sonucu farklılık göstermektedir. Bu farklılık çift taraflı banttan kaynaklanmaktadır. Test esnasında küresel takviye elemanlarını tutturmak için çift taraflı bant kullanılmıştı. Çift taraflı bant ezilirken sonuca yansımıştır.

Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de Küresel takviye elemanlarının (farklı çaptaki) basma testi için sonuç ortalamaları alınmıştır. Bu grafikler çıkartılırken eğri uydurma işlemi de uygulanmıştır.

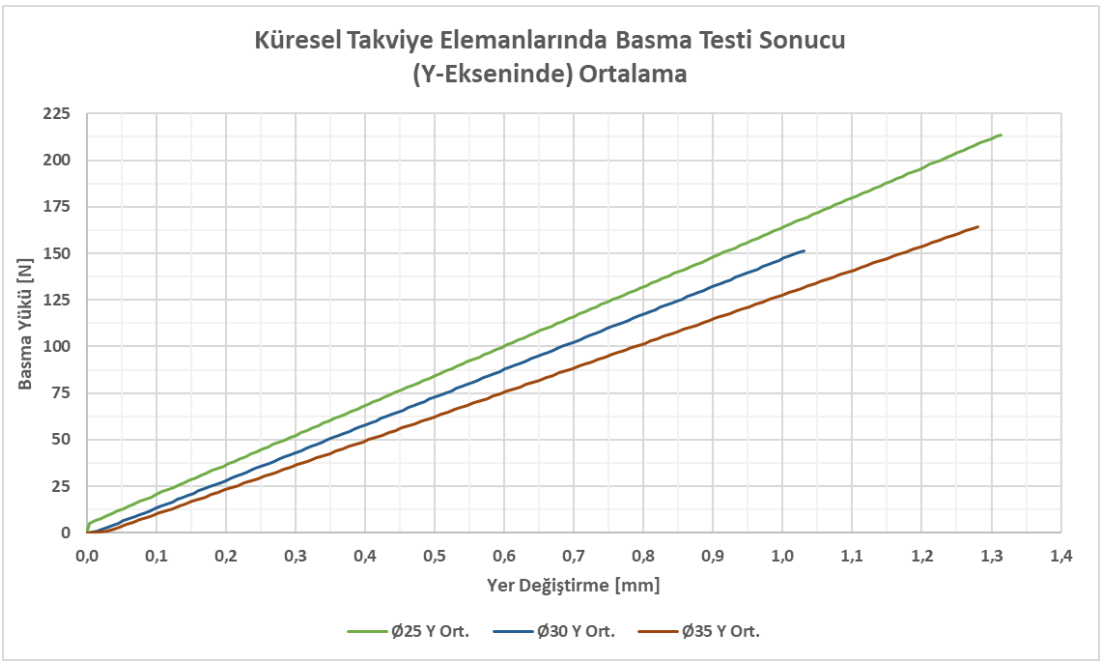
Y-yönlü basma yüklemesinde katmanlar arasından hasar oluşmuştur. Şekil 3.8'de boyut artışı ile hasar oluşma ihtimalinin arttığı görülmektedir. Böylelikle basma yükü, KTE'de dış çap artışı ve katman yönü ilişkilendirilebilir.

Şekil 3.7'de 1 ile 1,5 mm yer değişimi değer aralığını incelemeye alabiliriz. Çünkü bu aralıkta ilk burkulma aşamasına geçiş olmaktadır. Ø30 mm çapa sahip KTE, diğer çap değerlerine sahip KTE'lerden daha yüksek kuvvet ortalamasına sahiptir. Boyutun artışı devamlı olarak avantaj sağlamadığı bu grafikten görülmektedir. Ø35 mm dış çap değerine sahip KTE, verilen aralıkta kendinden daha küçük çaplı KTE'nin sağladığı basma kuvveti direncinden daha az direnç göstermiştir.

Şekil 3.8'de 0,7 ile 1,3 mm yer değişimi değer aralığı dikkate alınabilir. Bahsi geçen değer aralığında çap artışı oldukça basma yüklemesine karşın daha az direnç göstermektedir.



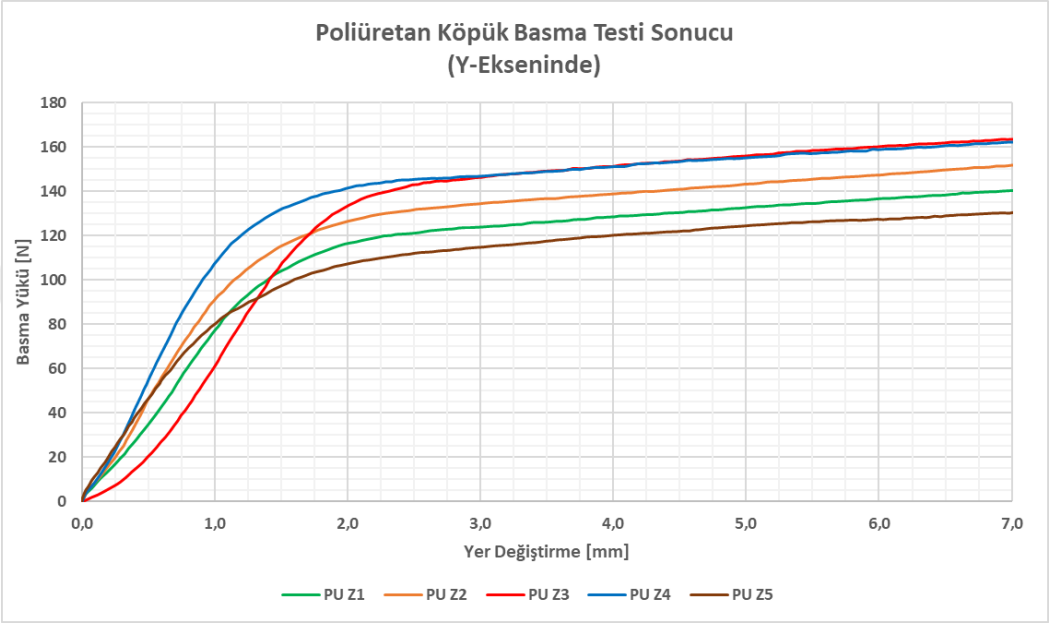
Şekil 3.7 Farklı çaptaki küresel takviye elemanlarının z ekseninde basma testi sonuçlarının ortalaması (eğri uydurma işlemi uygulanmıştır.)



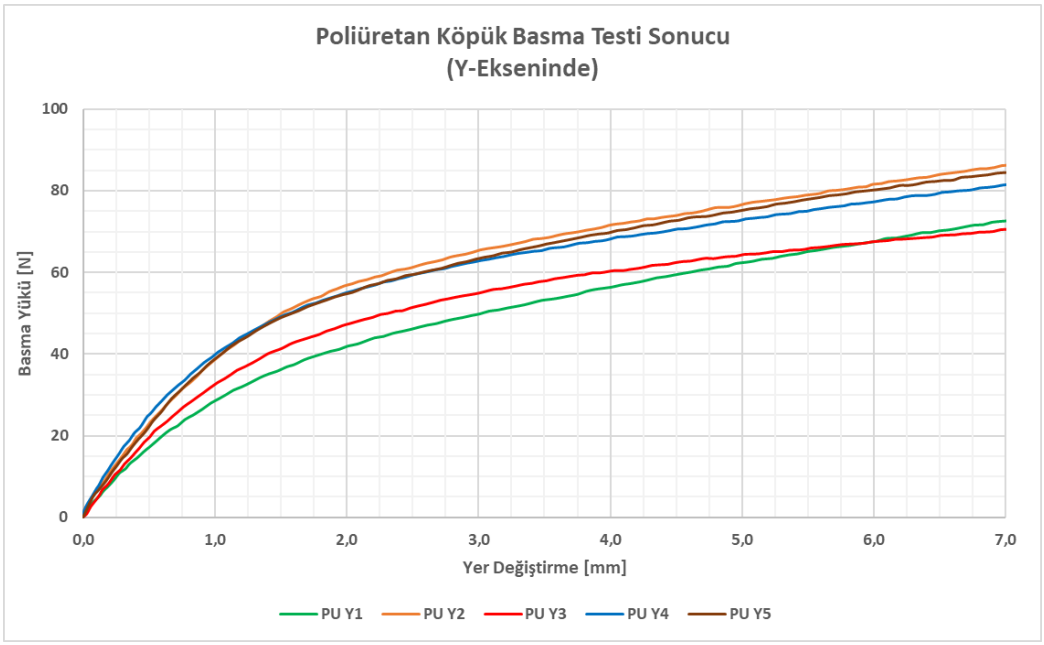
Şekil 3.8 Farklı çaptaki küresel takviye elemanlarının y ekseninde basma testi sonuçlarının ortalaması (eğri uydurma işlemi uygulanmıştır.)

3.2 Poliüretan Köpük Numunelerin Basma Testi Sonuçları

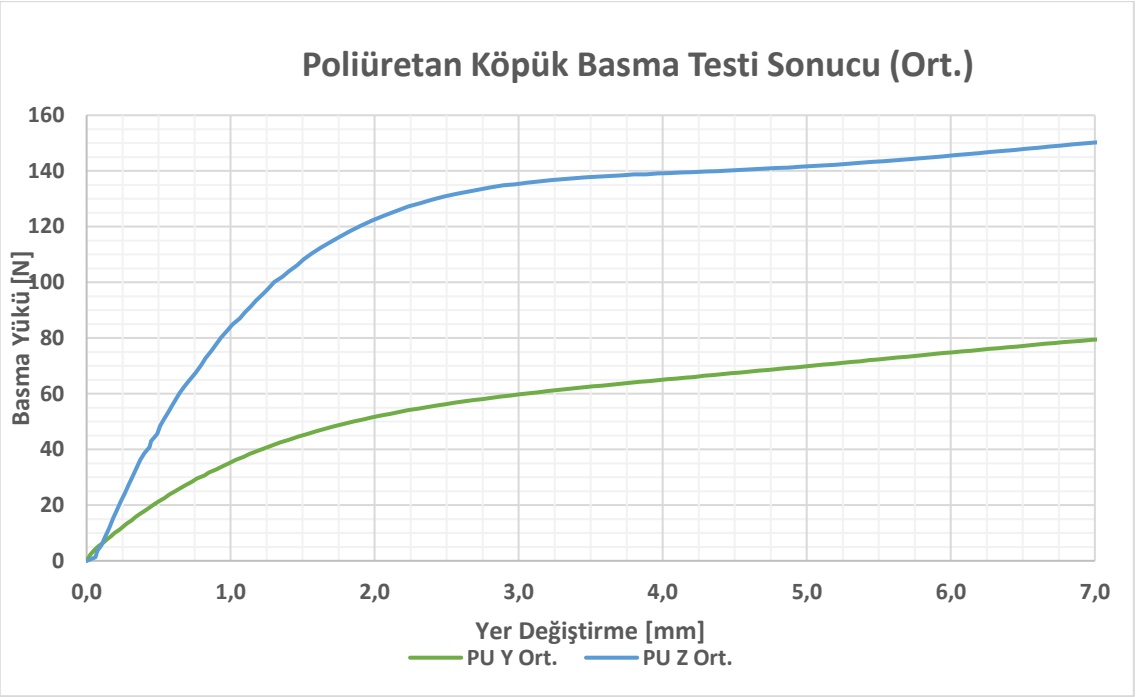
Poliüretan köpüklere, belirlenen z ve ye eksenlerinde basma testi uygulanmıştı. Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 'da numunelere uygulanan basma testi sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 3.9 Z ekseninde basma testi uygulanan poliüretan köpüklerin sonuçları



Şekil 3.10 Y ekseninde basma testi uygulanan poliüretan köpüklerin sonuçları



Şekil 3.11 Z ve y ekseninde basma testi uygulanan poliüretan köpük numunelerin sonuçlarının ortalamaları (eğri uydurma işlemi uygulanmıştır.)

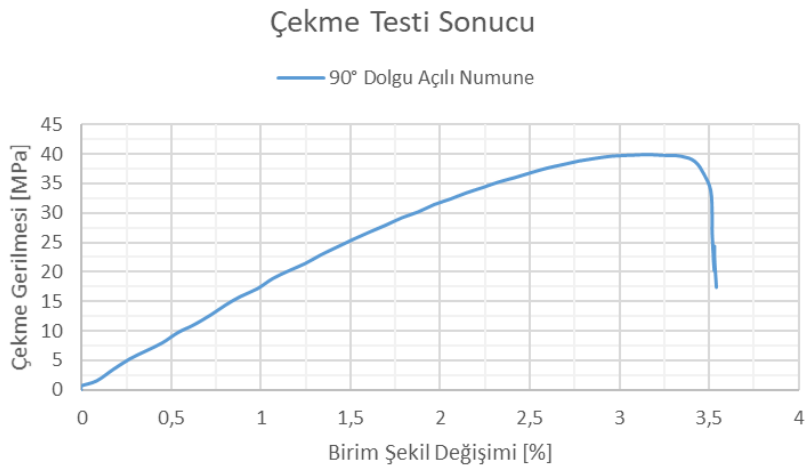
Şekil 3.11 'de poliüretan köpük numunelerin basma testi sonuçlarının ortalamaları alınmıştır. Ortalama değerleri grafiğe işlenirken eğri uydurma işlemi yapılmıştır. Çıkan eğrileri yorumlamak gerekir ise; z ekseninde poliüretan köpük malzemenin gösterdiği direnç, y eksenindekine göre daha yüksektir.

Üretin yapılırken köpüğün yükselme yönü yassı levhalara doğru olması avantaj sağlayabilir. Ancak üretim işleminde zorluk oluşması durumunda da dayanım azalmasını göze almak gerekebilir.

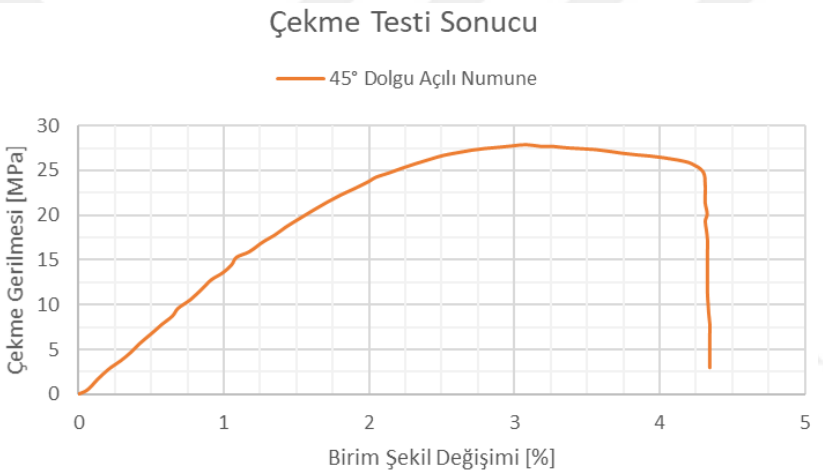
3.3 PVC Çekme Numunelerinin Test Sonuçları

Şekil 3.12 ile Şekil 3.14 arasında çekme testi uygulanan numunelerden sonuçlar paylaşılmıştır. Her bir dolgu açısından birer adet paylaşım yapılmıştır. Test verilerinden elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınarak Tablo 3.1 oluşturulmuştur.

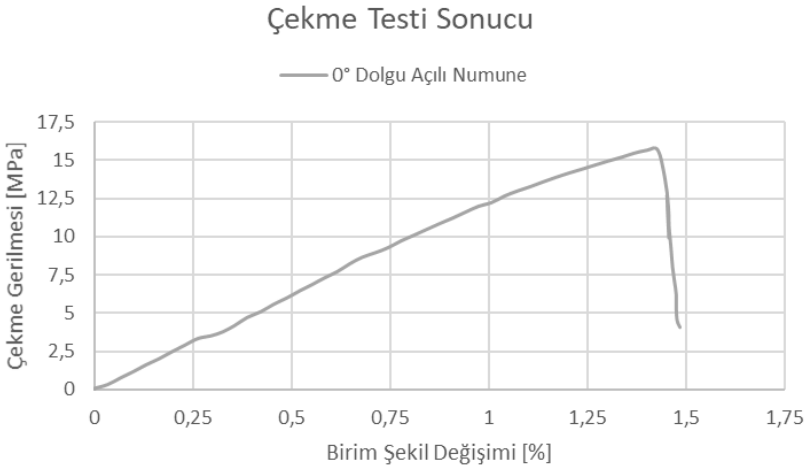
Tablo 3.1 'de gözüktüğü gibi çekme doğrultusunda dolgu açısı belirlenirse daha mukavemetli bir davranış görmekteyiz. Çekme yönünden uzaklaştıkça ortalama akma gerilmesi değerleri azalmaktadır.



Şekil 3.12 90° dolgu açılı PVC çekme numunelerinden bir tanesinin çekme testi sonucu



Şekil 3.13 45° dolgu açılı PVC çekme numunelerinden bir tanesinin çekme testi sonucu



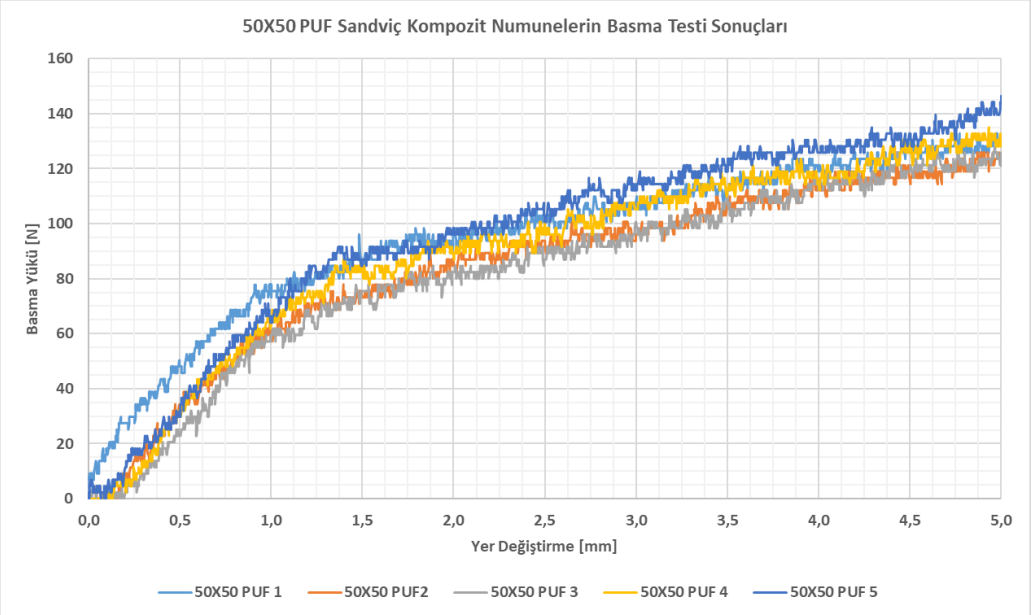
Şekil 3.14 0° dolgu açılı PVC çekme numunelerinden bir tanesinin çekme testi sonucu

Tablo 3.1 Çekme testi sonucunda ort. numune değerleri

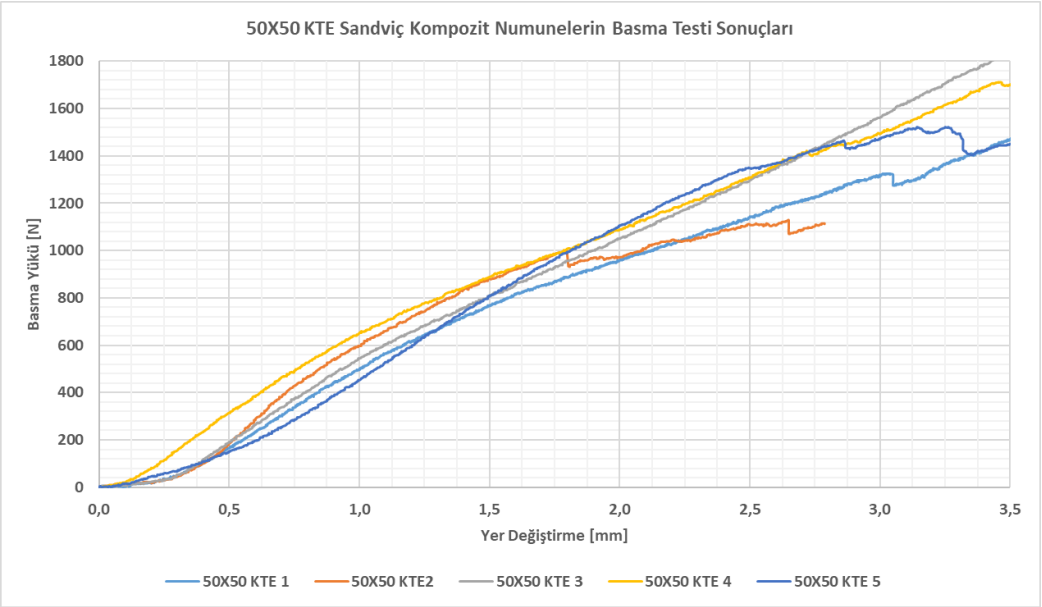
	Dolgu Açısı	Young Modülü Ort. [MPa]	Akma Sınırındaki Çekme Gerilmesi Ort. [Mpa]
∟	90°	2315	36,04
∠	± 45°	1405	24,4
—	0°	1386	15,76

3.4 Sandviç Kompozit Numunelerin Basma Testi Sonuçları

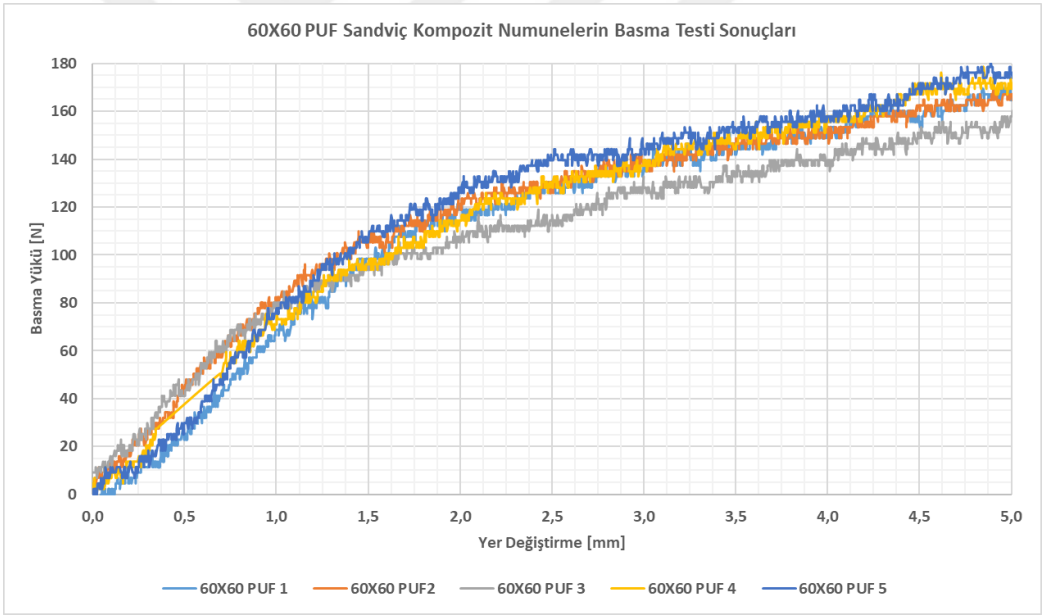
Çekirdek yapısındaki farklılıklar dikkate alındığında bu tez çalışmasında 6 tip numune grubu vardır. Bu gruplar KTE ve PUF içeren sandviç kompozitler olmak üzere iki ana başlığa ayrılabilir. Bu başlıklar altında da boyut farkından dolayı her biri 3 tipe ayrılmaktadır. Yapılan testlerin sonuçları Şekil 3.15 den Şekil 3.20'ye kadar verilmiştir.



Şekil 3.15 50x50 PUF çekirdekli sandviç kompozit numunelerin basma testi sonuçları



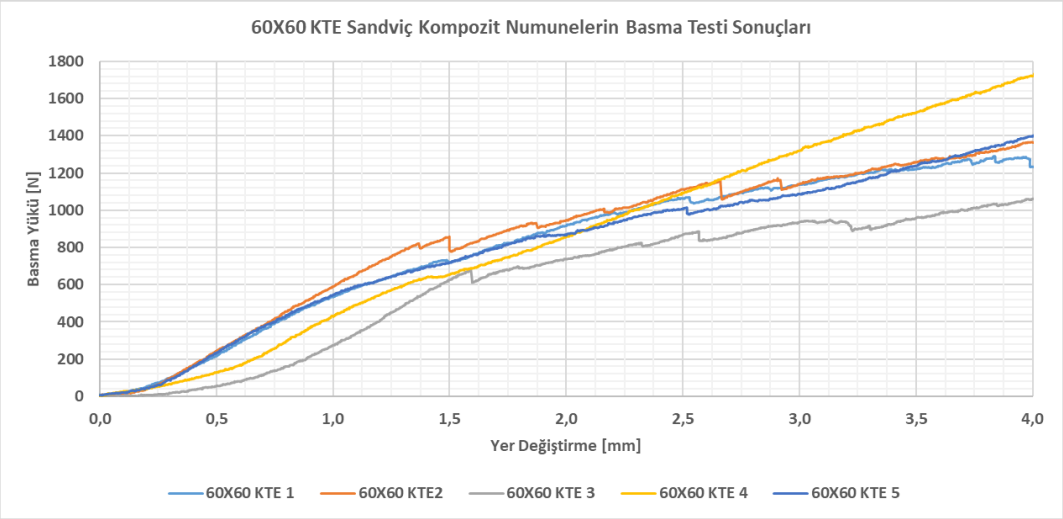
Şekil 3.16 50x50 KTE çekirdekli sandviç kompozit numunelerin basma testi sonuçları



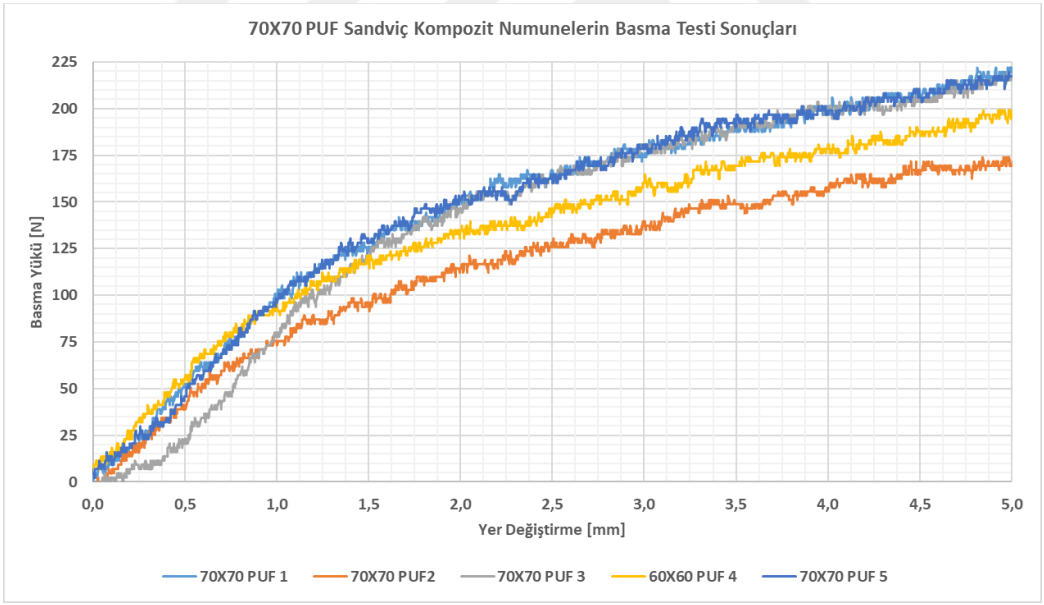
Şekil 3.17 60x60 PUF çekirdekli sandviç kompozit numunelerin basma testi sonuçları

Şekil 3.19 da 70x70 PUF çekirdekli numunelerin sonuçları görülmektedir. Bu sonuçlar arasında 3 numaralı numunenin ilk etapta farklı davranış sergilediği ve daha sonrasında ise diğer numunelerle benzer davranış sergilediği görülmektedir. Sandviç kompozit numunelerde ilk olarak 50x50x25 mm, sonrasında 60x60x30 mm ve en son 70x70x35 mm çekirdekli numuneler üretilmişti. Şişeden sıkma işlemi el ile yapıldığı için hassasiyet ayarlanamamış olabilir. Testte gaz kabarcığı

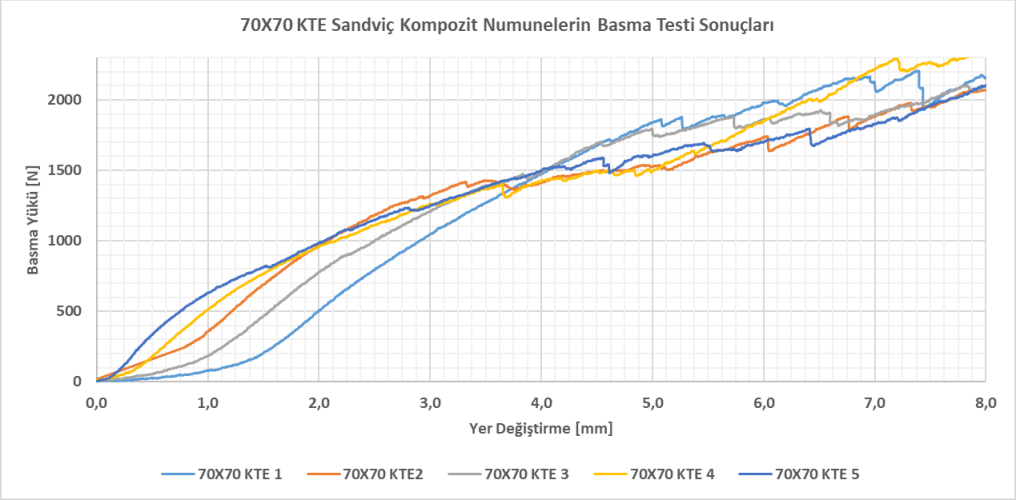
ilk etapta sıkışırken az direnç gösterdiği için 3 numaralı numune diğer numunelerden farklı davranış sergilemiş olabilir. Daha sonrasında sıkışma işlemi belirli seviyeye geldiği için benzer davranış sergilemiş olabilir.



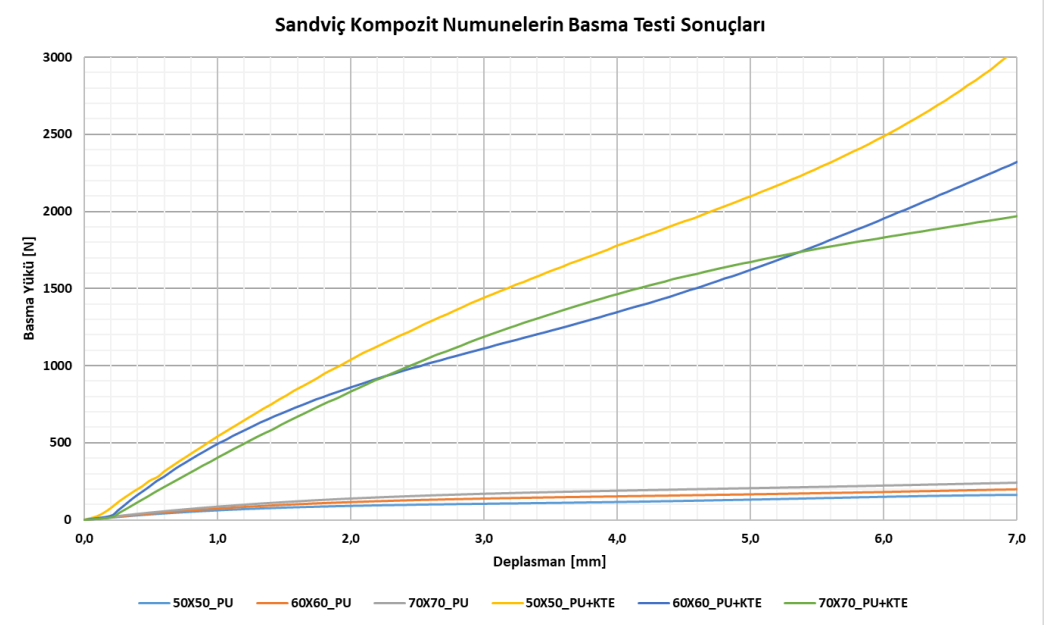
Şekil 3.18 60x60 KTE çekirdekli sandviç kompozit numunelerin basma testi sonuçları



Şekil 3.19 70x70 PUF çekirdekli sandviç kompozit numunelerin basma testi sonuçları



Şekil 3.20 70x70 KTE çekirdekli sandviç kompozit numunelerin basma testi sonuçları



Şekil 3.21 Sandviç kompozit numunelerin basma testi sonuçlarının ortalaması (eğri uydurma işlemi uygulanmıştır)

Şekil 3.21'de PUF ve KTE çekirdekli sandviç kompozit numunelerin boyutlarına göre sonuçlarının ortalaması alınmıştır. Şekil 3.21 incelendiğinde KTE içeren sandviç kompozitlerin, sadece poliüretan köpük içeren sandviç kompozitlere göre çok daha mukavemetli bir davranış sergiledikleri görülmektedir.

Tablo 3.2 Sandviç kompozitlerin ortalama ağırlıkları

Numune Tipi	Ort. Ağırlık [g]	Ağırlık Oran Katsayısı
50X50_PU	11,1	1
50X50_PU+KTE	21,6	1,95
60X60_PU	16,3	1,47
60X60_PU+KTE	31,5	2,85
70X70_PU	22,9	2,06
70X70_PU+KTE	44	3,97

Tablo 3.2'de üretilen sandviç kompozitlerin ağırlık ortalamaları verilmiştir. KTE içeren sandviç kompozitler tercih edilirse dayanım artışının yanı sıra ağırlık artışının da olacağı göz önüne alınmalıdır. Aynı en ve boydaki çekirdek ölçüsü baz alınırsa KTE içeren sandviç kompozitler, sadece poliüretan köpük içeren sandviç kompozitlere göre yaklaşık 2 katı ağırlığa sahip olduğu ölçümler ile tespit edilmiştir.

4
SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında sandviç kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen bu sandviç kompozitlerin çekirdek yapısında farklı geometriler ve malzemeler kullanılmıştır. Bu çekirdek yapısına göre iki ana grup tanımlanabilir. Bir tanesi sadece poliüretan köpük içeren sandviç kompozit yapılar ve diğeri küresel takviye elemanları ile desteklenmiş poliüretan çekirdekli sandviç kompozit yapılardır. Bu iki ana grup, üç alt başlığa daha ayrılabilir. Bu alt başlıklar çekirdek boyut farklılığından oluşmaktadır. Sırası ile çekirdek ölçüleri 50x50x25 mm, 60x60x30 mm ve 70x70x35 mm'dir.

Sandviç kompozit malzemeler basma testine tabi tutularak değerlendirmeye alınmıştır. Yapılan incelemede küresel takviye elemanı ile desteklenmiş çekirdeğe sahip sandviç kompozit numuneler, sadece poliüretan köpük içeren sandviç kompozit numunelere göre daha mukavemetli bir davranış sergilemiştir. Küresel takviye elemanları basma yüklemesi altında burkulma davranışı sergilediği için ani kuvvet düşüşleri de test sonuçlarında görülmüştür. Küresel takviye elemanları ile desteklenmiş sandviç kompozitler, aynı ebatlardaki sadece poliüretan köpük içeren sandviç kompozitlere göre yaklaşık 2 kart ağırdır.

Farklı dış çap değerine sahip küresel takviye elemanları ile desteklenmiş sandviç kompozit numuneler oluşturulmuştu. Ø25 mm dış çapa sahip numune, diğer küresel takviye elemanları ile desteklenmiş numunelere göre daha dayanımlıdır. Sandviç kompozit numunelerin test sonuçlarının ortalaması alındığı grafikten bu yorum çıkarılmıştır. Çap artışı ile burkulma belirginleştiği için Ø35 ve Ø30 mm dış çapa sahip küresel takviye elemanlı sandviç kompozitler daha az dayanım göstermiş olabilir.

Sandviç kompozitlerin yanı sıra bileşenleri de testlere tabi tutulmuştur. Test bileşenlerinden olan poliüretan köpük için iki farklı doğrultuda basma testi uygulanmıştı. Sonuçlarına göre köpüğün şişerek yükseldiği doğrultu diğer belirlenen doğrultuya göre daha mukavemetli davranmıştır.

PVC filament kullanılarak 3-D yazıcıda çekme numuneleri hazırlanmıştı. Dolgu açısı değiştirilerek numuneler üretilmişti. Katman içinde değişen yönlenmelerin çekme testinde etkisi incelenmiştir. Çekme doğrultusundaki numuneler daha mukavemetli olduğu görülmüştür. Çekme doğrultusundan uzaklaştıkça dayanım azalmaktadır.

3-D yazıcıda içi boş küresel elemanlar üretilmiş ve üretilen elemanlar basma testine tabi tutulmuştu. Katmanların yükseldiği doğrultuya göre her bir numune işaretlenip eksen tanımlaması yapılmıştı. Z ekseni boyunca yapılan basma testlerinde parçanın ezilerek iç içe geçtiği ve burkulmaların olduğu gözlemlenmiştir. Y ekseninde basma yüklemesi uygulanan numunelerde ise katmanlar arasından ayrılma gözlemlenmiştir. İki eksende de sergilenen mekanik davranış farklıdır.

Sandviç kompozit malzemeler de üretilirken yukarıdaki husus dikkate alınmıştır. Katman düzlemleri yüzey levhasına paralel olacak şekilde konumlandırılmaya çalışılmıştır.

3-D yazıcıda yapılacak üretimlerde; katman yönü, dolgu açısı gibi parametrelere dikkat etmemiz gerekmektedir. Sandviç kompozitte yüzey levhası yönünde uygulanacak basma yüklemelerinde, çekirdek bileşeni yapının esas dayanımını sergilemektedir. İçi boş küresel cisimlerde sadece dış çap artışı, yapının dayanımını artırmamaktadır. Dış çap artışı ile birlikte burkulma riski artmaktadır.

KAYNAKÇA

[1] P. Guggilla and A. Batra, “Novel Electroceramic: Polymer Composites - Preparation, Properties and Applications,” 2011.

[2] N. Vijay, V. Rajkumara, and P. Bhattacharjee, “Assessment of Composite Waste Disposal in Aerospace Industries,” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 35, pp. 563–570, 2016, doi: https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.041.

[3] B. V. Ramnath, C. Elanchezhian, V. M. Manickavasagam, R. S. Narayanan, R. Sudharshan, and G. Pugazhendhi, “A REVIEW ON SANDWICH COMPOSITES AND THEIR ADVANCEMENTS,” *Mater. Today Proc.*, vol. 16, pp. 1146–1151, 2019, doi: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.207.

[4] K. W. Ding, G. Wang, and W. Y. Yin, “Application of Composite Sandwich Panels in Construction Engineering,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 291–294, pp. 1172–1176, Feb. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.291-294.1172.

[5] A. Zinno, E. Fusco, A. Prota, and G. Manfredi, “Multiscale approach for the design of composite sandwich structures for train application,” *Compos. Struct.*, vol. 92, no. 9, pp. 2208–2219, 2010, doi: 10.1016/j.compstruct.2009.08.044.

[6] G. Palomba, G. Epasto, and V. Crupi, “Lightweight sandwich structures for marine applications: a review,” *Mech. Adv. Mater. Struct.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–26, 2021, doi: 10.1080/15376494.2021.1941448.

[7] A. S. Herrmann, P. C. Zahlen, and I. Zuardy, “Sandwich Structures Technology in Commercial Aviation,” in *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials*, 2005, pp. 13–26.

[8] K. F. Karlsson and B. TomasÅström, “Manufacturing and applications of structural sandwich components,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 28, no. 2, pp. 97–111, 1997, doi: https://doi.org/10.1016/S1359-835X(96)00098-X.

[9] T. Bitzer, *Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications And Testing*. 1997.

[10] O. T. Thomsen, “Sandwich Materials for Wind Turbine Blades — Present and Future,” *J. Sandw. Struct. Mater.*, vol. 11, no. 1, pp. 7–26, 2009, doi: 10.1177/1099636208099710.

[11] T. Khan, V. Acar, M. R. Aydin, B. Hülagü, H. Akbulut, and M. Ö. Seydibeyoğlu, “A review on recent advances in sandwich structures based on polyurethane foam cores,” *Polym. Compos.*, vol. 41, no. 6, pp. 2355–2400, 2020, doi: 10.1002/pc.25543.

[12] Teknopanel, “Çatı ve Cephe Panelleri Kataloğu.” https://www.teknopanel.com.tr/Upload/DocumentDocuments/Orginal/Teknopanel_Sandwich_Panel_Catalog_TR_EN.pdf (Erişim Tarihi 02.05.2022).

[13] Nebosan, “NBS 38/151 Alüminyum Trapez Çatı Paneli Teknik Dokümanı.”

https://nebosan.com.tr/urunlerimiz/aluminyum-trapez/ (Erişim Tarihi 11.05.2022).

[14] AssanPanel, "R3 Çatı Paneli Teknik Dokümanı." https://www.assanpanel.com/-/media/files/pdf/urunler/sandivic-paneller/cati-paneli/2019/10/assan-panel-r3-cati-paneli.ashx?la=tr-tr&hash=F7D7C71015502F436B48659B99753853A3EF8728 (Erişim Tarihi 12.05.2022).

[15] B. Manujesh, V. Rao, and M. S. Aan, "Moisture absorption and mechanical degradation studies of polyurethane foam cored E-glass-reinforced vinyl-ester sandwich composites," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 33, no. 5, pp. 479–492, Mar. 2014, doi: 10.1177/0731684413503720.

[16] W. Ma and R. Elkin, *Sandwich Structural Composites*. Boca Raton: CRC Press, 2021.

[17] L. Yang, O. Harrysson, H. West, and D. Cormier, "A Comparison of Bending Properties for Cellular Core Sandwich Panels," *Mater. Sci. Appl.*, vol. 04, no. 08, pp. 471–477, 2013, doi: 10.4236/msa.2013.48057.

[18] A. S. Joshi, "Study of aluminum honeycomb sandwich composite structure for increased specific damping," Purdue Üniversitesi, 2014.

[19] I. Ivañez, L. M. Fernandez-Cañadas, and S. Sanchez-Saez, "Compressive deformation and energy-absorption capability of aluminium honeycomb core," *Compos. Struct.*, vol. 174, pp. 123–133, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.056.

[20] Li, T. T., Xing, M., Wang, H., Huang, S. Y., Fu, C., Lou, C. W., & Lin, J. H., "Nitrogen/phosphorus synergistic flame retardant-filled flexible polyurethane foams: Microstructure, compressive stress, sound absorption, and combustion resistance," *RSC Adv.*, vol. 9, no. 37, pp. 21192–21201, 2019, doi: 10.1039/c9ra02332a.

[21] H. Tuwair, J. Volz, M. A. ElGawady, K. Chandrashekhara, and V. Birman, "Modeling and Analysis of GFRP Bridge Deck Panels Filled with Polyurethane Foam," *J. Bridg. Eng.*, vol. 21, no. 5, p. 04016012, May 2016, doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000849.

[22] F. Saint Michel, L. Chazeau, J.-Y. Cavaillé, and E. Chabert, "Mechanical properties of high density polyurethane foams: I. Effect of the density," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 66, pp. 2700–2708, 2006, doi: 10.1016/j.compscitech.2006.03.009.

[23] G. K. Latinwo, D. S. Aribike, A. A. Susu, and S. A. Kareem, "Effects of different filler treatments on the morphology and mechanical properties of flexible polyurethane foam composites," *Nat. Sci.*, vol. 8, no. 6, pp. 23–31, 2010.

[24] F. Saint-Michel, L. Chazeau, and J. Y. Cavaillé, "Mechanical properties of high density polyurethane foams: II Effect of the filler size," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 66, no. 15, pp. 2709–2718, 2006, doi: 10.1016/j.compscitech.2006.03.008.

[25] Mane, J., Chandra, S., Sharma, S., Ali, H., Chavan, V., Manjunath, B., & Patel, R., "Mechanical Property Evaluation of Polyurethane Foam under Quasi-static and Dynamic Strain Rates- An Experimental Study," *Procedia Eng.*, vol. 173, pp. 726–731, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2016.12.160.

[26] N. Sidek, I. A. A. Bakar, A. A. Azman, A. S. A. Rahman, and W. A. Austin, "Strength characteristic of polyurethane with variation of polyol to isocyanate mix ratio : A numerical analysis," *Proc. - 2017 IEEE 2nd Int. Conf. Autom. Control Intell. Syst. I2CACIS 2017*, vol. 2017-Decem, no. October, pp. 31–34, 2017, doi: 10.1109/I2CACIS.2017.8239028.

[27] A. Jędral, "Review of Testing Methods Dedicated for Sandwich Structures with Honeycomb Core," *Trans. Aerosp. Res.*, vol. 2019, no. 2, pp. 1–14, 2019, doi: doi:10.2478/tar-2019-0006.

[28] M. Aslan, O. Güler, and Ü. Alver, "The Investigation of the Mechanical Properties of Sandwich Panel Composites with Different Surface and Core Materials," *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, vol. 24, no. 6, pp. 1062–1068, 2018, doi: 10.5505/pajes.2018.37605.

[29] Y. Zhang, Z. Zong, Q. Liu, J. Ma, Y. Wu, and Q. Li, "Static and dynamic crushing responses of CFRP sandwich panels filled with different reinforced materials," *Mater. Des.*, vol. 117, pp. 396–408, 2017, doi: https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.01.010.

[30] Akfix, "820 B1 Yangına Karşı Dayanıklı Poliüretan Köpük Teknik Bilgi Formu,"2015.https://www.akfix.com.tr/public/uploads/Dosyalar/tds/tr/pu-kopukler/820_B1_Fire_Rated_Pu_Foam--TDS_TR.pdf (Erişim Tarihi 14.05.2022).

[31] M. H. M. Ali, H. A. Rahman, S. H. Amirnordin, and N. A. Khan, "Eco-friendly flame-retardant additives for polyurethane foams: A short review," *Key Eng. Mater.*, vol. 791, pp. 19–28, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.791.19.

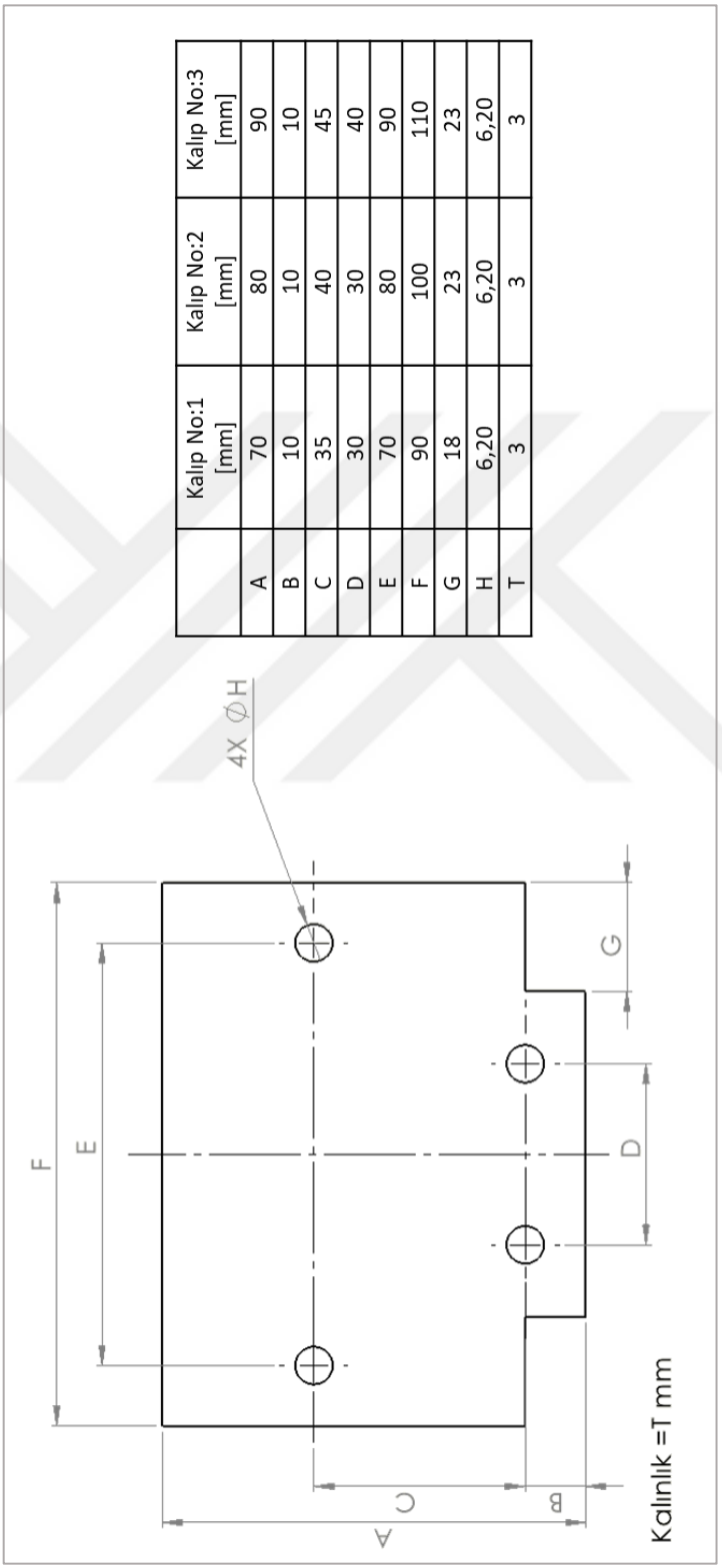
[32] P. M. Visakh, A. O. Semkin, I. A. Rezaev, and A. V. Fateev, "Review on soft polyurethane flame retardant," *Constr. Build. Mater.*, vol. 227, p. 116673, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.116673.

[33] N. Erdem, S., Arıoğlu, "Polimer Çatı Malzemelerinin Yangın Karşısında Davranışlarının İrdelenmesi," in *8. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*, 2016, pp. 133–143, [Online]. Available: http://catider.org.tr/pdf/sempozyum8/16-POLIMER-CATI-MALZEMELERININ-YANGIN-KARSISINDA.pdf.

[34] Hrituc, A., Mihalache, A., Mares, M., Coteata, M., Dodun, O., Nagit, G., & Slatineanu, L., "Mechanical behaviour of 3D printed PLA hollow spherical parts under axial compression," *Mater. Plast.*, vol. 57, no. 1, pp. 13–20, 2020, doi: 10.37358/MP.20.1.5307.

[35] F. Usta, H. S. Türkmen, and F. Scarpa, "Low-velocity impact resistance of composite sandwich panels with various types of auxetic and non-auxetic core structures," *Thin-Walled Struct.*, vol. 163, p. 107738, 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.107738.

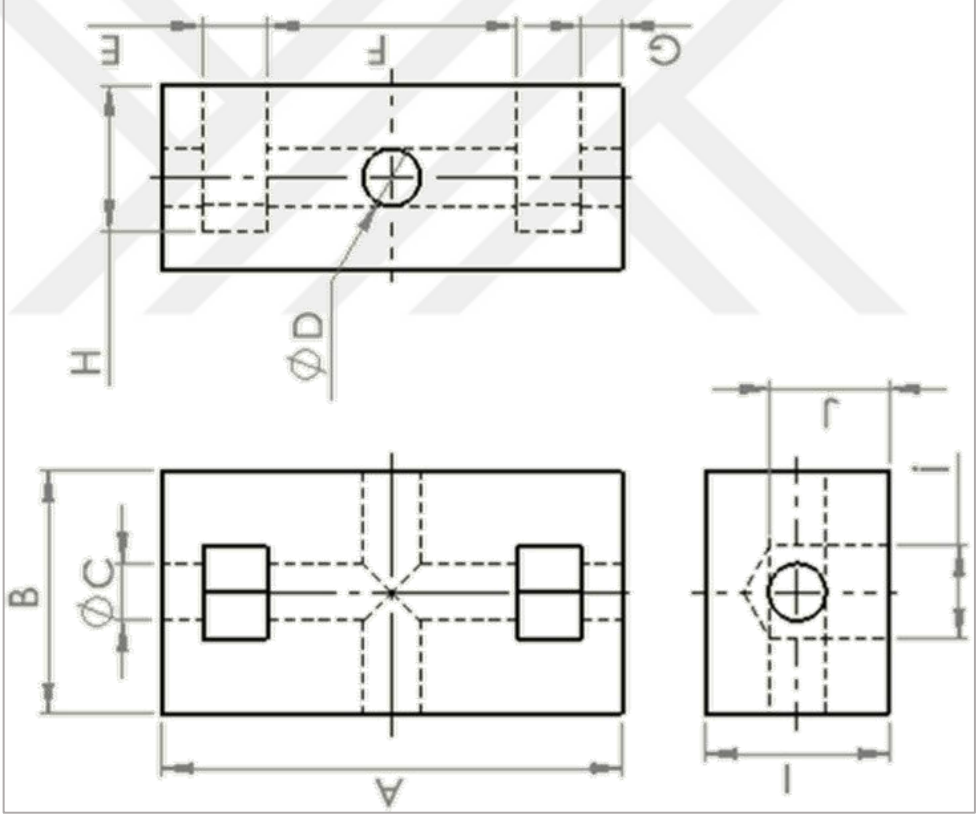
A
EK



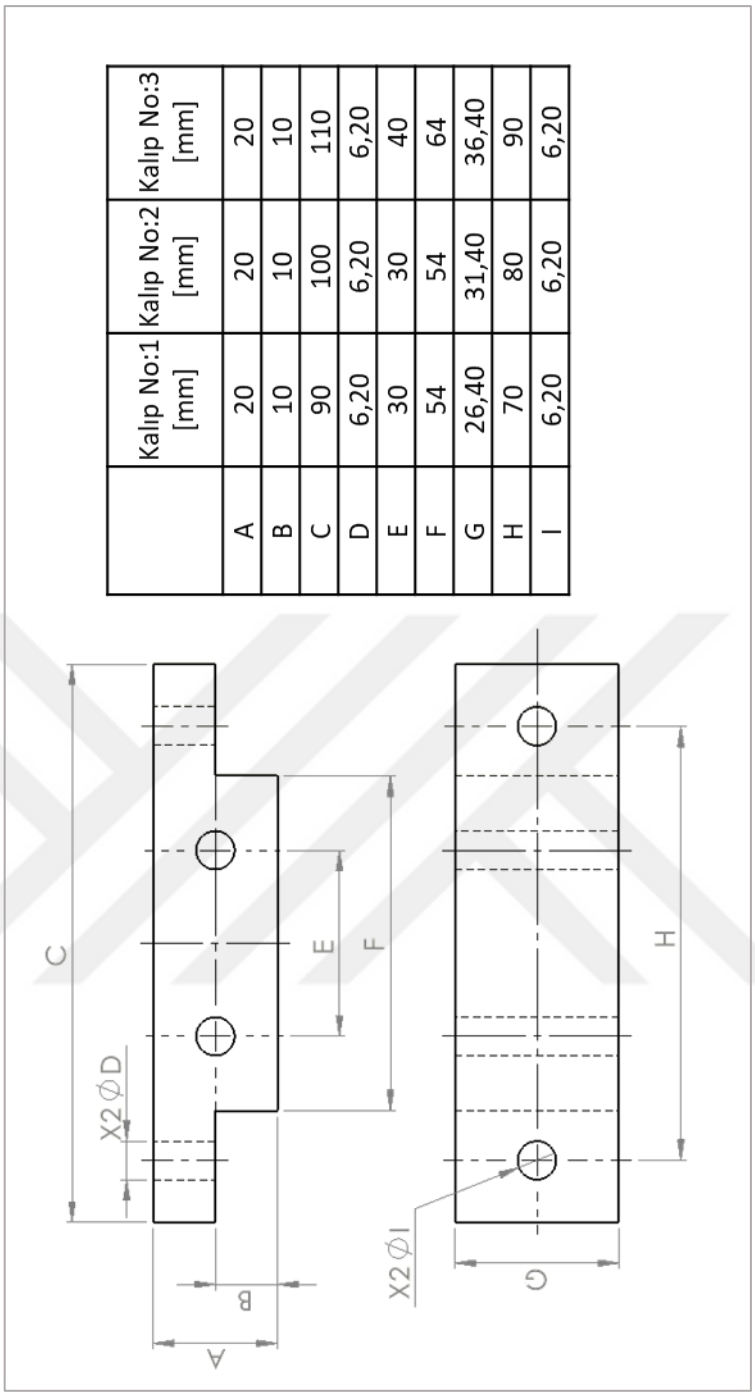
	Kalıp No:1 [mm]	Kalıp No:2 [mm]	Kalıp No:3 [mm]
A	70	80	90
B	10	10	10
C	35	40	45
D	30	30	40
E	70	80	90
F	90	100	110
G	18	23	23
H	6,20	6,20	6,20
T	3	3	3

Şekil A1. Sandviç kompozit numune kalıbının ön kapağının ölçüleri

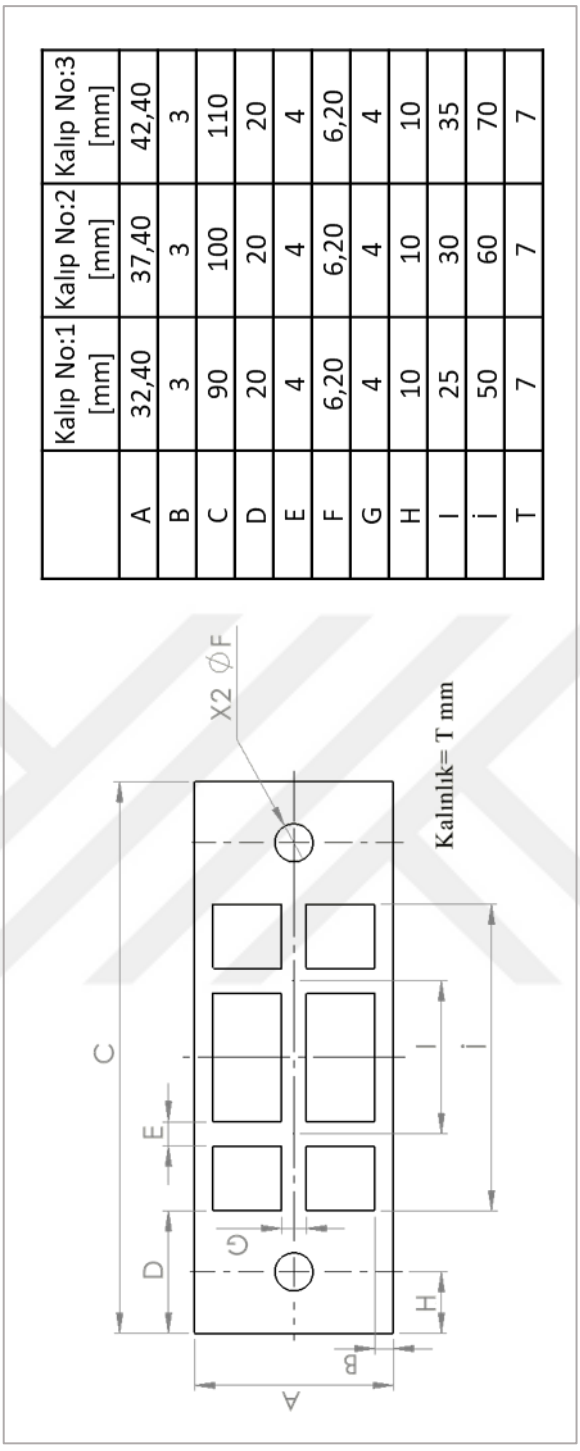
	Kalıp No:1 [mm]	Kalıp No:2 [mm]	Kalıp No:3 [mm]
A	50	60	70
B	26,40	31,40	36,40
C	6,20	6,20	6,20
D	6,20	6,20	6,20
E	7	7	7
F	27	37	47
G	4,50	4,50	4,50
H	15,89	15,89	15,89
I	20	20	20
İ	7	7	7
J	12,94	12,94	12,94



Şekil A2. Sandviç kompozit numune kalıbının yan parçasının ölçüleri

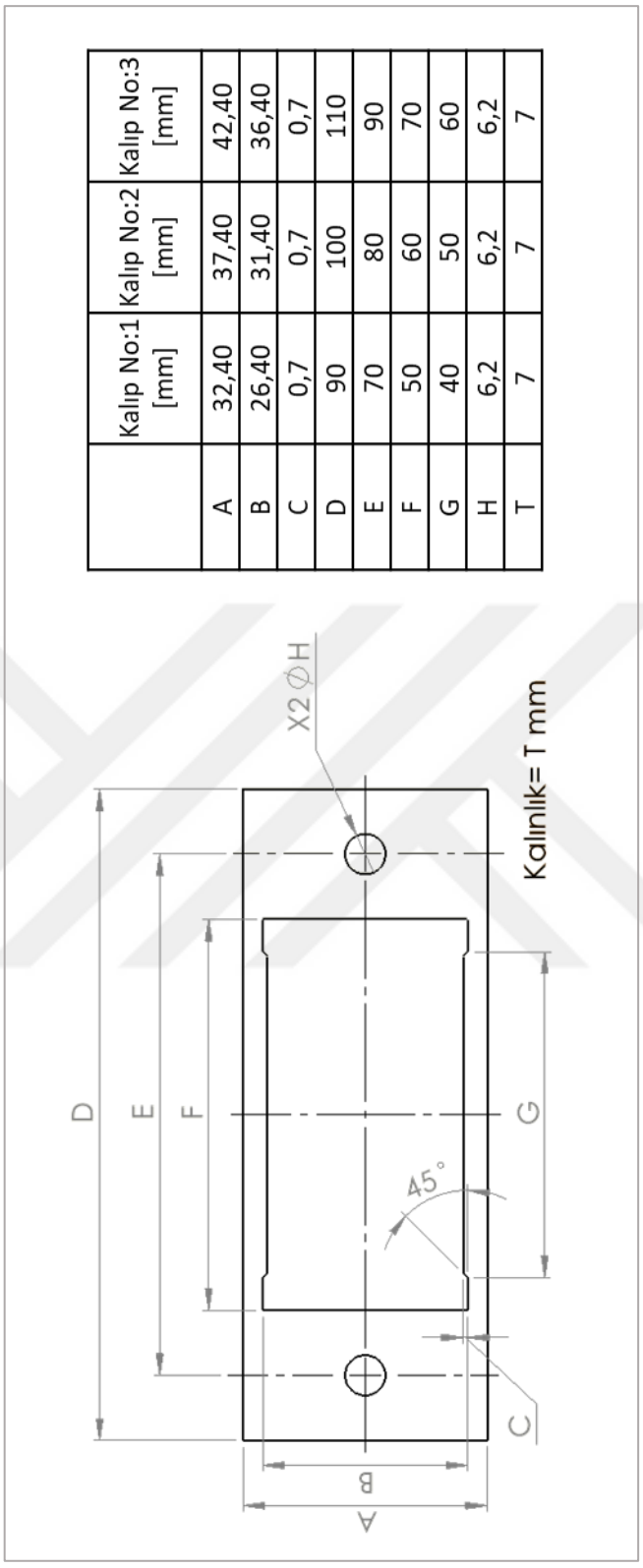


Şekil A3. Sandviç kompozit numune kalıbının alt parçasının ölçüleri



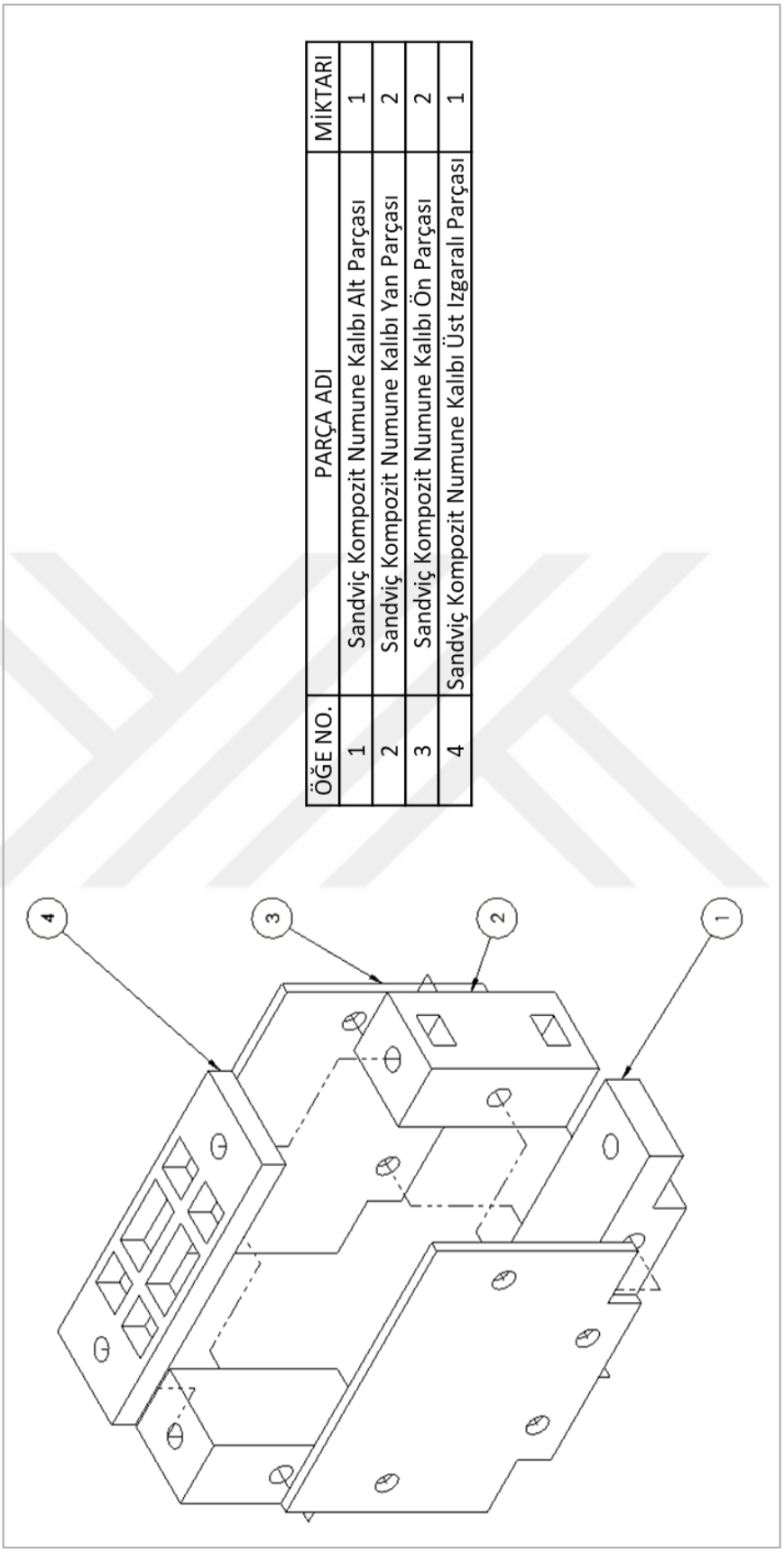
	Kalıp No:1 [mm]	Kalıp No:2 [mm]	Kalıp No:3 [mm]
A	32,40	37,40	42,40
B	3	3	3
C	90	100	110
D	20	20	20
E	4	4	4
F	6,20	6,20	6,20
G	4	4	4
H	10	10	10
I	25	30	35
İ	50	60	70
T	7	7	7

Şekil A4. Sandviç kompozit numune kalıbının üst ızgaralı parçasının ölçüleri

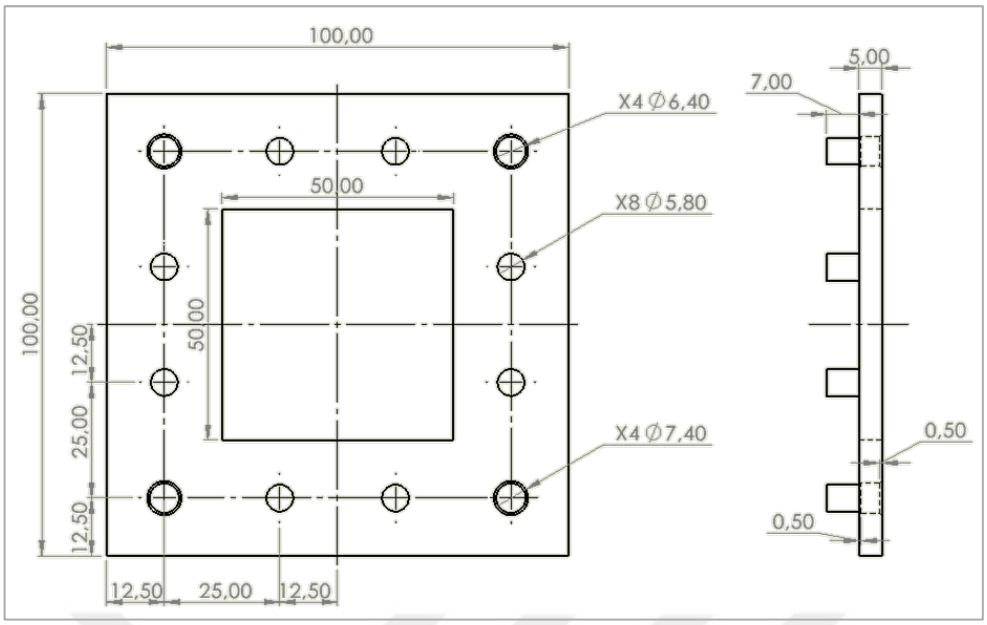


	Kalıp No:1 [mm]	Kalıp No:2 [mm]	Kalıp No:3 [mm]
A	32,40	37,40	42,40
B	26,40	31,40	36,40
C	0,7	0,7	0,7
D	90	100	110
E	70	80	90
F	50	60	70
G	40	50	60
H	6,2	6,2	6,2
T	7	7	7

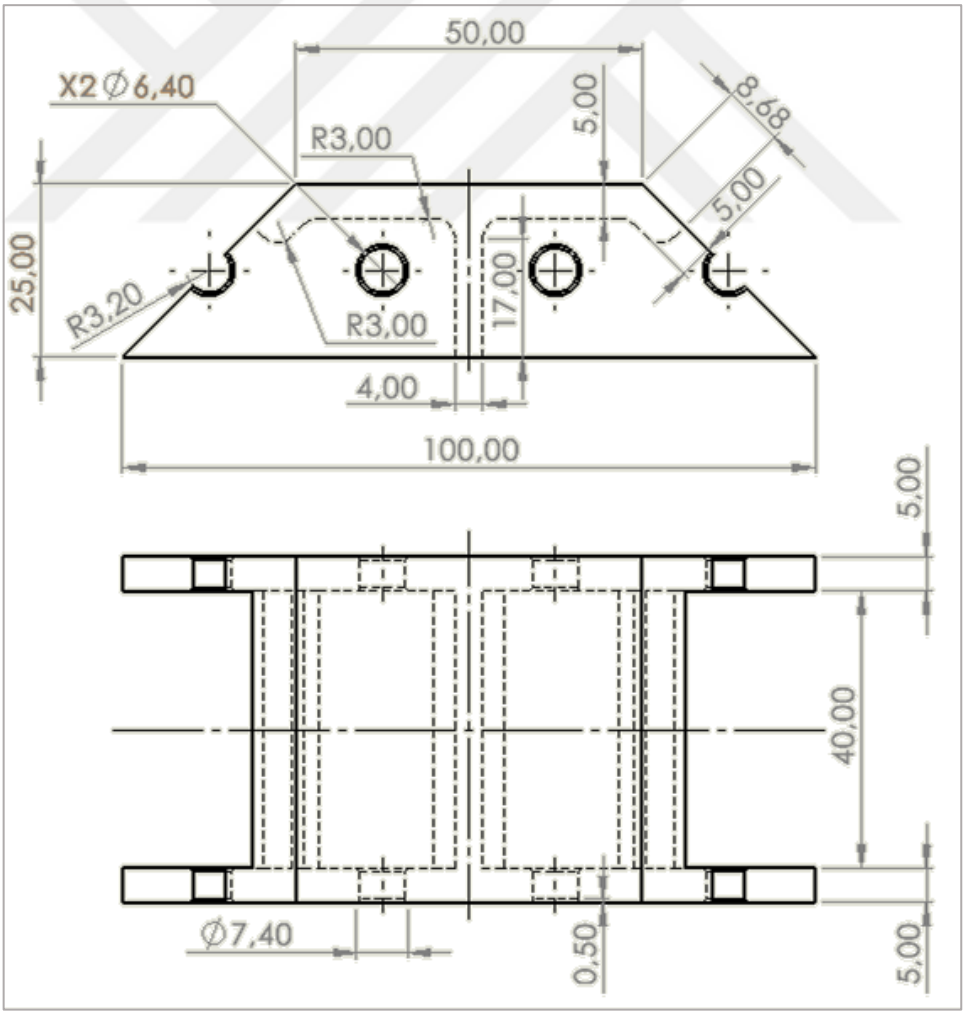
Şekil A5. Sandviç kompozit numune kalıbının üst ızgarasız parçasının ölçüleri



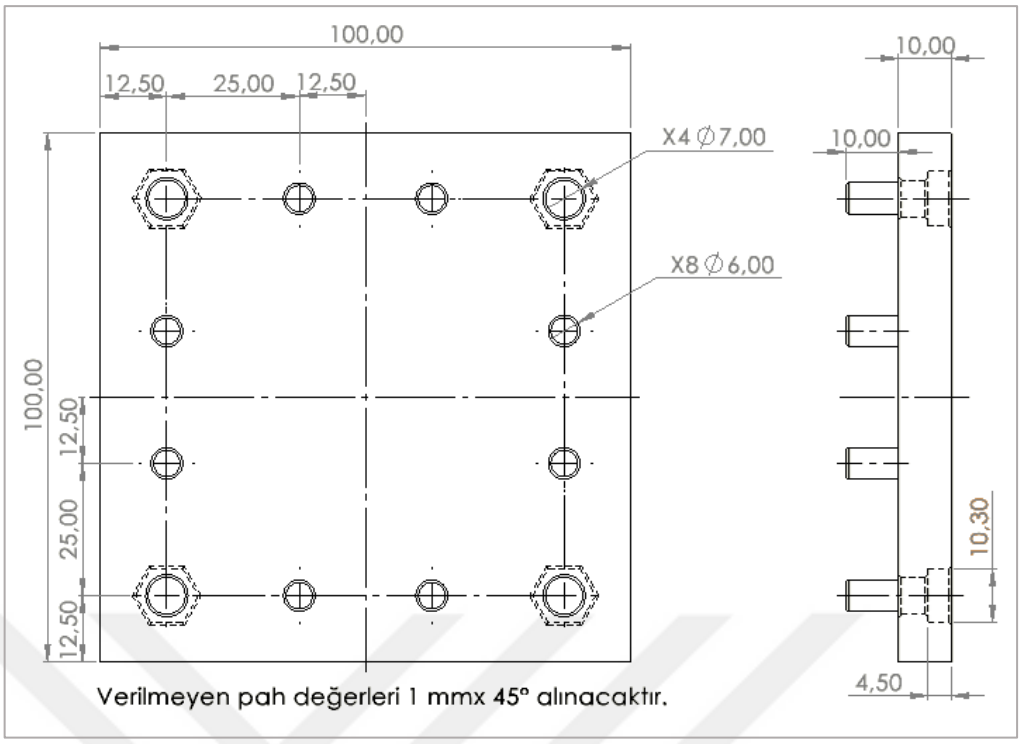
Şekil A5. Sandviç kompozit numune kalıbının montajı



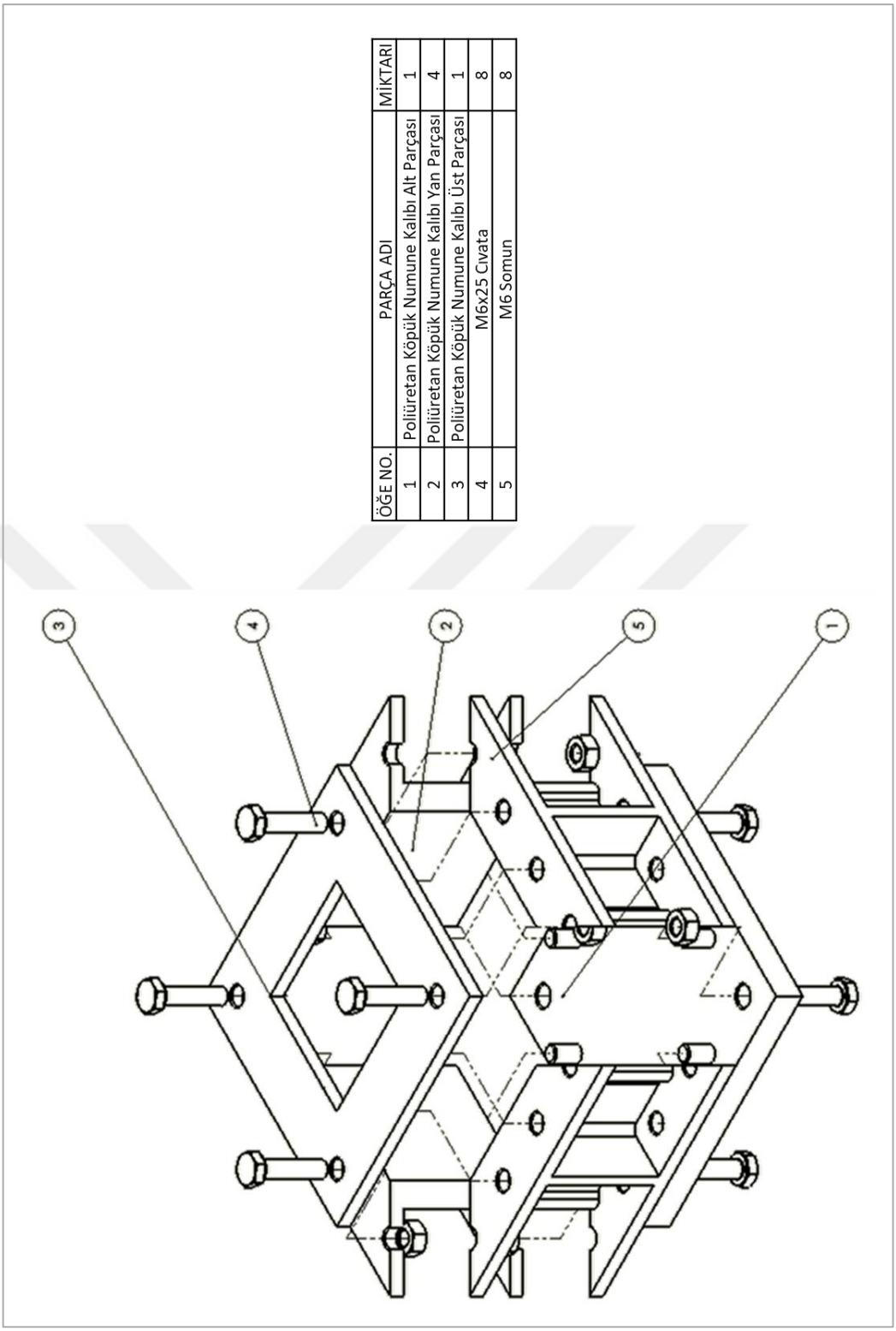
Şekil A6. Poliüretan köpük kalıbı üst parçasının ölçüleri



Şekil A7. Poliüretan köpük kalıbı yan parçasının ölçüleri



Şekil A7. Poliüretan köpük kalıbı alt parçasının ölçüleri



Şekil A8. Poliüretan köpük kalıbı montajı

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. F. Akpınar ve B. Aşçıoğlu Temiztaş, “Küresel Takviye Elemanı İçeren Kompozit Yapılarda Basma Davranışının İncelenmesi,” International Marmara Sciences Congress, Kocaeli, 2022.